Y1210788

分类号_____ 学校代码：10616

UDC _____ 密级_____ 学号：_____

成都理工大学博士学位论文

复杂地层潜孔锤跟管钻进技术研究

楼 日 新

指导教师姓名及职称 黄润秋 教授

申请学位级别 博 士 专业名称 地质工程

论文提交日期 2007.10 论文答辩日期 2007.12

学位授予单位和日期 成都理工大学（ 年 月）

答辩委员会主席 _____

评阅人 _____

2007 年 11 月

复杂地层潜孔锤跟管钻进技术研究

作者简介： 楼日新，男，1967 年 10 月出生，2002 年 9 月师从于成都理工大学黄润秋教授，于 2007 年 11 月毕业于成都理工大学地质工程专业。

摘 要

复杂地层的钻进与取样问题一直是地矿勘探、工程勘察、岩土工程施工中的一个技术难题。由于复杂地层结构松散、无规律包裹砂卵砾石、砾石大小不均、换层频繁、软硬悬殊、颗粒级配悬殊等，存在钻进、保护孔壁、取心这三大难题，常规的钻探技术难以满足施工要求。复杂地层钻探技术先后经历了锤击跟管取芯钻进和金刚石取芯钻进两个重要阶段。现有的砂卵石层 SM 胶金刚石钻进取样技术解决了一些稍复杂地层的钻进与取样问题，但至今，仍无法适应较复杂的地层，钻孔质量和钻进效率仍处于低水平状态。

论文主要从复杂地层钻探的适应性、钻进方式、钻进冲洗介质、钻进取心工具等方面开展研究工作，对于不同类型的复杂地层，提出了相适应的钻进与取样新技术、新方法。通过研究取得了以下主要成果和结论：

（1）采用应力波理论，分析了潜孔锤跟管钻进碎岩过程及影响因素。对潜孔锤跟管钻进过程中的跟管钻压、套管自重、潜孔锤冲击功、跟管钻进速度、跟管深度、扩孔口径和钻进中的钻压值进行了理论推导，得出：

① 潜孔锤跟管钻进速度取决于潜孔锤的冲击功、岩石的单位体积破碎功和凿岩直径三个因素；

② 在简单和复杂工况条件下的最大跟管深度l_0、l_{max}的计算公式，包括下向垂直孔和水平孔时的最大跟管深度的计算公式；

③ 分析了跟管钻进钻压与机械钻速的相互关系，提出了跟管钻进的钻压以每厘米钻头直径 0.5~0.9kN 为宜。

（2）国内外现有的空气潜孔锤跟管钻进技术主要应用于比较松散、均质、架空不严重及中等可钻性地层，均属全断面跟管钻进，效率虽高，但不能取芯。本文将空气潜孔锤跟管钻进技术和岩芯钻探技术结合，利用前者钻进速度快和护壁效果好、后者具备采集岩芯能力的技术优势，开发了新型的钻进与取样技术方法——空气潜孔锤取芯跟管钻进技术。该技术的主要特点有：

① 钻具结构采取同步、同心跟管钻进原理；采用中心钻头（唇面）超前套管钻头的阶梯钻进原理；采用双层管和三层管两种结构方法，可以满足的取芯要求；

② 钻具采用的外管和岩心管均为地质钻探以及石油钻井的标准管材系列，市场货源充足，互换性好；

③ 空气潜孔锤取芯跟管钻进可以取得能够客观反映地层情况（层位、包裹情况等特性）岩心；

④ 发挥潜孔锤钻进效率高的技术优势，采取取芯和跟管一次完成，钻进效率可以大幅度提高；

此外，进行了取芯钻头和套管钻头的研制；研究制订了实用、操作性强的空气潜孔锤取芯跟管钻进技术规程。该技术配套采用当前国内地质勘察单位常用的空压机、冲击器、钻杆等，具有通用性和适应性。该技术适合于50m以内浅部复杂地层，特别是II类复杂地层钻探取芯。

（3）在原有的GJ型扩孔张敛式跟管钻具的基础上，研究开发了冲击式金刚石取芯跟管钻进技术。该技术特点为：

① 组合张敛式扩孔钻头对称分布并呈锥形；

② 钻具承压和承扭能力足以满足常规钻进要求；

③ 两级钻头的同轴度好，导向和扶正相辅相成，不会造成钻孔弯曲；

④ 泄漏通道的设置在满足扩孔钻头冷却和冲刷要求的同时，不会造成孔底钻头缺少必要的冷却液体；

⑤ 在悬挂腔设计了调节圈，通过加减调节圈确保悬挂机构承受钻具重力，消除了收敛爪异常受力情况；

⑥ 设计了排沙系统，避免颗粒物质滞留钻具内部，确保钻具张敛性能的可靠性。

冲击式金刚石取芯跟管钻进方法适合在复杂地层钻探。该方法可减少孔内事故，降低材料消耗，提高钻进效率和钻探工程质量；简化钻孔结构；可为处理孔内事故提供条件。

（4）国内外现有的气动潜孔锤跟管钻进技术存在四个方面的问题：第一，钻具的规格、系列不完善；第二，钻具设计不完善；第三，钻具的制造技术如材料选择、热处理工艺不能满足要求；第四，设备配套、施工操作规程亟待提高。

小湾电站锚固和支护工程地形陡峻、地层情况较为复杂。锚固施工成孔困难的地层主要有崩塌堆积体和受构造、风化卸荷作用影响而破碎的基岩。针对小湾水电站的这一地层特点和原有技术存在的问题，设计开发出了二种类型的气动潜孔锤偏心跟管钻具。这两种偏心跟管钻具的特点有：

① 依靠中心钻头和偏心扩孔钻头实现二级破岩、设计合理的排渣系统使排渣顺畅以及与具有足够冲击功的冲击器相适配等；

② 具有中心钻头起导向作用的偏心跟管钻具结构对于地层复杂的小湾电站更有利于孔斜的预防，从而更大限度地满足工程设计的要求；

③ 钻具在结构上设计用键来传递扭矩，加之选用了高强度的材料，采用了特殊的热处理工艺，合理的固齿工艺，确保了钻具寿命；

④ 联接销系统为相互自锁的结构，保证了中心钻头与导正器之间连接具有良好的可靠性，解除了掉钻之忧。

同时，针对工程特点提出了钻机、空压机、潜孔锤合理选择原则和配套型号；对钻机进行了合理的改进；编制出了具有施工指导意义的潜孔锤跟管钻进工艺规范。

（5）套管的起拔速度直接影响着锚索的施工效率。针对工程实际，研制了起拔力为650KN的系列液压拔套管设备，其主要技术特点有：

① 系列液压拔管机结构简单，体积小、重量轻，装拆、操作方便；

② 操作台与液压泵站分开设置，适合于搬运、迁移困难的边坡工程使用；

③ 充分考虑了在陡坡上套管起拔的实际问题，底座和油缸采用铰接；

④ 一台设备可起拔多种规格的套管，形成系列。

（6）潜孔锤跟管钻进技术在二郎山龙胆溪滑坡整治堆积体工程、黄金坪电站坝基覆盖层钻进成孔与灌浆试验工程、雅砻江官地水电站左岸边坡锚索工程等近十个工程的复杂地层钻进成孔和取样中应用了研制的偏心跟管钻具、液压拔管机和工艺操作规程，取得了好的钻进成孔效率和取样质量。在一定程度上解决了深厚覆盖层、卵石层、堆积体成孔与取样技术难题，有创新性。

关键词：复杂地层；钻探技术；空气潜孔锤；跟管钻进；液动冲击器

Research on the Technology of DTH Hammer Drilling with Casing for Complex Stratum

Introduction of the Author: Lou Rixin, male, born in October, 1967 and granted the master degree by Chengdu University of Technology, has been under the instruction of his tutor, Professor Huang Runqiu.

Abstract

The drilling and coring for complex stratum has always been the main and difficult problem in the geological and mining exploration, the engineering of exploration, and the geotechnical engineering. Since the complex formation of sedimentary layers generally contain clay, flow sand, egg stones, gravel, big stones, it posed difficulties and problems to the drilling, hole-wall-protecting, and coring of the stratum, which can not be simply solved by any usual drilling technology. The hydraulic and hydroelectric engineering at home has undergone two phases, the down-the-hole hammer core-drilling with casing and the diamond core drilling (the two significant breakthroughs in technology). In particular, the development and broad application of SM-gel diamond core drilling for the gravel layer has fundamentally transformed the drilling technology in this field, for it has solved to a certain degree some of the drilling and coring problems. However, till now, the SM gel diamond core drilling can not be applied to the complex stratum. As a result, the quality and efficiency of drilling remain at a very low level.

Through the analysis and research on the drilling applicability into the complex stratum, the drilling techniques, the drilling fluid, the coring tools, etc., this paper has proposed the correspondingly new drilling methods and technology for different stratum, aiming to promote the drilling technology as such. Therefore, some major findings and conclusions are made as follows:

(1) Heavily drawing on the stress wave theory, the paper describes and illustrates the down-the-hole hammer drilling process, analyzing especially the drilling process of rock-breaking with DTH hammer and the relative factors. With the eccentric drilling as the case in study, the paper has also generated a theoretical model for the analysis of pipe drilling pressure, case weight, percussive capacity, pipe drilling speed and depth, reaming gauge, the value of pipe drilling pressure in the process, and made the following findings:

① the pipe drilling speed is determined by the percussive power of DTH hammer, rock-breaking power per volume, and the diameter of aperture;

② in terms of different drilling conditions, the paper has proposed, respectively for simple operating mode and complicated operating mode, the formula to calculate the maximum casing depth, namely l_0 and l_{max}, of both vertical and horizontal holes;

③ based on the analysis of the relation between pipe drilling pressure and drilling speed, the paper has concluded that the most appropriate pipe drilling pressure is 0.5~0.9kN per centimeter of the casing bit diameter.

(2) The pipe drilling with air-powered DTH hammer is with limitation applied to the shallow, loose and even-grained formation with few aerial strata, which is of medium drilling characters. Though with high efficiency, it is simply a full-section drilling with casing, and not capable of coring. With the integration of air-powered DTH hammer drilling and core drilling, this research has developed a new drilling and coring method—the technology of air-powered DTH hammer and core drilling with casing, by combining the high drilling speed and efficient hole-wall protection of the former with the core gathering capacity of the latter. The drilling equipment is mainly characterized by the following features:

① the drill tool is structured in the way of drilling with simultaneous and concentric case; the equipment follows the mechanism of stage drilling and employs the pre-casing bit in the form of centre bit (profile); to meet the requirements of coring in either gravel or loose strata, the drilling tool is in double-piped making and tri-piped making, respectively;

② the outer and core barrels are in rich supply and available in market, since they are general equipment for geological and oil drilling;

③ the core extracted by air-powered DTH hammer and core drilling can illustrate the factual state and characteristics of the formation (its position, its composition, etc.);

④ owing to the use of highly-efficient DTH hammer drilling, coring and casing are completed simultaneously to achieve the high drilling efficiency;

Besides, the coring bit in pipe drilling and casing bit have also been developed in the research; and practical and feasible regulations have been made for the air-powered DTH hammer and core drilling with casing. As general apparatus for geological exploration at home, such as air compressor, percussion tool, drill, the drilling equipment employed in the technology are easily available. Moreover, this technology is better applied to the drilling into shallow complex formation within 50m, especially to the core drilling into the II type complex stratum.

(3) Based on pipe drilling with GJ reamer, the research has innovated the technology of percussive diamond core drilling with casing, which has the following characteristics:

① the expansive-contracted reamer is cone-like and symmetrically structured;

② the drilling apparatus are able to meet the demand of conventional drilling on the bearing of pressure and twist;

③ the drilling bit and coring bit, in concentric pattern, are combined to function well in both orientation and adjustment in direction, and can avoid the hole deviation;

④ the design of drainage outlet contributes to the cooling and flushing of reamer without reducing the necessary cooling liquid at hole bottom.

⑤ the adjustable rings in the hanging cavity can not only help the contraction of reamer, but also guarantee the load-bearing capacity of hanging apparatus by increasing or decreasing the rings, so as to eliminate the abnormal stress on the claw.

⑥ the sand flushing system can prevent grainy stuff from sticking to the drilling tool, so as to guarantee the expansion and contraction of core bit.

The technology of percussive diamond core drilling with casing has been well applied to the drilling into complex stratum to achieve remarkably positive effects in technology and economics. And this method can reduce the drilling accident and the consumption of drilling material so as to enhance the efficiency and quality of drilling; it also simplify the hole structure and makes it possible to solve the backfire accident.

(4) At home and abroad, there still remain four problems in the technology of air-powered DTH hammer drilling with casing: first, the gauge of drilling tool is not uniformed and the series of drilling products are not complete; second, there are obvious defaults in the design of drilling tool; third, the manufacturing technique of drilling tool, such as the selection of raw material and the heat treatment process, can not live up to the requirement; four, the production of complete set of drilling equipment as well as the operating regulation for the equipment need improving urgently.

Due to the characters of the complex stratum in Xiao Wan hydropower station, the high-slope anchoring and reinforcement projects in the high slope bank have encountered the drilling difficulty mainly in the collapsed formation deposits and the foundation bed broken under the impact of geological formation and aeolian erosion. To solve the technological problems in the complex formation, this research has innovated two types of air-powered DTH hammer drilling equipment, The two types of drilling equipment have the following properties:

① the use of both centre bit and eccentric reaming bit forms the two-stage rock breaking; the design of slag flushing system ensures sufficient percussion impact of the percussive drilling tool;

② the eccentric drilling with casing that employs the centre bit can better prevent the hole deviation;

③ the drilling equipment has high endurance, due to the design of key connection to

deliver the torque, the selection of high strength material and the special heat treatment in manufacturing the drilling tool, as well as the proper techniques of fixing the gear tooth engagement;

④ the keys are interlocking devices that strongly and reliably attach the centre bit to the adjuster to avoid the risks of bit losing.

At the same time, in accordance with the drilling characters in Xiao Wan, the selection of the drilling tool, the air compressor, and the DTH hammer has followed the principle of mutual adaptation and matching, and the innovation of drilling tool has also been made. Moreover, the operation specifications and regulations for DTH hammer drilling with casing have also been proposed.

(5) Since the pulling speed has direct effects on the anchoring efficiency, the research has developed a series of hydraulic pull casing that has the pulling force of 65t. The technical features are as follows:

① the series of pull casing are simple, small, and light, easy to be assembled, dissembled, and operated;

② the separation of operating board from the hydraulic pump unit is better applicable to the high slope drilling projects suffering from difficult delivering and shifting;

③ for the sake of pull casing in high slope, the foundation of operating board and the petrol cylinder have been joined on hinges;

④ each device can pull out a series of casing pipes of different gauges.

(6) The technology of DTH hammer drilling with casing has been successfully applied to the drilling and coring into the complex stratum in more than ten projects, such as the project of slope rectification and anchoring in the Sichuan-Tibet Highway at Longdan River of Mt. Erlang, the cover curtain grouting test of the foundation in Gold Ping Power Station, the project of pre-stressing anchoring for the cable platform on the slope of the left bank of the Guandi Power Station of Yalong River. The application of the innovated eccentric drilling tool with casing, the hydraulic pull casing device, and the operation specifics and regulations has been proved efficient in both drilling and coring. The new drilling technology has been able to solve the drilling problems to a certain extent in the complex stratum with deep covering, cobble and pebble layers, and formation deposits.

Key word: complex stratum; drilling technology; air-powered DTH hammer; pipe drilling; hydraulic percussive drill

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 成都理工大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者导师签名：

学位论文作者签名：

2007年 12月 19日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 成都理工大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 成都理工大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

2007年 12 月 19 日

第1章 绪论

复杂地层钻进与取样问题一直是地矿勘探、工程勘察和工程施工中的主要技术难题。所谓复杂地层，是指难钻地层，即是指钻进、护孔、取心、控制孔斜等方面困难的地层。复杂地层钻与取样进技术水平直接关系到工程的成本、安全性、经济效益，解决好复杂地层钻进与取样问题一直是人们感兴趣而又富有挑战性的难题，而潜孔锤取芯跟管钻进技术，是解决复杂地层钻进与取样问题的最有效方法之一。

1.1 选题依据及研究意义

在钻探工作中，复杂地层按地层形成过程的不同可分为两类：由构造运动所形成的复杂地层，即由地质构造运动所产生的压力、张力、剪力等作用，使岩层产生节理、裂隙、裂缝、断层和片理，特别是硬或中硬以上的脆性岩石受构造力的剧烈破坏形成复杂地层。这类地层往往位于覆盖层下部，称为Ⅰ类地层。在这类地层中钻探，会遇到保护孔壁[1]、取心等困难问题[2][3][4]。由外力地质作用所形成的复杂地层，即风化层、河流冲积层、洪积层，风积层。岩层经风化作用变为岩性较松散、胶结不良的风化层，而冲积、洪积、风积作用形成的各种沉积层一般含有粘土、流砂、卵石、砾石、漂石成为复杂的地层。这类地层往往称为覆盖层，这里称为Ⅱ类地层。Ⅱ类地层包括粘土层、淤泥层、砂层、砂卵石地层和漂卵石地层。在这类地层中钻探，会遇到钻进、保护孔壁、取心等困难问题。

钻探工程和采用钻探方法进行施工的工程，称为岩土钻掘工程。岩土钻掘工程已广泛应用于：

① 矿产资源勘探和部分矿产的开采。② 水文地质勘探和水井钻。③ 工程地质勘查和生态，环境研究。④ 地质灾害的防治与环境治理；⑤ 工民建和道路桥梁的基础工程。⑥ 海洋研究及海运码头工程。⑦ 国防工程。⑧ 地球岩石圈、水圈的科学研究。

面向新的世纪，随着相关学科的交叉和高新技术的引入，岩土钻掘工程将展现出更强的生命力和适应性，岩土钻掘工程的工作量逐渐增加。复杂地层钻探问题是岩土钻掘工程中的关键性的难题，解决好复杂地层钻探问题有利于提高工程的经济效益和社会效益。

钻探工程技术发展到今天，它的理论体系还不够完善，对钻探生产经验有一定程度的依赖性，有待于进一步提高科学钻探技术水平。解决好复杂地层钻探问题有利于完善和发展钻探工程理论和技术水平。

本人一直从事复杂地层钻探及其相关的工作，负责或参加了国家和部“七·五”、

“八·五”、“九·五”、“十·五”与复杂地层钻探技术相关的科研课题，积累了一些经验，取得了一些成果。本研究课题既有对前面工作和科研的系统归纳和总结，也有对复杂地层钻探技术的进一步研究，主要从潜孔锤跟管钻具、潜孔锤跟管钻进工艺等方面开展研究工作，以解决复杂地层钻探技术难题。

1.2 国内外研究概况、水平及发展趋势

在复杂地层中钻进，主要会遇到钻进、保护孔壁、取心等困难问题。虽然目前国内外钻进技术可以解决一些复杂地层钻进问题。但是，由于复杂地层的复杂程度不同；对于取心（样）要求不同，目前国内外钻进技术还难于达到钻进的目的要求。

在保护孔壁方面：①国内外覆盖层钻进中，对于厚度小于20—50米的覆盖层，一般采用泥浆护壁快速钻穿覆盖层，然后下入套管隔离覆盖层；对于比较厚的覆盖层采用多层套管的钻孔结构，逐级钻进并下入套管，最终靠多层套管隔离保护孔壁。存在的问题是钻孔结构复杂；套管数量多，成本也会提高。国外有采用同径跟管取芯钻进技术，虽有优越性，但还存在钻具使用寿命和适用范围有限不足。②采用优质泥浆与多功能无固相冲洗液护壁堵漏。③采用水泥护壁堵漏，在漏失轻微、坍塌掉块严重的地层中，采用水泥护壁是行之有效的方法。对于地层比较单一、地层厚度不大和岩心质量要求不高的复杂地层钻探，钻探难度相对不大，比较容易满足地质勘探要求。而对于水利水电工程勘察岩芯钻探和工程施工钻，由于覆盖层厚、地层复杂，上述技术难以满足要求。

卵砾石覆盖层由于地层松散、无规律包裹砂卵砾石、砾石大小不均、换层频繁且软硬悬特殊和要求岩石采取率高（80%）等，矿产资源钻探技术难以满足施工要求。国内水利水电勘察等部门的多家单位对覆盖层钻探和工程施工钻进行了长期的探索，主要从事这种技术方法的研究单位有中国水电顾问集团（原国家电力公司）成都勘测设计研究院、中国水电顾问集团中南勘测设计研究院和中国水电顾问集团西北勘测设计研究院等，在传统钻探技术的基础上，先后经历了锤击跟管取芯钻进技术和推广应用金刚石取芯钻进技术两个重要阶段（两次重大技术突破），先后取得一大批科研成果，促进了水利水电勘察技术的发展。

（1）第一次重大技术突破——锤击跟管硬质合金取芯钻进技术

上世纪50年代，国家电力公司成都勘测设计研究院针对卵砾石覆盖层钻探中，因地层不稳定，钻孔频繁跨塌，钻进效率低和取芯质量较差等技术等难题，成功地研究和总结了《孔内爆破技术研究》，较好解决了这种地层钻进中的跟管技术难题。后来，经过不断改进完善，形成了一整套完善的锤击跟管取芯钻进技术，并在水利水电勘察中广泛应用。目前，这种技术仍然是一种对付架空层的一种主要的技术方

法，其中，取芯钻进方法与80年代前所不同的是采用金刚石钻进代替了硬质合金钻进和钢粒钻进。

锤击跟管钻进原理（工艺流程）[5]：先导孔钻进——孔底爆破——锤击跟管——先导孔钻进。具体技术方法：①采用比套管小一级的钻具在套管下部孔段进行取芯钻进（先导孔钻进），钻进方法为硬质合金和钢粒钻进，有时采用泥浆护壁；②当裸孔段的孔壁垮塌和掉块对正常取芯钻进构成比较严重的影响时，采取孔内爆破方法在裸孔孔段进行爆破；③采用吊锤打击的方法将套管逐根跟到孔底，靠套管护壁；①、②、③工艺形成一个钻进周期，构成完整的锤击跟管取芯钻进工艺流程。该技术方法尽管存在：①具有炸坏套管的可能、②套管容易在锤击时变形、③一级套管难以实现长孔段跟管等技术缺陷，但在尚无其它有效技术方法的情况下，不失为一种实用的取芯钻进技术。

（2）第二次重大技术突破——金刚石取芯钻进技术

上世纪80年代，随着天然金刚石在钻探中的成功应用和人造金刚石技术的飞跃发展，水利水电勘察部门开展了金刚石钻进技术在深厚覆盖层中的研究，具有代表性的研究项目是：国家电力公司成都勘测设计研究院承担的国家"六五"攻关项目《深厚砂卵石层金刚石钻进与取样技术的研究》，成功地实现了金刚石取芯钻进技术移植（推广），并在国内广泛推广应用。

在取心（样）技术方面：采取高质量的岩心标本仍然是现代岩心钻探的主要目的之一。所谓"取心质量"，应该是包括采取的岩心数量的百分比即采取率和反映岩层(或矿层)结构状态及物理力学性能的程度。不同勘探目的的钻孔，采取岩心质量的要求不同，矿床勘探钻孔，主要目的是查明矿层位置和含矿量，要求只须得到较高的岩矿心采取率即可。工程地质勘探钻孔，除了必须采取足够数量的岩心以外，还须取出保持地层原始结构状态和物理力学性状的岩样，即原状岩样，同时还须查明地层的水文地质条件。为了达到上述目的，有的还须进行必要的孔内测试。

取心钻具的结构对取心质量有重要的影响[6]。目前主要有回转式取心钻具。回转式取心钻具包括单管钻具、单动双管钻具，双动双管钻具和三层管钻具。绳索取心钻具一般属单动双管钻具之列，从冲洗液流向分有正循环钻具和反循环钻具[7][8]。

单管正循环钻具取心的效果最差，不论什么结构和采用什么类型的冲洗液，采取率最低，不能取原结构状岩样。

反循环钻具大多采用局部反循环，有单管反循环和双管反循环两种。反循环钻具岩心采取率最高，可以超过100%，它的缺点是岩心质量差，分选严重，一般不能反映原状结构。

双动双管钻具的岩心采取率高，但它的适用范围有限，由于只能采用硬质合金钻头，故一股只适用于软塑性岩层。

三层管钻具实质是在双管钻具的内壁增加一层薄壁的半合管，以避免退出岩心时人为损坏破碎的岩心。

单动双管钻具(包括绳索取心钻具)是目前应用最广的取心钻具，它适用于各种岩层，结构种类很多，性能相差也很远。

金刚石钻进和绳索取心钻进，以及有的单位研制的专用取心钻具，采用清水或泥浆作为冲洗液，可以获得较高的岩心采取率，但是企图取到原结构状的岩样是比较困难的。在一些破碎地层，采取率仍有明显地降低；在无泥质的砂卵石覆盖层，只能采取大块的卵石，而且只能采取扰动样；人们为了提高岩心采取率，为了在破碎地层、软弱夹层和砂层取样，设计了各式各样的取心钻具和取心工具，这些钻具和取心工具的共同特点是减少或避免冲洗液对岩心的冲刷，在一定的地层如泥质胶结地层、破碎地层和厚砂层有一定效果，但适用范围不广，尤其对漂卵砾石层、砂卵石层和薄砂层不能见效。

在钻进碎岩技术方面：覆盖层质地坚硬，结构复杂，其成份主要由坚硬的火成岩、变质岩组成，漂石和卵石的可钻性级别一般在7～11级，颗粒级配无规律性，从细砂到粒径10m以上漂砾无一不有，钻进碎岩有一定的难度。目前主要采用有硬合金钻进法、金刚石钻进法、冲击钻进法、潜孔锤钻进法。其中金刚石钻进法碎岩效率高，潜孔锤钻进法在可钻性为6—7级的岩石中钻进效率有明显提高，在坚硬致密“打滑”岩层中可成倍地提高钻进效率；特别是在裂隙及解理发育（岩心容易堵塞）的岩层钻进可以提高回次岩心长度，提高岩矿心采取率，对于硬、脆、碎的破碎带更为明显。

虽然对于解决护壁、取心、钻进问题，有些各自的技术方法，但仍未有效解决复杂地层钻探和工程施工钻技术问题，关键是应将高效率碎岩技术与有效的护壁、取心技术结合起来，进一步完善和发展复杂地层钻进技术。

1.3 课题的研究内容和重点要解决的问题

依据复杂地层的成因、分类、特性，以及目前钻探工程和工程施工的要求，结合现有钻探工程技术，拟开展对复杂地层钻探技术进行系统的研究。

（1）全面分析复杂地层的成因、分类、特性，以及目前钻探工程和工程施工钻的要求，确定钻探工程施工的难题。

（2）全面分析现有钻探工程技术特点、实用效果、适用范围，对现有钻探工程技术进行优化组合——施工方案、技术组合，并改进钻具和工艺，进一步完善现有钻探工程技术，力求解决复杂地层钻探技术问题。

（3）尽量应用与钻探工程技术相关的工程力学、流体力学理论及国内外先进的

理论，并完善钻探工程技术理论，从而解决复杂地层钻探技术问题。

（4）对于复杂地层钻探问题，提出采用新的钻探技术——潜孔锤取芯跟管钻探技术，开展对潜孔锤取芯跟管钻探技术进行研究。该钻探技术包括气动潜孔锤取芯跟管钻探技术和液动潜孔锤取芯跟管钻探技术，设计并研制气动潜孔锤取芯跟管钻具和液动潜孔锤取芯跟管钻具；研究气动潜孔锤取芯跟管钻具和液动潜孔锤取芯跟管钻具的钻进工艺规程，并指出操作注意事项。该项研究工作是重点要解决的问题。

（5）对于复杂地层锚索成孔等工程施工钻问题，提出采用新的钻进技术——潜孔锤跟管钻进技术，开展对潜孔锤跟管钻进技术进行研究。改进并研制气动潜孔锤跟管钻具；研究气动潜孔锤跟管钻具的钻进工艺规程，并指出操作注意事项；改进和完善配套钻进设备。从而使气动潜孔锤跟管钻进技术，成为复杂地层工程成孔的成熟钻进技术。

1.4 课题研究采用的研究方法和技术路线

首先弄清复杂地层的成因、分类、特性，确定复杂地层钻探的难点；充分了解国内外复杂地层钻探技术的研究现状和水平，提出复杂地层，主要是特别难钻探的复杂地层的新的钻进技术方案；创新设计钻具结构，优化钻具结构，采用 ATOCAD 绘图，尽量采用标件；应用钻探工程相关的工程力学、流体力学理论及国内外先进的理论，设计相应的钻进规程，制定相应的钻进操作规范。

在课题研究工作中，以科研和生产相结合，紧密依托水电工程相应勘测设计阶段深厚砂卵石层工程地质勘探项目和小湾电站锚索成孔技术项目，坚持理论联系实际的工作作风，坚持认识——实践——再认识——再实践的工作程序，通过大量室内或中间试验，生产应用，信息反馈、统计分析，不断循环反复，改进完善，最终以钻探工程施工效率、施工成本及钻具寿命作为评价新的钻探技术的指标，完成本课题的研究。

（1）通过改造和移植对心式潜孔锤跟管设备，实现优质取芯同步跟管钻进，在架空层和极其松散严重漏失地层中体现高效钻进的优势；根据空气潜孔锤跟管钻具在孔底的工作状态，寻找与岩芯钻探中广泛应用的双管钻具的最佳结合点，进行两层管与三层管兼容的高低压风路互不干涉的钻具结构设计；从钻头冷却、排除岩粉等方面要求出发，确定风路设计方案；选择使用大功率潜孔锤，为钻具提供足够的冲击动力；选择优质钢材，合理进行钻头布齿，选择适宜的加工工艺，来保证整套钻具的使用寿命。研制新型钻具是本课题研究的技术关键。

（2）针对小湾电站和西部水电工程的复杂地层特点，提出采用现有气动潜孔锤跟管钻进技术施工锚索等工程孔，依据现有气动潜孔锤跟管钻进技术的初步应用结

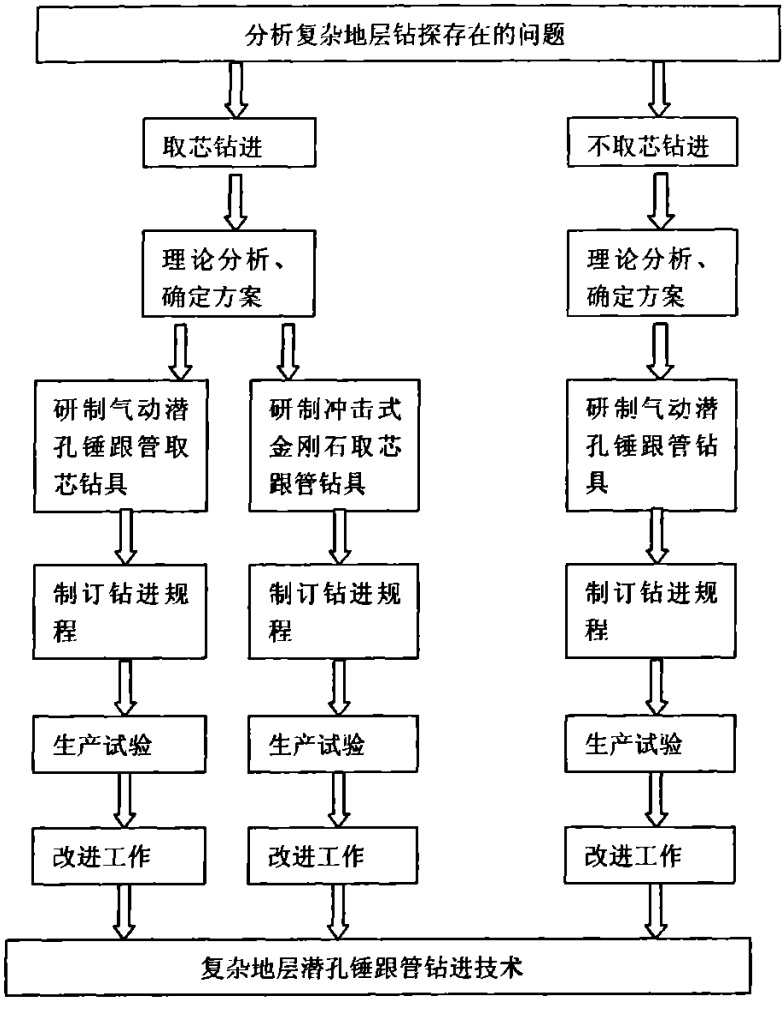


图 1-1　技术路线示意图

果，综合分析复杂地层钻进问题，研制适合小湾电站和西部水电工程复杂地层的气动潜孔锤跟管钻具；改进和完善气动潜孔锤跟管钻进配套机具、设备。

（3）应用钻探工程相关的工程力学、流体力学理论及国内外先进的理论，设计相应的钻进技术规程，制定相应的钻进操作规范。技术路线示意图见图 1-1。

1.5　取得的主要研究成果

全面认识复杂地层特性，对于不同条件的复杂地层，提出相应的钻进工程技术手段，使复杂地层钻进技术水平上了一个新台阶。取得的主要研究成果有：

（1）依据地层的成因、分类、特性，确定了复杂地层钻探的难点。由构造运动所形成的复杂地层，使岩层产生节理、裂隙、裂缝、断层和片理，特别是硬或中硬以上的脆性岩石受构造力的剧烈破坏形成复杂地层，在钻探中，会遇到保护孔壁、

取心困难问题，这里称为Ⅰ类地层；由外力地质作用所形成的复杂地层，即风化层、河流冲积层、洪积层，风积层。岩层经风化作用变为岩性较松散、胶结不良的风化层，而冲积、洪积、风积作用形成的各种沉积层一般含有粘土、流砂、卵石、砾石、漂石成为复杂的地层，在钻探中，会遇到钻进、保护孔壁、取心困难问题，这里称为Ⅱ类地层。这两类特性不同的地层，采用的钻进方法和钻进工器具也相应不同。

（2）采用应力波理论，分析了潜孔锤跟管钻进碎岩过程及影响因素。以单偏心跟管钻具为例对潜孔锤跟管钻进过程中的跟管钻压、套管自重、潜孔锤冲击功、跟管钻进速度、跟管深度、扩孔口径和钻进中的钻压值进行了理论推导，得出：

① 潜孔锤跟管钻进速度取决于潜孔锤的冲击功、岩石的单位体积破碎功和凿岩直径三个因素；

② 根据不同的钻进条件，分别提出了一种在简单工况条件下和复杂工况条件下的最大跟管深度l_0、l_{max}的计算公式，包括下向垂直孔和水平孔时的最大跟管深度的计算公式；

③ 分析了跟管钻进钻压与机械钻速的相互关系，提出了跟管钻进的钻压，以每厘米钻头直径0.5~0.9kN为宜。

（3）将空气潜孔锤跟管钻进技术和岩芯钻探技术结合，利用前者钻进速度快和护壁效果好、后者具备采集岩芯能力的技术优势，通过优化设计，优势互补并充分发挥这些技术优势，研制开发了一种新型的钻探技术方法—空气潜孔锤取芯跟管钻进技术。钻具主要特点有：

① 钻具结构采取同步、同心跟管钻进原理，从结构上保证孔底始终具有钻具到位的径向和轴向空间位置，确保钻具不因地层的垮塌因素造成钻具到位故障；

② 采用中心钻头（唇面）超前套管钻头的阶梯钻进原理，同时将高压气流通道与低压通道分开，岩心始终处于岩心管的屏蔽保护下，能够取得高质量的岩心和高的采取率；

③ 钻具采用双管（外管和岩心管）和三层管（外管、岩心管和半合管）两种结构方法，可以满足不同砾石（用单管）和松散地层（用双层管）的取芯要求；

④ 空气潜孔锤取芯跟管钻进可以取得能够客观反映地层情况（层位、包裹情况等特性）岩心；

⑤ 发挥潜孔锤钻进效率高的技术优势，采取取芯和跟管一次完成，钻进效率可以大幅度提高；

⑥ 钻具结构简单，操作简便，具有较好的实用性。

该技术适合于50m以内浅部复杂地层，特别是Ⅱ类复杂地层钻探取芯，该技术跟管护壁技术效果好、取芯质量好，钻进效率高。

（4）通过大量现场试验和施工工作，制订了实用、操作性强的空气潜孔锤取芯跟管钻进技术规程，有效地指导了现场生产，保证了复杂地层钻进成孔的质量和效率满足要求。

（5）开发了冲击式金刚石取心跟管钻进技术，该技术特点为：

① 组合张敛式扩孔钻头对称分布并呈锥形，破碎岩石效果较好，张开或收敛可靠；特别是加大型扩孔钻头套管跟进顺利；

② 钻具承压和承扭能力足以满足常规钻进要求；

③ 两级钻头的同轴度好，导向和扶正相辅相成，不会造成钻孔弯曲；

④ 泄漏通道的设置在满足扩孔钻头冷却和冲刷要求的同时，不会造成孔底钻头缺少必要的冷却液体；

⑤ 在悬挂腔设计了调节圈，在满足扩孔钻头收敛到位的情况下，通过加减调节圈确保悬挂机构承受钻具重力，消除了收敛爪异常受力情况；

⑥ 设计了排沙系统，避免颗粒物质滞留钻具内部，确保钻具张敛性能的可靠性。

冲击式金刚石取心跟管钻进方法是一项新的钻进技术，具有较广阔的推广应用前景。该技术适合在复杂地层钻探，其技术效果和经济效益显著。

采用冲击式金刚石取心跟管钻进方法在复杂地层钻探，可减少孔内事故，降低材料消耗，提高钻进效率；简化钻孔结构；为处理预想不到的孔内事故提供条件。

（6）根据小湾水电站的地层特点和原有气动潜孔锤跟管钻进技术存在的问题，设计开发出了二种类型的气动潜孔锤偏心跟管钻具，即 DPA 型单偏心跟管钻具、SPA 型带中心钻头的单偏心跟管钻具。这两种偏心跟管钻具的特点有：

① 依靠中心钻头和偏心扩孔钻头二级破岩、设计合理的排渣系统使排渣顺畅以及与具有足够冲击功的冲击器相适配等；

② 具有中心钻头起导向作用的偏心跟管钻具结构对于地层复杂的小湾电站更有利于孔斜的预防，从而更大限度地满足工程设计的要求；

③ 钻具在结构上设计用键来传递扭矩，加之选用了高强度的材料，采用了特殊的热处理工艺，合理的固齿工艺，确保了钻具寿命；

④ 联接销系统为相互自锁的结构，保证了中心钻头与导正器之间连接具有良好的可靠性，解除了掉钻之忧。

同时，针对工程特点提出了钻机、空压机、潜孔锤合理选择原则和配套型号；并对钻机进行了合理的改进。根据小湾地区钻进的特点，编制出了具有施工指导意义的潜孔锤跟管钻进工艺规范，为锚索施工提供了技术指导。

（7）针对工程实际，研制了起拔力为 650KN 的系列液压拔套管设备，其主要技术特点有：

① 系列液压拔管机结构简单，体积小、重量轻，装拆、操作方便，主要技术参

数合理，能较好的满足实际工作的需要；

② 操作台与液压泵站分开设置，特别适合于搬运、迁移困难的边坡工程使用；

③ 充分考虑了到陡坡上套管起拔的实际问题，底座和油缸采用铰接；

④ 一台设备可起拔多种规格的套管，形成系列。

（8）潜孔锤跟管钻进技术在川藏公路二郎山龙胆溪滑坡整治堆积体锚索工程、黄金坪电站坝基覆盖层灌浆试验工程、雅砻江官地水电站左岸缆机平台边坡预应力锚索工程等近十个工程的复杂地层钻进成孔和取样中应用了研制的偏心跟管钻具、液压拔管机和工艺操作规程，应用效果均良好,取得了好的钻进成孔效率和取样质量。和以往技术水平相比，钻具工作可靠，寿命长；性能良好。在一定程度上解决了深厚覆盖层、卵石层、堆积体成孔技术难题。

第 2 章　潜孔锤跟管钻进理论

2.1　潜孔锤钻进理论分析

潜孔锤钻进，除了回转作用碎岩外，主要是利用冲洗介质推动活塞往复运动，通过岩芯管把冲击力传给钻头，对岩石进行冲击破碎。

2.1.1　潜孔锤凿入分析

潜孔锤的撞击凿入系统如图 2 - 1 所示。在活塞撞击时，其本身变形很小，可以把活塞看成刚体，也即看成一个整体运动的质量块，用 M 表示其质量，在撞击瞬间，撞击面受力 p(t)。按牛顿定律，活塞的运动必受下式[9]支配

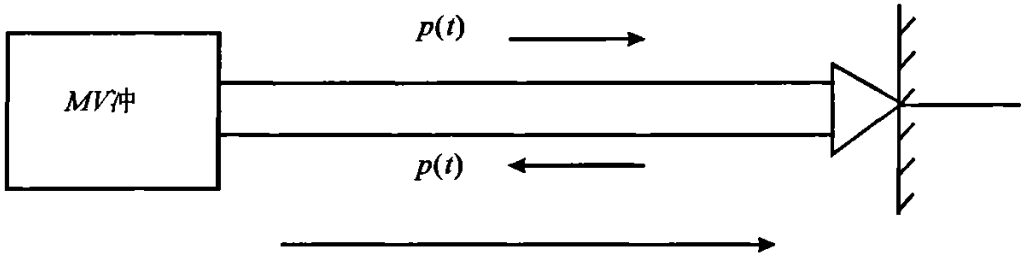


图 2-1　撞击凿入系统图

$$p(t)=-M\frac{dV}{dt}$$

但 p(t)同时又是岩芯管和砧子的入射波，即

$$p(t)=mV$$

上两式中 V 为撞击面的速度，以向右为正，消去 p(t)得

$$\frac{dV}{dt}=-\frac{mV}{M}$$

解此微分方程，以 t=0 时，$V=V_{*}$作初始条件，代入并整理后得

$$p(t)=mV_{*}e^{-mt/M}=P_{*}e^{-mt/M} \tag{2-1}$$

入射波 p(t)通过岩芯管传到钻头，函数形式并没有改变，只是在时间上落后了 l / a(l 为岩芯管长)。如果我们在钻头以推晚 l / a 作为时间的起点，那么在钻头的入射波表达式仍然为 p(t)。以 $p^{\cdot}$ (t)表示钻头凿入时的反射波，以 P 表示凿入力，那么，若在钻头，力和位移的关系如下

$$P=KU \tag{2-2}$$

式中　K——凿入系数；

U——凿入深度。

将上式微分得

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=\mathrm{KV}$$

V——为钻头凿入岩石的速度，由波之合成知

$$\begin{aligned}P&=p(t)+\dot{p}(t)\\&=p(t)-m[V-V(t)]\\&=2p(t)-mV\\&=2p(t)-\frac{m\mathrm{d}P}{K\mathrm{d}t}\end{aligned}$$

整理之得

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}+\frac{KP}{m}=\frac{2Kp(t)}{m} \tag{2-3}$$

它就是凿入微分方程的一般形式。在 t=0，P=0 时，解之可得

$$P=\frac{2(e^{\frac{-mt}{M}}-e^{\frac{-Kt}{m}})mV_{冲}}{1-\gamma} \tag{2-4}$$

这时

$$\gamma=\frac{m^2}{MK} \tag{2-5}$$

γ 是个无量纲量，它表征着整个撞击凿入系统的情况，称之撞击凿入指数。

为了从式(2 - 4)求得凿入力的最大值 P_m，将该式微分一次，令其为零，得

$$t^*=\frac{\ln\gamma}{\frac{m}{M}-\frac{K}{m}}$$

代回式 2 - 4 可得

$$P_m=2mV*\gamma^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \tag{2-6}$$

以静力侵入和凿入相同深度所消耗功的比，称作凿入效率，以 η 表示。因凿入时消耗的动能是 $\frac{MV_{冲}^2}{2}$，静力侵入时，达到 $\frac{P_m}{K}$ 深度需要作功 $\frac{P_m^2}{2K}$，故效率 η 是

$$\eta=\gamma\left(\frac{P_m}{P_{冲}}\right)^2 \tag{2-7}$$

将式 2-6 代入 2-7 便可得凿入效率

$$\eta = 4\gamma^{\frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \tag{2-8}$$

在上述情况下，凿入系统之效率高低，只取决于 γ，当 $\gamma=1$ 时，有最高的凿入效率，即

$$\eta_{\gamma=1}=0.\ 54136$$

γ 过大或过小，凿入效率都降低。当 γ 很大于 1 时，凿入效率低是由于活塞重量小、岩石软、而岩芯管较粗较重，能量以岩芯管动能的形式陷于岩芯管，也即以拉伸波的形式反射回来了。当 γ 极小于 1 时，意味着活塞重量大，岩石强度大而岩芯管细，岩芯管变形占去了很多能量，也就是以压缩波反射回来，故效率也低。从上面的分析也可知，随着冲锤速度增加，即随冲击功增加，碎岩速度也增加。

2.1.2 入射波形对凿入效率的影响

岩芯管中的入射波形，主要取决于活塞形状及其撞击面接触条件。就活塞的形状而论，图 2-2 清楚地表明，在等重量的条件下，它将对入射波形产生重要影响。图中活塞长度为 l，撞击面直径 d_1，背面直径为 d_2，砧子直径为 25mm。

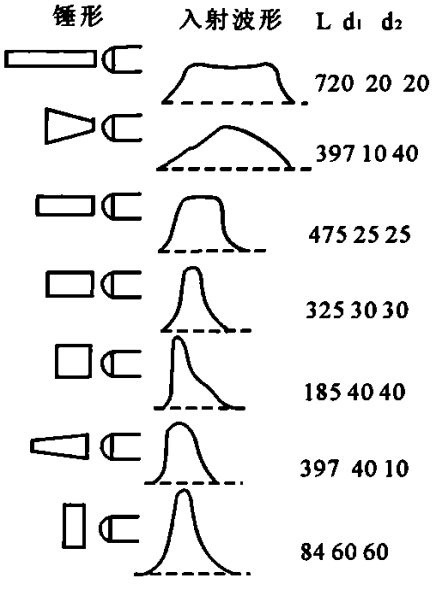


图 2-2 不同的入射波形和活塞的形状的关系图

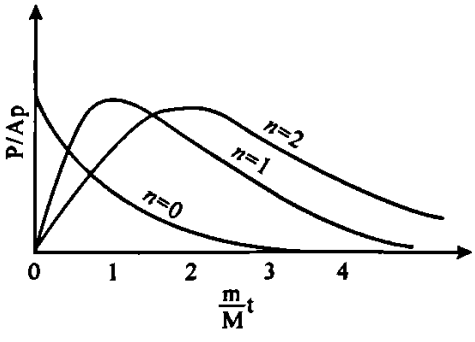


图 2-3 不同的入射波

一般而言，细长形状的活塞，入射波的幅值低而延时长；短粗活塞则与其相反。全断面一起接触，入射波上升阶段陡而急；撞击面有局部变形，则波形上升缓和，同时波形的幅值较低而且作用时间长。

不同的入射波形可用下面通式表征：

$$p(t)=A_p\left(\frac{mt}{Mn}\right)^n e^{n-\frac{mt}{M}} \tag{2-9}$$

在此式中，A_p 是取决于冲击功的系数，n 分别等于 0、1、2 时，三种波形绘于图 2-3。n=0 时，$A_p=mV_{冲}$；n=1 时，$A_p=\frac{\sqrt{2}}{e}mV_{冲}$；n=2 时，$A_p=\frac{4\sqrt{6}}{3e^2}mV_{冲}$，这样入射波的能量都恰好和活塞动能相等。显然，当 n=0 时，式 2-9 就是式 2-1；n=1 时，波形比较缓和；n=2 就更加缓和些。只要将式 2-5 代入式 2-4 求得最大值，再代入式 2-7 也就能够求得不同入射波形的凿入效率。

缓和的入射波形比陡起的入射波形有较高的凿入效率。这是因为凿入开始的初瞬间不需要有很大的力，随凿深增加，需要的力也增加。陡峭的波形，在凿深增加时，破岩需要更大力的时候，它已经衰竭了，势必影响凿岩效果；对比之下，较缓和的波形却有后劲，能在凿深进一步增长的时候，输出更大的力，凿岩效果显著。当然这些都指匹配得当的情况而言的。

2.1.3　应力波能量计算

应力波在管柱中传播时具有一定的能量，它包括质点的弹性应变能和质点的动能量两部分，其总和即为冲击器发出的能量。单位管柱体积内蕴有的能量以 W 示之：

$$W=W_1+W_2 \tag{2-10}$$

式中：W_1——质点弹性应变能；

W_2——质点动能。

$$W_1=\frac{\sigma^2}{2E} \tag{2-11}$$

式中：σ——应力；

E 弹——性模量。

$$W_2=\frac{\rho V^2}{2} \tag{2-12}$$

式中：ρ——质点密度；

V——质点运动速度。

由(2-7)式可知 $\sigma=\rho aV$，而 $a=(\frac{E}{\rho})^{0.5}$，所以 $V=\frac{\sigma}{(E_\rho)^{0.5}}$，并代入式(2-12)得

$$W_2=\frac{\sigma^2}{2E} \tag{2-13}$$

将式(2-13)和式(2-11)代入式(2-10)得

$$W=\frac{\sigma^2}{2E}+\frac{\sigma^2}{2E}=\frac{\sigma^2}{E}=\rho V^2 \tag{2-14}$$

由上式可以看出应力波所具有的能量中，动能和弹性应变能各占一半。由图(2-4)可以看出，应力波全部能量可以将应力波沿管柱中的分布加以积分：

$$W_{总}=\int W\cdot Fdx=F\int W\ dx=F\int\sigma^2dx/E=\rho F\int V^2\ dx \tag{2-15}$$

总能量用时间座标积分，也就是在管柱某一固定截面受力为 P，质点运动速度为 V，在 dt 时间内作功为 PVdt，则总能量为

$$W_{总}=\int PVdt=\int(F\sigma)\cdot(a\cdot\varepsilon)\ dt==\int(F\sigma)\cdot(a\sigma/E)\ dt$$

$$=Fa\int\sigma^2dt/E \tag{2-16}$$

式中：F——管柱截面积，m^2；

t——为波的传播持续时间，s；

a——为应力波在管柱中的传播速度，m/s；

E——管柱的弹性模量，N/m^2；

σ——应力，N/m^2。

(2-4)式就是国际标准 IS02787 应用应力波法求算潜孔锤冲击能量的基本公式，IS02787 要求有足够的积分点(至少 10 个)积分。

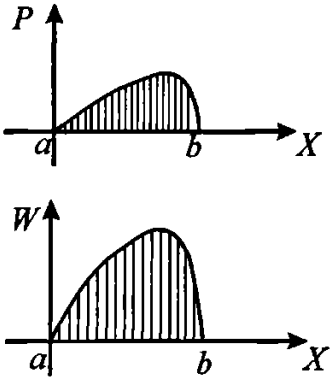


图 2-4　应力波的能量分布
P—力；W—功

2.2　潜孔锤跟管钻进理论

以单偏心跟管钻具为例，如图 2-5 所示，从图可知：冲击导正器受总钻压 P、冲击力 F_1 作用，套管受到跟管钻压 P_2，套管自重力 G，部分冲击力 F'_1 和孔壁地层对套管表面的总摩擦阻力 R_f 的作用。套管自重力 G=l·c，c 为每米长度套管的重力（kN/m），l 为套管长度（m）；孔壁地层对套管表面的总摩擦阻力[10]

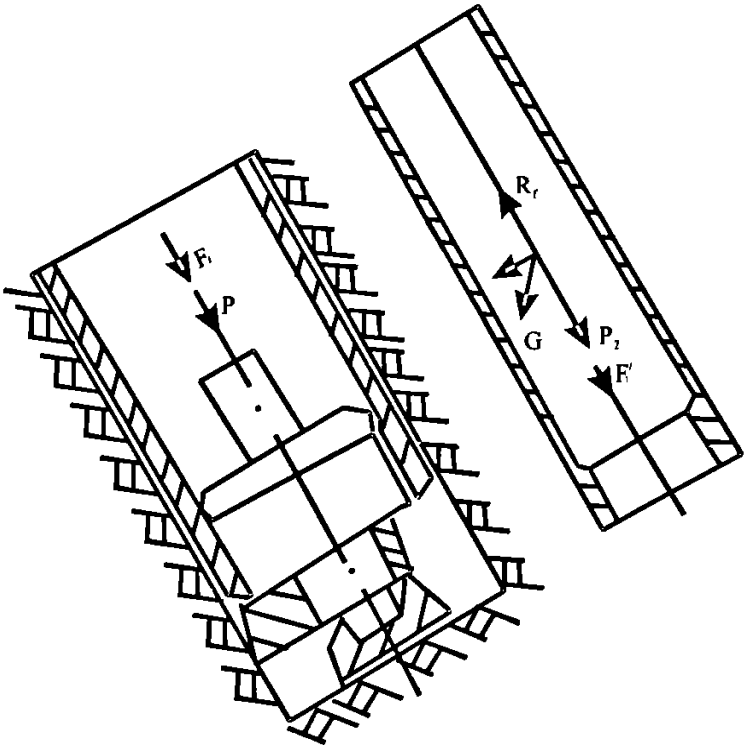


图 2-5　潜孔锤跟管钻进示意图

$$R_f=\pi dql+fG\sin\theta$$

式中：d——套管外径，m；

q——孔壁地层对套管单位表面积上的摩擦阻力，kPa；

f——孔壁地层与套管表面间的摩擦系数；θ—钻孔轴线与铅垂方向的夹角。

跟管钻进的初始阶段，即 $R_f<P_2+\cos\theta$时，套管在跟管钻压 P_2 和套管重分力 Gcosθ 作用下跟进，此时的跟管速度 V 可用下式[11]表达：

$$V=\frac{4A\eta}{\pi D^2 a} \tag{2-17}$$

式中：A——潜孔锤单位时间的冲击功，Nm/min；

η——凿入效率；

D——凿岩直径；m；

a——岩石单位体积破碎功，Nm/m^3。

从式(2-17)知：在 $R_f\leq P_2+\cos\theta\cdot G$ 条件下，潜孔锤跟管钻进速度取决于潜孔锤的冲击功、岩石的单位体积破碎功和凿岩直径三个因素。

随着跟管钻进深度的增大；当 $R_f=P_2+G\cos\theta$

$$\pi d l_0 q + f t_0 c \sin\theta = P_2 + l_0 c \cos\theta$$

$$l_0 = \frac{P_2}{\pi d q + f c \sin\theta - c\cos\theta} \tag{2-18}$$

l_0即为不消耗钻进钻压 P_1 和冲击功 A 时跟管的最大深度。

θ=0°时，

$$l_0 = \frac{P_2}{\pi d q - c} \tag{2-19}$$

即为下向垂直孔时不消耗钻进钻压 P_1 和冲击功 A 时的最大跟管深度。

θ=90°时，

$$l_0 = \frac{P_2}{\pi d q + f c} \tag{2-20}$$

即为水平孔时不消耗钻进钻压 P_1 和冲击功 A 时的最大跟管深度。

当（P_2+Gcosθ）< $R_f \le P = P_1 + P_2$ 即耗用钻进钻压跟管时：

$$L_0 = \frac{P_1 + P_2}{\pi d q + f c \sin\theta - c\cos\theta}$$

当 R_f >（P+Gcosθ）=（P_1+P_2+Gcosθ）时，即潜孔锤冲击功在破碎孔底岩石的同时，还要带动套管跟进，设在时间 t 内跟管深度从 L_0 增至 L_x。此时用于破碎孔底岩石的冲击功为 W_1，用于带动套管跟进的冲击功为 W_2，因：

$$W_1 = \frac{\pi}{4} D^2 a (\mathrm{Lx} - \mathrm{L_0})$$

$$W_2 = \int_{\mathrm{L0}}^{\mathrm{Lx}} (R_f - P - G\cos\theta) dl$$

$$= (\mathrm{Lx} - \mathrm{L0}) \left[\frac{1}{2} (\mathrm{Lx} + \mathrm{L0})(\pi d q + f c \sin\theta - c\cos\theta) - P \right]$$

在时间 t 内潜孔锤所做冲击功[12]为

$$W = A \cdot \eta \cdot t = W_1 + W_2$$

$$\therefore \quad A \cdot \eta \cdot t = \frac{\pi}{4} D^2 a (\mathrm{Lx} - \mathrm{L0}) + (\mathrm{Lx} - \mathrm{L0}) \left[\frac{1}{2} (\mathrm{Lx} + \mathrm{L0})(\pi d q + f c \sin\theta - c\cos\theta) - P \right]$$

等式两边对时间求导得：

$$V = \frac{A\eta}{\frac{\pi}{4} D^2 a + \frac{(\mathrm{Lx} + \mathrm{L0})}{2} (\pi d q + f c \sin\theta - c\cos\theta) - P} \tag{2-21}$$

此式即为 R_f>(P+Gcosθ)条件下潜孔锤跟管钻进下向斜孔时钻进速度的表达式。影响钻速的因素除由式(2-17)所反映的因素外，还有钻孔壁地层对套管单位表面积上的摩擦阻力 q。总钻压 P，钻孔轴线与钻垂方向的夹角θ和跟管深度等因素。

当跟管深度增大到使 R_f=P+Gcosθ+F 时，

$$l_{max}=\frac{P+F}{\pi dq+fc\sin\theta-c\cos\theta} \tag{2-22}$$

l_{max} 即为潜孔锤跟管钻进下向斜孔时的最大深度的理论值。

$$\theta=0^{\circ}\qquad l_{max}=\frac{P+F}{\pi dq-c} \tag{2-23}$$

$$\theta=90^{\circ}\qquad l_{max}=\frac{P+F}{\pi dq+fc} \tag{2-24}$$

即分别为钻进垂直孔和水平孔时的最大跟管深度的理论值。

从式(2-18)、(2-19)、(2-20)知：在 R_f≤P_2+Gcosθ条件下决定跟管深度的最主要因素是跟管钻压 P_2。

从式(2-22)知，在 P_2+Gcosθ<R_f=P+Gcosθ+F 条件下，决定跟管深度主要因素是总钻压和潜孔锤的冲击力 F，但钻速却逐渐降低至零。

2.3　潜孔锤跟管钻进中钻压的讨论

2.3.1　钻进所需钻压

在以冲击为主回转为辅破碎孔底岩石的钻进工艺中，保持足够钻进钻压 P_1，防止钻具在冲击时反弹，使钻具紧密地与孔底岩石接触，对有效的传递冲击功，提高破碎效果是十分重要的，实践证明，随着钻进钻压增大（一定范围内）机械钻速随之增高，但过大的钻进钻压又会使钻头冲击力过快的磨损而使回次钻程缩短，据实验和生产总结，用于钻进的钻压，以每厘米钻头直径 0.5~0.9kN 为宜[13]。

2.3.2　跟管钻压

跟管钻压 P_2 是决定潜孔锤跟管钻进跟管深度的主要因素，在设计确定潜孔锤跟管深度时，原则上应以钻具或套管允许施加的钻压为依据，对钻具来说：

$$P=P_1+P_2\le S[\sigma]$$

（P_2 是通过钻具传递给套管的）

式中：S——钻具组合中最弱环节标件的断面积（通常是钻杆）；

[σ]——该杆件材质的许用抗压强度。

从上式中，即可求解出最大的跟管钻压 P_2[14]。

对套管来说：

$$P_2 \leq S'[\sigma]'$$

$$P=P_1+P_2 \leq P_1+S'[\sigma]' \tag{2-25}$$

式中：S'——套管的断面积；

[σ]'——套管材质的许用抗压强度。

从式(2-24)和(2-25)中可求得两个不同值的跟管钻压 P_2，取其小值作为施加的最大跟管钻压。

在生产中，跟管的阻力 R_f 是随着跟管深度的增加而增大的，因此跟管钻压也应大致与之相适应，如果跟管钻压较阻力 R_f 大得过多，多余部分跟管钻压由钻头承受而使钻进钻压过大，致使钻头冲击刃过快的磨损。

在设计跟管深度时，应尽可能用跟管钻压达到设计跟管深度。

第 3 章　气动潜孔锤跟管取芯钻探技术

3.1　引言

由外力地质作用所形成的复杂地层，即风化层、河流冲积层、洪积层，风积层。岩层经风化作用变为岩性较松散、胶结不良的风化层，而冲积、洪积、风积作用形成的各种沉积层一般含有粘土、流砂、卵石、砾石、漂石成为复杂的地层。这类地层往往称为覆盖层，这里称为Ⅱ类地层。包括粘土层、淤泥层、砂层、砂卵石地层和漂卵石地层。在这类地层中钻探，会遇到钻进、保护孔壁、取心等困难问题。

西部地区已开工兴建或正在进行前期勘测设计工作的诸多大型水电站，地处高山峡谷，河床覆盖层深厚，其中较典型的如大渡河瀑布沟、龙头石、深溪沟、长河坝、黄金坪、双江口等工程，河床覆盖层厚度一般为60m-80m，最深的超过130m，结构松散、岩质坚硬，常见粒径超过1.0m（最大的直径超过15.0m），大孤石。由于覆盖层深厚，土石坝常常是工程的首选，因而对覆盖层的工程地质勘探，要求极为严格。诸如：查明厚度、结构成份，通过钻孔取芯、试验查明物理、力学特性等。因此砂卵石层（均属Ⅱ类地层）的钻进与取芯，是水电工程地质钻探的难题，其技术水平的发展与创新状况，成了制约水电水利工程开发进程的重要因素。

空气潜孔锤跟管钻进技术是基础工程施工中用于覆盖层造孔的先进工艺技术。上世纪70年代初，瑞典阿特拉斯科普可（Atlas Copco）公司研制的Odex偏心跟管钻进法，其钻进效率可达20m/h，近年来，美国英格索兰、瑞典山德维克公司相继开发出了可更好地保证钻孔垂直度，技术更先进的对心式跟管钻进设备，但上述钻具均属全断面跟管钻进，效率虽高，但不能取芯[15]。

在潜孔锤取芯钻进技术的试验方面，德国纳索维亚公司、前苏联全苏矿务地质勘探中心研制的潜孔锤单层管及双层管取芯钻具，采用了普通的硬质合金钻头，钻头寿命较低[16]。我们国家八·五重点科技攻关项目《勘测关键技术及其应用》中，曾进行了空气潜孔锤无冲洗（干钻）取芯技术研究，取芯质量较好，但仍沿用常规跟管方法，没有实现高效的套管同步跟进。把钻进效率高的同心式潜孔锤跟管钻进和取芯技术结合起来，通过对同心式潜孔锤跟管钻进设备的移植改造，研发一种新的技术方法，实现同步跟管取芯钻进，以解决这类地层钻探问题。同时考虑到当前跟管钻进的发展水平；地层结构松散，跟管阻力较大，因此，研究空气潜孔锤取芯跟管技术，用于钻探50m以内这种Ⅱ类复杂地层。当然这种方法也可用于钻探50m以内Ⅰ类复杂地层，可钻深度更大。

3.2 空气潜孔锤取芯跟管钻具

3.2.1 钻具设计原则

（1）以水利水电工程地质勘察中常见的卵砾石等覆盖层为主要对象，以国内水利水电地质勘察部门现有的钻探技术装备为基础，立足于安全、实用的基本原则，以“优质、高效”为目的，采取空气潜孔锤取芯跟管钻进的技术途径，解决卵砾石等覆盖层钻探生产中钻孔垮塌和漏失、钻进效率较低、岩心采取质量较差等实际问题。

（2）借鉴空气潜孔锤同心跟管钻进、取芯钻进的成功经验，将两种技术进行组合，并进行优化设计，形成一种具有钻进速度快和取芯质量好的、全新的钻进技术方法。

（3）采用国内钻探系列标准管材，以实现管材的通用和互换性；考虑到潜孔锤钻进对钻具结构的高强度要求，优化钻具结构设计、选择使用优质钢材和研究采用科学的热处理工艺。

（4）设计的气流通道，既要满足冲刷净化孔底和冷却孔底钻头的要求，又不能冲刷岩心，以保证较快的钻进速度和岩心采取质量。

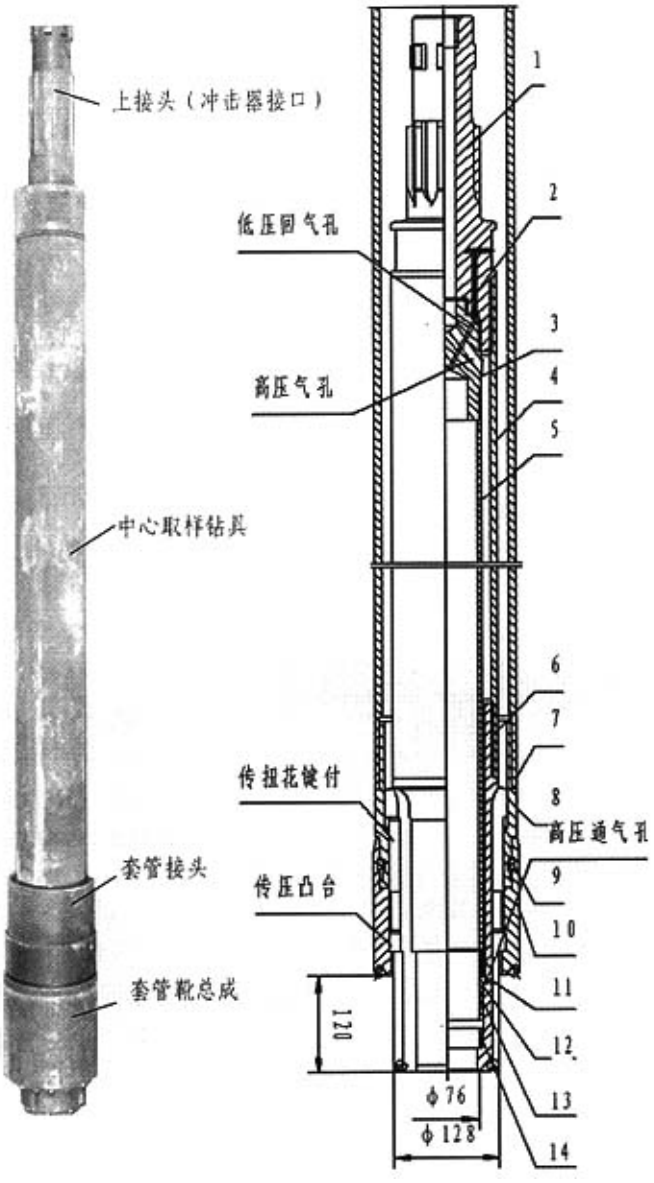
（5）在满足取芯跟管钻进的基本要求情况下，钻具结构及其零部件的几何形状尽量简单，装配方便，工作可靠、寿命长。

3.2.2 钻具结构原理

（1）钻具结构

如图 3-1 所示，空气潜孔锤取芯跟管钻具主要由中心取样钻具和套管靴总成两部分组成。中心取样钻具主要执行取芯钻进任务，在完成取芯钻进回次后，可随钻杆被提到地表；主要由上接头 1、O 形橡胶圈 2、分水接头 3、外管 4、岩心管 5、中心取样钻具 6、调节垫 11、短节 12、O 形橡胶圈 13 和卡簧 14 组成。

套管靴总成主要执行同步跟管钻进任务，在钻孔施工期间，始终留在孔内；由套管 7、卡环 8、套管靴 9 和套管钻头 10 组成，套管上端连接跟进的套管。实现空气潜孔锤取芯跟管钻进的主要机构和系统有：高压和低压气流通道系统、传扭机构、套管分动机构、传压机构、瞄向定位到位机构和取芯（岩心容纳）机构 6 个机构和系统。



A、钻具外貌　　B、钻具装配图

1、上接头； 2、O形橡胶圈； 3、分水接头； 4、外管； 5、岩心管； 6、中心取样钻具； 7、Φ168套管； 8、卡环； 9、套管靴； 10、套管钻头； 11、调节垫； 12、短节； 13、O形橡胶圈； 14、卡簧。

图3-1　168潜孔锤取芯跟管钻具

① 气流通道系统

钻具设有相对独立、互不串通的高压气流和低压气流两个通道；其中，高压通道为气流主通道，目的是将高压空气引到孔底，对孔底钻头进行冲刷冷却，同时将孔底岩屑携带到地面，起净化钻孔作用；低压通道为为岩心管的回风通道，当岩心随钻进入岩心管时，将管内空气和水（地下水）从回风通道顶往钻具与套管的环状空间，与主通道的回风回合，避免管内气水形成压力，消除影响岩心进入管内的因素。高压和低压通道是靠分水接头的高、低压分水孔分流，见图3-2。

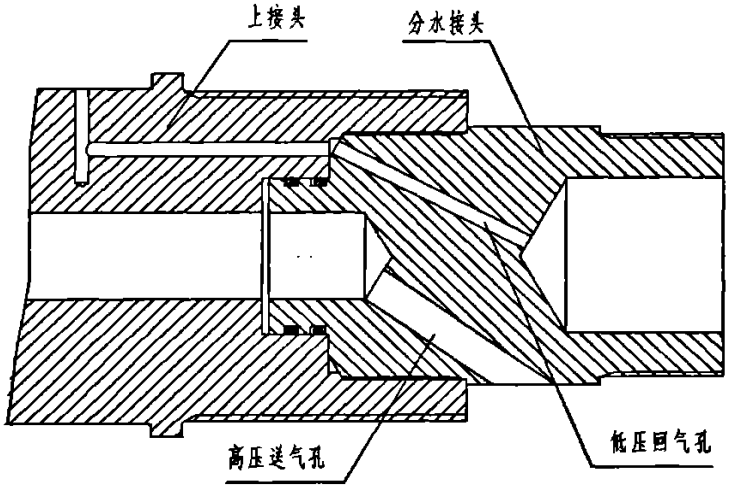


图3-2 钻具分水示意图

a. 高压气流通道

主要由上接头的中心孔和分水接头的高压送气孔、外管与岩心管的环状间隙、中心钻头的滞后通气孔组成。其流经路线为：钻杆—冲击器—上接头的中心孔—分水接头高压送气孔—岩心管与外管的环状间隙—中心钻头的滞后通气孔—中心取芯钻头与套管钻头的环状间隙—中心钻具与套管靴总成的环状间隙—钻杆与套管的环状间隙，然后返到地表。在孔底，由于中心钻头的破碎岩石部分超前于滞后通气孔，高压气流不直接冲刷孔底。

b. 低压气流通道

由岩心管内径（孔）、分水接头的低压回气孔和上接头的低压回气孔组成；钻进时，随着岩心逐渐进入岩心管，迫使管内空气和水通过分水接头低压回气孔和上接头的低压回气孔，进入中心取芯钻具与套管的环状间隙。

② 传扭机构

主要由中心取样钻头的内凹形花键槽与套管钻头的内凸形花键组成花键传扭付，实现传扭递扭矩功能，见图3-3。钻进时，将来自钻杆的回转扭矩通过上接头—

外管—中心取样钻头—花键传扭付，传到套管钻头，带动套管钻头回转，使其与中心取样钻头同步进行冲击回转钻进。

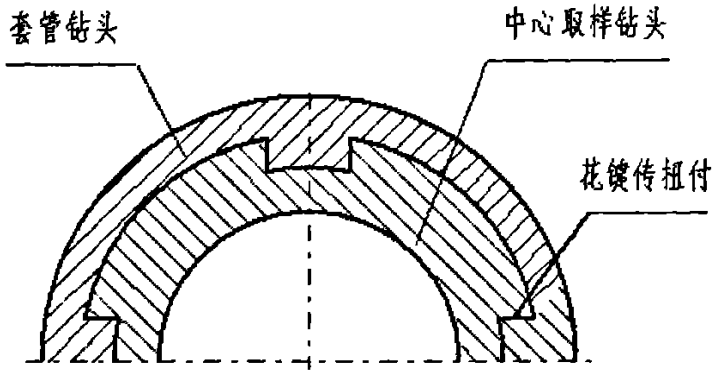


图3-3　钻具传扭付示意图

③ 传递压力机构

如图3-4所示，由中心取样钻头和套管钻头的凸台构成承冲传压付。钻压和来自冲击器的冲击力经过钻杆、中心钻具的中心钻头、传压付，传给套管钻头，为套管钻头提供必要的钻进压力和冲击力，同时带动套管沿轴向同步跟进。

④ 套管分动机构

如图3-5所示，套管分动机构由套管钻头、套管靴、卡环组成。套管靴与套管钻头采用插接（间隙配合），采用开有5—8mm的圆形弹性卡环嵌如套管接头的内环行槽中，在装配到位时，卡环同时处于套管靴的外环行槽中，卡环靠上下端面限位作用将套管接头和套管靴连接。在装配到位情况下，卡环与套管接头之间、卡环与套管靴之间在轴向和在径向均采用间隙配合，所以套管靴可以相对套管接头转动，从而实现分动，同时具备承受冲击和传递压力的能力。跟管钻进时，套管钻头随中心取样钻头回转，而套管靴及套管不回转；套管钻头以反拉的方式将冲击力和钻压传给套管靴和套管，随钻带动套管向孔底延伸。

⑤ 瞄向定位到位机构

由中心取样钻头的内花键和套管钻头的内凸花键组成，见图 3-3。下钻时采用人工辅助瞄向到位，通过取样钻头的内花键槽和套管钻头的内凸花键，使中心钻具与套管靴结合（连接），呈钻进状态；提钻时两者自动分离，中心取样钻具随着钻杆被提到地表，而套管靴留在孔底。

⑥取芯（岩心容纳）机构

由外管、岩心管（必要时可以在其内部加半合管）、短节、中心钻头和卡簧组成。钻进时，虽然岩心在卡簧处具有轻微的堵塞现象，由于采用空气冲击回转钻进，岩

心管内径又比钻头大，岩心能自如地进入岩心管；提钻时，靠卡簧与岩心的堵塞作用，防止岩心脱落。

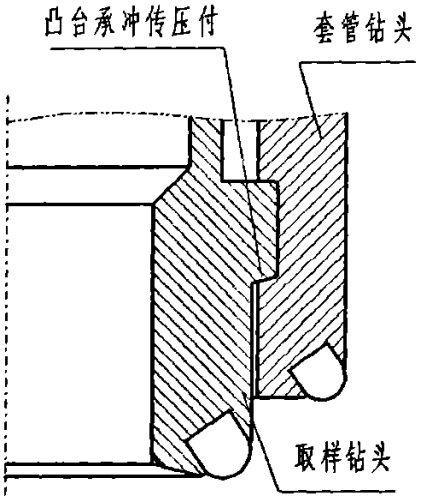


图3-4 钻具传压付示意图

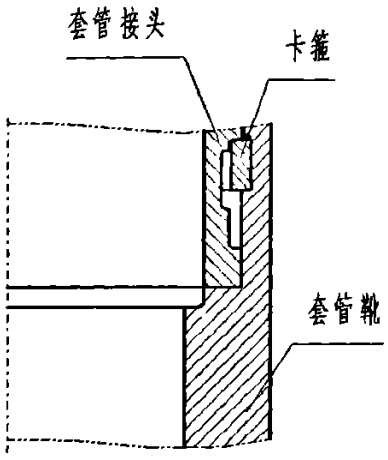


图3-5 分动机构示意图

（2）中心取样钻头、套管钻头

钻头是直接破碎岩石的工具。因此对钻头的合理设计、制造及使用，保证钻头高质量、长寿命，是提高潜孔锤钻进技术的重要环节。

柱齿钻头的设计制造，一方面要考虑到冲击能量的传递、另一方面要考虑到碎岩效果，因而其长度稍大于活塞长度，而重量不超过活塞重量的两倍；硬质合拿系用球柱形，提高了合金的抗碎能力[17]。

固齿原则，主要是防止产生"岩墙"和有利于保径，增加钻头的使用寿命，因此一般选用以 S=2d 的布齿原则，(S 一齿距；d 一球齿直径)，以防边齿齿孔连片崩裂。并严格注意外出刃的规格和出刃的高度，其次钻头还必须合理设计排风沟槽，保证钻头的冷却和岩屑(粉)的及时排除[18]。

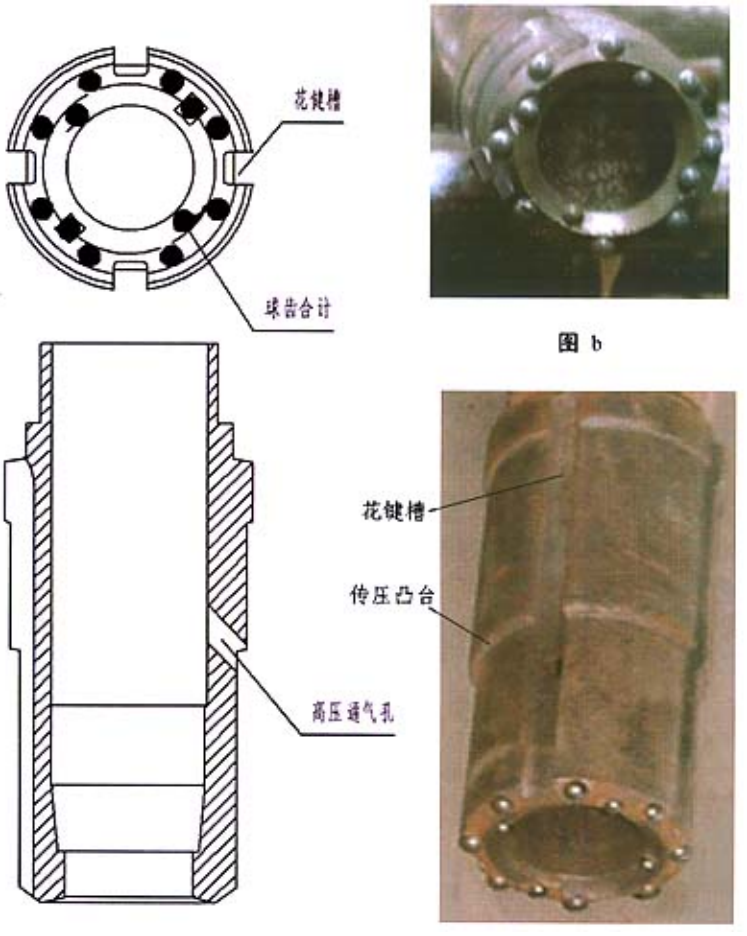
柱齿规格和硬质合金牌号选择，根据岩石性质及冲击器单次冲击功确定。其齿形为坚硬岩层中采用强度高、耐磨的球形齿。中硬及软岩层中，边齿采用锥球齿[19]。硬质合金牌号，采用 YG_{11c} 或 YG_{15c}，软岩层采用含钴较少的合金，硬岩层采用 YG_{15c}。球齿采用压固工艺镶嵌在钻头体上的。

在致密、磨蚀性强的岩层中钻进，柱齿钻头常因径向磨损而卡钻，从而大大降低钻进速度，并使钻头提前报废，为了防止卡钻，在钻头设计时应采用下列措施：边齿向外倾斜，倾角增大到 45^{o}[20]。

中心取样钻头和套管钻头均为潜孔锤球齿硬质合金钻头，钻头体采用优质钢材

（如 FF710），并进行渗碳淬火处理；采用冷压（过盈配合）镶嵌技术镶嵌合金，取样钻头的外圈组合金出刃 1mm,与套管钻头的内出刃（1mm）重叠，消除了在钻进时的破碎盲点[21]。

中心取样钻头见图 3-6[22]，采取超前（套管钻头和高压出气孔）式结构，其破碎（岩石）唇面超前高压出气孔和套管钻头 120mm,使得高压空气从高压出气孔直接排除，在保证充分冲刷岩屑净化孔底和冷却钻头的前提下，消除了高压空气直接冲刷钻头唇面影响岩心采取质量的不利因素；镶嵌有内、外两组Φ14 的球齿硬质合金[23] [23] [25]，其内圈组合金起内保径作用，用于保证岩心直径，有效直径 Φ76mm；外圈组合



图a　　图c

图a、钻头结构图；图b、钻头底唇；图c、钻头全貌

图3-6　中心取样钻头

金出刃 1mm,与套管钻头的内出刃（1mm）重叠；并设有与套管钻头构成承压传递冲击力的凸台，和构成传递回转扭矩的内凹形花键槽。

套管钻头为普通环行钻头，也同样镶嵌有两组球齿硬质合金。见图 3-7，钻头内腔的内凸花键是与中心取样钻头组成传扭花键的要素。



图 3-7　套管钻头外貌

（3）钻具取芯跟管钻进原理

如图 3-8 所示，钻进时，钻进轴向动力同时有两种：其一是来自高压空气驱动跟管取芯钻具上端连接的潜孔锤产生的高频冲击力，其二是来自地面钻机施加并通过钻杆和潜孔锤传给钻具的钻进压力，两者一并传给中心取样钻具；然后，钻具根据地层情况和跟进的套管阻力自动调节进行动力分配：①直接将动力传给中心取样钻头；②通过传压凸台将轴向动力传给套管靴总成（包括套管钻头）。钻杆回转时，通过潜孔锤直接带动中心钻具（包括中心取样钻头）回转，同时通过传扭机构（传扭花键付）将回转扭矩传给套管钻头，中心取取样钻头和套管钻头同时进行冲击回转钻进；其中，中心钻头进行冲击回转取芯钻进，岩心随钻直接进入岩心管；套管钻头进行冲击回转钻进，并带

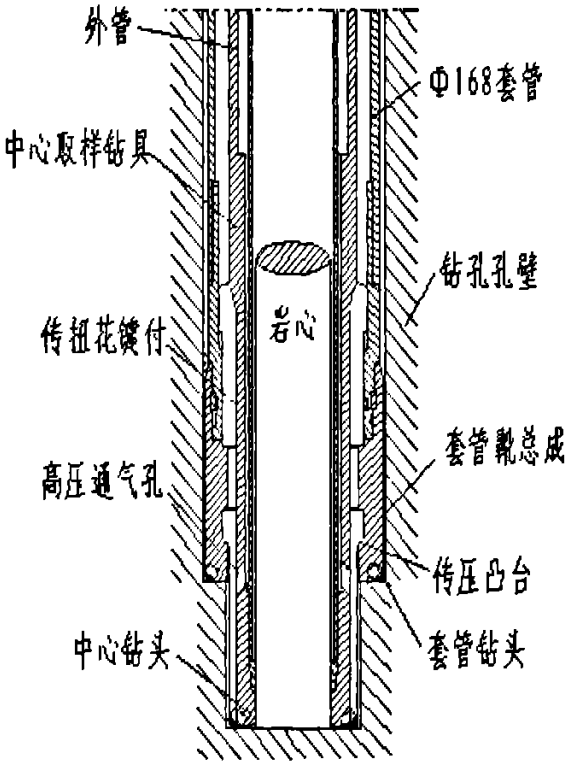


图3-8　取芯跟管钻进示意图

动套管随钻向孔底延伸，而在分动机构的作用下，套管并不回转。钻进回次结束后，在提钻情况下，中心取样钻具直接被提到地表，而套管靴总成及其套管则滞留在孔内；采集岩心后，再将钻具下到孔底，通过人工瞄向定位，使中心钻具到位，即中心钻具与套管靴总成再次连接，再次进行冲击回转取芯跟管钻进，从而实现空气潜孔锤取芯跟管钻进。

（4）钻具特点

① 钻具结构采取同步、同心跟管钻进原理，从结构上保证了孔底始终具有钻具到位的径向和轴向空间位置，所以，钻具不存在地层的垮塌因素造成钻具到位故障。

② 采用中心钻头（唇面）超前套管钻头的阶梯钻进原理，同时将高压气流通道与低压通道分开，使高压气流直接从高压排气孔排除，避免高压气流冲刷孔底岩心，岩心始终处于岩心管的屏蔽保护下，所以，能够取得高质量的岩心和高的采取率。

③ 钻具采用双管（外管和岩心管）和三层管（外管、岩心管和半合管）两种结构方法，可以满足不同砾石（用单管）和松散地层（用双层管）的取芯要求。

④ 钻具采用的外管和岩心管均为地质钻探以及石油钻井的标准管材系列，市场货源充足，互换性好。

⑤ 与金刚石回转钻进不同，空气潜孔锤取芯跟管钻进由于采用冲击为主的破碎岩石方式，其岩心主要是靠挤压方式形成，从而消除了金刚石钻进那种高速回转对岩心的扰动破坏因素，所以可以取得能够客观反映地层情况（层位、包裹情况等特性）岩心；在卵砾石和漂石中，尽管所取岩心的圆柱状几何形状没有金刚石钻进那样规则（见图 3-10b），然而并不影响地质方面对地层情况（岩石的力学特质、层位界限和岩石的组分等特性）的分析。

⑥ 发挥潜孔锤钻进效率高的技术优势，采取取芯和跟管一次完成，钻进效率可以大幅度提高。

⑦ 钻具结构简单，操作简便，具有较好的实用性。

3.2.3　钻具主要技术参数

钻具类型：空气潜孔锤取芯跟管钻具；

钻具规格：Φ168 mm；

钻具直径（套管钻头总成）：Φ176 mm；

跟进套管：Φ168mm（Φ168×7）；

钻孔直径：Φ176 mm；

岩心直径：Φ76mm；

中心钻具（取样钻头唇面）直径：Φ128 mm；

中心钻头超前（套管钻头）量：120mm；

钻具长度：1700 mm（岩石管长度 1000 mm、不包括潜孔锤）；

回次可采岩心长度：1200 mm；

跟管方式：潜孔锤随钻同步跟管。

3.3 空气潜孔锤取芯跟管钻进规程

3.3.1 设备和器具

空气压缩机：高风压空气压缩机（如阿特拉斯高风压空压机 KRHS396Md、英格索兰 S150-2S/18-AC 等）；

冲击器：DHD-350R 冲击器（宣化-英格索兰）；

钻机：钻进能力大于 100 米岩心钻机，具有 25～50 转/分的低转速挡，（如采用调速电机的 XY-2 岩心钻机、或具有相当钻进能力的动力头全液压钻机）[26]；

钻杆：Φ73（Φ73×9）或 Φ60（Φ60×6）钻杆；

套管：Φ168mm 套管，每根长度 1.2m，左旋螺纹连接；

管钳：Φ127、Φ89 套管钳；

钻塔：采用普通岩心钻机情况下，采用 7～9m 高的钻塔，此时，要求钻进平台高出孔口 1.2m；采用动力头钻机情况下，不需要专门的钻塔；

其它：钻探施工常用的工具。

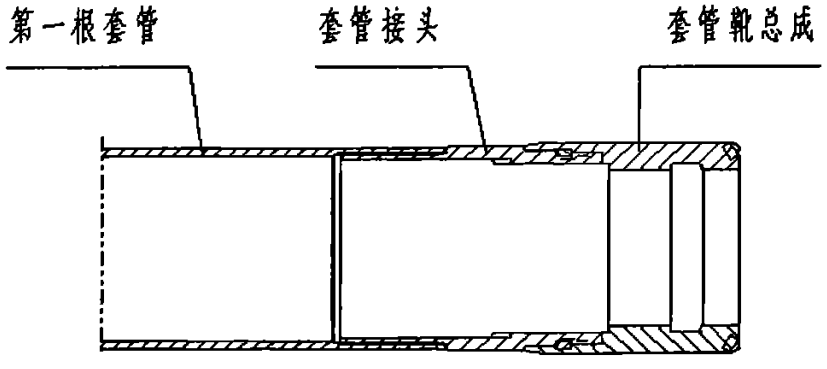


图3-9 套管靴与套管连接示意图

3.3.2 潜孔锤取芯跟管钻进工艺

（1）开孔

将套管靴直接放到孔位，采用简易的定位措施将其定位；将中心钻具下入套管内并使其到位，送空气和开动钻机进行冲击回转钻进。开孔时，由于套管基本上无

制动阻力，必然随中心取芯钻具回转，这属于正常现象。当套管跟进一定深度后，在孔壁的摩擦阻力作用下，套管不再随钻具转动。

（2）钻具到位判断

准确记录孔内钻具（包括钻杆、机上钻杆）长度Lz和套管长度Lt，并结合机高计算和记录钻具到位情况下的机上余尺L_Y，要求丈量和计算精确到厘米，以此作为判断钻具到位的唯一重要的依据。

钻杆下完后，采用钻机控制钻具下行，下至接近L_Y+210 mm时，采用管钳旋转钻具使中心取样钻头（内凹花键槽）进入套管钻头（内凸花键）处于配合状态，其直观表现是下放遇阻的中心钻具再往下行210mm，然后检查实际机上余尺与计算余尺L_Y是否吻合(约相等)，吻合则说明钻具到位，可以进行正常钻进操作；如实际机上余尺大于(L_Y+210mm)，说明钻具尚未到位，不能进行钻进操作。

（3）钻进规程参数

正常钻进时，应根据卵砾石等覆盖层的密实程度、漂石和卵砾石的硬度及其大小等地层情况，在以下范围内调整钻进规程参数。其调整原则为：地层胶结差（松散），采用小钻压和大风量为主的的规程参数；钻遇比较大的漂石和卵砾石，采用低转速和大钻压为主的钻进规程参数。

① 钻压：2—4kN；必要时采用较大钻压，尽量减轻高频冲击振动的反弹力对岩心的破坏[27]；

② 转速：20—30r/min；

③ 风量：≥12M^3/min；

④ 风压： ≥1.2 Mpa。

（4）操作规范及其注意事项

① 在下钻过程中，由于中心取样钻具的内凹花键槽方位与套管钻头的内凸花键方位是通过人工辅助瞄向，靠机械下钻一般不能自动完成瞄向任务，因此为避免二者方位不一致而导致高速碰击或冲击变形，每次下钻接近孔底（距孔底0.4—0.5m）时，严格控制下钻速度，采用最低速下钻；在中心钻具尚未到位情况下，严禁钻进操作，只有当准确判断确认钻具到位后，才能进行正常的钻进操作。

② 为避免因孔内钻具长度误差而导致中心钻具到位判断失误，下钻时，必须拧紧每一根钻杆。

③ 凡是下入孔内的套管，要求螺纹部分无损伤，螺纹连接必须用加力杆（长力臂）拧紧。

④ 地面退出岩心时，由于岩心因地层等因素呈不完整的块状或碎颗粒状，所以必须严格按照岩芯钻探规范操作，尽最大可能保持岩心原样，严禁人为混淆岩心层位。

⑤钻进过程中，一旦出现异常现象，及时停钻检查并排除故障原因。

⑥该钻进技术是一种新方法，管材直径较大、钻具较重，应严格遵守有关钻进工作的安全规程操作，在起下钻、跟管和退出岩心等工序时，应高度注意安全。

3.4 潜孔锤取心跟管钻进试验

2003 年 10 月～2004 年 3 月，在国家电力公司成都勘测设计研究院成都都江堰市下基地搭建了中试试验机台，见图 3-10，其设备、地层和机台管理模式与钻探生产机台完全相同，从而模拟生产试验机台进行中试。试验采取边试验，边对钻具进行改进的方法，试验过程概括为三个阶段：①跟管取芯钻进原理试验，目的在于考察钻具原理的可行性；②钻具结构性能试验，对钻具结构的合理性和可靠性进行初步考验；③综合钻进性能试验。试验表明，专题采取的空气潜孔锤取芯跟管钻进技术方法可行，钻具结构满足卵砾石等覆盖层取芯跟管钻进技术要求，跟管技术效果好，取芯质量好和钻进速度快（改进后的钻具的岩心采取率 100%，钻进效率达到 3m/h），取得了比较满意技术效果和技术指标；同时，针对试验情况，初步完善了潜孔锤取芯跟管钻具的结构，制订了空气潜孔锤取芯跟管钻进规范。

3.4.1 试验条件

地层为泥沙和卵砾石组成的河床堆积地层。其中，卵砾石约占 35%，最大粒径 0.3m 左右，可钻性 8 级左右；其余为松散的泥沙充填物。其钻进特征主要表现为：钻孔（泥浆）漏失，孔壁频繁垮塌、岩心采取质量很难保证。

3.4.2 试验情况简介

（1）原理试验

2003 年 10 月中旬，采用 $9m^3$ 的低风压（0.7MPa）空压机，冲击器为 CIR110，采用初期的钻具进行潜孔锤取芯跟管钻进原理试验。跟管基本顺利、具有一定取芯能力，试验结果基本上肯定潜孔锤取芯跟管钻进原理的可行性。但存在：①岩心采取率很低，累计进尺 9.4m(0～9.4 孔段)所采取的岩心长度不到 2m，采取率小于 25%；②钻进速度比较慢（≤1m/h）；③钻具局部结构存在折断、中心钻头与套管钻头唇面在同一平面导致高压空气直接冲掉松散岩心等结构缺陷。

（2）钻具结构性能试验

在原理试验的基础上，将中心取样钻头改成超前（套管钻头），并对其它结构逐一进行修改，力图结构完善；采用 $9m^3$ 的中风压（1.20MPa）空压机、DHD350R 高风压冲击器，于 2003 年 12 月中旬，进行钻具结构性能试验。试验中，虽然钻具结构基本满足要求，但仍然存在两大问题：①钻具因加工质量导致岩心管折断而影响

岩心采取率；②空压机能力（空气排量）不能满足 DHD-350R 冲击器的工作要求，导致钻进效率较低（小于 2m/h）。

（3）综合钻进性能试验

2004 年 1 月下旬～3 月，采用 20m^3 中风压气压机（英格索兰 S150- 2S/18- AC）型、DHD-350R 冲击器，采用改进和初步完善结构的跟管钻具进行钻进性能试验。试验孔段 9.4～12.8m，进尺 3.4m,Φ168mm 套管跟至 12.68m,岩心长度 3.4m，岩心呈柱状（无污染、无串层现象，见图 3-10），跟管钻进效率超过 2m/h。主要考虑到生



a、提钻取芯



b、卵石柱状岩心



c、松散地层岩心

图3-10　试验取得的岩心

产试验目的已经达到；其次，由于套管和孔口管在孔内的时间较长，孔口管与 Φ168 套管的环状间隙充填钻屑，形成严重的包裹架桥现象，严重影响正常钻进和套管跟进效果；孔内套管出现断裂隐患，导致起拔套管时第一根套管断在孔内，考虑到继续试验的成本比较大，而试验意义又不大，所以，试验结束。

3.4.3　试验取得的技术经济效果

试验取得的技术经济指标见下表，其中，综合钻进性能试验由于采用比较完善的钻具结构，设备配套合理，所取得的技术经济效果比较好；技术效果具体体现在以下几个方面。

表 3-1 生产试验主要技术指标

	原理试验	结构试验	综合试验阶段
钻速(m/h)	≤1.0	≤2.0	≥2.0
岩心采取率（%）	20.7		100
钻具结构效果	结构缺陷多	结构缺陷较多	基本完善（有待于生产试验的考验）
钻进回次数	14		4
累计进尺.m	9.4		3.4
岩心长度.m	1.95		3.4
平均回次岩心 m	0.14		0.85
试验孔深.m	0—9.4		9.4—12.8
套管跟进效果	基本顺利		顺利
其他情况	提钻阻力大，出现两次孔内故障		提钻顺利

（1）潜孔锤取芯跟管钻具初步经受了砂卵砾石等覆盖层的考验，钻具结构设计合理，钻进性能可靠，满足取芯跟管钻进的技术要求。

（2）取芯质量好。所取岩心无串层、无污染、采取率大于 90%，满足砂卵砾石等覆盖层岩芯钻探技术要求。

（3）同步跟管护壁技术效果好，为提高砂卵砾石等覆盖层的钻进效率创造了条件。

（4）钻进效率有大幅度提高。在砂卵砾石等覆盖层地层条件下，传统的锤击跟管钻进效率为 2～3m/d, 空气潜孔锤取芯跟管钻进中试试验钻进效率为 2m/h。

（5）钻进规程具有很强的可操作性。

3.5 本章结论

（1）将空气潜孔锤跟管钻进技术和岩芯钻探技术结合，利用前者钻进速度快和护壁效果好、后者具备采集岩芯能力的技术优势，通过优化设计，优势互补并充分发挥这些技术优势，研究开发了一种新型的钻探技术方法—空气潜孔锤取芯跟管钻进技术。钻具主要特点有：

① 钻具结构采取同步、同心跟管钻进原理，从结构上保证孔底始终具有钻具到位的径向和轴向空间位置，确保钻具不因地层的垮塌因素造成钻具到位故障；

② 采用中心钻头（唇面）超前套管钻头的阶梯钻进原理，同时将高压气流通道与低压通道分开，岩心始终处于岩心管的屏蔽保护下，能够取得高质量的岩心和高的采取率；

③ 钻具采用双管（外管和岩心管）和三层管（外管、岩心管和半合管）两种结

构方法，可以满足不同砾石（用单管）和松散地层（用双层管）的取芯要求；

④ 钻具采用的外管和岩心管均为地质钻探以及石油钻井的标准管材系列，市场货源充足，互换性好；

⑤ 空气潜孔锤取芯跟管钻进可以取得能够客观反映地层情况（层位、包裹情况等特性）岩心；

⑥ 发挥潜孔锤钻进效率高的技术优势，采取取芯和跟管一次完成，钻进效率可以大幅度提高；

⑦ 钻具结构简单，操作简便，具有较好的实用性。

（2）进行了跟管钻进取芯钻头和套管钻头的研制。

（3）依据地层性质、钻具特点，研究制订了实用、操作性强的空气潜孔锤取芯跟管钻进技术规程。

（4）该技术所采用的设备和器具均为当前国内地质勘察单位常用的空压机、冲击器、钻杆等，具有通用性和适应性。

（5）它是一项全新钻进技术，属于首次采用，具有较广阔的推广应用前景。适合于 50m 浅部复杂地层，特别是Ⅱ类复杂地层中钻探工作，该技术跟管护壁技术效果好、取芯质量好，钻进效率高。

第 4 章　冲击式金刚石取心跟管钻进技术

4.1　引言

在Ⅰ类复杂地层中钻探，会遇到保护孔壁、取心等困难问题。在Ⅱ类复杂地层中钻探，会遇到钻进、保护孔壁、取心等困难问题。在这两类地层中钻探，往往需要下套管护壁，方能完成钻探任务。结合目前钻探技术发展水平，对于大于 50m 孔深的Ⅱ类复杂地层、各种孔深的Ⅰ类复杂地层，提出采用冲击式金刚石取心跟管钻进技术，会大大提高钻探质量和效率。

冲击式金刚石取心跟管钻进技术，是钻具在同级套管下进行冲击回转钻进时为跟进套管创造必要的空间条件，以便套管靠其重力作用随钻孔加深向孔底延伸，利用套管随钻隔离保护孔壁；同时钻具又能通过套管内部实现起下钻工序。实现这种钻进方法，首先必须配备具有张敛性能的孔内跟管钻进器具，以满足在套管下面钻进和管内升降的技术要求；其次，根据复杂地层特点配备相适应的取心工具，确保岩心采取质量；此外针对复杂地层钻进岩心容易堵塞，配备液动冲击器，通过冲击回转钻进方式改善钻头碎岩效果，消除岩心堵塞和自磨现象，提高纯钻时间和回次长度，最终实现提高综合钻进效率和钻孔质量。因此，合理选择上述三种具有不同功能的器具并将其优化组合，是实现这种钻进方法的技术关键。

4.2　设计原则

（1）以国家电力公司成都勘测设计研究院地质勘探部门所采用的的钻探设备、技术和工艺为基础，钻进技术立足于安全实用的基本目的，本着优质高效和操作简便的基本原则，采取冲击回转跟管钻进的技术途径，主要解决钻孔垮塌和采集岩心等实际问题。同时着眼于这种技术的科技含量，提高复杂地层钻探技术水平，拓宽应用范围，为我国复杂地层钻探提供技术支持。

（2）采用冲击式金刚石取心跟管钻具。钻具所涉及的冲击器和取心钻具在国内均有比较成熟的技术，跟管钻具的研究也取得实质性突破，这些技术可供选择的器具较多，因此采取选择、改进和应用现有冲击器、跟管钻具和取心钻具的方法，将这些器具进行组合，组成冲击式金刚石取心跟管钻具。钻具中的各组成部件要求既能成龙配套，相辅相成，实现优势互补；又各自具有充分的独立性，以便根据施工现场的设备和钻孔具体情况调整工艺技术。

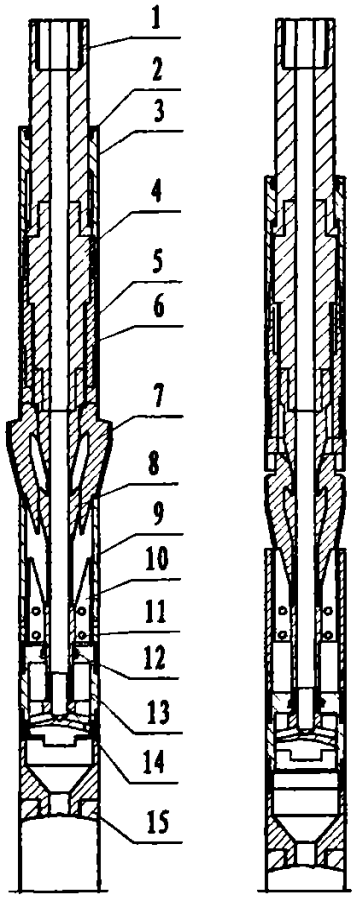
（3）在不影响综合钻进效率和钻孔质量前提下,最大限度缩短钻具的长度,避免长孔段裸孔钻进,充分发挥跟管钻进技术的优势。钻具长度（指扩孔变径处与普通取心钻头的距离）不得大于 3 米。

（4）钻具（具体指跟管钻具）应具备管下扩孔和扫孔功能，钻孔直径要求大于同级套管并能在套管内升降（满足起下钻条件）；钻具的张敛性能应绝对可靠，并有地面观察判断孔内钻具工作状态的功能；钻孔直径与导向孔直径的级差不得大于岩心钻探直径系列的一个级差，并满足相关标准，同时与水电勘测现行的钻探规范相吻合。

（5）采用以液体作为动力传递介质的冲击器，冲击器应满足：①直径与取心钻具匹配；②能在低固相泥浆环境下正常工作，技术性能稳定；③在额定冲击功前提下耗水量小，以减少顶漏钻进时的泥浆材料消耗[28]。

（6）沿用现有器具和管材,借助现行低固相泥浆或无固相冲洗液护壁技术支持。

（7）钻具结构简单，组配方便，工作可靠、寿命长。



1-内悬挂接头；2-O形圈；3-外悬挂接头；4-六方轴；5-六方套；6-厚管；7-扩孔钻头；8-张敛轴；9-钻头架；10-收敛爪；11-圆柱销；12-O形圈；13-振信阀座；14-振信阀；15-接头；16-取心钻具

图 4-1 跟管钻具结构

4.3 跟管钻具

4.3.1 钻具结构原理

探矿工艺所在跟管钻进技术方面进行了大量的研究，取得了多项科研成果。研制的 GJ 型扩孔张敛式跟管钻具采用机械楔顶式张敛原理，结构特点为：组合张敛式扩孔钻头对称分布并呈锥形，破碎岩石效果较好，并靠楔顶作用强制张开或收敛，可靠程度高；利用水力驱动扩孔钻头张开，提钻自动收敛，其张敛控制方法与常规钻进工艺的开泵送水、起下钻工序相吻合，钻具张开和收敛完全实现地面控制；钻具承压和承扭能力足于满足常规钻进要

求；两级钻头的同轴度好，导向和扶正相辅相成，不会造成钻孔弯曲。因此，本研究的跟管钻具仍然按 GJ 型跟管钻具的机械楔顶式张敛机构原理进行设计。

但是，由于原 GJ 型跟管钻具设计上本身的弱点，如没有排沙系统，钻具在泥沙多的地层易发生卡阻，产生张不开或收不拢的情况，所以跟管钻具必须进行改进重新设计。

跟管钻具结构原理如图 4-1 所示，主要由张敛轴总成和钻头架总成组成。其中，张敛轴总成由内悬挂接头 1、六方轴 4、装有收敛爪 10 的张敛轴 8 和报信阀 14 组成；钻头架总成由外悬挂接头 3（装有 O 形密封圈）、罩管 6、六方套、钻头架 9 和报信阀座（含 O 形密封圈）13 组成。组合张敛式扩孔钻头 7 装在（插入）钻头架 9 的的四个窗口内，由罩管 6 罩住其顶部，并由张敛轴（机构）控制张开和收敛。钻具有张开（钻进）和收敛（升降）两种工作状态；在张开状态下，钻具可在同级套管下钻进，钻孔直径比套管大，为套管随钻孔加深而延伸创造必要空间条件；升降（起下钻）时，钻具外径比套管小一个标准级别，能在管内自由升降。钻具除满足直接跟管钻进工艺外，还能在套管下进行扩孔接力跟管。

就其功能而言，上述结构除构成张敛机构外，还构成报信系统、悬挂机构、滑动到位承载系统和双通道水路。

4.3.2 钻具的改进

在复杂地层钻探工程施工中，经常遇到的地层是河床砂卵砾石、冰积、滑坡等堆积层、第四系覆盖层和断层破碎带等钻进困难的复杂地层，泥沙多，经常出现钻孔缩径、超径、卡钻等事故，针对这样的特点，我们对原 GJ 跟管钻具的扩孔钻头、泥浆泄漏量和悬挂等机构进行了改进，并增设了排沙系统。

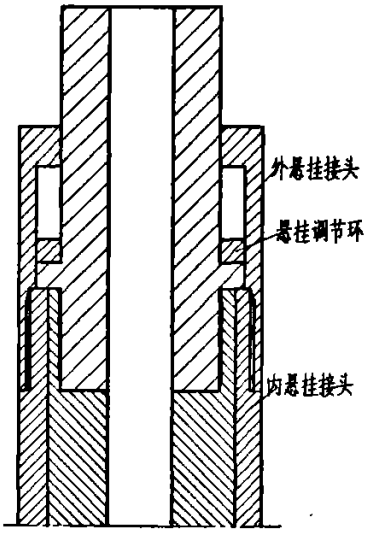


图 4-2 悬挂机构

（1）扩孔钻头的改进[29] [30]。就跟管钻进而言，钻具成孔直径（具体尺寸）是决定跟管效果的技术关键，尤其在复杂地层胶结性较差和钻孔经常出现缩径情况下，钻孔直径的大小跟管效果有很大的关系。跟管钻具的钻孔直径由钻具张开情况下的扩孔钻头直径决定，如果钻头直径较小，套管凭自身重力下降将比较困难，甚至借助吊锤打击都难以将套管打至预定孔深，无法达到预期跟管目的；在结构尺寸允许条件下，适当增

大扩孔钻头直径，可以使套管跟进比较容易，但是，若钻头直径太大，一方面钻具结构尺寸不允许，另一方面孔内套管活动空间较大，容易发生套管脱扣和断裂等孔内故障[31][32][33]。为此，采用两种直径的扩孔钻头在复杂地层进行实钻试验，得到表 4-1 的跟管钻进效果；标准型扩孔钻头因钻孔直径较小，常常因孔内探头石导致套管跟进阻力大，套管难以跟至预定孔深；加大型扩孔钻头套管跟进顺利，也未发生套管脱扣和断裂事故，所以在在原标准直径基础上将扩孔钻头直径加大 2～4 毫米。扩孔钻头胎体因形状复杂，碎岩任务较重，其金刚石层一般采用电镀方法制造[34][35][36][37][38][39][103]。

表 4-1 钻孔直径与跟管效果相关表

钻具	扩孔钻头直径			套管直径(mm)		地层	跟管效果
	张开(mm)	收敛 mm	标准(mm)	规格	外径		
GJ108	116	95	加大型	108	108	冰积和滑坡等堆积层	好
	112	91	标准型				阻力大
GJ89	94	75	加大型	89	89	强风化层	好
	92	73	标准型			河床堆积层	阻力大

（2）泥浆泄漏通道的改进。原钻具虽然设有泄漏通道，但主要通过更换密封圈调节泄漏量，这种方法受密封圈规格的制约，难以准确控制实际泄漏量。因此改由张敛轴与六方轴连接处的间隙（液体泄漏间隙）为主要泄漏通道，该间隙一般为 2-3 毫米,允许泥浆通过该间隙泄漏泵量的 10%的液体，用于冷却扩孔钻头，同时冲刷张敛机构的活动空间，避免颗粒物质滞留于此处。通过大量试验表明，泄漏通道的设置，即使在顶漏钻进时采用极限小的泵量，在满足扩孔钻头冷却和冲刷要求的同时，不会造成孔底钻头缺少必要的冷却液体。

（3）悬挂机构的改进。原跟管钻具理论上虽然由悬挂接头承担自身重力，但由于缺少有效的调配措施，在调配钻具时又强调钻头收敛充分，往往造成由张敛机构（薄弱环节为收敛爪）承受重力。这种受力方式尽管足以承受钻具自身重力，但在强力拔断岩心瞬间或孔底出现卡钻情况时，收敛爪难免超负荷工作，轻则产生塑性变形，重则折断，无论哪种情况发生，都直接影响扩孔钻头收敛失灵。针对这一技术缺陷，如图 4—2 所示，在悬挂腔增设调节圈，在满足扩孔钻头收敛到位的情况下，通过加减调节圈确保悬挂机构承受钻具重力，消除了收敛爪异常受力情况。原跟管钻具曾因卡钻导致收敛爪出现裂纹。增加调节圈后，跟管钻具跟管钻进近百米从未出现异常现象。

（4）增设除沙系统。钻进时孔内岩粉、泥沙和泥浆包裹体等颗粒物质难免从扩

孔钻头处侵入并滞留在钻具内部(张敛机构的活动空间),必然影响钻具的张敛性能。因此,在钻头架下部(距扩孔钻头窗口 100mm 处)均设 4 个 φ12 通孔。φ12 通孔、钻头架窗口、钻头架内腔和孔壁环状间隙构成开放性通道,形成除沙系统。钻进时,借助钻具高速回转产生的离心力,将从窗口处侵入的岩粉、泥沙、泥浆包裹体等颗粒物质从通孔排除,避免颗粒物质滞留在钻具内部。大量试验证明,未设排沙孔的钻具,时有因颗粒物质侵入严重影响张敛动作失灵的情况发生;增设排沙系统后,即使钻进沙层和在极限小泵量下钻进,从未出现过颗粒物质滞留钻具内部的情况,确保钻具张敛性能的可靠性。

4.3.3 主要技术参数

跟管钻具主要技术参数见表 4-2。

表 4-2 跟管钻具主要技术参数表

		Ø108 跟管钻具	Ø89 跟管钻具	说明
钻孔直径(mm)		110	91	
导向钻头		φ91 普双金刚石	φ75	
扩孔钻头	类型	四单元组合张敛式	四单元组合张敛式	电镀钻头
	张开直径(mm)	116	94	
	收敛直径(mm)	91	75	
张开报信压力(MPa)		2.0～2.5	1.0～1.5	可调
承压能力(kN)		20	18	
承扭能力(kN-m)		3.5	2.5	
套管规格(mm)		φ108	φ89	
泥浆类型		低固相、无固相	低固相、无固相	

4.4 液动冲击器

液动冲击器主要是为了解决Ⅴ级以上地层和打滑地层钻进效率低的问题。而复杂地层钻进的地层和工艺条件都十分恶劣,许多技术措施与冲击器要求的工作条件相矛盾,因此,必须根据钻进技术特征选择适宜的冲击器。国内现有液动冲击器种类很多,主要类型如表 4-3。比较表中各种冲击器,其中,YZ 型液动冲击器属阀式正作用,结构简单,能在低固相泥浆环境下工作,并且泵量和泵压都较小,启动容易,其钻进工艺条件与复杂地层钻进比较接近,基本满足复杂地层钻进的要求[40]。所以采用 YZ 液动冲击器作为组合式跟管钻具的冲击器具[41][42][43]。

表 4-3 国内主要液动冲击器及其技术参数

系列名称	型号	钻孔直径（mm）	外径（mm）	冲击功（J）	频率（Hz）	工作泵压（Mpa）	泵量.（m^3/min）	泥浆类型
YZ	YZ-73	75-76	73	7-40	22-40	0.5-1.7	0.06-0.14	清水或低固相泥浆
(正作用)	YZ-89	91-93	89	15-60	20-38	0.5-1.8	0.08-0.20	
TK	TK-75A	75	73	6-55	20-50	1.0-3.0	0.06-0.18	
(正作用)	TK-91A	91-110	91	7-70	7-70	1.5-3.5	0.09-0.20	
YS	YS-74	75-76	74	5-50	25-50	0.6-4.0	0.0.-0.12	
(双作用)	YS-89	91-93	89	18-85	25-40	0.5-2.5	0.07-0.15	
SC	JSC-75	75-110	73	39-69	13-25	1.5-2.0	0.12-0.2	
(射吸式)	SC-89	91-110	89	39-78	13-25	1.5-2.0	0.18-0.25	

YZ 冲击器主要技术参数见表 4-4 。

表 4-4 YZ 冲击器主要技术参数

	YZ-73 冲击器	YZ-89 冲击器
外径（mm）	73	89
钻孔直径（mm）	75、76	91、94
冲锤重（N）	88．2	147
冲锤行程（mm）	12；16	12；16
自由行程（mm）	4	4～5
锤簧预压（mm）	4～6	3～5
冲击频率（Hz）	22～40	20～38
冲击功（J）	7～40	15～60
工作泵量（m^3/min）	0．06～0．14	0．08～0．20
工作压力（Mpa）	0．5～0．17	0．5～1．8
长度（mm）	1300	1300
冲击器重（N）	294	490
冲洗介质	清水或低固相泥浆	

4.5 取心钻具

国内目前现有的金刚石取心钻具种类繁多，有普通单动双管、单管、孔底局部反循环、绳索取心等多种类型[44]，可供选择的品种很多。本技术针对地层特征，采用成都勘测设计院的 SD 型取心钻具，其技术参数见表 4-5。SD 钻具属单动双管类型；是针对水电勘测的地层特点（各种堆积层）和对岩心采取质量的高要求（采取率 85%），沿用普通单动双管钻具的基本结构原理而设计的专用取心钻具。该钻具具有良好的单动性能，并增设了沉沙系统以避免因泥沙堵塞泥浆通道造成岩心堵塞，在钻探生产中一般都能保证岩心采取质量；虽然有时岩心采取率达不到要求的情况，

但是因钻孔垮塌和掉块造成岩心堵塞所致，并非取心钻具原因造成。因此，只要解决施工期间频繁的钻孔垮塌和掉块技术难题，SD 取心钻具完全能够满足复杂地层钻探岩心采取质量的要求。本技术正是以跟管技术途径解决各种堆积层钻孔的护壁问题，从根本上消除孔壁不稳定因素，最大限度地减少孔壁垮塌和掉块现象，为采取岩心创造良好的环境，所以，SD 取心钻具不存在任何取心技术难题。

表 4-5 SD 取心钻具技术参数

钻具规格	钻具类型	钻孔直径 (mm)	岩心直径 (mm)	钻头规格	泥浆类型	取心效果
SD89	单动双管	94	68	φ94	SM 胶、低固相	好
SD73	单动双管	77	54	φ77		较好

4.6 冲击式金刚石取心跟管钻具

4.6.1 钻具规格和组合方法

根据岩心钻探标准和水电勘测钻探规范，结合成都水电勘测设计院现行的钻孔和管材系列，冲击式金刚石取心跟管钻具的规格制订为 φ108/φ89（简称 φ108）、φ89/φ73（简称 φ89）两种[46]。φ108 跟管钻具钻孔直径 116mm，钻具直径（升降时）94mm，可跟 φ108mm 套管，其套管是成勘院在复杂地层钻进中主要采用的直径系列，属跟管钻进技术的常用直径系列，直接用于跟管钻进。φ89 跟管钻具钻孔直径 94mm，钻具直径 77mm，岩心直径 54mm，可跟 φ89mm 的套管，也是常用直径系列[47]。

冲击式金刚石取心跟管钻具可采用如图 4-3 所示的两种组合方式，图 4-3（b）所示的组合方法为：自上而下为冲击器—跟管钻具—取心钻具。这种组合虽然扩孔钻头与普通取心钻头的

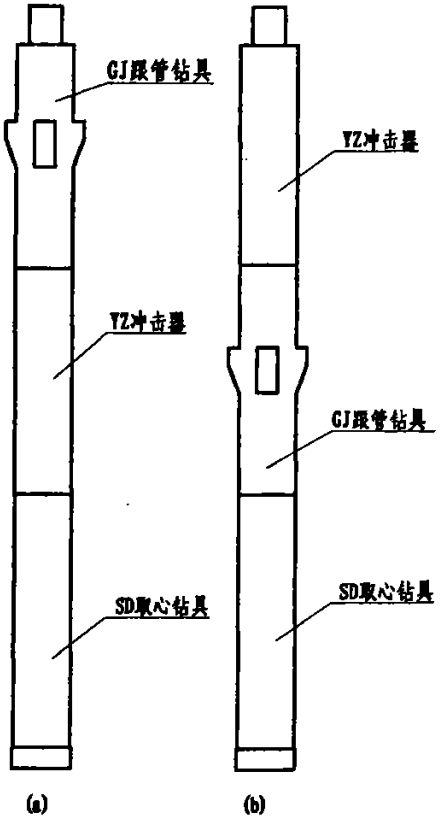


图 4-3 钻具组合示意图

长度较短，具有最大限度缩短钻孔裸露长度的优点；但由于冲击器距普通取心钻头较远，在传递冲击功的途中，跟管钻具的扩孔部分因距冲击器较近首先消耗了大部分冲击功，剩余的在长距离传递途中又被钻具吸收，最后传到普通取心钻头的冲击功已很小，难于发挥冲击碎岩效果，其结果无法实现冲击回转钻进目的[48]。图 4-3（a）组合方法是：跟管钻具—冲击器—取心钻具。这种组合的下部与普通冲击回转钻具相同，可充分发挥冲击回转钻进技术的优势；虽然因跟管钻具在冲击器上部扩孔部分不能产生冲击效果，但根据以往两级碎岩原理的碎岩效果试验和实践，扩孔部分面对岩石的破碎自由面比孔底岩石多，容易产生体积破碎效果，其碎岩速度始终超前普通钻头，不会出现滞后现象；扩孔部分虽然距普通钻头较长，增长（1 米左右）了钻孔裸露长度，就间隙跟管而言，只要借助泥浆护壁技术配合，负面影响不大。综合这两种组合方法优势和缺陷，采用图 4-3（a）组合方法配置冲击式金刚石跟管钻具[49] [50] [51]。

4.6.2 钻具主要技术参数

冲击式金刚石取心跟管钻具的技术参数见表 4-6。

表 4-6 冲击式金刚石取心跟管钻具主要技术参数

规格		φ89	φ108	备注
钻孔直径（mm）		94	116	
岩心直径（mm）		54	68	
跟进套管（mm）		89	108	
钻具直径（mm）	钻进状态	94	116	
	升降状态	77	94	
钻具张开报信压力（Mpa）		2．0～2．5	2．5～3．0	
报警压力（Mpa）		＞3.5	＞4.0	
钻头类型	扩孔钻头	94/77 组合张敛式	116/94 组合张敛式	电镀金刚石
	取心钻头	SD77	SD94	
取心钻具		SD 取心钻具	SD 取心钻具	
承压能力（kN）		18	20	
承受扭距（kN.m）		2.5	3.5	
冲击频率（Hz）		22～40	20～38	
单次冲击功（J）		7～40	15～60	
正常钻进工作泵压（Mpa）		0.5～1.7	0.5～1.8	
正常钻进工作泵量（m^3/min）		0.060.14	0.08～0.20	
钻具长度（mm）	总长	3500	3750	
	扩孔钻头与普通双钻头长	3000	3000	
泥浆类型		清水、无固相、低固相泥浆		

4.7 冲击式金刚石取心跟管钻进

4.7.1 设备和工具

钻机：钻进能力大于或等于 XY-2 型的立轴式钻机；

水泵：BW150 或 BW250 型（必须配备抗震压力表和 0.02 m^3 的空气包 ）

钻塔：有效高度大于或等于 10 米；

钻杆：Φ50mm 钻杆；

套管：Φ108mm（Φ108 钻具）、Φ89mm（Φ89 钻具）；

套管夹板：Φ108、Φ89；

搅拌机：0.3 m^3 或 0.6 m^3

泥浆：低固相泥浆或无固相冲洗液；

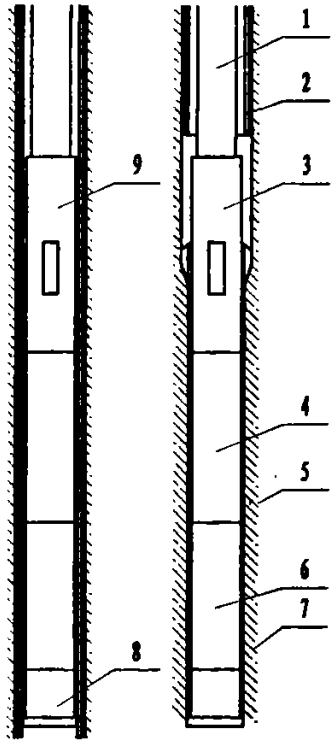
其他机具：一般钻探现场配备的常用机具。

4.7.2 钻具配置

冲击式金刚石取心跟管钻进采用冲击式金刚石取心跟管钻具（简称跟管钻具），钻具根据图 4-4（a）所示配置。其中扩孔钻头和普通取心钻头根据钻进工作量参考钻头使用寿命配备[52]。

4.7.3 跟管钻进原理

冲击回转钻进原理如图 4-4 所示，采用常规下钻方法将处于图 4-4（a）所示升降状态的跟管钻具通过同级套管下到孔底后，开泵送水便可利用水力作用使钻具在套管下张开至图 4-4（b）所示的钻进状态，此时可进行金刚石冲击回转钻进，钻孔直径与套管同级；钻进回次结束后开始提钻的瞬间，钻具凭重力自动收敛（复位）为图 4-4（a）的升降状态，钻具可通过套管提到地表；根据回次进尺长度加长套管并控制其向孔底延伸；下钻继续钻进。



a. 升降状态　　b. 钻进状态

1. φ50 mm钻杆　2. φ108mm套管
3. φ108钻具(张开直径116mm)
4. YZ液动冲击器　5. 孔壁
6. SD89取心钻具　7. 导向孔孔壁
8. SD94金刚石钻头
9. φ108钻具(收敛直径91mm)

图 4-4　跟管钻具原理图

4.7.4 操作规程

（1）孔口钻具张开报信试验和孔内钻具工作状态的判断

孔口试验：首次使用跟管钻具，应先在孔口作钻具张开报信试验，测定具体的报信压力值 Pm 和报警压力 Pb，以作为判断孔内钻具工作状态的依据。试验方法：a、报信压力测试：将钻具直接与钻机立轴连接，并保证钻具的扩孔钻头露出孔口，采用常用泥浆和常规泵量开泵送水，观察泵压表和扩孔钻头的变化情况，扩孔钻头张开时的稳定泵压就是钻具张开报信压力 Pm；b、报警压力测试：基本方法同 a，不同点在于在开泵前，用一与钻具同级的套管接头套住扩孔钻头，使钻头无张开的有效空间，开泵后，泵压升至 Pm 后仍继续上升至大于（Pb＞Pm+1.0）,即出现憋泵现象，即可视 Pb 为钻具不能张开（处于升降状态）的报警压力。

孔内钻具工作状态的判断：将钻具下到孔底（处于同级套管下）开泵送水后，当泵压上升到报信压力 Pm 并保持基本稳定，表明钻具张开呈钻进工作状态，可以进行扫孔和钻进；如果泵压大于 Pb（出现憋泵现象），说明钻具仍处于收敛状态，此时可活动钻具并观察泵压，憋泵现象仍不能解除，应提钻检查和排除钻具的张敛故障。

（2）换径造导向孔

为避免跟管钻进的钻孔与上部孔段错位，换用组合式跟管钻具之前，应先在 SD 取心钻具的上部加扶正管（与组合式跟管钻具同级的套管或岩心管），单独采用 SD 钻具钻进 2 米左右。然后采用组合式跟管钻具进行钻进。

（3）钻进规程参数

根据钻具的两级钻进原理，结合跟管钻进的特殊性，考虑到复杂地层软硬不均的特点，通过大量实钻试验总结出表 4-7 的钻进规程参数。具体使用时在保证合理钻速的前提下，尽量采用小规程。

表 4-7 冲击式金刚石取心跟管钻进规程参数

钻具规格	钻进方式	钻压 (kN)	转速 (r.p.m)	泵量 (m3/min)	泥浆类型	说明
Φ108	跟管钻进	8.0～15	300～400	0.09～0.12		具体参数根据地层调整
	扩孔接力跟管	3.0～6.0	200～300	0.06		
Φ89	跟管钻进	5.0～10	300～400	0.06～0.09		
	扩孔接力跟管	2.0～5.0	200～300	0.06		

（4）跟管工艺

① 跟管：跟管方法采用间歇式回次跟管。在提钻后，沿用常规下套管方法在孔口加长套管，控制孔内套管向孔底延伸。每次跟管按照下式计算套管所增加的长度

L(米)。

L=H-La-(b+1)

式中：

H—钻孔深度(米)；

La—孔内套管长度（米）；

b—组合跟管钻具的扩孔钻头与取心钻头间的距离 。

套管的丝扣要求缠麻和涂树脂胶，并采用大力矩扭紧。套管一般凭其重力便能自动下降，如遇阻力可用管钳搬动便可使套管顺利下降。套管下到预定孔深后，在孔口用套管夹板夹紧。

② 套管脱扣预防和处理[53][54][55][56]

为保证跟管钻进的连续进行，套管管脚与孔底（指导向孔和主孔的变径处）必须保持一定的距离；套管必然处于悬空状态，钻进时，钻杆回转的颤动作用导致套管具有脱扣的可能性。对此，除避免使用弯曲钻杆和采用合理的钻进规程参数等预防措施外，还应根据孔内具体情况采取相应的预防和处理技术。

A.采用反扣连接的套管

采用反扣套管进行跟管钻进,钻杆回转(正转)产生的颤动作用不仅消除了套管脱扣可能性,而且还具有拧紧套管的能力。这是跟管钻进技术预防套管脱扣的理想技术措施。

B.正扣套管回扣的预防

每钻进 4-6 回次或每次跟管时，借用短钻杆将套管直接下到孔底，合上立轴并采用极限低转速拧紧孔内套管柱，然后将套管提到孔口夹紧，恢复正常钻进。

C.套管脱扣处理方法

钻进时，一旦发现孔内出现异常响声或蹩车现象，应及时提钻和检查钻具磨损情况，如扩孔钻头的上部锥面出现磨损，表明孔内套管脱离，应立即进行处理。

直接对接法：根据孔深与孔内套管的长度差，用相应长度的钻杆连接孔口套管，然后将其慢慢下到脱落的套管顶端，用管钳对接上扣，确认对接无疑后，加力拧紧。最后将套管提到孔口夹紧，恢复正常钻进。这种方法在环状间隙较小情况下都能见效。

粗径钻具扶正导向对接处理法：直接对接法处理无效时，可先探明脱落套管深度，根据该深度，将粗径钻具下入孔内，利用其导向和扶正的作用将脱落套管和悬空套管扶正，然后直接人工对接，确认对接上后，加力拧紧，提出粗径钻具和夹紧套管，恢复钻进。

（5）操作注意事项

① 每回次下钻之前，必须严格检查钻具张敛动作是否灵活，水路是否畅通，以

及钻具的磨损情况，严禁将带故障的钻具下入孔内。

② 下钻时，必须将钻具（具体指扩孔钻头）下到套管以下的裸孔中才能开泵送水，严禁钻具在套管内开泵和回转钻具。如果出现操作疏漏，开泵后地面将出现憋泵报警信号，此时应关泵并提升钻具使其收敛，再把钻具下到套管下部，然后重开泵。

③ 提钻时如果钻具在套管脚受阻，转动钻杆便可解除阻力，严禁强力提拔。

④ 注意观察和判断孔内情况，一旦孔内出现异常情况、孔口套管出现跑管现象，立即停钻并检查和排除。

4.8 冲击式金刚石扩孔接力跟管钻进

接力跟管，是指在已经下入套管并换径钻进的钻孔，因遇到钻进故障需要将原套管加深。目前,其他钻进方法还无法实现这一特殊工艺，而采用跟管钻具可很容易进行扩孔接力跟管，这是跟管钻具在事故处理中的一种特殊用途。

4.8.1 钻具配置

扩孔接力跟管的钻具为：跟管钻具-导向钻具。其中，导向钻具用单管钻具，长度以 1.5～2.0 米为宜；也可采用常规 SD 取心钻具作为导向钻具。

4.8.2 操作规程

（1）孔口报信压力试验与孔内钻具工作状态的判断与 4.7.4（1）相同。

（2）扩孔工艺

将前期下入钻孔的套管拔离始扩位置 0.5～1.0 米，为跟管钻具的张开提供空间条件；将跟管钻具下到始扩位置与套管脚之间的裸露孔段；开泵送水使钻具张开，先采用小规程参数扩孔 0.2-0.4 米，在根据地层选择适宜的扩孔规程参数扩孔。

（3） 跟管

每当累计扩孔进尺 5～10 米，提钻及时加长套管，增加套管的长度 L（米）为：

$$L=Hk-La-1$$

式中：

Hk——扩孔孔深（米）；

La——孔内套管长度（米）。

（4）操作要领[57] [58]

① 每次下钻（包括加单根钻杆），均应准确将钻具（具体指扩孔钻头）下到扩孔位置与套管脚之间，确认无误后才能开泵；

② 需要倒杆时，严禁将钻具顶离扩孔位置，避免因钻具频繁张开和收敛增加不

必要的判断（钻具状态）以及造成失误；

③ 扩孔规程参数见表 5.1；

④ 为避免钻孔缩径和保证孔壁规则，扩孔速度不宜快（每小时控制在 2 米左右），并且维持匀速扩孔，尤其在软硬悬殊的地层应高度重视；

⑤ 每次提钻均应对钻具进行检查；

⑥ 扩孔时扩孔钻头以下的零部件处于空转，各连接部分必须拧紧。

4.9 生产试验情况

冲击式金刚石取心跟管钻进技术先后在四川狮子坪水电站 ZK38 钻孔和溪洛渡水电站 XH21 钻孔分别采用 Φ89 和 Φ108 两种规格跟管钻具进行了两轮生产试验，试验进尺 123.4 米，套管跟至最大孔深 142.45 米，岩心采取率 85%，取得了比较满意的跟管钻进技术效果。

4.9.1 狮子坪水电站试验情况

（1） 设备

钻机：XY-2 型（配 395 柴油机）；

钻杆：Φ50mm 钻杆；

钻塔：9 米木塔；

水泵：BW150 型（配 195 柴油机）；

试验钻具：Φ89 冲击式金刚石取心跟管钻具；

搅拌机：0.4m^3(自制)

冲洗液：SM 植物胶。

（2）地层情况

试验在国家电力公司成都勘测设计研究院 110 机组承担的 ZK38 孔中进行。该孔位于阿坝州理县大丘地乡的玛脑河河中心，水深 1～2 米，属于水上钻探。钻孔设计孔深为 150 米，终孔直径 Φ77mm，全孔采用 SM 植物胶无固相冲洗液。该孔地层复杂，0-90 米孔段为堆积覆盖层，堆积物由砂卵石、角砾岩和砂岩等岩石的漂石以及泥质充填物等组成，岩石松散且软硬悬殊，岩石极不完整，柱状岩心长度最长不超过 20cm，大部分呈碎石状（破碎）可钻性 2～8 级；孔内极易坍塌、掉块，全孔漏失，钻进和取心都非常困难。 90-150 米为板状页岩，岩石完整，可钻性 5～6 级。

（3）试验情况

试验于 1999 年 4 月 1 日至 4 月 25 日在钻孔的 67.98～98.28 米孔段进行。钻孔结构见表 4-1。试验进尺 30.3 米，共钻进 34 个回次，纯钻进时间 25.5 小时，时效为 1.19 米/小时，下 Φ89 套管 25 根，共计 91.98 米。

钻进技术参数：转速一般为 535r/min（6 速），个别为 5 速；钻压一般为 5.0kN[18]；冲洗液量为 32-60L/min。

通过试验，该钻具成功地解决了孔段 67.98 米至 98.28 米河床堆积层孔壁坍塌和掉块等技术难题。同时避免了孔内放炮造成的一系列不规范操作所带来的孔内事故。在该孔 50 米处未使用该钻具之前，为了跟管曾出现放炮炸破套管管脚事故，处理该事故花费了两个班的时间，造成了一定的经济损失。经统计该孔在 0-67.98 米之间共放炮十多次，而在 67.98-98.28 米孔段使用该钻具后，没放一次炮,使 Φ89 套管顺利地跟至 91.98 米基岩处。

表 4-8 ZK38 钻孔跟管情况

钻具型号规格	钻孔深度（m）	下管方法	套管规格	套管深度（m）
Φ130 合金钻进	0-11.65	放炮跟管	Φ6"	8.03
Φ110 合金钻进	11.65～43.02	放炮跟管	127mm	40.15
Φ94SD 钻具钻进	43.02～67.98	放炮跟管	Φ108mm	56.26
Φ91 跟管钻具 SD77 取心钻具	67.98～98.28	同径跟管	Φ89mm	91.98
Φ77SD 钻具钻进	98.28～150	裸孔		

由于我们设计的扩孔钻头外径只有Φ92,加上在Φ94 变径到Φ77 时未采用钻进扶正器，造成钻孔小眼和大眼不同心，在下套管的过程中需要用吊锤拍打才能下入套管，有一定阻力。

4.9.2 溪洛渡水电站试验情况

（1）设备

钻机：XY-2 型（395 柴油机）；

水泵：BW-150 型（195 柴油机）；

钻塔：四脚铁塔，塔高 9 米；

钻杆：Φ50mm 钻杆；

试验钻具：Φ108 冲击式金刚石取心跟管钻具；

泥浆：SM 植物胶、瓜尔胶无固相冲洗液。

（2）地层情况

该孔设计孔深为 175 米，终孔直径为 Φ77mm。地层 0～130 米为第四纪堆积层；其中上部为洪积的碎石土层，中部为冰积、冰水积的漂卵石层，下部为宣威组地滑堆积，岩石胶结性很差，松散且破碎，岩石软硬不均可钻性 2～8 级，全孔漏失。130～

150 米为宣威组砂岩、铝土质粘土岩，岩石完整，可钻性 6～8 级。

（3）试验过程及跟管情况

试验于 1999 年 11 月 1 日至 1999 年 12 月 10 日在溪洛渡水电站左岸开关站（四川雷波县白铁坝乡）XH21 钻孔进行。 试验孔段 52.1-145.2 米，从 61 回次至 202 回次，总共钻进 142 个回次共进尺 93.1 米，纯钻进时间 80.7 小时，时效 1.15 米/小时，下 Φ108 套管 43 根，共计 142.45 米（孔深）。

钻进技术参数：转速一般为 4-5 速，少数为 6 速（535r/min）；钻压为 5.0KN 左右；泵量为 32-60L/min。

该钻孔处于滑坡带地层，覆盖层较厚，特别是在冰积、冰水积的漂卵石层中填充物较少，在钻进过程中特别容易坍塌、掉块，而且全孔不返水。在这种恶劣的条件下，采用冲击式金刚石取心跟管 Φ108 钻具成功地通过了该地层。

我们加大了扩孔副钻头的外径尺寸（Φ116mm），使得所扩得的钻孔比套管外径大 8 毫米，成功地解决了下管过程中的阻力问题，非常顺利地随钻延伸套管长度，有效地阻止了孔壁坍塌、掉块现象的发生，保护了孔壁的完整。

由于该孔全孔不返水,孔内沉砂较多,曾经出现两次钻具水路被岩粉及砂子堵死,造成水路不通现象,通过提钻清洗水路后下钻都能顺利地钻进。另外由于现场使用的 Φ50mm 钻杆全部弯曲,在钻进过程中曾经使套管松扣至脱落两次,提钻后直接下放套管并拧紧套管丝扣即可。后来随着孔深增加,钻具重量增加,减压钻进中把钻杆拉直后,未出现套管脱扣现象。钻孔结构及下管情况见表 4-9。

4.9.3 试验结果及分析

通过两轮两种规格 170 多个回次的试验，冲击式金刚石取心跟管钻进经受了严峻的考验，取得了较好的跟管钻进技术效果和经济效果。

（1）跟管钻具设计结构合理、组配科学

① 跟管钻具张敛动作灵活可靠，未出现扩孔钻头张不开和收不拢的情况。试验累计进行 176 回次，钻具张开成功率 100%，提升钻具（收敛）成功率达到 100%。

② 钻具张开报信可靠，报信泵压醒目，钻具张开遇阻报警及时准确，能防止错误操作。生产试验中从没有出现因报信故障而导致错误操作的情况。正常钻进时，钻具张开状态的稳定由钻进压力保持，泵压便由张开报信压力降为正常钻进泵压。另外钻具只有在张开情况下其钻井液通道才开启，故孔口返水是钻具张开报信判断的验证措施。

③ 钻具承压传扭能力大，满足复杂地层钻进工艺要求。在承压传扭系统中，除钻头架结构形状特殊外，其他零部件的有关结构形状及尺寸和常规钻具大致相同，具有足够的承压传扭能力。相对而言，钻头架是钻具承压传扭的薄弱环节，然而因

其结构设计合理，抗压刚度和抗扭强度都比下部的岩心管大,故能够承受比岩心管大的钻进压力和扭矩。

表 4-9 XH21 钻孔跟管情况

钻具类型及规格	钻孔深度(m)	下管方法	套管规格	套管长度 m
Φ110 合金单管	0-5.9	吊锤敲打	Φ6"	5.88
Φ110 合金单管	5.9-43.65			
Φ130 合金扩孔	0-43.65	直接下管	Φ127	43.65
Φ94 合金单管	43.65-46.85	放炮下管	Φ127	46.42
Φ94SD 金刚石	46.85-49.4	放炮下管	Φ127	48.9
Φ94SD 金刚石	49.4-52.1			
Φ108 跟管钻具	52.1 -52.62	放炮下管	Φ127	49.5
Φ108 跟管钻具	52.62-58.22	放炮下管	Φ127	54.08
Φ108 跟管钻具	58.22-61.1	放炮下管	Φ127	58.9
Φ108 跟管钻具	61.1-67.5	直接加管	Φ108	63.9
Φ108 跟管钻具	67.5-71.45	直接加管	Φ108	66.2
Φ108 跟管钻具	71.45-72.85	直接加管	Φ108	69.25
Φ108 跟管钻具	72.85-75.7	直接加管	Φ108	71.63
Φ108 跟管钻具	75.7-78.33	直接加管	Φ108	73.53
Φ108 跟管钻具	78.33-80.84	直接加管	Φ108	76.61
Φ108 跟管钻具	80.84-84.15	直接加管	Φ108	79.7
Φ108 跟管钻具	84.15-86.91	直接加管	Φ108	82.95
Φ108 跟管钻具	86.91-90.91	直接加管	Φ108	86.35
Φ108 跟管钻具	90.91-93.71	直接加管	Φ108	89.15
Φ108 跟管钻具	93.71-97.83	直接加管	Φ108	93.15
Φ108 跟管钻具	97.83-100.41	直接加管	Φ108	96
Φ108 跟管钻具	100.41-104.52	直接加管	Φ108	100.1
Φ108 跟管钻具	104.52-107.15	直接加管	Φ108	102.9
Φ108 跟管钻具	107.15-111.1	直接加管	Φ108	106.5
Φ108 跟管钻具	111.1-113.05	直接加管	Φ108	108.75
Φ108 跟管钻具	113.05-116.65	直接加管	Φ108	112
Φ108 跟管钻具	116.65-119.93	直接加管	Φ108	115.1
Φ108 跟管钻具	119.93-121.93	直接加管	Φ108	117.8
Φ108 跟管钻具	121.93-123.08	直接加管	Φ108	118.9
Φ108 跟管钻具	123.08-126.08	直接加管	Φ108	122.07
Φ108 跟管钻具	126.08-129	直接加管	Φ108	125.1
Φ108 跟管钻具	129-132.02	直接加管	Φ108	128.2
Φ108 跟管钻具	132.02-135.6	直接加管	Φ108	131.22
Φ108 跟管钻具	135.6-139.6	直接加管	Φ108	134.2
Φ108 跟管钻具	139.6-145.2	直接加管	Φ108	142.45
Φ108 跟管钻具	145.2-终孔	裸孔		

④ 悬挂机构、传扭副和移动到位承压副设计合理，保证张敛轴不承压钻压、拉力和扭矩作用。悬挂机构的两悬挂面，可以通过调节张敛轴同六方轴的螺丝连接长度使它们在收敛状态下呈密和接触，以承受提升钻具时的拉力；承压副的两端面在张开状态下，呈密和接触，直接承受压力，传扭副直接传递全部回转扭矩，因此，不管在任何状态下，张敛轴都不承受压力。

⑤ 钻井液通道设计合理，主通道过水能力强，不会给使用液动冲击器带来障碍；副通道的设置，不会影响导向钻头正常钻进时的冲洗和排粉。

⑥ 排砂系统自净效果好，能够有效防止砂粉沉淀在钻头架内部。在176钻进回次中，从未出现砂粉沉淀现象。

⑦ 液动冲击器选择合理、工作性能稳定、可靠。

（2）跟管技术效果好

跟管工艺可行，跟管技术效果好，能凭借跟进的套管隔离孔壁，解决复杂地层钻孔施工中孔壁垮塌、掉块等困难。

钻具凭借扩孔钻头张开，实现在套管下部钻进，钻孔直径至少比套管大6-8mm；凭靠扩孔钻头收敛，实现钻具在套管内升降。从而可以在地面控制套管向孔底延伸，实现跟管钻进。在整个试验过程中，下放套管方便可行，所遇孔壁阻力很小，大多数回次只要连接好套管直接下放或晃动套管即可，仅个别回次需用吊锤轻轻敲打。

（3）经济效益明显

冲击式金刚石取心跟管钻进技术在试验中已取得明显的经济效果，表4-10是两种跟管方法的主要技术经济效果对比：

表4-10　技术经济效果对比表

钻进方法	冲击式金刚石取心跟管钻进（xh21孔为例）	放炮锤击跟管钻进（xh20孔为例）
钻孔施工周期（月）	1.5(孔深175米)	3.0(孔深135米)
台月效率(米/台月)	114	45
岩心采取率(%)	>85	<80
孔内事故	无	经常卡钻、埋钻
套管层数	3	5
终孔直径（mm）	94	56

① 减少孔内事故，降低材料消耗，提高钻进效率，降低钻探成本。据统计，未使用跟管钻具之前，现112机组（原316机组）在XH21孔附近200米左右施工的XH20钻孔,其地层情况与试验孔xh21相同，都处滑坡堆积层、冰积和冰水积的覆盖地层，设计孔深为120米（实际钻进135米），钻进设备也一样，施工时间长达3个月之久，比试验钻孔多一倍的时间；且一共下了Φ168mm、Φ127mm、Φ108mm、

Φ89mm、Φ73mm 五层套管，最终以 Φ56 mm 终孔，其管材和钻头以及其它材料的消耗可想而知；而岩心采取率在覆盖层仅达到 70%。试验孔仅花 1.5 月的时间，只下了三层套管，并确保终孔直径大于 Φ77 mm（实际终孔直径 Φ94 mm）。

② 简化钻孔结构。采用冲击式金刚石取心跟管钻进技术可以下入任意长度的某一级套管，减少下入小一级套管的可能。试验孔 XH21 孔用跟管钻具钻进下入 Φ108 mm 套管直接到基岩处，Φ108 mm 套管总长 142.45 米。如果采用放炮跟管的话，至少还需要下一层 Φ89 mm 的套管。缩短了钻孔施工周期和大幅度降低了材料消耗，经济效益较显著。

③ 可处理预想不到的孔内事故。当下入某一级套管到某一完整地层后，用常规钻具继续钻进发现下面地层仍然处于破碎带，而又不可能下入小一级套管，这时候就可以把所下入的套管提离变径处 1 米左右，下入同一级的跟管钻具对套管下面的钻孔进行扩孔，继续下放套管封住破碎层。

（4）钻孔质量好

钻孔质量好，岩心采取率和取心质量达到设计要求。经水文地质人员鉴定，两个试验孔的岩心采取率都超过 85%，岩心质量较好，提供了较为准确的地质资料，两个钻孔都被评为优质孔。

（5）操作简单,易于推广应用

4.10 本章结论

（1）开展了冲击式金刚石取心跟管钻进技术的研究和开发。经过调研、设计、加工、现场试验工作，在原有的 GJ 型扩孔张敛式跟管钻具的基础上，研究开发了冲击式金刚石取芯跟管钻进技术。该技术特点为：

① 组合张敛式扩孔钻头对称分布并呈锥形，破碎岩石效果较好，张开或收敛可靠；特别是加大型扩孔钻头套管跟进顺利；

② 钻具承压和承扭能力足以满足常规钻进要求；

③ 两级钻头的同轴度好，导向和扶正相辅相成，不会造成钻孔弯曲；

④ 泄漏通道的设置在满足扩孔钻头冷却和冲刷要求的同时，不会造成孔底钻头缺少必要的冷却液体；

⑤ 在悬挂腔设计了调节圈，在满足扩孔钻头收敛到位的情况下，通过加减调节圈确保悬挂机构承受钻具重力，消除了收敛爪异常受力情况；

⑥ 设计了排沙系统，避免颗粒物质滞留钻具内部，确保钻具张敛性能的可靠性。

冲击式金刚石取心跟管钻进方法适合在复杂地层钻探，其技术效果和经济效益显著。

（2）研制的冲击式金刚石取心跟管钻具结构合理，确定钻进规程的方法合理可行。采用冲击式金刚石取心跟管钻进方法在复杂地层钻探，可减少孔内事故，降低材料消耗，提高钻进效率；简化钻孔结构；为处理预想不到的孔内事故提供条件。

（3）由于冲击式金刚石取心跟管钻进方法中的潜孔锤是液动潜孔锤，其冲击功没有空气潜孔锤大等原因，在浅部（如深 50m 内）Ⅱ类复杂地层中钻探，这种钻进方法的钻进效率低于空气潜孔锤取心跟管钻进方法。

第 5 章　气动潜孔锤跟管钻进成孔技术

云南小湾电站是在新世纪水电开发序幕拉开之后第一个装机容量超过 4000 MW 的特大型水电站。小湾水电站为特大型水利枢纽工程，其双曲拱坝最大坝高 292m，是世界上已建、在建的最高混凝土拱坝。为了大坝浇筑，在两岸修建了缆机系统，左岸高缆平台高程 1380m，右岸高缆平台高程 1365m。坝址区两岸山体陡峻，地质条件复杂，特别是左右岸堆积体的分布和强卸荷裂隙发育带及卸荷裂隙发育带的广泛分布，严重影响了两岸坝肩及缆机基础边坡开挖的稳定。鉴于两岸边坡支护难度大，特别是堆积体锚索的施工难度，严重影响边坡支护和开挖工程施工进度，为此针对对小湾堆积体锚索孔成孔难题进行气动潜孔锤跟管钻进技术的专题研究，显的很有必要和巨大的现实意义。该技术的针对性主要内容包括堆积体锚索孔成孔工艺研究、锚固钻机的选择与改进、跟管钻具的研制与改进等。

5.1　小湾电站工程地质条件及支护设计概况

小湾水电站位于云南省大理州南涧县与临沧地区凤庆县交界的澜沧江中游河段，电站以发电为主，兼有防洪、灌溉、拦沙及航运等综合利用效益的特大型水利枢纽工程。枢纽由混凝土双曲拱坝、坝后水垫塘及二道坝、左岸泄洪洞和右岸引水发电系统组成。最大坝高 292 m，总库容 149 亿立方米，电站总装机容量 4200 MW。电站控制性工期为 2002 年元月开工，2005 年 11 月大江截流，2010 年底首台机组发电，2012 年底全部机组投产发电，工程竣工。

小湾电站坝址地处深山峡谷之中，两岸山势陡峻，河谷深切，坝址区河谷低于两岸山顶达 1000 m 以上，缆机基础及坝基开挖形成的高边坡，在左岸从山梁顶部开口线至大坝建基面高程差 687 m，右岸也有近 600 m，这在全国乃至全世界都是罕见的。由于小湾边坡连续开挖高度达 600 余米，而边坡地层的地质条件复杂，地下水位高，为了满足开挖边坡施工期和运行期的稳定，工程设计中采用了大量的岩土锚固支护措施，锚索数量达到 10000 束以上，钻进延米将超过 30 万米，另有 3～4 万米排水孔和超过 100 万米的系统锚杆。高边坡问题是小湾水电站最突出、最重要的重大工程技术问题，做好高边坡的开挖和支护是小湾水电站建设成功的关键。

小湾电站锚固和支护工程地形陡峻、地层情况十分复杂。岩层主要为中深变质岩系的黑云母花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩。对锚固施工不利的地层主要有两大类：其一为坝址上游两岸规模较大的崩塌堆积体，即为Ⅱ类复杂地层；其二为受构造、风化卸荷作用影响而破碎的基岩，即为Ⅰ类复杂地层。岩石的复杂性在水电站施工

中在全国乃至全世界都是罕见的。

① 堆积体：小湾电站的堆积体在左右两岸都有，物质组成主要为块石、特大孤石夹碎石土、碎石层或砂壤土。特大孤石直径一般为 2 m～5 m，最大可达 9 m；块石直径 0.2～0.8 m，最大可达 1.0 m；特大孤石、块石、碎石母岩为黑云母花岗岩，呈弱、微风化状态，强风化较少。碎石土、碎石层及砂壤土主要填充在大孤石和块石之间。堆积体有相当部分地段较为松散，并伴有较普遍的架空现象，堆积体铅直厚度一般为 30～40 m，最深 60 多米，平均深度 30 多米。其中：

左岸饮水沟堆积体：分布在左岸饮水沟至 2 号山梁山脊之间，其平面呈“舌形”，平均坡度 32o～35o。堆积体前缘高程约在 1130m，后缘高程约在 1600m，宽约 80～200m。前缘 1130m 以下基岩出露，地形陡峻，河谷岸边地段直立，高程 1610m 以上地形平缓。一般铅直厚度 30～37m，最大 63.63m，平均为 35m，其物理成分主要为块石、孤石夹碎石质碎石层和沙壤土。堆积体组成结构松散，并存在块石架空现象。

右岸大椿树沟堆积体：分布在右岸大椿树沟，主要沿 F7 断层附近呈窄条形。堆积体前缘高约在 1170m，后缘高程约在 1620m，宽度约 80～100m。大椿树沟堆积体铅直厚度一般为 9.6～38.8m，最厚可达 50.70m。其成分主要为碎石粉土夹块石、孤石，中等密实。块石直径一般为 30～60cm，最大 5m。碎石、块石、孤石含量约占 80%，粉土约占 20%。

② 基岩：坝址地段岩体风化的表层均匀风化为主，夹层风化不明显。受岩性构造和地形控制，两岸强风化岩体底界埋深（铅直）一般为 10～20m，右岸局部可达 26 m；弱风化岩体底界埋深一般为 40～50 m，局部可达 70～88 m。两岸山坡岩体在卸荷作用下，卸荷裂隙发育。受陡倾的卸荷张拉裂隙和顺坡的中缓倾角剪切裂隙的影响，在强卸荷带，二组裂隙张开度大，一般大于 2 cm，有泥、岩屑、岩块充填或架空，且松动和变位错落明显。在卸荷带，两组裂隙张开度一般为 0.2 cm～2 cm，局部可达 20～30 cm。

坝址区两岸岩体风化深度(铅直)，强风化一般为 10～20m，右岸局部可达 26m，弱风化岩体底界埋深一般为 40～50m，局部可达 70～88m，河床部位一般为 23～31.5m。

坝址区河谷深切，相对高差达 1000 余米，岸坡陡峻，两岸山坡岩体形成顺坡倾斜的中缓倾角剪切裂隙和陡倾角卸荷张拉裂隙。

③ 岸边剪切带：岸坡形成过程中，在临空面附近的坡体内形成平行坡面的剪切应力集中带，使岸坡形成与坡面近平行的剪切裂隙，称为岸边剪切裂隙。由于它常呈带状出现，因此又称为岸边剪切带(简称剪切带)。剪切带内，剪切破裂面间距大小不等，一般 0.5～5.0cm，岩体被切割成薄片状、薄板状或碎块状。剪切裂隙面平直、粗糙，顺坡倾斜，倾角一般在 30°～45°，个别倾角 50°左右。

河谷下切过程中，靠近岸坡表部的岩体由于失去约束，向临空面产生卸荷回弹，因而形成卸荷张拉裂隙，卸荷张拉裂隙多沿陡倾角节理(主要沿 SN 向陡倾角节理)产生，在冲沟两侧沿近 EW 向陡倾节理产生，在空间上它们常与中缓倾角剪切裂隙呈阶梯状组合。

④ 卸荷带：根据卸荷裂隙发育的强弱及卸荷作用以及卸荷作用对岩体结构的影响程度，将卸荷岩体化分为强卸荷裂隙发育带和卸荷裂隙发育带，简称强卸荷带和卸荷带。

⑤ 蚀变带：高温热液沿岩体中的裂隙运动，产生交代变质作用，引起物质组分的交换，使原岩发生蚀变。蚀变后的岩体强度大部分有明显降低。坝址地段分布有规模较大的蚀变带有 4 条，左岸 E8，右岸有 E1、E4、E5。

⑥ 断层：经勘测查明，坝基及抗力岩体地段无 I 级断层分布，II 级断层仅有 F7，III级断层主要有 F3、F11、F10、F5、F20 等 5 条。

F7 断层在坝前右岸大椿树沟至左岸饮水沟一线通过，与坝踵之间最近距离约 50m，总体产状近 EW，N∠74°～90°，断层面呈舒缓波状，沿走向和倾向产状均有变化，局部倾角仅 45°～50°，有时反倾.其破碎带总宽 18.6～37m，其中主裂带宽度一般为 0.8～2.5m，主要由灰白色断层泥和泥化糜棱岩组成，部分地段发育有两个主裂带。

F11 在坝基下游通过，左岸在高程 1130m 以上近邻坝址通过，在高程 1200m 以上斜穿坝基。总体产状为 N80°～90°W，NE∠80～90。

F10 主要发育在右岸 1200m 以上地段，在坝基下游通过，距右岸高程 1150m 以上坝址约 40～55m。总体产状为 N80～90W，NE∠75°～90°。

F5 位于坝基下游地段，距右坝端约 125m，距左坝端约 280m，地貌上沿 F5 形成冲沟或山坳。总体产状为 N80～90W，NE∠70°～90°。

F20 总体产状为 N10°～20°E，⊥。分布在左岸坝基下游的 F11 和 F5 之间。破碎带由节理密集带和宽度数厘米的小断层、挤压面构成，是坝址地段唯一 SN 走向的三级断层。

F3 总体产状为 EW，NE∠80°，破碎带宽约 1.5m，属 F7 派生构造，分布在右岸 F7 与坝基之间，距坝基最近距离约 70～80m。

由于地质条件差，断层裂隙发育，再者大部分开挖边坡开挖坡度较陡，边坡开挖稳定性差，设计采用了大量的锚索、锚杆等进行支护。

左、右岸缆机基础及 1000m 以上坝基开挖、支护和相关工程的开挖及支护主要工程量如下表 5-1。

表 5-1　左、右岸 1000m 以上开挖支护主要工程量表

项目 / 部位	土石方开挖 (万方)	预应力锚索（束）					系统锚杆 (根)	喷砼 (m^3)
		100t	180t	300t	600t	合计		
右岸	776.5	1513	371	5081	155	7120	107216	61182
左岸	780.0	1832		1240		3072	93585	69534
合计	1556.5	3345	371	6321	155	10192	200801	130716

5.2　现有潜孔锤跟管钻进技术应用效果

5.2.1　应用气动潜孔锤跟管钻进技术

由于小湾电站岩层地质情况十分复杂，存在Ⅰ类、Ⅱ类复杂地层，岩石矿物硬度高、岩石破碎，锚索成孔中主要存在钻进碎岩、护壁困难。因此，确定采用气动潜孔锤跟管钻进技术成孔。

潜孔锤是一种用压缩空气为动力的冲击锤，全称应为气动冲击器，由于在钻进中，均是在孔下工作，所以俗称为潜孔锤。潜孔锤钻进是用联接在钻头或岩心管上的潜孔锤对钻具施加一定压力下并同时回转，予钻头以高频冲击能量，进行孔底冲击回转钻进。在冲击载荷下，岩石发生体积破碎。这种方法比一般回转钻进效率高，孔内事故少，工程成本低。根据岩石破碎的弹性理论，在一定预压下的岩石冲击破碎强度要比无预压情况下低 50～80%左右。潜孔锤钻进比无预压下的钢丝绳冲击钻进效率高 3～5 倍以上。在能量利用上，风动潜孔锤比液动潜孔锤更合理些。因为液动潜孔锤是用水排除岩屑，在钻头与岩石间形成一“水垫”吸收了部分冲击能量。所以风动潜孔锤比液动潜孔锤的钻进速度高 10～30%。因此，确定采用气动潜孔锤钻进成孔解决钻进碎岩困难问题。

潜孔锤跟管钻进技术是潜孔锤钻进技术的发展基础上，在架空、坍塌严重的地层进行钻进时，孔壁容易发生坍塌，为了护壁问题，人们发明了潜孔锤跟管钻进技术。其基本的思路是在钻进过程中，同步跟进套管，利用套管解决解决孔壁坍塌的问题。

潜孔锤跟管钻进技术 20 世纪 70 年代开始在国外开始应用，瑞典 Atlas Copco 公司的 Odex 钻进法，德国斯坦威克公司的海王星和土星法是早期跟管钻进的代表[61]。

卵砾石层 Odex(偏心跟管钻进)钻进法首先在瑞典阿特拉斯科普柯(Atlas Copco)研制使用，其钻进效率可达 20 m/h[62]。国内，中国地质科学院探矿工艺研究所也研制有该类跟管钻具，在锚固孔、注浆孔等工程施工中被广泛使用。它的工作原理是

在潜孔锤的下端加接偏心钻具（偏心钻头、导正器等），钻进时，顺时针方向旋转，偏心钻头从中心偏离出来，钻出的孔径大于套管外径，套管伴随钻头的前进而随之下降，即实现跟管钻进；提钻时，钻具逆时针方向旋转，偏心钻头向中心收拢，即可通过套管而提出孔外[63]。

德国斯坦威克公司为了更有效地发挥潜孔锤钻进卵砾石层的优势，在瑞典 Odex 钻进法的基础上，研制出双回转跟管钻进法（土星法和海王星法）。钻进时由两个动力头分别驱动钻杆和护壁套管，使用偏心钻头，使之边钻进边跟管护孔；在提钻时，钻头收拢，不受套管的阻碍，能顺利地把钻头提出。

我国的气动潜孔锤跟管钻进技术始于上个世纪 80 年代，以中国地质科学院探矿工艺研究承担的原地质矿产部“七五”重点科技攻关项目“多工艺空气钻进”课题之一为标志，开始潜孔锤跟管钻进技术研究。该项目于 1991 年通过部级鉴定，从此，国内开始了潜孔锤跟管钻进技术的实际应用。中国地质科学院探矿工艺研究所从 80 年代开始跟管钻进技术研究研究以来，经大量的工作，该技术 90 年代开始在国内推广应用，目前该技术应用较多，当然也仍然存在一些问题。因此，确定采用气动潜孔锤跟管钻进成孔解决钻进碎岩、护壁困难问题。

在针对该工程的地层特点进行气动潜孔锤跟管钻进技术的研究开发前，采用原有工艺技术和如表 5-2 设备机具施工了 40 个锚索孔，但施工效果十分不理想。

表 5-2　设备机具

锚固钻机	YG-80 型	互特 HBR202TFA
套管	φ168mm×10mm	φ146mm×10mm
冲击器	QCW150	SHB150/3
管靴	φ172mm（外径）	无管靴
钻杆	φ89mm	φ65mm
拔管机	TX60 型	起拔能力 85t
空压机	英格索兰 VHP700E/20m³ 空压机：阿特拉斯	英格索兰 XHP750E/21m³

5.2.2　原有常规气动潜孔锤跟管钻进技术存在的问题

岩石锚索多采用常规风动潜孔锤施工成孔的方法，由于地层岩体风化破碎，裂隙孔洞多，在钻进过程中频繁发生孔间、排间大范围长距离跑风、漏气和塌孔现象。为了解决成孔而采取反复固壁灌浆，多次扫孔成孔；对大裂隙、空洞采取堵、灌相结合的方法完成锚索孔的成孔施工。这样，既加大了施工成本，又严重的拖后了锚索施工工期[64]。

在缆机基础 1465m 以上下游边坡 A 区 1467m 第 14#孔钻进到 15m 至 20m 遇岩

石破碎带，29～33m遇松散岩体，40～50m为黄土夹碎石，6月17日卡钻，6月24日才拔出；

1471m高程第12#孔6月20日开钻，钻至27m出现孔内不返风现象，停机进行固壁灌浆，扫孔后钻进至45m又遇土夹石卡钻，拔出后再进行固壁灌浆。

A区10#、18#、21#孔进行了6次固壁灌浆，9#、12#孔进行了5次固壁灌浆，6#、13#、17#孔进行了3次固壁灌浆，11#、6#孔进行了一次固壁灌浆，11孔共灌注水泥179.93吨，平均每孔15.34吨，最大的10#孔6次共灌注水泥达35.32吨。

B区钻孔过程中，通过孔内摄像，看到6#孔钻至4m、8.64m、10.56、m13.46m时分别遇到0.5m、0.25m、0.3m、1.0m宽的裂隙、空洞和破碎带，10#孔钻至4m、8m、13.5、17m时遇到1.3m、0.9m、0.4m、0.4m宽的裂隙破碎带。21个孔固壁灌浆总灌注水泥138.7吨，平均6.6吨，最大的11#孔7次固壁灌浆共灌注水泥23.8吨。

另外，在凤小路、高缆运行路、低缆边坡锚索施工都同样存在钻孔难、灌浆难的问题。岩锚钻孔由于岩石破碎、卡钻、跑风、漏气，需反复灌浆扫孔，大大延长了成孔钻进时间。虽然岩石锚索施工过程中存在成孔难的问题，但尚可根据实际的地层地质情况，分别采取堵、灌相结合的施工方法可以解决施工成孔的问题[65]。由于堆积体地层为碎石砂土和块石、孤石组成，地层结构松散。堆积体厚度平均35.0m，最大厚度65.0m。块石直径一般为30～60cm，最大2m，孤石直径最大达14.0m，碎石、块石、孤石含量约占60～70%，砂土约占30～40%。块石间形成架空结构，孤石间为碎石、砂土结构软弱夹层，结构松散，常规的钻孔施工工艺方法和锚孔护壁工艺方法根本无法成孔，严重制约边坡支护和开挖进度[66]。

由于边坡陡峻，坡面狭窄，锚索施工都在边坡脚手架上进行，大、重型设备又无法进行安装使用。

因此，寻求适合小湾施工地形、地层地质条件的施工设备和堆积体施工工艺技术，势在必行。

原有常规气动潜孔锤跟管钻进技术存在问题：

（1）钻具质量不过关，致使造孔过程中事故发生频繁，大大增加了造孔时间。

在前期的锚索施工中，采用了跟管钻进技术进行施工，试验表明，采用跟管钻进来解决小湾电站锚索的成孔是成功的，也是目前较为可取的成孔方法。但是，由于钻具的设计和加工不具有对小湾地层的针对性，结构设计不尽合理、材料选择不当、热处理工艺不过关，使钻具频繁断裂而造成孔内事故，大大增加了造孔时间，增大了造孔成本。

潜孔锤跟管钻进技术在我国始于90年代初，1991年，地质矿产部“七五”重点科技攻关项目“多工艺空气钻进”课题，在国内开始了潜孔锤跟管钻进技术的应用。十多年来，跟管钻具有了很大的发展，由最开始的单偏心发展到了今天的双偏心、对

心等。但是，总的来说，跟管钻具的设计、制造还处于起步阶段，主要体现在三个方面[67] [68]：第一，钻具的规格、系列不完善，当时除了 127 mm 偏心跟管钻具等少数钻具比较成熟外，其它规格系列的跟管钻具都还处于试用阶段。第二，钻具设计不完善。第三，钻具的制造技术还需要进一部提高。从材料选择、热处理工艺都还需要进行大量的研究。

（2）设备配套、施工工艺技术水平亟待提高。

小湾电站锚索施工的队伍都是全国一流的水利水电施工队伍，在水电站施工中均具有丰富的经验，但是，受整个跟管钻进行业水平的制约，在设备配套、跟管方案、施工工艺技术等方面都还存在许多的问题。

我国的锚杆钻机始于上世纪 80 年代，起步最早的为土星－881 锚杆钻机，此后地矿部勘探技术研究所与重庆探矿机械厂共同研制的 MGJ－30 型和煤炭部江苏省镇江煤矿专用设备厂研制的 MYZ－150 型锚杆钻机相继投产[69]。90 年代以来，随着市场经济的发展和锚索施工工程的大量增加，涌现了一大批专用锚索孔钻机，使施工用户有了更大的选择余地。但是，这些钻机各有各的针对性，各有各的使用范围，必须紧密结合施工条件、地层情况和施工工艺才能正确选择钻机，才能获得好的钻进效果。

钻进工艺技术是跟管钻进快速、高效钻进的主要因素之一。可以说，钻进工艺技术是跟管钻进中变化最大的因素，与地层、采用的设备、钻具等密切相关，而钻进施工中往往也最容易忽视[70]。

从小湾电站当时锚索施工情况来看，可以得出两点结论。第一，跟管钻进技术在解决小湾电站锚索孔的成孔中是成功的，是目前较为现实和可行的锚索孔成孔钻进技术，也是堆积体、风化岩层锚索孔、排水孔造孔的首选技术，其它技术还不能取代跟管钻进技术。在堆积体的钻进中，首次采用 φ178 mm 的偏心跟管钻具，最大跟管深度达到了 49 m，创造了国内新的记录。第二，国内目前跟管钻进的技术水平还不能满足小湾电站复杂地层施工的需要，还需要进行进一步的研究。

（3）拔管机具、拔管工艺技术亟待开展攻关研究。

拔管是冲击跟管钻进中的一个重要环节，拔管机具、拔管工艺技术的好坏将直接影响冲击跟管钻进的效率、成本、成孔质量乃至锚索质量。因此，开展拔管机具的设计、加工生产及拔管工艺技术的攻关研究是非常紧迫而有必要的。

5.2.3　完善和发展气动潜孔锤跟管钻进技术的新内容

（1）锚索孔钻进设备的选型

根据地层情况和设计的钻具的特点，提出钻机、空压机和套管起拔设备的选用依据，改进并确定合理配套的钻机、空压机和套管起拔设备。

（2）跟管钻具的设计和制造

结合小湾工程地质条件，设计并制造合理的跟管钻具。

（3）跟管钻进工艺规程

根据小湾的地层特点，结合设备情况和钻具特点，结合生产试验和工程实践，制订出一套较完整、合理的“跟管钻进施工工艺规程”。

（4）高效、可靠的套管起拔设备及套管起拔技术的研究

5.3 跟管钻具的研制

5.3.1 原有跟管钻具存在的主要问题

小湾电站地质情况十分复杂，在全国乃至全世界水电站施工中都是罕见的。电站岩层主要为中深变质岩系的黑云母花岗片麻岩和角闪斜长片麻岩，十分坚硬。对锚固孔施工不利的地层主要有两大类：其一为坝址上游两岸规模较大的崩塌堆积体。小湾电站的堆积体在左右两岸都有，物质组成主要为块石、特大孤石夹碎石土、碎石层或砂壤土。特大孤石直径一般为 2～5 m，最大可达 9 m；块石直径 0.2～0.8 m，最大可达 1.0 m；特大孤石、块石、碎石母岩为黑云母花岗片麻岩，呈弱、微风化状态，强风化较少，钻进非常困难。碎石土、碎石层及砂壤土主要填充在大孤石和块石之间。堆积体有相当部分地段较为松散，并伴有较普遍的架空现象，堆积体铅直厚度一般为 30～40m，最深达 60 多米，平均深度为 30 多米。其二为受构造、风化卸荷作用影响而破碎的基岩。受岩性构造和地形控制，两岸强风化岩体底界埋深（铅直）一般为 10～20 m，右岸局部可达 26 m；弱风化岩体底界埋深一般为 40～50 m，局部可达 70～88 m。两岸山坡岩体在卸荷作用下，卸荷裂隙发育。受陡倾的卸荷张拉裂隙和顺坡的中缓倾角剪切裂隙的影响，在强卸荷带，二组裂隙张开度大，一般大于 2 cm，有泥、岩屑、岩块充填或架空，且松动和变位错落明显。在卸荷带，两组裂隙张开度一般为 0.2～2 cm，局部可达 20～30 cm。

小湾电站这样的岩层对钻具的质量要求较高。在小湾电站一般只能打十几米甚至几十厘米就报废。而小湾电站边坡的堆积体和风化岩层厚度一般在 30～50 米，这意味着钻一个孔需要消耗几套甚至于十几套跟管钻具，并且，钻具如果在钻进过程中，一旦掉到孔底，如果取不出来，这个孔就只能报废。

对已使用报废的近百套跟管钻具的报废形式进行了认真的统计和分析，发现钻具主要存在以下几方面的问题：

（1）跟管钻具结构设计不合理，传动销负担太重，受力过大；

（2）零件材料强度不够；

（3）零件热处理不合适；

（4）偏心扩孔钻合金齿大小、材质及分布不合适，钻进困难；

（5）钻具最大钻孔直径设计太小，跟管跟进困难。

5.3.2　新型钻具的设计原则

（1）上端能与常规空气潜孔锤相连，承受钻机施加的钻压和回转扭矩以及出冲击器提供的冲击能，并能有效地传递给钻头破碎岩石。

（2）要有一个扩孔装置，在孔底破碎岩石，为套管跟进提供空间。

（3）跟管钻进的套管无单独的驱动装置，可在钻具和套管上建立一对传力装置，将钻压及冲击能量部分地施加给套管，迫使套管随钻头同步钻进。

（4）钻具必须有让岩屑和气流通过套管内部返到地表的通道。

（5）有一个具有破岩效率高、寿命长的钻头。

5.3.3　新型偏心跟管钻具扩孔机构设计

（1）扩孔机构的选择

国内外现有扩孔机构有以铰链联接，依靠弹簧变形力张开，强迫压缩弹簧收敛的；有铰支或滑槽形式，依靠斜面分力张敛的，也有用偏心圆依靠不同方向转动而实现张敛的[71]。根据钻具能承受较大的冲击功和传递应力波的特点，选取偏心圆形式的扩孔装置，使钻具扩孔体有足够的强度，有较小的界面。

（2）偏心扩孔机构的工作原理

偏心扩孔张敛机构有两种结构，一种为利用孔底摩擦力张敛的推出式偏心机构；另一种为利用惯性及孔壁或套管底部摩擦力张敛的甩出式偏心机构。

推出式偏心机构的原理见图 5-1。它由中心钻头体上的偏心轴、冲击导正器下部的导槽及偏心扩孔器组成。偏心扩孔器心部有一长圆孔、上端面有导块可在导正器的导槽中滑动，下端部分镶了硬质合金切削具。中心钻头上部是中心轴，插在导正器中心孔中并由半合环卡住，保证其不脱落，并能自由转动，底部镶有硬质合金切削具，中间部分为一偏心轴，偏心扩孔器套在偏心轴上。钻具回转时，带动导正器转动，中心钻头由于孔底阻力暂不转动，扩孔器由导正器通过导块带动转动。它的长圆孔与中心钻头的偏心轴发生位置上的改变，使偏心轴给扩孔器一个通过偏圆圆心、平行于导正器导槽的力，将扩孔器推出。当扩孔器到达设计位置时，中心钻头的偏心轴受长圆孔的阻力不能转动。而后导正器的导槽带动扩孔器

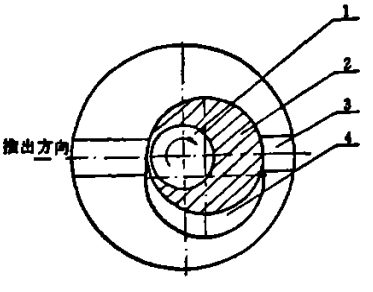


图 5-1　推出式偏心扩孔机构原理图

1—中心轴；2—偏心轴；3—导块；4—偏心长圆孔

的导块，扩孔器的长圆孔又带动偏心轴使中心钻头旋转，从而进入钻进扩孔的工作状态。收回扩孔器时，反转钻具，中心钻头的偏心轴脱离约束而进入自由状态。由于受孔底阻力不回转，偏心轴又给扩孔器一个同张开时相反的力使扩孔器收敛到下钻时的位置，从而能从套管内提出。推出式偏心机构具有加工简单，但在孔底被高压空气吹空，不能提供给中心钻头阻力，使偏心扩孔器不能收敛。

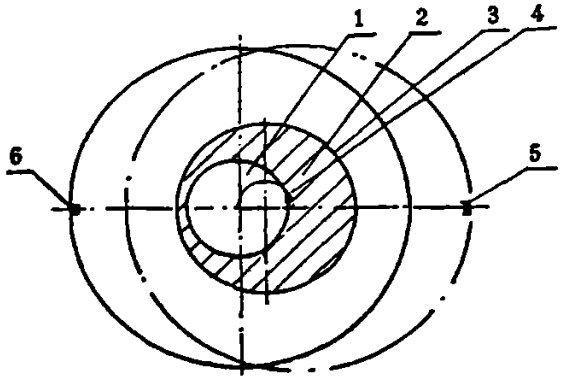


图 5-2　甩出式偏心扩孔机构原理图

1—中心轴；2—偏心轴；3—偏心孔；4—偏心扩孔器外圆圆心运动轨迹；5—偏心扩孔器转动 180° 后的位置；6—偏心扩孔器收敛位置

甩出式偏心扩孔机构的原理见图 5-2。它由一对偏心圆组成。扩孔器内圆是偏心孔，套在中心钻头中部的偏心轴上。当扩孔器与中心钻头发生相对转动时，偏心扩孔器外圆圆心围绕偏心圆圆心旋转，相当手增加了钻具回转中心的半径。甩出式偏心机构加工工艺复杂，不易保证加工质量。中心钻头轴部分受力复杂，复合力过大，发生过轴折断事故，使钻头断落孔底。但钻进任何地层都能灵活地开合，即使在孔底无摩擦阻力时还可以提钻具，借助套管鞋端面提供摩擦力收敛。

（3）偏心扩孔装置的偏心距 e，转角 θ 与扩孔孔径 $D_{扩}$ 之间的关系

因转动时偏心扩孔器是以偏心圆圆心为轴甩出，故偏心扩孔器上任一点的运动轨迹仍是以偏心轴中心为圆心的圆。但转动半径对于原钻具中心是变值，其转动关系见图 5-3。由图中，取极坐标，求得偏心扩孔器在甩出后扩孔半径 ρ 为如下公式：

$$\rho=\sqrt{R^2+2(e^2+\mathrm{Re})(1-Cos\theta)}$$

扩孔孔径为：

$$D_{扩}=2\rho=2\sqrt{R^2+2(e^2+\mathrm{Re})(1-Cos\theta)}$$

式中：$D_{扩}$——扩孔孔径；

ρ——扩孔半径；

R——偏心扩孔器外圆半径；

e——偏心轴偏心距；

θ——偏心扩孔器甩出时转角。

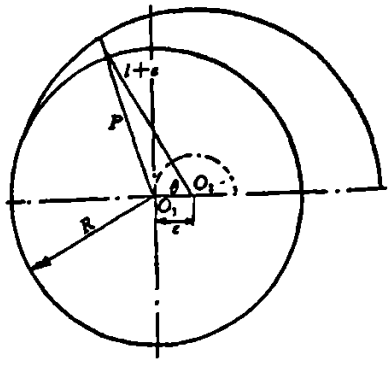


图 5-3　扩孔机构转动关系图

由上式可知，当偏心扩孔器无转动时，

θ=0°，钻孔直径为偏心扩孔器外径 2R。当它转动 180°时，钻孔直径最大，为 2R+4e，即：钻孔直径比未扩孔时增加 4 倍的偏心距。考虑到偏心扩孔器在转动 170°以后扩孔直径的增量很小，也意味着当反转收敛时在这一区域的缩回量小，因此设计时选定限制转角在 0°～165°±5°范围内。

偏心距 e 根据所要求的扩孔孔径与中心孔径的差值来选择。偏心距选小些，对加工制造，钻具受力都有好处。因此，设计时应尽量增大中心钻头直径，以能通过套管鞋为原则，或是将其直径参照同级常规钻头直径设计，以减小偏心扩孔器的负荷。在实际设计中，应用以下公式选择 e：

$$e=\frac{1}{4}$$（扩孔直径-中心钻头直径）+0.5mm

式中：+0.5mm 是不允许偏心距有负公差。

（4）排屑通道设计

为了保证导正器在钻进时起到导正作用，它的外表面与套管鞋的内表面间隙较小，孔底破碎的岩屑要从这里通过，进入套管内后排出孔外，这一段排屑槽设计的合理与否，直接关系着钻进能否顺利进行。风槽形状、断面大小与其它方面相互制约。槽开得太小，会引起孔底岩屑不能顺利排出，堵塞气流，导致已排入套管内的岩屑沉降，卡在钻杆与粗径钻具连结部位，形成事故；槽开得太大，套管鞋上台肩受压强过大，发生变形，也会卡住钻具。

（5）导正器的设计

导正器是一个传递钻压、扭矩及冲击应力波的关键部件，将偏心轴、螺杆、花键等和导正器制成一个整体，使整个钻具的受力状况得到改善，而中心钻头和偏心扩孔器成为可更换的易损件。

导正器花键部分的尺寸参照所配潜孔锤的花键套设计；冲击套管鞋的凸台外径应比所配用套管的最小内径小 2 mm；导正部分外径应比标准的同级潜孔锤钻头外径稍大；偏心轴的偏心距根据所需扩孔孔径而定，在小湾地区，扩孔孔径通常比跟进的套管大 10 mm 左右，套管才能顺利跟进；中心钻头直径尽量大些，但要在偏心轴上留出足够的端面向中心钻头传递冲击功，导正器工作时所受的最大应力为冲击应力。

（6）钻头设计

跟管钻具的钻头设计主要是包括硬质合金齿的选用、固齿面和固齿倾角等。

① 硬质合金齿型

除了硬质合金的材质，硬质合金齿型也是很重要的，它和钻头的寿命和效率由很大的关系。目前硬质合金齿型主要有：半球齿、弹头齿、等强齿、楔形齿等[72]。

跟管钻具钻头上常用的齿型为半球齿和弹头齿。图 5-4 是在冲击力作用下，合金齿齿冠与岩石接触面积随凿深的变化曲线。半球齿的工作特点是开始接触面积大，

后来增长缓慢，表现出比较好的耐磨性。弹头齿的工作特点是开始接触面积较小，后来增长较快。一般情况下，弹头齿比半球齿钻速快，对凿岩条件有更好的适应性，并有利于材料和动力的节省，但是弹头齿的坚固性和抗径向磨损能力不如半球齿[73]。

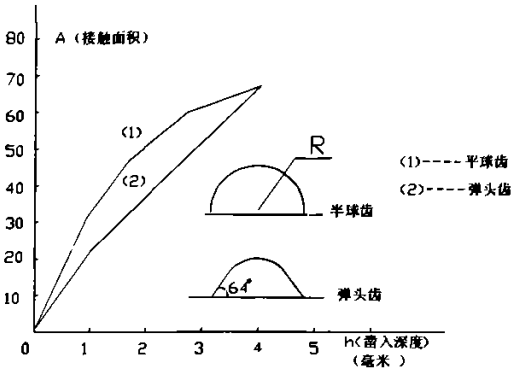
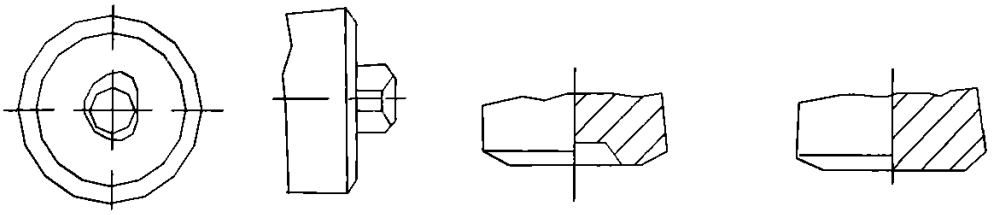


图 5-4　半球齿和弹头齿与岩石接触面积随凿岩深度的变化

所以，在跟管钻具中，通常中间部位的齿用弹头齿，边刃用半球齿。

② 固齿面设计

硬质合金通常是垂真镶于固齿面上的，因此固齿面的形状对刃具的受力状况好坏，制造难易程度，钻进效率和排岩粉等都有一定影响，固齿面的形状大致有如图 5-5 所示的几种。



a 凸心式固齿面　　b 凹心式固齿面　　c 平面式固齿面

图 5-5　固齿面的几种形状

在图 5-5 中，a 图为凸心式的固齿面，凸上的刃具即为超前刃，在钻进时可起到掏槽的作用，增加孔底自由面，为后续刃具提供有利有破岩条件，以提高破岩效率。但是，它给排粉带来了困难，易造成重复破碎。b 图所示的凹心式就正具备了排粉条件好的特点。然而，这两种结构都增加了斜面数。在斜面上的齿受力条件复杂，易磨损甚至断齿，从而会影响钻头寿命。c 图为平面式构形，即中心区平面，边缘为斜面，平面式的固齿面便于加工和固齿，并且固齿面上的齿绝大多数垂直于岩面表面，从而有利于能量的传递及破碎岩石。因此，目前跟管钻具钻头广泛采用平面式的结构。

③ 边齿倾角

边齿的斜面倾角对边齿的受力状况和护径的外出刃量有很大关系需要认真地加以分析和选择[18]。图 5-6 为边齿的受力情况，由图可见，边齿承受的弯矩为：

$$M=P\cdot X$$

式中：

M——弯矩

P——作用在柱齿上的外力

X——力臂距离，随边齿（斜面）倾角变化而变化

$$X=X_1+X_2=\frac{D}{2}Cos\alpha+HSin\alpha$$

式中：D——柱齿直径

H——柱齿高度

α——柱齿倾角（即为斜面倾角）

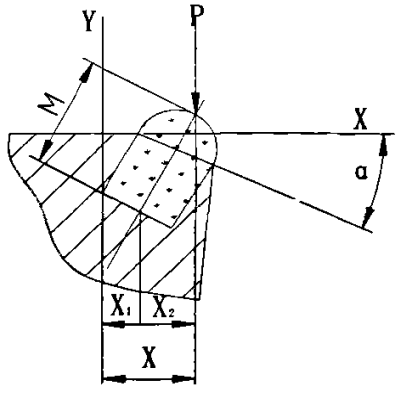


图 5-6　边齿受力简图

当柱齿形状尺寸和其受力不变时，柱齿所受的弯矩随 X 的增大而增大。减小边齿的倾角有利于提高边齿的抗冲击能力。但是过小的边齿倾角，将导致边齿的外沿钢体过薄，降低钻头的护径能力。依据以上分析和国内外资料，并对现场使用的钻头加以分析，确定 α 在 35°左右为好。对研磨性较强的岩石，α 角度适当大些。

5.3.4　新型跟管钻具的制造

（1）跟管钻具基体材质及热处理

在小湾电站跟管钻进中，由于岩石的复杂性，对跟管钻具基体（包括扩孔钻头、中心钻头和导正器）提出了很高的要求，通常的材料很难满足[74]。

表 5-3 是国外用于制造潜孔锤钻头的常用钢材牌号表。由于成本等原因，我们在小湾项目中主要采用国产钢材。

在我国潜孔锤钻头制造行业，一般常用的钢材为 40Cr、35CrMo、42CrMo、35CrMoSi 等。近几年，我国已研制成功了几种较好的钢种，如：40MnMoV、FF710、Q45、EN30B 等。

FF710 原产于瑞典，国内仿制。经中国地质科学院探矿工艺研究所等单位试用，证明国产 FF710 钢种能较好地满足潜孔钻进复杂地层条件下的使用[75]，在小湾电站，我们主要采用了这一钢材。

下面着重介绍这种钢的有关情况[76] [77] [78] [79]。

① 化学成分（%）：C　O.22；Si 1.50；Mn l.30；Ni 1.75；Cr 0.30；Mo 0.40；V O.12；S.P≤0.025

表 5-3 国外用于常用潜孔锤钻头钢材

国别	钢种	牌号	化学成分 %								
			C	Si	Mn	Cr	Ni	No	V	S	P
瑞典	中碳镍铬钼钒钢	45NiCrMoV	0.45	0.30	0.80	1.20	0.50	1.00	0.15	—	—
	低碳硅锰镍铬钼钢	22SiMnNi$_2$CrMo	0.22	1.50	1.30	0.35	1.80	0.35	—	—	—
日本	中碳镍铬钼钒钢	SKC24 38CrNi$_3$Mo	0.38	0.25	0.65	0.50	3.00	0.28	—	0.03	0.03
	低碳硅锰镍铬钼渗碳钢	SKC31 20CrNi$_3$Mo	0.20	0.25	0.90	1.50	3.00	0.50	—	0.03	0.03
英国	中碳镍铬钼钒钢	40CrNi$_3$Mo	0.40	0.25	0.60	0.40	3.15	0.65	—	0.04	0.04
美国	中碳镍铬钼钒钢	20Cr，SiMnNo	0.30	1.25	1.00	2.50	—	0.55	—	—	—
	中碳镍铬钼钒钢	30CrNi$_2$Mo	0.30	0.25	0.95	0.65	2.25	0.20	—	—	—
	低碳硅锰镍铬钼钢	28SiMnNiCrMo	0.25	1.50	0.60	0.30	1.70	0.50	—	—	—

② 冶炼方法：电弧炉或真空感应炉。

③ 轧制工艺：加热温度 1160～1190 ℃，开轧温度 1140～1150℃，终轧温度 900～910 ℃，箱内沙埋缓冷 36 h

④ 退火工艺：670 ℃25 h炉冷，硬度为HB229～241，或750℃×2 h炉冷至600℃～650℃×15 h 炉冷，硬度小于 HB260。

⑤ 机械性能：不同热处理条件下的机械性能见表 5-4。

表 5-4 FF710 机械性能表

性能 / 热处理工艺	σ_2 ($\sigma_{0.2}$) (N/mm^2)	σ_b (N/mm^2)	δ (%)	Φ (%)	硬度 (HRC)
890℃油淬 200℃回火	1215	1500	13	50.5	40-41
890℃x20 分钟盐炉空冷	1200-1240	1400-1450	12-15	65.50	39-42

⑥ 奥氏体等温转变曲线（C 曲线）见图 5-7。

国产 FF-710 钢这种含有高硅的低碳马氏体钢，实质上是板条马氏体和残余奥氏体的混合组织。该钢之所以具有相当高的抗疲劳负载寿命和很好的韧性，在于它充分发挥了稳定的残余奥氏体抑制了钢中沿马氏体发展的微观缺陷；加上低碳马氏体本身消除了中碳钢中常见的孪晶。

在钻具的制造过程中，材料的热处理工艺非常关键，必须严格按工艺进行，才

能保证钻具质量。

（2）钻头用硬质合金及固齿

① 硬质合金球齿的材质

跟管钻具钻头使用的硬质合金质量是跟管钻具质量的保证条件之一，它是以难熔金属碳化物（WC 等）为基体，以铁族金属（主要是钴）作粘结剂，采用粉末冶金方法生产的多相组合材料。凿岩硬质合金具有硬度和抗压强度高、耐磨性好、抗高温能力强等优点，但韧性较低、脆性较高。根据项目组的经验，考虑成本等因素，选用 YG11C、YGl5C，它有较高的硬度和较好抗冲击韧性，可以满足小湾电站施工的需要。

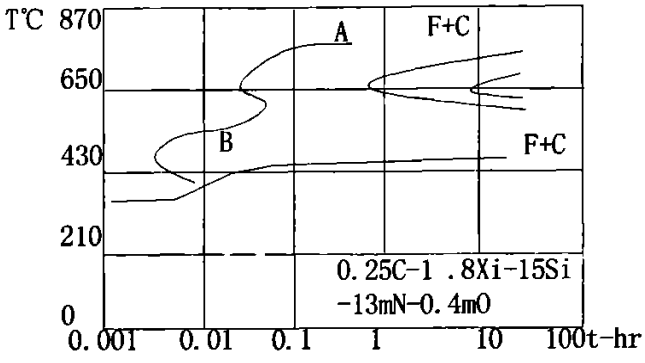


图 5-7　FF-710 钢的 C 曲线

② 固齿工艺[80][81]

跟管钻具采用冷压固齿工艺生产。冷压固齿工艺参数根据基体材质、热处理工艺、硬质合金齿的成份、齿型等确定。在固齿加工中，必须解决好下面几个关键问题：

齿孔必须达到镜面，这是为了达到可靠的过盈配合。

齿孔需用量仪来测量，硬质合金须经无芯磨床磨削，精度要达到 μ 级。

压装齿时段须有专门的压装工装来保证齿与孔的对心准确度。

5.3.5　DPA 型单偏心跟管钻具研制

（1）DPA 型单偏心跟管钻具的结构[82][83]

单偏心跟管钻具（如图 5-8）由偏心扩孔钻头 1、导向定位器 2、联接销 3 和管靴 4 组成。结构简单实用，装拆十分方便。装配时，用手锤和铁棒将联接销打入到与导向定位器上的联接销孔口齐平，即可将偏心扩孔钻头和导向定位器牢靠地联接在一起。将铁棒插入联接销孔小端，用手锤打出联接销，即可方便地拆卸钻具。

整套钻具通过导向定位器上的花键与潜孔冲击器联接在一起、通过管靴上的螺纹与套管联接在一起。偏心扩孔钻头的前端面嵌有硬质合金齿，用于破碎岩石。钻具破碎岩石所需要的扭矩和推进力由钻机提供，所需要的冲击能量由潜孔冲击器提供。来自钻机的扭矩通过钻杆、冲击器传递给导向定位器，再通过导向定位器上的

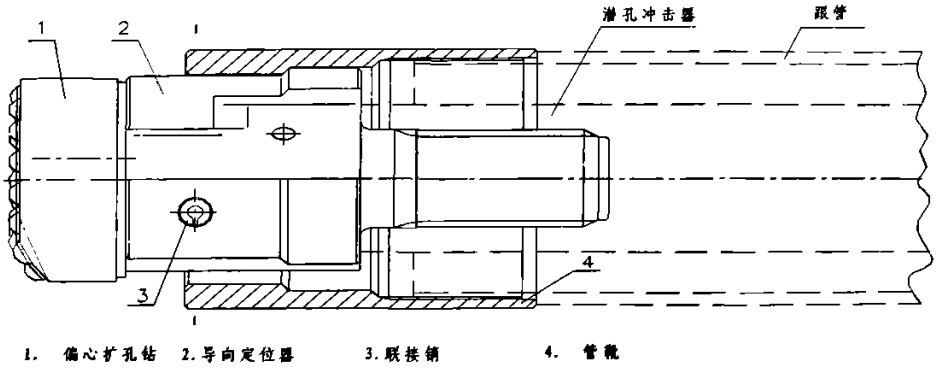


图 5-8 DPA 型单偏心跟管钻具联接图

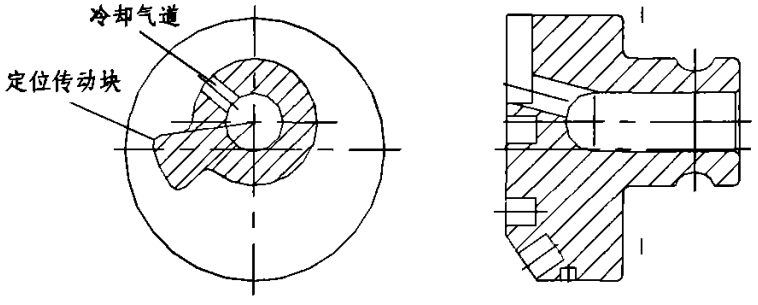


图5-9 偏心扩孔钻结构图

定位传动槽和偏心扩孔钻头上的定位传动块传递给偏心扩孔钻头；潜孔冲击器的活塞不断地撞击导向定位器尾部端面，将冲击能量传递给钻具。随着钻机的旋转，偏心跟管钻具不断地在新的位置冲击破碎岩石；从空气压缩机来的压缩空气经由钻杆中心孔、冲击器内部相关气道、钻具中心孔道及相关气道吹入孔底，将钻具破碎下来的岩粉经由钻具排粉槽、冲击器与套管之间的环形间隙、钻杆与套管之间的环形间隙吹到孔外。这样不断地破碎岩石、排出岩粉，便形成了圆形钻孔。跟管钻具工作时，钻机正转（顺时针旋转），偏心扩孔钻头甩开到最大位置，钻出的岩孔直径大于管靴和跟进套管的外径。在导向定位器上设有台阶，钻具钻进的同时，通过这个台阶带动管靴和套管同步跟进。当工作结束或需要取出钻具时，可将钻具反转（逆时针旋转），偏心扩孔钻头便会收拢到最小位置。

（2）DPA 型单偏心跟管钻具结构特点

① 巧妙的定位传动块和定位传动槽结构设计，取代了传统的传动销结构设计

传动销结构的跟管钻具，其传动销的作用太大。小小的传动销，不仅要起到联接偏心扩孔钻头和导向定位器的作用，更重要的是还要起到定位及传递扭矩的作用，

往往不堪重负，过早折断。传动销一旦折断，偏心扩孔钻头就会掉到孔底。

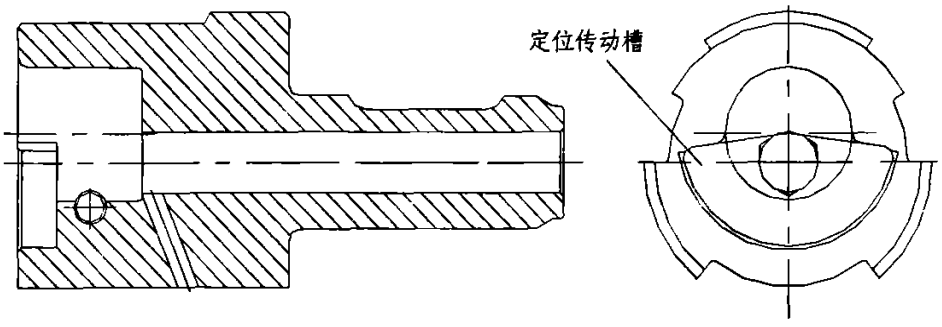


图5-10　导向定位器结构图

DPA 单偏心跟管钻具在结构设计上摒弃了传动销结构，设计了定位传动块和定位传动槽结构来承担起跟管钻具定位和传递扭矩的重任。图 5-9 为偏心扩孔钻头结构图，定位传动块就设在偏心扩孔钻头上。图 5-10 为导向定位器结构图，定位传动槽就设在导向定位器上。从图 5-10、5-11 可以看出，定位传动块和定位传动槽的两受力边的延长线均通过同一偏心圆的中心，保证了偏心扩孔钻头在收拢和甩开到最大位置时，其上的定位传动块与导向定位器上的定位传动槽有良好的平面接触，大大改善了受力条件。另外，在定位传动块的旁边设有冷却气道，工作时，压缩空气源源不断地由冲击器流向偏心跟管钻具中心孔，再经此冷却气道吹向定位传动块与定位传动槽的接触面，使受力面得到充分冷却。巧妙的结构设计，确保了定位传动块与定位传动槽在钻具寿命期内几乎无磨损，很好地起到了定位和传递扭矩的作用，解除了传动销早期折断的后顾之忧。

② 独特的弹性圆柱销联接结构

用弹性圆柱销将偏心扩孔钻和导向定位器联接到一起，结构简单可靠，加工制造方便，是 DPA 偏心跟管钻具结构设计上独具匠心的创造，属国内外潜孔锤跟管钻具结构设计之首创，弹性圆柱销联接结构，利用高级弹簧钢的弹性，将联接销与导向定位器溶为一体，联接销仅仅起到联接偏心扩孔钻头和导向定位器的作用，不再承担径向定位和传递扭矩的重任；精确的设计，使得偏心扩孔钻头在工作状态下，不会撞击到联接销。因此，弹性圆柱销联接结构具有良好的可靠性，彻底解除了用户的掉钻头之忧。

此外，DPA 偏心跟管钻具还设计了内螺纹结构的管靴，较之传统的外螺纹结构的管靴，由于壁厚较厚，结构更合理，加之选用了高强度的材料，采用了特殊的热处理工艺，这种管靴的寿命更长。

（3）DPA 单偏心跟管钻具主要技术参数

根据小湾工程的实际需要，我们共研制了三种规格的 DPA 单偏心跟管钻具，其主要技术参数见表 5-5。

表 5-5 DPA 单偏心跟管钻具主要技术参数

跟管钻具型号	DPA127	DPA146	DPA168
跟进套管规格	φ127×5.5～8 mm	φ146×6～8 mm	φ168×6～10 mm
配套潜孔锤	CIR110、 J100B 等	CIR110、J100B 等	CIR110、CIR150、DHD350、DHD360、J150B、JG150 等
扩孔直径	φ136mm	φ157mm	φ179mm
套管鞋通孔径	φ102mm	φ121mm	φ141mm

5.3.6 带中心钻头的单偏心（SPA 型）跟管钻具研制

（1）钻具结构

带中心钻头的单偏心跟管钻具（SPA 型）主要由导正器、扩孔钻头和中心钻头三大件组成，而普通的单偏心钻具主要由扩孔钻头和导正器组成，所以带中心钻头的单偏心跟管钻具通常又称为“三件套”。SPA 型单偏心跟管钻具结构如图 5-11 所示，钻具由中心钻头、偏心扩孔钻头、导正器、联接销系统等组。钻具采用两级破碎岩石，中心钻头破碎底部岩石，实现钻进；扩孔钻头跟进扩孔，为套管的跟进提供空间。套管的跟进是通过导正器的台阶传递力量，在潜孔锤冲击力的作用下，向孔内跟进。钻具在结构上设计用键来传递扭矩，改变普通单偏心跟管钻具利用连接销进行扭矩传递的弱点，可以传递更大的扭矩，而不发生断裂，从而出现孔内事故。由于采用了中心钻头的结构形式，中心钻头与冲击器以及套管的中心重合，所以理论上讲不易形成孔斜，有利于防斜钻进，保证钻孔的轨迹按预定的方向前进。

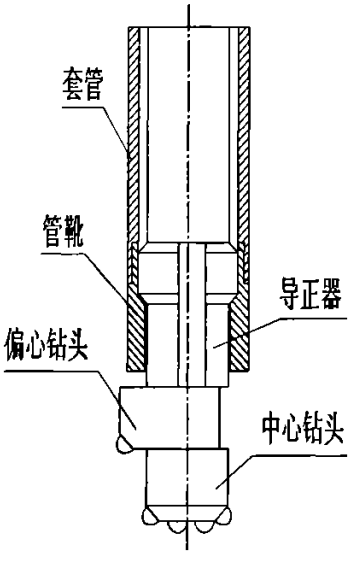


图 5-11 SPA 型单偏心跟管钻具示意图

对该钻具进行了系列化，可以跟进 φ108、φ127、φ146、φ168 mm 等规格的套管，可配多种型号的潜孔锤。

图 5-12 是研制的两种 SPA 型跟管钻具。

（2）潜孔锤偏心跟管钻具的特点

① 采用两级破钻孔速度快

主要依靠中心钻头和偏心扩孔钻头二级破岩、设计合理的排渣系统使排渣顺畅以及与具有足够冲击功的冲击器相适配等。



图 5-12　SPA 型跟管钻具

② 钻进导向性好

导向钻孔的形成主要依靠中心钻头，中心钻头与冲击器以及套管的中心重合，所以理论上讲不易形成孔斜。这种具有中心钻头起导向作用的偏心跟管钻具结构对于地层复杂的小湾电站更有利于孔斜的预防，从而更大限度地满足工程设计的要求。偏心钻头仅起扩孔作用，使之形成我们需要的孔径。

③ 钻具寿命长

SPA 系列潜孔锤偏心跟管钻具在结构上设计用键来传递扭矩，当偏心扩孔钻头在展开到最大位置时，其上的键侧平面与导正器上的键侧平面有良好的平面接触，大大改善了受力条件，确保了 SPA 系列潜孔锤偏心跟管钻具在寿命期内磨损极小，很好地起到了定位和传递扭矩的作用。加之选用了高强度的材料，采用了特殊的热处理工艺，先进的固齿工艺，保证了 SPA 系列偏心跟管钻具能满足各种复杂地层跟管的需要。

④ 独具特色的联接销系统

该联接销系统在 SPA 系列偏心跟管钻具中的主要功能是使中心钻头与导正器之间连接可靠，避免掉钻头。从外表看，该联接销系统主要由横销、伸缩头、竖销组成，当装配到SPA系列偏心跟管钻具上时，该联接销系统为相互自锁的结构，如图 5-13 所示，保证了中心钻头与导正器之间连接具有良好的可靠性，彻底解除了用户的掉钻之忧。

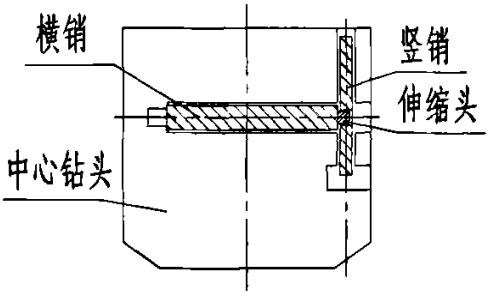


图 5-13　联接销系统示意图

(3) SPA 单偏心跟管钻具主要技术参数

我们共研制了三种规格的 SPA 单偏心跟管钻具，其中 SPA146、SPA168 两种跟管钻具在小湾得到了成功应用。其主要技术参数见表 5-6。

表 5-6 SPA 单偏心跟管钻具主要技术参数

跟管钻具型号	SPA127	SPA146	SPA168
跟进套管规格	φ127×5.5～8 mm	φ146×6～8 mm	φ168×6～10 mm
潜孔锤规格	CIR110、 J100B 等	CIR110、 J100B 等	CIR110 、 CIR150 、DHD350、DHD360、J150B、JG150 等
扩孔直径	φ137mm	φ156mm	φ178mm
套管鞋通孔径	φ103mm	φ122mm	φ142mm

5.4 套管起拔设备的研究

套管起拔设备（液压拔管机）是跟管钻进中必须的专用起拔设备,主要用于跟管钻进施工中起拔护壁套管，也可用于钻具事故处理中起拔钻杆。在小湾电站工程施工中，由于地层复杂，跟进的套管不容易拔出，所以必须研制专门的套管起拔设备，加快套管的起拔，提高施工效率。

5.4.1 液压拔管机设计

（1）液压拔管机设计的基本原则

① 主要技术参数合理；

② 结构尽量简单，操作容易，搬迁方便；

③ 应充分考虑到陡坡上套管起拔的实际问题，底座和油缸采用铰接；

④ 一台设备可起拔多种规格的套管。

（2）液压拔管机的结构及工作原理

液压拔管机由液压系统和机械系统两大系统组成。液压系统主要由高压油泵、电动机、油箱、滤油器、溢流阀、三位四通电磁换向阀、同步分流阀和拔管油缸组成；机械系统主要由底座、卡瓦座和卡瓦组成。液压泵站为全封闭集成结构，具有结构紧凑、体积小，工作安全可靠、运行平稳等优点（实物如图 5-14）；拔管油缸与底座和上卡瓦座之间均采用销



图 5-14 液压拔管机

轴联接，在一定程度上减轻了两油缸不同步对拔管的不利影响，且装拆十分方便；上、下卡瓦座锥孔内可安放各种规格的卡瓦，以夹持不同规格的套管。

液压拔管机结构图如图 5-15 所示：为实现上卡瓦松动并同步往下走，特配有限位机构和下卡瓦机构。只要在活塞缩回前，用扳手拧紧下卡瓦螺母，使下卡瓦夹紧套管，即可有效防止上卡瓦不易松脱而带着松动的套管随活塞的回缩而下沉。在操作台与泵站之间配有 20 米长的油管，泵站固定后，可在 20 米的半径范围内拔管，相对较重的泵站（约 150 kg）搬动次数大为减少。拔管油缸与底座和上卡瓦座之间均采用销轴联接，在一定程度上减轻了两油缸不同步对拔管的不利影响，且装拆十分方便。左右底座之间也采用铰接结构，能部分消除地面不平对拔管的不利影响。卡瓦卡紧套管部位螺纹为梯形螺纹，强化热处理工艺，克服套管起拔过程中出现打滑现象。

拔管机液压系统原理图如图 5-16 所示：主要由油缸、手动换向阀、油泵等组成。

5.4.2　液压拔管机的主要技术参数

液压拔管机的主要技术参数见表 5-17 所示。

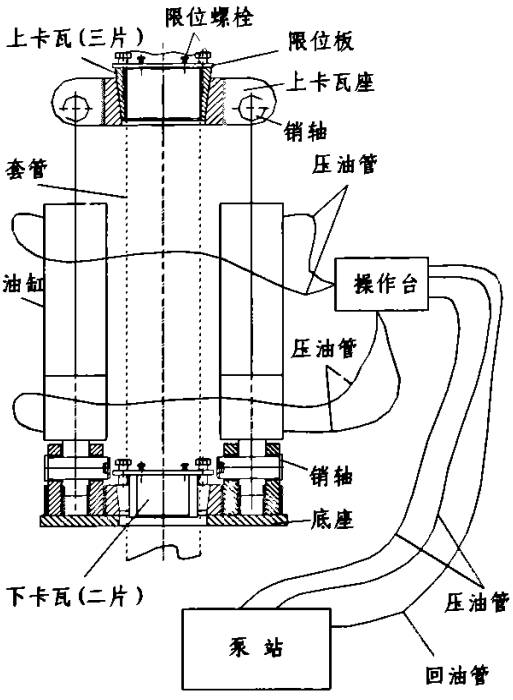


图 5-15　液压拔管机结构示意图

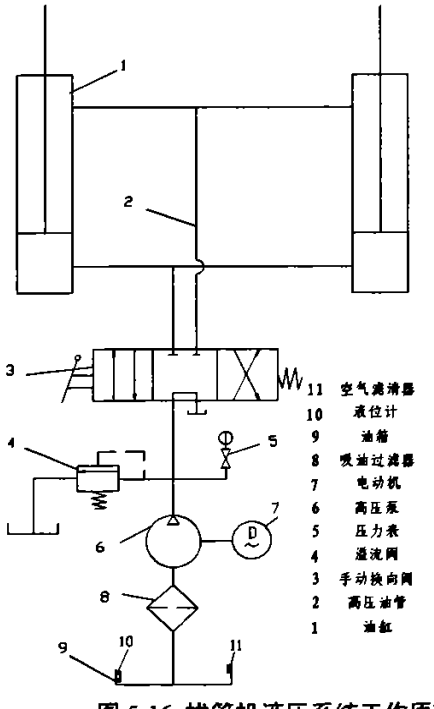


图 5-16 拔管机液压系统工作原理图

该液压拔管机具有以下特点：

（1）系列液压拔管机结构简单，体积小、重量轻，装拆、操作方便，主要技术参数合理，能较好的满足实际工作的需要。

（2）操作台与液压泵站分开设置，二者用长液压胶管连接，相对较重的泵站搬动次数大为减少，特别适合于搬运、迁移困难的边坡工程使用。

表 5-7 液压拔管机主要技术

参 数	单 位	数 值
系统额定压力	MPa	25
额定起拔力	T	60
油缸行程	mm	500
油箱容量	L	80
油口接头		M18X1.5
电动机功率	kw	5.5
整机质量	kg	约 520
最大部件质量	kg	约 150
起拔套管规格	mm	φ178、φ168、φ146、φ127、φ108

5.5 设备选型与机具配套

潜孔锤跟管钻进效率的高低，不仅取决于所用跟管钻具的性能和质量，而且必须做到合理配备钻机、空气压缩机和气动潜孔锤。

5.5.1 设备选型与机具配套的基本原则

（1）确保钻具整体性能优良，充分考虑国情，所有设备立足于国内，充分考虑采购和维修的方便；

（2）根据高陡边坡设备搬迁困难，小湾电站边坡施工搬迁频繁的特点，设备考虑尽量轻便；

（3）配套原则；

（4）成本最小化原则。

5.5.2 潜孔锤选型

（1）潜孔锤的国内外研究现状

潜孔锤跟管钻具冲击碎岩的能量是由气动潜孔锤提供的。气动潜孔锤的效率高低、质量好坏与钻孔效率、钻孔施工成本密切相关。选择品质优良，价格适中，性

能、规格与跟管钻具相匹配的气动潜孔锤，是小湾电站边坡锚固跟管钻进技术成功应用的因素之一。

早在 1932 年，潜孔凿岩技术由美国英格索兰公司提出，并获得了专利权。从二十世纪四十年代初开始，逐步在露天和井下矿山推广应用；六七十年代，国外对气动潜孔锤的碎岩理论和设计制造技术进行了大量的研究和探讨，使之不断的发展和日趋完善。应用广泛的产品有美国英格索兰公司的 DHD 系列、瑞典阿特拉斯公司的 COP 系列、瑞典山特维克公司的 SD 系列等产品。

从二十世纪六十年代初开始使用气动潜孔锤凿岩技术，最先引进的是原苏联的 M 系列（即我国 C 系列，如 C80、C100、C150 等），经过几十年的国内使用，它的缺点大于优点，现已被淘汰。目前，国内广泛使用的是宣化—英格索兰公司的 CIR 系列、DHD 系列潜孔冲击器，嘉兴冶金机械厂的 J 系列潜孔冲击器。

气动潜孔锤是利用压缩空气驱动冲击锤完成工作行程和实现冲击锤的回程，亦称风动冲击器、潜孔冲击器等。气动潜孔锤结构类似凿岩机，但无转钎机构，碎岩工具的旋转由地面钻机完成。

气动潜孔锤结构类型很多，分类方法也各不相同。气动潜孔锤的活塞是冲击器主要运动件，甚至是唯一的运动件。气动潜孔锤活塞按结构可分为同径活塞、异径活塞、串联活塞三种。从活塞在配气装置的作用及工作中承受的负荷来看，活塞应有较高的尺寸精度与较高的表面光洁度，使其有良好的密气作用及宜于在高速度下作往复运动（其速度可达 10 米/秒），有合理的几何形状，不仅保证其有足够的强度，而且要能有效的传递冲击能量[65]。

有阀型冲击器活塞结构简单，无阀型冲击器活塞上开有较多的配气孔道、另外加工精度要求高、工艺也比较复杂。活塞常见的损坏式有两种；一种是活塞冲击钻头尾部时，由于冲击载荷的作用引起疲劳断裂；二是活塞在气缸内滑动时，与气缸接触的表面，由于严重磨损而报废。有阀型冲击器的配气阀多种多样。从配气阀与活塞运动的偶合性来看，阀应该体轻、动作灵敏；从配气分流来看，阀应该有良好的密气性及较小的局部阻力损失；从使用及维护来看，阀应该有较高的寿命。潜孔冲击器配气阀的形式以圆片状阀、四爪圆片状阀、环形圆片状阀、蝶形阀、方形片状阀、双环筒状阀、单环筒状阀和杯形阀应用最多[43][44][45]。

冲击器与钻头的联接是冲击器设计值得重视的部位，它的作用：①卡住钻头，使之不脱离冲击器；②传递回转扭力矩；③钻头能自由滑动，保证在提钻时活塞自由下落，实施防空打措施。目前联接方式有销钉联接、键联接、滚珠联接及卡簧联接等[67]。

大多数气动潜孔锤均接有防水逆止阀，它的作用是供风停止时，逆止阀将冲击器与钻具气道隔断，使一部分气体残留于冲击器内部，防止岩粉及水涌入冲击器之

中。纵观国内外气动潜孔锤制造与使用情况，其结构与性能上的发展趋势是：

① 无阀型气动潜孔锤制造的比重愈来愈大。因为无阀潜孔锤不仅结构简单，取消了易损件阀片，而且其更重要的一个特点是宜于在不同气压（低至 7 公斤/厘米^2，高至 24.6 公斤/厘米^2）下工作。

② 结构上采用中心杆配气，采用进气座与配气杆一体的结构型式，采用细长形活塞与细长形钻头。

③ 为了适应地质勘探及水文水井钻进的需要，其结构型式由全面破碎向环状取芯式结构型式发展，钻进适用孔深由矿山用的浅孔向深孔发展。

④ 在气能源上，由低压（5～7 公斤/厘米^2）向高气压（10.5、21、24.6 甚至 70～80 公斤/厘米^2）过渡，使单次冲击功及钻孔深度可大大提高。

⑤ 在材质选取上向更合理方向发展，用轻铝合金及尼龙材料制作阀片、用含镍铬的低碳钢或者高碳工具钢制作活塞和气缸、用厚壁低合金无缝管制造外缸等。

⑥ 在性能参数上向大的单次冲击功及低冲击频率方面发展。

表 5-8 是国内常用潜孔锤的主要技术参数 [12][13]。

表 5-8 常用潜孔锤的主要技术参数

生产厂家	型号	钻孔直径（mm）	钻具直径（mm）	冲击功（J）	冲击频率（Hz）
无锡探矿工具厂	WC70	75～95	66	60-80	12～16
	WC85	95～110	85	80-120	10～16
	WC100	105～120	92	160	18
	WC110	115～140	102/106	180-420	12～15
	WC150	150～180	142	200-580	12～15
	WC200	205～250	185	450-800	10～14
嘉兴冶金机械厂	J80B	90～95	76	108	16
	J100B	100～140	95	165	16
	J150B	150～170	136	400	16
	J170B	170～240	156	430	15
	J200B	200～210	188	520	17.2
	J250B	250～300	215	560	16.2
英格索兰	CIR65	65～75	57		13.5
	CIR90	90～130	80		13.7
	CIR110	110～150	98		13.8

（2）潜孔锤选择的基本要求

从使用的角度出发，气动潜孔锤应满足以下一些要求：

① 应具有良好的使用适应性，在高、低不同的压气压力下均能正常工作；

② 具有较高钻进速度及使用寿命；

③ 在各种复杂的岩层(包括含水层)条件下均能工作；

④ 排除孔底岩粉效果好；

⑤ 结构简单，便于制造、使用及维修；

⑥ 具有较好的能量恢复，即较少的能耗。

（3）潜孔锤选型

根据上述原则结合小湾水电站的地层情况，选择国内技术较成熟的宣化-英格索兰公司和嘉兴冶金机械厂的潜孔冲击器。跟进 φ146 mm 套管选用 CIR110、J100B 等型潜孔冲击器，跟进 Φ168 mm 套管选用 CIR110、CIR150、DHD350Q、DHD350R、DHD360、J150B、JG150 等型潜孔冲击器，跟进 Φ178 mm 套管选用 CIR150、DHD350Q、DHD350R、DHD360、J150B、JG150 等型潜孔冲击器。以上型号潜孔冲击器的主要技术参数如表 5-9 和表 5-10，CIR 系列潜孔冲击器如图 5-17，J 系列潜孔冲击器如图 5-18，JG 系列潜孔冲击器如图 5-19。

表 5-9　宣化-英格索兰公司潜孔冲击器主要技术参数

	CIR110	CIR150	DHD350Q	DHD350R	DHD360
单次冲击功 J	180	340	651	590	822
冲击频率 Hz	13.8	13.3	14.2～25.2	13.5～24.5	13.7～24.6
耗气量 m^3/min	12	15.9	6.5～21	5.7～20	8.5～25
工作气压 MPa	0.63	0.63	0.7～2.1	0.7～2.1	0.7～2.1
冲击器外径 mm	98	136	122	114	136
质量 kg	36	85	90	68.5	126

表 5-10　嘉兴冶金机械厂潜孔冲击器主要技术参数

	J100B	J150B	JG150
单次冲击功 J	165	400	560
冲击频率 Hz	16	16	18
耗气量 m^3/min	9	15	18
工作气压 MPa	0.63	0.63	1.6
冲击器外径 mm	95	136	137
质量 kg	30	81	118

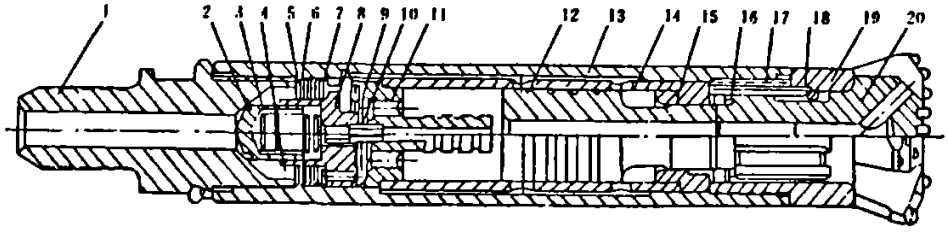


图 5-17　CIR 系列潜孔冲击器

1—后接头；2—调整垫；3—碟形簧；4—阀盖；5—导向管；6—阀片；7—配气座；8—活塞；9—外套管；10—汽缸；11—导向套；12—立销；13—弹簧；14—前接头；15—横销；16—密封圈；17—逆止阀；18—弹簧；19—垫圈；20—钎头

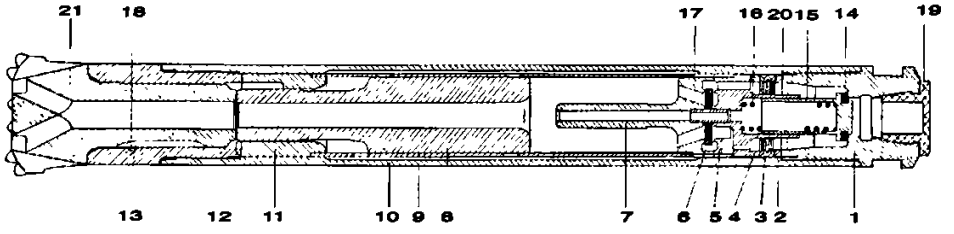


图 5-18　J 系列潜孔冲击器

1—接头；2—调整垫圈；3—碟簧；4—碟簧座；5—阀盖；6—阀片；7—阀座；8—活塞；9—外缸；10—内缸；11—衬套；12—卡钎套；13—圆键；14—密封圈；15—止逆塞；16—弹簧；17—导向套；18—钢丝；19—螺纹保护塞；20—磨损片；21—钻头

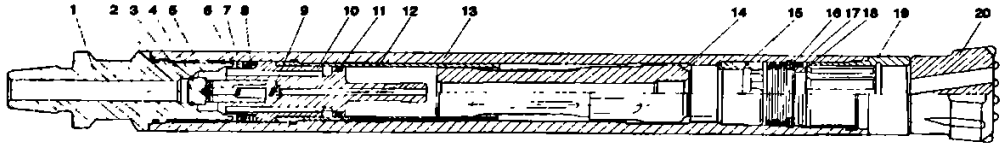


图 5-19　JG 系列潜孔冲击器

1—接头；2—O 形密封圈；3—逆止阀；4—O 形密封圈；5—限气塞；6—补偿垫；7—钢垫圈；8—碟簧；9—弹簧；10—配气座；11—O 形密封圈；12—内缸；13—外缸；14—活塞；15—导向套；16—卡簧；17—弹形圈；18—钎卡环；19—卡钎套；20—钻头

5.5.3　锚索孔施工钻机选型

（1）锚索施工钻机的国内外研究现状

1）国外岩土锚固工程锚索施工钻机的发展水平

国外岩土锚固技术的研究和应用起步比较早，特别是进入 20 世纪 80 年代以来，施工技术向能力更强，质量更高，适用范围更大、更宽的方向发展，钻孔机械完成了从机械—液压驱动向全液压驱动的转变，钻孔机具则发展了完整的、能在各种复

杂地层中实施多工艺钻进的配套机具。国外锚索施工钻机属基础工程施工机械中的一种，其基本特点是：

① 锚索施工钻机采用的是多功能型的全液压钻机。无论主传动还是回转、给进、夹持、支承、调幅、变位、运移等执行机构，基本上均为液压传动。由于液压驱动模式的采用，使整机各执行机构间的传动链用液压管线代替了传统的轴、齿轮、皮带、链等元件。这不仅使整机各执行机构（部件）的布局和动力传递方向具有最大的灵活性，而且使其具有"动态"传动的特性。如长行程顶驱式动力头的传动；履带轨距可变的行走机构传动；保证施工方位、位置、角度的变幅、变位、变角机构的传动等。这种多功能钻机支持市场上大多数钻孔方法： 螺旋式、旋转和旋转冲击钻孔；纯粹的 DTH 和顶冲击锤钻孔；以及过载钻井方法，如 OD，ODEX 和 DEPS。这类钻机普遍使用标准的模块化元件：进给、旋转头、悬臂系统和基本支架（这些元件可以装在多种规格的底盘上）[72]。通过不同类型的模块组合，可满足相应工艺要求的能力和功能输出。除此之外，还可以选择多种标准选项：钻杆夹持器和破碎锤、绞车、冲洗泵、集尘器、灌浆套件等，尽可能的满足用户的各种使用需求。

② 设备的重量、整机功率配置和主执行机构(回转、冲击、给进、起拔等)的输出能力等日趋加大。大扭矩液压顶驱双动力头和长给进行程已成为当代液压多功能钻机典型的回转和给进模式。为实现执行机构速度的连续调节并扩大调速范围，一般均用变量泵一变量马达组合方式进行容积式调速。为满足大扭矩、大起拔力、大冲击能输出的要求，主液路均采用高压大排量系统。在某些特殊领域中也发展了结构紧凑、功能较强、外廓尺寸很小的特种多功能钻机。

③ 钻机普遍采用全液压履带式底盘装载方式。也可安装在固定支架或卡车上，还可选择为钻机配备橡胶轮和拖挂装置，并可轻松地安装在牵引机上。

④ 设备的操作、控制向机电液一体化的方向发展，使操作控制过程简化、准确、灵活、直观，并能更有效地确保施工质量。从而使当代全液压多功能钻机能更好的适应岩土工程施工中多工艺方法、多工序环节、多工作状况对设备运行可靠性和工程质量保障程度的要求。当代全液压多功能钻机机电液一体化控制系统的特点可概括为：以载荷一传感系统为依托，用先导型电液比例阀控制，借助机载计算机和屏幕显示系统，使操作、监测和质量保证体系进入人机对话并具有一定智能型特征的监控阶段。其控制系统具有以下三个显著特点：

(a)液路控制均采用低电压的先导型电液比例控制阀控制中压系统，再由中压系统操纵、控制高压系统。主泵、主马达一般均配有高灵敏度的伺服机构，从而提高了控制的灵敏度和执行机构的响应速度，减少了操作的力度和动作的幅度，增大了系统的可靠性。此外，由于先导型比例阀的采用，也使操作面板变得十分小巧、紧凑。

(b)各执行机构或中间运转环节普遍增设了各类传感器和检测传输装置，可及时反馈、采集各类相关信息（如位置、荷载、速度、压力、甚至钻孔的轮廓尺寸等）这不仅可使各执行机构的动作幅度、力度准确无误，为正确选择施工措施提供依据，而且由于动力输入和执行输出间建立的内存联系，使功率利用率和施工效率均得以明显提高。

(c)某些大型多功能钻机往往配有机载计算机、屏幕显示器和数据、图表打印输出系统。该系统不仅能直观显示各个施工参数和施工机械的运转情况，以确保工作过程的正常进行和机械的正常运转，而且还可实时显示出施工状况，如孔的垂直度及其偏差、瞬时钻速等，从而可确保工程施工效率和质量。部分国外多功能钻机主要性能参数参见表 5-11。

表 5-11 部分国外多功能钻机主要性能参数表

型号	给进行程 mm	最大扭矩 KN.m	最大起拔力 KN	功率 KW	质量 Kg	备注
MUATANG A-52CB	3700	9.95	49	58	9800	阿特拉斯_柯普科/柴油驱动履带式
C6	4000	12	63.5	66	11700	卡萨特兰地/柴油驱动履带式
KR803-02 IC-5W	3000 1700/2700	16.12 5	80 2	29 10	11000 240	英格索兰/柴油驱动履带式
T41 T25	4100 2000/5000	6 1.5/5	80 60	98 51	16000 8600	意大利 Bretta/柴油驱动履带式

2）我国岩土锚固工程锚索施工钻机的发展水平

我国岩土锚固钻孔机具的发展是跟随着锚固技术的研究发展、推广应用而逐步发展起来的。锚索施工钻机是锚索孔钻进的主要设备，对成孔的质量、效率和钻进成本都起着十分重要的作用。

过去我国没有专门的锚固孔施工钻机，浅锚固孔通常采用风动凿岩机成孔，较深的锚固孔则使用岩心钻机或坑道钻机。岩土锚固技术在我国开始应用的初期，锚索施工钻孔方法基本上是引用了地质部门勘探矿产使用的钻孔工艺方法。钻进工艺以回转钻进加水基冲洗液循环排渣为主，钻机采用的是地质岩心钻机，施工钻进效率低、成本高。尤其在复杂地层钻孔时，钻孔的护壁、堵漏十分困难，材料消耗大，工程进度慢。简单、单一的钻孔设备和机具不能满足岩土锚固工程锚索施工中对钻孔速度和钻孔质量的特殊需要[74]。

从 20 世纪 60 年代末到 70 年代中期，在我国矿山开采部门开始推广应用气动潜孔冲击器，用于露天矿山开采时钻凿爆破孔，使钻孔效率较回转钻进和钢绳冲击钻进提高了 3—5 倍，同时国内一些矿山研究院开始研制气动潜孔冲击器和气动潜孔钻

机，并且迅速得到推广应用[75]。

进入 20 世纪 80 年代后，我国的经济建设发展迅速，水电站及高等级公路建设项目纷纷上马，大量的岩土边坡和工程设施需要用锚固技术进行加固处理，钻进速度高的风动潜孔锤钻进技术随即被应用到岩土锚固工程施工中，大幅度提高了锚固工程施工效率，使施工成本也得到较大幅度的降低，从而为锚固技术的推广应用提供了有力的施工技术保证。为了适应我国岩土锚固工程施工需要，许多行业或部门开始开发专用锚杆钻机。起步最早的为原地矿部机械电子研究所与赤峰钻机厂共同研制的土星—881 型全液压多功能钻机，此后地矿部勘探技术研究所与重庆探矿机械厂共同研制的MGJ—30 型和煤炭部江苏省镇江煤矿专用设备厂研制的MYZ—150 型锚杆钻机相继投产。

进入 90 年代，随着岩土锚固技术的理论研究和工程实践的不断完善，采用锚固技术来加固岩土体已被大量工程设计所采用。对锚固钻孔的造孔速度和精度也提出了新的要求，在工程施工中不断遇到的复杂地层钻孔困难问题已逐渐显得重要和突出，需要更能适应广泛锚固工程钻孔所需的专用设备和机具来完成大量的岩土锚固工程施工[79]。在国家一些大型重点工程施工中相继从国外引进了一些专用的锚固施工钻机；与此同时国内一些从事岩土锚固技术研究的单位和钻机生产厂家也开始着手研制专用的锚固钻机和钻孔机具，并且在施工工艺方法上作了许多研究探索。MD-50 型全液压动力头式锚杆钻机的成功研制,标志着我国全液压锚固工程钻机的研制达到了一个新的水平。该钻机是“八五”国家科技攻关项目“地震、地质灾害及城市减灾重大技术方法研究”中的子课题，由原地矿部勘探技术研究所设计、江苏省无锡探矿机械总厂制造。钻机于 1995 年 4 月通过部级鉴定，受到与会专家的一致好评，认为：钻机设计与性能处于国内领先水平，是一种设计合理、性能稳定、工作效率高的锚杆钻机。随后，重庆探矿机械厂、无锡双帆钻凿设备有限公司等单位相继研制了一系列全液压锚固工程专用钻机。这些钻机大都有以下共同点[86]：a、钻机适应性强，一机多用。钻机适合岩石潜孔锤钻进、跟管钻进，同时也适合土层合金回转钻进、螺旋钻进工艺。b、钻机结构为分体式，可拆性好，重量轻，能在脚手架上施工，搬迁、安装迅速方便；可远距离操纵，操作员工作环境好；一次搬迁完成多孔施工，劳动强度低。近年来，国内一些单位相继研制成功全液压双动力头式锚固工程钻机。双动力头式钻机，可实现多种钻进方式：在较厚的（30～50 米）破碎层和堆积体钻孔时，后动力头接内钻具，端部联潜孔锤，实现冲击回转钻进，前动力头驱动套管回转，进行护壁，在复杂地层（破碎层和堆积体）可实现快速成孔和快速注浆。 在松散覆盖层、流沙层、淤泥层施工时，内钻具为普通回转钻具或长螺旋钻具，前动力头驱动套管回转，进行护壁。在较完整地层钻进时，可单独使用一个动力头，进行常规回转钻进、冲击回转钻进。双动力头式钻机的成功研制，使我国锚

索施工钻机的研制水平更接近国际先进水平。大量国产锚固工程专用钻机的涌现，使施工用户有了更大的选择余地。目前，国产锚索施工钻机已基本能适应各类工作环境（高空排架、地下洞室）、各种角度（水平、上倾、下倾）、各种不良地层状况需求。国内主要的锚索施工钻机主要性能参数参见表5-12。

表5-12 国内部分锚索施工钻机主要性能参数表

型 号	给进行程 mm	最大扭矩 KN.m	最大起拔力 KN	钻进能力		驱动功率（KW）	质量（kg）	研制单位	备注
				最大孔径（mm）	最大钻深（m）				
MG-50A	2300		30	150	50	电动/11	980	无锡双帆公司	机械动力头式
MGJ-50	2300	2.8	22	180	60	电动/11	850	重庆探矿厂	
JMZ-150	1680	1.65	25.4	150	50	电动/11		山东探矿厂	
MD-30	1200	1.62	22	130	50	电动/15		中国地科院勘探所与无锡探矿机械总厂	液压动力头式
MD-50	1700		25	180	50	电动/18.5	1200		
MD-60	1800		50	185	80	电动/22	1550		
MD-100	2200		80	200	100	电动/37	3460		
MGY-80	1800	3.5	50	200	80	电动/22	1710	重庆探矿厂	
YGQ-30	1200	1.2	30	120	35	电动/7.5	450	无锡双帆钻凿设备有限公司	
YG-30	1800	1.5	30	130	30	电动/15	550		
YG-50	1800	2	30	168	50	电动/18.5	1000		
YG-60	1800	2.5	45	180	60	电动/22	1300		
YG-80	1800	3.5	45	220	80	电动/30	1700		
YG-80A	1800	4	45	250	80	电动/22	1400		
YXZ-70	1800	4	45	200	100	电动/18.5	1265	成都哈迈岩土钻掘设备厂	
YXZ-80	1800	4	45	230	100	电动/18.5	1265		
YXZ-100	1800	8	75	330	120	电动/30	1760		
QDG-2	2000	2.5	34	300	50	电动/30	2700	北京探矿厂	
MZ-165	1500	3	80	165	80	电动/22	2150	宜化英格索兰	
YMC150A	1800	4.2	50	170	40	电动/30	2200	宜昌黑旋风	
YGS-120	1300	前10后3.5	100	250	80	电动/22+22	2500	无锡双帆钻凿设备有限公司	液压双动力头式
奇迹-2000	2000	前8后6.5	40	254	100	柴油/7 4	10700	河北裕隆机械有限公司	液压履带式、双动力头
YMD-1	3000	8	52	200	120	柴油/69	9500	宜昌黑旋风工程机械公司	

（2）锚索施工钻机选型与改进

比较钻机的基本情况，气动潜孔锤跟管钻进的机械钻速很高，但加接钻杆费工费时，加接套管更是如此，为了减少加接套管的时间。可选用长行程动力头钻机，

以增加单根套管长度。以上这些钻机各有各的针对性，各有各的使用范围，结合小湾电站边坡锚固跟管钻进施工条件，选用无锡市双帆钻凿设备有限公司生产的 YG一80 型锚固工程钻机。

YG-80 型全液压钻机整体性能基本满足小湾锚索孔施工需要，但在施工过程中也逐步暴露出一些薄弱环节，为此专门进行了改进研究：

① 钻机动力头变速箱小齿轮磨损严重，影响钻机扭矩有效传递。经过认真分析计算，在接触强度方面，原设计小齿轮材质 40Cr、大齿轮材质 45 的选择上存在安全系数太低的问题。将材料选择为小齿轮 20CrMnTi、大齿轮 40Cr 的配对组合，有效解决了齿轮磨损太快的问题[89]。

② 钻机主机部分桅杆配有滑移机构和机架。滑移机构行程 500mm，通过滑移油缸的滑移可以增加动力头行程，机架部分装有变角油缸，通过变角油缸的伸缩可以改变桅杆倾角。这两部分作用在小湾高边坡堆积体锚索施工中基本没有用武之地，相反由于这两部分的存在却增加了主机的重量，使得钻机搬迁难度增加。为此，对主机部分进行了改造，去掉滑移机构和机架，有效减轻了主机重量，使得主机移位迁移更为方便，并且在桅杆底部增加了同脚手架连接的机构，钻机稳定性得到很大的提高。

③去掉滑移机构和机架后，对钻机的液压系统也做了相应改进，简化了油路系统。

YG-80 型工程钻机（图 5-20）为全液压驱动动力头式钻机。适用于水电站、铁路、公路边坡大吨位预应力锚固孔、排水孔的施工，以及预防滑坡、岩石坍塌等地质灾害治理工程。也适用于小型水井的施工、高压旋喷引孔的施工。钻机已在国内水电站中大吨位岩土锚固工程大量使用的主力机型。该钻机的主要技术参数见表 5-13，钻机特点如下：



图 5-20　YG-80 型工程钻机

钻机钻进能力强，适用范围广；钻孔速度快，处理事故能力强，钻进效率高。

钻机动力头输出轴设有伸缩机构,可以有效保护钻具。动力头及孔口板调转方向，可直接钻凿仰孔，大大增加钻孔倾角范围。

钻机机架前部设有上下调节立柱及哈夫,可调节桅杆高低,施工时对孔位快捷方便。

钻机结构为分体式，可拆性好，搬迁、安装讯速方便；并可远距离操纵，一次搬迁完成多孔施工；操作员工工作环境好，劳动强度低。

钻机桅杆上预留固定安装孔，可以无需机架直接通过辅件（横轴及扣件）安装在脚手架，使重量大大减轻，移机快捷方便。

钻机液压马达采用进口件，其它主要部件优选国内名优产品，使整机性能稳定、可靠、寿命长。钻机易损件的标准化、系列化程度高，互换性好。

钻机全液压驱动，可实现无级调速，操纵简单，维修保养方便，易损件少。

钻机可适用多种钻进工艺方法，如合金回转钻进、螺旋钻进、潜孔锤钻进、跟管钻进等。

表 5-13 YG-80 型工程钻机主要技术参数

钻孔直径	130～220mm	钻孔深度	100～80m
钻孔倾角	0～120°	动力头行程	1800 mm
动力头输出转速（正反）	5～180 rpm	动力头额定输出扭矩	3500 Nm
桅杆滑移行程	500 mm	动力头最大起拔力	45 KN
动力头最大给进力	30 KN	液压系统额定压力	18 MPa
动力（电动机）	功率 30 kW	钻机质量	1700 kg
主机外行尺寸	3400×1000×1500 mm		

5.5.4 空气压缩机选型

空气压缩机是把一个标准大气压的空气通过能量转化的方式输出用户需求的空气的机械。空气具有可压缩性，经空气压缩机做机械运动便本身体积缩小，压力提高后的空气称为压缩空气。压缩空气是一种重要的动力源，有以下显著特点：无污染，清晰透明，输送方便，没有有害性能，没有起火危险，不怕起负荷。

空气压缩机作为一种重要的能源产生形式，被广泛应用于生活生产的各个环节。尤其是双螺杆式的空气压缩机被广泛应用机械，冶金，电子电力，医药，包装，化工，食品，采矿，纺织，交通等众多工业领域，成为压缩空气的主流产品。

国内生产空气压缩机的厂家很多，主要有沈阳气体压缩机股份有限公司、上海压缩机有限公司、复盛实业（上海）有限公司、无锡压缩机集团公司、柳州富机械有限公司、安瑞科（蚌埠）压缩机有限公司、上海斯可络压缩机有限公司、博莱特压缩机（中国）有限公司和上海英格索兰压缩机有限公司等[94]。根据用气的气量（m^3/min）和压力（MPa）要求，便可选择空气压缩机的规格。空压机是潜孔锤钻进的最重要动力源之一，其情况好坏、能力大小，不仅直接影响潜孔冲击器性能的发挥，而且和钻进效率、钻孔深度均有很大有关系。

根据小湾电站边坡锚固工程所选的潜孔冲击器型号，空压机宜选用风压在 0.8 MPa 以上，风量在 20 m^3/min 以上的。表 5-14 是适合小湾电站边坡锚固跟管钻进的几种空压机的主要技术参数。

表 5-14　小湾电站跟管钻进选用空压机主要技术参数

型　号	风压（MPa）	风量　（m^3/min）	生产厂家
LG-16-20/5-15D	1.5	20	无锡压缩机集团公司
LGY25/20-20/25	2.5	20	
XHP750WGM	1.75	21.25	上海英格索兰压缩机有限公司
VHP750E	1.2	21.5	
PTHS900GD	1.05	24.8	瑞典阿特拉斯公司
XR350GD	1.2	21	

5.6　潜孔锤跟管钻进技术规程

5.6.1　钻孔结构方案

根据地层结构情况，孔深和终孔直径，推荐采用如下表 5-15 所示的跟管技术方案。

表 5-15　跟管钻进成孔技术方案

地　层　情　况	技　术　方　案
完整地层-较完整地层	潜孔锤钻进成孔，一径到底，终孔直径满足设计要求。
上部破碎地层不超过 40 米，孔深 50 米内。	可采用跟管钻具全孔跟管钻进，终孔直径以满足设计要求为准，尽量缩小成孔直径，降低成本。
上部破碎地层不超过 40 米下部地层完整，孔深大于 40 米，一次跟管能力不足以达到终孔设计深度。	上部地层采用跟管钻进，穿过破碎层后，用潜孔锤裸孔钻进成孔，终孔直径满足设计要求为准。
上部破碎地层远超过 40 米，通常超过 60 米，一次跟管能力不足以达到终孔设计深度，一次跟管不能穿过上部破碎层。	可采用二次跟管钻进工艺，在一次跟管到适当深度后（通常 30-35 米），换径进行第二次跟管到终孔，并回拔出锚岗段，进行锚岗施工。 二次跟管时安装可靠的对中护正装置。 二次跟管完成后是否拔管应根据地层漏失情况，从保护锚索体，保证注浆质量，降低施工成本，提高施工效率等方面进行综合评价。
特别深厚破碎地层	可采用 2 次跟管，结合潜孔锤裸孔钻进，但要注意钻具的级配，特别是各种钻具管靴的通孔直径和终孔直径的要求。

根据小湾电站生产试验情况和项目承担单位的实践和经验，在进行跟管钻进时，如果一级套管的跟进深度大于 40 米，跟管钻进的效率将急剧下降，同时，套管的强度、起拔设备的能力均受到限制，所以，根据小湾地层的特点，建议一级套管的跟进深度不要超过 35～40 米。

5.6.2 潜孔锤跟管钻进工艺流程

采用气动潜孔锤跟管钻进的预应力锚索施工，其主要施工工艺流程见图 5-21。

5.6.3 施工工艺

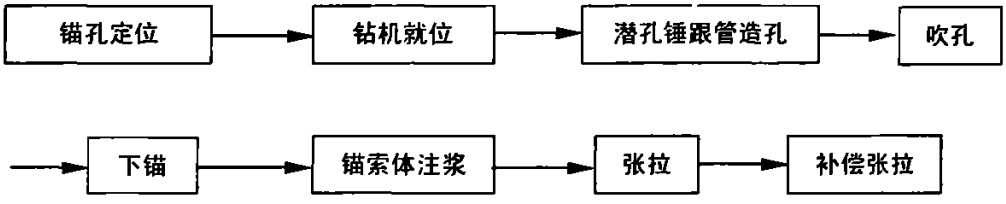


图 5-21 施工工艺流程图

（1） 锚孔定位

① 锚孔定位

测放孔位，采用经纬仪与红外仪结合使用的方法进行锚孔测放定位。严格检测开孔钻具与设计锚孔轴线方位保持一致。

② 标志

用红油漆在所测放的孔位处标明锚孔中心点及编号。

（2）钻机就位

为使锚孔在施工过程中及成孔后其轴线的俯角、方位角符合设计要求，必须保证钻机就位的准确性和稳固性，因此，钻机安装平台要平整、坚实、不变形、不振动等。并严格检测开孔钻具的轴线与设计锚孔轴线方位是否保持一致。

1）准确性

① 调整钻机立轴轴线和边坡岩面的接触点的高程与标定孔位一致；

② 调整钻孔立轴的轴线，使其与锚孔设计中心轴线的俯角及方位角保持一致；

③ 由技术人员测校开孔钻具轴线，使其与锚孔中心轴线方向一致，然后才能开孔。

2）稳固性

① 用卡固管件使钻机牢固卡牢紧稳；

② 试运转钻机，再次校测开孔钻具轴线与锚孔中心轴线，使其保持一致，拧紧

紧固螺杆；

③ 必须随时保证施钻过程中钻机的稳固性；

④ 设置孔口导向管或小型导向桩，以保证施工的锚孔顺直、倾角、方位角符合设计要求。

（3）作业前的检查

① 开始作业前，应仔细检查供气管路是否连接牢固，不准有漏风现象。

② 检查油雾器内是否已装满机油。

③ 检查各部分螺钉、螺帽、接头等是否拧紧，钻机安装是否稳固、周正、水平。

④ 开孔前，反复倒置潜孔锤，检查活塞运动是否灵活。如果活塞运动受阻，应查明原因，排除故障后，才能使用。

⑤ 检查供风管路及钻杆内孔是否有杂物，并及时清除干净，防止堵塞潜孔锤。

（4）钻进工艺参数

钻进技术参数的选择是潜孔锤钻进的一项关键问题。其合理与否将直接影响钻进效率和经济效益的高低。主要钻进技术参数包括风量、风压、钻压与转数等。

① 风量

根据所选用的空压机和潜孔锤的性能，合理确定风量。为使潜孔锤正常工作而又能排除岩粉，要求钻杆和孔壁环状间隙之间的最低上返风速为 15 m/s。如风量较小，就难以排除孔内岩粉，从而影响钻进效率。

② 风压

潜孔锤的冲击频率和冲击功能都与风压有密切关系，潜孔锤钻进常用风压是钻进参数重要指标之一。据美国研究资料表明，钻速和风压几乎是成正比的。风压从 0.6 MPa 提高到 1.30 MPa 时，钻进效率可提高一倍。国内室内试验，也得到类似结论。

国内生产的潜孔锤有两种：低压潜孔锤，所需风压为 0.5～0.7 MPa；高压潜孔锤，所需风压为 0.8～1.5 MPa。在潜孔锤钻进时，除正常工作所需风压外，还要加上孔深时沿程压降及克服水位以下的水柱压力。

③ 冲击频率

当潜孔锤额定风量和额定风压均达到规定要求时，都能达到额定冲击频率。潜孔锤一般的额定冲击频率为 800～1500 次/min。

④ 钻压

从潜孔锤破碎岩石的原理来看，岩石主要是在冲击功作用下破碎的。潜孔锤钻进效率的高低，主要取决于冲击功的大小和冲击频率的多少，而钻压是保证冲击功充分发挥作用的辅助力。对某一直径的潜孔锤来说，钻压有一个合理的范围。钻压过大，不仅不会提高钻进效率，反而会加速钻头磨损。例如，使用 200 mm 的潜孔锤，钻压在 13～16 kN 时钻进效率最佳。使用 90 mm 潜孔锤，钻压在 5～6 kN 时钻进效

率最佳。

⑤ 转数

为使潜孔锤的冲击功有效地传到孔底，钻具的转数应按潜孔锤的冲击频率和所钻岩石的性质来确定，它存在最优冲击间隔。钻具的转数和冲击频率的配合，应使切削具在最优冲击间隔的条件下工作，此时钻进效率最高。美国水学井学会(N. W. W. A)康伯尔认为：潜孔锤回转存在最优转角，其值为11°，最优转角与转数、冲击频率之间的关系[96]为

$A=n*360/f$

式中：A——最优转角，(°)；

n——钻具转数，r/min；

f——冲击频率，次/min。

如最优转角取11°，冲击频率为600次/min，代入上式获得转数为18 r/min。当冲击频率为1000次/min时，则转数为31 r/min。这样计算出的数据，与美国、前苏联等国潜孔锤应用转数的范围基本相同。钻进压力：开孔时，使冲击器能紧贴岩面的低压力冲击，平稳缓缓推进即可，跟管钻进中根据所用冲击器型号的不同 $P_f=10\sim15$ kN。

转速：

a.开孔转速 n=0。

b.跟管钻进中根据所用冲击器型号的不同转速 n=25～45 r/min。

风量：$Q_{风}=9\sim25$ m^3/min。

5.6.4 钻进中注意事项

（1）严格按照钻进技术参数作业，不能盲目追求进尺而加大钻压，防止钻杆折断、钻头掉齿、断齿等事故发生。

（2）随时观察气压表。如发现压力急剧上升或下降，应立即提钻，查明原因，排除故障。

（3）钻进中经常注意潜孔锤冲击响声。如发现冲击频率变低或不稳定，潜孔锤出现异常，应立即提钻进行修理。

（4）钻进中，如发现钻杆抖动厉害或周期性滞转现象，说明遇到破碎带或较大裂隙，应立即提动钻具，再缓慢下放，以较低钻压通过该区，防止造成钻杆折断等事故。

（5）如发现孔口不返气、进尺缓慢，说明遇到大裂隙，应反复上下提动钻具进行周期性碎岩和吹孔工作，把大颗粒岩屑冲成粉末并吹入裂缝中，保证正常钻进。必要时，应加入泡沫剂以堵死裂隙。

（6）回次结束后，应上提钻具 0.3～0.5 m，进行吹孔。待孔口不返岩屑时，才可停风加接钻杆。

（7）停风时，应缓慢关闭送风阀，不可突然中断供风，防止潜孔锤倒吸岩粉，造成潜孔锤堵塞事故。

（8）定期向钻杆向加入少量机械油，确保潜孔锤充分润滑(冬季施工机械油应加热)和高效能，延长使用寿命。

（9）下钻进时应边回转边下放。当钻具接近孔底时，应放慢速度。

（10）当空压机风压不足时，可采用两台或多台并联的办法，以加大风压。

（11）应经常保持孔底清洁。当钻进时孔内岩粉过多时，应进行专门吹孔，清除孔内岩粉。

（12）为防止硅尘危害，孔口应设置除尘设施，确保作业人员身体健康。

5.6.5　钻进中特殊情况处理

（1）钻遇较大孤石时，采用常规冲击器配Φ135 钻头钻出先导孔，先导孔钻进时，应避免一次性穿透孤石，以免孔内漏风严重，造成跟管困难，先试探性钻进再跟管反复多次进行，直至穿透孤石继续正常钻进。

（2）孔内事故：钻进过程中，由于多种原因造成偏心钻头脱落遗留孔内。处理时先用常规冲击器配Φ135 废旧钻头小风量钻进导孔 1m 左右，在钻进过程中，由于岩层破碎松软，钻遇偏心钻头时将其向前推进挤靠在孔壁下方（或左右方）；然后继续跟管钻进，当钻遇偏心钻头时被再次推进挤靠，套管顺利通过，恢复正常钻进。若事故孔段岩层较完整，在条件允许时，可将套管向外拔出 2~3m，然后在孔底实施小药量爆破扩孔，使钻头沉积在扩大的孔段，从而避开再次跟进的套管[100]。

（3）拔管：锚束体下入孔内后，即将孔内套管拔出。采用 YB-30 型拔管机及 ZB4-500S 电动油泵进行拔管；拔管前，先将孔口部位平整，使孔口岩面与套管轴线垂直，然后搭设简易脚手架固定拔管机，拔管机通孔中心线与套管轴线要重合，否则易造成拔管困难甚至套管断裂事故。拔管时在拔管机底座与岩面之间铺垫平直厚木板，即可开始拔管；拔管时，若孔口岩面受压变形过大，应重新加垫木板整平，才能继续拔管作业。

（4）钻具维修与保养：钻具使用中或使用结束，应进行维护保养。对钻杆、套管丝扣清理干净，仔细检查是否有破损变形，将完好的钻杆、套管丝扣涂抹黄油编号备用；将冲击器拆卸清洗，更换易损配件；检查偏心钻具锤头外肩环、套管靴内肩环是否有毛刺，用锉刀打磨平整，变形较大的应停止使用；检查偏心钻头与中心锤连接横销及中心锤与冲击器连接横销磨损情况，并及时更换已经变形或磨损较大的横销；磨损严重的钻头由于不能满足孔径要求，不能使用[101]。

5.7 跟管钻进技术在小湾电站试验与应用情况

从2004年起，岩土工程公司A、岩土工程公司B等单位先后在小湾电站应用气动潜孔锤跟管钻进技术施工锚索孔。取得了理想的效果，获得了高的经济效益，也证明了气动潜孔锤跟管钻具的性能优良、该技术成熟。

5.7.1 岩土工程公司A锚索施工情况

在小湾堆积体锚索施工工程中，岩土工程公司A先后完成了右岸大椿树沟中部堆积体边坡、左岸饮水沟2#山梁堆积体边坡的锚索孔施工工作。

右岸大椿树沟中部边坡共计完成1800 kN级堆积体锚索500多根，最深施工孔深70.0 m，平均跟管深度31.5 m，最大跟管深度56.0 m。

在左岸饮水沟2#山梁共计完成1800 kN级堆积体锚索300多根，最深施工孔深80.0 m，平均跟管深度43.0 m，最大跟管深度63.0 m。

岩土工程公司A使用研制的跟管钻具290多套，平均钻具寿命超过60米，钻具平均寿命比原来提高了38 %。项目研究成果的应用，确保了小湾水电站左右岸边坡开挖和支护的施工进度，有力的推动了小湾水电站的建设进程，取得了显著的社会经济效益。

表5-16是岩土工程公司A在小湾电站锚索施工中左岸饮水沟2#山梁跟管钻进新技术完成的钻孔情况统计表。

表5-16 左岸饮水沟2#山梁跟管钻进新技术完成的钻孔情况统计表

序号	孔号	孔深（m）	跟管深度（m）	序号	孔号	孔深（m）	跟管深度（m）
1	QX1370-8	50.0	39.0	169	QX1382-1	75.0	49.5
2	QX1370-9	50.0	40.0	170	QX1384-15	60.0	47.0
3	QX1370-10	50.0	33.0	171	QX1380-6	75.0	62.0
4	QX1370-12	60.0	46.0	172	QX1372-4	75.0	45.5
5	QX1374-1	70.0	49.0	173	QX1384-14	61.0	52.0
6	QX1374-2	50.0	36.0	174	QX1372-3	75.0	41.5
7	QX1374-4	50.0	30.0	175	QX1384-13	72.0	48.0
8	QX1374-5	50.0	34.0	176	QX1372-1	75.0	48.0
9	QX1370-6	50.0	36.0	177	QX1384-10	75.0	38.0
10	QX1366-8	70.0	45.0	178	QX1380-5	70.0	52.5
11	QX1370-11	60.0	48.0	179	QX1384-12	75.0	56.5
12	QX1370-1	60.0	47.0	180	QX1380-4	75.0	34.0
13	QX1370-13	50.0	40.0	181	QX1372-2	73.0	51.0
14	QX1366-3	60.0	45.0	182	QX1384-11	75.0	58.5

续表 5-16

15	QX1370-7	65.0	35.0	183	QX1380-3	75.0	62.0
16	QX1370-2	60.0	28.5	184	JG1378-5	62.0	59.5
17	QX1346-4	50.0	34.5	185	JG1372-8	67.0	35.0
18	QX1370-3	70.0	35.0	186	JG1376-5	60.0	53.0
19	QX1370-5	75.0	35.0	187	JG1376-4	75.0	49.0
20	QX1366-4	60.0	33.0	188	JG1374-4	75.0	59.0
21	QX1366-10	65.0	34.0	189	JG1372-7	75.0	63.0
22	QX1346-5	50.0	39.0	190	JG1376-6	75.0	52.0
23	QX1346-5	50.0	33.0	191	JG1374-5	75.0	50.0
24	QX1366-2	50.0	45.0	192	JG1372-6	75.0	57.0
25	QX1366-9	75.0	32.5	193	JG1372-5	68.0	45.0
26	QX1366-5	60.0	31.5	194	JG1372-4	75.0	43.0
27	QX1366-7	70.0	37.0	195	ZJ1378-2	75.0	60.0
28	QX1366-6	70.0	36.0	196	QX1380-2	75.0	61.0
29	QX1350-1	60.0	35.0	197	JG1374-6	72.0	38.0
30	QX1346-6	50.0	27.0	198	ZJ1378-3	75.0	53.0
31	QX1350-3	60.0	34.5	199	JG1378-6	64.0	46.0
32	IIZ1-4	55.0	33.0	200	JG1374-7	75.0	52.0
33	QX1350-4	60.0	42.0	201	ZJ1386-7	75.0	50.0
34	IIZ2-1	55.0	34.0	202	JG1378-7	75.0	43.0
35	IIZ1-2	55.0	39.0	203	ZJ1378-4	75.0	48.0
36	QX1346-3	50.0	36.0	204	ZJ1386-6	75.0	50.0
37	IIB1362-2	60.0	35.0	205	ZJ1374-1	75.0	49.0
38	LM1270-1	55.0	30.0	206	ZJ1378-6	75.0	50.0
39	LM1272-1	55.0	39.0	207	ZJ1386-8	75.0	53.0
40	QX1370-4	70.0	31.5	208	ZJ1378-5	75.0	46.0
41	LM1272-4	55.0	37.0	209	ZJ1374-3	60.0	48.0
42	LM1272-3	55.0	40.0	210	ZJ1378-7	75.0	47.0
43	IIZ1-1	55.0	40.0	211	ZJ1374-2	75.0	46.5
44	QX1350-6	60.0	40.5	212	ZJ1378-8	75.0	34.0
45	QX1346-2	50.0	43.5	213	ZJ1386-9	75.0	49.0
46	IIZ7-2	50.0	37.0	214	ZJ1374-7	75.0	47.0
47	LM1270-13	45.0	37.0	215	ZJ1386-12	75.0	44.5
48	LM1272-5	55.0	40.0	216	ZJ1374-4	70.0	46.5
49	LM1272-2	55.0	41.0	217	QX1376-8	75.0	36.0
50	LM1270-12	50.0	42.5	218	ZJ1386-10	75.0	46.0
51	LM1270-8	50.0	42.0	219	ZJ1374-5	80.0	53.0
52	QX1346-1	50.0	30.0	220	ZJ1386-13	75.0	43.0
53	LM1270-11	50.0	45.0	221	ZJ1386-14	75.0	50.0
54	ZJ1368-5	65.0	31.0	222	ZJ1368-11	75.0	35.0
55	QX1350-5	60.0	46.0	223	ZJ1364-13	70.0	54.0

续表 5-16

56	IIZ1-3	55.0	27.0	224	ZJ1374-6	70.0	42.5
57	IIB1362-1	65.0	36.5	225	ZJ1368-10	75.0	37.5
58	ZJ1348-4	65.0	38.0	226	ZJ1378-1	75.0	42.5
59	ZJ1368-4	75.0	45.0	227	ZJ1364-14	75.0	45.0
60	ZJ1364-1	75.0	40.0	228	ZJ1386-11	75.0	45.0
61	ZJ1362-11	75.0	31.5	229	ZJ1368-9	75.0	38.0
62	ZJ1362-1	75.0	33.0	230	ZJ1364-12	75.0	40.0
63	QX1350-2	60.0	40.5	231	ZJ1368-12	65.0	33.5
64	IIZ5-1	40.0	40.0	232	ZJ1368-8	70.0	37.0
65	ZJ1362-10	75.0	45.0	233	ZJ1378-9	75.0	52.0
66	QX1350-8	60.0	45.0	234	IIB1366-4	65.0	40.0
67	ZJ1368-3	75.0	34.5	235	IIB1366-3	65.0	38.0
68	ZJ1362-9	75.0	46.0	236	IIB1366-2	60.0	34.0
69	ZJ1348-5	65.0	37.0	237	ZJ1364-16	75.0	46.0
70	ZJ1362-2	75.0	35.0	238	QX1338-4	60.0	48.0
71	ZJ1364-2	75.0	45.0	239	ZJ1368-13	75.0	41.0
72	ZJ1348-3	65.0	27.0	240	QX1338-5	60.0	51.0
73	ZJ1362-8	75.0	44.0	241	QX1338-5	60.0	33.0
74	ZJ1362-3	75.0	40.0	242	IIB1366-1	65.0	32.0
75	ZJ1364-7	75.0	36.0	243	ZJ1364-15	74.0	39.0
76	ZJ1368-2	70.0	39.0	244	ZJ1368-14	75.0	38.5
77	ZJ1360-5	75.0	35.0	245	QX1378-1	50.0	34.0
78	ZJ1364-3	75.0	40.0	246	QX1378-2	50.0	30.0
79	ZJ1364-8	75.0	38.0	247	QX1378-3	50.0	35.0
80	ZJ1368-1	75.0	37.5	248	QX1378-4	40.0	33.0
81	ZJ1348-2	70.0	28.5	249	QX1378-5	40.0	31.0
82	ZJ1360-6	75.0	45.0	250	QX1378-6	50.0	42.0
83	ZJ1348-1	70.0	25.0	251	QX1376-6	60.0	41.0
84	QX1350-10`	60.0	39.0	252	QX1376-5	60.0	58.0
85	ZJ1364-4	75.0	38.0	253	QX1376-7	60.0	40.0
86	ZJ1368-6	75.0	43.5	254	QX1362-1	65.0	50.0
87	ZJ1362-4	75.0	49.5	255	QX1332-10	60.0	55.0
88	QX1350-9	60.0	36.0	256	QX1376-3	75.0	41.0
89	ZJ1360-7	70.0	42.0	257	QX1376-4	75.0	47.0
90	ZJ1352-9	70.0	40.0	258	QX1332-9	65.0	51.0
91	ZJ1352-5	70.0	30.0	259	QX1362-3	70.0	43.0
92	ZJ1352-6	70.0	40.0	260	QX1376-2	75.0	49.0
93	ZJ1368-7	75.0	36.5	261	QX1346-8	60.0	40.0
94	ZJ1362-5	75.0	35.0	262	QX1350-10	60.0	40.5
95	ZJ1360-8	75.0	39.0	263	QX1350-7	50.0	33.5
96	ZJ1364-9	75.0	42.0	264	QX1346-9	60.0	56.0

续表 5-16

97	ZJ1364-11	75.0	37.0	265	QX1350-11	60.0	36.0
98	ZJ1364-5	75.0	36.0	266	IIZ2-4	55.0	41.0
99	ZJ1364-6	75.0	39.0	267	QX1332-8	65.0	46.5
100	ZJ1352-8	70.0	30.0	268	QX1332-6	45.0	45.0
101	IIB1362-4	65.0	50.0	269	QX1376-1	75.0	55.0
102	ZJ1352-7	70.0	33.0	270	IIZ2-3	55.0	29.5
103	ZJ1362-7	75.0	37.0	271	IIZ3-4	55.0	29.0
104	ZJ1364-10	75.0	39.0	272	LM1270-3	55.0	34.0
105	QX1366-11	75.0	33.0	273	JG1376-8	75.0	55.0
106	IIB1362-3	65.0	50.0	274	QX1362-2	70.0	47.0
107	QX1366-12	75.0	45.0	275	LM1270-4	55.0	37.0
108	ZJ1360-10	75.0	47.0	276	IIZ3-2	55.0	33.0
109	ZJ1360-9	75.0	31.2	277	QX1346-10	60.0	40.0
110	QX1338-3	60.0	37.0	278	LM1270-5	55.0	29.0
111	QX1330-6	50.0	39.0	279	IIZ3-1	55.0	37.0
112	QX1344-5	70.0	54.0	280	ZJ1360-3	75.0	38.5
113	QX1354-7	58.0	45.0	281	LM1270-6	55.0	34.0
114	QX1354-4	65.0	27.0	282	LM1272-8	45.0	45.0
115	QX1354-6	60.0	47.0	283	IIZ4-1	50.0	39.0
116	QX1354-5	60.0	55.5	284	IIZ4-2	50.0	43.0
117	ZJ1352-3	65.0	53.0	285	ZJ1360-2	75.0	33.0
118	ZJ1352-1	70.0	43.0	286	LM1270-7	50.0	45.0
119	ZJ1352-2	75.0	56.0	287	LM1272-14	50.0	34.5
120	ZJ1352-4	70.0	46.0	288	IIZ8-1	40.0	30.0
121	QX1326-9	40.0	37.0	289	QX1346-11	60.0	38.0
122	QX1326-10	40.0	32.0	290	ZJ1370-9	75.0	52.5
123	QX1326-11	40.0	35.0	291	LM1272-15	50.0	43.0
124	QX1326-12	40.0	31.5	292	LM1272-6	50.0	37.0
125	QX1330-8	40.0	25.5	293	LM1272-7	50.0	45.0
126	QX1330-9	40.0	30.0	294	LM1270-9	50.0	37.0
127	QX1330-7	40.0	39.7	295	ZJ1360-1	75.0	30.0
128	QX1342-4	50.0	38.0	296	QX1346-13	60.0	43.0
129	QX1334-3	50.0	46.0	297	ZJ1370-8	75.0	34.0
130	QX1334-4	60.0	43.0	298	QX1346-12	60.0	47.0
131	QX1342-3	50.0	39.0	299	QX1350-12	60.0	45.0
132	Lm1263-1	55.0	35.0	300	ZJ1352-12	70.0	45.0
133	IIZ2-2	55.0	37.0	301	QX1358-1	75.0	42.0
134	LM1270-2	55.0	33.0	302	ZJ1354-4	70.0	40.0
135	LM1272-12	55.0	44.0	303	ZJ1356-4	70.0	38.0
136	IIZ7-1	40.0	36.0	304	QX1350-13	60.0	38.0
137	LM1272-11	50.0	42.0	305	ZJ1356-2	70.0	39.0

续表 5-16

138	LM1272-13	50.0	37.5	306	ZJ1370-10	75.0	40.0
139	IIZ5-4	50.0	35.0	307	ZJ1354-3	70.0	41.5
140	IIZ6-1	50.0	41.0	308	ZJ1370-11	75.0	37.0
141	IIZ5-2	50.0	48.0	309	ZJ1352-15	70.0	42.0
142	ZJ1344-4	65.0	50.0	310	QX1368-5	75.0	31.0
143	LM1270-10	50.0	44.5	311	QX1358-2	75.0	47.0
144	LM1272-10	50.0	42.0	312	ZJ1356-1	75.0	37.0
145	ZJ1344-3	50.0	39.0	313	QX1368-4	75.0	42.0
146	ZJ1344-2	65.0	38.0	314	ZJ1356-5	70.0	31.5
147	QX1346-7	60.0	32.0	315	QX1358-3	75.0	28.0
148	ZJ1344-9	70.0	46.5	316	ZJ1356-3	75.0	45.0
149	ZJ1344-10	70.0	45.0	317	ZJ1352-13	70.0	35.5
150	ZJ1344-5	65.0	41.0	318	ZJ1352-11	70.0	34.0
151	ZJ1344-11	70.0	43.0	319	ZJ1352-14	70.0	34.0
152	ZJ1344-6	70.0	33.5	320	ZJ1348-14	70.0	45.6
153	ZJ1344-1	65.0	47.0	321	ZJ1354-2	70.0	46.0
154	QX1384-19	50.0	39.0	322	ZJ1356-6	75.0	38.0
155	QX1384-18	60.0	35.0	323	ZJ1354-1	70.0	36.0
156	QX1384-17	60.0	34.0	324	ZJ1354-6	70.0	34.0
157	QX1384-16	60.0	52.5	325	ZJ1360-4	75.0	46.5
158	QX1380-7	60.0	45.0	326	QX1358-4	75.0	36.0
159	QX1380-8	60.0	52.0	327	ZJ1348-9	70.0	42.0
160	QX1380-9	60.0	48.0	328	ZJ1348-13	70.0	39.0
161	QX1380-10	60.0	34.0	329	ZJ1354-5	70.0	36.0
162	QX1380-11	50.0	42.0	330	ZJ1368-15	75.0	31.5
163	QX1380-12	50.0	31.5	331	ZJ1352-10	70.0	46.0
164	QX1374-6	50.0	30.0	332	QX1342-5	55.0	43.0
165	QX1374-7	50.0	37.0	333	ZJ1348-7	65.0	37.0
166	QX1374-8	40.0	22.5	334	ZJ1348-11	70.0	42.0
167	QX1374-9	60.0	52.0	335	ZJ1348-8	65.0	36.5
168	QX1374-10	50.0	46.5	336	ZJ1348-6	65.0	28.5

5.7.2 岩土工程公司 B 锚索施工情况

岩土工程公司 B 是 2003 年底进入小湾工地进行施工，到 2004 年 10 月止，采用跟管钻进技术跟进套管近两千米，使用两种偏心跟管钻具 20 多套，跟管钻具寿命平均 60 多米，最长寿命达到 110 米。图 5-22 为左岸锚索施工情况。



图 5-22 左岸山梁堆积体锚索施工

表 5-17 是岩土工程公司 B 在小湾电站锚索施工中采用跟管钻进技术完成的钻孔情况。

表 5-17　岩土工程公司 B 跟管钻进技术完成的钻孔情况统计表

孔号	孔深 (m)/T	跟管深度	孔号	孔深 (m)/T	跟管深度
S1566-1	70/180	46.0	QX1406-15	45/180	44.0
S1566-2	70/180	42.0	QX1402-11	75/180	55.0
S1566-3	70/180	38.0	QX1402-12	65/180	46.0
S1566-4	70/180	35.0	QX1402-13	75/180	45.0
S1558-1	70/180	44.0	QX1402-14	75/180	39.0
S1558-2	70/180	41.0	QX1402-15	75/180	40.0
S1558-3	70/180	39.0	QX1402-16	45/180	35.0
S1558-4	70/180	36.0	QX1402-17	45/180	35.0
S1558-5	45/180	32.0	IIB1346-1	40/100	26.0
S1558-6	45/180	29.0	IIB1346-2	40/100	25.0
S1558-7	45/180	28.0	IIB1320-1	30/100	25.0
S1546-1	70/180	46.0	IIB1320-2	30/100	22.0
S1546-2	70/180	45.0	QX1320-2	50/180	39.0
S1546-3	70/180	42.0	IIB1320-1'	55/180	43.0
S1546-4	70/180	41.0	IIB1320-2'	60/180	37.0
S1546-5	70/180	39.0	IIB1320-3'	40/180	40.0
S1546-6	45/180	32.0	IIB1316-3'	37/180	38.0
S1546-7	45/180	35.0	QX1312-3	40/180	37.0
S1542-1	70/180	51.0	QX1312-5	55/180	39.0
S1542-2	70/180	48.0	IIB1312-1	50/100	41.0
S1542-3	70/180	47.0	IIB1312-2	40/180	37.0
S1542-4	70/180	43.0	IIB1312-7	50/180	46.0
S1542-5	70/180	39.0	IIB1312-8	50/180	36.0
S1542-6	45/180	35.0	IIB1312-9	50/180	31.0
S1542-7	45/180	29.0	IIB1312-10	30/100	30.0
S1530-3	75/180	52.0	IIZ5-3	70/180	45.0
QX1406-10	75/180	47.0	IIZ6-3	70/180	41.0
QX1406-11	75/180	46.0	IIZ6-4	60/180	44.0
QX1406-12	75/180	41.0	IIZ7-3	55/180	39.0
QX1406-13	65/180	46.0	IIZ7-4	50/180	36.0
QX1406-14	75/180	38.0			

5.7.3 气动潜孔锤跟管钻进技术应用结果及效益评述

（1）气动潜孔锤跟管钻进技术应用结果

① 在小湾工程中，应用两种气动潜孔锤偏心跟管钻具施工锚索孔，取得了理想的效果，钻具的平均寿命达到了 81.66 米；平均时效达到了 2.17 米/小时。按平均钻进速度计算，完成跟进 40 米 φ168 mm 的套管施工，最多需要 20 个小时。证明了气动潜孔锤跟管钻具的性能优良。

② 钻具结构设计合理，具有一定的创新性。两种型号的钻具结构设计合理，特别是将以前的依靠柱销传递力矩改为依靠键来传递力矩和特殊的联接销结构，延长了钻具的使用寿命，降低了钻具孔内发生事故的可能性。

③ 套管起拔设备在小湾的使用中，泵站工作性能良好，油缸的同步性好，设备运行平稳，工作可靠，搬迁方便，底座和油缸采用铰接连接的设计新颖，在工地上比较适用。

④ 选择的钻机、空压机、潜孔锤型号均较为合理，YG-80 锚固工程钻机经过改进后，提高了钻机的适应性，增强了钻机功能，使其更适合小湾堆积体锚索控施工的需要。

⑤ 跟管钻进工艺规程和操作注意事项合理，形成了适合小湾工程锚索孔施工的工艺技术。

（2）气动潜孔锤跟管钻进技术应用效益评述

① 社会效益显著。

小湾电站坝址地处深山峡谷之中，两岸山势陡峻，河谷深切，坝址区河谷低于两岸山顶达 1000 m 以上，缆机基础及坝基开挖形成的高边坡，在左岸从山梁顶部开口线至大坝建基面高程差 687 m，右岸也有近 600 m，这在全国乃至全世界都是罕见的。堆积体在左右两岸都有，物质组成主要为块石、特大孤石夹碎石土、碎石层或砂壤土。堆积体有相当部分地段较为松散，并伴有较普遍的架空现象，堆积体铅直厚度一般为 30～40 m，最深 60 多米，平均深度 30 多米。受岩性构造和地形控制，两岸基岩强风化岩体底界埋深（铅直）一般为 10～20 m，右岸局部可达 26 m；弱风化岩体底界埋深一般为 40～50 m，局部可达 70～88 m。两岸山坡岩体在卸荷作用下，卸荷裂隙发育。对于这类边坡，按常规设计,一般采用以大开挖为主、局部辅以锚固的工程处理措施。但该工程措施施工周期长、施工干扰大、辅助工程量大、工程处理费用巨大，特别是象小湾工程，其施工工作面狭窄，更突出了大开挖方案的不足。如果采用以锚固为主、开挖为辅的工程处理措施，在施工周期、施工干扰、辅助工程量、工程处理费用等方面都大大优于大开挖方案，其所带来的经济效益和社会效益都是非常巨大的、不可估量的。但对小湾这样的边坡，要实施锚固工程，必须有

一套适合小湾边坡地层条件的跟管钻进技术。该项目的研究较好的解决了小湾电站锚固施工的关键技术难题，使以锚固为主、开挖为辅的工程处理措施得以顺利实施，由此所带来社会效益巨大的。

② 直接效益明显。

由于小湾边坡连续开挖高度达 600 余米，锚索数量达到 10000 束以上，钻进延米将超过 30 万米，另有 3～4 万米排水孔和超过 100 万米的系统锚杆，所以，跟管钻进工作量巨大。因此锚固工程单米成本的小幅度的降低都会对小湾工程边坡锚固处理总费用的降低带来巨大的现实意义。锚固工程的成本受很多因素的影响，如：跟管钻具的使用寿命、跟管钻进的效率、地层条件、跟管深度、跟管口径、施工条件、施工设备选型等等，因此，就本跟管钻进技术的开发研究成果所带来的经济效益很难准确的量化计算。但从应用该成果的几个生产单位反馈、统计、分析结果表明：通过该新技术的开发研究，仅在跟管钻具使用寿命延长和跟管钻进效率的提高这两个方面，使锚固工程的单米成本降低 80～120 元左右，因此，通过该新技术的开发研究，给小湾整个工程所带来的直接经济效益是十分显著的。

③该技术成果具有广阔的推广应用价值。

该技术研究成果不仅可在小湾电站边坡锚固施工中发挥重要而关键的作用，也对后续启动的西部大型水利水电工程（如糯扎渡、拉西瓦等水电站）的施工提供宝贵的经验和可靠的技术储备。同时，本项目技术成果还可广泛应用于交通、矿产勘探、工程勘测、城市建设、地质灾害与环境治理、地下水资源开发等工程施工领域，从而取得巨大的经济及社会效益。

5.8　本章结论

（1）根据小湾地层的特点,研究出了二种类型,多种规格的潜孔锤跟管钻具。即 DPA 型单偏心跟管钻具、SPA 型带中心钻头的单偏心跟管钻具。这两种偏心跟管钻具的特点有：

① 依靠中心钻头和偏心扩孔钻头二级破岩、设计合理的排渣系统使排渣顺畅以及与具有足够冲击功的冲击器相适配等；

② 具有中心钻头起导向作用的偏心跟管钻具结构对于地层复杂的小湾电站更有利于孔斜的预防，从而更大限度地满足工程设计的要求；

③ 钻具在结构上设计用键来传递扭矩，加之选用了高强度的材料，采用了特殊的热处理工艺，合理的固齿工艺，确保了钻具寿命；

④ 联接销系统为相互自锁的结构，保证了中心钻头与导正器之间连接具有良好的可靠性，解除了掉钻之忧。

生产试验和工程实践表明,钻具结构简单、设计合理，性能优良，材料选择和热处理工艺完全能满足小湾工程跟管钻进的需要，钻具的平均寿命达到了81.66米，最长寿命达到110米，比以前的钻具寿命有较大提高；平均时效达到了2.17米/小时。

（2）通过大量的资料分析和调研，针对小湾地区施工的特点，提出了钻机、空压机、潜孔锤选择原则和配套型号；并对钻机进行了合理的改进。

（3）针对小湾电站套管起拔困难的问题，研制了起拔力为650KN的拔管设备，满足小湾电站套管起拔的需要。其主要技术特点有：

① 系列液压拔管机结构简单，体积小、重量轻，装拆、操作方便，主要技术参数合理，能较好的满足实际工作的需要；

② 操作台与液压泵站分开设置，特别适合于搬运、迁移困难的边坡工程使用；

③ 充分考虑了到陡坡上套管起拔的实际问题，底座和油缸采用铰接；

④ 一台设备可起拔多种规格的套管，形成系列。

（4）根据小湾地区钻进的特点，编制出了具有施工指导意义的潜孔锤跟管钻进工艺规范，为小湾电站锚索施工提供了技术指导。

（5）通过采用新的钻具和成孔工艺技术，对于跟管口径 φ168 mm、跟管深度40米的跟管钻孔，单孔成孔时间在50个小时以内，钻具性能稳定，钻进事故率低，成孔顺利。在小湾工程中，应用气动潜孔锤跟管钻进技术施工锚索孔取得了显著的经济效益。

第 6 章　工程应用实例

6.1　潜孔锤跟管钻进技术在二郎山龙胆溪滑坡整治工程中的应用

6.1.1　工程概况

川藏公路是国家重点军、地两用交通要道，二郎山隧道是国家“九五”重点建设工程。长期以来龙胆溪滑坡影响川藏公路这一交通大动脉。由于紧邻公路的滑体规模大，滑面深、稳定性差，设计采用了较长的堆积体锚索（76 米）和较深的堆积体抗滑桩（65 米），而在国内外还没有类似工程的成功经验，特别是在松散堆积体中进行大口径跟管钻进，其难度在国内外尚属首次。本文结合成功的工程实践，采用研究开发的潜空锤跟管钻进技术和 DPX、SPX 偏心跟管钻具及配套的工艺规程，很好地解决了工程难题。

龙胆溪滑坡（1#）位于四川省天全县二郎山隧道东口龙胆溪右岸，国道 318 线 K2729＋920~K2730＋425 处。滑坡地形陡峻，平均坡度约 43°，前后缘海拔分别为 1840m 和 2135m。滑坡分东西块：K2729＋920~K2730+165 为东块，K2730＋166~K2730+425 为西块。从监测资料和工程施工所能揭示的情况看，1#滑坡西块滑体自公路为界分为上下多级，下级又分为浅、中、深三层滑面。其中最活跃的是紧邻公路的上级滑坡和下级的第三层滑面。西块规模大，滑面深、稳定性差是整个滑坡最危险、也是施工难度最大的工程区。

1＃滑坡西块（K2730＋166~K2730+425）公路内侧设计布置 41 肋预应力锚索框架：K2730＋182~K2730＋222 为 10 肋小框架，每肋上设 2 束长为 21.5m 的（锚固段长为 8m）锚索；K2730＋222~K2730+342 为 31 肋大框架，每肋上设 3 束长为 24.5m（锚固段为 10m）的锚索。公路外侧 K2730＋163~K2730＋420 范围内设计共布置 43 根（实际施工 42 根）预应力锚索抗滑桩，每根桩头设置 4 束锚索。抗滑桩最大设计深度 49.5m（实际施工最大深度 65m）；锚索设计最大深度 76m（实际施工最大深度 83.5m）。

6.1.2　工程地质及水文地质条件

滑坡区地层由表层的崩坡积物和志留系统下统罗惹坪组钙质泥岩组成。地表为块、碎石土坡积物，多呈松散结构，厚度变化大，大孤石普遍，厚度 3~5m。志留罗惹坪组钙质泥岩是崩坡积层的下伏岩层，包括钙质泥岩和泥岩两类；呈灰、灰绿、灰黑色。钙质泥岩呈中、厚层状，致密较坚硬，节理裂隙发育，岩层较破碎，风化

程度中等，野外露头可见中厚层状岩体，或挤压破碎岩块组成碎裂结构的岩体。泥岩以灰黄、灰绿夹灰色为特征，中薄层构造，破碎风化严重，多呈现碎石夹泥或泥化夹层状及糜棱化条带，含泥量较高。地层出露点可见泥呈挤压破碎带或碎裂泥质结构。该套地层产状 NE40°~50° / S50°~65°，局部产状倾北。

施工区地形陡峻，坡体上冲沟发育，崩坡层透水性好，赋水性差。滑带透水性差，地下水较丰富。本区地下水主要以基岩裂隙、孔隙水为主，坡体表层存在上层滞水。前期勘探揭示坡体地下水以窝状、脉状或片状分布与埋藏，地下水主要接受雨水、融雪的入浸补给。施工过程中部分桩内遇大流量远程补给承压水，最大流量 40m^3/h，稳定水位于 16m。

二郎山地区地处四川盆地亚热带季风湿润气候区与青藏高原内陆性干冷气候区的交接地带，常年有暴雨、降雪等灾害性天气。龙胆溪雨季洪水流量达 6m^3/s，丰水期流量 0.8m^3/s，平均期为 0.2~0.3m^3/s，枯水期为 0.06~0.1m^3/s。50 年一遇最大洪水流量 174 m^3/s，洪水对岸坡的冲刷侧蚀作用是岸坡失稳的主要原因。

6.1.3 堆积体预应力锚索跟管钻进施工

（1）工程概况

本工程共有 42 根堆积体预应力锚索抗滑桩和 41 肋堆积体预应力锚索框架。每根抗滑桩布置 4 束 12Øj15.24 锚索，共计 168 束抗滑桩堆积体预应力锚索，锚索最长施工长度 76m。小框架每肋设 2 根 9Øj15.24 锚索，大框架每肋设 3 根 12Øj15.24 锚索，最大施工深度 32m，共计 9Øj15.24 锚索 510m，12Øj15.24 锚索 12465.56m。（包括大框架和抗滑桩锚索）。

（2）施工流程

堆积体预应力锚索施工，其主要施工工艺流程见图 6-1。

（3）施工工艺

① 锚孔放样。

利用经纬仪结合红外仪，依据设计单位移交的控制桩号，先确定 42 根抗滑桩的桩排方向,再依据各桩桩心座标确定桩心位置，通过不同桩排方向和桩心位置确定各桩长轴方向，各桩不同锚索的外撇脚确定各锚孔的方向；结合锁口盘高程和桩段长度，计算锚孔在孔口的位置（距长轴方向中心线的距离和高程）放出锚孔的开孔位。用红油漆在所测放的孔位处标明锚孔中心点及锚孔编号。

要求孔口坐标误差≯10cm。

② 校正定位。

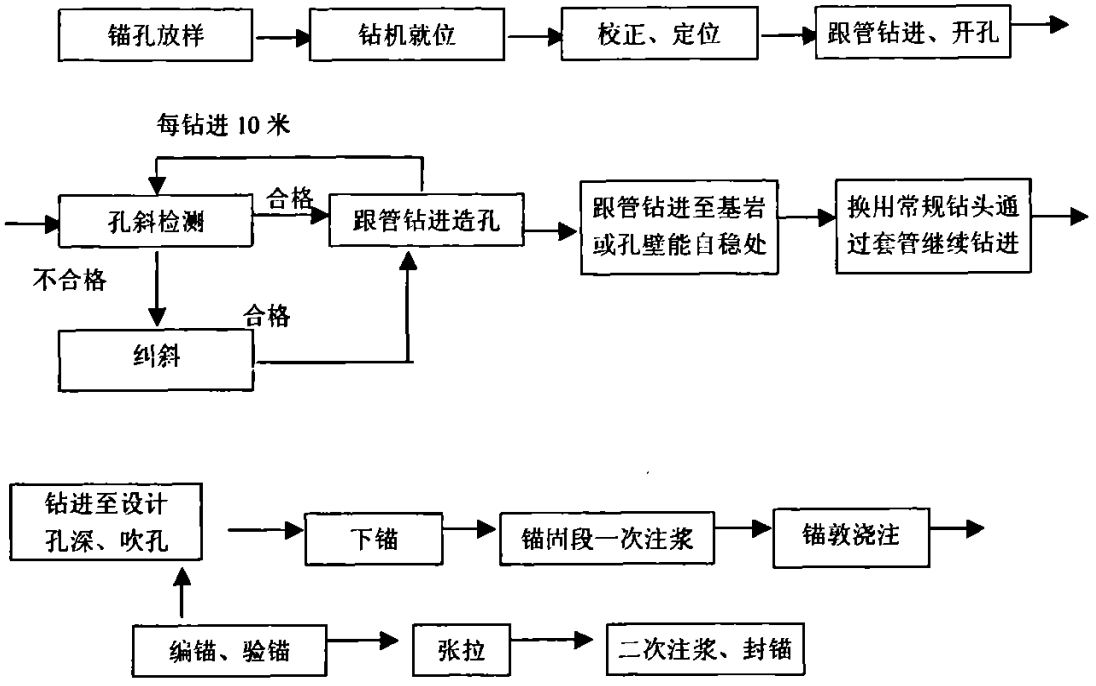


图 6-1　施工工艺流程图

在确定孔位中心和钻机就位后，依据各孔位的外撇脚和钻孔俯角校正钻机立轴方向。校正的定位要求：

各桩上排（1、2 号孔）俯角 28°；

各桩下排（3、4 号孔）俯角 32°；

各桩 1、3 号孔外撇下游 2°；

各桩 2、4 号孔外撇上游 2°。

③ 钻机就位。

为使锚孔在施工过程中及成孔后其轴线的俯角、方位角符合设计要求，必须保证钻机就位的准确性和稳固性。因此，钻机安装平台做到平整、坚实、不变形、不振动等。确保开孔钻具的轴线与设计锚孔轴线保持一致，否则，必须整改达到要求方可开孔钻进。

钻机安装准确性的要求：调整钻机立轴轴线和边坡地面的接触点的高程与标定孔位一致；调整钻机立轴的轴线，使其与设计锚孔中心轴线的俯角及方位角保持一致；由技术人员测校开孔钻具轴线，使其与锚孔中心轴线方向一致，然后才能开孔；在钻进前和每钻进 10 米由技术人员检测钻具轴线、钻机立轴轴线与锚孔轴线的一

致性。

钻机安装稳固性的要求：用卡固管件使钻机卡牢稳固；试运转钻机，再次校测开孔钻具轴线与锚孔中心的轴线，使其保持一致，拧紧紧固螺栓；随时保证施钻过程中钻机的稳固性；设置孔口导向管或小型导向桩，以保证施工的锚孔顺直、倾角、方位角符合设计要求。

④造孔

锚孔基本技术参数如下：

锚孔中心轴线允许偏差：

a.孔斜误差：≯3%。

b.钻孔偏角：≯1°。

c.外撇角误差：≯0.5°。

锚孔孔径参数：孔径 146mm。

孔深参数：

a.各锚孔深度均按设计要求严格执行，并依据现场监理指令适当调整。

b.严格控制有效孔深：ΔL≤50cm

c.钻孔应穿过滑动面，将锚固段设置在较新鲜完整的岩体中。

造孔主要设备、机具：

a.造孔设备：四台套 XY－2 型钻机、2 台套 MD50 锚固钻机。

b.机　　具：冲击器 CIR110 共 10 台套，JW100 型 8 套，350R8 套。

c..造孔钻具：DPX、SPX146、168 型对心、偏心扩孔跟管潜孔锤钻具各 30 套。

d.空 压 机：10m^3/0.8MPa、20m^3/1.5MPa 各三台。

e.电动拔管机（自制）4 台。

⑤钻进工艺及参数

钻进工艺：在崩积层和崩坡积层以及裂隙较为发育基岩钻进，采用风动潜孔锤冲击跟管钻进技术,采用研制的 DPA 和 SPA 跟管钻具；在裂隙不发育基岩层采用风动潜孔冲击钻进。

工艺参数:

a.钻进压力：开孔时，冲击器紧贴岩面，低压力冲击，平稳缓慢推进，钻进过程中 P_f=2～4kN。

b.转速：

开孔转速：n=0。

钻进转速：n≯50r.p.m。

c.风量：$Q_{风}$=9~17m^3 / min　　$P_{风}$=0.7~1.0Mpa

⑥扫孔、清孔、测孔

a.扫孔：钻孔钻到设计孔深以后，用同级钎头扫孔，保证终孔直径。

b.清孔：终孔后的清孔，采用＞0.8MPa 压缩空气冲孔排碴，保证孔底残存岩渣低于沉碴段顶端。

c.测孔：综合测定钻孔各项技术指标，必须符合设计规范要求。

6.1.4　堆积体潜孔锤跟管钻进中特殊情况下的工艺措施及其效果

（1）深厚覆盖层。

由于滑坡体的主要组成岩体在平面分布上沿公路方向呈波状起伏特征，存在窿起的褶曲构造。褶曲构造核部岩体多为厚层结构，破碎程度相对较轻，而构造核之间岩体则受挤压作用强烈，岩层形成了严重的破碎带或断层挤压带。这种构造影响的强弱、岩性软硬、风化程度的差异使锚索成孔施工的难度成倍增加。在第三层滑面以上，由于地层结构松散，垮塌、架空、漏风严重，夹泥、遇水、造孔护壁排碴困难。考虑到滑坡体造孔严禁使用液体冲洗介质，因而如何确保造孔、固壁的顺利是该工程的关键技术之一。针对现场具体地层情况，综合考虑工期要求、设备、工艺水平等因素，积极组织技术人员开展科技攻关。优化偏心跟管钻具，自行设计了分体式无锁偏心跟管钻具（SPA、DPA），无锁自锐式对心跟管钻具，电动拨管机等设备和机具。确保了锚索施工的质量和工期。

为了能进一步了解滑坡体地层结构情况，指导锚索成孔施工，在进场之初分别在公路上坡边小框架 X1－1，和抗滑桩平台 M2Ⅲ－18－1 施工了两个取芯孔，结果与设计提供地层情况基本吻合。框架和抗滑桩共 281 个孔地质及钻进情况见表 1。由于抗滑桩锚索施工区覆盖层较厚、松散破碎，加大了造孔难度，而现有设备跟管钻进深度有限，现场采用了异径跟管、一次性跟管钻具、孔底割管等施工工艺，保证了钻孔方位角、俯角与开孔方位角、俯角的一致性，达到设计要求，取得良好效果。

（2）破碎地层段。

在钻遇破碎地层时，钻具发生剧烈跳动现象，钻进负荷加大，甚至坍孔、埋钻、卡钻，给正常钻进施工带来一定的影响。为此，必须采取有效措施，以保证正常钻进施工。

① 崩坡积层必须采用潜孔锤跟管钻进工艺，待锚索钢绞线和压浆管送孔底后，方可拔出套管。

表 6-1 锚索钻孔地层及施工情况一览表

孔　号	设计深度(m)	设计覆盖层钻孔深度(m)	实际钻孔覆盖层深度(m)	地下水出露深度(m)	实际孔深(m)	粘土层深度范围(m)
MZ-IV-19-1	63.5	51.0	66.0	64.0	82.2	1.0~54.64
MZ-IV-19-2	63.5	51.0	66.0	/	82.2	0.9~49.51
MZ-IV-19-3	55.0	39.5	62.5	/	80.0	0.9~53.24
MZ-IV-19-4	55.0	39.5	62.5	64.1	80.0	2.9~58.13
MZ-IV-20-1	63.5	51.0	71.0	51.0	83.5	0.8~39.50
MZ-IV-20-2	63.5	51.0	71.0	46.9	83.5	0.8~39.50
MZ-IV-20-3	55.0	39.5	61.7	51.0	79.2	0.8~39.60
MZ-IV-20-4	55.0	39.5	60.0	48.0	80.0	1.0~40.10
MZ-IV-21-1	63.5	51.0	65.0	56.0	82.0	4.0~65.1
MZ-IV-21-2	63.5	51.0	65.0	58.5	83.2	4.3~65.20
MZ-IV-21-3	55.0	39.5	60.4	/	80.0	4.0~59.30
MZ-IV-21-4	55.0	39.5	65.0	/	83.0	0~64.10
MZ-IV-22-1	63.5	51.0	71.0	51.6	83.5	0.8~34.10
MZ-IV-22-2	63.5	51.0	66.2	57.3	80.7	0.8~61.10
MZ-IV-22-3	55.0	39.5	58.0	52.3	78.0	0~49.60
MZ-IV-22-4	55.0	39.5	60.0	52.5	75.5	0.8~31.20
合　计	948	724	1031.3		1296.5	

② 在基岩接触面岩层较破碎，尤其是采用偏心跟差时，易出现卡钻、掉钻等孔内事故。因此，必要时采用注浆固结孔壁的措施，待凝后继续扫孔钻进。

通过以上处理措施，能够顺利通过破碎地层，在起拔套管时也能顺利拔出套管。加快了钻进速度，取得了良好的技术效果。

（3）地下水、承压水和黄粘土层。

在钻遇地下水、承压水时，跟管钻进的排渣、排粉效果较差，可加入一定的泡沫剂，同时增大风量强行吹孔。如果仍不能正常钻进，提钻具、下栓塞、钻杆注浆处理该地层，待凝后继续扫孔钻进。

在钻遇黄粘土层、滑面、其它软弱夹层若为干孔（无地下水），采用降低钻进速度、多提动钻具、充分排粉的处理措施；若有地下水，加入一定的泡沫剂，同时增

大风量；如果仍不能正常钻进，起钻具、下栓塞和钻杆注浆处理该处地层，待凝后继续钻进。

通过以上的技术措施，较好地通过该段地层。但是在起拔套管时，由于套管与围岩可能被水泥浆液固结在一起，无法起拔套管，造成了一定的经济损失，有待进一步组织技术人员开展科技攻关。

6.2　潜孔锤跟管钻进技术在黄金坪电站坝基灌浆工程钻进成孔中的应用

6.2.1　工程概况

（1）黄金坪电站概况

黄金坪电站系大渡河干流水电规划“三库 22 级”的第 11 级电站，上接长河坝梯级电站，下游为泸定梯级电站。坝址区位于甘孜州康定县境内姑咱镇黄金坪村上游约 2～3km 河段，距上游的丹巴县城约 100km，距下游的泸定县城为 30km，距成都约 340km，省道 S211 公路从电站枢纽区右岸通过，并在瓦斯河口与国道 318 线相接，交通较方便（图 6-2）。

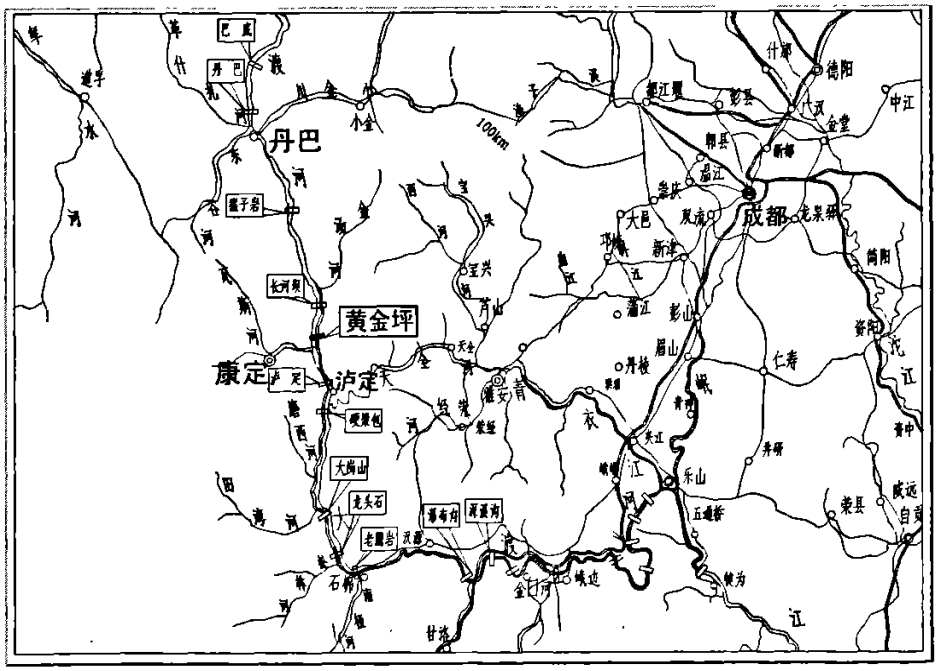


图 6-2　黄金坪水电站地理交通位置图

根据《四川省大渡河黄金坪水电站预可行性研究报告》及其审查意见，黄金坪水电站采用水库大坝、地下引水发电系统的开发方式，枢纽建筑物由拦河大坝、泄洪消能建筑物、地下引水发电建筑物等组成。初拟正常蓄水位1475m，大坝坝高81m，电站装机容量680MW；水库总库容为1.31亿m^3，正常蓄水位以下库容约1.19亿m^3，调节库容0.045亿m^3，具有日调节性能。

黄金坪水电站工程等别为二等大（2）型。大坝按2级建筑物设计，地震设防烈度Ⅷ度。

（2）试验目的

黄金坪水电站为二等大（2）型工程，拦河大坝最大坝高约81m、拟采用砾石土心墙坝或沥青混凝土心墙堆石坝，坝基防渗最大深度约159m、拟采用上部悬挂式防渗墙（约70m）接下部灌浆帷幕（约89m）为主的防渗型式。由于在较开阔河谷、高地震烈度区、深厚不均匀覆盖层上建造高土石坝的复杂性，坝基防渗处理成为本大坝工程设防的重点和难点。其中，河床帷幕灌浆处理深度55m～149m，主要穿过第①层——漂（块）卵（碎）砾石夹砂土（$fglQ_3$）层，为验证现行设计方案的安全可靠、施工可行和经济合理性，进行现场帷幕灌浆试验。

本次钻进成孔与帷幕灌浆试验的主要目的有：

① 通过地质资料与钻孔试验分析各地层组成及其透水情况，选择适宜的钻孔和灌浆施工设备；

② 对不同地层的灌浆材料及浆液配比进行分析选择；

③ 选择适宜的钻孔施工方法、施工控制措施；成孔的可能性与效率是工程设计得以成立的核心和关键；

④ 选择适宜于各地层灌浆的施工方式、施工措施及灌浆参数；

⑤ 选择合理可靠的灌浆检查手段，了解灌后帷幕的临界水力坡降和破坏水力坡降；

⑥ 通过试验确定帷幕灌浆合理的孔、排距，确定合理的灌浆排数；

⑦ 分析评价覆盖层帷幕灌浆的综合施工工效和经济性；

⑧ 配合工程可行性研究阶段设计，为坝基防渗处理方案优化提出建议意见。

经过灌浆，帷幕的渗透系数应不大于1×10^{-4}cm/s，破坏水力坡降不小于12，灌浆帷幕总厚度大于6m。

由于黄金坪水电站坝址区地处大渡河干流，砂卵砾石覆盖层深厚、地层架空严重、砂卵砾石级配悬殊、软硬不均、卵砾石坚硬，造成钻孔钻进困难、极易出现塌孔，钻孔无法采用现有的常规技术护壁。因此，能不能实现在该地层条件下的顺利钻进成孔、成孔的效率、钻孔的质量特别是帷幕灌浆钻孔的质量、钻进成孔的经济性是本坝基防渗处理方案能否实施和优化关键，也是该水电站的关键技术难题之一。

因此，拟在该项目进行潜孔锤跟管钻进技术的应用研究。

（3）试验工作量

钻进成孔与灌浆试验主要包括现场灌浆试验（浅层试验、深层试验）及灌后灌浆效果检查。试验工作量见表 6-1。

表 6-2　钻进成孔与灌浆试验工作量表

序号	项　目	单位	工作量	备　注
1	**浅层钻进成孔与灌浆试验**			
1.1	浅层覆盖层钻孔	m/孔	450/30	跟 Φ127～Φ146 管 150m
1.2	浅层覆盖层钻孔压(注)水试验	试段	120	
1.3	灌浆(水泥)	t	328.4	
1.4	灌后检查孔钻孔	m/孔	90/6	跟管 72m
1.5	灌后检查孔注水试验	试段	24	
1.6	灌后检查孔单孔声波测试	m/孔	10/1	
2	**深层钻进成孔与灌浆试验**			
2.1	深层覆盖层钻孔	m/孔	1622.1/12	跟 Φ127～Φ168 管 912m
2.2	深层覆盖层钻孔注水试验	试段	207	综合注水试验
2.3	灌浆(水泥)	t	1076.1	
2.4	灌后检查孔钻孔	m/孔	675/5	跟管 380m
2.5	灌后检查孔注水试验	试段	48	SJ1-1、SJ1-3、SJ1-5
2.6	灌后检查孔 SH 植物胶取芯	m/孔	118/2	SJ1-2、SJ1-4
2.7	灌后检查孔耐压压水试验	试段/孔	5/3	SJ1-1、SJ1-3、SJ1-5
2.8	灌后检查孔疲劳压水试验	试段/孔	3/3	SJ1-1、SJ1-3、SJ1-5
3	**室内浆液试验**	**项**	**1**	
4	**临时设施**	**项**	**1**	

（4）试验区地质条件

试验区地质条件参见图 6-3。

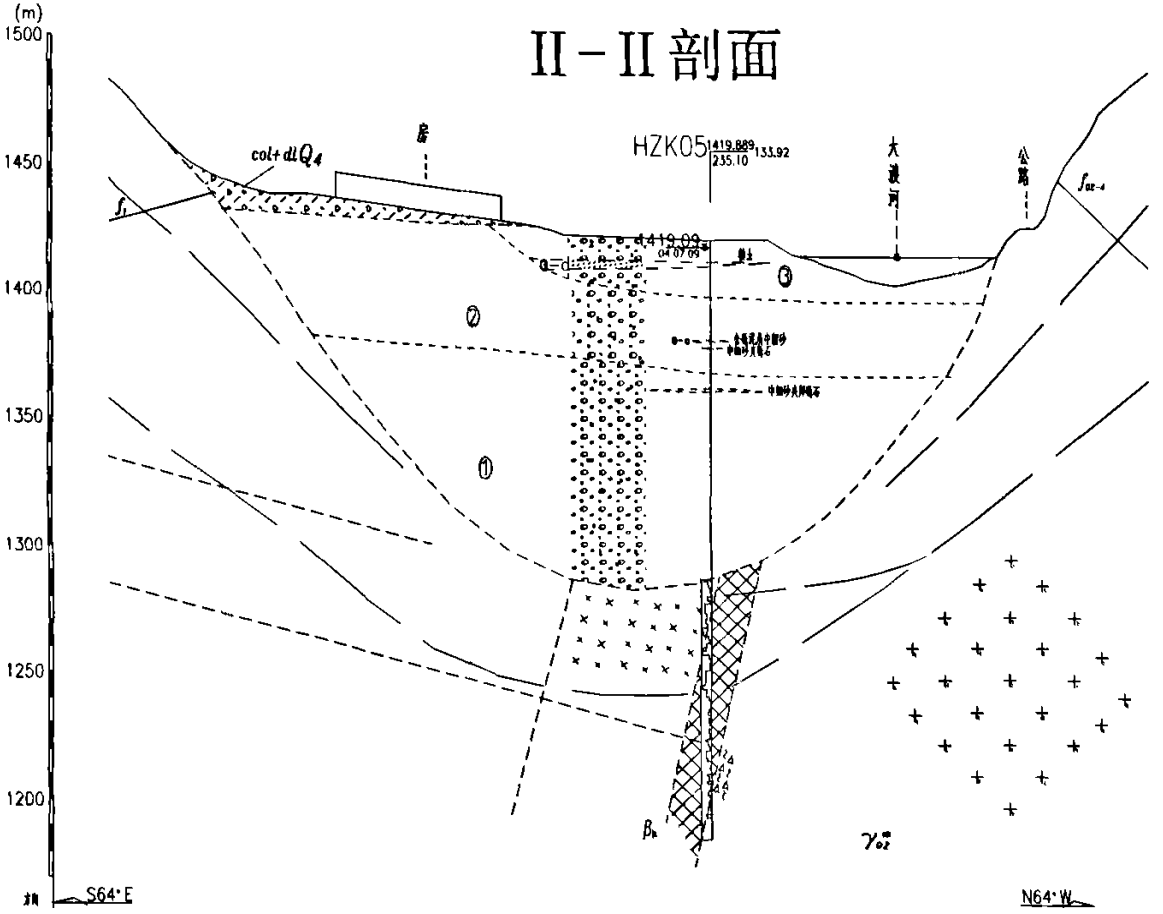


图 6-3　试验区地质剖面图 C

试验区地面高程 1420～1425m，据地表测绘、钻孔勘探及试验，试验区覆盖层组成及物理力学性质自下而上分别为：

1）第①层漂（块）卵（碎）砾石夹砂土（$fglQ_3$），分布河谷底部，厚度和顶面埋深变化较大，厚度 29.44～81.57m，顶面埋深 46.00～57.80m。粗颗粒基本构成骨架，充填灰～灰黄色含泥中细砂或中粗砂，局部具架空结构。该层底部一般含有一层厚 3.56～6.49m 的砂砾石层，中部夹有 1～3 层厚 0.5～4.15m 的灰～灰黄色泥质砂砾石层和含角（砾）质砂土。

该层埋藏较深，结构较密实，超重型圆锥动力触探试验的校正 N_{120} 平均击数 8.02～8.28 击，经换算成承载力基本值 f_k=0.64～0.66MPa，变形模量 E_0=32.08～33.11MPa，具有较高的承载力。一段钻孔抽水试验渗透系数 $K=3.4\times10^{-2}$cm/s、三段钻孔标准注水试验渗透系数 $K=9.83\times10^{-2}$～3.83×10^{-2}cm/s、七段钻孔简易注水试验渗透系数 $K=7.52\times10^{-2}$～2.17×10^{-3}cm/s，均表明该层具有中等～强透水性。

2）第②层漂（块）砂卵（碎）砾石层（alQ_4^1），超重型圆锥动力触探试验的校正 N_{120} 平均击数 6.44～7.77 击，经换算成承载力基本值 f_k=0.51～0.62MPa，变形模量 E_0=25.75～31.08mPa，表明卵砾石层粗颗粒构成骨架，结构较均一，具有较高的承载力。

据室内压缩试验反映出在压力 0.1～0.2MPa 情况下，其压缩系数 $a_{v0.1\sim0.2}$=0.007MPa^{-1}，压缩模量 $E_{s0.1\sim0.2}$=174.36MPa；室内直剪试验表明内摩擦角 φ=48.0°，凝聚力 C=0.095MPa。上述试验成果表明该层总体强度较高，具低压缩性，结构不均一等特点。据现场渗透变形试验表明，渗透系数 $K=5.38\times10^{-2}$cm/s，临界坡降 0.21，破坏坡降 0.48，破坏型式为管涌。五段钻孔抽水试验渗透系数 $K=7.40\times10^{-2}$～2.32×10^{-3}cm/s、两段钻孔标准注水试验渗透系数 $K=4.16\times10^{-3}$～2.39×10^{-3}cm/s，现场渗透变形试验和钻孔抽（标准注）水试验均表明其具有中等～强透水性。

该层中有砂层分布，在坝址左岸高漫滩横Ⅰ、横Ⅱ、横Ⅳ线②层中部分布的②—a 砂层，分布高程 1378.27～1386.83m，厚度 0.70～2.78m，埋深 24.05～36.37m，其标贯击数 $N_{63.5}$=4.38～4.91 击，承载力基本值 fk＝0.15～0.20MPa，结构松散。

3）第③层含漂（块）砂卵砾石层（alQ_4^2），超重型圆锥动力触探试验的校正 N_{120} 平均击数 7.51 击，经换算成承载力基本值 f_k=0.60MPa，变形模量 E_0=30.06MPa，表明卵砾石层粗颗粒构成骨架，结构较均一，具有较高的承载力。

室内压缩试验反映出在压力 0.1～0.2MPa 情况下，其压缩系数 $a_{v0.1\sim0.2}$=0.008～0.010MPa^{-1}，压缩模量 $E_{s0.1\sim0.2}$=156.90～119.60MPa；室内直剪试验内摩擦角 φ=40.6～45.4°，凝聚力 C=0.070～0.095MPa。上述试验成果表明该层总体强度较高。现场管涌试验表明，渗透系数 $K=2.01\times10^{-1}$～3.77×10^{-2}cm/s，临界坡降 0.15～0.16，破坏坡降 0.72～0.87，破坏型式为管涌。钻孔抽水试验渗透系数一般 $K=5.39\times10^{-3}$～

3.17×10^{-2}cm/s，现场渗透试验渗透系数 $K=5.26\times10^{-2}\sim3.17\times10^{-2}$cm/s，表明该层总体具有强透水性、局部具有中等透水性的特点。

该层中有砂层分布，广泛分布于左岸高漫滩③层中的③－a 砂层的分布高程1400.03～1409.65m，厚度 1.41～7.40m，埋深 3.60～17.00m，其标贯击数一般 $N_{63.5}=4.58\sim6.80$，局部 11.32～13.30 击，承载力基本值 fk＝0.15～0.30MPa、局部 0.32～0.40MPa ，结构稍密～中密。

此外，分布于左岸高漫滩III线下游地表的③－b 砂层上部 0.8～2.2m 为中细砂、下部 2.2～3.2m 为含砾中粗砂，土工定名二者均为级配不良砂，结构松散。

上部 0.8～2.2m 的中细砂据室内压缩试验反映出在压力 0.1～0.2MPa 情况下，其压缩系数 $a_{v0.1\sim0.2}=0.257MPa^{-1}$，压缩模量 $E_{s0.1\sim0.8}=7.94$MPa；室内直剪试验表明内摩擦角 $\varphi=16.9°$，凝聚力 C=0.026MPa。上述试验成果表明③－b 砂层上部总体强度较低，具较高压缩性等特点。据现场渗透变形试验表明，渗透系数 $K=2.25\times10^{-4}$cm/s，表明③－b 砂层上部总体具有中等透水性。下部 2.2～3.2m 的含砾粗中砂据室内压缩试验反映出在压力 0.1～0.2MPa 情况下，其压缩系数 $a_{v0.1\sim0.2}=0.066MPa^{-1}$，压缩模量 $E_{s0.1\sim0.8}=25.23$MPa；室内直剪试验表明内摩擦角 $\varphi=19.3°$，凝聚力 C=0.010MPa。上述试验成果表明该层总体强度较低，具中等压缩性等特点。据现场渗透变形试验表明，临界坡降 0.42，破坏坡降 1.16，破坏型式为管涌，渗透系数 $K=1.02\times10^{-2}$cm/s，表明③－b 砂层下部总体具有强透水性。

（5）试验工期

1）室内浆液试验自 2006 年 3 月中旬开始进行。

2）2006 年 4 月 5 日前完成现场准备工作。

3）浅层钻进成孔与灌浆试验时间为 2006 年 4 月 6 日～2006 年 5 月 28 日。

4）深层钻进成孔与灌浆试验自 2006 年 6 月 12 日～2007 年 1 月 10 日。

6.2.2 浅层钻进成孔与灌浆试验

（1）灌浆工艺流程

浅层灌浆孔 0～5m 非灌段采用套管隔离，灌浆段采用“自上而下分段、孔口封闭法、喷射灌浆法”灌浆，相应采用的工艺流程如图 6-4。

（2）测放孔位

1）浅层钻进成孔与灌浆试验分两组进行，第一组孔排距为 1.5m，第二组孔距 2m、排距 1.5m。

2）采用全站仪严格按照孔位布置图测放布置孔位，孔位偏差不大于 10cm，在所测放孔位处设置明显标记。

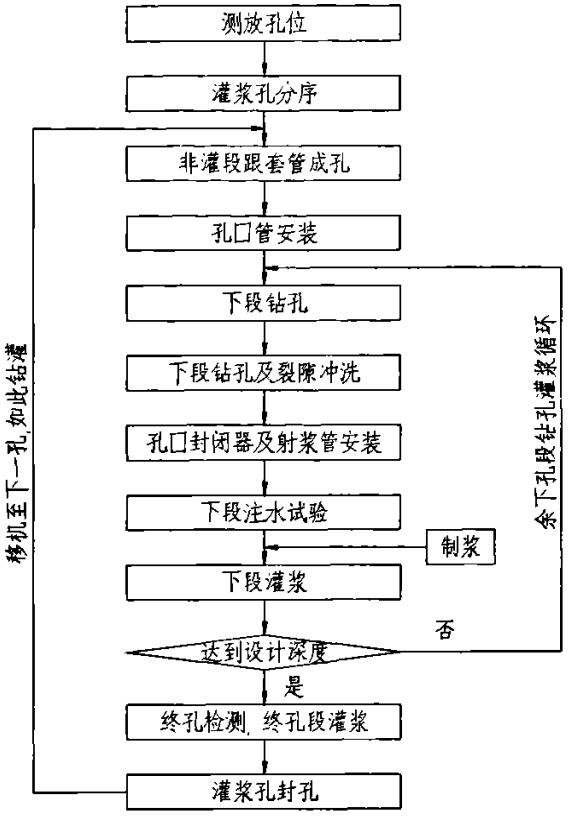


图 6-4　灌浆工艺流程图

（3）钻进成孔与灌浆段长度

灌浆孔分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序。同排灌浆孔按分序加密的原则施灌，先灌Ⅰ序孔，再灌Ⅱ序孔，后灌Ⅲ序孔。

钻进成孔与灌浆段长度值划分见表 6-3。

表 6-3　浅层钻进成孔与灌浆孔钻灌段长初拟值

深度(m)	5～7	7～9	12～15	9～12	备注
段长(m)	2	2	3	3	

施工过程中，部分钻进成孔与灌浆孔段的长度根据试区被灌地层的孔隙发育程度、孔壁稳定情况、渗透性、钻孔过程中岩性变化情况以及实际送浆能力等因素进行了适当调整，如 QA2-1 孔遇淤泥层等情况，分 6 个段次灌注，段长从上至下分别为 2m、0.63m、2m、0.87m、1.4m、3.1m。

（4）非灌段套管隔离方法

非灌段隔离与孔口管安装施工流程见图 6-5。

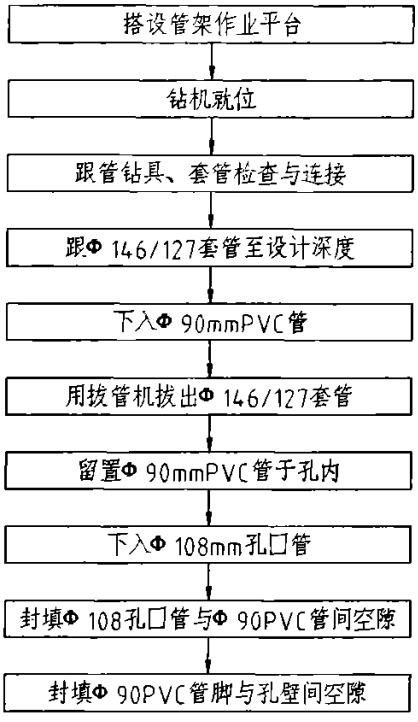


图 6-5 施工流程图

1）浅层灌浆孔 0～5m 非灌段采用管材隔离：

① 跟 Φ146/127 套管至 5m 处；

② 下入 Φ90mmPVC 管；

③ 拔出 Φ146/127 套管；

④ 留置 Φ90mmPVC 管护壁。

2）跟套管方法采用了常规跟管法、跟管钻具（偏心或同心）跟套管法。

① 1 个孔采用常规跟 Φ127 套管。

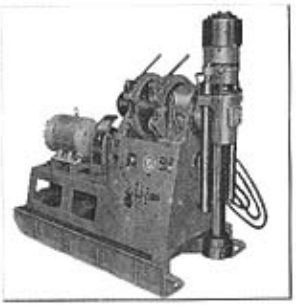
② 2 个孔采用 Φ146 同心跟管钻具（AC 生产）配套 DHD340A 冲击器跟 Φ146 套管。

③ 其余孔采用 Φ146 偏心跟管钻具（CTC 生产）配套 CIR110 冲击器跟 Φ146 套管。

（5）跟套管施工设备机具

根据施工实际情况，浅层非灌段主要采用 XY-2 钻机（表 6-4）进行跟管施工。

表 6-4　设备性能表

XY-2 液压回转钻机	✧ 钻孔直径(mm)：46～165 ✧ 钻孔深度(m)：380 ✧ 钻孔倾角(°)：0～90 ✧ 电机功率(KW)：22 ✧ 立轴转速(r/min)：65；114；180；248；310；538；849；1172 ✧ 最大扭矩(N.m)：2760 ✧ 最大起拔力(KN)：60 ✧ 立轴行程(mm)：600 ✧ 立轴通孔直径(mm)：76 ✧ 外形尺寸(mm)：2150×900×1690	

1）设备

① 钻机：XY-2 钻机。

② 空压机：XHP750WCAT 柴动高风压空压机。

2）机具

① 钻杆：Φ89 钻杆。

② 冲击器：CIR110 冲击器、DHD340A 冲击器。

③ 跟管钻具：Φ146 同心和偏心跟管钻具。

④ 护套管：Φ146/Φ127 套管，Φ90mmPVC 管。

⑤ 拔管机：50T 液压拔管机，振动拔管机。

（6）钻机设备安装

1）XY-2 钻机的行程为 600mm，用于跟管施工时，搭设 2m 左右高的管架，管架着地点处设置垫块。管架要求搭设水平，其上安装 XY-2 钻机。

2）通过钻机底座滑轨油缸动作并配合钻塔吊装、人工辅助进行钻机就位。

3）钻机底座滑轨油缸移动至前止点，立轴下放至孔位高程，适当调整钻机位置，使立轴底端对准孔位。

4）用水平尺校正钻机水平度及立轴垂直度，调整钻机位置（钻机底座与作业平台保持“面”接触），使立轴底端对准孔位。如此反复进行，使立轴中心线与钻孔中心线保持一致，确保钻机就位准确，确保开孔孔向准确。

5）牢固固稳钻机。

6）在施工过程中，持续进行钻机水平度及立轴垂直度校正工作。

7）调整钻塔位置，使滑车中心线与钻孔中心线基本一致。

（7）跟管钻进工艺

跟管钻进采用偏心跟管钻进方法。偏心跟管钻进工艺如下：

1）Φ146 偏心跟管钻具下孔前应逐一检查风动潜孔锤、偏心钻头、套管及套管靴。

① 风动潜孔锤应工作正常，并加注机油润滑；

② 偏心钻头应能灵活张开和收拢，张开时钻头偏心外缘应大于套管靴，联接销及锁紧机构应牢固；

③ 钻头与潜孔锤联接应可靠；

④ 套管靴、套管有无裂纹，凡有影响强度的缺陷切勿使用。

2）开孔

① 用同径常规钎头或 Φ146 同心跟管钻具先造孔 1m 左右，为跟管钻进提供定位和导向作用。

② 开钻前，将连接好的潜孔锤及钻头放入带有套管靴的套管内，让偏心钻头伸出套管靴，将组装好的钻具就位于预先凿好的导向浅孔内。开动钻机，正转速度达到一定时，偏心钻头张开，方可进行钻进。

3）跟管钻进过程中，边加钻杆边加接套管。

① 每钻进 0.3～0.5m 强风吹孔排粉一次，保证孔底清洁，遵循“短进尺、强排渣”的基本原则。

② 每钻进 2～3m，提钻检查钎头与冲击器的联接状况、偏心钻头联接机构及锁紧机构状况，更换销子等。

③ 钻进结束或需更换中心钻具时，先将孔底残渣吹尽，脱开中心钻具的回转动力，停止回转，缓慢提升中心钻具至偏心钻头后背与套管靴前端接触为止，用管子钳卡持钻杆，作反时针方向回转，同时缓慢试提中心钻具。

a）当中心钻具可顺利提升时，表明偏心钻头已顺利收拢，这时可按照常规方法提升中心钻具，直至全部提出中心钻具。

b）有时会因孔底残留岩渣过多，偏心钻头回转部分被岩渣卡住而影响偏心钻头的收拢。当试提几次仍不能奏效时，应开动空压机重新对钻孔进行清洗，并使潜孔锤作短时间工作，然后再进行试提，如此作法直至提出中心钻具。

4）在跟管过程中，如遇到大孤石难以穿过时，采用小口径潜孔锤超前钻孔穿过大孤石，为后续跟管钻具钻进提供阶梯临空面，再下入跟管钻具继续跟套管。

5）跟管钻进至预定深度后，即可将跟管钻头、冲击器、钻杆提升出孔外。在套管中下入 Φ90mmPVC 管，然后拔出套管。

（8）灌浆孔钻孔

钻孔是通向地层空隙并从中进行灌浆的人为通道，其要求如下：

1）钻孔的位置、方向和深度符合设计要求，误差不大于允许值。

2）钻孔孔底最大偏差符合设计要求。

3）不允许由于施工的原因将缝隙或空洞的入口堵死。

4）因需要埋设的孔口管，必须铸牢，防止沿管壁冒浆。

灌浆孔钻孔流程见图 6-6。

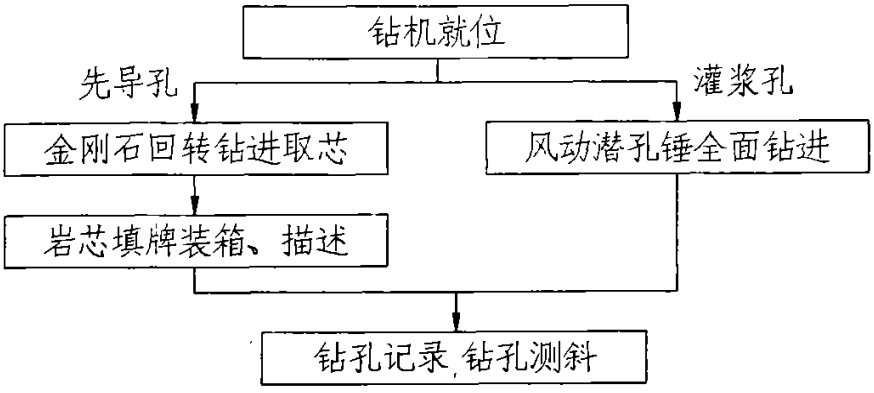


图 6-6　钻孔流程

灌浆孔开孔孔径 Φ146/127mm（非灌段），其下孔径 Φ76mm 至底。

（9）灌浆

1）浆液及比级

使用浆液试验确定的浆液及比级。

① 普通水泥浆液水灰比（重量比）使用 5:1、3:1、2:1、1:1、0.8:1、0.6:1、0.5:1 等比级。

② 水泥—膨润土稳定浆液配比：水灰比 0.7:1，膨润土 3%（水泥重量），减水剂 0.5%。

2）开灌水灰比

① 普通水泥浆液开灌水灰比（重量比）采用 5:1，以满足首先灌注较小孔隙的需要。

② 水泥—膨润土稳定浆液使用：水灰比 0.7:1，膨润土 3%（水泥重量），减水剂 0.5%。

3）普通水泥浆液变换

合理的浆液变换，有利于提高灌浆质量。过早地使用浓浆，常易将细小裂缝进口堵塞，影响灌浆效果；灌注稀浆过多，也易延长灌注时间，浆液过度扩散，造成材料的浪费，而且稀浆形成的水泥结石耐久性差。

灌浆浆液由稀至浓逐级变换，其变换原则如下：

① 当灌浆压力保持不变，注入率持续减少时，或注入率不变而压力持续升高时，不得改变水灰比。

② 当某一比级浆液注入量已达 300L 以上，或灌注时间已达 30min，而灌浆压力和注入率均无改变或改变不显著时，改浓一级水灰比。

③ 当注入率大于 30L/min 时，可根据具体情况越级变浓。当注入率大于 30L/min 而灌浆压力又低于设计压力，水灰比大于 1:1 时可越级变换；当浆液的单位注入率≥60L/min 时，可越级变浓。

4）灌浆过程中，灌浆压力或注入率突然改变较大时，查明原因并采取相应的措施处理。

受覆盖层地下水影响，灌浆浆液在孔中的凝结时间较长。适宜的灌浆结束标准对保护孔壁稳定、提高覆盖层钻灌工效有密切关系。

帷幕灌浆结束标准如下：

帷幕灌浆采用自上而下分段灌浆法时，灌浆段在最大设计压力下，注入率不大于 1L/min 后，继续灌注 60min，可结束灌浆。

灌浆全过程中，在设计压力下的灌浆时间不少于 120min。

6.2.3 深层钻进成孔与灌浆试验

（1）浆工艺流程

深层灌浆孔 0～76m 非灌段采用套管隔离，灌浆段采用“自上而下分段、孔口封闭法、喷射灌浆法”灌浆，相应采用的施工流程如图 6-7。

（2）钻孔分序

深层灌浆试验孔排距为 1.5m，3 排孔，共 12 个孔。严格按照孔位布置图测放布置孔位，孔位偏差不大于 10cm，在所测放孔位处设置明显标记。

1）三排灌浆孔，先施工上、下游排，后施工中间排。

2）灌浆孔分为Ⅰ、Ⅱ序。

3）同排灌浆孔按分序加密的原则施灌，先灌Ⅰ序孔，再灌Ⅱ序孔。

4）现场施工顺序如下：

① Ⅰ序孔施工顺序

S1-9（先导孔）、S1-12、S1-1、S1-4、S1-5、S1-8。

② Ⅱ序孔施工顺序

a）第一阶段施工：S1-10、S1-2、S1-6；

b）第二阶段施工：S1-11、S1-3、S1-7。

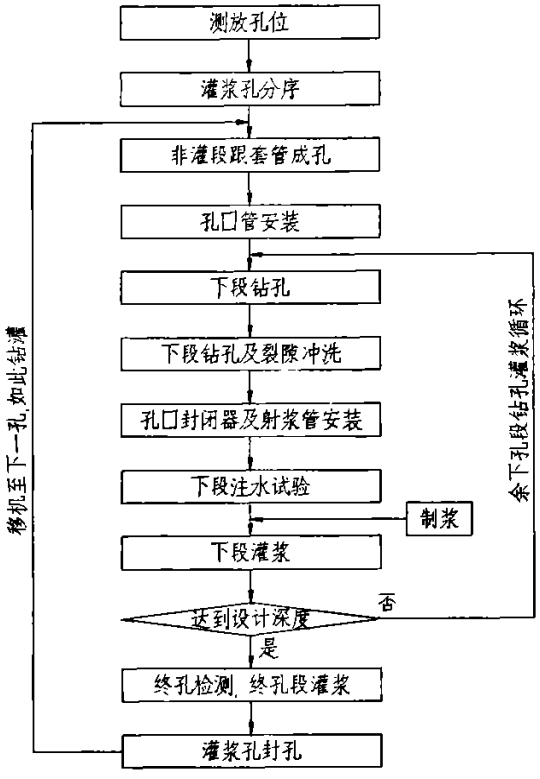


图 6-7　深层灌浆工艺流程

（3）灌浆段长度

灌浆段长度为第一、二段长度 1～2m，以下各段长度采用 2～3m。灌浆段长度值划分参见表 6-5。

表 6-5 深层灌浆孔钻灌段长值

深度(m)	76～80	80～90	90～99	≥100	备注
段长(m)	1～2	2	3	3	

施工过程中，部分灌浆孔段的长度根据试区被灌地层的孔隙发育程度、孔壁稳定情况、渗透性、钻孔过程中岩性变化情况以及实际送浆能力等因素进行了适当调整，列出部分如下：

1）S1-7 孔 80～135m、S1-3 孔 82～135m 范围的孔段长度加长至 4～5m。

2）S1-9 孔 114.30～116.30m 分为两段，段长缩短至 1.0m。

（4）深层帷幕灌浆孔成孔方案

深层帷幕灌浆孔在覆盖层中的单孔深度为135m，其中0～76m为非灌段，采用套管隔离。在成孔施工过程中，面临以下主要问题：

1）0～76m非灌段跟套管护壁成孔。

2）76～135m孔段成孔方法。

3）钻孔孔斜控制。

4）排渣。

5）成孔效率。

针对上述问题，采取如下措施：

1）非灌段成孔

① 根据前述各类下套管方法分析、浅层试验孔下套管方法实践及套管结构尺寸分级情况，决定采用偏心跟套管方法。

② 非灌段采用风动潜孔锤分两级偏心跟套管至76m，在套管内下入Φ89钢管后拔出套管，用Φ89钢管护壁成孔。

③ 为保证跟管质量，设置套管导向架。

2）灌浆段选用Φ59小口径金刚石钻具回转钻进成孔

① 结合孔口封闭灌浆法特点及覆盖层钻孔排渣、灌浆浆液上返流速的需要，深层灌浆孔采用小口径钻孔。小口径钻孔可使孔内介质的上返流速高，钻进时携带岩渣能力强，不易出现孔内事故，钻进效率高；灌浆时浆液不容易发生凝结，可有效避免灌浆时射浆管被水泥浆凝住的事故发生。

② 小口径风动潜孔锤CIR65A的钻孔直径为Φ68mm，但其单次冲击能（51J）较小，故选用Φ59小口径金刚石钻具回转钻进成孔。

③ 选用XY-4-3A、XY-2型深孔钻机，并配套5m长的Φ58mm钻具、Φ50钻杆以减小孔壁与钻具、钻杆之间的环状间隙，增强钻具的稳定性和导正作用，以改善下部钻具的弯曲形态，提高钻进时的防斜能力，从而极大地降低了钻孔弯曲的可能性，有效防止孔斜。

（5）非灌段套管隔离方法

非灌段隔离与孔口管安装工艺流程见图6-8。

1）根据类似工程经验，结合浅层灌浆试验期间的试验成果，综合考虑施工效率、国内外套管力学性能、风动潜孔锤性能、偏心钻具结构以及钻机性能等因素，决定跟76m套管采用分两级跟进，第一级套管为Φ168，第二级为Φ127，圆满地实现了跟76m套管的目标，填补了该项指标空白。

2）深层灌浆孔0～76m非灌段跟套管隔离程序

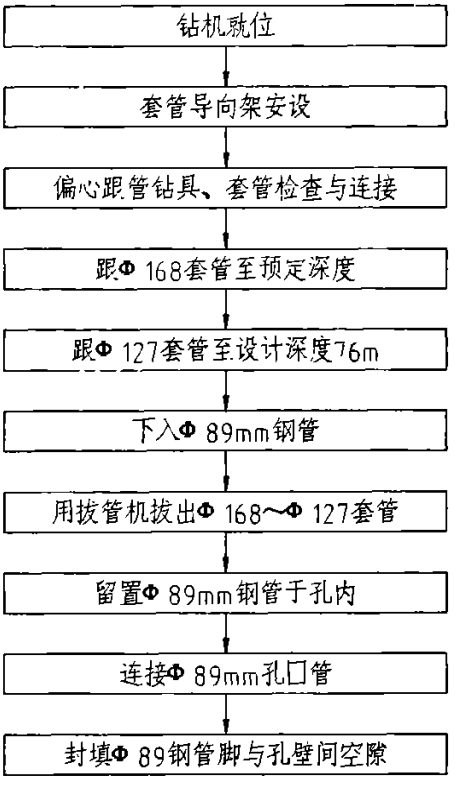


图 6-8　深孔非灌段成孔工艺流程图

① 跟 Φ168 套管至预定深度；

② 跟 Φ127 套管至设计深度 76m 处；

③ 下入 Φ89mm 钢管；

④ 用拔管机拔出 Φ168、Φ127 两级套管；

⑤ 留置 Φ89mm 钢管起隔离作用。

（6）跟套管施工设备机具

跟套管钻机采用 XY-4-3A 钻机进行跟管施工。

1）设备

① 钻机：XY-4-3A 钻机。

② 空压机：XHP750WCAT 柴动高风压空压机。

2）机具

① 钻杆：Φ89 钻杆。

② 冲击器：CIR110 冲击器、DHD350R 冲击器。

③ 跟管钻具：Φ168、Φ127 偏心跟管钻具。

④ 护套管：Φ168 套管，Φ127 套管，Φ89mm 钢管。

⑤ 拔管机：50T 液压拔管机，振动拔管机。

（7）钻机设备安装

1）XY-4-3A 钻机的行程为 600mm，用于跟管施工时，搭设 2m 左右高的管架，管架着地点处设置垫块。管架要求搭设水平，其上安装 XY-4-3A 钻机。

2）通过钻机底座滑轨油缸动作并配合钻塔吊装、人工辅助进行钻机就位。

3）钻机底座滑轨油缸移动至前止点，立轴下放至孔位高程，适当调整钻机位置，使立轴底端对准孔位。

4）用水平尺校正钻机水平度及立轴垂直度，调整钻机位置（钻机底座与作业平台保持"面"接触），使立轴底端对准孔位。如此反复进行，使立轴中心线与钻孔中心线保持一致，确保钻机就位准确，确保开孔孔向准确。

5）牢固固稳钻机。

6）在施工过程中，持续进行钻机水平度及立轴垂直度校正工作。

7）调整钻塔位置，使滑车中心线与钻孔中心线基本一致。

（8）跟管钻进工艺

1）跟管钻进前，安设好套管导向架。

2）偏心跟管钻进工艺参见前面"浅层偏心跟管钻进工艺"相应部分。

3）在跟管过程中，如遇到大孤石难以穿过时，采用小口径潜孔锤超前钻孔穿过大孤石，为后续跟管钻具钻进提供阶梯临空面，再下入跟管钻具继续跟套管。

4）跟 Φ168 套管至预定深度后，换跟 Φ127 套管至 76m。

5）在套管中下入 Φ89mm 钢管，然后拔出 Φ168、Φ127 套管，留置 Φ89mm 钢管于孔内。

覆盖层灌浆试验孔上部 76m 非灌段采用 Φ89mm 钢管隔离。采用 Φ168、Φ127 两级偏心钻具跟管至 76m，将 Φ89mm 钢管下入后拔出 Φ168、Φ127 套管。采用两级跟管，使用高风压空压机，跟管平均工效为 13.4m/d，见表 6-6。

表 6-6 深孔偏心跟管钻进工效表

项 目	累计进尺 (m)	累计工日 (d)	综合工效 (m/d)	备注
Φ168 偏心跟管 Φ127 偏心跟管	914	68	13.4	包括跟管、下入 Φ89 钢管和起拔 Φ168、Φ127 套管等工作

（9）灌浆孔钻进方法

深层灌浆孔为垂直孔，深度 135m。先导孔及灌浆孔均选用 Φ59 小口径金刚石钻具回转钻进成孔。

选用 XY-4-3A、XY-2 型深孔钻机，并配套 5m 长的 Φ58mm 钻具、Φ50 钻杆以

减小孔壁与钻具、钻杆之间的环状间隙，增强钻具的稳定性和导正作用，以改善下部钻具的弯曲形态，提高钻进时的防斜能力，从而极大地降低了钻孔弯曲的可能性，有效防止孔斜。

（10）灌浆

1）浆液及比级

使用浆液试验确定的浆液及比级。

① 水泥—膨润土稳定浆液：水灰比0.7:1，膨润土3%（水泥重量），减水剂0.5%。

② 稀浆1:1水泥—膨润土浆液。

2）开灌水灰比

① 部分孔段使用稀浆1:1水泥—膨润土浆液起灌排渣。

② 水泥—膨润土稳定浆液：水灰比0.7:1，膨润土3%（水泥重量），减水剂0.5%。

3）浆液变换

部分孔段使用稀浆1:1水泥—膨润土浆液起灌排渣后，浆液变换为0.7:1水泥—膨润土稳定浆液。

帷幕灌浆采用自上而下分段灌浆法时，灌浆段在最大设计压力下，注入率不大于1L/min后，继续灌注60min，可结束灌浆。

6.2.4 钻进成孔与帷幕灌浆试验结果

黄金坪坝基覆盖层钻进成孔与帷幕灌浆试验经过浅层试验、深层试验两个阶段的分步实施，攻克了深层76m跟管和深厚覆盖层灌浆的难题，完成了全部试验工作量，经试验检查，灌浆效果满足试验设计要求。灌浆试验区覆盖层经过灌浆后，渗透系数降低明显，防渗效果达到了设计要求。深层76m非灌段跟管作业中所采用的钻孔结构（Φ168/Φ127）、跟管钻机、偏心跟管钻具、Φ89钻杆、高风压空压机、风动潜孔锤偏心跟管技术是可行的。完成的深厚覆盖层跟76m套管的成果填补了该项指标空白。灌浆工艺技术可行，效果良好。

6.3 潜孔锤跟管钻进技术在雅砻江官地水电站边坡预应力锚索工程中的应用

6.3.1 工程概况

（1）官地水电站概况

官地水电站位于雅砻江干流下游、四川省凉山彝族自治州西昌市和盐源县交界的打罗村境内，系雅砻江卡拉至江河口河段水电规划五级开发方式的第三个梯级电

站。坝址位于竹子坝沟口以下约 1.3km 长的河段，上游与锦屏二级电站尾水衔接，库区长约 58km，下游接二滩水电站，与二滩水电站相距约 145km。距西昌市的直线距离约 30km，公路里程约 80km。参见图 6-9。



图 6-9　官地水电站交通地理位置图

官地电站主要任务是发电，水库正常蓄水位 1330.00m，总库容 7.6 亿 m^3，水库回水长 58km，装机容量 2400MW，装 4 台（4×600MW）水轮发电机组。

官地水电站工程等级为一等工程，主要水工建筑物为 1 级，次要建筑物为 3 级，临时建筑物为 4 级。工程枢纽主要由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、引水发电系统建筑物组成。其中拦河大坝为碾压混凝土重力坝，泄洪建筑物由坝身的 5 个溢流表孔和两个泄洪中孔组成，下游消能采用底流消能形式。大坝轴线方位 N12°E，坝顶高程 1334.00m，最低建基高程 1166.00m，最大坝高 168m，坝顶长度 529.32m，最大坝底宽度 153.2m。

（2）左岸缆机平台开挖及支护工程施工概况

本工程主要包括左岸缆机固定端和机房的开挖及支护工程，左岸坝肩 1334m 高程以上的开挖及支护工程，左岸坝顶交通洞工程。

左岸缆机固定端基础开挖高程为 1418m，基础平台长 8.8m，宽为 4m，缆机固定端边坡最大开挖高程为 1470m，边坡最大开挖高度为 52m（计算至缆机固定端基础开挖高程），开挖坡比为 1:0.5，在 1418m、1442m、1464m 高程分别设置马道，马道宽 3m；在左岸缆机固定端边坡 1436m 高程设置一条主锚固洞，在 1421m 高程设置两条导轮锚固洞，两条锚固洞中心线距离为 4m，1436m 高程主锚固洞长 35m，开挖

断面尺寸宽×高为：洞口 6×4.5m、洞底 2×3m；1421m 高程两条导轮锚固洞长 16m，锚固洞开挖断面尺寸宽×高为：洞口 2×2m、洞底 2×3m。左岸机房距离左岸缆机固定端下部导向滑轮的水平距离为 20m，机房基础平台高程为 1406m，机房平台长 16m，宽 10m，机房出绳的轴线与垂直立面的夹角为 0°。

左岸坝肩最大岸坡开挖高程 1497m，边坡最大开挖高度 163m（计算至 1334m），左岸坝肩 1334m 高程以上开挖坡比为 1:0.5，每 20～30m 设置一马道，马道宽 3m。

大坝左岸坝顶 1334m 高程交通洞与左岸坝顶 1334m 高程灌浆平洞结合，并与左高线 2#隧洞相交，交点桩号 2+315m，交点高程 1332.8m，左岸坝顶交通洞长 65.2m，断面尺寸宽×高为 9×7.105m。

左岸缆机平台公路长约 1km，为水泥混凝土路面，路基宽度 5m，路面宽度 4m，最大纵坡 10%，一般最小平曲线半径 30m，极限最小平曲线半径 15m，桥涵设计荷载为汽车-20，挂-120。

（3）工程地质条件

1）地形地貌

枢纽区位于雅砻江虎山滩至打罗向西凸出的河弯段，弧长 4.75km，弦长 1.88km。主体建筑区位于竹子坝沟上游至硐探队驻地，河段长约 1.3km。枢纽区属高山峡谷地形，河谷呈基本对称的“V”型，临江坡高大于 700m，谷坡较陡峻，左岸地形坡度 40°～50°，局部段 35°～40°；右岸 35°～40°，局部段达 50°～60°。雅砻江以 S60°W 方向流入虎山滩后逐渐偏转至 S75°E 方向流入坝区再渐转至 E 流出枢纽区，坝区河道略向南凸出。枯水期江水位 1203m 时，水面宽 90～110m，正常蓄水位 1330m 时，相应谷宽 396～440m。

2）地层岩性

坝肩开挖涉及的地层主要为二叠系上统玄武岩组（$P_2\beta$），表层第四纪覆盖层分布较为广泛。参见图 6-10，剖面方向为：S12°4′42″ W。

① 玄武岩组（$P_2\beta$）

与下伏平川组假整合接触。根据岩性特征及喷发形式将该组分为上、中、下三段，总厚度>2000m。下段以含较多喷发相物质（角砾集块、凝灰质等）为特征，厚 800～850m；中段以杏仁状玄武岩、斑状玄武岩、致密状玄武岩与紫红色凝灰岩构成多个次级喷发旋回为特征，厚 600～650m；上段以致密状玄武岩占优势，厚度大于 600m。

下段（$P_2\beta_1$）分为 5 层，其中 $P_2\beta_1^5$ 是枢纽区分布最广的地层，许多重要水工建筑物均布置在该层内，厚 288～392m，可分为 2 个小层：$P_2\beta_1^{5\text{-}1}$ 和 $P_2\beta_1^{5\text{-}2}$，其中，$P_2\beta_1^{5\text{-}1}$ 厚 98～176m 为灰绿色斑状玄武岩，斑晶主要为黑色短柱状辉石；$P_2\beta_1^{5\text{-}2}$ 厚 186～284m，为灰绿色角砾集块熔岩，角砾大小 3～5cm，集块 10～15cm，成份较复杂，

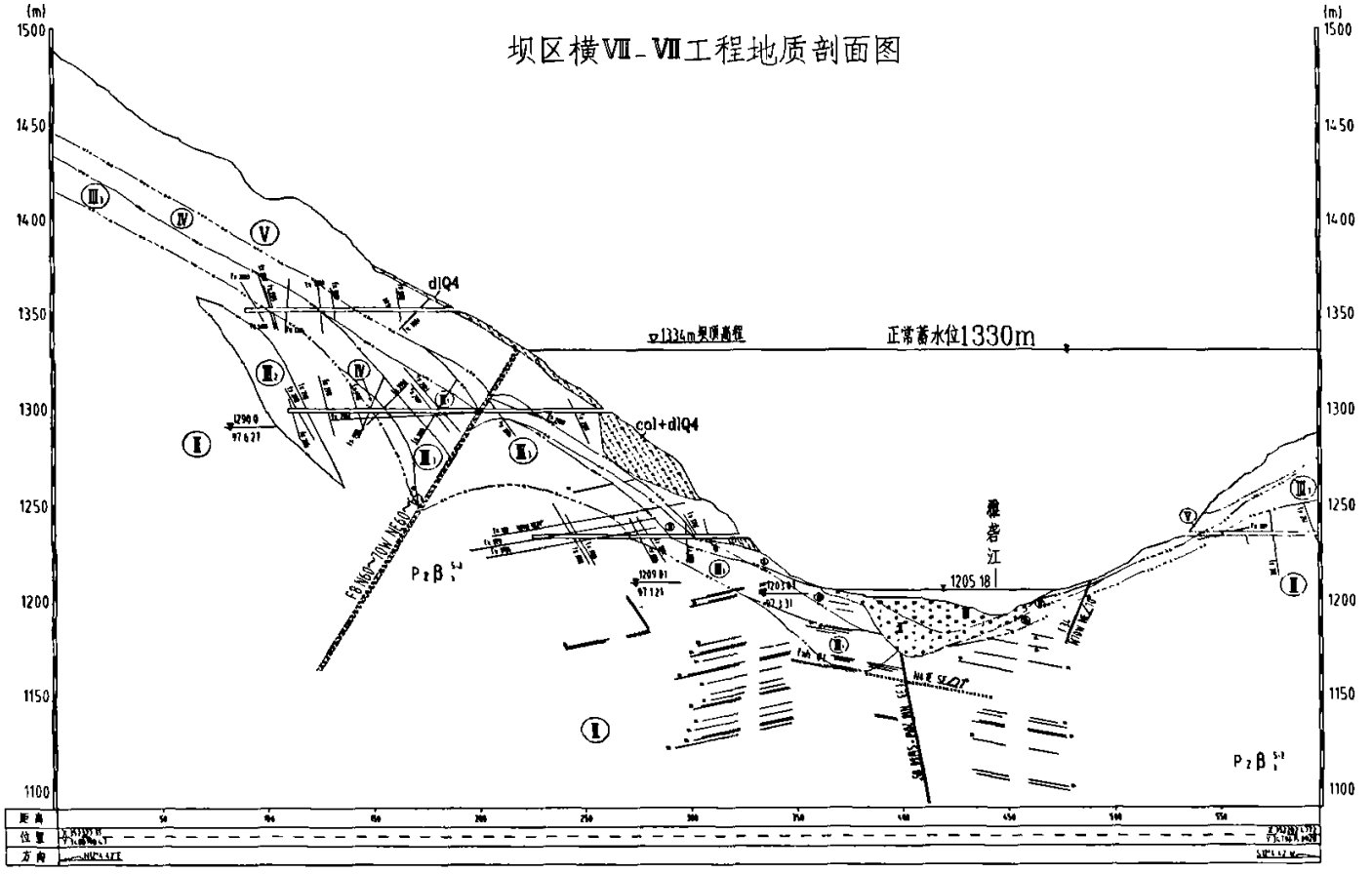

坝区横Ⅶ-Ⅶ工程地质剖面图
(m)
1500
1450
1400
1350
1300
1250
1200
1150
1100
dlQ4
正常蓄水位1330m
col+dlQ4
雅砻江
1205.18
Pzβ
Pzβ

图 6-10　地质剖面图

为各种玄武岩，$P_2\beta_1^{5-2}$ 底部局部（见于 XD04 上支硐）见厚约 3m 的含角砾凝灰质熔岩或火山砂砾岩。该层岩石坚硬，裂隙不大发育，岩体完整性较好。

② 覆盖层（Q_4）

第四系覆盖层主要为现代河床冲积物以及分布于两岸谷坡的崩坡积，坡残积、少量冲沟内的洪积物，两岸的Ⅰ～Ⅴ阶地堆积物零星分布。河床覆盖层厚 1.0～35.8m。纵向上厚度较稳定，横向上以河床左侧最厚，向两岸逐渐减薄。组成物质为卵砾石夹砂层，含少量漂石，局部为粉细砂层，结构较紧密，卵砾石磨圆度好，成份基本上为远源物质，如花岗岩、大理岩等，纵向上基本连续，横向上局部分布。岸坡覆盖层，主要为崩坡积及残坡积块碎石土，分布比较广泛，一般厚 5～10m，局部厚可达到 50～60m。

3）地质构造

坝肩开挖场地区地处矿山梁子断裂与小高山断裂所夹持的打罗地质块体之上，其内部为向西陡倾（总体产状为近 SN/W∠75°～85°）的单斜构造。引水发电系统区经过多次构造运动，发育有断层及大量的错动带，裂隙亦十分发育。

玄武岩坚硬性脆，而且经受多次构造作用，加之成岩过程中发育有大量的原生节理，岩石各向异性比较突出，使节理发育规律性差，方向较分散。枢纽区以中陡倾裂隙为主导优势，占裂隙总数 80%以上，且分布普遍，缓倾角裂隙数量相对较少，但分布仍具有一定普遍性。裂隙产状在各部位差异较大，浅表部沿该组裂隙卸荷强烈，大部分充填次生泥。

坝肩开挖涉及到的主要断层为 F1、F2、F6、F8、F9 五条断层。F1、F2、F6 断层走向大致为近 SN 向，倾 SW 或 NE，以陡倾角为主；F8、F9 断层走向近东西，倾向北，陡倾角。一般断层延伸长度 250～2000m，宽度为 1～4m，大多属于压性断层（F9 为张性断层），面平直。

4）岩体风化卸荷

坝肩开挖区主要为坚硬的玄武岩和岩质较软的沉积岩。玄武岩自身抗风化能力较强，风化作用主要沿节理裂隙、构造错动带及断层扩展，以裂隙式风化或夹层状风化为主要特点，在浅部如有断层发育或裂隙密集带，风化作用强烈，多呈全～强风化。风化作用在空间上很不均一，但总体而言，由表及里，岩体风化由强变弱，风化夹层出现的机率减小。

岩质较软的沉积岩抗风化能力较差，而且风化不均一，但总体上是由表及里的岩体风化由强变弱，风化夹层出现的机率较大。

由于河谷下切，使岸坡向河流临空方向产生卸荷。

根据官地电站坝区勘探资料，岩体风化卸荷较强。总体而言，岸坡全强风化水平深度 12～50m，弱风化 20～90m。强卸荷深度一般 7～35m；弱卸荷深度一般 15～80m。

5）左坝肩 1334m 高程以上工程地质条件

左坝肩 1334m 高程以上，除在 1350m 高程有一排平硐外，没有其它勘探资料。

左岸谷坡地形陡峻，坡度 40°～45°，局部段达 50°～55°，基岩裸露，坝基岩体为 $P_2\beta_1^{5-2}$ 角砾集块熔岩，岩石坚硬。

F8 断层从坝肩中上部通过。错动带发育程度不均匀，一般线发育率 6～7 条/100m，F8 断层附近地带发育程度较高，为 9～10 条/100m，以陡倾为主，少量中缓倾。裂隙发育。

谷坡风化卸荷主要受构造制约，特别是受 F8 断层影响较大。谷坡 1350m 高程附近，强卸荷下限水平深度 47～52.3m，弱卸荷下限 87.5～101m。全强风化下限水平深度 33～52.3m，局部段无全强风化，弱风化上段下限 36～64m，弱风化下段下限 43～87.5m。

坝肩地基全强风化、强卸荷、弱风化上段岩体完整性差，多张开、松弛，充填大量次生夹泥，宽 1～10cm。呈散体、碎裂或块裂结构，为Ⅴ类或Ⅳ类岩体。弱风化下段和微新岩体在岸坡下部次生泥较少，分布深度较浅，但岸坡中上部次生泥普遍，分布不均匀，部分段次生泥膜率较高，可达 50～70%，部分段为夹泥裂隙，频率为 1 条/3m，宽 0.5～2cm，大者可达 5cm，为Ⅱ类或Ⅲ类岩体。

左岸坝基Ⅲ2 和Ⅲ3 类岩体中，次生夹泥率高、变形模量较小，均一性差，存在变形稳定问题，同时抗剪强度较低，因此，对Ⅲ2、Ⅲ3 类岩体应加强处理。

左岸坝基 F8 断层分布于 2#坝块地基中，其破碎带较宽，且影响带岩体破碎，为Ⅳ、Ⅴ类岩体；fx108 错动带位于 4#、5#坝块地基中，次生泥厚度大，变形模量低，对变形稳定不利，均需进行处理。坝基下为Ⅲ1 类岩体，裂隙多数闭合，无松软物质充填，少数裂隙断续张开，宽度一般小于 0.1cm，对坝基变形影响较小。

（4）工程量

主要工程量参见表 6-7。

表 6-7　工程量表

部位	项　目	单位	工程量	备　注
左岸坝肩 1334m 高程以上边坡开挖及支护工程	Ⅰ区预应力锚索 2200kN	根	71	30m(35 根)和 35m(36 根)交错布置
	Ⅱ区预应力锚索 2200kN	根	20	35m(10 根)和 40m(10 根)交错布置
	Ⅲ区预应力锚索 2200kN	根	128	40m(64 根)和 45m(64 根)交错布置
	Ⅳ区预应力锚索 2200kN	根	77	45m(38 根)和 50m(39 根)交错布置
	Ⅴ区预应力锚索 2200kN	根	36	50m(18 根)和 55m(18 根)交错布置
	Ⅵ区预应力锚索 2200kN	根	55	55m(27 根)和 60m(28 根)交错布置
	Ⅶ区预应力锚索 2200kN	根	66	60m(33 根)和 65m(33 根)交错布置
	Ⅷ区预应力锚索 2200kN	根	24	70m(12 根)和 75m(12 根)交错布置
	合　计	根	477	

（5）工期要求

工程控制性进度如下：

1）2007 年 3 月 1 日开始修建左岸缆机平台施工道路和至开挖工作面便道，至 2007 年 4 月 30 日至缆机平台道路与便道修筑结束。

2）2007 年 5 月 1 日开始进行左岸缆机平台和左坝肩 1334m 高程以上的开挖工程，支护紧跟开挖进行，至 2007 年 8 月 30 日完成 1418m 高程以上的开挖。

3）2007 年 9 月 31 日，左岸高程 1334m 及以上的开挖及支护工程全部完成。

6.3.2　锚孔造孔

（1）成孔方案

玄武岩坚硬性脆，裂隙产状在各部位差异较大，浅表部沿该组裂隙卸荷强烈，大部分充填次生泥。坝肩开挖涉及到的主要断层为 F1、F2、F6、F8、F9 五条断层。

坝肩开挖区主要为坚硬的玄武岩和岩质较软的沉积岩。坝肩地基全强风化、强卸荷、弱风化上段岩体完整性差，多张开、松弛，充填大量次生夹泥，宽 1～10cm。呈散体、碎裂或块裂结构，为Ⅴ类或Ⅳ类岩体。

岸坡覆盖层，主要为崩坡积及残坡积块碎石土，分布比较广泛，一般厚 5～10m，局部厚可达到 50～60m。

玄武岩硬、脆、碎，浅表部风化卸荷强烈，呈散体、碎裂或块裂结构，软硬岩并存以及覆盖层等复杂地质条件，在锚索孔的成孔过程中，掉块、卡钻、塌孔严重，成孔难度大，导致成孔工效低下，是本工程的难点。拟采取的措施主要如下：

1）浅表部强风化强卸荷、难以成孔的锚索孔，采用随钻跟进套管护壁至一定深度，再正常钻进。

2）难以采用跟套管护壁的破碎孔段，采用超前固结灌浆处理，再扫孔继续钻进。

3）采取跟套管与固结灌浆相结合的措施。

4）锚索孔破碎段采用冲击器配套粗径长组合钻具、扶正器、防卡器、反振器、Φ89 钻杆等成孔。

（2）锚孔要求

1）孔位坐标误差不大于 10cm。

2）锚索终孔孔轴偏差不得大于孔深的 2%，方位角偏差不得大于 3°。有特殊要求时，按要求执行。

3）终孔孔径不得小于设计孔径 10mm。

4）终孔孔深宜大于设计孔深 40cm，具体由锚固段位置确定。预应力锚索的锚固段位于满足锚固设计要求的岩体中，若孔深已达到预定深度，而锚固段仍处于破碎带或断层等软弱岩层时，延长孔深，继续钻进，直至监理工程师认可为止。

5）对破碎地层采用超前固结灌浆进行处理。

锚索孔基本技术参数见表 6-8。

表 6-8 锚索孔基本技术参数表

锚索吨位(KN)	2200	备注
孔径(mm)	150	
锚固段长度(m)	10m 或执行设计要求	
孔深(m)	30、35、40、45、50、55、60、65、70、75	具体由锚固段位置确定
锚孔倾角(°)	15	
锚孔方位角(°)	垂直开挖坡面	
间排距	5m	

（3）成孔方法

1）锚索孔均采用 YG-80 型液压锚固钻机配套跟管钻具、风动潜孔锤冲击回转钻进成孔。

① 浅表部强风化强卸荷、难以成孔的锚索孔，采用 CIR150 配套 Φ178 偏心钻具随钻跟进 Φ178 套管护壁至一定深度，再换用 Φ150 钎头钻进。

② 不需跟管成孔的锚索孔，采用 YG-80 锚固工程钻机配套 DHD350Q 风动冲击器及 Φ150 钎头钻进成孔。

2）锚索孔破碎段采用冲击器配套粗径长组合钻具、螺旋钻具、扶正器、防卡器、反振器、Φ89 钻杆等成孔。参见图 6-11。

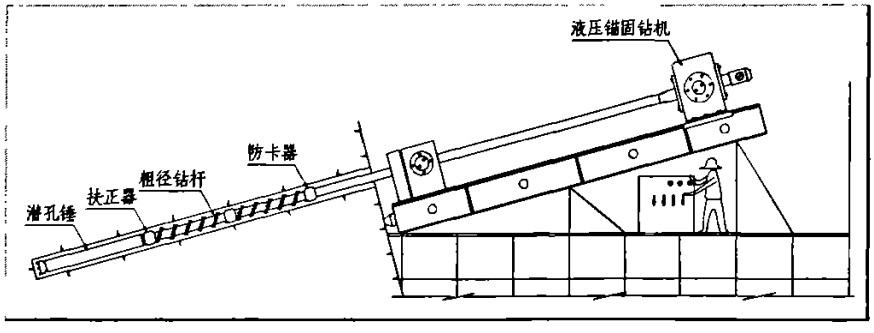


图 6-11 钻进示意图

3）破碎孔段采用喷射灌浆钻具进行超前固结灌浆处理。

（4）锚孔成孔设备及配套机具选择

根据锚索孔成孔难点、地层条件、锚索孔参数，选择成孔设备及机具如下：

1）钻机：选择 YG-80 型全液压锚固钻机。钻机技术参数见表 6-9。

表 6-9　设备性能参数

名称	性能简述	备注
锚固工程钻机 YG-80	✧ 钻孔直径(mm)：220 ✧ 钻孔深度(m)：100 ✧ 钻孔倾角(°)：0～120 ✧ 转速(r/min)：5～180 ✧ 扭矩(N.m)：3500 ✧ 额定提升力(KN)：45 ✧ 额定给进力(KN)：30 ✧ 给进行程(mm)：1800 ✧ 电机功率(KW)：30	

2）空压机：中风压空压机，风压 1.2MPa，风量 21.2m³/min。

3）钻杆：Φ50、Φ89 高强度钻杆。

4）风动冲击器：CIR150，DHD350Q（配 Φ150 钎头）。

5）机具：粗径长钻具，螺旋钻具，扶正器，防卡器，反振器，喷射灌浆钻具。

6）跟管钻具：Φ178 偏心跟管钻具。

7）套管：Φ178 套管。

8）拔管机：50T 液压拔管机，振动拔管机。

9）开孔钻具：CIR150 冲击器配 Φ190 钎头开孔。

（5）钻进操作规程

1）钻进参数

钻进参数见表 6-10。

表 6-10　潜孔锤冲击回转钻进工艺参数

钻进阶段	压力(kN)	转速(r/min)	风压(MPa)	风量(m³/min)
开　孔	使钎头紧贴岩面,平稳缓缓推进即可	0	0.7～1.2	5.7～20
正常钻进	1～2	30～90	0.7～1.2	5.7～20

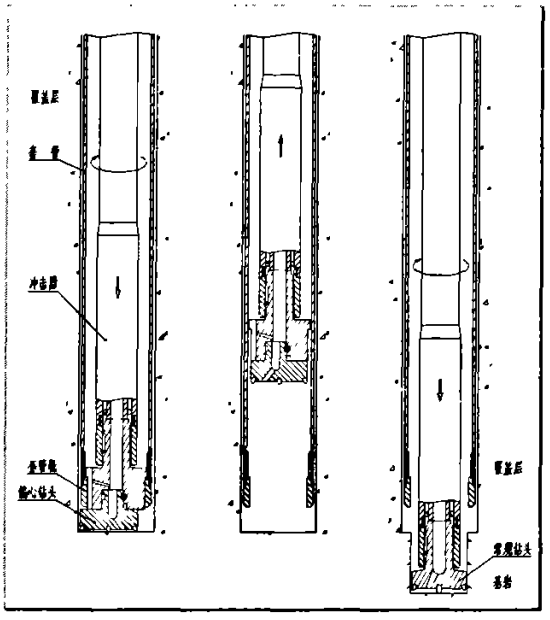
2）跟管钻进工艺

跟管钻进前，安设好套管导向架。跟管钻进采用同心跟管与偏心跟管钻进方法。偏心跟管钻进工艺如下（图 6-12，同心跟管钻进工艺参照执行）：

① 偏心跟管钻具下孔前应逐一检查风动潜孔锤、偏心钻头、套管及套管靴。

a）风动潜孔锤应工作正常，并加注机油润滑；

b）偏心钻头应能灵活张开和收拢，张开时钻头偏心外缘应大于套管靴，联接销及锁紧机构应牢固；



1）覆盖层偏心根套管护壁 2）提升偏心根管钻具出孔外 3）换用常规钎头继续钻孔

图 6-12 偏心跟管钻进示意图

c）钻头与潜孔锤联接应可靠；

d）套管靴、套管有无裂纹，凡有影响强度的缺陷切勿使用。

② 开孔

a）用 CIR150 冲击器配 Φ190 常规钎头先造孔 1m 左右，为跟管钻进提供定位和导向作用。

b）开钻前，将连接好的潜孔锤及钻头放入带有套管靴的套管内，让偏心钻头伸出套管靴，将组装好的钻具就位于预先凿好的导向浅孔内。开动钻机，正转速度达到一定时，偏心钻头张开，方可进行钻进。

③ 跟管钻进过程中，边加钻杆边加接套管。

a）每钻进 0.3～0.5m 强风吹孔排粉一次，保证孔底清洁，遵循“短进尺、强排渣”的基本原则。

b）每钻进 2～3m，提钻检查钎头与冲击器的联接状况、偏心钻头联接机构及锁紧机构状况，更换销子等。

c）钻进结束或需更换中心钻具时，先将孔底残渣吹尽，脱开中心钻具的回转动力，停止回转，缓慢提升中心钻具至偏心钻头后背与套管靴前端接触为止，用管子钳卡持钻杆，作反时针方向回转，同时缓慢试提中心钻具。

当中心钻具可顺利提升时，表明偏心钻头已顺利收拢，这时可按照常规方法提

升中心钻具，直至全部提出中心钻具。

有时会因孔底残留岩渣过多，偏心钻头回转部分被岩渣卡住而影响偏心钻头的收拢。当试提几次仍不能奏效时，应开动空压机重新对钻孔进行清洗，并使潜孔锤作短时间工作，然后再进行试提，如此作法直至提出中心钻具。

④ 在跟管过程中，如遇到大孤石难以穿过时，采用小口径潜孔锤超前钻孔穿过大孤石，为后续跟管钻具钻进提供阶梯临空面，再下入跟管钻具继续跟套管。

⑤ 跟管钻进至预定深度后，即可将跟管钻头、冲击器、钻杆提升出孔外，换用Φ150 钎头继续钻进直至设计深度。

⑥ 下入预应力锚索后，用拔管机拔出套管。

3）成孔措施

① 开孔前，清除孔口附近松动岩块。必要时，可填筑混凝土等强后开孔。

② 开孔时，在设计孔位上，人工或用风钻凿出与孔径相匹配的 10cm 左右深的槽（孔），以利于钻具定位及导向；再次复核钻机钻具轴线倾角与方位角。

③ 根据需要在钻杆上安装扶正器、防卡器等器具。

④ 严格遵循“小钻压、低转速、短回次、多排粉”原则。每钻进 0.3～0.5m 强风吹孔排粉一次，以保持孔内清洁。

⑤ 每钻进≯1m，缓慢倒杆>1m，往返不少于 2 次，直至孔口无岩粉返出，以利充分吹粉排渣，避免卡钻及重复破碎。

⑥ 勤检查钻杆、钻具磨损情况，对磨损严重的钻杆、钻具应予以更换，尽量避免孔内事故的发生。

⑦ 在钻孔过程中，如遇岩体破碎或地下水渗漏严重使钻进受阻时，采取超前固结灌浆等措施。

⑧ 在钻进过程中，不宜一个钎头打到底，否则终孔孔径与开孔孔径相差过大，使得下锚时困难。可备 3 个钎头，每个钎头打 10～15m 左右，就轮换一个。

⑨ 在钻进过程中，认真、真实地做好钻孔记录，为分析判断孔内地质条件提供依据。记录中要详细标明每一钻孔的尺寸、返风颜色、钻进速度和岩芯记录等数据。

6.3.3　预应力锚索体制作与安装

（1）锚索体型式

锚索型式选用自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索。

1）自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索主要由导向帽、单锚头、锚板、注浆管、高强低松弛无粘结钢绞线等组成。具有克服锚固段应力集中、有效防腐、有效减小孔径、全孔一次注浆、可进行二次补偿张拉等特点。

2）一根锚索由多组锚头构成，锚头组间距为 0.6m；每组锚头包括锚板、单锚头，

锚头数目及组合结构根据工程地质特性和锚索吨位大小进行选择。

（2）钢绞线规格及束数

1）钢绞线母材使用经检验符合《预应力混凝土用钢绞线》GB/T5224-2003 的Φ15.24mm 的 1860MPa 高强度低松弛无粘结钢绞线。

2）钢绞线强度利用系数≯75%，不同吨位锚索钢绞线束数及钢绞线强度利用系数见表 6-11。

表 6-11 钢绞线束数及钢绞线强度利用系数

设计工作载荷(KN)	钢绞线数量(束)	设计荷载时钢绞线强度利用系数(%)
2200	16	53

3）钢绞线运到现场后，按要求对钢绞线进行抽样送检，合格后方可使用。

（3）预应力锚索体制作

1）自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索体参见前述有关锚索结构图。

自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索为单孔多锚头防腐型结构，每个锚头分别承载一定荷载。锚索吨位及工程地质条件不同，自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索锚头数目及组合结构亦不同（表 6-12）。

表 6-12 自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索锚头数目

锚索吨位(KN)	钢绞线根数	锚头数目(组)
2200	16	8（2/2/2/2/2）

2）下料及内锚头组制作

① 根据锚索的设计尺寸及张拉工艺操作需要，使用砂轮切割机下料，同组锚头钢绞线等长，相邻组锚头钢绞线不等长。下料长度为：

Ln=钻孔深度 Lk-距第 1 组锚头距离ΔL+锚墩厚度 Ld+锚具及测力计厚度 Lj+张拉长度 L1

② 将钢绞线清洗干净，顺直排列在加工平台上。

③ 在 XJ-600 型挤压机上用不低于 36MPa 的压力将每根钢绞线与锚头嵌固端牢固联结，底部嵌固端钢绞线端头采取密封防腐措施。

④ 按照锚索结构要求装配单锚头、锚板、托板等进行锚头部分的制作。

3）编索

① 锚索根据设计结构进行编制，采用隔离架集束，隔离架按设计要求设置。

② 锚索进出浆管按要求编入索体。靠近孔底的进浆管出口至锚索端部距离不大于 200mm。

③ 编索中，钢绞线要排列平顺、不扭结，两隔离架中间用黑铁丝绑扎牢固，绑扎间距 2.0m 左右。

④ 导向帽按要求制作，与锚索体牢固可靠连接。

⑤ 锚索编制完成并经检验合格后，进行编号挂牌。合格锚索整齐、平顺地存放在距地面 20cm 以上的间距 1.0m～1.5m 的支架或垫木上，不叠压存放，并进行临时防护。

4）钢绞线编号

对自由式单孔多锚头防腐型预应力锚索体每根钢绞线予以编号、记录并标记，以便分组张拉检查。示例：M1/1-1（其中，“M1”表示锚索孔编号；“1-1”表示第 1 组锚头中的第 1 根钢绞线，锚头组编号自孔底开始向孔外顺序编号）。

（4）锚索运输与安装

1）锚索运输过程中，采取措施防止损伤锚索及防护涂层。

2）锚索入孔前，无明显弯曲、扭转现象；损伤的防护涂层已修复合格；进出浆管位置及通畅性检查合格。

3）锚索安装采取人工缓慢均匀推进。

4）锚索安装完毕后，对外露钢绞线进行临时防护。

6.3.4　锚索注浆

（1）浆液及材料

锚固浆液为水泥净浆，强度 M35。浆液水灰比一般为 0.36:1～0.4:1，通过试验确定，水泥结石体强度要求：R_{7d}≮30MPa。

1）水泥：新鲜普通硅酸盐水泥。使用大厂水泥，水泥强度等级不得低于 P.O42.5。

2）水：符合拌制水工混凝土用水。

3）外加剂：按设计要求，在水泥浆液中掺加的速凝剂和其它外加剂不得含有对锚索产生腐蚀作用的成分。

（2）制浆

1）设备：ZJ-400 高速搅拌机。

2）使用 ZJ-400 高速搅拌机，按配合比先将计量好的水加入搅拌机中，再将袋装水泥倒入搅拌机中，搅拌均匀。搅拌机搅拌时间不少于 3min。制浆时，按规定配比称量材料，控制称量误差小于 5%。水泥采用袋装标准称量法，水采用体积换算重量称量法。

3）将制备好的浆液通过一级泵站送到二级泵站，再通过二级泵站送至灌浆工作面。

（3）浆液灌注

1）注浆方式

采用孔口阻塞、全孔一次有压注浆法。

2）锚索注浆前，检查制浆设备、灌浆泵是否正常；检查送浆及注浆管路是否畅通无阻，确保灌浆过程顺利，避免因中断情况影响锚索注浆质量。

3）注浆作业

① 采用 TTB180/10 泵灌注。

② 灌注前先压入压缩空气，检查管道畅通情况。

③ 锚索注浆采用孔口阻塞封闭灌注。浆液从注浆管向孔内灌入，气从排气管直接排出。在注浆过程中，观察出浆管的排水、排浆情况，当排浆比重与进浆比重相同时，方可进行屏浆。当回浆压力达到 0.6～0.8MPa，再屏浆 30min 即可结束。

6.3.5 预应力锚索张拉

（1）一般规定

1）锚索张拉在锚索浆液结石体抗压强度及锚墩混凝土等的承载强度达到施工图纸规定值后进行。

2）锚索张拉用设备、仪器如电动油泵、千斤顶、压力表、测力计等符合张拉要求，在张拉前标定完毕并获得张拉力—压力表（测力计）读数关系曲线。锚夹具检测合格。

3）为确保锚索张拉顺利进行，锚索张拉前，确认作业平台稳固，设置安全防护设施，挂警示牌；张拉机具操作由合格人员进行，非作业人员不进入张拉作业区，千斤顶出力方向不站人。

4）根据锚索结构要求选择单根张拉或整体张拉方式，张拉时先单根调直，钢绞线调直时的伸长值不计入钢绞线实际伸长值。

5）锚索张拉采用以张拉力控制为主，伸长值校核的双控操作方法。当实际伸长值大于计算伸长值 10%或小于 5%时，查明原因并采取措施后继续张拉。

6）预应力的施加通过向张拉油缸加油使油表指针读数升至张拉系统标定曲线上预应力指示的相应油表压力值来完成。

7）锚索张拉过程中，加载及卸载缓慢平稳，加载速率每分钟不宜超过设计应力的 10%，卸载速率每分钟不宜超过设计应力的 20%。

8）最大张拉力不超过预应力钢绞线强度标准值的 75%。

9）试验锚索宜安装测力计。

（2）张拉程序

1）先进行试验锚索的张拉，试验锚索由监理工程师指定。在进行锚索试验时，记录力传感器读数、千斤顶读数以及锚索在不同张拉吨位时的伸长值。试验锚索的张拉应在监理工程师指导下进行。

2）张拉工艺流程

锚索张拉按分级加载进行，由零逐级加载到超张拉力，经稳压后锁定，即 0→mσ→稳压 10～20min 后锁定（m 为超载安装系数，最大值为 1.05～1.1，σ为设计张拉力），相应的张拉工艺流程如下：

穿锚→初始荷载(钢绞线调直)→分级循环张拉至设计工作荷载→超张拉

6.3.6　预应力锚索工程验收结果

在预应力锚索施工过程中，进行一系列项目的质量检查和检验，验收资料齐全。通过预应力锚索验收试验的结果分析，数据符合设计检验标准。锚固效果明显，整体施工质量良好。

除了在上面三个工程中应用研制的偏心跟管钻具外，还在金沙江向家坝水电站马延坡变形体预应力锚索工程、瀑布沟水电站厂房进水口高边坡加固的预应力锚索工程等近十个工程中应用了本文所研制的偏心跟管钻具，应用效果均良好。

6.4　本章结论

在上面三个工程中应用研制的偏心跟管钻具，应用效果均良好,取得了好的经济效益和社会效益。

在二郎山龙胆溪滑坡整治工程中，由于紧邻公路的滑体规模大，滑面深、稳定性差，设计采用了较长的堆积体锚索（76 米）和较深的堆积体抗滑桩（65 米），而在国内外还没有类似工程的成功经验，特别是在松散堆积体中进行大口径跟管钻进，其难度在国内外尚属首次。本文结合成功的工程实践，采用研究开发的潜空锤跟管钻进技术和设计的分体式无锁偏心跟管钻具 DPA、SPA、无锁自锐式对心跟管钻具、电动拨管机等设备及配套的工艺规程，很好地解决了工程难题，实现了在深厚松散堆积体中施工锚索这一目标，确保了锚索施工乃至整个滑坡整治工程的质量和工期。

黄金坪坝基覆盖层钻进成孔与帷幕灌浆试验经过浅层试验、深层试验两个阶段的分步实施，攻克了深度达 76m 的复杂地层跟管钻进成孔和深厚覆盖层灌浆的难题，完成了全部试验工作量，经试验检查，跟管钻进成孔质量、效率与深层复杂地层灌浆效果满足试验设计要求。

在雅砻江官地水电站边坡预应力锚索施工过程中，在采用常规跟管钻进方法钻进成孔极其困难的情况下，应用研制的偏心跟管钻具、工艺技术规程和方法，在 40—50 米厚的强卸荷破碎带中，取得了好的钻进成孔质量和效率。预应力锚索验收试验的结果分析，数据符合设计检验标准，锚固效果明显，整体施工质量良好。应用本文所研制的偏心跟管钻具，上面三个工程施工成本节约三分之一；钻具工作可靠，寿命长（钻具寿命长达 300 米），性能良好。解决了深厚覆盖层、卵石层、堆积体钻进成孔技术难题。

结 论

由于复杂地层特别是卵砾石覆盖层存在地层结构松散、无规律包裹砂卵砾石、砾石大小不均、换层频繁、软硬悬殊、颗粒级配悬殊等现象，在钻进与取样过程中往往会遇到钻进、保护孔壁、取心这三大难题，常规的钻探技术难以满足施工要求。国内复杂地层钻探技术先后经历了锤击跟管取芯钻进技术和金刚石取芯钻进技术两个重要阶段，特别是砂卵石层 SM 胶金刚石钻进取样技术在一定程度上解决了一些稍复杂地层的钻进与取样问题。但对于较复杂的地层，特别是在深厚砂卵砾石层中的架空层、近地表部分极其松散的严重漏失层、30 米以上的深厚覆盖层、大的破碎带和断裂带地层等，SM 胶金刚石钻进技术优势还难以发挥，至今仍沿用落后的常规跟管钻进技术。

本文依据复杂地层的成因、分类、特性，以及目前钻探工程的要求，结合现有钻探工程技术，对复杂地层钻探技术及理论进行了系统的研究。研究成果及创新性主要表现在以下几个方面：

（1）采用应力波理论，对潜孔锤跟管钻进过程中的跟管钻压、套管自重、潜孔锤冲击功、跟管钻进速度、跟管深度、扩孔口径和钻进中的钻压值进行了理论推导，并分析了潜孔锤跟管钻进碎岩过程及影响因素。得出：

① 潜孔锤跟管钻进速度取决于潜孔锤的冲击功、岩石的单位体积破碎功和凿岩直径三个因素；

② 根据不同的钻进条件，分别提出了一种在简单工况条件下和复杂工况条件下的最大跟管深度l_0、l_{max}的计算公式，包括下向垂直孔和水平孔时的最大跟管深度的计算公式；

③ 分析了跟管钻进钻压与机械钻速的相互关系，提出了跟管钻进的钻压，以每厘米钻头直径 0.5~0.9kN 为宜。

（2）将空气潜孔锤跟管钻进技术和岩芯钻探技术结合，利用前者钻进速度快和护壁效果好、后者具备采集岩芯能力的技术优势，通过优化设计，优势互补并充分发挥这些技术优势，研究了一种新型的钻探技术方法—空气潜孔锤取芯跟管钻进技术。该技术地主要特点可归纳为：

① 钻具结构采取同步、同心跟管钻进原理，从结构上保证孔底始终具有钻具到位的径向和轴向空间位置，确保钻具不因地层的垮塌因素造成钻具到位故障；

② 采用中心钻头（唇面）超前套管钻头的阶梯钻进原理，同时将高压气流通道与低压通道分开，岩心始终处于岩心管的屏蔽保护下，能够取得高质量的岩心和高

的采取率；

③ 钻具采用双管（外管和岩心管）和三层管（外管、岩心管和半合管）两种结构方法，可以满足不同砾石（用单管）和松散地层（用双层管）的取芯要求；

④ 空气潜孔锤取芯跟管钻进可以取得能够客观反映地层情况（层位、包裹情况等特性）岩心；

⑤ 发挥潜孔锤钻进效率高的技术优势，采取取芯和跟管一次完成，钻进效率可以大幅度提高；

⑥ 钻具结构简单，操作简便，具有较好的实用性。

该技术可以取得能够客观反映地层情况（层位、包裹情况等特性）岩心；发挥潜孔锤钻进效率高的技术优势，采取取芯和跟管一次完成，钻进效率可以大幅度提高；钻具结构简单，操作简便，具有较好的实用性。

该技术所采用的设备和器具均为当前国内地质勘察单位常用的空压机、冲击器、钻杆等，具有通用性和适应性。。

该技术适合于 50m 浅部复杂地层，特别是Ⅱ类复杂地层中钻探工作，跟管护壁技术效果好、取芯质量好，钻进效率高。

此外，进行了跟管钻进取芯钻头和套管钻头的研制；依据地层性质、钻具特点，研究制订了实用、操作性强的空气潜孔锤取芯跟管钻进技术规程

（3）钻进技术规程参数的选择是潜孔锤取芯跟管钻进技术的的一项关键问题。其合理与否将直接影响钻进效率和经济效益的高低。通过大量现场试验和生产性应用，针对性地制订了实用、操作性强的空气潜孔锤取芯跟管钻进技术规程：

① 钻压：2—4kN；必要时采用较大钻压，尽量减轻高频冲击振动的反弹力对岩心的破坏；

② 转速：20—30r/min；

③ 风量：≥12M^3/min；

④ 风压： ≥1.2 Mpa。

此外，钻进技术规程应根据卵砾石等覆盖层的密实程度、漂石和卵砾石的硬度及其大小等地层情况的不同针对性的进行调整，其调整原则为：地层胶结差（松散），采用小钻压和大风量为主的的规程参数；钻遇比较大的漂石和卵砾石，采用低转速和大钻压为主的钻进规程参数。

（4）研究开发了冲击式金刚石取芯跟管钻进技术。该技术具有较广阔的推广应用前景。该技术特点可归纳为：

① 组合张敛式扩孔钻头对称分布并呈锥形，破碎岩石效果较好，张开或收敛可靠；特别是加大型扩孔钻头套管跟进顺利；

② 钻具承压和承扭能力足以满足常规钻进要求；

③ 两级钻头的同轴度好，导向和扶正相辅相成，不会造成钻孔弯曲；

④ 泄漏通道的设置在满足扩孔钻头冷却和冲刷要求的同时，不会造成孔底钻头缺少必要的冷却液体；排沙系统的设计，避免颗粒物质滞留钻具内部，确保钻具张敛性能的可靠性。

⑤ 在悬挂腔设计了调节圈，在满足扩孔钻头收敛到位的情况下，通过加减调节圈确保悬挂机构承受钻具重力，消除了收敛爪异常受力情况；

该钻进方法适合在复杂地层钻探，其技术效果和经济效益显著，解决了复杂地层钻探技术难题。当然，由于冲击式金刚石取心跟管钻进方法中的潜孔锤是液动潜孔锤，其冲击功没有空气潜孔锤大等原因，在浅部（如深 50m 内）II类复杂地层中钻探，这种钻进方法的钻进效率低于空气潜孔锤取心跟管钻进方法。

采用该钻进方法在复杂地层钻探，可减少孔内事故，降低材料消耗，提高钻进效率；简化钻孔结构；为处理预想不到的孔内事故提供条件。

（5）根据小湾地层的特点,研究出了二种类型气动潜孔锤偏心跟管钻具即 DPA 型单偏心跟管钻具、SPA 型带中心钻头的单偏心跟管钻具。这两种偏心跟管钻具的特点有：

① 依靠中心钻头和偏心扩孔钻头二级破岩、设计合理的排渣系统使排渣顺畅以及与具有足够冲击功的冲击器相适配等；

② 具有中心钻头起导向作用的偏心跟管钻具结构对于地层复杂的小湾电站更有利于孔斜的预防，从而更大限度地满足工程设计的要求；

③ 钻具在结构上设计用键来传递扭矩，加之选用了高强度的材料，采用了特殊的热处理工艺，合理的固齿工艺，确保了钻具寿命；

④ 联接销系统为相互自锁的结构，保证了中心钻头与导正器之间连接具有良好的可靠性，解除了掉钻之忧。

钻具结构简单、设计合理，性能优良，材料选择和热处理工艺完全能满足小湾工程跟管钻进的需要。钻具的平均寿命达到了 81.66 米，最长寿命达到 110 米，比以前的钻具寿命有较大提高；平均时效达到了 2.17 米/小时。

在大量现场试验和生产的基础上，针对小湾电站气动潜孔锤偏心跟管钻进施工锚索孔的特点，提出了钻机、空压机、潜孔锤选择原则和配套型号；并对钻机进行了合理的改进。

（6）根据小湾地区钻进的特点，编制出了具有施工指导意义的潜孔锤跟管钻进工艺规范，为小湾电站锚索施工提供了技术指导。主要钻进技术参数包括风量、风压、钻压与转数等，一般采用的规程参数为：

① 风量：考虑风量时，要求钻杆和孔壁环状间隙之间的最低上返风速为 15 m/s。推荐风量为：$Q_{风}=9\sim25\ m^3/min$

② 风压：钻速和风压几乎是成正比的。风压从 0.6 MPa 提高到 1.30 MPa 时，钻进效率可提高一倍。低压潜孔锤，所需风压为 0.5～0.7 MPa；高压潜孔锤，所需风压为 0.8～1.5 MPa。

③ 钻压：使用 200 mm 的潜孔锤，钻压在 13～16 kN 时钻进效率最佳。使用 90 mm 潜孔锤，钻压在 5～6 kN 时钻进效率最佳。

④ 转数：开孔转速 n＝0；跟管钻进中根据所用冲击器型号的不同转速 n=25～45 r/min。

（7）套管起拔设备是跟管钻进中必须的专用起拔设备，套管的起拔速度直接影响着锚索的施工效率。针对工程实际，研制了起拔力为 650KN 的系列液压拔套管设备，该液压拔管机结构简单，体积小、质量轻，最大部件质量约 150Kg，装拆、操作方便，主要技术参数合理，能较好的满足实际工作的需要；操作台与液压泵站分开设置，操作台与泵站之间配有 20 米长的油管，特别适合于搬运、迁移困难的边坡工程使用；设计制造时充分考虑了到陡坡上套管起拔的实际问题，底座和油缸采用铰接；一台设备可起拔多种规格的套管，形成系列。

（8）在川藏公路二郎山隧道龙胆溪滑坡处理工程、黄金坪电站坝基覆盖层钻进成孔与帷幕灌浆试验工程、雅砻江官地水电站左岸缆机平台边坡预应力锚索工程等近十个工程中应用了本文所开发的潜孔锤跟管钻进技术和研制的偏心跟管钻具、液压拔管机，解决了上述工程复杂地层钻进成孔与取样问题，从而实现了设计意图，达到了高的复杂地层钻孔质量和钻进效率，应用效果均良好,取得了好的经济效益和社会效益。工程施工成本节约三分之一；钻具寿命长达 300 米，平均时效达到了 3.2 米/小时。钻具工作可靠，寿命长；性能良好。解决了深厚覆盖层、卵石层、堆积体成孔技术难题。

致 谢

在职攻读博士学位期间，得到了许多老师、同事、同学和亲朋好友的大力支持和帮助。值此博士学位论文完成之际，特向他们致以崇高的敬意和衷心的感谢!

首先要衷心地感谢我的导师黄润秋教授。自本人有幸成为黄老师的学生，攻读博士学位以来，始终得到了黄老师的亲切关怀和悉心指导。在这几年里，本人在地质工程领域所取得的点滴成绩和进步，无不凝集着老师的心血和汗水，老师对事业执着的追求精神，实事求是的科学态度，精湛的学术造诣，敏捷的思维，勇于开拓和严谨治学的作风，给学生以深刻的潜移默化影响。他处理问题的果断以及驾驭整个局势的能力，使学生深为折服。他无私、真诚和朋友般的教诲，将使学生受益终身。在博士论文的撰写过程中，更是得到了导师的亲切关怀和精心指导，这为作者最终保质保量地完成学位论文提供了重要保证。希望在今后的学习和工作中，继续得到您们的指导和帮助。

本人还要感谢多年一起从事研究工作和日夜相处的同事们和老师们。尤其是马洪琪院士（工程院）、艾永平教授级高级工程师、吴锡贤教授级高级工程师 、吴光琳教授、朱宗培教授、陈礼仪教授、李子章教授级高级工程师、杨俊志教授级高级工程师、张道云教授级高级工程师、石永泉教授、袁学武老师、冯杨文高级工程师、陈修星高级工程师等等，是他们和本人共同从事研究工作，提供论文素材，才得以论文顺利完成。

在本人学习和完成学位论文的过程中，还得到了许强教授、许模教授、李天斌教授、万新南教授、胥建华教授、李山教授、韩才义老师的关心和帮助。在此表示衷心的感谢!同时还要感谢环境与土木工程学院全体老师和有关工作人员对本人学位论文的关心与关注。也深深感谢李 璞老师、何 萍老师一直来对本人的关心和鼓励。

最后，向多年来为支持本人学习而默默奉献的妻子表示深深的谢意!是她的深情关爱和精心照顾，使本人的学业和事业走到了今天。

参考文献

[1] 李海石，符国强．钻井取心技术．北京：石油工业出版社 1993.
[2] 吴隆杰等.《钻井液处理剂胶体化学原理》，成都科技大学出版社，1992 年
[3] 李世忠.《钻探工艺学(中册)-钻孔冲洗与护壁堵漏》，地质出版社，1989 年 11 月
[4] PW 植物胶在钻探泥浆中的应用资料汇编，成都地质学院泥浆研究室，1986 年 2 月
[5] 李祥麟．潜孔锤钻进技术[M].地质出版社.1988，10.
[6] 武汉地质学院．钻探工艺学[M]. 地质出版社.1980，10.
[7] 刘广志，中国古代钻探科学技术史．北京：地质出版社 1998.
[8] 张春波，刘峰．中国绳索取心钻探技术现状．探矿工程，1996.（4）.
[9] 石永泉．冲击回转钻进中的静压力[J]. 地质与勘探.1984，2.
[10] 张泽业．影响空气潜孔锤跟管钻进速度和跟管深度因素分析.西部探矿工程[J]. 1997，10.
[11] 李世忠．钻探工艺学[M]. 地质出版社.1994.10.
[12] 刘晓阳．松辽盆地上第三系含砾石砂岩、砂砾石层取心技术研究[R].北京核工业局科研报告.2000.
[13] 吉林大学建设工程学院．多工艺空气钻探[R].1987，10.
[14] 张国忠．气动冲击设备及设计[M].机械出版社.1989，12.
[15] 张永群．多介质反循环复合钻探技术的研究[J].探矿工程，2000，（4）.
[16] 柴世丁．空气潜孔锤钻进工艺在基岩水井中的应用[J].探矿工程，1998，（6）.
[17] 耿瑞伦．多工艺空气钻探[M]. 地质出版社出版.1995，10.
[18] 蒋荣庆．大直径硬岩潜孔锤钻具系统研制与实验[J].吉林科学技术出版社出版.1992.
[19] 蒋荣庆．贯通式潜孔锤反循环连续取心样钻进在水文井中的应用.探矿工程，1991，（4）.
[20] 蒋荣庆．潜孔锤钻进在复杂地层中应用[J].地质与勘探.1999，（3）.
[21] 蒋荣庆． 贯通式潜孔锤反循环连续取心钻头[P]. 中国专利，91205924.9 、ZL91102114.4.
[22] 楼日新．钻探新技术的开发和应用[R].国家电力公司成都勘测设计研究院科研报告，2000.
[23] 黄培云.《粉末冶金原理》，冶金工业出版社，1997。
[24] 郭志猛 宋月清 陈宏霞 贾成厂.《超硬材料与工具》，冶金工业出版社，1996。
[25] J.D.Downs, et al, Novel Drilling and Completion Fluids for Demanding Environments, SPE 25177，1993.
[26] 张国忠.《气动冲击设备及其设计》，机械工业出版社，1984.
[27] 黄万志．冲击回转钻进能量传递和参数选择，《西南石油学院学报》，1997.4
[28] 鄢捷年.《钻井液工艺原理》，石油大学出版社，2001.
[29] 黄汉仁等.《泥浆工艺原理》，石油工业出版社，1984,1.
[30] 黎建良等.《固体中的波》，1995.
[31] 新型孕镶金刚石碎岩工具的研制[硕士论文]，中国地质大学，1996。
[32] Evan Oort, Manipulation of Coupled Osmotic Flows for Stabilisation of Shales Exposed to Water-Based Drilling Fluids, SPE 30499.
[33] B.Engser.1990.Die Kernbohrstrategie fuer die KTB Hauptbohrung. Erdoel Erdgas Kohle，（12）：496～500.
[34] 鲁凡．钻进极坚硬地层的孕镶金刚石钻头，中南工业大学学报，1995，（5）。
[35]王殿江．孕镶金刚石钻头胎体磨损的几何效应，地质与勘探，1994，（8）。

[36] 段隆臣．新型镀膜金刚石碎岩工具的研制（博士论文），中国地质大学，1997。
[37] 李晓苗．热压温度确定原则及低温活化烧法，地质与勘探，1999，1。
[38] Vijayaraghavan M R, et al, Histochemical, Structure, and Ultrastructural Features of Endosperm in Alyssum Marittimum Lam, Actabol Neerl.
[39] 李耕．金刚石与胎体嵌镶状况分析，磨料磨具与磨削，1992，(2)。
[40] 张伟．大直径硬岩钻孔中液动锤全面钻进，中国地质大学学报，2004,2
[41] 谢文卫，苏长寿，孟义泉． YZX127 液动潜孔锤在 CCSD 科钻 1 井先导孔中的应用．地球科学，2005．30（增刊）．
[42] Milchem Co•Drilling Fluids Reference Manual，1980.
[43] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组，《正交设计》，人民教育出版社，1976 年.
[44] 李世忠．《钻探工艺学(上册)》，地质出版社，1992，11.
[45] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组．《正交设计》，人民教育出版社，1976.
[46] 硬质合金矿山、地质工具制品（YB883—77）
[47] 地质钻探用管材标准（YB235-70）、（YB-235-63、YB-236-63）
[48] 赵金洲，张桂林．钻井工程技术手册．北京：中国石化出版社 2005.
[49] 高德利等．复杂地质条件下深井超深井钻井技术．北京：石油工业出版社 2004.
[50] P·L·Moore，Drilling Practies Manual，The Petroleum Publishing Co.Tulsa，1974.
[51] 林冉．岩石破碎机理在孕镶头设计中的应用，西部探矿工程，1994（6）。
[52] 金刚石岩芯钻探用无缝钢管（GB3423-82）
[53] 石油油管螺纹（YB690—70）
[54] 冶金地质系统金刚石岩芯钻探钻具级配系列
[55] 机械制图（DB4457~4460，GB131—83）
[56] 公差与配合（GB1800~1804—79）
[57] 刘广志．《金刚石钻探手册》 地质出版社 1991 第一版
[58] 谭跃麟．“钻孔下套管方法综述” 《地质与勘探》 91.6
[59] 包根源．“复杂地层钻探套管使用” 《地质与勘探》 92.9
[60] 王人杰等．《液动冲击回转钻探》 地质出版社 1988 第一版
[61] 赵建勤．潜孔锤的研制与应用前景.全国第四届坑探与隧道会议论文，1997.4
[62] 程良奎等．岩土锚固.中国建筑出版社，2003.1
[63] 汪彦枢等．长江三峡链子崖危岩体防治工程中的锚固钻孔工艺.中国地质灾害与防治学报，1998.1
[64] 孙建华等．岩土锚固施工技术介绍.工程勘察与施工信息，1996.7-8
[65] 施世久．滑坡治理中预应力锚索施工技术.西部探矿工程，2001.1
[66] 孟庆鸿．预应力锚索施工实践.探矿工程，1997.2
[67] 刘治德等．铁路高边坡的预应力锚索施工.西部探矿工程，2000.5
[68] 张祖培，殷琨，蒋荣庆，孙友宏.岩土钻掘工程新技术［M］.北京：地质出版社,2003.
[69] 殷琨,蒋荣庆．潜孔锤反循环钻进技术及其应用[J].探矿工程[岩土钻掘工程],1996(5)
[70] 蒋荣庆,殷琨．潜孔锤多工艺钻进在水文水井及工程中的应用[J].水文地质工程地质.1998(6)
[71] 殷琨，蒋荣庆等．嵌岩桩施工用大直径潜孔锤，探矿工程科技进步 100 例［M］．北京：地震出版社，1998
[72] 吴光琳 齐瑞忱 胥建华 楼日新 张道云．YDX-1 型岩心定向器的 研制和应用，《探矿工程》，1997 年第 5 期，49-52 页。
[73] 季米特拉雪克 A.И.等（丁方维译）．用 К Г Д Г 定向取心器采取定向岩心，《国外探矿工程

情报》，1988 年第 4 期，168-170 页。
[74] 马明　刘桢荣．三峡岩心定向技术综述，内部资料，1994 年。
[75] 马克新．YCO-Ⅱ型岩心定向钻具的工作原理及应用，《地质与勘探》，1999 年第 2 期，59-60 页。
[76] 苏子义　刘誉选，套钻与定向取心技术，会议交流文件，1988 年。
[77] 吴光琳．利用定向岩心确定地下岩层产状的方法，《成都地质学院学报》，1984 年第 4 期，79-86 页。
[78] 汤国起　季伟峰．非磁性钻杆在钻孔定向和测斜中的应用．《探矿工程》，1985 年第 6 期，31-35 页。
[79] 地质岩芯钻探管材螺纹（DZ1.1~1.3—84）
[80] 形状和位置公差（GB1182~1184—80）
[81] 鄢捷年．《钻井液工艺原理》，石油大学出版社，2001 年
[82] 地质钻探金刚石扩孔器（DZ2.2—87）
[83] 地质钻杆锁接头（DZ25~83）
[84] 地质钻探金刚石钻头（DZ2.1—87）
[85] An Zhisheng，Ai Lietal．2006．Lake Qinghai Scientific Drilling Project．Scientific Drilling，(2)：
[86] G•R•Gsay，H•C•H•Dorley，W•F•Rogers，Composition and properties of Oil well Drilling Fluids (4-Edition)，1980.
[87] 方啸虎主编．《超硬材料科学与技术》（上、下），中国建材工业出版社，1992。
[88] Savins G, Drag Reducing Additives Improve Drilling Fluid Hydraulics, Oil & Gas Journal，1995.3.
[89] 郑宋本．如何确定金刚石钻头结构参数，地质与勘探，1989，(11)。
[90] J.D.Downs, et al, Development of Enviromentally Formate-based Drilling and Completion Fluids, SPE 27143，1994.
[91] 石昆山．岩石物理力学性质与孕镶金刚石钻头结构参数的优选，探矿工程，91，(1)。
[92] Brannon H D，Ault M G，New，Delayted Borate-Crosslinked Fluids Provided Improved Fracture Conductivity in Hight-Temperture Applications. SPE22838，1991.
[93] 罗超 李世忠．人造金刚石孕镶钻头磨损特征的研究，地质与勘探，1995，(2)。
[94] Kooiman P, Structures of the Galactomannans from Seeds of Annina Muricata, Cocos Nucifera, and Sophoriajaponica, Carbonhudrate Research, 1975.
[95] 王中华．高分子处理剂的结构与性能分析，钻井液与完井液，1987 年第 3 期
[96] 张宝泽．田菁和碱蒽菜耐盐性能的研究，山东师大学报(自然科学版)，1997 年 03 期
[97] 崔军文等．中国大陆科学钻探主孔 2000 米以上脆性变形构造应力场．岩石学报，2004．20（1）
[98] Dubois M, Clolorimetric Methods for Determination of Sugars and Related Substances, Anylytical Chemistry, 1956.
[99] 贾　军，杨凯华．中国大陆科学钻探先导孔钻井液的固控与润滑对取心钻进的影响．地球科学，2005．30（增刊）．
[100] Brannon H D，Ault M G，New，Delayted Borate-Crosslinked Fluids Provided Improved Fracture Conductivity in Hight-Temperture Applications. SPE22838，1991.
[101] 袁公昱 方啸虎 王殿江等．《人造金刚石与金刚石工具制造》，中南工业大学出版社，1992。
[102] Drink Lynnette, Structural Studies on Galactomannans and their Complexs, Phytochemistry, 1995
[103] 张　伟，谢文卫．大直径硬岩钻孔中的液动锤全面钻进．地球科学，2005．30（增刊）．

攻读博士期间发表论文及科研成果

1 作者简介

楼日新（1967.10—），男，汉族，浙江东阳人。1986～1990 年就读于成都地质学院，1990 年 6 月获探矿工程专业学士学位，同年考入成都地质学院攻读硕士学位，1993 年 6 月获得探矿工程学硕士学位。2002 年 9 月考入成都理工大学环境与土木工程学院攻读地质工程博士学位，师从黄润秋教授，研究方向为岩土钻掘工程。

2 参加科研项目

[1] 2001.03～2006.04，架空层钻进与取芯技术研究，专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[2] 2003.04～2005.04，小湾电站边坡锚固钻进技术研究报告，专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[3] 2004.04～2005.04，宜宾市白沙组团工业园区龙翔路、梨湾路、龙头山路地基处理方案咨询专题，专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[4] 2004.05～2005.12，宜宾市白沙组团工业园区白沙堰工程咨询专题；专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[5] 2004.01～2005.11，屏山县新市镇地质灾害危险性评估及工程地质勘察专题；专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[6] 2003.2～2005.11，四川鑫顺矿业公司委托的《宁南县矿区输电线路电力设计》专题；专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[7] 2005.02～11，宜宾市白沙工业园顾湾路工程地质勘察报告；专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[8] 2007.01～12，宜宾市白沙工业园挂弓小区工程地质勘察（可行性勘察）报告；专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[9] 2005.11～2007.06，宜宾市白沙工业园城市环线预埋管涵地基处理咨询报告；专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

[10] 2000.09～2005.09，钻探新技术的开发和应用研究专题；专题研究负责人，主持研究工作并负责编写和审阅报告；

3 公开发表论文

[1] 楼日新. SDQ-91 型钻孔定向取芯器的研制[J]. 水电站设计，2003 年第 2 期，（EI 核心期刊）

[2] 楼日新. 卵石层大口径空气潜孔锤钻进与取样技术[J]. 地质与勘探，2003 年第 2 期，（EI 核心期刊）

[3] 楼日新，吴光琳. 芯定向新技术的研究[J]. 水利水电技术，2003 年第 6 期，（EI 核心期刊）

[4] 楼日新. 堆积体锚索钻孔跟管钻进工艺技术的应用[J]. 水力发电，2003 年第 1 期，（EI 核心期刊）

[5] 楼日新等. 适合溪洛渡水电站地层条件金刚石钻头的研制[J]. 水力发电，2003 年第 9 期，（EI 核心期刊）