岩石力学与工程研究著作丛书

岩土工程界面识别理论与方法

◎谭卓英 著

(TU-0569.0101)

ISBN 978-7-03-020150-8
9 787030 201508 >

科学出版社
电话：010-64019417
E-mail:gcjs@mail.sciencep.com

定 价：40.00 元

TU4/75

2008

岩石力学与工程研究著作丛书

岩土工程界面识别理论与方法

谭卓英 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍基于钻孔参数的风化花岗岩地层识别的技术、理论与方法。全书共分八章，分别为：岩土工程界面识别方法概述；DPM 系统的组成与工作原理；DPM 系统数据的采集及基本图形；界面识别的基本理论；穿孔参数在岩土界面处的变化；穿孔参数在风化花岗岩地层中的响应特征；风化花岗岩地层界面识别的能量原理；风化花岗岩地层界面识别的相似性原理。本书内容涵盖了当今国际岩土工程领域在钻孔地层识别技术、方法与理论方面的前沿进展，全书论述严谨、深入浅出，并有大量图表数据，易于阅读和理解。

本书可供高等院校和科研机构岩土工程等相关领域的大学高年级本科生、研究生、大学教师及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩土工程界面识别理论与方法 / 谭卓英著. —北京：科学出版社，2008
ISBN 978-7-03-020150-8

Ⅰ. 岩… Ⅱ. 谭… Ⅲ. ①岩土工程—界面—识别—理论 ②岩土工程—界面—识别—方法 Ⅳ. TU4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 009754 号

责任编辑：沈 建 / 责任校对：刘亚琦
责任印制：刘士平 / 封面设计：王 浩

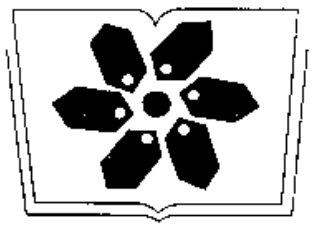
科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
中国科学院印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 2 月第 一 版 开本：B5 (720×1000)
2008 年 2 月第一次印刷 印张：13
印数：1—3 000 字数：233 000

定价：40.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换(科印))



中国科学院科学出版基金资助出版

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编: 孙　钧　王思敬　钱七虎　谢和平

主　　编: 冯夏庭

副 主 编: 何满潮　黄润秋　周创兵

秘 书 长: 黄理兴　刘宝莉

编　　委: (以姓氏汉语拼音字母顺序排列)

蔡美峰	曹　洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠　杨
康红普	李　宁	李　晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘汉东	刘汉龙	刘宝莉	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
佘诗刚	盛　谦	施　斌	谭卓英	唐春安
王　驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨　强	杨光华
岳中琦	张金良	赵　文	赵阳升	郑　宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施，国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开：在建、拟建水电工程达30多项，大多以地下洞室（群）为其主要水工建筑物，如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等，其中白鹤滩水电站的地下厂房高达90m、宽达35m、长400多m；锦屏二级水电站4条引水隧道，单洞长16.67km，最大埋深2525m，是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞；规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在400～900m，最大埋深1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸，许多矿山采深已达1200m以上。高应力的作用使得地下工程冲击岩压显现剧烈，岩爆危险性增加，巷（隧）道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程（如深海石油与矿产资源的开发等）也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO_2 地下隔离等已引起政府的高度重视，有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如，深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题，高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题，地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO_2 隔离层的安全性问题，深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律，等等，这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

近几年来，国家863计划、国家973计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点（重大）与人才项目等，对上述科学与工程技术难题的攻克陆续给予了有力资助，并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研，吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下，这些课题已经取得了很多很好的研究成果，并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统地总结，并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》，值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果，包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术，考虑复杂条件与过程（如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合）的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论，地质超前预报方法与技术，工

程地质灾害预测预报与防治措施，断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法，灾害环境下重大工程的安全性，岩石工程实时监测技术与应用，岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化，典型与特殊岩石工程（海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等）超规范的设计与实践实例，等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设，岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力，在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版，必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展，在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。

钱七虎

2007 年 12 月 8 日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来，随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建，岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展，科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法，973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果，为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀，由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划，先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会，组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写，来反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。出版时间计划为2007～2011年，分期分批出版。到2007年底，已有二十多本专著列入出版计划。

本丛书编委会编委由58位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查，科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中，得到了各专著作者与编委的积极响应；得到了各界领导的关怀与支持，中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序；中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作，在此一并表示感谢。

“21世纪岩土力学与工程研究中心在中国”，这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里，感到无限的幸福与骄傲，同时我们也感觉到肩上的责任与重大。我们组织编写这套丛书，希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果，希望对读者有所帮助，希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007年11月28日

序 一

由于地质环境的复杂性，地球物理方法在进行信号解译时存在不确定性和非唯一性，而常规岩土工程勘察方法需进行大量的土工和岩石力学实验，需要进行人工录孔，且对于完整性差的岩土体及软弱结构面，不易取样，很难获得未扰动下的物理力学参数。采用仪器钻进系统，可在钻进过程中实时采集钻进参数，数据连续且信息量大，这为工程质量管理、控制以及岩土工程设计与检验提供了非常丰富的资料。通过对钻进参数与岩石强度、硬度及可钻性等指标间的响应分析，可对岩石进行坚固性分级，从而获取岩土地层的分层特性。

然而，由于地层变化的多样性，监测数据之间的相关性并不高，在数据解译分析方面，传统的相关性分析方法难以尽显其能。如何将这些信息变为工程所用，合理解译钻进数据与地层特性之间的关系，成了制约仪器钻进系统发展与应用的技术瓶颈。目前，尽管仪器钻进系统技术还不是很成熟，但该技术的研究对于推动岩土工程勘察技术朝自动化、数字化方向发展的意义重大。因此，研究和发展基于钻进参数的地层识别理论与方法是今后研究的重要内容和发展趋势。

该书作者从钻进能量与相似性原理出发，建立了响应分析的变斜率识别方法、能量识别理论及相似性识别理论，成果具有理论创新意义，其技术、方法与理论在岩土工程及其相关领域具有广阔的应用前景。

全书从仪器钻进系统的组成、工作原理、数据采集、参数标定到分析方法与理论的建立，浑然一体，逻辑性、系统性及可读性强，技术、方法与理论先进。该书的出版对推动岩土工程等相关领域的研究及学科的发展具有重要意义，可作为广大岩土工程领域的研究人员、工程师和专家学者的参考。

岩土工程界面识别理论是一门新兴学科，我希望有更多的人投入到这一研究中来，并深信它能在岩土工程学科发展及我国工程建设中发挥重要作用。

王思敬
中国科学院地质与地球物理研究所研究员
中国工程院院士

2007 年 10 月 22 日

序　二

在岩土工程勘察中，常规钻探、土工及岩石力学试验不但费钱，而且费时。因此，研究仪器钻进系统，对钻进过程进行实时监测以取代土工和岩石力学试验的研究有很大的价值。利用钻进参数与地层特征之间的响应关系，从能量与相似性原理出发，建立岩土工程界面识别理论与方法，在岩土工程勘察、地质灾害探测、油气钻井、资源探测以及大陆科学钻探自动化等领域具有广泛的应用前景。

常规岩土工程勘察方法在进行钻孔的同时，须进行人工录孔以及大量的土工与岩石力学实验，且对于完整性差的岩土体及软弱结构面，不易取样，很难获得未扰动下的物理力学参数。近年来，尽管地球物理方法在勘探领域已取得长足的进步，但由于地质条件的复杂性，地球物理方法在进行信号解译时仍存在不确定性和非唯一性。

采用仪器钻进系统，可在钻进过程中实时采集钻进参数，数据连续且信息量大，通过对钻进参数与岩石强度、硬度及可钻性等指标间的响应分析，可对岩石进行坚固性分级，从而对岩土地层进行力学分层。然而，由于地层变化的多样性，监测数据之间的相关性并不高。如何将这些信息变为工程所用，合理解译钻进数据与地层特性之间的关系，成了制约仪器钻进系统发展与应用的技术瓶颈。

该书作者基于钻进参数在地层界面上的响应特征，从岩石强度、可钻性、钻孔能量及参数变化的相似性特征出发，建立了基于钻进参数可钻性指标、地层界面能量识别理论与相似性识别理论，其理论具有重大创新。

该书以仪器钻进系统及其在风化花岗岩地基中的应用为研究背景，介绍了仪器钻进系统的基本组成、工作原理、参数设置与标定，数据采集、分析方法，识别理论及其应用，全书文字表达流畅，深入浅出，逻辑性、系统性及可读性强。该书的出版对推动岩土工程等相关领域的研究及学科的发展具有重要意义，可作为广大岩土工程领域的研究人员、工程师和专家学者的参考。

蔡美峰
北京科技大学教授
国际岩石力学教育委员会主席
中国岩石力学与工程学会副理事长
2007 年 10 月 28 日

前　言

根据钻探、土工及岩石力学试验对岩土进行力学分层是岩土工程勘察中一项非常重要的工作。但这项工作耗资大、费时长。而且，所获岩芯样本及数据有限，特别是在碎裂等软弱结构面或断层中很难取样，要获得沿钻孔全断面的连续图像及所穿透地层的力学特性是很困难的。地球物理方法作为很有前途的勘察方法，已应用于地层层序学及地质勘探中地层层序界面的识别。但是，由于地球物理方法高昂的测试费用以及信息解译的不确定性与多解性而受到限制。因此，研究仪器钻进系统，对钻进过程进行实时监测以取代土工和岩石力学试验的研究一直以来是国际岩土工程领域的前沿课题。

钻孔过程监测系统(drilling process monitoring system，DPM)是一种自动记录数据的仪器钻进系统(instrumented drilling system)，又称随钻监测系统(monitoring while drilling，MWD)，最初用于油气田中测量钻孔偏斜、钻具力矩、施加在钻具上的重量以及简单的地层参数分析。

基于钻进参数对地层评价的研究源于海上及滨海地区难钻工程的需要，目的是通过仪器钻进系统，自动获取岩土的基本特征参数和地层沿孔深的连续剖面，从而克服传统岩土工程勘探方法中钻探、取样、土工及岩石力学试验工程量大、周期长、成本高等技术瓶颈。由于仪器钻进系统在场址特征、数值控制及质量管理等方面的重要性，自 20 世纪 80 年代以来，基于微处理器的钻机监测仪在钻机工作参数的感应、采集、存储和处理方面的应用已备受关注，由于它克服了地球物理方法在数据解译上存在的不确定性和非唯一性，仪器钻进系统被认为是在地层特征识别方面非常有潜力的一种方法。目前，基于微电子的监测系统可以记录扭矩、轴压、转速、穿孔速率、钻液流速/流量、压力及位移等各种钻孔参数。英国、法国、加拿大、美国、日本、中国及中国香港地区等对此进行了许多研究。该系统已从静态监测模式进入到了实时随机监测模式。这些系统包括 ENPASOL 系统、PAPERO 系统、Kajima 的车载地层测量系统、KYPC 及 HDK 等。由于仪器钻进技术在海上钻探中取得成功，激发了该项技术在岩土工程地层评价方面的研发。加拿大 Montreal 公司针对 Atlas Copco Roc 810H 旋转冲击式钻机在大理岩中的钻进研究表明，有效轴压和瞬时穿孔速率是非常重要的参数，与所穿透地层的岩性及岩体地质力学特性具有相关性。加拿大采矿自动化与模拟机器人中心(CCARM)基于特定钻机性能参数的响应对不同岩类进行自动识别，对钻进参数与 γ(gamma)、中子(neutron)及岩芯录孔结果进行相关性分析，并将传统的统计模式识别方法应用

于钻孔数据，以区别不同的岩石单元。

这些参数与钻孔深度的相关性分析已用来揭露所钻地层的强度和分层特性。穿孔参数与可钻性指标及岩石强度之间存在一定的关系。根据这一关系，可通过穿孔参数对地层进行识别。然而，由于传统方法所取得的岩芯样本及穿孔数据离散、随机、有限且代表性差，所以，基于传统方法以岩芯样本的可钻性实验所获数据进行的线性回归是局部的，很难反映钻孔剖面全过程的岩土特性（强度、硬度等）的变化。利用 DPM 系统，可实现对钻孔过程中钻进参数的自动采集，所监测数据具有实时、连续及样本海量的特点。

钻孔过程参数随时间的动态监测可为工程质量管理和控制以及岩土工程设计与检验提供丰富、有利的真实数据和资料。但研究表明，由于地层变化的复杂性及 DPM 系统采集数据海量且连续，参数间的相关程度并不高。为了克服现行技术、方法及理论上的局限性，针对海量实时数据，研究有效的分析方法，建立有关识别理论，实现对地层的准确识别是应用和发展 DPM 技术的关键。本书旨在结合 DPM 系统在香港风化花岗岩地基勘察中的应用情况，对穿孔参数与岩石强度及风化程度间的关系进行深入研究，确定其响应关系，建立界面识别的能量理论以及相似性识别理论，基于仪器钻进系统创立一套完整的地层识别技术、理论与方法。

全书共分八章。第 1 章对岩土工程中地层界面识别进行简单的概述；第 2 章主要介绍 DPM 系统的组成、工作原理以及各种传感器数据采集与标定方法；第 3 章主要介绍钻孔过程识别中参数的设置、类型以及参数曲线的变化特征；第 4 章至第 8 章相对独立，第 4 章对岩土的可钻性进行分析和定义，建立金刚石钻进中可钻性指标的计算公式，对可钻性指标在地层识别中的敏感性进行分析，建立基于金刚石可钻性指标的地层识别理论；第 5 章分析钻进参数随地层变化的基本规律，对钻进参数在界面处的变化及响应指标等进行分析计算；第 6 章对穿孔参数及岩石强度在界面上的变化及响应强度进行分析；第 7 章对金刚石钻进能量进行分析，确定有关能量的计算公式，分析地层中钻进能量的分布规律；第 8 章阐述相似性识别的基本原理，建立斜率搜索识别算法，形成相应的判别准则和方法，对穿孔参数之间的相似性进行识别和检验，最后基于钻进比功对地层进行判别分类。全书从钻进参数、钻进能量及钻进比功之间的相关性以及在界面处的响应特点出发，分析和解决界面识别中的有关理论问题。

岩土工程界面识别理论是一门全新的学科，有关技术、理论及方法还不是很成熟，加之著者水平有限，书中难免有不当和错误之处，恳请读者批评指正！

谭卓英

2007 年 10 月 16 日于北京

目　录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序
《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话
序一
序二
前言
第 1 章　岩土工程界面识别方法概述 …… 1
1.1　地层界面 …… 1
1.2　界面识别的一般方法 …… 1
1.2.1　静力触探试验 …… 1
1.2.2　圆锥动力触探 …… 2
1.2.3　标准贯入试验 …… 2
1.2.4　岩石可钻性试验 …… 3
1.2.5　地球物理探测试验 …… 3
1.3　存在问题与发展趋势 …… 3
1.4　研究内容、目的与意义 …… 5
1.4.1　研究内容 …… 5
1.4.2　目的与意义 …… 5
参考文献 …… 5
第 2 章　DPM 系统的组成与工作原理 …… 7
2.1　国内外钻孔过程监测系统(DPM)的研究现状 …… 7
2.2　DPM 系统的基本构成 …… 9
2.3　钻机组成与工作原理 …… 11
2.3.1　钻机类型、组成与工作原理 …… 11
2.3.2　钻机工作参数 …… 11
2.4　DPM 系统工作原理 …… 12
2.4.1　作用于钻机/具动荷载-压力监测 …… 12
2.4.2　钻具转速监测 …… 13
2.4.3　钻头位移监测 …… 13
2.4.4　流量的监测 …… 13

2.5 DPM 系统参数设置 …… 14
2.6 各种传感器的标定 …… 16
2.6.1 压力传感器的标定 …… 16
2.6.2 速转传感器的标定 …… 23
2.6.3 位移传感器 …… 24
参考文献 …… 25
第 3 章 DPM 系统数据的采集及基本图形 …… 27
3.1 钻孔过程的识别 …… 27
3.1.1 参数类型 …… 27
3.1.2 钻孔过程的划分 …… 27
3.1.3 钻孔过程参数门槛值的设置 …… 31
3.1.4 DPM 系统的过程识别 …… 35
3.2 监测过程曲线及其变化规律 …… 35
3.2.1 工程背景 …… 35
3.2.2 监测参量的实时变化曲线 …… 37
3.2.3 钻进全过程曲线 …… 39
3.2.4 钻进全过程曲线的特点 …… 48
参考文献 …… 49
第 4 章 界面识别的基本理论 …… 50
4.1 岩石的可钻性 …… 50
4.2 基本假设 …… 52
4.3 监测数据的预处理与噪声过滤 …… 52
4.3.1 监测数据的预处理 …… 52
4.3.2 监测数据的噪声过滤 …… 52
4.4 基于轴压-转速-穿孔速率耦合的可钻性指标 …… 54
4.5 可钻性指标对地层识别的敏感性 …… 56
4.6 基于可钻性指标的地层识别 …… 57
参考文献 …… 59
第 5 章 穿孔参数在岩土界面处的变化 …… 60
5.1 穿孔作业特征及 DPM 系统的安装 …… 61
5.1.1 穿孔作业特征 …… 61
5.1.2 DPM 系统的安装 …… 61
5.2 穿孔参数变化的基本规律 …… 61
5.2.1 轴压随孔深变化的全过程曲线 …… 61
5.2.2 钻具转速随孔深变化的全过程曲线 …… 63

5.2.3 冲洗压力随孔深变化的全过程曲线 …… 64
5.2.4 钻头位移随钻进时间变化的全过程曲线 …… 66
5.3 岩土工程界面及其穿孔参数 …… 68
5.3.1 界面值与岩性 …… 68
5.3.2 在界面处的穿孔参数 …… 70
5.4 界面处的响应指标 …… 74
5.4.1 穿孔参数在界面处的变化 …… 74
5.4.2 界面上的响应指标 …… 76
参考文献 …… 79
第 6 章 穿孔参数在风化花岗岩地层中的响应特征 …… 81
6.1 岩石分级与强度特征 …… 81
6.2 穿孔参数在界面处的变化 …… 84
6.2.1 有效轴压力在界面上的变化 …… 86
6.2.2 钻具转速在界面上的变化 …… 90
6.2.3 冲洗压力在界面上的变化 …… 93
6.2.4 穿孔速率在界面上的变化 …… 95
6.3 穿孔参数在界面上的响应强度 …… 99
6.3.1 普通风化花岗岩地层 …… 99
6.3.2 充填土简单风化花岗岩地层 …… 102
6.3.3 复杂风化花岗岩地层 …… 106
第 7 章 风化花岗岩地层界面识别的能量原理 …… 111
7.1 能量原理 …… 112
7.2 钻进过程能量分析 …… 113
7.3 钻进比功 …… 121
7.4 金刚石旋转钻进能量在风化花岗岩地层中的变化特征 …… 122
7.4.1 旋转钻进能量在普通风化花岗岩地层界面上的变化特征 …… 122
7.4.2 旋转钻进能量在充填土-风化花岗岩地层界面上的变化特征 …… 124
7.4.3 旋转钻进能量在复杂风化花岗岩地层界面上的变化特征 …… 127
7.5 金刚石旋转钻进比功在风化花岗岩界面上的变化特征 …… 130
7.5.1 旋转钻进比功在普通风化花岗岩地层界面上的变化特征 …… 130
7.5.2 旋转钻进比功在充填土-风化花岗岩地层界面上的变化特征 …… 131
7.5.3 旋转钻进比功在复杂风化花岗岩地层界面上的变化特征 …… 133
7.6 金刚石旋转钻进比功与花岗岩分级 …… 135
7.6.1 金刚石旋转钻进比功在不同花岗岩地层中的分布 …… 135
7.6.2 基于金刚石旋转钻进比功的花岗岩岩体分级 …… 139

参考文献 …… 140
第 8 章　风化花岗岩地层界面识别的相似性原理 …… 142
8.1　相似性识别的基本原理 …… 143
8.2　斜率搜索识别法原理 …… 144
8.2.1　样本提取 …… 144
8.2.2　预处理 …… 145
8.2.3　特征提取与特征库的建立 …… 145
8.2.4　特征匹配算法——斜率搜索识别 …… 146
8.2.5　相似识别的 t 检验 …… 150
8.3　判别分类 …… 151
8.3.1　聚类准则 …… 151
8.3.2　判别分类方法 …… 151
8.3.3　判别分类的有效性 …… 154
8.4　穿孔参数之间的相似性 …… 155
8.4.1　普通风化花岗岩地层中穿孔参数间的相似性 …… 155
8.4.2　充填土-风化花岗岩地层中穿孔参数间的相似性 …… 161
8.4.3　复杂风化花岗岩地层中穿孔参数间的相似性 …… 167
8.5　基于金刚石钻进比功曲线的地层判别分类 …… 173
8.5.1　聚类参数及类的门限值设置 …… 173
8.5.2　普通风化花岗岩地层的判别分类 …… 174
8.5.3　充填土-风化花岗岩地层的判别分类 …… 176
8.5.4　复杂风化花岗岩地层的判别分类 …… 178
参考文献 …… 182
作者已发表与本书有关的论文 …… 184
致谢 …… 185

第 1 章　岩土工程界面识别方法概述

1.1　地 层 界 面

地层界面是一种非连续面(discontinuous plane),地质学意义上的层序地层界面(stratigraphic interface) 由层序地层学方法确定,它主要反映沉积地层的形成与演变规律,几乎没有工程属性。在岩土工程中,地层界面也是地质界面,但它有着丰富的工程属性,包括各种物质分异面、结构面、岩溶空洞和滑移面。其中,物质分异面包括土层、风化层、岩性分界面及各种人工材料分异面。结构面(structural plane)是地质历史发展过程中,在岩体内形成的具有一定延展方向和长度,厚度相对较小的地质界面或带,包括物质分异面和不连续面,如层面、不整合面、节理面、断层、片理面等,又称非连续面(discontinutities)或节理(joint)。结构面对工程岩体的完整性、渗透性、物理力学性质及应力传递等都有显著影响,是造成岩体非均质、非连续、各向异性和非线弹性的原因之一。滑移面是地质过程中因人类工程活动或地质构造运动使地质体发生相对位移而形成的地质界面,因为滑移面更容易沿已有的弱面产生,所以,它可能是结构面、岩性分异面,也可能沿完全不同于已有的结构面和岩性分异面而形成新的地质界面。

1.2　界面识别的一般方法

1.2.1　静力触探试验

静力触探试验(cone penetration test,CPT)用于土层划分及土类判别,亦用于估算沙土相对密度、内摩擦角、黏土不排水强度、土的压缩模量、饱和黏土不排水模量、沙土初始切线弹性模量、初始切线剪切模量、地基承载力、单桩承载力、固结系数、渗透系数、黄土湿陷性系数及沙土和粉土的液化判别等。目前广泛应用的是电测静力触探,即将带有电测传感器的探头,以静力匀速贯入土中,根据电测传感器的信号,测定探头贯入土中所受阻力。分常规静力触探 CPT 和孔压静力触探 CPTU。CPT 分单桥和双桥探头,单桥触探测定比贯入阻力 p_s,双桥触探测定锥尖阻力 q_c 和侧壁摩擦阻力 f_s。CPTU 在 CPT 的基础上还可在贯入时能测量土中的孔隙水压力(u)。

静力触探传感器包括电阻率探头、测振探头、侧应力探头、旁压探头、波速探

头、振动探头、地温探头等。量测记录仪器主要为电阻应变仪、电位差计和数据采集系统。

静力触探的贯入机理包括贯入阻力理论、贯入时超孔隙水压力以及停止贯入时超孔隙水压力的消散理论。

在这些理论[1]中，贯入阻力理论包括 De Beer、Kerisel、I'Herminer、Berezantzev 及 Janbu 等为代表的承载力理论，Vesic 为代表的孔隙扩张理论，以及 Baligh 为代表的稳定流体理论。

贯入过程初始超孔压的分布理论包括孔隙扩张理论、初始超孔压的应力路径法、初始超孔压的应变路径法及水力压裂理论。

消散理论包括 Torstensson(1977)及 Baligh(1980)的固结系数法。

根据静探曲线(如 q_c-h、R_f-q_c)在深度上的连续变化可对土进行力学分层，并根据贯入阻力的大小、曲线形态特征、摩阻比的变化、孔压曲线对土进行判别和工程分层。

静力触探适用于黏性土、粉土、软土及沙土等，静力触探的深度取决于触探机的推力和土层类别，目前最大推力为 200 kN，在软土中的最大深度为 70 m，在中密砂层中为 30 m。

1.2.2 圆锥动力触探

圆锥动力触探(dynamic penetration test，DPT)利用一定的锤击动能，将一定规格的圆锥探头打入土中，然后根据贯入击数或动贯入阻力判别土层的变化，确定土的工程性质，对地基土做出岩土工程评价。适用于强风化、全风化的硬质岩石、各种软质岩石及各类土。动力触探的主要目的：①评价沙土的孔隙比或相对密实度及黏性土的状态；②估算土的强度和变形模量；③评价场地地基的均匀性及承载力；④探查土洞、滑动面及软硬土层界面等；⑤确定桩基持力层和承载力；⑥检验地基加固和改良的效果。

通过动探击数或动贯入阻力随贯入深度变化曲线，对软硬地层界面进行力学分层。分轻型(N_{10})、中型(N_{28})、重型($N_{63.5}$)及超重型(N_{120})动力探测。根据动贯入阻力 R_d 来估算地基土承载力及变形模量，确定桩的持力层等。

1.2.3 标准贯入试验

标准贯入试验(standard penetration test，SPT)采用标准质量(63.5 kg＝140 lb)和标准落距(0.76 m＝2.5 ft)将标准贯入器打入土中 0.15 cm，然后计算再打入 0.3 cm (1 ft)的标准贯入击数 N，绘制 N 随土层深度 H 变化的曲线来划分土层的类别和确定土层剖面。此外，N 可用来作为判断砂土的密实度或黏性土和粉

土的稠度、估算土的强度与变形指标，确定地基土的承载力，评定砂土、粉土的振动液化及估计单桩极限承载力及沉桩的可能性。

SPT 适用于砂土、粉土、黏性土、风化岩及冰碛土等。

1.2.4　岩石可钻性试验

岩石可钻性试验(rock drillability test，RDT)用以测试岩石破碎的难易程度。根据岩石可钻性的定义[2~4]，表征可钻性的指标可以是岩石的物理力学性质(如抗压强度、压入硬度、回弹硬度、点载荷强度、弹性模量及声波速率等)、穿孔速率、钻头进尺、凿碎比功(如普氏捣碎法及巴氏砸碎法)及微钻法的穿孔速率、钻深及钻时等指标。这些指标大体上可归纳为强度指标、位移指标及能量指标。强度指标如抗压强度、点载荷强度及弹性模量等；位移指标如穿孔速率、钻头进尺及磨损量等；能量指标如凿碎比功。此外，岩体工程分类方法，可概括地反映各类岩体的质量，从而揭示岩石地层的结构特征，预测有关岩体的力学问题。

1.2.5　地球物理探测试验

地球物理探测试验(geophysical prospecting test，GPT)方法包括电法、磁法、电磁法、地震波法、地震 CT、重力法、声波及超声波法。这些方法普遍应用于地层层序学及地质勘探中地层层序界面的识别，其原理基本上是相同或相近的，通常都是通过测定所穿透地层的相对介电常数、电磁波速、波阻抗、纵波速度或声速等物理参数来揭露地层特征，从而确定地质界面。例如，在层序地层学方法中，一般通过常规地震剖面和测井曲线的解译来确定地层层序界面。地震和测井都属于地球物理方法。前者通常是在地表进行的，为地表地球物理方法；后者则在钻孔内进行，属孔内地球物理探测。其中，地震剖面是基于地层界面处的波阻抗存在的差异性，而在岩性界面上产生反射的结果而成像的。测井方法一般包括声波时差法及电磁波电阻率法。声波时差法是基于声波在不同介质中具有不同的传播速度，介质的孔隙度和声波时差呈线性关系的基本规律。因此，在沉积地层中，声波时差对数与地层深度呈线性关系。利用这一关系，声波时差法可以确定地层层序的变化和识别地层层序界面。而采用地层倾角测井法，通过井内测量地层的倾角和倾斜方位角，可以识别断层与不整合等构造的变化。除地球物理方法以外，化学探测也可用于地质勘探中的界面识别。

1.3　存在问题与发展趋势

在地层层序学方法中，利用测井资料识别层序地层界面只是层序地层研究中

的一种辅助方法，需结合地震、岩芯及露头等资料进行综合分析。声波时差法在反映地层层序界面时，会因不整合的影响而引起异常，需排除异常才能进行准确的层序识别。地震剖面不能直接判别地层岩性，要确定岩性需通过基于地震波动方程的参数反演或基于皱积模型的波阻抗反演。而且，地球物理勘探方法受诸多因素干扰，一般只适合于沉积地层及表土层，对于硬岩地层的识别精度不高。目前，地球物理勘探方法主要用于找矿(含油气田)，在岩土工程勘探中的应用还处于探索阶段。主要原因有两个方面，一是干扰因素多，单一方法的解译精度不高，且存在不确定性、多解性，需要结合多种方法才能对地层进行判别，费用高昂。另一方面，难以提供岩土工程所需的全部基础数据。虽然能判断地层中自然水位，但无法定量判断含水量及孔隙水压力的大小，对岩土体的分级也还难以实现。因此，要获得岩土工程所需的基础数据，还必须依赖钻孔。

就技术而言，基于钻孔的触探试验和岩芯资料是岩土工程特别是深基础岩土工程勘察中最可靠的方法。然而，钻孔勘探中钻孔编录、取样及触探试验、室内物理力学参数测试等工作量巨大，耗时长，费用高。据统计，在地基钻孔勘探中，纯钻孔时间在整个钻孔勘探中的耗时比例不到30%，钻孔勘探费用一般占整个工程建设费用的15%～28%。所以，岩土工程中钻孔勘探仍然是一项非常繁巨的工作。

使用钻孔机或钻探机在大地中钻孔是工程勘察、基础工程、斜坡加固等建筑工程中一项最常见的、最重要的工程任务。然而，工程勘察钻探的钻孔记录一般是由地质和岩土工程师根据采集的岩芯和土样编录的，而且，施工钻孔的记录一般由钻机操作人员进行编录，干扰因素很多。

此外，在富含崩积土、粗砂土和风化岩石的斜坡及地基工程中，由于岩土中的坚硬岩块及粗砂会阻碍传统的现场连续测试仪器的贯入，甚至损坏仪器[5,6]，因此，直接利用岩土工程钻探过程中的数据来反映地层岩性的变化是相当重要的。

在国际岩土工程领域，针对地质勘探方法和岩土工程钻探方法的不足，一直以来在探索一种简单、有效的方法来获取有关地层的工程信息。两个重要的发展趋势是：①地球物理等无损探测技术发展迅速，声波探测、地震CT、探地雷达(ground penetration radar，GPR)、高密度电法及Stratagem电磁法等技术已开始应用于隧道衬砌、管线、桩基、大坝及建筑基础等浅地表工程的质量检测，以及浅部地下水、岩溶及地下构筑物及滑坡等滑移界面的识别。②基于钻孔勘察的岩土工程钻探方法将朝自动化数据采集与分析方向发展。ENPASOL[7]、PAPERO[8]、Kajima[9]、KYPC及HDK[10]等仪器钻进系统在钻孔过程中实现了对钻机运行参数的自动监控，并一直在寻求通过钻孔参数来获取有关钻进地层的岩土特性。

1.4　研究内容、目的与意义

1.4.1　研究内容

本书研究内容为：

1）钻孔过程监测系统(drilling process monitoring system，DPM)的基本组成与工作原理。

2）DPM系统数据的采集及图形的基本特征。

3）界面识别的基本理论。

4）穿孔参数在岩土工程界面处的变化特征。

5）穿孔参数在风化花岗岩地层中的响应特征。

6）风化花岗岩地层界面的能量识别原理。

7）风化花岗岩地层界面的相似性识别原理。

1.4.2　目的与意义

开展本研究的目的是利用钻孔数据采集系统，对钻机作业参数进行实时监测，寻求一种技术可能性，实现基于监测数据对地层特征的反演，达到通过钻孔参数来揭露所穿透地层特征的目的。同时，通过分析研究，建立岩土工程界面识别的有关分析方法，解决界面识别的有关理论问题，为仪器钻进系统的应用提供理论依据。

通过对钻孔过程监测系统的研究，可以实现对钻机运行压力、钻具轴压、钻头转速及位移等参数的实时监测，根据监测数据对地层特征的反演分析，直接获取所穿透地层的工程参数，从而避免繁琐的土工试验，节省工程费用，增强时效，提高钻孔过程的自动化水平，实现钻探过程中岩土地层的实时识别，有着十分重要的理论意义和应用前景，为大陆科学钻探及星球钻探自动化及数据解译奠定了基础。

参 考 文 献

[1] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，1994：12.

[2] White C G. 岩石可钻性指数[M]. 边蔚奇译. 北京：煤炭工业出版社，1980：4.

[3] 坦加耶夫 И A. 岩石的可钻性和可爆性[M]. 王维俊译. 北京：冶金工业出版社，1987：2.

[4] 徐小荷，余静. 岩石破碎学[M]. 北京：煤炭工业出版社，1984：11.

[5] Law K T. Trial vane tests on a soft marine clay [J]. Canadian Geotechnical Journal，1997，16 (1)：11.

[6] ASTM. Annual Book of ASTM Standards，Vol. 04. 08 (Soils and Rock)，Designation D-1586-84 [S]. New York：ASTM，1997.

[7] Hamelin J P，Hass G，Burgess N. Instrumented borehole drilling using ENPASOL system，

field measurements in geomechanics[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics-FMGM 99. Singapore, 1-3 December, 1999: 577.

[8] Fortunati F, Pellegrino G. The use of electronics in the management of site investigation and soil improvement works: principles and applications [C]// Geotechnical Site Characterization, Proceedings of the First International Conference on Site Characterization-ISC'98. Atlanta, Georgia, USA, 19-22 April 1998: 359.

[9] Suzuki Y, Sasao H, Nishi K, et al. Ground exploration system using seismic cone and rotary percussion drill [J]. J. Technol. Design, 1995(1): 180.

[10] 鄢泰宁. 钻探最优化技术在俄罗斯和中国的发展与现状[J]. 西部探矿工程, 1999, 11(2): 70.

第 2 章　DPM 系统的组成与工作原理

2.1　国内外钻孔过程监测系统(DPM)的研究现状

钻孔过程监测系统是一种在钻机上安装仪器来进行钻孔记录的自动化数据记录系统(logging while drilling,LWD),亦称随钻系统或仪器钻进系统(instrumented drilling system,IDS)。最初的目的是用于油气田中测量钻孔偏斜、钻具力矩、施加在钻具上的重量以及简单的地层参数分析。在英国、美国和日本等发达国家,LWD 已于 20 世纪 80 年代开始进入应用阶段。目前,随着传感技术的发展,LWD 系统从静态监测模式进入到了实时随机监测模式,已在软件及硬件方面取得长足的进步[1]。

由于在场址特征、数值控制及质量管理等方面的重要性,钻孔过程监测系统在岩土工程中的开发和应用几乎与钻井监测是同时代的。自 20 世纪 80 年代,基于微处理器的钻机监测仪在钻机工作参数的感应、采集、存储和处理方面的应用已备受关注,认为是在地层特征识别方面非常有潜力的一种方法[2~7]。在这些系统中,ENPASOL 系统在 1970 年进行了地层调查方面的试验应用[8],其后还有 Rodio 公司的 PAPERO 系统[9]及 Kajima 的车载地层测量系统[10]。

在 ENPASOL 系统中,记录钻进参数的传感器包括:①两个液控防逆传感器,其量程为 0～3.5 MPa;②两个力传感器,分别用于钻具力矩和轴推力,量程为 0～25 MPa;③运动传感器,用以测量孔深;④电磁传感器,测量钻具转速。每个传感器的测量误差为±3%。因为钻孔过程及钻进数据受钻孔工作参数和钻孔方法的影响,ENPASOL 系统要求在整个钻孔过程中,保持相对稳定的钻液流速、钻具转速及轴压力。该系统用于柴油驱动、液压伺服、履带式行走的 Hutte 200/2 TF 回转钻机上,进行地下勘探时,流速由 100 m 扬程的水泵供给,转速在 120 r/min 左右,轴压为 8 kN 左右[8]。

PAPERO 系统的监测参数几乎与 ENPASOL 系统相同,不同之处在于 PAPERO 系统增加了对钻具振动加速度的测量。据报道,Rodio 公司已开发相应的软件、硬件以及建立了土层地层的解译标准[9]。

与 ENPASOL 和 PAPERO 系统比较,Kajima 系统由两类测量设备组成,一是 MWD (monitoring while drilling)测井记录设备,它能通过高速旋转的冲击钻所测得的阻力,快速提供反映所穿透地层硬度的有关信息;其次,进行地震圆锥触探试验(seismic cone penetration test,SCPT)。监测参数不仅包括钻速、轴压、扭

矩、回转频率、钻井液压力与流量，而且还包括冲击能和冲击次数。MWD 测井记录设备由回转冲击钻及记录和分析钻孔数据的计算机分析系统组成。结果表明，该系统适合于低转速和低轴压的钻孔作业。其工作参数为：①钻速：0～5 m/min；②轴压：0～220 N；③扭矩：0～11 N·m；④转速：0～75 r/min；⑤冲击能：0～2.8 N·m/time；⑥冲击频率：0～2200 b/min；⑦水压：0～4 MPa；⑧流量：0～40 L/min[10]。

显然，基于微电子的监测系统可以记录扭矩、轴压、转速、穿透速率、钻液流速及压力等各种钻孔参数。这些参数与钻孔深度的相关性分析已用来揭露所钻地层的强度和分层特性[11～14]，源自岩石破碎的比功概念[15]已用于钻孔数据的解译[16～18]。

其在界面识别方面的应用包括：

1）确定次地表地层细粒土和粗质土的层位变化。

2）识别土层和基岩界面。

3）圈定矿体边界。

4）构造非连续界面(断层、裂隙)及岩溶的定位。

5）砾岩及隔阻层障碍物的描述。

6）土层加固工程的验证。如注浆、喷射混凝土层及复合土层等。

值得注意的是，为了将钻机的工作参数用于地层特征的综合评价，钻进工作必须尽可能接近理想状态。也就是说，钻机的工作参数在整个钻进过程中必须相对稳定，穿孔作业保持在一个较理想的状态。例如，钻屑必须及时地从孔底排除，应避免卡钻，合适和连续的钻液循环，钻具处于良好的运行状态等。

对于如此精密的系统，在实际应用中，其监测的准确性及可靠性取决于仪器。然而，在整个钻孔过程中，有一个技术瓶颈需要克服，那就是对各子过程的准确识别。根据以上的讨论，目前的监测工作是在钻孔过程的拟标准化假设下进行的。这也就是说，在此假设下将通过各子过程的标准化来识别钻孔数据。

在上述假设下，实际钻进过程中存在的一系列与穿孔作业相似或伪操作的子过程是不允许出现的。此外，在钻进过程中，要求提供相对稳定的钻液流量、冲洗压力、转速和轴压。事实上，钻进过程与操作人员的技术水平和熟练程度有关，所记录的原始数据将受操作人员的干扰。一种情况是，在钻进过程中，操作者经常会不断调整钻具以达到最佳的钻进效果。因此，在实际钻进过程中，理想状态是难以实现的。这使得这些技术的推广应用受到很大的限制。

为了克服现行技术存在的不足，香港大学研制了一种数字式钻孔过程监测仪，安装在气动冲击式钻机上，用于香港风化花岗岩土斜坡加固工程的土钉钻进[18～20]。试验及初步的分析表明，钻孔过程参数随时间的动态监测可为工程质量管理和控制以及岩土工程设计与检验提供丰富、有利的真实数据和资料[19]。但在

液压回转式钻机、地基勘探钻孔、岩土界面识别及岩土剖面、钻机工作参数及穿透速率与地层特征的解译等方面还须寻求新的理论与方法。

2.2　DPM 系统的基本构成

DPM 系统主要由三个部分组成：①感应系统(sensing system，SS)；②数据采集(data logging，DL)；③数据分析(data analysis，DA)。其布置如图 2.1 所示。

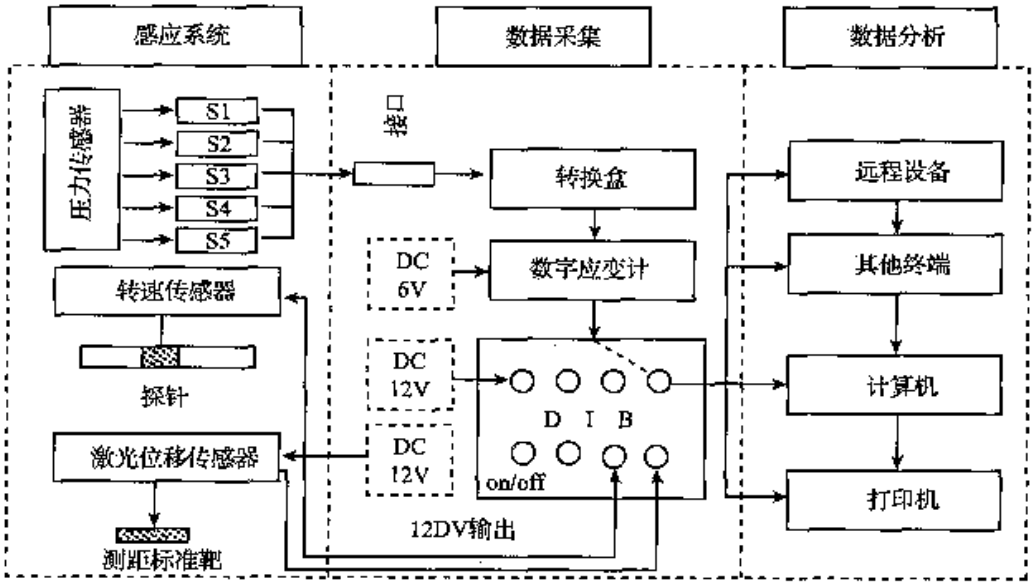


图 2.1　钻孔过程监测系统设计流程图

Figure 2.1　Design flow sketch of drilling process monitoring system

其中，感应系统(SS)安装在控制台或钻架上，用于监测钻孔的物理参数。这些传感器包括：

1) 位置传感器，用来监测钻头的位置。通常采用激光传感器进行位移的监测，在本系统中采用日本 MM30/30R 激光测距仪。

2) 旋转传感器，用来监测钻头及钻杆的转速。在本系统中采用德国 PEPPERL+FUCHS 电磁传感器测量转速，测量范围为 0～2500 r/min。

3) 压力传感器，用来监测钻机水平向前或后退运动、钻头及钻杆的前进或后退、冲洗水/液压力等产生动力荷载时的液体压力。这里采用英国 Gems 2200/2600 传感器系列，各压力传感器的测量范围为 10～250 bar。参见标定部分。

4) 流量传感器，主要用来测量钻进液的流量。对于一定的钻机而言，冲洗液的排出孔径一定，此时，可通过监测冲洗液的压力来表征冲洗量的大小。在本研究中，冲洗液为纯水溶液。此外，流量传感器的另一个重要用途是监测燃料、液压油及润滑油的消耗量与速率。

数据采集单元(DL)安装在地面工作台上，进行数据的传输与转化。这部分包括：

1) 转换盒，将压力传感器采集的模拟数据进行转换。这里采用日本 CSW-5A

型转换器，它通过 CR-655 接口电缆与数字式应变仪相连。

2）数字应变仪，将 CSW-5A 转换盒输入的压力模拟信号变换为数字信号，这里采用日本 TC-31K 数字应变仪，通过 RS-232C 接口电缆将数据输入到数据集成盒 DIB(date integrated box)。

3）数据集成盒，将数字应变仪输入的压力感应数据及位移和旋转感应器输入的数据进行集成，通过 CR-553B 接口电缆输入到终端设备。

数据分析单元(DA)可以安装在测试现场、工地或远处的办公室。这里终端可以是计算机、打印机、调制解调器(modem)、测距器(telemeter)以及外部显示终端。图 2.2 是数据分析单元的输出连接示意图。

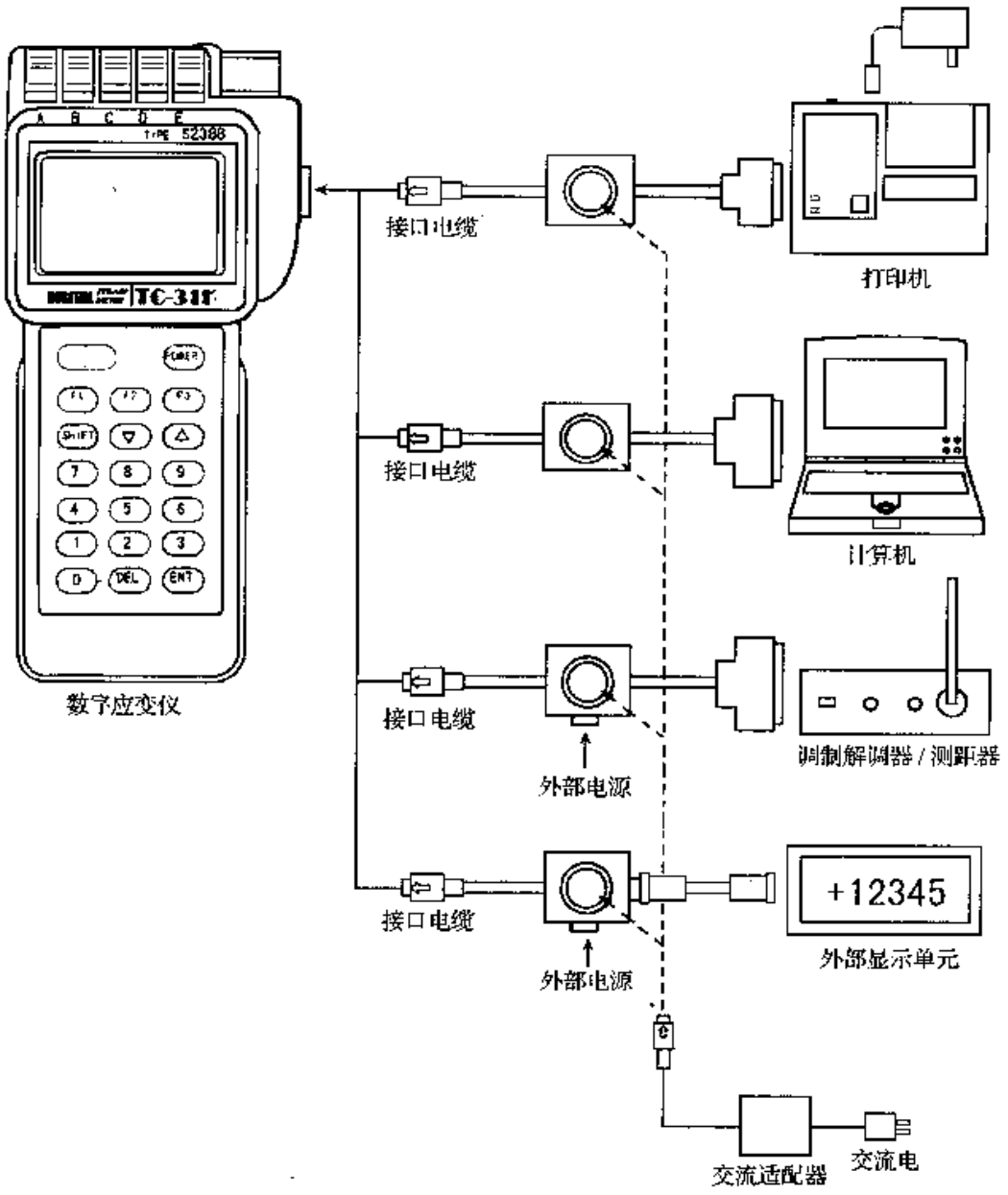


图 2.2 数据输出连接方式

Figure 2.2 Connecting method of data output under specified conditions

2.3　钻机组成与工作原理

2.3.1　钻机类型、组成与工作原理

试验采用 R-20 型柴油驱动的液压回转式钻机。钻机由机座、水平运动机构、钻具回转机构、加压/调压机构、液压控制系统及钻具等组成。其中，水平运动机构主要由机座上的导轨及两个水平油缸组成。水平油缸可使钻机整体沿导轨产生向前或向后的水平运动，用以调整钻孔的位置。钻具回转机构由液压马达、减速箱、输出轴、联轴器、旋转头及钻具组成。液压马达经减速箱，最后通过旋转头将转动传给钻具和钻头，使钻具和钻头产生旋转动作。加压/调压机构由安装在钻机前端的两个垂直油缸及连接板组成，油缸缸体一端固定在机架上，活塞杆通过连接板与钻具固连在一起，因此，活塞运动时，钻具将随活塞杆一起往复运动，从而给钻具施加压力或提升力。液压控制系统则通过操纵开关控制钻机所需要的各种动力及冲洗水压力和流量。

钻头为牙轮钻头或取样钻头，钻孔原理是在一定的有效轴压作用下，将钻头压入岩石一定深度，由旋转头带动钻具旋转来破碎岩石。当钻机采用独立的调压系统时，有效轴压 P_c 是指轴压 P_a、调压力 P_t 及钻具自重 W 共同作用下的合理轴推力，由下式确定：

$$P_c = P_a + W - P_t \tag{2.1}$$

在钻机前端安装有两个并行的垂直油缸，其中，一个为钻具轴压的加压油缸，另一个为钻具的调压油缸。在钻进过程中，当钻具的自重低于钻孔所需的合理轴压力时，将采用加压钻进，即通过加压油缸来增大轴压，加压油缸的压力方向总是向下。因此，P_a 的作用方向始终向下，是正压力。随着钻孔深度的增大，钻具重量增加，钻具本身的重量将超出合理轴压力。此时，需要减压钻进，即由调压油缸提供反向的提升力来平衡一部分钻具重量来达到合理的轴压力。由于调压力总是向上，所以 P_t 为负。

钻具所需的转速与轴压之间存在一定的关系，遵循高轴压-低转速或低轴压-高转速的工作方式。其大小与钻头直径、岩石强度或硬度、轴压及干式与湿式钻进有关。钻头的转速由液压马达经减速箱来控制的。

2.3.2　钻机工作参数

1）推进压力，由加压油缸施加给钻具，提供轴压力。根据钻进过程的实际压力范围，采用 10 MPa 的压力传感器对轴压进行监测，参数输出为 mV。经标定后转换为压力值。压力传感器系列号 P083112。

2）调压力，与轴压力方向相反，随着孔深的增大，钻具重量增加，所要求的调

压力逐渐增大，其范围相对比轴压力大。这里，采用 25 MPa 的压力传感器，系列号为 P052281。

3）冲洗液压力，冲洗液的作用是从孔底清除岩渣，减少重复破碎，提高钻进效率；同时，冷却和润滑钻头及钻杆，减少磨损；提高钻孔的稳定性。由于冲洗液压力不大，一般为小于 0.4 MPa 左右，故采用 1.0 MPa 的压力传感器进行监测。压力传感器系列号为 P063883 及 2493858 系列。

4）前进压力，是钻机用以对钻孔开始时的定位及钻进中的调整，压力的大小由克服钻机沿水平导轨运动所产生的摩擦力以及钻进过程中调整钻杆与纠偏的水平力决定，根据工程应用实际，采用 10 MPa 的压力传感器进行监测。压力传感器系列号为 P051961。

5）后退压力，与前进压力相反，压力传感器系列号为 P083107。

6）旋转速度，钻具的旋转由减速箱的输出轴传递，对于 R-20 钻机，钻具的最大转速一般为 600 r·min^{-1}，为了满足各种钻机的需要，转速传感器的测量范围为 0～2500 r·min^{-1}。转速传感器为脉冲传感器，其输出即为转速，无需转换。型号为 NBB10-30GM50-E0V1。

7）钻进位移，钻进位移是钻头穿透位移的累计，由安装在钻机前端的垂直推进油缸来实现。每个循环的最大推进长度为 650 mm，当发生向下推进运动时，位移逐渐增大；当发生向上提升钻具的运动时，位移逐渐减少。采用激光测距仪对位移进行监测，型号为 MM30/30R。

2.4 DPM 系统工作原理

2.4.1 作用于钻机/具动荷载-压力监测

对于液压旋转式钻机，动荷载包括：①钻机沿水平导轨前进或后退运动的压力；②钻具沿钻架钻进或退出运动的压力，即轴压力和调压力；③冲洗液压力。作用于钻机及钻具的动荷载与钻孔方式有关。在斜坡土钉钻进中，一般采用气动驱动和气动排渣。但流体介质的改变，一般只会改变压力的幅值及动力效率，而监测原理是完全相同的。不同之处是液压驱动的压力通常比气动时高出数倍到数十倍。因此，不同的动力驱动方式，选择的压力传感器的量测范围会不同。图 2.3 是压力传感器的安装示意图。

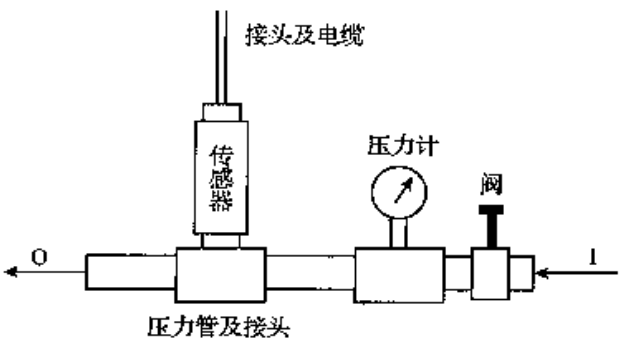


图 2.3 压力传感器的安装

Figure 2.3 Installation of pressure sensor

2.4.2　钻具转速监测

钻具的转动是通过安装在钻架上的马达来驱动的，马达输出的转速一般要经过多级减速才能达到钻头钻进要求的转速。根据不同的钻机类型及钻进方式，马达分液压、气动和电动三种主要类型。这里，钻具是指钻杆、连接套、冲击器及钻头的总称。因此，钻头和钻具具有相同的转速。钻具的转速与钻进对象的材料特性及所施加的轴压有关。对于金刚石旋转钻进及牙轮钻进而言，一般存在两种工作方式，即高轴压-低转速钻进和低轴压-高转速钻进。其代表是牙轮钻进。对于冲击式钻进而言，转速一般比较低，钻头位置的变换是依靠回转机构来实现的，其转动也是非连续的，转速以保证钻头在更换冲击位置时，能顺利将岩石破碎即可。其代表如各种冲击式岩石钻机。冲击-回转式钻进是在一定的轴压和钻具连续回转的情况下，冲击器活塞以一定的频率冲击钻头，以冲击能破碎岩石。其代表为各种潜孔冲击式钻机。在岩土工程勘探钻孔中，一般采用气压冲击回转式钻机和液压回转式钻机[21]。

图 2.4 是旋转传感器在钻具上的安装示意图。

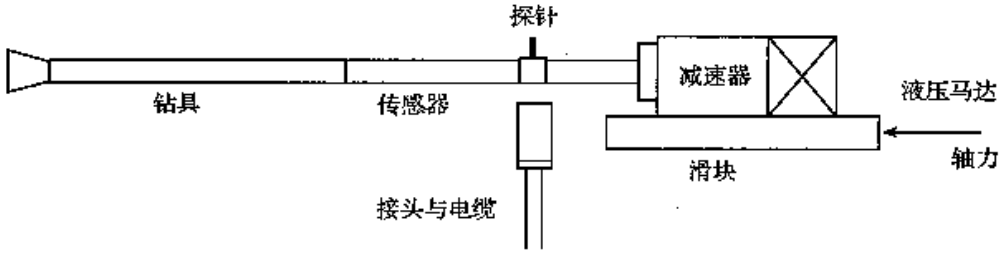


图 2.4　旋转传感器的典型安装

Figure 2.4　A typical installation of a RPM transducer

2.4.3　钻头位移监测

钻头在轴压和旋转产生的力矩作用下，破碎岩石，并以一定的速率穿透地层，从而产生位移。由于钻机的推进长度是一定的，在钻进过程中，每次钻进的深度受钻机推进长度的限制。当钻孔的计划深度大于钻具的一次推进长度时，则需要增加钻杆长度，多次循环推进。此时，钻头的实际进尺是多次循环推进后的位移的总和。图 2.5 是钻头位移监测的安装示意图。从图中可知，可用减速箱前端面到标准测把间的距离变化来反映钻头位置的改变。

2.4.4　流量的监测

流量的监测是通过流量传感器来实现的，其安装与压力传感器相同。监测内容可根据需要确定，可以是钻井液或燃料油、润滑油和液压油的消耗。这里仅对钻进冲洗液的压力进行监测，并通过压力确定流量。

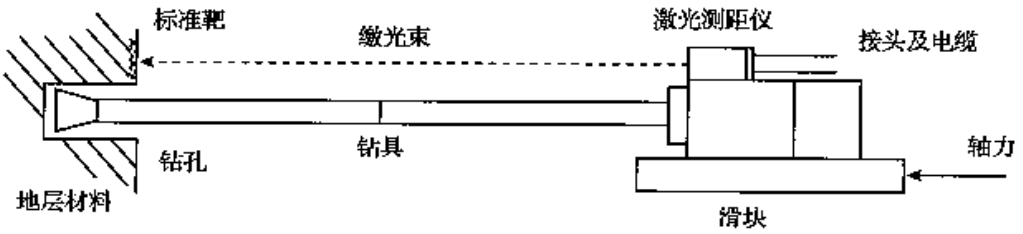


图 2.5 钻头相对位移的监测

Figure 2.5 The monitoring of the relative displacement for the drilling bit

DPM 系统的基本原理是:采用传感器技术,将钻机钻进过程中的工作参数进行采集,以电压或电子脉冲信号的形式,根据选定的采样频率直接输出到数据采集系统,经数据转化和数字集成后输入给计算机分析系统及其他终端,进行数据的存储、显示、分析、打印及网络传输。其中,钻机工作时各种动荷载的输入依靠液压控制系统提供,压力的监测由压电传感器来实现,原始感应信号为电压或电流;钻具转动速率的监测由电磁传感器实现,原始感应信号为电磁脉冲信号,通过脉冲次数记录转数;钻头位置的变化通过光电传感器即激光测距仪来实现,其原始输出数据为距离。

2.5 DPM 系统参数设置

(1) TC-31K 的参数设置

TC-31K 是一种应变计,主要功能是对 DPM 系统的数据进行转化。参数设置主要包括应变计的运行参数、压力传感器以及显示格式的设置。运行参数的设置包括分析、存储卡、计时器、打印、RS232C 接口及系统等功能模式。

分析模式的功能是给出监测数据时间系列的 Y-T 曲线,这些数据存储在所选通道中,一个通道为一个数据存储模块,共 19 个通道。当 TC-31K 设置为<正常>模式时,即可绘制单个时间系列曲线。当与 CSW-5A 连接时,为多通道模式,可同时绘制 19 条时间系列曲线。可根据监测项目数确定。曲线参数设置包括 0 的位置、Y 的分割数、T 的分割数以及数据范围。

存储卡用来将监测数据保存于 TC-31K 中,数据可以转化到 PC 机或读卡机。存储卡的工作模式为等待-0、数据写-1、数据读-2、数据删除-3 以及格式化存储卡。

TC-31K 内置了一个间隔计时器,分 5 步编程,监测工作可以自动按照预先设定的时间间隔开始,进行间隔测量的状态称为计时器模式。每一步包括时间间隔及重复或循环数,间隔测量是从第 1 到第 5 顺序进行的。如下面所示,时间间隔为 1 s,循环数为 1:

S1 00 : 00 : 01 N01

S2 00 : 00 : 01 N01

S3 00 : 00 : 01 N01

S4 00 : 00 : 01 N01

S5 00 : 00 : 01 N01

存储在 TC-31K 存储器中的数据可通过选择<打印>功能进行硬输出。

RS232 电缆接口的参数设置为：

Baud rate:9600

Data length:8 bit

Party:none

Stop bit:1 bit

X-parameter:no

系统参数设置为：

Memory cascade:no

Ring buffer:no

Burn out check:no

Internal RJC:yes

Auto power offer:no

Data output:Auto

CSV output:no

Multi monitor:yes

Comet:no

(2) CSW-5A 的参数设置

CSW-5A 设有 5 个通道。它由 24 V 外部直流电源供电，压力传感器的模式数设置为 32，各传感器的参数设置如下：

00　S=32 : V　24V

01　S=32 : V　24V

02　S=32 : V　24V

03　S=32 : V　24V

04　S=32 : V　24V

(3) 显示形式设置

测量模式设置为直接模式，各压力传感器的输出为电压，单位为 mV。参数如下：

[D]　00　mV

[D]　01　mV

[D]　02　mV

[D]　03　mV

[D]　04　mV

显示形式的设置包括系数、小数点及物理单位。

各压力传感器的系数设置为 1。如下所示：

00 C=+1.000
01 C=+1.000
02 C=+1.000
03 C=+1.000
04 C=+1.000

小数点设置为 1 位，各压力传感器如下：

00 P1 □□□□□.□
01 P1 □□□□□.□
02 P1 □□□□□.□
03 P1 □□□□□.□
04 P1 □□□□□.□

物理单位设置为电压，单位为 mV。各压力传感器如下：

00 U17 mV
01 U17 mV
02 U17 mV
03 U17 mV
04 U17 mV

(4) 激光测距仪的参数设置。与 TC-31K 比，激光测距仪 LMD(laser monitor of distance)的设置相对简单。这里，测距的物理单位设置为 mm，而通过 RS-232C 基带信号的数据通信设置如下：

Asynchronous working
Baud rate:1200bps (/9600bps)
Start bit:1 bit
Data length:8 bit
Parity:none
Stop bit:1 bit

2.6 各种传感器的标定

2.6.1 压力传感器的标定

压力传感器用于监测钻进系统中各种流体的压力，这些流体包括高压液压油、压缩空气及钻进液(如压力水、压缩空气及其他特别用途的钻进液)。由于传感器

的敏感度与所测流体介质有关，其输出参数为电压或电流，并不具有直接的可读性。所以，在投入正式监测工作前，需对传感器输入-输出参数进行标定，确定实际工作压力与电压及电流之间的耦合关系。

压力传感器标定分实验室标定与现场标定，原理相同，参见图 2.6。基本步骤如下：①检查标定系统的管路有无泄漏，清除故障，对压力仪表进行校正；②将压力传感器与压力表出口连接，压力传感器的连接头与 DIB(date integrated box)相连，然后通过数据接口电缆与计算机连接；③设置压力步长，分步调节压力阀，记录压力表读数及相应的传感器输出参数；④将压力表读数与传感器输出参数作图，并通过关联分析，得出二者之间的耦合方程。根据该方程将电参数转化为压力值。

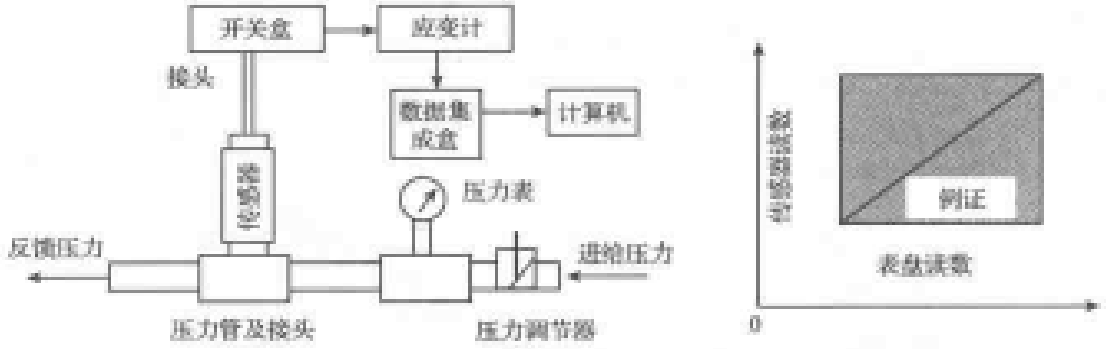


图 2.6　压力传感器的标定

Figure 2.6　Calibration of pressure sensor

1. 流体介质为压缩空气时的压力传感器标定

当流体介质为压缩空气时，各压力传感器感应参数与压力表读数之间的关系分别如图 2.7～图 2.14 所示。各传感器参数及标定方程如表 2.1 所示。

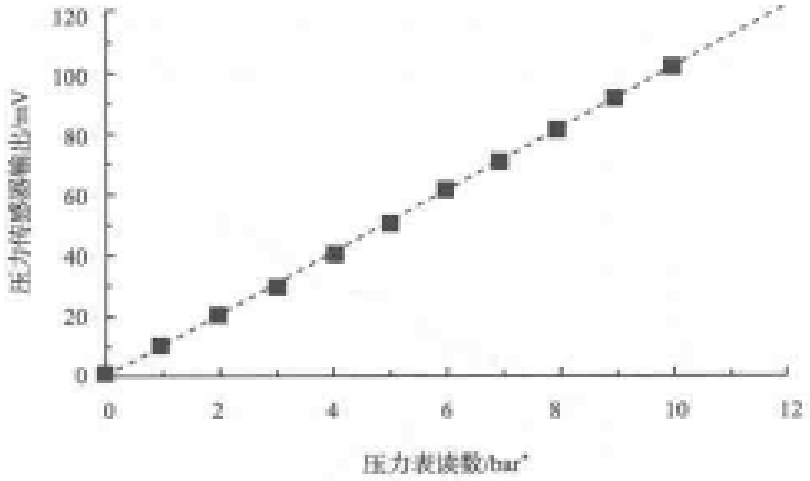


图 2.7　压力传感器(P063883)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.7　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

* 1 bar=10^5Pa

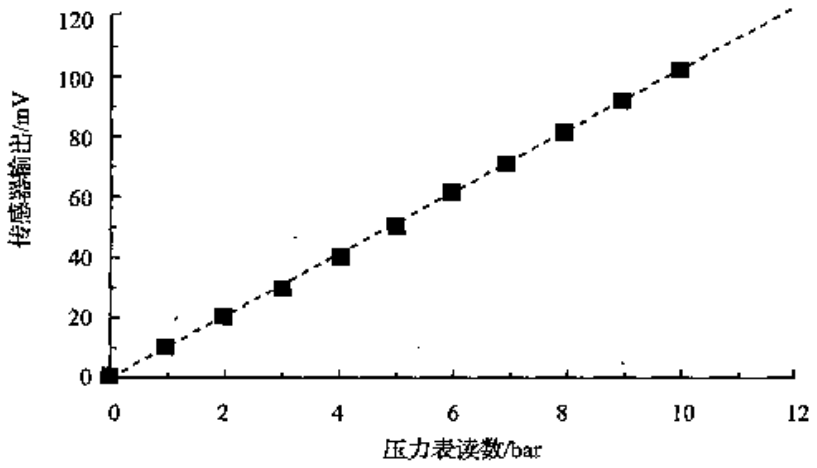


图 2.8 压力传感器(P063859)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.8 Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

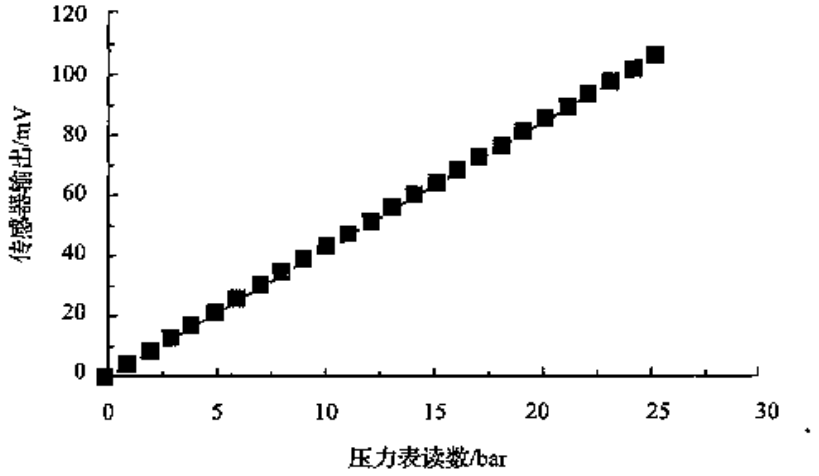


图 2.9 压力传感器(P015212)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.9 Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

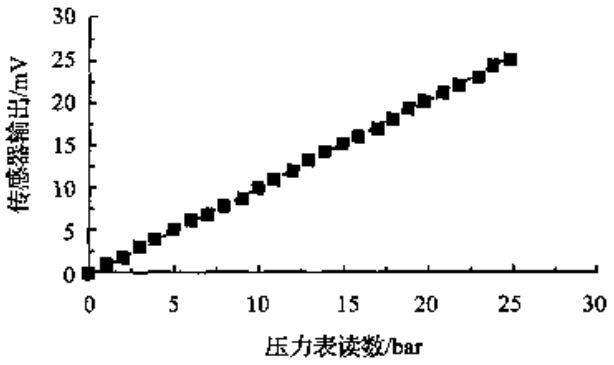


图 2.10 压力传感器(P083106)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.10 Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

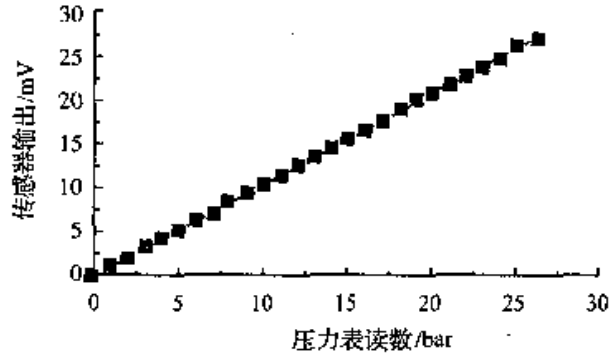


图 2.11　压力传感器(P083112)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.11　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

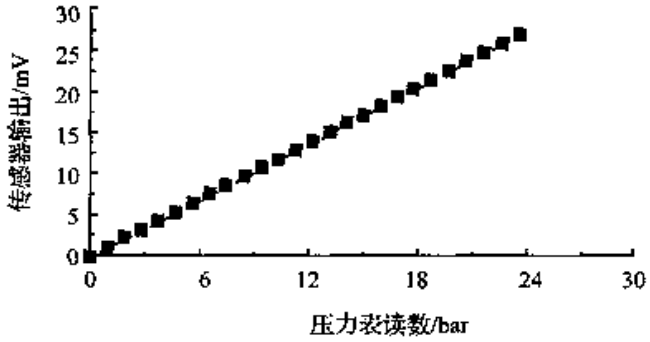


图 2.12　压力传感器(P083107)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.12　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

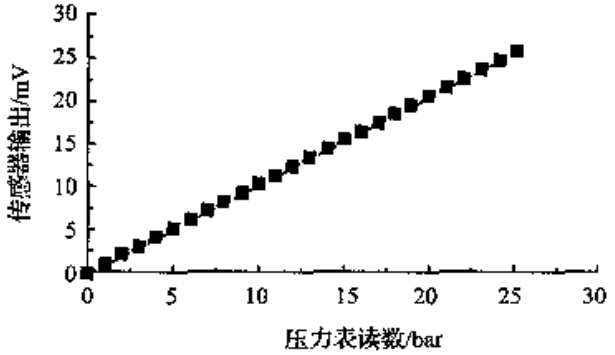


图 2.13　压力传感器(P051951)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.13　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

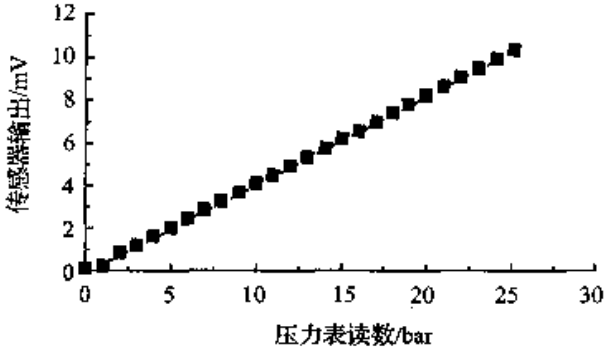


图 2.14　压力传感器(P052281)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.14　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

从表 2.1 可知，各压力传感器输出参数与标准压力表读数之间具有非常好的线性耦合关系，方差的平方 $R^2 \in [0.9994, 0.9999]$，拟合度高。

表 2.1 当流体介质为压缩空气时各传感器的标定方程

Table 2.1 Equation of calibration of pressure sensors for compressed air

传感器型号	测量范围/bar	耦合方程	R^2
P063883	10	$y=9.8655x-0.3636$	0.9999
P063859	10	$y=10.075x-0.4273$	0.9999
P015212	25	$y=4.0924x+0.0291$	0.9999
P083106	100	$y=1.0029x-0.1556$	0.9999
P083112	100	$y=1.0022x-0.1043$	0.9999
P083107	100	$y=1.0067x-0.2111$	0.9999
P051951	100	$y=1.0003x-0.3769$	0.9998
P052281	250	$y=0.4006x-0.3111$	0.9994

2. 流体介质为液压油时传感器的标定

当流体介质为液压油时，各压力传感器感应参数与压力表读数之间的关系分别如图 2.15～图 2.19 所示。各传感器参数及标定方程如表 2.2 所示。

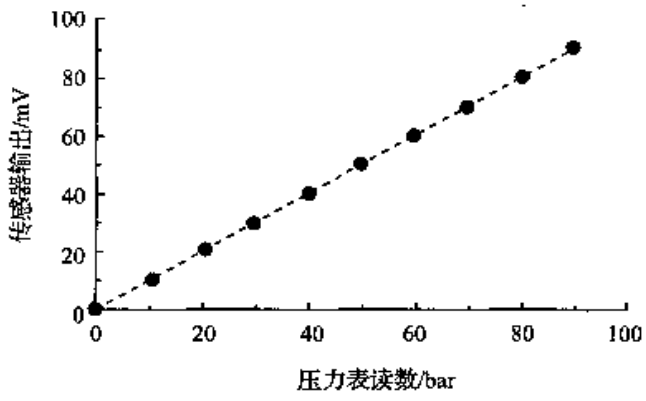


图 2.15 压力传感器(P083107)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.15 Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

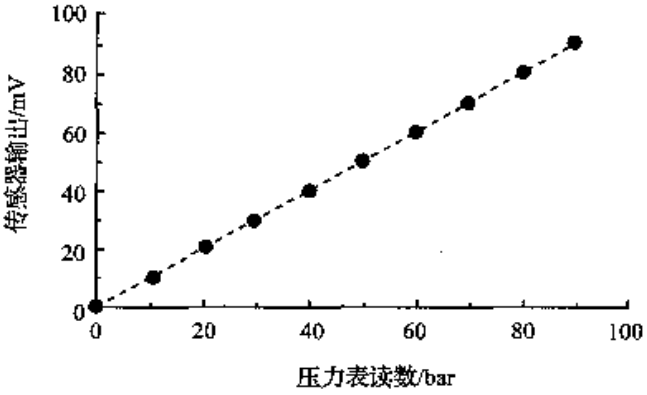


图 2.16 压力传感器(P083106)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.16 Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

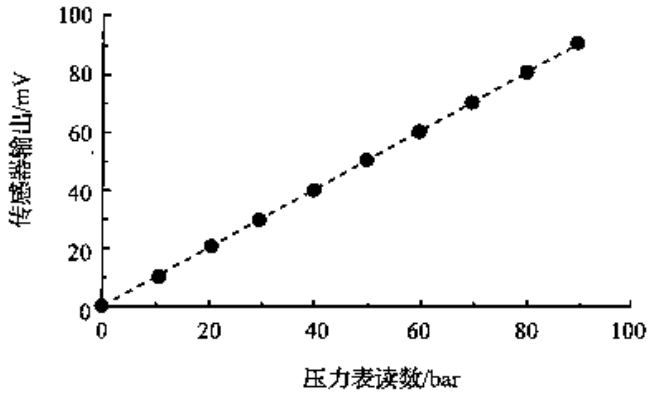


图 2.17　压力传感器(P051951)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.17　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

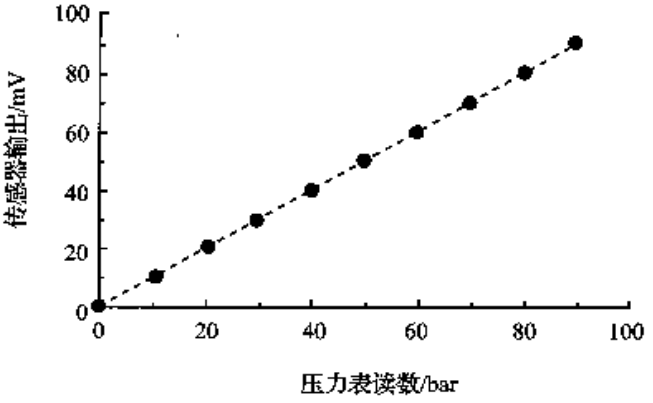


图 2.18　压力传感器(P083112)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.18　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

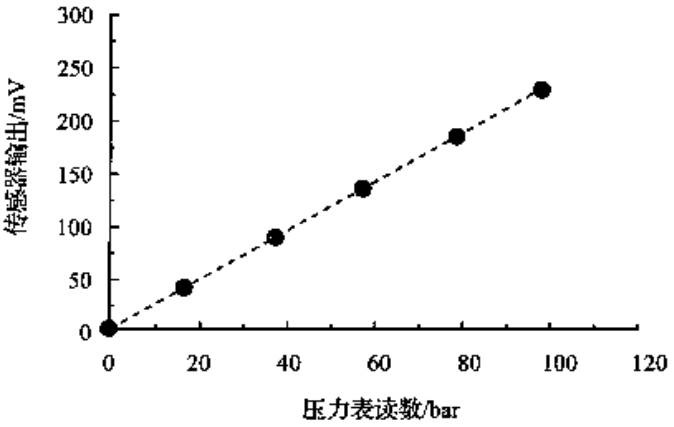


图 2.19　压力传感器(P083112)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.19　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

表 2.2 当流体介质为液压油时各传感器的标定方程

Table 2.2 Equation of calibration of pressure sensors for hydraulic oil

传感器型号	测量范围/bar	耦合方程	R^2
P083107	100	$y=1.0049x-0.4293$	0.9999
P083106	100	$y=1.0011x-0.1717$	0.9999
P051951	100	$y=1.0018x-0.2104$	0.9999
P083112	100	$y=1.0072x-0.6654$	0.9997
P052281	250	$y=2.4828x-0.6469$	0.9999

3. 流体介质为纯水时的传感器标定

各压力传感器感应参数与压力表读数之间的关系分别如图 2.20～图 2.23 所示。各传感器参数及标定方程如表 2.3 所示。

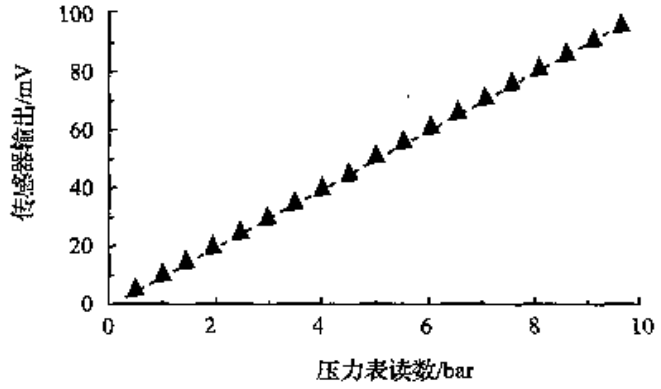


图 2.20 压力传感器(249-3858-1)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.20 Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

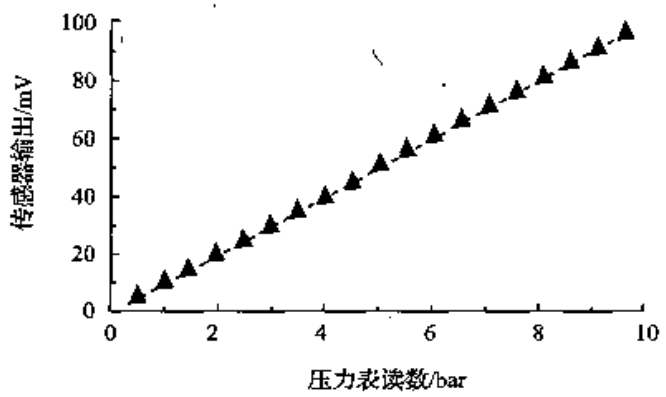


图 2.21 压力传感器(249-3858-2)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.21 Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

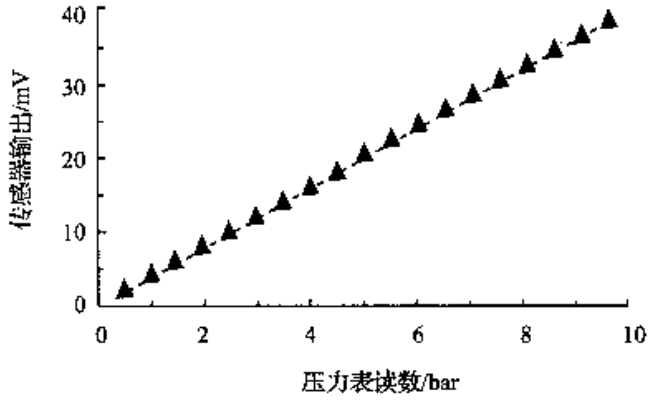


图 2.22　压力传感器(249-3965-3)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.22　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

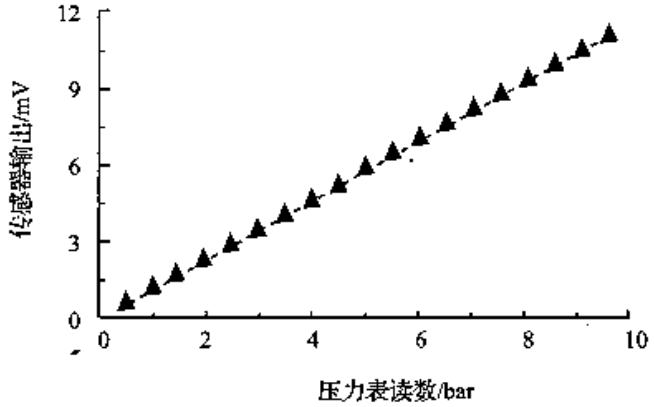


图 2.23　压力传感器(249-3820-4)输出参数与压力表读数之间的关系

Figure 2.23　Relationship between the output of the sensor and reading from the guage

表 2.3　当流体介质为纯水时各传感器的标定方程

Table 2.3　Equation of calibration of pressure sensors for pure water

传感器型号	测量范围/bar	耦合方程	R^2
249-3858-1	10	$y=9.8974x+0.5595$	1.0000
249-3858-2	10	$y=9.9077x+0.2660$	1.0000
249-3965-3	25	$y=3.9666x+0.3255$	1.0000
249-3820-4	100	$y=0.9858x+0.1288$	0.9998

2.6.2　速转传感器的标定

无论是电马达、油马达还是风马达，钻具转速均通过减速箱的输出轴来获得，转速的大小由调速器来控制输出。转速传感器是电磁脉冲式传感器，通过记录一定时间内的脉冲信号数来计算转数。可在试验室的任何可以控制转数的机器上进行标定，也可直接在钻机上标定。标定装置如图 2.24 所示。

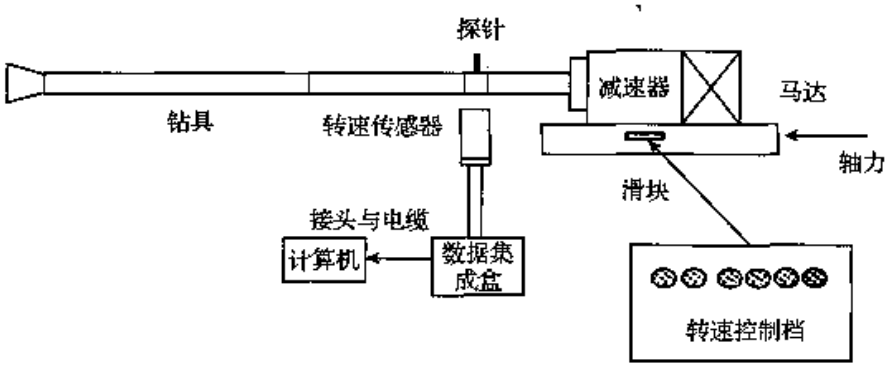


图 2.24 转速传感器的标定

Figure 2.24 Calibration of rotational speed sensor

这里,转速传感器选用德国 PEPPERL+FUCHS 的 NBB10～30GM50-E0V1 型脉冲式传感器,供电电压为 10～30 V,电流为 200 mA,转速测量范围为0～2500 r/min。在钻进作业中,R-20 钻机钻具的最大转速为 600 r/min,其他钻机一般不超过 1000 r/min。因此,标定范围选择为 0～1000 r/min,采用 TACHO M4W-C 型标准转速表及在 3700 型钻孔机床上进行标定。

转速传感器输出的数据为实际感应的脉冲数,在数值上与转数相等。传感器输出的脉冲数与转速表读数之间为对等的线性关系。设输出转数为y,读数为x,其耦合方程为$y=x$,如图 2.25 所示。

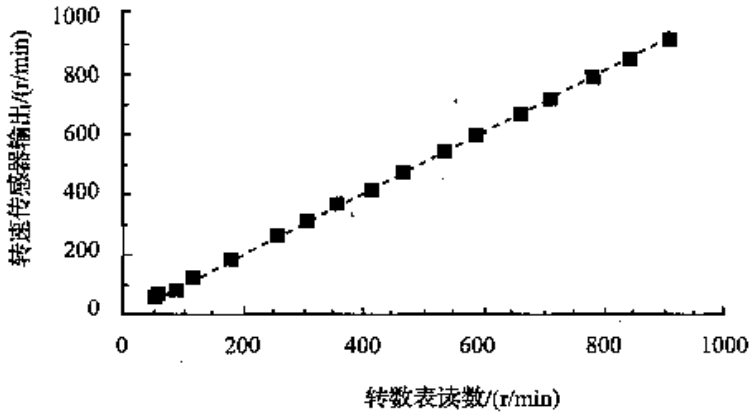


图 2.25 转速传感器(NBB10-30GM50-E0V1)输出转数与转数表读数之间的关系

Figure 2.25 The relationship between the output of the rotational transducer and reading of the rotation meter

2.6.3 位移传感器

位移传感器采用激光测距仪,型号为 MM30/30R。由于激光测距属高精度位移测量,1000 m 测距的系统误差为 0.10 mm,比传统的钻孔测井记录要精确,因此,无需标定。

参 考 文 献

[1] Stefan M L. Geological Well Logs: Their Use in Reservoir Modeling[M]. London: Springer. 2000.

[2] Barr M V, Brown E T. Instrumented drilling as an aid to site investigation[C]// Proceedings of the 3rd International Congress IAEG, Madrid. 1978.

[3] Pfister P. Recording drilling parameters in ground engineering[J]. Journal of Ground Engineering, 1985, 18(3): 16～21.

[4] Peck J, Vynne J F. Current status and future trends of monitoring technology for drills[C]// Proceedings of the International Mining Geology Conference. Kalgoorlie, Australia. 1993.

[5] Schunnesson H. Probing ahead of the face with percussive drilling[J]. Tunnels Tunneling, 1996: 22～23.

[6] Paulo C. On the use of drilling parameters in rock foundations. Geotechnical site characterization[C]// Proceedings of the first International Conference on Site Characterization-ISC'98, Atlanta, Georgia, USA, 19～22 April 1998: 347～358.

[7] Braithwaite R. Exploration drilling 2000[J], Mining Magazine, 2000: 6～10.

[8] Hamelin J P, Hass G, Burgess N. Instrumented borehole drilling using ENPASOL system, Field measurements in geomechanics[C]// Proceedings of the 5th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics-FMGM 99, Singapore, 1～3 December, 1999: 577～581.

[9] Fortunati F, Pellegrino G. The use of electronics in the management of site investigation and soil improvement works: principles and applications. Geotechnical Site Characterization[C]// Proceedings of the first International Conference on Site Characterization-ISC'98, Atlanta, Georgia, USA, 19～22 April 1998: 359～364.

[10] Suzuki Y, Sasao H, Nishi K, et al. Ground exploration system using seismic cone and rotary percussion drill[J]. Journal of Technology and Design, Architectural Institute of Japan, 1995, 1: 180～184.

[11] Howarth D F, Adamson W R, Berndt J R. Correlation of model tunnel boring and drilling machine performances with rock properties[J]. Journal of Rock Mechanics Sciences & Geomechanics Abstract. 1986, 23(2): 171～175.

[12] Paolo B De, Viola G, Tomiolo A. The use of drilling energy for soil classification[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurement in Geomechanics, Kobe. 1988

[13] Zacas M, M Kavadas, I Mihalis. The use of recording drilling parameters in rock mass classification[C]// Proceedings of the 8th ISRM Congress, 1995, 3: 1121～1124.

[14] Gui M W, Soga K, Bolton M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(4): 283～291.

[15] Teal R. A concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics Sciences & Geomechanics Abstract, 1965, 2: 57～73.

[16] Reddish D J, Yasar E. A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics Sciences & Geomechanics Abstract. 1996, 33(5): 543～548.

[17] Fortunati F, Pellegrino G. The use of electronics in the management of site investigation and soil improvement works: principles and applications[C]// Geotechnical Site Characterization, Proceedings of the first International Conference on Site Characterization-ISC'98, Atlanta, Georgia, USA, 19～22 April 1998: 359～364.

[18] Yue Z Q, Lee C F, Law K T, et al. HKU drilling process monitor and its applications to slope stabilization[C]// Proceedings of the Annual Conference-Works Bureau and Ministry of Construction on the Development and Co-operation of the Construction Industry of the Mainland and Hong Kong, 20～ 21 September, 2001, 2: Ⅱ 35～ Ⅱ 46.

[19] Yue Z Q, Lee C F, Law K T, et al. Use of HKU drilling process monitor in soil nailing in slope stabilization[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (11): 1685～1690 [in Chinese].

[20] Sugawara J, Yue Z Q, Tham L G, et al. Weathered rock characterization using drilling parameters[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(3): 661～668.

[21] Chugh C P. High Technology in Drilling and Exploration[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992.

第 3 章　DPM 系统数据的采集及基本图形

3.1　钻孔过程的识别

3.1.1　参数类型

钻孔过程中的工作参数可分为三类，即压力、转速及位移，均为矢量。其中，压力按活塞动作分为进给压力和反馈压力。对于垂直油缸，进给压力的作用是对钻具产生轴压力，推进钻具使之向下运动；对于水平油缸，其作用是对钻机产生水平推力，使钻机沿其底座上的水平导轨向前运动或在钻进中施加给钻具以横向（水平）调节力，调整钻孔方向。反馈压力的作用则与上述相反。对于垂直油缸，将实现对钻具轴向压力的调节及向上运动；对于水平油缸，将实现钻机沿水平导轨的后退运动以及钻进中钻具水平力的调节。可以看出，以上压力将实现钻具的向下（向前）或向上（向后）位移，具有确定的矢量性，它通过传感器感应数据的正、负来标识。冲洗液为排放式，压力恒为正值。

转动分顺时针和逆时针两种运转方向。但由于传感器是基于电磁原理产生的脉冲信号来记录数据的，单个传感器不能对转动方向进行识别。然而，通过两个传感器组合，根据感应数据的时间差可以实现对转动矢量的识别。

钻进位移由活塞运动来反映，分下向和上向位移。当活塞杆向下运动时，激光传感器所测位移不断减小；相反，则不断增大。通过位移的递增或递减，可以对位移矢量进行识别。

3.1.2　钻孔过程的划分

完成一个钻孔，需要钻机的许多动作来实现。根据钻孔过程中动作发生的先后，可划分为如下几个主要过程：

1）加载钻杆。

2）钻机水平向前运动。

3）钻杆连接。

4）钻进。

5）提升加长杆。

6）拆接钻杆。

7）钻机水平向后运动。

8）卸载钻杆。

9）标准触探试验。

10）空闲。

以上各主过程由多个次级过程的一系列动作来实现。各子过程及状态参数如表 3.1～表 3.10 所示。其中，也列出了标准触探试验 SPT 过程。

表 3.1 加载钻杆过程及工作参数的状态

Table 3.1 State of operational parameters during the process of loading drill rod

主过程	子过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
加载钻杆	下放吊索	0	0	0	0	0	0 1/hoist *	0
	连接索栓与钻杆	0	0	0	0	0	0 0/1	0
	提升钻杆	0	0	0	0	0	0 1	0
	下放钻杆及定位	0	0	0	0	0	0 1/0	0
	连接钻杆	0	0	0	0	0	0 0	0
	下放钻杆至孔中	0	0	0	0	0	0 1	0
	止住钻杆	0	0	0	0	0	0 0	0

注：1＝开状态，0＝关状态，on＝1 / off＝0，* 为电动葫芦。表 3.2～表 3.10 状态参数意义相同。

表 3.2 钻机前移过程及工作参数的状态

Table 3.2 State of operational parameters during the moving forward process of drill rig

主过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
钻机前移	0	0	0	0 1	1	0 0	0

表 3.3 钻杆连接过程及工作参数的状态

Table 3.3 State of operational parameters during the connecting of drill rods

主过程	子过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
连接	下放旋转头及加长杆	1	0 1	0	0 1	0 1	0 0	1
连接	定位	1 0	0 1	0	1 0	1 0	0 0	0 1
	连接	0	0	0	0	0	1 0	1

表 3.4　钻进过程及工作参数的状态

Table 3.4　State of operational parameters during the penetrating process

主过程	子过程		进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
钻进	纯钻进	施加轴推力	1	0 1	1	0 1	0 1	1 0	1
		施加扭矩	1 0	0 1	1	0 1	0 1	1 0	1
		冲洗	1 0	0 1	1	0	0	1/0 0	1 0
	活塞推程	松开卡盘	0	0	1	0	0	0 0	0
		提升旋转头	0	1	1	0	0	0 0	1
		旋紧卡盘	0	1	1	0	0	0 0	0

表 3.5　提升加长杆过程及工作参数的状态

Table 3.5　State of operational parameters during the elevation of extensional bar

主过程	子过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
提升加长杆	提升钻具	0	1	1	0	0	0 0	1
	卡住钻杆组	0	1	1	0	0	0 0	0
	松开卡盘	0	0	1	0	0	0 0	0
	下放旋转头	1	0 1	1	0	0	0 0	1
	旋紧卡盘	0	0	1	0	0	0 0	0
	放开钻杆组	0	1 0	1	0	0	0 0	0

表 3.6 钻机前移过程及工作参数的状态

Table 3.6 State of operational parameters during the moving forward process of drill rig

主过程	子过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
拆接钻杆	卡住钻杆组	0	0	0	0	0	0 0	0
	拆接加长杆	0	0	0	0	0	1 0	1
	提升旋转头	0	1	0	0	0	0 0	1

表 3.7 卸载钻杆过程及工作参数的状态

Table 3.7 State of operational parameters during the process of unloading drill rods

主过程	子过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
卸载钻杆	下放吊索	0	0	0	0	0	0 1	0
	连接钻杆与索栓	0	0	0	0	0	0 0/1	0
	松开钻杆组	0	0	0	0	0	0 1	0
	提升钻杆	0	0	0	0	0	0 1	0
	卡住钻杆组	0	0	0	0	0	0 0	0
	拆接钻杆	0	0	0	0	0	0 0	0
	提升/下放钻杆	0	0	0	0	0	0 1	0

表 3.8 钻机后移过程及工作参数的状态

Table 3.8 State of operational parameters during the moving backward process of drill rig

主过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
钻机后移	0	0	0	1	0 1	0 0	0

表 3.9　标准触探试验时工作参数的状态

Table 3.9　State of operational parameters during the process of standard penetration test

主过程	子过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
标准触探试验	加载钻杆及固定取样器	0	0	0	0	0	0 1	0
	标准触探试验	0	0	0	0	0	0 1	0
	撤除取样器	0	0	0	0	0	0/1 1	0

表 3.10　钻机空闲时工作参数的状态

Table 3.10　State of operational parameters during the idling process of drill rig

主过程	进给压力	反馈压力（调压力）	冲洗压力	向后运动	向前运动	钻具/电动葫芦旋转	位移
空闲	0	0	0	0	0	0	0

3.1.3　钻孔过程参数门槛值的设置

对钻孔过程进行划分后，要实现对过程的自动识别及数值控制，还需对钻进中各主、次过程进行分析，确定各过程工作参数的状态变化及数值大小。由以上各表可知，任意一个过程均是由一系列的参数状态来控制的。因此，首先要对状态进行界定。由此，需要确定各状态下工作参数的门槛值。具体方法是将钻机置于某一工作状态，记录各工作参数，然后终止该状态，参数将由工作态向非工作态转变，并逐渐趋于平稳。观察该参数的变化，并记录下稳定态时的参数值，即是此工作参数的门槛值。

门槛值可在不同钻进深度下进行测定，也可直接在钻孔过程监测参数-时间变化曲线上进行确定。表 3.11 是某典型钻孔钻进过程工作参数的上、下限值。不同的钻进系统，门槛值会有变化。

工作参数状态将对应一个多位字符串，按计算机二进制数制的处理模式，根据状态数的多少，可以是 8 的倍数位 8X，即 8 位、16 位、32 位或 64 位字符串。实际状态数不一定是 8X，此时，缺省的状态数以 0 填补。这里设置为 8 位。如钻进过程的主要识别码为 1010 0101，第一位数“1”表示进给压力为“开”状态，即施加轴压

力；第二位数字“0”表示反馈压力为“关”状态，即无调压力；第三位数字“1”表示钻进过程中冲洗压力为“开”状态……这些字符串形成一个信号链，对应一个过程，根据此信号链即可对此过程进行辨识。值得指出的是，有些过程可能存在互不相干的多个子过程或动作。例如，在钻进过程中，由于顺孔和排渣的需要，在对钻具施加轴压的同时，要上下提升钻杆。此时，除存在进给压力即轴压外，还同时存在调节的反馈压力。而且，由于调节钻孔方向的需要，水平油缸可能前后运动，施加一定的弯矩来纠偏。此时，存在多条信号链，均属于同一过程。因此，一个过程所对应的信号链具有多维性。如同样是钻进过程，当钻进深度较大，需要施加调压力而非轴压时，其识别码为 0110 0101。

表 3.11 钻孔过程中工作参数的上下门槛值

Table 3.11 The upper and lower thresholds of operational parameters during a drilling process

钻孔	阶段	极值	进给压力 /bar	反馈压力 /bar	冲洗压力 /bar	前移压力 /bar	后移压力 /bar	钻具转速 /(r/min)	钻头位移 /mm
BH-1	1	max	0.40	126.62	3.44	123.52	0.80	311	878
		min	−122.78	−0.74	−0.31	−0.60	−99.18	0	248
	2	max	0.91	124.39	11.59	119.11	0.90	266	879
		min	−119.15	−0.99	−0.44	−0.80	−99.18	0	246
	3	max	0.71	117.68	−0.57	58.91	0.90	207	886
		min	−101.12	−1.24	4.09	−0.90	−110.64	0	244
	4	max	0.90	119.67	10.68	90.86	1.00	341	880
		min	−112.91	−0.99	−0.47	−0.90	−99.28	0	248
	5	max	0.81	122.40	11.01	80.14	1.11	362	878
		min	−115.26	−0.74	−0.58	−1.10	−110.84	0	249
	6	max	0.91	119.42	17.46	105.49	1.00	359	875
		min	−76.75	−0.74	−0.21	−1.00	−100.29	0	246
	7	max	0.81	115.20	10.67	74.73	0.60	362	882
		min	−104.65	−0.99	−0.10	−0.90	−106.62	0	249
	8	max	0.81	115.20	9.97	92.77	0.80	408	877
		min	−104.65	−0.74	−0.03	−0.90	−101.90	0	250

续表

钻孔	阶段	极值	进给压力 /bar	反馈压力 /bar	冲洗压力 /bar	前移压力 /bar	后移压力 /bar	钻具转速 /(r/min)	钻头位移 /mm
BH-2	1	max	0.60	116.94	3.74	110.70	0.60	204	877
		min	−98.60	−1.24	−0.35	−0.70	−110.74	0	251
	2	max	0.71	127.36	12.66	100.88	1.11	287	879
		min	−112.81	−0.99	0.60	−0.80	−95.87	0	250
	3	max	0.50	121.41	15.59	108.70	1.00	297	878
		min	−120.56	−1.24	−0.70	−1.00	−101.29	0	250
	4	max	0.71	123.89	16.39	113.20	1.00	486	879
		min	−55.60	−1.24	−0.35	−0.70	−22.71	0	249
	5	max	−121.67	120.42	16.68	101.08	9.14	391	879
		min	31.93	−1.24	−0.62	−1.00	−29.24	0	250

取样钻探时，卸钻杆、取岩芯和加钻杆必须在完成一个推进长度后顺序进行。因为大多数情况下连接钻杆时会存在时间“空档”，在实际钻进前，钻杆之间的连接动作会产生钻进的假象。这种时间“空档”通常达几秒至数十秒，这主要取决于孔深和当时的连接状态。通常，由于螺纹连接的过程与穿透作业相同或相似。所以，要将其与穿透的真实过程加以区别是很困难的。此外，在取样钻探中子过程将增多，也增加了识别的难度。

各参数的门槛值设置如表 3.12 所示。

表 3.12　状态参数门槛值的设置

Table 3.12　Setting of threshold values of the state parameters

过程参数	状态符	状态数	门槛值	状态符	状态数	门槛值	最大值(R20)
进给压力	on	1	≥0.40bar	off	0	<0.40bar	100bar
反馈压力	on	1	≥1.25bar	off	0	<1.25bar	150bar
冲洗压力	on	1	≥0.20bar	off	0	<0.20bar	20bar
前移	on	1	≥10bar	off	0	<10bar	50bar
后移	on	1	≥10bar	off	0	<10bar	50bar
钻具旋转	on	1	≥10r · m^{-1}	off	0	<10 r · m^{-1}	500r · m^{-1}
电动葫芦	on	1	≥5r · m^{-1}	off	0	<5r · m^{-1}	300r · m^{-1}
钻具位移	on	1	>248mm, actual dynamic data	off	0	static data	886mm

表 3.13 给出了过程的识别码。其中，x 为 0 或 1。从表中可知，一个子过程对

应一个或多个识别码。而且，有些过程的识别码是相同的。子过程识别码的非唯一性和相同性，将对子过程的精确识别带来困难。解决的办法是在数据采集系统中增加传感器的数量，对各子过程的所有动作进行监测。这样，可以增大子过程识别码的长度，提高识别精度。

在目前的情况下，由于受钻机机械化程度的限制，许多钻进子过程或动作是非自动化的，须依靠手工完成。因此，有些子过程或动作难以实现参数的数量化控制。

然而，主过程是由多个子过程构成的，主过程识别码的长度通常是子过程识别码长度的数倍。其倍数由子过程的数量决定。这里，主过程识别码的最大长度为56位，如加载与卸载钻杆；最小为8位，如钻机水平向前或后运动。因此，主过程识别码取56位，不足者补0。

识别码长度的增大，减少了识别码的重复性，提高了识别码的唯一性。因此，保证了主过程的识别精度。

表 3.13 钻进过程识别码

Table 3.13 Identification code of drilling process

主过程	子过程		过程识别码
加载钻杆	下放吊索		0000 0010
	连接索栓与钻杆		0000 00x0
	提升钻杆		0000 0010
	下放钻杆及定位		0000 00x0
	连接钻杆		0000 0000
	下放钻杆至孔中		0000 0010
	止住钻杆		0000 0000
	钻机前移		000x 1000
连接	下放旋转头及加长杆		1x0x x001
	定位		xx0x x00x
	连接		0000 0101
钻进	纯钻进	施加轴推力	1x1x xx01
		施加扭矩	xx1x xx01
		冲洗	xx10 0x0x
	活塞推程	松开卡盘	0010 0000
		提升旋转头	0110 0001
		旋紧卡盘	0110 0000
提升加长杆	提升钻具		0110 0001
	卡住钻杆组		0110 0000
	松开卡盘		0010 0000
	下放旋转头		1x10 0001
	旋紧卡盘		0010 0000
	放开钻杆组		0x10 0000
拆接钻杆	卡住钻杆组		0000 0000
	拆接加长杆		0000 0101
	提升旋转头		0100 0001

续表

主过程	子过程	过程识别码
	钻机后移	0000 x000
卸载钻杆	下放吊索	0000 0010
	连接钻杆与索栓	0000 00x0
	松开钻杆组	0000 0010
	提升钻杆	0000 0010
	卡住钻杆组	0000 0000
	拆接钻杆	0000 0000
	提升/下放钻杆	0000 0010
标准触探试验	加载钻杆及固定取样器	0000 0010
	标准触探试验	0000 0010
	撤除取样器	0000 00x0
	空闲	0000 0000

3.1.4　DPM 系统的过程识别

DPM 系统的过程识别包括如下步骤：①读取传感器采集的数据(电压、位移及转速等)；②根据标定方程，将采集的原始数据转化为可读的物性参量；③将物性参量与门槛值比较，对子过程的状态进行判断，产生状态数“0”或“1”；④由状态数生成子过程数据链，即子过程的识别码；⑤读取子过程验证码，对子过程进行检验；⑥按56 位生成过程码；⑦读取过程验证码，对主过程进行检验；⑧生成过程曲线。图 3.1 是识别过程的逻辑框图。

3.2　监测过程曲线及其变化规律

3.2.1　工程背景

以香港九龙岛(Kowloon)三个典型工程场址的调查项目为例。这些场址分别为普通风化花岗岩地层、充填土风化花岗岩地层及复杂风化花岗岩地层，在香港风化花岗岩地层中具有典型性。这些地基调查项目是香港房屋署根据城市发展规划进行的改建项目。香港每年都要进行不少这样的改建工程，由于香港海岛地形地貌及地质条件的特殊性，工程项目对地层勘察的技术要求非常严格，因此工程勘察的费用也非常高昂。为了增强工程钻探的自动化水平，降低工程费用，提高勘察效益，同时也为了钻孔的科学管理，香港科学研究基金会(the Research Grant Council of HKSAP Government)及香港赛马会慈善基金(Hong Kong Jockey Club Charities Trust)联合资助了 DPM 系统的研发与应用研究课题。

根据香港政府岩土工程控制办公室(Geotechnical Control Office，GCO)出版的 1∶20 000 比例尺区域地质图(Sheet 11∶HGM20 Series 1-1986)[1]，普通风化

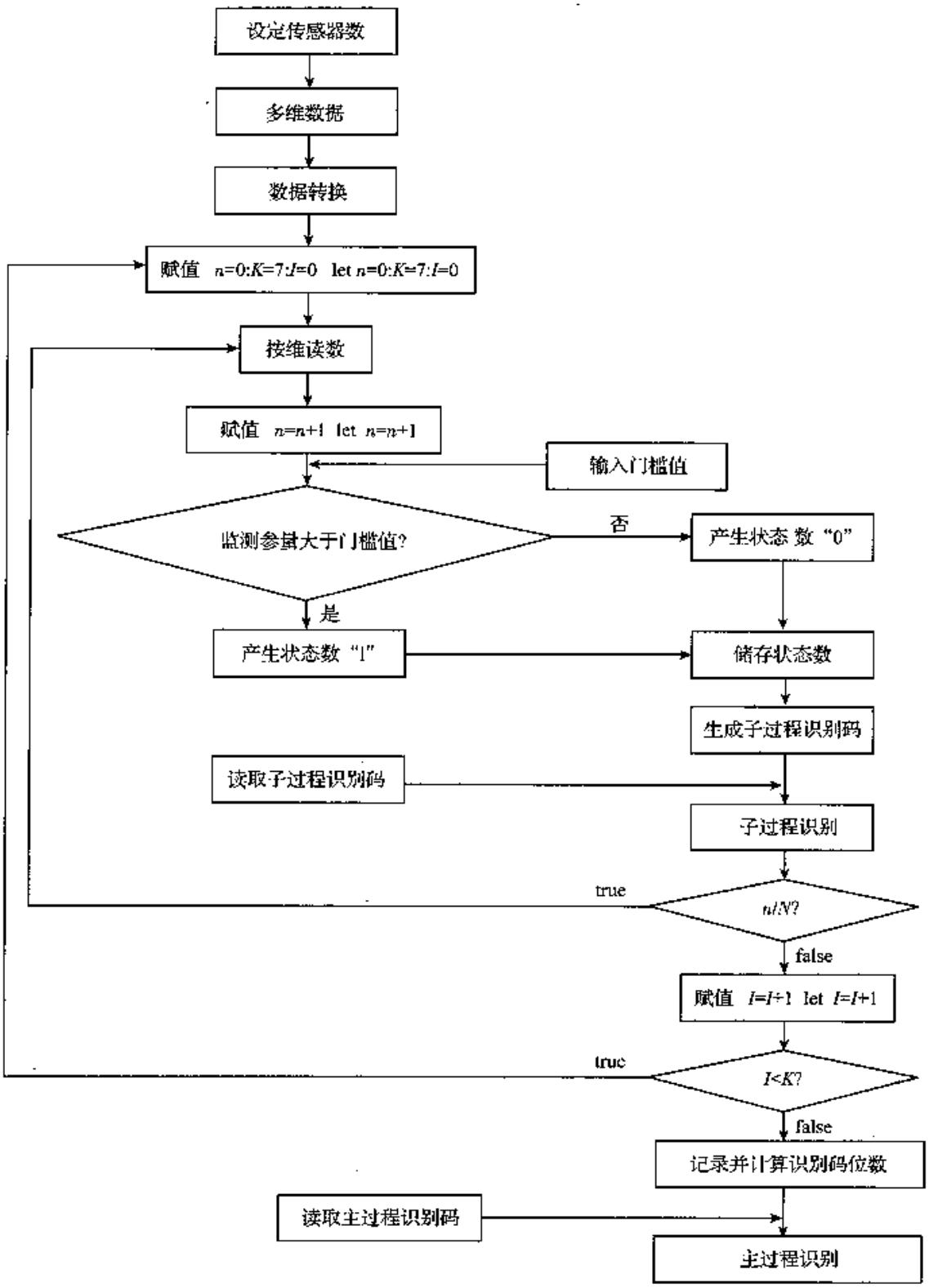


图 3.1 DPM 系统过程识别的逻辑框图

Figure 3.1 Logic flowchart of procedure identification of DPM

花岗岩场址及充填土风化花岗岩场址主要为侏罗纪到白垩纪的中粒花岗岩;复杂风化花岗岩场址则主要为侏罗纪到白垩纪的细粒至中粒花岗岩。这些场址的工程

地质资料非常有限。为了查清其工程地质条件，各布置了 30 余个勘探钻孔。在每个场址的勘探钻孔中选择了部分钻孔用于 DPM 系统的监测。其中，典型钻孔坐标如表 3.14 所示。

表 3.14　典型监测钻孔的位置分布

Table 3.14　Distribution of typical borehole position used for DPM monitoring system

工程场址	孔号	坐标	地面标高
普通风化花岗岩场址	BH-1	836742.78E,819763.85N	42.33
充填土风化花岗岩场址	BH-2	836932.24E,819976.85N	42.18
复杂风化花岗岩场址	BH-3	842429.83E,819104.94N	91.39

3.2.2　监测参量的实时变化曲线

在风化花岗岩中钻进时，DPM 系统监测参量的实时变化曲线如图 3.2～图 3.9 所示。

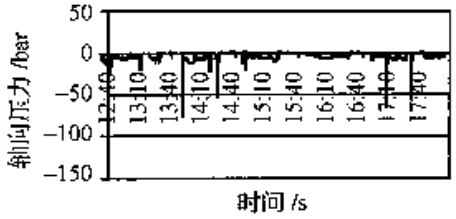


图 3.2　轴压力随时间变化的实时曲线

Figure 3.2　Real-time graph of thrust pressure during drilling

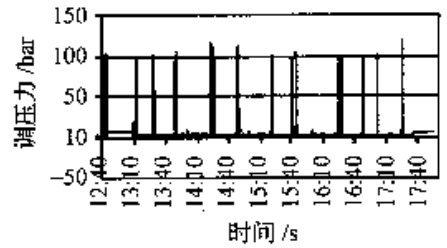


图 3.3　调压力随时间变化的实时曲线

Figure 3.3　Real-time graph of adjusting pressure during drilling

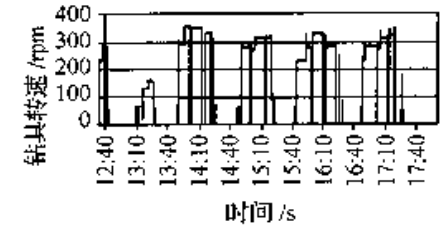


图 3.4　钻具转速随时间变化的实时曲线

Figure 3.4　Real-time graph of core bit's rotational rate during drilling

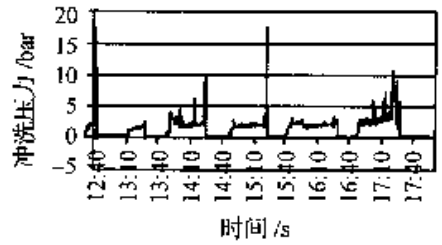


图 3.5 冲洗压力随时间变化的实时曲线

Figure 3.5 Real-time graph of flushing pressure during drilling

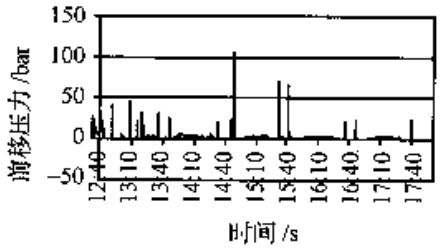


图 3.6 钻机水平向前运动压力随时间变化的实时曲线

Figure 3.6 Real-time graph of horizontally forward moving pressure during drilling

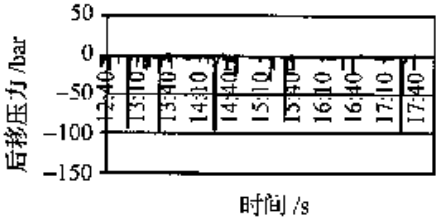


图 3.7 钻机水平向后运动压力随时间变化的实时曲线

Figure 3.7 Real-time graph of horizontally backward moving pressure during drilling

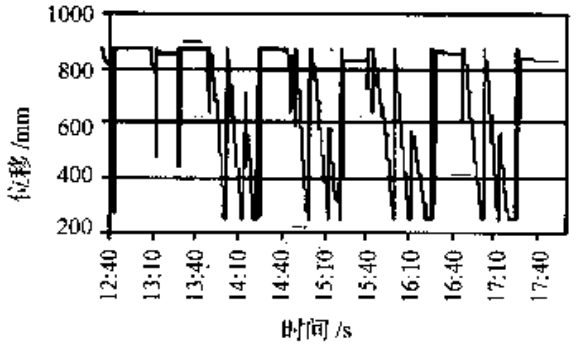


图 3.8 垂直活塞位移随时间变化的实时曲线

Figure 3.8 Real-time graph of vertical displacement during drilling

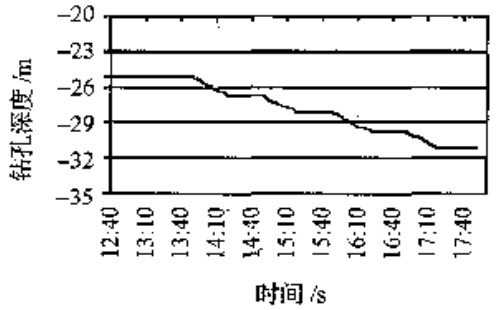


图 3.9　钻头位移(钻孔深度)随时间变化的实时曲线

Figure 3.9　Real-time graph of core bit's displacement(borehole depth) during drilling

从图 3.2、图 3.3 可知，轴压力与调压力的方向相反，且大小和频次均低于调压力。说明钻进到该深度时，钻具本身的重量已超过要求的有效轴压，需要一定的调压力平衡钻具自身的重量。此时，调压力高达 11.10 MPa。图 3.4 反映了钻具转速随时间的变化规律，在一定的深度范围内，转速基本是恒定的。在该深度时，最大转速达 347 $r \cdot m^{-1}$。图 3.5 是冲洗压力随时间的变化规律，从图中可以看出，冲洗压力的变化与转速是对应的，压力基本恒定，在 0.13～0.44 MPa 之间。随着时间的延长，孔深的增大，水压有渐增的趋势。图 3.6、图 3.7 是钻机水平前、后运动压力的变化，它们是方向相反的，其大小、频次与工作状态有关，没有规律性。图 3.8 反映垂直活塞位移随时间的变化规律。从图 3.8 中可知，在该时段内，活塞共推进了四个循环，每个循环钻具推进 3 次，即加长杆的推进长度。它与图 3.9 对应，图中斜线为每个循环钻头推进的总位移(即钻孔深度)，共 6.176 m。

以上各图是在工程场址的实际钻进过程中，某个时间段内各参量的实时变化规律。在不同的孔径、孔深及不同岩性的地层中，这些参数的变化是不同的。其总体的规律需在钻进全过程曲线中才能得以反映，这里只是一个示例。

3.2.3　钻进全过程曲线

在整个钻孔过程中，每个主过程包含许次级过程或子过程。其中，钻进主过程中的纯钻进过程直接和所穿透地层相关。根据过程识别原则和方法，可获得各钻孔纯钻进时各监测参量的变化曲线。

1. 普通风化花岗岩地层纯钻进全过程曲线

在纯钻进子过程中，典型钻孔 BH-1 中纯钻进的全过程曲线如图 3.10～图 3.17所示。

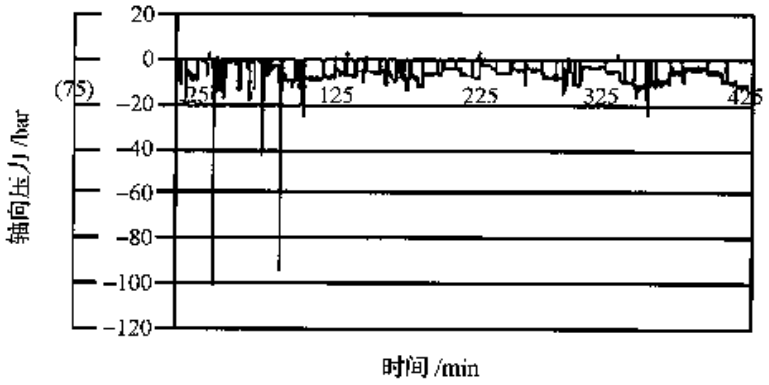


图 3.10 轴压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.10 Entire process graph of thrust pressure with actual time during drilling

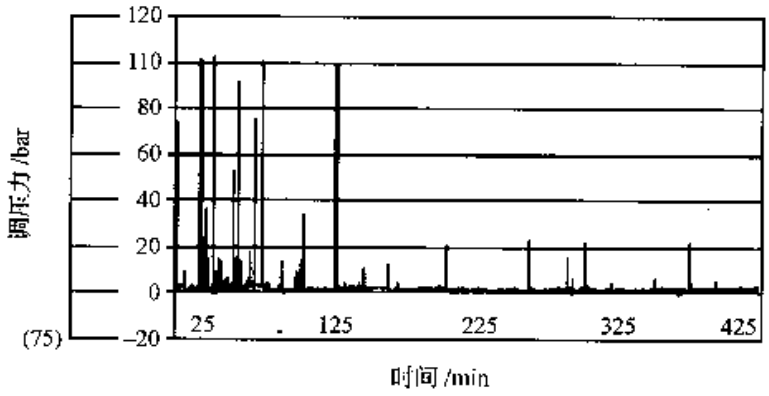


图 3.11 调压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.11 Entire process graph of adjusting pressure with actual time during drilling

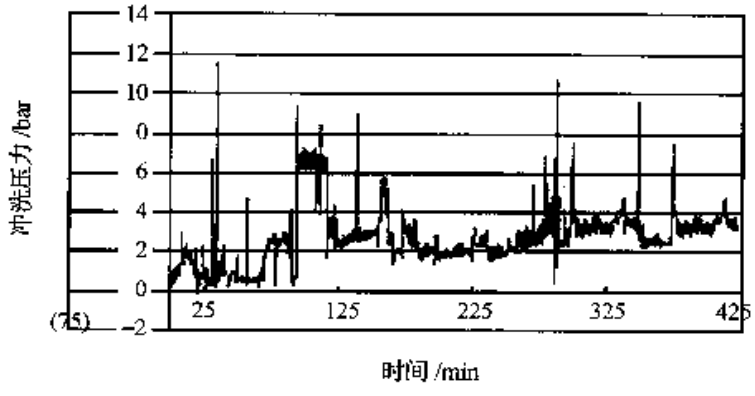


图 3.12 冲洗压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.12 Entire process graph of flushing pressure with actual time during drilling

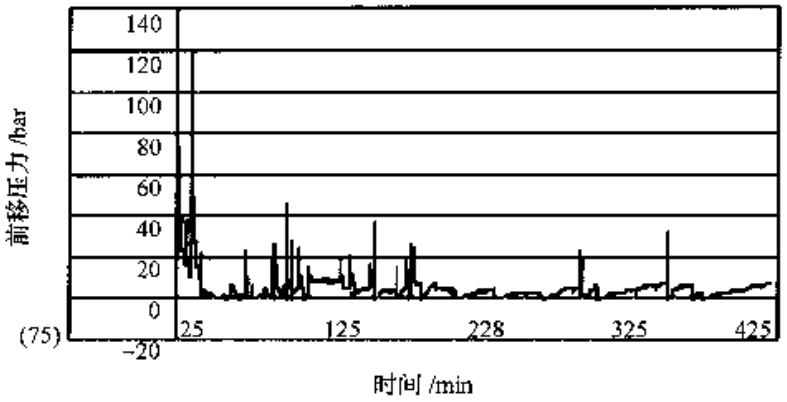


图 3.13　钻机向前运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.13　Entire process graph of horizontally forward moving pressure with actual time during drilling

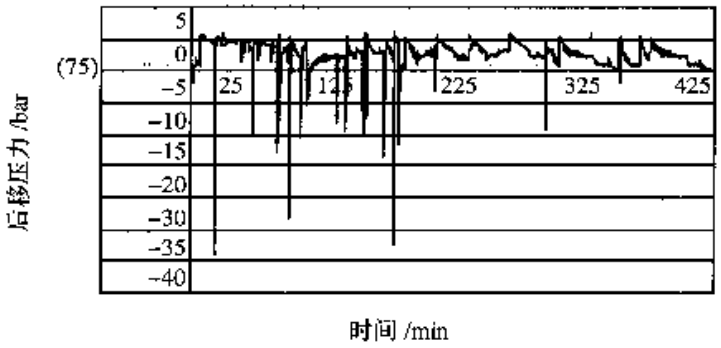


图 3.14　钻机水平向后运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.14　Entire process graph of horizontally backward moving pressure with actual time during drilling

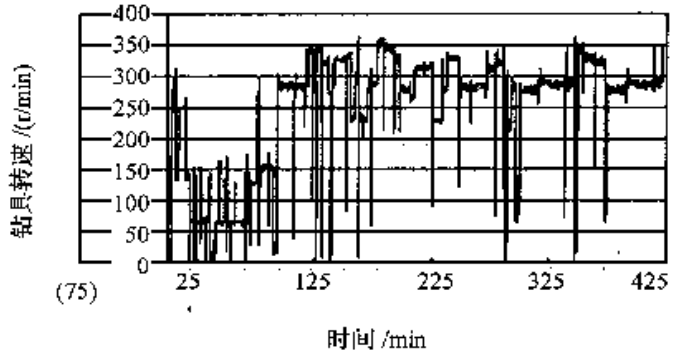


图 3.15　钻具转速随时间变化的全过程曲线

Figure 3.15　Entire process graph of core bit's rotational rate with actual time during drilling

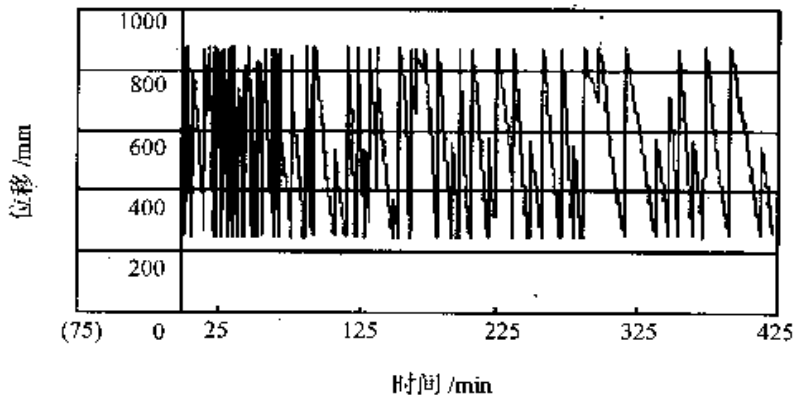


图 3.16 垂直活塞位移随时间变化的全过程曲线

Figure 3.16 Entire process graph of vertical piston displacement with actual time during drilling

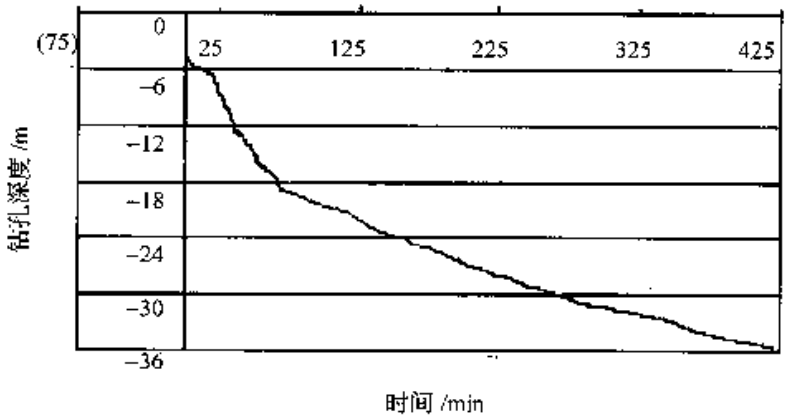


图 3.17 钻头位移(钻孔深度)随时间变化的全过程曲线

Figure 3.17 Entire process graph of core bit's displacement (borehole depth) with actual time during drilling

2. 充填土风化花岗岩地层纯钻进全过程曲线

钻探录孔资料显示,此地层与普通风化花岗岩地层非常接近,不同之处在于此地层上覆有厚度数米的充填土层。在此地层中,典型钻孔 BH-2 中纯钻进的全过程曲线如图 3.18～图 3.25 所示。

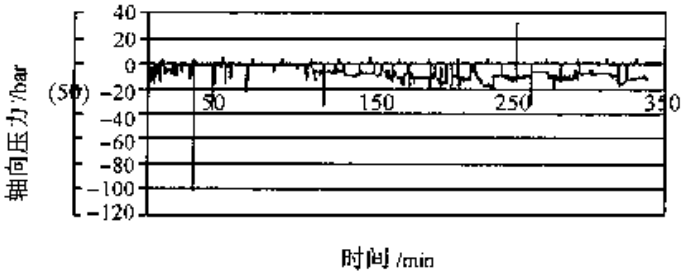


图 3.18 轴压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.18 Entire process graph of thrust pressure with actual time during drilling

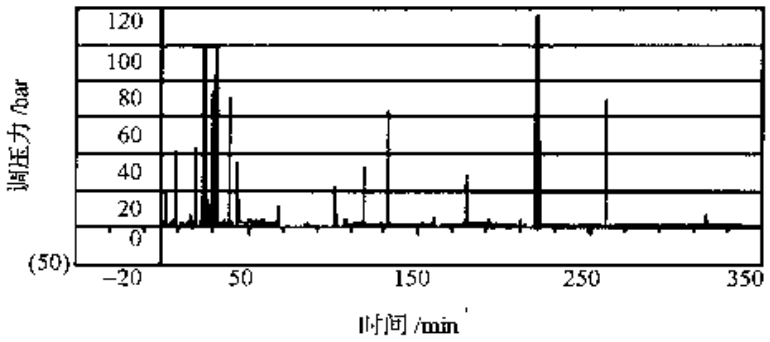


图 3.19　调压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.19　Entire process graph of adjusting pressure with actual time during drilling

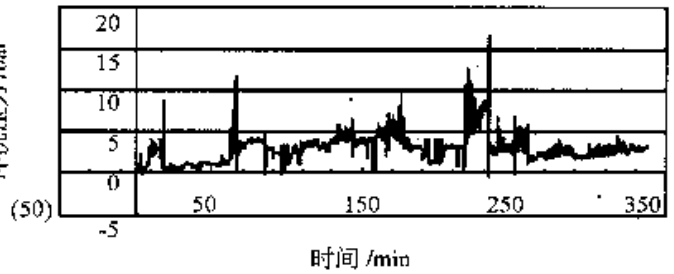


图 3.20　冲洗压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.20　Entire process graph of flushing pressure with actual time during drilling

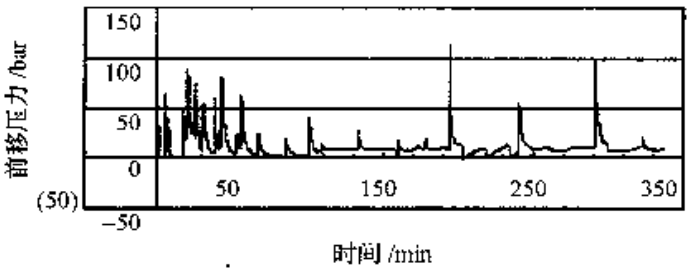


图 3.21　钻机向前运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.21　Entire process graph of horizontally forward moving pressure with actual time during drilling

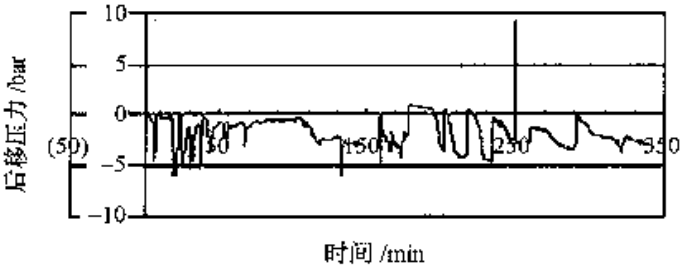


图 3.22　钻机水平向后运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.22　Entire process graph of horizontally backward moving pressure with actual time during drilling

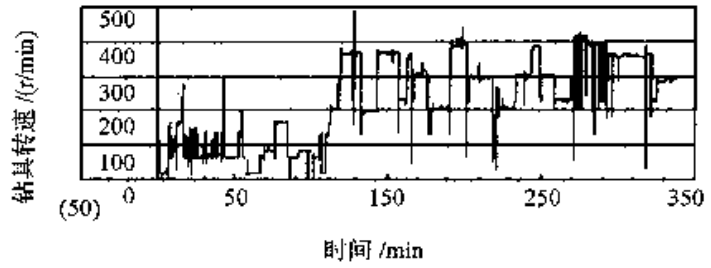


图 3.23 钻具转速随时间变化的全过程曲线

Figure 3.23 Entire process graph of core bit's rotational rate with actual time during drilling

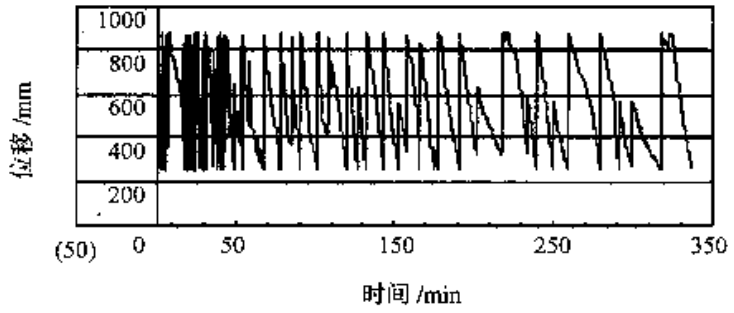


图 3.24 垂直活塞位移随时间变化的全过程曲线

Figure 3.24 Entire process graph of vertical piston displacement with actual time during drilling

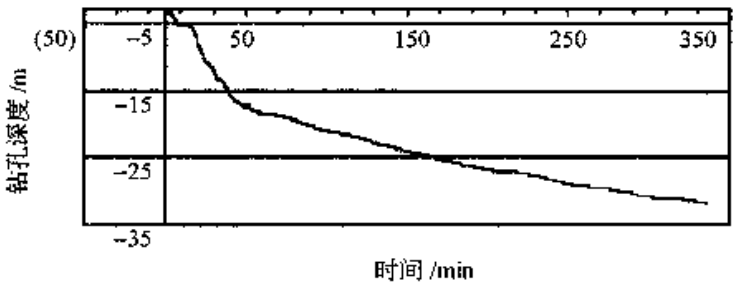


图 3.25 钻头位移(钻孔深度)随时间变化的全过程曲线

Figure 3.25 Entire process graph of core bit's displacement (borehole depth) with actual time during drilling

3. 复杂风化花岗岩场址纯钻进过程曲线

由于此场址钻孔深度达到 50 多米,采集数据量已超出 Excel 的处理范围,因此进行了分段处理。特别说明的是,由于此典型钻孔中转数数据部分损坏,没有给出。其中,典型钻孔 BH-3 中第一部分如图 3.26～图 3.32 所示。

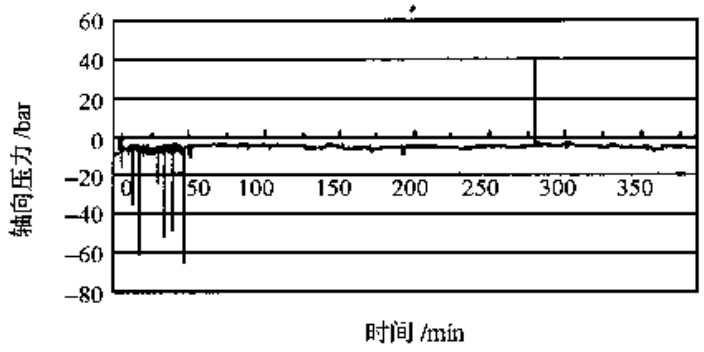


图 3.26　轴压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.26　Entire process graph of thrust pressure with actual time during drilling

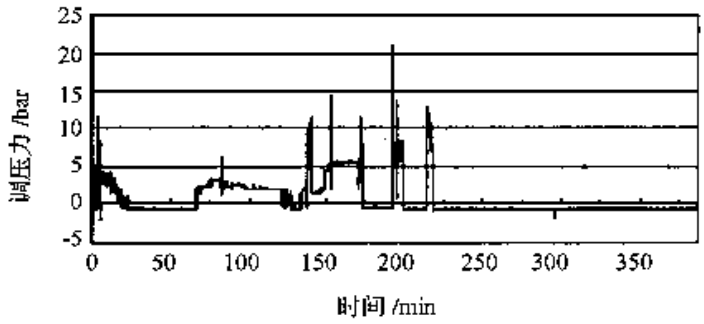


图 3.27　调压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.27　Entire process graph of adjusting pressure with actual time during drilling

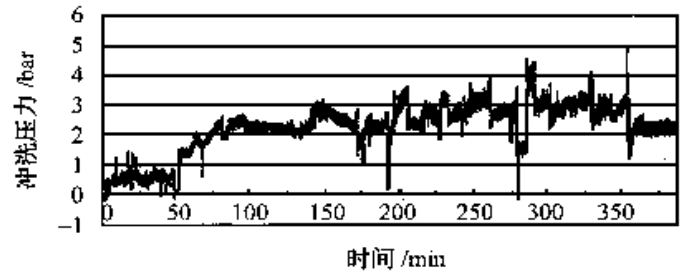


图 3.28　冲洗压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.28　Entire process graph of flushing pressure with actual time during drilling

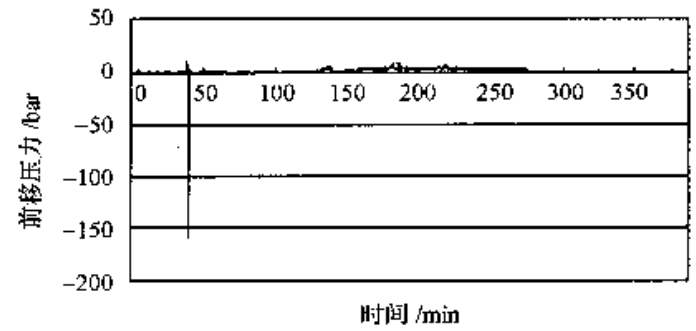


图 3.29　钻机向前运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.29　Entire process graph of horizontally forward moving pressure with actual time during drilling

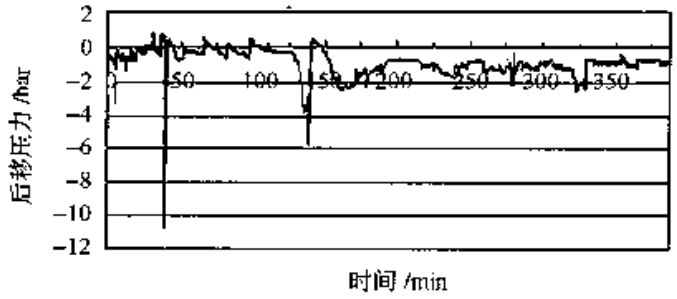


图 3.30 钻机水平向后运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.30 Entire process graph of horizontally backward moving pressure with actual time during drilling

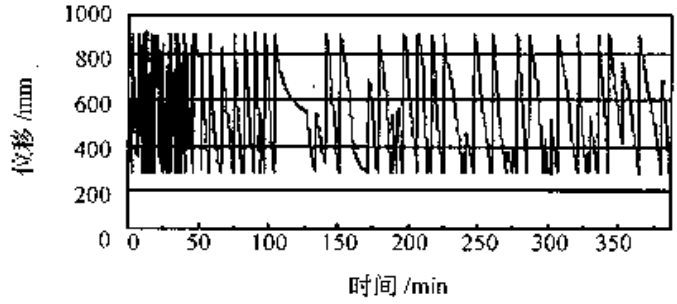


图 3.31 垂直活塞位移随时间变化的全过程曲线

Figure 3.31 Entire process graph of vertical piston displacement with actual time during drilling

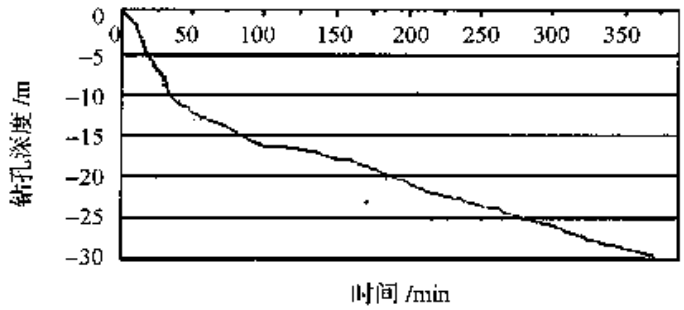


图 3.32 钻头位移(钻孔深度)随时间变化的全过程曲线

Figure 3.32 Entire process graph of core bit's displacement (borehole depth) with actual time during drilling

第二部分如图 3.33～图 3.39 所示。

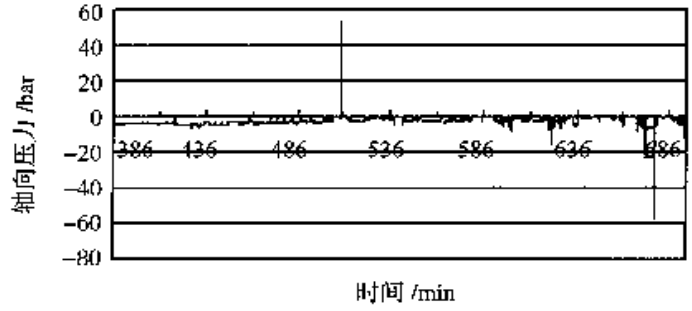


图 3.33 轴压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.33 Entire process graph of thrust pressure with actual time during drilling

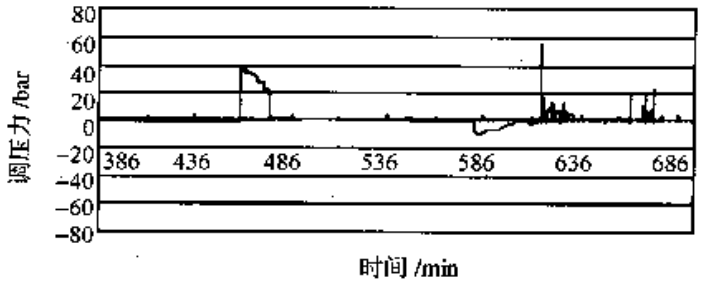


图 3.34　调压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.34　Entire process graph of adjusting pressure with actual time during drilling

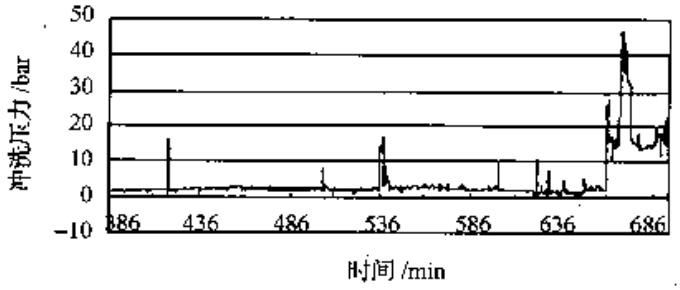


图 3.35　冲洗压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.35　Entire process graph of flushing pressure with actual time during drilling

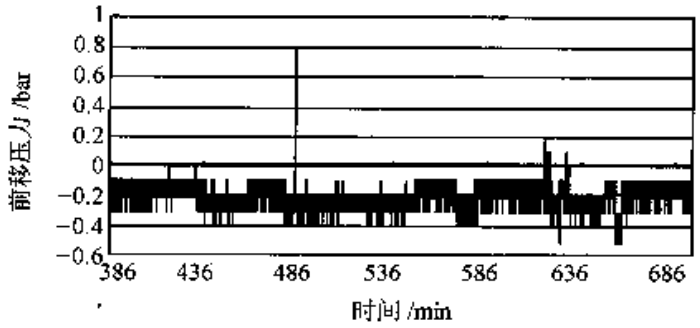


图 3.36　钻机向前运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.36　Entire process graph of horizontally forward moving pressure with actual time during drilling

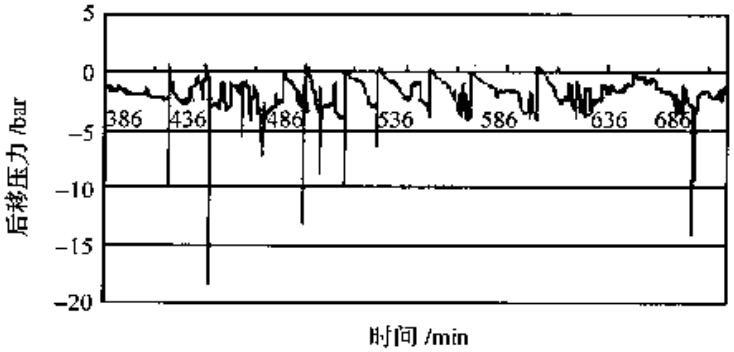


图 3.37　钻机水平向后运动压力随时间变化的全过程曲线

Figure 3.37　Entire process graph of horizontally backward moving pressure with actual time during drilling

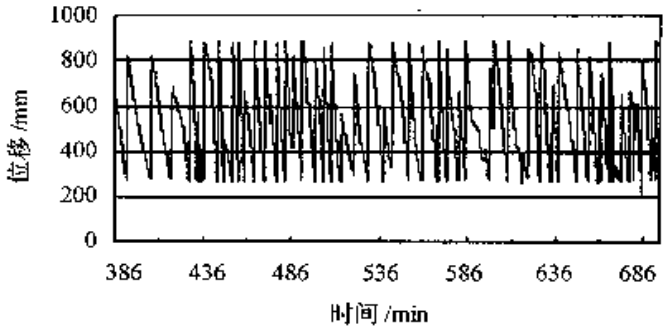


图 3.38 垂直活塞位移随时间变化的全过程曲线

Figure 3.38 Entire process graph of vertical piston displacement with actual time during drilling

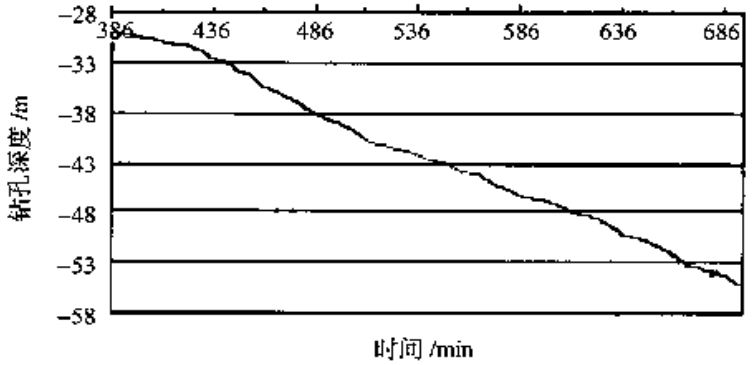


图 3.39 钻头位移(钻孔深度)随时间变化的全过程曲线

Figure 3.39 Entire process graph of core bit's displacement (borehole depth) with actual time during drilling

3.2.4 钻进全过程曲线的特点

(1) 轴压力与调压力

从上述各图可以看出(图 3.10、图 3.11、图 3.18、图 3.19、图 3.26、图 3.27、图 3.33及图 3.34),轴压力和调压力的方向相反,其值均低于 1.0 MPa。曲线中出现多个脉冲,峰值达 12.0 MPa,这是在钻进过程中因顺孔或提升钻具所产生的,不代表纯钻进时的轴压力与调压力值。

(2) 钻具转速

钻具转速具有明显的低转速和高转速两个过程或阶段(图 3.15及图 3.23)。在低转速阶段,平均转速为 100 $r \cdot min^{-1}$,变化区间为[50,150] $r \cdot min^{-1}$;在高转速阶段,平均转速为 300 $r \cdot min^{-1}$,变化区间为[200,400] $r \cdot min^{-1}$。在低转速和高转速之间有一个过渡期。转速的改变与垂直活塞的位移及钻头位移存在对应关系。垂直活塞的位移曲线表明,低转速时,"弹簧"曲线呈压缩状态,说明单位时间内的位移(速度)大。高转速时,"弹簧"呈拉张状态,说明单位时间内的位移小。从钻头位移曲线可知,低转速时,钻头位移曲线的斜率大,说明单位时间内钻头的穿

透速率大；高转速时，钻头的位移曲线斜率小，说明单位时间内钻头的穿透速率小。穿透速率的改变反映了所穿透地层岩性的改变。

(3) 冲洗压力

从图 3.12、图 3.20、图 3.28 及图 3.35 可知，冲洗压力亦可分低压冲洗和高压冲洗两阶段。在 BH-1 及 BH-2 中，低压阶段的平均值为 0.10 MPa，压力的变化范围为[0.05，0.20] MPa；高压阶段的平均值为 0.30 MPa，变化区间为[0.20，0.40] MPa。在 BH-3 中，低压阶段的平均值为 0.05 MPa，变化区间为[0.02，0.08] MPa；高压阶段的平均值为 0.25 MPa，变化区间为[0.20，0.35] MPa。此外，当钻进深度 55.14 m 时，出现了卡钻事故，冲洗孔被堵塞，导致冲洗压力增大，此时冲洗压力超过 1.50 MPa。这就是图 3.35 中出现冲洗压力迅速增大的原因。

(4) 钻机水平前进及后退压力

如图 3.13、图 3.14、图 3.21、图 3.22、图 3.29、图 3.30、图 3.36 及图 3.37 所示，这是一对作用方向相反的压力，出现在钻头定位、加/卸钻杆以及钻进中的纠偏等。在钻进过程中该动作的发生是随机的，没有规律。

(5) 活塞推进位移

如图 3.16、图 3.24、图 3.31 及图 3.38 所示，其位移呈现为“弹簧”状，由压缩和拉张两部分组成。压缩部分对应低转速及低冲洗压力，表示活塞推进速度快，前进位移大，钻头穿透位移大，钻速大，对应于松散层。拉张部分对应于高转速及高冲洗压力，表示此时活塞推进速度慢，位移小，钻速低，对应于坚硬岩层。因此，此位移曲线的压缩、拉张状态及其变化可反映地层的岩性变化。

(6) 钻头位移

如图 3.17、图 3.25、图 3.32 及图 3.39 所示。钻头位移曲线与冲洗压力、转速及活塞位移曲线对应，根据曲线的斜率(即穿透速率)总体上可划分为高斜率段和低斜率段。高斜率段对应高的穿透速率，表示所穿透的地层岩性比较松软，为易穿透岩层。低斜率段对应低的穿透速率，表示所穿透的地层岩性比较坚硬，为难穿透地层。因此，根据钻头位移曲线可以大致划分地层。当然，这首先要遵循某些假设。

参 考 文 献

[1] Geotechnical Control Office, Hong Kong. Geological sheet No. 11, Hong Kong and Kowloon series HGM20[R]. edition 1-1986, Hong Kong, 1986.

第 4 章　界面识别的基本理论

不同岩性的地层具有不同的物理力学特性。物质组成、颗粒大小、容重、强度、硬度、弹性模量及声波速率等物理力学性质不同，其抵抗机械作用破坏的方式和效果也不同。在地层中进行钻孔时，对于坚硬岩石，一般呈脆性破坏。在选择钻进方式时，以冲击破碎为主。对于中硬以下岩石(坚固性系数 $f < 8$)及软岩，塑性增大，脆性减弱，一般呈剪切破坏。在选择钻进方式时，以旋转或旋转-冲击式为主。当二氧化硅含量高，如矽卡岩类极坚硬岩石，将加剧对钻头、钻杆的磨损。强度、硬度及弹性模量等指标的不同，破碎单位体积岩石所需的能量(即比能或比功，specific energy)不同，穿孔速率也不同。基于此，构成地层的物质组成、物理力学特性指标的分异，可以标识地层的分异。同时，物理力学特性的分异也使得作用于钻头等的机械特性指标如单位时间内的磨损率、钻头穿孔速率等的分异。因此，物理力学指标是地层区划的基础。界面识别的本质就是根据地层物理力学性质的分异特征，对地层进行的区划或分级。

然而，获取地层岩性及其物理力学参数，要经历钻孔、取样、现场试验、标样、记录、试件加工、实验室测试和数据分析等过程。不仅耗时长、工作量大，而且成本非常高昂。因此，通过所穿透地层作用于钻具的机械特性指标来标识地层岩性的分异特征显得相当重要。岩石的可钻性指标反映了岩石抵抗钻头钻进的阻力[1]或抵抗钻具钻凿的能力[2]。岩石的可钻性级值已作为岩石可钻性的定量指标，用于钻头选择、制定生产定额以及地层判层，在石油、矿山和地质等部门广泛采用[3~5]。这里，仍沿用岩石可钻性指标的概念对地层进行区划。

4.1　岩石的可钻性

根据岩石可钻性的定义[1,2]，表征可钻性的指标可以是岩石的物理力学性质(如抗压强度、压入硬度、点载荷强度、弹性模量及声波速率等)、穿孔速率、钻头进尺、破碎单位体积的能量(如普氏捣碎法及巴氏砸碎法)及微钻法的穿孔速率、钻深及钻时等指标。这些指标大体上可归纳为强度指标、位移指标及能量指标。强度指标如抗压强度、点载荷强度及弹性模量等；位移指标如穿孔速率、钻头进尺及磨损量等；能量指标如凿碎比功。

然而，在这些指标中，物理力学性质指标虽然在一定程度上，反映了岩石抵抗破坏或被破碎的能力，但它们不能反映钻进时岩石的破碎过程。抗压强度指标，即

使是三轴抗压强度指标也不能完全模拟钻孔内实际的围岩应力状态。而且，岩石取样也具有很大的离散性，加压测试过程及压头与岩石端面的接触情况也与实际的钻凿条件不一致。压入硬度及点载荷强度等指标，由于试验本身的限制，接触面非常狭小。如此小的点、线或面，难以代表岩石的整体情况。弹性模量是通过应力-应变曲线间接获得的，同样受到强度指标测试的限制。这说明脱离孔内围压及温度等环境，难以反映岩石的实际可钻性指标。声波速率（严格说，为纵波速率或声波时差）是通过测井数据获得的。由于岩石本身是一种非完全弹性介质，岩石的矿物成分、颗粒大小、胶结状态、孔隙率及松散程度等，会造成声速差异。岩石结构的复杂性以及不适当的参数化，对岩石可钻性的反映是极不准确的。

一定条件下的实际穿孔速率虽然能反映穿透地层的围岩应力状态，以及试件的离散性问题，但受地层、钻头类型及钻进参数的影响，条件性很强，度量标准不准确。因此，可比性适用范围受限，特别是在相似地层中钻进时是如此。

破碎比能是指破碎单位体积岩石所需要的能量。一方面，实验模拟不能反映孔底岩石的应力状态，同时也不能反映孔内的应力状态。钻孔时，钻头、钻杆不仅和孔壁、岩屑存在摩擦，而且还有冲洗液的作用，其能量的传递方式与实验模拟条件大相径庭。另一方面，无论是捣碎法还是砸碎法[6]，破岩原理均属冲击破碎，而勘探钻进为回转式，其破岩机理完全不同，也难以反映旋转破碎的情况。

微钻法是由 Rollow（美国）提出的一种研究岩石可钻性的方法，20 世纪 80 年代在我国石油行业得到推广[7,8]。该方法采用微型钻头及实际岩芯，在实验室钻进台上模拟钻进的实际过程。可钻性指标可以是穿孔速率、设定时间内的进尺或设定深度内的时间。但该法和其他岩芯实验法一样，脱离了孔内的温度场、应力场等实际环境。因此，无法模拟孔内应力状态，可钻性数据随机、离散、有限。而且，测试工作滞后于实际钻进，不能随钻随测，周期长，费用高[9]。

此外，岩屑能量法[10]是基于能量破碎原理的，其不足与比功法相同。而 A、B 法[11]则适用于钻头的抗研磨性设计。对于实际钻进过程中，钻具存在磨损不均；在薄层、软地层及磨蚀性差的地层中，磨损量甚微，分级及级差会受到限制，影响可钻性分级的精度；而实际钻头磨损量的体积测量也十分复杂。此外，钻孔录井实时数据已被用来优化采矿作业参数，新的可钻性指标和概念也不断被提出[12]。

综上分析，从岩芯实验和原位实测来看，可钻性指标宜以实际钻凿来衡量。因为它与地层、标准的钻凿工具、钻孔方式、孔底环境场以及实际用于钻孔岩石破碎的能量有关。它反映了地层岩性、钻头以及环境的关系。因此，岩石的可钻性可定义为在一定的外力和钻具条件下，岩石抵抗钻头破坏的能力。可钻性指标不仅应反映岩石抵抗尖锐工具入侵的能力，而且要反映所穿透地层的岩石与钻具间的相互作用关系。无论是冲击还是旋转式破岩，钻头端面及侧向与岩石间的相互作用最终可通过能量消耗的形式来表现。因此，可钻性指标应为单位能量下的穿孔速率。

事实上，每种岩石单位体积的破碎比功是不同的。但在标准条件下，特定岩石的破碎比功是不变的。不管采用什么样的凿岩工具，只要破碎的表面积和粒度分布相同，破碎单位体积的岩石所需消耗的能量就是一样的。也就是说，岩石的破碎比功只与输入的能量有关，与工具无关。不同的钻凿工具，在同一地层的岩石中具有不同的穿孔速率，那是因为不同的钻具对能量的传递效率不同。这进一步解析了采用单位能量下穿孔速率作为可钻性指标的科学性。

4.2 基本假设

1）钻头类型、钻孔方式和机具标准化。

2）钻机钻进所需的动荷载是由钻机系统自适应及自调节的。也即是，钻机工作参数将随地层岩性的变化自动调节和自动适应。因此，各参数的设置无需标准化或常量化，是钻进系统的自组织行为。

3）钻孔位移和穿透速度随着地质介质的强度和完整性而变化。

4.3 监测数据的预处理与噪声过滤

4.3.1 监测数据的预处理

DPM 系统输出的原始数据是以 .txt 格式的纯文本文件输出的，为了方便分析，需先转化为 Excel 等数据软件能处理的数据类型。在这些数据中，除位移和转速外，其他输出均为电压值，可读性差。因此，需根据标定方程，先将电压数据转化为可读的压力值，压力值采用 MPa 或 bar 为单位，1bar=0.102 MPa。

此外，监测数据全部为实时数据，按秒采样。时间格式为 H：M：S，在非实时曲线中，时间转化为总量统计时间数据，以 min 表示。

4.3.2 监测数据的噪声过滤

从第 3 章 3.2 节可知，监测曲线变量总是在一定范围内波动，并非平滑。曲线中噪声的干扰将降低参数之间的相关性。对监测曲线进行噪声滤波，是曲线平滑化处理的先决条件，也是提高参数间相关性的必要途径。根据变量波动幅度的大小，曲线大体上可划分为两部分。一部分反映变量的主流趋势，其特点是频率高、波幅小。在各压力曲线中，可用一条相对规整的曲线来反映变量的变化趋势，称为主流线。另一部分是曲线的噪声。其特点是频率低、波幅大，表现为脉冲形式，它是以主流线为根线垂直 X 轴发散的，称为曲线的噪声。噪声是钻进过程中，由于操作不规范或处理钻孔事故等产生的，一般与穿孔的实际过程无关，对破碎岩石不

做功。

噪声过滤是去除与钻进过程无关的脉冲数据，使参量-时间(或孔深)曲线平滑化的过程。设钻机钻凿地层时，某工作参数(变量)的标准值为 P_0，其在标准值附近的波动幅度或离差为 ΔP，则该参数变化范围为 $P \in [P_0 - \Delta P, P_0 + \Delta P]$，如图 4.1所示。

将 $P \in (P_0 - \Delta P, P_0 + \Delta P)$ 范围的脉冲峰值去除，所截留的部分即为主流线。P_0 及 ΔP 的值可以通过现场钻进试验、历史数据的统计分析或直接在 DPM 系统的实时曲线上进行确定。

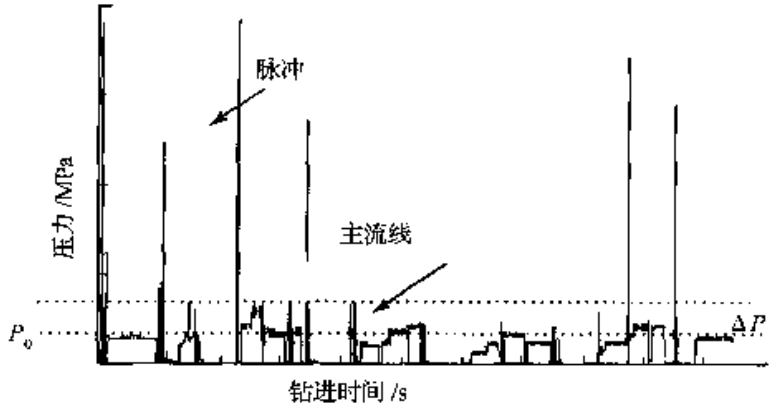


图 4.1　DPM 实时曲线的噪声过滤原理图

Figure 4.1　Analytic law of noise filtration for DPM real-time graph

确定了 P_0 及 ΔP 后，可通过高级语言编程或利用 Word 宏编制简单的宏，直接从 Excel 数据文件中读取符合要求数据，生成新的数据文件，并生成去噪后的平滑曲线。其中，Word 宏可对格式完全相同的数据文件进行快速处理，效率非常高。

最简单也是最笨的方法就是直接在实时曲线上，在带刻度的坐标图纸上描出根线，按等间距取数，并确定 P_0 及 ΔP。这种方法可以根据统计分析模型，在全过程实时曲线中提取满足统计样本要求的数据即可，可大大地减少样本的数量，并保证分析的精度。

在任意时刻 t，则平滑后曲线可写成波动方程的形式：

$$P = P_0 + P_0 \cos(\theta_0 + \theta) \tag{4.1}$$

式中：θ_0、θ 为初始角向量和变角向量。若钻头转速为 N_r，则 θ 可表示为：

$$\theta = \frac{2\pi N_r}{t} \tag{4.2}$$

值得一提的是，当钻孔方式和钻头类型一定的情况下，各工作参数的 P_0 及 ΔP 将随地层、岩性及孔深而变化。如在同一地层中钻进，在表土层、强风化层与基岩层中 P_0 及 ΔP 会有很大的不同。

4.4 基于轴压-转速-穿孔速率耦合的可钻性指标

根据可钻性指标的定义，设任意时刻的穿孔速率为 V_p，钻孔破碎岩石所消耗的能量为 E_s，则可钻性指标 K_d 可表示为：

$$K_d = \frac{V_p}{E_s} \tag{4.3}$$

K_d 的物理意义为：在一定条件下，岩石吸收 E_s 大小的能量，破碎单位体积的岩石，并使钻孔推进一个单位的深度。

若从时刻 t_1 到时刻 t_2，钻头位移从 H_1 到 H_2，则：

$$V_p = \frac{H_2 - H_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \tag{4.4}$$

钻头破碎的体积 V_b 为：

$$V_b = \frac{\pi \Delta H}{4}(D_2^2 - D_1^2) \tag{4.5}$$

式中：当岩芯钻进时，D_2 为钻孔外径，与所钻凿地层的岩性有关[113]；D_1 为岩芯外径。当为破坏性钻进时，$D_1 = 0$。

又设 t 时刻施加在钻具或钻头上的有效轴压为 T_e，则：

$$T_e = WOB \cdot \cos\alpha + T_d - T_u \tag{4.6}$$

式中：WOB 为 t 时刻钻具的重量；α 为钻孔轴线方向与铅直线的夹角。垂直钻孔时，钻孔轴线与铅直线重合，$\alpha = 0$；水平钻孔时，钻孔轴线与铅直线垂直，$\alpha = 90°$。T_d、T_u 分别为 t 时刻作用于钻具上的下向轴推力及上向调压力。

钻机所产生的能量由两部分组成：由钻具重量、轴压力及调压力组成的有效轴推力随钻头钻进位移所做的功 E_e；以及由钻机旋转所做的功 E_r。根据能量守恒原理，钻机所产生的能量用以克服钻具与孔壁、钻井液及岩屑之间的摩擦阻力；钻头与孔底岩石、钻头体侧向与孔壁等的摩擦阻力所需要的能量 E_f，以及破碎岩石所需要的能量 E_p。用公式表示为：

$$E_e + E_r = E_f + E_p \tag{4.7}$$

则

$$E_p = E_e + E_r - E_f \tag{4.8}$$

考虑到能量的传递效率，上式可进一步简化为：

$$E_p = K_1 E_e + K_2 E_f \tag{4.9}$$

式中：K_1、K_2 分别为有效轴推力和转矩所做的功对岩石破碎的贡献率。

从时刻 t_1 到时刻 t_2 的 Δt 时间内，有效轴推力和转矩用于破碎岩石所消耗的功分别由下式确定：

$$E_T = T_e V_p \Delta t \tag{4.10}$$

$$E_r = M N_r \Delta t \tag{4.11}$$

式中：M 为作用于钻头的力矩。

将公式(4.10)、式(4.11)代入公式(4.9)，可得破碎单位体积所需的能量，即比能公式为：

$$E_s=\frac{4(K_1T_eV_p+K_2MN_r)}{\pi(d_2^2-d_1^2)V_p} \tag{4.12}$$

式中：d_1、d_2 为钻头的内直径及外直径。同样，当破坏式钻孔时，$d_2=0$。

将式(4.12)代入公式(4.3)，得可钻性指标的计算公式如下：

$$K_d=\frac{4(K_1T_eV_p+K_2MN_r)}{\pi(d_2^2-d_1^2)} \tag{4.13}$$

又因为力矩和有效轴压呈线性关系[14,15]，则可钻性指标可进一步表示为：

$$K_d=\frac{4T_e(K_1V_p+K_2K_3N_r)}{\pi(d_2^2-d_1^2)} \tag{4.14}$$

式中：K_3 为力矩与轴压之间的比例系数。

公式(4.14)可进一步用自然对数表示为：

$$\ln(K_d)=\ln\left[\frac{4T_e(K_1V_p+K_2K_3N_r)}{\pi(d_2^2-d_1^2)}\right] \tag{4.15}$$

公式(4.14)即是有效轴压、转数和穿孔速率耦合的可钻性指标预测模型。一旦 K_1、K_2 及 K_3 确定，就可直接根据钻进工作参数确定所穿透地层的可钻性指标。

从公式(4.14)可知，对于一定的钻头而言，所穿透地层岩石的可钻性由有效轴压、转速和穿孔速率确定。也就是说，有效轴压、转速和穿孔速率的变化将反映地层岩性的变化，根据这些参数的变化，可以实现对地层的实时识别。这为 DPM 系统监测数据的地层识别奠定了重要的理论基础。

研究表明，对于垂直钻孔，当钻头类型及孔径一定时，轴压力、调压力、转速及冲洗水压等钻机工作参数与穿透地层的岩性有关。在同一岩性的地层中，轴压力与调压力的基本规律是：钻进开始时，钻具自身重量最小，所需的轴压力最大，没有调压力。随着孔深的增大，钻具自重增加，轴压将随孔深增大而减小。当钻进到一定深度，钻具自身重量的增加将达到所需的有效轴压力。此时，轴压力和调压力均为 0。这种状态称为临界状态，对应的深度为临界深度。根据岩石破碎的比功理论，在地层岩性相同的条件下，破碎单位体积岩石所需的能量是一定的[6]。因此，不同岩性的地层所需的有效轴压力是不同的。即使是相同的钻机和机具，临界深度也不同。一般而言，在垂直钻孔中，轴压力逐渐减小，调压力则逐渐增大。为了获得最优的穿孔效率，轴压力、调压力及钻具自重三者间在钻进过程中，始终需要保持在有效轴压力值的附近。在有效轴压下，增大转速将提高穿孔速率。过大或过小的轴压都对穿孔速率不利，三者之间必须维持一种协调的关系。

4.5 可钻性指标对地层识别的敏感性

对于标准化的钻具(钻头)和钻凿方式,在特定的岩石中,穿孔速率是恒定不变的,且比功为常量。两个不变量的比值仍是常量。说明在特定的地层岩性中,可钻性指标所反映的特征值是恒定的。相反,如果地层岩性发生了改变,穿孔速率和破碎比能也将随之发生改变。由于穿孔速率随岩石强度和硬度指标的增高而降低,破碎比能随岩石强度及硬度指标的增高而增大。所以,穿孔速率与比能随地层岩石的物理力学性质的变化是互逆的。可见,穿孔速率与比能的比值——可钻性指标的梯度降将随岩石强度及硬度指标的增大而减小,敏感性是非常显著的。可钻性指标对地层识别的分辨能力可由敏感性进行检验。

根据定义,利用公式(4.3),设在深度 H 或 t 时刻,钻头从 A 地层到 B 地层,穿孔速率由 V_p 改变为 $V_p+\Delta V_p$,破碎比能由 E_p 改变为 $E_p+\Delta E_p$,则敏感性 K_s 为:

$$K_s=\frac{K_{d,B}-K_{d,A}}{K_{d,A}}=\frac{\dfrac{\Delta V_p}{V_A}-\dfrac{\Delta E_s}{E_A}}{1+\dfrac{\Delta E_s}{E_A}} \tag{4.16}$$

根据公式(4.16),若钻凿地层从软(A)到硬(B),则 $V_B<V_A$,$\Delta V_p<0$;而 $E_B>E_A$,$\Delta E_s>0$。所以,公式(4.16)的分子 $\dfrac{\Delta V_p}{V_A}-\dfrac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒小于 0,而分母 $1+\dfrac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于 1。可钻性指标的敏感性系数恒小于 0。

若钻凿地层从硬(A)到软(B),则 $V_B>V_A$,$\Delta V_p>0$;而 $E_B<E_A$,$\Delta E_s<0$,公式(4.16)的分子 $\dfrac{\Delta V_p}{V_A}-\dfrac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于 0,而分母 $1+\dfrac{\Delta E_s}{E_A}=\dfrac{E_B}{E_A}$ 恒小于 1,可钻性指标的敏感性系数恒大于 0。

因此,当地层岩性发生变化时,可钻性指标的敏感性系数就不可能等于 0。这意味着只要地层岩性发生改变,可钻性指标将随之发生改变。可见,可钻性指标对地层岩性的识别是显著的。

又若在不同岩性的地层中,具有相同的穿孔速率,但破碎比能不同(因构成岩石的颗粒或晶格、胶结状态、物质成分及结构不同)。可钻性指标的识别能力如何?同样,按上述两种情况进行分析。

若从相似地层 A 到钻凿地层 B,但 $V_B=V_A$,$\Delta V_p=0$;如果 $E_B>E_A$,则 $\Delta E_s>0$。所以,公式(4.16)的分子 $\dfrac{\Delta V_p}{V_A}-\dfrac{\Delta E_s}{E_A}$ 还是恒小于 0,而分母 $1+\dfrac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于 1。可钻性指标的敏感性系数恒小于 0。

此时,如果 $E_B<E_A$,则 $\Delta E_s<0$。所以,公式(4.16)的分子 $\dfrac{\Delta V_p}{V_A}-\dfrac{\Delta E_s}{E_A}$ 恒大于

0，而分母 $1+\frac{\Delta E_s}{E_A}=\frac{E_B}{E_A}$ 恒小于 1。可钻性指标的敏感性系数恒大于 0。

综上分析，即使穿孔速率相同，可钻性指标的敏感性系数也不可能等于 0。可见，在地层岩性不同，但物理力学特性相似、穿孔速率相同的地层中穿孔时，可钻性指标的敏感性也是显著的，同样可以对地层进行识别。以上也进一步说明了用穿孔速率作为可钻性指标在理论和应用上存在的问题。

4.6　基于可钻性指标的地层识别

在地层钻进中，有效轴压 T_e、转数 N_r、穿透速率 V_p 均可以看作是孔深 h 的函数。因此，可钻性指标可用钻孔深度 h 的函数表示。设 $K_d=f(h)$，则 $f(h)$ 为隐函数。显然，可钻性指标变化的程度，可用其在单位孔深上的变化率来表征。在 K_d-h 曲线中，即为曲线斜率的变化或梯度的改变。如图 4.2 所示，设从孔深 i 位置变化到 $i+1$ 位置，则变化率为：

$$\frac{\Delta K_{d,i}}{\Delta h_i}=\frac{K_{d,i-1}-K_{d,i}}{h_{i+1}-h_i} \tag{4.17}$$

当 $\Delta h\to 0$ 时，可用 $f(h)$ 的导数 K_d' 表示为：

$$K_d'=\lim_{\Delta h\to 0}\frac{\Delta K_d}{\Delta h}=f(h) \tag{4.18}$$

由于 $f(h)$ 为隐函数，因此公式(4.18)可进一步用偏导数表示为：

$$K_d'=f(h)=\frac{\partial T_d}{\partial h}\cdot\frac{\partial N_r}{\partial h}\cdot\frac{\partial V_p}{\partial h} \tag{4.19}$$

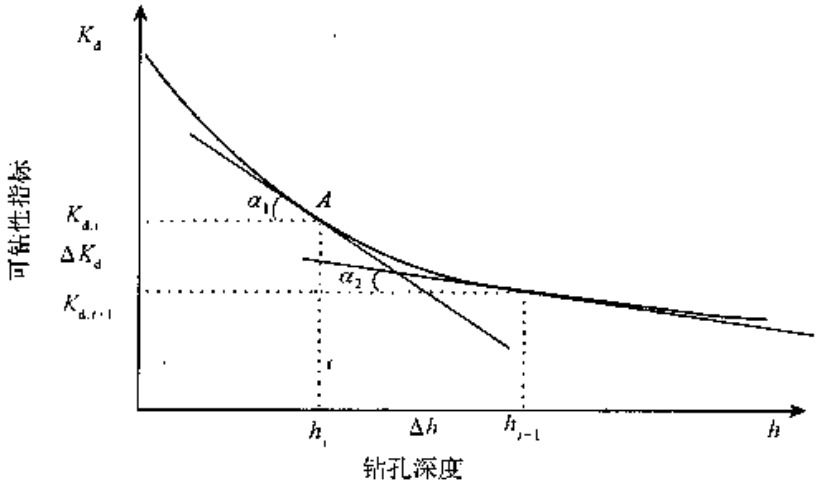


图 4.2　可钻性指标随孔深变化的几何解析

Figure 4.2　Geometrical analytic graphics of drillability index with borehole depth

公式(4.19)确定了可钻性指标随钻孔深度变化的梯度。K_d' 的物理意义为：在某一地层中，当孔深的变化趋于无限小时，可钻性指标的变化。K_d' 的几何意义为：

K_d-h 曲线的斜率，其角度为 $\alpha=\arctan K_d'$。

根据梯度变化的大小可对所钻地层进行区划。设识别地层的分辨率为 Δh，同一地层内许可的可钻性指标的变化幅度——级值，为 ΔG_d，则由公式(4.19)得识别公式为：

$$|\Delta K_d'|=|f(\Delta h)|=|f(h_i+\Delta h)-f(h_i)|\geqslant\Delta G_d \tag{4.20}$$

这里，分辨率是指系统能识别的最小厚度。当 $\Delta h\to 0$ 时，为连续、动态识别模式。ΔG_d 的物理意义为：当孔深发生 Δh 的变化时，属于同一岩性地层的可钻性指标所允许变化的最大幅度。若超出了 ΔG_d 值，则属于另一岩性的地层。其几何意义为：在 K_d-h 曲线中，当自变量发生的变化为 Δh 时，曲线斜率变化所允许的最大值。

根据图 4.2，公式(4.20)可用角度表示为：

$$|\Delta\alpha_d|=|\arctan\alpha_2-\arctan\alpha_1|\geqslant\arctan\Delta G_d \tag{4.21}$$

公式(4.21)反映了从孔深 h_i 到 h_{i+1} 时，K_d-h 曲线方向的变化。如果孔深发生的变化量为 Δh 时，K_d-h 曲线的方向改变了 $\arctan\Delta G_d$，则说明地层的岩性发生了显著变化，可以判为另一属性的地层。

在地层界面处，岩性的改变有两种情况，一是发生根本性的改变，岩体的物质组成、结构等完全不同，物理力学性质截然不同。因此，在界面处岩体抵抗机械破坏的性质也完全不同。在 K_d-h 曲线上，表现为曲线的方向发生突变。另外是渐变形式，物质分异面并不明显，在界面附近存在过渡带或区。在 K_d-h 曲线上，表现为曲线沿原来的方向走向，没有明显的改变。此外，结构面、滑移面以及水、气、油等的与岩体的分界面，也可视为物质分异面。广义地，可以归为第一种情况。

地层界面识别参数 ΔG_d 的设置必须满足突变界面和渐变界面的有效标识。理论上，ΔG_d 的设置不受任何限制，可设置为无限小。ΔG_d 越小，精度越高。但从应用的角度，ΔG_d 设置太小，标识的界面多，不能把主界面和次界面有效地分开。因此，ΔG_d 的设置以满足研究目标或工程要求为前提，通过实际钻进标定后确定。

传统的可钻性分级只针对岩石，且钻孔的可钻性剖面是间断的和静态的。DPM 系统对岩体的可钻性分级是连续的、动态的，可以获得钻孔剖面的可钻性曲线。

除了根据可钻性指标及其级值将岩石加以区别外，还需对物质分异面以外的其他界面进行识别。这些界面包括结构面、滑移界面以及岩溶空洞、硐室、地下水、石油、天然气等固-液相、固-气相界面，包括了所有穿透的地层，如表土层钻进。因此，可钻性指标比传统的概念涵盖的范围更宽。

表 4.1 是我国石油部门的可钻性分级指标，它以穿孔速率和压入硬度为可钻性指标，按软、中、硬将岩石划分为十级。

表 4.1　我国石油部门岩石可钻性分级标准(1987)

Table 4.1　Rock classification standard by drillability in petroleum industry (China, 1987)

岩石分类	软岩				中硬岩			硬岩		
可钻性分级	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
可钻性 /(m·h^{-1})	≥2.0	2.0～1.0	1.0～0.5	0.5～0.3	0.3～0.1	0.1～0.06	0.06～0.03	0.03～0.01	0.01～0.008	0.008～0.004
岩石硬度 /MPa	≤100	100～200	200～500	500～700	700～1500	1500～2100	2100～2500	2500～3400	3400～3500	3500～3700

注：表中的硬度为压入硬度。

参 考 文 献

[1] White C G. 岩石可钻性指数[M]. 边蔚奇译. 北京：煤炭工业出版社，1980:4～15.

[2] 坦加耶夫 И A. 岩石的可钻性和可爆性[M]. 王维俊译. 北京：冶金工业出版社：1987：2～10.

[3] 张建平. 白云鄂博铁矿矿岩可钻性研究[J]. 金属矿山，1994，211(11):13～17.

[4] 卢春阳，狄敏燕，朱炳兰. 盐城地区可钻性分级及钻头选型[J]. 钻采工艺，2001，24(6):10～13.

[5] 闫天俊. 岩石可钻性及其在德国的研究现状[J]. 凿岩机械气动工具，2002,(1):22～27.

[6] 徐小荷，余静. 岩石破碎学[M]. 北京：煤炭工业出版社，1987.

[7] 史晓亮，段隆军，王霄，等. 微钻法进行岩石可钻性分级[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2002，3(129)：32～34.

[8] 张厚美，薛佑刚. 岩石可钻性方法探讨[J]. 钻采工艺，1999，22(1)：10～13.

[9] Spoar J R, Ledgerwood L W. Formation compressive strength estimates for predicting drillabilities and PDC bit selection[R]. SPE/IADC 29397, 1995.

[10] 杜镰，杨世良. 岩石可钻性能量法现场试验研究[J]. 西南石油学院学报，1994，16(4)：66～73.

[11] 张绍和. 一种新的岩石可钻性分析方法研究[J]. 探矿工程，1999,(6)：32～35.

[12] Liu H, Yin K K. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data [J]. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2001, 15(3): 177～203.

[13] 谭卓英，赖海辉. 冲击回转式凿岩扭矩的分析与计算[J]. 矿业研究与开发，1993(4)：19～24.

[14] 徐军，李春兰，卢文发，等. 旋转机械的功率在线测试[J]. 热能动力工程，1999，14(80)：135～140.

[15] 滕子军. 用钻进参数仪实时判层[J]. 煤田地质与勘探，2000，28(2)：58～60.

第 5 章　穿孔参数在岩土界面处的变化

利用钻机工作参数和地层性能数据进行的多变量线性回归表明，影响钻速最主要的因素是钻头类型、工作参数以及所穿透地层的特性[1]。在石灰岩和页岩中，增加转速比提高其他参数对穿孔速率的影响更大，转速是控制穿孔速率最重要的因素[2]。钻进与岩芯取样实验表明，穿孔速率及所施加的力矩随作用于钻具上的重量的增加而按指数增长，穿孔速率随钻头转速的增大而增大。然而，转速之于转矩及破碎比能的影响并不显著[3]。在大理岩、粉砂岩、花岗岩及闪长岩等的凿岩实验模拟也表明，钻机工作参数、岩石的强度与硬度以及破碎比功之间存在合理的匹配关系[4~9]。在褐煤中，单轴抗压强度、抗拉强度、内聚力、阻抗与穿透速率之间存在一定的关系。其中，最主要的是单轴抗压强度，可以用以估计轴压、转速和穿孔速率[10]。

以上研究表明，钻孔参数与可钻性指标之间存在一定的关系。但国内外对各参数的研究是基于提高穿孔速率、优化钻头选择为目的而进行的实验室模拟。由于岩芯样本的限制，使得可钻性数据离散、随机、有限且代表性差。所以，基于岩芯样本的可钻性实验所获数据进行的线性回归是局部的，很难反映钻孔剖面全过程的可钻性变化。对于有限、离散、随机或缺失的样本数据，如果采用灰色数据生成方法，建立灰色预测模型，可望提高可钻性预测的精度。

为了克服岩芯实验的上述不足，现场测井数据被用来进行可钻性预测[11~15]。显然，测井或录井数据将大大增加数据点数，增大样本容量，其随机性、离散性和有限性得到了改善。目前测井数据大多来自于声波测井。但根据声波时差或纵波速率所获得的数据，是滞后于钻孔的，也并非随钻的实时数据，且受岩体结构的复杂性及不适当参数化的影响，数据亦存在随机性和离散性，其可钻性估计仍然存在问题。

为了解决有限数据样本及离散性问题，灰色模型[16]、多组判别分析[17]、模糊识别模型[18,19]、人工神经网络方法[20]及组合数据方法等用于钻速及可钻性预测模型的建立。

其中，判别分析可根据已知岩石的级别判别未知的岩石级别，但要求组内观察值呈正态分布，且各协方差矩阵没有显著差别。模糊识别模型中，隶属函数及隶属度需凭经验确定，具有随机和不确定性。神经网络不能解决层内交叉问题，而各参数之间存在交互作用。组合数据法采用输入-输出的二元二次多项式，不能反映变量的真正机制，也没有明确的物理意义。而且，变量之间的关系必须在建模前确

定，这往往难以实现。显然，在采用某种数学方法进行建模时，样本数据首先需满足该方法的必要条件。

无论是实验室模拟还是现场测试，现行的可钻性分析均是在已知地层岩性的条件下进行的，是根据岩性和可钻性指标来选择钻头和编制钻进计划等。而现在需要在一定的钻进条件下，根据钻进工作参数及穿孔速率等参数的变化，确定地层的可钻性指标和岩性。

在 DPM 系统的钻孔过程中，数据采集系统按秒读数，所监测的数据为时间序列数据，具有数据连续、样本海量的特点。因此，采用时间序列法进行相关性分析。

5.1　穿孔作业特征及 DPM 系统的安装

5.1.1　穿孔作业特征

试验的钻探机为 R-20 型回转式钻机。钻机的钻孔原理是：钻头在一定的轴压作用下，和岩石保持完全接触；在钻机回转机构的作用下，钻头旋转破碎岩石；排粉机构将破碎的岩屑排出孔外。钻具每推进一个循环，再加长钻杆，如此循环直至设计的钻孔深度。在钻进过程中，轴压是由钻机的调压机构和钻具自重来提供的。合理的轴压是保证正常钻进的关键。钻头破碎岩石的扭矩是由钻机上的回转电机来实现的。排渣是由排粉机构即冲洗系统来完成的，这里采用湿式钻孔，排渣液（钻孔液）为清洁水。通常，钻机有两种工作方式，即高轴压-低转速或低轴压-高转速。

钻进采用直径 ϕ115 mm 金刚石钻头和 T2-101 双筒岩芯套管，岩芯直径为 84 mm，钻杆单重为 58.4 kN·m^{-1}。

5.1.2　DPM 系统的安装

DPM 系统的安装原理参见图 2.1。在安装 DPM 前，为确保采集数据的准确，对 DPM 系统的传感器进行标定。安装后，试运行钻探机以检查其液压油路、各传感器的连接和 DPM 采集系统，当确认一切正常后，进入监测状态。DPM 系统对钻进过程进行全程监测。

5.2　穿孔参数变化的基本规律

5.2.1　轴压随孔深变化的全过程曲线

图 5.1～图 5.3 是不同风化花岗岩场址典型监测钻孔中，作用于钻头上的有

效轴压随钻头推进位移或孔深的全过程变化曲线。

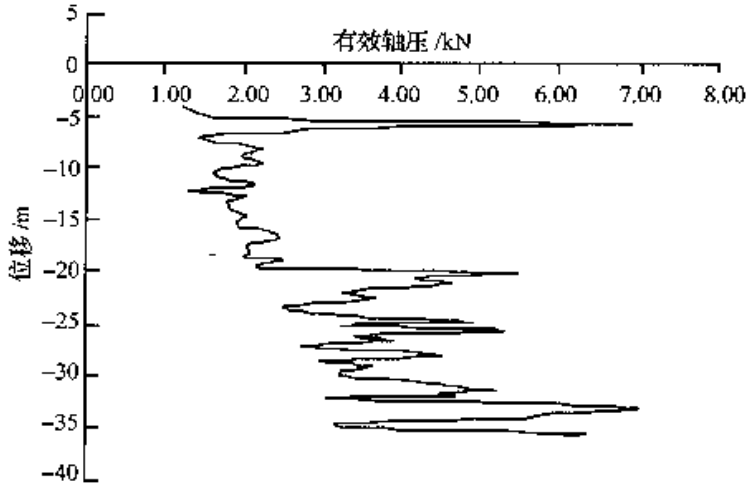


图 5.1 典型钻孔 BH-1 中有效轴压随钻头位移的变化

Figure 5.1 Change of effective thrust force with displacement of bit in the typical borehole No. BH-1

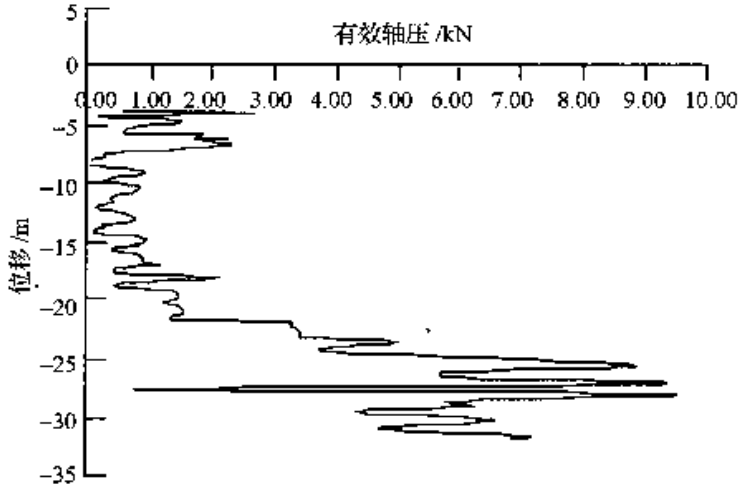


图 5.2 典型钻孔 BH-2 中有效轴压随钻头位移的变化

Figure 5.2 Change of effective thrust force with displacement of bit in the typical borehole No. BH-2

轴压作用是保证钻头与孔底岩石有效接触，并使钻头压入岩石一定深度，同时保证在钻机回转过程中，钻具不致回弹。轴压过大，会增大孔底摩擦，增大扭矩，造成卡钻和钻具失效；轴压过小，钻齿不能压入岩石，达不到破碎岩石的效果，所以必须维持合理的轴压。

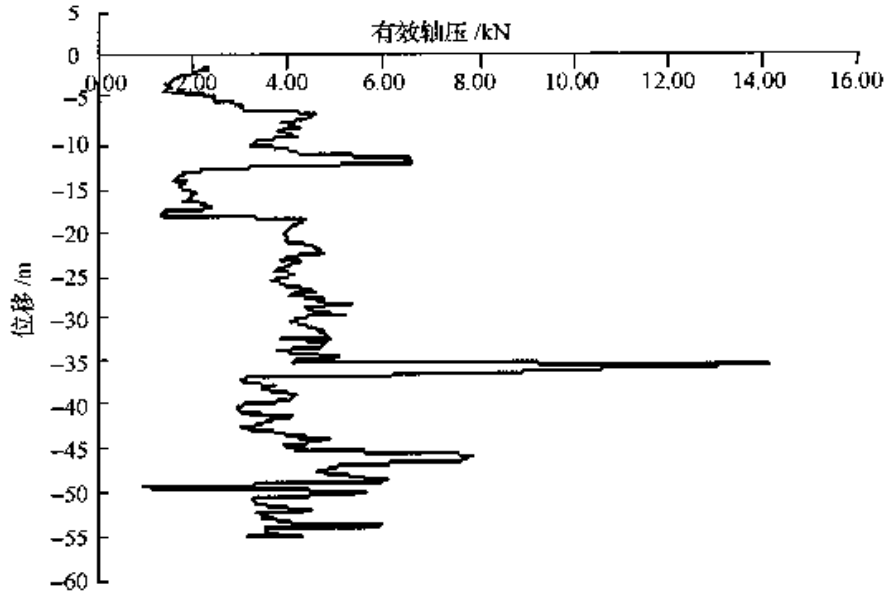


图 5.3　典型钻孔 BH-3 中有效轴压随钻头位移的变化
Figure 5.3　Change of effective thrust force with displacement of bit in the typical borehole No. BH-3

5.2.2　钻具转速随孔深变化的全过程曲线

R-20 属旋转式破岩，钻孔的动力主要来自钻机回转电机产生的扭矩。图 5.4～图5.6 是三种地层中典型钻孔 BH-1、BH-2 及 BH-3 钻头转速随钻头推进位移的变化曲线。

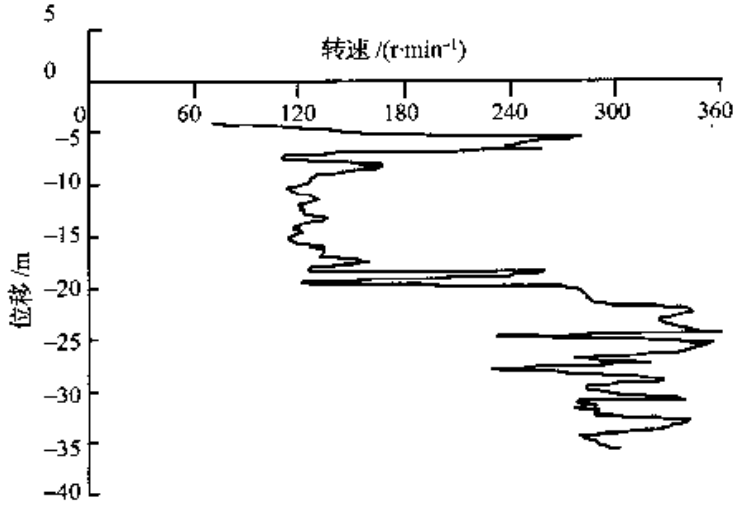


图 5.4　典型钻孔 BH-1 中钻头转速随钻头位移的变化
Figure 5.4　Change of rotational speed with displacement of bit in the typical borehole No. BH-1

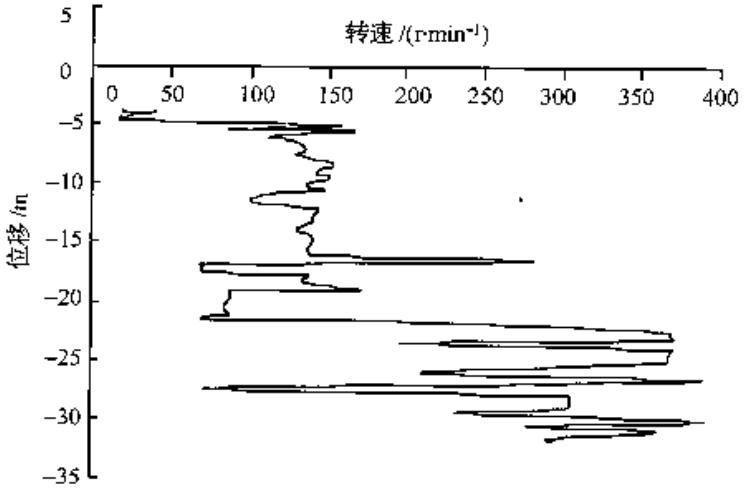


图 5.5 典型钻孔 BH-2 中钻头转速随钻头位移的变化

Figure 5.5 Change of rotational speed with displacement of bit in the typical borehole No. BH-2

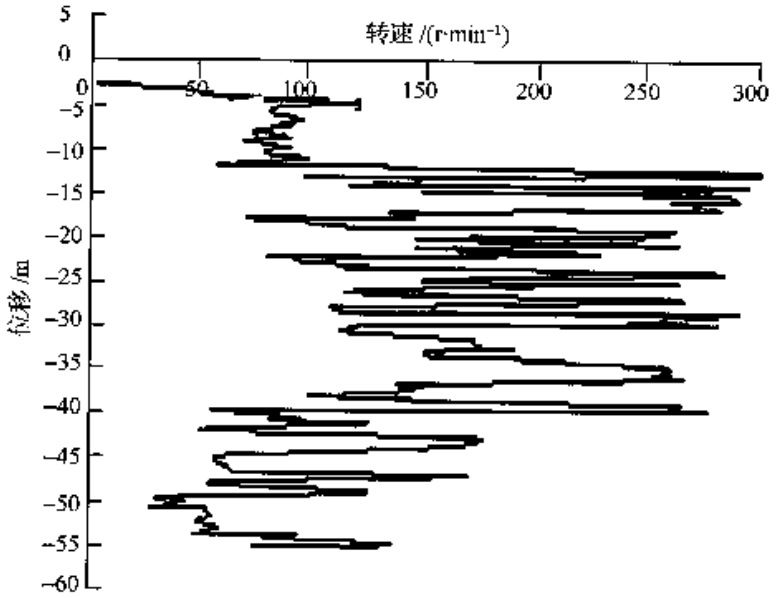


图 5.6 典型钻孔 BH-3 中钻头转速随钻头位移的变化

Figure 5.6 Change of rotational speed with displacement of bit in the typical borehole No. BH-3

5.2.3 冲洗压力随孔深变化的全过程曲线

图 5.7～图 5.9 是钻进过程中冲洗压力随孔深的变化曲线。

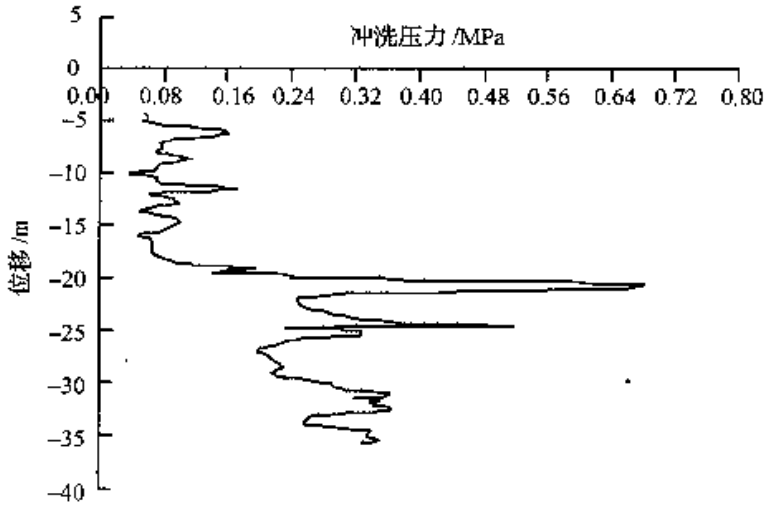


图 5.7　典型钻孔 BH-1 中冲洗压力随钻头位移的变化

Figure 5.7　Change of flushing pressure with displacement of bit in the typical borehole No. BH-1

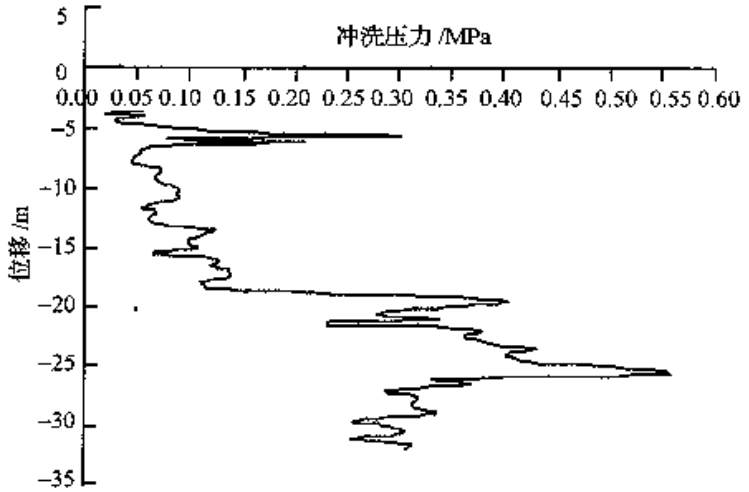


图 5.8　典型钻孔 BH-2 中冲洗压力随钻头位移的变化

Figure 5.8　Change of flushing pressure with displacement of bit in the typical borehole No. BH-2

冲洗水的作用除排渣外，可润湿孔壁起到护壁的作用。同时，润湿孔底岩石，提高穿孔效率并降低钻头温度，减少磨损。

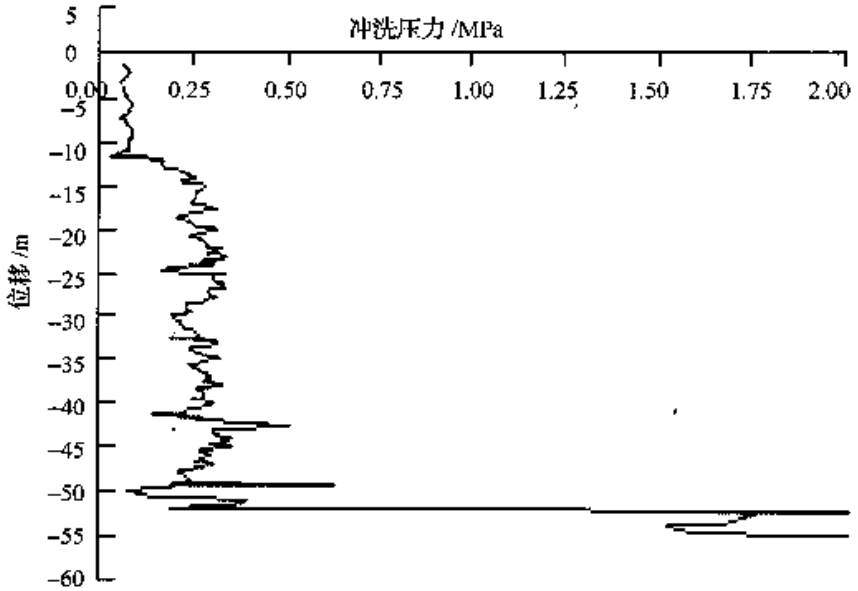


图 5.9 典型钻孔 BH-3 中冲洗压力随钻头位移的变化

Figure 5.9 Change of flushing pressure with displacement of bit in the typical borehole No. BH-3

5.2.4 钻头位移随钻进时间变化的全过程曲线

图 5.10～图 5.12 是钻头位移随钻进时间的变化关系曲线。曲线的斜率反映钻头的穿孔速率。因此，位移-时间曲线实际上反映的是钻头穿孔速率的变化。

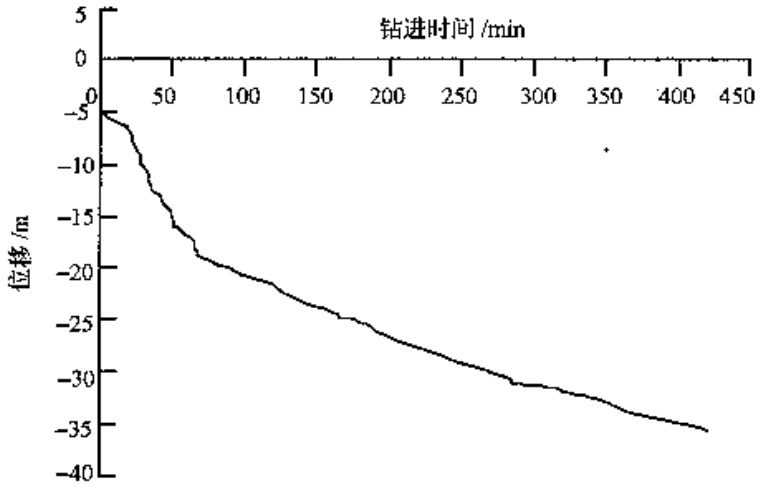


图 5.10 典型钻孔 BH-1 中钻头位移随钻进时间的变化

Figure 5.10 Change of displacement of bit with drilling time in the typical borehole No. BH-1

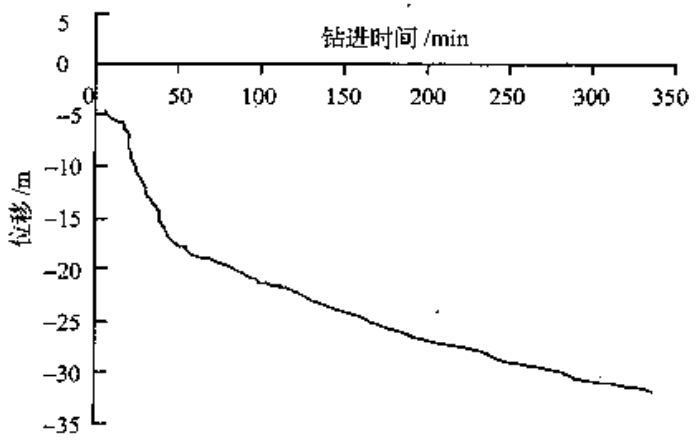


图 5.11　典型钻孔 BH-2 中钻头位移随钻进时间的变化

Figure 5.11　Change of displacement of bit with drilling time in the typical borehole No. BH-2

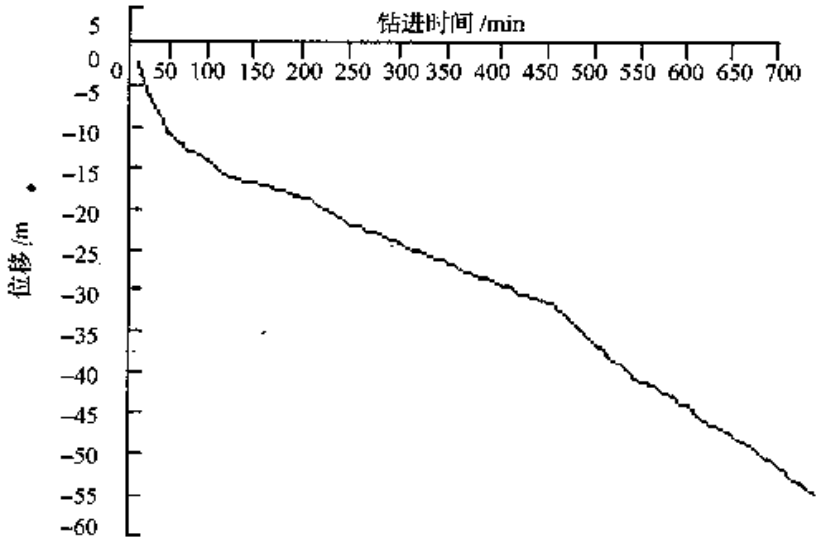


图 5.12　典型钻孔 BH-3 中钻头位移随钻进时间的变化

Figure 5.12　Change of displacement of bit with drilling time in the typical borehole No. BH-3

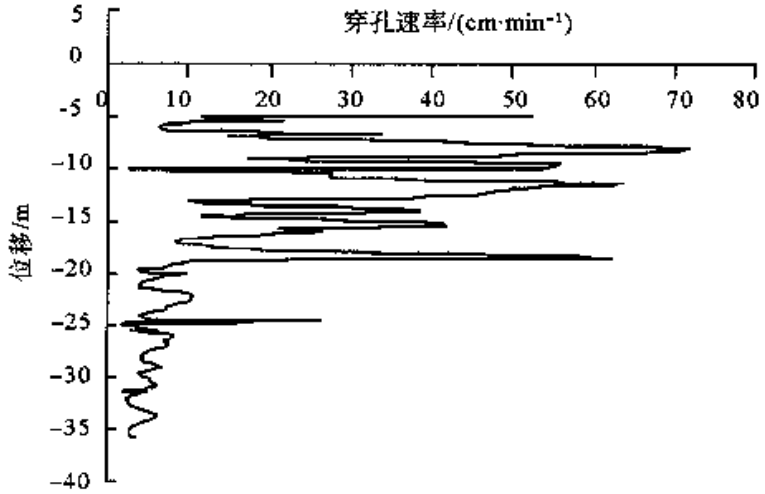


图 5.13　典型钻孔 BH-1 中钻头穿孔速率随钻进位移的变化

Figure 5.13　Change of penetrating rate of bit with drilling displacement in the typical borehole No. BH-1

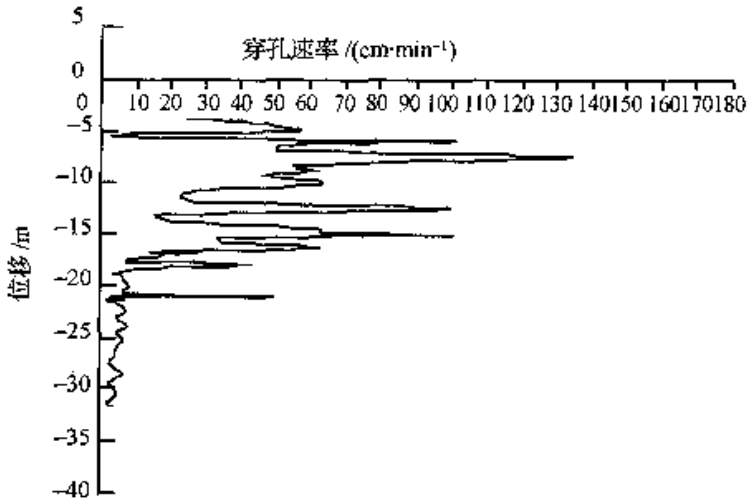


图 5.14 典型钻孔 BH-2 中钻头穿孔速率随钻进位移的变化

Figure 5.14 Change of penetrating speed of bit with drilling displacement in the typical borehole No. BH-2

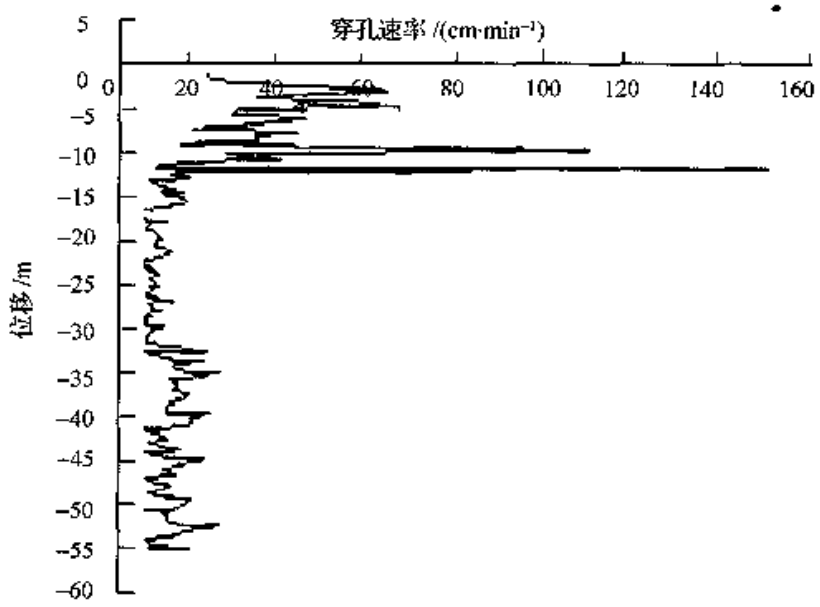


图 5.15 典型钻孔 BH-3 中钻头穿孔速率随钻进位移的变化

Figure 5.15 Change of penetrating rate of bit with drilling displacement in the typical borehole No. BH-3

5.3 岩土工程界面及其穿孔参数

5.3.1 界面值与岩性

传统的岩土工程勘探是采用钻孔人工录孔的方法进行的。通过标准触探试

验、点载荷试验和钻孔岩芯的岩性鉴别，获得各钻孔岩性界面值。普通风化花岗岩地层、充填土风化花岗岩地层及复杂风化花岗岩地层典型钻孔的试验结果如表 5.1、表 5.2 及表 5.3 所示。

表 5.1　普通风化花岗岩中手工和 DPM 系统所获得的岩性界面深度值(BH-1)

Table 5.1　Depth values at lithology Interfaces from manual and DPM records in the general weathered granite(BH-1)

手工获得的界面深度值/m	岩性分布	分级	监测系统获得的界面深度值/m
1.90～2.00	充填土	Fill	—
2.00～5.10	细及粗粉沙土	V	2.000～5.360
5.10～6.00	中及轻度风化粗粒花岗岩	III/II	5.360～6.670
11.00～16.10	细及粗粉沙土	V	11.320～15.760
16.10～18.90	粗粉沙土	V/IV	15.760～18.580
18.90～19.60	中及轻度风化粗粒花岗岩	III/II	18.580～19.500
19.60～19.95	高度风化花岗岩	IV	19.500～19.950
19.95～24.80	中及轻度风化粗粒花岗岩	III/II	19.950～24.420
24.80～25.40	高及中度风化粗粒花岗岩	IV/III	24.420～24.870
25.40～31.37	轻度风化粗粒花岗岩	II	24.870～31.080
31.37～31.70	轻度风化细至中粒花岗岩脉	Vein#	31.080～31.920
31.70～35.80	轻度风化粗粒花岗岩	II	31.920～35.670

#为轻度风化结晶花岗岩岩脉。

表 5.2　充填土风化花岗岩中手工和 DPM 系统所获得的岩性界面深度值(BH-2)

Table 5.2　Depth values at lithology Interfaces from manual and DPM records in the weathered granite with earth fill(BH-2)

手工获得的界面深度值/m	岩性分布	分级	监测系统获得的界面深度值/m
0.00～4.00	充填土	Fill	0.000～3.866
4.00～5.00	充填土	Fill	3.866～5.000
5.00～5.60	充填土	Fill	5.000～5.420
5.60～5.90	混凝土	Concrete*	5.420～6.090
5.90～7.10	充填土	Fill	6.090～7.100
7.10～15.10	细及粗粉沙土	V	7.100～16.860
15.10～18.00	细及粗粉沙土	V	16.860～17.870
18.00～19.03	粗粉沙土	V/IV	17.870～19.000
19.03～21.20	高及中度风化粗粒花岗岩	IV/III	19.000～21.330
21.20～21.60	高度风化花岗岩	IV	21.300～21.510
21.60～21.70	轻度风化细至中粒花岗岩	Vein#	21.510～21.680
21.70～31.85	轻度风化粗粒花岗岩	II	21.680～31.868

*为旧混凝土块体，#为轻度风化结晶花岗岩岩脉。

表 5.3 复杂风化花岗岩中手工和 DPM 系统所获得的岩性界面深度值(BH-3)

Table 5.3 Depth values at lithology interfaces from manual and DPM records in the intricate weathered granite(BH-3)

手工	0～8.5	8.5～11.65	11.65～12.46	12.46～12.88	12.88～13.0	13.0～14.01
分级	V	V	IV/III	III	IV/III	III
监测	0～7.32	7.320～11.65	11.65～12.00	12.0～12.88	12.88～13.0	13.0～14.01
手工	14.2～14.71	14.71～15.78	15.78～17.7	17.7～18.0	18.0～19.0	19.0～22.52
分级	III	III	IV/III	IV	IV/III	III
监测	14.32～14.71	14.71～16.42	16.42～17.55	17.55～18.0	18.0～19.0	19.0～22.03
手工	23.3～25.95	25.95～26.18	26.18～27.0	27.0～28.6	28.6～29.79	29.79～30.1
分级	III	IV/III	III	IV/III	III	IV/III
监测	22.91～24.93	24.93～26.18	26.18～27.0	27.0～28.13	28.13～29.97	29.97～30.1
手工	33.6～36.9	36.9～37.32	37.32～39.74	39.74～41.39	41.39～41.65	41.65～44.8
分级	III/II	IV/III	III	IV/III	V/IV	IV/III
监测	32.59～35.12	35.12～38.21	38.21～39.65	39.65～41.27	41.27～41.82	41.82～43.93
手工	45.3～49.25	49.25～50.75	50.75～52.32	52.32～53.75	53.75～53.83	53.83～54.92
分级	IV/III	V	V	IV	V	IV/III
监测	45.3～49.46	49.46～50.57	50.57～52.34	52.34～53.00	53.00～53.83	53.83～55.136

表 5.3 中花岗岩的风化程度按以下原则进行分级：Fill 为充填土；V 为全风化中粒花岗岩、粗粉沙土；V/IV 为全风化至高度风化花岗岩；IV 为高度风化花岗岩；IV/III 为高度至中度风化花岗岩；III 为中度风化中粒度花岗岩；III/II 为中度至轻度风化花岗岩；II 为微风化花岗岩。

5.3.2 在界面处的穿孔参数

表 5.4 为普通风化花岗岩地层典型钻孔 BH-1 钻进过程中，在各地层岩性中穿孔参数的平均值。

表 5.4 普通风化花岗岩场址不同岩性界面中穿孔参数的平均值(BH-1)

Table 5.4 Average values of penetrating parameters in different lithology interfaces in the general weathered granite site(BH-1)

岩性分级	有效轴压力/ kN	冲洗压力/ MPa	钻头转速 / (r · min^{-1})	穿孔速率 / (cm · min^{-1})	单轴抗压强度 / MPa
V	1.239	0.08	102	35.2	0.667
V/IV	1.018	0.07	101	29.4	1.273
IV	2.613	0.20	142	5.0	2.667
IV/III	3.716	0.34	293	11.2	5.682
III/II	2.992	0.26	226	13.4	53.841
Vein	3.997	0.34	282	3.1	64.833
II	4.194	0.29	302	4.6	61.662

表 5.5 为普通风化花岗岩地层钻孔 BH-1 钻进过程中，在各地层界面处的穿孔参数值。

表 5.5　普通风化花岗岩场址不同岩性界面处穿孔参数的瞬时值(BH-1)

Table 5.5　Instantaneous values of penetrating parameters at lithology interfaces in the general weathered granite site (BH-1)

岩性界面所处深度/ m	有效轴压力/ kN	冲洗压力/ MPa	钻头转速/(r · min^{-1})	穿孔速率/(cm · min^{-1})
−5.36	3.246	0.093	247	21.7
−6.67	0.247	0.112	67	34.0
−11.00	0.399	0.074	70	27.6
−15.76	0.146	0.065	66	21.7
−18.58	2.359	0.114	126	40.0
−19.50	1.347	0.141	123	5.8
−19.95	5.460	0.248	155	5.5
−24.42	3.833	0.519	349	6.6
−24.87	1.517	0.230	232	3.2
−31.08	5.007	0.363	284	2.6
−31.92	2.705	0.341	286	2.6

表 5.6 为充填土风化花岗岩地层典型钻孔 BH-2 钻进过程中，在各地层岩性中穿孔参数的平均值。

表 5.6　充填土风化花岗岩场址不同岩性地层中穿孔参数的平均值(BH-2)

Table 5.6　Average values of penetrating parameters in different lithology ground in the weathered granite site with earth fill(BH-2)

岩性分级	有效轴压力/ kN	冲洗压力/ MPa	钻头转速/(r · min^{-1})	穿孔速率/(cm · min^{-1})	单轴抗压强度/MPa
Fill	1.299	0.120	86	35.5	0.332
V	0.609	0.092	116	50.7	0.667
V/IV	1.345	0.173	93	16.8	1.273
Concrete	1.782	0.188	126	10.4	2.667
IV	1.350	0.236	66	4.4	4.574
IV/III	1.386	0.318	87	11.6	7.323
II	5.391	0.351	289	4.9	54.681
Vein	1.960	0.274	120	2.7	67.890

表 5.7 充填土风化花岗岩场址不同岩性界面处穿孔参数的瞬时值(BH-2)

Table 5.7 Instantaneous values of penetrating parameters at lithology interfaces in the weathered granite site with earth fill (BH-2)

岩性界面所处深度/m	有效轴压力/kN	冲洗压力/MPa	钻头转速 /(r · min^{-1})	穿孔速率 /(cm · min^{-1})
−3.87	2.921	0.016	15	24.4
−5.00	0.628	0.092	153	55.6
−5.60	1.835	0.298	164	4.2
−6.09	1.827	0.209	114	90.0
−7.10	0.259	0.052	63	41.7
−16.86	1.172	0.138	65	13.8
−17.87	2.074	0.109	135	8.0
−19.00	1.273	0.355	85	3.7
−21.33	1.359	0.231	66	3.5
−21.51	1.346	0.242	66	2.5
−21.68	2.936	0.322	166	3.5

表 5.8 复杂风化花岗岩场址不同岩性地层中穿孔参数的平均值(BH-3)

Table 5.8 Average values of penetrating parameters in different ground lithology in the intricate weathered granite site (BH-3)

岩性分级	有效轴压力/kN	冲洗压力/MPa	钻头转速 /(r · min^{-1})	穿孔速 /(cm · min^{-1})	单轴抗压强度 /MPa
V	3.545	0.361	88	26.4	0.501
V/IV	4.036	0.268	114	8.4	1.273
IV	2.438	1.017	97	11.2	2.574
IV/III	4.079	0.587	161	10.0	5.826
III	3.534	0.251	220	7.4	16.237
III/II	4.400	0.251	197	10.0	43.872

表 5.9　复杂风化花岗岩场址不同岩性界面处穿孔参数的瞬时值(BH-3)

Table 5.9　Instantaneous values of penetrating parameters at lithology interfaces in the intricate weathered granite site (BH-3)

岩性界面所处深度/m	有效轴压力/kN	冲洗压力/MPa	钻头转速 /(r · min^{-1})	穿孔速率 /(cm · min^{-1})
−7.32	3.960	0.044	116	13.9
−11.65	6.512	0.016	98	150.0
−12.00	3.315	0.154	181	17.5
−12.88	3.164	0.173	126	6.1
−13.00	1.804	0.177	168	4.4
−14.01	1.631	0.254	293	10.0
−14.32	1.730	0.201	266	12.0
−14.71	1.753	0.238	168	8.1
−16.42	1.830	0.241	274	5.3
−17.55	1.430	0.280	122	8.3
−18.00	1.376	0.260	106	4.4
−19.00	4.097	0.227	265	5.8
−22.03	4.650	0.323	112	2.7
−22.91	4.077	0.323	138	4.1
−24.93	4.122	0.336	267	4.7
−26.18	3.970	0.313	147	4.9
−27.00	4.069	0.279	268	4.4
−28.13	4.634	0.292	132	5.0
−29.97	4.418	0.203	281	5.1
−30.10	4.327	0.177	148	6.3
−32.59	3.824	0.259	204	6.9
−35.12	4.097	0.299	266	20.0
−38.21	3.476	0.250	155	9.1
−39.65	3.935	0.257	278	10.7
−41.27	4.085	0.216	142	3.6
−41.82	3.641	0.244	96	4.0
−43.93	4.241	0.329	158	5.7
−45.30	4.197	0.258	87	11.5
−49.46	1.661	0.180	86	14.0
−50.57	3.802	0.187	65	4.1
−52.34	3.356	1.811	83	20.0
−53.00	3.492	1.725	89	12.5
−53.83	5.838	1.549	119	10.0

5.4 界面处的响应指标

5.4.1 穿孔参数在界面处的变化

如图 5.16 所示，当钻头在一定的有效轴压、冲洗压力、钻头转速作用下，以某种穿孔速率从岩石强度为 σ_a 的岩性地层 A，透过界面，进入强度为 σ_b 的另一相邻的岩性地层 B，其有效轴压、冲洗压力、钻头转速及穿孔速率将随之发生变化。设在岩性 A 中的穿孔参数为 P_a，在 B 中的参数为 P_b，在界面处该参数的瞬时值为 P_i，则在界面处的变化值 ΔP 可定义为该参数在界面处的瞬时值与进入界面前岩性 A 中该参数的平均值 $\overline{P}_a$ 之差值，即

$$\Delta P = P_i - \overline{P}_a \tag{5.1}$$

同理，单轴抗压强度的变化值以界面为区划标准，为岩石 B 的抗压强度减去岩石 A 的抗压强度值。

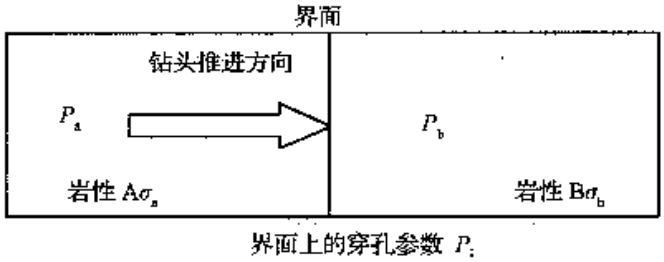


图 5.16 界面处参数变化示意

Figure 5.16 Change of penetrating parameters at the geotechnical interface

通过数据处理，获得各钻孔穿孔参数在岩性界面处的变化值如表 5.10、表5.11及表 5.12 所示。

表 5.10 普通风化花岗岩地层中穿孔参数在岩性界面处的相对变化值(BH-1)

Table 5.10 Relative change values of penetrating parameters at lithology interfaces in the general weathered granite ground(BH-1)

DPM 界面深度 /m	有效轴压力 /kN	钻头转速 /(r · min^{-1})	冲洗压力 /MPa	穿孔速率 /(cm · min^{-1})	抗压强度 UCS
−5.36	0.420	0.464	0.153	−0.626	0.991
−6.67	−1.526	−1.580	−2.352	0.680	−97.302
−11.32	0.112	−0.010	0.544	−0.279	0.026
−15.76	0.019	0.012	−0.770	−0.321	0.950
−18.58	0.069	−0.055	0.361	−1.538	0.789
−19.50	−0.655	−1.350	−0.845	−0.090	−1.426
−19.95	0.374	0.442	0.174	−0.346	0.588
−24.42	0.230	0.172	0.497	0.592	−0.635
−24.87	−0.099	−0.017	−0.473	−2.518	0.485
−31.08	0.163	−0.065	0.207	−0.743	0.094
−31.92	−0.024	0.013	−0.009	−0.231	−0.104

表 5.11　充填土风化花岗岩地层中穿孔参数在岩性界面处的相对变化值(BH-2)

Table 5.11　Relative change values of penetrating parameters at lithology interfaces in the weathered granite ground with earth fill (BH-2)

DPM 界面深度 /m	有效轴压力 /kN	钻头转速 /(r · min^{-1})	冲洗压力 /MPa	穿孔速率 /(cm · min^{-1})	抗压强度 UCS
−3.93	−1.039	−5.133	−6.430	−0.454	0.600
−5.00	0.088	0.399	−0.303	0.361	0.257
−5.42	0.688	0.439	0.598	−7.516	0.980
−6.09	−2.109	−0.101	0.099	0.884	−47.727
−7.10	0.265	0.303	−1.325	−0.274	0.350
−16.86	0.023	−0.780	0.135	0.486	0.042
−17.87	1.035	0.143	0.154	−1.225	0.959
−19.00	0.532	0.275	0.513	−3.509	0.656
−21.33	0.158	−0.394	−0.375	−2.305	−0.484
−21.51	−0.456	−0.111	−0.132	−0.090	0.686
−21.68	0.332	0.157	0.152	0.217	−0.104

表 5.12　复杂风化花岗岩地层中穿孔参数在岩性界面处的变化值(BH-3)

Table 5.12　Relative change values of penetrating parameters at lithology interfaces in the intricate weathered granite ground(BH-3)

界面深度 /m	有效轴压力 /kN	冲洗压力 /MPa	钻头转速 /(r · min^{-1})	穿孔速率 /(cm · min^{-1})	单轴抗压强度 UCS
−7.32	−0.105	−7.118	0.241	−0.899	0.178
−11.65	−0.456	−21.261	0.102	0.824	0.154
−12.00	−2.085	−2.819	0.110	0.431	0.641
−12.88	0.117	−0.450	−0.746	−0.205	−1.787
−13.00	1.261	−2.317	0.042	−1.242	0.641
−14.01	1.168	0.012	0.249	0.262	−1.787
−14.32	1.357	−1.916	0.395	0.170	0.641
−14.71	1.016	−0.051	−0.310	0.086	0.012
−16.42	0.931	−0.042	0.197	−0.406	−1.821
−17.55	1.852	−1.096	−0.320	−0.196	−1.263
−18.00	0.772	−2.918	0.085	−1.543	0.558
−19.00	−0.005	−1.580	0.392	−0.714	0.641
−22.03	−0.240	0.225	−0.964	−1.707	−1.787
−22.91	0.000	−0.814	−0.167	−1.453	0.641

续表

界面深度 /m	有效轴压力 /kN	冲洗压力 /MPa	钻头转速 /(r·min^{-1})	穿孔速率 /(cm·min^{-1})	单轴抗压强度 UCS
−24.93	−0.143	0.253	0.176	−0.563	−1.787
−26.18	0.027	−0.872	−0.095	−1.048	0.641
−27.00	−0.131	0.102	0.179	−0.692	−1.787
−28.13	−0.120	−1.008	−0.220	−0.993	0.641
−29.97	−0.200	−0.235	0.217	−0.436	−1.787
−30.10	−0.057	−2.313	−0.088	−0.594	0.867
−32.59	0.151	0.031	0.034	−0.446	0.022
−35.12	0.074	0.162	0.259	0.500	−6.702
−38.21	0.173	−1.350	−0.039	−0.091	0.641
−39.65	−0.102	0.024	0.209	0.311	−1.787
−41.27	−0.001	−1.713	−0.134	−1.805	−3.577
−41.82	0.109	−0.094	−0.188	−1.076	0.781
−43.93	−0.038	−0.785	−0.019	−0.738	−3.577
−45.30	−0.038	−0.038	−0.310	0.272	0.781
−49.46	1.456	−2.257	−0.872	0.288	−10.629
−50.57	−0.067	−0.932	−0.354	−5.415	0.180
−52.34	0.057	0.801	−0.060	−0.321	0.763
−53.00	−0.302	0.410	−0.090	0.103	−4.138
−53.83	−0.393	0.767	0.261	-1.641	0.914

5.4.2 界面上的响应指标

在岩性变化等界面处，由于地质材料的改变，岩石抗压强度、硬度、弹性模量等强度参数均将发生变化。钻机穿孔参数在岩性变化处亦会发生相应的改变。穿孔参数随岩石性质变化的关系特性称为响应关系。可用穿孔参数随岩石强度变化特征来反映。

1. 界面处的数据特征

在界面处，由于岩性的改变，强度参数会随之发生改变。例如，在某一深度 h_s 处存在岩性分界面，界面以上的材料具有 UCS 强度 σ_{c1}，界面以下的材料具有 UCS 强度 σ_{c2}。显然，一个自变量对应两个因变量。同样，穿孔参数在界面上也有如此的变化。这说明，界面处的数据会发生分岔，具有歧异性。

在界面处所需考虑的参数除岩石物理力学参数外，还有外部作用参数如轴压、转速、冲洗压力及穿孔速率等。不同的物理量具有不同的量纲，在进行响应分析时，需进行无量纲化处理。无量纲化处理的常用方法是极大化或均值化处理。这里，根据界面处参量响应特征分析的需要，采用界面处参数的相对变化率作为无量纲化指标。

2. 响应程度指标

(1) 响应度

研究发现，两个响应程度高的曲线之间，在形态上具有很强的相似性，共有峰多，非共有峰少；对于响应程度低的曲线，其相关性差，共有峰少，非共有峰相对地多。可见，在直观上，响应程度指标可以用共有峰的数量来反映。由此，穿孔参数在界面上的响应特征，可以用强度-孔深曲线为基线，考察各变量-孔深曲线的脊线形态与基线的相似性，通过共有峰的数量指标来描述。

这里，作为基准的强度参数是被响应指标，即基准变量或参考变量，其他待考察变量是响应指标。基准变量曲线称为基线，是被响应曲线；待考察变量曲线称为响应曲线。

设基线中脊线峰的总数为 N，响应曲线与基线的共有峰个量为 n，则响应程度的直观指标 R_d 可定义为：

$$R_d = \frac{n}{N} \tag{5.2}$$

共有峰数量指标虽能在总体上较直观地反映参数间的响应程度，但不能反映变量在脊线峰值点处的响应程度。因此，还需研究一个既能反映共有峰数量又能反映峰值点响应程度的综合指标。

设自变量为 x_i，因变量为 $y_{i,1}$、$y_{i,2}$，在任意界面处 A 的坐标为 A(x_i，$y_{i,1}$，$y_{i,2}$)，而该点考察变量的变化程度可用其相对变化率表示：

$$V_{r,i} = \frac{y_{i,1} - y_{i,2}}{y_{i,1}} \tag{5.3}$$

显然，无论是待考察变量还是基准变量，均是一个自变量对应两个因变量。同样，对于基准变量而言，设自变量为 x，在各界面处(x_i，$i=1,2,\cdots,n$)的因变量为 a，即基准变量如单轴抗压强度、硬度、弹性模量等强度指标，在界面处的指标的变化可用其相对变化率表示为 $V_{a,i}(i=1,2,\cdots,n)$。由于界面处基准变量的改变，待考察变量 b 将随之改变，则待考察变量在界面处的相对变化率为 $V_{b,i}(i=1,2,\cdots,n)$。由此，响应度可定义为待考察变量随基准变量(被响应变量)在界面处的相对变化率之比，记为 R_i，即

$$R_i = V_{b,i}/V_{a,i} \tag{5.4}$$

式(5.4)反映任意界面上被考察变量对基准变量的响应程度。R_i 的符号意义为：当 $R_i>0$ 为正响应；当 $R_i<0$ 时，为负响应，$R_i=0$ 时不响应。

根据响应度数值的大小，可以将响应程度划分为如下：

1) 当 $R_i=0$ 时，被考察变量对基准变量无响应，响应度为 0。说明被考察变量的变化与基准变量无关。

2) 当 $0<R_i<1$ 时，被考察变量对基准变量有一定的响应，但属于低响应区。说明被考察变量对基准变量敏感，但敏感度不高，相关性不是很大。

3) 当 $R_i=1$ 时，被考察变量与基准变量的变化一致。说明被考察变量与基准变量变化具有协同性。

4) 当 $R_i>1$ 时，被考察变量对基准变量具有很高的响应特性。说明被考察变量对基准变量非常敏感，是影响被考察变量的主要因素，相关性很高。

在岩土工程界面识别中，R_i 为位移/孔深数据序列$[R_i]$，被考察变量对基准变量的综合响应指标及响应特征由$[V_{a,i}]$及$[V_{b,i}]$序列数据的相关性分析确定。

(2) 方差分析

显然，从地表到地层某一深度的钻孔，各界面处的响应度 R_i 以地层深度为序列，构成一个位移数据序列$[R_i]$，$[R_i]$的离散与否，将反映待考察变量在各峰值点的变化与基准变量的比例关系及一致性。若$[R_i]$的变化趋于某一均值，说明在各峰值点的响应程度一致，具有很好协同性。相反，数据离散，极差或均值差偏离大，说明在各峰值点待考察变量对基准变量的响应不一，响应程度低，协同性差。对于各峰值点而言，数据序列的分布特征反映了响应曲线和基准曲线之间的相关程度。因此，对数据序列$[R_i]$的离散性或均匀性进行分析，可以反映待考察变量在界面处的响应程度。

对于数据序列$[R_i]$，记序列中的极大值为 R_{max}，均值为 R_a，则极值差 $R_{mm,i}$和均值差 $R_{aa,i}$分别为：

$$R_{mm,i}=(R_{max}-R_i) \tag{5.5}$$

$$R_{aa,i}=(R_a-R_i) \tag{5.6}$$

式(5.5)和式(5.6)反映响应程度的离散性和一致性。

$R_{mm,i}$和 $R_{aa,i}$分别生成两个新的数据序列$[R'_{mm,i}]$和$[R_{aa,i}]$，对此进行方差分析，可以反映响应程度指标的可靠性。

(3) t-检验

设界面处穿孔参数的相对变化率为一组变量，界面处岩石强度、硬度及可钻性指标等为另一组参量，前一组为响应参数，后一组为被响应参数，要考察一个响应参数与一个被响应参数之间是否存在显著差别，可以设定两个观察变量 u_i、v_i，问题即转化为回答 u_i 和 v_i 之间是否存在显著差别。根据 t-检验理论，如果两个变量在界面处的响应程度相同，则在每一对观察数据之间的差值将由随机误差产生。

差值变量可以认为是以 0 为平均值的正态分布。因此，不同变量之间的显著性差异可以通过考察 $x=u-v$ 是否遵循正态分布 $N(0,\sigma^2)$。这里，σ^2 是未知的，而 x 是一个新的独立观察变量。

以上问题可以在一定的显著性水平 $\alpha(\alpha=0.01)$下，检验下列假设来回答：假设变量 x 的平均值 $E(x)$为 0，即

$$E(x)=0 \tag{5.7}$$

检验的拒绝域为：

$$|\bar{x}|>\frac{s}{\sqrt{n}}t_{\alpha/2}(n-1) \tag{5.8}$$

式中：$\bar{x}$ 是观察样本的平均值，s 是样本的标准离差，n 是样本容量。其中，s 由下面的关系确定：

$$s^2=\frac{1}{n-1}\sum(x_i-\bar{x})^2 \tag{5.9}$$

式中：

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum x_i$$

通过设定显著性水平 α，可以检验两个观察变量之间的差异，从而确定响应程度指标沿界面变化的可靠度$(1-\alpha)$。

参 考 文 献

[1] Ersoy A, Waller M D. Prediction of drill-bit performance using multi-variable linear regression analysis[J]. Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy, Section A: Mining Industry, 1995, 104: A101～A114.

[2] Osman M E, Sabry A M. Limestone, shale penetration rate equations developed [J]. Oil and Gas Journal, 1992, 90(1): 78～81.

[3] Huang S L , Wang Z W. Mechanics of diamond core drilling of rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3-4): 612～615.

[4] Detournay E, Defourny P. Phenomenological model for the drilling action of drag bits [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1992, 29(1): 13～23.

[5] Ohno T, Karasawa H, Kosugi M, Rowley J C. Proposed practical methods to estimate rock strength and tooth wear while drilling with roller-cone bits[J]. Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, 2004, 126(4): 302～310.

[6] Wijk G. Rotary drilling prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(1): 35～42.

[7] Ersoy A. Automatic drilling control based on minimum drilling specific energy using PDC and WC bits [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section

A: Mining Technology, 2003, 112(2): A86～A96.

[8] Reddish D J, Yasar E. New portable rock strength index test based on specific energy of drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(5): 543～548.

[9] Miller D, Ball A. Rock drilling with impregnated diamond microbits, An experimental study [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1990, 27(5): 363～371.

[10] Karpuz C, Pasamehmetoglu A G, Dincer T, et al. Drillability studies on the rotary blasthole drilling of lignite overburden series[J]. International Journal of Surface Mining & Reclamation, 1990, 4(2): 89～93.

[11] Liu H, Yin K K. Analysis and interpretation of monitored rotary blasthole drill data[J]. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2001, 15(3): 177～203.

[12] 刘向君，孟英峰. 岩石可钻性和钻速预测[J]. 天然气工业，1999，19(5)：61～63.

[13] Jung S J, Prisbrey K, Wu G. Prediction of rock hardness and drillability using acoustic emission signatures during indentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1994, 31(5): 561～567.

[14] 韩来聚，李相奎，燕静，等. 碳酸盐岩地层岩石声学特性的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(14)：2444～2447.

[15] 赵军，蔡西亚，林元华. 声波测井资料在岩石可钻性及钻头选择中的应用[J]. 测井技术，2001，25(4)：305～307.

[16] 刘之的，夏宏泉，陈平，等. 基于灰色 GM(0，N)法的测井预测岩石可钻性研究[J]. 天然气工业，2004，24(11)：76～80.

[17] 李巨龙. 判别分析在岩石可钻性分级中的应用[J]. 煤田地质与勘探，1997，25(4)：61～63.

[18] 杨明奇. 应用模糊识别进行岩石可钻性分级[J]. 煤田地质与勘探，1994，22(4)：62～64.

[19] 郑文瑞，郭华，张敬之，等. 应用隶属函数对可钻性进行分级[J]. 世界地质，1998，17(2)：91～93.

[20] 薛亚东，高德利. 急于人工神经网络的实钻地层可钻性研究[J]. 石油钻采工艺，2001，23(1)：26～29.

第 6 章　穿孔参数在风化花岗岩地层中的响应特征

6.1　岩石分级与强度特征

(1) 普通风化花岗岩地层

此类地层全部为全风化花岗岩或上覆土层厚度小于 2.00 m 的花岗岩地层。此类地层的岩性随深度变化有序，风化程度依次降低，强度相对稳定，属简单风化花岗岩地层。

对普通风化花岗岩地层进行钻探取样，并根据岩石的风化程度以及岩芯力学试验，对岩石进行分级，结果如表 6.1 所示。

表 6.1　普通风化风化花岗岩分类及强度指标

Table 6.1　Classification and strength index of general weathered granite

岩石分级	分类标准	抗压强度
VI	残积土、充填土等	0.072
V	全风化	0.80
V/IV	介于全风化至高度风化之间	18.90
IV	高度风化	37.00
VI/III	介于高度风化至中等风化之间	54.90
III	中等风化	72.80
III/II	介于中等风化至微风化之间	89.75
II/I(花岗岩岩脉)	轻微风化至未风化	117.80
II	轻微风化	106.70
I	未风化/新鲜岩	117.80
VI/III(旧混凝土制件)	参考风化花岗岩确定	54.30

岩芯随地层深度的分布如图 6.1 所示。

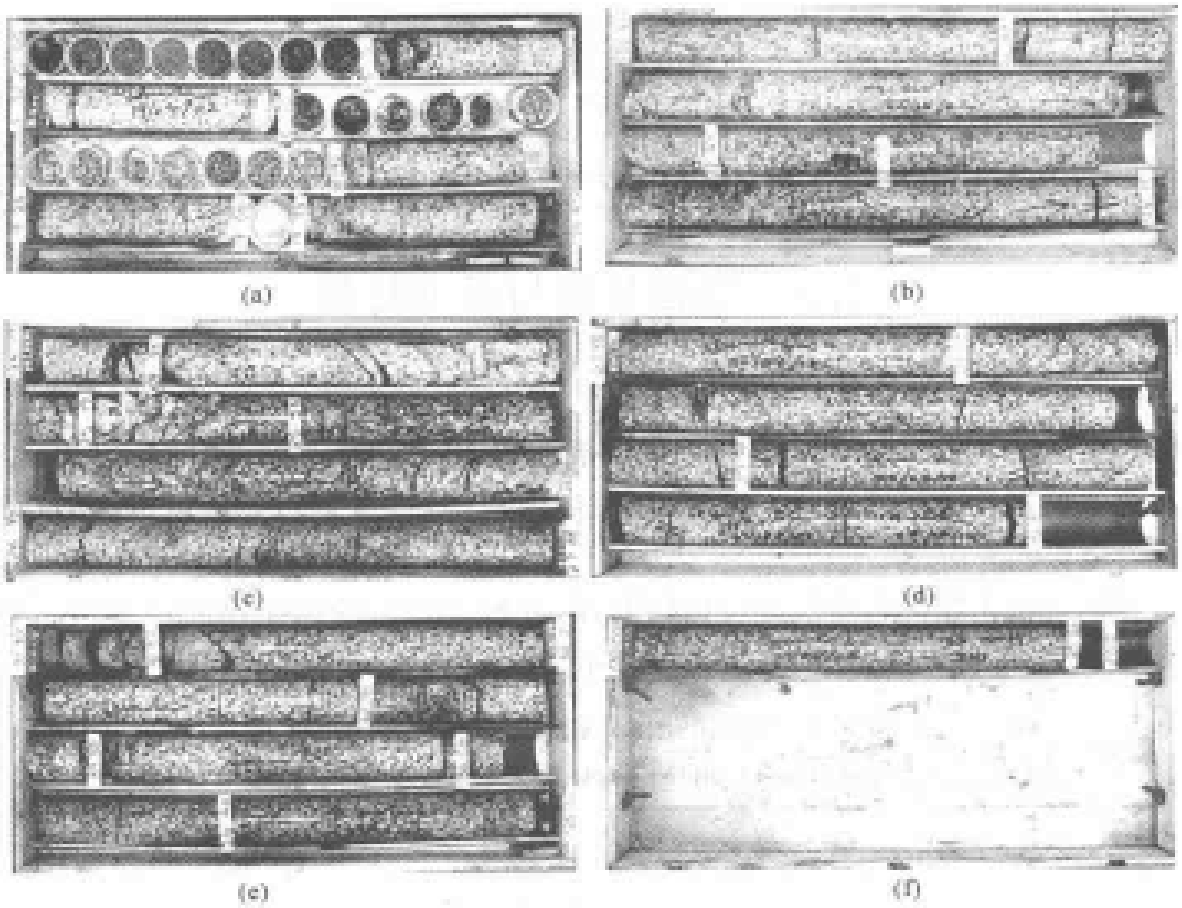


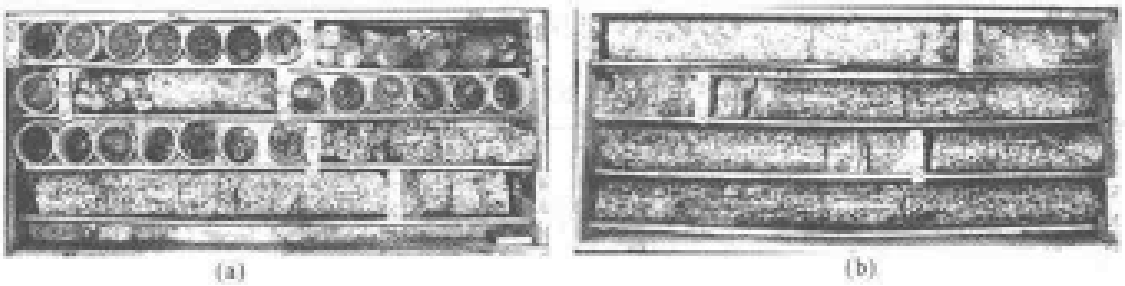
图 6.1 普通风化花岗岩地层典型钻孔 BH-1 的岩芯分布

Figure 6.1 Distribution of core samples of typical borehole No. BH-1 in the general weathered granite ground

(岩芯图片由 Department and Construction Branch, Hong Kong Housing Authority 提供,2002)

(2) 充填土风化花岗岩地层

此地层同属简单风化花岗岩地层,但在全风化花岗岩面上的上覆充填土(含冲积土,残余土等)厚度较大,达到 5.60 m,充填土与全风化花岗岩的厚度达到 17.87 m,但下覆各风化层相对简单。此外,在充填土中夹杂有人工材料混凝土制件。因此,在此类地层中存在人工界面材料。其典型钻孔的岩芯分布如图 6.2 所示,岩石分级及强度参数参见表 6.1。



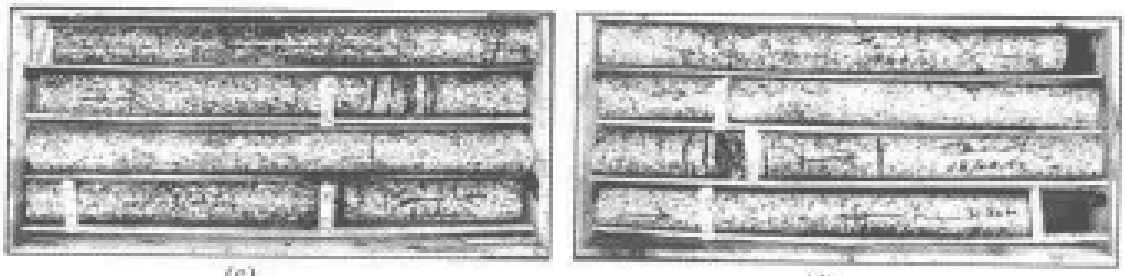


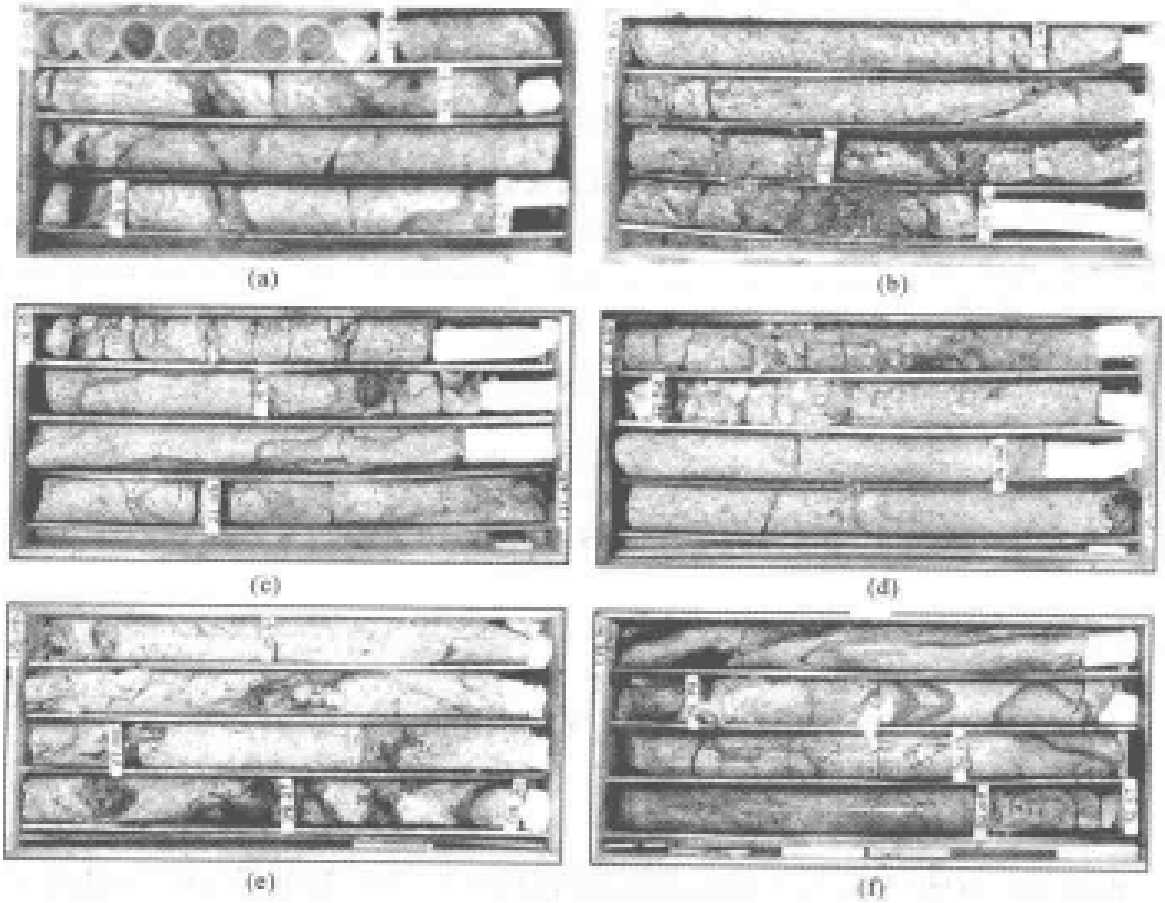
图 6.2　充填土风化花岗岩地层典型钻孔 BH-2 的岩芯分布

Figure 6.2　Distribution of core samples of typical boreholeNo. BH-2 in the weathered granite ground with earth fill

（岩芯图片由 Department and Construction Branch，Hong Kong Housing Authority 提供，2002）

（3）复杂风化花岗岩地层

在这种风化花岗岩地层中，花岗岩发生了强烈的风化蚀变，全风化花岗岩层的深度达到－11.65 m，基本无上覆表土。地层的变化比简单风化花岗岩地层复杂，表现为不同风化程度、不同强度的岩石地层交错出现，没有序次性。多数地层为高度风化至中等风化不等花岗岩，在－50 m 深度下仍出现全风化岩层。而且，岩石强度明显低于简易风化花岗岩的强度。表 6.2 是该类风化花岗岩地层岩性的分级与强度指标。图 6.3 是该类花岗岩地层中典型钻孔的岩芯样本。



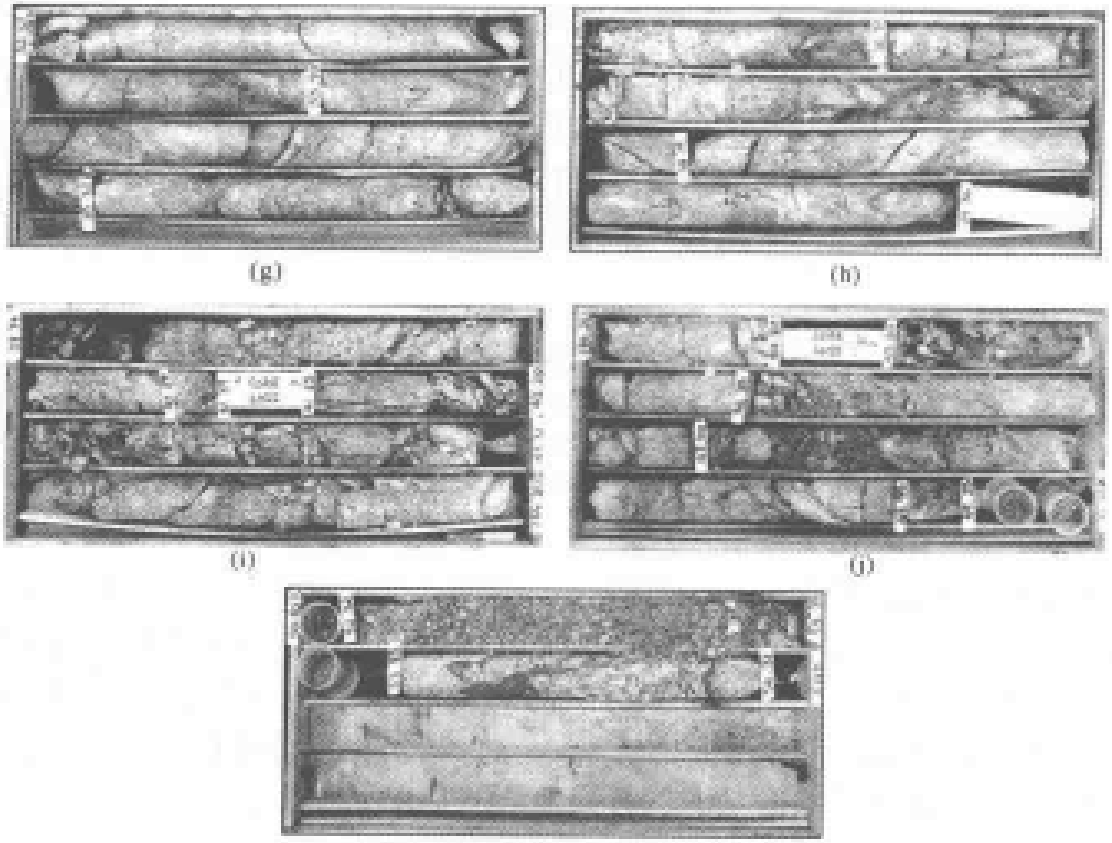


图 6.3 复杂风化花岗岩地层典型钻孔 BH-3 的岩芯分布

Figure 6.3 Distribution of core samples of typical borehole No. BH-3 in the intricate weathered granite ground

(岩芯图片由 Department and Construction Branch, Hong Kong Housing Authority 提供,2002)

表 6.2 复杂风化花岗岩分类及强度指标

Table 6.2 Classification and strength index of the intricate weathered granite

岩石分级	分类标准	抗压强度
V	全风化	0.50
V/IV	介于全风化至高度风化之间	1.27
IV	高度风化	2.57
IV/III	介于高度风化至中等风化之间	5.83
III	中等风化	16.24
III/II	介于中等风化至微风化之间	43.87
II	轻微风化	68.76
I	未风化/新鲜岩	—

6.2 穿孔参数在界面处的变化

(1) 普通风化花岗岩地层

根据第 5 章的分析,岩石强度指标是岩石物理力学参数的综合反映,能揭示工程

所需的地层特征。当所穿透地层的强度变化时，穿孔参数在界面处也将发生相应的改变。穿孔参数在地层中的相对变化率作为岩石强度的重要响应指标，能很好地反映界面处岩石强度的变化特征。因此，这里采用岩石在界面处强度指标的相对变化率作为基准响应指标进行比较。各穿孔参数在界面处的变化值如表 6.3 所示。

表 6.3　普通风化花岗岩中穿孔参数在界面处的变化指数(BH-1)

Table 6.3　The variation index of the penetrating parameters at the interfaces in the general weathered granite ground(BH-1)

界面深度监测值/m	界面深度以上的岩石级别	抗压强度的变化指数	各穿孔参数的变化指数			
			有效轴压力/kN	钻头转速/(r·min^{-1})	冲洗压力/MPa	穿孔速率/(cm·min^{-1})
−5.36	V-1	0.991	0.420	0.464	0.153	−0.626
−6.67	III/II	−97.302	−1.526	−1.580	−2.352	0.680
−11.32	V-2	0.026	0.112	−0.010	0.544	−0.279
−15.76	V-3	0.950	0.019	0.012	−0.770	−0.321
−18.58	V/IV	0.789	0.069	−0.055	0.361	−1.538
−19.50	III/II	−1.426	−0.655	−1.350	−0.845	−0.090
−19.95	IV	0.588	0.374	0.442	0.174	−0.346
−24.42	III/II	−0.635	0.230	0.172	0.497	0.592
−24.87	IV/III	0.485	−0.099	−0.017	−0.473	−2.518
−31.08	II	0.094	0.163	−0.065	0.207	−0.743
−31.92	花岗岩岩脉	−0.104	−0.024	0.013	−0.009	−0.231

(2) 充填土风化花岗岩地层

同理，各穿孔参数在界面处的变化值如表 6.4 所示。

表 6.4　充填土风化花岗岩中穿孔参数在界面处的变化指数(BH-2)

Table 6.4　The variation index of the penetrating parameters at the interfaces in the weathered granite ground with earth fill(BH-2)

界面深度监测值/m	界面深度以上的岩石级别	抗压强度的变化指数	各穿孔参数的变化指数			
			有效轴压力/kN	钻头转速/(r·min^{-1})	冲洗压力/MPa	穿孔速率/(cm·min^{-1})
−3.93	Fill-1	0.600	−1.039	−5.133	−6.430	−0.454
−5.00	Fill-2	0.257	0.088	0.399	−0.303	0.361
−5.42	Fill-3	0.980	0.688	0.439	0.598	−7.516
−6.09	混凝土材料	−47.727	−2.109	−0.101	0.099	0.884
−7.10	Fill-4	0.350	0.265	0.303	−1.325	−0.274
−16.86	V-1	0.042	0.023	−0.780	0.135	0.486
−17.87	V-2	0.959	1.035	0.143	0.154	−1.225
−19.00	V/IV	0.656	0.532	0.275	0.513	−3.509
−21.33	IV/III	−0.484	0.158	−0.394	−0.375	−2.305
−21.51	IV	0.686	−0.456	−0.111	−0.132	−0.090
−21.68	花岗岩岩脉	−0.104	0.332	0.157	0.152	0.217

(3) 复杂风化花岗岩地层

穿孔参数在此类地层界面处的变化如表 6.5 所示。

表 6.5 复杂风化花岗岩地层中穿孔参数在界面处的变化指数(BH-3)

Table 6.5 The variation index of the penetrating parameters at the interfaces in the intricate weathered ground(BH-3)

界面深度监测值/m	界面深度以上的岩石级别	抗压强度的变化指数	各穿孔参数的变化指数			
			有效轴压力/kN	冲洗压力/MPa	钻头转速/(r·min^{-1})	穿孔速率/(cm·min^{-1})
−7.32	V-1	0.178	−0.105	−7.118	0.241	−0.899
−11.65	V-2	0.154	−0.456	−21.261	0.102	0.824
−12.00	IV/III	0.641	−2.085	−2.819	0.110	0.431
−12.88	III	−1.787	0.117	−0.450	−0.746	−0.205
−13.00	IV/III	0.641	1.261	−2.317	0.042	−1.242
−14.01	III	−1.787	1.168	0.012	0.249	0.262
−14.32	IV/III	0.641	1.357	−1.916	0.395	0.170
−14.71	III	0.012	1.016	−0.051	−0.310	0.086
−16.42	III	−1.821	0.931	−0.042	0.197	−0.406
−17.55	IV/III	−1.263	1.852	−1.096	−0.320	−0.196
−18.00	IV	0.558	0.772	−2.918	0.085	−1.543
−19.00	IV/III	0.641	−0.005	−1.580	0.392	−0.714
−22.03	III	−1.787	−0.240	0.225	−0.964	−1.707
−22.91	IV/III	0.641	0.000	−0.814	−0.167	−1.453
−24.93	III	−1.787	−0.143	0.253	0.176	−0.563
−26.18	IV/III	0.641	0.027	−0.872	−0.095	−1.048
−27.00	III	−1.787	−0.131	0.102	0.179	−0.692
−28.13	IV/III	0.641	−0.120	−1.008	−0.220	−0.993
−29.97	III	−1.787	−0.200	−0.235	0.217	−0.436
−30.10	IV/III	0.867	−0.057	−2.313	−0.088	−0.594
−32.59	III/II	0.022	0.151	0.031	0.034	−0.446
−35.12	III/II	−6.702	0.074	0.162	0.259	0.500
−38.21	IV/III	0.641	0.173	−1.350	−0.039	−0.091
−39.65	III	−1.787	−0.102	0.024	0.209	0.311
−41.27	IV/III	−3.577	−0.001	−1.713	−0.134	−1.805
−41.82	V/IV	0.781	0.109	−0.094	−0.188	−1.076
−43.93	IV/III	−3.577	−0.038	−0.785	−0.019	−0.738
−45.30	V/IV	0.781	−0.038	−0.038	−0.310	0.272
−49.46	IV/III	−10.629	1.456	−2.257	−0.872	0.288
−50.57	V	0.180	−0.067	−0.932	−0.354	−5.415
−52.34	V	0.763	0.057	0.801	−0.060	−0.321
−53.00	IV	−4.138	−0.302	0.410	−0.090	0.103
−53.83	V	0.914	−0.393	0.767	0.261	−1.641

6.2.1 有效轴压力在界面上的变化

1. 普通风化花岗岩地层

典型钻孔中有效轴压力的典型特征曲线如图 6.4 所示。从图可知，从岩石强度较高的岩层进入强度较低的岩层时，在相对率-深度曲线上出现峰；相反，则出现

谷。而轴压力的相对变化率与岩石强度的变化具有相同的峰或谷，即两者享有共有峰。这说明有效轴压力的相对变化率与岩石强度的相对变化率具有很好的对应关系，在界面处的变化具有一致响应的特点。

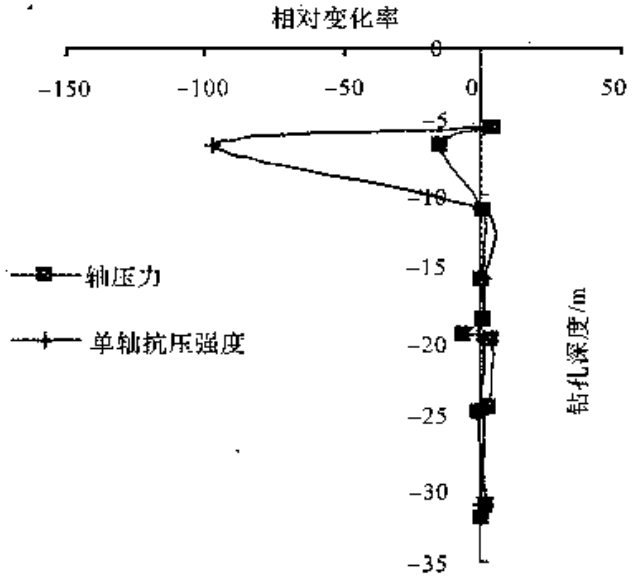


图 6.4　典型钻孔 BH-1 中有效轴压力与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.4　The variation rate of effective thrust force and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-1

从表 6.2 中可以看出，此地层的全风化花岗岩层中，夹有厚 1.31 m 的 III/II 类中等风化至微风化的花岗岩层，其下覆地层中，花岗岩的风化程度有一定的交错现象，但总体上地层的变化相对简单。在有效轴压力的变化中，81.82%的界面与岩石抗压强度具有同步增减的性质，呈正相关。在－5.36 m 处，岩石由 V 类全风化花岗岩转变为 III/II 类花岗岩，岩石强度变化指数为 0.991，有效轴压力指数为 0.420；在－6.67 m 处，岩石地层发生逆转，岩石由 III/II 类花岗岩转变为 V 类全风化花岗岩，强度剧减，有效轴压力指数为－1.526；同样，在－19.50 m 处，岩石由 III/II 类花岗岩转变为 IV 类花岗岩，岩石强度指数为－1.426，有效轴压力指数为 0.655。可见，有效轴压力增减的幅度普遍比抗压强度的变化幅度要低。

同时，结果也表明，有效轴压力对岩石强度的变化非常敏感。如在－11.32 m 深度处，抗压强度变化指数仅为 0.026，而有效轴压为 0.112。同样，在－31.08 m 处，有效轴压力的变幅也比强度的变化要大。从表 6.2 可知，在－11.32 m 处，岩层从V－2变化为 V－3，岩性基本没有变化，强度变化幅度也很小；在－31.08 m 处，岩性虽由 II 类花岗岩转变为花岗岩岩脉，但强度变化也很小。可见，有效轴压力对在强度变化小的情况下，亦是十分敏感。说明有效轴压力对岩石强度变化具有很好的响应特征。

此外，也出现了有效轴压力与岩石强度变化呈负相关的情况，这种情形占界面

总数的18.19%。如在－24.42 m处，地层由III/II类花岗岩转变为IV/III类花岗岩，岩石强度变化指数为－0.635，但有效轴压力变化指数为0.230；在－24.87 m处，岩石由IV/III类花岗岩转变为II类花岗岩，强度变化指数为0.485，但轴压力变化指数为－0.099。这可能与试验所采用的强度指标有关。因为取样的岩芯并非正好是界面处的岩芯，而是该类岩层的典型孔段。严格地说，为该类岩层的平均强度指标，而非界面点处的强度指标值。

从钻孔岩芯(参见图6.1)来看，在－5.10～－6.00 m段为中等风化至微风化的粗粒花岗岩，在－5.10 m附近存在明显的强风化区；在－19.60～－19.95 m段为高度风化的花岗岩，无法收集岩芯样本，岩芯缺失；在－24.17～－25.53 m段以及－31.37～－31.57 m段的岩芯明显碎裂现象。在这些区域，有效轴压力亦发生了显著的变化，在图6.3中表现为峰或谷，与岩石强度的变化相对应。

2. 充填土简单花岗岩地层

典型钻孔中有效轴压力的典型变化曲线如图6.5所示。从图中可知，在充填土风化花岗岩地层中，有效轴压力随界面深度的变化曲线与强度曲线具有相同的峰和谷，说明有效轴压力在界面处与强度的变化相吻合。

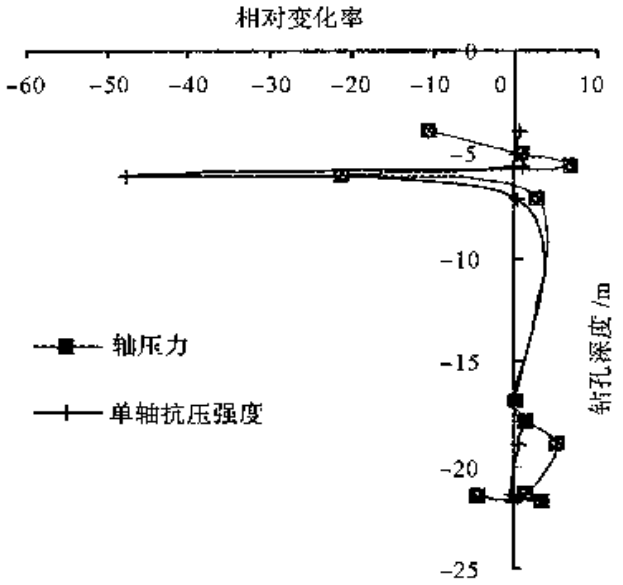


图6.5 典型钻孔BH-2中有效轴压力与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.5 The variation rate of effective thrust force and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-2

从表6.4中可知，各层充填土由于压实程度不一，随着厚度的增大，其压实强度多变。而且，在充填体中夹杂有人工混凝土材料。其下覆地层花岗岩风化程度不一，但地层交错现象少，相对简单。其中，在63.64%的界面处，有效轴压力与岩石强度变化呈正相关，36.36%的界面上，有效轴压力与岩石强度变化呈负相关。

在－5.00 m 处，同属充填土，强度变化指数为 0.257，有效轴压力的变化指数为 0.088；当从充填土进入到混凝土时，强度变化指数为 0.980，有效轴压力变化指数为 0.688；当从混凝土转入充填土时，强度变化指数为－47.727，有效轴压力的变化指数为－2.109。从有效轴压力的变化来看，多数情况下，有效轴压力的变化指数值亦低于岩石强度在界面处的变化指数值。

从岩芯分布来看（参见图 6.2），在孔深－4.00～－5.00 m 的孔段，为鹅卵石充填土；－5.00～19.03 m 为粗粒砂岩；其间－5.60～－5.90 m 为旧的混凝土制块。上覆充填土层来源广，成分复杂，岩性变化大。在－18.00～－19.03 m 出现了强风化花岗岩，为粗粉砂土，在－21.20～－21.60 m 为高度风化的粗粒花岗岩，表现为粗砾砂。在这些位置，有效轴压亦发生了相应的变化。此外，在－25.83 m 及－30.36 m孔深附近，岩芯出现了明显的岩饼断裂和破碎现象。但由于岩石强度没有变化，有效轴压力亦没有反映出这种变化。

从以上两类地层的试验结果分析，有效轴压在界面处的变化规律与岩石的完整性及均质性有关。当岩石非均质，特别是岩石节理、裂隙等发育时，会给钻孔作业带来很大困难。钻孔中常见的故障是卡钻。此时，需要人为地加大轴压和扭矩来克服钻具与孔壁岩石间的摩擦力或冲击、剪切破碎卡阻的岩石。因此，有效轴压的变化也必然存在与强度变化不完全吻合的情形。由此也可以推知，在节理、裂隙发育的地层中，有效轴压力作为岩石强度变化的响应参数会受许多随机因素的干扰。因此，需要对钻机系统的有效钻孔过程进行识别，其可靠性亦可通过统计误差分析加以检验。

3. 复杂风化花岗岩地层

典型钻孔中有效轴压力在界面处的变化如图 6.6 所示。从表 6.5 中可知，在此地层中，54.55%的界面处，有效轴压力与岩石强度的变化呈正相关，这较简单风化花岗岩地层中的结果偏低。有 8 处地层由 IV/III 类花岗岩转变 III 类花岗岩，有 4 处地层由 IV/III 类花岗岩转变为 IV 或 IV/V 类花岗岩；在－50.57 m 深度以下，重又出现了 V 类全风化花岗岩地层。从图 6.6 中亦可见，在复杂风化花岗岩地层中，由于地层变化比较大，地层岩石的强度及钻具有效轴压力的变化曲线呈多峰状。且由于节理、裂隙发育，在地下－53.83 m 处因卡钻而终止钻孔勘探。从图 6.6 中可以清楚地看到，在界面－53.00 m 处，出现岩石强度降低而有效轴压骤然增大的现象。

在－11.65 m 处，地层岩石由 V 类全风化花岗岩转变为 IV/III 类花岗岩，岩石强度变化指数为 0.154，有效轴压力的变化指数为－0.456。在 IV/III 类转化为 III 类的 8 个地层界面上，岩石强度的变化指数为 0.641，在 4 个界面上有效轴压力与岩石强度呈负相关，有效轴压力的变化指数为 0.027～1.357，平均为 0.705；另有 4 个呈正相关，变化指数在－0.000～－2.085 之间，平均为－0.553。在 III 类转化 V/IV 类的地层界面中，在 62.5%的界面上轴压力与岩石强度呈正相关，此

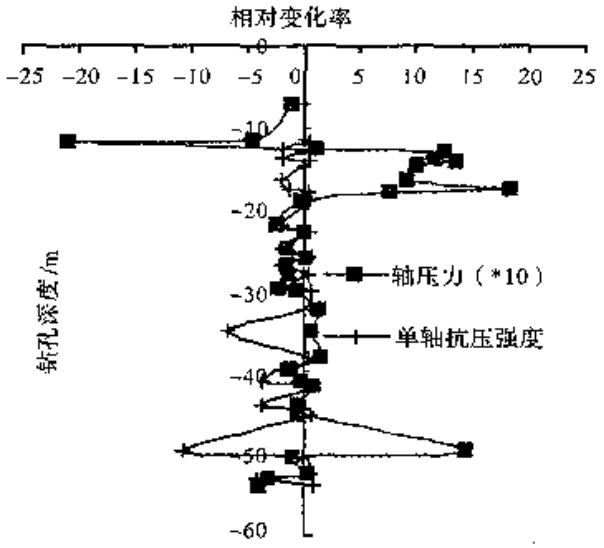


图 6.6 典型钻孔 BH-3 中有效轴压力与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.6 The variation rate of effective thrust force and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-3

时，强度指数变化为－1.787，轴压力变化为－0.102～－0.240，平均为－0.163；在其他 3 个界面上，轴压力与岩石强度呈负相关，轴压力的变化指数为 1.168～0.117，平均为 0.739。当地层由 IV/III 类转化为 IV 类时，岩石强度的变化指数为－1.263，有效轴压力的变化指数为 1.852；当由 IV/III 类转化为 V 类时，岩石强度的变化指数为－10.629，有效轴压力的变化指数为 1.456。这说明轴压力与岩石强度多呈正相关，但亦存在异常的情况。

6.2.2 钻具转速在界面上的变化

1. 普通风化花岗岩地层

典型钻孔中钻具转速在界面处的相对变化率如表6.3所示。变化曲线如图6.7所示。在地层深度－5.36 m 的位置，地层由 V 类进入到 III/II 类花岗岩夹层，厚度为 1.31 m，钻具转速的变化指数为 0.464，与该位置的有效轴压变化指数值 0.420 接近。在－6.67 m 及－19.50 m 处，岩石由III/II类的夹层转变为充填土和 IV 类花岗岩，界面上岩石强度显著降低，分别为－97.302 和－1.426，钻具转速的变化指数也显著降低，分别为－1.580 和－1.350；而该界面处有效轴压的相对变化指数分别为－1.526 和－0.655。在－15.76 m处，由充填土层转变为V/IV类风化花岗岩，岩石强度变化指数为 0.950，钻具转速指数为 0.012。可见，钻具转速在这些界面处随岩石强度的增强而增高，减弱而降低，呈正响应。在界面上，钻具转速与岩石强度呈负相关的占 54.54%。

此外，在－18.58 m 处，岩石由 V/IV 类花岗岩转变为 III/II 类花岗岩，岩石强

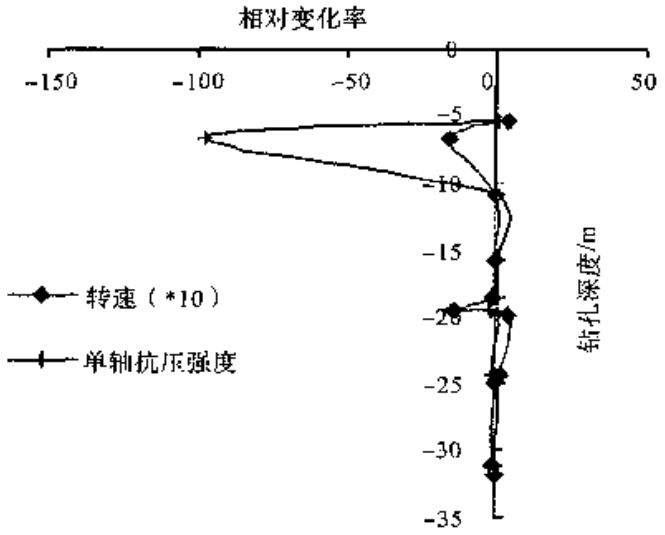


图 6.7　典型钻孔 BH-1 中钻具转速与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.7　The variation rate of rotational speed and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-1

度变化指数为 0.789，但钻具转速变化指数为 0.055；在－24.42 m 处，岩石又 III/II类转变为 IV/III 类，岩石强度变化指数为－0.635，钻具转速变化指数却提高为 0.172；同样，在－31.08 m 及－31.92 m 处，钻具转速的变化与岩石强度亦呈负响应。在界面上，钻具转速与岩石强度变化呈正相关的占 45.45%。

从岩石强度的变化来看，在上述界面处岩石强度的变化十分显著，说明岩性变化明显。钻具转速在界面处的变化曲线与图 6.3 中有效轴压力的变化曲线相似，说明钻具转速和有效轴压力对岩石强度变化的响应几近相同。转速变化曲线与强度变化曲线在界面处享有共有峰。

2. 充填土简单风化花岗岩地层

典型钻孔中钻具转速在界面处的变化如图 6.8 所示。从图可知，其变化曲线亦与有效轴压的变化曲线相似，在人工材料及岩性变化的界面处均存在显著的变化，与强度变化曲线亦享有共有峰。在－5.60 m 处，为充填土与人工混凝土材料的交接面，界面处强度变化指数为 0.980，钻具转速和有效轴压力的变化指数分别为 0.439 及 0.688；在－6.09 m 处，地层由人工混凝土材料转变为 V 类全风化花岗岩，此时强度发生显著降低，钻具转速和有效轴压的变化指数均降低了，分别为 0.101 和 2.109；在－17.87 m 处，岩性由 V 类花岗岩转变为 IV/V 类花岗岩，岩石强度指数为 0.959，钻具转速指数为 0.143，有效轴压力变化指数为 1.035；在－21.51 m处，岩性由 IV 类花岗岩转变为花岗岩岩脉，界面处强度指数为 0.686，钻具转速和有效轴压力均提高了，分别为 0.157 和 0.332。在所监测的 11 个界面中，在 7 个界面上，钻具转速随强度变化的增强而增大，减弱而降低，占 63.64%。在 5 个界面上，钻具转速与强度的变化呈负相关，占 36.36%。

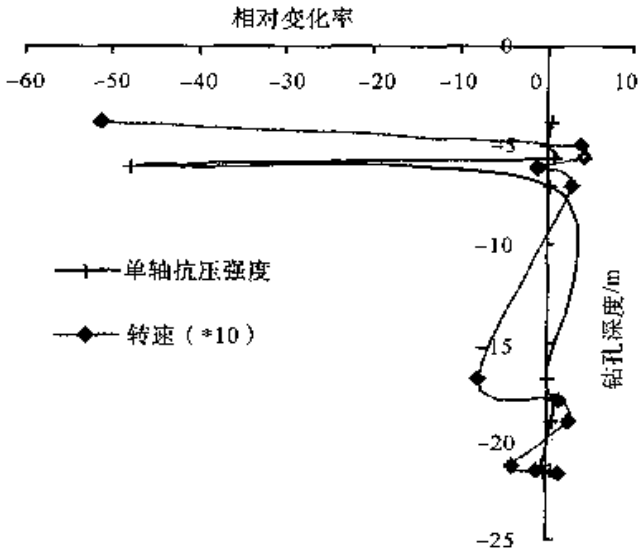


图 6.8 典型钻孔 BH-2 钻具转速与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.8 The variation rate of rotational speed and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-2

此外，钻具转速在界面上的改变程度与岩石强度变化的强弱呈正相关。这说明钻具转速对强度的变化具有一致响应的特征。但同时也注意到，钻具转速的变化有时比有效轴压力的变化相对要弱，这也说明，有效轴压力对岩石强度的变化可能更为敏感。

3. 复杂风化花岗岩地层

典型钻孔中的钻具转速的变化如图 6.9 所示。

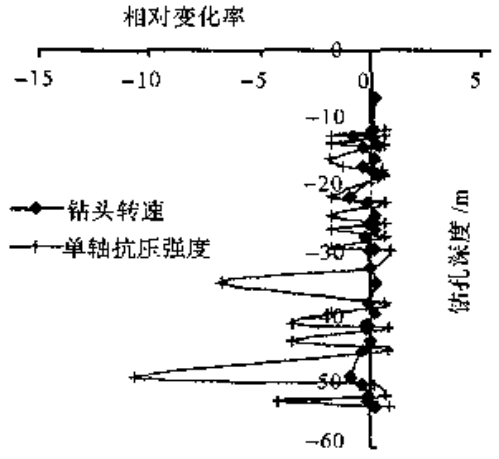


图 6.9 典型钻孔 BH-3 中钻具转速与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.9 The variation rate of rotational speed and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-3

由此可见，钻具转速与有效轴压一样，在强度变化的界面处发生了突变。在不同的界面处，钻具转速的变化不同。岩性变化越大，强度变化越大，钻具转速的变

化也越大。尽管存在岩石强度指标均一性与钻孔参数实时性之间的矛盾，穿孔参数在界面处变化程度存在不等性，但不能掩盖在界面处的这种跃迁性质。这说明钻具转速、有效轴压与岩石强度具有一定的响应关系。显然，如果避开强度指标均化的影响，用穿孔参数的变化来反映岩土工程界面的变化是完全可靠的。

6.2.3　冲洗压力在界面上的变化

1. 普通风化花岗岩地层

典型钻孔中冲洗压力在界面处的变化如图 6.10 所示。从图可知，冲洗水压力曲线与强度变化曲线多数情况下享有共有峰，说明在界面处冲洗压力的变化规律与岩石强度的变化具有一致性，响应性较好。

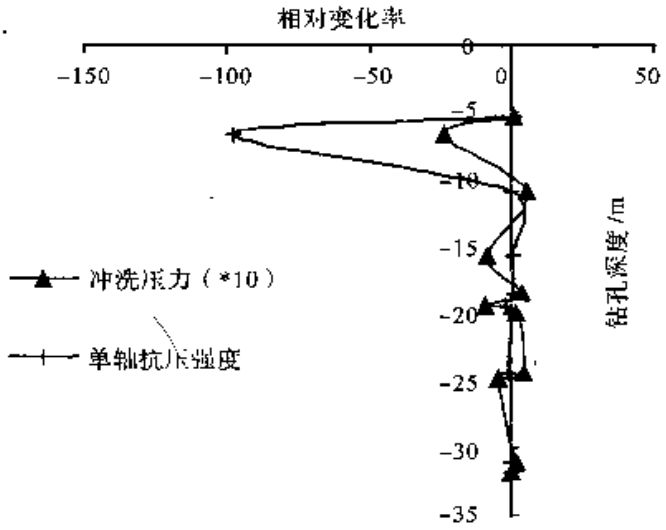


图 6.10　典型钻孔 BH-1 中冲洗压力与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.10　The variation rate of flushing pressure and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-1

在－5.36 m处，地层由全风化花岗岩转变为 III/II 类中等/微风化花岗岩，岩石强度增高了，其变化指数为 0.991，冲洗压力亦提高，变化指数为 0.153；在－6.67 m处，岩性发生逆转，由 III/II 类中等及微风化花岗岩转变为全风化花岗岩，强度急剧降低了，冲洗压力也降低了，其变化指数为－2.352。说明冲洗压力的变化与岩石强度的变化为正响应关系。但是，在－15.76 m 处，由 V 类花岗岩转变为 V/IV 类，岩石强度增高，变化指数为 0.950，冲洗压力在界面处降低了，为－0.770；同样，在－24.87 m 处，当花岗岩地层由 IV/III 类转变为 II 类时，在界面处强度增高，变化指数为 0.485，冲洗压力降低，变化指数为－0.473。可见，在这些界面上，冲洗压力的变化与岩石强度的变化呈负响应。同样，其他界面处，冲洗压力亦发生了不同的变化(参见表 6.2)。在所监测的 11 个界面中，冲洗压力与强度

呈正相关的占 72.73%，负相关的占 27.27%。

2. 充填土简单风化花岗岩地层

典型钻孔中冲洗压力在界面处的变化如图 6.11 所示。从图中可知，压力变化曲线在多数情况下并不与强度变化曲线享有共有峰，54.54%呈负相关，45.45%呈正相关。在－5.60～6.09 m 处，充填土中夹杂有 0.49 m 厚人工混凝土材料，在其上、下界面处，冲洗压力的变化指数分别为 0.598 和 0.099。说明在充填土转变为混凝土以及混凝土转变为 V 类全风化花岗岩的过程中，冲洗水压力都有所提高。从岩芯样本分析，混凝土的上层比较破碎，即由充填土转变为混凝土时，上层混凝土裂隙比较发育，导致冲洗压力增大；在混凝土的下界面，混凝土坚实；但 V 类全风化花岗岩破碎，裂隙亦非常发育。因此，亦导致冲洗压力增大。在－17.87 m 处，岩石由 V 类全风化花岗岩转变为 V/IV 类高度风化的花岗岩，冲洗压力变化指数为 0.513。从岩芯样本来看，均显破碎，无显著差别。在－21.33 m 及－21.51 m 处，岩性分别由 IV/III 类转变为 IV 类、IV 类转变为花岗岩岩脉，岩石强度略有降低或略有增高，但冲洗压力均降低了，变化指数分别为－0.375 和－0.132。这说明冲洗压力在界面处的变化并非完全由岩石强度的变化决定，具有不确定性。

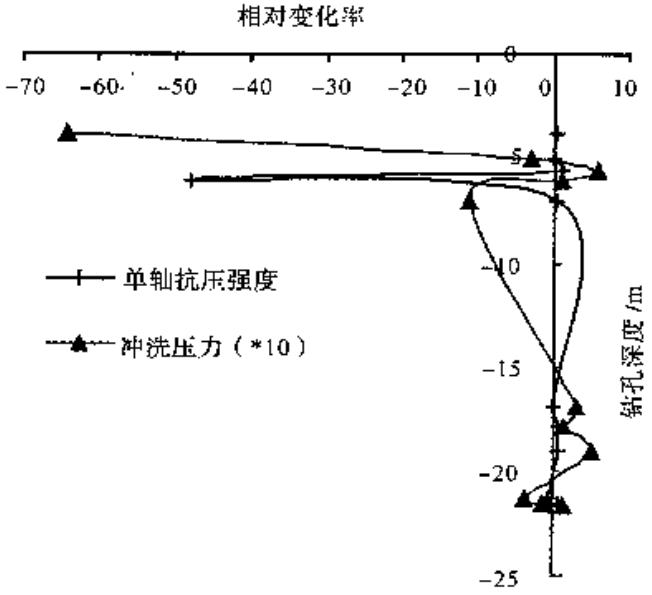


图 6.11 典型钻孔 BH-2 中冲洗压力与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.11 The variation rate of flushing pressure and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-2

究其原因，冲洗压力主要与孔深及排渣状态有关。当孔深越大，所要求的压力越大。孔底岩粉越多，排渣压力及水量也越大。当由低强度岩石向高强度岩石转变时，冲洗压力将降低。这是因为此时的穿孔速率降低所致。因为岩石强度增大后，穿孔速率降低，产生的岩粉也相应减少，所需的排渣压力亦可降低。此外，人为

因素及强度均化也会对压力曲线的协同性产生影响。

3. 复杂风化花岗岩地层

典型钻孔中冲洗压力的变化指数值参见表 6.5。其在界面处的变化规律如图 6.12 所示。从图中可知，多数情况下，冲洗压力曲线与岩石强度曲线存在峰-谷对应关系，在所监测的 33 个界面中，在 69.70%的界面上，冲洗压力与岩石强度的变化呈负相关。从表 6.5 中可知，在 8 个由 IV/III 类花岗岩转化 III 类花岗岩的地层界面中，冲洗压力的变化与岩石强度的变化全部呈负相关。在这些界面上，岩石强度的变化指数平均为 0.641，冲洗压力的变化指数为－0.814～－2.819，平均为－1.585。同样，由 III 类转化为 IV/III 类花岗岩地层的界面有 8 个，冲洗压力与岩石强度的变化有 5 个呈正相关，占 62.5%。在这些界面上，岩石强度的变化指数平均为－1.787，冲洗压力的变化指数为 0.012～0.253，平均为 0.123；在 3 个呈负相关的界面中，冲洗压力的变化指数在－0.042～－0.450之间，平均为－0.242。此外，在 V/IV 转化为 IV/III 的两个界面上，冲洗压力与岩石强度的变化呈负相关。在此界面上，岩石强度的变化指数为 0.781，冲洗压力的变化指数为－0.066。

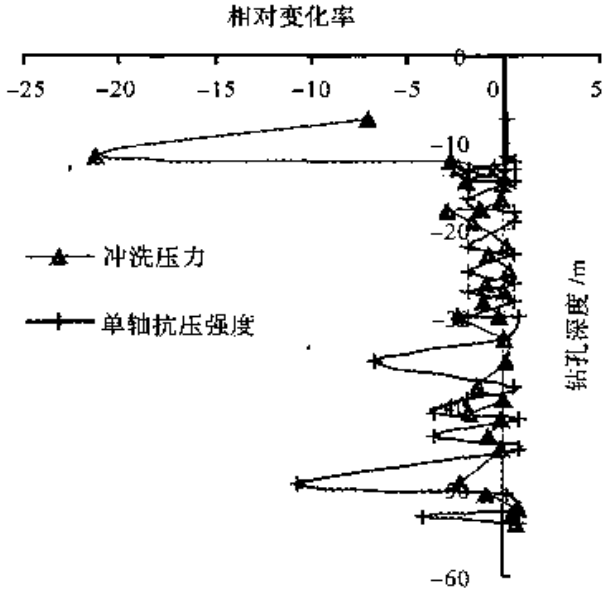


图 6.12　典型钻孔 BH-3 中冲洗压力与岩石单轴抗压强度在界面处的相对变化率

Figure 6.12　The relative variation rate of flushing pressure and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-3

6.2.4　穿孔速率在界面上的变化

1. 普通风化花岗岩地层

典型钻孔中穿孔速率在界面上的变化如图 6.13 所示。界面处的变化值参见

表 6.3。从图中可见，穿孔速率在界面上的变化曲线与岩石强度在界面上的变化曲线呈负响应关系的占 81.82%，具有显著的峰-谷对应的特征，享有共有峰。

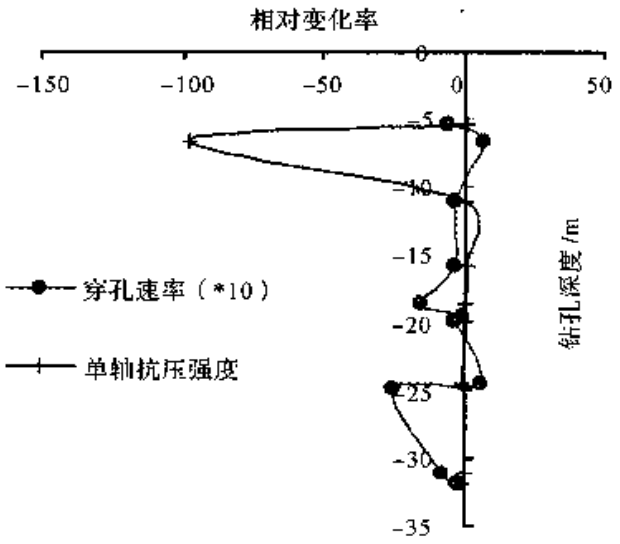


图 6.13 典型钻孔 BH-1 中穿孔速率与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.13 The variation rate of penetrating rate and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-1

在孔深－5.36 m 处，花岗岩地层由 V 类转变为 III/II 类，强度增高，变化指数为 0.991，穿孔速率降低，变化指数为－0.626；在－18.58 m 处，岩石由 V/IV 类转变为 III/II 类，岩石强度变化指数为 0.789，穿孔速率的变化指数为－1.538；在－19.95 m处，岩石由 IV 类转变为 III/II 类，岩石强度变化指数为 0.588，穿孔速率的变化指数为－0.346；在－24.87 m 处，岩石由 IV/III 类转变为 II 类，岩石强度变化指数为 0.485，穿孔速率指数为－2.518。可见，在岩石强度增高的界面处，穿孔速率均发生了不同程度的降低。在孔深－6.67 m 处，岩石由 III/II 类逆转为 V 类，岩石强度急剧降低，变化指数为－97.302，穿孔速率变化指数达到 0.680；在－24.42 m 处，岩石强度降低，变化指数为－0.635，穿孔速率的变化指数为 0.591。以上说明，在岩石强度降低的界面上，穿孔速率将增高；在岩石强度增高的界面上，穿孔速率将降低。在所探测的 11 个界面中，在 9 个界面上遵循穿孔速率与岩石强度呈负响应的原则，其符合率为 81.82%。由此可见，穿孔速率在界面上的变化与岩石强度的变化具有很好的响应性。

然而，也有相反的情况。如在－19.5 m 处，岩石由 III/II 类转变为 IV 类，虽然岩石强度降低，变化指数为 1.426，但穿孔速率也降低了，变化指数为－0.089；在－31.92 m 处，岩石由花岗岩岩脉转变为 II 类微风化花岗岩，强度变化指数为－0.104，穿孔速率的变化指数为－0.231。在所监测的 11 个界面中，18.18%出现了正相关的情况。从岩芯分析可以看出，在界面处，岩石的风化程度及强度与强度试验的典型岩段存在差异，在这些界面处，岩石强度不是降低，而是增高了。由于

受岩石强度均化的影响，这影响了穿孔速率与强度变化响应程度的一致性。

2. 充填土简单风化花岗岩地层

典型钻孔中穿孔速率在界面上的变化如图 6.14 所示。界面处穿孔速率的变化值如表 6.4 所示。与在简单风化花岗岩地层中的情况相似，穿孔速率在界面上的变化曲线与相应的强度变化曲线具有峰-谷对应的关系，呈负响应的占 72.73%。在岩石强度增强的界面处，穿孔速率将降低。在－5.60 m 处，地层由充填土转变为人工混凝土材料，岩石强度提高，变化指数为 0.980，穿孔速率显著降低，变化指数为－7.516；在－17.87 m 处，地层由 V 类花岗岩转变为 V/IV 类，岩石强度变化指数为 0.959，穿孔速率的变化指数为－1.225；在－19.00 m 处，由 V/IV类岩石转变为 IV/III 类岩石，岩石强度变化指数为 0.656，穿孔速率的变化指数为－3.509；在－21.51 m 处，由 IV 类花岗岩转变为花岗岩岩脉，岩石强度变化指数为 0.686，穿孔速率的变化指数为－0.090。显然，穿孔速率的变化与地层转变的快慢程度有关。转变越快，穿孔速率的转变也越快，如在遇到人工混凝土材料的界面上。转变越慢，速率的改变也慢，如 IV 类岩石转变为花岗岩岩脉。

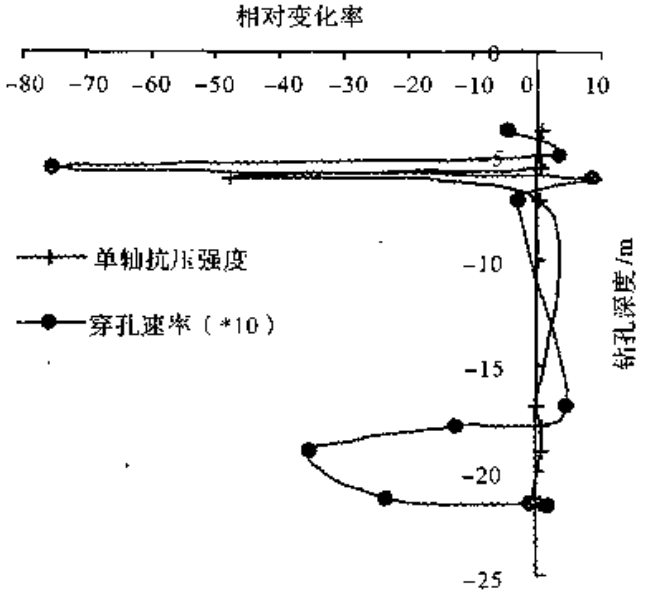


图 6.14　典型钻孔 BH-2.穿孔速率与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.14　The variation rate of penetrating rate and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-2

同样，在岩石强度变弱的界面上，穿孔速率将提高。在－6.09 m 处，由人工混凝土转变为 V 类全风化花岗岩，岩石强度显著降低了，穿孔速率提高，其变化指数为 0.884；在－21.68 m 处，岩石由岩脉转变为 II 类花岗岩，强度变化指数为－0.104，穿孔速率的变化指数为 0.217。

此外，也有相反的情况。在－16.86 m 处，岩石由 V-2 类转变为 V-3 类，强度有

微小的增强，变化指数为 0.042，穿孔速率反而增高了，其变化指数为 0.486；在 −21.33 m处，由 IV/III 类花岗岩地层转变为 IV 类，在界面上强度变化指数为 −0.484，穿孔速率的变化指数为 −2.305。这说明在这些界面处，穿孔速率和岩石强度的变化呈正相关，这也是不符合事实的。从岩芯分析亦可知，在这些界面附近，岩石的强度并非真正地增强或变弱了。同样，还可以看到，穿孔速率的变化响应亦并非与岩石强度变化的强弱成正相关，具有随机性，这实际上也是由强度均化引起的。

3. 复杂花岗岩地层

典型钻孔中穿孔速率在各界面处的变化如表 6.5 所示，其变化曲线如图 6.15 所示。从图中可知，穿孔速率的变化曲线与岩石强度的变化曲线存在峰-谷对应关系，即二者享有共有峰。

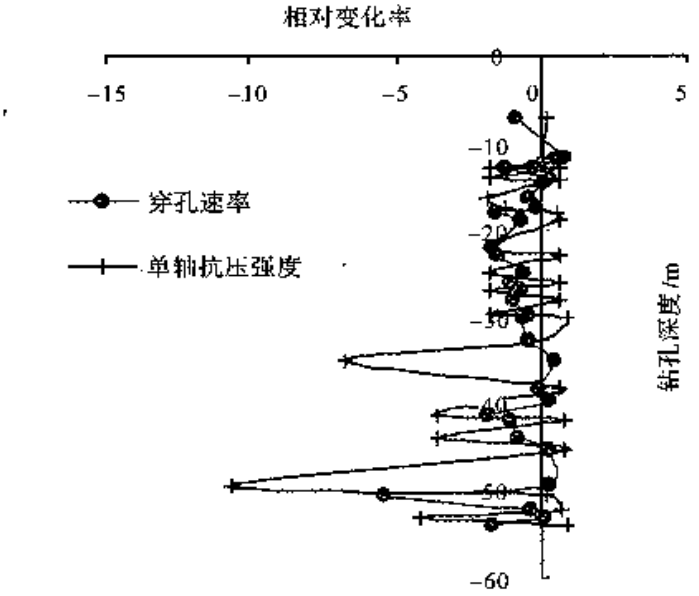


图 6.15 典型钻孔 BH-3 中穿孔速率与岩石单轴抗压强度在界面处的变化率

Figure 6.15 The variation rate of penetrating rate and UCS at the interfaces in the typical borehole BH-3

在所监测的 33 个界面中，57.58% 的界面上穿孔速率的变化与岩石强度的变化呈负相关。在 8 个由 IV/III 类花岗岩转化为 III 类花岗岩的界面上，有 6 个呈负相关，占 75.00%，岩石强度的变化指数为 0.641，穿孔速率的变化指数在 −0.091～−1.453之间，平均为 −0.924；在 2 个正相关的界面上，穿孔速率的变化指数平均为 0.301。在 −41.82 m 处，地层由 V/IV 类花岗岩转化为 IV/III 类花岗岩，岩石强度变化指数为 0.781，穿孔速率的变化指数为 −1.078。但亦有界面处出现正相关的情况。在 −11.65 m 处，在岩石由 V 类转化为 IV/III 类界面上，岩石强度变化指数为 0.154，穿孔速率的变化指数为 0.824，穿孔速率与岩石强度

呈正相关。在－45.30 m 处，岩石强度的变化指数为 0.781，穿孔速率的变化指数为 0.272。其原因主要是岩石强度指标不能代表界面处岩石强度指标所致。从图 6.3 岩芯分布来看，在－11.65 m，岩芯界面呈倾斜，而且比较破碎；在－45.30 m 处，岩芯亦呈破碎状。在这些位置，穿孔速率变化指数仍是符合实际的。

6.3　穿孔参数在界面上的响应强度

穿孔参数的响应指标反映了各参数在界面上的变化情况，但并没有反映与岩石强度变化强弱之间的关系。这里，仍用界面上地层岩石强度的变化作为反映岩石物理力学性质改变的综合指标，在界面上岩石强度改变的快慢与引起穿孔参数变化的快慢程度可用响应强度来表示。响应强度指标可以定义为单位强度变化率下的响应指标变化率，在数值上等于界面处穿孔参数的变化率与相应岩石强度的变化率之比，比值大于 0 时为正响应，穿孔参数的变化与岩石强度变化呈正相关；比值小于 0 时为负响应，穿孔参数的变化与岩石强度变化呈负相关。其物理意义为岩石强度每发生 1%的变化时，所引起的穿孔参数发生的改变率。

6.3.1　普通风化花岗岩地层

穿孔参数在此类地层界面处的响应强度指标如表 6.6 所示。从表中可知，在此普通风化花岗岩地层中，有效轴压力的响应强度指数与界面处岩石强度变化呈正相关的占 81.82%。由于有效轴压力受钻机动力系统、钻头类型、钻孔方式、岩石物理力学性质及破碎单位岩石的能耗等有关，在界面处有效轴压力的变化速率比岩石强度的变化速率低。因此，在岩石强度变化大的界面上，穿孔速率的响应强度指数相对较低，在岩石强度变化小的界面上，穿孔速率的响应强度指数值相对较大，即地层岩性越接近，岩石强度越相近，响应强度指数值越大；当地层跨度大，岩性、强度变化大时，响应强度指数值越小，如图6.16所示。在－6.67 m 处，地层由 III/II 类花岗岩转变为 V 类花岗岩，岩石强度变化指数降低 97.302，有效轴压力的响应强度指数为 0.016；在－15.76 m 处，地层由 V 类花岗岩转变为 V/IV 类花岗岩，岩石强度变化指数提高 0.950，有效轴压力的响应强度指数为 0.020；在－11.00 m处，同属 V 类地层，岩石强度略有改变，强度变化指数仅提高 0.026，有效轴压力的响应强度指数达到 4.387；同样，在－31.08 m 处，地层由 II 类花岗岩转变为花岗岩岩脉，岩石强度指数仅提高 0.094，但穿孔速率的响应强度指数达到 1.724。由此可见，在界面处有效轴压力的响应强度指数值越低，表示其响应强度越高，岩石强度变化越大。

表 6.6 典型钻孔 BH-1 中穿孔参数在界面处的响应强度指数

Table 6.6 The response strength index of the penetrating parameters at the geotechnical interfaces in BH-1

界面深度监测值/m	界面深度以上的岩石级别	各穿孔参数的响应强度指数			
		有效轴压力/kN	钻头转速/(r·min^{-1})	冲洗压力/MPa	穿孔速率/(cm·min^{-1})
−5.36	V-1	0.423	0.468	0.154	0.632*
−6.67	III/II	0.016	0.016	0.024	0.007*
−11.32	V-2	4.387	0.405*	21.242	10.875*
−15.76	V-3	0.020	0.013	0.811*	0.338*
−18.58	V/IV	0.088	0.069*	0.457	1.948*
−19.50	III/II	0.460	0.947	0.593	0.063
−19.95	IV	0.636	0.752	0.296	0.588*
−24.42	III/II	0.362*	0.271*	0.783*	0.932*
−24.87	IV/III	0.204*	0.034*	0.975*	5.187*
−31.08	II	1.724	0.687*	2.200	7.882*
−31.92	花岗岩岩脉	0.226	0.121*	0.090	2.221

* 为负值，与岩石强度呈负响应关系。

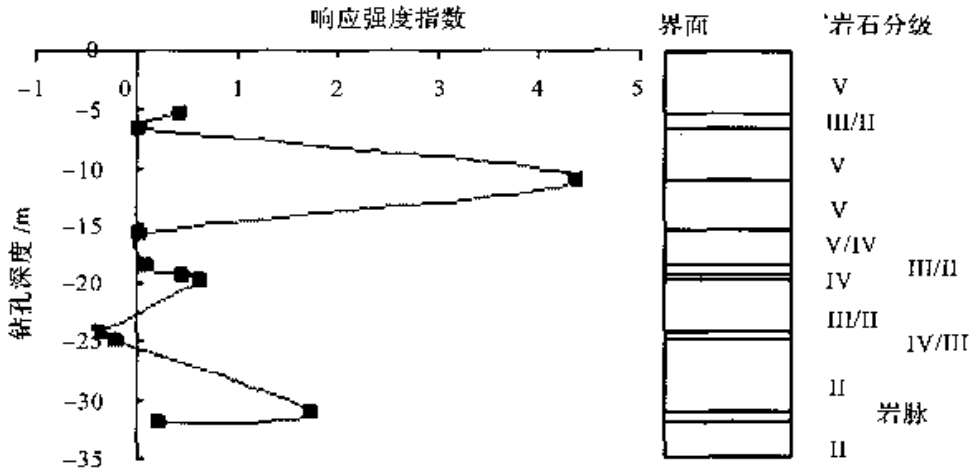


图 6.16 典型钻孔 BH-1 中有效轴压力在界面上的响应强度

Figure 6.16 The response strength of the effective thrust force at the interfaces in BH-1

在此地层中，钻具回转速率的响应强度指数与界面处岩石强度变化呈正相关的占 45.46%。钻具转速不仅与岩石物理力学性质有关，而且与作用在钻具上的有效轴压力有关。一般而言，无论是采用高轴压-低转速还是低轴压-高转速的工作方式，在同一地层岩石中钻具转速基本恒定。当岩石物理力学性质变化不大时，钻具转速的变化甚小。因此，在 −11.00 m 处，钻具转速的响应强度指数仅为 0.405。与轴压的变化相似，在界面上钻具转速的变化也比岩石强度的变化要低。因此，岩石强度变化大的界面上，钻具转速的响应强度指数也较低，如图 6.17 所示。在 −6.67 m 处，地层由 III/II 类花岗岩转变为 V 类花岗岩，岩石强度指数降低 97.302，转数的响应强度指数为 0.016；而在 −19.50 m 处，地层由 III/II 类花岗

岩转变为 IV 类花岗岩，岩石强度指数降低 1.426，转数的响应强度达到 0.947；而在－15.76 m处，地层由 V 类花岗岩转变为 V/IV 类花岗岩，岩石强度指数提高 0.950，转数的响应强度指数为 0.013；在－31.08 m 处，地层由 II 类花岗岩转变为花岗岩岩脉，岩石强度指数提高 0.094，转数的响应强度指数为 0.687。由此可见，在界面处转数的响应强度值越低，岩石强度变化越大，与轴压力的响应强度一致。

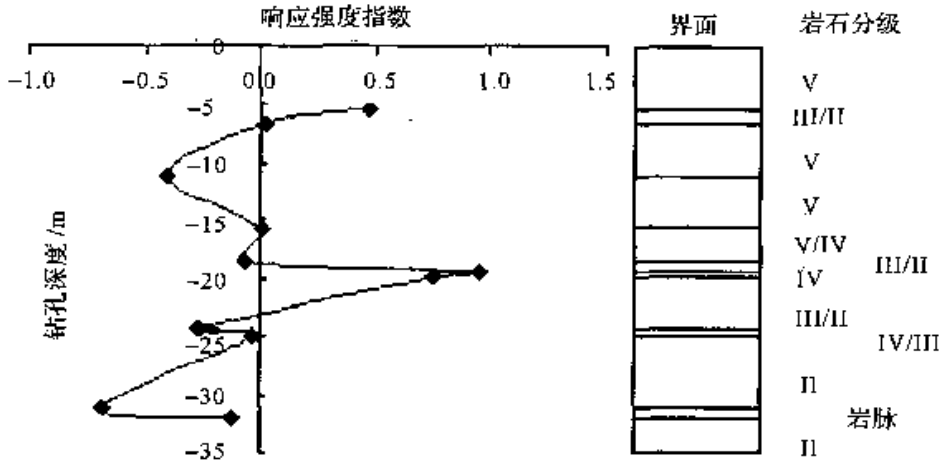


图 6.17　典型钻孔 BH-1 中钻具转速在界面上的响应强度

Figure 6.17　The response strength of the rotation speed at the interfaces in BH-1

冲洗压力的响应强度指数与界面处岩石强度变化呈正相关的占 72.73%，在界面处的响应变化曲线如图 6.18 所示。在－5.36 m 处，地层由 V 类花岗岩转变

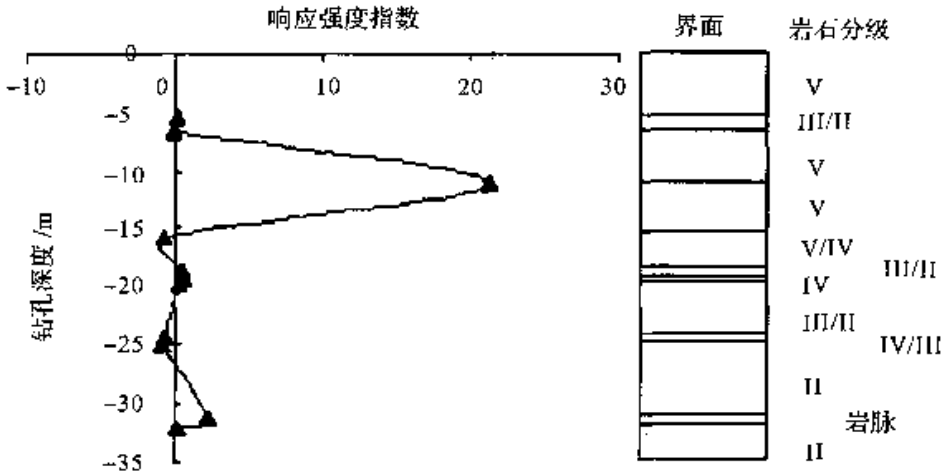


图 6.18　典型钻孔 BH-1 中冲洗压力在界面上的响应强度

Figure 6.18　The response strength of the flushing pressure at the interfaces in BH-1

为 III/II 类花岗岩，岩石强度指数增大 0.991，冲洗压力的响应强度指数为 0.154；在－18.58 m 处，地层由 V/IV 类花岗岩转变为 III/II 类花岗岩，岩石强度指数增大 0.789，冲洗压力的响应强度指数为 0.457；而在－6.67 m 处，地层由 III/II 类花

岗岩转变为 V 类花岗岩，岩石强度指数降低 97.302，冲洗压力的响应强度指数为 0.024；在－19.50 m 处，地层由 III/II 类花岗岩转变为 IV 类花岗岩，岩石强度指数降低 1.426，冲洗压力的响应强度指数为 0.593。可见，冲洗压力的响应强度指数值随界面处岩石强度指数增大而减小。此外，在－11.00 m 处，岩石强度指数的变化仅为 0.026，冲洗压力的响应强度指数达到 21.242。在－31.08 m处，地层由 II 类花岗岩转变为花岗岩岩脉，岩石强度指数仅增大 0.094，冲洗压力的响应强度达到 2.200。说明冲洗压力的响应强度指数在岩石强度指数变化小的界面处，具有较大的响应强度值，即响应强度值越小，响应强度越高。

穿孔速率的响应强度指数与界面处岩石强度变化呈负相关的占 81.82%。从前面的分析可知，穿孔速率与岩石强度成负响应关系，如图 6.19 所示。从表 6.6 可知，在岩石强度变化大的界面上，穿孔速率的响应强度指数较小，在岩石强度变化小的界面上，响应强度指数较大。如在－6.67 m 处，地层从 III/II 类花岗岩转变为 V 类全风化花岗岩，岩石强度指数降低 97.302，穿孔速率的响应强度指数为 0.007；在－11.00 m 处，均属 V 类全风化花岗岩地层，岩石强度指数变化很小，仅增大 0.026，而穿孔速率的响应强度指数达到 11.875。

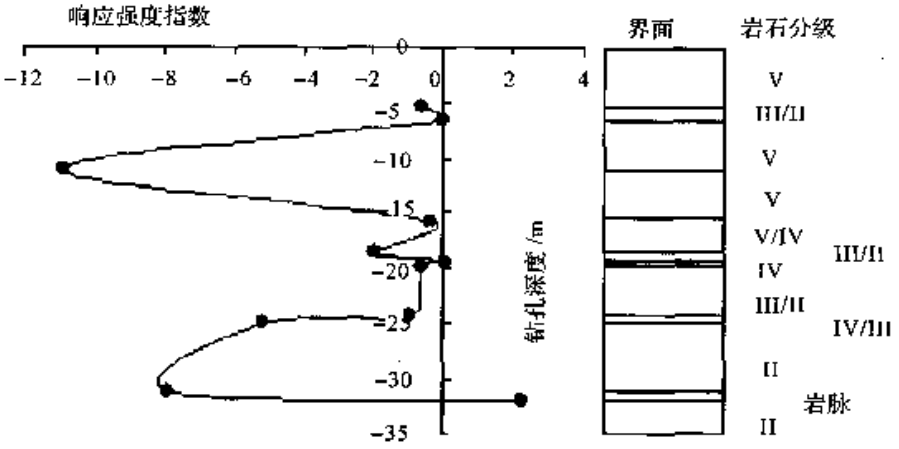


图 6.19 典型钻孔 BH-1 中穿孔速率在界面上的响应强度

Figure 6.19 The response strength of the penctrating rate at the interfaces in BH-1

6.3.2 充填土简单风化花岗岩地层

在此地层中，各穿孔参数在界面上的响应强度指数值如表 6.7 所示。从表中可知，有效轴压力的响应强度指数与界面处岩石强度变化呈正相关的占 63.64%。在－5.60～－6.09 m 处，充填土中夹杂有厚 0.49 m 的人工混凝土材料，在－5.60 m界面处，地层由充填土进入混凝土，强度指数的变化率为 0.98，响应强度指数为 0.702；在－6.09 m 处，地层由人工混凝土材料转变为充填土，强度指数的变化率为－47.727，响应强度指数仅为 0.044；在－21.51 m 处，地层由 IV 类花岗

岩转变为花岗岩岩脉，界面上岩石强度指数的变化率为 0.686，响应强度指数为 0.665。由此可见，在岩石强度变化率大的界面上有效轴压力的响应强度指数值较低，在岩石强度变化率小的界面上，有效轴压力的响应强度指数值较高。在界面处的响应变化曲线如图 6.20 所示。

表 6.7　典型钻孔 BH-2 中穿孔参数在界面处的响应强度指数

Table 6.7　The response strength index of the penetrating parameters at the geotechnical interfaces in BH-2

界面深度监测值/m	界面深度以上的岩石级别	各穿孔参数的响应强度指数			
		有效轴压力/kN	钻头转速/(r·min^{-1})	冲洗压力/MPa	穿孔速率/(cm·min^{-1})
−3.87	Fill-1	1.732*	8.556*	10.717*	0.757*
−5.00	Fill -2	0.342	1.549	1.177*	1.404
−5.60	Fill-3	0.702	0.448	0.611	7.673*
−6.09	混凝土材料	0.044	0.002	0.002*	0.019*
−7.10	Fill-4	0.757	0.866	3.130*	0.783*
−16.86	V-1	0.547	18.737*	8.024	11.672
−17.87	V-2	0.140	0.149	0.161	1.277*
−19.00	V/IV	0.811	0.420	0.782	5.352*
−21.33	IV/III	0.326*	0.814	0.775	4.765
−21.51	IV	0.665*	0.162*	0.193*	0.131*
−21.68	花岗岩岩脉	3.194*	1.506*	1.457*	2.083*

* 为负值，与岩石强度呈负响应关系。

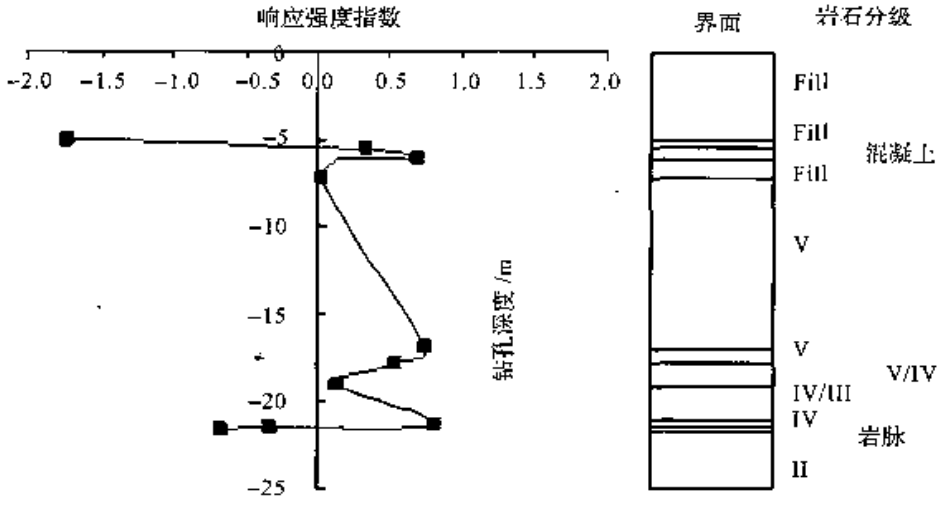


图 6.20　典型钻孔 BH-2 中有效轴压力在界面上的响应强度

Figure 6.20　The response strength of the effective thrust force at the interfaces in BH-2

此外，当界面处岩石强度指数的变化率较小时，其响应强度指数也十分显著。如在−5.00 m 处，同属充填土层，界面上强度指数的变化率为 0.257，有效轴压力的响应强度指数为 0.342；在−16.86 m 处，同属 V 类全风化花岗岩地层，界面上岩石强度变化率为 0.042，有效轴压力的响应强度指数为 0.547。这说明，在各界

面处，岩石强度指数的变化率有微小的改变，也能在有效轴压力的响应强度指数中反映出来。

钻具回转速率的响应强度指数与界面处岩石强度的变化呈正相关的占63.64%。响应强度指数在界面处的变化曲线如图6.21所示。从表6.7可知，在混凝土夹层的上界面－5.60 m处，材料强度指数的变化率为0.980，钻具转速的响应强度指数为7.673；在其下界面－6.09 m处，材料强度指数的变化率为－47.727，转速的响应强度指数为0.019；在－21.51 m处，地层由IV类花岗岩转变为花岗岩岩脉，岩石强度指数的变化率为0.686，转数的响应强度指数为0.162。说明转数的响应强度值在岩石强度变化率大的界面上较低。此外，从岩石强度指数率变化较小的界面来看，在变化率小的界面上转数的响应强度值较高。如在－5.00 m处，同属充填土地层，岩石强度变化率为0.257，转数的响应强度指数为1.549；在－16.86 m处，同属V类花岗岩地层，岩石强度指数的变化率为0.042，转数的响应强度指数为18.737；同样，在－21.68 m花岗岩岩脉转变为II类花岗岩处，岩石强度变化率仅为－0.104，转数的响应强度达到1.506。可见，在岩石强度变化微小的界面上，转数的响应强度指数亦有显著的变化。

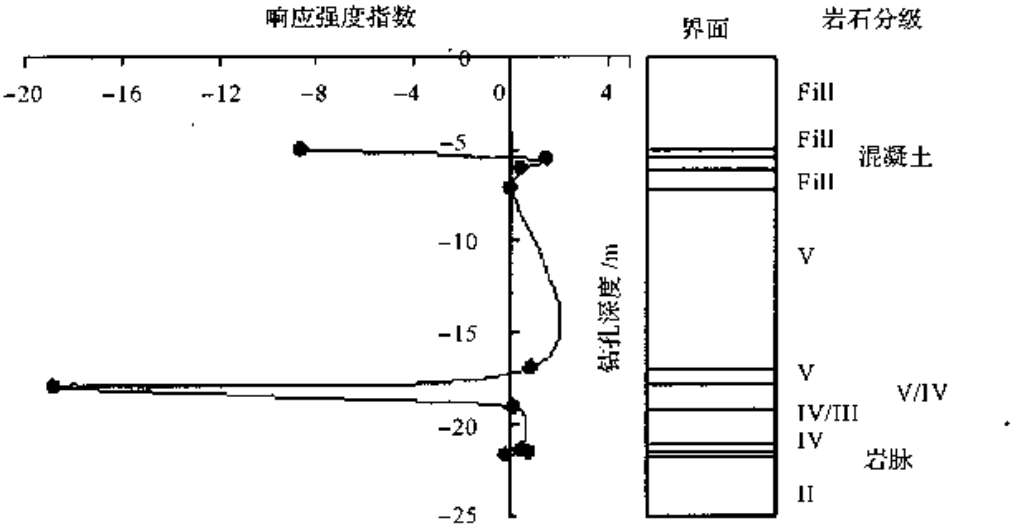


图6.21 典型钻孔BH-2中钻具转速在界面上的响应强度

Figure 6.21 The response strength of the rotation speed at the interfaces in BH-2

冲洗压力的响应强度指数的变化曲线如图6.22所示。其与界面处岩石强度变化呈正相关的占45.45%。在－5.60 m处，地层由充填土进入人工混凝土材料，强度指数的变化率为0.980，冲洗压力的响应强度指数为0.611；在－6.09 m处，地层由人工混凝土材料转变为V类全风化花岗岩，岩石强度指数的变化率为－47.727，冲洗压力的响应强度指数为0.002；同样，在－21.51 m处，当地层由IV类花岗岩转变为花岗岩岩脉时，强度变化率为0.094，冲洗压力的响应强度指数为0.193；而当地层由花岗岩岩脉转变为II类花岗岩时，岩石强度指数变化率为

−0.104，冲洗压力的响应强度指数为 1.457。这说明在岩石强度变化大的界面上，冲洗压力的响应强度指数值低。而在岩石强度指数变化小的界面上，冲洗压力的响应强度指数较高。如在−5.00 m 处，同属充填土地层，强度指数的变化率仅为 0.257，响应强度指数为 1.177；在−16.86 m 处，同属 V 类全风化花岗岩地层，岩石强度变化率为 0.042，响应强度指数为 8.024。

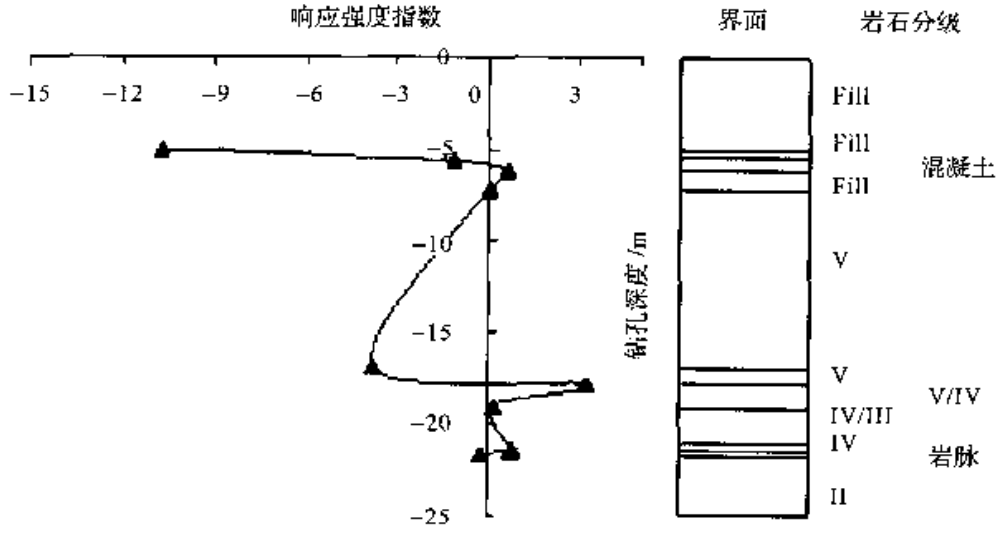


图 6.22　典型钻孔 BH-2 中冲洗压力在界面上的响应强度

Figure 6.22　The response strength of the flushing pressure at the interfaces in BH-2

穿孔速率的响应强度指数在界面处的变化曲线如图 6.23 所示。其与界面处岩石强度变化呈负相关的占 72.73%。在−5.60 m 处，地层由充填土进入人工混凝土材料，岩石强度的变化率为 0.980，响应强度指数为 7.673；在混凝土夹层的下界面−6.09 m处，地层由混凝土进入 V 类全风化花岗岩，岩石强度的变化率为

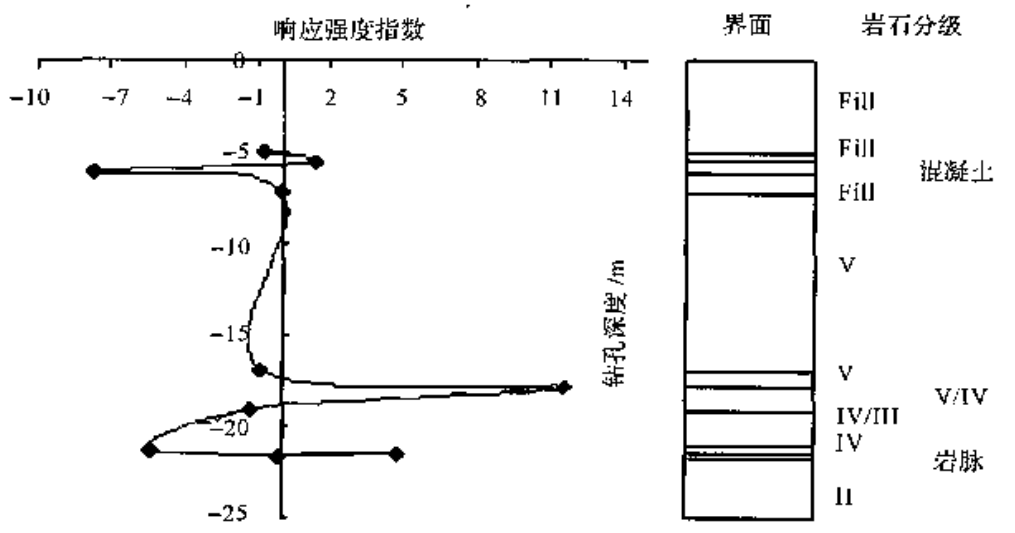


图 6.23　典型钻孔 BH-2 中穿孔速率在界面上的响应强度

Figure 6.23　The response strength of the penetrating rate at the interfaces in BH-2

−47.727，穿孔速率的响应强度指数为 0.019。可见，在强度变化大的界面上，穿孔速率的响应强度指数值较低，在岩石强度变化小的界面上，响应强度指数值较高。

在−16.86 m 处，地层同属 V 类全风化花岗岩地层，界面上岩石强度的变化率甚微，仅为 0.042，穿孔速率的响应强度指数达 11.672；在−19.00 m 处，地层由 V/IV 类花岗岩转变为 IV/III 类花岗岩，岩石强度的变化率为 0.656，穿孔速率的响应强度指数为 5.352。这进一步说明界面处岩石强度的细微变化亦将在穿孔速率上得到反馈。

6.3.3 复杂风化花岗岩地层

穿孔参数在界面处的响应强度指数如表 6.8 所示。从表中可知，在界面上，有效轴压力与岩石强度的变化呈正相关的占 54.545%，其响应强度指数的变化曲线如图 6.24 所示。在由 IV/III 类花岗岩地层转化为 III 类花岗岩地层的 8 个界面中，与岩石强度的变化呈正占 62.50%，有效轴压力的响应强度为 0.001～2.117，平均为 0.879；在−14.71 m 处，地层由 III 类花岗岩转化为 IV/III 类花岗岩，岩石强度变化指数为 0.012，而有效轴压力的响应强度却达到了 83.507。在−17.55 m 处，地层由 IV/III 类花岗岩转化为 IV 类花岗岩，岩石强度变化指数为−1.263，有效轴压力与岩石强度变化呈正相关，响应强度指数为−1.466。在−43.93 m 处，地层由 IV/III 类花岗岩转化为 V/IV 类花岗岩，岩石强度变化指数为−3.577，有效轴压力的响应强度指数为 0.011。这同样反映在岩石强度变化小的界面上，有效压力的响应强度值大。

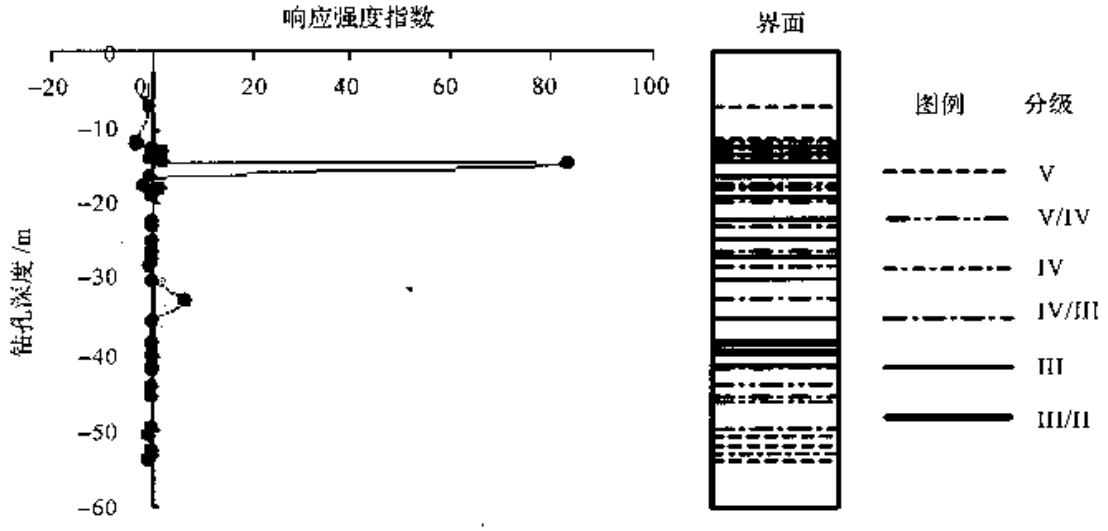


图 6.24 典型钻孔 BH-3 中有效轴压力在界面上的响应强度

Figure 6.24 The response strength of the effective thrust force at the interfaces in BH-3

表 6.8　典型钻孔 BH-3 中穿孔参数在界面处的响应强度指数

Table 6.8　The response strength index of the penetrating parameters at the geotechnical interfaces in BH-3

界面深度监测值/m	界面深度以上的岩石级别	各穿孔参数的响应强度指数			
		有效轴压力/kN	钻头转速/(r·min^{-1})	冲洗压力/MPa	穿孔速率/(cm·min^{-1})
−7.32	V-1	0.590*	40.070*	1.359	5.058*
−11.65	V-2	2.964*	138.315*	0.664	5.360
−12.00	IV/III	3.252*	4.397*	0.172	0.672
−12.88	III	0.066*	0.252	0.417	0.115
−13.00	IV/III	1.966	3.614*	0.065	1.937*
−14.01	III	0.653*	0.007*	0.139*	0.146*
−14.32	IV/III	2.117	2.989*	0.616	0.265
−14.71	III	83.507	4.167*	25.438*	7.053
−16.42	III	0.511*	0.023	0.108*	0.223
−17.55	IV/III	1.466*	0.867	0.253	0.155
−18.00	IV	1.383	5.227*	0.152	2.764*
−19.00	IV/III	0.007*	2.464*	0.612	1.113*
−22.03	III	0.134	0.126*	0.540	0.955
−22.91	IV/III	0.001	1.269*	0.260*	2.265*
−24.93	III	0.080	0.142*	0.099*	0.315
−26.18	IV/III	0.043	1.361*	0.149*	1.635*
−27.00	III	0.073	0.057*	0.100*	0.387
−28.13	IV/III	0.187*	1.573*	0.343*	1.548*
−29.97	III	0.112	0.131	0.121*	0.244
−30.10	IV/III	0.066*	2.667*	0.101*	0.685*
−32.59	III/II	6.758	1.387	1.540	20.005*
−35.12	III/II	0.011*	0.024*	0.039*	0.075*
−38.21	IV/III	0.270	2.106*	0.060*	0.142*
−39.65	III	0.057	0.013*	0.117*	0.174*
−41.27	IV/III	0.000	0.479	0.037	0.505
−41.82	V/IV	0.139	0.121*	0.240*	1.376*
−43.93	IV/III	0.011	0.219	0.005	0.206
−45.30	V/IV	0.049*	0.049*	0.397*	0.348
−49.46	IV/III	0.137*	0.212	0.082	0.027*
−50.57	V-3	0.375*	5.177*	1.965*	30.077*
−52.34	V-4	0.074	1.050	0.079*	0.421*
−53.00	IV	0.073	0.099*	0.022	0.025*
−53.83	V-5	0.430*	0.839	0.285	1.796*

* 为负值，与岩石强度呈负响应关系。

此外，在一些界面上，有效轴压力的响应强度指数与岩石强度的变化呈负相关。如在由 IV/III 类花岗岩地层转化为 III 类花岗岩地层的 8 个界面中，与岩石强度的变化呈负相关的亦占 37.50%，在这些界面上，其响应强度为 −0.007～

−3.252，平均为−1.149。从岩芯样本可以看出，这同样是由于岩石强度指标与界面处的实际强度不一致造成的。钻具转速在界面上的响应强度如图 6.25 所示。冲洗压力的响应强度指标与岩石强度的变化指数有 69.70%呈负相关，其响应强度指数的变化曲线如图 6.26 所示。在 8 个 IV/III 类花岗岩地层转化为 III 类花岗岩地层的界面上，冲洗压力响应强度指数 100%与界面处岩石强度的变化呈负相关，变化值为−1.269～−4.397，平均为−2.472。可见，当由强度较小的地层进入强度较大的地层时，冲洗压力的响应强度降低。说明当软岩进入硬岩时，冲洗压

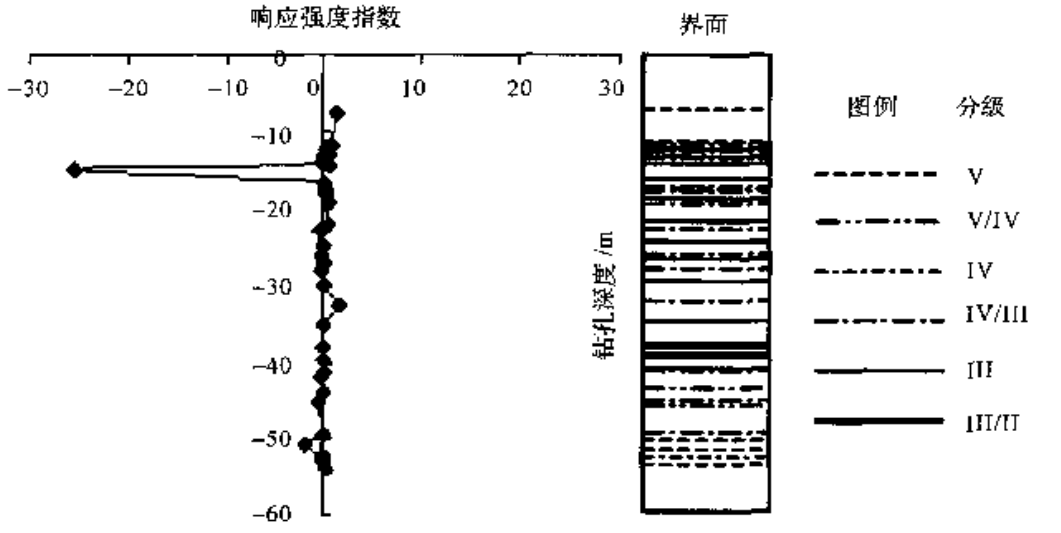


图 6.25 典型钻孔 BH-3 中钻具转速在界面上的响应强度

Figure 6.25 The response strength of the rotation speed at the interfaces in BH-3

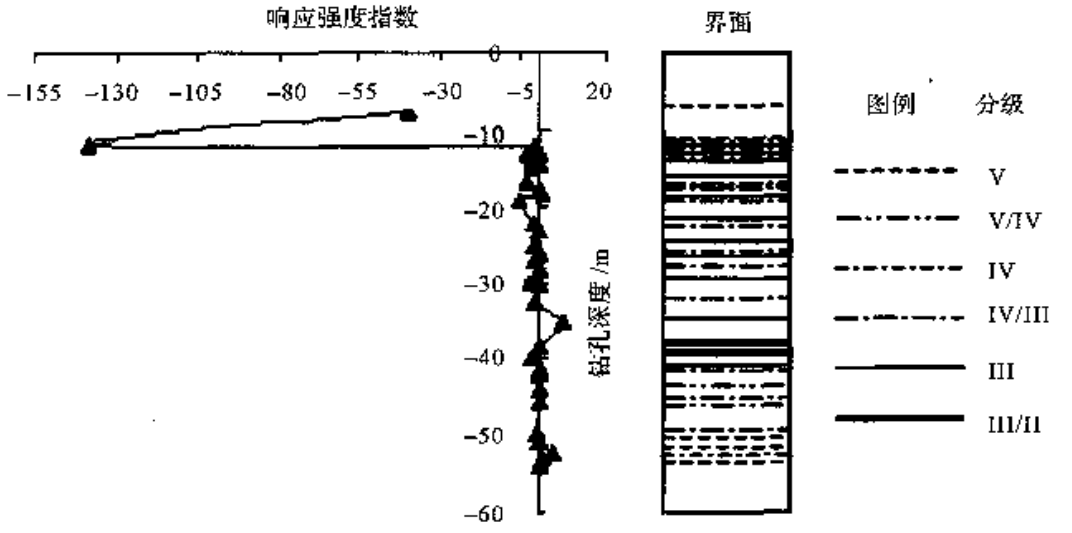


图 6.26 典型钻孔 BH-3 中冲洗压力在界面上的响应强度

Figure 6.26 The response strength of the flushing pressure at the interfaces in BH-3

力降低了。此外，当由 IV/III 类进入 IV 类或 V/IV 类花岗岩时，如在−17.55 m、−41.27 m、−43.93 m 及−49.46 m 深度处，冲洗压力的响应强度分别为 0.867、

0.479、0.219 及 0.212。当由硬地层进入软地层时，冲洗压力的响应强度增高了，说明此时所需的冲洗压力增大了。这符合岩石破碎与排渣规律。但也有例外，如在－11.65 m处，地层由 V 类花岗岩进入 IV/III 类花岗岩，界面上岩石强度增高了，冲洗压力的响应强度为－138.315，说明冲洗压力大大降低了。其原因主要是从软的全风化地层进入硬地层，穿孔速率大大降低，钻机工作方式也随之发生改变。即使在同类地层中，岩石强度发生改变，冲洗压力也随之发生改变，其响应强度指数随界面处岩石强度的增高而降低。

穿孔速率的响应强度指数与岩石强度的变化呈负相关的占 57.58%，其响应强度指数的变化曲线如图 6.27 所示。在由 IV/III 类风化花岗岩转化为 III 类风化花岗岩的界面上，穿孔速率有 75.00%与岩石强度的变化呈负相关，其响应强度指数为－0.142～－2.265 之间，平均为－1.440；25.00%与岩石强度的变化呈正相关，响应强度指数为 0.265～0.672。在 V 及 III/II 类花岗岩次级地层中，穿孔速率与岩石强度的变化同样表现出负相关。如在－7.32 m、－32.59 m 及－50.57 m 处，穿孔速率的响应强度指数分别为－40.070、－20.005 及－30.077。显然，在岩石强度微变的界面上，响应强度指数值相对较大。此外，基于与简单风化花岗岩地层中相同的原因，亦出现穿孔速率与岩石强度变化呈正相关的情形。

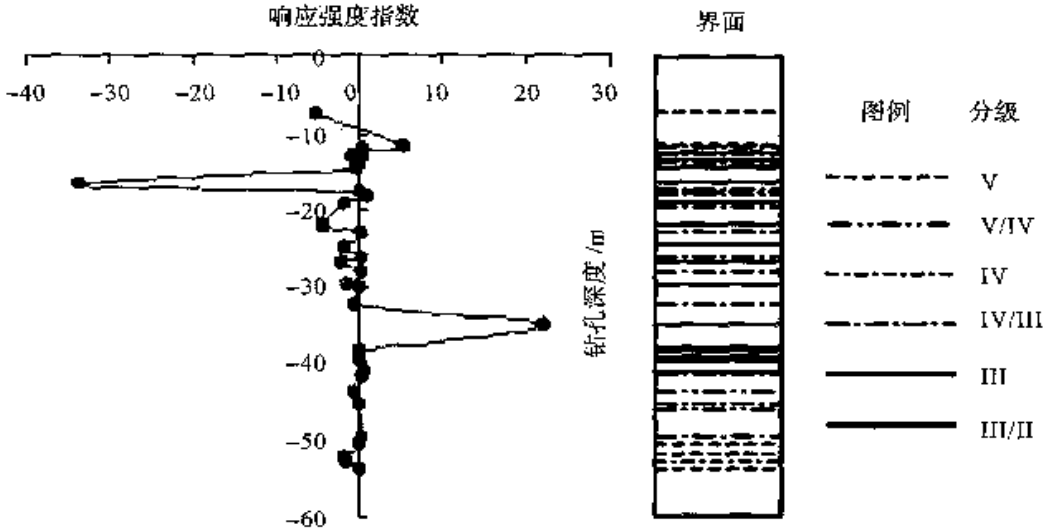


图 6.27　典型钻孔 BH-3 中穿孔速率在界面上的响应强度

Figure 6.27　The response strength of the penetrating rate at the interfaces in BH-3

从以上分析可知，在简单风化花岗岩地层、充填土风化花岗岩地层及复杂风化花岗岩地层中，有效轴压力的响应强度指数与岩石强度的变化多呈正相关，分别为 81.82%、63.64%及 54.55%。由于受岩芯样本强度与界面处实际强度分离的影响，在不同地层中，相关性分异比较大。特别是在复杂风化花岗岩地层中，由于节理、裂隙发育，地层交错变化，界面处岩石不是完整的面，而是一定厚度的蚀变层，岩芯取样困难。因此，岩芯强度难以完全反映界面处的实际情况。

在不同的花岗岩地层中，冲洗压力的响应强度指标与岩石强度的变化指数分异比较大。在简单风化花岗岩地层中，有 72.73%与岩石强度的变化指数呈正相关，与之截然相反；在充填土风化花岗岩地层中，呈负相关的占 54.55%；在复杂风化花岗岩地层中，呈负相关的占 69.70%。可见，冲洗压力的响应强度指数变化很大，没有规律性。

在简单风化花岗岩地层中，在 54.54%的界面上，钻具转速与岩石强度变化呈负相关；在充填土风化花岗岩地层中，在 63.64%的界面上，钻具转速与岩石强度变化呈正相关。由于钻具转速与钻机工作方式有关。当采用低轴压-高转速方式，钻具转速的响应强度指数与岩石强度的变化呈正相关；当采用高轴压-低转速方式时，呈负相关。然而，在一次钻进过程中，采用不同的钻进方式时，其响应规律很难判断。在简单风化花岗岩地层中，转速为 67～358 $r \cdot min^{-1}$，平均为 291 $r \cdot min^{-1}$；在充填土风化花岗岩地层中，转速为 15～390 $r \cdot min^{-1}$，平均为 276 $r \cdot min^{-1}$；在各自钻进中采用了两种钻进方式，因此，钻具转速的响应强度指数与岩石强度变化的相关性具有不确定性。

在简单风化花岗岩地层、充填土风化花岗岩地层及复杂风化花岗岩地层中，穿孔速率的响应强度指数与岩石强度的变化呈负相关，分别为 81.82%、72.73%和 57.78%。显然，对于复杂地层，由于前述相同的原因，穿孔速率的响应关系没能很好地反映出来。

从以上各参数在界面处的响应规律可知，有效轴压力、钻具转速、冲洗压力及穿孔速率等参数在界面处均存在不同程度的响应。其中，有效轴压力与岩石强度的变化率呈正响应，岩石强度越大，所需轴压力越大，轴压力的响应强度越低；当岩石强度越小，所需轴压力越小，轴压力的响应强度越大。钻具转速与岩石强度变化率的响应关系随钻进工作方式而变，采用高轴压低转速的工作方式时，钻具转速随岩石强度的增大而降低，转速的响应强度较大；当采用低轴压高转速的工作方式时，钻具转速随岩石强度的增大而增大，转速的响应强度较小。冲洗压力在界面处的响应不具有规律性。冲洗压力随孔深的增大而增大，且与岩体的裂隙性及孔底的排渣状态有关，因此，冲洗压力难以揭露所穿透地层的岩石强度性质。穿孔速率与所穿透地层的岩石强度呈负响应关系。当岩石的强度越高，穿孔速率越低，响应强度越大；当岩石的强度越低，穿孔速率越高，其响应强度越低。

此外，如何根据穿孔参数的响应强度指标对地层界面进行识别，还需要更广泛的试验数据进行统计分析。

第 7 章　风化花岗岩地层界面识别的能量原理

凿碎比功是岩石分级中的一种能量指标，是指破碎单位体积岩石所需要的功，一般采用捣碎法或砸碎法测定，其大小与破碎比有关[1]。凿碎比功的概念早在 20 世纪 60 年代就已提出[2]，根据破碎比功对岩石可钻性进行分级，并据此选择钻头和确定生产定额，已在油气钻井、地质钻探及岩土工程勘察领域广泛应用[1,3~6]。岩石可钻性指标通常的确定方法是在室内进行凿碎试验[1~7]或通过微钻模拟[8]来确定。然而，由于凿碎比功是采用冲击破碎岩石的方法在实验室测定的，与现场实际钻进还存在许多差异：①适用的钻进方式为冲击式钻进，在岩土工程中，对以旋转式钻进为主的取样钻进不适用，而捣碎器等凿碎工具与钻头形式也很难一致。②实验条件下的凿碎比功测定已经撤离了原始的环境场，是在没有环境应力、温度等约束条件下进行的，因此，所测凿碎比功不能完全反映真实条件下的破碎难易程度。③破碎功的计算难以确定。在破碎过程中，由于摩擦、热、声等的能量发散，用于破碎岩石的功难以确定。而且，在实际钻进中，由于钻井液等的作用，热能的耗散也不相同。由此可见，直接利用实际钻进参数对岩石进行分级具有非常重要的意义。

但是，在实际钻进中，若按照传统的破碎理论，须确定钻头与孔底及周边岩石之间的摩擦阻力系数、钻杆与孔间钻进液之摩擦阻力，最终还需确定用于岩石破碎的实际能量。事实上，摩擦功如何发声、发热以及如何传递，传递效率如何，热能对破碎岩石的贡献大小，无论在实验模拟还是现场测试中均存在技术与理论上的限制，难以定量计算。因此，如何克服测试与分析中的技术瓶颈，根据钻进过程中的可监测参数，从能量守恒与转换原理出发，对钻进过程中总的输入能量以及总的钻进能量进行定量分析是非常重要的，它将为钻进比功的实时计算并进而实现岩石的实时分级提供新的方法。

通过仪器钻进系统，可以获得钻机工作参数进而获得有关地层丰富的地质信息。研究表明，钻进参数如有效轴压力、钻具转速及钻孔速率与岩石地层强度及风化程度之间存在很好的响应关系[9~14]。在采用浇注混凝土试块对煤层顶、底板地层特性进行的模拟试验亦表明，基于钻进物理参数对模拟地层进行识别与分类，其误差低于 5%[15]。然而，由于地质环境的复杂性以及钻进作业的随机性，钻进参数之间以及钻进参数与地层特征参数之间的相关性并不高[9,11,13]；在钻进过程中，钻进参数不仅与钻机形式及钻进方式有关，还与钻头形式、钻头直径、冲洗、排渣状态及其钻杆连接方式等有关。可见，基于钻进参数对地层的定量识别需要满足严格的、可

比的工作条件，即钻机/具形式、钻进方式及钻头规格必须相同。因此，从钻进能量的角度来分析钻进参数变化的综合特征，可消除不可比因素产生的种种限制。

本章基于钻进过程监测系统的监测数据，对金刚石钻进系统在风化花岗岩地层中的动能、轴力功、黏滞能耗、钻进总能量及钻进比功进行了分析。研究表明，金刚石钻进能量与岩石风化程度具有很好的响应关系，在全风化及强风化花岗岩地层中，金刚石旋转钻进比功值明显低于冲击凿碎比功；在中等风化的花岗岩地层中，金刚石旋转钻进比功值与冲击凿碎比功接近；在微风化的坚硬与极坚硬岩石中，金刚石旋转钻进比功则明显高于冲击凿碎比功。

7.1 能量原理

在钻孔过程中，钻头破碎孔底岩石，需要消耗能量。破碎单位体积岩石的能量与岩石性质、钻具及钻头类型、钻进方式、排渣状态、排渣介质类型及破碎岩石的比表面积等有关。因考虑到取样的需要，在岩土工程钻探以及油气钻井中，一般以旋转式钻进为主；在其他生产钻进中，则根据岩石性质，一般在硬岩中，采用冲击式钻进为主；在中硬岩中，以冲击-旋转式钻进为主；在软岩中，则以旋转式钻进为主。在不同的钻进方式中，能量的传递方式将不同。这里，主要针对取样钻进即金刚石旋转钻进进行分析。在钻机、钻具/钻头类型及排渣方式(包括钻井液类型)一定，正常排渣与钻进的情况下，破碎岩石的粒级配比可视为一定，即破碎单位体积岩石所产生的比表面积基本恒定。此时，破碎单位体积岩石所需的能量由岩石强度及硬度等性质决定。因此，当钻进条件确定时，可用破碎单位体积岩石的实际能耗来反映岩石的物理力学性质。

设用于破碎单位体积岩石的能耗为 E，则岩石强度或硬度指标的变化可表示为：

$$I=CE(h) \tag{7.1}$$

式中：C 为岩石强度与比能之间的相关性系数。

假设钻孔深度的变化步长为 Δh，则岩石破碎比能的变化率为：

$$\frac{\Delta I}{\Delta h}=C\frac{E(h_0+\Delta h)-E(h_0)}{\Delta h} \tag{7.2}$$

当 $\Delta h\to 0$ 时，式(7.2)即为函数 $E(h)$ 的导数：

$$I'=CE'(h)=\lim_{\Delta h\to 0}\left(\frac{\Delta I}{\Delta h}\right)=\lim_{\Delta h\to 0}C\frac{E(h_0+\Delta h)-E(h_0)}{\Delta h} \tag{7.3}$$

设岩石界面的强度显著性指标为 S(变化率)，则任意位置 h 处，岩石界面识别标准为：

$$S\leqslant CE'(h) \tag{7.4}$$

上式表明，在正常钻进过程中，当破碎单位体积岩石的能耗变化率大于某个设定值 S 时，可以认为岩石强度在 h 位置发生了显著变化，说明岩石已从一种强度进入到另一强度；而 h 的位置为岩石强度显著变化的分界面。显然，当显著性指标设定后，岩石分界的划分标准随之确定；而且，通过设定 h 的步长，可以识别任意厚度层中岩石强度的显著性变化。

由于在自然界中，岩石形成条件的不同，同种岩石的强度差异迥然。显然，通过强度和破碎能量的变化来鉴定岩石，可以避免通过岩芯进行岩性分类在工程应用中的不足。此外，以往的岩石分级指标均采用实验指标，而实验指标取决于取样点的位置。一方面，通过点来揭示沿孔深的变化，不能反映岩石强度沿孔深全断面的变化。另一方面，实验指标往往离开了原始的环境场，受外界及人为扰动很大。而采用原位钻进指标，则可克服上述不足。

7.2　钻进过程能量分析

在金刚石钻进过程中，破碎岩石的能量源自钻头旋转所产生的扭矩以及作用于钻头的有效轴压（轴推力），而这两部分的能量共同用于岩石破碎、摩擦生热、破碎发声等的能量消耗。将钻进系统视为质点，则根据能量守恒原理，钻机动力系统所做的功存在以下能量转换关系：

$$P_e = P_k + P_d + P_f \tag{7.5}$$

式中：P_e 为钻机动力系统输出的总能量；P_k 为钻具旋转运动所产生的动能；P_d 为克服钻具重量并使钻具上下位移所需要的能量；P_f 为钻机动力系统能量输出过程中所产生的摩擦热、振动及声发射等的能量消耗。

在式(7.5)中，直接用于破碎岩石的能量为 P_k 与 P_d，分别由下式确定：

$$P_k = \frac{1}{2}\sum mV_l^2 = \frac{1}{2}\sum m(\pi Dn)^2 \tag{7.6}$$

式中：$\sum m$ 为钻进系统的总质量，包括钻头、取样器、钻杆及加长杆的质量，与孔深有关，为变量；V_l 为钻进系统质量中心的瞬时线速度；D 为钻进系统的回转直径；n 为进系统的转速。

$$P_d = F_e S\sin\alpha = (F_t + \sum mg - F_a)V\sin\alpha \tag{7.7}$$

式中：F_e 为施加在钻进系统的有效轴压力；S 为钻具系统在单位时间内的位移；α 为钻具系统中心轴线与水平面夹角，$0° \leqslant \alpha \leqslant 90°$，当垂直钻孔时 $\alpha = 90°$，水平钻孔时 $\alpha = 0°$；V 为穿孔速率；F_t 为加压-调压系统施加在钻具上的轴向压力；F_a 为加压-调压系统施加在钻具上的调压力，用以平衡钻具重量。

其中，钻杆质量为钻杆长度的函数，设单根钻杆的长度为 l，则钻进系统的钻杆质量 m_r 为 l 的分段函数：

$$m_r = \rho g \sum_{i=1}^{n} l_i \tag{7.8}$$

式中：ρ 为单位长度钻杆的质量；n 为钻杆的数量。

将钻机旋转马达及减速系统视为黑箱，则用于钻进的有效能量由减速系统输出轴带动钻具系统所产生的动能与钻机加压-调压系统推动钻具位移所做的轴力功组成，即用于钻进的总能量 P_w 为：

$$P_w = P_k + P_d \tag{7.9}$$

在上述钻进总能量中，钻进系统所做的功一部分用于岩石破碎，生成新的表面并发声发热，另一部分能量用于钻杆与钻井液的摩阻消耗以及液体运动。

钻头破碎岩石的摩擦能耗包括两部分：钻头孔底摩擦和侧向摩擦，这部分能量主要用于摩擦破碎岩石，生成新表面和发热、发声。其中，单位时间内孔底摩擦所消耗的能量为 $P_{f,b}$：

$$P_{f,b} = \frac{1}{4}\int_0^{\theta} n\tau_f D_b \, d\theta = \frac{1}{4} n\mu_b \pi D_b F_e \tag{7.10}$$

式中：μ_b 为钻头与孔底岩石间的摩擦系数；τ_f 为孔底摩擦应力；D_b 为钻头外直径，当为金刚石钻头钻进时，为内、外直径之均值，当为破坏式钻进时则为钻头外径之半；其他符号意义同前。

单位时间内钻头侧向摩擦所消耗的能量 $P_{f,s}$ 为：

$$P_{f,s} = \pi D_b \mu_s K_s F_e n \tag{7.11}$$

式中：μ_s 为钻头与岩石之间的侧向摩擦系数；K_s 为轴向压力的侧压系数；其他符号意义同前。其中侧压系数 K_s 与所钻凿的岩石性质及钻头材料有关。由于钻头材料的硬度通常远大于岩石材料的硬度，因此，钻头可视为刚性材料，侧压系数由岩石性质决定，可由下式估计：

$$K_s = \frac{\nu}{1-\nu} \tag{7.12}$$

式中：ν 为岩石的泊松比。

式(7.10)及式(7.11)的摩擦能耗用于生成新的岩石表面以及发声、发热。

钻具与孔壁及钻孔液(排渣液)之间的摩擦，主要来自钻杆与钻孔液之间的黏滞阻力，分沿钻杆推进方向和钻杆环向的摩擦两部分，与排渣液密度、转速及流体状态(雷诺数 Re)等有关。

单位时间内钻具环向摩擦所消耗的能量 P_c 可按下式计算：

$$P_c = \mu_c N_c \pi D_r n \tag{7.13}$$

式中：μ_c 为钻具旋转时的摩擦系数；N_c 为钻杆与孔壁或排渣液之间的黏滞力；D_r 为钻杆外直径。

单位时间内钻具轴向摩擦所消耗的能量 P_a 可按下式计算：

$$P_a = \mu_a N_a \pi V \tag{7.14}$$

式中：μ_a 为钻具发生轴向运动时的轴向动摩擦系数；N_a 为钻杆与孔壁或排渣液之间的黏着力，$N_a=N_c$。

由式(7.13)及式(7.14)可知，这两部分能耗与岩石破碎并无直接关系，全部转换为热能及液体动能。

在钻进条件一定时，若钻头不重复破碎孔底岩石，则在钻进系统的总能量中，用于非破碎岩石能耗的变化部分主要为钻杆随孔深变化的摩擦功，而其他摩擦能耗与岩石性质、钻头形式、钻进方式有关。当钻头形式和钻进方式一定时，摩擦能耗直接由岩石性质决定。因此，在总能量中，与岩石破碎有关的能量 P_{rf} 可用钻进总能量减去钻杆-液间的黏滞能耗来表示：

$$P_{rf}=P_w-(P_c+P_a) \tag{7.15}$$

从以上分析可以看出，要确定摩擦功耗或与岩石有关的能耗，需知道有关摩擦系数、岩石的泊松比以及黏滞力等参数。

有关油水乳化液摩阻的研究表明[3]，随着钻具转速的提高，管内液体一般会出现层流、层流＋Taylor 涡旋、紊流及紊流＋ Taylor 涡旋四种状态。当转数不太高，没有达到某一临界值时，流体处于层流。当转数增大，达到某一临界转速时，流体发生离心失稳，出现 Taylor 涡旋，此时，管壁摩擦力急剧增大，流体处于层流＋Taylor 涡旋。随着转速的进一步提高和雷诺数的增大，将出现紊流、紊流＋ Taylor 涡旋。显然，摩阻系数的计算还与流型有关。

钻头-岩石摩阻系数及钻杆-液间黏滞力的测定非常复杂，通常只能依靠实验模拟来估计。事实上，在实时钻进中，由于受测试条件的限制，摩阻、黏滞力及泊松比等参数是很难测定的。因此，要精确计算钻进过程中用于岩石破碎的能量是不可能的。这也说明用单位体积破碎功确定岩石可钻性存在“输入功率用于其他方面和用于切削岩层或总体积破碎功的比值对每种岩石来说都是不同的，并很难测量”的事实。然而，在实际钻进中，由于钻进速度很低，轴向黏滞阻力会很小，可以忽略不计。而环向旋转产生的黏滞力将带动钻杆与孔壁间液体运动，且由于钻杆与孔壁间的距离很小，因此，液体质点沿径向的速度梯降很小，孔间液体质点可视为等线速度运动。根据能量守恒及传递原理，黏滞力所做的功将转化为液体的动能 P_{lk}。因此，式(7.13)可用下式来计算：

$$P_{lk}=\frac{1}{2}m_1V_1^2=\frac{1}{8}\rho\pi^3n^2D_e^2(D_h^2-D_r^2)V \tag{7.16}$$

式中：m_1 为钻杆与钻孔壁间排渣液体的质量；ρ 为排渣液的质量密度；D_e 为排渣液环形柱的等效直径；D_h 为钻孔直径。其他符号意义同前。

由此，式(7.15)可直接由下式确定：

$$P_f=P_w-P_{lk} \tag{7.17}$$

经过转换后，难测参数变成了容易获取的可测参数。

值得指出的是，钻进能量的传递效率将与穿透深度成反比，且不同钻进方法、

不同钻头形式、不同钻进参数下变为热能所消耗的能量不同。随着钻孔深度的增大，钻杆增多，在钻杆联结处的能量损失也随之增大；而且，钻杆-液间摩擦与机械振动都将增大，由此而产生的热能损耗也将增大。有研究表明，钻进过程中有70%～90%的输入功转换为热能被钻进液带走[3]。尽管这个数字并不精确，但从某种意义上说明了钻孔能量的效率很低。

为了检验金刚石钻进能量的大小，在 R-20 液压回转式钻机上安装 DPM 系统，分别在香港普通风化花岗岩地层、充填土风化花岗岩地层及复杂风化花岗岩地层进行钻探试验。在岩层中钻进时，金刚石钻头的内、外径分别为 ϕ84 mm 及 ϕ100 mm，在土层中钻进时，钻头内、外径分别为 ϕ100 mm 及 ϕ115 mm。钻杆直径均为 ϕ100 mm，质量为 6.0 kg·m^{-1}。钻进液为洁净的天然水，钻进工作参数由系统自动控制和调节，钻孔的终孔深度为完整基岩以下 10 m。DPM 系统监测的参数包括轴压、调压、转数、冲洗压力、水平调节压力、钻头位移等，部分监测参数如表 7.1 所示。为了分析和比较，在采用 DPM 系统监测获取钻进参数的同时，仍采用录孔、取样、力学试验等常规试验方法获得岩性及物理力学参数。最后，根据监测数据，利用上述分析所得公式对钻进过程中的能量进行分析计算。

表 7.1 在不同风化花岗岩地层中的钻进参数

Table 7.1 Drilling parameters in Various weathered granite formations

地层分级	普通风化花岗岩地层			充填土-风化花岗岩地层			复杂风化花岗岩地层		
	有效轴压力/kN	钻头转数/(r·min^{-1})	穿孔速率/(cm·min^{-1})	有效轴压力/kN	钻头转数/(r·min^{-1})	穿孔速率/(cm·min^{-1})	有效轴压力/kN	钻头转数/(r·min^{-1})	穿孔速率/(cm·min^{-1})
充填土	—	—	—	0.573	92	35.48	—	—	—
V	1.883	132	35.23	0.609	116	50.67	3.545	88	26.41
V/IV	2.196	133	29.44	1.345	121	16.83	4.036	114	8.40
IV	3.418	142	4.98	1.350	66	4.37	2.438	97	11.22
IV/III	4.319	293	11.19	1.386	92	11.61	4.079	161	9.96
III	—	—	—	—	—	—	3.534	220	7.38
III/II	3.562	289	10.89	—	—	—	4.400	197	10.01
II	4.194	302	4.60	5.391	289	4.94	—	—	—
岩脉	4.785	282	3.15	1.960	140	2.72	—	—	—
混凝土	—	—	—	1.782	126	10.42	—	—	—

注：V 表示全风化；IV 表示强风化；III 表示中等风化；II 表示轻度风化；下同。—表示此地层缺失。

普通风化花岗岩地层由全风化至微风化花岗岩组成，各层厚度不一。其中，上覆充填土层的厚度为 0～2.0 m，由于钻孔开孔准备的需要，充填土层不在监测范围内。在此地层中，钻进系统输出的能量随孔深的变化如图 7.1 所示。

图 7.1 中只反映钻进系统的输入能量，即系统的动能与轴力功。从图中可见，钻进系统的输入能量主要来自钻具旋转运动产生的动能，有效轴压力推动钻头位移所做的功非常小，最大为 0.027 kN·m。而钻杆带动液体运动克服黏滞阻力所消耗的能量比轴力所做的功更低，最大仅为 0.007 kN·m。由于黏滞阻力所消耗

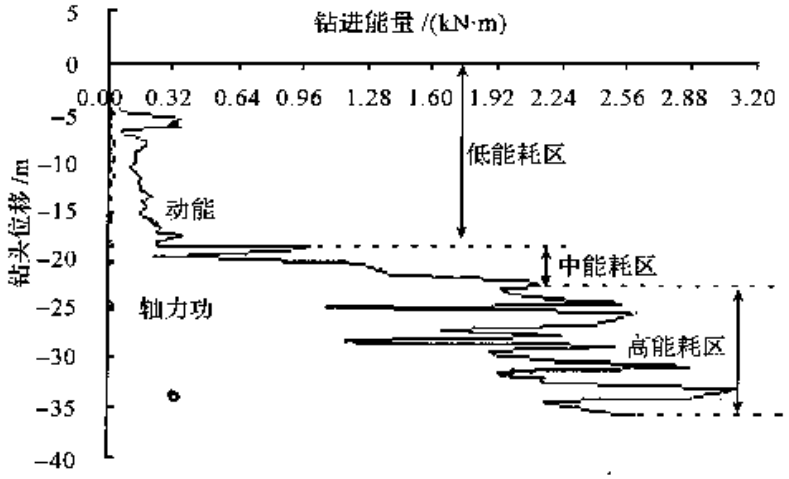


图 7.1　普通风化花岗岩地层中钻进能量随钻头位移的变化曲线

Figure 7.1　Change of penetrating energy with displacement of bit in general weathered granite formation

的能量很少，没有在能量曲线中反映出来(下同)。从总的能量来看，可以用系统输入的动能来表征系统的钻进能量。按照动能可把钻凿地层分为低能耗区、中能耗区及高能耗区。根据录孔数据可知，在 0～－18.58 m 深度范围主要为全风化(V)至强风化(IV)花岗岩地层；在－18.58～－22.50 m 范围主要强风化(IV)至中等风化(III)花岗岩地层；在－22.50～－35.67 m 则主要为中等风化(III)到轻度风化(II)花岗岩及其岩脉。显然，钻进能量分区与风化程度分级一致。能量曲线的平稳性与地层变化的复杂性有关。如在低能耗区，在－5.36～－6.67 m 区间存在一厚为 1.31 m 的中等至轻度风化的花岗岩层(III/II)，钻进能量明显增高，表明所需要的能耗增大，在能量曲线上表现出明显的脉冲。

充填土-风化花岗岩地层由上覆充填土、全风化至微风化花岗岩组成，各层厚度不一。其中，充填土的厚度为 0～－7.10 m。在此地层中，系统输出能量随孔深的变化如图 7.2 所示。与普通风化花岗岩地层中相似，钻进能量主要为系统的动能。其中，有效轴压力推动钻头位移所做的功最大为 0.038 kN·m，而钻杆带动液体运动克服黏滞阻力所消耗的能量最大仅为 0.010 kN·m。

从图 7.2 可知，同样可以划分为三个区，低能耗区的深度为 21.50 m，但中能耗区只有 1.51 m 厚，比在普通风化花岗岩中薄，而且，在－21.51～－21.68 m 处夹杂有薄层花岗岩岩脉。对照录孔数据可知，在低能耗区，主要由充填土及全风化花岗岩地层组成，其中在－5.60～－6.09 m 区间存在薄层的混凝土夹层，中能耗区亦为强风化及中等风化的花岗岩；－23.00 m 至终孔深度－31.87 m 为高能耗区，其间主要为轻度风化花岗岩。

复杂花岗岩地层由上覆充填土、全风化至中等风化花岗岩组成。在此地层中，系统输出能量随孔深的变化如图 7.3 所示。同样，系统动能是主要的钻进能量来源，轴力功及黏滞阻力所耗能量均很低，有效轴压力推动钻头位移所做的功最大为

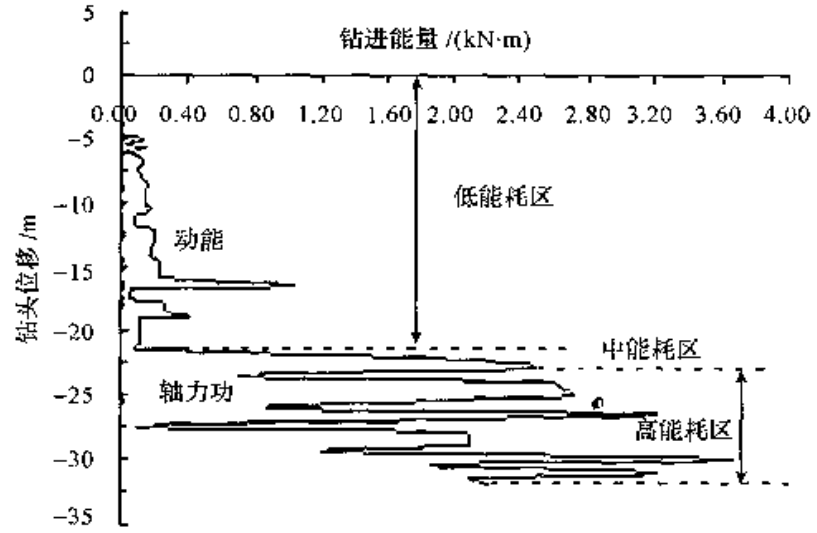


图 7.2 充填土-风化花岗岩地层中钻进能量随钻头位移的变化曲线

Figure 7.2 Change of penetrating energy with displacement of bit in weathered granite formation with earth fill

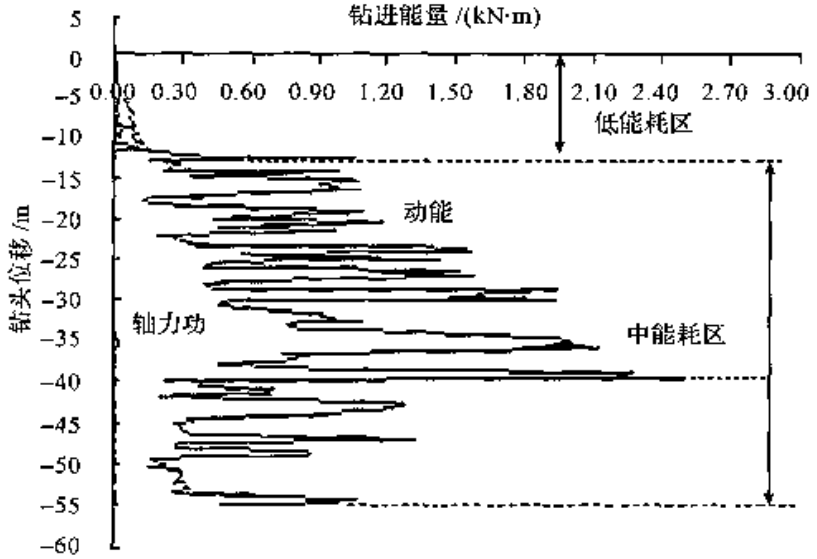


图 7.3 复杂风化花岗岩地层中金刚石钻进能量随钻头位移的变化曲线

Figure 7.3 Change of diamond penetrating energy with displacement of bit in the intricate weathered granite formation

0.163 kN·m，而钻杆带动液体运动克服黏滞阻力所消耗的能量最大仅为 0.003 kN·m。从能量的分布曲线来看，在－11.65～－55.14 m 区间能量曲线呈现为凸峰状，在－39.65 m 深处达到峰顶。但从能量尺度分布分析，与以上两种风化花岗岩地层比较，此区间亦为中能耗区。典型监测钻孔揭露情况表明，该地层由上至下，岩石单元变化十分复杂。其中，上覆充填土的厚度为 1.00 m，全风化花岗岩

(V 级)为 10.65 m,其下为强风化与中等风化花岗岩(VI/III～III 级)交替地层,厚度为 29.74 m,再其下的岩石变得更弱和更复杂。强风化、中等风化甚至全风化的岩石单元均有出现,在－49.25 ～－52.32 m 及－53.00～－53.83 m 深度区间重又出现全风化花岗岩,最后导致卡钻而终孔。

从图 7.3 可知,根据钻具系统动能的大小及变化趋势,可将动能-深度曲线划分为三个大的区段,它们是低动能区、动能增强区及动能减弱区,动能的平均值分别为 0.066、0.762、0.733 kN · m,对应的地层深度范围分别为 0～－11.65 m、－11.65～－32.60 m 和－32.60～－53.83 m,如表 7.2 所示。根据能量守恒与转化原理,金刚石钻进系统在各区段所消耗的动能是不同的。从录孔资料来看,第一区段主要为全风化花岗岩(V)地层;第二区段为强风化(IV)至中等风化花岗岩(III)交替层;在第三区段,全风化、强风化至中等风化的花岗岩均有出现,岩石单元变化没有规律性,总体上岩石风化增强,强度变弱。可见,钻具系统所消耗的动能与岩石风化程度呈负相关,反映了所穿透地层岩石风化程度的总体变化趋势。

表 7.2　复杂风化花岗岩中金刚石钻进能量在主地层中的分布

Table 7.2　Distribution of diamond drilling energy in principal formations of the intricate weathered granite

区间		动能 /(kN · m)	轴力功 /(kN · m)	黏滞能耗 /(kN · m)	总能耗 /(kN · m)	比能/(kN · m · m^{-3})
0～－11.65m	最大值	0.317	0.163	0.003	0.321	0.0888
	平均值	0.066	0.021	0.001	0.086	0.0118
	极差	0.317	0.158	0.003	0.315	0.0888
－11.65～－32.6m	最大值	1.925	0.014	0.003	1.927	2.0050
	平均值	0.762	0.004	0.001	0.765	0.3582
	极差	1.788	0.014	0.003	1.789	1.9466
－32.65～－53.83m	最大值	2.470	0.021	0.003	2.479	0.9798
	平均值	0.733	0.007	0.0005	0.740	0.2339
	极差	2.314	0.021	0.003	2.320	0.9459

此外,从动能变化的极差来分析,在第一、二及三区段的极差分别为 0.317、1.788 和 2.314 kN · m。显然,在第一区,全风化花岗岩强度很低,与充填土比较接近,其极差较小;在第三区,风化程度变化比第二区大,其极差较大。可见,极差越小,岩石风化程度的差异越小。因此,动能极差大小反映了所穿透地层岩石风化程度的复杂性。

图 7.1～图 7.3 的能量分析表明,在旋转钻进中钻进能量主要来自系统的动能,有效轴压力在钻进过程中推动钻头位移所做的功很少,占钻进总能量中的比重非常小。而且,能量曲线的跃迁或涨落与岩石风化程度的变化有关。风化程度越强,钻凿岩石所需能量越少,地层中风化程度变化越大,钻进能量的涨落也越大。

在普通风化花岗岩地层中金刚石钻进能量的分布如表 7.3 所示。研究表明，在此地层中，钻进过程中动能占了输入总能量的 83.49%～99.94%，平均为 98.16%；钻进过程中有效轴压力推动钻具位移所做的功平均只有总能量的 1.84%。钻具克服液体黏滞阻力所消耗的能量与孔深及旋转速率等有关，在全风化岩层中最大，占输入总能量的 0.87%，在各地层中平均为 0.24%。破碎岩石的能量 P_f 与地层风化程度分级相吻合。

在充填土风化花岗岩地层中(表 7.4)，在土层与岩层中有明显的不同，在土层中，动能占总能量的 7.24%～98.38%，平均为 77.67%，此时，有效轴压力推动钻具位移所做的功平均占总能量的 22.33%；在岩层中，动能占总能量的 91.03%～99.98%，平均为 98.29%，有效轴压力所做的功为 1.71%，钻杆与钻进液间黏滞阻力所消耗的能量在土层与混凝土层中最大，分别占输入总能量的 1.15% 和 1.20%，在各地层中平均耗能为 0.48%。亦可见破碎岩石的能量 P_f 与地层风化程度分级相吻合。而且，通过试验可以看出，混凝土夹层中钻凿的能耗介于充填土与强风化地层之间，这与混凝土构件的年代有关。

表 7.3 在普通风化花岗岩地层中金刚石钻进能量的分布

Table 7.3 Distribution of diamond drilling energy in weathered granite formation

地层分级	动能 P_k/(kN·m)	轴力功 P_d/(kN·m)	钻进能量 P_{rf}/(kN·m)	P_k/P_w /%	P_d/P_w /%	P_{lk}/P_w /%
V	0.149	0.011	0.159	93.13	6.87	0.87
V-IV	0.341	0.011	0.351	96.30	3.70	0.42
IV	0.545	0.003	0.547	99.40	0.60	0.06
IV/III	1.175	0.006	1.179	99.00	1.00	0.14
III/II	1.771	0.008	1.777	99.55	0.45	0.13
II	2.241	0.003	2.243	99.88	0.12	0.02
岩脉	2.026	0.002	2.028	99.85	0.15	0.04

表 7.4 在充填土-风化花岗岩地层中金刚石钻进能量的分布

Table 7.4 Distribution of diamond drilling energy in the weathered granite formation with earth fill

地层分级	动能 P_k /(kN·m)	轴力功 P_d/(kN·m)	钻进能量 P_{rf}/(kN·m)	P_k/P_w /%	P_d/P_w /%	P_{lk}/P_w /%
充填土	0.072	0.007	0.079	77.67	9.36	1.15
V	0.142	0.001	0.143	98.89	0.69	0.04
V/IV	0.148	0.003	0.150	97.81	1.81	0.12
IV	0.199	0.005	0.202	97.30	2.32	1.03
IV/III	0.301	0.004	0.305	98.54	1.31	0.20
II	1.938	0.004	1.941	99.73	0.23	0.05
岩 脉	0.347	0.001	0.348	99.75	0.27	0.03
混凝土夹层	0.111	0.003	0.113	96.00	2.66	1.20

在复杂风化花岗岩地层中(表 7.5)，动能占总能量的 2.59%～99.95%，平均

为 95.14%；钻进过程中有效轴压力推动钻具位移所做的功平均只占总能量的 4.86%。黏滞阻力所消耗的能量在全风化岩层中最大，为 0.31%，平均为 0.11%。在此复杂地层中亦可见破碎岩石的能量 P_f 与地层风化程度分级基本吻合。但在强风化层(IV)中，钻凿岩石的能耗 P_f 略低于 V/IV 类混合层，这可能与分级误差有关。因为此地层岩石风化程度变化很大，人工进行分级难免会产生误差。

表 7.5　在复杂风化花岗岩地层中金刚石钻进能量的分布

Table 7.5　Distribution of diamond drilling energy in intricate weathered granite formation

地层分级	动能 P_k/(kN·m)	轴力功 P_d/(kN·m)	钻进能量 P_{df}/(kN·m)	P_k/P_w /%	P_d/P_w /%	P_{lk}/P_w /%
V	0.145	0.016	0.161	76.94	10.01	0.31
V/IV	0.479	0.007	0.485	98.20	1.37	0.04
IV	0.240	0.005	0.244	98.31	1.91	0.08
IV/III	0.705	0.005	0.709	98.79	0.76	0.07
III	0.952	0.004	0.955	99.39	0.43	0.09
III/II	1.083	0.009	1.091	99.22	0.78	0.08

显然，在地层中钻进时，钻孔能量主要来自钻具的动能。但在土层中，有效轴压力推动钻头位移所做的功明显增大。如在充填土-风化花岗岩地层中，在土层中轴压力所做的功占总能量的 22.33%。原因是土层比较软，较小的轴压力即可达到岩石的压入硬度，将钻头压入，从而产生位移做功。这在复杂风化花岗岩地层中也得到反映。在此地层中，全风化花岗岩地层(V 级)变化大，不仅在浅地表深度范围(0～－11.65 m)存在，而且，在地基深处(－49.50～－53.83 m)也存在，虽然同属 V 级，但其风化程度在同级之间还有很大的变化，轴压力所做的功平均达 23.06%。而在风化程度较低或新鲜岩层中，由于作用于钻头上的轴压力一般达不到岩石的压入硬度，此时破碎岩石所需要的能量主要来自于钻具系统回转所产生的动能。在上述三种地层中，动能占钻进总能量平均为 97.20%。黏滞阻力所消耗的能量比较低，与地层岩性关系很大，在土层与混凝土层中的耗能明显增大，这与旋转破岩的钻进原理一致。

7.3　钻进比功

在旋转钻进过程中，金刚石钻头在一定的轴压作用下，通过钻头旋转产生的扭矩破碎孔底岩石，通过排渣系统在钻进液的共同作用下将破碎岩粉排出，从而形成钻孔。形成钻孔的难易程度不仅与岩石性质(如强度、硬度及磨蚀性等)有关，而且与钻头直径大小、钻头形式、钻进方式及排渣状态有关。当钻头直径、钻头形式、钻进方式及排渣状态一定时，钻进的难易程度反映了岩石的可钻性程度，从而也反映

了岩石抵抗机械破坏的难易程度。

岩石抵抗钻头侵入的能力可用侵入硬度来反映。岩石抵抗压头侵入的难易程度称之为岩石的侵入硬度，通常采用的指标有赫兹侵入硬度、史氏侵入硬度及巴氏侵入硬度[1]。此外，采用压碎、球磨、捣碎及砸碎等方法产生新表面所消耗的功来反映岩石的坚固性。但由于功与表面积的测量不稳定，表面耗能并不容易测定。

在旋转钻进中，其凿岩原理具有压入、压碎和剪切磨削的特征，可用岩石侵入硬度及破碎单位表面积的能耗来表征。然而，这两个指标在实时钻进中难以测定。这里，采用钻进比功来反映钻进过程中岩石破碎的综合特征，钻进比功可定义为钻进过程中，在一定的钻头形式、钻进方式和排渣条件下，钻头破碎单位体积岩石所消耗的总的钻进能量。可用公式表示为：

$$E(h)=\frac{4P_f}{\pi(D_h^2-D_i^2)V} \tag{7.18}$$

式中：P_f 为钻进过程中单位时间内钻头破碎岩石所做的功，是孔深或地层深度 h 的函数，由公式(7.17)确定；D_i 为钻头内直径，当为破坏钻进时，$D_i=0$。其他符号意义同前。

从式(7.18)可以看出，比功反映了钻进能量与破碎面积及穿孔速率的关系，因而，表明了在一定轴压下岩石抵抗钻头压入及破碎的难易程度。而且，公式中的参数容易测定或计算。

7.4 金刚石旋转钻进能量在风化花岗岩地层中的变化特征

7.4.1 旋转钻进能量在普通风化花岗岩地层界面上的变化特征

在普通风化花岗岩地层中，钻进系统的动能随孔深的变化如图 7.1 所示。从图中可知，动能变化曲线大体上可划分为低动能区、过渡区和高动能区三个区。录孔数据表明，在低动能区，主要为全风化(V 级)至强风化(IV 级)花岗岩，过渡区主要为强风化至中等风化(III 级)花岗岩，高动能区则为中等风化至轻微风化(II 级)花岗岩。显然，随着风化程度的降低，钻凿岩石所消耗的动能增大，动能的消耗与岩石的风化程度呈负相关。图中虚线为高动能区的线性拟合曲线。在低动能区，动能的变化亦表现为渐增趋势，但并不明显。在此区间，可见明显的脉冲区。从录孔数据可知，在深度－5.36～－6.67 m 区间，存在厚度为 1.31 m 的中等至轻微风化的花岗岩层(III/II)夹层。在此夹层中钻进能量明显增高，表明所需要的能耗增大，表明动能对岩石风化程度非常敏感。可见，曲线变化的平滑或脉冲大小揭示了地层风化程度变化的复杂性。

对于有效轴力推动钻头位移所做的功(图 7.4)而言，能量曲线随深度增大而

逐渐减少，说明轴力所做的功随岩石风化程度增大而增长。原因是岩石风化程度越高，岩石的侵入硬度越小，抵抗钻头破碎的能力越差，钻头在轴力作用下的产生的位移越大，轴力功也就越多。图中虚线分别为轴力功的线性及非线性拟合曲线，从拟合曲线可知，轴力功随风化程度的降低，轴力功近似线性递减或渐近线递减，规律性很强，但分区性不明显。

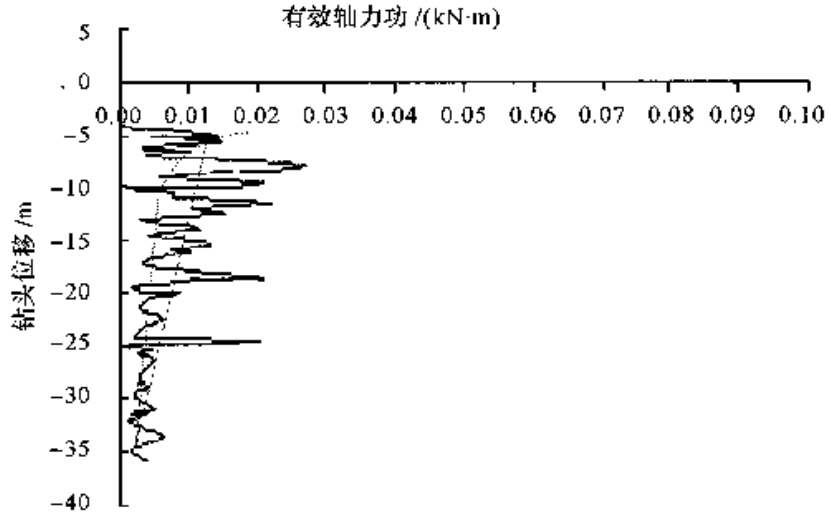


图 7.4　普通风化花岗岩地层中有效轴力功随钻头位移的变化曲线

Figure 7.4　Change of energy from effective thrust force with displacement of bit in the general weathered granite formation

黏滞能是克服钻具与钻进液之间黏滞阻力所消耗的能量，从图 7.5 可知，黏滞能耗随孔深及岩石的风化程度没有明显的规律性。因为黏滞能耗主要与液体的黏度、质量及液体的旋转半径有关。通常，在土层及强风化的岩石中，岩石破碎的颗粒比较大，在风化程度低及无风化的新鲜岩中，岩石破碎的颗粒比较小。而黏度不仅与岩粉颗粒大小有关，还与其物质组成有关。对于黏土矿物含量高的岩石而言，黏度相应增大。但因黏滞能耗比较低，因此在较小的深度范围内很难表现出规律性。

从前面的分析可知，钻进系统的总能量是钻进系统输入能量（动能与轴力功）与黏滞能耗的差值。由于轴力功和黏滞能耗相对小，钻进系统总能量的变化与系统动能的变化基本一致（图 7.6）。钻进总能量曲线与动能曲线具有很大的相似性，同样可以划分为三个区。从图 7.6 中可知，钻进能量亦随孔深的增大而增大，具有明显的区间性或阶段性。说明钻进总能量亦随风化程度的降低而增大，说明随着岩石风化程度的减弱，钻凿岩石所消耗的能量愈多。图中虚线为高能耗段的线性拟合曲线，它反映了在此区间破碎岩石能耗的梯度在递减。

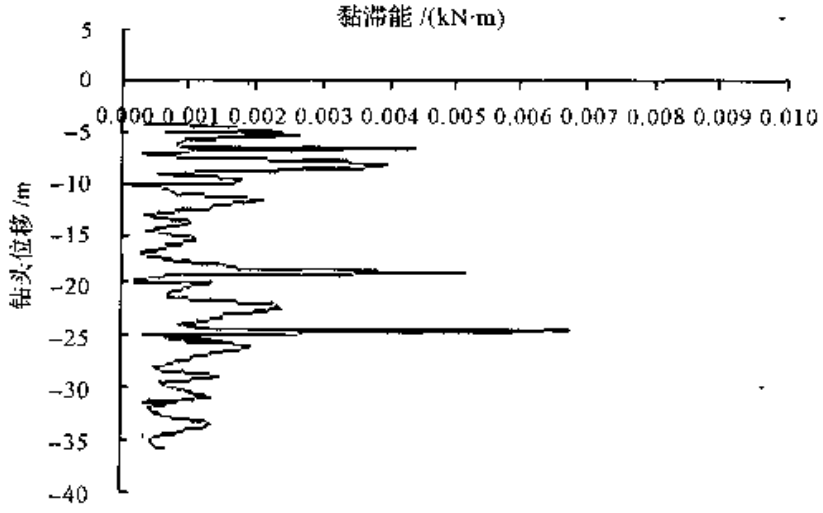


图 7.5 普通风化花岗岩地层中黏滞能随钻头位移的变化曲线

Figure 7.5 Change of viscous energy with displacement of bit in the general weathered granite formation

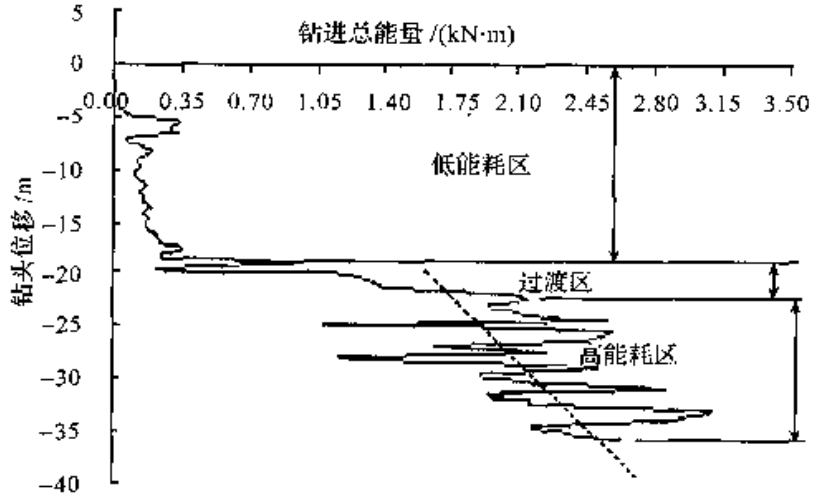


图 7.6 普通风化花岗岩地层中金刚石钻进总能量随钻头位移的变化曲线

Figure 7.6 Change of total diamond penetrating energy with displacement of bit in the general weathered granite formation

7.4.2 旋转钻进能量在充填土-风化花岗岩地层界面上的变化特征

从图 7.2 可知，金刚石钻进过程中钻具动能随孔深的变化呈现明显的分区性或阶段性。根据动能值的分布，可将其分为低动能区、过渡区及高动能区。低动能区为 0.000～－21.500 m 深度区间，其动能值最低为 0.001 kN·m，最高为 1.043 kN·m，平均为 0.157 kN·m，在此区间，旋转破碎岩石的动能消耗比较低。过渡区为 21.500～23.000 m，其动能值最低为 0.075 kN·m，最高为 2.497 kN·m，平均为 0.989 kN·m，在此区间钻具动能明显增高，与低动能区比，平均增长了 5.299 倍。高动能区为－23.000～－31.868 m，在此区间，动能值最低为 0.099 kN·m，最高为 3.678 kN·m，平均为 2.094 kN·m，与低动能区和过渡区相比，

平均增长了 12.338 倍和 1.117 倍。

从地质录孔所揭露的地层及风化程度分级来看，在低动能区，所涵盖的地层为充填土、全风化花岗岩(风化程度为 V 级)、全风化至强风化花岗岩(V/IV)、强风化花岗岩(IV)、强风化至中等风化花岗岩(IV/III)地层，风化程度比较复杂，但总体上风化程度随孔深的增大而逐渐减弱。其中，0.000～－7.100 m 为上覆充填土地层，在此地层中，在－5.600～－6.090 m 深度范围为一古老混凝土夹层，该夹层中动能的平均值为 0.091 kN·m；如果不考虑混凝土夹层对充填土层的影响，其动能的平均值 0.085 kN·m。显然，在混凝土夹层中，动能比在纯充填土层中增大了 6.59%。此外，在－16.860～－17.870 m 区间，动能变化曲线出现明显的脉冲，其值高达 1.043 kN·m。这说明在此区间岩石地层的强度及硬度增高。从录孔数据可知，在－7.100～－17.870 m 区间，虽然同属 V 级全风化花岗岩地层，但－16.860～－17.870 m 区间岩石完整性较好，属于 V 级中风化程度较低的地层。可见，钻具动能对岩石地层总体的风化程度变化敏感，响应性强。但动能对地层中的细微变化敏感程度并不高，还并不能完全反映混凝土夹层的变化特征。

有效轴压力来自钻机的加压-调压系统，在数值上等于钻具系统的重量与下向轴压力之和，再与上向调压力之差。其作用是使钻头在钻进过程中与孔底岩石紧密接触，为钻头旋转破碎岩石提供必要条件。有效轴力功随孔深的变化如图 7.7 所示。

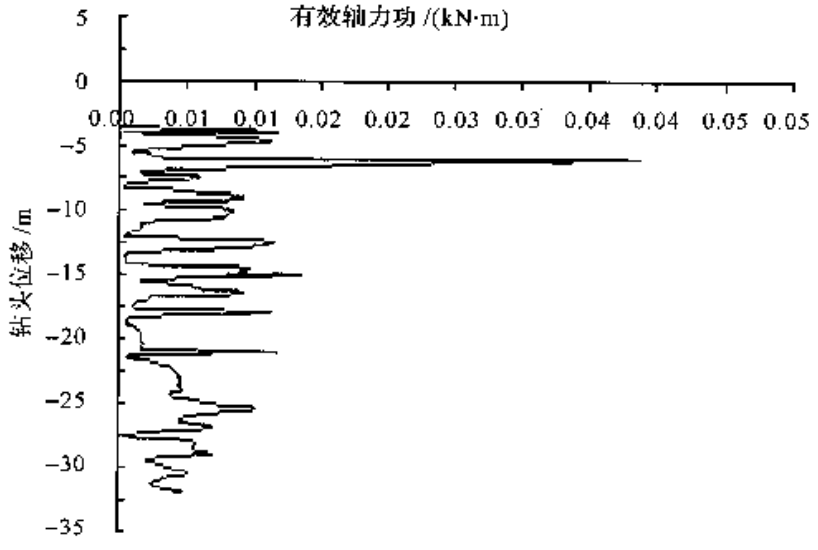


图 7.7　充填土-风化花岗岩地层中有效轴力功随钻头位移的变化曲线

Figure 7.7　Change of energy from effective thrust force with displacement of bit in the weathered granite formation with earth fill

从图 7.7 可知，相对于动能变化而言，轴力功随孔深变化的分区性不明显。如按动能区间划分，在低动能区，轴力功的平均值为 0.006 kN·m，最小为 0.3×10^{-3} kN·m。在过渡区，平均为 0.002 kN·m，最小为 0.001 kN·m；在高动能

区，轴力功平均为 0.007 kN·m，最小为 0.4×10^{-3} kN·m。可见，轴力功随变化的规律性不强。在上述纯充填土中，轴力功为 0.008 kN·m，在混凝土夹层中为 0.018 kN·m。显然，在混凝土夹层中，随着动能的增大，轴力功也增大。这与普通风化花岗岩地层中轴力功的变化规律不一致。在普通风化花岗岩地层中，轴力功随风化程度的降低，虽然分区不明显，但近似线性递减或渐近线递减的规律性却很强。这可能与钻机的钻进方式有关。通常，旋转钻进有高轴压-低转速及低轴压-高转速两种钻进方式，在不同的钻进方式下，轴力功和动能是不一样的。因此，只有当钻进方式相同时，从动能和轴力功的角度对地层进行分析才是有效的。

黏滞能是指钻进过程中，排渣液（钻进液）与孔内钻具之间的黏滞阻力所消耗的摩阻能量，该能耗与岩石破碎无关。黏滞阻力包括两部分，其一为绕钻杆轴心同轴旋转所产生的摩阻，另一部分为钻具向下推进过程中，液体沿钻孔轴相对向上运动而产生的下向摩阻。由于钻进过程中钻具的推进速率通常很小，可见，沿轴向产生的黏滞摩阻可以忽略不计。

根据能量守恒与转化原理，黏滞能通过黏滞摩阻使排渣液产生与钻杆的同轴转动，因此，在数值上等于液体旋转运动的动能。黏滞能随孔深的变化如图 7.8 所示。

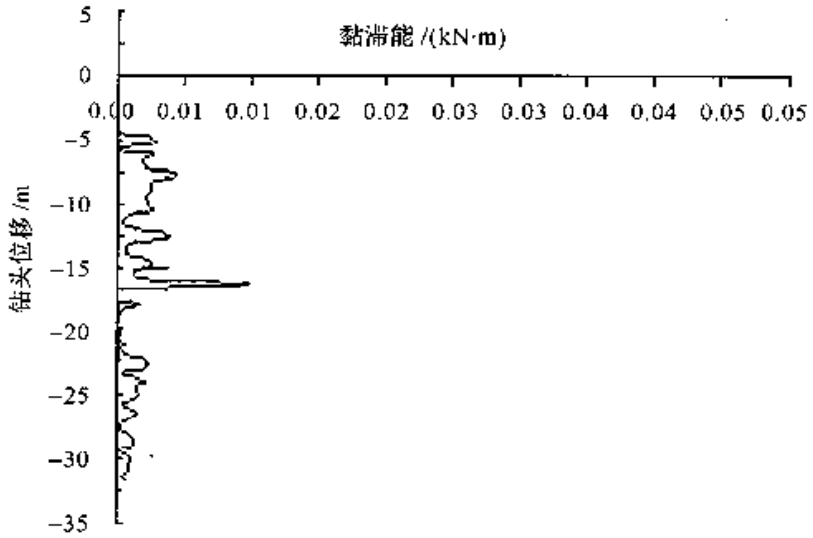


图 7.8 充填土-风化花岗岩地层中黏滞能随钻头位移的变化曲线

Figure 7.8 Change of energy viscous with displacement of bit in the weathered granite formation with earth fill

从图 7.8 可知，黏滞能耗总体上随孔深增大而递减。但在 −16.000～−17.500 m深度范围，出现了黏滞阻力增高区，最大为 0.097 kN·m，平均为 0.0023 kN·m。在−17.500～−22.000 m 范围则出现了递减区，平均仅为 0.3×10^{-3} kN·m。从 7.2 可知，黏滞能的脉冲特征与钻具动能的变化一致，说明黏滞能的变化与岩石风化程度、强度及硬度有关，而且也与钻进方式有关。

钻进总能量为钻具系统用于岩石破碎的能量总和，在数值上等于钻具系统的

动能与轴力功之和，再与黏滞能耗之差。金刚石钻进总能量随孔深的变化如图 7.9 所示。

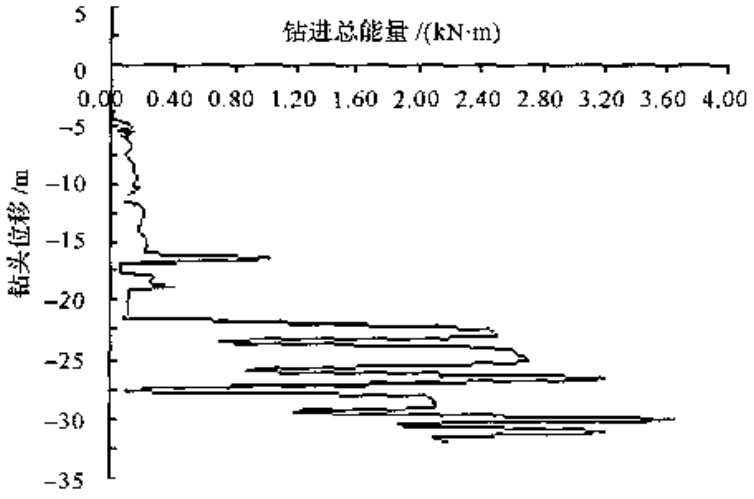


图 7.9　充填土-风化花岗岩地层中钻进总能随钻头位移的变化曲线

Figure 7.9　Change of total penetrating energy with displacement of bit in the weathered granite formation with earth fill

从能量的分布来看，在钻具系统总能量中，动能平均占 95.18%，轴力功和黏滞能分别为 4.23%和 0.59%，可见，轴力功与黏滞能所占比重很低，钻具动能在钻具总能量中占主导，总能量的变化与动能的变化一致(图 7.9)。这与普通风化花岗岩中的结果相吻合。但是，轴力功在孔深−4.500 m 处出现异常增大现象，达到 0.011 kN·m，占总能量的 91.57%。从录孔资料来看，在此深度位置，地层为次级全风化花岗岩的分界层，岩石变化并不大。究其原因，可能是遇到岩层强度变化，钻机产生不稳定从而导致大的位移，出现较大的轴力功。可见，轴力功作为识别指标可能存在较大的随机误差。

7.4.3　旋转钻进能量在复杂风化花岗岩地层界面上的变化特征

从图 7.10 可知，轴力功随孔深变化曲线亦具有明显的分区性。如按动能区间划分，对应第一、二、三区，轴力功可分为高、中及低区。在第一区钻进所消耗的有效轴力最多，平均为 0.021 kN·m；第二区最少，平均为 0.004 kN·m；在第三区，平均为 0.007 kN·m。显然，在钻进过程中，岩石风化程度越高，岩石强度越低，越易被破碎，有效轴力对岩石破碎所做的功也就越大。然而，有效轴力做功对岩石破碎的贡献远比钻具动能对岩石破碎的贡献小。

此外，钻进过程对轴力功的消耗亦没有表现出渐进性，在第三区出现了轴力功耗重又增大的现象，揭示了岩石风化程度随地层深度变化的异常。这与动能曲线所揭露的地层特性相吻合。从极差来分析，三区中极差分别为 0.158、0.014 及 0.021。在第一区，轴力功极差大，反映全风化花岗岩存在较大的差异；在第二区，

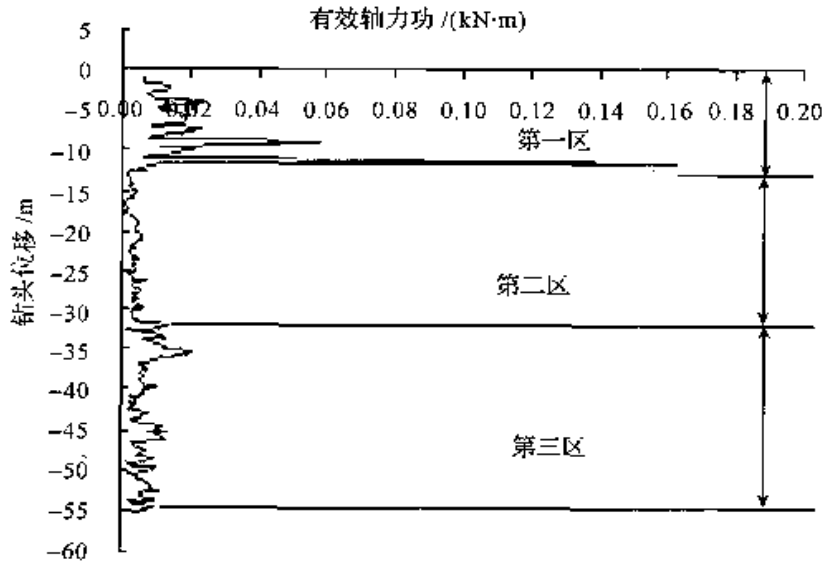


图 7.10 复杂风化花岗岩地层中有效轴力功随钻孔深度的变化曲线

Figure 7.10 Change of energy from effective thrust with depth of bit in the intricate weathered granite formation

岩石风化程度相对比较稳定，其极差值亦较小；而在第三区，地层中夹杂有不同风化程度的花岗岩，复杂程度增大，其极差较第二区大。显然，在第二、三区，轴力功极差所揭示的风化程度复杂性与动能极差所反映的情况一致。但在第一区，极差值偏大，说明全风化花岗岩存在较大的差异，这可能与地层的非均一性及不确定性等有关。从录孔所揭示的情况也说明，在第一区存在不同规格的碎石夹块及砾岩。

值得注意的是，轴力功在孔深 11.500 m 处出现异常增大现象，达到 0.163 kN·m。从录孔资料来看，在此深度位置，地层为次级全风化(V)与强/中等风化花岗岩(IV/III)的分界层。究其原因，岩层强度突然增大，钻机产生不稳定从而导致大的位移，出现较大的轴力功。可见，轴力功作为识别指标可能存在较大的随机误差。

在上述对应的区段内，黏滞能的平均值在第一、二段内相等，均为 0.001 kN·m，第三段均值为 0.0005 kN·m。显然，在此钻孔过程中黏滞能耗很低，仅占动能和轴力功的很少部分。从图 7.11 可知，黏滞能耗随孔深的变化没有明显的分区性。三个区间内的极差均为 0.003 kN·m，没有区别，这可从黏滞能的极差分析得到检验。但是，从图 7.11 可知，在上述分区界面附近出现明显的峰值。在第一、二界面，钻进过程由强风化的软岩到弱风化的硬岩过渡，其峰值脉冲多，时间长；在第二、三界面，钻进过程由弱风化的硬岩到强风化的软岩过渡，峰值脉冲少，单一脉冲作用时间长。在两种转变过程中，黏滞能的大小等于脉冲曲线所包络的面积。显然，在前一转变中的黏滞能耗多于后者。由此可见，在钻进过程中，当岩石风化程度改变时，黏滞能耗将发生改变。

根据能量守恒原理，钻进总能量在数值上等于钻具系统的动能与有效轴力做功之和，再与黏滞阻力所消耗的能量之差。钻进总能量随孔深的变化如图 7.12 所示。从能量的分布来看，在钻具系统输出的总能量中，动能平均占 93.58%，轴力

功为 6.42%，而总能量的 0.21%用于黏滞能耗。可见，轴力功与黏滞能所占比重很低，钻具动能在钻具总能量中占主导，总能量的变化与动能的变化一致(图7.3)。这与普通风化花岗岩及充填土风化花岗岩中的结果相吻合。从表 7.2 可知，在各区间的总能耗中，第一、二、三区间分别为 0.086、0.765 及 0.740 kN·m，极差分别为 0.315、1.789 及 2.320 kN·m，说明岩石风化程度越低，钻进所需要的能量越多，极差越大，风化程度越复杂。这与动能曲线所揭示的规律一致，同时也再次验证了可用钻具系统动能来估计钻进过程能量消耗的结论。

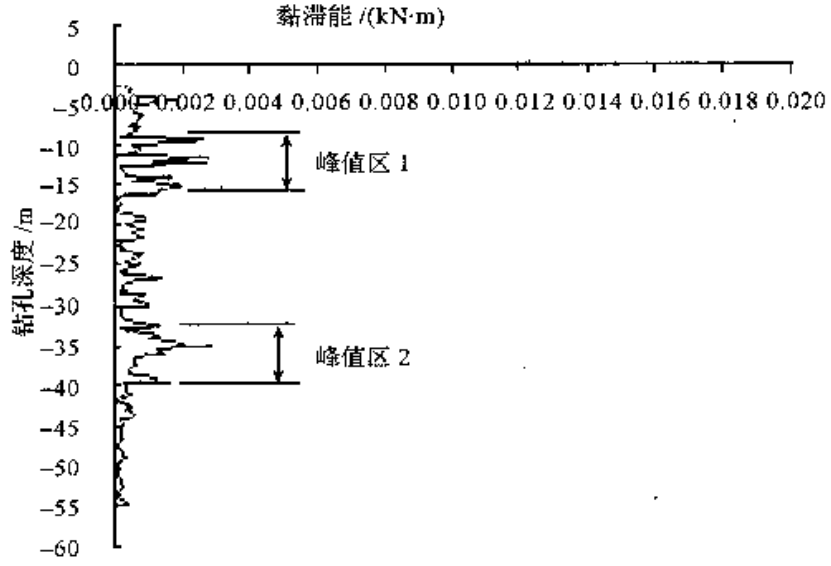


图 7.11　复杂风化花岗岩地层中黏滞能随钻孔深度的变化曲线

Figure 7.11　Change of energy for viscous with depth of bit in the intricate weathered granite formation

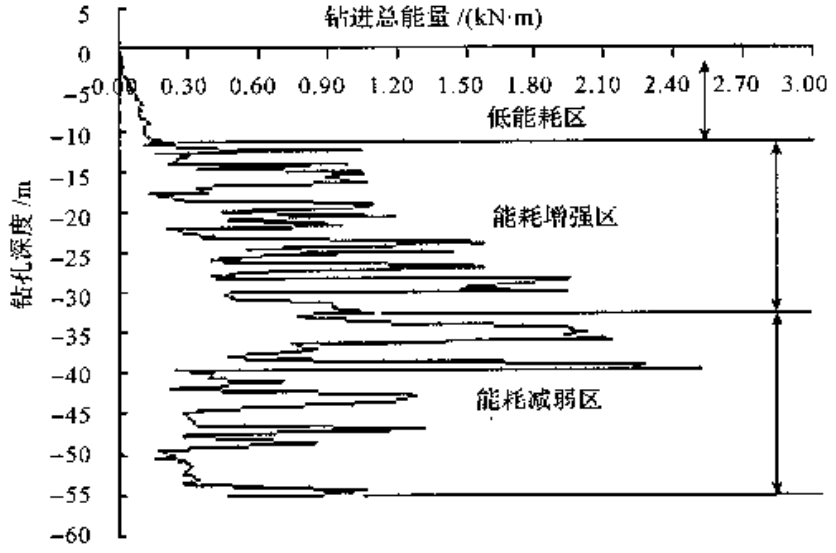


图 7.12　复杂风化花岗岩地层中金刚石总钻进能量随钻孔深度的变化曲线

Figure 7.12　Change of total diamond penetrating energy with depth of bit in the intricate weathered granite formation

7.5 金刚石旋转钻进比功在风化花岗岩界面上的变化特征

7.5.1 旋转钻进比功在普通风化花岗岩地层界面上的变化特征

在此地层中，金刚石钻进比功的变化曲线如图 7.13 所示。钻进比功曲线与钻进总能量的变化曲线具有相似性，亦可将变化曲线划分为低能耗、中能耗(过渡)及高能耗三个区，动能、钻进总能量及钻进比功的三个区间分别对应岩石风化程度的三个区间，即重度风化区、中度风化区及轻度风化区。从能量曲线来看，钻进比功曲线与动能及总能量变化曲线相比，钻进比功的中能耗区更趋于平缓。录孔数据表明，在中能耗区主要为 IV～III 风化花岗岩，属渐进过渡层，平缓的过渡曲线比动能及钻进总能量曲线更能反映岩石风化程度的演变。从图 7.13 可知，随着岩石风化程度的减弱，钻进比功呈明显的递增趋势，从虚线所表示的线性拟合曲线分析，钻进比功随孔深的梯度降增大，而且大于动能及钻进总能量的梯度变化。其在各地层中的钻进比功如表 7.6 所示。

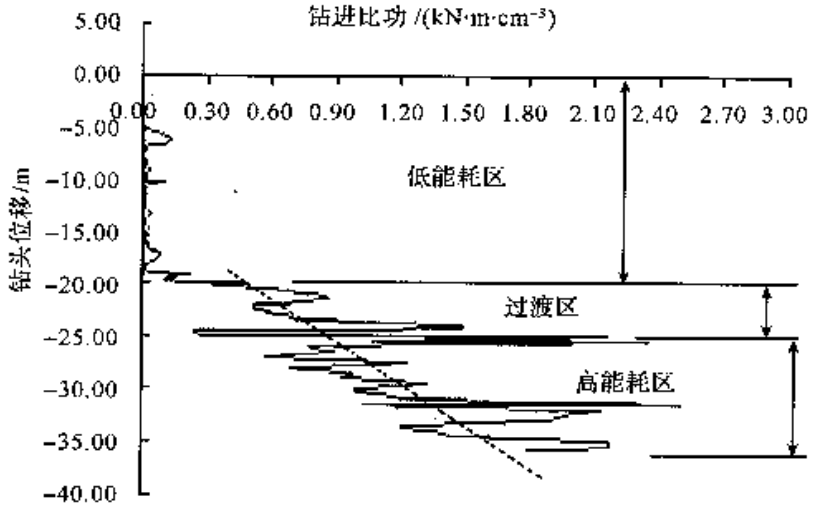


图 7.13 普通风化花岗岩地层中钻进比功随钻头位移的变化曲线

Figure 7.13 Change of penetrating specific energy with displacement of bit in the general weathered granite formation

表 7.6 金刚石钻进比功在普通花岗岩地层中的分布

Table 7.6 Distribution of diamond penetrating specific energy in the general weathered granite formation

风化程度分级	V	V/IV	IV	IV/III	III/II	II
钻进比功/(kN·m·cm^{-3})	0.0196	0.0390	0.2840	0.4702	0.6021	1.4434

注：V 为全风化；IV 为强风化；III 为中等风化；II 为轻度风化。

从表 7.6 可以看出，在全风化与强风化花岗岩地层中，钻进比功低于 0.0500 kN·m·cm^{-3}，在微风化花岗岩地层中很高，达到 1.4434 kN·m·cm^{-3}。按照凿碎比功的分级[1]，极软类松散岩石如页岩、煤及凝灰岩中的凿碎比功的上限为 0.1862 kN·m·cm^{-3}；在极坚硬的岩浆岩及石英岩中为 0.9800 kN·m·cm^{-3}。这表明旋转钻进时在松散层中钻进比功值低于凿碎比功值，而在坚硬岩石中，则高于凿碎比功。钻进比功值在不同风化程度的花岗岩岩层中具有显著的差异。显然，冲击凿碎比功在旋转钻进中不再适用，采用凿碎比功对岩石进行分级也是欠合理的。

7.5.2　旋转钻进比功在充填土-风化花岗岩地层界面上的变化特征

旋转钻进比功定义为钻具旋转破碎单位体积原始岩石所消耗的钻进总能量。钻进比功随孔深的变化如图 7.14 所示。

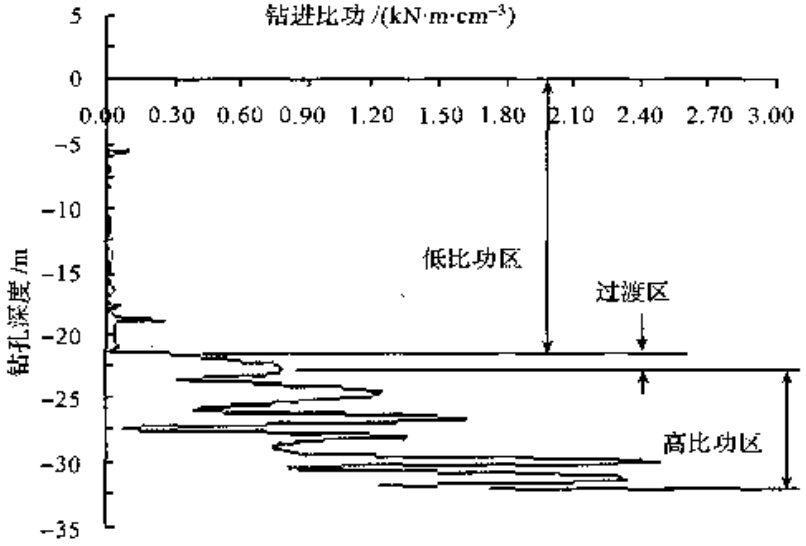


图 7.14　充填土-风化花岗岩地层中钻进比功随钻头位移的变化曲线

Figure 7.14　Change of penetrating specific energy with displacement of bit in the weathered granite formation with earth fill

从图 7.14 可知，与其他特征曲线相比，钻进比功变化曲线更为平滑，这反映了地层变化的渐变性。显然，钻进比功随钻孔深度的增大而呈现明显的分区性，随着地层深度的增加，钻进比功在增加。在低比功区，其深度范围为 0～－21.500 m，主要为充填土、全风化至中等风化的花岗岩，钻进比功为 0～0.2715 kN·m·cm^{-3}，平均为 0.0249 kN·m·cm^{-3}。在此区域内，包含有 0.490 m 的古老混凝土夹层，钻进比功为 0.0023 kN·m·cm^{-3}，其钻进比功值很低，与录孔所揭示的情况一致。过渡区的深度范围比较小，为－21.500～－22.500 m，主要为中等风化花岗岩，钻进比功为 0.2715～0.7833 kN·m·cm^{-3}，平均为 0.4415 kN·m·cm^{-3}。高比能区的深度范围为－22.500～－31.868 m，主要为微风化花岗岩及花

岗岩岩脉，其钻进比功为 0.7833～2.4935 kN·m·cm^{-3}，平均为 1.1062 kN·m·cm^{-3}。钻进比功与地层深度的变化如表 7.7 所示。

在不同的地层中，岩石的风化程度不同，岩石强度及硬度不同，其抵抗钻具破坏的能力不同。在不同风化程度的花岗岩地层中，钻进比功的分布如表 7.8 所示。

表 7.7 在充填土-风化花岗岩地层中金刚石钻进比功随地层深度的变化

Table 7.7 Variation Values of penetrating specific energy with the depth of the weathered granite formation with earth fill

深度范围	地层岩性	风化程度分级	钻进比功平均值/(kN·m·cm^{-3})
0.000～3.866	充填土	—	0.0012
3.866～5.000	充填土	—	0.0054
5.000～5.600	充填土	—	0.0919
5.600～6.090	古老混凝土	—	0.0023
6.090～7.100	充填土	—	0.0063
7.100～16.860	全风化花岗岩	V	0.0099
16.860～17.870	全风化花岗岩	V	0.0780
17.870～19.000	全风化/强风化花岗岩	V/IV	0.2715
19.000～21.330	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.3051
21.330～21.510	强风化花岗岩	IV	0.2613
21.510～21.680	花岗岩岩脉	—	0.3290
21.680～31.868	微风化花岗岩	II	1.2230

从表 7.8 可知，在充填土-全风化花岗岩中，钻进比功的值低于 0.050 kN·m·cm^{-3}，在微风化花岗岩地层中，比功达到 1.2230 kN·m·cm^{-3}。当风化程度由 V 级转变为 V/IV 级时，钻进比功的消耗提高了 6.90 倍；当由 V/IV 级转变为 IV 级时，钻进比功增长了 0.09 倍；同样，当由 IV 级转变为 IV/III 级、IV/III 级转变为岩脉以及由岩脉转变为 II 级风化花岗岩时，钻进比功分别提高了 1.35 倍、0.24 倍和 2.72 倍。显然，风化程度对钻进比功的影响很大，钻进比功值在不同风化程度的地层中具有显著差异。

表 7.8 金刚石钻进比功在充填土-风化花岗岩地层中的分布

Table 7.8 Distribution of diamond penetrating specific energy in the weathered granite formation with earth fill

风化程度分级	充填土	古老混凝土	V	V/IV	IV	IV/III	岩脉	II
钻进比功/(kN·m·cm^{-3})	0.0215	0.0264	0.0131	0.1035	0.1127	0.2651	0.3290	1.2230

随着风化程度的减弱，钻进比功明显增大。在充填土及全风化岩中，钻进比功明显低于凿碎比功，在微风化岩中，钻进比功则明显高于凿碎比功。这与普通风化花岗岩地层中的研究结果相吻合。值得指出的是，在此地层中钻进比功值低于普通风化花岗岩地层中的指标值。在 IV/III 级风化地层中，钻进比功比普通风化花

岗岩中降低了 43.83%，在 II 级微风化花岗岩中，降低了 15.27%。究其原因，可能与地质构造本身的复杂性以及根据风化程度分级存在定性误差有关。

7.5.3　旋转钻进比功在复杂风化花岗岩地层界面上的变化特征

从钻进比功来分析，第一、二、三区分别为 0.0118、0.3582 及 0.2339 kN·m·cm^{-3}，亦表现为与总能耗相似的变化规律，反映了所钻进地层风化程度由强到弱、再到次弱的地质现象。图 7.15 所揭示的规律与动能及总能量变化曲线相似，但钻进比功变化曲线更平滑，且展示了−11.65 m 处的突变特征，因而揭示了地层变化的渐变性与突变性。钻进比功与地层深度的变化如表 7.9 所示。

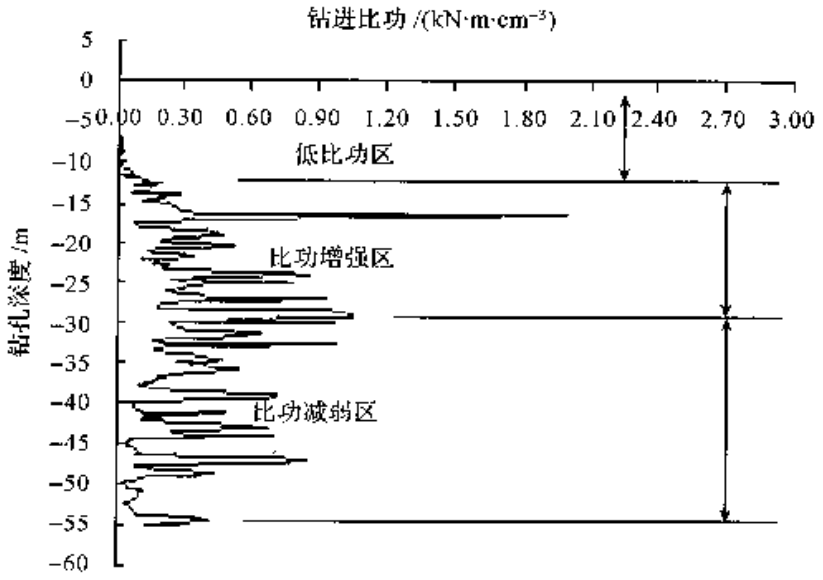


图 7.15　复杂风化花岗岩地层中钻进比功随钻孔深度的变化曲线

Figure 7.15　Change of penetrating specific energy with depth of bit in the intricate weathered granite formation

表 7.9　钻进比功在复杂风化花岗岩地层中随地层深度的变化

Table 7.9　Variation values of penetrating specific energy with the depth of formation in the intricate weathered granite

深度范围	地层岩性	风化程度分级	钻进比功平均值/(kN·m·cm^{-3})
0.000～−11.650	全风化花岗岩	V	0.0104
−11.650～−12.000	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.0476
−12.000～−12.880	中等风化花岗岩	III	0.0703
−12.880～−13.000	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.1737
−13.000～−14.010	中等风化花岗岩	III	0.2517
−14.010～−14.320	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.1768
−14.320～−16.420	中等风化花岗岩	III	0.2997
−16.420～−17.550	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.0658
−17.550～−18.000	强风化花岗岩	IV	0.0971
−18.000～−19.000	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.4819

续表

深度范围	地层岩性	风化程度分级	钻进比功平均值/(kN·m·cm^{-3})
−19.000～−22.030	中等风化花岗岩	III	0.2154
−22.030～−22.910	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.2266
−22.910～−24.930	中等风化花岗岩	III	0.7886
−24.930～−26.180	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.2469
−26.180～−27.000	中等风化花岗岩	III	0.9317
−27.000～−28.130	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.2067
−28.130～−29.970	中等风化花岗岩	III	0.9648
−29.970～−30.100	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.2218
−30.100～−35.120	中等风/微风化花岗岩	III/II	0.3362
−35.120～−38.210	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.2119
−38.210～−39.650	中等风化花岗岩	III	0.6004
−39.650～−41.270	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.4930
−41.270～−41.820	全风化/强风化花岗岩	V/IV	0.2013
−41.820～−43.930	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.4012
−43.930～−45.300	全风化/强风化花岗	V/IV	0.0652
−45.300～−49.460	强风化/中等风化花岗岩	IV/III	0.0552
−49.460～−52.340	全风化花岗岩	V	0.0776
−52.340～−53.000	强风化花岗岩	IV	0.0714
−53.000～−53.830	全风化花岗岩	V	0.1600

在不同的地层中，岩石的风化程度不同，岩石强度及硬度不同，其抵抗钻具破坏的能力不同，因此破碎岩石的比功也不同。通过不同风化程度花岗岩地层中能耗的统计分析，获得钻进比功的分布如表 7.10 所示。

表 7.10 金刚石钻进比功在复杂风化花岗岩地层中的分布

Table7.10 Distribution of diamond penetrating specific energy in the intricate weathered granite formation

风化程度分级	V	V/IV	IV	IV/III	III	III/II
钻进比功/(kN·m·cm^{-3})	0.0328	0.1263	0.2669	0.2956	0.3497	0.3647

注：V 为全风化；IV 为强风化；III 为中等风化；II 为轻度风化。

从表 7.10 可知，岩石的破碎比功随风化程度的降低而增大。在全风化花岗岩(V)中，钻进比功的值为 0.0328 kN·m·cm^{-3}，在中/微风化花岗岩地层(III/II)中，钻进比功为 0.3647 kN·m·cm^{-3}。当风化程度由 V 级转变为 V/IV 级时，钻进比功的提高了 2.85 倍；当由 V/IV 级转变为 IV 级时，钻进比功增长了 1.11 倍；同样，当由 IV 级转变为 IV/III 级、IV/III 级转变为 III 级以及由 III 级转变为 II 级风化花岗岩时，钻进比功分别提高了 0.11 倍、0.18 倍和 0.04 倍。显然，风化程度对钻进比功的影响很大，钻进比功值在不同风化程度的地层中具有显著差异。

可见，采用金刚石旋转钻进时，全风化岩中钻进比功明显低于凿碎比功，在强风化至中/微风化岩中，钻进比功接近德列捷斯基花岗岩、列尼可夫斯基花岗岩的

砸碎比功[1]。若按凿碎比功分级，则属于较坚固～很坚固类岩石，中等硬度。若与同类金刚石钻进时的钻进比功进行比较，在此复杂地层中，在全风化及强风化花岗岩地层中，比功值与普通风化花岗岩及充填土风化花岗岩地层中的指标值接近，但在中硬以上风化花岗岩中的钻进比功值比普通风化花岗岩中要低。可能与地质构造本身的复杂性以及根据风化程度分级存在定性误差有关。值得指出的是，由于此次试验的地基非常复杂，在－53.83 m 时出现卡钻，导致试验无法进行下去，因此，没有获得微风化花岗岩地层中的钻进比功指标，也无法与前述试验比较。按照前面的研究，在微风化花岗岩地层中的钻进比功指标将高于同类岩石中的凿碎比功。

总之，金刚石旋转钻进比功在全风化及强风化花岗岩中比相应的冲击凿碎比功值低，在中等硬度的花岗岩中与冲击凿碎比功接近，在坚硬以上花岗岩中则远高于冲击凿碎比功。

7.6　金刚石旋转钻进比功与花岗岩分级

7.6.1　金刚石旋转钻进比功在不同花岗岩地层中的分布

1. 旋转钻进比功在普通风化花岗岩中的分布

金刚石钻进比功的变化如图 7.16 所示。在此地基中，钻进比功随岩石风化程度(级)的减弱而增大，其比功值的变化如表 7.11 所示。从表 7.11 可知，随着风化

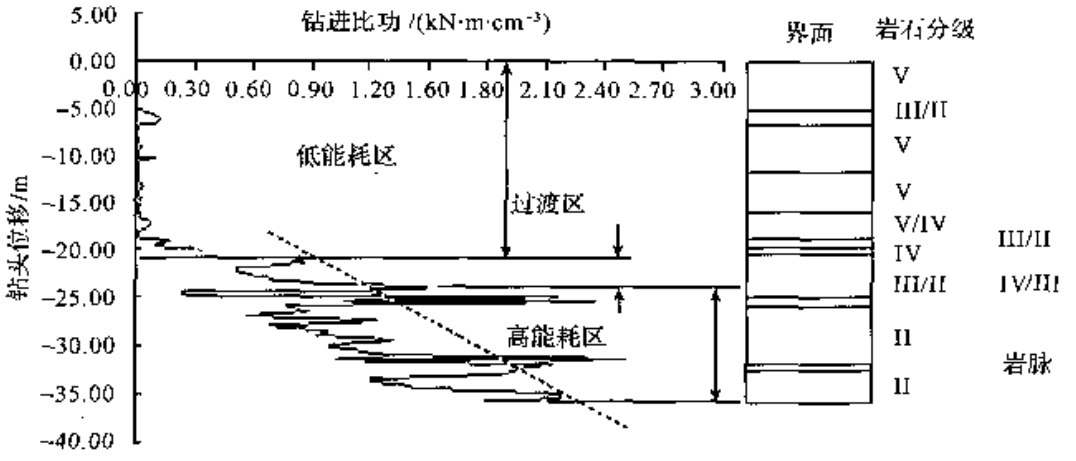


图 7.16　普通花岗岩地层中金刚石钻进比功随钻孔深度的变化曲线

Figure 7.16　Variation of diamond drilling specific energy with depth of borehole in the general granite formation

(左图虚线为线性拟合直线，右图为沿钻孔剖面的岩土工程界面及相应的岩石风化程度分级)

程度的减弱，平均比功指标增大，反映了岩体随风化程度的减弱，抵抗破坏能力增强的渐变性质。尽管钻进比功在不同风化程度的地层中具有明显的分区性，但变

化范围较大，不同风化程度岩体的比功值，其下界指标低于次级风化程度岩体的上界指标，即不同风化程度岩体的比功变化区间呈现相互交叉的特征。这进一步揭示了岩体非连续及非均质的本质。由于不同风化程度的岩体中必然包含各种节理、裂隙甚至软弱夹层等结构面，比功值会出现比较低的下界值。然而，采用实验指标进行的岩石分级时，岩石中结构面的含有率将大大降低，从而增大了比功指标的下门槛值，缩短了变化范围，在应用上对于完整性好的岩体才是合适的。

表 7.11 金刚石钻进比功在普通风化花岗岩地层中的分布

Table 7.11 Distribution of diamond penetrating specific energy in the general weathered granite formation

风化程度分级	V	V/IV	IV	IV/III	III/II	II
比功均值/(kN·m·cm^{-3})	0.0196	0.0390	0.2840	0.4702	0.6021	1.4434
比功变化范围	0.0045～0.1113	0.0105～0.0744	0.1075～0.4978	0.064～1.4971	0.2470～0.9439	0.5682～2.3534

注：V为全风化；IV为强风化；III为中等风化；II为轻度风化。

事实上，对于工程岩体的划分，要求可操作性强，不可能也无必要划分得太细。根据图 7.16，可将比功值划分为三个区间，即低比功区、过渡区和高比功区。其深度范围、比功平均值及变化区间如表 7.12 所示。

表 7.12 根据金刚石钻进比功进行的普通风化花岗岩分类

Table 7.12 Classification of general weathered granite formation by diamond penetrating specific energy

比功区间	低比功区	过渡区	高比功区
岩石类型	软 岩	中硬岩	硬 岩
深度范围/m	−4.00～−18.58	−18.58～−24.00	−24.00～−35.67
比功均值/(kN·m·cm^{-3})	0.0421	0.6620	1.3780
比功变化范围	0.0045～0.2324	0.2466～1.4971	0.2470～2.4665

显然，根据比功均值的变化，可将相应区段的岩体划分为软岩、中硬岩及硬岩。从图 7.16 可知，软岩层主要包括全风化及强风化花岗岩，其中含少量中等风化至微风化的岩石夹层，这类岩石也构成了此地基中的过渡层即中硬岩，而硬岩层则主要由微风化岩组成，局部含花岗岩岩脉。

2. 旋转钻进比功在充填土-风化花岗岩中的分布

钻进比功的变化如图 7.17 所示。在充填土-风化花岗岩地层中，钻进比功的分布如表 7.13 所示。在此地层中，比功的均值指标大多低于普通风化花岗岩地层中的指标值。可见，此地层岩体抵抗金刚石钻头旋转破坏的能力相对普通花岗岩地层较弱。从其埋藏特点分析，此地基原属坡地，后因建筑而充填平整而成当前地

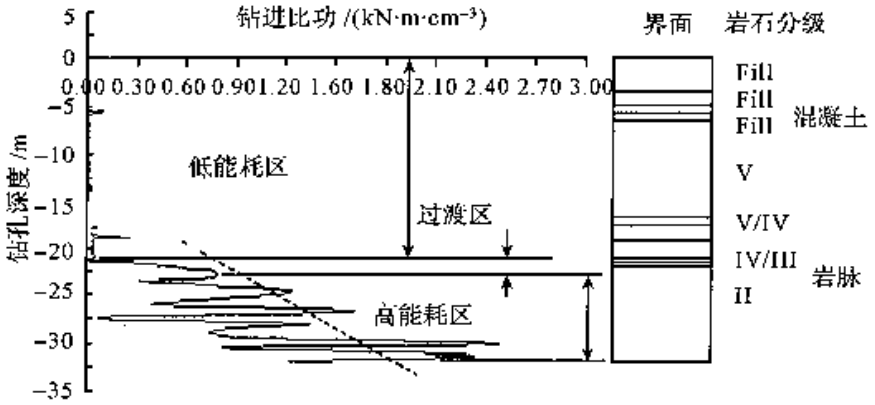


图 7.17　充填土-花岗岩地层中金刚石钻进比功随钻孔深度的变化曲线

Figure 7.17　Variation of diamond penetrating specific energy with depth of borehole in the granite formation with earth fill

基，其岩基应属出露岩体，说明其风化作用相对较普通花岗岩地基强烈。

表 7.13　金刚石钻进比功在充填土-风化花岗岩地层中的分布

Table 7.13　Distribution of diamond penetrating specific energy in the weathered granite formation with earth fill

风化程度分级	充填土	V	V/IV	IV	IV/III	II
比功均值 /(kN·m·cm⁻³)	0.0215	0.0131	0.1035	0.1127	0.2651	1.2230
比功变化范围	0.0000～0.1145	0.0017～0.0780	0.148～0.2175	0.0258～0.2613	0.0062～0.2715	0.0766～2.4935

与普通花岗岩地层的分析同理，亦可将图 7.17 中的比功变化曲线划分为三部分，软岩主要为全风化至强风化花岗岩，中硬岩为中等风化花岗岩及部分岩脉，硬岩为微风化花岗岩。此地层中的过渡区相对较小，仅 1.50 m，充填土中夹杂有 0.49 m 厚的古老混凝土块。

比功分区的情况如表 7.14 所示。从表中可知，各区段的比功值比普通花岗岩的值相对要低，在软岩、中硬岩及硬岩中分别降低了 35.87%、26.22%和 18.37%。显然，随着地层深度的增大，风化影响减弱。

表 7.14　根据金刚石钻进比功进行的充填土-风化花岗岩分类

Table 7.14　Classification of the weathered granite formation with earth fill by diamond penetrating specific energy

比功区间	低能耗区		中能耗区	高能耗区
岩石类型	充填土	软岩	中硬岩	硬岩
深度范围/m	−3.50～−7.10	−7.10～−21.50	−21.50～−23.00	−23.00～−31.868
比功均值 /(kN·m·cm⁻³)	0.0191	0.0270	0.4884	1.1249
比功变化范围	0.0000～0.1145	0.0017～0.2715	0.2613～0.7833	0.0766～2.4935

3. 旋转钻进比功在复杂风化花岗岩中的分布

钻进比功的变化如图 7.18 所示。在此复杂地层中，钻进比功的分布如表 7.15 所示。从表中可知，比功值多数介于普通风化花岗岩与充填土-风化花岗岩之间，其变化范围的特点与上述两种岩层中相同。

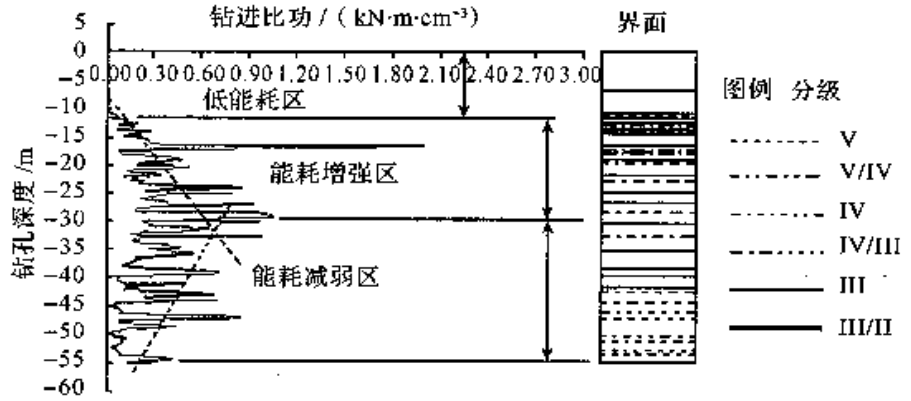


图 7.18 复杂花岗岩地层中金刚石钻进比功随钻孔深度的变化曲线

Figure 7.18 Variation of diamond penetrating specific energy with depth of borehole in the intricate granite formation

表 7.15 金刚石钻进比功在复杂风化花岗岩地层中的分布

Table 7.15 Distribution of diamond penetrating specific energy in the intricate weathered granite formation

风化程度分级	V	V/IV	IV	IV/III	III	III/II
比功均值/（kN·m·cm⁻³）	0.0328	0.1263	0.2669	0.2956	0.3497	0.3647
比功变化范围	0.0000～0.1197	0.0466～0.6955	0.0390～0.3851	0.0018～2.0050	0.1519～0.9798	0.0018～1.0503

从图 7.18 可知，由于此地层的复杂性，比功随地层深度曲线呈现为低—高—低的变化态势。因此，根据这一特点，可将其划分为低比功区、比功增强区及比功减弱区，结果如表 7.16 所示。从比功的变化特点分析，比功增强区及减弱区的指标值均低于上述两种花岗岩地层中的相应指标值；从图 7.18 可知，增长曲线与减弱曲线基本对称，其与深度坐标轴所包络的面积相近，表明在增强和减弱区的钻进过程中，能耗基本相同，抵抗旋转钻进破坏的能力相近。因此，均属于中硬岩石类型。

表 7.16 根据金刚石钻进比功进行的复杂风化花岗岩分类

Table7.16 Classification of intricate weathered granite formation by diamond penetrating specific energy

比功区间	低比功区	比功增强区	比功降低区
岩石类型	软岩	中硬岩	硬岩
深度范围/m	−1.00～−11.65	−11.65～−29.00	−29.00～−53.83
比功均值/（kN·m·cm⁻³）	0.0118	0.3280	0.2551
比功变化范围	0.0000～0.0888	0.0476～2.0050	0.0339～0.9798

7.6.2　基于金刚石旋转钻进比功的花岗岩岩体分级

根据以上试验结果分析，可获得不同风化程度花岗岩地层中金刚石旋转钻进比功的分布及其均值指标，如表 7.17 所示。其中，变化范围为同级岩体中比功值的下下界值与上上界值。从表中可知，钻进比功的均值指标随风化程度的降低而增大。但过渡级指标偏小。如 V/IV 的指标值均偏向于 V 级风化岩体的指标值，IV/III 的指标值均偏向于 IV 级风化岩体的指标值，而 III/II 的指标值均偏向于 III 级风化岩体的指标值，这说明过渡级岩体的风化程度以前级为主的事实。此外，不同风化程度的岩体中，比功的变化范围较大，这是由岩体的非连续及非均质等性质决定的。即使在硬度较大的硬岩层中，也可能出现比较低的下门槛值。正因为如此，岩体分类必须先根据比功曲线进行分段，然后才能分级。

表 7.17　金刚石钻进比功与花岗岩风化程度分级

Table 7.7　Diamond penetrating specific energy and classification of granite formation by weathered grade

风化程度分级	V	V/IV	IV	IV/III	III	III/II	II
比功均值/($kN \cdot m \cdot cm^{-3}$)	0.0218	0.0896	0.2212	0.3436	0.3497	0.4834	1.3332
比功变化范围	0.0017～0.1197	0.0105～0.6955	0.0258～0.4978	0.0018～2.0050	0.1519～0.9798	0.0018～1.0503	0.0766～2.4935

此外，根据比功变化曲线分区及指标进行统计分析，可获得花岗岩地层的分类如表 7.18 所示。根据冲击凿碎比功的有关研究结果[3]，在极软的页岩及凝灰岩等岩石中，冲击凿碎比功值为 0～0.186 $kN \cdot m \cdot cm^{-3}$，在石灰岩、砂页岩等软岩中为 0.196～0.284 $kN \cdot m \cdot cm^{-3}$，在花岗岩、硅质灰岩等中硬岩中为 0.294～0.480 $kN \cdot m \cdot cm^{-3}$，在石英岩、细粒花岗岩等硬岩中为 0.490～0.676 $kN \cdot m \cdot cm^{-3}$。将金刚石钻进比功均值与之对比可知，在软岩中金刚石旋转钻进比功显著低于冲击凿碎比功；在中硬岩中，金刚石钻进比功与冲击凿碎比功接近；在硬岩中，金刚石钻进比功显著高于冲击凿碎比功。因此，只有在中等硬度的岩层中，采用冲击凿碎比功对岩体进行分级才是合适的。

表 7.18　根据金刚石旋转钻进比功进行的花岗岩分类

Table 7.18　Classification of granite formation by diamond rotary penetrating specific energy

岩石类型	充填土	软岩	中硬岩	硬岩
比功均值/($kN \cdot m \cdot cm^{-3}$)	0.0191	0.0270	0.4334	1.2515
比功变化范围	0.0000～0.1145	0.0017～0.2715	0.0339～2.0050	0.0766～2.4935

显然，通过以上分析，可以得出以下结论：

1）金刚石钻进比功曲线随岩石风化程度的减弱而增大，具有明显的分区性。根据钻进比功可期实现岩石可钻性实时分级与地层的实时判层。

2）在风化程度分级及岩体强度分级中，由于岩体的复杂性，比功指标的变化区间较大，具有相互交叉的现象，宜结合比功变化曲线进行分区，并采用比功均值指标与上界指标对岩体进行分级。

3）在软的全风化及强风化花岗岩中，金刚石钻进比功值低于冲击凿碎比功值；在中等硬度的风化花岗岩中，金刚石钻进比功值与冲击凿碎比功值接近；在硬度较大的微风化花岗岩中，金刚石钻进比功大于冲击凿碎比功。可见，只有在中等硬度的花岗岩中，用冲击凿碎比功来估计金刚石钻进比功才是合适的。在实验室进行的岩石分级一般只适于完整性好的岩体。

值得指出的是，以上研究是针对风化花岗岩这一特定岩石及地层所得出的结论，其普遍性还有待更广泛的试验与统计分析来确定。

参 考 文 献

[1] 徐小荷，余静. 岩石破碎学[M]. 北京：煤炭工业出版社，1984.

[2] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Volume, Issue, March, 1965, 2(1): 57～73.

[3] White C G. 岩石可钻性指数[M]. 边蔚奇译. 北京：煤炭工业出版社，1980.

[4] 坦加耶夫 И А. 岩石的可钻性和可爆性[M]. 王维俊译. 北京：冶金工业出版社，1987.

[5] Pathak K, Mazumda B K. Effect of operating parameters and rock formation type on rotary blast-hole drill performances[J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 1989, 37(9): 373～379.

[6] De P B, Viola G, Tomiolo A. The use of drilling energy for soil classification[C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurement in Geomechanics, Kobe, 1988.

[7] 沈世雄. 对回转破碎比功岩石可钻性分级的初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程)，1988, 5: 1～5.

[8] 史晓亮，段隆军，王蕾，等. 微钻法进行岩石可钻性分级[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2002, 3(129): 32～34.

[9] Zacas M, Kavadas M, Mihalis I. The use of recording drilling parameters in rock mass classification[C]// Proceedings of the 8th ISRM Congress, 1995, (3): 1121～1124.

[10] 谭卓英，蔡美峰，岳中琦，等. 钻进参数用于香港复杂风化花岗岩地层的界面识别[J]. 岩石力学与工程学报，2006, 25(s1): 2839～2845.

[11] Tan Z Y, Cai M F, Yue Q Z, et al. Application and reliability analysis of DPM system in site investigation of HK weathered granite[J]. J. Unvi. Sci. Technol. Beijing, 2005, 12(6): 481～488.

[12] Paulo C. On the use of drilling parameters in rock foundations[C]// Geotechnical Site Characterization, Proceedings of the first International Conference on Site Characterization-ISC'98, Atlanta, Georgia, USA, 19-22 April 1998: 347～358.

[13] Gui M W, Soga K, Bolton M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation [J]. ASCE, J. Geotech. Geoenvir. Eng., 2002, 128(4): 283～291.

[14] 谭卓英，蔡美峰，岳中琦，等. 基于岩石可钻性指标的地层界面识别的理论与方法[J]. 北京科技大学学报，2006，26(9)：803～807.

[15] LaBelle D, Bares J, Nourbakhsh I. Material classification by drilling[C]//Proceedings of the 17th IAARC/CIB/IEEE/IFR International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 17th ISAREC 2000, 2000: 445～450.

第 8 章　风化花岗岩地层界面识别的相似性原理

相似是自然界普遍存在的一种现象。从宏观天体到微观粒子，从低等的原生生物到高等的人类，都是由一定要素构成的系统，存在着具体的属性或特征。当系统间享有某些共有属性或特征时，系统将呈现出相似性。

早在 20 世纪 60 年代，随着计算机技术的发展，人们就开始了生物认证的研究[1]。在已有的指纹识别研究中，关于指纹识别的算法很多，如基于形态学和结构图表的指纹识别、脊线采样的指纹识别、方向场和细节特征匹配的指纹识别等。归纳起来，大体上可分为四类：第一类是图形匹配算法(figure matching algorithm)，其典型算法由美国联邦调查局(FBI)提出，属于细节点坐标模式下的细节匹配识别算法[2]。该算法利用指纹脊末梢与脊线分支点这两个关键点来验证指纹，通过将细节点表示为点模型，将指纹识别问题转化为点模式匹配问题[3~5]。其实质是基于脊线结构或者细节点间拓扑结构的匹配。但这类方法对于图像的旋转及平移不敏感，对于少量细节点的缺失、伪细节点的存在和细节点的定位误差，具有一定的容错性。该方法包括结构匹配算法[6~8]及脊线采样的指纹识别算法[9]。虽然结构匹配及脊线采样识别算法的识别准确率较高，但其最大缺点是对指纹图像质量要求较高，对破损指纹图像以及带有疤痕的指纹图像识别准确率较低。因而又发展了基于光学联合变换相关的指纹识别算法[10]。基于光学联合变换相关器工作原理的联合交换相关算法，不同于上述的细节匹配算法，该算法主要依据指纹图像的整体特征，而不是依据指纹的脊末梢与脊线分支点进行细节匹配，因而对破损指纹以及带有疤痕的指纹图像具有较高的识别准确性。第二类是模糊识别算法(fuzzy identification algorithm，FIA)。利用模糊判别技术从另一种角度改进了指纹细节匹配算法，增强了指纹识别系统抵抗噪声和非线性形变的能力。这类方法包括在细节匹配算法的基础上改进的模糊识别算法[11]、二维聚类快速算法[12]及相似度聚类算法[13]等。第三类是人工神经网络方法(artificial neural network algorithm，ANNA)。包括使用神经网络的点匹配法[14,15]、对传神经网络识别算法(CPN)[16]及反向传播(back propagation，BP)的神经网络算法[17]等。由于人工神经网络具有解决模糊问题的优势，具有很强的自学习性、自组织性、容错性、高度非线性及高鲁棒性等特点，如针对现存的许多指纹特征提取算法中的旋转和平移问题，发展了基于神经网络匹配的脊线分叉点提取算法。该算法通过一个多输入、单输出三层前向神经网络提取脊线的分叉点。但事先要经过足够数量样本的训练，系统才能正确地进行工作。显然，这类匹配方法不适于实时的自动指纹识别系

统[18]。此外，在采用 BP 算法训练连接权值时，由于 BP 算法存在易于陷入局部极值的缺点，因而可能使最终的分类结果达不到理想状态[19]。第四类是遗传算法(genetic algorithm，GA)。遗传算法是一种自适应的启发式全局搜索算法，能从问题的解空间而不是单个解开始进行鲁棒性搜索，可以有效地防止寻优结果收敛于局部最优解，由于该算法不依赖于问题模型特性，没有解析寻优算法要求目标函数连续光滑的限制，具有较好的自适应性。加之，又可并行实现，因而得到了广泛的应用。这些方法包括基于点匹配[20]、细节匹配[21,22]、指纹图匹配[23,24]以及色谱指纹峰配对[25]的遗传算法。

相似性识别问题的本质是模式识别。在模式识别方面，已有许多成熟的理论与方法[26,27]。目前，各类识别算法正在朝高识别精度及快速收敛速率方向发展。

在岩土工程中，由于地质条件的复杂性和多变性，在较大的区域范围内，没有也不可能存在完全相同的地层；然而，其相似性却普遍存在。即使是岩性不同的地层，其结构构造、风化程度、强度、可钻性及承载力等的变化亦可能存在着某种相似。在钻机工作参数中，轴向压力、调节压力、钻头转速(扭矩)、钻头位移、冲洗压力、冲洗水量等也将随着地层特性的变化而变化。研究表明，它们的变化特征亦存在着某些相似性。

然而，这种相似性与指纹的相似识别有着本质的区别。在指纹识别中，指纹图像/图形提取的精度与个体指纹的自然特征密切相关，当指纹受刀伤等破损或因磨损变浅时，提取的指纹图形具有缺陷。此外，指纹提取的精度还与图形摄取仪器的特性及方法等有关。目前一般采用红外或激光仪进行图形的提取。在指纹图形的特征上，均为单峰图形，且按照一定的间距沿某坐标点或轴序次展布。而钻进过程各参数的变化为时间序列特征曲线，直接由数据采集系统获取；在图形特征上为参量-时间的多峰曲线。由于指纹图形所具有的独立特征，其识别算法涉及破损图形如疤痕、指纹末梢及分支点的处理，属于单纯的几何图形的识别范畴。而钻进过程参数的时间序列曲线与地层地质、岩体强度及风化程度等特征并不直接相关，因此需要变换为与地层本构相关的特征曲线；而且由于地层变化的复杂性以及参数曲线的多解性，地层界面在识别算法上与指纹识别存在本质的区别。

钻进过程中钻机诸工作参数之间存在着何种相似性，反映地层特性的诸要素之间又存在着什么样的相似性，以及钻机工作参数与地层特性参数之间又存在何种相似性，是识别算法要研究的问题。如何判别这种相似性，建立什么样的识别方法和识别准则是本章要解决的关键问题。

本章介绍斜率搜索识别法的基本原理、方法以及应用。

8.1　相似性识别的基本原理

相似性识别的基本原理如图 8.1 所示。在一个相似识别的实现过程中，通常

需经历如下几个步骤：

1）提取钻进过程曲线。这一过程相当于个体指纹图形的提取。这里，由DPM系统的数据采集单元实现对轴压、转速、位移、冲洗压力等钻进过程参数的实时采集。这些曲线均具有时间序列变化的特征。

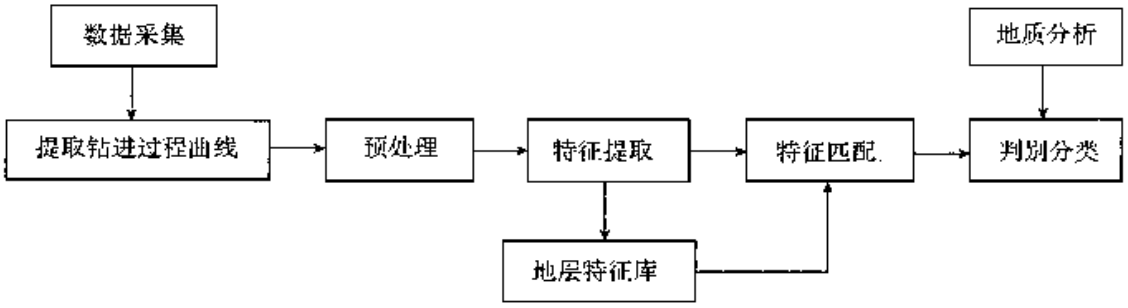


图 8.1 相似性识别的基本原理

Figure 8.1 The primary process of similarity recognition

2）数据预处理。由于钻进过程受各种人为因素及设备性能等的影响，数据存在一定的噪声。为了提高监测数据的信噪比，必须对数据进行去噪处理。此外，因为时间为标量，与地层特性不相关。因此，在预处理阶段，还将对时间序列曲线进行变换，将其转换为与地层特征相关的参量。这里，时间序列曲线将转换为随地层深度的变化曲线。地层深度由钻进过程中钻头实际位移的变化来表征。

3）特征提取。通过对钻进过程各参数曲线与地层分类特征参数之间的响应分析，确定响应系数。以响应程度高的曲线作为特征曲线。将各种地层中通过标定的特征曲线作为参考曲线，并建立地层特征库。

4）特征匹配。将特征曲线与特征库中的参考曲线进行对比分析，寻找与之匹配的特征。

5）判别分类。找到匹配的特征曲线后，根据相应的地层特征进行地质分析和层序分析，进而对地层进行判别和分类。

综上所述，地层界面的相似识别过程是地层钻进参数曲线与地层特征曲线的对比，并结合地质层序分析的判决分类过程。

8.2 斜率搜索识别法原理

8.2.1 样本提取

对于一个工程场址而言，往往需要布置钻孔进行勘探，钻孔的数量及布置的方式与工程场址地理、地质条件的复杂性及工程要求有关。一个钻孔即是一个样本。对于每一个钻孔或样本而言，虽然钻机工作参量的属性相同，但其变化特点不同。不同钻进参量构成一个样本集。这里，称为层次样本。钻孔为一级样本，各钻进参

量为次级样本。设钻进过程的可监测参数为 $A_1, A_2, A_3, \cdots, A_n$，它们是随时间变化的时间序列变量，可用 $A_i(t)$ 表示，相应的样本集合可表示为 $\{A_i(t)\}$。一级样本的选择取决于勘探设计，一般由岩土工程师根据工程要求及工程地质条件等进行设计。次级样本所包含的参量由 DPM 系统进行数据采集，形成各样本。这里主要分析次级样本。

8.2.2　预处理

样本数据的预处理包括监测数据的转换、图形输出及去噪处理。DPM 系统采集的原始数据为 RTF 数据格式，须转换为所需的数据库文件格式(如 EXL 的数据格式)后才能进行图形的输出分析。而且，系统采集的是时间序列数据，因此，最初的图形为各变量随时间变化的曲线图形。为了反映各钻进参量随地层深度的变化特征，还须将时间序列变化的曲线变换为随孔深变化的曲线。具体的做法是根据钻头位移与时间曲线找出对等关系，将时间轴变换为位移或地层深度轴。

去噪处理分两步。一是通过过程识别中的参数设置(参见第 3 章)，对钻进过程进行识别，将非实际钻进过程进行排除，提取实际的纯钻进过程曲线，这是实际钻进过程真实性的保证，也是 DPM 系统的一种过滤功能。其次，是对实际钻进过程曲线中的异常数据进行剔除处理。剔除处理必须非常谨慎，需要对钻机工作原理及钻进过程的特点进行认真分析，才能做出判断。异常数据通常表现为一种畸变脉冲，如卡钻时钻头无位移，无转速，压力却陡增。

8.2.3　特征提取与特征库的建立

在采集的样本数据中，包括施加在钻具上轴压力、调节压力、钻头转速(转矩)、钻头轴向位移、穿孔速率、冲洗水压力、冲洗量以及钻机在水平方向前进或后退的压力，这些钻进参量在钻进过程中是随钻进时间而变化的参量，各具特征。根据前面章节的分析结果，转速-位移曲线及位移-时间曲线与地层特征有较好的响应关系。但转速的变化与钻机的工作方式有关，转速-位移曲线及位移-时间曲线要求严格可比的钻进条件，即钻机及机具完全相同。后续的钻进能量分析表明，钻进过程中的动能与钻进总能量相近，动能-位移曲线与总能量-位移曲线图形基本一致，亦与地层特征有较高的响应，但同样需要严格的可比条件。比功曲线反映的是单位钻进能量随地层深度的变化，与位移-时间曲线及能量-位移曲线相同，与地层具有很好的响应特征，而且没有严格的可比条件限制。因此，提取比功-位移曲线为特征样本，并将对应特定地层的曲线段作为样本特征。通过标定后的样本特征所形成的数据库，称之为样本的特征库。

8.2.4 特征匹配算法——斜率搜索识别

1. 基本假设

在岩土工程钻探中，当钻孔深度达到 30 m 时，取样钻探时间一般需要 3d 左右，其中，非取样的纯钻进时间大约在 8 h 以上，DPM 数据采集系统一般以秒或更小的时间单位采样。可见，一条监测曲线数据点达 30 000 多个；当钻孔深度更大时，数据量将随之增加；对于油气地层及大陆科学钻探等的钻进而言，数据是海量的。而且，地层复杂多变，因变量的变化大。因此，监测曲线的图形比指纹曲线要复杂得多，难以获得反映全局的拟合函数。尽管如此，这些监测曲线的函数关系是存在的，设监测曲线函数的一般表达式为 $f(x)$，则 $f(x)$满足以下基本假设：

1) 连续。设函数 $f(x)$在 x_0 的某个邻域内有定义，当自变量 x 在 x_0 处取得增量 Δx(点 $x_0+\Delta x$ 仍在该邻域内)时，相应地函数取得增量 $\Delta y=f(x_0+\Delta x)-f(x_0)$，如果当 $\Delta x\to 0$ 时，$\Delta y\to 0$，即 $f(x)$在 x_0 处连续。若变量 x 的变化区间为 $[a,b]$，则 $f(x)$在此区间内为连续函数。

2) 可导。同样地，设函数 $f(x)$在 x_0 的某个邻域内有定义，当自变量 x 在 x_0 处取得增量 Δx(点 $x_0+\Delta x$ 仍在该邻域内)时，相应地函数取得增量 $\Delta y=f(x_0+\Delta x)-f(x_0)$，如果当 $\Delta x\to 0$ 时，$\Delta y/\Delta x$ 的极限存在，即 $f(x)$在 x_0 处的导数存在。根据曲线斜率的定义，$f(x)$在 x_0 处的一阶导数即为曲线过 x_0 切点的斜率，若变量 x 的变化区间为$[a,b]$，则 $f(x)$在此区间的一阶导数存在且同样为连续函数，则 $f(x)$亦二阶可导。

2. 图形等价的条件

为了简化分析过程，取钻进过程特征曲线的单峰段进行相似识别分析，如图 8.2 所示。其中实线为特征库中的参考曲线，虚线为提取的样本特征曲线。显然，这一对曲线图形完全等价的条件是相互重合。设参考曲线为 $y_0(x)$，特征曲线为 $y_1(x)$，则图形等价的充分必要条件为：① 对于任意点 x，即自变量 x 的值相等时，因变量 y 的值相等；② 图形变化的轨迹相同。

要满足条件 ①，则必须：

$$y_1(x)=y_0(x) \tag{8.1}$$

要满足条件 ②，则必须：

1) 在任意点 x 处，特征曲线的斜率与对应的参考曲线在该点的斜率相等。

设某点 $A_1(x_{1,1},y_{1,1})$，经过增量 Δx 到 $B_1(x_{1,2},y_{1,2})$，则特征曲线在 A_1 点的斜率可表示为：

$$K_1=\frac{y_{1,2}-y_{1,1}}{x_{1,2}-x_{1,1}} \tag{8.2}$$

同理，对于参考曲线而言，在对应点 $A_0(x_{0,1},y_{0,1})$ 经过增量 Δx 到达 $B_0(x_{0,2},y_{0,2})$，A_0 点处的斜率为：

$$K_0=\frac{y_{0,2}-y_{0,1}}{x_{0,2}-x_{0,1}} \tag{8.3}$$

因此，当 Δx 足够小时，$K_1=K_0$ 成立。

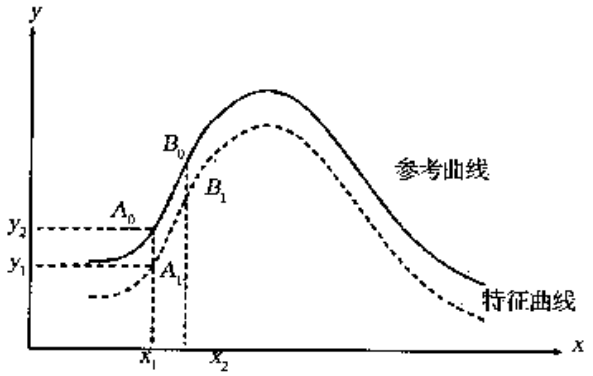


图 8.2　样本特征曲线相似识别分析示意图

Figure 8.2　Sketch map of similarity recognition identification analysis for sample characteristic curve

2) 在区间$[a,b]$内，对于任意点 x_0，在增量区间 Δx 内，即$[x_0,x_0+\Delta x]$，图形的凹凸性必须一致。根据函数凹凸性的定义，若函数 $y=f(x)$ 在区间$[a,b]$上连续，如果对$[x_0,x_0+\Delta x]$上任意一点 x_1、x_2 恒有：

$$f\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)<\frac{f(x_1)+f(x_2)}{2} \tag{8.4}$$

那么，称 $f(x)$在$[x_0,x_0+\Delta x]$上的图形是凹的或凹弧，反之，如果恒有：

$$f\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)>\frac{f(x_1)+f(x_2)}{2} \tag{8.5}$$

那么，称 $f(x)$在$[x_0,x_0+\Delta x]$上的图形是凸的或凸弧。

根据凹凸性定理，若 $y_1(x)$及 $y_0(x)$在$[a,b]$上连续，在(a,b)内具有一阶和二阶导数，那么，在$(x_0,x_0+\Delta x)$内，函数 $y_1(x)$及 $y_0(x)$的二阶导数大于 0，图形为凹；二阶导数小于 0，图形为凸。利用符号函数 SIGN(x)，若两图形在该区段内的凹凸性一致，则其二阶导数的正负符号一致，即下式成立：

$$\mathrm{SIGN}[y''_1(x_0)]=\mathrm{SIGN}[y_0''(x_0)] \tag{8.6}$$

根据导数的定义，当 $\Delta x\to 0$ 时，$K_1=y_1'|_{x=x_0}=\lim\limits_{\Delta x\to 0}\dfrac{\Delta y_1}{\Delta x}$，$K_0=y_0'|_{x=x_0}=\lim\limits_{\Delta x\to 0}\dfrac{\Delta y_0}{\Delta x}$，则有：

$$y_1''|_{x=x_0}=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y'_1}{\Delta x},\ y_0''|_{x=x_0}=\lim_{\Delta x\to 0}\frac{\Delta y_0'}{\Delta x}$$

但上述推导其逆不成立。

由于图形距离偏差可能掩盖曲线的凹凸性，因此，凹凸性是图形相似的必要条件。

3) $y_1(x)$与$y_0(x)$在区间$[a,b]$内曲线所包络的总面积相等，而且，对于任意点x_0，在增量区间Δx内，特征曲线与参考曲线所包络的面积增量亦相等。若设$y_1(x)$与$y_0(x)$在区间$[a,b]$内任意点x处的导数分别为$y_1'(x)$及$y_0'(x)$，则：

$$\int_a^b y_1'(x)\mathrm{d}x = \int_a^b y_0'(x)\mathrm{d}x \tag{8.7}$$

$$y_1(x)\Delta x = y_0(x)\Delta x \tag{8.8}$$

显然，公式(8.8)与公式(8.1)相等。同样地，可以利用微积分的定义推导公式(8.7)与公式(8.1)相等。因此，条件2) 是图形等价的充分条件而非必要条件。也就是说，只要满足自变量x的值相等时因变量y的值相等，且保证两图形的轨迹相同，其所包络的面积也就相同。

3. 图形相似的条件

根据图形等价的条件可知，图形相似的充分必要条件为：① 对于任意点x_i，即自变量x的值相等时，因变量y的值成比例；② 图形变化的轨迹相同。

要满足条件①，则必须：

$$|y_1(x_i) - y_0(x_i)| \leqslant \delta \tag{8.9}$$

式中：δ为特征图形在任一点与参考图形对应点间容许的距离偏差。

此外，还需满足条件②，即在任意点x_i处，特征曲线的斜率与对应的参考曲线在该点的斜率相近。根据图形等价的条件，特征图形上任一点与参考图形上对应点容许的斜率偏差为：

$$|K_1(x_i) - K_0(x_i)| \leqslant \zeta \tag{8.10}$$

式中：ζ为特征图形在任一点的切线斜率与参考图形对应点切线斜率间的容许偏差。

此外，特征曲线与参考曲线的凹凸性必须一致，即公式(8.4)仍然满足。

值得指出的是，当不同物理参数曲线之间进行相似性分析时，应对数据进行无量纲化处理。常用方法有极大值化、极小值化与均值化处理，以消除不同量纲之间的影响。这里采用极大值化处理。

4. 斜率搜索识别算法

斜率搜索识别过程如图8.3所示。

(1) 建立参考坐标系。

参考坐标系的建立应以方便图形的比较为目的。对于以多种岩性地层钻孔建立的参考曲线而言，一般以钻孔的起点即地面点为坐标原点，以标定参量(因变量)

为横轴，以经过转化后的地层深度（孔深）为纵轴，建立独立坐标系。对于场址勘探而言，除单个钻孔剖面外，若还需要沿勘探线方向的地层剖面，则须建立钻孔坐标系。钻孔坐标系的建立一般采用绝对坐标，根据工程需要可采用相对坐标系。相对坐标系的建立一般以起始钻孔为原点，计算得出各钻孔的相对坐标。

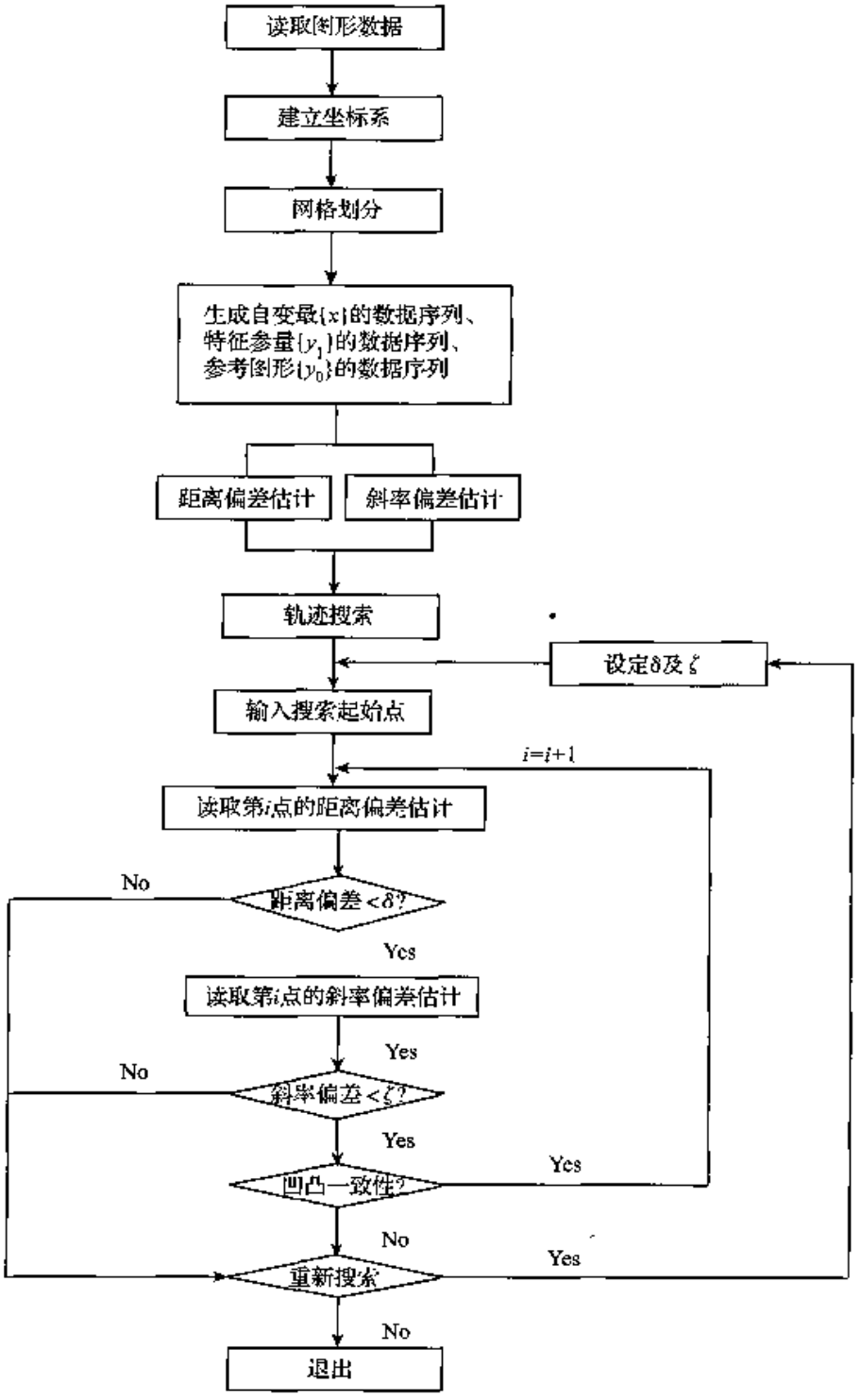


图 8.3　样本特征曲线相似识别分析示意图

Figure 8.3　Sketch map of similarity recognition analysis for sample characteristic curve

(2) 图形网格划分。网格的划分取决于对工程识别的精度要求。设自变量 x 为钻孔深度 h,对于自变量区间$[a,b]$,有$(b-a)=h$,设工程要求的地层识别厚度(精度)为∇h,则纵向网格数 n 为:

$$n=\frac{h}{\nabla h}+1 \tag{8.11}$$

横向网格的划分视识别参量在不同岩性地层中特征值的大小而定。通常将地层划分为极软、软、中硬、坚硬及极坚硬,然后根据各地层中特征值大小划分区间。横向网格的划分主要用于图形的初步比较,在搜索算法中并不使用。

(3) 距离偏差的计算

对于自变量区间$[a,b]$,通过网格分割后形成 x 的数据序列 $X=\{x\}=\{x_0,x_1,\cdots,x_n\}$,特征图形对应的因变量数据序列为 $Y_1=\{y_1\}=\{y_1(x_0),y_1(x_1),\cdots,y_1(x_n)\}$,参考图形对应的因变量数据序列为 $Y_0=\{y_0\}=\{y_0(x_0),y_0(x_1),\cdots,y_0(x_n)\}$,根据公式(8.9)左边表达式逐点计算其距离偏差,并形成相应的偏差数据序列$\{\delta\}=\{\delta_0(x_0),\delta_1(x_1),\cdots,\delta_n(x_n)\}$。

(4) 斜率偏差的计算

同理,对于自变量 x 形成的数据序列 $X=\{x\}=\{x_0,x_1,\cdots,x_n\}$,可利用公式(8.2)及公式(8.3)逐点对特征图形及参考图形进行斜率计算,并相应获得参考曲线及特征曲线的数据序列$\{K_0\}=\{K_{0,0}(x_0),K_{0,1}(x_1),\cdots,K_{0,n}(x_n)\}$及$\{K_1\}=\{K_{1,0}(x_0),K_{1,1}(x_1),\cdots,K_{1,n}(x_n)\}$。在此数据的基础上,利用公式(8.10)计算图形各点斜率的偏差值,形成相应的数据序列 $\{\zeta\}=\{\zeta_0(x_0),\zeta_1(x_1),\cdots,\zeta_n(x_n)\}$。

(5) 斜率搜索

设定两图形的距离容许偏差 δ 及斜率容许偏差 ζ,按照自变量$\{x\}$的变化,逐点搜索两图形的数据序列$\{y_0\}$及$\{y_1\}$,并根据公式(8.9)进行判断。当公式(8.9)的条件成立时,转入对应点斜率序列数据$\{K_0\}$及$\{K_1\}$的搜索,找到对应的数据点后按公式(8.10)的条件进行检验,当条件成立时,该点的识别过程即完成。开始进入下一点的运算和判别,直到将图形上所有的点检验完成。在以上识别过程中,当公式(8.9)或公式(8.10)的判别条件不成立时,则终止运算,退出识别过程。

8.2.5 相似识别的 t 检验

设 Y_1 为来自正态总体 $N(\mu_1,\sigma^2)$的样本,Y_2 为来自另一正态总体 $N(\mu_2,\sigma^2)$的样本,且设两样本独立,它们对应的距离差为 $d_i=y_1(x_i)-y_0(x_i)$。同样,假设 d_1,$d_2,\cdots,d_n$ 来自正态总体 $N(\mu_d,\sigma^2)$,这里 μ_d、σ^2 均为未知。若特征曲线产生数据样本的函数值与参考曲线所产生的数据样本的函数值一致,则各对数据的差异 d_1,$d_2,\cdots,d_n$ 为随机误差。而随机误差可以认为服从正态分布,其均值为零。因此,要求检验

$$H_0:\mu_d=0, H_1:\mu_d\neq 0$$

的拒绝域：

$$|t|=\left|\frac{\bar{d}-0}{s/\sqrt{n}}\right|\geqslant t_{a/2}(n-1) \tag{8.12}$$

式中：a 为显著性水平；$\bar{d}$ 及 S^2 为 $d_1, d_2, \cdots, d_n$ 的样本均值与样本方差。

$$\bar{d}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i \tag{8.13}$$

$$S^2=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(d_i-\bar{d})^2 \tag{8.14}$$

采用 t 检验可对距离偏差 δ 和斜率偏差 ζ 进行检验。当式(8.12)成立时，可以认为 $|t|$ 的值不落在拒绝域内，接受 H_0，两曲线的样本函数值没有显著差异，两曲线相似。

8.3　判 别 分 类

8.3.1　聚类准则

在聚类分析中，如何把真正属于同一个类的样本聚合成一个类型的子集，并把不同类的样本分离出来，这需要一定的聚类准则函数。聚类准则函数不仅对聚类的质量产生影响，而且还可以评价聚类的效果。如果聚类质量不满足要求，则需要重复执行聚类过程，优化聚类结果。在重复优化过程中，可以改变相似性度量，若有必要还可选择新的准则函数。

在统计模式识别中，常用的聚类判别准则有误差平方和准则、加权平均平方距离和准则、类间距离和准则及最近邻准则等[28]。然而，由于钻进参数的时间序列性，样本函数值不具有统计特征，因此，基于统计模式识别的聚类准则不再适用。

为了满足钻进参数样本数据的特点，建立最短距离准则。在样本总体 $A(x,y)$ 中，若 x 代表样本所处的位置，y 代表样本的函数值，则因变量的样本集为 $Y=\{y\}=\{y_0(x_0), y_1(x_1), \cdots, y_n(x_n)\}$。设因变量样本集中，有任意两个样本 $y_i(x_i)$ 和 $y_k(x_k)$，分别记为 y_i 和 y_k，则距离可定义为：

$$D_l=|y_i-y_k| \tag{8.15}$$

设类的允许偏差为 δ，当 $D_l\leqslant\delta$ 时，样本 y_k 与样本 y_i 属于同一类。

D_l 准则反映的是类内距离分布的状态，其值越小，说明类内样本越密集，样本间差异越小，聚类效果越好。通过调节 δ，可以优化聚类的效果。

8.3.2　判别分类方法

判别分类是建立在聚类分析的基础上的。对于钻进参数曲线而言，其数据具有

沿时间或深度变化的序列性。由于地层地质条件的复杂性，数据又具有随机性和不均性。然而，由于地层岩性的变化，岩石的可钻性在不同地层中会不同，因此又具有分区性。从数学上讲，分区性是一种聚类特征。例如，穿孔速率、钻头转速以及钻进比功等将随岩石物理力学性质的变化而变化，在各参数的变化曲线上亦表现为分区性或分段性。如果把参数曲线中的每一个时间或深度序列数据视为一个个体，对于一条完整的参数曲线而言，各数据个体的总和构成了样本总体。在样本总体中，不同岩性地层中的个体将表现为显著的聚类属性。聚类分析就是将总体中的个体分类以发现数据中的结构，同时实现一个类内的个体彼此接近或相似，而与其他类内的个体相异。聚类分析的结果可以形成可识别的结构，并产生解释观察数据的假说。

此外，由于以钻进参数的变化进行的分类是基于岩石的力学分层的，因此，单从数据分析上来看，它可能允许一个对象属于多个类。在自然界，不同岩性的岩石具有接近或相似力学特性的现象是可能存在的，因此，聚类分析还须借助地质学家的专业知识以对地层岩性进行判别。

常用的聚类分析方法很多，如最近邻规则的聚类算法、最大最小距离聚类算法、C-均值聚类算法、ISODATA(iterative self-organizing data analysis technique algorithm)聚类算法、分级聚类算法及最小张树聚类算法等，其算法的一个基本原则是距离相似(如欧氏 Euclidean 距离、马氏 Mahalanobis 距离及明氏 Minkowsky 距离)或角度相似。但这些算法均属于统计模式的识别范畴，对于随时间或位置变化的序列数据而言，不再适用。在时间或位置序列数据样本中，即使在同一个类内，样本的考察指标(因变量)随自变量(时间或位置)序列的线性递增而变化，会导致样本向量空间变化，样本向量与空间位置有关，属三维空间二元变量。因此，样本间的距离或角度在类内不具有相似性。

对于某个钻进地层而言，地层的类型数事先并不知道，即类型数未知，要求聚类分析中自动确定类型数。下面针对二元变量的分类判别建立二元聚类判别分析方法。

1. 类及分类数已知时的判别方法

(1) 设置类的门限值

类门限值大小取决于钻进试验及模拟实验的结果，设第 i 类的门限值为 C_i，对于依赖于钻进参数进行的聚类分析，可参考岩石的可钻性分级指标进行设定。这类指标包括岩芯可钻性指标、单位能耗下的穿孔速率及钻进比功等指标。其中，由类的上、下门限值确定类内样本考察指标的允许偏差 δ。

(2) 生成新的二元样本集

根据类的门限值 C_i，将样本总体按因变量 $\{y\}=\{y_0(x_0),y_1(x_1),\cdots,y_n(x_n)\}$ 分割成与类 C_i 对应的新的二元样本 $\{x,y\}_{C_i}=\{(x_i,y_i),(x_{i+1},y_{i+1}),\cdots,(x_{i+k},$

y_{i+k})}(k 为第 i 类的样本总数)。新的二元样本中,样本将根据类进行重新分布,形成多个子集,子集的个数等于类的个数。由于数据点总数不变,各类的二元样本的集合仍等于总体样本$\{x,y\}=\{(x_0,y_0),(x_1,y_1),\cdots,(x_n,y_n)\}$,其样本空间与样本向量不变。

(3) 生成位置的新样本

在新的二元样本中,将类 C_i 中与因变量对应的自变量重新生成一元的位置变量样本$\{x\}_{C_i}=\{x_i,x_{i+1},\cdots,x_{i+k}\}$。

(4) 计算位置样本的连续长度

位置样本的连续长度即类在地层中的分布范围。在一个位置样本 C_i 中,它可能包含连续的位置样本,也包含不连续的位置样本,这些样本将又形成多个子集,每个子集虽属于同一个类,但类的地层厚度由子集的大小决定。对于不连续的孤点样本(也是子集,称为孤点集),因孤点集不存在物理意义,无须识别,可直接将该点返回总样本,最后归入该样本位置所属的类即可。对于连续样本,则须计算连续样本的位置坐标所包含的长度。

设一元的位置变量样本$\{x\}_{C_i}=\{x_i,x_{i+1},\cdots,x_{i+k}\}$中,任意连续样本(子集)$\{x_j,x_{j+1},\cdots,x_{j+m}\}$,当公式(8.15)成立时,该连续样本属于独立的类 C_i:

$$(x_{j+m}-x_j)\geqslant\Delta\delta \tag{8.16}$$

式中:$\Delta\delta$ 为同类地层中工程许可的最小厚度。这与地层厚度方向的识别精度不同,识别精度可以设置得很高,以反映地层的细微变化。但划分的类太多,类也就无意义,因为其极端的例子就是一个样本一个类。此外,识别精度设置太低,则类的划分太大,其极端就是所有样本为一个类,类的划分也失去意义。因此,识别的精度应该与工程许可的分类厚度一致。

如果公式(8.15)不成立,说明这些连续的点(样本)仍不能构成一个独立的类,此时,即使是多个点,亦按孤点集处理。

通过以上判别分类,从而获得类 C_i 与地层厚度 h_i 的集合。判别分类过程如图 8.4 所示。

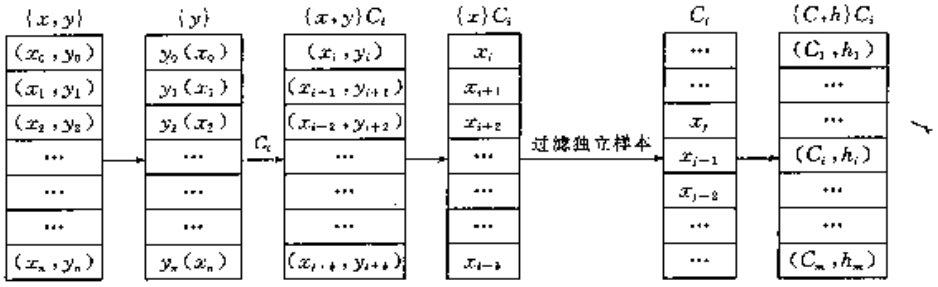


图 8.4　相似性识别的判别分类过程

Figure 8.4　The process of discriminatory classification for similarity identification

值得指出的是,孤点与类间的距离反映了该样本离群的大小,属于系统误差或

随机误差，在判别过程中，要求不将其返回样本总体，直接进行剔除处理。这样，可以提高信噪比。

2. 类及分类数未知时的自动判别分类方法

以上是已知类的门限值及分类数的情况。但在有些情况下，试验数据不充分，或缺乏地质分析类的门限值及分类数未知，此时，需要在判别过程中自动确定类的门限值和分类数，即自动分类判别。其基本方法如下：

1）在样本总体中，以第一个样本的函数值 y_0 为门限值 C_1。

2）顺次搜索下一个样本的函数值 y_1，并计算 $|y_0-y_1|$，若 $|y_0-y_1|\leqslant\delta$，则把 y_1 归入 C_1 类，即 $y_1\in C_1$，再往前搜索下一个样本。若 $|y_0-y_1|>\delta$，则令 y_1 为门限值 C_2。

3）顺次搜索下一个样本 y_2，并计算 $|y_1-y_2|$ 及 $|y_0-y_2|$，若 $|y_1-y_2|\leqslant\delta$，则将 y_2 归入 C_2，即 $y_2\in C_2$；若 $|y_0-y_2|\leqslant\delta$，则将 y_2 归入 C_1，即 $y_2\in C_1$。再继续往前搜索下一个样本。若 $|y_1-y_2|>\delta$，$|y_0-y_2|>\delta$，则将 y_2 设为门限值 C_3。

4）依此类推，直到把样本总体中所有样本（n）都进行分类。

5）按照类生成位置样本，并计算位置样本的连续长度，完成地层结构（厚度）的判别。参照已知类及分类数的情形处理。

如果聚类结果不令人满意，则重新设置 δ 或改变第一个门限值 C_1 的大小，直到得到满意结果为止。δ 和 C_1 的设置直接影响算法的收敛速率及分类的效果。

8.3.3 判别分类的有效性

聚类分析的目的是揭示数据的真实结构，并最终找出与地层匹配的结构，而不是通过一种数学方法将某种结构强加给数据。因此，首先要合理选择类的门限值及允许偏差。类的门限值及允许偏差要能很好地表征地层的分类结构。这需要对表征地层的物理力学参数进行深入分析，已在前面章节对这部分内容进行了讨论，不再重复。这里介绍如何分析判别分类有效性的数学方法。从数理统计及统计模式识别理论可知，样本误差平方和的大小能反映样本集合中数据的离散程度，而类间距离的大小可揭示各类型的聚合程度及分离效果。显然，可采用类间距离及类内样本的误差平方和大小来分析判别分类的有效性。但误差平方和的大小与样本数据的大小有关。一般样本数据量大，误差平方和值也大。因此，误差平方和只适合于类间样本数较均匀的情况。为了消除样本数量不均造成的差异，必须采用类内样本的平均误差平方和来分析判别分类的有效性。

1. 类内样本的误差平方和

在样本总体$\{X,Y\}$中，令因变量的样本集为$\{y\}=\{y_0(x_0),y_1(x_1),\cdots,y_n(x_n)\}$，在某种相似性度量的基础上，被聚合成 m 个类的子集 $Y_1,\cdots,Y_m$，每个子

集是一个类型，若每个子集(类)的样本数为 $n_1,\cdots,n_m$，则类型 C_i 聚类的质量可用类内平均误差平方和 $S^2_{C_i}$ 来反映：

$$S^2_{C_i}=\frac{1}{n_i-1}\sum_{k=1}^{n_i}(y_k-\bar{y}_i)^2 \tag{8.17}$$

式中：$\bar{y}_i$ 是类型 C_i 中类内样本的均值，即

$$\bar{y}_i=\frac{1}{n_i}\sum_{k=1}^{n_i}y_k \qquad i=1,\cdots,m \tag{8.18}$$

而样本分类后总的误差平方和 S_c^2 为：

$$S_c^2=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}S^2_{C_i} \tag{8.19}$$

显然，若 $S^2_{C_i}$ 值越小，说明类内样本间误差小，样本间距离小，所有样本接近样本均值，集中度高，聚类效果好。相反，则聚类质量差。S_c^2 反映的是样本总体聚类后的效果，与 $S^2_{C_i}$ 同理，S_c^2 值越小，说明相同的类聚集程度高，总体样本的分类效果好。

2. 邻近类间距离的计算

样本总体{X,Y}经过聚类后，不同类之间的分离程度可通过类间距离 D_{ij} 来反映。设 $\bar{y}_i$ 为 C_i 类型的样本均值，$\bar{y}_j$ 为 C_j 类型的样本的均值，则邻近类间距离可定义为：

$$D_{ij}=\sum_{i=1}^{m-1}|\bar{y}_i-\bar{y}_j| \qquad j=i+1 \tag{8.20}$$

显然，若 D_{ij} 值大，说明邻近类的距离大，类的密集程度好，类的分离显著，效果好。反之，则聚类效果差。

8.4　穿孔参数之间的相似性

穿孔参数之间的相似性包括三个方面：① 在同一钻孔的钻进过程中，不同钻进参数间的相似性。它反映的是在相同的岩性地层层序中钻进时不同钻进参数间的相似性。② 在不同钻孔或场址的相同岩性地层中，同一钻进参数所表现出的相似性。③ 在相同风化程度的岩性地层中，同一钻进参数间的相似性。下面分别以有效轴压力为参考曲线，以冲洗水压力及钻具转速曲线为特征曲线；以钻进比功为参考曲线，以钻具动能及钻进总能量曲线为特征曲线，对特征曲线与参考曲线之间的相似性进行研究。

8.4.1　普通风化花岗岩地层中穿孔参数间的相似性

1. 穿孔参数间的相似性斜率搜索识别

(1) 冲洗压力、钻具转速与有效轴压力之间的相似性

提取冲洗压力及钻具转速曲线为特征图形，以有效轴压力曲线为参考图形，以钻进参数指标为横轴，钻头位移为纵轴建立坐标系，获得相似性比较图形如图 8.5 及图 8.6 所示。其中，图 8.5 为冲洗压力与有效轴压力随钻进位移变化的相似性比较关系曲线，图 8.6 为转速与有效轴压力随钻进位移变化的相似性比较关系曲线。为了实现不同物理参数之间的距离计算，采用极大值化对函数值进行了无量纲化处理。图中水平轴为无量纲参数的极值化比例系数，纵轴为钻头位移，亦即地层深度；各参数的极大值已标于图中。

定义相似图形上的峰为特征峰，则可用特征峰的匹配程度来反映图形的相似程度。一般地，可通过计算匹配的特征峰的个数与特征峰总数之比对相似程度进行描述。图 8.5 中参考曲线的特征峰总数为 18 个，特征曲线与之匹配的特征峰个数为 13，则相似比为 0.72。

同样地，可计算图 8.6 中特征曲线与参考曲线匹配的特征峰为 15，相似比为 0.83。然而，特征峰数的描述无法揭示图形相似的轨迹。因此，还需对图形轨迹的进行相似性识别。

根据斜率搜索识别原理，沿地层厚度方向（纵轴）划分 80 个网格，样本数 $n=81$。按照相关公式计算各特征曲线与参考曲线之间函数值的距离、斜率以及斜率值间的距离，并生成相应的数据集。将曲线离散化后，即可遵循识别准则进行图形的相似性识别。为了简化计算过程，编制相关的计算机程序完成搜索识别过程。

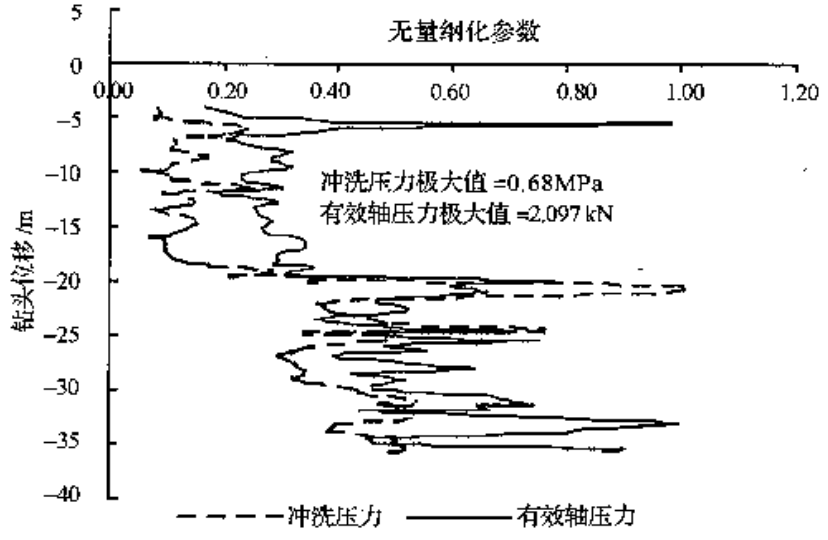


图 8.5 冲洗压力曲线与有效轴压力曲线的相似性比较

Figure 8.5 Compare of similarity between flushing pressure curve (FPC) and effective thrust force curve (ETFC)

(2) 钻具动能、钻进总能量与钻进比功之间的相似性

分别提取钻具动能及钻进总能量曲线为特征图形，钻进比功曲线为参考图形。与冲洗压力等的分析同理，根据钻进过程参数曲线，可以获得钻具动能-位移曲线

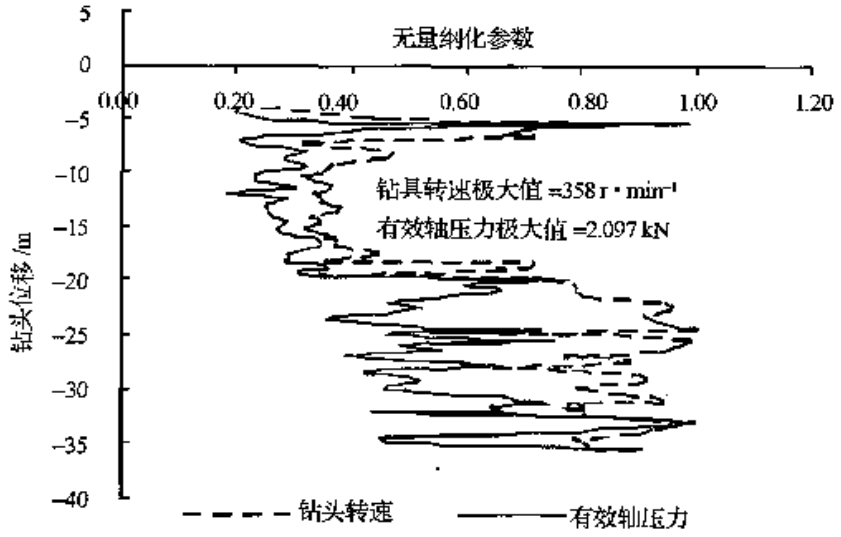


图 8.6　钻头转速曲线与有效轴压力曲线的相似性比较

Figure 8.6　Compare of similarity between rotational speed curve (RSC) and ETFC

及钻进比功-位移曲线之间的相似性比较关系图形(图 8.7),以及钻进总能量-位移曲线与钻进比功-位移曲线之间的相似性比较关系图形(图 8.8)。

在图 8.7 及图 8.8 中,在浅部(20 m)以上钻进比功值很低,特征峰并不明显,此时,需放大倍数进行观察。显然,能量曲线与作业参数的特征峰数量是一致的,它们的相似比相同。这说明,无论是作业参数曲线还是能量曲线,在地层界面处具有明显的峰值特征,因此特征峰又反映了钻进参数在岩石界面处的响应特性。

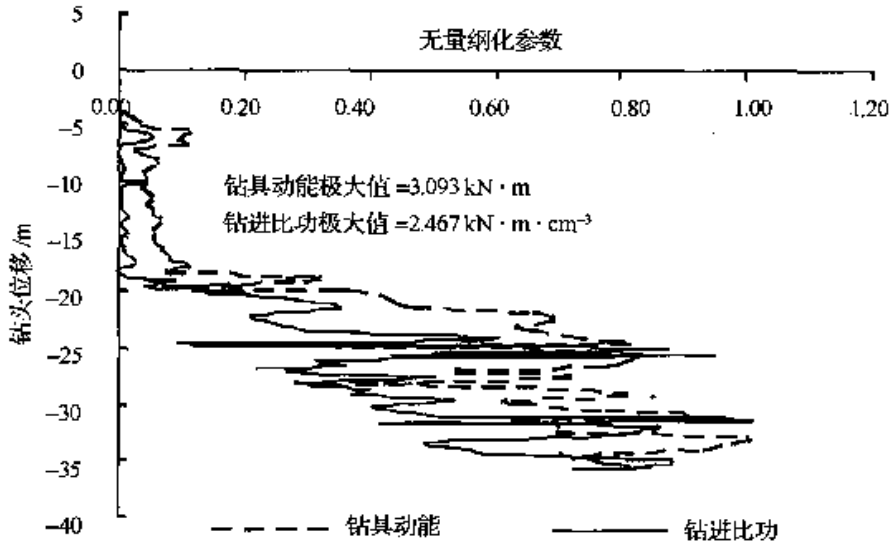


图 8.7　钻具动能曲线与钻进比功曲线的相似性比较

Figure 8.7　Compare of similarity between kinetic energy curve (KEC) and penetrating specific energy curve (PSEC)

此外,从图形上看,无论是作业参数曲线还是能量曲线,图形的态势一致,而

且，在基岩界面上具有明显的分区性。

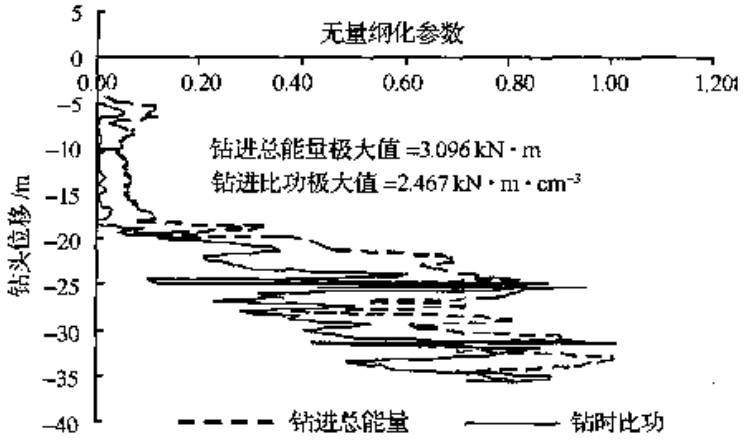


图 8.8 钻进总能量曲线与钻进比功曲线的相似性比较

Figure 8.8 Compare of similarity between total penetrating energy curve (TPEC) and PSEC

同样，按照作业参数相似图形的网格划分方法，划分网格并生成自变量-因变量数据集。然后，按照斜率搜索识别方法，进行函数值距离、斜率及斜率间的距离计算与逻辑判断，可完成相似识别过程。

然而，上述相似性的置信程度如何，还需通过 t 检验进行统计分析。

2. 穿孔参数间的相似性 t 检验

(1) 冲洗压力、钻具转速与有效轴压力之间的相似性 t 检验

在斜率搜索识别时，网格化已将特征曲线与参考曲线进行离散，形成两组样本数据或两个样本总体，根据网格节点坐标可计算特征曲线与参考曲线各对应点的距离、各点切线斜率以及斜率之间的距离。根据特征参数构成的函数值距离及斜率间的距离值，可获得相应距离数据图形的变化。为了更好地表征特征曲线与参考曲线之间距离的大小和方向，用正、负号定义距离矢量。距离为正表示特征曲线极值化后的函数值大于参考曲线的函数值，否则小于参考曲线的函数值。图 8.9 为冲洗压力及钻具转速特征曲线间距离数据的矢量分布图，图 8.10 为相应的斜率间距离数据的矢量分布图。

从图 8.9 及图 8.10 可知，两特征曲线与参考曲线之间无论在数值上还是形态上均存在一定的偏差。然而，其相似性还须通过 t 检验来判断。

根据斜率识别网格化所获得的样本数据，设特征曲线和参考曲线所获得的函数值样本均服从正态总体 $N(\mu_1,\sigma^2)$ 分布，且彼此本独立，它们对应的距离差 d_1，$d_2,\cdots,d_n$ 亦服从正态总体 $N(\mu_d,\sigma^2)$。其中，样本均值及方差 μ_d、σ^2 为未知。从前面的分析可知，实际上，这是检验成对数据是否相等的问题，亦即单个正态总体 Y 的方差未知时检验其均值 $\mu_z=0$ 的问题。已知样本数 $n=81$，若相似性置信度为

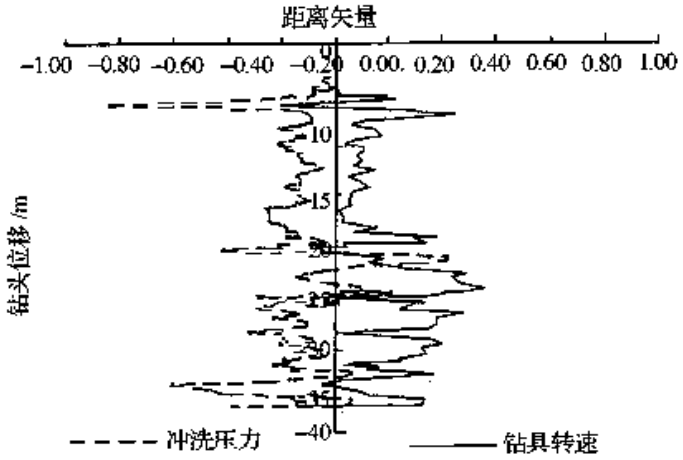


图 8.9　冲洗压力及钻具转速与有效轴压力之间的距离矢量分布

Figure 8.9　Distribution of distance vector between FPC as well as RSC and ETFC

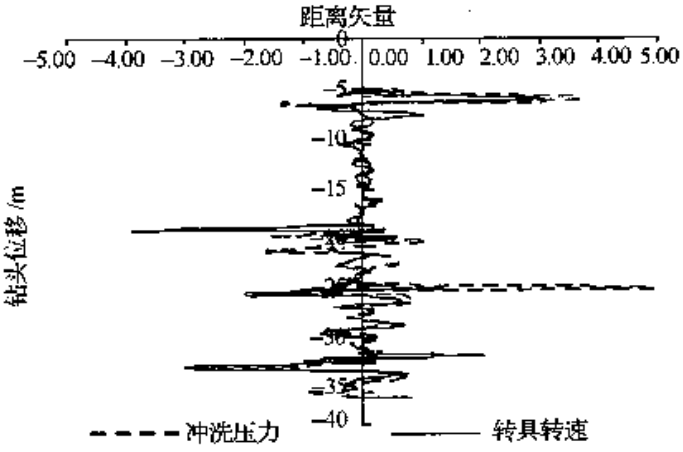


图 8.10　冲洗压力及钻具转速曲线斜率与有效轴压斜率之间的距离矢量分布

Figure 8.10　Distribution of distance vector between slope coefficient of FPC as well as RSC and ETFC

99.9%，根据成对数据的 t 检验方法，得检验结果如表 8.1 所示。

从表 8.1 可知，在特征参数曲线函数值距离数据样本的检验中，$|t|$ 分别为 8.69007 及 9.82387，$|t|>t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明当置信度为 99.9%时，该假设否定 H_0 接受 H_1，冲洗压力及钻具转速两特征曲线与有效轴压曲线之间的距离存在显著性差异。然而，斜率间的距离数据样本在检验中 $|t|$ 分别为 0.35362 及 0.48819，$|t|<t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明在置信度为 99.9%时，该假设接受 H_0 否定 H_1，冲洗压力及钻具转速两特征曲线与有效轴压力曲线图形的凹凸性及轨迹没有显著差异。由此可见，尽管冲洗压力曲线及钻具转速曲线的函数值在数值上与有效轴压力的函数值存在差异，但它们在形态上相似，具有相似的轨迹。

表 8.1 冲洗压力、转速与有效轴压力曲线相似性 t 检验结果

Table 8.1 Result of t-test between FPC as well as RSC and ETFC

特征参数	偏差检验	样本数 n	样本均值 $\bar{d}$	样本方差 S^2	$\lvert t\rvert=\left\lvert\frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}}\right\rvert$	$t_{\alpha/2}(n-1)$	α
冲洗压力	距离	81	−0.16048	0.02763	8.69007	3.41634	0.001
	斜率	81	0.03548	0.81523	0.35362	3.41634	0.001
钻具转速	距离	81	0.17808	0.02662	9.82387	3.41634	0.001
	斜率	81	−0.04613	0.72308	0.48819	3.41634	0.001

(2) 钻具动能、钻进总能量与钻进比功之间的相似性 t 检验

通过对特征参数曲线与参考曲线的网格离散化，形成了相应的自变量-因变量数据，因此，可快捷地计算相应函数值的距离值、斜率值及斜率间的距离数据，并生成相应的函数值距离数据样本以及斜率值距离数据样本。图 8.11 及图 8.12 为特征曲线与参考曲线间函数值的距离分布及其斜率之间的距离分布。

从图 8.11 和图 8.12 可知，能量曲线函数值之间的距离及斜率之间的距离基本重合，说明钻具动能与钻进总能量两特征曲线之间无偏差，具有较好的相似性。显然，能量曲线克服作业参数的随机性及不确定性，进一步说明了能量指标的合理性。

与作业参数曲线的 t 检验过程同理，若能量曲线生成的样本仍遵循成对数据 t 检验的基本假设，则可获得检验结果，如表 8.2 所示。

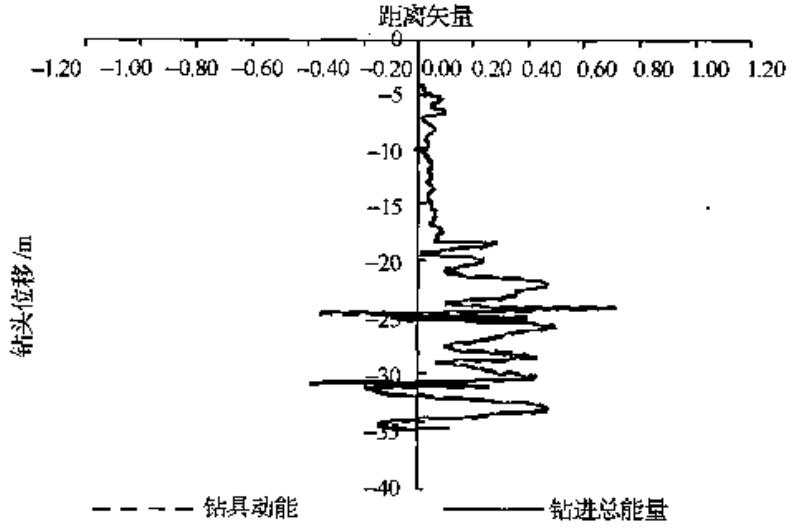


图 8.11 钻具动能及钻进总能量与钻进比功之间的距离矢量分布

Figure 8.11 Distribution of distance vector between KEC as well as TPEC and PSC

从表 8.2 可知，与冲洗压力、钻具转数及有效轴压力等作业参数特征曲线的 t 检验相似，能量曲线的函数值生成的距离样本，$|t|$ 分别为 5.79377 及 3.56628，$|t|>t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明当置信度为 99.9%时，该假设否定 H_0 接受 H_1，两特征曲线与参考曲线之间的距离存在显著性差异。然而，斜率间的距离数据样本在检验中 $|t|$ 分别

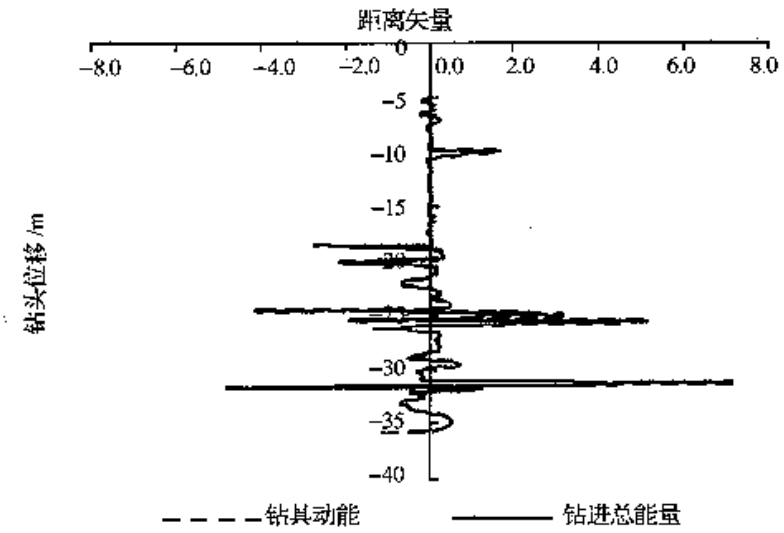


图 8.12　钻具动能及钻进总能量与钻进比功斜率之间的距离矢量分布

Figure 8.12　Distribution of distance vector between slope coefficient of KEC as well as TPEC and PSC

为 0.40997 及 0.42240，$|t|<t_{\alpha/2}(n-1)$恒成立，说明在置信度为 99.9%时，该假设接受 H_0 否定 H_1，两特征曲线与参考曲线图形的凹凸性及轨迹没有显著差异。由此可见，钻具动能与钻进总能量在数值上与钻进比功存在差异，但它们在地层特性的响应是同步的，图形形态相似，具有相似的轨迹。同时也说明，能量作为综合指标，能克服作业参数指标的随机性与不确定性误差，更能反映地层的总体特征。

表 8.2　动能、钻进总能量与钻进比功曲线相似性的 t 检验结果

Table 8.2　Result of t-test between KEC as well as TPEC and PSEC

特征参数	偏差检验	样本数 n	样本均值 $\bar{d}$	样本方差 S^2	$\lvert t\rvert=\left\lvert\frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}}\right\rvert$	$t_{\alpha/2}(n-1)$	α
动能	距离	81	0.12027	0.03490	5.79377	3.41634	0.001
	斜率	81	0.06540	2.06108	0.40997	3.41634	0.001
钻进总能量	距离	81	0.12133	0.09375	3.56628	3.41634	0.001
	斜率	81	0.06750	2.06853	0.42240	3.41634	0.001

8.4.2　充填土-风化花岗岩地层中穿孔参数间的相似性

1. 穿孔参数间的相似性斜率搜索识别

(1) 冲洗压力、钻具转速与有效轴压力之间的相似性

与普通花岗岩地层中同理，提取冲洗压力及钻具转速曲线为特征曲线，有效轴压力曲线为参考曲线，做相应的相似性比较图形如图 8.13 及图 8.14 所示。

从图 8.13 可知，参考曲线的特征峰数量为 18，特征曲线冲洗压力的特征峰数为

13，相似比为 0.72；在图 8.14 中，钻具转速曲线的特征峰数为 15，相似比为 0.83。这与普通风化花岗岩地层中的相似比一致，说明两个场址具有相似的地层结构。从这钻勘所揭露的工程地质背景相符合(参见相关章节)。

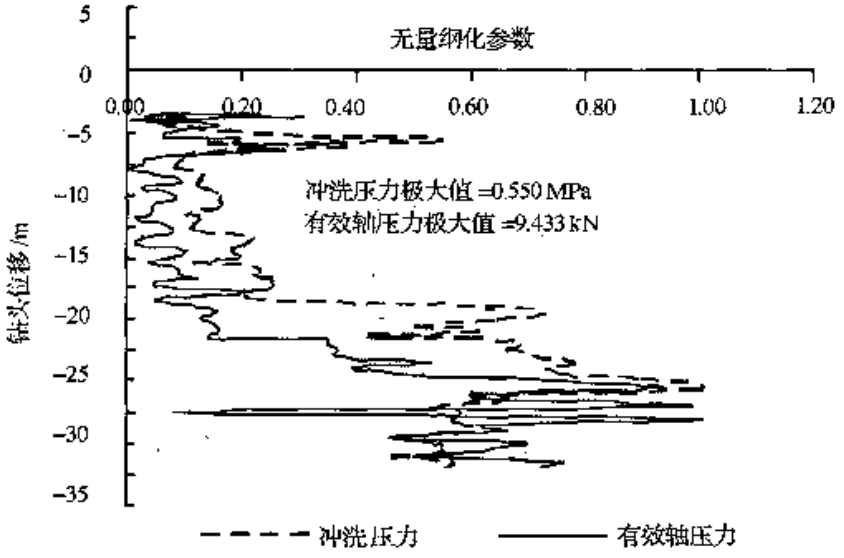


图 8.13 冲洗压力曲线与有效轴压力曲线的相似性比较

Figure 8.13 Compare of similarity between FPC and ETFC

下面对相似轨迹进行识别。根据斜率搜索识别原理，沿纵轴方向划分 70 个网格，生成样本数 $n=71$。同样，按照相关公式计算各特征曲线与参考曲线之间函数值的距离、斜率以及斜率值间的距离，并生成相应的数据集。最后，通过相关计算机程序自动完成图形的相似性搜索识别过程。

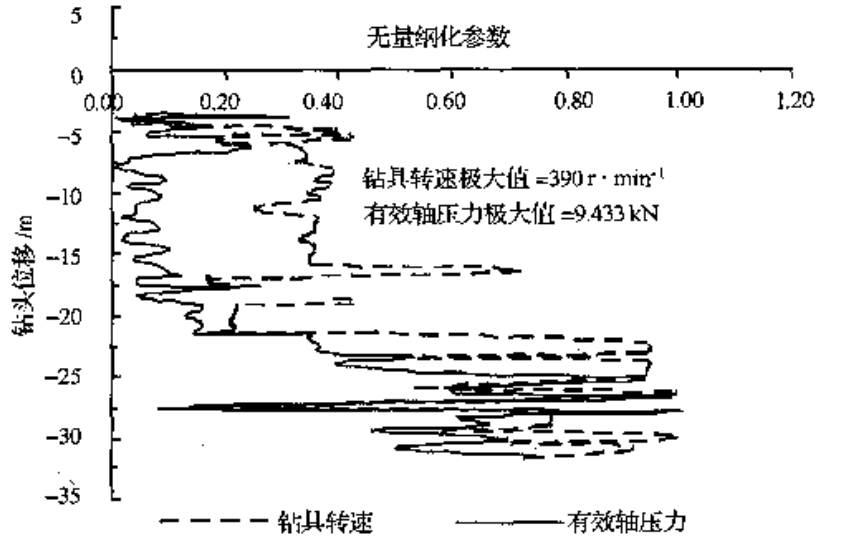


图 8.14 钻具转速曲线与有效轴压力曲线的相似性比较

Figure 8.14 Compare of similarity between RSC and ETFC

(2) 钻具动能、钻进总能量与钻进比功之间的相似性

同样，提取钻具动能、钻进总能量曲线为特征图形及钻进比功曲线为参考图形，生成相似比较图形如图 8.15 及图 8.16 所示。其中，图 8.15 为钻具动能曲线与钻进比功曲线的相似比较图，参考曲线的特征峰数为 15，特征曲线的特征峰数为 12，相似比为 0.80。图 8.16 为钻进总能量曲线与钻进比功曲线的相似比较图，特征曲线的特征峰数为 13，相似比为 0.87。显然，能量曲线的相似程度比操作曲线的相似程度高。

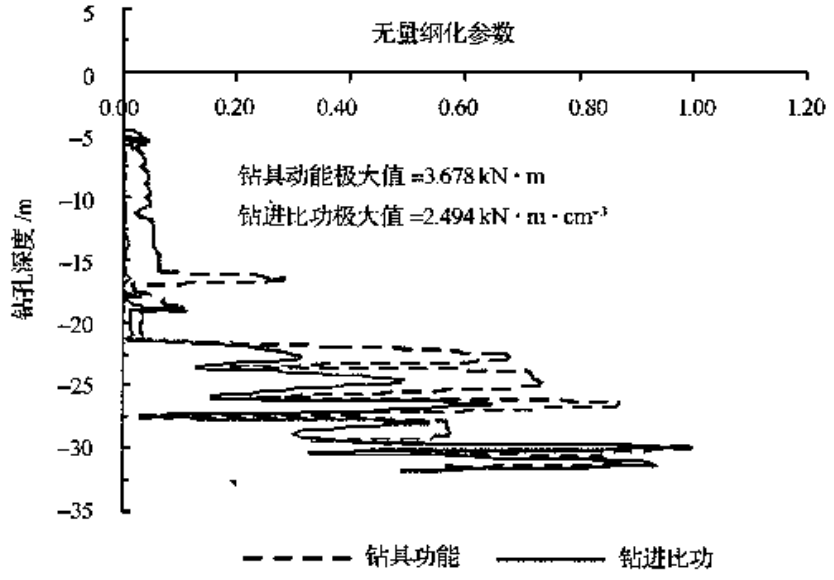


图 8.15　钻具动能曲线与钻进比功曲线的相似性比较

Figure 8.15　Compare of similarity between KEC and PSEC

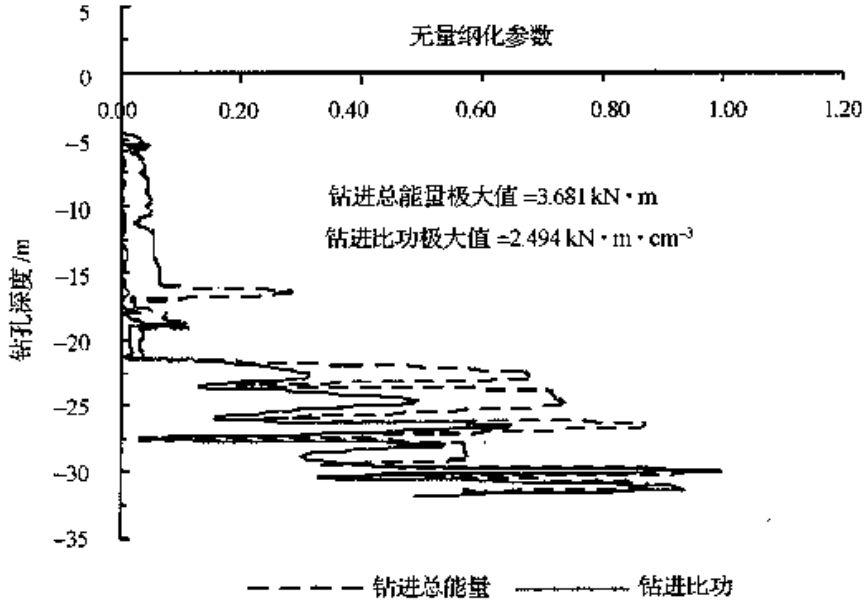


图 8.16　钻进总能量曲线与钻进比功曲线的相似性比较

Figure 8.16　Compare of similarity between TPEC and PSEC

而且，在图形上，无论是作业参数曲线还是能量曲线，图形的态势基本一致，在基岩界面上具有明显的分区性。这与在普通风化花岗岩地层中所揭示的规律相一致。相似图形轨迹的识别仍遵循操作曲线相似性识别时的设定。网格数为 70，样本数为 71，并计算特征曲线与参考曲线网格点的对应坐标、对应网格点间的距离以及特征曲线与参考曲线各点的切线斜率、斜率差。最后，运用斜率搜索算法，计算机程序自动完成识别过程。

与普通风化花岗岩地层中的识别一样，斜率搜索识别过程所完成的只是设定容许偏差条件下的相似性，其置信程度还须通过离散化的数据样本进行统计检验。

2. 穿孔参数间的相似性 t 检验

(1) 冲洗压力、钻具转速与有效轴压力之间的相似性 t 检验

根据特征曲线及参考曲线网格离散化后生成的数据样本，可分别获得冲洗压力及钻具转速与有效轴压力函数值之间的距离矢量分布如图 8.17 所示，以及曲线斜率值之间的距离差如图 8.18 所示。从图中可知，冲洗压力曲线与钻具转数曲线函数值之间以及斜率值之间存在一定的距离偏差，这与普通风化花岗岩地层中的情形一致。但同样，它们与有效轴压力之间的相似性还须根据数据样本的 t 检验来判断。

同样地，设特征曲线和参考曲线所获得的函数值样本均服从正态总体 $N(\mu_1,\sigma^2)$ 分布，且彼此本独立，它们对应的距离差 $d_1,d_2,\cdots,d_n$ 亦服从正态总体 $N(\mu_d,\sigma^2)$。其中，样本均值及方差 μ_d、σ^2 为未知。现已知样本数 $n=71$，若设相似性置信度为 99.9%，根据成对数据的 t 检验方法，得检验结果如表 8.3 所示。

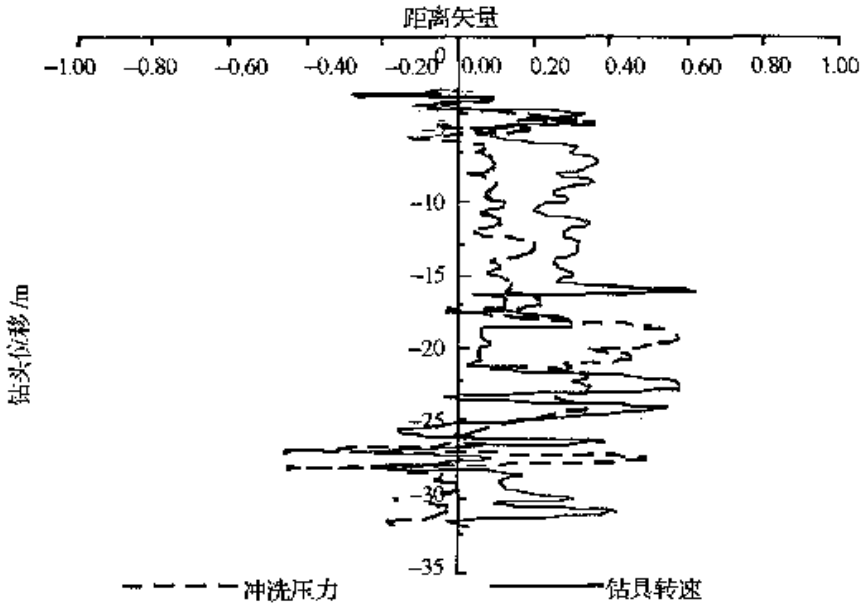


图 8.17 冲洗压力及钻具转速与有效轴压力之间的距离矢量分布

Figure 8.17 Distribution of distance vector between FPC as well as RSC and ETFC

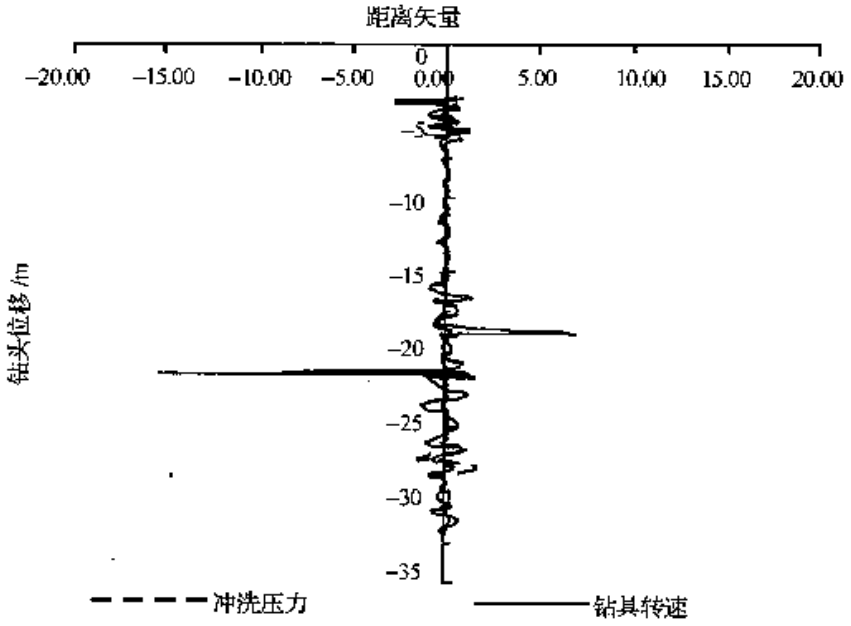


图 8.18　冲洗压力及钻具转速曲线斜率与有效轴压力斜率之间的距离矢量分布

Figure 8.18　Distribution of distance vector between slope coefficient of FPC as well as RSC and ETFC

表 8.3　冲洗压力、转速与有效轴压力曲线相似性 t 检验结果

Table 8.3　Result of t-test between FPC as well as RSC and ETFC

特征参数	偏差检验	样本数 n	样本均值 $\bar{d}$	样本方差 S^2	$\lvert t\rvert=\left\lvert\frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}}\right\rvert$	$t_{\alpha/2}(n-1)$	α
冲洗压力	距离	71	0.12892	0.04003	5.54287	3.43501	0.001
	斜率	71	−0.01815	0.45654	0.23102	3.43501	0.001
钻具转速	距离	71	0.18241	0.03284	8.65921	3.43501	0.001
	斜率	71	−0.12220	4.30586	0.50660	3.43501	0.001

从表 8.3 可知，与普通风化花岗岩地层中作业参数特征曲线的 t 检验相似，冲洗压力及钻具转速曲线的函数值生成的距离样本，$|t|$ 分别为 5.54287 及 8.65921，$|t|>t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明当置信度为 99.9% 时，该假设否定 H_0 接受 H_1，冲洗压力及钻具转速两特征曲线与有效轴压力曲线之间的距离亦存在显著性差异。而斜率间的距离数据样本在检验中 $|t|$ 分别为 0.23102 及 0.50660，$|t|<t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明在置信度为 99.9% 时，该假设接受 H_0 否定 H_1，冲洗压力及钻具转速两特征曲线与有效轴压力曲线图形的轨迹没有显著性差异。由此可见，尽管冲洗压力曲线及钻具转速曲线的函数值在数值上与有效轴压力曲线的函数值之间存在差异，但它们在形态上均与有效轴压曲线相似，具有相似的轨迹。

(2) 钻具动能、钻进总能量与钻进比功之间的相似性 t 检验

钻具动能及钻进总能量曲线与钻进比功之间的距离矢量分布如图 8.19 所示，相应斜率曲线之间的距离矢量如图 8.20 所示。从图中可见，两能量曲线的距离矢

量图形基本重合。说明在充填土-风化花岗岩地层中，钻具动能及钻进总能量在地层界面上的响应一致，具有相似的图形轨迹。这也进一步说明能量曲线作为地层特征的综合反映，可避免作业参数产生的随机性及不确定性，验证了普通风化花岗岩地层中能量曲线所揭示的规律的可靠。

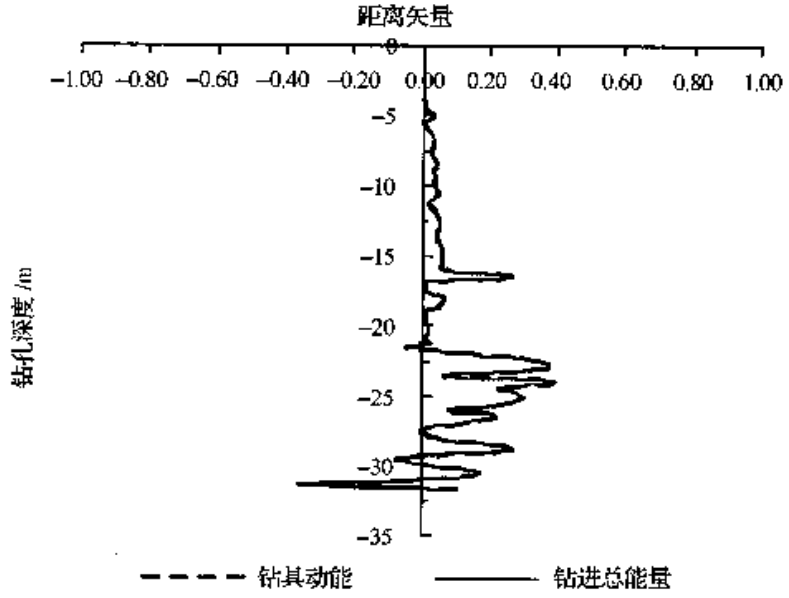


图 8.19 钻具动能及钻进总能量与钻进比功之间的距离矢量分布

Figure 8.19 Distribution of distance vector between KEC as well as TPEC and PSC

对能量特征曲线与参考曲线之函数值的距离样本及斜率值之间的距离样本进行 t 检验，结果如表 8.4 所示。从表中可知，两能量曲线生成的距离样本，$|t|$ 分别为 4.60601 及 4.68294，$|t|>t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明当置信度为 99.9%时，该假设否定 H_0 接受 H_1，钻具动能及钻进总能量两特征曲线与钻进比功曲线之间的距离存在显著性差异。然而，检验中斜率间的距离样本 $|t|$ 分别为 0.65852 及0.68294，$|t|<t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明在置信度为 99.9%时，该假设接受 H_0 否定 H_1，两能量曲线与比功曲线图形的凹凸性及轨迹没有显著差异。这亦与普通风化花岗岩地层所揭示的规律一致。

表 8.4 动能、钻进总能量与钻进比功曲线相似性的 t 检验结果

Table 8.4 Result of t-test between KEC as well as TPEC and PSEC

特征参数	偏差检验	样本数 n	样本均值 $\bar{d}$	样本方差 S^2	$\lvert t\rvert=\left\lvert\frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}}\right\rvert$	$t_{\alpha/2}(n-1)$	α
动能	距离	71	0.05912	0.01219	4.60601	3.43501	0.001
	斜率	71	0.04203	0.30150	0.65852	3.43501	0.001
钻进总能量	距离	71	0.06009	0.01218	4.68294	3.43501	0.001
	斜率	71	0.04174	0.30547	0.64965	3.43501	0.001

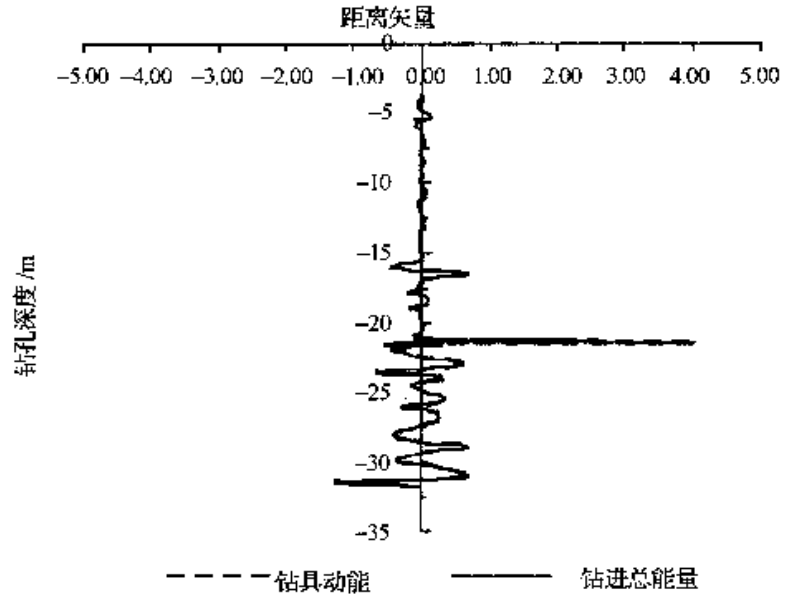


图 8.20　钻具动能及钻进总能量与钻进比功斜率之间的距离矢量分布

Figure 8.20　Distribution of distance vector between slope coefficient of KEC as well as TPEC and PSC

8.4.3　复杂风化花岗岩地层中穿孔参数间的相似性

1. 穿孔参数间的相似性斜率搜索识别

(1) 冲洗压力、钻具转速与有效轴压力之间的相似性

普通风化花岗岩地层及充填土-风化花岗岩地层均是属于相对简单的地层，由于地层比较稳定，钻进过程中机器容易控制，操作相对简单，作业参数的随机误差也比较小，特征曲线及参考曲线也相对简单和平稳。然而，在复杂地层中，由于地层的多变性，作业参数自适应地层变化的控制难度大大增加，操作过程中随机误差的发生概率也随之增高。可见，在复杂地层中的识别更具挑战性。

与普通花岗岩地层及充填土-风化花岗岩地层中同理，提取冲洗压力及钻具转速曲线为特征曲线，有效轴压力曲线为参考曲线，做相应的相似性比较图形如图 8.21及图 8.22 所示。

从图 8.21 可知，特征曲线冲洗压力的特征峰并不明显，无需计算，其与参考曲线的相似比低。这说明冲洗压力作为特征参量，在复杂地层中钻进时并不稳定。因此，冲洗压力作为特征参量来考察地层特性可能是不合适的。在图 8.22 中，参考曲线的特征峰数为 25，钻具转速曲线的特征峰数为 21，相似比为 0.84。这与普通风化花岗岩地层及充填土-风化花岗岩地层中的相似比基本一致。说明在相同的钻进工作方式下，钻具转速作为特征参量是相对稳定的。

相似图形轨迹的识别仍按斜率搜索识别原理进行，沿纵轴方向划分 120 个网格，生成样本数 $n=121$。同样，按照相关公式计算各特征曲线与参考曲线之间函

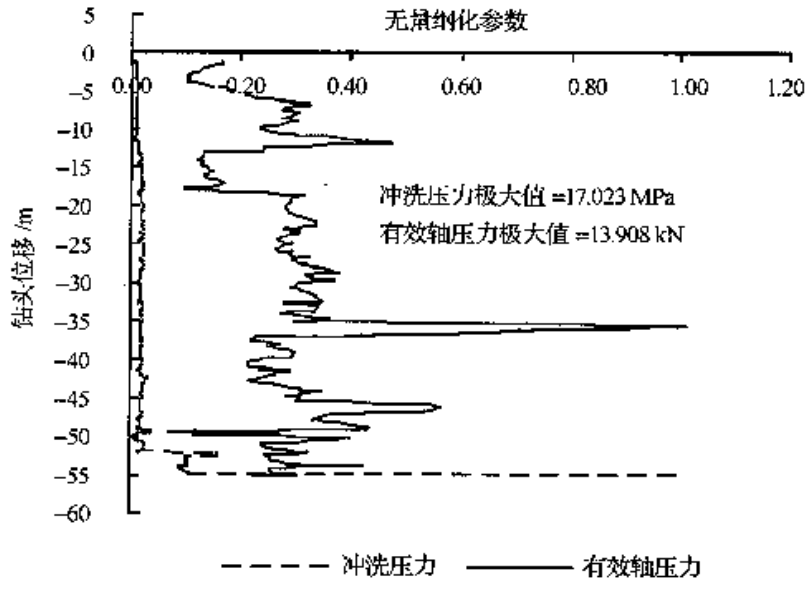


图 8.21 冲洗压力曲线与有效轴压力曲线的相似性比较

Figure 8.21 Compare of similarity between FPC and ETFC

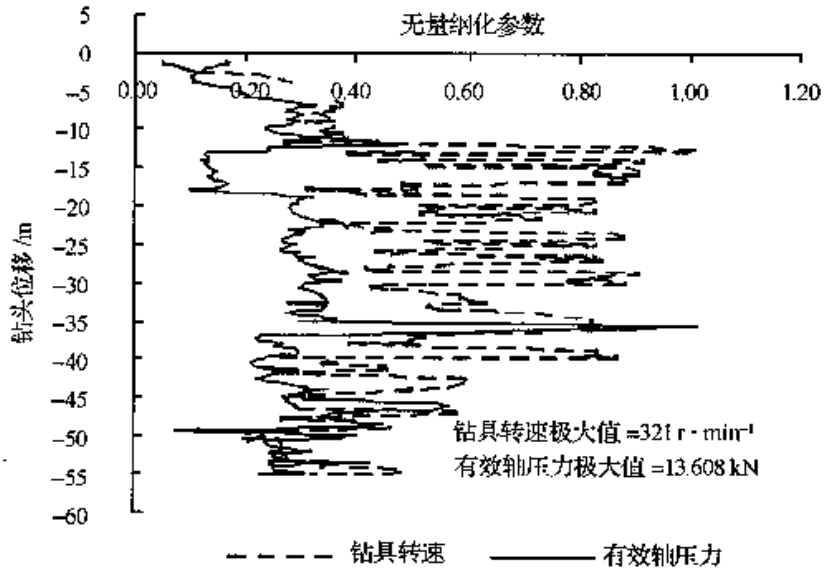


图 8.22 钻具转速曲线与有效轴压力曲线的相似性比较

Figure 8.22 Compare of similarity between RSC and ETFC

数值的距离、斜率以及斜率值间的距离，并生成相应的数据集。最后，通过相关计算机程序自动完成图形的相似性搜索识别过程。

2) 钻具动能、钻进总能量与钻进比功之间的相似性

提取钻具动能、钻进总能量曲线为特征图形及钻进比功曲线为参考图形，生成相似比较图形如图 8.23 及图 8.24 所示。其中，图 8.23 为钻具动能曲线与钻进比功曲线的相似比较图，参考曲线的特征峰数为 25，特征曲线的特征峰数为 23，相似比为 0.92。图 8.24 为钻进总能量曲线与钻进比功曲线的相似比较图，特征曲线

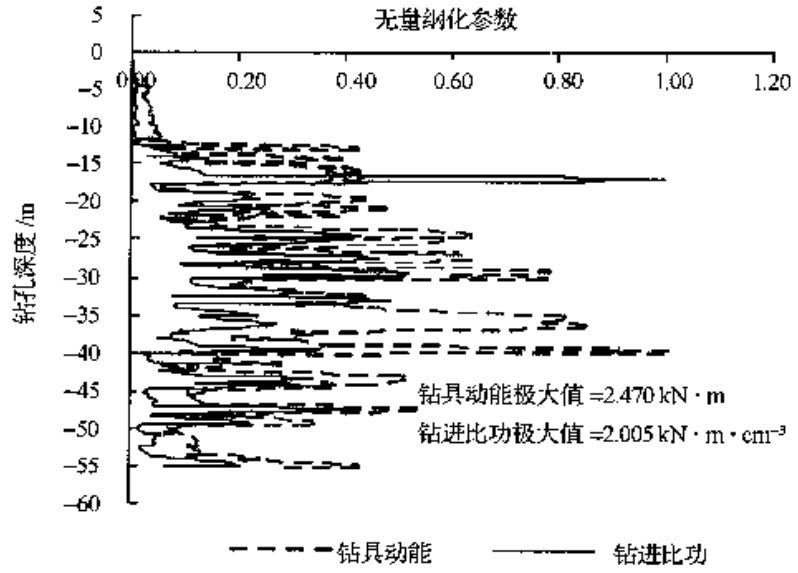


图 8.23　钻具动能曲线与钻进比功曲线的相似性比较

Figure 8.23　Compare of similarity between KEC and PSEC

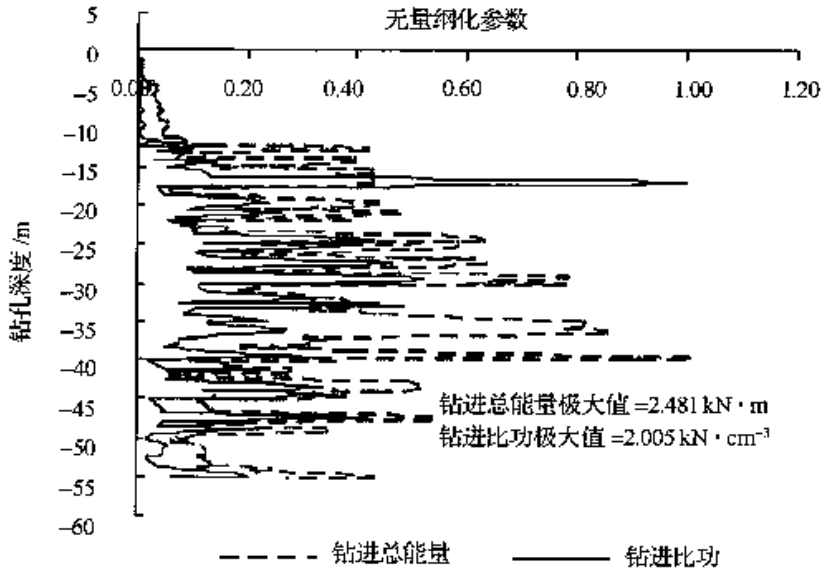


图 8.24　钻进总能量曲线与钻进比功曲线的相似性比较

Figure 8.24　Compare of similarity between TPEC and PSEC

的特征峰数亦为 23，相似比同为 0.92。显然，在复杂风化花岗岩地层中，能量曲线之间表现出了很高的相似度。但这只是能量特征峰的数量相似，对于曲线轨迹还须采用斜率搜索法进行特征曲线和参考曲线进行比较，网格及识别参数的设置与作业参数曲线的识别相似。

从以上三种不同风化花岗岩地层的相似性比较可以看出，作业参数曲线中的钻具转速与有效轴压力，以及能量曲线中的钻具动能、钻进总能量与钻进比功曲线具有较好的相似性。

2. 穿孔参数间的相似性 t 检验

1) 冲洗压力、钻具转速与有效轴压力之间的相似性 t 检验

特征曲线与参考曲线之间的距离分布分别如图 8.25 及图 8.26 所示。其中图 8.25 为冲洗压力及钻具转速曲线与有效轴压力曲线之间的距离矢量分布，图 8.26 为两特征曲线与参考曲线网格对应点的斜率偏差分布。

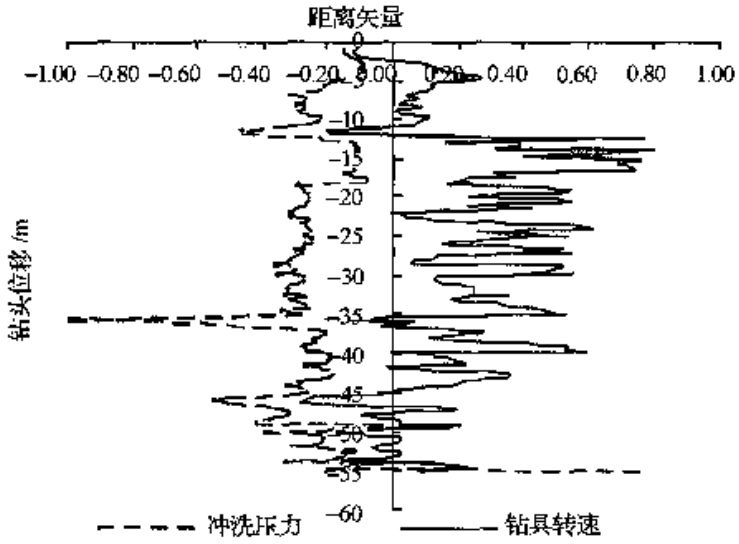


图 8.25 冲洗压力及钻具转速与有效轴压力之间的距离矢量分布

Figure 8.25 Distribution of distance vector between FPC as well as RSC and ETFC

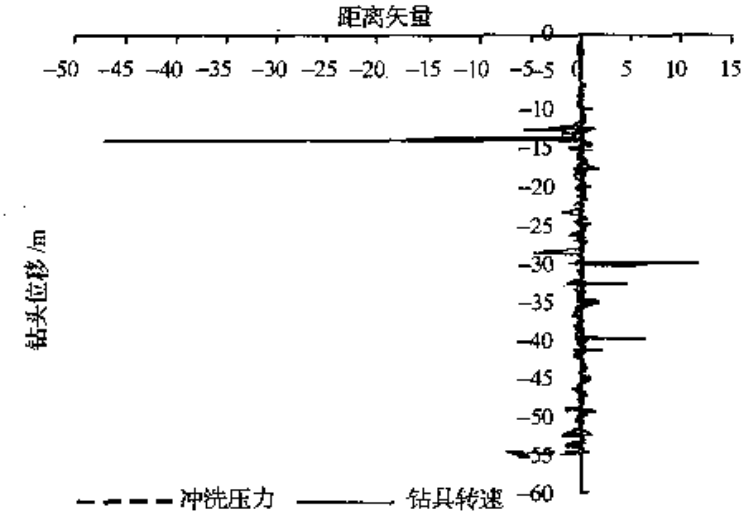


图 8.26 冲洗压力及钻具转速曲线斜率与有效轴压力斜率之间的距离矢量分布

Figure 8.26 Distribution of distance vector between slope coefficient of FPC as well as RSC and ETFC

从图 8.25 及图 8.26 可知，特征曲线与参考曲线函数值之间以及斜率值之间存在较大的距离偏差。这与普通风化花岗岩及充填土-风化花岗岩地层中所揭示

的情况一致。也就是说，无论是简单花岗岩地层还是复杂花岗岩地层，作业参数之间均存在一定的偏差，存在随机性和不确定性。

同样可采用相应的特征曲线与参考曲线形成的距离数据样本进行 t 检验，结果如表 8.5 所示。

表 8.5　冲洗压力、转速与有效轴压力曲线相似性 t 检验结果

Table 8.5　Result of t-test between FPC as well as RSC and ETFC

特征参数	偏差检验	样本数 n	样本均值 $\bar{d}$	样本方差 S^2	$\lvert t\rvert=\left\lvert\frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}}\right\rvert$	$t_{\alpha/2}(n-1)$	α
冲洗压力	距离	121	−0.25459	0.02072	22.23169	3.37345	0.001
	斜率	121	−0.05187	0.42704	0.99779	3.37345	0.001
钻具转速	距离	121	0.20701	0.05771	10.83178	3.37345	0.001
	斜率	121	−0.24260	15.98351	0.76275	3.37345	0.001

从表 8.5 可知，与普通风化花岗岩及充填土-风化花岗岩地层中作业参数特征曲线的 t 检验相似，冲洗压力及钻具转速曲线的函数值生成的距离样本，$|t|$ 值比简单地层中大，分别为 22.23169 及 10.83178，$|t|>t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明当置信度为 99.9%时，该假设否定 H_0 接受 H_1，冲洗压力及钻具转速两特征曲线与有效轴压力曲线之间的距离差异增大。而斜率间的距离数据样本在检验中 $|t|$ 值亦有所增大，但幅度较小，分别为 0.99779 及 0.76275。显然，$|t|<t_{\alpha/2}(n-1)$ 仍成立，说明在置信度为 99.9%时，该假设接受 H_0 否定 H_1，冲洗压力及钻具转速两特征曲线与有效轴压力曲线图形的轨迹没有显著性差异。由此可见，尽管冲洗压力曲线及钻具转速曲线的函数值在数值上与有效轴压曲线的函数值之间存在差异，但它们在形态上均与有效轴压力曲线相似，具有相似的轨迹。这与普通风化花岗岩及充填土-风化花岗岩地层中所揭示的规律一致。

(2) 钻具动能、钻进总能量与钻进比功之间的相似性 t 检验

钻具动能及钻进总能量曲线与钻进比功之间的距离矢量分布如图 8.27 所示，相应斜率曲线之间的距离矢量如图 8.28 所示。从图中可见，两能量曲线的距离矢量图形基本重合。说明在复杂风化花岗岩地层中，钻具动能及钻进总能量在地层界面上的响应一致，在数值上差异不大，且具有相似的图形轨迹。这也进一步说明能量曲线作为地层特征的综合反映，可避免作业参数产生的随机性及不确定性，与普通风化花岗岩及充填土-风化花岗岩地层中能量曲线所揭示的规律相吻合。

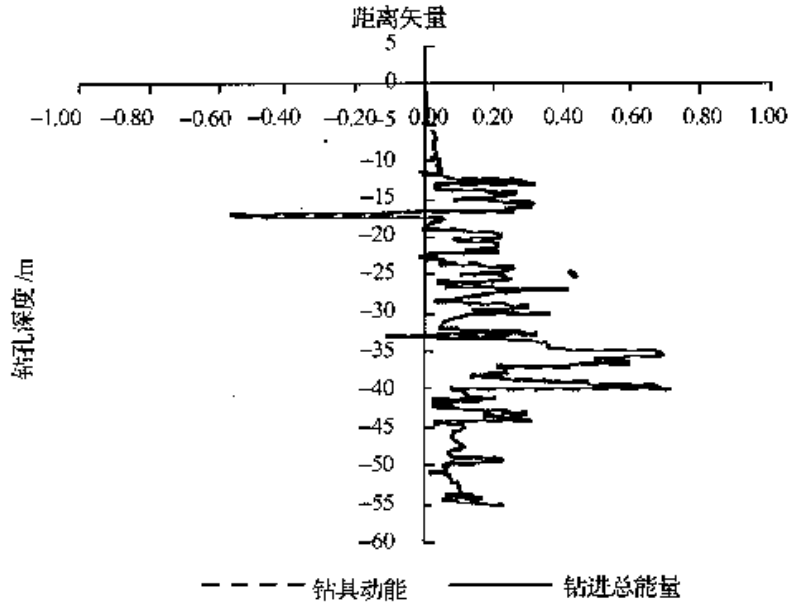


图 8.27 钻具动能及钻进总能量与钻进比功之间的距离矢量分布

Figure 8.27 Distribution of distance vector between KEC as well as TPEC and PSC

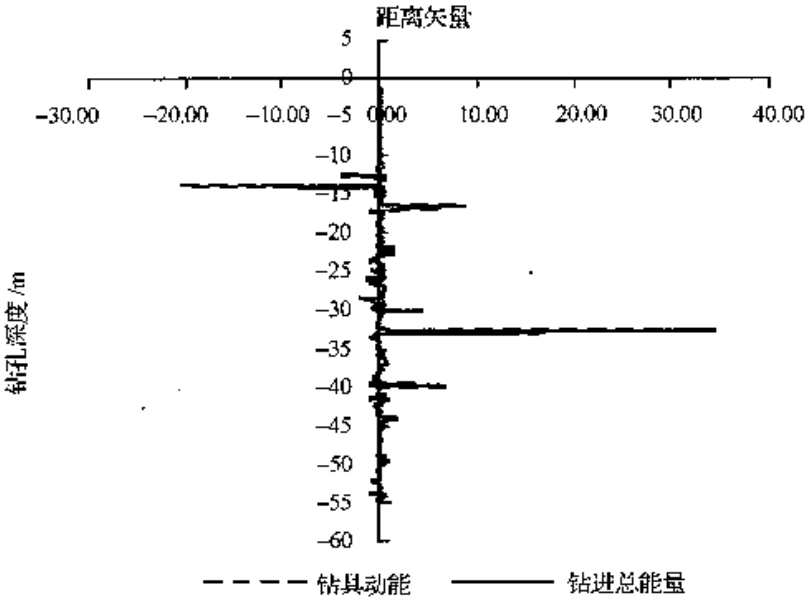


图 8.28 钻具动能及钻进总能量与钻进比功斜率之间的距离矢量分布

Figure 8.28 Distribution of distance vector between slope coefficient of KEC as well as TPEC and PSC

对能量特征曲线与参考曲线之函数值的距离样本及斜率值之间的距离样本进行 t 检验，结果如表 8.6 所示。从表中可知，两能量曲线生成的距离样本，$|t|$ 分别为 10.72546 及 10.95952，显然，$|t|>t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明当置信度为 99.9% 时，该假设否定 H_0 接受 H_1，钻具动能及钻进总能量两特征曲线与钻进比功曲线之间的距离存在显著性差异。然而，检验中斜率间的距离样本 $|t|$ 分别为 0.66701 及 0.67719，$|t|<t_{\alpha/2}(n-1)$ 恒成立，说明在置信度为 99.9% 时，该假设接受 H_0 否

定 H_1，两能量曲线与比功曲线图形的凹凸性及轨迹没有显著差异。这亦与普通风化花岗岩及充填土-风化花岗岩地层中所揭示的规律一致。

表 8.6　动能、钻进总能量与钻进比功曲线相似性的 t 检验结果

Table 8.6　Result of t-test between KEC as well as TPEC and PSEC

特征参数	偏差检验	样本数 n	样本均值 $\bar{d}$	样本方差 S^2	$\lvert t\rvert=\left\lvert\frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}}\right\rvert$	$t_{\alpha/2}(n-1)$	α
动能	距离	121	0.13360	0.02452	10.72546	3.37345	0.001
	斜率	121	0.17060	11.58266	0.66701	3.37345	0.001
钻进总能量	距离	121	0.13566	0.02421	10.95952	3.37345	0.001
	斜率	121	0.18217	11.43362	0.67719	3.37345	0.001

上述三种不同风化花岗岩地层中的相似性研究表明，在相同的钻进条件下，冲洗压力、钻具转速及有效轴压力随地层特性的变化轨迹存在一定的相似性特征，但存在随机性和不确定性。然而，钻具动能、钻进总能量及钻进比功随地层的变化轨迹具有较高的相似性。相似性识别再次表明，能量曲线具有较高的相似性及稳定性，进一步验证了能量指标作为地层判别综合性指标的科学性。

8.5　基于金刚石钻进比功曲线的地层判别分类

8.5.1　聚类参数及类的门限值设置

1）聚类参数的选取。聚类参数的选取必须遵循如下原则：① 对地层特性的高敏感性。所选参数将随地层岩性的变化而变化，特别是对地层强度等工程地质特性应具有高的响应性，与之高度相关。② 具有普适性和可比性。当钻具变更时，所选参数可进行比较，应能克服严格的可比条件的限制。从前面的分析可知，穿孔速率及钻进能量与地层强度之间具有较高的响应特性。但穿孔速率受钻机工作方式、钻机类型、钻具、冲洗液及排渣方式等条件的限制，为了克服严格的可比条件，必须变换为单位钻进能量的穿孔速率。在钻进能量中，存在能量破岩效率问题。因此，必须变换为破碎单位岩石体积的所消耗的能量，即钻进比功。由此可见，聚类参数可选取单位钻进能量下的穿孔速率及钻进比功。

2）聚类参数的门限值设置。聚类参数的门限值设置须遵循以下原则：① 具有好的分区性。所选参数能将数据样本有效分开，形成具有一定档次和级别结构的数据单元。② 与地层特性的分类相匹配。通过门限值设置所形成的数据结构不应是一种数学意义上的数据结构，而应与地层的物理力学分层具有良好的匹配性。因此，门限值的设置必须建立在岩石物理力学试验的基础上，参考有关试验指

标进行设置。聚类参数门限值的设置如表 8.7 所示。

表 8.7 风化花岗岩地层中旋转钻进比功的门限值设置

Table 8.7 Setting of threshold for rotary drilling specific energy in weathered granite formation

风化分级	充填土	V	IV	III	II	I
门限值/(kN·m·cm^{-3})	0～0.0215	0.0215～0.1075	0.1075～05375	05375～1.6125	1.6125～3.2250	>3.2250

下面以旋转钻进比功为聚类指标，设定厚度的识别精度为 0.01 m，对不同风化花岗岩地层的风化程度进行分类判别。

8.5.2 普通风化花岗岩地层的判别分类

在普通风化花岗岩地层中，采用金刚石钻进比功指标进行的聚类分析结果如表 8.8 所示。从表 8.8 可知，在设定的识别精度下，根据金刚石钻进比功对地层风化程度进行的聚类分级结果与工程勘察中根据钻孔岩芯进行的分级结果基本一致。

1) 在序号为 2、4、5、8、10、12 及 13 的地层中，聚类分级结果与岩芯地质分级结果完全吻合。其中，序号 4 的地层深度范围为－6.00～－11.00m，厚 5.00m，岩芯地质分级为全风化层。聚类分析结果表明，此层可细分为充填土、花岗岩强风化层(V)及充填土层，实际上为一厚度为 0.03 m 的强风化花岗岩夹层，总体上属于全风化花岗岩，金刚石钻进比功均值为 0.0207kN·m·cm^{-3}。序号 12 的地层，深度范围－31.37～－31.70m，厚 0.33m，岩芯地质分级为微风化花岗岩(II)。聚类分级结果表明，此层中含有厚 0.33m 的中等风化花岗岩层(III)，但总体上仍为微风化层，金刚石钻进比功均值为 1.8372kN·m·cm^{-3}。在序号 13 的地层中，岩芯地质分级为 II 级。根据金刚石钻进比功进行聚类分级的结果表明，此层中亦含有厚1.50m 的 III 级风化花岗岩夹层。然而，此层中金刚石钻进比功均值为 1.8238kN·m·cm^{-3}，仍属 II 级风化花岗岩。此外，在深度－24.80～－25.40m 的地层中，岩芯地质分级为强风化至中等风化(V/III)花岗岩，显然，聚类分析可以对岩芯地质分级结果进行细分，但总体上是完全吻合的。这一方面揭示了实际岩体的非均质性，另一方面，也证实了聚类分级判别的高精度及可靠性。

2) 在序号 6 及 9 的地层中，聚类分级结果与岩芯地质分级结果基本吻合。其中，在－16.10～－18.90m 深度范围，岩芯地质分级为全风化至强风化花岗岩层(V/IV)。聚类分级结果表明，此地层金刚石钻进比功为 0.0390 kN·m·cm^{-3}，属 V 级风化花岗岩，聚类分级结果与人工分级结果接近。在深度－19.95～－24.80m 的地层中，岩芯地质分级为中等风化至微风化花岗岩(III/II)，而根据金刚石钻进比功进行的聚类分级结果表明，此地层由 IV 及 III 两组不同风化程度的地层交错组成，厚度为 0.05～2.42m 不等，钻进比功均值为 0.7253 kN·m·cm^{-3}，属 III 类风化花岗

岩地层。显然，聚类分级结果与岩芯地质进行人工分级的结果接近。而且，以金刚石钻进比功进行聚类分级的结果同样揭示了此地层的不均性。

3) 在序号 3、7 及 11 的地层中，聚类分级与岩芯地质分级结果之间存在差异。在钻孔深度－5.10～－6.00 m 范围内，厚度 1.10 m，根据钻孔岩芯进行的分级结果为 III/II 级。根据金刚石钻进比功进行聚类分级，此层钻进比功均值为 0.1307 kN·m·cm^{-3}，总体的风化程度为 IV 级。此层可细分为三类地层。① 深度范围－5.36～－5.50 m，厚 0.14m，为 V 级风化花岗岩。② 深度范围－5.50～－6.50m，厚 1.00m，属 IV 级风化花岗岩。③ 深度范围－6.50～－6.67m，厚 0.17m，属 V 级风化花岗岩。显然，根据金刚石钻进比功进行的分级结果，此地层的风化程度比以钻孔岩芯进行的分级高。同样，在－18.90～－19.60m 深度范围，根据岩芯进行的风化分类结果亦为 III/II 级，而此地层金刚石钻进比功均值为 0.1900 kN·m·cm^{-3}，风化分类结果为 IV 级。此外，在－25.40～－31.37m 深度范围，厚 5.97m，钻孔岩芯分类结果为 II 级，而由钻进比功进行分类结果表明，此层可细分为 5 层，由 II 及 III 级风化程度的花岗岩交错组成，金刚石钻进比功均值为 1.2272 kN·m·cm^{-3}，此层总体的分类结果为风化程度 III 级。众所周知，钻孔岩芯的风化程度分级是地质工程师根据钻孔岩芯的颜色、破碎程度及简单的强度检测来确定的，属定性判别过程。显然，由于人工识别能力的局限性，其判断往往是粗略的。而根据钻进比功进行分类，则可以将判别过程量化。

从两种方法的分类判别结果来看，钻孔岩芯对风化程度的分级结果与金刚石钻进比功的分类结果的吻合率为 76.92%。由此可见，采用金刚石钻进比功较采用岩芯样本进行的人工分级更细、更精确。可以实现对岩石风化程度分级的定量化，确保识别的可靠性和精度。

表 8.8　普通风化花岗岩聚类分级结果

Table 8.8　The results of clustering classification for general weathered granite

地层序号	根据钻孔岩芯进行的风化程度分级			根据金刚石钻进比功对风化程度进行的聚类分级			识别精度
	录孔深度/m	地层岩性	风化分级	监测深度/m	风化分级	比功均值/(kN·m·cm^{-3})	厚度/m
1	0.00～－2.00	充填土	充填土	－	－	－	2.00
2	－2.00～－5.10	花岗岩	V	－2.00～－5.36	V	0.0200	3.36
3	－5.10～－6.00	花岗岩	III/II	－5.36～－5.50	V	0.0640	0.14
				－5.50～－6.50	IV	0.1751	1.00
				－6.50～－6.67	V	0.064	0.17
				平均	IV	0.1307	－
4	－6.00～－11.00	花岗岩	V	－6.67～－9.97	充填土	0.0115	3.30
				－9.97～－10.00	IV	0.1113	0.03
				－10.00～－11.00	充填土	0.0132	1.00
				平均	V	0.0207	－

续表

地层序号	根据钻孔岩芯进行的风化程度分级			根据金刚石钻进比功对风化程度进行的聚类分级			识别精度
	录孔深度/m	地层岩性	风化分级	监测深度/m	风化分级	比功均值/(kN·m·cm^{-3})	厚度/m
5	−11.00～−16.10	花岗岩	V	−11.00～−15.76	V	0.0184	4.76
6	−16.10～−18.90	花岗岩	V/IV	−15.76～−18.58	V	0.0390	2.82
7	−18.90～−19.60	花岗岩	III/II	−18.58～−19.50	IV	0.1900	0.92
8	−19.60～−19.95	花岗岩	IV	−19.50～−19.95	IV	0.4978	0.45
9	−19.95～−24.80	花岗岩	III/II	−19.95～−20.00	IV	0.2932	0.05
				−20.00～−21.50	III	0.7498	1.50
				−21.50～−22.00	IV	0.5184	0.50
				−22.00～−24.42	III	0.8840	2.42
				平均	III	0.7253	—
10	−24.80～−25.40	花岗岩	IV/III	−24.42～−24.80	IV	0.2918	0.38
				−24.80～−24.87	III	0.8810	0.07
				平均	III	0.6021	—
11	−25.40～−31.37	花岗岩	II	−24.87～−25.00	II	2.1690	0.13
				−25.00～−25.40	III	1.0659	0.40
				−25.40～−25.50	II	2.3534	0.10
				−25.50～−31.00	III	0.9829	5.50
				−31.00～−31.08	II	2.0079	0.08
				平均	III	1.2272	—
12	−31.37～−31.70	花岗岩岩脉	II	−31.08～−31.37	II	2.2372	0.29
				−31.37～−31.70	III	1.2878	0.33
				−31.70～−31.92	II	2.1358	0.22
				平均	II	1.8372	—
13	−31.70～−35.80	花岗岩	II	−31.92～−33.00	II	2.0162	1.08
				−33.00～−34.50	III	1.3471	1.50
				−34.50～−35.67	II	2.0439	1.17
				平均	II	1.8238	—

8.5.3 充填土-风化花岗岩地层的判别分类

在此地层中，采用金刚石钻进比功进行聚类分级的结果如表 8.9 所示。

从表 8.9 可知，根据金刚石钻进比功对地层风化程度进行的聚类分级结果与工程勘察中根据钻孔岩芯进行的分级结果基本一致。

1) 在序号 1、2、3 及 7 的地层中，金刚石钻进比功对风化程度分级的结果与岩芯地质分级的结果完全吻合。其中，在地层深度−5.60～−6.09 m 范围为一古老的混凝土夹层，岩芯地质分级相当于强风化至全风化(IV/V)花岗岩，根据金刚石钻进比功对风化程度进行聚类分级结果表明，此混凝土层可划分为厚 0.08 m 的强风化层(IV)与厚 0.10 m 的全风化层(V)，钻进比功均值为 0.1032 kN·m·cm^{-3}。然而，此夹层的识别厚度差异较大，由地质录孔可鉴别的混凝土层厚度为 0.49 m，而根

据钻进比功的识别厚度为 0.18 m，究其原因钻进比功指标是一种力学分层，无法对岩性进行识别。从地层结构来看，此混凝土层为充填土中的夹层，由于混凝土的强烈蚀变，部分已接近充填土的强度，因此，单从钻进比功的角度难以识别混凝土夹层的厚度，要对岩性进行准确识别，还须结合地质分析及标定。

表 8.9　充填土-风化花岗岩聚类分级结果

Table 8.9　The results of clustering classification for weathered granite with earth fill

地层序号	根据钻孔岩芯进行的风化程度分级			根据金刚石钻进比功对风化程度进行的聚类分级			识别精度
	录孔深度/m	地层岩性	风化分级	监测深度/m	风化分级	比功均值/(kN·m·cm^{-3})	厚度/m
1	0.00～－5.60	充填土	充填土	0.00～－5.42	充填土	0.0026	5.42
2	－5.60～－6.09	古老混凝土	IV/V	－5.42～－5.50	IV	0.1145	0.08
				－5.50～－5.60	V	0.0919	0.10
				平均	V	0.1032	—
3	－6.09～－7.10	充填土	充填土	－5.60～－7.10	充填土	0.0049	1.50
4	－7.10～－18.00	花岗岩	V	－7.10～－13.33	充填土	0.0071	6.23
				－13.33～－14.00	V	0.0280	0.67
				－14.00～－17.50	充填土	0.0114	3.50
				－17.50～－17.87	V	0.0780	0.37
				平均	充填土	0.0131	—
5	－18.00～－19.03	花岗岩	V/IV	－17.87～－19.00	V	0.1035	1.13
6	－19.03～－21.20	花岗岩	IV/III	－19.00～－19.03	IV	0.2715	0.03
				－19.03～－21.00	V	0.0385	1.97
				－21.00～－21.20	充填土	0.0062	0.20
				－21.20～－21.33	V	0.0510	0.13
				平均	V	0.0651	—
7	－21.20～－21.70	花岗岩岩脉	IV	－21.33～－21.68	IV	0.2995	0.35
8	－21.70～－31.85	花岗岩	II	－21.68～－21.70	IV	0.3468	0.02
				－21.70～－23.00	III	0.7186	1.30
				－23.00～－23.50	IV	0.3160	0.50
				－23.50～－25.50	III	0.9402	2.00
				－25.50～－26.00	IV	0.4144	0.50
				－26.00～－27.00	III	1.3013	1.00
				－27.00～－27.50	V	0.0766	0.50
				－27.50～－29.50	III	0.9924	2.00
				－29.50～－30.00	II	2.4935	0.50
				－30.00～－30.50	III	0.8210	0.50
				－30.50～－31.50	II	2.2855	1.00
				－31.50～－31.87	III	1.223	0.37
				平均	III	1.0042	—

2）在序号 4 及 5 的地层中，金刚石钻进比功对风化程度的分级结果与岩芯地质的分级结果基本一致。根据钻孔岩芯风化程度的分级表明，地层深度－7.10～

－18.00 m范围为全风化花岗岩(V)；而根据金刚石钻进比功进行的分级表明，此层为充填土与全风化花岗岩的交错层，各层厚度不等，钻进比功均值为 0.0131 kN·m·cm^{-3}，此层总体的力学分层属于充填土。在地层深度－18.00～－19.03 m范围，岩芯地质的分级结果为全风化(V)至强风化(IV)花岗岩，金刚石钻进比功对此的分级为 V 级。显然，根据金刚石钻进比功对岩石风化程度的分级结果与根据岩芯地质对风化程度的分级结果接近。

3) 在序号 6 及 8 的地层中，金刚石钻进比功与钻孔岩芯进行的分级结果存在差异。其中，在地层深度－19.03～－21.20 m 范围，岩芯地质钻孔所揭露的地层为强风化至中等风化(IV/III)的花岗岩，而根据金刚石钻进比功对此地层风化程度进行的分级结果表明，此层由强风化层(IV)、全风化层(V)及充填土构成，钻进比功均值为 0.0651 kN·m·cm^{-3}，总体为全风化花岗岩(V)。在地层深度－21.70～－31.85 m 范围，岩芯地质钻孔所揭露的地层为微风化(II)花岗岩，而根据金刚石钻进比功进行分级表明，此层由多层 IV 至 II 级风化程度的花岗岩构成，各层厚度不等，随着深度的增大，风化程度逐渐减弱，但总体的风化程度为 III 级，金刚石钻进比功均值为 1.0042 kN·m·cm^{-3}。显然，在以上地层中，以钻孔岩芯进行的风化程度分级结果与以金刚石钻进比功获得的分级结果之间存在一定的差异。

从以上分析可知，在此地层中，钻孔岩芯对风化程度进行分类判别的结果与金刚石钻进比功进行分类判别的结果比较，其吻合率为 75.00%，与普通风化花岗岩地层中 76.92%略低。充填土风化花岗岩地层结构与普通风化花岗岩地层的结构比较接近，但前者较普通风化花岗岩地层复杂。

与普通风化花岗岩地层中相似，在钻孔岩芯分级中，由于人工对岩石风化后色泽及破碎程度的细小变化很难进行定量的判别，很容易将风化程度接近的地层划归为同一类地层。而金刚石钻进比功属能量指标，对地层进行力学分层时可以实现数量化分级，且分级精度可以根据工程要求进行设置。因此，采用金刚石钻进比功进行的分级比以钻孔岩芯的色泽及破碎程度进行的分级更精确。

8.5.4 复杂风化花岗岩地层的判别分类

根据金刚石钻进比功对复杂地层的风化程度进行聚类分级，结果如表 8.10 所示。从表中钻孔岩芯的分级结果可知，此地层主要为全风化(V)、强风化(IV)及中等风化(III)交错的花岗岩地层，地层结构非常复杂，没有规律可循。对于这种地层，根据钻孔岩芯进行人工分级难度高、误差大，很不精确。采用金刚石钻进比功进行聚类分级，则克服了这一不足。

表 8.10　复杂风化花岗岩聚类分级结果

Table 8.10　The results of clustering classification for intricate weathered granite

地层序号	根据钻孔岩芯进行的风化程度分级			根据金刚石钻进比功对风化程度进行的聚类分级			识别精度
	录孔深度/m	地层岩性	风化分级	监测深度/m	风化分级	比功均值/(kN·m·cm^{-3})	厚度/m
1	0.00～－11.65	花岗岩	V	0.00～－9.00	充填土	0.0052	9.00
				－9.00～－11.65	V	0.0272	2.65
				平均	充填土	0.0112	—
2	－11.65～－12.46	花岗岩	IV/III	－11.65～－12.00	V	0.0589	0.35
3	－12.46～－12.88	花岗岩	III	－12.00～－12.46	V	0.0476	0.46
				－12.46～－12.88	IV	0.1860	0.42
				平均	IV	0.1398	—
4	－12.88～－13.00	花岗岩	IV/III	－12.88～－13.00	IV	0.1220	0.12
5	－13.00～－14.00	花岗岩	III	－13.00～－14.00	IV	0.1458	1.00
6	－14.00～－14.01	花岗岩	III	－14.00～－14.01	V	0.0584	0.01
7	－14.01～－14.20	花岗岩	IV/III	－14.01～－14.32	IV	0.2402	0.31
8	－14.20～－15.78	花岗岩	III	－14.32～－16.42	IV	0.2177	2.10
9	－15.78～－17.70	花岗岩	IV/III	－16.42～－16.50	II	2.0050	0.08
				－16.50～－17.50	IV	0.3063	1.00
				－17.50～－17.55	V	0.0658	0.05
				平均	III	0.6349	—
10	－17.70～－18.00	花岗岩	IV	－17.55～－18.00	V	0.0821	0.45
11	－18.00～－19.00	花岗岩	IV/III	－18.00～－19.00	IV	0.3989	1.00
12	－19.00～－22.52	花岗岩岩脉	III	－19.00～－22.03	IV	0.3246	3.03
13	－22.52～－23.30	花岗岩	IV/III	－22.03～－22.91	IV	0.2014	0.88
14	－23.30～－25.95	花岗岩	III	－22.91～－24.00	IV	0.2715	1.09
				－24.00～－24.50	III	0.8620	0.50
				－24.50～－24.93	IV	0.2413	0.43
				平均	IV	0.3516	—
15	－25.95～－26.18	花岗岩	IV/III	－24.93～－26.18	IV	0.2981	1.25
16	－26.18～－27.00	花岗岩	III	－26.18～－27.00	IV	0.3423	0.82
17	－27.00～－28.60	花岗岩	IV/III	－27.00～－28.13	IV	0.2003	1.13
18	－28.60～－29.79	花岗岩	III	－28.13～－28.60	IV	0.2512	0.47
				－28.60～－29.79	III	0.9919	1.19
				－29.79～－29.97	IV	0.4938	0.18
				平均	III	0.5930	—
19	－29.79～－30.10	花岗岩	IV/III	－29.97～－30.10	IV	0.2311	0.13
20	－30.10～－36.90	花岗岩	III/II	－30.10～－31.00	IV	0.2761	0.90
				－31.00～－31.50	III	0.6499	0.50
				－31.50～－32.59	IV	0.2810	1.09
				－32.59～－32.60	III	0.9798	0.01
				－32.60～－35.12	IV	0.2815	2.52
				平均	IV	0.3497	—

续表

地层序号	根据钻孔岩芯进行的风化程度分级			根据金刚石钻进比功对风化程度进行的聚类分级			识别精度
	录孔深度/m	地层岩性	风化分级	监测深度/m	风化分级	比功均值/(kN·m·cm^{-3})	厚度/m
21	−36.90～−37.32	花岗岩	IV/III	−35.12～−35.50	III	0.5512	0.38
				−35.50～−37.50	IV	0.2476	2.00
				−37.50～−38.00	V	0.0996	0.50
				−38.00～−38.21	IV	0.2119	0.21
				平均	IV	0.2626	—
22	−37.32～−39.74	花岗岩	III	−38.21～−39.00	IV	0.2357	0.79
				−39.00～−39.65	III	0.6714	0.65
				平均	IV	0.4535	—
23	−39.74～−41.39	花岗岩	IV/III	−39.65～−40.50	V	0.0620	0.85
				−40.50～−41.27	IV	0.3216	0.77
				平均	IV	0.2383	—
24	−41.39～−41.65	花岗岩	V/IV	−41.27～−41.82	IV	0.2311	0.55
25	−41.65～−44.80	花岗岩	IV/III	−41.82～−43.93	IV	0.4250	2.11
26	−44.80～−45.30	花岗岩	V/IV	−43.93～−45.30	IV	0.2234	1.37
27	−45.30～−49.25	花岗岩	IV/III	−45.30～−46.50	V	0.0804	1.20
				−46.50～−47.00	III	0.8491	0.50
				−47.00～−47.50	IV	0.1080	0.50
				−47.50～−48.00	V	0.0793	0.50
				−48.00～−49.00	IV	0.3333	1.00
				−49.00～−49.46	V	0.0772	0.46
				平均	IV	0.1981	—
28	−49.25～−52.32	花岗岩	V	−49.46～−52.34	V	0.0732	2.88
29	−52.32～−53.75	花岗岩	IV	−52.34～−53.00	V	0.0517	0.66
30	−53.75～−53.83	花岗岩	V	−53.00～−53.83	V	0.0716	0.83
31	−53.83～−54.92	花岗岩	IV/III	−53.83～−55.14	IV	0.2585	1.31

从表 8.10 可知，在按钻孔岩芯分级为全风化(V)的 3 个地层中，序号 28 及 30 的地层与以金刚石钻进比功进行聚类分级的结果一致，而序号 1 的地层(深度 0.00～−11.65 m)在设置的识别精度下可细分为充填土层和强风化层(V)，此地层钻进比功均值为 0.0112 kN·m·cm^{-3}，按力学分层，此地层应属于充填土。

在按钻孔岩芯分级为全风化与强风化之间(V/ IV)的 2 个地层中，序号 24 及 26 地层中的金刚石钻进比功分别为 0.2311 kN·m·cm^{-3}及 0.2234 kN·m·cm^{-3}，按钻进比功进行聚类分级，均为强风化花岗岩地层(IV)，两种方法的分级结果接近。

在按钻孔岩芯分级为强风化(IV)的 2 个地层中，序号 10 及 29 地层中的金刚石钻进比功分别为 0.0821 kN·m·cm^{-3}及 0.0517 kN·m·cm^{-3}，按钻进比功进行聚类分级，均属于全风化层(V)。尽管两种方法之间的结果存在差异，但属于邻近级，结果比较接近。

强风化至中等风化之间(IV/III)的地层是此场址中的主要地层，按钻孔岩芯分

级，在钻孔岩芯所判别的 31 个地层中，IV/III 占了 14 个，为 45%。其中，按金刚石钻进比功进行聚类分析，在序号 2 的地层中，钻进比功均值为 0.0589 kN·m·cm^{-3}，应属于全风化(V)地层。在序号 4、7、11、13、15、17、19、25 及 31 的地层中，金刚石钻进比功均值最小为 0.1220 kN·m·cm^{-3}，最大为 0.4250 kN·m·cm^{-3}，按进比功分级，这些地层均属于强风化层(IV)，而且多数与中等风化层(III)交错出现，使得复杂结构中呈现出某些层次性特点。在序号 9、21、23 及 27 的地层中，在设定的识别精度下，这些地层结构均可按金刚石钻进比功进行细分，其次级结构可参见表中相应内容。在这些地层中，金刚石钻进比功均值分别为 0.6349 kN·m·cm^{-3}、0.2626 kN·m·cm^{-3}、0.2383 kN·m·cm^{-3}及 0.1918 kN·m·cm^{-3}。按钻进比功进行聚类分级，地层风化程度除序号 9 为 III 级外，其他均为 IV 级。由此可见，在钻孔岩芯划分为 IV/III 级的这些地层，除序 2 地层差异较大外，在其他地层中，由金刚石钻进比功进行的风化程度分级均为 III 或 IV 级，两种方法分级的总体结果很接近。

中等风化程度(III)的地层是此场址中的第二大类地层，按岩芯钻孔分级，III 类地层有 9 个，占 29%。其中，序号 18 地层，深度范围－28.60～－29.79 m，按金刚石钻进比功进行聚类分级，此层由 IV、III 及 IV 三个次级结构组成，但总体的钻进比功均值为 0.5930 kN·m·cm^{-3}，属于 III 级风化地层。两种方法分级的结果相同。根据金刚石钻进比功的聚类分级结果，序号 3、5、8、12、14、16 及 22 地层中，金刚石钻进比功均值的最小值为 0.1398 kN·m·cm^{-3}，最大值为 0.4535 kN·m·cm^{-3}，均属风化 IV 级地层。而且，从表 8.10 中结果可知，这些地层中的钻进比功均值随着深度增大而增大，进一步说明风化程度随深度增大而减弱的一般规律。此外，在序号为 6 的地层中，金刚石钻进比功均值仅为 0.0584 kN·m·cm^{-3}，属风化 V 级。这与钻孔岩芯的分级结果有较大的差异，但此层很薄，厚度只有 0.01 m。然而，从总体上讲，在此 III 级风化程度的 9 个地层中，两种分级方法完全吻合与基本吻合的比率达 88.89%，分级结果接近。

在此场址的钻探深度范围内，根据钻孔岩芯判别为中等风化至微风化(III/II)的地层只有一段，序号 20，深度－0.10～－36.90 m，厚 6.80 m。按金刚石钻进比功进行聚类分级，此层可细分为多个次地层。这些地层中钻进比功的最小值为 0.2810 kN·m·cm^{-3}，最大值为 0.9798 kN·m·cm^{-3}，属强风化层(IV)及中等风化层(III)，此层总体的钻进比功均值为 0.3497 kN·m·cm^{-3}，按钻进比功聚类分级应属于强风化层(IV)。可见，此地层钻孔岩芯分级结果与钻进比功分级结果之间存在较大的差异。

从上可知，采用钻孔岩芯对风化程度进行分级，往往会忽略一些厚度较小的地层结构，而且只能定性地判别，因而分级比较粗略。在复杂地层中，钻孔岩芯分级结果与金刚石钻进比功的分级结果比较，其吻合率仅为 61.29%。而在普通风化花岗岩地层及充填土风化花岗岩地层中，岩芯分级结果与钻进比功分级结果的吻

合率分别为 76.92%及 75.00%。可见，随着地层结构复杂性的增高，岩芯破碎程度的增大，钻孔岩芯判别的精度将下降。

参 考 文 献

[1] Tou J T. On feature encoding in picture processing by computer[C]//Proceedings of the 7th Annual Allerton Conference Circuit and System Theory, 1969: 1～18.

[2] Jain A K, Hong L, Bolle R. Online fingerprint verification [J]. I EEE Trans Pattern and Machine Intel., 1997, 19(4): 302～314.

[3] 张迪，傅德胜. 一种基于模糊判别的指纹识别算法[J]. 南京气象学院学报，2002，25(5)：702～705.

[4] Ranade S, Rosenfeld A. Point pattern matching by relaxation[J]. Patern Recognition, 1980, 12: 269～275.

[5] Skea D, Barrodale I, Kuwahara R, et al. A control point matching algorithm [J]. Pattern Recognition, 1993, 26 (2): 269～276.

[6] Hrechak A K, Mchugh J A. Automated fingerprint recognition using structural matching [J]. Pattern Recognition, 1990, 23 (8): 893～904.

[7] Nicolau C, Enrique C, Giuseppe F, et al. Hardware-software codesign of a fingerprint identification algorithm[C]. Audio-and Video-Based Biometric Person Authentication: 5th International Conference, AVBPA 2005. Proceedings, 2005: 683～692.

[8] Yamada M, Kodate A, Tominaga H. A proposal of description method of fingerprint structure and identification algorithm using geometric characteristics[J]. Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers D-II, 1993, J76D-II (9):2004～2014.

[9] 解梅，佟异. 基于脊线采样的指纹识别算法[J]. 电子学报，2003，31(10)：1503～1505.

[10] 张勇，冯广斌，闫鹏程，等. 基于光学联合变换相关的指纹识别算法研究[J]. 激光与红外，2006，36(10)：998～1000.

[11] 张迪，傅德胜. 一种基于模糊判别的指纹识别算法[J]. 南京气象学院学报，2002，25(5)：702～705.

[12] Chang Shih-hsu, Chen Fang-hsuan, Hsu Wen-hsing. Fast algorithm for point pattern matching, invariant to translations, rotations and scale changes [J]. Pattern Recognition, 1997, 30: 311～316.

[13] 田捷，何余良，陈宏，等. 一种基于相似度聚类方法的指纹识别算法[J]. 中国科学 E 辑：信息科学，2005，35(2)：186～199.

[14] Vinod V V, Ghose S. Point matching using a symmetric neural networks [J]. Pattern Recognition, 1993, 26 (8): 1207～1214.

[15] Ozbayoglu Murat A, Dagli Cihan H. Unsupervised hierarchial fingerprint matching [C]// Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Neural Networks. Houston, USA, 1997:1439～1442.

[16] 李林青，郝玉. 基于改进 CPN 的指纹识别算法[J]. 计算机仿真，2006，23(11)：198～201.

[17] 王永仲，张勇，冯广斌，等. BP 神经网络在光学相关器相关峰识别中的应用[J]. 应用光学，2006，27(1)：15～18.

[18] 罗菁，修春波. 一种基于神经网络匹配的指纹识别算法[J]. 人工智能，2005，21(12)：191～193.

[19] 黄席樾，马笑潇，沈志熙，等. 基于遗传算法的神经网络指纹自动分类[J]. 重庆大学学报，2001,24(1)：74～77.

[20] Ansari N, Chen M, Hou Edwin S H. Point pattern matching by a genetic algorithm[C]// IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference) Power Electronics Emerging Technologies. 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Los Alamitos USA: IEEE Los Alamitos CA USA, 1990: 1233～1238.

[21] 金升平，陈定方. 指纹细节匹配的遗传算法[J]. 交通与计算机，2002，20(2)：30～32.

[22] Wetcharaporn W, Chaiyaratana N, Huvanandana S. Enhancement of an automatic fingerprint identification system using a genetic algorithm and genctic programming[C]// Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. 10th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2006. Proceedings, 2006: 368～379.

[23] 漆远，田捷，邓翔. 基于遗传算法的指纹图像匹配算法及应用[J]. 软件学报，2000，11(4)：488～493.

[24] 蒋景英，胡晓东，徐可欣，等. 结合遗传算法与方向图法的指纹图像分割[J]. 工程图学学报，2002，2：76～81.

[25] 陈闽军，程翼宇. 基于遗传算法的色谱指纹峰配对识别[J]. 分析化学研究报告，2003，31(5)：513～517.

[26] 杨光正，吴岷，张晓莉. 模式识别[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2001.

[27] Andrew R, Webb. Statistical Pattern Recognition [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

[28] Marques de sa J P. 模式识别的原理、方法与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2002.