

钻探工程学

钻进方法 钻探质量 钻探冲洗液

上册

屠厚泽 主编 赵国隆 主审

中国地质大学出版社

前 言

《钻探工程学》是我们在长期的教学实践中编写的一本供探矿工程专业教学用的教材。根据教学改革的精神,为了拓宽知识面和加强基础理论方面的教学,我们总结了多年来的教学经验,并吸收近年来国内外的一些新理论、新技术和新方法而编成的。全书内容丰富、结构合理、层次清楚,有利于讲授和自学,是一本实用性较强的教学用书。本书的结构特点是:

1. 从实际的教学要求出发,文字编写力求简炼,层次分明,循序渐进,将工艺分析与计算方法融为一体,便于教学和自学。

2. 考虑到近年来国内外岩心钻进工艺和设备的迅速发展,将多品种金刚石钻头制造工艺与多品种金刚石钻头钻进工艺、微机程序在钻探工艺中的应用、新型泥浆及流变理论、先进的取心工具与方法以及定向钻进工艺中的新成果等方面的内容均编入了上册。

3. 随着国民经济进一步发展,钻探工程的应用范围远远超出对固体矿床的勘探。近年来,水文水井钻探、工程钻探的需求量迅速增加,因此在下册里专门编写了工程施工大口径基桩孔钻进工艺和触探、取样等专门工艺,尤其注意将近年来国内外行之有效的水文、水井钻进技术方法与工艺等均编入下册。

4. 中册是钻探设备,编写时考虑了近年来钻探设备的发展和拓宽专业面的要求,除了保持不同种类钻机的相同部件放在一起进行横向分析外,还增添了有关水文、水井钻探设备等内容,分析设备的实例尽量采用了具有代表性的新型常用设备。

本书由中国地质大学探工系钻探教研室部分教师编写。主编屠厚泽教授,主审赵国隆总工程师(地质部探矿工程工业装备公司);上册编写人员有俞承城、张希浩、鄢泰宁和杨凯华;中册编写人员是黄振群和冯德强;下册编写人员是戎信和陈维明。

本教材在编写过程中,参考了武汉地质学院等五院校统编教材及其他有关教材,引用了最近几年学校、科研、设计单位在这方面的研究成果,无疑这些材料对编写本教材帮助很大,在此,仅向提供有关资料的作者和单位表示感谢!

由于编者们的水平和时间有限,难免有错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

1987年3月

目 录

(上 册)

总论.....	(1)
---------	-------

第一篇 钻进方法

第一章 岩石性质及岩石破碎基础知识.....	(6)
第一节 岩石及其物理性质.....	(6)
第二节 岩石的力学性质.....	(9)
第三节 压入时岩石破碎的基本规律.....	(21)
第四节 影响岩石破碎效果的因素.....	(27)
第五节 岩石的研磨性及其分类.....	(32)
第六节 岩石的可钻性及其分级.....	(39)
第二章 硬质合金钻进.....	(50)
第一节 钻探用硬质合金.....	(50)
第二节 硬质合金钻进的孔底过程及破岩机理.....	(53)
第三节 硬质合金切削具的磨损.....	(58)
第四节 硬质合金钻头的结构要素.....	(61)
第五节 硬质合金钻头.....	(69)
第六节 硬质合金钻进规程.....	(77)
第三章 金刚石钻进.....	(89)
第一节 金刚石钻头破碎岩石的基本概念.....	(89)
第二节 钻探用金刚石及其它超硬材料.....	(93)
第三节 金刚石钻头和扩孔器.....	(105)
第四节 金刚石钻头和扩孔器的制造工艺.....	(124)
第五节 提高钻头质量的措施.....	(129)
第六节 金刚石钻进规程.....	(135)
第七节 钻头的选择和使用.....	(142)
第八节 金刚石钻头的高转速钻进技术.....	(147)
第四章 钻粒钻进.....	(155)
第一节 钢粒钻进的特点及钻探用钢粒、钢粒钻头.....	(155)
第二节 钢粒钻进的孔底过程及破岩机理.....	(157)
第三节 钢粒钻进工艺.....	(160)

第五章 冲击回转钻进	(167)
第一节 冲击回转钻进的破岩原理.....	(167)
第二节 液动冲击器.....	(170)
第三节 风动冲击器.....	(187)
第四节 冲击回转钻进钻头.....	(198)
第五节 冲击回转钻进规程.....	(202)
第六节 提高冲击回转钻进水平的措施.....	(205)
第六章 全面钻进	(211)
第一节 全面钻进的特点.....	(211)
第二节 硬质合金全面钻头.....	(212)
第三节 金刚石全面钻头.....	(217)
第四节 牙轮钻头.....	(224)

第二篇 钻探质量及定向钻进

第七章 岩矿心采取综述	(230)
第一节 对岩矿心采取质量的基本要求.....	(230)
第二节 影响岩矿心采取质量的因素.....	(231)
第三节 岩矿层取心难度的分类.....	(233)
第八章 常用的取心工具及取心方法	(234)
第一节 单层岩心管钻具取心.....	(234)
第二节 双层岩心管钻具取心.....	(236)
第三节 绳索取心钻进.....	(245)
第九章 反循环钻进	(253)
第一节 局部反循环钻进.....	(253)
第二节 水力反循环连续取心钻进.....	(262)
第十章 定向取心及岩矿心的补取	(268)
第一节 定向取心.....	(268)
第二节 岩矿心的补取.....	(274)
第十一章 钻孔弯曲	(277)
第一节 钻孔弯曲的测量.....	(278)
第二节 钻孔弯曲的原因.....	(305)
第十二章 钻孔弯曲的预防与纠正	(311)
第一节 钻孔弯曲的预防.....	(311)
第二节 钻孔弯曲的纠正.....	(315)
第十三章 定向钻进	(316)
第一节 定向钻孔的分类.....	(316)
第二节 定向钻孔的设计.....	(318)
第三节 人工定向钻进方法.....	(323)

第三篇 钻孔冲洗与护壁堵漏工艺

第十四章 钻孔冲洗与护壁堵漏综述	(339)
第一节 地层类型及其在成孔过程中的特征.....	(339)
第二节 钻进时循环系统的组成及循环方式.....	(340)
第三节 冲洗液及其循环的基本任务.....	(342)
第四节 钻孔冲洗及护壁堵漏工艺的研究对象和任务.....	(343)
第十五章 冲洗液	(344)
第一节 成孔过程对冲洗液的要求及冲洗液的类型.....	(344)
第二节 泥浆的基本原料.....	(346)
第三节 粘土-水分散体系的物理化学性质.....	(356)
第四节 泥浆的性能与测定方法.....	(366)
第五节 泥浆处理剂.....	(384)
第六节 钻探常用泥浆.....	(395)
第七节 乳状液.....	(402)
第十六章 复杂地层护壁与堵漏	(419)
第一节 水泥护壁与堵漏.....	(419)
第二节 其它护壁与堵漏方法.....	(437)
主要参考文献	(444)

总 论

《钻探工程学》课程的内容、地位和任务

钻探工程和其它学科一样,是人类与自然界斗争的经验总结。它研究的是如何用机械方式破碎岩石,在地层中形成其规格和质量符合要求的钻孔,以达到地质找矿(固、液、气态)和其它工程目的的问题。《钻探工程学》主要包括工艺和设备两大部分。这两部分是相辅相成的,即首先是工艺的要求促进了设备的发展,而设备的进步又使工艺水平得以提高。

《钻探工程学》是采矿工程专业的主要必修课,是继基础课和技术基础课,并通过野外实习获得一定的专业感性认识之后,为高年级开设的一门专业课。《钻探工程学》与基础课、技术基础课不同,它是一门实践性很强,多种学科综合应用的技术学科,其自身的理论正处于不断发展和完善的过程中。

通过本课程的学习可使学生掌握钻探工艺技术(岩心钻探、水文水井和工程钻探)及钻探设备的“三基”内容,为今后从事本专业技术工作和进一步学习后续选修课程奠定必要的专业基础知识。

钻探工程的起源和发展状况

我国是世界上最早开始钻探工程的国家。它起源于我国劳动人民钻凿盐井和饮用水井。最早的文字记载是二千二百多年前为了在内陆吸取卤水,而在四川地区“凿井求盐”。利用简便的竹弓法进行冲击钻进,并制造了冲击钻头和处理井内事故、修理井壁的工具。这种古老而有效的冲击钻进破岩工艺流传至今,仍具有生命力。现代机械冲击钻进法的基本原理仍与它相同,而西方直到19世纪20年代才开始应用这种方法。

随着工业技术的发展,直接破碎岩石的磨料、钻具形式以及与之适应的钻探设备都在不断改进。

19世纪初期,硬质合金的问世给钻井和采掘工业开辟了新的时代。以碳化钨为基体的硬质合金比以前各种钢制的切削具具有更高的硬度和耐磨性。硬质合金的硬度仅次于金刚石,可达HRA90。利用这种切削具做成不同类型的取芯钻头和取芯钻头,在Ⅳ级以下的岩层中可以有效地进尺。

19世纪末期,美国工程师提出在硬岩、特别是裂隙岩层中使用钻粒钻进取芯钻孔。因为钻进这种岩石时,昂贵的天然金刚石消耗量甚大。苏联、东欧的一些国家和我国在采用金刚石钻进之前,主要采用钢粒作为磨料来钻进坚硬、研磨性高的岩石。在钢粒钻进中钢粒不是固定在钻头唇面上,而是在钻头唇面推动下翻滚,达到破碎岩石的目的。当钢粒丧失工作能力后,由冲洗液进行分选,并由孔口补充。钢粒可用于Ⅳ级以上的硬岩钻进。即

使在金刚石钻进已普及的今天,由于成本关系,钢粒钻进仍在某些大口径钻进中得到应用。

自1862年法籍瑞士工程师莱舒特首先将天然金刚石应用于矿山钻探以来,西方国家金刚石钻进已有百余年历史。金刚石是世界上最硬的矿物,它比硬质合金的压模硬度大3~6倍,是钻进深孔和坚硬、强研磨性岩石最理想的磨料。但是天然金刚石资源有限,价格昂贵,制约了它的大面积推广。

1963年我国研制成功了人造金刚石钻头,并逐渐掌握了热压法、冷压法和电镀法等制造金刚石钻头的工艺技术。把人造金刚石孕镶钻头用于钻探生产是我国钻探工程界的一大突破,它得到了国际探矿工程界的一致好评。据统计,近年来我国地质系统采用金刚石钻进(其中绝大多数为人造金刚石钻进)的工作量已达1225km,占全国总钻探工作量的39.5%,平均台月效率403m/台月,优质孔达91.7%。由于用人造合成金刚石作为主要的钻进磨料,十分符合我国的资源特点,因而我国的金刚石回转钻进、金刚石冲击回转钻进等工艺技术和金刚石破岩机理、金刚石钻进岩石可钻性分级、金刚石钻头制造工艺学等理论研究都得到了迅速的发展。

为适应钻进工艺的进步,钻探设备逐步地更新换代。19世纪中期制造了可以采取岩矿芯的回转式钻机,这种钻机在基岩中钻进效率高,地质效果好。因而,在地质勘探各领域中占据了主导地位。

随着金刚石钻进的推广,为了适应金刚石钻进的高转速和严格的泵量要求,钻探设备结构设计必须改进。目前的新型液压力式钻机、动力头式钻机、多用型钻机,无论在性能上、技术参数上、结构上和外形上都与老一代钻机截然不同。

钻探设备的发展除了适应工艺要求之外,还与冶金工业、机械制造工业和电子工业的发展有关。这是因为钻探设备的结构设计除了有本专业特点外,还需大量采用机械行业中先进的传动副、标准件、液压件,以及仪表行业的各种测试仪表、显示元件等。冶金工业的发展提供了轻质高强度的材料,使设备的重量减轻,体积缩小。液压元件的可靠性和寿命增长将使新型钻机设计得更加合理耐用。

标准化工作的开展使得新钻机的设计与制造过程缩短,加速设备更新的步伐。这是因为一种新机型的设计,只要根据设计要求提出方案完成技术设计后,即可选用专业公司生产的性能完善的标准件进行组装。由于大量采用专业化生产的标准件,组装后的整机质量得以保证,通用性及互换性也良好。这一工作目前已在我国开展起来,但钻探设备的标准化、系列化工作与国际水平相比还有很大的差距。

钻探工程在国民经济建设中的作用及其分类

由于钻探工程可以从孔内取出圆柱形样品——岩芯,可以在任何硬度及稳定性的岩石中,以各种碎岩工具钻进与水平面呈各种不同角度的钻孔,可以用较轻的钻探设备钻进很深的小直径钻孔或较浅的大口径井筒,所以它在国民经济各部门得到了广泛的使用。

钻探工程是直接取得地下深部实物资料的唯一手段,是普查找矿和探明矿产储量的主要方法之一,是地质工作多工种合成作战的重要组成部分*。同时,钻探工程还广泛用于工程地质、水文地质研究和油、气田普查的构造填图及勘查。此外,还广泛用于钻进高层建

* 摘自地质矿产部地发(1987)29号文件

筑的桩孔、铺设各种管道的技术孔、军事工业的导弹发射井、矿山工业的通风孔、冻结孔，以及代替开凿竖井用的大直径井筒等。钻探工程可按其有代表性的特点进行分类：

(1) 按用途可把所有钻孔分为：普查填图钻孔、勘探钻孔、油、气、水开采钻孔、工程施工钻孔和辅助钻孔等。

(2) 按钻进深度可把钻孔分为浅孔、中深孔、深孔和超深孔。地质勘探钻进深度从几米至2~3km。南非勘探金矿的钻孔深达4.5km。油气勘探和开采井达9km以上。而研究地壳深部结构的超深孔深度为12~18km。

(3) 按孔径钻孔可分为小口径、大口径和特大口径。钻探的直径取决于钻孔深度、钻孔用途和地质构造，其孔径在26~5000mm之间变化。

(4) 按孔位可把在地表、江河湖海水面上和矿山坑道内施工的钻探工程分别称为陆地钻探、水上钻探和坑道钻探。

(5) 按开孔角度钻孔可分为垂直孔、倾斜孔和水平孔。设计时应力求使钻孔轴线与岩层的走向和倾向成直角。

(6) 按钻孔布置方案除了有直孔、弯曲孔外，还可根据钻孔用途、孔深和孔位，布置分支孔，即多孔底钻孔。

(7) 按碎岩工具可把钻进方法分为硬质合金钻进、钢粒钻进、金刚石钻进和牙轮钻头钻进。

(8) 按碎岩工具的传动方式可分为：回转钻进——利用安装在孔口的钻机，通过钻杆把扭矩和轴载传给钻头；冲击回转钻进——钻机从地表把扭矩和轴载通过钻杆和液动（或气动）冲击器传给钻头，同时冲击器以一定的频率冲击钻头；孔底动力机钻进——借助潜入式液动发动机（涡轮或螺杆钻具）或气动及电动发动机带动钻头破碎岩石，而其上部的钻杆柱不回转。

(9) 按冲洗剂分类：钻进中为了及时把岩屑排至孔外，清洁孔底，维护孔壁和冷却钻头要保持冲洗剂的不断循环。据所钻岩性和任务的不同可分为：用于稳定岩层的清水钻进；用于弱稳定岩层或裂隙、破碎岩层的泥浆钻进；用于高转速时钻具减摩减振的乳状液钻进；用于钻进盐类地层的饱和盐溶液钻进；用于缺水地区或特殊工艺要求的压缩空气吹孔钻进等。

(10) 按冲洗剂循环方式可分为：正循环钻进——冲洗剂（液或气）沿钻杆送至孔底，再沿钻杆外与孔壁之间的环状间隙升至地表，同时携出孔底岩屑；反循环钻进——冲洗液或压缩空气通过孔口密封装置沿孔壁和钻杆之间的环状间隙送入孔内，再与岩屑一起沿钻杆内通道返回地表；孔底局部反循环钻进——冲洗液或压缩空气先沿正循环路径，在接近孔底处经专用接头进入环状间隙，再与岩屑一起沿岩心管道上返至专用接头处，这样可提高硬、脆、碎地层的岩芯采取率。

(11) 按岩芯、岩屑从孔内输送至地表方式可分为：提钻用岩心管取芯方法；提钻用取粉管取岩屑或用岩屑收集器收集岩屑方法；不提钻用钢丝绳打捞绳索取芯器取芯方法和不提钻用液力或气力连续上举岩芯及岩屑方法（反循环连续取芯（屑）钻进）。

钻探工程的新工艺、新技术及其展望

目前，随着金刚石钻进的普及，本专业和兄弟学科许多新工艺、新技术及微型计算机

的应用, 钻探工艺是经验和技巧的综合的传统观念正在被更新。作为钻探工艺三要素的破碎岩石、提取岩芯、清理岩屑与护孔诸方面都有了长足的进步, 传统钻探的笨重落后状况正在被改观。

由于现代物理、岩石力学和断裂力学在钻探工程中的应用, 创立了各种钻进方法的井底过程和岩石破碎机理的理论, 并被实验研究所证实。电子显微镜、能谱分析等现代测试手段用于分析岩屑和钻头磨损, 可从微观上解释岩石破碎机理与切削具的磨损过程。

作为碎岩工具的切削具除了单晶的人造(或天然)金刚石外, 聚晶的多晶金刚石、金刚石复合体和其它超硬材料都已用于钻探工程。与制造钻头有关的人造金刚石选型与预处理、高温高压技术、粉末冶金、钻头结构参数和水力学设计等内容已逐渐形成一种专门的综合性知识——钻头制造工艺学。适用于现代钻探设备的金刚石钻进岩石可钻性分级方案业已试行, 为选择钻进规程和制订生产定额提供了依据。

在发展传统碎岩工具的同时, 孔底不提钻换钻头的新技术已取得了初步的成功。它使得金刚石钻头的寿命成倍提高, 在深孔钻进中具有更强的生命力。

延长钻头寿命只是提高钻探效率的一个方面, 我们还要设法缩短辅助作业时间, 提高纯钻进时间利用率。但在取芯钻进中传统的岩芯管长度一般不超过4.5m, 限制了回次长度。近年来不断完善的绳索取芯钻进和水力反循环连续取芯新工艺, 正逐渐用于生产, 钻探效率及地质效果进一步得以提高。目前, 美国和加拿大80%以上的岩芯钻探采用了绳索取芯, 并正在研制3.6km深孔的地质钻探用绳索取芯钻具。我国自行设计的S-56型、YS-55型和YS-45型绳索取芯钻具已批量生产, 口径为76mm的绳索取芯钻具也已投入推广使用。而反循环连续取芯新工艺在大幅度减少辅助时间和提高钻探质量方面更优于绳索取芯。苏联应用这种新工艺已钻进了780km, 机械钻速提高了2.4倍, 平均效率达2.5km/台月左右, 通常岩芯和岩屑采取率都达100%。

护孔技术也是钻探工艺中不容忽视的环节。它要求冲洗液有好的流变性, 对水敏性地层有抑制能力, 能抗高温稠化及参数可调范围广等特点。近年来推广使用了低固相泥浆、无固相泥浆、水包油乳化泥浆、泡沫泥浆和各种高效乳化剂、处理剂等。由于我国复杂岩层的钻探工作量约占总钻探工作量30%, 所以堵漏技术往往与护孔技术是联系在一起的。当前各种速效堵漏剂, 如高分子聚合物、塑料、地勘水泥等已用于钻探生产。随着高分子化学、有机化学、胶体化学诸学科成就的引入, 以及泥浆流变学、环空水力学和钻头水力学研究的进展, 钻探工程中的护壁堵漏这一分支已逐渐形成一门新的课程。此外, 采用电化学护孔技术处理水敏性的土层、岩层和没有固结力的砂层近年来也发展较快, 并已在大型井筒施工和一些水利工程中以及石油钻井中付诸实施。

近年来, 我国的冲击回转钻进工艺日趋成熟, 正作用、反作用、有阀式、无阀式、射流式和射吸式各类结构的冲击器均有定型产品, 并用于钻探生产。在大口径水井开发和工程施工钻孔中应用了泵吸反循环全面钻进。

在钻探施工中采用组合钻进技术, 是提高效率、降低成本的有效措施之一。即针对所钻岩层性质和工程目的, 分别采用配合物探测井的不取芯全面钻进、取芯回转钻进、冲击回转钻进或其它特种钻进方法。

在易斜矿区和无法设计垂直孔的地区, 已进行初级定向孔和分支孔钻进。随着孔底马达和随钻测量技术的完善以及微型计算机的应用, 这方面的新技术将迅速得到推广。

随着水上钻探任务的增多,许多单位正在从事船泊定向、水下专用钻具结构设计制造等新课题的开发研究。

今天由于钻参仪、微型计算机和其它新技术应用,钻探工程界已开始进入科学打钻的新阶段。在一些工业发达国家,微机已进入了钻探设备、碎岩工具、冲洗液、处理剂的选型、设计和生产控制与管理的各个领域。我国的高等院校、科研单位和部分局、队也已把微机用于钻探生产数据的采集、处理、优化设计、钻探参数和配方的优选以及管理工作的报表自动化等方面,并取得了可喜的进步。

以前限于室内研究的水力破碎和热力破碎两种碎岩新方法在近期内可望用于工业规模。新的探索性试验,如激光破碎和电磁破碎等也正在室内进行。

总之,展望21世纪钻探工程的应用范围将日趋扩大,除了勘探固体矿产外,各类开发孔、技术孔、具有专门用途的特种钻孔将愈来愈多。因而,所需的技术日益复杂,所需的知识面日益更新,交叉学科、边缘学科的形成和发展将成为必然的趋势。

第一篇 钻进方法

第一章 岩石性质及岩石破碎基础知识

钻探的对象是岩石。岩石是所有固体材料中最复杂的一种，是经历了漫长地质年代的自然产物。岩石的不均质性、不连续性、各向异性等物理性质和弹性、强度、硬度等力学性质，以及不同加载方式等工艺技术因素，都将明显地影响钻探工作的效率和质量。

本章的目的在于阐明岩石的基本性质，岩石在外载下破碎的基本规律，为正确地选择破碎岩石的方法、工具和护壁手段，确定合理的钻进工艺规程等奠定基础。

第一节 岩石及其物理性质

从影响机械破岩效果的角度看，岩石最重要的地质特征是矿物成分、结构和构造。而与此相关的主要物理性质是岩石的孔隙度、密度和各向异性。

一、岩石的矿物组成对岩性的影响

组成岩石的矿物称为造岩矿物。自然界组成岩石的矿物仅数十种，如橄榄石、长石、石英、云母、角闪石、辉石、方解石等。仅由单一矿物组成的岩石称为单矿物岩石，如白云岩、石英岩等。而多数岩石是由两种以上矿物组成的多矿物岩石，如花岗岩、砂岩等。

矿物的解理和劈理发育程度及方向、矿物的硬度、晶体结构等特征，在一定条件下决定着岩石抵抗外力的能力。特别是当岩石中含有数量较多的软而劈理发育的矿物或含有坚硬矿物时就更为明显。

矿物按莫氏硬度从软到硬的顺序是：（1）滑石，（2）石膏，（3）方解石，（4）萤石，（5）磷灰石，（6）长石，（7）石英，（8）黄玉，（9）刚玉，（10）金刚石。一般来说，由硬度较高的矿物所组成的岩石，其强度和硬度也较高。由于莫氏硬度较高的矿物是组成岩浆岩的主要造岩矿物，莫氏硬度较低的矿物则是沉积岩的主要造岩矿物。所以大致的规律是，岩浆岩的强度和硬度较高，沉积岩的强度和硬度较低。

通常是，造岩矿物中石英的含量愈多，胶结物的强度愈大，矿物颗粒愈细，则岩石的强度也愈大。由图 1-1 可明显看出，随着石英含量的增加，砂岩的强度将增大。而石英含

量相同的砂岩，钙质胶结的强度又更大一些。

二、岩石的结构及其孔隙度、密度

岩石的结构和构造是岩石组织的两个主要特征，它们对岩石的物理力学性质均有显著的影响。

岩石的结构属于岩石的微观特征，它指的是组成岩石的微晶或碎屑岩岩屑的粒度、形状和表面性质所决定的组织特征。岩石内部结晶的不完全性（岩浆岩、变质岩）和颗粒间的胶结不均匀性（沉积岩），特别是其中的某些因素（如孔隙、杂质含量、颗粒外形及薄弱质点等）对岩石的力学性质都会产生影响。

由于岩石微观结构上的特点，使多数岩石具有内部的孔隙空间，它是由矿物颗粒间的毛细裂隙所构成的，它使岩石的强度降低。当孔隙空间含水、渗水时，减小了矿物间的联系力，将使岩石的强度进一步降低，并导致硬度降低。

孔隙度 η 用岩石中的孔隙空间所占岩石体积的百分数来表示，

$$\eta = (V_0/V) \times 100\% \quad (1-1)$$

式中： V_0 ——岩石中孔隙的体积； V ——岩石的体积。

岩石的密度为

$$\rho = W_s/V \quad (1-2)$$

式中： W_s ——干燥岩石的质量。

实测资料表明，随着岩石孔隙度的减小，其密度（容重）增加，强度也将显著增加。如砂岩的容重由 1.87 增至 $2.57 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 时，其抗压强度由 15 增至 90 MPa 。因此，从钻进机械破碎岩石的角度来说，岩石的孔隙度和密度是重要的物理量。

表 1-1 为一些典型岩石的孔隙度和密度值。

表 1-1

岩 石	密度 (g/cm^3)	孔隙度 (%)	岩 石	密度 (g/cm^3)	孔隙度 (%)
花 岗 岩	2.6~2.7	0.5~1.5	页 岩	2.0~2.4	10~30
粗 晶 玄 武 岩	3.0~3.05	0.1~0.5	石 灰 岩	2.2~2.6	5~20
流 纹 岩	2.4~2.6	4~6	白 云 岩	2.5~2.6	1~5
安 山 岩	2.2~2.3	10~15	片 麻 岩	2.9~3.0	0.5~1.5
辉 长 岩	3.0~3.1	0.1~0.2	大 理 岩	2.6~2.7	0.5~2
玄 武 岩	2.8~2.9	0.1~1.0	石 英 岩	2.65	0.1~0.5
砂 岩	2.0~2.6	5~25	板 岩	2.6~2.7	0.1~0.5

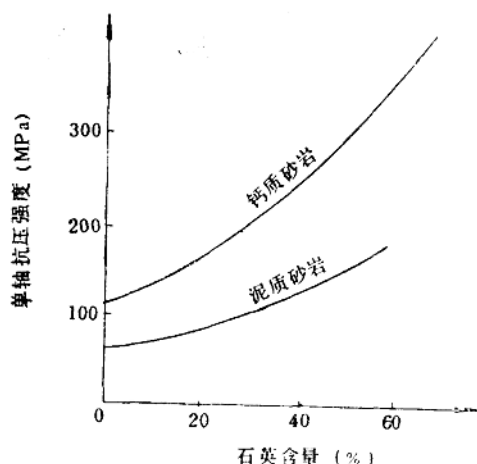


图 1-1 岩石的强度与石英含量的关系

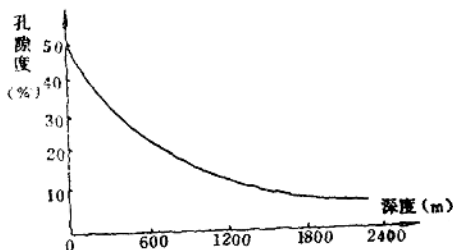


图 1-2 岩石孔隙度和埋藏深度的关系

一般岩石的孔隙度会随着埋藏深度的增加而减小。见图 1-2。而岩石的密度会随埋藏深度的增加而增大，因此岩石的强度也将随其埋藏深度的增加而增加。

三、岩石的构造及其各向异性、裂隙性

岩石的构造属于岩石组织的宏观特征，它是由微晶或碎岩岩屑的相互空间分布情况所决定的组织特征。属于构造特征的有层理、片理和裂隙。

沉积岩的层理和片理对岩石的力学性质有重要影响。

层理可定义为在垂直方向上岩石成分变化的情况。层理的形成主要有如图 1-3 中的几种类型。某些钻孔中出现的软硬互层也可看成是层理变化的反映。

片理是岩石沿平行的平面分裂为薄片的能力。片理面往往不与岩石的层理面相一致，它是岩石曾经历动力变质过程的结果。

由于岩石的构造特征，使多数岩石的性质具有不均匀性，反映在力学性质上为明显的各向异性。例如页岩、砂岩和某些石灰岩是成层的，板岩具有板状解理，这些沉积岩都表现了较高的各向异性。据实验资料得知，泥质页岩垂直于层理的抗压强度比平行层理的强度大 1.05~2.00 倍，砂岩为 1.03~1.20 倍，石灰岩则在 1.08~1.35 倍之间。其原因是层理面之间的联结力较弱，在沿平行于层理方向加压时，岩石首先从层理面裂开。如图 1-4 所示，垂直于岩石层理的抗压强度最大，平行于层理方向的抗压强度最小，与层理方向呈某种斜交时的抗压强度介于两者之间。

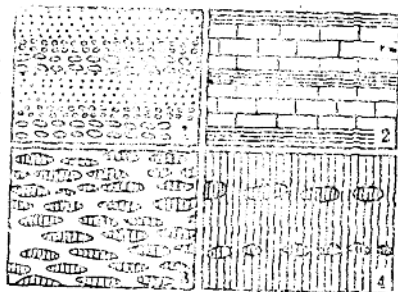


图 1-3 沉积岩的层理类型

1. 成分相同颗粒大小在垂直方向上呈规律性变化 2. 不同矿物成分的相互交替 3. 颗粒按一定方向排列 4. 某种颗粒呈线状分布

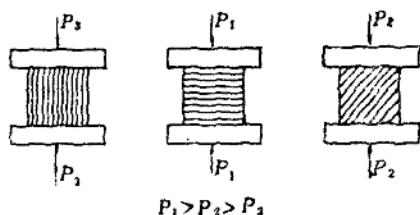


图 1-4 岩石层理对强度的影响

绿泥石、滑石和云母片岩等变质岩具有发育的片理面，其强度等力学性质随不同的试验方向呈现很大的差异，所以说许多变质岩的各向异性可能比沉积岩更显著。

必须指出，图 1-4 仅以岩石的抗压强度为例来说明各向异性的影响，其实沉积岩和变质岩在抗拉、抗弯、抗剪和变形特性等方面都具有各向异性，只是抗拉、抗弯强度最大的加载方向与抗压强度最大的加载方向相反。表 1-2 所

列为室内静力条件下测得的某些岩石在强度和变形特性方面的各向异性。

表 1-2 某些沉积岩的各向异性

岩石力学性质	粗砂岩		中粒砂岩		细砂岩		粉砂岩	
		⊥		⊥		⊥		⊥
弹性模量 E (10^4 MPa)	1.89 ~4.1 0.1	1.7 ~4.45 0.12	2.81 ~4.11 0.12	2.63 ~3.3 0.1	2.77 ~4.85 0.1	2.84 ~4.5 0.15	0.99 ~3.17 0.15	0.82 ~2.99 0.28
波桑比 μ	~0.45	~0.36	0.12	~0.22	~0.22	~0.36	~0.5	~0.47
抗压强度 σ_c (MPa)	116.1 ~154.4	139.5 ~172.5	114.7 ~211.7	144.1 ~201.9	135.0 ~236.2	130.8 ~216.1	33.7 ~102.4	54.3 ~112.4
抗拉强度 σ_t (MPa)	4.34	5.0 ~5.15	7.55	5.1	7.9 ~11.6	5.88 ~6.91	—	—
抗弯强度 σ_B (MPa)	10.88 ~16.86	10.09	15.88 ~22.15	12.84 ~19.01	20.43 ~26.0	17.4	2.22 ~16.27	4.21
抗剪强度 τ (MPa)	47.33	46.06	32.93 ~58.21	47.24 ~60.56	42.34 ~58.31	51.35 ~63.6	4.7 ~11.07	12.64 ~19.4

* 表中 || 和 ⊥ 符号分别表示平行于和垂直于层理面方向的试验条件。

裂隙性也是岩石的重要物理性质之一。它将对岩石的强度，钻进的难易程度和孔壁的稳定性产生影响。苏联学者在研究岩石裂隙性的基础上，建立了用于钻探工作的岩石裂隙性分级表(表 1-3)。岩石的裂隙性分级按下述三个标准来进行：岩心成块率 K_y (块/m)，岩心采取率 B_K (%)，裂隙性指标 W (个/r)。

按下式计算裂隙性指标，它用钻头转一圈遇到的裂隙数平均值来确定。

$$W = DK_y \lambda / \tan \beta \quad (1-3)$$

式中： D ——岩心直径 (m)； λ ——经验系数，取 $\lambda = 0.7$ ； β ——裂隙(节理)平面与钻孔轴线的夹角(度)。岩心成块率 K_y 和 β 角由从孔内取出的岩心来确定。

表 1-3 按岩石的裂隙性分级表

裂隙性 级 别	岩石的裂 隙 性 程 度	岩石裂隙性的估计值		
		成块率 (块/m)	裂隙性指标 (个/r)	岩心采取率 (%)
I	完 整 的	1~5	≤ 0.5	100~70
II	弱 裂 隙 性 的	6~10	0.5~1.0	90~60
III	裂 隙 性 的	11~30	1.01~2.0	80~50
IV	强 裂 隙 性 的	31~50	2.01~3.0	70~40
V	完 全 破 碎 的	≥ 51	≥ 3.01	60~30或更少

第二节 岩石的力学性质

岩石的力学性质是岩石在受力过程中表现出来的特性，它们取决于岩石的组成和结构，并与加载方式等外部工艺因素有关。与机械破岩效果有关的力学性质包括弹性、塑

性、强度、硬度和岩石的研磨性。

一、岩石的弹性与塑性

(一) 岩石的弹性

由于岩石的矿物组成和结构上的复杂性,岩石不是理想的弹性固体,其变形不可能完全地恢复。但是在某种形变的情况下(除非各向受很大的压应力),绝大部分岩石在破坏以前都存在着或长或短的一段弹性应变,也就是说岩石接近于弹性脆性体。在研究岩石的力学性质时,可借用弹性理论得出一些比较符合实际的定性解释,以便分析影响岩石变形特征和利于破碎的因素。

人们常用弹性模量 E 和波桑系数 μ 来表征岩石的弹性。其中 E 表示岩石受载方向上应力与应变成正比的比例系数, μ 则与在垂直加载方向上引起的应变有关。

矿物和某些岩石在发生破碎之前,它们变形时的应力和应变呈线性关系,可按公式(1-11)来确定其弹性模量。而多数岩石的应力应变关系是非线性的,可按等间距把载荷分成若干段,然后分段用公式(1-11)确定弹性模量,并用下式求平均值

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i \quad (1-4)$$

不同岩石的弹性模量值见表1-4。

表1-4 单向压缩时弹性模量 E 的值

岩 石	E (10 ⁴ MPa)	岩 石	E (10 ⁴ MPa)
泥 质 页 岩	1.5~2.5	白 云 岩	2.1~16.5
砂 岩	3.3~7.8	花 岗 岩	<6.0
石 灰 岩	1.3~3.5	玄 武 岩	<9.7
大 理 岩	3.9~9.2	石 英 岩	7.5~10.0

试验表明,岩石的弹性与应变种类、加载大小和加载性质等技术因素及矿物组成、颗粒大小、孔隙度和湿度等自然因素有关。

岩石的拉伸弹性模量 E_t ,弯曲弹性模量 E_B 和压缩弹性模量 E_c 之间有如下关系

$$E_t < E_B < E_c \quad (1-5)$$

即岩石在压缩条件下,抵抗变形和破碎的能力最强。由表1-5中数据可知,随着压应力增大,岩石的弹性模量也增大。

表1-5 在不同压应力下某些岩石的弹性模量

参 数	岩 石					
	粘 土		泥 灰 岩		灰 岩	
σ_c (MPa)	0~1	4~5	0~1	2~3	1~2	4~5
E (MPa)	8	36	35	182	85600	122600

当加载性质不同时，一次加载的弹性模量 E ，多次加载和卸载的弹性模量 E_H 和卸载弹性模量 E_V 有下述关系

$$E < E_H < E_V \quad (1-6)$$

若岩石的主要造岩矿物弹性模量较高，则岩石也具有较高的弹性模量，但是岩石的弹性模量将永远小于造岩矿物的弹性模量。这是因为弹性模量的大小主要与晶格内相互作用力有关，该作用力在矿物颗粒连接处比其内部显著减弱。

岩石的变形特征也具有各向异性。一般层状岩石在垂直层理方向的 $E_{\perp}$ 值小于平行于层理 $E_{\parallel}$ 值。例如泥质页岩 $E_{\parallel}/E_{\perp} \cong 2$ ，砂岩或粉砂岩 $E_{\parallel}/E_{\perp} \cong 1.2 \sim 1.4$ 。

在其它条件相同时，随着岩石的孔隙度和湿度增加，其弹性模量减小。

岩石的波桑系数变化范围也较大 ($0.1 \sim 0.45$)，但大多数岩石，特别是岩浆岩的平均值约为 0.25 。表 1-6 给出了某些岩石的波桑系数。

表 1-6

岩 石	μ	岩 石	μ
塑 性 粘 土	0.38~0.45	泥 质 页 岩	0.10~0.25
致 密 泥 岩	0.25~0.35	花 岗 岩	0.26~0.29
石 灰 岩	0.28~0.33	岩 盐	0.44
砂 岩	0.30~0.35		

在确定了岩石的弹性模量 E 和波桑系数 μ 之后，其剪切弹性模量 G 和体积应变模量 K 可由下述公式导出

$$G = E/[2(1 + \mu)] \quad (1-7)$$

$$K = E/[3(1 - 2\mu)] \quad (1-8)$$

(二) 岩石的塑性及其分类

岩石的塑性和岩石的弹性一样，都是岩石在外力作用下变形特征的一种反映。弹性反映的是岩石储存并释放外力所作的功使自身产生可逆应变的特性，而塑性反映的是岩石吸收残余变形或吸收其未破坏之前的不可逆应变机械能的特性。

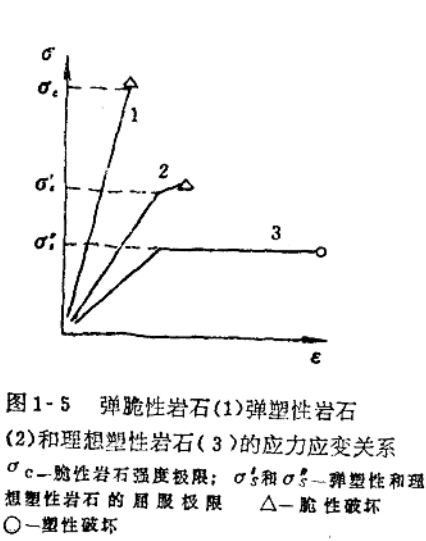
由于多数造岩矿物的塑性都不大，有的基本上无塑性，所以岩石的塑性变形主要是由于矿物颗粒间沿界面所产生的滑动面引起的。岩石内部颗粒间相对滑移能力愈强（细粒砾石、多晶体岩石），孔隙度和湿度愈大，则岩石的塑性愈强。

我们知道，在室温和常压下，当岩石处于简单应力（如单向压缩）状态时，其塑性并不明显（有的学者甚至认为就其自然属性来说，岩石是不具有塑性的）。但是，在复杂应力状态下（比如各向压缩），岩石却表现出很明显的塑性。不言而喻，钻探的对象都是处于各向压缩的地下岩石，因此我们关心和研究岩石的塑性是很有意义的。

在岩石力学中，根据单向压缩时应力-应变曲线所反映的岩石变形特征，常把岩石分成弹脆性岩石、弹塑性岩石和塑性岩石三类。

如图 1-5 所示，岩石在外力作用下，首先产生弹性变形，其应力-应变关系是一条斜率为 E 的直线。若进一步增加外载，便出现三种可能：一是导致岩石的脆性破坏，在此之前实际上不存在不可逆的应变——这类岩石称为弹脆性体（或弹性体）；二是导致应力和

应变之间的直线关系发生变化,这时变形速率大于加载的速率,岩石产生不可逆的应变。岩石经过短暂的塑性变形后,也产生脆性破坏——称为弹塑性体;三是经过短暂弹性变形后,很快便转入典型的塑性变形,岩石并不发生脆性破坏而是塑性破坏,其特点是破坏前有较大的不可逆应变和明显的破坏面,这类岩石称为塑性体。



由于岩石的性质有很大差异,也可能测出的曲线不象图 1-5 那样典型,但仍可大致归为上述三类。比如著名学者米勒 (Miller) 据 28 类岩石的试验结果,将单轴应力-应变曲线分为六种类型。如图 1-6 所示。其中 I、II 类属于弹脆性岩石, III、IV、V 类属于弹塑性岩石, VI 类属于塑性岩石。

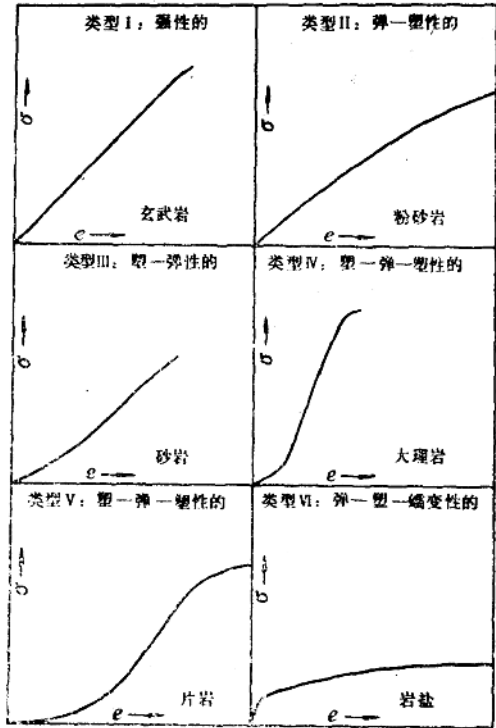


图 1-6 在单轴压缩下岩石直至破坏的典型应力-应变曲线

二、岩石的强度

(一) 岩石的强度及影响强度的因素

岩石强度的定义同固体强度的定义,可理解为抵抗外载整体破坏的能力。据外载的形式不同,可以有抗拉、抗压、抗弯和抗剪等几种强度。

岩石强度的大小主要取决于其内聚力和内摩擦力。岩石的内聚力表现为矿物晶体或其碎屑间的相互作用力。岩石的内摩擦力表现为颗粒间的原始状态即将破坏而要产生位移时的摩擦阻力。

参阅表 1-7 可知,同类岩石(如三种砂岩)和同名岩石(如页岩)的抗压强度 σ_c 变化范围很大,而成分不同的岩石(如白云岩与花岗岩、泥岩与石膏) σ_c 却很接近。说明岩石的矿物成分、结构、构造及其它物理性质等自然因素对岩石的强度影响很大。