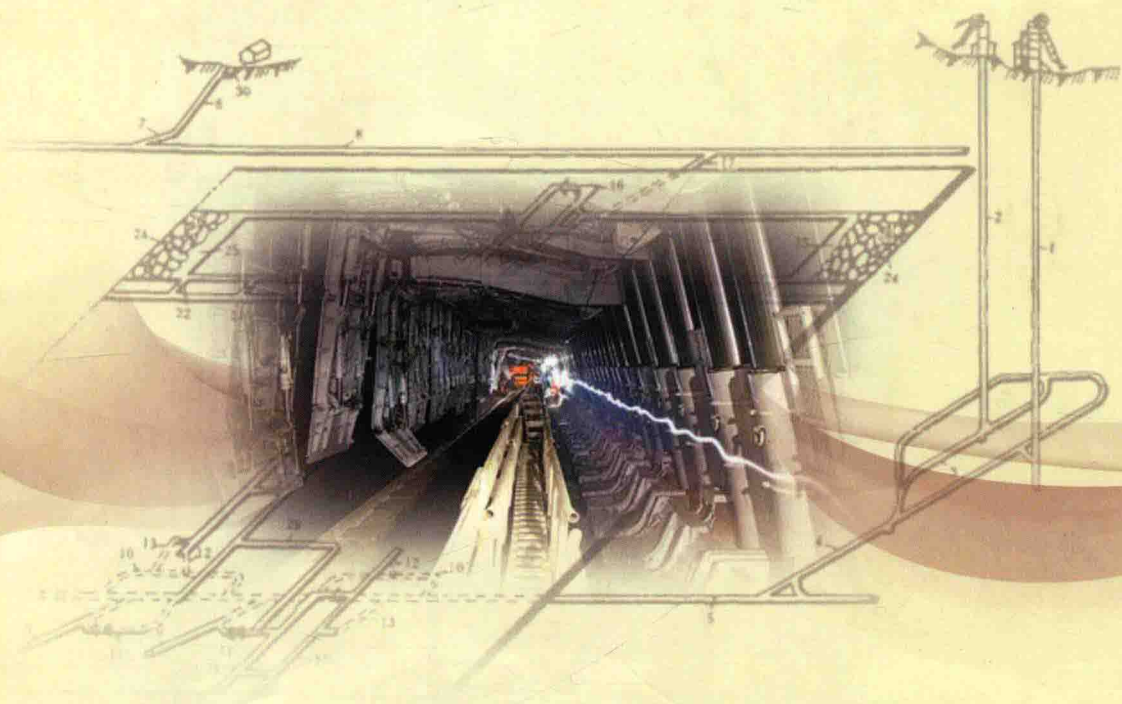


中国矿业大学卓越采矿工程师教材

井巷工程

刘 刚 东兆星 主编

Jinghang Gongcheng



中国矿业大学出版社

中国矿业大学卓越采矿工程师教材

井巷工程

刘 刚 东兆星 主编

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书介绍井巷工程的施工方法与施工技术,施工工艺和施工装备的选择,施工组织与管理以及质量、安全管理与健康保护等基础理论知识。在具体内容上,以钻眼爆破基础理论、岩石平巷和立井井筒的设计与施工为主进行系统的阐述,对其他巷道和井筒工程亦做了相应介绍。

本书是高等学校采矿工程专业“井巷工程”课程的通用教材。除满足高等学校本、专科教学用书外,还可作为企业培训、注册建造师考试及煤炭远程教育等参考书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

井巷工程 / 刘刚,东兆星主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3190 - 1

I. ①井… II. ①刘… ②东… III. ①井巷工程—高等学校—教材 IV. ①TD26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 173728 号

书 名 井巷工程

主 编 刘 刚 东兆星

责任编辑 陈红梅

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 24.5 字数 612 千字

版次印次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价 43.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

我国已建成煤矿的产能约 40 亿吨/年,包括新建、改扩建、资源整合等煤矿的在建煤矿产能超过 10 亿吨/年。按照国家规划,重点开发建设的 14 个大型煤炭生产基地的产能占全国总量的 90%以上,煤矿建设发展的布局已经自东、中部向西部地区快速转移。

井巷工程(shaft sinking and drifting)是研究地层中井筒、巷道、硐室设计与施工基本理论、方法和技术的一门应用技术学科。井筒、巷道、硐室等工程是矿山建设和矿井生产准备的重要组成部分,在矿井建设总工程量中占 60%~70%,是决定矿井建设质量和工期的主要因素。安全、高效、经济地破碎岩石并维持井巷围岩的稳定性,成为井巷工程的核心问题。除煤炭行业外,非煤矿山的井巷,其他地下工程领域如铁路隧道、地铁站线、地下厂房和涵洞的建设,均属于井巷工程的范畴。

按照井巷破岩方法的不同,井巷施工可分为钻眼爆破法和掘进机法。按照围岩强度、整体性、含水量及其赋存的地质环境不同,井巷施工方法有普通施工法和特殊施工法。普通施工法是指在稳定或含水较少的地层中采用钻眼爆破或其他常规手段掘凿井巷;特殊施工法是在不稳定或含水量很大的地层中采用特殊措施和工艺完成井巷开挖和支护,主要包括冻结法、钻井法、沉井法以及注浆法等。

我国煤矿建设的能力、技术和水平等方面已位居国际领先或先进水平。主要表现在:井巷施工机械化装备水平显著提高;爆破材料与技术不断取得进步;锚喷支护得到了广泛应用;井巷特殊施工技术迅速发展;地面建筑施工技术、机电设备安装技术有了长足进步。我国煤矿或非煤矿山的井巷施工技术成熟、可靠、安全,风险控制比较完善,能够针对或解决各种地层、岩性、水文、瓦斯等条件下的复杂井工或露天开采煤矿的建设施工。各类(项)煤矿生产、建设技术规范、标准健全严格。

本书以煤矿井巷工程施工图设计为基础,学习井巷工程的施工方法与施工技术,正确选择施工工艺和施工装备,科学的施工组织与管理,以人为本的安全管理与健康保护等基础理论知识,使学生比较全面、系统地掌握和运用基本理论和知识,获得结合工程实际、分析和解决有关实际问题的能力。“井巷工程”是一门实践性很强的应用性专业课程,学习时应注意理论联系实际,做到学习、研究基本理论知识与学习、研究科学组织与管理并重,学习知识与培养分析问题、解决问题能力并重。

本书与以前各版本的《井巷工程》教材相比,加强了施工组织与管理方面的内容。具体为三个方面:一是增加了井巷工程质量控制、检查与验收内容;二是增加了井巷工程施工安全管理与事故处理内容;三是加强了井巷施工的环境保护和职工健康保护方面的内容。

本书可适应采矿工程、通风安全等相关专业 32~64 课时的教学要求。建议学时如下:第一章至第八章可满足基本学时 32 课时的教学要求,也可满足 2 周巷道课程设计的指导要求;第一章至第十章可满足 48 课时的教学要求;第一章至第十三章可满足 56 或 64 课时的教学要求。除满足高等学校本、专科教学用书外,也可作为企业培训、注册建造师考试及煤

炭远程教育等参考使用。

本书共 13 章内容,由刘刚、东兆星担任主编。编写人员除中国矿业大学教师外,还有煤炭建设和生产现场的专家学者。各章编写人员如下:第一章至第三章由东兆星编写;第四章为由河南能源化工建设集团有限公司朱俊福编写;第五章、第六章、第十三章由刘刚编写;第七章由重庆川九建设有限责任公司侯建军编写;第八章由河南永煤集团城郊煤矿范子毅编写;第九章、第十一章由田建胜编写;第十章由盛平、刘志强共同编写;第十二章由中煤第五建设有限公司王鹏越编写。

本书编写过程中参考了众多的文献资料,在书末的参考文献中未能一一列出,在此向所有的文献作者致谢。

由于编者水平所限,虽经反复推敲核证,仍难免有不妥甚至疏漏之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

2016 年 1 月

目 录	
第一章 岩石的性质及其工程分级	1
第一节 概述	1
第二节 岩石的物理性质	3
第三节 岩石的力学性质	7
第四节 岩体工程分级	13
本章思考题	20
第二章 凿岩方法与设备	22
第一节 钻孔方法及其分类	22
第二节 凿岩机具	24
第三节 钻眼工具	30
第四节 压风供应	33
本章思考题	36
第三章 爆破理论与技术	37
第一节 炸药和爆炸概论	37
第二节 工业炸药	48
第三节 起爆器材	53
第四节 起爆方法	59
第五节 破岩原理与爆破技术	63
本章思考题	68
第四章 巷道断面设计	70
第一节 煤矿巷道类型与断面形状	70
第二节 巷道断面尺寸确定	73
第三节 水沟与管缆布置	87
第四节 巷道断面设计示例	90
本章思考题	95
第五章 岩巷施工	96
第一节 钻眼爆破	96
第二节 通风防尘与降温	111
第三节 装岩与运输	117

第四节 岩巷快速施工机械化作业线	132
第五节 巷道掘进安全工作	139
本章思考题	145
第六章 巷道支护技术	147
第一节 支护材料	147
第二节 锚杆支护	160
第三节 喷射混凝土支护	179
第四节 锚杆为主的联合支护	185
第五节 被动支护形式	193
本章思考题	197
第七章 采区巷道施工	198
第一节 概述	198
第二节 煤巷施工	203
第四节 半煤岩巷道施工	215
本章思考题	217
第八章 巷道施工组织与质量管理	218
第一节 巷道施工作业方法	218
第二节 巷道施工组织与管理	220
第三节 掘进队的劳动组织形式与管理制度	224
第四节 施工质量控制与验收	226
本章思考题	232
第九章 斜井设计与施工	234
第一节 斜井断面设计	234
第二节 斜井表土段施工	240
第三节 斜井基岩段施工	246
本章思考题	256
第十章 立井井筒设计与施工	257
第一节 概述	257
第二节 井筒断面设计	261
第三节 立井井筒表土施工	268
第四节 立井井筒基岩施工	276
第五节 立井井筒的延深	297
第六节 立井井筒施工组织	302
本章思考题	312

第十一章 井底车场的结构与施工	314
第一节 井底车场的结构与形式	314
第二节 井底车场施工组织与硐室施工方法	321
第三节 交岔点类型与施工方法	328
第四节 煤仓的结构与施工方法	332
本章思考题	338
第十二章 特殊条件下的巷道施工	339
第一节 软岩巷道施工	339
第二节 煤与瓦斯突出巷道施工	349
第三节 巷道的维护与修复	357
本章思考题	361
第十三章 矿井建设施工组织与管理	362
第一节 矿井建设施工方案	362
第二节 矿井建设施工组织	368
第三节 矿井建设安全管理与环境保护	376
本章思考题	380
参考文献	381

第一章 岩石的性质及其工程分级

井巷施工最基本的过程就是把岩石从岩体上破碎下来,形成设计所要求的井筒、巷道及硐室等空间,接着对这些地下空间进行必要的维护,防止围岩继续破碎或垮落。因此,破岩与井巷维护就成为井巷工程的主要问题。为了有效、合理地进行破岩和井巷维护,必须对岩石的物理、力学性质有较深的了解,并在此基础上进行科学的岩石工程分级,以便为设计、施工、维护和成本计算提供依据。

第一节 概 述

一、岩石与土的联系与区别

岩石作为多孔介质的一种,是由一种或多种矿物组成的集合体。它是没有显著软弱面的石质材料,是各种地质作用的产物,也是构成地壳的物质基础。岩石的每种矿物都各有其一定的内部结构和固定的化学成分,因而也各具一定的物理、力学性质和形态。

岩石和土都是矿物的集合体,是自然界地质作用的产物,并在地质作用下相互转化。土在一定温度和压力下,经过压密、脱水、胶结及重结晶等成岩作用会形成岩石;岩石经风化作用,又可变成土。岩石与土之间,既存在多方面的共性和密切联系,又有明显的不同。一般来说,岩石的力学性能、抗水性以及完整性等都比土好得多。也有些岩石与土很难区别,如某些固结程度较差的黏土岩、泥灰岩、凝灰片岩等,颗粒间的连接弱、强度低、抗变形性能差,其工程地质性质与土接近,可作为岩石与土的过渡类型。

岩石与土体的另一个重要差别,就是岩体中具有较高的地应力,这是岩石在长期的地质历史过程中遭受地质构造作用的结果,而土体中仅有自重应力存在。地应力的存在,使岩石的物理力学性质变得更为复杂。但总的来说,岩石的建筑条件比土体要优越得多,许多土体中出现的问题,对岩石来说则显得十分微弱。

建井工作者通常把覆盖在地壳上部的第四纪沉积物如黄土、黏土、流沙、淤泥、砾石等统称为表土。将表土以下的固结性岩石统称为基岩。我国华东、华北、华中和东北的各大煤田,上部覆盖几十米到上千米的含水松软、不稳定的冲积层,下部赋存着裂隙、岩溶发育,且含水丰富的基岩,有时还会遇到断层、褶皱等复杂的地质构造,这些都给建井增加了特殊困难,为适应特殊困难条件下建井的需求,产生了冻结法、钻井法、注浆法、帷幕法、沉井法、板桩法等特殊凿井方法。

二、岩石的基本概念

研究岩石主要是研究岩石的种类、性质、成分、形成过程、演变历史以及与矿产的关系。地壳中绝大部分矿产都产于岩石中,它们之间有着密切的成因联系。如煤产生在沉积岩里,大部分金属矿则产生在岩浆岩或其形成与岩浆岩有直接或间接联系。一方面,研究岩石就是为了发现岩石与矿产的关系,从中找出规律,以便更多、更好地寻找和开发矿产;另一方

面,大多数岩石本身就是重要矿产,如花岗岩、大理岩,可用作天然的建筑和装饰石料;此外,冶金用的耐火材料和熔剂、农业用的无机肥料以及部分能源,都来自天然岩石。

岩石对于采矿者来说尤为重要。工业场地布置于岩石之上,开拓系统布置在岩石之中,开采对象(矿体)不仅赋存在岩石内且有着成因联系,要采矿石必须先采出大量岩石(如露天矿的剥离)。因此,采矿工程技术人员必须具备岩石学的知识。

1. 岩石、岩块和岩体

研究岩石性质时,常用到岩石、岩块和岩体这三个术语。一般认为:岩块是指从地壳岩层中切取出来的小块体,或者指岩体中由弱面分割包围的即是岩块;岩体是指地下工程周围较大范围的自然地质体,即岩体=岩块+弱面;岩石则是不分岩块和岩体的泛称。

工程中岩石和岩体有明显区别。通常把在地质历史过程中形成的、具有一定的岩石成分和一定结构,并赋存于一定地应力状态的地质环境中的地质体,称为岩体。岩体在形成过程中,长期经受着建造和改造两大地质作用,生成了各种不同类型的结构面,如断层、节理、层理、片理等,这些地质界面具有强度低、易变形的特点,称为弱面。由于弱面的存在,岩体强度通常小于岩块强度,或者说弱面的性质决定着岩体的性质。所以,岩体往往表现出明显的不连续、非均质和各向异性。具有一定的结构是岩体的显著特征之一,它决定了岩体的工程特性及其在外力作用下的变形破坏机理。由此可见,从抽象的、典型化的概念来说,可以把岩体看做是由结构面和受它包围的结构体(岩块)共同组成的。

在研究岩石的力学性质时,应注意岩体的非均质性、各向异性和不连续等问题。相对于岩体而言,可以把岩块近似地视为均质、各向同性的连续介质来处理,而岩体则不能。除了少数岩体外,一般岩体均属于非均质、各向异性的不连续介质。

2. 岩石的结构与构造

岩石的结构和构造对岩石的性质有着重要影响。

岩石的结构说明岩石的微观组织特征,是指岩石中矿物的结晶程度、颗粒大小和形状以及彼此间的联结组合方式。岩石结构不同,其性质也各异。这主要决定于地质作用进行的环境,在同一大类岩石中,由于其生成的环境不同,就产生了种种不同的结构。

岩石的构造则说明岩石的宏观组织特征,是指岩石中矿物集合体之间或矿物集合体与岩石的其他组成部分之间的排列方式以及充填方式,反映着地质作用的性质。岩浆岩大多具有块状和流纹构造;变质岩的组成矿物在多数情况下都按一定方向平行排列,具有片理状构造;由外力地质作用生成的沉积岩是逐层沉积的,多具有层状构造。这些构造使岩石在力学性质上呈现出显著的各向异性。

研究岩石的结构构造,不仅对划分岩类、正确识别岩石有着实际的意义,而且在采掘工艺中,对于研究岩体稳定、井巷支护、爆破措施及选择采掘机械起着重要作用。

3. 节理的影响和岩体力学特性

岩体内存在有节理面(弱面)是影响岩体力学性质的重要因素。节理面的影响因素包括节理面本身的(强度、变形、结构形式等)性质、节理面的分布(密度和朝向)等。

节理面是岩体的弱结构,节理对岩体力学性质的影响与节理面的朝向有关。在不利朝向时,节理的存在会降低岩石强度和变形模量,形成岩体变形和强度的各向异性。

节理面的抗剪强度可以用库仑准则表示。节理面抗剪强度的影响因素包括节理面的接触形式、剪胀角大小、节理面粗糙度以及节理面充填情况(充填度、充填材料性质、干燥和风

化程度)等。

4. 岩石的分类

按其成因划分,可分为沉积岩、岩浆岩和变质岩三大类。

(1) 沉积岩

沉积岩通常以层状形式分布,具有明显的层理性。根据沉积条件和成分不同分为砾岩、各种砂岩及黏土岩、各种碳酸盐岩(石灰岩、白云岩等)。沉积岩地层中蕴藏着绝大部分矿产,如能源、非金属、金属和稀有元素矿产,其次还有化石群。

机械性沉积岩的组成包括颗粒成分与胶结成分。粗颗粒沉积岩性质主要取决于胶结成分,如砾岩和砂岩的力学性质,除了和砾石与砂粒的矿物成分有关以外,还与胶结物的性质有关。胶结成分包括硅(矽)质、铁质、钙质及泥质等,硅质和铁质胶结的岩石较坚固,钙质胶结易于溶解,泥质胶结岩石遇水后会软化。细颗粒沉积岩的性质与颗粒的矿物成分有很大关系,以高岭石、蒙脱石、伊利石等成分为典型,这类岩石孔隙率小、渗透性差,遇水后极易泥化而容易有塑性变形,甚至吸水膨胀。

(2) 岩浆岩

岩浆岩根据成因分为火山岩和侵入岩。岩浆岩的矿物组成与结构比较复杂。深成的侵入性岩浆岩形体大、结晶较均匀,浅成的侵入性岩浆岩组织结构复杂。喷出性火山岩常含有不同的凝灰成分,并会有间层等不规则结构。深成岩—浅成岩—喷出岩之间的强度和抗风化能力形成从高到低排列。

岩浆岩一般被视为均质、各向同性体(除部分喷出岩),物理力学性质指标比较高。

(3) 变质岩

变质岩随变质环境(母岩种类、温度、压力)的不同,有石英岩、片麻岩、板岩、大理岩等多种。变质岩一般具有结晶和定向排列结构,但其成分多种多样,变质程度也有深浅区别,因此岩性差别较大。变质岩的母岩如是沉积岩,变质会改善其力学性质,变质程度越深,岩性越好。

除按其成因划分外,按照岩石坚硬程度可划分为硬质岩、软质岩和极软岩三类;按岩体完整程度可划分为完整岩体、较完整岩体、较破碎岩体、破碎岩体和极破碎岩体。

第二节 岩石的物理性质

一、岩石的相对密度和密度

岩石由固体、水、空气三相组成,具有相对密度、密度等指标。

1. 相对密度

岩石的相对密度,是指岩石固体实体体积的质量与同体积水的质量之比值。所谓岩石固体实体体积,是指不包括孔隙体积在内的实在体积。其计算公式为:

$$d = \frac{G}{V_c \rho_w} \quad (1-1)$$

式中 d ——岩石的相对密度;

G ——绝对干燥时体积为 V_c 的岩石质量, g;

V_c ——岩石固体实在体积, cm^3 ;

ρ_w ——水的密度, g/cm^3 。

岩石的相对密度取决于组成岩石的矿物的相对密度。一般地,如果岩石的矿物成分确定以后,岩石的相对密度就可以粗略地进行估计,例如石灰岩的相对密度与方解石的相对密度相近,砂岩的相对密度接近于石英的相对密度。

2. 密度

单位体积(包括岩石内孔隙体积在内)岩石的质量,称为岩石的密度。岩石的密度又可分为干密度和湿密度两种。干密度是指单位体积岩石绝对干燥时的密度,湿密度是指天然含水或饱水状态下的密度。

$$\rho_c = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

$$\rho = \frac{G_1}{V} \quad (1-3)$$

式中 ρ_c ——岩石的干密度, g/cm^3 ;

ρ ——岩石的湿密度, g/cm^3 ;

G ——岩石试件烘干后的质量, g ;

G_1 ——岩石试件的质量(天然含水或饱水), g ;

V ——岩石试件的体积, cm^3 。

一般情况下,岩石干、湿密度差别不大。但对于某些黏土类岩石,区分干、湿密度具有重要意义。岩石密度取决于岩石的矿物成分、孔隙率和含水量。当其他条件相同时,岩石的密度在一定程度上与埋藏深度有关,靠近地表的岩石密度往往较小,而深部的致密岩石一般具有较大的密度。

二、岩石的孔隙性

岩石的孔隙性,系指岩石的裂隙和孔隙发育的程度,它通常用孔隙率 n 和孔隙比 e 来表示。孔隙率是指岩石试件内各种裂隙、孔隙的体积总和与试件总体积 V 之比;孔隙比指岩石试件内各种裂隙、孔隙的体积总和与试件内固体矿物颗粒体积 V_c 之比。岩石的孔隙率和孔隙比通常是根椐岩石的相对密度 d 和干密度 ρ_c 计算求得。

$$n = \frac{V - V_c}{V} = 1 - \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{V_c}{G} \cdot \frac{G}{V} = 1 - \frac{\rho_c}{d\rho_w} = \left(1 - \frac{\rho_c}{d\rho_w}\right) \times 100\% \quad (1-4)$$

$$e = \frac{V - V_c}{V_c} = \frac{V}{V_c} - 1 = \frac{d\rho_w}{\rho_c} - 1 \quad (1-5)$$

岩石的孔隙性质对岩石的其他性质有显著影响。随着岩石孔隙率增大:一方面,削弱了岩石的整体性,使得岩石的密度和强度随之降低、透水性增大;另一方面,由于孔隙的存在,又会加快风化速度,从而进一步增大透水性和降低力学强度。

三、岩石的水理性质

岩石在水作用下表现出来的性质是多方面的,对于矿山工程岩体稳定性有突出影响的主要是吸水率、透水性、溶蚀性、软化性、膨胀性和崩解性等指标。

1. 岩石的吸水率

岩石吸水率 w ,是指岩石试件在大气压力下吸入水的质量 g 与试件烘干质量 G 之比值。

$$w=\frac{g}{G}$$

(1-6)

岩石吸水率的大小,取决于岩石所含孔隙、裂隙的数量和大小、开闭程度及其分布情况,并且与试验条件有关。试验表明,整体岩石试件的吸水率比同一岩石的碎块试样吸水率要小;随着浸水时间的增加,吸水率也会有所增大。

某些岩石的相对密度、密度、孔隙比和吸水率指标见表 1-1。

表 1-1 某些岩石的相对密度、密度、孔隙比和吸水率指标

岩石名称		d	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$e/\%$	$w/\%$
岩浆岩	花岗岩	2.50~2.84	2.30~2.80	0.04~0.92	0.10~0.92
	闪长岩	2.60~3.10	2.52~2.96	0.25~3.00	0.30~0.48
	辉绿岩	2.80~3.10	2.53~2.97	0.40~6.38	0.22~5.00
	安山岩	2.40~2.80	2.30~2.70	1.09~2.19	0.29
	玄武岩	2.60~3.30	2.50~3.10	0.35~3.00	0.31~2.69
	凝灰岩	2.56~2.78	2.29~2.50	1.50~4.90	0.12~7.45
沉积岩	砾岩	2.67~2.71	2.42~2.66	0.34~9.30	0.20~5.00
	砂岩	2.60~2.75	2.20~2.71	1.60~2.83	0.20~12.19
	页岩	2.57~2.77	2.30~2.62	1.46~2.59	1.80~3.10
	石灰岩	2.48~2.85	2.30~2.77	0.53~2.00	0.10~4.45
变质岩	片麻岩	2.63~3.01	2.30~3.05	0.70~4.20	0.10~3.15
	片岩	2.75~3.02	2.69~2.92	0.70~2.92	0.08~0.55
	石英岩	2.53~2.84	2.40~2.80	0.50~0.80	0.10~1.45
	大理岩	2.80~2.85	2.60~2.70	0.22~1.30	0.10~0.80

2. 岩石的透水性

地下水存在于岩石的孔隙和裂隙中,而且大多数岩石的孔隙和裂隙是互相贯通的,因而在一定水压力作用下,地下水可在岩石中渗透。这种岩石能被水透过的性能称为岩石的透水性。岩石透水性的 大小除了与地下水水头和岩体的应力状态有关外,还与岩石的孔隙率、孔隙大小及其连通程度有关。

衡量岩石透水性的指标为渗透系数,其单位与速度相同。由达西公式 $Q=KAI$ 可知,单位时间内的渗水量 Q 与渗透面积 A 和水力坡度 I 成正比,其中比例系数 K 称为渗透系数。渗透系数一般通过在钻孔中进行抽水试验或压水试验来测定,不同岩石的透水性差别极大。

岩石的透水性对岩石的工程稳定性影响很大。一般来说,地下的岩石处于流体(液体和气体)的环绕之中,相对处于平衡状态。当受到人类工程活动影响时,其原始的平衡状态被打破,岩石系统为寻求新的平衡就要发生相应的状态调整,在调整过程中流体的流动对岩石是有很大影响的,两者是处于耦合状态下的调整。这一点在坝体工程、地下岩石中的核废料处理、地下岩体中的水污染处理等问题中经常要涉及。

3. 岩石的溶蚀性

由于水的化学作用而把岩石中某些组成物质带走的现象称为岩石的溶蚀。岩石的溶蚀

性取决于其化学成分、矿物组成和岩石结构。溶蚀作用可使岩石致密程度降低、孔隙度增大,导致岩石强度降低。这种溶蚀现象在某些围岩如石灰岩地层中是常见的,是岩溶地貌形成的主因。

4. 岩石的软化性

岩石浸水后其强度明显降低,用软化系数来表示水对岩石强度的影响程度。软化系数是指水饱和岩石试件的单向抗压强度与干燥岩石试件单向抗压强度之比,可表示为:

$$\eta_c = \frac{R_{cw}}{R_c} \leq 1 \quad (1-7)$$

式中 η_c ——岩石的软化系数;

R_{cw} ——水饱和岩石试件的单向抗压强度,MPa;

R_c ——干燥岩石试件的单向抗压强度,MPa。

岩石浸水后的软化程度,与岩石中亲水性矿物和易溶性矿物的含量、孔隙发育情况、水的化学成分以及岩石浸水时间的长短等因素有关。亲水矿物和易溶矿物含量越多,开口孔隙越发育,则岩石浸水后强度降低程度越大。岩石浸水时间越长,其强度降低程度也越大。表 1-2 为某些常见岩石的软化系数值。

表 1-2 某些常见岩石的软化系数值

岩石名称	R_c /MPa	R_{cw} /MPa	η_c
黏土岩	20.3~57.8	2.35~31.2	0.08~0.87
页 岩	55.8~133.3	13.4~73.6	0.24~0.55
砂 岩	17.1~245.8	5.6~240.6	0.44~0.97
石灰岩	13.1~202.6	7.6~185.4	0.58~0.94

岩石的软化性对井巷工程稳定性的影响很大,在设计中必须考虑。另外,在地下采矿活动中,有时也充分利用水对岩石所产生的软化作用来防治地质灾害的发生,如煤与瓦斯突出防治中的水力处理措施、大面积来压中坚硬顶板的注水软化处理等。

5. 岩石的膨胀性和崩解性

膨胀性和崩解性是松散软岩所表现出的特征。前者是指软岩浸水后体积增大和相应地引起压力增大的性能,后者是指软岩浸水后发生的解体现象。岩石的膨胀性和崩解作用往往对地下工程的施工和巷道稳定性带来严重的不良影响。

岩石的膨胀性和崩解性主要取决于其胶结程度及造岩矿物的亲水性,一般含有大量黏土矿物(如蒙脱石、高岭土和水云母等)的软岩遇水后极易产生膨胀和崩解。

四、岩石的碎胀性和压实性

岩石破碎以后因碎块间空隙增多而总体积将比整体状态下增大的性质称为岩石的碎胀性。而压实性是指岩石破碎后在外力作用下,随着时间的推移能够逐步被重新压实的性质。

岩石的碎胀性可用岩石破碎后处于松散状态下的体积与岩石破碎前处于整体状态下的体积之比来衡量,该值称为碎胀系数,即:

$$K = \frac{V_1}{V} \quad (1-8)$$

式中 K ——岩石的碎胀系数;

V_1 ——岩石破碎膨胀后的体积；

V ——岩石处于整体状态下的体积。

岩石的碎胀系数与岩石的物理性质、破碎后块度大小及其排列状态等因素有关。如坚硬岩石破碎后块度较大且排列整齐时，碎胀系数较小；反之，如破碎后块度较小且排列较杂乱，则碎胀系数较大。表 1-3 列出了几种常见岩石的碎胀系数。

表 1-3 几种常见岩石的碎胀系数

岩石名称	砂、砾石	砂质黏土	中硬岩石	坚硬岩石	煤
K	1.05~1.2	1.2~1.25	1.3~1.5	1.3~1.5	<1.2

在井巷掘进中选用装载、运输、提升等设备时，必须考虑岩石的碎胀系数，而且岩石爆破所需膨胀空间大小也与岩石的碎胀系数有关。另外，岩石的碎胀系数对工作面矿体采出后直接顶垮落形成的堆积体高度，以及随后基本顶结构失稳造成工作面顶板来压的影响很大。在计算顶板来压强度时往往要考虑到直接顶岩层的厚度以及其碎胀系数，借此可以了解到其对采空区的充填程度及来压状况。而在路基的碎石垫层设计中，必须考虑到岩石的压实性。

第三节 岩石的力学性质

岩石的力学性质是指岩石在外力作用下所表现出来的性质，包括岩石的变形性质和强度性质。岩石的变形性质所表现的是岩石对外力的尺寸响应，而强度性质所表现的是岩石抵抗外力破坏的能力。

在外力作用下岩石首先产生变形，随着力的不断增加，达到或超过某一极限值时，便产生破坏，岩石遭受破坏时的应力称为岩石的强度。研究岩石的力学性质，主要是要研究岩石的变形、破坏与强度等性质。

一、岩石的变形特征

研究岩石的变形性质，主要是研究岩石在外力作用下所表现出来的应力—应变关系，而岩石的应力—应变关系又与岩石的受力状态有关。

1. 静荷载单向受压条件下岩石的变形特征

岩石的变形规律可通过外力作用下的变形过程及变形参数说明。所以，首先应研究岩石的全应力—应变关系。根据大量的实验资料，在单向压力作用下，岩石典型的应力—应变全程曲线如图 1-1 所示，该曲线通常只有用刚性试验机才能得出。为便于比较，图中也给出了软钢在单向拉伸时的应力—应变全程曲线，可以看出，岩石与软钢具有明显不同的变形特征。页岩全应力—应变全程曲线特征见表 1-4。

(1) 微裂隙及裂隙闭合阶段(OA 段)。应力应变曲线呈凹型，这是岩石中原有裂隙受压后逐渐闭合所致，称为裂隙压密闭合阶段。对于致密岩石这个阶段很小甚至没有。

(2) 可恢复弹性变形阶段(AB 段)。应力应变曲线呈直线形，即曲线的斜率近似为常数，称为线弹性阶段。弹性段的斜率(弹性模量)，软钢要比页岩高一个量级(10 倍)左右。岩石的弹性模量一般为 20~30 GPa，是软钢弹性模量(206 GPa)的 10%~15%。

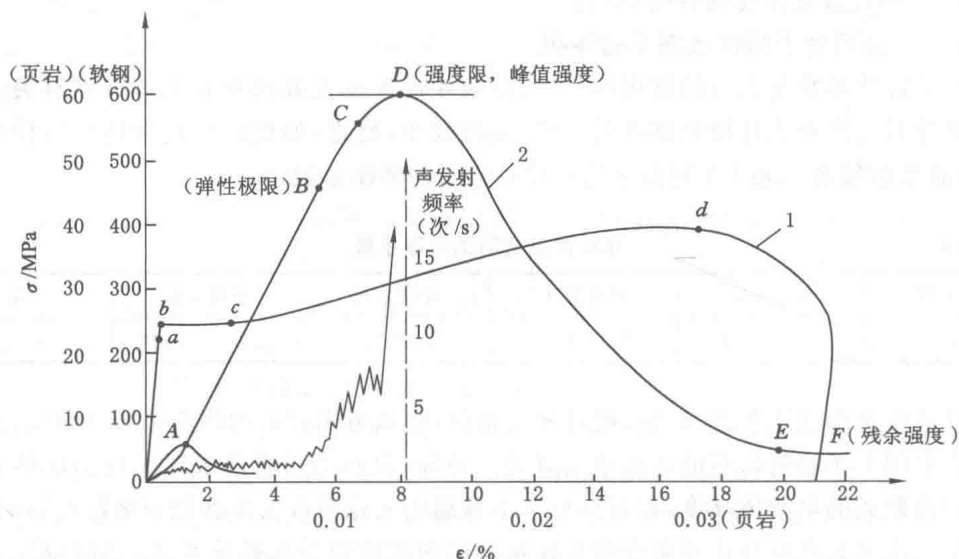


图 1-1 页岩全应力—应变曲线与软钢应力—应变全程曲线

1—软钢应力—应变曲线；2—页岩应力—应变曲线

a—比例极限；b—屈服极限（弹性极限）；bc—屈服平台；c—屈服平台终端；d—软钢强度极限

表 1-4

岩石全应力—应变曲线特征

特征 \ 区段	OA	AB	BC	CD	DE	EF
斜率	渐增	不变	渐减	速减	变号	变为零
裂隙状况	原始裂隙闭合，试件与压板间隙调整	微量新裂隙产生	应力达到 60% 峰值强度以上时，新裂隙产生增多	应力达到 95% 峰值强度以上时，新裂隙激增并相互贯穿	贯穿裂隙继续发展	裂隙停止发展
声发射	微量	少量	明显增多	激增	继续变化	停止变化
残余应变	有（或无）	无	有	有	有	有

在此阶段，如果卸除荷载，变形能完全恢复。B 点对应的应力称为弹性极限，其值约等于峰值强度的 30%~40%。此阶段中有微量新裂隙随之产生。

(3) 部分弹性变形至微裂隙扩展阶段(BC 段)。这一阶段的特点可由开始膨胀和近似性增长的体积应变来表征。曲线仍呈近似直线，这一阶段的上界 C 点对应的应力称为屈服极限。这时岩石压密至最密实状态，体积应变趋于零，C 点出现在 80% 峰值强度处。相比页岩，软钢有明显的屈服平台 bc 段。

(4) 非稳定裂隙扩展至岩石结构破坏阶段(CD 段)。这一阶段的特点是微裂隙迅速增加和不断扩展，形成局部拉裂或剪裂面。体积变形由压缩转变为膨胀，最终导致岩石结构完全破坏。本阶段的上界 D 点对应的应力称为峰值强度或单向抗压强度。

(5) 微裂隙聚结与扩展阶段(DE 段)。岩石通过峰值应力阶段，虽然其内部结构完全破坏，但岩石仍呈整体。到本阶段裂隙扩展成分叉状，并相互连接形成宏观断裂面。此时由于应变软化效应，应力随着应变增加而降低。

(6) 沿破断面滑移阶段(EF段)。本阶段岩石基本上已经分离成一系列碎块体,并在外力作用下相互滑移,随之变形不断增加。而应力则降低到某一稳定值,这一稳定值称为残余强度,其大小等于块体间的摩擦阻力。

2. 岩石全应力—应变曲线及变形特征的工程意义

岩石以应力峰值为界,其左右分别称为峰前区和峰后区,而软钢通常没有必要如此划分。岩石峰后区DEF曲线的存在,说明岩石在达到极限强度以后,仍然存在着承载能力。这符合一部分矿山工程的实际情况,如巷道围岩多数平稳地破裂,破裂后仍然具有一定的强度。因此,在岩体已经开裂破坏而尚未垮落的情况下,如能采取适当支护措施制止或缓和岩体变形,则岩体破坏就会停止而仍然保持相当大的承载能力,充分利用岩石承载能力是地下岩石工程的重要原则。锚喷支护就是制止岩体变形的有效措施。

材料受力作用时发生变形或断裂,会以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射。岩石的压缩变形伴随有裂隙开裂的过程,因此破裂声响不断,并最终形成断裂。岩石试件在不同的阶段都有声发射产生,并且在不同阶段有不同的声发射特征。岩石的宏观裂隙与其微破裂有直接的关系,岩石的声发射反映了岩石损伤的程度,它与岩石内部缺陷的演化与繁衍直接相关。利用声发射技术可以探测岩石性质和状态的变化,从而对岩体破坏进行预报。

由于岩石具有在弹性阶段体积变小和塑性阶段体积增大的特点,故在塑性阶段,试件要先恢复至原体积而后再超过原体积。相对于试件原体积而言,体积由减小到增加的转折点,约在50%峰值强度附近。岩石在塑性阶段的体积膨胀称为扩容现象,它主要是由于变形引起裂隙发展和张开而造成的,对于研究巷道变形和围岩对支护造成的压力等问题有重要意义。

岩石受载后变形很小即破裂的性质称为脆性。永久变形或全变形小于3%者为脆性破坏,具有这种特性的岩石称为脆性岩石。永久变形或全变形大于5%者为塑性破坏,具有这种特性的岩石称为塑性岩石。永久变形或全变形为3%~5%为过渡状态。由图1-1可知,达到强度极限时的应变值,页岩只有1.3%,而软钢则达到17%(比页岩高十几倍)。岩石的弹性、塑性和脆性不是绝对的,可随受力状态、加载速度、温度等条件而变化。例如:在静荷载作用下产生塑性变形的岩石,在冲击荷载作用下脆性显著增长;在常温下表现为脆性的岩石,在高温下塑性显著提高。

岩石在弹性变形和塑性变形过程中要消耗能量,这对冲击凿岩和爆破不利。如果凿岩冲击功不大,弹性大的岩石会使钎杆在孔底跳动而影响钻进速度。爆破时,药包爆炸能量中有相当大的一部分要消耗在岩石的弹性震动上。相反,岩石脆性较大时,由于变形所耗能量较小,对局部应力敏感而易于冲击破碎,宜选用高猛度炸药。塑性显著的岩石,虽不利于冲击凿岩,但对剪切应力抵抗能力差,宜使用旋转式钻眼法破岩,并可选用低威力炸药。

3. 岩石在三向静荷载压缩条件下的变形特征

在自然环境条件下,岩体绝大多数是处于三向压缩状态,研究岩石在三向压缩下的变形特性更有实际意义。为了研究岩石在三向应力下的变形,常进行两种应力状态下的三轴实验:一是 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$,称为不等压或真三轴实验;二是 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$,称为假三轴或常规三轴实验。本节介绍常规三轴,即假三轴实验的变形。研究表明,围压作用下岩石的变形特征与单向受压时不尽相同。图1-2所示为大理岩在不同围压下的应力—应变曲线。