目　　录

绪论 …… (1)

第一章　岩石的组成 …… (3)

1.1　引言…… (3)

1.2　岩石材料和岩体…… (4)

1.3　岩石与土壤…… (4)

1.4　地球化学…… (5)

1.5　矿物学…… (7)

1.6　岩石组构…… (10)

1.7　岩石的地质分类…… (11)

1.8　岩石的工程分类…… (14)

1.9　与其它材料的比较…… (16)

1.10 小结…… (16)

第二章　参数的考虑 …… (17)

2.1　引言…… (17)

2.2　取样方面的考虑…… (17)

2.3　地球化学方面的考虑…… (18)

2.4　结构方面的考虑…… (19)

2.5　环境方面的考虑…… (20)

2.6　测量方面的考虑…… (21)

2.7　小结…… (21)

第三章　密度 …… (22)

3.0　术语表…… (22)

3.1　引言…… (22)

3.2　术语的定义…… (22)

3.3　实验室方法…… (23)

3.4　野外方法…… (24)

3.5　已发表数据的统计分析…… (25)

3.6　相关的可能性…… (26)

3.7　小结…… (28)

附录：表3.2中数据来源的书目…… (29)

第四章　孔隙度、渗透率、分配系数和分散度 …… (34)

4.0　术语表…… (34)

4.1　引言与界说…… (34)

4.2　孔隙度…… (35)

4.3　渗透率…… (36)

4.4 分配系数……（37）
4.5 分散度……（38）
4.6 小结……（39）
第五章 岩石的强度……（63）
5.0 术语表……（63）
5.1 引言……（63）
5.2 单轴抗压强度……（64）
5.3 围限抗压强度……（69）
5.4 抗张强度……（73）
5.5 剪切强度……（76）
5.6 岩石破坏……（77）
5.7 岩石疲劳……（80）
5.8 蠕变……（83）
5.9 小结……（87）
附录：表5.1，5.2和5.3中数据来源的书目……（88）
第六章 静态应力-应变关系……（91）
6.0 术语表……（91）
6.1 引言……（91）
6.2 定义……（92）
6.3 矿物含量、微裂隙和各向异性……（93）
6.4 测量方法……（94）
6.5 实验室试验结果……（96）
6.6 野外试验结果……（124）
6.7 小结……（127）
第七章 岩石间断面的剪切阻力与可变形性……（129）
7.0 术语表……（129）
7.1 引言、术语和观点……（129）
7.2 有关间断面特性的理论……（131）
7.3 剪切间断面的装置和方法……（136）
7.4 间断面的阻力和可变形性……（143）
7.5 小结……（158）
第八章 地震波速度……（160）
8.0 术语表……（160）
8.1 引言……（160）
8.2 实验方法……（161）
8.3 速度与弹性之间的关系……（161）
8.4 参数影响……（163）
8.5 数据的表示……（164）
8.6 数据的讨论……（186）
8.7 小结……（188）

第九章　岩石的电学性质 …… (189)
9.0　术语表 …… (189)
9.1　引言 …… (189)
9.2　电量参数 …… (190)
9.3　电荷传输的过程与机制 …… (192)
9.4　电导率：电荷传输 …… (194)
9.5　矿物与岩石的电导率 …… (194)
9.6　水与水溶液的电学性质 …… (195)
9.7　岩石中的水：混合定律 …… (200)
9.8　小结 …… (200)
附录A：部分岩石、矿物和化合物在室温下的电学性质及电介质介电常数统计数值表 …… (210)
附录B：岩石与矿物的电导率 …… (230)
第十章　岩石和矿物的磁性 …… (235)
10.0　术语表 …… (235)
10.1　引言 …… (235)
10.2　抗磁性 …… (235)
10.3　顺磁性 …… (236)
10.4　铁磁性 …… (238)
10.5　磁滞 …… (238)
10.6　反铁磁性 …… (239)
10.7　弱铁磁性 …… (240)
10.8　铁氧体磁性 …… (241)
10.9　磁铁矿：钛尖晶石系列 …… (242)
10.10　赤铁矿：钛铁矿系列 …… (243)
10.11　变化 …… (244)
10.12　铁的氢氧化物 …… (245)
10.13　铁-镍-钴 …… (246)
10.14　超顺磁性（SP）-单磁畴（SD）铁 …… (249)
10.15　沉积物 …… (250)
10.16　大洋玄武岩 …… (250)
10.17　大陆岩石 …… (251)
10.18　小结 …… (254)
第十一章　岩石的熔融曲线和造岩熔体的粘度 …… (255)
11.1　引言 …… (255)
11.2　熔融曲线的实验测量技术 …… (257)
11.3　熔融间隔 …… (257)
11.4　挥发分在硅酸盐熔体中的作用 …… (261)
11.5　多组分挥发分体系 …… (262)
11.6　岩石熔融温度和结晶温度的实验结果 …… (263)

11.7 数据 …… (263)
11.8 在高于一大气压压力下的熔融关系 …… (272)
11.9 挥发分存在时的熔融作用 …… (275)
11.10 熔体的粘度和密度 …… (280)
11.11 粘度测量的实验技术 …… (281)
11.12 粘度数据 …… (281)
11.13 硅酸盐熔体的密度 …… (284)
11.14 小结 …… (285)
附录：定义 …… (286)
第十二章 岩石的热物理性质 …… (287)
12.0 术语表 …… (287)
12.1 引言 …… (288)
12.2 定义和理论上的考虑 …… (288)
12.3 热导率测量方法 …… (291)
12.4 误差来源的讨论 …… (292)
12.5 估算热导率的方法 …… (293)
12.6 联合方法 …… (295)
12.7 热膨胀测量方法 …… (295)
12.8 小结 …… (298)
附录：数字数据 …… (299)
精选的岩石及其性质的数据书目 …… (360)
全书参考文献（按章的顺序排列） …… (372)

绪　论

这本著作对于岩石和包括某些矿物在内的其它地质材料的物理性质提供了经过评价的数据和必要的讨论。尽管涉及的范围有人为选择的因素，却也相当广泛。起始的两章是导论性的，它们概括了几乎全部物理性质讨论中都要涉及到的岩石的组成与工程分类，以及对一般参数的考虑。随后的十章，论述了岩石的物理性质、力学性质、电学性质、磁性和热物理性质，其中特别强调了在地热应用中认为有用的那些数据。

为什么要把岩石的性质汇集成书？理由是多种多样的。但是，人们已经认识到，为了确定矿产资源的产地和开采这些资源，以及对岩石上或岩石中建造的工程设施选定地点、进行设计、施工建设乃至长期维修，都必须测定一种或多种岩石性质。在本卷的准备过程中，得到了能源部的支持，该部对于开发地热能源深感兴趣，在这方面，重要的岩石性质是热性质、可钻性和渗透率。此外，在区域基础上得到的较好的热流知识，它有助于确定迄今尚未知晓的地热资源的地点。

岩石性质数据的许多其它用途包括：压缩强度有助于选择填石坝的外壳材料；密度是选择土坝的最经久耐用的护面材料的基础；在矿山开发面的准备措施中，以及设计储存核废料或容纳地下电站的岩洞设计中，岩石强度和模量是必须的数据基础；电性和磁性的变化有助于预报地震；在设计稳定岩石边坡时必须有节理剪切强度数据。另外，对于诸如对速度特点和高温高压引起的相变之类的某些基本性质的较清楚的了解，可以提供对地壳习性的更深入的理解；这种理解对于确定地热能源产地，预报地震，以及对找寻新的矿产资源都是必要的基础。

内容多寡适度的一卷书的材料必须在一个适宜的时期之内编纂起来，要想把已经发表的有关岩石性质的数以万计的数据包罗无遗是不可能的。不过，在本卷中，应用者能够获得代表性的数据，并获知若干包含岩石性质数据的出版参考文献。由于组织本卷内容的方式，读者会感到，常用的主体索引可能不是特别有用的。所以用一个详细的目录表取代之。

这部参考著作代表了31位物理学家、工程师、地质学家和地球物理学家的共同努力的成果，他们来自美国和加拿大的大学、政府的实验室和一个咨询处。编者衷心地感谢他们慷慨地贡献了其宝贵的时间和知识专长，没有这些，这本著作是难以完成的。

如果我们不对关于岩石物理性质的两种早期经典著作作出特别的申述，那么这些引论性的说明便不完善。自然，我们参考了1942年弗朗西斯·伯奇（Francis Birch）编辑的36号特殊出版物——《物理常数手册》和小克拉克（Sydney P. Clark, Jr）于1966年编辑的修订本，这两本著作都是由美国地质学会主持出版的。多年来，这些著作为地学界作了优秀的服务。现在这本著作在结构上和内容上都不同于上述的两本书，虽然它对于地学家同样有意义，但它直接针对着工程学界。但是，就其相应的内容部分而言，我们希望现在的这本著作代表小克拉克在1966年所编的一书的最新扩充。

最后，我们以尽可能最强有力的方式强调，如果对岩石所报导的物理数据是有最大应用价值的话，将来的研究者必须把多得多的注意力花在对岩石的全面的特征化上。与此相联系，必须强调需要有特定位置的数据。另外，必须认识到，岩石性质与起源于化学、粒度和形成

方式方面的各种考虑的地质名称或岩石学名称无关。换句话说，岩石名称，比如石灰岩并不意味着必然有相同的一套性质。

编者们是能源部地热能司委任的一批高级研究员，在准备这卷参考著作时，对他们的部分支持和相互理解的合作表示衷心的感谢。

Y.S.Touloukian
W.R.Judd
R F.Roy

第一章　岩石的组成

H.J.平库斯

1.1　引　　言

材料物理性质的经典模式，很少能精确地用于称为岩石的一类材料。不管大小如何，在所研究的岩石体积内，由一点到另一点的性质变化（非均一性）和性质随方向的变化（各向异性），都是规律远多于例外。

矿物是岩石的砌块。最常见的造岩矿物都是各向异性的，而且往往含有由矿物组成的杂质。矿物颗粒由相互交嵌的颗粒边界，矿物胶结物，以及粘结性颗粒集合体连接在一起。颗粒接触面上的薄膜水与摩擦力也阻碍了解离作用。与晶格不同，颗粒的网格的结构很少是均匀的和周期性的。

相象的矿物或相象的矿物群的颗粒畴，可能以蓆状、透镜状、球状和其它形状来排列。这些排列方式至少记录了岩石的某些地质历史。例如，蓆状或层状排列方式，可能由水或空气搬运和沉积的沉积物粒度或成分的差别引起，或者由曾被熔融的物质中平面板状颗粒和柱状矿物垂直于速度梯度的排列引起，或者由与应力场平衡而重结晶的板状颗粒的平行排列造成的。

岩石中的矿物质布满了诸如裂纹和孔隙之类的间断面。在较大的单位中，岩石被诸如裂隙（节理）和层理间的剥离面之类的间断面所切割。裂纹、孔隙和裂隙的空间间隔与方向在岩石中很少是均匀地分布。

岩石中的空隙可能被水部分地或全部地充填。被排干了水的岩石通常还会在毛细孔隙中保留一些水分。岩石水和含岩石水的岩石彼此之间相互发生化学的和物理的作用。干岩石在一些重要方面不同于它的饱含水的对应物。同样，已经暴露在诸如水、氧和二氧化碳之类的风化营力作用下的岩石可能明显地不同于未风化的岩石。

岩石的应力历史可能在相当大的程度上取决于岩石的习性。例如，残留应力的作用达到破坏程度所需要的载荷量，而且也可能影响破坏面的方向。虽然残余应力并不是岩石成分的一部分，但在应力存在的地方便立即与岩石的全部成分相互作用，并影响其性质。应力史可能直接与不均一性和各向异性有关。例如，通过岩石的破裂造成这种不均一性和各向异性，破裂岩石的习性不同于它的未破裂对应物；另外，诸如空间大小、方向和粗糙度之类的破裂特点，在岩石中常常不是均匀分布的。

在对岩石成分的所有考虑中，最根本的一条，是要记住尺度效应。就不均一性和各向异性而言，这一点特别重要。在一种尺度上可把岩石物质看作是均匀的和各向同性的，而在更大或更小的尺度上看，则可能既不是均匀的，也不是各向同性的。

本节前面的一些讨论肯定与下述观察相符：岩石性质的实验结果表现得相当分散，即使是同一岩石类型也是如此。并非所有影响实验结果的因素都讨论到了。例如，进行测试时的时间-速率会影响象抗压强度之类的常用性质的实验结果。而且，同一种性质的实验室实验和原地实验得到的结果也常常彼此不同，远比估计的测量误差要大得多。

岩石材料即使只在诸次实验间变化，我们也还是可以发现对于一种特殊的岩石类型得到的结果要比诸如金属、陶瓷乃至矿物都分散得多。出现这种情况的原因，只是因为命名（分类）岩石（第1.7节）的间隔格架要比分类许多其他材料的格架大得多。最精细的岩石分类型式可能伴有化学成分与矿物成分、粒度、颗粒形态和颗粒排列的变化，但是，却没有一种岩石的地质分类明确地论及应力历史。

“同种”岩石（例如“花岗岩”）的被测量性质可能呈现出一个宽的数值范围，因为它在所有实验中并不是“同种”岩石。除了岩石名称之外，实验数据还必须提供详细说明的背景资料，例如，地理位置、深度、采集方法、样品定向及水文条件。

但是，对于不同岩石类型的性质是能够作出有效的概括的。“花岗岩”的抗压强度平均起来大于“砂岩”的强度，“砂岩”的平均渗透率大于“花岗岩”的平均渗透率。岩石的抗压强度要比它们的抗张强度大得多。然而特定位置的岩石的性质却不能依据区域平均值或概括出的性质来推断：特殊用途所要求的性质必须在那个位置上进行测定。

1.2 岩石材料和岩体

岩石材料（岩石物质、原样岩石、岩石单元）是实验室进行性质测试时假定为连续的岩石物质，则某些形式的刚体连续力学可以应用于它们。就颗粒、孔隙和裂纹来看，岩石材料的体积要素是大的；而就诸如裂隙（节理）和层理面之类的不连续面之间的空间间隔来看，它又是小的。

岩体（岩石体系、原地岩石）由此相应的岩石材料更大的体积单元构成。从物理意义上看，岩体并不意味是“岩石的块体”。岩体由岩石物质和诸如裂隙之类的明显的不连续面一起构成。经常观察到的岩石材料与岩体之间的物理性质的差别证明了两者之间是有区别的。

岩石材料的强度越大，在确定岩体性质时间断面的地位便越是重要。相反，强度弱的岩石具有接近于土壤的性质，表现出岩石材料与岩体性质之间较小的差别。

岩石材料与岩体的精确而完善的野外描述，无论怎么强调，都不过份。例如，间断面的填图可以提供比高度细致的实验室研究多得多的有用资料。另外，实验工作者完成野外研究可以花费少得多的时间和低得多的费用。理想的情况是，野外研究和实验室研究都应该严格细致地进行，以便得出岩石材料和岩体的差别之处。

野外记录的特点有：岩石的构造（褶皱、裂隙、构造的可变性和宏观性质），有关环境因素（水文、地貌、经济），以及当地的岩石物理性质演变历史。在许多主要研究岩石的研究计划中，记录土壤的野外特点，尤其是土壤与岩石之间的分布关系，也是重要的。例如，土壤盖层表现出来的地表凹陷，可以作为下伏岩石中坍塌构造或断层之类的间断面的标志。

任何地质变量的面积与体积图象都需要大量的内插工作，通常为了填补一些详细的图象也需要某种外推工作。象表征力学性质之类的变量，必定不能单独用数字方法进行内插和外推。只有对在区域内起作用的地质过程和边缘区域主要地质特点有了合理的综合理解，才能做出可以信赖的内插和少量外推。即使是在这种情况下，还可能遇到意想不到的细微之处。

1.3 岩石与土壤

对于土壤与岩石的区别，还没有普遍接受的一致意见。如果忽视了这个问题，这种区分

可能具有重大的法律后果和财经后果。例如，把开挖的风化页岩的契约术语称作“土壤”，就与把同一种开凿物称作“岩石”可能有重大的差别。美国实验与材料学会〔1975〕把岩石与土壤〔D653-77a标准〕定义为：

岩石——以大的岩体或碎块出现的天然固体矿物物质。

土壤（土）——由岩石的物理和化学解离作用产生的沉积物或其它的固体颗粒未固结堆积物，可以含有也可以不含有有机质。

地质学家和土壤学家用规定有供养户外植物的能力来进一步限定了土壤的定义。

岩石能够转变为土壤，而且反之亦然。两者之间的接触边界可以是突变的，也可以是渐变的。它们都可以单独在地表出现。

表1.1〔Goodman，1976，表2-1〕表示了卡尔·特扎基(Karl Terzaghi)教授的关于区分固体岩石、风化岩石和土壤的实用指导表格。这个指导表可供相对缺乏经验而又细心的观察者有效地使用。

表1.1 特扎基区分岩石、风化岩石和土壤的指导表〔据Goodman，1976〕

原始状态	在反复地烘干、浸湿和振动之后，或者长期暴露于大气之中	使干的碎屑饱和水产生的体积变化	分类
固体 当用铁锤敲打时发出清脆声音	未变化的	难以察觉的	a）固体岩石
	破碎为具有清晰表面的硬的小块		b）细裂开的或者磨碎的未变化岩石
	破碎成小碎片，由于存在细粒风化产物而具有象油脂的表面		c）稍微分解的裂开的岩石
	破碎为单个的砂或粉砂颗粒		d）具有不稳定胶结物的砂岩或泥岩
	破碎为小的棱角状碎片，没有任何化学变化的标志	可以测量的	e）岩石与粘土的中间物，岩石特点占主要地位
固体 当用铁锤敲击时发出沉闷的声音	逐渐转变为土壤颗粒悬浮物		f）岩石与粘土的中间物，粘土特点占主要地位
	逐渐转变为粘土颗粒悬浮物和由棱角状岩屑组成的沉积物		g）完全分解的岩石
	完全转变为悬浮物和（或）松散沉积物	难以察觉的到重要的	h）在干的或者十分压实的条件下的粘土、粉砂和很细的砂

土壤的成分和结构取决于它的母源物质、从岩石转变为土壤的过程和土壤的环境历史。土壤可以很缓慢地与它们由之而来的下伏岩石混为一体。但是，如在冰川搬运与沉积的物质的情况下，土壤可以与下伏岩石决无成因关系。

土壤与岩石影响彼此起作用的过程。例如，土壤控制了水渗入地下水体系的速率；就重力诱发上覆土壤盖层的运动而言，基岩地貌起伏影响上覆土壤盖层的稳定性。

1.4 地球化学

地壳中的主要元素的丰度在表1.2中表示出来。注意这八个元素占了大洋和大陆地壳重

量的98%，其中两个元素，氧和硅合起来占了地壳的2/3～3/4。地壳的质量是 2.5×10^{25}g，它是地球质量的0.4%〔Turekian，1972〕。

表1.2 地壳中主要元素的丰度（重量百分比）〔据Tan与Yao，1970〕

元素	区域				地壳			岩石	
	深大洋	浅大洋	大陆	褶皱带	大洋	大陆	地球	火成的与变质的	沉积岩
氧	44	46	46	47	45	46	46	46	50
硅	23	24	29	29	23	29	27	27	21
铝	8.5	8.2	8.4	8.2	8.4	8.3	8.3	8.6	5.6
铁	8.3	6.6	4.9	4.4	7.5	4.8	5.8	6.0	3.3
钙	7.5	6.6	4.1	4.1	7.1	4.1	5.2	4.8	10.0
钠	2.0	1.9	2.5	2.5	2.0	2.5	2.3	2.5	0.9
钾	0.8	1.5	2.0	2.1	1.1	2.0	1.7	1.6	1.9
镁	4.3	3.3	3.2	1.9	3.9	2.1	2.8	2.8	2.0

单个元素的丰度变化反映了不同地质环境中地壳成分的明显的差别。例如，大洋壳的较大丰度的铁、钙和镁和大陆壳中丰度较大的钾、钠和硅，从化学上表现了“玄武岩质”大洋壳与“花岗岩质”大陆壳的差别。

上述的这种质量丰度只说了内情的一部分。元素的体积相对丰度却描绘了一种不同的画面。比其余七个主要元素中的任何一个都大的氧原子，占了地壳体积的94%左右。因此，我们是在一个氧原子的方阵上走来走去，在这个方阵中替代进了一些体积小得多其它元素。氧主要与硅和铝强烈地键合。

溶解在水中的主要元素的丰度在表1.3中表示出来。注意，氯、钠、硫和钙是海水与河流中五种最大丰度的溶解元素中的四个。它们在海水比河水中的浓度要高几个数量级。

平均起来，溶解盐占海水重量的3.5%。氯化钠占了这些盐类的77.8%，氯化镁占10.9%。镁、钾和钙的硫酸盐占了10.8%，溴化镁和碳酸钙占了其余0.5%。

表1.3 溶解在水中的主要元素的丰度（重量）〔据Turekian，1972〕

	海水 (mg/L)	河流 (mg/L)
氯	1.94×10^{7}	7800
钠	1.08×10^{7}	6300
镁	1.29×10^{6}	4100
硫	9.04×10^{5}	5600
钙	4.11×10^{5}	15000
钾	3.92×10^{5}	2300
溴	67300	20
碳（无机的）	28000	11500
氮	15000	没有可靠数据
锶	8100	70
氧	6000	没有可靠数据
硼	4450	10
硅	2900	6100
氟	1300	100
水：氢	1.10×10^{8}	1.10×10^{8}
氧	8.83×10^{8}	8.83×10^{8}

象在地壳岩石中一样，氧是水中丰度最大的元素。氧在水中的重量丰度几乎是岩石中的两倍。

硅在河水中的浓度比海水中的浓度更高。表1.2的数据来源〔Turekian，1972〕也表明了河水中铝、铁、锰、铬、钛、铜、锌和铅的浓度比海水中高，而在海水中镍、钴、金、汞和铀的浓度比河水中高。

典型情况下空气的成分用体积表示在表1.4中。根据重量百分比，氮和氧分别占75.5%和23.2%。有趣的是，我们呼吸的空气中比起水和岩石中只有少得多的氧。

表1.4 海平面上不含水的空气中的主要组分（体积%）〔据Turekian，1972〕

氮	78.08%
氧	20.95%
氩	0.93%
二氧化碳	0.03%
总　计	99.99%

岩石、水和空气的成分在空间上和时间上都发生变化。物质的三态彼此之间在化学上和物理上不断地相互作用。这些相互作用的结果是岩石的风化，它使岩石变软、碎屑物质易于被风、水和冰带走。

以化学风化为主的这种风化作用被称作分解作用。岩石遭受到如下的化学变化：新矿物形成，老矿物可能也被溶解移去，矿物的元素可能被移去或者发生变化。岩石可能通过以下途径被风化：①被碳酸之类的天然溶剂溶解；②硅酸盐矿物的水解；③水化并导致体积变化；④氧化作用。有机化合物也可能在分解中起作用。分解作用的诸过程往往彼此一起起作用，而且还同机械风化或碎屑化一起起作用。化学风化作用的产物包括矿物胶结物和海水、河水与地下水的一大部分溶解荷载物。长石通过化学风化作用向粘土矿物的转变是广泛出现的，这反映在沉积岩中粘土比长石有大得多的丰度。

1.5 矿 物 学

矿物是天然产出的无机结晶化合物。虽然在经济研究中也把煤和石油称作矿物，但根据这一定义，它们不是矿物。

矿物的物理特点取决于它们的成分和晶体结构。例如，结晶形态、矿物解理（在优势方向上破裂的趋势）、比重、硬度和弹性常数，都与成分及结构有关。

矿物成分分为如下各主要范畴：硅酸盐、氧化物、硫化物、碳酸盐、硫酸盐和磷酸盐。硅酸盐是地壳中遥遥领先的丰度最大的矿物。在表1.5中，方解石、文石和白云石是碳酸盐，磁铁矿和钛铁矿是氧化物，所有其它矿物名称都是硅酸盐。

注意，长石单独占了总量的一半还多一点。石英和长石共占了总量的63%。

硅酸盐的基本砌块是硅氧四面体，它们由四面体四角上的四个氧原子紧密围绕着硅原子组成。这种四面体又可以以单链、双链、席状、三维网格相连，或者完全不相连（表1.6）。因此，辉石与角闪石通常呈现柱状解理，云母呈板状解理，而橄榄石和石榴石则完全不表现矿物解理，这些现象就不足为奇了。

表1.6也表示了所列矿物的化学成分。应该注意，上面三排中的矿物（橄榄石、石榴石、

辉石和角闪石）是富含铁和镁的，而下部两列中的矿物除黑云母外都不含铁和镁。硅酸盐分为这样两个成分范围（低〔Fe+Mg〕和高〔Fe+Mg〕的)的划分，得到了相当广泛的应用。

表1.5 地壳中主要矿物的丰度〔据Ronov和Yaroshevskiy，1967〕

矿　物	丰　度（%）	
	实测①	标准分子②
石　英	12	14
钾长石	12	14
斜长石	39	49
云　母	5	—
角闪石	5	—
辉　石	11	20
橄榄石	3	—
粘土矿物和绿泥石	4.6	—
方解石与文石	1.5	—
白云石	0.5	—
磁铁矿与钛铁矿	1.5	3
其它矿物（石榴石、蓝晶石等）	4.9	—
	100.0	100

①实际矿物成分。

②用标准矿物分子表示的理论矿物成分。

表1.6 主要硅酸盐矿物的结构与成分

结构类型	矿物组	实例	成分
单个四面体	橄榄石	镁橄榄石	Mg_2SiO_4
		铁橄榄石	Fe_2SiO_4
	石榴石	铁铝榴石	$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$
		钙铁榴石	$Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$
单个四面体链	辉　石	普通辉石	$Ca(Mg, Fe, Al)[(Al,Si)O_3]_2$
		紫苏辉石	$(Fe, Mg)SiO_3$
双四面体链	角闪石	阳起石	$Ca(Mg, Fe)_3(SiO_3)_4$
		普通角闪石	$Ca_2(Mg,Fe, Al)_5[(Al,Si)_4O_{11}]_2(OH)_2$
四面体席	云　母	白云母	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$
		黑云母	$K(Mg,Fe)_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$
	粘　土	高岭石	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$
		蒙脱石	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2\cdot nH_2O$
三维四面体网格	长　石	正长石	$KAlSi_3O_8$
		斜长石	$NaAlSi_3O_8$
		钠长石	$CaAl_2Si_3O_8$
		钙长石	
	石　英		SiO_2

表1.7表示选择出来的一些矿物的几种物理性质和结晶学性质，其中有些矿物（即硅酸盐）也在表1.6中出现。这里使用了莫氏（Mohs）相对硬度计，它用刻划的难度作比较，

把金刚石作为最高（10），滑石最低（1）。表1.7中表示的数字数据表达了矿物的几种常用物理性质的范围和大小。就性质或矿物来看，这并不意味是一种综合参考表。更详细的情况将在本卷的其他地方出现。

表1.7　选择矿物的一些物理性质和结晶学性质及其成分

矿　物	比　重	硬　度	晶　系	解　理	成　分
硅酸盐					硅酸盐的成分在表1.6中
橄榄石					
镁橄榄石	3.2	6.5	斜　方	无	
铁橄榄石	4.14	6.5	斜　方	无	
石榴石					
铁铝榴石	4.25	7	等　轴	无	
钙铁榴石	3.75	7	等　轴	无	
辉石					
普通辉石	3.2～3.4	5～6	单　斜	两组（柱状）	
紫苏辉石	3.4～3.5	5～6	斜　方	两组（柱状）	
角闪石					
阳起石	3.0～3.2	5～6	单　斜	两组（柱状）	
普通角闪石	3.2	5～6	单　斜	两组（柱状）	
云母					
白云母	2.7～3.1	2～2.5	单　斜	一组（板状）	
黑云母	2.8～3.2	2.5～3	单　斜	一组（板状）	
粘土					
高岭石	2.6～2.65	2～2.5	单　斜	一组（板状）	
蒙脱石	2.5	1.5	单　斜	一组（板状）	
长石					
正长石	2.57	6	单　斜	两组解理	
钠长石	2.62	6	三　斜	三组解理	
钙长石	2.76	6	三　斜	两组解理	
石英	2.65	7	菱面体	无	
氧化物					
磁铁矿	5.18	6	等　轴	八面体假解理	Fe_3O_4
冰	0.92	1.5	六　方		H_2O
硫化物					
黄铁矿	5.02	6～6.5	等　轴	无	FeS_2
闪锌矿	3.9～4.1	3.5～4	等　轴	六组（十二面体）	ZnS
碳酸盐					
方解石	2.72	3	菱面体	三组（菱面体）	$CaCO_3$
白云石	2.85	3.5～4	菱面体	三组（菱面体）	$CaMg(CO_3)_2$
硫酸盐					
石膏	2.32	2	单　斜	三组解理	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
硬石膏	2.89～2.98	3～3.5	斜　方	三组（长方体状）	$CaSO_4$
磷酸盐					
磷灰石	3.15～3.20	5	六　方	一组（发育差）	$Ca_5(F,Cl,OH)(PO_4)_3$
其它					
岩盐	2.16	2.5	等　轴	三组（立方）	NaCl

表1.8表示三大岩类中矿物类的分布。火成岩是由熔融物质凝固形成的岩石。沉积岩是胶结了的碎屑物质或者沉淀物质。变质岩是岩石受到压力、温度或者二者兼而有之而造成的岩石，也就是说，变质作用是一种岩石到岩石的转变作用。

表1.8 主要岩石类型中的硅酸盐矿物及其丰度〔据Jackson，1973，表4.2〕

矿物类	×——表示在下列岩石中是大量的或常见的		
	火成岩	沉积岩	变质岩
橄榄石	×		
石榴石			×
辉石	×		
角闪石	×		×
云母	×		×
粘土		×	
长石	×		×
石英	×	×	×

1.6 岩石组构

《地质学术语》〔Gary et al.，1972〕将组构定义为"岩石的所有构造与结构的总和。这个术语把作用或习性（相关的物理性质）以及形态（构造与结构单元的排列）这些概念合并在一起……"。

组构数据被分为无向量和向量两类。无向量数据包括非方向性的属性，例如，粒度分布、颗粒形态和孔隙度。向量数据是依据方向性质得到的，例如，长形颗粒的定向、结晶轴和裂隙。变形作用、生长作用和沉积作用都可以导致定向组构〔Fairbairn，1949〕。

在现今的地质工作用，所谓组构分析通常指得是对向量数据的研究。无向量数据常常与岩石的矿物成分一起得出。在典型情况下，组构分析是为佐助阐明岩石的变形作用历史而进行的。

组构要素研究的大小范围是从晶格到山脉之类的大型地球构造，跨越了15个数量级〔Friedman，1969〕。在这两个极端之间，研究这样一些组构要素：微观尺度的标本、手标本、露头、地图和航空照片上的一块面积、卫星照片的一个区域。为了研究而选择的组构要素是行之有效的并且是推断与问题有关的一些要素。

弗里德曼〔Friedman，1969〕描述了组构分析的描述期与解释期的工作。在描述期中要鉴定组构要素、测量它们的性质，并用数字和图解把得到的数据组合在一起。解释期则致力于阐明变形历史，这可以由两种途径进行。所谓运动学分析是根据这样的假定：与组构有关的运动的对称性是由组构的对称性表现出来的；由于变形组构继承了岩石初始（例如，沉积的）组构的特点，所以运动学分析不会比关于初始组构特点的推断更好些。所谓动力学分析是关于变形机制与造成变形的应力的研究，这种方法是根据对矿物和岩石的实验研究和有关的理论研究。

对于划分不同类型的组构对称性已经建立了一些常规。特纳等〔Turner et al.，1963〕对于组构对称类提供了清晰的描述，这些类与晶体对称类相似，但却不等同。

组构分析遇到的困难是很大的。例如，在某些情况下，清理两期或两期以上的变形作用造成的组构可能是不现实的，甚至简直是不可能。只对于少数组构要素得知了其变形机制，

而且，也许在你所从事研究问题的区域中一个这样的要素也没有出现。此外，所进行的组构分析的尺度对所研究的变形作用并不适宜。

迄今，运动学分析比动力学分析用得更为广泛，尽管后者的应用范围正在不断扩大。组构分析已经扩大到来辅助预测在开凿项目和建筑项目中岩石将表现出的习性。

1.7 岩石的地质分类

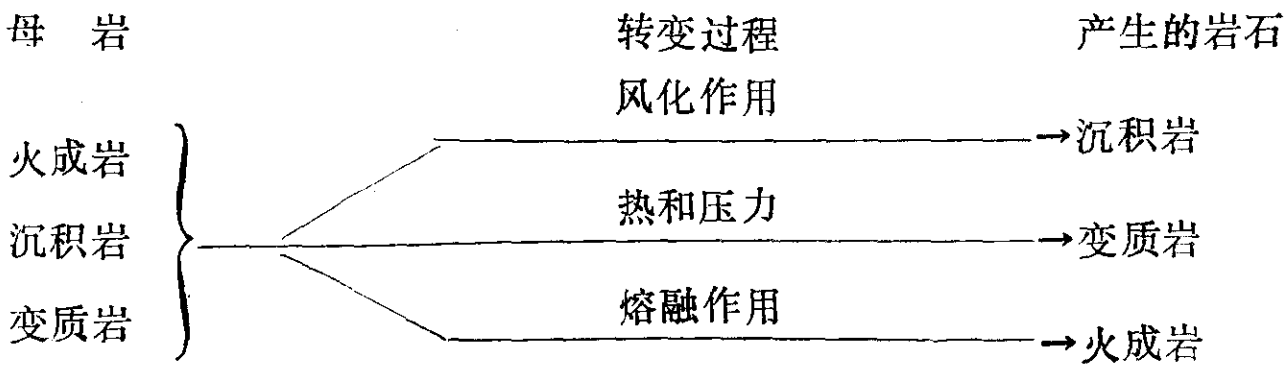
最广泛应用的岩石地质分类是第1.5节中伴随表1.8的行文所解释的火成岩、沉积岩和变质岩三大类岩石。每一大类都进一步划分成本节中后面所解释的一些类型。岩石的地质分类是根据若干成因因素和描述因素进行的。

在三大类岩石的每一大类的分类的两个主要标志是矿物成分与结构。已知矿物成分，人们便可以计算大致的化学成分，但反过来则不可靠。每一种矿物都趋向于在固定的物理与化学条件范围内形成，因此，矿物成分知识提供了关于岩石及其组分的演化历史的信息。在对手标本上主要矿物颗粒太细难以鉴定的岩石进行分类时，用其占优势的颜色来代替矿物名称，例如，绿色板岩、黑色页岩等等。

结构主要指岩石组分颗粒的粒度，它也指颗粒的形态和排列（注意不要将结构与包含内容更广的组构相混淆，见第1.6节）。结构具有成因意义，对于三大类 的每一类岩石尤其是这样。火成岩的最重要的结构是粒度，它趋向于与形成岩石的熔融物质的冷却速率成反变关系。因此，在地表以下凝固的岩石（侵入岩）要比在地表或其以上凝固的岩石（喷发岩）有更粗的颗粒。在由胶结过的碎屑组成的沉积岩（碎屑沉积岩）中，碎屑的粒度随使这些沉积物沉积的水和风的能量（速度）而变化。变质岩的粒度随岩石所受的温度和压力的增加而增大，因此，在有些情况下可以说粒度随变质作用强度而变化。有些变质岩表现出板状矿物的明显的平行排列（叶理），有时是由在非流体静压应力场中的重结晶作用引起的。

通常三大类岩石之间的关系可作如下表示：

岩石的成因关系



比较常见的一些火成岩的成分与结构分类在表1.9中表示出来。成分中最重要的变量是二氧化硅，它的范围从高二氧化硅的“花岗质”岩石到低二氧化硅的“玄武质”岩石。随着这种成分变化，往往出现颜色的变化，它向着低二氧化硅的一端逐渐变深。粗与细之间的基本结构差别通常把侵入岩与喷出岩分开。在粗粒岩石中矿物组分是可以区分的，在细粒岩石中则有可能难以区分。玻璃质岩石是由岩浆的淬冷造成的。

表1.10表示出比较常见的沉积岩的成分与结构分类。在碎屑沉积岩中，主要矿物组分和粒度被鉴定出来。在化学和生物沉积岩中，用最重要的组分来定断岩石。许多沉积岩属于表1.10所列三个范畴的一种以上的范围。例如，一种胶结很好的含化石灰岩，可以归属于全部三个类，因为它含有贝壳碎屑并受到化学胶结。

表1.9 火成岩的分类

成分 / 结构						
浅色 ——→深色						
高二氧化硅 ——→低二氧化硅						
	正长石＞斜长石		斜长石＞正长石		很少或没有长石	
	很少云母、辉石、角闪石		辉石＋角闪石＜35%	辉石＋角闪石＞35%	许多辉石、角闪石和橄榄石	
	25～10%的石英	很少或没有石英	很少或没有石英	10%橄榄石没有石英	没有石英	
粗粒的	花岗岩	正长岩	闪长岩	辉长岩	橄榄岩	纯橄榄岩
细粒的	流纹岩	粗面岩	安山岩	玄武岩		
玻璃质的	浮岩（多泡状）		黑曜岩		火山渣（多泡状）	

注：如果至少有两种不同粒度出现，将修饰语斑状的或名词斑岩加在岩石名称上，例如：斑状花岗岩或者花岗斑岩。

表1.10 沉积岩的分类

1.碎屑沉积岩

结构	粒度	岩类	各种实例	成分
粗的	＞2mm	角砾岩		任何岩类的棱角状碎屑
		砾岩		任何岩类的磨圆碎屑
中粒的	2至1/16mm	砂岩	石英砂岩	主要是石英
			长石砂岩	石英和明显数量的长石常呈粉色
			铁质砂岩	铁的氧化物作胶结
			杂砂岩	粘土、石英、岩屑、常呈暗色
细的	1/16至1/256mm	粉砂岩		主要是石英，含有粘土
			钙质粉砂岩	有些方解石
			铁质粉砂岩	有些铁的氧化物
很细的	＜1/256mm	页岩		粘土和石英，板片岩
			钙质页岩	含些方解石
			黑色页岩	含些煤质物和硫化铁
		粘土岩		与页岩相同，往往含钙质

2.化学沉积岩

岩类	各种实例	成分
石灰岩	鲕状灰岩	针头大小的钙质球粒
	结晶灰岩	中到粗粒的方解石
	白垩	显微方解石介壳、粘土
白云岩	白云质灰岩	白云石、方解石
燧石		浅色细粒的二氧化硅
火石燧石（flint）		深色的细粒二氧化硅
蒸发岩	岩盐	石盐
	石膏岩	石膏

3.生物沉积岩

岩　　类	各　种　实　例	成　　分
煤①	褐　煤	植物物质、褐色、黑色
	沥青质的	压实的致密植物质，黑色
石 灰 岩	贝壳灰岩	松散胶结的化石碎屑

①无烟煤见表1.11。

表1.11　变质岩的分类

	结　　构	岩　　类	各　种　实　例	说　　明
有叶理的	很　　细	板岩	灰色板岩	最常见
			黑色板岩	有些石墨
			红色板岩	有些赤铁矿
			绿色板岩	有些绿泥石
	细	千 枚 岩	（类似板岩）	表面丝绢状
	中到粗粒	片岩	云母片岩	白云母、黑云母、石英
			普通角闪石片岩	
			绿泥石片岩	
			石榴石片岩	
	粗到很粗；条带状	片 麻 岩	石英-长石-黑云母片麻岩	矿物成分类似花岗岩
			云母片麻岩	
			普通角闪石片麻岩	
			石榴石片麻岩	
块　状　的 （无叶理的）		大 理 岩	方解石质大理岩	
			白云石质大理岩	
		石 英 岩	石英岩状砂岩	石英含量高，破裂穿过颗粒
			石英岩状砾岩	
		煤	无烟煤	致密，黑色，碳质

比较常见的变质岩的成分与结构分类在表1.11中表示出来。有叶理的变质岩是依据主要矿物和粒度划分的。块状（无叶理）的岩石则依据主要矿物组分分类。

地质学家使用了比表1.9～1.11中多得多的岩石名称。这些表只想介绍这些分类体系，并不想作为完备的参考。这些表中的一些岩石名称的用法与技术上的用法十分不同，例如建筑业的一些人把致密石灰岩之类的任何一种坚硬岩石都叫作“花岗岩”。

克里宁等〔Krynine et al.，1957〕提出了一个很有用的三大类岩石野外鉴定表。这张表不需要用放大镜检查手标本，但他们指出这些标本必须是未风化的。

最后，表1.12中提供了地壳中岩石类型丰度的数据。通常在火成岩和变质岩之上的薄席中沉积岩分布最广泛。可以预料，浅的井眼可能遇到比表1.12中更高比例的沉积岩。

表1.12 地壳中主要岩类的丰度〔取之Ronov和Yaroshevskiy，1967〕

岩　　类	地壳的体积%	地壳的质量%
砂（砂岩）	1.7	1.5
粘土和页岩	4.2	3.8
碳酸盐和蒸发岩	2.0	1.8
花岗岩	10.4	10.3
花岗闪长岩、闪长岩	11.2	10.9
正长岩、霞石正长岩	0.4	0.4
玄武岩、辉长岩、角闪岩、榴辉岩	42.5	44.5
橄榄岩、纯橄榄岩	0.2	0.2
片麻岩	21.4	20.9
片　岩	5.1	4.9
大理岩	0.9	0.9
	100.0	100.0

1.8 岩石的工程分类

岩石的工程分类是面向岩石和岩石中空间的潜在工程应用的。地质分类和制图大都用工程分类中的内插的属性数据来提高其可靠性。工程分类可以用于岩石材料或者岩体，或者二者兼而用之。日常测量的岩石材料性质，通常是在实验室内测定的，被称为指标性质，例如非围限压缩强度、渗透率和比重。在原地测量的岩体性质可以与实验室中测量的岩石材料性质有同样的名称，但这并不意味着两者是等价的。数据的汇集和分类标志的应用必须考虑得到每个数据点的方法。

根据使用者的需要，分类可以根据一种标志，也可以根据几种标志综合考虑。下面有一些岩石的工程分类的实例。选择这些实例，与其说是为了描述各种变体，不如说是为了得到综合的理解。

表1.13提供了一个依据输送流体的能力（渗透率）做出的含水岩石（含水层）的分类。渗透率可以在实验室中测量（对岩石材料），也可以在野外测量（对于岩体）。两种测量都可能受到断裂和沿层理的裂理的影响。

表1.13 含水层的分类〔据Chow，1964，图13.8〕

	渗透率（D）
好的含水层	$10^{6}\sim10$
差的含水层	$10\sim10^{-4}$
不透水层	$10^{-4}\sim\infty$

注：$1D=0.987\times10^{-8}cm^{2}$　对于20°C时的水，$1D=0.966\times10^{-3}cm\cdot s^{-1}$

科提斯〔Coates，1964〕列举了一系列用于对地球物质的喷气冲击效应研究的变形模式。表1.14中表示的这种分类是根据破坏前的变形特点提出的。

迪尔等〔Deere et al.，1966〕根据单轴压缩强度和弹性模量相结合的原则，对于原状岩石（岩石材料）提出了一种定量的工程分类。他们也提供了表达某些指标性质与强度及弹性模量之间关系的数据。

表1.14 破坏前的变形特点〔据Coates，1964〕

模　　式	特　　点
（1）线弹性	直线的、可逆的应力-应变线
（2）曲线弹性	曲线的、可逆的应力-应变曲线
（3）双线弹性	由两条相连的直线组成的可逆的应力-应变曲线
（4）弹塑性	由连接在一条水平线上的倾斜直线段组成的应力-应变曲线
（5）塑弹性	由与一条斜的直线段相连的起始水平线段组成的应力-应变曲线
（6）粘弹性	变形作用随应力水平和作用时间而变化，并可完全复原
（7）粘塑性	变形作用随应力水平和作用时间而变化，不能完全复原
（8）闭锁介质	应力-应变曲线由一条起始水平线与一条垂线相连组成

科提斯〔1964〕曾提出了一个更为综合的分类。他鉴定了五种类型的岩石特征，这些特征是可以测定的，而且对于开矿与建筑都是重要的。其中，三种特征用于岩石材料，两种用于岩体。这五种特征中的每一种都作为包括二或三种类型的分类格架。这种分类在表1.15中表示出来。

表1.15 岩石的工程分类〔据Coates，1964，作了修改〕

岩石材料	单轴压缩应变	弱的〔<5000磅/英寸²(34×10⁶Pa) 强的〔5000～25000磅/英寸²（34～172×10⁶Pa） 很强的〔>25000磅/英寸²（172×10⁶Pa）
	破坏前变形	弹性的 粘性的（在50%单轴抗压强度时，应变速率>2（10）⁻⁶/h）
	破坏特点	脆性的 塑性的（在破坏之前有25%的总应变是永久的）
岩　体	宏观均匀性	块状的 层状的（所有的成层性，如层理和叶理，产生平行的弱表面）
	岩石材料在岩体中的连续性	坚固的〔节理间隔>6英尺（2m）〕 块状的〔节理间隔3英寸～6英尺（0.1～2m）〕 破碎的〔碎屑<3英寸（0.1m）〕

对于隧道、岩坡、喷气冲击、钻井以及开凿等特殊工作已经发展了特殊的分类。古德曼〔Goodman，1976，表2-10〕收集了关于岩石工程分类的参考文献并做了有益的讨论和图示。Roberts（1977）也讨论了分类图式和岩石材料与岩体的性质实验。

在某些岩体的习性中间断面是那么重要，以致对间断面本身也作出了分类〔Obert et al.，1967；Goodman，1976〕，这些分类又与其他分类相结合来表达岩体的特征〔Bieniawski，1974；Barton et al.，1974〕。对节理之类的间断面分类的标志包括：空间，主要方向（方向组）的数目，粗糙度，节理的填充情况和围岩蚀变性质。断层泥（细的磨碎物质）的厚度和成分以及破裂面之间的蚀变产物都大大地影响岩体后来的习性。

在结束本节之前，对于作为碎石和块石等建筑材料的岩石必须加以阐述。这里对物理性质的详细说明和所用的分类与前面所讨论的情况略有不同。就碎石而言，重要的特点是对磨碎、冲击和风化的阻抗力、比重、粒度分布，在某些情况下还有强度。一项开凿计划所涉及

的体系可以包括开凿岩石的特点，以及产生碎石这两者的特点。

1.9 与其它材料的比较

岩石与诸如水泥、陶瓷、玻璃、金属、木材之类的其它材料的详细比较和综合分析需要有涉及多种学科的处理方法。

把岩石与其余材料区分开来的特点是它们的不均一性和各向异性的程度、粒度范围和必须考虑的时间区间，严酷的事实是，通常我们在挑选材料性质时只有相当小的选择余地。

组成岩石的砌块（矿物）与构成大多数其他材料的砌块之间有相当大的差别。其它材料都很少或者没有与岩体中层理之类间断面相对应的固有构造，也许木材中的纹理和纹层状或复合合成材料中的层状边界是例外情况。在本书的后几章中读者会更深刻地感到这方面的影响。

1.10 小　　结

不均一性和各向异性代表了岩石材料和岩体的特性。岩石材料的强度越大，则间断面在测定岩体特性中越是重要。为数相对较少的元素构成了地壳的大部分体积，而为数不多的矿物又构成了大多数的岩石。成分与结晶构造决定了矿物的性质。矿物成分和组构又进而影响岩石的性质。

岩石组构可用来辅助澄清岩石的变形历史。组构分析主要用来鉴定与变形组构有关的运动的对称性，不过组构分析对阐明与变形有关的应力场特点的应用，也在与日俱增。

岩石的地质分类，一部分是成因的，一部分是描述的；岩石的工程分类则面向于岩石及其空间的应用。然而，地质图象在工程中是重要的，因为要内插属性数据就必须有地质依据。岩石的工程分类因为其应用方面的不同而多种多样。

本章中提出的许多观点在本书的其它章节还会加以发展

第二章　参数的考虑

G. R. 奥尔豪夫特

2.1 引　　言

岩石与矿物的物理性质是各种各样的参数和外部影响的函数。本章是对在物理性质研究中所必须关注的范围广阔的参数的一般介绍。参数可以在一般意义上引入，而特殊情况的实例则作为更重要的考虑来描述。许多参数在其他章中定义和讨论，因而在本章中只作列举。这里对在参数考虑时所引起的物理性质研究中的问题给出一个大概的轮廓，至于它们应用于每种物理性质时的解释则在单另的章节中给出。重要的一些参数可以分作五类：取样的、地球化学的、结构的、环境的和测量方面的考虑。在此五类之内则是对实验控制条件之内和之外的一些考虑。本章着重强调在实验控制条件之下的那些参数。

2.2 取样方面的考虑

在物理性质研究中，最困难的任务是对于特殊地质环境、区域、矿床、或其它特定区域特点有代表意义的适宜样品的选择。通常，为了确定各种取样偏差的影响，必须完成相当面积的制图和有关工作。一块单独的样品往往是不适宜的，常常必须使用许多满足需要的样品。对于采样的考虑有如下几点：

（1）样品选择偏畸　样品选择过程的各种偏畸和在一个位置上样品的选择分布包括：线状取样、面状取样和体积取样（一维、二维和三维），水平的或垂直的、以及取样的频率（每米、每平方米或每立方米一个或两个），等等。

（2）样品统计　从理论上说，要得到或合成单个矿物的一个完善样品是可能的，但在岩石类型中却没有对应关系，例如完善的“橄榄石”单晶对应一个完善的“玄武岩”。为了适当地研究一种岩石类型的物理性质，必须完成许多测量，而且必须进行总体统计，以描述这种岩石类型的性质。统计上的可变形称作“地质噪声”，它的范围可以从百分之十到几个数量级。例如，电阻的统计可变性在所有玄武岩平均值周围可大出三倍。另外，在自然界内完美的矿物很少遇到。因此，当一种完美的矿物理论上可以在实验室内合成与测量时，那么在天然标本上完成测量以确定该矿物的天然可变性是重要的。不适当地取样和选择样品的偏畸也可能影响样品的统计。

（3）取样步骤　这是由样品的原始位置得到样品（手工取样、泥浆取心、空气取心及爆破等）并小心地保持样品原来状态（无包装、用蜂蜡密封、装瓶、热封在塑料中及其他方法）的过程。这种过程也包括有关样品原始状态的附加资料的获得与保存，例如样品的三维方位，取心样品的深度、取心类型、所用的钻探泥浆等等）。

（4）样品处理与制备　从标本被获得的时间起，对样品所做的各种事情的整个历史，不只限于样品的保存，还包括清洗步骤、制备过程（切割、制心、磨制等），以及测量技术

和环境的影响（加热、加应力、置入磁场等）。

（5）样品尺度　系指相对于原始产地诸重要特点的标本大小与形状，以及测量过程的相对尺度影响。

在第一章中已经讨论了许多取样方面的考虑。在物理性质研究中由于取样考虑而遇到的问题的类型包括：

1）各向异性。由于小尺度孔隙度或矿物晶体构造引起的微观各向异性相对于区域应力场或大尺度节理、断层和裂隙引起的宏观各向异向的相对重要性。

2）粘土含量。应用泥浆取心获得样品可能加大样品的粘土含量，而使样品失去湿气的不适当加热，可能会改变粘土的矿物成分和含量。

3）湿气含量。取心过程或实验室内的湿锯割可能将样品湿气含量加大，而不适当的保存可能会因蒸发而逸入大气，使湿气失去。在某些材料中，例如粘土和煤，一旦湿气被除去，其样品便有可能被明显地改变，而予以取代。

4）温度。永久冻土、海冰和其他物质，如果允许融化，不必恢复原来的性质而再度冰冻；这也同样适用于已经凝固的岩浆物质的重熔。热膨胀可能造成产生出新裂纹和孔隙构造的应力，而退火可能破坏老的裂纹和裂隙。

5）压力。由一产地或区域应力场取除一块样品可以不可逆地改变内部应力、孔隙构造和其它性质。

6）制备。取心和磨制过程可以诱发局部加热或局部应力，这可能改变样品的矿物成分，使表面化学反应能力变得灵敏，或者改变孔隙构造。

这些实例和下面的其它参数考虑实例并不意味着是综合理解，而只是意味着是物理性质研究中所遇到的问题类型的说明。其它章次将评论这些问题和解释的更详细的情况。

2.3　地球化学方面的考虑

对于许多物理性质来说，样品的地球化学状态和地球化学环境是重要的。样品应该保持或者回复到与它原始存在环境相同的地球化学状态。地球化学方面的考虑包括：

（1）平衡　样品相对于获得它的环境的平衡状态。样品不需要与其原始环境处于平衡，甚至整个样品体积内也不需要一致地处于同样的平衡状态。在样品内，从某种原先的环境到后来的环境或者现在的环境，平衡可以在不同的地点逐渐转变。

（2）岩石学—矿物学　见第一章。

（3）挥发分的储存　高度活动的化学成分的状态与含量可能是重要的。挥发分指的是在室温下呈液态或气态的那些物质。挥发分的状态指的是物理或化学吸附作用、化学键、固态、液态、气态等等。

1）最常考虑的问题包括水蒸汽、氧、硫、二氧化碳和其他类似物质的化学逸度、分压和活度（见第九、十和十一章）。

2）水的状态与含量以及对水的其他有关考虑是重要的。例如：

a．水化学（pH、Eh、pX，盐度等）；

b．水—岩石相互作用（腐蚀、钝性、水化、蚀变等）（见第九章）；

c．吸附与膨胀（见第四章）；

d．离子交换容量（见第九章）；

e. 疏水的与亲水的（见第九章）。

由于地球化学考虑导致的物理性质的常见问题的实例包括：

1）平衡。许多岩石与其现存环境并不平衡。最好的实例是部分风化的岩石与土壤，它们力求在一个新环境内再度平衡，但是还含有一部分是与老的环境处于平衡的。同一问题的另一组成部分是化学平衡对物理平衡的问题。一个样品可能是物理上达到了平衡，即在整个样品内的温度是一致的，但这与在该温度下持续的时间长度有关，而整个样品中的不同矿物可能在化学上处于平衡，也可能不处于平衡（见环境考虑一节）。

2）岩石学—矿物学。这个问题已在第一章中讨论过了。例如，两个标本可能有相同的化学成分，但是，如果一块样品含有细的浸染赤铁矿，另一块含有不相连的树枝状赤铁矿，其电性和化学性质可能是很不同的。

3）挥发分。岩浆物质的多数物理性质对于挥发分是特别灵敏的，而其它物质则只对选择挥发分的特殊方面是灵敏的。密度和其它物理性质对于岩浆中的挥发分含量是很灵敏的，而与挥发分的类型无关。地震波速与水的pH及Eh无关，但电学性质对于pH和Eh的变化可能是很敏感的。

这些地球化学考虑中最重要的一些方面在第一、三、四、九、十和十一章中做出进一步的讨论。

2.4 结构方面的考虑

结构考虑涉及那些表达岩石几何构造特点和矿物构成岩石的方式的那些参数，包括了描述孔隙和颗粒的参数。因为在第三、四章还要详细阐述这类考虑的定义并进行讨论，这里只是简单的列举一下。结构考虑包括：

（1）颗粒参数（见第三章）

a. 颗粒密度（比重）。

b. 粒度分布。

c. 粒形分布。

d. 颗粒连接情况。

e. 晶体构造。

f. 组构（包括结构）。

g. 干的总体密度。

h. 湿的总体密度（水饱和总体密度）。

（2）孔隙度和渗透率（见第四章）。

a. 流体可进入的孔隙度。

b. 闭塞孔隙度。

c. 总孔隙度。

d. 毛细压力。

e. 孔隙大小分布。

f. 孔隙形态分布。

g. 孔隙连通性（包括曲折的）。

h. 比表面面积。

（3）各向同性—各向异性（见第一章）

a．矿物组构。

b．层理。

c．定向的裂纹和裂隙。

（4）均一性—非均一性（见第一章）

上述的这些参数中有许多在别的章内作为物理性质列出。但是，其他物理性质都取决于这些结构参数，例如，介电电容率取决于总体密度，或者电阻取决于湿岩石的孔隙度。

当结构考虑取决于其它考虑时，问题便更为复杂，例如，孔隙度取决于压力，或者各向异性取决于尺度。因此，经过周密的结构考虑的物理性质通常也都与其它考虑相联系。这些问题将在其它章内进一步讨论。

2.5 环境方面的考虑

以前提到过的环境方面的考虑包括：

（1）温度

（2）压力（或应力）

1）方向。包括：a．流体静压（所有方向上相等地施压）；b．单轴的（只沿一个轴施压）；c．围压（在一个圆柱状样品上辐射状向内施压）。

2）类型。包括：a．孔隙压力（由孔隙流体造成）；b．有效压力；c．总体压力（孔隙压与有效压力之和）。

3）差异压力（梯度）。

4）残余压力（闭锁应力）。

（3）时间

环境考虑的影响是与地球化学考虑紧密联系的。通常，环境考虑都包括平衡问题。但是有时环境考虑是重要的，因为它们直接影响物理性质。两种类型的实例都包括：

1）物理对化学平衡。在一个给定的岩石内，不同的矿物要求不同的达到平衡的时间，它们可能只在很窄的温度和压力范围内达到平衡（在不同的矿物之间不一定重叠）。另外，对于一定的环境变化，物理平衡可能要求与化学平衡不同的时间尺度。因此，一种矿物可能在几小时之内达到热平衡，而对于缺陷构造的平衡则需要几千小时。

2）在可以达到物理平衡而不能达到化学平衡的短的时间尺度上，不同的物理性质可以对小的温度和压力变化有十分不同的响应。因此，在干岩石中电性强烈地取决于温度而对压力并不敏感，而在湿岩石中，情况则恰恰相反。对于弹性来说，不论岩石是湿的还是干的，通常压力都比温度重要。

3）附加的考虑包括与引起岩石的热或应力裂隙的变化的温度与压力伴生的问题。因此，当温度通过线性膨胀系数和体积膨胀系数改变颗粒与空洞空间时，温度的变化（和变化速率）也可以在样品内造成新的颗粒和空洞构造。反之，热退火过程可能破坏老的孔隙构造。

4）温度和压力也影响标本内的相转变。标本的矿物成分可以变化，挥发分的状态和含量也会变化。这类变化中，许多可能是不可逆的或者在自然界中从物理上不可能实现。在那些情况下，应该首要考虑的是样品在正常情况下可能占有的那些环境。

2.6 测量方面的考虑

测量考虑包括影响物理性质的参数，因为在测量过程中，测量仪有时可对样品做一些事情。测量考虑包括：

1）线性或非线性激发与响应：

a. 激发的幅度；

b. 时间或频率域激发或响应；

c. 激发的频率或周期和波形；

2）测量体系和样品座偏畸。

3）存取用于测量的样品所需要的特殊制约条件。

这些考虑中多数都在单另的章次中进行详细的讨论。如果体系是线性的，则幅度、频率或时间域等的选择是不重要的，因为进行的测量是前前后后可以转变的。不论是线性的还是非线性的，进行测量时的频率或周期（或速率）的选择可能是重要的。有些电性、应力-应变测定、强度实验和磁性测量是非线性的或不可逆的。在这些情况下，激发幅度和频率或时间域选择也成为重要的。非线性的讨论在第五、六、七、八、九和十章中进行。

对坯料和标准样品进行干流程测量时，测量和样品座偏移应该考虑予以适当的补偿。对于实验仪器通常不是这样的结构，以致使设备在结束测量时，其自身的特性与样品性质无关。在电性测量中，特别是电阻的可能范围是28个数量级，但现有仪器还没有一种能测量10个以上的数量级。因此，这种设备必须仔细地搞清其特点，以致使实验者认识到这些数字是无意义的，或者不再与样品性质有联系。这些考虑将在其他章中进一步讨论。除了仪器之外，最困难的偏畸是由测量仪器与样品间的界面引起的。这要求仔细地检查样品座的特性，这种样品座正处于界面位置。

特殊的制约条件是那些与特定的物理性质有关的测量，它们也将在其它章中讨论。这些当中有一些分辨上的要求是冲突的，例如，对于介电测量需要薄碟状标本，而对于电阻或地震波速的测量则需要长的圆柱状标本。其它的限制条件是这样考虑的：象有限大小的压力容器的有效性或者最大强度的磁场，或者类似的考虑。

2.7 小　结

所有的物理性质测量都受到上面介绍的一种或多种参数方面考虑的影响。实验室中测量的每一种物理性质都受到取样方面考虑的影响，但是其它方面的考虑并不同样适用。电性几乎对于列举的所有考虑都敏感，而磁性只对少得多的参数方面考虑有敏感的响应。在后面的每一章中，当提到和讨论物理性质时，更详细地发展了参数方面考虑。

一般地说，为了观察这些参数方面考虑对给定的物理性质的影响，这种物理性质的测量是在一个参数受到扰乱而其它参数保持不变时完成的。遗憾的是，对于实验者来说，要控制与扰乱所有的参数是不可能的。因此，关于经过参数方面考虑的物理性质的特性的许多信息，是通过对大量样品的测量的统计而费力地得到的。由于大量的参数方面考虑和不可能发现一个参数变化而其余的保持不变的样品组，所以需要多变量统计。遗憾的是，多数物理性质在统计数据库中有很大的间隙，而且物理性质对许多参数的依赖性要么是还不了解要么是还模糊不清。在每一章中，这些领域中有一些被鉴为对将来的研究有指望的领域。

第三章 密 度

W. R. 贾德和A. 莎柯尔

3.0 术 语 表

A	原子量	p	孔隙度
F	长英-镁铁指数	r	相关系数
g	比重	V_p	纵波或P波速度
N	用于统计分析数据的样品数目	v	矿物的体积
n	岩石中矿物种数	Z	原子序数
希腊符号			
Δ	标记增量的数学符号	ρ	矿物的颗粒密度
Σ	标记求和的数学符号	σ	标准偏差

3.1 引 言

密度是岩石的一种固有性质，表示岩石的质量与单位体积的关系。用它来作为标志性特征或者预测岩石其他性质的独立变量是困难的，因为密度值可以受温度、压力以及流体饱和量与饱和类型的影响。另外，正如下文所要讨论的，矿物成分的变化和测定方法的改变，对于看来类似的岩石的密度也会有显著的影响。

3.2 术语的定义

下面的关于密度和比重的定义引自美国测试与材料标准协会（非12-70）；在所有的这类测定中，所用的材料与水的温度都必须是特定的。

真密度：指固态物质的单位体积的质量，其中只考虑不渗透部分的体积。它可以简单地表示为：（质量）÷（体积-孔隙）。

真比重：单位体积物质的质量与同体积的不含气体的蒸馏水的质量的比值。对于固态物质，所用的体积是不渗透部分的体积。

视密度：单位体积岩石的不渗透部分在空气中的重量。

视比重：单位体积物质在空气中的重量与同体积的不含气体的蒸馏水在空气中的重要之比，即：（空气中的干重）÷（空气中干重－浸在水中的重量）。

体密度：单位体积可渗透物质在空气中的重量，这种物质包括了正常情况下的可渗透的与不渗透的孔隙。它可以表示为：（重量）÷（包括全部孔隙在内的体积），或者，（重量）÷（包括水在内的单位体积）。体密度常常被看作是视密度的同义词（美国测试与材料标准协会ASTM，标准B243-65及E12-70）。

体比重：单位体积的可渗透物质（包括所有孔隙）在空气中的重量与同体积等密度不含气体的水在空气中的重量之比。即：（空气中的干重）÷（饱和重量—浸在水中的重量）。

粒密度：单位体积颗粒的质量，即：（颗粒的质量）÷（颗粒的体积）。它由下式计算：

$$\rho_g = \sum_{i=1}^{i=n} \rho_i v_i \qquad (3.1)$$

式中 n——岩石中矿物的种数；

ρ_i——种矿物的颗粒；

v_i——各矿物的体积。

测定粒密度时必须将常见的孔隙与开放裂隙对岩石单元或碎片的影响减小到最低程度（Young，1976〕。

在分析公开发表的密度数据时，一个令人感到为难的问题是某些作者未能说明他们的测定结果是"真密度"、"视密度"还是"体密度"。同样，如果作者不说明测量单位，则必须假定该数据代表比重。例如，如果给出的值是2.55g/cm³，很清楚这个值是密度，但如果只是2.55，则此值很可能是指比重。在分析文献中成千上万的数据时，采用了前面的这种假设〔Judd，1971〕。

3.3 实验室方法

为了避免在本文中过多地讲述有关测定密度的实验室方法中一些易行施的详细步骤，我们向读者介绍以下几种出版物：

国际岩石力学学会推荐的方法〔国际岩石力学学会，1972〕：

a. 使用饱和度与测径技术的孔隙度/密度测定法；

b. 饱和度与浮力技术；

c. 汞替换与粒比重技术；

d. 汞替换与玻意耳定律技术。

美国测试与材料标准学会

a. 天然建筑石料的吸收性与体比重（C-97）；

b. 与固体、液体和气体密度比重有关术语的标准定义（E12-70）。

粒密度也可用比重计和浮力法测定。这些方法的详细描述见国家标准局487号通报〔Hidnert et al.，1950〕和〔Lama et al.，1978〕。在比重计方法中，可以使用水，但最好还是使用具有高度润湿能力的液体。这有助于排出空气并防止水溶性矿物的溶解，也有助于防止岩石中可能出现的惰性化学组分的溶解。这类液体有苯、四氯化碳、乙醚和甲苯。样品在玛瑙研钵中研磨到能通过0.22mm网目的筛子为止。样品可在105°C温度下烘干并可在干燥器或真空中冷却，以排出空气和外来的湿气。浮力法与比重法有些相似，但更为精确（达±1kg/m³），并更为费时费力。孔隙度＜3%的岩石最好采用这种方法〔Lama et al.，1978〕。

正如上述方法所规定的那样，实验室测定对象为固体标本（岩块）或粉末标本。虽然可以把结果算到小数三位或更多位数，但当测定对象是岩块时，其精度是值得怀疑的；标本之

间的微裂隙和孔隙差别非常大，因此，多位小数的计数所表示的只是数学的演算，而不是密度与比重的精确值。

3.4 野外方法

岩系或岩体（原地）的密度可以用伽马-伽马录井技术，或者通过测定速度或重力来评价。伽马-伽马录井法取决于探头发出的伽马射线对井壁的穿透能力。该测试系统由伽马放射源和一至两个伽马射线探测器组成。老式系统以钴60（^{60}Co）为伽马源；新式系统则使用铯源。放射源发射的伽马射线辐射入岩石，然后，与岩石中的电子碰撞而发生散射与偏转（康普顿散射）。返回探测器的伽马射线数目受产生散射物质的电子密度ρ_e的控制。电子密度是每单位体积物质中的电子数，它可以由下列各方程式得出〔Schlumberger，1972〕：

由单元素组成的物质：

$$\rho_e=\rho_b\left[\frac{2z}{A}\right] \tag{3.2}$$

式中 ρ_b——有效体积密度；

Z——原子数；

A——原子量。

由分子组成的物质：

$$\rho_e=\rho_b\left[\frac{2\Sigma Z,\ s}{\text{mol. wt.}}\right] \tag{3.3}$$

式中 ΣZ，s——构成分子的原子数目的总和；

mol. wt——分子量。

对于多数地层物质来说，上述方程中的括号里的量值都接近于1；经适当校准，测井系统便能够与物质的体密度联系起来。在此方法中放射源-探测器的距离是极为重要的。距离小，则物质密度的增大，导致在探测器上收到更多的散射伽马射线；距离大，则情况恰恰相反。根据经验，射线源至探测器的距离以8cm为最佳。这种方法适用于高孔隙度的粒密度不均匀的物质。

Belkin等〔1975〕报导了一项精度达0.005g/cm³的测定，在此测定中，井壁上粘土或泥壳覆盖层厚度不超过13～15mm。这种方法的缺点是伽马射线穿透浅。大概只是厘米级的；它也不能用于下了钢套管的井眼。这种方法的主要优点是所得的结果似乎与裂隙空隙、裂隙充填物、孔隙度以及渗透率有某种相关关系〔Schalkwyk，1976〕。

利用经验方程，密度值可通过测量纵波或P波（V_p）的传播速度计算出来，这种震波由锤击钢板或爆炸之类的能源发出。对于致密、细粒的岩石，这种方法可以获得中等成效，但对粗粒物质，由于得到的结果分散得太宽而难以应用。另外，野外测量结果的精度取决于实验室多次测量所建立的相关方程。克里斯坦森等〔Christensen et al，1975〕所描写的研究工作根据下列方程提供了数据的线性拟合：

$$\text{密度}=\frac{V_p+4.26}{3.56} \tag{3.4}$$

这个关系式是根据在0.5kbar下对取自大洋壳细粒多孔状微蚀变玄武岩的饱和水的岩心所做

的试验建立起来的。但是，在这些研究中发现，富含方解石的粗粒玄武岩得出了不适于此方程的异常速度。

精密的井眼重力测量的最新进展为原地岩石的体密度（ρ_b）提供了一种精确测量方法。后者可以表示为$\rho_b=\rho_f^p+\rho_m^{(1-p)}$，这里$\rho_f$是岩石孔隙中任何液体的原地密度，$\rho_m$是矿物的粒密度，p是用分数表示的孔隙度。使用这种方法可把实验室测定中产生的误差消除掉或减到最小，这种误差是由样品扰动（钻进污损、岩心膨胀、孔隙流体的变化、大气的影响）引起的。用于密度测定时，重力仪的理想精度是±0.01mGal数量级的，再现性为±0.01～0.02mGal。但是，具有±0.01mGal的井下重力仪，在50m的深度间隔上可以产生与实验室测定相等的结果，其精度约为0.007～0.013g/cm³〔McCulloh，1966〕。用重力仪测定的密度能够用下列方程计算：

$$\rho=3.686-\frac{\Delta g}{0.02552t} \tag{3.5}$$

式中 Δg——被测间隔的顶底之间的重力变化；

t——间隔的厚度。

当应用这一方程时，需要做某些校正，但潮汐影响是通常应用的唯一校正。当测量间隔大时，可获得最佳精度，例如，如果需要精度达到0.02g/cm³则才必须是15～20ft。

原子能委员会也使用这种方法来估计地下核爆炸所引起的密度变化。一般地说，井眼重力计的测定结果似乎比伽马-伽马法更精确。例如在一系列的比较实验中，重力计精度达到2%，而伽马-伽马测井的精度是5%〔Hearst et al.，1976〕另外，重力计测量能够提供半径几百米内的密度值，而与之成明显对照的伽马-伽马研究方法却只有20厘米的半径。

密度的精确的野外测量方法，对于精确解释用来测定地壳的各种其他性质（如杨氏弹性模量）的地球物理技术得到的结果是必要的。这类地球物理研究中已经应用的密度值变化的一种设想，在表3.1中表示出来。

表3.1 地壳密度值

产地	范围（g/cm³）①	资料来源
洋底岩石		〔Hyndman et al.，1976〕
101玄武岩（体密度）	2.46～2.95	
10辉长岩	2.96±0.07	
陆壳与洋壳	2.84	〔Worzel et al.，1975〕
地壳岩石（平均值）	2.8	〔Jacobs et al.，1959〕
双层地壳模式	2.65，2.87	〔Bullen，1975〕
	2.70，2.9	〔Woollard 1966〕
大陆花岗岩质物质	2.700	〔Stacey，1977〕
薄层大洋玄武岩质物质	2.900	〔Stacey，1977〕
地壳岩石	2.8⁺	〔Byerley，1942〕
	2.60～2.75	〔Bott，1971〕

①g/cm³换算为SI单位kg/cm³时以g/cm³乘1000。

3.5 已发表数据的统计分析

设在普杜大学（Purdue University）的信息与数字数据分析综合中心（CINDAS）汇编了一个实际上包括所有类型岩石性质的计算机化的数据库。现在，这个数据库包含91种岩

石类型的2187个真比重值和4218个视比重的值。为了获得地壳岩石的更有用的比重值，就14种常见岩类的比重对CINDAS数据库进行了分析。这些岩石类型的1768个真比重值范围是2.33～2.77；3258个视比重值的范围是1.98～2.83。每类岩石的具体范围和平均值列于表3.2中。由岩石总分类选择的比重值列于表3.3中。一些常见矿物的真比重和视比重则列在表3.4中。

3.6 相关的可能性

为把比重用作岩石的其它性质的预测标志，已经做了许多尝试。例如在岩石的密度和成分之间可能存在着某种关系；但是有几位研究者探讨了这种可能性并得出结论说，结构关系（包括孔隙百分比）比矿物成分更为重要〔French，1976；Schreiber et al.，1977；Stewart et al.，1977〕。其中一项研究〔Stewart et al.，1977〕申明："……对于低密度的岩石来说，体积密度的变化大部分是由于孔隙度变化造成的，而高密度的岩石的体积密度增大主要是由于重结晶作用增强和密度大的矿物含量增大造成的。"另一项研究〔Young et al.,1976〕则检查了岩石的比重与化学成分间的关系。他们的目的显然是为了发展一种有助于更精确地鉴定岩石类型的检验方法。他们发现，长英-镁铁质指数

表3.2 主要岩石类型的比重

（资料来源见附录）

岩石类型	样品数		范围		平均值		标准偏差	
	真比重	视比重	真比重	视比重	真	视	真比重	视比重
玄武岩	66	311	2.20～2.85[1]	2.04～3.08	2.59	2.60	0.339	0.236
花岗岩	359	675	2.31～2.99	2.30～2.99	2.66	2.65	0.050	0.047
黑云岩花岗岩	195	232	2.60～2.74	2.52～2.73	2.67	2.62		
角闪石花岗岩	4	14	2.63～2.66	2.59～2.63	2.65	2.62		
二长岩	83	109	2.56～2.79	2.19～2.76	2.68	2.64	0.031	0.069
白云岩	31	99	1.91～2.93	1.91～2.93	2.77	2.64	0.062	0.172
钙质白云岩	—	11		2.41～2.82		2.63		
泥质白云岩	—	18		2.34～2.81		2.58		
石灰岩	84	413	2.23～2.82[2]	1.21～2.92	2.67	2.41	0.114	0.330
白云质石灰岩	4	39	2.67～2.79	2.18～2.81[3]	2.72	2.55		
泥质石灰岩	3	7	2.67～2.80	1.89～2.74	2.72	2.32		
砂岩	124	551	1.32～2.71[4]	1.43～2.93[4]	2.32	2.31	0.149	0.089
长石砂岩	16	4	2.58～2.69	2.13～2.37	2.63	2.25		
泥质砂岩	10	26	2.32～2.65	2.13～2.72	2.57	2.36		
凝灰质砂岩	11	11	1.32～2.03	2.58～2.71	1.68	2.63		
钙质砂岩	6	11	2.17～2.62	2.19～2.75	2.39	2.49		
页岩	66	131	0.97～2.72	1.38～2.86	2.34	2.47	0.379	0.308
凝灰岩	596	331	1.05～2.87	1.33～2.85	2.41	1.98	0.068	0.047
片麻岩	94	235	2.56～3.15	2.49～3.36	2.70	2.73	0.090	0.126
花岗片麻岩	61	84	2.65～2.73	2.61～3.04	2.68	2.67		

续表

岩石类型	样品数		范围		平均值		标准偏差	
	真比重	视比重	真比重	视比重	真	视	真比重	视比重
片状片麻岩	—	13		2.49～3.17		2.73		
黑云母片麻岩	20	13	2.56～2.90	2.65～2.92	2.75	2.73		
大理岩	14	96	2.50～2.88	2.49～3.20	2.69	2.76	0.112	0.101
石英岩	57	66	2.59～2.85	2.27～4.07[5]	2.67	2.67	0.051	0.252
片岩	53	98	1.91～3.06	2.47～3.20	2.76	2.83	0.177	0.152
蛇纹岩	59	22	2.43～2.80	2.40～3.00	2.63	2.68	0.01	0.123
板岩	82	21	2.76～2.90	2.60～2.76	2.68	2.64	0.032	0.040

1. 据报导，一极为多孔玄武岩的值达13.20，此高异常值未包括于此表中；
2. 两个含方铅矿的白云质石灰岩比重为3.30与4.41。此二值未纳入本表之“范围”与“平均”栏内；
3. 此范围不包括上述第2条所指的含方铅矿的样品。如包括该样品，则范围为2.18～4.41，平均值为2.61；
4. 此处真比重与视比重值范围变宽是由于砂岩成分的范围宽而造成。较低的值为凝灰质砂岩，较高的值为泥质砂岩；
5. 此为一含铁石膏之石英岩，某些含铁与含钙的石英岩之值亦高（>3）。

表3.3 地壳岩石

（比重据一般分类）

岩石类型	样品数目	范围	真平均值	样品数目	范围	视平均值
火成岩	706	2.17～3.74	2.65	1630	1.35～3.74	2.65
变质岩	395	1.91～3.15	2.71	742	2.18～4.07	2.77
沉积岩	1023	1.05～3.34	2.55	1729	1.33～4.41[1]	2.33
矿物	63	1.93～4.25	2.47	117	1.72[2]～5.07	3.09
所有岩石类型	2187	1.05～4.25	2.65	4218	1.33～5.07	2.55

1. 含方铅矿白云岩。不包括此岩石，最高值为3.30；
2. 据一项报导，石英之值为0.48，本处未将此值计算在内。

表3.4 矿物的密度〔据Deer et al., 1969〕

矿物	化学成分	密度①（g/cm³）
钠长石	$Na(AlSi_3O_8)$	2.63
钙长石	$CaAl_2Si_2O_8$	2.76
黑云母	$K_2(Mg, Fe^{+2})_{6-4}(Fe^{+3}, Al, Ti)_{0-2}[Si_{6-5}Al_{2-3}O_{20}](OH, F)_4$	2.7～3.3
方解石	$CaCO_3$	2.72～2.94
白云石	$CaMg(CO_3)_2$	2.86～2.93
角闪石	$(Na, K)_{0-1}Ca_2(Mg, Fe^{+2}, Fe^{+3}, Al)_5[Si_{6-7}Al_{2-1}O_{22}](OH, F)_2$	3.02～3.45
伊利石	$K_{1-1.5}Al_4[Si_{7-6.5}Al_{1-1.5}O_{20}](OH)_4$	2.6～2.9
高岭石	$Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$	2.61～2.68
磁铁矿	$Fe^{+2}Fe_2^{+3}O_4$	5.2
微斜长石	$(K, Na)[AlSi_3O_8]$	2.56～2.63
蒙脱石	$(1/2Ca, Na)_{0.7}(Al, Mg, Fe)_4[(Si, Al)_8O_{20}](OH)_4 \cdot nH_2O$	2～3（可变的）
白云母	$K_2Al_4[Si_6Al_2O_{20}](OH, F)_4$	2.77～2.88
橄榄石	$(Mg, Fe)_2[SiO_4]$	3.22～4.39
正长石	$(K, Na)[AlSi_3O_8]$	2.55～2.63
黄铁矿	FeS_2	4.95～5.03
辉石类	$(Mg, Fe^{+2})_2Si_2O_6$	2.96～3.96
	（Na与Ca可置换部分Mg, Fe, Al可置换部分Si_2）	
石英	SiO_2	2.65
透长石	$(K, Na)[AlSi_3O_8]$	2.56～2.62
蛇纹石	$Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$	2.55

①g/cm^3换算为SI单位kg/cm^3将g/cm^3乘以1000，

$$\frac{SiO_2+Na_2O+K_2O}{FeO+Fe_2O_3+MgO+CaO}$$

在试图建立岩石的比重与化学成分之间的相关关系时，提供了比二氧化硅更好的相关曲线。然而，当岩石中的长英质含量高于石英二长岩时，这种相关性便不大有用了。他们提出的相关曲线是：

$$比重=2.643+0.444e^{-F/4} \qquad 标准偏差\sigma=\pm0.057$$

一部分长英-镁铁质指数（F）在表3.5中提供出来。

表3.5 长英-铁镁质指数〔据Young，1976〕

岩石类型	长英-镁铁质指数
碱性花岗岩	28.5
安山岩	2.67
玄武岩	2.10
黑云母片麻岩	2.12～5.56
闪长岩	2.41～2.55
辉长岩	1.73
花岗岩	19.8
二长岩	3.22～4.56
石英闪长岩	4.87～6.78
石英二长岩	11.7
流纹斑岩	15.8～22.3
片岩	11.0～11.7

CINDAS数据的最小二乘法统计分析表明，岩石的比重与表3.6所表示的岩石其他性质可以表现出有用的相关关系〔Judd，1971〕。这种分析把各种岩石类型混合在一起；但是，有少数岩石类型，例如石灰岩和砂岩，在比重与非围限抗压强度之间表现出相对较高的相关性。在这种研究中发现的一个异常情况是，当所有岩石类型都包括在分析中时，岩石的两种性质之间的相关性比只限于特定岩类的分析时更高一些。由此得出结论，即在给岩石学上相似的岩石定以特殊名称而可能导致的变化，会大大妨碍对岩石性质的大量数据的统计分析。

3.7 小　结

评价密度数据的一条基本要求是测定方法相同；如果不这样做，则与岩石其它性质的相关关系便可能是不确切的。使用什么类型的方法是重要的，在原地测定密度时尤为重要。就后一种情况而言，目前最精确的方法是井眼精细重力测量。

在比较常见的地壳岩石的两千多个密度测量的分析中，得到其数值范围为0.97～3.15之间，平均值范围在1.68～2.77之间。总地来看，变质岩真密度的最高平均值是2.71。沉积岩所具有的最大变化范围可达2.29。

密度作为预测岩石其他性质的标志，现在还有点冒险，很可能是因为还缺乏一种统一的岩石分类。

附录：表3.2中数据来源的书目

1. Asinkritov, F.A., Associated Technical Services, Inc. Rept. RU-1355, 24 pp., 1963.
2. Bayuk, E.I., Bull. Acad. Sci., USSR, 6, 833-5, 1960.
3. Griffith, J.H., Iowa State College, Eng. Expt. Sta. Bull., 35(42), 1-56, 1937.
4. Keller, G.V., "Physical Properties of Tuffs of the Oak Spring Formation, Nevada," Geological Survey Research, 8396-400, 1960.
5. Price, N.J., "A Study of Rock Properties in Conditions of Triaxial Stress," Mechanics of Non-Metallic Brittle Materials, London, 106-22, 1959.
6. Balmer, G.G. and Hanson, J.A., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Structural Lab. Rept. SP-30, Pt. I, 60 pp., 1951.
7. Balmer, G.G., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Concrete Lab. Rept. SP-39, 78 pp., 1953.
8. Monfore, G.E., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Concrete Lab. Rept. C-731, 35 pp., 1954.
9. King, M.E. and Monfore, G.E., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Concrete Lab. Rept. C-786, 29 pp., 1955.
10. Kujundzic, B. and Colic, B., Office of Technical Services Rept. OTS 60-21644, 7-26, 1961.
11. Kudunozic, B. and Radosavljevic, Z., Office of Technical Services Rept. OTS 60-21656, 37-81, 1961.
12. Windes, S.L., Bureau of Mines Rept. BM-RI-4459, 79 pp., 1949.
13. Windes, S.L., Bureau of Mines Rept. BM-RI-4727, 37 pp., 1950.
14. Blair, B.E., Bureau of Mines Rept. BM-RI-5130, 69 pp., 1955.
15. Blair, B.E., Bureau of Mines Rept. BM-RI-5244, 69 pp., 1956.
16. Nicholls, H.R., Bureau of Mines Rept. BM-RI-5888, 13 pp., 1961.
17. Johnson, R.B., et al., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letters PLUTO-1-14, 75 pp., 1961.
18. Deklotz, E.J., Heck, W.J., and Neff, T.L., U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Div. Lab. Rept. 64/108, 106 pp., 1965.
19. Deklotz, E.J. and Heck, W.J., U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Div. Lab. Rept. 64/474, 15 pp., 1965.
20. Deklotz, E.J., Heck, W.J., and Neff, T.L., U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Div. Lab. Rept. 64/493, 79 pp., 1966.
21. Emerick, W.L., Hasler, J.W., and Bowers, W.E., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letter AREA-12-1, 2? pp., 1962.
22. Emerick, W.L., Snyder, R.P., and Hoover, D.L., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letter AREA-12-1, Suppl. 1, 3 pp., 1962.
23. Emerick, W.L., Hoover, D.L., Snyder, R.P., and Hasler, J.W., U.S. Department of the Interior Geological Survey Technical Letter AREA-12-9, 4 pp., 1963.
24. Houser, F.N., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letter AREA-15-2 4 pp., 1963.
25. Williams, W.P., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letter YUCCA-1, Suppl. 2, 8 pp., 1961.
26. Cole, T.H. and Williams, W.P., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letter YUCCA-1, Suppl. 3, 26 pp., 1962.
27. Everling, G., Glueckauf, 96(7), 390-409, 1960.
28. Gard, L.M. and Dickey, D.D., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letter GNOME-5, 4 pp., 1961.
29. Manger, G.E., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Bull. 1144-E, E1-55, 1963.
30. Peselnick, L., J. Geophys. Res., 67(11), 4441-8, 1962.
31. Hewitt, D.F., Ontario Department of Mines Industrial Mineral Rept. 15, 41 pp., 1964.
32. Hewitt, D.F., Ontario Department of Mines Industrial Mineral Rept. 16, 89 pp., 1964.
33. Hewitt, D.F., Ontario Department of Mines Industrial Mineral Rept. 17, 57 pp., 1964.
34. Hewitt, D.F., Ontario Department of Mines Industrial Mineral Rept. 19, 51 pp., 1964.

35. Carpenter, C.B. and Spencer, G.B., Bureau of Mines Rept. BM-RI-3540, 20 pp., 1940.

36. Kessler, D.W., Insley, H., and Sligh, W.H., J. Res. Natl. Bur. Stand., 25, 161-206, 1940.

37. Kessler, D.W. and Sligh, W.H., J. Res. Natl. Bur. Stand., 9, 377-411, 1932.

38. Wolkoocef, V.E., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Petrographic Lab. Rept. PET-100, 23 pp., 1953.

39. Sutherland, R.B., in Proceedings of the Fifth Symposium on Rock Mechanics, MacMillan Publishing Co., New York, NY, 473-90, 1963.

40. Gildersleeve, B., Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng., 187, 883-6, 1950.

41. Birch, F., National Academy of Science, National Research Council Publ. 1185, 132-3, 1964.

42. Medvedev, V.Y. and Stepanov, P.P., Int. Geol. Rev., 67-78, 1968.

43. Leet, L.D., Physics, 4, 375-85, 1933.

44. Volarovich, H.P., Bayuk, E.I., Zhoanov, A.A., and Tohashevskaya, I.S., Bull. Acad. Sci. USSR, Geophys. Ser., 8, 712-6, 1964.

45. Saucier, K.L. and Ainsworth, D.L., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Misc. Paper C-69-3, 286 pp., 1969.

46. Saucier, K.L., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Misc. Paper C-69-9, 132 pp., 1969.

47. Saucier, K.L., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Misc. Paper C-69-12, 291 pp., 1969.

48. Saucier, K.L. and Crisp, R.W., U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Misc. Paper C-69-16, 122 pp., 1969.

49. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE P-CR-8, 7 pp., 1969.

50. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE P-CR-64, 6 pp., 1969.

51. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE R-CR-72, 7 pp., 1969.

52. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-P-CR-81, 7 pp., 1969.

53. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-W-2-CR-1, 7 pp., 1969.

54. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-W-2-CR-4, 8 pp., 1969.

55. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-W-2-CR-5, 7 pp., 1969.

56. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-W-2-CR-14, 7 pp., 1969.

57. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-W-2-CR-26, 7 pp., 1969.

58. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-DV-CR-9, 8 pp., 1969.

59. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-DV-CR-17, 6 pp., 1969.

60. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-DV-CR-19, 7 pp., 1969.

61. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-DV-CR-39, 4 pp., 1969.

62. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-DV-CR-40, 7 pp., 1969.

63. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE ST-CR-4, 6 pp., 1969.

64. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-7, 6 pp., 1969.

65. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-9, 6 pp., 1969.

66. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-12, 6 pp., 1969.

67. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-16, 6 pp., 1969.

68. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-18, 6 pp., 1969.

69. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-20, 6 pp., 1969.

70. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-26, 6 pp., 1969.

71. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-ST-CR-28, 7 pp., 1969.

72. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-MG-CR-2A, 6 pp., 1969.

73. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-MG-CR-10, 7 pp., 1969.

74. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-MG-CR-18, 7 pp., 1969.

75. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-MG-CR-26, 7 pp., 1969.

76. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-MG-CR-28, 7 pp., 1969.

77. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-MG-CR-54, 7 pp., 1969.

78. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-6, 8 pp., 1969.

79. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-8, 7 pp., 1969.

80. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-10, 8 pp., 1969.

81. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-19, 6 pp., 1969.

82. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-25, 6 pp., 1969.

83. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-28, 6 pp., 1969.

84. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-32, 7 pp., 1969.

85. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-34, 7 pp., 1969.

86. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Unpublished Data Rept. HOLE-BG-CR-39, 7 pp., 1969.

87. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Jackson Installation, Concrete Div., Unpublished Data, 14 pp., 1965.

88. U.S. Bureau of Reclamation, Unpublished Data, 98 pp., 1957.

89. Beare, T.H., Proc. Inst. C. E., 107, 341-69.

90. Leeman, E.R., Association Mine Mgrs. of South Africa, 339-41, 1958-1959.

91. Belikov, B.P., Studia Geoph. Geod., 6(1), 75-85, 1962.

92. Serafim, J.L., Private Communication, Ministerio das Obras Publicas Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, 10 pp., 1962.

93. Dickey, D.D., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Unpublished Data, Linen-1, 3 pp., 1961.

94. Geological Society of America, Annual Meeting Symposium sponsored by ASCE-GSA Joint Committee on Engineering Geology, St. Louis, MO, Nov. 6-8, 1958, 27 pp., 1958.

95. Grobbelaar, C., Association Mine Mgrs. of South Africa, 300-30, 1958.

96. L'Hermite, M.R. and Feret, L., Compt. Rend. des Recherches Effectuees, 40-62, 1943; English Translation: U.S. Geological Survey, 56 pp., 1947.

97. Fucik, E.M., Panama Canal, Special Engineering Division, Soil Mechanics Section, Diablo Heights, Canal Zone, Design Memorandum No. C-40, 37 pp., 1941.

98. Fucik, E.M., Panama Canal, Special Engineering Division, Soil Mechanics Section, Diablo Heights, Canal Zone, 37 pp., 1942.

99. U.S. Army Engineer District, Omaha, Nebraska, Subsurface Investigation Report, 120 pp., 1961.

100. Poole, F.G. and Roller, J.C., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Trace Elements Investigations Rept. 762, 32 pp., 1959.

101. Byers, F.M., Jr., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Trace Elements Investigation Rept. 811, 37 pp., 1961.

102. Izett, G.A., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Trace Elements Memorandum Rept. 836-C, 37 pp., 1960.

103. Wilmarth, V.R., McKeown, F.A., and Houser, F.N., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. NTS-23, 22 pp., 1962.

104. Weatherby, B.B., Born, W.T., and Harding, R.L., Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 18(1), 106-18, 1934.

105. Carroll, R.D. and Dickey, D.D., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Technical Letter GNOME-2, 7 pp., 1961.

106. Karpoff, K.P., U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Earth Laboratory Rept. EN-318, 13 pp., 1952.

107. Mellor, M., Cold Regions Research and Engineering Lab. Rept. CRREL-RR-294, 78 pp., 1971.

108. Bieniawski, Z.T., Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 5, 325-35, 1968.

109. Handin, J., Hager, R.V., Jr., Friedman, M., and Feather, J.N., Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 47(5), 717-55, 1963.

110. Oka, S.S. and Parthasarathy, A., India Institute of Technology, Bombay Research Reports 1965-67, 125-7, 1968.

111. Mellor, M. and Rainey, R., U.S. Army Terrestrial Science Center, Hanover, Unofficial Memorandum, 34 pp., 1968.

112. Weide, D.L., Missile and Space Systems Div. Rept. SM-44547, 22 pp., 1963.

113. Hunt, R.W., Leach, R.E., Curro, J.R., Jr., Gatz, J.L., and Stowe, R.L., U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper S-71-2, 335 pp., 1971.

114. Ros, H.C., Federal Materials Testing Laboratory of the E.T.H., Zurich, No. 28, 1928; English Translation: Bureau of Reclamation Tech. Memorandum No. 635.

115. Rutherford, H.E. and Lucas, J.R., Trans. Soc. Mining Eng. AIME, 319-24, 1962.

116. Balakrishna, S., Trans. Am. Geophys. Union, 39(4), 711-12, 1958.

117. Knopoff, L., Trans. Am. Geophys. Union, 35(6), 969-73, 1954.

118. Birch, F., J. Geophys. Res., 65(4), 1083-102, 1960.

119. Atchinson, T.C. and Roth, J., U.S. Bureau of Mines Rept. BM-RI-5707, 1961.

120. Kusakabe, S., Japan Imperial Earthquake Inst., 27-49, 1908.

121. Swartz, J.H., U.S. Geological Survey Professional Paper 260AA, 1962.

122. Author Anon., Computer Punch Card, U.S. Geological Survey, Experimental Results, 1964.

123. Rutherford, H. and Lucas, J.R., Trans., Soc. Mining Eng. AIME, 1962.

124. Ito, I. and Terada, M., "Stress Waves in Rocks and Their Effects on Rock Breakage," Source, pages, and year unknown.

125. Author Anon., "Comparison of Values of Elastic Modulus of Foundation Rock by Seismic Field Measurements and by Laboratory Tests of Cores," U.S. Bureau of Reclamation, 1958.

126. Rutherford, H.E., "Evaluation of Specific Rock Properties by Ultrasonic Principles," Ohio State Univ., M.S. Thesis, 71 pp., 1961.

127. Emerick, W.L., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. TEI-773, 38 pp., 1962.

128. Emerick, W.L., Kickey, D.D., and McKeown, F.A., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. TEI-776, 22 pp., 1962.

129. Davis, R.E., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. TEI-789, 25 pp., 1961.

130. Hasler, J.W., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. TEI-834, 19 pp., 1963.

131. Emerick, W.L., Snyder, R.P., and Hoover, D.L., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Technical Letter Area 12-4, 3 pp., 1963.

132. Emerick, W.L., Snyder, R.P., and Bowers, W.E., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Technical Letter Area 12-5, 11 pp., 1963.

133. Sargent, K.A., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Technical Letter: Special Studies 1-38, 25 pp., 1965.

134. Hoover, D.L., U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Technical Letter: Special Studies 1-48, 19 pp., 1966.

135. Barnes, H., Hinricks, E.N., McKeown, F.A., and Orkild, P.P., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. NTS-45, Part A, 196 pp., 1963.

136. Hazlewood, R.M., Healey, D.L., and Miller, C.H., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. NTS-45, Part B, 53 pp., 1963.

137. Williams, W.P., Emerick, W.L., and Davis, R.E., U.S. Department of the Interior, Geological Survey Rept. NTS-45, Part C, 251 pp., 1963.

第四章　孔隙度、渗透率、分配系数和分散度

R. G. 沃尔夫

4.0　术语表

C_d	分配系数	l	厚度
c	离子在溶液中的浓度	n	孔隙度（体积百分比）
$\bar{c}$	骨架结构上吸附的离子的浓度	Q	单位时间内通过单位面积的水的体积
D^*	分子扩散系数	q	单位面积上的流速
D_l	纵向分散系数	t	时间
G_d	干样品的比重	V	总体积
G_s	饱和样品的比重	$\bar{v}$	液体的平均线速度
h_1, h_2	分别代表流体压力计中砂岩垂直圆柱的上、下终端距参考水平面的高度	v_i	空隙体积
		v_m	固体颗粒的聚合体积
K	固有渗透率	v_w	饱和样品中水的体积
k	比例因子		

希腊符号

α	分散度
η	运动粘度
ρ	密度

渗透率的换算因子——普通渗透率单位相对于表4.4～4.6中使用的cm/s制的比值

（例如，表中的cm/s换算为cm^2值需除以9.804×10^4）

9.804×10^4 (cm/s)/$cm^2$①	9.66×10^{-7}(cm/s)/mD①
9.109×10^7 (cm/s)/$ft^2$①	4.72×10^{-5}(cm/s)/(gpd/ft^2)②
9.66×10^{-4} (cm/s)/D①	30.48(cm/s)/(ft/s)

①适用于20° C的水。

②适用于60° F的水＝迈涅兹单位（Meinzer Unit）。

（gpd＝美制的加仑每天）

4.1　引言与界说

最近一个时期内，对作为流体来源（水，油，气）或流体，以及其它物质的储集或处置库的多孔介质的研究兴趣与日俱增，而且这种兴趣有可能直到将来都会持续地增大。为了完善地描述孔隙介质中的流体的状态，对以下几点必须作出详细的说明：①流体压力；②流体成分；③流体中包含的能量。为了预测多孔介质中流体的流动以及成分怎样随时间与空间变化，对某些参数必须作详细地说明。对于流动要考虑的主要参数是孔隙度和渗透率。对于成

分的变化，一个主要来源或水汇是吸收型反应，它通常用分配系数来表征。这一章的目的是为这些因素以及分散度提供数据，分散度是预测混合流体成分的一种参数。

这里假设使用这一章所提供的数据的人，对于所收集到的这些参数的合理分布范围是感兴趣的。本章试图汇编具有代表性和容易采用的数据。其中许多实验室都有一些由于权威性或其它原因不能公诸于众而有效使用的未发表数据，在本章都不予收容。另外，无可怀疑，有一些可靠的文献中的数值会无意之中被忽略了。重申一点，任何认为这种汇编已包罗无遗的夸口都会惨遭失败，因为，大量科学和工程方面的进展都正在竭力产生这种信息。为了易于表达，每一个标题孔隙度、渗透率、分配系数和分散度另立成节。第一章中的表1.12表明，沉积岩只构成地壳的8%左右，然而，由于大部分地下水、石油和天然气是存在沉积岩中的，所以，多数适用于这一章标题的可靠数据都是针对这类岩石而言的。

第一章和第二章中的大部分分别进行的讨论对于本章所考虑的岩石特性都是可用的，也就是说，岩石术语的不精确性（第一章），外来化学成分对这些性质的测量的影响，“环境”条件（第二章）和点数据的重现性。在试图对这章提供的数据进行综合时已经极为审慎，然而，错误无疑还会出现，对于这一点事先表示歉意。

4.2 孔 隙 度

4.2.1 一般定义

斯利科特〔Slichter，1899〕在他最早考虑的关于在多孔介质的水流动中孔隙度的作用时，只不过做了这样的阐述，“……，整个空间中开放空间的百分比，或所谓的孔隙度，……”，而没有留下孔隙度的定义。然而，自那时起，人们把相当大的注意力已经集中在总体孔隙度这个问题上，总孔隙度即“孔隙体积与固体体积比，它一般是用体积-重力方法来确定的”〔API-RP-40，1960〕，并将有效孔隙度定义为“用全部体积的百分比表示的能使流体传播的相互连接的孔隙空间的总量”〔Lohman等，1972b，第10页〕。假定水的比重为1，总的孔隙度用百分比来表示，依据四种常用方法，能够表示为〔Lohman，1972a，第3页〕：

$$n=100\left[\frac{v_i}{V}\right]=100\left[\frac{v_w}{V}\right]=100\left[\frac{V-v_m}{V}\right]=100\,(G_s-G_d) \qquad (4.1)$$

式中 n——孔隙度（体积的百分比）；

V——总体积（L^3）；

v_i——空隙体积（L^3）；

v_m——固体质点的聚合体积（L^3）；

v_w——饱和样品中水的体积（L^3）；

G_d——干样品的比重（ML^{-3}）；

G_s——饱和样品的比重（ML^{-3}）。

有效孔隙度一般根据博伊尔定律（Boyle's Law）制定的步骤来测定。当然，所使用的压力和步骤会影响所测量的相互连接的程度和孔隙大小。对于方法学的详细描述，包括优点和缺点的讨论可参考〔API-RP-40，1960〕。

4.2.2 历史方面的情况

由于多孔介质中水运动（地下水）的理论研究要早于油井石油的商业开发，所以，早期

地下水文献包含大量的理论上的发展。斯利科特〔1899〕的早期详尽研究指出，均一大小的球之间的孔隙度，从最不稳定填充的47%的最大值变到最稳定填充的最小值26%。因为，物质自然出现的沉积物很少是由均匀大小的球隙物质组成的，所以，物质自然出现的孔隙度的测量要扩大到这些界限以外（表4.1～4.3）。弗雷泽〔Fraser，1935〕增添了一些影响孔隙度的因素。他考虑了如下一些因素以及它们对于测量未固结的天然沉积物孔隙度的相对重要性：

a. 绝对粒度；

b. 粒度的非均匀性；

c. 各种粒度所占的比例；

d. 颗粒形状；

e. 沉积方式；

f. 在沉积期间和其后的压实作用；

g. 固化作用。

关于这些因素的报导，即使有，也提供的很少。然而，弗雷泽的论文〔1935〕已经作为试图发展控制孔隙度的"规律"的许多研究的基础。这些方面的考虑超过了本文的范围；不过，普依〔Pryor，1973〕曾提供出过一个很好的概括。

4.3 渗 透 率

4.3.1 一般定义

一种流体流过任一体系，如多孔介质和开口管道等的速率取决于两种基本性质：①流体的势能梯度；②对于流体沿运移途径流动的阻力。一般将可测定的多孔介质的"阻力"积分因子的"常量"称为"渗透率"。洛哈曼〔Lohoman，1972b，第9页〕将固有渗透率定义为：在势能梯度下多孔介质能够传输液体的相对容易程度。事实上这是介质本身的性质，与液体的性质和由运动引起的力场无关。渗透率是取决于孔隙形状和大小的介质性质。

4.3.2 历史方面的情况

在哈根〔Hagen，1839〕和波伊斯尤尔〔Poiseuille，1846〕致力于影响水流过毛细管的流动定律的研究工作前，达西〔Darcy，1856〕就完成了关于影响水穿过沙子向下流动的一系列实验，提出将沙作为法国第戎城水的过滤物质，实验导出的关系式为

$$Q=-k\ (h_2-h_1)\ /l \tag{4.2}$$

式中 Q——在单位时间内通过单位面积的水的体积（L^3t^{-1}）；

h_1, h_2——分别是水在砂垂直圆柱上、下终端流体压力计中高出参考水平面的高度(L)；

k——比例因子（L^3t^{-1}）；

l——砂的厚度（L）。

当然，达西原来确定的比例常数包含了流体和多孔介质的性质。

达西的试验测试的范围经受了检验，并且定律已经推广为含有粘度在内的关系式。这就能够把比例常数与多孔介质本身的特点分离开来，通常称为固有渗透率。

之后，休伯特〔Hubbert，1940〕考虑到粘度的广义的达西关系式便成为

$$q=\frac{K\rho g}{\eta}\left[\frac{dh}{dl}\right] \tag{4.3}$$

式中 K——固有渗透率（L^2）；

η——运动学粘度（$ML^{-1}t^{-1}$）；

q——单位面积上的流动速率（Lt^{-1}）；

dh/d*l*——梯度，每单位长度的流动造成的水头的单位变化量；

ρ——流体密度（ML^{-3}）；

g——重力加速度（Lt^{-2}）。

对包括渗透率在内的达西定律的高度综合和全面的讨论请看〔Hubbert，1940〕。

石油工业对达西关系式做了大量的检验和推广工作。Wykoff等（1934，第167页）提出这种渗透率的单位是："……依据达西（D′Arcy）首次得出孔隙流动定律的公式，而称为"达西"。将特定的一致单位用于方程（4.3），1达西渗透率意味着粘度为1厘泊的1立方厘米流体，在一大气压差下，1秒内流过长为1厘米、截面为1平方厘米多孔介质的流动速率。因为，大多数多孔介质的渗透率小于1达西，所以为了少用小数，石油工业中通常使用毫达西（10^{-3}达西）。

包括具有相对均匀特性的流体在内的研究已经把流体性质加在渗透率（基体）的考虑之中。例如，在地下水中，在通过单位长度流动的单位水头变化的水力梯度下，如果在单位时间内通过与流动方向成直角的单位面积的剖面可以输送一个单位体积的占优势粘度的地下水，那么，多孔介质便具有单位时间一个单位长度的水力传导系数"〔Lohman，1972a，第6页〕。

4.3.3 讨论

在以下的数据表中（表4.4～4.6），包含有无论何处这些数据可用性的测试条件的资料。影响精确测定渗透率的一些最重要的因素是：①实验室的温度条件〔Weinbrandt等，1975和Potter，1978〕；②加在样品上的梯度；③样品是否是在模拟野外的条件下再度加载和进行测试的〔Zoback和Byorle，1975〕；④试验中所使用的流体成分〔Johnstor和Beeson，1945〕；⑤饱和状态。所有这些题目，在过去和现在流行的文献中都已有论述并在不断改进。

从理论上讲，对于均匀粒度和形态的物质，孔隙度与渗透率存在一定关系。在自然界中根据孔隙度的测量便可定量预测渗透率的情况很少遇到。概括有关这个题目的已经发表的文献的尝试已超出了本章的范围。但是，最近引入的文献有：佐贝克(Zoback)和比尔利（Byerlee）〔1975〕；比尔德（Beard）和韦尔（Weyl）〔1973〕；弗雷德曼（Friedman）〔1976〕。对影响沉积物孔隙度和渗透率的因素的更广泛处理可在沃尔夫(Wolf)和奇林格林（Chilingarian）〔1976，第188～241页〕的著作中找到。

这些表中选择的"渗透率"的单位是厘米/秒。文献中报道的用比传导率单位或其它的单位的数据已经被换算过来。最常见的"渗透率"单位的换算表包括在术语表中。

4.4 分配系数

4.4.1 一般评论

如第4.1节所述，预测（模拟）一种多孔介质中的流体成份在时间和空间上的变化，必须考虑到作为化学组分来源与汇集的化学反应。吸收-解吸收型反应在天然物质中是常见的，可以利用分配系数来表征它们的具体特征。

4.4.2 历史背景

天然“岩石”物质的吸附性质——保持长久分离或含水种类滞后运动的性质——自Way（1850）的经典文章开始，多年来便引起多种学科的兴趣。自那时起，人们把大量精力集中在以下几个方面：①天然物质离子交换特性的评价；②影响离子交换的因素；③表达这些反应特点的最好方法。因为有关废物处理的环境问题不断逐步升级，所以，自然（原地）条件下表征吸收的特征变得越来越重要。人们认识到前面讨论过的从实验室测量转化成野外条件会遇到各种各样的困难，水文和土壤学家已经预见到一个全新的研究领域。

4.4.3 一般定义和讨论

对于将离子吸附到多孔介质格架之上或之外的最常用的定量表达是分配系数C_d。分配系数被定义为〔据Wood，1978，第27页〕：

$$C_d=\frac{\bar{c}}{c} \tag{4.4}$$

式中 C_d——分配系数（L^3M^{-1}）；

$\bar{c}$——在格架结构上吸附的离子的浓度（MM^{-1}）；

c——溶液中的离子浓度（ML^{-3}）。

表4.7中从罗伯逊〔Robertson，1974和1977的文章中获得的值是无量纲的，而民斯等〔Means et al.，1978〕的那些值没有特定的量纲，只是被假设为没有量纲。

C_d必定是在研究者感兴趣的浓度范围内根据经验确定的。C_d的实验室测量方法的“标准化”还处在演变状态之中。雷利（Relyea）和塞尼（Serne）〔1979〕在他们的“控制样品项目”的报道中指出，即使把均匀的样品分送到几个实验室用特定的标准化方法和物质来测量C_d，其结果仍在三个量级内变化。在使需要仔细控制的因素达到一致方面，正在取得进展〔Means et al，1978；Apps et al.，1977〕。一旦这些因素做到标准化，就应该有可能比较由不同岩石物质、离子等得到的结果。由于实验室测量值还显然存在着问题，所以，表4.7中只报道了都是在饱和水条件获得的野外测定值。这些值是在综合了影响有意义的化学形式的流动和输送的原地因素的条件下测量得到的。这种综合可能包括吸收实验中通常不考虑的那些现象。然而，直到考虑介质的特征对隔离废料工作达到完全定量化的程度时，由野外试验确定的数值和（或）区域模式化才可能是最有意义的。然而，正如已经说明过的“野外”测量的数量是很少的。

这种编汇所起的主要作用是突出了对于野外实验和/或包括用于校正的足够野外资料的模拟研究两方面的大量数据的需要。

艾姆斯（Ames）和拉埃（Rai）〔1978〕已经总结了对放射性核素有效的C_d的大部分现有数据。他们也评价了对这类同位素进行实验室测定有明显影响的那些因素。

4.5 分 散 度

4.5.1 一般定义

在多孔介质中，影响溶解物浓度和运动（搬运）的因素包括平流、分散、和化学反应（第4.4节）。与势差和达西流动相应的流体伴生的溶解物的输送被称为平流（虽然，对流的更多的性质留给了由热差所引起的流动，但对流（convection）被用作平流（advection）的同义语）。平流过程导致了溶解物的运动，其平均速率与搬运流体的平均线速度相等。但

是，溶解物有一种从依据纯平流预测的范围扩延开来的趋势。这种扩展现象被称为水力学分散。分散是由不同成分流体的混合而引起的一种现象。在混合带中产生溶解物的稀释。分散包括分子扩散效应和孔隙介质的微观与受宏观变化影响的速度差引起的混合作用。除了在低平流速率下以外，一般对分子扩散效应忽略不计。由速度变化引起的分散被称为机械分散或水力分散。分散具有方向性：溶解物顺流动方向扩散被称为纵向分散，垂直于流动方向的扩散则称为横向分散。

假设在稳定状态、饱合和非反应溶解条件下，水动力纵向扩散系数能够表示为

$$D_l=\alpha\bar{v}+D^* \tag{4.5}$$

式中 D_l——流动路径的纵向扩散系数（L^2t^{-1}）；

α——分散度，多孔介质的特性（L）；

$\bar{v}$——液体的平均线速度（Lt^{-1}）；

D^*——分子扩散系数（L^2t^{-1}）。

将方程（4.5）变换为多于一维或多于这里讨论的一维坐标系的一些必要的考虑，则超出了本章的范围。为了作清晰的讨论，请参看弗瑞兹（Freeze）和彻瑞(Cherry）的文章〔1979，第548页〕

在搬运过程的分析中，扩散系数是极为重要的。

$$\text{由分散作用引起的搬运}=nD_l\frac{\partial c}{\partial l} \tag{4.6}$$

式中 n——孔隙度；

D_l——纵向扩散系数；

$\partial c/\partial l$——纵向浓度梯度。

值得注意的是，在方程（4.6）中的搬运的扩散作用分量和菲斯克（Fick）第一定律具有相同的形式，它能够用于扩散。

4.5.2 讨论

正如方程（4.5）所定义的，这一节的题目“分散度”，它是用来表达归属所考虑的介质的扩散或分散特点的一个“常数”。已经表明，分散度值的变化取决于测量它们所用的尺度。实验室测量范围是10^{-2}～1cm，而野外值的范围是10～100m〔Anderson，1979〕。因为，分散度是对试验样品均一性的一种间接测量，所以，样品越大，其结果的代表性越强。由于这个原因和由于利用固体地球来处理包括长寿核废料在内的各种物质的趋势不断增长，这就决定了只报道来自于以下两方面的分散度值：①实验室试验；②化学搬运的野外研究。通常，要通过模型分析测定分散度。后一类数据来自可能包括其它因素的区域数字模型校正，这些内容也包含在本章讨论中。因此这些值应被看作是“视分散度”。

安德森〔Anderson，1979〕提出了一种包括有分散作用的地下水流动系统的模拟模型的一个卓绝的观点。表4.8和4.9中报道的分散度值就取自这篇论文。

4.6 小　结

天然无机物的最大孔隙度是由斯科勒〔Schoeller，1962〕报道的浮岩样品的87.3%。最小孔隙度的值大多是一个尺度因数，因为，所有不含裂隙的物质存在着一个尺度问题。地球物理证实至少在地壳的15km深处还存在有互相连通的孔隙。然而，对于实验室样品来说已

知的孔隙度最低值的样品是苏城石英岩（Sioux Quartjite）（取自密执州地区的贾塞，年代为前寒武纪），有的报道它的孔隙度为零〔Hanley等，1978，第36页〕。

除了少数例外情况，这里只提供了自然产出的样品的数值。而人工制备的混合物的数值已经被省略去。农业意义上的“土壤”也已经从以下各表中删去，因为，它们已经开立了一个超越本章范围以外的全新领域。在表4.4～4.6中报道的最小渗透率是渗透率为零的层状盐和最大渗透率为8.1cm/s的具有“洞穴状空隙”的玄武岩。

表4.1 火成岩的孔隙度（百分比）
（按各类岩石的平均孔隙度增加顺序排列）

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
德雪斯玄武岩，威斯康星州	1			0.047	Hanley et al.〔1978〕
混合配制玄武岩	8	0.1	2.9	0.80	Schoeller〔1962〕
德国玄武岩	5	0.27	3.37	1.49	Schoeller〔1962〕
玄武岩	20	1.2	18.7	9.4	Corps of Engineers〔1965〕
玄武岩	41	1.4	32.7	15.0	Saucier〔1969a〕
玄武岩				4.40～5.60	Schoeller〔1962〕
英安岩	3	3.5	16	9	Norton et al.〔1977a〕
英安岩墙，取自亚利桑那州特洛伊	1			3.08	Norton et al.〔1977a〕
英安岩流，取自亚利桑那州特洛伊	1			15.7	Norton et al.〔1977a〕
英安斑岩	101	2.0	29.9	10.4	Griffith〔1937〕
辉绿岩，取自马里兰州弗雷德里克				0.1	Brace〔1965〕
辉绿岩，取自马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	2	0.47	1.0	0.58	Houser〔1962〕
辉绿岩	2	0.90	1.13	1.01	Meinzer〔1923〕
闪长岩	38			0	Hanley et al.〔1978〕
闪长岩				0.25	Schoeller〔1962〕
石英闪长岩				0.6	Schoeller〔1962〕
石英闪长岩（有效流动孔隙度）				0.2～0.003	Villas〔1975〕
石英闪长岩，取自亚利桑那州的谢拉-埃斯佩兰萨	1			2.90	Norton et al.〔1977a〕
闪长岩	1			3	Norton et al.〔1977a〕
辉长岩，取自马里兰州的卡罗尔和弗雷德里克	3	0.00	0.62	0.29	Houser〔1962〕
辉长岩	1			0.84	Meinzer〔1923〕
辉长岩				0.6～0.7	Schoeller〔1962〕
舍尔麦花岗岩（有效流动孔隙度）				0.002	Pratt et al.〔1974〕
花岩岗，取自佛蒙特州的巴里	1			0.079	Hanley et al.〔1978〕
花岗岩，取自罗得岛的韦斯特利	1			0.106	Hanley et al.〔1978〕
花岗岩，取自佐治亚州的斯通山				0.3	Brace〔1965〕
花岗岩	45			0.4	Franklin et al.〔1970〕
花岗岩，取自亚利桑那州的图森	1			0.611	Norton et al.〔1977a〕
花岗岩	451			0.7	Mellor〔1971〕
花岗岩	26	0.4	3.0	0.9	Izett〔1960〕
花岗岩，取自怀俄明州的拉勒米	1			1.08	Norton et al.〔1977a〕
花岗岩，取自罗得岛的韦斯特利				1.1	Brace〔1965〕

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
花岗岩，取自马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	17	0.44	3.98	1.11	Houser〔1962〕
花岗岩，亚利桑那州的特洛伊	1			1.36	Norton et al.〔1977a〕
花岗岩	322	0.1	11.2	1.4	Kessler et al.〔1940〕
等粒状花岗岩，亚利桑那州的哥洛比-迈阿密	1			1.77	Norton et al.〔1977a〕
花岗岩，亚利桑那州的德克斯坎里	1			2.96	Norton et al.〔1977a〕
花岗岩	9	0.7	5.5	3	Norton et al.〔1977a〕
花岗岩（有效流动孔隙度）				5.0～0.004	Bianchi et al.〔1969〕
花岗斑岩（蚀变的），亚利桑那州的哥洛比-迈阿密	1			5.35	Norton et al.〔1977a〕
花岗斑岩，犹他州宾厄姆	1			6.11	Norton et al.〔1977a〕
花岗闪长岩，密执安州克鲁特海峡	1			0.076	Hanley et al.〔1978〕
花岗闪长岩，取自马里兰州卡罗尔县和弗雷德里克县	1			0.50	Houser〔1962〕
云英岩	13			5.5	U.S.Geological Survey〔1964〕
安粗石英斑岩，取自犹他州的伯尼汉	1			2.64	Norton et al.〔1977a〕
石英安粗岩	2	4	5.2	4.6	Norton et al.〔1977a〕
安粗石英斑岩，取自新墨西哥州的西尔弗城	1			5.34	Norton et al.〔1977a〕
安粗岩墙，取自犹他州的伯尼汉	1			12.5	Norton et al.〔1977a〕
石英=长岩（蚀变的），亚利桑那州的斯瑞塔-埃斯佩兰斯	4	1.96	2.96	2.51	Norton et al.〔1977a〕
石英=长斑岩（蚀变的），取自新墨西哥州的乔罗	1			2.60	Norton et al.〔1977a〕
石英=长岩（其中一些被蚀变），取自马托格罗索州的伯特	6	0.075	6.35	3.03	Norton et al.〔1977a〕
石英=长岩	21	0.1	7	4	Norton et al.〔1977a〕
石英=长岩（蚀变的），取自亚利桑那州的圣马尼尔	7	1.46	4.1	4.0	Norton et al.〔1977a〕
黑曜岩				0.521	Schoeller.〔1962〕
伟晶岩	3			0.8	U.S.Geological Survey〔1964〕
伟晶岩	4			0.9	U.S.Bureau of Reclamation〔1958〕
响岩			4.50	2.0～3.50	Schoeller〔1962〕
斑岩，取自德国	10	0.4	15.5	5.48	Schoeller〔1962〕
浮岩，查普斯-菲利格尼斯				87.3	Schoeller〔1962〕
浮岩				50～75	Schoeller〔1962〕
石英=长岩	25			1.3	Houser〔1962〕
石英=长岩	42	0.2	10.1	1.7	Houser〔1962〕
石英=长岩	90	0	35.0	23.8	Deklotz et al.〔1964〕

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
流纹英安岩墙，取自亚利桑那州的特洛伊	1			7.52	Norton et al.〔1977a〕
流纹岩，次火山岩，取自新墨西哥州的乔罗	1			6.74	Norton et al.〔1977a〕
流纹岩（蚀变的），亚利桑那州的斯瑞塔-埃斯佩兰斯	1			7.48	Norton et al.〔1977a〕
流纹岩	3	7	21	12	Norton et al.〔1977a〕
流纹岩	6	10.2	17.9	14.6	Sargent〔1965〕
正长岩			1.38	0.5～0.6	Schoeller〔1962〕
英云闪长岩	9	2.9	11.5	7.0	Saucier〔1969b〕
熔结凝灰岩				14.1	Keller〔1960〕
凝灰岩（蚀变的），亚利桑那州的红山	1			21.5	Norton et al.〔1977a〕
凝灰岩	84	7.3	47.5	28.5	Williams et al.〔1963〕
沸石化的凝灰岩	23	15.8	37.7	29.4	Emerick et al.〔1962b〕
火山凝灰岩，取自意大利南部	8	6	58.4	31.0	Schoeller〔1962〕
沸石化的凝灰岩	28	23.2	39.5	31.1	Emerick et al.〔1962c〕
凝灰岩	165	15.5	44.2	31.7	Byers〔1961〕
火山凝灰岩，莱茵地堑	4	24.74	45.14	32.01	Schoeller〔1962〕
凝灰岩	15	29.3	40.0	33.5	Dickey〔1961〕
浮岩凝灰岩	31	25.2	46.1	35.3	Emerick〔1962〕
脆性凝灰岩				35.5	Keller〔1960〕
浮岩凝灰岩	16	31.5	43.3	36.2	Byers〔1961〕
浮岩凝灰岩	27	28.4	47.8	38.6	Emerick et al.〔1962a〕
层状凝灰岩，取自内华达州				38.8	Keller〔1960〕
层状凝灰岩（泡沫状的）				40.2	Keller〔1960〕
凝灰岩	180	7.2	54.7	41	Morris et al.〔1967〕

表4.2　沉积岩的孔隙度（百分比）
（按各类岩石平均孔隙度增加顺序排列）

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
硬石膏，取自得克萨斯区的布拉索斯二叠系	14	0.3	4.4	1.9	Gloyna et al〔1961〕
硬石膏	21	0.3	40.8	10.3	U.S.Geological Survey〔1964〕
胶结了的白垩，法国北部	2	7.7	8.3	8.0	Schoeller〔1962〕
白垩，取自法国北部	16	22.2	37.2	29.2	Schoeller〔1962〕
白垩	3	45.9	46.8	46.2	Baldwin et al.〔1909〕
白垩				53	Meinzer〔1923〕
燧石，取自基威廷的前寒武系	1			0.10	Sanyal et al.〔1971〕
燧石，取自斯威士兰前寒武系昂沃瓦赫特群	4	0.03	0.72	0.33	Sanyal et al.〔1971〕
燧石	2			4.3	Blair〔1956〕
燧石	2			6.9	Blair〔1955〕
粘土岩	12	22.1	32.3	29.0	Blair〔1955〕

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
粘土岩	4	41.2	45 2	43	Morris et al. (1967)
贝壳灰岩	1			56.7	Griffith (1937)
白云岩，西弗吉尼亚州的马丁斯堡				0	Brace (1965)
白云岩，纽约州的韦伯塔克				0.4	Brace (1965)
白云岩（鲁斯特尔），得克萨斯州西部	2	0.41	1.37	0.89	Sanyal et al. (1971)
白云岩	27	0.8	12.4	4.5	U.S.Army (1961)
白云岩	5	3.0	8.6	5.5	Windes (1950)
白云岩	2	19.1	32.7	26	Morris et al. (1967)
白云岩				1.0～22.2	Schoeller (1962)
杂砂岩	2	0.4	4.2	2.3	Schoeller (1962)
混杂石膏	2	1.3	4.0	2.6	Schoeller (1962)
石膏		1.32	3.96	2.64	Meinzer (1923)
石膏，取自巴黎盆地				4.8	Schoeller (1962)
石膏，得克萨斯州西部卡斯特尔	4	3.42	6.43	4.81	Sanyal et al. (1971)
石膏	3	27.2	30.6	28.4	Gard et al. (1961)
石盐	22	0.5	5.1	2.0	U.S.Geological Survey (1964)
石盐	9	0.8	7.1	2.9	Gard et al. (1961)
石灰岩，宾夕法尼亚州的奥克希尔				0	Brace (1965)
石灰岩（邦斯普林思），得克萨斯州西部	1			0.44	Sanyal et al. (1971)
石灰岩，马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	7	0.27	4.36	1.70	Griffith (1937)
白云质灰岩，马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	2			2.08	Griffith (1937)
石灰岩，新墨西哥州的奇诺	3	0.366	4.38	2.44	Norton et al. (1977a)
白云质灰岩，取自下奥陶统		0.1	12.6	2.5	Manger (1963)
石灰岩，亚利桑那州的约翰逊坎普	4	2.35	3.88	3.20	Norton et al. (1977a)
石灰岩（塞勒姆），印第安纳州的贝德福	1			3.630	Hanley et al. (1978)
泥盆系的白云质灰岩	92	0.6	12.9	4.4	Manger (1963)
致密石灰岩，意大利南部	24	0.3	14	4.5	Schoeller (1962)
白云质大理岩状石灰岩	11	0.53	13.36	4.85	Meinzer (1923)
奥陶系的白云质灰岩	216	0.07	22.3	5.4	Manger (1963)
石炭系石灰岩	29	0.6	14.9	5.5	Manger (1963)
志留系的白云质灰岩	31	0.5	15.9	5.5	Manger (1963)
寒武系的白云质灰岩				5.8	Manger (1963)
上石炭统石灰岩	2117	0	31.6	6.3	Manger (1963)
三叠系石灰岩	37	0.4	36.5	9.3	Manger (1963)
二叠系的白云质灰岩	56	3.2	27.1	9.8	Manger (1963)
白云质灰岩，取自德国	6	3.1	28.4	10.4	Schoeller (1962)

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
混合配制的石灰岩	10	1.6	36.5	10.6	Schoeller〔1962〕
下石炭统石灰岩	226	0.9	25.9	11.3	Manger〔1963〕
三叠系的鲕状石灰岩	2109	0	34.4	13.4	Manger〔1963〕
白垩系的白垩状石灰岩	601	0.2	42.8	17.5	Manger〔1963〕
石灰岩	74	6.6	55.7	30	Morris et al.〔1967〕
意大利的海相白云质灰岩	12	10.5	66.6	34.7	Schoeller〔1962〕
非碎屑沉积物	12	0.1	5.5	3.5	Norton et al.〔1977a〕
鲕石	8	3.28	12.44	7.18	Meinzer〔1923〕
石英岩，苏城石英岩，密执安州贾斯珀	1			0.000	Hanley et al.〔1978〕
石英岩，马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	3			0.46	Griffith〔1937〕
石英岩（切斯瑞），佛蒙特州的拉特兰				0.6	Brace〔1965〕
石英岩	1			0.8	Meinzer〔1923〕
石英岩，亚利桑那州的哥洛比-迈阿密	1			1.38	Norton et al.〔1977a〕
石英岩，亚利桑那州的约翰逊坎普	3	2.52	5.35	4.0	Norton et al.〔1977a〕
石英岩	21	0.2	10.0	4.1	Cole et al.〔1962〕
石英岩，宾夕法尼亚州的奇卡斯组	5	3.8	7.8	5.4	Muskat〔1937〕
岩盐（610～640米）		0.1	0.8	0.4	Powers et al.〔1978〕
岩盐（790～823米）		0.3	0.7	0.5	Powers et al.〔1978〕
层状盐，堪萨斯州的韦林顿组哈钦森索尔特段				0.59	Robertson〔1962〕
岩盐，温菲尔德穹窿				1.28	Guido et al.〔1960〕
岩盐，取自得克萨斯州大盐穹窿				1.71	Robertson〔1962〕
层状岩盐	17	0.62	7.17	2.10	Aufricht et al.〔1961〕
岩盐	11	1.5	8.6	3.7	Corps of Engineers〔1965〕
杂色砂岩（德国）			15.9	3.2	Schoeller〔1962〕
砂岩，取自新泽西州和宾夕法尼亚州的斯托克顿组	5	1.3	7.9	4.0	Muskat〔1937〕
志留系砂岩	13	0.5	17.4	4.9	Manger〔1963〕
砂岩，4600m，俄克拉何马州卡特克诺矿区的布罗德组				5.0	Engelhardt〔1960〕
粘土质砂岩，马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	1			6.10	Criffith〔1937〕
砂岩，俄亥俄州的洛雷恩县贝尔砂	1			6.400	Hanley et al.〔1978〕
砂岩，3260米，俄克拉何马州林特塞的石油湾组				6.7	Engelhardt〔1960〕
砂岩，意大利南部	16	0.7	15.3	7.4	Schoeller〔1962〕
砂岩，马里兰州的卡罗尔县和					

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
弗雷德里克县	6	1.62	26.40	9.25	Griffith〔1937〕
二叠系砂岩	334	0.5	24.8	9.6	Manger〔1963〕
砂岩		3.46	22.8	10.22	Meinzer〔1923〕
砂岩（低级杂砂岩）布雷德福组	5	9.0	11.6	10.7	Wyble〔1958〕
寒武系砂岩	70	0.2	28.3	11.1	Manger〔1963〕
砂岩，宾夕法尼亚州克拉伦登组	6	9.9	12.2	11.5	Muskat〔1937〕
斯利波组砂岩，来自12口井的岩心，怀俄明州，南穹窿，俄勒冈盆地				13	Morgan et al.〔1978〕
砂岩	88			14.0	Wolkodoff〔1953〕
砂岩，宾夕法尼亚州的第三布文安格组	16	7.5	17.8	14.0	Muskat〔1937〕
砂岩，宾夕法尼亚州的第三布雷德福组	10	12.2	15.6	14.0	Muskat〔1937〕
泥盆系砂岩	785	0.5	25.6	14.2	Manger〔1963〕
奥陶系砂岩	134	3.6	30.3	14.3	Manger〔1963〕
威尔组砂岩（低级杂砂岩）	6	12.9	16.6	14.5	Wyble〔1958〕
砂岩，宾夕法尼亚州的布雷德福组	5	13.0	17.4	14.8	Muskat〔1937〕
柯克伍德组砂岩（“相当纯的正石英岩”）	5	12.6	18.7	15.2	Wyble〔1958〕
砂岩	16	4.81	28.28	15.89	Meinzer〔1923〕
上石炭统砂岩	6040	0.4	38.7	16.5	Manger〔1963〕
白垩系砂岩	1264	0.4	51.2	16.5	Manger〔1963〕
三叠系砂岩	303	0	35	16.9	Manger〔1963〕
杂色砂岩（德国）	19	2.7	27.2	17.2	Schoeller〔1962〕
含油气砂岩	84	3.4	37.7	17.5	Meinzer〔1923〕
砂岩，1860m，科罗拉多州的韦布兰格利				17.6	Engelhardt〔1960〕
下石炭统砂岩	375	3.8	27.6	17.6	Manger〔1963〕
中新统砂岩	Many	0.4	50.1	18	Manger〔1963〕
砂岩（混合配制的）	23	6.8	25.4	18.3	Schoeller〔1962〕
三叠系砂岩	111	3.6	30.8	18.5	Manger〔1963〕
砂岩（薄片鉴定），威斯康星州的克尔斯维尔	87			19.3	Wilson et al.〔1978〕
砂岩，2280m，怀俄明州的大梅迪辛布的登斯利波组				19.5	Engelhardt〔1960〕
砂岩，4300m，加利福尼亚州的菲尔莫尔上新统				20.0	Engelhardt〔1960〕
渐新统砂岩	Many	0.8	45	22	Manger〔1963〕
始新统砂岩	344	7	46.5	22.4	Manger〔1963〕

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
砂岩，1104m，斯赫赫尼巴诺德兰				23	Engelhardt〔1960〕
砂岩，1575m，意大利的皮亚琴察				23.2	Engelhardt〔1960〕
砂岩，2320m，得克萨斯州戴维斯朗斯，始新统				27.0	Engelhardt〔1960〕
砂岩，1960m，意大利的皮亚琴察				27.0	Engelhardt〔1960〕
砂岩，1120m，斯赫赫尼巴诺德兰				27	Engelhardt〔1960〕
砂岩，得克萨斯州的大学矿区中新统，2160m				28.0	Engelhardt〔1960〕
砂岩，1930m，意大利的皮亚琴察				28.0	Engelhardt〔1960〕
轻微固结砂岩，1483m，德国石油区的埃尔登金巴策德				28	Engelhardt〔1960〕
砂岩，2740m，得克萨斯州菲什斯礁夫的弗里粘土				28.2	Engelhardt〔1960〕
砂岩，突尼斯的中新统	2	20	37	28.5	Schoeller〔1962〕
砂岩，1463m，埃尔登金巴策德				29	Engelhardt〔1960〕
砂岩，得克萨斯州卡替的科卡弗尔特组，2100m				29.8	Engelhardt〔1960〕
砂岩，2530m，意大利的布德诺-奥斯特巴-波洛尼亚的上中新统				30.0	Engelhardt〔1960〕
砂岩，鲁赫莱莫巴梅佩恩，842m				30	Engelhardt〔1960〕
古新统砂岩	18	9.4	53.6	30.8	Manger〔1963〕
砂岩，得克萨斯州利伯蒂县的始新统，2340m				31.5	Engelhardt〔1960〕
砂岩，意大利的皮亚琴察，1595m				31.7	Engelhardt〔1960〕
砂岩，鲁赫莱莫巴梅恩，853m				33	Engelhardt〔1960〕
砂岩（细粒状）	55	13.7	49.3	33	Morris et al.〔1967〕
砂岩，意大利的皮亚琴察，1555m				36.0	Engelhardt〔1960〕
砂岩（中粒状）	10	29.7	43.6	37	Morris et al.〔1967〕
上新世-更新世砂岩	7	38.1	39.7	39.0	Manger〔1963〕
奥陶统页岩，宾夕法尼亚州班戈				1.0	Manger〔1963〕
页岩，诺恩斯奇组的前寒武系	6	1.5	1.7	1.6	Manger〔1963〕
页岩，犹他州的奥菲拉组	4			0.75	Manger〔1963〕
页岩，亚利桑那州的约翰逊坎普	1			2.12	Norton et al.〔1977a〕
页岩，泥盆系-下石炭统页岩	5	1.6	7.6	5.9	Manger〔1963〕

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
页岩	20	1.4	9.7	5	Morris et al.〔1967〕
志留系页岩	7			6.6	Manger〔1963〕
上石炭统和二叠系的页岩	5			8.8	Manger〔1963〕
上石炭统的粘土页岩	23	7.1	17.2	9.9	Manger〔1963〕
下石炭统页岩	2	9.7	11.0	10.4	Manger〔1963〕
二叠系页岩，堪萨斯州的韦林顿组	2	15.3	15.5	15.4	Manger〔1963〕
白垩系页岩，粘土和泥岩	34	0.8	42.3	18.8	Manger〔1963〕
侏罗系页岩，粘土	11	8.8	30.7	20.2	Manger〔1963〕
渐新统和中新统页岩，委内瑞拉东部	40	9.1	35.8	21.7	Manger〔1963〕
页岩	29	3.2	42.2	23.8	U.S.Geological Survey〔1964〕
古新统页岩，马托格罗索州的福特尤尼组	3	21.2	36.9	27.2	Manger〔1963〕
中新统页岩，粘土	8			31.9	Manger〔1963〕
页岩				20～40	Schoeller〔1962〕
粉砂岩	6	1.1	24.9	16.7	Gard〔1961〕
粉砂岩	7	21.2	41.0	35	Morris et al.〔1967〕
次杂砂岩	5	1.9	5.5	3.3	Monfore〔1954〕
石灰华	5	9	38	18	Schoeller〔1962〕
第四系石灰华	4	7.0	27.8	19.2	Manger〔1963〕

表4.3　变质岩的孔隙度（百分比）

（按各类岩石平均孔隙度增加顺序排列）

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
片麻岩，马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	5	0.30	2.23	0.78	Griffith〔1937〕
片麻岩	56	0.7	1.8	1.2	Kessler et al.〔1940〕
片麻岩	30	0.3	4.1	1.3	U.S.Geological Survey〔1964〕
绿岩，新墨西哥州西尔弗城	1			0.669	Norton et al.〔1977a〕
角页，大理岩和绿岩	6	0.2	2.5	1.5	Norton et al.〔1977a〕
大理岩				0.19	Schoeller〔1962〕
白色大理岩，葡萄牙				0.26～0.27	Schoeller〔1962〕
大理岩，佛蒙特州的丹伯里				0.3	Brace〔1965〕
前寒武系大理岩，格林威尔杂岩	9	0.01	1.06	0.35	Manger〔1963〕
大理岩，田纳西州的诺克斯维尔的霍尔斯顿	1			0.52	Hanley et al.〔1978〕
白色大理岩，蒂罗尔				0.59	Schoeller〔1962〕
大理岩，美国东部	100	0.4	0.8	0.6	Manger〔1963〕
白云质大理岩，马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	2			0.60	Griffith〔1937〕
大理岩，马里兰州的卡罗尔县和弗					

续表

岩　　石	样品编号	最小值	最大值	平均值	参考文献
雷德里克县	7	0.31	2.02	0.62	Griffith〔1937〕
大理岩	6	0.7	1.1	0.9	Baldwin et al.〔1909〕
大理岩，亚利桑那州的约翰逊坎普	1			2.62	Norton et al.〔1977a〕
大理岩，意大利的卡拉拉				0.11～0.22	Schoeller〔1962〕
泥质片岩				0.62	Schoeller〔1962〕
片麻岩，花岗岩	36	0.02	1.85	0.80	Meinzer〔1923〕
硅质片岩				0.88	Schoeller〔1962〕
片岩，亚利桑那州的哥洛比－迈阿密的皮纳	1			1.30	Norton et al.〔1977a〕
片岩，亚利桑那州的约翰逊坎普的皮纳尔	1			1.54	Norton et al.〔1977a〕
片岩、板岩，片麻岩	6	0.2	8	2	Norton et al.〔1977a〕
片岩	39	0.6	6.0	2.6	Kessler et al.〔1932〕
片岩，角闪、片麻岩、亚利桑那州的哥洛比-迈阿密					
片岩（其中有些已风化）	5	0.66	8.42	3.12	Norton et al.〔1977a〕
风化的石英云母片岩，佐治亚州的道森县	18	4.4	49.3	38	Morris et al.〔1967〕
蛇纹岩	21	30.7	58.4	46.9	Stewart〔1964〕
矽卡岩，新墨西州的西弗尔城	10	0.6	8.5	2.4	U.S.Geological Survey〔1964〕
矽卡岩，新墨西哥州的奇诺	2	3.96	5.24	4.60	Norton et al.〔1977a〕
矽卡岩（透闪石、白云母、石英、磁铁矿、赤铁矿），亚利桑那州的约翰逊坎普	8 1	0.73	9.43	4.65 14.7	Norton et al.〔1977a〕 Norton et al.〔1977a〕
板岩，马里兰州的卡罗尔县和弗雷德里克县	3	0.00	1.06	—	Griffith〔1937〕
黑色板岩	3	0.40	0.50	0.49	Manger〔1963〕
板岩，尼戈尼艾恩组的前寒武系	2			0.6	Manger〔1963〕
板岩，亚利桑那州的哥洛比-迈阿密	1			0.73	Norton et al.〔1977a〕
板岩	76	0.1	4.3	0.8	Kessler et al.〔1932〕
板岩	6	1.91	5.66	3.12	Schoeller〔1962〕
泥盆系板岩	21	1.3	13.0	3.3	Manger〔1963〕
板岩，页岩	2	0.49	7.55	3.95	Meinzer〔1923〕
石炭系板岩，粉砂岩和粘土		1.2	14.3	5.7	Manger〔1963〕

表4.4 火成岩的渗透率（cm/s）

（孔隙度取的是平均值；加载条件是10^6Pa，NS＝无具体的详细说明）

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	实验温度(℃)	孔隙度	参考文献
夏威夷州的瓦胡岛玄武岩（野外抽水试验）	NS	9.7×10^{-2}	2.9×10^{-1}		水	原地	原地	NS	Davis〔1969〕
中等致密的玄武岩(NS)	NS			1.4×10^{-8}	NS	NS	NS	7.7	Davis〔1969〕
玄武岩（实验室试验）	93	1.9×10^{-9}	4.2×10^{-5}	9.4×10^{-6}	水	NS	15.5	17	Morris et al.〔1967〕
有裂隙的玄武岩，流纹岩粗面岩（野外抽水试验）	37	6.1×10^{-5}	1.3×10^{-2}	9.6×10^{-4}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
爱达荷州的蛇河玄武岩（根据野外抽水试验估计的）	11			9.7×10^{-2}	水	原地	原地	原地	Davis〔1969〕
有孔隙的玄武岩，流纹岩，粗面岩，（野外抽水试验）	10	1.2×10^{-1}	8.1	1.2	NS	NS	NS	NS	Rasmussen〔1964〕
纽约州的哈德逊辉绿岩（实验室试验）				8.1×10^{-13}	水	NS	15.5	43	Ohle〔1951〕
风化的辉绿岩（实验室试验）	4	4.7×10^{-5}	3.8×10^{-4}	1.9×10^{-4}	水	可变的	24	NS	Morris et al.〔1967〕
花岗岩，2524m¹(实验室试验)	1	1.2×10^{-11}	1.9×10^{-8}		水	可变的	24	NS	Potter〔1978〕
花岗岩，2902m¹（实验室试验）	1	8.6×10^{-11}	1.5×10^{-8}		NS	NS	NS	NS	Potter〔1978〕
安大略省（加拿大）的巴里尔矿区的花岗岩（实验室试验）				4.9×10^{-11}	NS	NS	NS	NS	Ohle〔1951〕
怀俄明州拉腊米的谢尔麦花岗岩（实验室试验）				1.0×10^{-9}	NS	NS	NS	NS	Pratt et al.〔1974〕
花岗岩（野外抽水试验）	1			4.0×10^{-9}	水	原地	原地	NS	Delisle〔1975〕
明尼苏达州的奎尤尼斯花岗岩（实验室试验）				4.4×10^{-9}	NS	NS	NS	NS	Ohle〔1951〕
哈德赫特花岗岩（野外水平试验）				4.0×10^{-8}	空气	原地	原地	NS	Morris et al.〔1967〕
哈德赫特花岗岩（野外垂直试验）				7.0×10^{-8}	空气	原地	原地	NS	Boardman et al.〔1966〕
怀我明州拉腊米的谢尔麦花岗岩，有节理（野外抽水试验）				9.8×10^{-7}	水	原地	原地	NS	Pratt et al.〔1974〕
有裂隙的粗粒花岗岩，闪长岩，辉长岩(野外抽水试验)	106	4.7×10^{-7}	4.2×10^{-3}	4.2×10^{-4}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
风化的花岗岩(实验室试验)	7	3.3×10^{-4}	5.2×10^{-3}	1.6×10^{-3}	水	NS	5.5	45	Morris et al.〔1967〕
有裂隙未分异的	556	9.4×10^{-8}	1.9×10^{-2}	8.5×10^{-5}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
密西西比州的马克特地区非详细说明的侵入体（实验室试验）	4	7.5×10^{-11}	2.7×10^{-8}	4.6×10^{-9}	NS	NS	15.5	NS	Stuart et al.〔1954〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	实验温度(°C)	孔隙度	参考文献
密西西比州铁河和马克特地区的铁矿石，赤铁矿等（实验室试验）	29	1.3×10^{-10}	3.3×10^{-5}	1.3×10^{-6}	NS	NS	15.5	NS	Stuart et al. (1954)
北弗吉尼亚试验场的熔结凝灰岩（野外抽水试验）	NS			9.0×10^{-10}	水	原地	原地	原地	Winograd (1971)
北弗吉尼亚试验场的粘土质凝灰岩（实验室试验）	38	9.4×10^{-11}	1.9×10^{-5}	2.8×10^{-8}	水	NS	NS	11.0	Winograd et al. (1975)
北弗吉尼亚试验场的层状凝灰岩（实验室试验）	sev.①	7.3×10^{-10}	1.6×10^{-5}	3.9×10^{-6}	水	NS	NS	38.8	Keller (1960)
北弗吉尼亚试验场的熔结凝灰岩（实验室试验）	sev.	8.9×10^{-10}	5.6×10^{-5}	3.2×10^{-7}	水	NS	NS	14.1	Keller (1960)
北弗吉尼亚试验场的熔结凝灰岩（实验室试验）	sev.	2.1×10^{-8}	5.6×10^{-5}	6.4×10^{-7}	空气	NS	NS	14.1	Keller (1960)
北弗吉尼亚试验场的层状凝灰岩（实验室试验）	sev.	6.8×10^{-8}	3.8×10^{-5}	8.7×10^{-7}	空气	NS	NS	38.8	Keller (1960)
北弗吉尼亚试验场的脆性凝灰岩（实验室试验）	sev.	8.1×10^{-8}	2.6×10^{-5}	1.3×10^{-6}	水	NS	NS	35.5	Keller (1960)
北弗吉尼亚试验场的沸石化凝灰岩（实验室试验）	34	2.4×10^{-9}	2.8×10^{-5}	2.4×10^{-6}	水	NS	NS	37.7	Winograd et al. (1975)
北弗吉尼亚试验场的脆性凝灰岩（实验室试验）	sev.	9.2×10^{-7}	4.0×10^{-5}	5.8×10^{-6}	空气	NS	NS	35.5	Keller (1960)
北弗吉尼亚试验场的层状泡沫凝灰岩(实验室试验)	sev.	3.6×10^{-6}	5.9×10^{-5}	1.1×10^{-5}	水	NS	NS	40.2	Keller (1960)
北弗吉尼亚试验场的层状泡沫凝灰岩(实验室试验)	sev.	4.0×10^{-6}	7.2×10^{-5}	2.0×10^{-5}	空气	NS	NS	40.2	Keller (1960)
凝灰岩(实验室垂直试验)	44	4.7×10^{-9}	8.0×10^{-4}	1.9×10^{-7}	水	NS	15.5	41	Morris et al. (1967)
凝灰岩(实验室垂直试验)	44	4.7×10^{-9}	8.0×10^{-4}	2.4×10^{-4}	水	NS	15.5	41	Morris et al. (1967)
北弗吉尼亚试验场的凝灰岩，凝灰质砂岩（最大值＝实验室破裂试验）	1			6.5×10^{-3}		NS	NS		Eutters et al. (1976)

①几个样品。

表4.5 沉积岩的渗透率（cm/s）
（孔隙度是平均值，加载条件是10⁶Pa，NS＝无具体的详细说明）

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	实验温度(°C)	孔隙度	参考文献
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组的粗粒长石砂岩（实验室垂直试验）	1			1.4×10^{-8}	水	NS	NS	7.9	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组的中粒长石砂岩（实验室垂直试验）	1			4.7×10^{-8}	水	NS	NS	16.1	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组的中粒长石砂岩（实验室水平试验）	1			4.7×10^{-8}	水	NS	NS	16.1	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组的细粒长石砂岩（实验室垂直试验）	1			1.4×10^{-7}	水	NS	NS	14.4	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组很粗粒的长石砂岩（实验室垂直试验）	1			3.3×10^{-7}	水	NS	NS	10.9	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组很粗粒的长石砂岩（实验室垂直试验）	1			4.2×10^{-7}	水	NS	NS	19.4	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组很粗粒的长石砂岩（实验室水平试验）	1			4.7×10^{-7}	水	NS	NS	10.9	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组很粗粒的长石砂岩（实验室水平试验）	1			4.7×10^{-7}	水	NS	NS	19.4	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组中粒长石砂岩（实验室垂直试验）	1			4.7×10^{-7}	水	NS	NS	25.6	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组中粒长石砂岩（实验室水平试验）	1			9.4×10^{-7}	水	NS	NS	25.6	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组的细粒长石砂岩（实验室水平试验）	1			1.4×10^{-6}	水	NS	NS	14.4	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组的粗粒长石砂岩（实验室水平试验）	1			1.4×10^{-6}	水	NS	NS	19.2	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组的粗粒长石砂岩（实验室垂直试验）	1			1.9×10^{-6}	水	NS	NS	19.2	Rima et al. (1962)
宾夕法尼亚州斯托克顿组的中粒长石砂岩（实验室垂直试验）	1			9.4×10^{-6}	水	NS	NS	30.6	Rima et al. (1962)

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	实验温度(°C)	孔隙度	参考文献
宾夕法尼亚州斯托克顿组的中粒长石砂岩（实验室水平试验）	1			1.4×10^{-5}	水	NS	NS	30.6	Rima et al.〔1962〕
碳酸盐，具有大孔隙的(野外抽水试验）	513	4.7×10^{-8}	1.1×10^{-1}	4.4×10^{-3}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
伦敦盆地的白垩（野外抽水试验）	NS	5.8×10^{-7}	1.4×10^{-5}		水	原地	原地	NS	Satchell et al.〔1973〕
南美州的昂沃瓦赫特群燧石（实验室试验）	1			4.8×10^{-13}	海水	NS	NS	0.5	Nagy〔1970〕
加拿大的基威廷燧石（实验室瞬变试验）	1			1.1×10^{-10}	油压	11032	NS	0.10	Sanyal et al.〔1971〕
密西西比州铁河燧石（实验室试验）				1.6×10^{-10}		NS	15.5	NS	Stuart et al.〔1954〕
南美州的昂沃瓦赫特群燧石（实验室瞬变试验）	4	9.7×10^{-13}	2.0×10^{-8}	8.0×10^{-7}	油压	11032	NS	0.72	Sanyal et al.〔1971〕
燧石（实验室试验）	7	7.0×10^{-9}	6.4×10^{-7}	1.9×10^{-7}	气体	2068	NS	1.7	Smith et al.〔1970〕
新西兰的怀拉基火山碎屑岩（野外加压）	8	6.0×10^{-7}	1.0×10^{-3}	1.3×10^{-7}	原处	原地	原地	NS	Grindley〔1965〕
粘土岩(实验室垂直试验）	2			9.4×10^{-8}	水	NS	15.5	43	Morris et al.〔1967〕
西弗吉尼亚州的普里斯顿的煤（野外实验）	几个号	2.3×10^{-9}	8.3×10^{-9}		原处	原地	原地	NS	Rauch〔1979〕
怀俄明州的坎贝尔县的煤（野外水平试验）	NS	1.7×10^{-4}	3.5×10^{-4}		水	原地	原地	NS	Snoeberger et al.〔1975〕
怀俄明州的坎贝尔县的煤（野外垂直试验）				1.2×10^{-6}	水	原地	原地	NS	Snoeberger et al.〔1975〕
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组非常粗粒的砾岩（实验室水平试验）	1			1.4×10^{-7}	水	NS	NS	7.1	Rima et al.〔1962〕
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组非常粗粒的砾岩（实验室垂直试验）	1			1.9×10^{-7}	水	NS	NS	71.	Rima et al.〔1962〕
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组非常粗粒的砾岩（实验室垂直试验）	1			3.3×10^{-7}	水	NS	NS	17.3	Rima et al.〔1962〕
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组非常粗粒的砾岩（实验室水平试验）	1			4.2×10^{-7}	水	NS	NS	17.3	Rima et al.〔1962〕
田纳西州东部的白云岩＞80%；石灰岩＜20%（实验室试验）	6	8.7×10^{-11}	3.8×10^{-8}	9.7×10^{-9}		NS	NS	NS	Ohle〔1951〕
得克萨斯州西部的拉斯特勒组白云岩(实验室瞬变试验）	2	4.2×10^{-8}	9.0×10^{-8}	6.6×10^{-8}	油压	10342	NS	0.87	Sanyal〔1971〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	实验温度(°C)	孔隙度	参考文献
白云岩（实验室试验）				9.7×10^{-7}		NS	NS	6.3	Murrary〔1960〕
白云岩(实验室垂直试验)	3	3.8×10^{-9}	3.3×10^{-6}	1.4×10^{-6}	水	NS	15.5	26	Morris et al.〔1967〕
德国西北部的白云岩（实验室试验）				2.9×10^{-6}		NS	NS	13.0	Engelhardt〔1960〕
得克萨斯州的麦克纳特白云岩（实验室试验）	1404			5.3×10^{-6}		NS	NS	NS	Warren et al.〔1961〕
白云岩（实验室试验）				1.5×10^{-5}	NS	NS	NS	11.9	Murrary〔1960〕
下石炭统白云岩（实验室试验）				2.8×10^{-4}	NS	NS	NS	27.8	Murrary〔1960〕
密西西比州的铁河杂砂岩（实验室试验）	8	2.5×10^{-10}	1.3×10^{-7}	2.5×10^{-8}	NS	NS	15.5	NS	Stuart et al.〔1954〕
布雷德福组的低级杂砂岩（实验室垂直试验）	2			4.8×10^{-7}	NS	34473	NS	10.1	Wyble〔1958〕②
威尔组的低级杂砂岩（实验室水平试验）	3			6.8×10^{-7}	NS	34473	NS	13.4	Wyble〔1958〕②
威尔组的低级杂砂岩（实验室垂直试验）	3			8.6×10^{-7}	NS	34473	NS	13.2	Wyble〔1958〕②
布雷德福组的低级杂砂岩（实验室垂直试验）	2	9.1×10^{-7}	9.2×10^{-7}	9.2×10^{-7}	NS	大气压力	NS	11.0	Wyble〔1958〕②
威尔组的低级杂砂岩（实验室水平试验）	3	1.0×10^{-6}	3.1×10^{-6}	1.8×10^{-6}	NS	大气压力	NS	14.6	Wyble〔1958〕②
威尔组的低级杂砂岩（实验室垂直试验）	3	1.6×10^{-6}	4.5×10^{-6}	2.6×10^{-6}	NS	大气压力	NS	14.3	Wyble〔1958〕②
布雷德福组的低级杂砂岩（实验室水平试验）	3			2.9×10^{-6}	NS	34473	NS	9.2	Wyble〔1958〕②
布雷德福组的低级杂砂岩（实验室水平试验）	3	4.6×10^{-7}	9.9×10^{-6}	3.9×10^{-6}	NS	大气压力	NS	10.4	Wyble〔1958〕②
加利福尼亚州门多斯诺县有裂隙的杂砂岩（野外示踪试验）	11	7.0×10^{-6}	1.2×10^{-4}	4.5×10^{-5}	水	原地	原地	NS	Lewis et al.〔1936〕
得克萨斯州西部的卡斯特利组的石膏（实验室垂直瞬变试验）	1			1.2×10^{-10}	油压	11031	NS	4.8	Sanyal〔1971〕
得克萨斯州西部的卡斯特利组的石膏（实验室水平瞬变试验）	1			3.0×10^{-8}	油压	11031	NS	4.6	Sanyal〔1971〕
科罗拉多州的克尔麦石灰岩（实验室试验）	2			4.2×10^{-13}	空气	大气压力	NS	NS	Rove〔1947〕
亚利桑那州采矿区的比斯比石灰岩（实验室试验）	许多			3.3×10^{-12}	空气	大气压力	NS	NS	Rove〔1947〕
田纳西州东部的石灰岩>80%白云岩<10%（实验室试验）	4	5.8×10^{-13}	6.3×10^{-12}	3.6×10^{-12}	NS	NS	NS	NS	Ohle〔1951〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
特里斯替区的石灰岩（实验室试验）	22			4.4×10^{-11}	空气	大气压力	NS	NS	Rove〔1947〕
田纳西州东部的石灰岩>80%；白云岩<20%（实验室试验）	3	6.9×10^{-11}	4.6×10^{-10}	2.8×10^{-10}	NS	NS	NS	NS	Ohle〔1951〕
得克萨斯州西部的邦斯普林思组石灰岩（实验室瞬变试验）	1			4.7×10^{-10}	油压	9652	NS	0.44	Sanyal〔1971〕
新墨西哥区的汉诺佛的海百合纲石灰岩（实验室试验）	8			1.3×10^{-9}	空气	大气压力	NS	NS	Rove〔1947〕
澳大利亚的比特斯普林思灰岩(实验室瞬变试验)	1			3.9×10^{-8}	油压	9652	NS	0.24	Sanyal〔1971〕
北弗吉尼亚试验场的白云质灰岩(实验室试验)	13	9.4×10^{-10}	4.7×10^{-6}	4.7×10^{-7}	自来水	NS	NS	2.3	Winograd et al.〔1975〕
石灰岩（实验室试验）				9.7×10^{-7}	NS	NS	NS	8.4	Murrary〔1960〕
德国西北部的鲕状石灰岩（实验室试验）				7.4×10^{-6}	NS	NS	NS	10.1	Archie〔1952〕
德国西北部的贝壳石灰岩（实验室试验）				6.3×10^{-5}	NS	NS	NS	19.8	Engelhardt〔1960〕
德国西北部的贝壳石灰岩（实验室试验）				2.5×10^{-4}	NS	NS	NS	23.6	Engelhardt〔1960〕
鲕状石灰岩(实验室试验)				3.2×10^{-4}	NS	NS	NS	21.6	Archie〔1952〕
石灰岩(实验室垂直试验)	28	1.4×10^{-8}	7.5×10^{-3}	1.1×10^{-3}	水	NS	15.5	30	Morris et al.〔1967〕
德国西北部的珊瑚鲕状灰岩（实验室试验）				2.6×10^{-3}		NS	NS	19.5	Engelhardt〔1960〕
堪萨斯州的哈钦森层状盐（实验室试验）	1	4.9×10^{-10}	2.2×10^{-8}		煤油	16892	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	2.0×10^{-10}	5.9×10^{-8}		海水	22063	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	4.9×10^{-10}	4.9×10^{-7}		煤油	17236	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	2.7×10^{-8}	9.8×10^{-8}		海水	75884	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	5.3×10^{-8}	2.1×10^{-7}		煤油	11031	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	1.5×10^{-7}	4.3×10^{-7}		海水	7584	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	1.4×10^{-7}	4.4×10^{-7}		海水	7884	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	1.7×10^{-7}	9.8×10^{-7}		煤油	3792	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	1.1×10^{-7}	3.9×10^{-6}		海水	3792	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	3.1×10^{-6}	4.1×10^{-6}		煤油	3792	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	1.7×10^{-6}	6.1×10^{-6}		煤油	3792	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
堪萨斯州的哈钦森层状盐（实验室试验）	1	0	0		海水	7584	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
堪萨斯州的哈钦森层状盐（实验室试验）	1	0	7.1×10^{-9}		海水	7584	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
堪萨斯州的哈钦森层状盐（实验室试验）	1	0	1.5×10^{-8}		海水	14824	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
堪萨斯州的哈钦森层状盐（实验室试验）	1	0	0		海水	10342	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
堪萨斯州的哈钦森层状盐（实验室试验）	1	0	0		海水	3447	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
堪萨斯州的哈钦森层状盐（实验室试验）	1	0	0		煤油	3792	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验试验）	1	0	1.4×10^{-7}		海水	7584	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
得克萨斯州的大萨林盐丘（实验室试验）	1	0	4.9×10^{-8}		海水	11031	NS	NS	Gloyna et al.〔1961〕
宾夕法尼亚州的克拉伦登组砂岩(实验室垂直试验)	6	7.3×10^{-8}	3.2×10^{-6}	1.3×10^{-6}	水	NS	NS	14.6	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的布雷德福组砂岩(实验室水平试验)	5	3.5×10^{-7}	3.1×10^{-6}	1.7×10^{-6}	水	NS	NS	13.1	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的布雷德福组砂岩（实验室垂直试验）	8	5.0×10^{-7}	4.4×10^{-6}	2.1×10^{-6}	空气	NS	NS	12.9	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的布雷德福组砂岩(实验室垂直试验)	38	6.1×10^{-8}	1.3×10^{-4}	7.0×10^{-6}	水	NS	NS	11.7	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的第二文安格组砂岩(实验室垂直试验)	8	8.0×10^{-7}	1.3×10^{-4}	3.3×10^{-5}	水	NS	NS	14.3	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的瓦恩替组砂岩（实验室水平试验）	7	2.4×10^{-6}	1.6×10^{-4}	3.6×10^{-5}	水	NS	NS	16.8	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的凯恩组砂岩（实验室水平试验）	2	3.2×10^{-5}	5.9×10^{-5}	4.5×10^{-5}	水	NS	NS	22.1	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的凯恩组砂岩（实验室垂直试验）	5	1.3×10^{-6}	2.1×10^{-4}	6.9×10^{-5}	水	NS	NS	17.6	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的威尔科克斯组砂岩（实验室水平试验）	2	7.3×10^{-5}	8.5×10^{-5}	7.9×10^{-5}	水	NS	NS	14.2	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的第三文安格组砂岩(实验室垂直试验)	13	1.5×10^{-8}	5.2×10^{-4}	1.0×10^{-4}	空气	NS	NS	11.5	Muskat〔1937〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
俄克拉何马州的瓦恩替组砂岩（实验室垂直试验）	7	1.1×10^{-5}	4.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}	水	NS	NS	16.5	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的约翰逊组砂岩（实验室水平试验）	4	7.7×10^{-7}	2.7×10^{-4}	1.2×10^{-4}	水	NS	NS	15.9	Muskat〔1937〕
得克萨斯州东部的伍德宾组砂岩(实验室水平试验)	2	1.9×10^{-5}	3.3×10^{-4}	1.7×10^{-4}	水	NS	NS	26.3	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的克伦威尔组砂岩(实验室水产试验)	13	3.7×10^{-5}	6.4×10^{-4}	2.2×10^{-4}	水	NS	NS	20.0	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的约翰逊组砂岩（实验室垂直试验）	6	7.9×10^{-7}	6.7×10^{-4}	2.5×10^{-4}	水	NS	NS	14.1	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的贝瑞组砂岩（实验室垂直试验）	2	2.5×10^{-4}	2.8×10^{-4}	2.6×10^{-4}	水	NS	NS	19.4	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的克伦威尔组砂岩(实验室垂直试验)	14	5.2×10^{-5}	7.4×10^{-4}	2.8×10^{-4}	水	NS	NS	19.8	Muskat〔1937〕
俄克拉何马州的威尔科克斯组砂岩（实试室垂直试验）	4	7.6×10^{-5}	6.5×10^{-4}	2.9×10^{-4}	水	NS	NS	13.1	Muskat〔1937〕
得克萨斯州东部的伍德宾组砂岩(实验室垂直试验)	8	1.1×10^{-4}	3.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	水	NS	NS	24.6	Muskat〔1937〕
宾夕法尼亚州的第二文安组砂岩（15.5）	4	1.1×10^{-5}	6.4×10^{-5}	3.4×10^{-5}	水	NS	NS	15.5	Muskat〔1937〕
加拿大西部下白垩系的很细粒的粘土砂岩，2012m（实验室垂直试验$d_{50}=40$）	1			1.6×10^{-13}	海水	原地	36	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的很细粒的粉砂质和粘土质砂质，1414 m，（实验室垂直试验$d_{50}=100$）	1			1.9×10^{-12}	海水	原地	35	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的很细粒的纯粉砂质和粘土质砂岩，1924 m（实验室垂直试验$d_{50}=100$）	1	1.0×10^{-12}	2.9×10^{-12}	1.9×10^{-12}	变化的	变化的	35-36	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的很细粒的粉砂质和粘土质砂岩，1414 m（实验室水平试验$d_{50}=100$）	1	4.7×1.0^{-12}	1.1×10^{-11}	7.7×10^{-12}	变化的	变化的	35-36	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的细粒—很细粒的粉砂质和粘土质砂岩，1519 m，（实验室垂直试验$d_{50}=135$）	1			1.9×10^{-11}	海水	原地	35	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的细粒粘土质和粉砂质砂岩，	1			3.2×10^{-10}	海水	原地	35	NS	Young et al.〔1964〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(.C)	孔隙度	参考文献
1519 m（实验室水平试验 d_{50}=135）									
加拿大西部下白垩统的含一小部分粘土质中等颗粒砂岩，1423 m（实验室水平试验）	1			9.7×10^{-9}	海水	原地	35	NS	Young et al.〔1964〕
得克萨斯州布雷索热县的乔科莱特巴尤矿区砂岩（实验室和野外试验）	NS	5.0×10^{-8}	1.3×10^{-3}	3.0×10^{-6}	原地	原地	原地	2到27	Bebout et al.〔1978〕
伍克伍德组砂岩（实验室垂直试验）	2			5.5×10^{-6}	NS	34473	NS	15.0	Wyble〔1958〕②
德国西北部砂岩（d_{50}=0.4mm，<20μ=15%）				6.8×10^{-6}	空气	NS	NS	10.2	Engelhardt〔1960〕
伍克伍德组砂岩（实验室水平试验）	2			7.9×10^{-6}	NS	34473	NS	14.8	Wyble〔1958〕②
伍克伍德组砂岩（实验室垂直试验）	2	7.1×10^{-7}	2.1×10^{-5}	1.1×10^{-5}	NS	大气压力	NS	15.8	Wyble〔1958〕②
伍克伍德组砂岩（实验室水平试验）	2	2.3×10^{-6}	3.4×10^{-5}	1.8×10^{-5}	NS	大气压力	NS	15.6	Wyble〔1958〕②
俄克拉何马州的“布罗米德组”砂岩③（实验室试验）	1371			3.1×10^{-5}	NS	NS	NS	NS	Warren et al.〔1961〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.04mm，<20μ=15%）				3.4×10^{-5}	空气	NS	NS	24.5	Engelhardt〔1960〕
加拿大西下白垩统含小部分粘土的中颗粒砂岩（实验室垂直试验）	1			4.0×10^{-5}	海水	原地	35	NS	Young et al.〔1964〕
怀俄明州登斯利波的非常细粒到细粒的的砂岩（实验室试验，粘土比例<2%）	许多			6.6×10^{-5}	空气	NS	NS	13.8	Morgan et al.〔1978〕
有裂隙的砂岩，粉砂岩，页岩（野外抽水试验）	326	4.7×10^{-8}	7.1×10^{-3}	7.1×10^{-5}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.35mm，<20μ=3.1%）				9.7×10^{-5}	空气	NS	NS	19.0	Engelhardt〔1960〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.10mm，<2μ=6.5%）				1.0×10^{-4}	空气	NS	NS	24.7	Engelhardt〔1960〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.10mm，<20μ=7.5%）				1.7×10^{-4}	空气	NS	NS	27.2	Engelhardt〔1960〕
加利福尼亚州的主要储油砂岩④（实验室试验）	1233	3.9×10^{-9}	2.7×10^{-3}	1.7×10^{-4}	水	NS	15.5	NS	Johnston et al.〔1945〕
细粒砂岩（实验室试验）	20	3.8×10^{-7}	1.7×10^{-3}	2.4×10^{-4}	水	NS	15.5	33	Morris et al.〔1967〕
细粒砂岩（实验室水平试验）	20	4.7×10^{-7}	2.3×10^{-3}	3.3×10^{-4}	水	NS	15.5	33	Morris et al.〔1967〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
德国西北部砂岩（d_{50}=0.11mm，<20μ=9.5%）				3.8×10^{-4}	空气	NS	NS	27.4	Engelhardt〔1960〕
得克萨斯湾海岸的中新统松散固结的砂岩（实验室井壁岩心试验）	2			4.6×10^{-4}	NS	NS	NS	32.5	Donaldson〔1973〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.4mm，<20μ=6%）				4.9×10^{-4}	空气	NS	NS	23.6	Engelhardt〔1960〕
有裂隙的砂岩（野外抽水试验）	182	3.3×10^{-7}	5.4×10^{-3}	5.1×10^{-4}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.09mm，<20μ=2.6%）				5.9×10^{-4}	空气	NS	NS	22.8	Engelhardt〔1960〕
加利福尼亚州的主要储油砂岩④（实验室试验）	1223	3.8×10^{-7}	4.9×10^{-3}	9.8×10^{-4}	水	NS	15.5	NS	Johnston et al.〔1945〕
得克萨斯州东部的伍德宾组砂岩（实验室试验）	1号 NS			1.2×10^{-3}	CCL	NS	NS	NS	Wyckoff et al.〔1934〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.3mm，<20μ=2.3%）				1.3×10^{-3}	空气	NS	NS	18.5	Engelhardt〔1960〕
得克萨斯州东部的伍德宾组砂岩（实验室试验）	4号 NS			1.4×10^{-3}	水	NS	NS	NS	Wyckoff et al.〔1934〕
得克萨斯州东部的伍德宾组砂岩（实验室试验）	2号 NS			1.5×10^{-3}	水	NS	NS	NS	Wyckoff et al.〔1934〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.16mm，<20μ=2.0%）				1.5×10^{-3}	空气	NS	NS	26.9	Engelhardt〔1960〕
得克萨斯州东部的伍德宾组砂岩（实验室试验）	3号			1.6×10^{-3}	空气	NS	NS	NS	Wyckoff et al.〔1934〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.2mm，<20μ=10%）				2.3×10^{-3}	空气	NS	NS	28.5	Engelhardt〔1960〕
加利福尼亚州的主要储油砂岩④（实验室试验）	1233	4.2×10^{-6}	1.3×10^{-2}	2.7×10^{-3}	空气	NS	15.5	NS	Johnston et al.〔1945〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.25mm，<20μ=1.5%）				3.0×10^{-3}	空气	NS	NS	25.1	Engelhardt〔1960〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.25mm，<20μ=2.5%）				3.1×10^{-3}	空气	NS	NS	24.6	Engelhardt〔1960〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.21mm，<20μ=1.6%）				3.1×10^{-3}	空气	NS	NS	27.8	Engelhardt〔1960〕
中粒砂岩（实验室垂直试验）	13	2.4×10^{-6}	1.0×10^{-2}	3.6×10^{-3}	水	NS	15.5	37	Morris et al.〔1967〕
德国西北部砂岩（d_{50}=0.7mm，<20μ=2.1%）				4.7×10^{-3}	空气	NS	NS	19.9	Engelhardt〔1960〕
弗吉尼亚州诺福克的细到中粒的胶结不好的砂岩（实验室试验）	12			4.9×10^{-3}	水	NS	NS	NS	Brown et al.〔1937〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
德国西北部砂岩 (d_{50}=0.35mm,<20μ=1.1%)				5.5×10^{-3}	空气	NS	NS	24.5	Engelhardt〔1960〕
德国西北部砂岩 (d_{50}=0.25mm,<20μ=0.8%)				7.2×10^{-3}	空气	NS	NS	29.5	Engelhardt〔1960〕
德国西北部砂岩 (d_{50}=0.50mm,<20μ=1.3%)				9.5×10^{-3}	空气	NS	NS	26.2	Engelhardt〔1960〕
意大利早上新统页岩，4925m（实验室试验）	1			9.7×10^{-12}	NS	NS	NS	5.9	Neglia〔1979〕
上石炭统页岩（实验室试验）	NS			8.7×10^{-11}	NS	NS	NS	NS	Gondouin et al.〔1958〕
意大利上新统下部页岩，3532m，（实验室试验）	1			1.4×10^{-10}	NS	NS	NS	12.0	Neglia〔1979〕
意大利上三叠统页岩，6168m，（实验室试验）	1			1.6×10^{-10}	NS	NS	NS	12.5	Neglia〔1979〕
意大利上新统下部页岩，3034m，（实验室试验）	1			2.2×10^{-10}	NS	NS	NS	13.3	Neglia〔1979〕
意大利上新统下部页岩，3919m（实验室试验）	1			4.4×10^{-10}	NS	NS	NS	11.8	Neglia〔1979〕
意大利中新统中部页岩，1957m（实验室试验）	1			2.6×10^{-9}	NS	NS	NS	16.6	Neglia〔1979〕
白垩纪页岩（实验室试验）	NS			3.9×10^{-9}	NS	NS	NS	NS	Gondouin et al.〔1958〕
意大利上新统下部页岩，4295m(实验室试验)	1			3.9×10^{-9}	NS	NS	NS	10.3	Neglia〔1979〕
意大利上新统下部页岩，11367m（实验室试验）	1			4.8×10^{-8}	NS	NS	NS	23.0	Neglia〔1979〕
有裂隙的页岩（野外抽水试验）	93	2.4×10^{-6}	5.7×10^{-3}	3.5×10^{-4}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
密西西比州的铁河粉砂岩（实验室试验）	2	1.5×10^{-9}	4.3×10^{-8}	2.3×10^{-8}	NS	NS	15.5	NS	Stuart et al. 〔1954〕
加拿大西部下白垩统的粗粒粘土质粉砂岩，1650m（实验室垂直试验d_{50}=40）	1	2.3×10^{-13}	4.2×10^{-13}	3.2×10^{-13}	海水	变化的	36	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的粗粒粘土质粉砂岩，1426m（实验室垂直试验 d_{50}=35～40）	1			4.7×10^{-13}	海水	原地	36	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的粗粒粘土质粉砂岩，1426m（实验室垂直试验 d_{50}=35～40）	1			1.3×10^{-12}	海水	原地	35	NS	Young et al.〔1964〕
加拿大西部下白垩统的粗	1	3.8×10^{-13}	2.9×10^{-12}	1.4×10^{-12}	变化的	变化的	35-36	NS	Young et al.

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
粒粘土质粉砂岩，1680m（实验室垂直试验）									〔1964〕
加拿大西部下白垩统的分选差的非常粗粒的粉砂岩，1665m（实验室垂直试验）	1			2.9×10^{-12}	海水	原地	35	NS	Young et al. 〔1964〕
加拿大西部下白垩统的分选差的非常粗粒的粉砂岩，1665 m（实验室水平试验）	1			2.9×10^{-12}	海水	原地	35	NS	Young et al. 〔1964〕
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组砂质粉砂岩（实验室水平试验）	1			1.0×10^{-7}	水	NS	NS	9.7	Rima et al. 〔1962〕
宾夕法尼亚州东南的斯托克顿组砂质粉砂岩（实验室水平试验）	1			1.4×10^{-7}	水	NS	NS	9.7	Rima et al. 〔1962〕
粉砂岩(实验室垂直试验)	8	9.4×10^{-10}	1.4×10^{-6}	1.9×10^{-7}	水	NS	15.5	35	Morris et al. 〔1967〕

①统计思考讨论中请查看原始参考文献；
②试验报告列出了围压的作用；
③统计思考讨论中请查看原始参考文献；
④按渗透物的不同选择试验样品，讨论中请看原始参考文献。

表4.6 变质岩的渗透率（cm/s）

（孔隙度为平均值，加载条件=10^6Pa，NS=无具体的详细说明）

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
内华达州试验场的埃莉那组泥质岩，358m（仔细控制的实验室垂直试验）	1	7.8×10^{-13}	1.1×10^{-12}		水	原地	20	NS	Lin 〔1978〕
内华达州试验场的埃莉那组泥质岩，102m（仔细控制的实验室垂直试验）	1	3.1×10^{-12}	3.6×10^{-12}		水	原地	20	NS	Lin 〔1978〕
内华达州试验场的埃莉那组泥质岩，102m（仔细控制的实验室垂直试验）	1	5.4×10^{-12}	9.8×10^{-12}		水	原地	20	NS	Lin 〔1978〕
内华达州试验场的埃莉那组泥质岩，361(仔细控制的实验室垂直试验）	1	1.1×10^{-12}	2.3×10^{-12}		水	原地	20	NS	Lin 〔1978〕
内华达州试验场的埃莉那组有裂隙的泥质岩，358m（仔细控制的实验室垂直试验）	1	7.9×10^{-10}	1.1×10^{-9}		水	原地	20	NS	Lin 〔1978〕

续表

样品说明（注释）	样品编号	最小值	最大值	平均值	渗透物	加载条件	试验温度(°C)	孔隙度	参考文献
内华达州试验场的埃莉那组泥质岩，361m（仔细控制的实验室水平试验）	1	2.3×10^{-9}	3.9×10^{-9}		水	原地	20	NS	Lin〔1978〕
内华达州试验场的埃莉那组泥质岩，102m（仔细控制的实验室垂直试验）	1	6.0×10^{-8}	1.1×10^{-7}		水	原地	20	NS	Lin〔1978〕
内华达州试验场的泥质岩，粉砂岩(实验室试验)	9	3.3×10^{-11}	3.3×10^{-10}	9.4×10^{-11}	水	NS	NS	2.0	Winograd et al.〔1975〕
有裂隙的片麻岩（野外抽水试验）	131	4.7×10^{-8}	2.6×10^{-3}	6.6×10^{-5}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
有裂隙的绿岩（野外抽水试验）	134	5.7×10^{-6}	9.9×10^{-3}	7.0×10^{-4}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
加利福尼亚州的普拉塞尔具有裂隙的变质沉积岩（野外现场示踪物试验）	6	1.7×10^{-5}	7.2×10^{-5}	3.8×10^{-5}	水	野外	野外	NS	Lewis et al.〔1956〕
内华达州试验场的石英岩（实验室试验）	9	9.4×10^{-11}	4.7×10^{-9}	9.4×10^{-10}	水	NS	NS	1.9	Winograd et al.〔1975〕
密西西比州的马克特地区的石英岩（实验室试验）				1.6×10^{-9}	NS	NS	15.5	NS	Stuart et al.〔1954〕
有裂隙的石英岩（野外抽水试验）	135	1.9×10^{-7}	2.6×10^{-3}	3.7×10^{-4}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
密西西比州铁河的云母片岩（实验室试验）	1			1.8×10^{-9}	NS	NS	15.5	NS	Stuart et al.〔1954〕
片岩（实验室垂直试验）	17	1.9×10^{-9}	1.1×10^{-3}	1.9×10^{-4}	NS	NS	15.5	38	Morris et al.〔1967〕
佐治亚州道森县风化的石英云母片岩(实验室试验)	21	1.9×10^{-8}	2.7×10^{-3}	3.8×10^{-4}	NS	NS	15.5	46.9	Stewart〔1964〕
有裂隙的片岩（野外抽水试验）	481	4.7×10^{-7}	1.2×10^{-2}	1.2×10^{-3}	水	原地	原地	NS	Rasmussen〔1964〕
密西西比州铁河的板岩（实验室试验）	12	2.0×10^{-10}	3.9×10^{-8}	4.4×10^{-9}	NS	NS	15.5	NS	Stuart et al.〔1954〕
板岩（实验室垂直试验）	8	1.9×10^{-10}	4.7×10^{-8}	9.4×10^{-9}	NS	NS	15.5	NS	Morris et al.〔1967〕

表4.7　根据野外试验和利用野外资料模拟模型求得分配系数
（n＝用百分比表示的孔隙度）

岩石类型	同位素	C_d	n	方法学	参考文献
印第安纳州蛇河平原含水层玄武岩	锶-90	3.0	10	有刻度的区域数字模拟结果	Robertson〔1974〕
印第安纳州蛇河平原玄武岩	锶-90	15.0	10	有刻度的区域数字模拟结果	Robertson〔1977〕
印第安纳州蛇河平原玄武岩	锶-90	5	10	有刻度的区域数字模拟结果	Robertson〔1977〕
印第安纳州蛇河平原玄武岩	氚	0	10～40	有刻度的区域数字模拟结果	Robertson〔1977〕
印第安纳州蛇河平原沉积岩	锶-90	100	30～45	有刻度的区域数字模拟结果	Robertson〔1977〕
田纳西州奥克岭康萨格组页岩	钴-60	6.1～65.3	NS	野外井样试验	Means et al.〔1978〕

表4.8　野外测量的分散度（据Anderson，1979）

岩石类型	分散度，α(m)（方向没详细说明）	孔隙度（%）	距离（m）	方　法
英格兰多塞特白垩	1.0	2.3	8	二个井孔试验
英格兰多塞特白垩（有裂隙的）	3.1	0.5	8	二个井孔试验
新墨西哥州卡尔斯巴德白云岩（有裂隙的）	38.1	12	16.8	二个井孔试验
南卡罗来纳州萨凡纳河平原片岩—片麻岩（有裂隙的）	134	0.08	538	二个井孔试验

表4.9　根据模拟模型结果求得的区域分散度（据Anderson，1979）

岩石类型	分散度，α（m） Long.	分散度，α（m） T/L	n（%）	模型类型	节点间隔（m）
华盛顿州哈佛地区的玄武岩（有裂隙的）	30.5	0.6	NS	区域的	NS
爱达荷州玄武岩(有裂隙的)	91	1.0	10	区域的	640
爱达荷州玄武岩(有裂隙的)	91	1.5	10	区域的	640
佐治亚州不伦瑞克石灰岩	61	0.3	35	区域的	变化的

n＝孔隙度；Long.＝平行于流线的经度；T/L＝垂直于流动的横向与经度分散度之比；NS＝无具体详细的说明。

第五章　岩石的强度

M. M. 辛格

5.0 术 语 表

a	特征尺寸
a_i, b_i	方程（5.6）中的拟合参数
C_a	压碎强度
C_o	单轴抗压强度
C_s	剪切强度
C_T	张裂强度
C	裂纹半长度
D_g	扩散率，颗粒边界
D_v	扩散率，体积
d	直径
E	扬氏模量
f	指定函数关系
G	剪切模量
I_s	点载荷指数，$I_s=P/d^2$
J	迟滞的弹性屈服
J_o	与时间无关的弹性屈服
J（t）	蠕变屈服
K	虎克弹性常数
k	破裂速度的比例因子
L	长度
h	圆板或环形样品的厚度
P	外载荷或破裂载荷
P_a	概率
Q	每单位破裂表面积释放的能量
Q_c	每单位破裂表面积释放能量的临界值
Q_e	平板的每单位厚度贮存的弹性能量
Q_k	动能损耗
Q_s	平板的每单位面积的破裂面能量
Q_γ	比表面能
q	固体活性能量
R	通用的气体常数
r	环形物或岩心的半径
S_m	断裂模量
T	绝对温度
t	时间
W	岩石重量

希腊符号

α	相关材料常数
β	与材料中缺陷分布有关的常数
$\dot{\gamma}$	剪切应变
$\dot{\varepsilon}$	蠕变率或应变率
ε_d	膨胀应变体积
η	粘度
μ	内摩擦系数
μ_c	裂面之间的摩擦系数
γ	泊松比
ξ	比重
π	数学常数，$\pi=3.1415\cdots$
σ	正应力
τ	剪应力
ϕ	指定函数关系

5.1 引　　言

5.1.1定义

在本章之始，引出如下一些定义是适宜的：

强度是岩石抵抗载荷而不受其屈服或破裂的能力。

屈服点是应变明显增大而应力不再出现任何明显增大时的应力。

岩石的**极限强度**是破裂前达到的最大应力值。超过屈服点和达到这种极限强度值以前，材料一般仍有抵抗应变、恢复原状的趋势。

抗张强度是拉张的极限强度。

抗压强度是压缩的极限强度。

剪切强度是剪切的极限强度。

抗弯强度是弯曲的极限强度。它也叫作弯曲的破裂模量，尽管它是岩石的强度而不是模量。

疲劳是在应力重复作用下，岩石强度的降低。疲劳损伤一般是由沿着某些结晶方向出现的滑动引起的。

蠕变是一种逐渐的流动或是在施加恒定载荷的情况下，物体尺寸的变化。蠕变是一种塑性变形，通常与沿着单个晶体的结晶方向出现的滑动伴生，并与颗粒边界上物质的一些流动一起出现。

5.1.2 岩体的强度

岩体性质与岩石物质性质的差异，在前面几章中已经阐述过了(特别是第一和二章)。然而，这需要详细说明，特别是对参考强度和变形模量要进行详尽阐述。模量的变化将在第六章讨论，而强度的变化则在本章论述。岩体的强度很大程度上取决于断裂、节理、褶皱和其它构造特征的发育程度。因而，岩体的强度一般都比实际岩石物质的强度低得多。

岩石物质强度与岩体强度之间的关系现在还没有得到确定。它们随岩石类型、断裂程度以及区域地质情况而变化。然而，人们已经注意到岩体强度值是在岩石物质强度的10～50%之间变化。

人们已经根据实验室数据估算了岩体强度，也就是根据岩石物质强度的测量〔Herget et al.,1976〕，经验估算〔Protodyakonov，1964〕，根据裂纹分布的统计知识〔Weibull，1939〕，样品尺寸〔Beiniawski，1968；Pratt et al.，1972〕，断裂的程度，即岩体的质地〔Hansagi，1965〕，节理面的产状〔Manev et al.，1970；Kendorski，1975〕，节理数量〔Duncan et al.,1965，1966；Barton，1973〕，波传播特性〔Schneider，1970〕，和岩体的分类〔Hoek et al，1980〕。

5.2 单轴抗压强度

单轴压缩试验是依照ASTM D2938给出的步骤进行的。试验样品通常是NX-岩心（直径54mm），如结果可以进行适当的校正，那么即使用其它的尺寸也是允许的。长度与直径比应该大致为2：1。样品的两个端面应是平行的，而且，基面偏差在0.025mm范围内。样品仔细地放在加载机器的中心部位和硬度为HRC58的钢台上。不应该使用覆盖材料。

岩石的单轴抗压强度常常用于比较各种不同的岩石，并且它可以作为一个很好的标志值。表5.1给出了单轴抗压强度的代表数值。

5.2.1 末端效应

两个末端需要是平的，偏差在上述的限度之内，即0.025mm。利用刀架磨床或磨盘研磨是可以做到这一点的。不然，就可能得出低强度值来。

如果平台与样品之间有润滑剂的话，那么样品在低值时通常出现具有张力破坏特征的裂口。同样，样品中引起拉张的剪应力是由覆盖的软物质造成的。当然，如果在末端平面用坚硬覆盖物或引入高摩擦的话，则出现特有的剪切锥形破裂，而且其强度值较高。试验已经证明，当岩石样品的末端用钢箍夹住时，得到的抗压强度值比没有夹住时高10～50%。因此，这种影响的程度是变化很大的。

表5.1　岩石的单轴抗压强度

岩石类型	地　点	单轴抗压强度 (MPa)	标准偏差 (MPa)	试验编号	参考文献号
玄武岩		81.2	42.8	116	1
玄武岩	爱华达州和华盛顿州	118.1	78.5	156	2
煤	西弗吉尼亚州	17.6	7.7	10	3
煤	联合王国（英国）	20.6	N/A	283	4
煤	联合王国	66.4	N/A	421	4
煤	南非	40.1	N/A	638	5
煤	南非	43.1	N/A	240	6
煤	南非	6.2	2.3	37	7
粗玄岩	联合王国	166.2	50.3	24	8
石英粗玄岩	联合王国	333.3	89.2	22	9
白云岩		100.8	29.5	16	10
花岗片麻岩		154.7	23.5	22	11
黑云母花岗片麻岩		160.1	32.0	34	11
花岗岩		122.2	N/A	63	12
花岗岩	怀俄明州	128.6	24.6	91	13
花岗岩（贝瑞）	佛蒙特州	225.6	33.4	150	14
花岗岩		231.4	42.4	16	15
花岗岩		94.6	35.9	12	16
花岗岩	联合王国	206.9	103.6	11	9
花岗岩	怀俄明州	142.4	21.0	24	17
霓石花岗岩		161.2	17.9	16	11
黑云母花岗岩		159.9	41.1	171	11
二云母花岗岩		144.9	27.3	26	11
花岗闪长花岗岩	加利福尼亚州	36.6	43.6	10	18
斑状花岗岩		152.3	23.1	10	19
花岗闪长岩	联合王国	165.7	51.7	21	8
花岗闪长岩	加利福尼亚州	116.0	45.5	43	18
赤铁矿		168.7	36.6	15	10
铁矿石	法国	34.4	12.1	18	20
石灰岩	马绍尔群岛	47.8	41.1	12	22
石灰岩		90.9	41.2	16	23
石灰岩		44.2	46.0	41	24
石灰岩		93.0	28.9	47	12
石灰岩		110.0	47.7	17	25
石灰岩（贝德福）		66.2	29.7	150	14
石灰岩（康康妮）		47.8	4.1	12	26

续表

岩石类型	地　点	单轴抗压强　度 (MPa)	标准偏差 (MPa)	试验编号	参　考文献号
石灰岩（印第安纳州）		75.3	36.0	17	15
石灰岩（印第安纳州）		53.1	3.7	14	26
石灰岩（锡赫）		37.7	8.7	11	10
石灰岩	联合王国	103.8	26.2	15	8
磁铁矿		136.6	23.7	15	10
大理岩（奇基斯石英岩）		98.6	22.6	14	27
方解石大理岩	加拿大的安大略省	136.8	75.6	20	28
白云石大理岩		123.3	58.1	35	28
石英二长岩		164.2	2.8	31	11
石英二长岩	内华达州	177.1	41.0	29	29
苏长岩，韦斯特利	罗得岛	210.2	10.5	15	30
花岗岩					
英安斑岩		101.4	31.8	55	31
流纹斑岩		226.0	62.3	14	10
钾碱		32.8	12.9	56	21
石英岩		143.7	50.4	20	10
云母石英岩		112.4	37.3	55	25
流纹英安岩		142.9	45.4	14	31
斑状流纹岩		200.5	100.3	11	32
岩盐		23.7	2.8	36	1
砂岩（卡莱尔板岩）	亚利桑那州	24.2	11.0	104	33
砂岩		59.8	32.0	69	12
砂岩（加通）	巴拿马	4.6	N/A	74	34
砂岩（贝瑞）	俄亥俄州	91.2	N/A	150	14
砂岩，石灰岩，长石	苏联	238.2	N/A	326	35
石英黑云母片岩		32.6	10.5	17	36
云母片岩		38.3	16.1	57	25
页岩	西弗吉尼亚	12.9	17.0	23	1
页岩		22.8	15.5	14	3
页岩		116.4	29.8	59	10
英云闪长岩	犹他州	85.1	36.7	33	37
凝灰岩		16.6	6.9	24	1
凝灰岩	内华达州	60.0	52.6	58	38.39
凝灰岩	内华达州	65.3	50.1	19	40
浮石凝灰岩	内华达州	30.6	13.5	27	41
浮石凝灰岩	内华达州	22.7	9.5	28	42
凝灰岩（有印第安遗迹，沸石质）	内华达州	52.4	19.8	44	43.50

注：参考文献目录列在附录中。

5.2.2 尺寸

一般地说，在压缩过程中，样品越大就越弱。这一点根据最弱环节理论是容易理解的。显然，样品越大，在样品中存在的弱环节概率（the probability of a Weak link）也就

越大。单轴抗压强度C_o常常确定为

$$C_o \propto a^{-x} \tag{5.1}$$

式中 a——样品的特征尺寸；

x——常数。

对于煤来说，已经提出的各种x变化值是在0.2～0.5范围内。

图5.1描述了基于许多调查研究者的结果所得出的煤的尺寸对强度的影响。

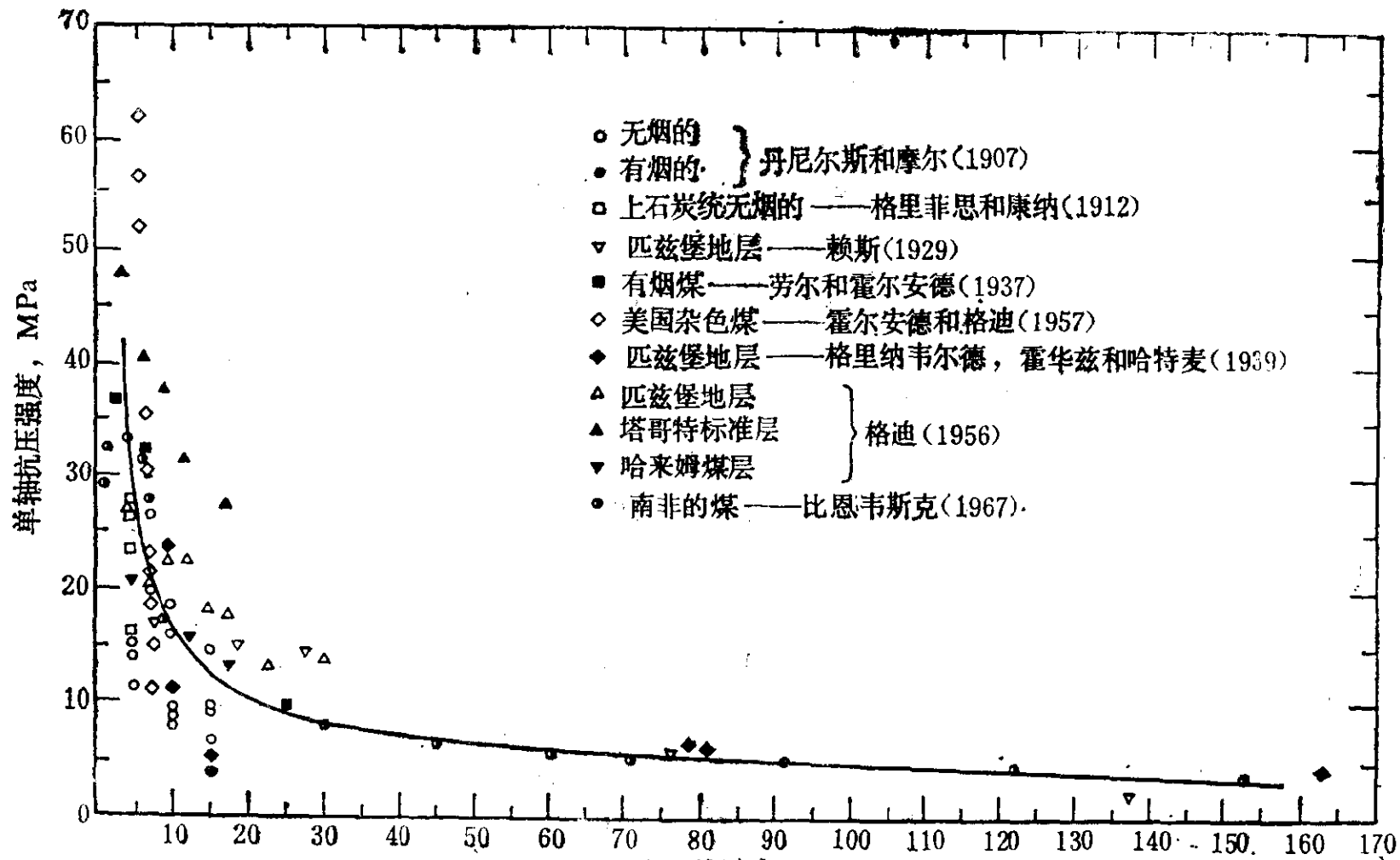


图5.1 尺寸对抗压强度的影响：煤样品

因为，尺寸效应是由材料中存在的缺陷引起的，所以边长为a的立方体的压碎强度C_a与受一给定应力而幸免于压碎的立方体的概率P_a的关系为

$$(C_a)^{\beta/\alpha} \ln P_a = 常量 \tag{5.2}$$

式中 α——随材料而定的常数；

β——表示缺陷分布类型的常数。

5.2.3 加载速率

高速加载往往引起岩石抗压强度值的增加。但是，正常的加载速率，例如0.5～3MPa/s，这时抗压强度不会呈现显著变化。

5.2.4 湿度的影响

岩石中的水分可以以两种不同方式改变材料的强度。孔隙水压力能够影响颗粒间的接触应力。这种效应在下面的“围限抗压强度”下的“孔隙压力”一节中将进一步讨论。水分也可以与矿物表面相互作用，并改变其表面性质和键性〔Horn et al., 1962〕。岩体中的孔隙水压力可以沿着薄弱面引起不稳定性，也可以减小它的剪切摩擦阻力。它也可以改变岩石中的断层泥或岩石的粘土矿物组分的特性。雷宾德（Rebinder）〔1957〕和麦克格瑞(McGarry)〔1973〕讨论了因表面吸附使得不同固体中的自由表面能减小的现象。科尔贝克(Colback)〔1965〕，基艾尼斯利（Kjaernsli）〔1966〕和其它许多研究者报导了由于水的作用抗压

强度的减小。因为强度的变化程度取决于岩石的类型和试验条件，因此，最好是在潮湿条件下测定岩石的强度，可以预料在野外构造中会遇到这种条件。

5.2.5 粒度

样品的粒度可以影响破裂的样式。细粒岩石的非围限压缩试验，如石印灰岩，常常产生张性破裂，即使在样品两端夹住的情况下也是如此。相反，大颗粒岩石的试验一般都呈现出圆锥形剪切图式。要得到除粒度之外其它所有参数都是常数的岩石是困难的。因此，这就给定量比较带来了困难。然而，由于在正常情况下，岩石在拉张条件下比在剪切条件下更弱，因而可以预料到粗粒岩石会比细粒变种表现出更高的抗压强度。

5.2.6 机器的硬度

大多数常规的压缩试验机器是具有坚硬钢支架的液压机，因此，贮存相当大量的总外加能量，也就是说它们是软体机器。于是，当岩石样品被加载到它们的抗压强度值时，由于贮存能量引起岩石突然破裂，会出现不稳定情况。如果机器被设计成贮存能量只占总体能量的一小部分的话，那么破裂后区域内的应力-应变曲线的斜率是相当陡的，因此，样品不那么容易破裂。相反，岩石发生变形，但仍能经受一些载荷。这种观察结果对于结构设计是非常重要的，特别是在采矿事业中尤为重要。要获得这种破坏后的曲线，可以由与岩石样品平行加载一个钢性构件〔Cook，1965；Bieniawski，1966〕或使用Hudson等1972描述的“硬（stiff）”试验机器，使常用的机器硬化。

5.2.7 点载荷试验

上述的单轴压缩试验需要细心制备试样，而这是费时间的。有时，被证明是不正确的，而近似的强度值却是适当的。于是，一种点载荷试验可以用便携式的野外仪器完成〔Broch，1971；Broch等，1972〕。在这种试验中，点载荷P是在距任一端的至少7cm的地方穿过岩石的一条直径d加载上去的。于是，指数I_s可由下式给出：

$$I_s=\frac{P}{d^2} \qquad (5.3)$$

对于NX-岩心(直径54mm)(图5.2)〔Bieiawski，1974〕，点载荷指数I_s与岩石的抗压强度C_o由下列关系式联系起来：

$$C_o=24I_s \qquad (5.4)$$

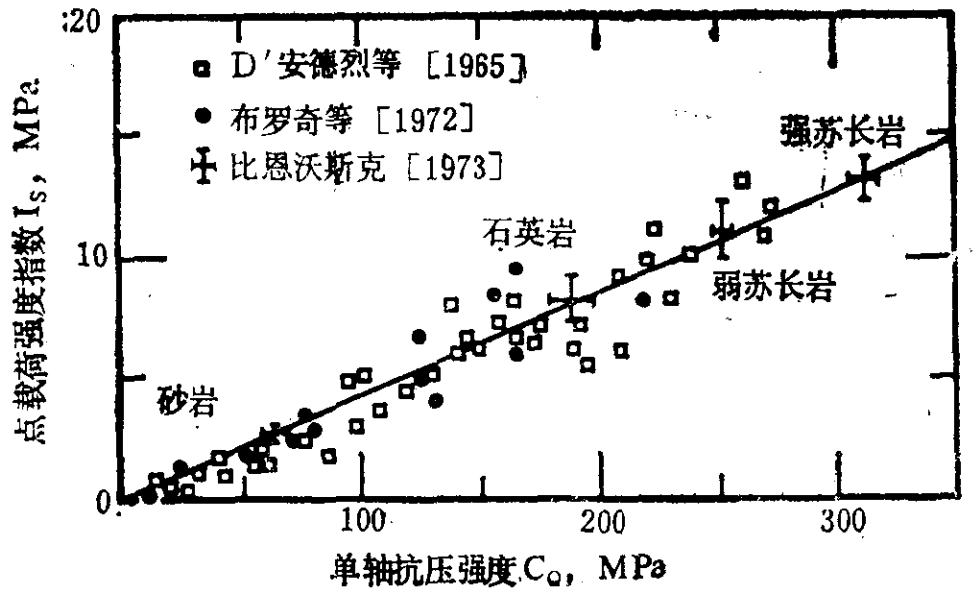


图5.2 抗压强度与点载荷指数的相互关系
〔据Bieiawski，1974〕

5.2.8 使用不规则试样测定抗压强度

人们已经做了用不规则的试样得到近似的抗压强度值的尝试。因为，这样既节时间，又节省制备样品的精力〔Koeffman，1940；Sidenko，1954；Protodyakonov等，1957〕。抗压强度值由下列关系式给出：

$$C_o=P\left(\frac{\xi}{W}\right)^{2/3} \qquad (5.5)$$

式中 P——外加载荷，kg；

ξ——岩石的比重，g/cm^3；

W——样品的重量，g。

在英国也使用了这种方法〔Hobbs，1963〕，但还没有普及。

5.3 围限抗压强度

地壳中的岩石一般处于围限状态，即被其它岩石包围着，这些岩石从各边向所考虑的单元施加压力。于是，这个单元便处于三轴应力状态之下。因此，为了获得有关岩石在原型加载过程中有怎样的行为的更切合实际的概念，测量岩石的围限抗压强度常常是重要的。

岩石的围压强度是在样品上测定的，这种样品的制备与单轴压缩试验的那些方法类似，大小和容限(tolerances)也类似。然后把样品包在一个柔韧无孔隙的套子中。样品受到柔韧套周围液压流体的围限压力和加载机器平台施加的轴向应力。轴向载荷一般是在选定的应变率和预定的恒定围压下施加的。当载荷恒定不变或降低，或已达的预期应变时，就达到破裂了（这种试验安排的示意图显示在第六章的图6.3中）。

5.3.1 围压

岩石样品周围外加的围压趋向使岩石抗压强度增大。随不同的围压可获得不同的抗压强度，而不是单一的数值。于是，可以产生如图5.3所示的一系列力对变形的投影图。在更高围压下岩石的流动趋势也可以观察到，也即以更为韧性的方式变动。

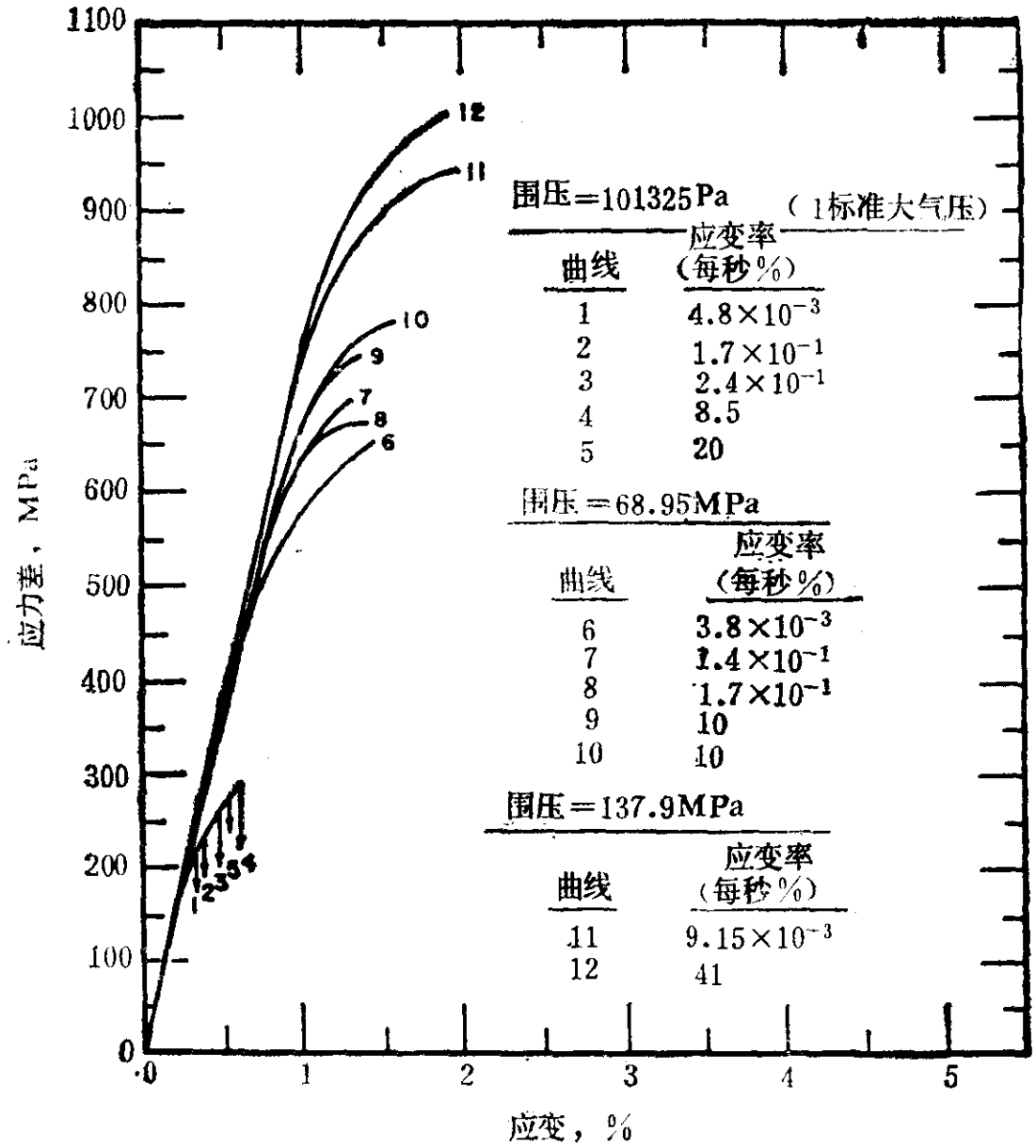


图5.3 围压和应变率对佩拉（Pala）辉长岩的影响

注意：这些参数对最终破坏应力的影响〔据Serdengecti et al., 1961〕

5.3.2 孔隙压力

孔隙压力的存在对岩石引起的力学影响取决于孔隙压的若干因素：岩石的饱和程度、水、矿物和岩石结构的相对总体压缩性，岩石孔隙度和渗透率的发育程度和属性，矿物颗粒之间的粘合情况，边界的排水条件和应力状态的变化率。这些因素中许多是互相依赖的，但是由于它们之间的相互关系至今还未确定，所以分别考虑每一因素是方便的。

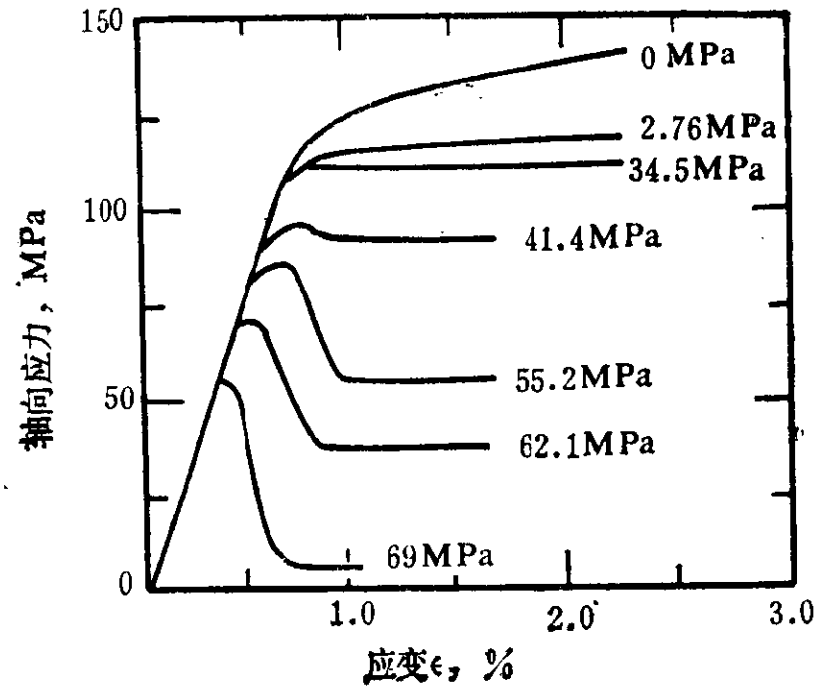


图5.4 孔隙压力对印第安纳石灰岩的强度的影响
〔据Robinson, 1959〕

几位研究者〔Griggs,1936; Robinson, 1959〕提出了将“有效”应力概念用于岩石。因此，由于孔隙压力的引入（图5.4)而否定了围限压力的影响。但是，在许多岩石中，由于颗粒边界上水的表面吸附效应有可能违背这种关系〔Boozer et al, 1963〕。

5.3.3 体积变化

当一完整的岩石样品遭受到围压和轴向载荷下时，最初，已有的显微裂隙闭合起来。在这个阶段中，样品体积减小（图5.5）。然后，它们在极限应力范围内传播，在这个期间内，其作用基本上是弹性的或者是可逆的。在这个阶段内，体积应变近乎线性，但处于压缩状态，并达到极小值。如应力水平继续增高，传播就变成不可逆的，岩石逐渐弱化，直至出现破裂。然后样品的总体积开始增大，这种现象被称为扩容现象。这种现象的出现是由于单个颗粒之间的位移，和随后裂纹体积的增大。康斯坦丁等〔Costantino et al., 1977〕提出，岩

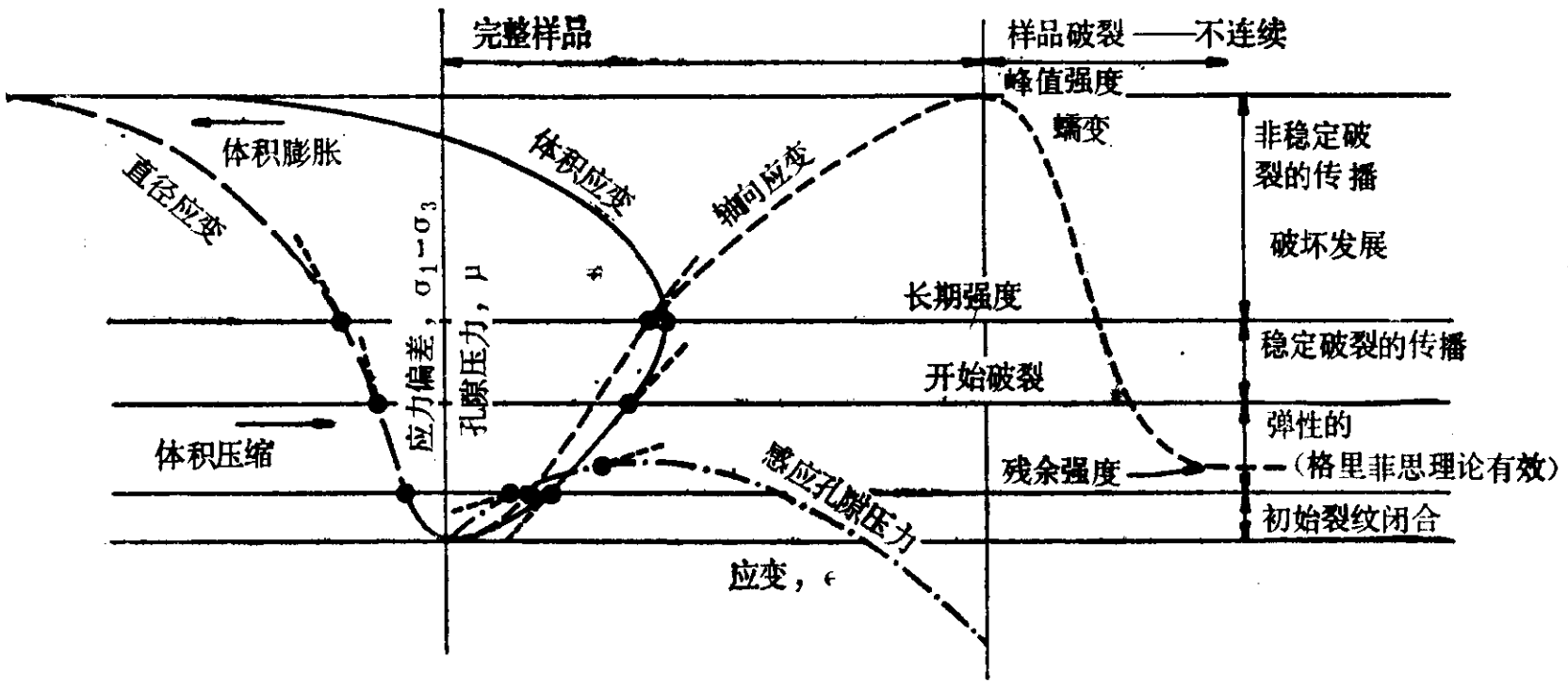


图5.5 表示在压缩载荷条件下，岩石的体积应变与孔隙压变化的图解
〔据Deklotz et al, 1968〕

石的扩容习性能够用下述类型的方程来描述：

$$\varepsilon_d = a_0 + a_i\tau + b_0\exp(b_i\tau) \qquad i=0,1 \tag{5.6}$$

式中 ε_d——膨胀应变体积，它是在静水压力和非静水压力载荷条件下，在给定的平均应力

值时的体积应变差；

τ——剪应力；

a_i，b_i——拟合参数。

在岩石破坏过程的这些阶段内，追溯无排水样品中的孔隙压力的变化也是有意义（图5.5）。当体积应变为压缩时，诱发的孔隙压力增加。当体积应变减小为线时，孔隙压力亦是如此。当体积应变偏离线性，朝向最小值时，孔隙压力非线性上升并达到最大值。随着非稳定破裂传播开始，孔隙压力下降，最初很慢，但是，后来当样品膨胀和接近峰值强度时，孔隙压力下降的更为迅速。恰好当岩石样品开始膨胀到超过它的原始体积时，孔隙压力降到初始值以下。

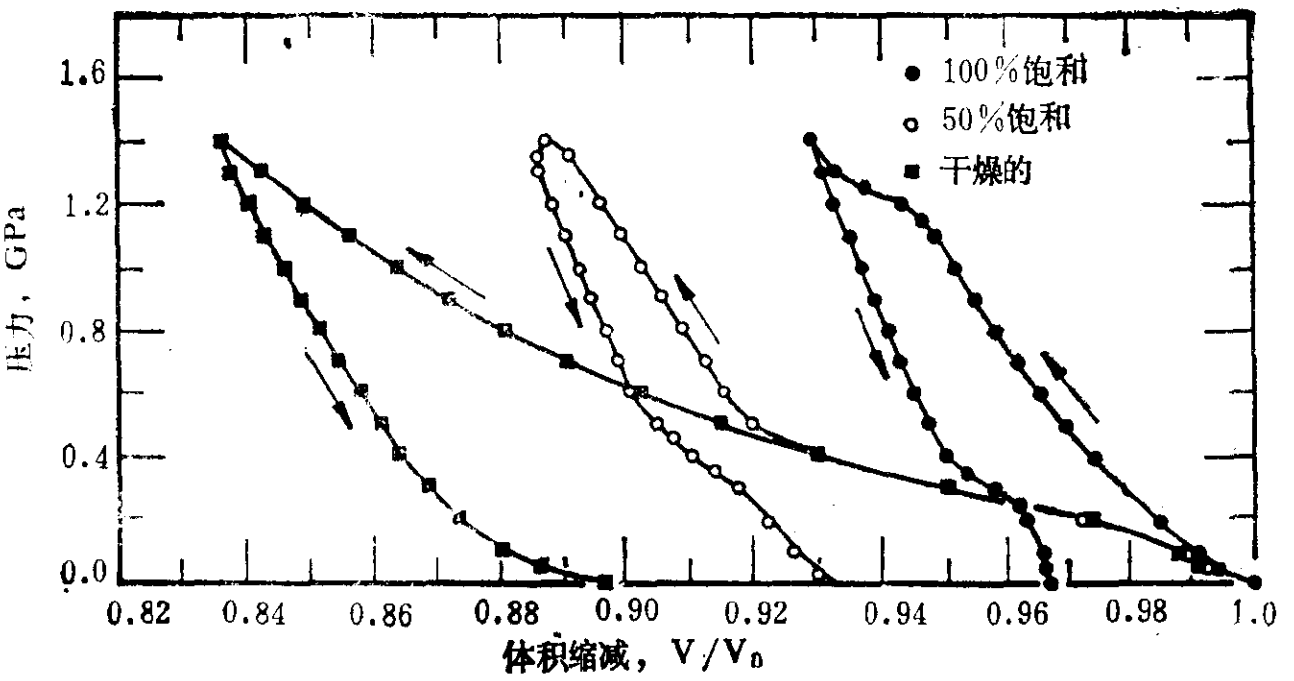


图5.6 印第安纳石灰岩的湿度对静水压力P与V/V_0的加载-卸载曲线的影响

〔据Heard et al.，1974〕

由于水的存在妨碍了裂纹的闭合，这在图5.6中看的很清楚。水降使总体模量增大。此外，印第安纳石灰岩的明显的滞后现象，也是从干岩石为10%减小到50%饱和时的7%，再降到完全饱和时的3%。

5.3.4 温度

通常，温度的增加会导致抗压强度减小和韧性加大（图5.7）。然而，对于不同的岩石韧性数额的变化是很大的（图5.8）。

5.3.5 脆-韧性的转变

岩石习性受周围的压力、温度、孔隙压力、应变率或载荷率、水或其它可以影响岩石化学特性之物质存在的影响。最后这一参数还不很了解，需要进一步研究。其它因素以上已作了简要的讨论。通常，岩石的韧性随压力和温度升高而增大，随较高的孔隙压力或应变率而

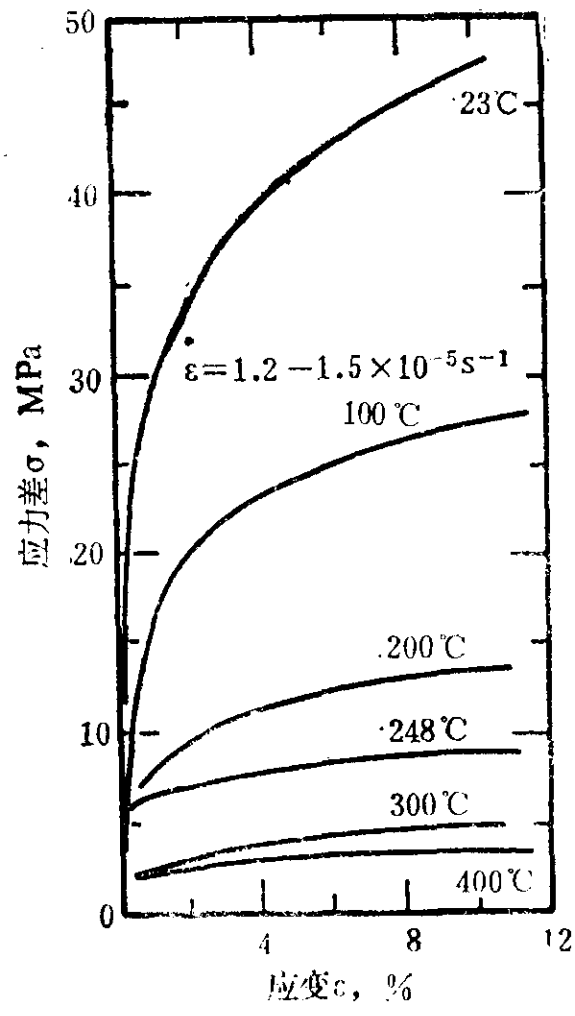


图5.7 温度对石盐的变形特性的影响

〔据Heard，1972〕

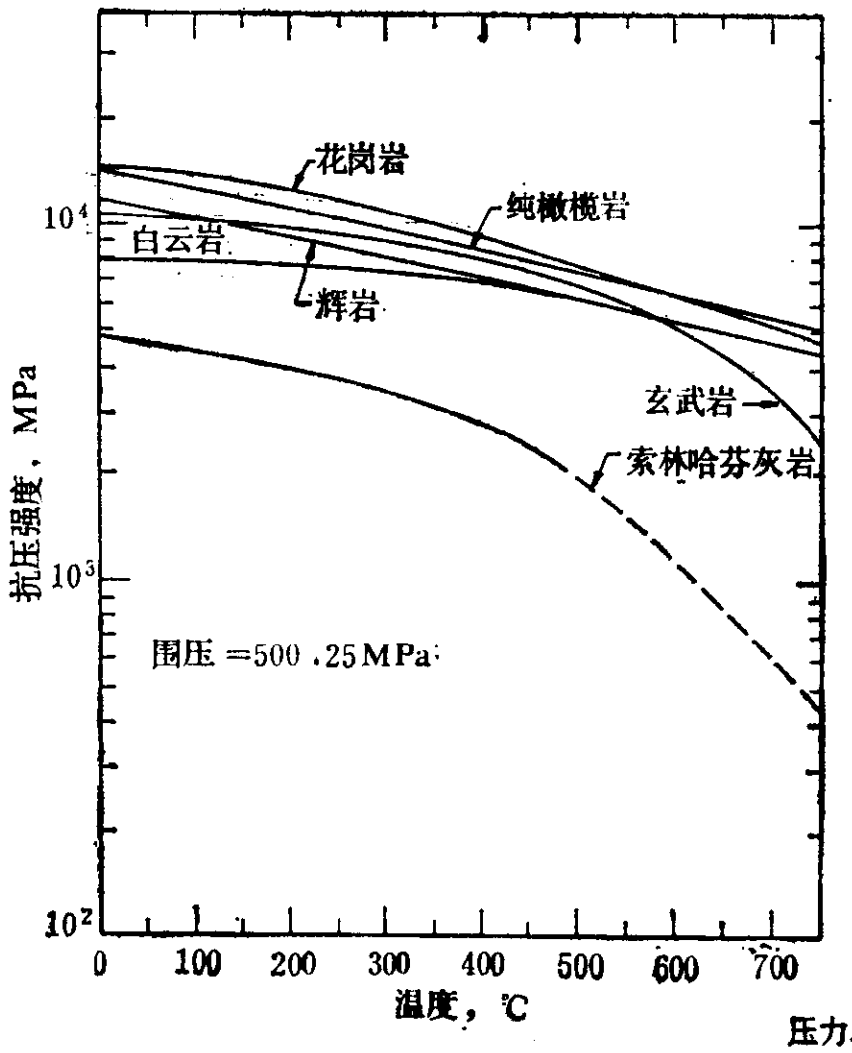


图5.8　湿度对岩石强度的影响
〔据Griggs，1960〕

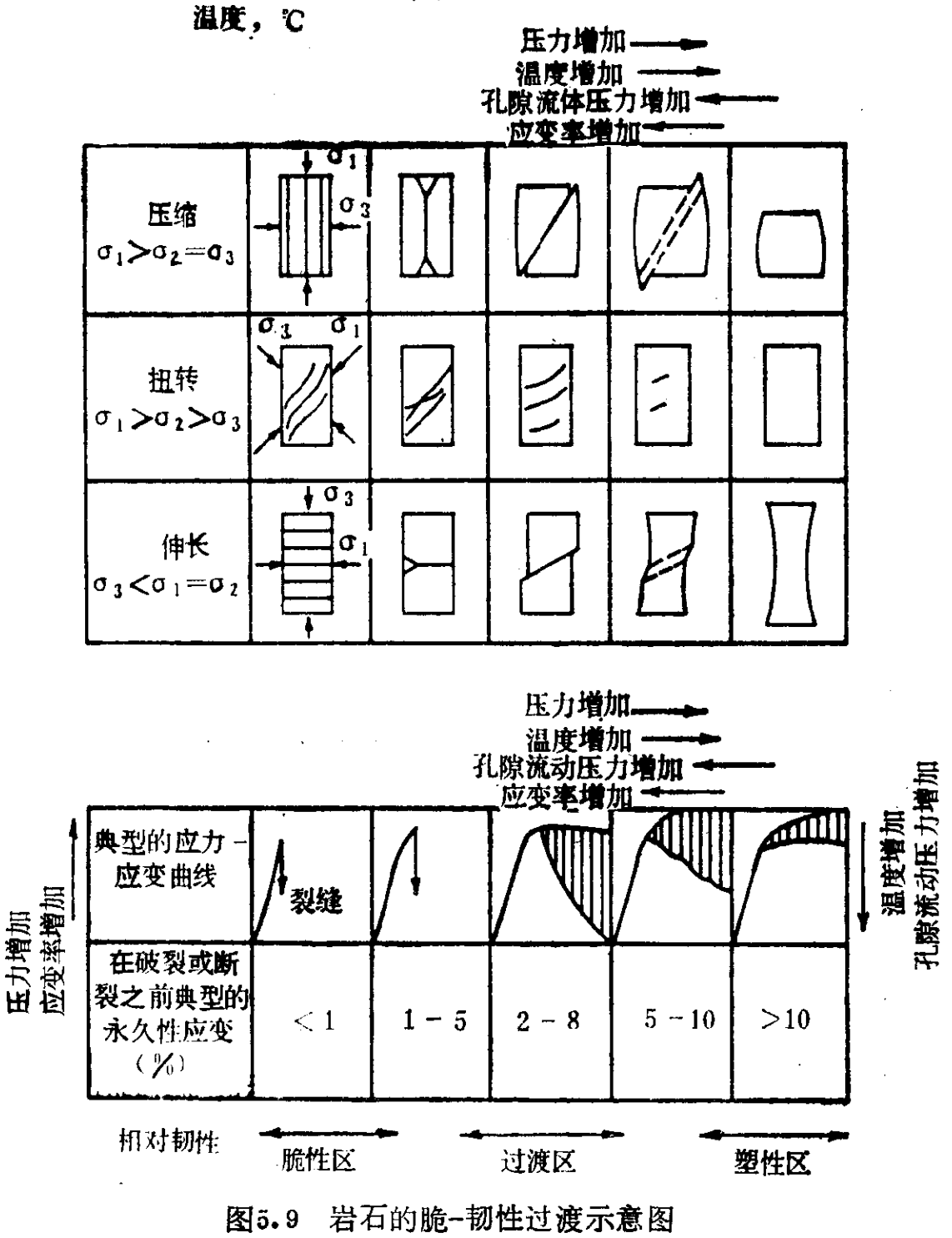


图5.9　岩石的脆-韧性过渡示意图

减小。这种情况在图5.9中示意地描绘出来〔据Heard，1976〕。影响这种岩石习性的岩石性质包括粒度、矿物成分、杂质量、岩石结构、显微裂隙程度、均匀性、各向异性、孔隙度、渗透率和粒面之间的胶结物质。

5.4 抗张强度

在拉张情况下，岩石是软弱的，因此，如果在岩石结构中存有张应力得话，几乎无疑，张应力对岩石向破坏发展将起到一定作用。岩石的抗张强度通常是那么低，以致为了设计起见，这种值常常被取作零。对于存在许多节理或破裂面的岩体来说，这一点是特别正确的。

一种岩石类型的抗张强度往往比它的抗压强度要小一个数量级。表5.2中表示出一些单轴抗张强度的几个数值。

表5.2 岩石的抗张强度（直接拉伸法）

岩石类型	地　点	拉张强度（MPa）	标准偏差（MPa）	试验编号	参考文献
玄武岩，方解石		8.6	1.4	12	44
砾岩		29.7	N/A	10	45
铁矿石	法国	3.2	0.8	18	20
石灰岩		4.2	N/A	18	46
石灰岩（勒奴阿）		5.8	3.2	11	44
砂岩（卡利尔页岩）	亚利桑那州	1.1	0.5	102	33
砂岩		1.7	1.3	10	12
钙质砂岩		4.3	2.5	10	47
黑云母石英片岩		3.1	2.1	15	36
云母片岩		3.1	2.1	15	25

注：参考文献的来源列在附录中。

5.4.1 直接拉拔试验

测量岩石抗张强度的最好方法是直接拉拔试验。但是，需要注意末端夹持装置的设计。在常规的拉伸机中，岩石不能够用夹头夹住，因为，样品末端容易被夹碎或由夹紧压力引起强应力，这将影响其结果。岩石样品即使对于轻微弯曲也非常敏感。虽然，特殊的哑铃形样已由机械加工出来，并且在过去已使用于克服上述障碍，但是，这些工序非常耗费时间和代价太高。

进行直接拉拔拉强度实验最好是选择正式发表的ASTM D2936方法。NX-岩心为正圆柱体（直径54mm），长与直径之比为2～2.5，端顶用环氧树脂粘合剂与岩石样品粘牢。张力是通过防止样品弯曲或扭转力的链条引进的（图5.10）。用这种方法获得的一些抗张强度值在表5.2中表示。

5.4.2 裂开抗张强度

以上讨论的直接拉拔试验给出了最可靠的岩石抗张强度值，但是，它耗费时间（因而代价太高）。对于大多数建设和设计来说，近似的抗张强度是足够的了。因此，可使用裂开试验或巴西（Brazilian）试验。

ASTM现在还没有对岩石采用这种试验（尽管这种试验类似于对水泥所做的巴西实验的

ASTM标准），但是在这里我们提供这种得到人们推荐的试验步骤〔Peng，1978〕。从岩心上切下来的试验样品（圆板）的直径大约为50mm，其厚度与直径之比大约为0.5～1.0。然后，在压缩条件下加载（图5.11），并且，注意加载到破坏载荷P。裂开抗张强度C_T由下式得到：

$$C_T=\frac{2P}{\pi l d} \tag{5.7}$$

式中 l——圆板的厚度；

d——圆板的直径。

临界试验值的计算是由费雷哈斯特〔Fairhurst,1964〕、阿迪那尔等〔Addinall et al.，1964〕和梅尔等〔Mellor et al.，1971〕提出的。表5.3给出了用这种方法测量到的一些抗压强度值。

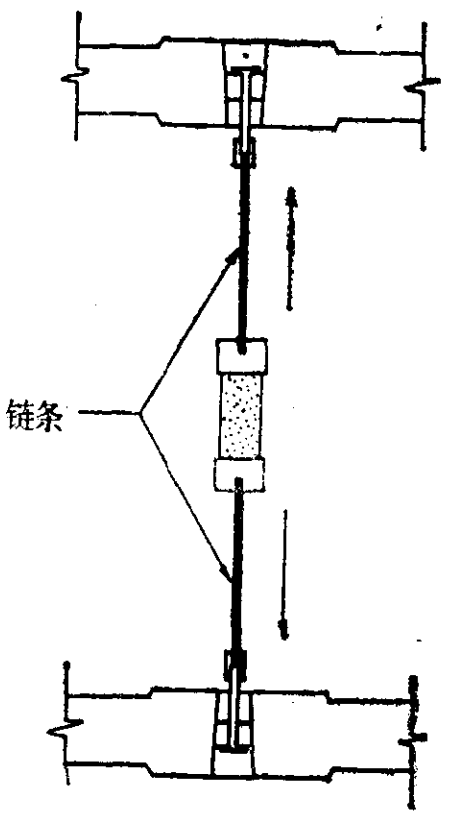


图5.10 直接拉拔试验的装置

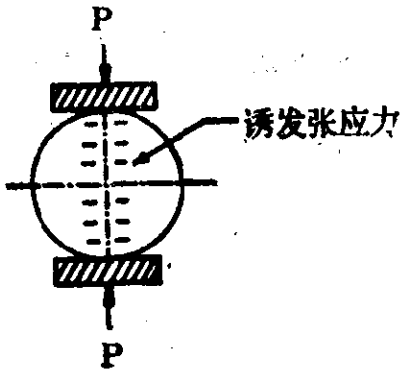


图5.11 裂开试验示意图

表5.3 岩石的抗张强度（圆板裂开法）

岩石类型	地　点	拉张强度 (MPa)	标准偏差 (MPa)	试验编号	参考文献
白云岩		8.7	3.3	13	10
花岗岩（贝瑞）	佛蒙特	13.8	2.1	150	14
花岗岩（贝瑞）	佛蒙特	14.2	2.5	17	48
石灰岩（贝德福德）		7.5	3.6	34	14
石灰岩（印第安纳）		9.1	3.8	17	48
二氧化硅磁铁矿		12.5	1.7	12	10
流纹斑岩		14.4	1.8	9	10
砂岩		7.7	1.8	21	10
砂岩（贝瑞）		7.1	5.2	33	14
砂岩（贝瑞）		10.2	5.7	1	48
砂岩（达利达尔）	联合王国	6.0	1.0	9	49
砂岩（达利达尔）	联合王国	14.8	3.9	11	49
页岩		10.1	1.9	24	10

注：参考文献来源列在附录中。

5.4.3、环载试验

岩石环径向加载是一些研究者作为测量抗张强度的一种方法进行研究的〔Hobbs,1964;

Addinall et al., 1964; Price et al., 1966; Jaeger et al., 1966; Hudson, 1969; Mellor et al, 1971〕。抗张强度C_T由下式得出：

$$C_T=\frac{P}{\pi l r_o}\left[6+38\frac{r_i^2}{r_o^2}\right] \tag{5.8}$$

式中 P——外加载荷；

l——环的厚度；

r_o——环的外半径；

r_i——环的内半径。

这种方法避免了裂开试验存在的一些问题，但是，并没有赢得人们的支持。

5.4.4 圆周应力法

当受到内压作用时，空心圆柱体岩心在张应力作用下裂开。这种方法常常使用陶瓷材料〔Sealacek等，1962〕，但是，将这种方法应用于岩石方面是不容易的，因为，要得到均匀壁厚的圆柱体岩心是极困难的。辛格〔Singh，1966〕使用同心取心金钢石钻头开创了这种方法的工作，尔后，杰伊雷曼（Jayaraman）等〔1970〕、哈迪（Hardy）和杰伊雷曼〔1970，1971〕进一步发展了这种方法，岩石抗张强度由下式得出：

$$C_T=P_f\left[\frac{r_o^2+r_i^2}{r_o^2-r_i^2}\right] \tag{5.9}$$

式中 P_f——破裂时的内压值；

r_i——岩心的内半径；

r_o——岩心的外半径。

5.4.5 破裂模量

虽然，破裂模量非真正的抗张强度测定值，但是，人们常常要测量破裂模量，因为，破裂始于拉张，而且，这种试验十分类似于地下洞室顶板的横梁破裂。

在这种试验中，岩心被放在两个刀口支承上，由机器在中心部位加载引起破裂（三点加载）。奥布特（Obert）等〔1964〕给出了这一过程的详细叙述。

在破裂模量试验过程中测量到的强度值几乎是拉拔试验中测量到的强度值的两倍。因为复合应力起着重要的作用。破裂模量S_m由下式得出：

$$S_m=\frac{8PL}{\pi d^3} \tag{5.10}$$

式中 P——外加载荷；

L——两个外刀口支承间的岩心长度；

d——岩心的直径。

5.4.6 冲孔试验

在美国通常不使用这种技术，但是，在苏联普罗基雅克诺夫（Protdyakonov）和他的同事发展了这种技术。在这种试验中，金属冲头把岩石圆板打出同轴冲孔。抗张强度由下式得出：

$$C_T\approx P_p\frac{d_p}{d-d_p} \tag{5.11}$$

式中 P_p——金属冲头的撞击压力；

d_p——冲头的直径；

d——样品的直径。

5.5 剪切强度

5.5.1 沿平面的剪切

在野外，大多数岩石常常呈剪切破裂。因此，岩石的剪切强度是个重要的设计标准。然而，测量剪切强度是不容易的，而且，这种测量也没有标准化的或公认的测量程序。试验目的是穿过岩石样品上的一个或几个预选定的平面施加剪应力。这种平面可以通过岩石实体或通常较大的兴趣是通过现有的弱面，例如：节理面、断层面或层面。人们已经发展了几种类型的设备来对这类性质进行试验。肯蒂〔Kenty，1970〕对于美国陆军工兵部队所发展的实验设备及其使用步骤，一并作了描述。霍克〔Hoek，1970〕描述了另一种更常使用的仪器。这也是一种便携式的仪器〔Hoek et al.，1977〕，而且，在市场上是买的到的。古德曼〔Goodman，1973〕设计了能够用于控制或监测数字参数的设备。

实质上，试验是由将岩石样品固结在剪切箱中组成的。使用了环氧树脂或流体石质粘合剂，以便留下已被确定的剪切平面作为不受限制的平面。于是，便可将预定的法向(或超额)载荷施加在样品上，然后，施加剪切载荷直到样品被破坏（图5.12）。这时，可以观察到朝法向载荷方向的膨胀（或收缩）（在垂直载荷装置是无掩蔽的情况下)和沿着剪切面的位移。图5.13给出了剪应力-位移曲线（节理的剪切强度的详细讨论是第八章的主题）。

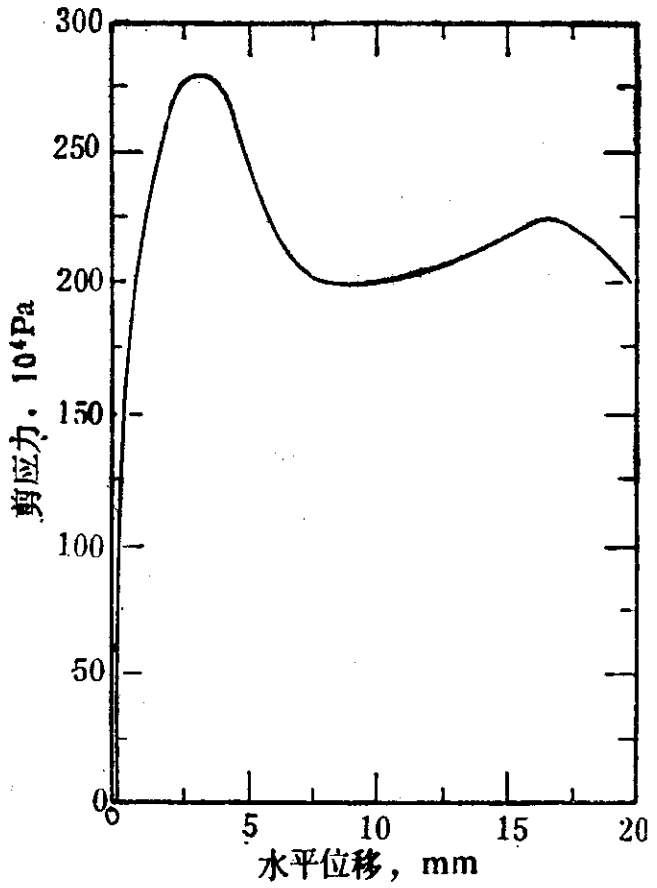


图5.13 花岗斑岩的剪切-位移曲线

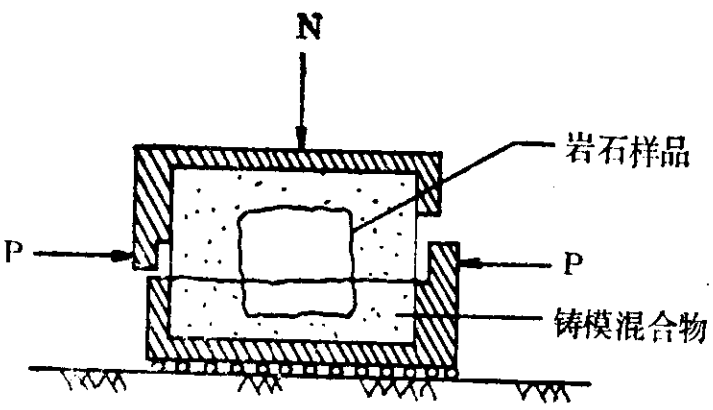


图5.12 直接剪切试验示意图

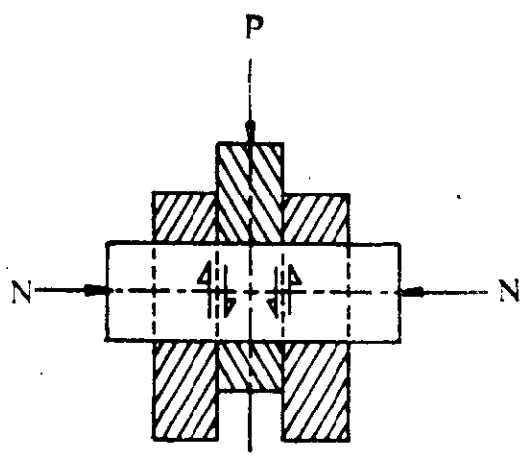


图5.14 双剪切试验示意图

5.5.2 通过岩石实体的剪切

如果希望得到完整岩石实体的剪切强度，可以使用剪断机型设备。这种设备是由精密拟合的在两个固定的钢板间滑动的剪断机组成的，每块钢板具有一个孔以伴随岩心通过所有三部分图（5.14）。之后，对剪断机施加负载，以致使两边的岩石受到剪切。由于负载p

提供了一对剪切，剪切强度C_s由下式得出：

$$C_s=\frac{P}{2\pi r^2} \tag{5.12}$$

式中，r是岩心半径。这种方法既简单又迅速。然而，岩心与仪器孔必须密封拟合，但是，这未必总是可能的，因为，岩石的直径通常是变化的，因此，会引起一些弯曲应力。岩石也必须有足以经受住剪断机重量的强度，不致于以任何方式产生损伤。

5.6 岩石破坏

5.6.1 经典理论

破坏的经典理论，即最大应力、最大应变、最大剪应力、最大八面体应力、最大应变能和最大畸变能，并没有很好地应用于岩石材料。所有这些理论是以均匀、各向同性、缺少与时间有关的特性（即蠕变）和施加的仅仅是静负载为依据得出的。

5.6.2 纳维-库伦理论（Navier-Coulomb Theory）

最大剪切理论是由库伦创立的，纳维做了改进。纳维不再假定破裂出现在剪应力等于剪切强度或岩石内聚力（即常量τ_0），而是假设这种剪切强度随常数μ乘以作用在那个平面上的时间正应力σ的积而增大。由于它类似于普通摩擦作用，因而，常数μ被称为“内摩擦系数”。于是

$$|\tau|=\tau_0+\mu\sigma \qquad \text{（假设是正压缩）} \tag{5.13}$$

这种纳维-库伦理论常常适用于土壤、破裂的岩石及某些弱岩石。

5.6.3 莫尔假说

莫尔（Mohr）提出通过破裂平面的正应力与剪应力的关系为

$$\tau=f(\sigma) \tag{5.14}$$

式中，f是材料的函数特性。

莫尔理论是个经验准则，它不仅有助于测定诱发破裂的应力大小，也能测量它们的方向。这些取决于平均应力$\sigma_m=1/2(\sigma_1+\sigma_2)$和最大剪应力$\tau_m=1/2(\sigma_1-\sigma_2)$，其中$\sigma_1$和$\sigma_2$是双轴场中的主应力。

在岩石力学中常常要么以原始形式要么以直线简化（纳维-库伦）形式使用莫尔破坏准则。因为，理论较为简单，因此，使用起来比较方便。

图5.15显示出了莫尔包络线，图5.16描述了孔隙压力的影响。

为了进行三维表示，对莫尔假说作了改进，但由于引起各种复杂情况而很少使用。莫尔假说也作了适用于薄弱面或断层的改进，可以证实这种改进方案在野外应用中非常见效。

莫尔理论的优点在于它能简单易行地为多数工程提供好的数据、预测一套正应力的破裂角、能够解释薄弱面、各向异性及与理想材料的偏差、预测材料承受强流体静压应力的能力和预测三维引张容量。它的局限性是没有一坚强的理论基础，也没有对断裂机制提供一种很好的物理解释。此外，它也不能预测给定点上的主应力。

5.6.4 格里菲思（Griffith）裂纹理论

格里菲思裂纹假说也能应用于岩石破裂，格里菲思裂纹假说与莫尔准则之间的关系已经建立起来。这种理论也被扩展到提供在压缩条件下的流体压力的破坏、破裂的传播和三维应

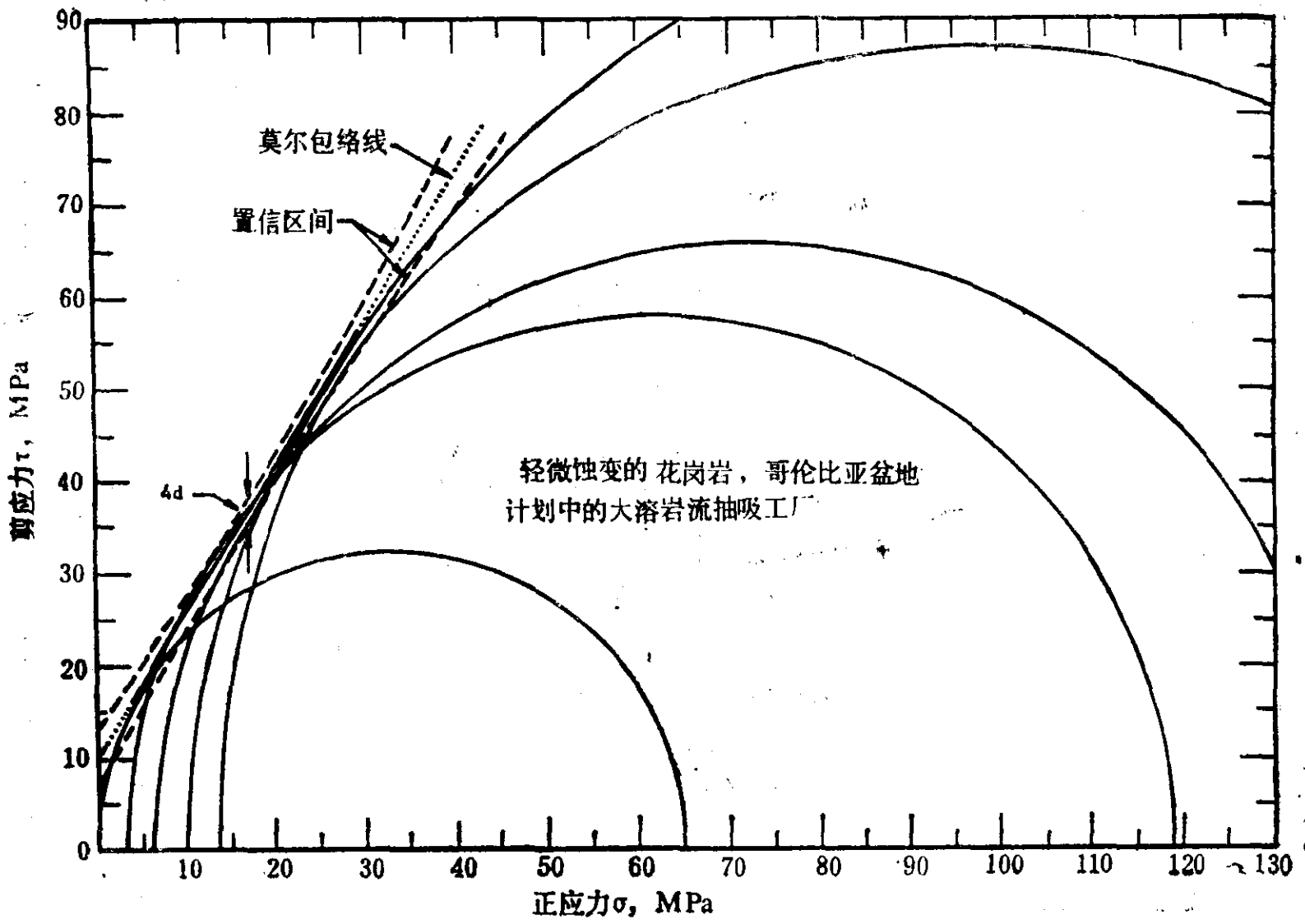


图5.15　蚀变花岗岩的莫尔曲线

（据Balmer，1953）

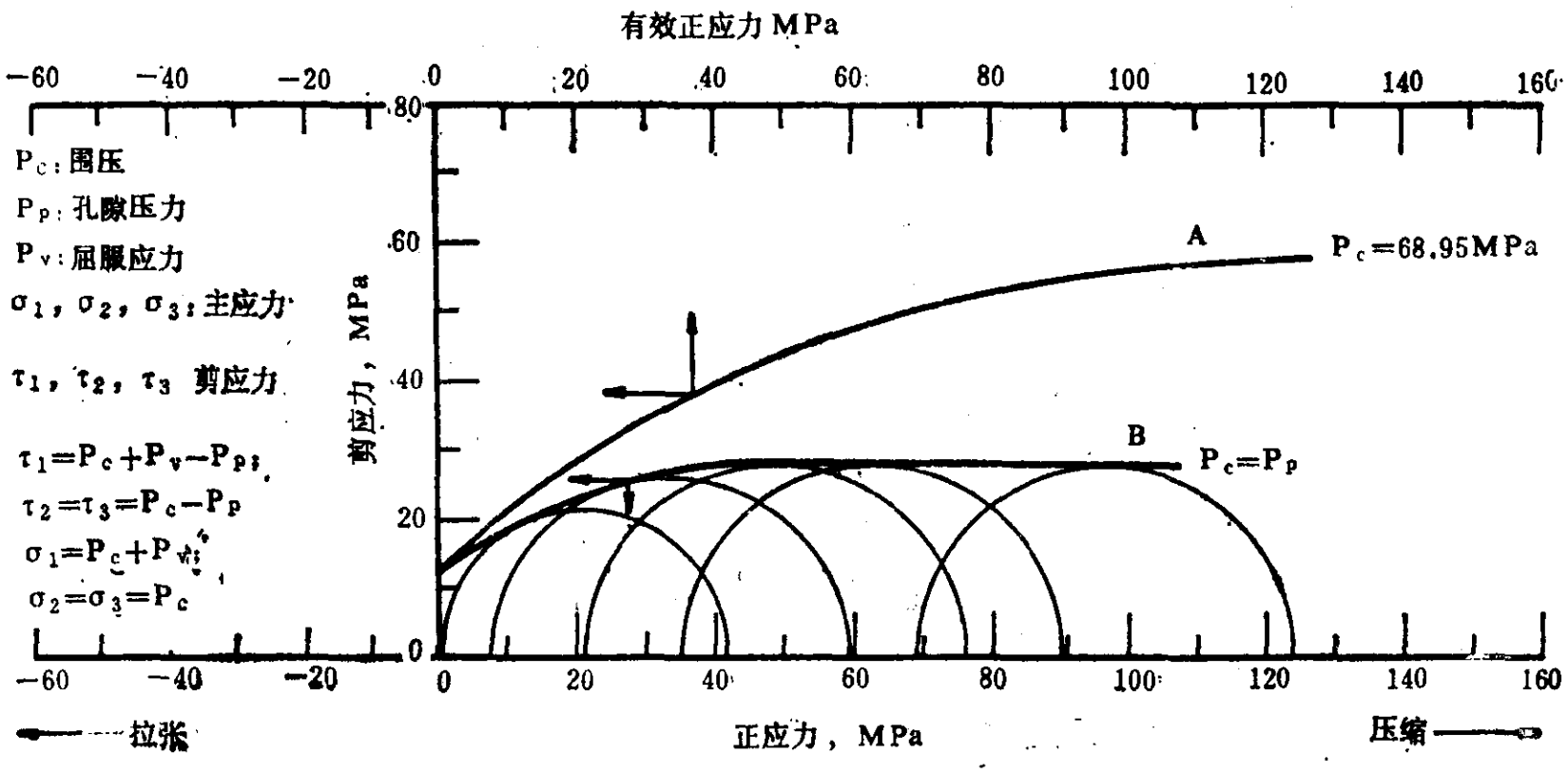


图5.16　孔隙压力对印第安纳灰岩的莫尔包络线的影响

（据Robinson，1959）