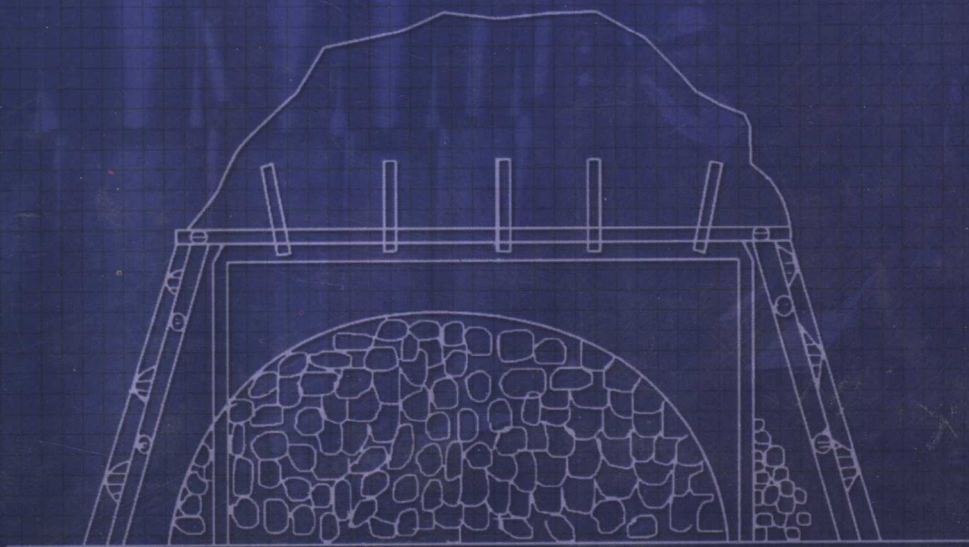


J I N G H A N G G O N G C H E N G

井巷工程

主编 东兆星 吴士良



中国矿业大学出版社

井巷工程

东兆星 吴士良 主编

中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

井巷工程/东兆星,吴士良主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2004. 1

ISBN 7 - 81070 - 849 - X

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 127046 号

书 名 井巷工程

编 著 东兆星 吴士良

责任编辑 耿东锋

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

电话:3888115 3884895

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

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 **印张** 20.25 **字数** 501千字

版次印次 2004年1月第1版 2004年1月第1次印刷

定 价 26.80元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

煤炭工业是国民经济的基础工业,它为许多重要部门提供原料和能源。我国能源结构以煤为主的格局在今后较长的一段时间内不可能改变,国民经济的发展将对煤炭产量的增长提出更高要求。而煤炭工业生产的发展,取决于煤炭工业基本建设及开拓延深工作能否及时地、持续不断地提供生产煤炭的场所。为了把煤从地下采出,首先要从地表开始开凿一系列的井筒、硐室和巷道到达煤层,这即是矿山基本建设的主体工程——矿建工程;移交生产后,随着采煤工作面 and 采区的不断推进,还要持续不断地及时准备巷道,以保证采煤工作面和采区的正常接续;在上一生产水平煤层采完之前,就要着手进行井筒延深和新水平的开拓,以保证水平的及时接替。所以,只有及时地做好矿井建设和开拓延深工作,才能保证煤炭稳产、高产并不断发展。井巷掘进为采煤创造生产条件,掘进服务于采煤,二者相互依存、必须并重,否则,采掘比例失调必将严重影响煤炭的正常生产和发展。

建国以来,煤炭矿井建设得到了迅速发展,恢复和改造了一些老矿井,建设了几十个新矿区,并相继进行了开拓延深和扩建工程,为我国煤炭产量从1949年的3 243万t增长到2003年的约14亿t奠定了基础。同时,井巷施工技术也得到了迅猛发展。在立井施工方面,已在一些矿区装备使用了以大型凿井绞车、提升机、新Ⅳ型和新Ⅴ型大型凿井井架、伞形钻架、深孔光面爆破、大型抓岩机、锚喷和滑模筑壁等为主要设备和技术的机械化作业线;立井混合作业也得到了广泛应用,并逐步改进提高;井筒防腐技术也有了提高,到目前为止全国新建的立井井筒装备大部分进行了防腐处理,使用寿命可延长一倍以上;用树脂锚杆固定井筒装备技术已在全国100多个井筒推广应用,从而加快了井筒安装速度,保证了井壁质量。在特殊凿井方面,由于在新井建设中经常遇到比较复杂的工程地质和水文地质条件,因此应用比重逐渐增加。据统计,采用冻结法施工的井筒已有420余个,累计冻结总深度近70 km,最大冻结深度435 m;采用注浆法施工的井筒已有150多个,最大注浆深度达1 105 m;采用钻井法施工的井筒已有50余个,成井累计深度约10 km,最大钻井直径9.3 m,最大钻井深度508.2 m;采用沉井法施工的井筒达160余个,创造了下沉192.75 m的纪录,接近世界最大下沉深度200.3 m的水平;采用帷幕法施工的井筒约30个,井径一般4.5~6 m,最大达8 m,深度一般为30~40 m,最大达57 m。在岩石平巷施工方面,平巷机械化作业已初见成效,以钻装锚机为主体的作业线、以凿岩台车、侧卸装载机为主组成的作业线已广泛采用,全断面掘进机正在积极推广之中,带调车盘耙斗装载机作业已成为平巷快速施工的主要方式,光面爆破、锚喷支护也得到广泛推广和应用,锚喷支护已成为岩石平巷的主要支护形式。在煤巷掘进中采用部分断面掘进机已取得了较好效果。在斜井施工方面,已形成以大箕斗、大扒斗、深孔光爆、锚喷支护、激光指向为主要内容的一套有中国特色的机械化施工工艺和作业线,在国内多次实现斜井快速施工,从而保证了我国斜井施工在世界的领先地位。此外,施工管理技术也得到了不断改进和提高。

为了适应国民经济发展对煤炭产量的要求,必须依靠科学技术进步,缩短建井工期,快速、优质、高效、低耗和安全地完成井巷工程施工任务,也要积极提高井巷施工机械化程度,

推广和使用新技术,加强科学管理,使井巷工程技术发展到一个新水平。

《井巷工程》是一门实践性很强的应用课程。学习本课程时,要注意理论联系实际,要把实习、课堂教学、课程设计三个环节紧密配合起来,以便使学生较好地掌握课程内容。本书主要供煤炭高等院校教学之用,也可作为相关人员学习、参考用书。因此,根据教学实际需要,本书在内容上做了适当的调整,在平巷、斜巷、立井三项技术中,以平巷设计与施工为主进行系统阐述,其他的内容也都根据专业特点做了有主有次安排,力求做到点面结合、重点突出、举一反三。

本书各章编写人员如下:第一章吴士良,第二章东兆星,第三章、第四章刘刚,第五章翟所业、毕永芳,第六章张若祥、吴士良,第八章梁士杰,第九章牛光峰、翟所业,第十章李伟、翟所业,第十一章史振凡、吴士良,第十二章、第十三章、第十四章刘志强。

由于条件所限,不足之处在所难免。衷心希望读者能给予批评或指正,在此先道一声谢谢!如您有相关建议,请直接与本书的责任编辑联系。

编者

2003年12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	2
第三节 岩石的力学性质	5
第四节 岩石的工程分级	12
第二章 钻眼爆破	15
第一节 钻眼机具	15
第二节 炸药和爆炸概论	28
第三节 工业炸药	37
第四节 起爆器材	41
第五节 电雷管起爆法	47
第六节 破岩原理和爆破技术	50
第三章 巷道断面设计	54
第一节 巷道断面形状	54
第二节 巷道断面尺寸	55
第三节 巷道断面内水沟设计和管线布置	66
第四节 巷道断面设计示例	68
第四章 岩巷施工	73
第一节 钻眼爆破	73
第二节 掘进通风与综合防尘	86
第三节 装岩与转运	89
第四节 岩巷掘进机	103
第五章 巷道支护	107
第一节 支护材料	107
第二节 锚喷支护	120
第三节 普通支架	139
第六章 煤巷施工	146
第一节 全煤巷施工及配套设备	146
第二节 半煤岩巷道施工	149
第三节 综采和综放工作面全煤切眼锚网支护设计和施工	151
第四节 全煤巷快速掘进作业规程编制	154
第七章 巷道施工组织与管理	161
第一节 一次成巷及其作业方式	161
第二节 施工组织	163

第三节 掘进队的组织与管理制度·····	166
第四节 巷道快速施工工艺与组织施工实例·····	167
第八章 硐室及交岔点·····	171
第一节 井下主要硐室设计·····	171
第二节 硐室施工·····	189
第三节 平巷交岔点设计与施工·····	196
第九章 采区上下山及煤仓施工·····	210
第一节 上下山施工·····	210
第二节 采区煤仓施工·····	215
第十章 特殊条件下的巷道施工·····	220
第一节 松软岩层巷道施工·····	220
第二节 揭开煤与瓦斯突出煤层的施工方法·····	231
第十一章 巷道维护与维修·····	239
第一节 巷道破坏分析和巷道维护原理·····	239
第二节 巷道维护与修复支护技术·····	240
第三节 巷道底鼓的防治·····	248
第四节 巷道修复安全措施·····	250
第十二章 井筒施工·····	252
第一节 概述·····	252
第二节 井筒断面设计·····	253
第三节 井筒表土施工·····	260
第四节 立井基岩施工·····	266
第十三章 立井井筒延深·····	287
第一节 利用辅助水平延深井筒·····	287
第二节 利用延深间延深井筒·····	290
第三节 利用反井延深井筒·····	293
第四节 延深井筒的保护设施·····	300
第十四章 矿井建设施工组织与管理·····	302
第一节 矿井建设施工顺序·····	302
第二节 矿井建设施工管理·····	308
主要参考文献·····	315

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,必须对岩石和岩体的物理力学性质有所了解,并在此基础上制定出科学的岩石工程分级方法,以便为设计、施工和成本计算提供依据。

第一节 概 述

岩石是由一种或多种矿物组成的。每种矿物都各有其一定的内部结构和比较固定的化学成分,因而也各具一定的物理性质和形态。岩石性质与其矿物组成有关。一般而言,岩块中含硬度大的粒状和柱状矿物如石英、长石、角闪石、辉石和橄榄石等愈多,岩块的强度就愈高;含硬度小的片状矿物如云母、绿泥石、滑石、蒙脱石及高岭石等愈多,岩块的强度就愈低。

岩石的结构和构造对岩石的性质也有重要影响。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、形状和颗粒之间的联结方式。岩石结构不同,其性质也各异。当矿物成分一定,呈现细晶、隐晶结构时,岩块强度往往比较高。粒状矿物较片状矿物不易形成定向排列。所以当其他条件相同时,含片状矿物较多的岩石往往呈现较强的各向异性;含粒状矿物较多的岩块则常呈各向同性。沉积岩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很大的关系。硅质胶结的强度最大,铁质、钙质、泥质和泥灰质胶结的强度依次递减。而岩石的构造则说明岩石的宏观组织特征。岩浆岩的流纹构造、沉积岩的层理构造和变质岩的片理构造,均可使岩石在力学性质上呈现出显著的各向异性。

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;岩体是指地下工程周围较大范围的自然地质体;岩石则是不分岩块和岩体的泛称。

由于各种地质作用,岩体中往往有明显的地质遗迹,如层理、节理、断层和裂隙面等。这些地质界面与所研究岩体的岩块比较,具有强度低、易变形的特点,称为弱面。岩体被这些弱面切割成既连续又不连续的裂隙体。由于弱面的存在,岩体强度通常小于岩块强度。

在研究岩石的力学性质时,必须注意到岩块的非均质性、各向异性和不连续等问题。但岩块是不包含有显著弱面的岩石块体,相对岩体而言,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。

建井工作者常把覆盖在地壳上部的第四纪沉积物如黄土、粘土、流沙、淤泥、砾石等统称为表土;表土以下的固结性岩石统称为基岩。在煤系地层中最常遇到的是各种沉积岩,如石灰岩、砂岩、砂质页岩、页岩等,只有局部地段才有岩浆岩侵入。

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、密度和重度等指标。

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,就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 为岩石相对密度; G 为绝对干燥时体积为 V_c 的岩石质量, g ; V_c 为岩石固体实在体积, cm^3 ; ρ_w 为水的密度, 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。一般情况,如果岩石的矿物成分鉴定以后,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

岩石单位体积(包括岩石内孔隙体积在内)的质量,称为岩石的密度,又称质量密度。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 为岩石的干密度, g/cm^3 ; ρ 为岩石的湿密度, g/cm^3 ; G 为岩石试件烘干后的质量, g ; G_1 为岩石试件的质量(天然含水或饱水), g ; V 为岩石试件的体积, cm^3 。

在一般情况下,岩石干、湿密度的数值差别不大,但对于某些粘土类岩石,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、孔隙度和含水量。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,而深部的致密的岩石一般具有较大的密度。

3. 重度

单位体积岩石所受的重力称为重度,又称为重力密度。重度用 γ 表示。

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,它通常用孔隙度 n 和孔隙比 e 来表示。孔隙度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。岩石的孔隙度和孔隙比通常是根

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

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

岩石的孔隙性质对岩石的其他性质有显著影响。随着岩石孔隙度增大,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。

$$w = \frac{g}{G} \quad (1-6)$$

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。

表 1-1 为某些岩石的相对密度、密度、孔隙比和吸水率指标。

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		相对密度 d	密度 $\rho/g \cdot cm^{-3}$	孔隙比 $e/\%$	吸水率 $w/\%$
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内的应力状态有关外,还与岩石的孔隙度、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 成正比关系,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。对于某些岩石来说,即使是同种类型的岩石,其透水性也可以在很大范围内变化,表 1-2 为几种岩石的渗透系数指标。

表 1-2 几种岩石的渗透系数

岩石类型	渗透系数/ $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	测定方法
泥 岩	10^{-4}	现场测定
粉砂岩	$10^{-8} \sim 10^{-9}$	实验室测定
细砂岩	2×10^{-7}	实验室测定
坚硬砂岩	$4.4 \times 10^{-5} \sim 3.9 \times 10^{-4}$	
砂岩或多裂隙页岩	$> 10^{-3}$	
致密的石灰岩	$< 10^{-10}$	
有裂隙的石灰岩	$2 \sim 4$	

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。如把试件浸在 80°C 的纯水中,经过 24 h,从水中离子的变化就可以看出水的溶蚀作用。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为石灰岩的矿井中是常见的。如贵州 761 矿,在该矿巷道中即可看到类似钟乳石或石笋的溶蚀沉积物。

4. 岩石的软化性

岩石浸水后其强度明显降低,通常用软化系数来表示水分对岩石强度的影响程度。所谓软化系数,是指水饱和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 为岩石的软化系数; R_{cw} 为水饱和和岩石试件的单向抗压强度, MPa; R_c 为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愈多,开口孔隙愈发育,则岩石浸水后强度降低程度愈大。岩石浸水时间愈长,其强度降低程度也愈大,如某些砂岩浸水 3 d 后单向抗压强度可降低 32%~35%,而浸水 9 d 后降低 51%~59%。

表 1-3 某些常见岩石的软化系数值

岩石名称	干试件抗压强度 R_c/MPa	水饱和试件抗压强度 R_{cw}/MPa	软化系数 η_c
粘土岩	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

5. 岩石的膨胀性和崩解性

膨胀性和崩解性是散软岩石所表现出的特征。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不良影响。

岩石的膨胀性可用膨胀应力和膨胀率来表示。岩石与水进行物理化学反应后,随时间变化会产生体积增大现象,这时使试件体积保持不变所需要的压力称为岩石的膨胀应力,而增大后的体积与原体积的比率称为岩石膨胀率。这些指标可在实验室用专门仪器测定。

岩石的崩解性用耐崩解指数表示,它是指岩石试件在承受干燥和湿润的两个标准循环之后,岩石试件对软化和崩解作用所表现出的抵抗能力。该指标可通过实验确定。

四、岩石的碎胀性

岩石破碎以后的体积将比整体状态下增大,这种性质称为岩石的碎胀性。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 为岩石的碎胀系数; V_1 为岩石破碎膨胀后的体积; V 为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 1-4 列出了几种常见岩石的碎胀系数。在井巷掘进中选用装载、运输、提升等设备的容器时,必须考虑岩石的碎胀系数。岩石爆破所需容许膨胀的空间大小也同该岩石的碎胀系数有关。

表 1-4 几种常见岩石的碎胀系数

岩石名称	砂、砾石	砂质粘土	中硬岩石	坚硬岩石	煤
碎胀系数 K	1.05~1.2	1.2~1.25	1.3~1.5	1.3~1.5	<1.2

第三节 岩石的力学性质

一、岩石的变形特征

岩石在外荷载作用下,因应力增加会发生相应的应变。当荷载增大到破坏值,或荷载达到某一数值而恒定保持下去,均会导致岩石破坏。变形和破坏是岩石在荷载作用下的两个发展阶段。变形中包含着破坏的因素,而破坏是变形发展所致。

外荷载按作用性质有静荷载和动荷载之分。

(一) 静荷载下岩石的变形特征

岩石在静荷载单向压缩情况下,应力—应变的一般关系如图 1-1 所示。

I —— OA 段,应力应变曲线呈上凹型,这是岩石中原有裂隙和孔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。

Ⅱ——AB段,应力应变曲线呈直线型,即曲线的斜率近似为常数,称为线弹性阶段。在Ⅰ、Ⅱ段内,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或屈服应力,B点称为屈服点。

Ⅲ——BC段,应力应变曲线呈下凹型,曲线斜率逐渐减小,此阶段内局部破损逐渐增大而导致岩石达到强度极限C点,称为破裂发展阶段。如为普通试验机,则到达C点后,由于加载系统储存的弹性能量的突然释放会致使试件破坏;如为刚性试验机,由于加载系统储存的弹性能量大大减少和试验机及时地减少荷载,则可以观察到应力应变曲线第Ⅳ阶段。如果在BC段内任一点P卸载,曲线按PQ变化;重新加载,曲线按QR变化。PQR称为塑性滞环。QS为弹性变形,卸载时可恢复;OQ为塑性变形,卸载时不能恢复。C点对应的应力称为极限抗压强度。

Ⅳ——CD段,为应力应变曲线的软化阶段。在这个阶段内,岩石仍保持一整体继续抵抗荷载;当岩石破裂仍继续发展,直到D点才最终破裂;从D点以后应力基本不变而应变无限增长。D点应力被称为残余强度。CD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。锚喷支护就是制止岩体变形的十分有效的措施。

岩石受单轴压缩时,始终伴随着体积变化,其一般规律是在弹性阶段体积减小而在塑性阶段体积膨胀。通常将体积改变量 ΔV 与原体积 V 的比值称为体积应变,也称体积改变率。体积应变 ϵ_v 与三向应变之间的关系为:

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

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,体积由减小到增大的转折点大约在 $\sigma = R_c/2$ 附近, R_c 为岩石单轴抗压强度。

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。它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。

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、温度等条件变化而变化。例如,多数岩石在单向或三向低压应力状态下表现出脆性,但在三向高压应力状态下脆性岩石在破坏前都表现出很大的塑性;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

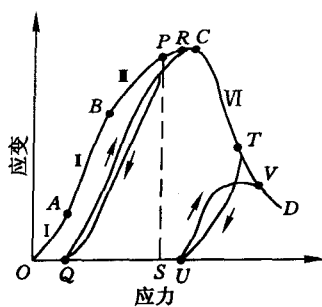


图 1-1 一般岩石在室温和大气条件下单向压缩试验曲线

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;脆性大易于爆破碎岩并适于选用高猛度炸药。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,并可选用低猛度、低静力作用力炸药。

(二) 岩石在三向静荷载压缩条件下的变形特征

研究岩石在三向压缩下的变形特性有很大的实际意义,因为自然条件下岩体绝大多数是处于三向压缩状态,受单向应力的岩体是很少见的。试验证明,有侧向压力作用时的岩块变形特性与单向压缩时的变形特性不大相同。图 1-2 表示大理岩在三向压缩条件下的应力应变全过程曲线。由图可见,随着围压提高,岩石表现出下列特征。

(1) 弹性段与单轴压缩下基本相同。这一特性具有重要意义,因为可以通过简易的单轴试验确定复杂应力状态下的弹性常数。

(2) 岩石表现出明显的塑性变形。

(3) 屈服极限、强度峰值和残余强度都与围压大小成正变关系。

(4) 大部分岩石在一定的临界围压下出现屈服平台,呈现塑性流动现象。

(5) 达到临界围压以后继续提高围压,不再出现峰值,应力应变关系呈单调增长趋势。

(三) 动荷载下岩石的变形特征

无论是冲击式凿岩机凿碎岩石还是爆破破碎岩石,岩石承受的外力都不是静荷载,而是一种冲击荷载。它不是一个常数,而是关于时间的函数。图 1-3 所示是凿岩机活塞冲击钎尾时作用力随时间变化的实测曲线。从图中可以看出,作用力在数十微秒内由零骤增到数万牛顿,经数百微秒后又重新下降到零。

岩石在这种急剧变化荷载作用下,既产生运动又产生变形。这种动荷载变形用肉眼是看不出的,可用图 1-4 示意说明。当冲击荷载 P 施于岩石的端面时,其质点便失去原来的平衡而发生变形和位移,进而形成扰动。一个质点的扰动必将引起相邻质点的扰动。这样一个传一个地使质点的扰动,必然连锁反应地由冲击端面向另一端传播过去。这种扰动的传播叫做波。同时,变形将引起质点之间的应力和应变。这种应力—应变的变化的传播叫做应力波或应变波。图中 Δt 为质点扰动位移, c_p 为质点扰动的传播速度(即波速), Δt 为质点扰动的传播时间,则 Δt 时间内变形范围为 $c_p \Delta t$ 。此时,岩石试件中只有 $c_p \Delta t$ 段的变形,其他部分仍处于原始静止状态。所以,在动荷载作用下的变形不是整体的均匀变形,质点的运动速度也不是整体一致的,变形和速度都有一个传播过程。因此,岩石的动荷载变形特征同静荷载变形特征有本质区别。

波是质点扰动的传播而不是质点本身的移动。根据传播位置不同,波可分为体积波和表

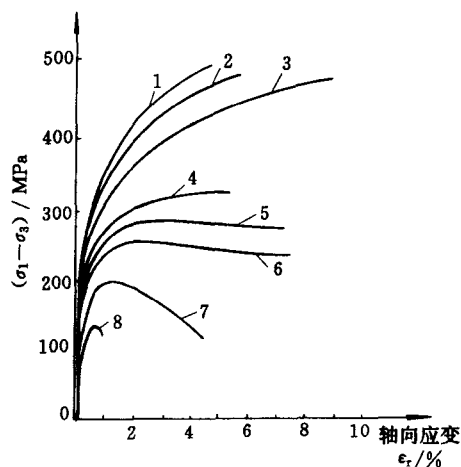


图 1-2 德国大理岩单轴和三轴应力—应变全图

- 1—— $\sigma_3 = 326 \text{ MPa}$; 2—— $\sigma_3 = 249 \text{ MPa}$;
3—— $\sigma_3 = 165 \text{ MPa}$; 4—— $\sigma_3 = 84.5 \text{ MPa}$;
5—— $\sigma_3 = 62.5 \text{ MPa}$; 6—— $\sigma_3 = 50 \text{ MPa}$;
7—— $\sigma_3 = 23.5 \text{ MPa}$; 8—— $\sigma_3 = 0 \text{ MPa}$

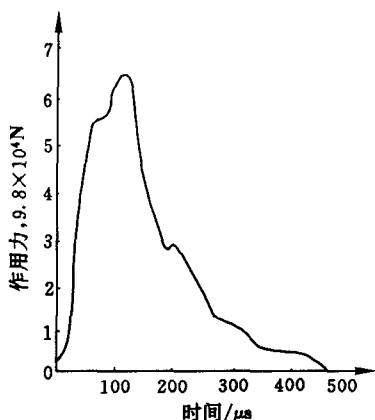


图 1-3 作用力—时间曲线

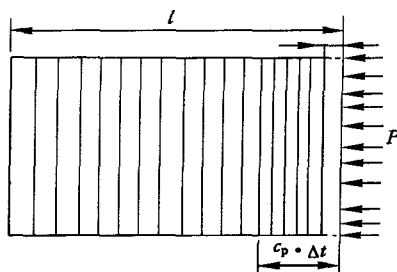


图 1-4 由冲击端面产生的变形

面波。在介质内部传播的波叫做体积波,只沿介质体的边界面传播的波叫做表面波。体积波又可分为纵波和横波两种。介质质点振动方向同波的传播方向一致的叫做纵波,它可引起介质体积的压缩或膨胀(拉伸)变形,故又叫做压缩波或拉伸波。介质质点振动方向同波的传播方向垂直的叫做横波,它可引起介质体形状改变的纯剪切变形,故又称为剪切波。这些波都叫做应力波或应变波,但通常应力波是指纵波。

在应力波的传播过程中,应力 σ 、波速 c_p 和质点振动速度 v_p 之间的关系,可通过动量守恒条件导出。即应力波在 Δt 时间内经过某区段 $c_p \Delta t$ 时,它所接受的冲量和表现出的动量相等,即

$$p \Delta t = M v_p$$

式中, M 为某区段 $c_p \Delta t$ 的质点, $M = \rho \omega c_p \Delta t$ 。则

$$P = \rho \omega c_p v_p$$

$$\sigma = \frac{P}{\omega} = \rho c_p v_p \quad (1-9)$$

式中, ρ 为介质的密度; ω 为某区段的截面积; ρc_p 被称为波阻抗,即介质密度和纵波波速的乘积,它表征介质对应力波传播的阻尼作用。

应力波在传播过程中,遇到岩体中的层理、节理、裂隙、断层和其他自由面,或者介质性质发生改变(例如从钎头到岩石介面或岩性不同的交界面)时,应力波的一部分会从交界面反射回来,另一部分透过交界面进入第二介质。如图 1-5 所示,设介质 1 (ρ_1, c_{p1}) 与介质 2 (ρ_2, c_{p2}) 的交界面为 A—A,当应力波到达交界面是垂直入射时,就会产生垂直反射和垂直透射。由于交界面处应力波具有连续性,若不考虑应力波的衰减和损失,则质点的振动速度相等,即

$$v_i - v_r = v_t \quad (1-10)$$

同时,在交界面处的作用力与反作用力相等,即交界面两侧的应力状态相等,则

$$\sigma_i + \sigma_r = \sigma_t \quad (1-11)$$

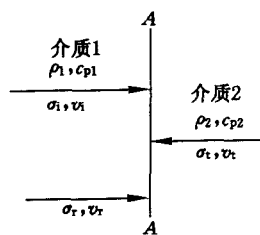


图 1-5 纵波垂直入射

式中,下标 i、r、t 分别表示入射、反射和透射。

根据公式(1-9)得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \rho_1 c_{p1} v_i & v_i &= \frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{p1}} \\ \sigma_r &= \rho_1 c_{p1} v_r & v_r &= \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{p1}} \\ \sigma_t &= \rho_1 c_{p1} v_t & v_t &= \frac{\sigma_t}{\rho_1 c_{p1}} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

将公式(1-12)代入公式(1-10)得

$$\frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{p1}} - \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{p1}} = \frac{\sigma_t}{\rho_2 c_{p2}} \quad (1-13)$$

将公式(1-13)与公式(1-11)联立求解得:

$$\sigma_r = R_r \sigma_i \quad (1-14)$$

$$\sigma_t = R_t \sigma_i \quad (1-15)$$

其中, R_r 为应力波的垂直反射系数,用下式计算。

$$R_r = \frac{\rho_2 c_{p2} - \rho_1 c_{p1}}{\rho_2 c_{p2} + \rho_1 c_{p1}} \quad (1-16)$$

R_t 为应力波的垂直透射系数,用下式计算。

$$R_t = \frac{2\rho_2 c_{p2}}{\rho_2 c_{p2} + \rho_1 c_{p1}} \quad (1-17)$$

公式(1-14)至公式(1-17)表明,反射应力波和透射应力波的大小是交界面两侧介质波阻抗(ρc)的函数。

(1) 当交界面两侧介质的波阻抗相等即 $\rho_1 c_{p1} = \rho_2 c_{p2}$ 时, $\sigma_r = 0$, $\sigma_t = \sigma_i$, 说明透射波和入射波性质完全一样,并全部通过交界面进入第二介质,不产生波的反射。

(2) 当 $\rho_2 c_{p2} > \rho_1 c_{p1}$ 时, $\sigma_r > 0$, $\sigma_t > 0$, 说明在交界面上有反射波也有透射波。如果 $\rho_2 c_{p2} \gg \rho_1 c_{p1}$, $\rho_1 c_{p1}$ 可忽略不计,交界面为固定端,则 $\sigma_r = \sigma_i$, $\sigma_t = 2\sigma_i$, 这说明在交界面上的反射应力波的符号、大小和入射应力波完全一样,透射应力波是入射应力波的两倍。叠加的结果使交界面处的应力值为入射应力波的两倍。

(3) 当 $\rho_2 c_{p2} = 0$ 或 $\rho_2 c_{p2} \ll \rho_1 c_{p1}$ 时,即当应力波到达的交界面是自由面时, $\sigma_r = -\sigma_i$, $\sigma_t = 0$, 这时反射波与入射波的符号相反、大小相等,叠加的结果使交界面处的应力值为零。即入射压缩波全部反射成拉伸波而没有透射波产生。由于岩石的抗拉强度很小,因此这种情况对岩石的破碎极为有利。这也说明自由面对破岩的重要作用。

(4) 当 $\rho_2 c_{p2} < \rho_1 c_{p1}$ 时, $\sigma_r < 0$, $\sigma_t > 0$, 即在交界面处既有透射压缩波又有反射拉伸波,这也会引起岩石的破碎。

根据能量守恒定律,反射波和透射波的能量总和应等于入射波的能量。因此,当交界面两侧介质波阻抗相等时,入射波能量也将全部随透射波传入第二介质。因此,钎子或炸药的波阻抗值同岩石的波阻抗值匹配得愈好,传给岩石的能量就愈多,在岩石中引起的应变值也愈大。

几种材料和岩石的密度、纵波速度和波阻抗值列于表 1-5。

表 1-5 几种材料的密度、纵波速度和波阻抗值

材料名称	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	纵波速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	波阻抗/ $\text{kg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$
钢	7.8	5 130	4 000
铝	2.5~2.9	5 090	1 370
花岗岩	2.6~3.0	4 000~6 800	800~1 900
玄武岩	2.7~2.86	4 500~7 000	1 400~2 000
辉绿岩	2.85~3.05	4 700~7 500	1 800~2 300
辉长岩	2.9~3.1	5 600~630	1 600~1 950
石灰岩	2.3~2.8	3 200~5 500	700~1 900
砂 岩	2.1~2.9	3 000~4 600	600~1 300
板 岩	2.3~2.7	2 500~6 000	575~1 620
片麻岩	2.5~2.8	5 500~6 000	1 400~1 700
大理岩	2.6~2.8	4 400~5 900	1 200~1 700
石英岩	2.65~2.9	5 000~6 500	1 100~1 900

二、岩石的强度特征

在外荷载作用下岩石抵抗破坏的能力称为岩石强度。岩石在静荷载作用下的强度和在动荷载作用下的强度是不同的。

1. 静荷载下岩石的强度性质

岩石静荷载强度的测定方法,是将岩石做成规定形状和尺寸的试件,在材料试验机或三轴压力试验机上进行拉、压、剪、弯等强度试验,或者利用点荷仪进行点荷试验。实验表明,岩石的静荷载强度有如下主要性质。

(1) 在大多数情况下,岩石表现为脆性破坏。

(2) 同一种岩石的强度并非常数。影响岩石强度的因素很多,例如岩石的组成成分、颗粒大小、胶结情况、生成条件、层理构造、孔隙度、温度、湿度、重度、风化程度、受力状态和时间等。

(3) 在不同受力状态下,岩石的极限强度相差悬殊。实验表明,岩石在不同应力状态下的强度值一般符合以下规律:三向等压抗压强度>三向不等压抗压强度>双向抗压强度>单向抗压强度>单向抗剪强度>单向抗弯强度>单向抗拉强度。

根据实验资料,单向抗压强度 R_c 、单向抗拉强度 R_t 和抗剪强度 τ 之间存在以下数量关系:

$$\frac{R_t}{R_c} = \frac{5}{1} \sim \frac{1}{38}$$

$$\frac{\tau}{R_c} = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{15}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{R_t \cdot R_c}{3}}$$

因此,利用以上关系,可以通过岩石的抗压强度大体估算其抗拉强度和抗剪强度。

2. 动荷载下的岩石强度性质

岩石承受静荷载达到强度极限前,外荷载卸除后岩石可立即恢复到原来静止状态。而在