



高等学校“十一五”规划教材

井巷工程

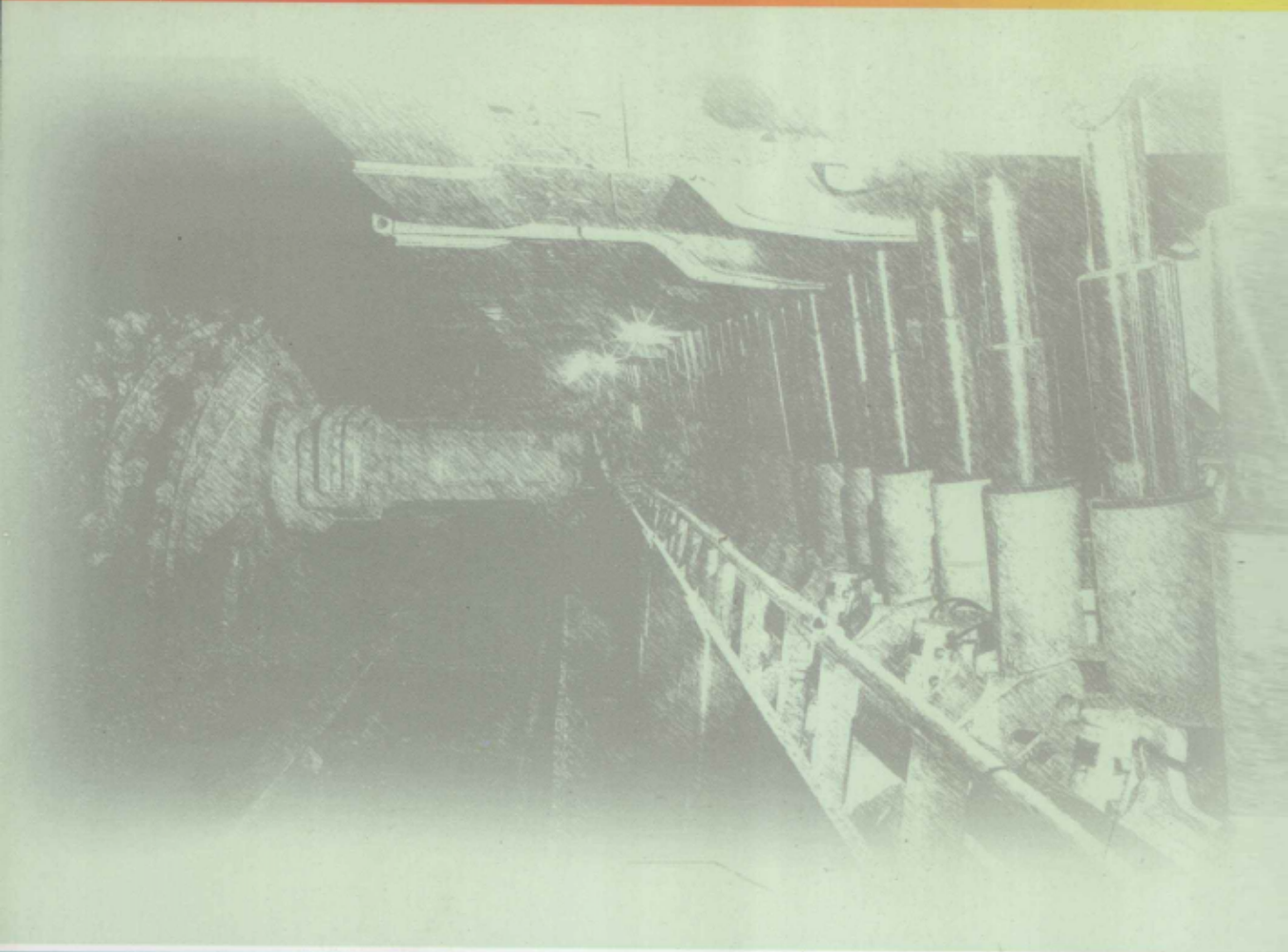
Jinghang Gongcheng

主 编 张恩强 勾攀峰 陈海波

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

责任编辑 王美柱 郭 玉 封面设计 肖新生



Jinghang Gongcheng

China University of Mining and Technology Press

ISBN 978-7-5646-0745-6



9 787564 607456 >

定价: 32.00 元

高等学校“十一五”规划教材

井巷工程

主 编 张恩强 勾攀峰 陈海波

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了井巷设计与施工的基本知识,主要内容包括:钻眼及爆破技术、巷道断面设计、巷道掘进、井巷支护、采区巷道施工、巷道施工组织与管理、硐室设计与施工、井筒施工、立井井筒延深、特殊条件下的巷道施工等。本书在内容选取上注重常用技术与先进技术兼收、基本知识与工程实例结合,整体结构合理,系统性和完整性好,具有实用性、先进性和前瞻性,便于学习。

本书为普通高等学校教材,其知识的深度和广度主要按照教学要求安排。本书适宜于采矿工程及相关专业本科和专科教学使用,也可作为从事井巷设计和施工的工程技术人员及相关管理人员的学习和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

井巷工程/张恩强,勾攀峰,陈海波主编. —徐州:

中国矿业大学出版社,2010.8

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0745 - 6

I. ①井… II. ①张… ②勾… ③陈… 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(2010)第 169633 号

书 名 井巷工程

主 编 张恩强 勾攀峰 陈海波

责任编辑 王美柱 郭 玉

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

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 江苏淮阴新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 20 字数 499 千字

版次印次 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

“井巷工程”是采矿工程专业必修的专业主干课程,是培养采矿工程专业人才必备的专业知识和技能的重要途径,而《井巷工程》教材是井巷工程知识的载体和“井巷工程”课程的教学工具,在采矿工程专业教学和人才培养中具有重要的作用。然而,《井巷工程》教材写什么、如何写一直是教学研究的一个难题。尤其是在知识爆炸的时代,在我国经济与社会快速发展的时期,又正值我国采矿行业实现跨越式发展和我国高等教育不断改革创新阶段,编写一本能反映教育教学改革研究最新成果,包含本领域最基本的理论和最常用、最先进的技术,满足行业发展对人才培养要求的好教材更是难上加难。

本书按照便于教学的原则组织编写。在内容选择上,以吸收现有各主要版本《井巷工程》教材精华为基础,结合我国在该领域的发展现状和近期需求,增加了最新的理论和技术成果。在知识结构安排上,按照在课程间知识不重复,在课程内知识体系完整,在知识体系内知识单元划分合理,在知识单元中理论与技术结合,在知识体系间、知识单元间、理论与技术间,深度基本一致、份量大致平衡等原则进行。

笔者追求的目标是将必要的知识按照科学的方式,用最简明的语言系统而完整地介绍给学习者。然而,由于水平所限,存在问题在所难免,望读者批评指正。

本书为高等学校“十一五”规划教材,由西安科技大学张恩强教授、河南理工大学勾攀峰教授和黑龙江科技学院陈海波副教授担任主编,由西安科技大学张恩强教授统稿。具体分工如下:第一章由勾攀峰(河南理工大学)执笔;第二章由马岳潭(西安科技大学)执笔;第三章、第六章、第七章、第八章、第九章、第十章由张恩强(西安科技大学)执笔;第四章由李伟(黑龙江科技学院)执笔;第五章由陈海波(黑

龙江科技学院)执笔。

本书第二章部分插图由高晓旭(西安科技大学)绘制。在本书编写过程中,硕士研究生惠双琳和侯金玲参与部分资料的收集和插图绘制工作。在教材立项、编写和出版过程中,得到了中国矿业大学出版社的关心和帮助。在此向参与本书编写和出版工作的所有人员表示衷心的感谢!

编 者

2010年7月

目 录

绪论.....	1
第一章 钻眼及爆破技术.....	3
第一节 岩石的可钻性和可爆性.....	3
第二节 钻眼机械和钻眼工具	13
第三节 炸药和爆炸概论	27
第四节 电雷管起爆法	45
第五节 爆破技术	53
第二章 巷道断面设计	57
第一节 巷道断面形状设计	57
第二节 巷道断面参数确定与计算	59
第三节 巷道断面内水沟设计和管缆布置	74
第四节 井筒断面设计	76
第五节 交岔点设计	84
第三章 巷道掘进	90
第一节 爆破掘进	90
第二节 掘进机掘进.....	113
第三节 掘进通风与综合防尘.....	137
第四章 井巷支护.....	145
第一节 支护材料.....	145
第二节 棚子支护.....	159
第三节 锚杆支护.....	171
第四节 联合支护.....	184
第五章 采区巷道施工.....	187
第一节 概述.....	187
第二节 煤巷施工.....	190
第三节 半煤岩巷施工.....	193

第四节 上、下山施工	195
第五节 采区煤仓施工	201
第六章 巷道施工组织与管理	209
第一节 巷道施工的方法与作业方式	209
第二节 巷道施工中的正规循环作业	212
第三节 巷道施工队伍的组织与管理制度	214
第七章 硐室设计与施工	217
第一节 硐室设计	217
第二节 硐室施工	237
第八章 井筒施工	244
第一节 概述	244
第二节 立井井筒施工专用设备及布置	246
第三节 立井表土施工	249
第四节 立井基岩施工	257
第五节 立井井筒施工作业方式	266
第六节 立井井筒施工辅助工作	269
第七节 立井井筒安装工作	273
第八节 斜井表土施工	275
第九章 立井井筒延深	277
第一节 利用辅助水平延深井筒	277
第二节 利用延深间延深井筒	282
第三节 利用反井延深井筒	285
第四节 延深井筒的保护设施	290
第十章 特殊条件下的巷道施工	293
第一节 松软岩层巷道施工	293
第二节 揭开煤与瓦斯突出煤层的施工方法	303
参考文献	312

绪 论

在地下采矿中,为了进行生产和保证安全,需要在岩石中开掘有不同用途的各种空间,这些空间统称为矿井坑道。矿井坑道按用途分为两类:一类是巷道,主要用做矿石、矸石、材料、设备运输,人员出入以及通风的通道,也用于敷设各种管道和缆线;另一类是硐室,或用于安装固定设备,或用于临时贮存(存放)矿石、材料、工具和设备,或作为人员休息、工作的场所。在矿井坑道中,直接通达地表的一类巷道为井筒。井筒是矿井的咽喉,其服务时间长、装备比较复杂、设计与施工技术要求高,且井筒一般要穿过比较复杂的地层、施工技术难度大,因此井筒的设计与施工在矿井巷道设计与施工中占有突出地位,所以习惯上又将矿井坑道称为井巷。井巷工程即矿井坑道工程,主要包含三部分内容:第一部分是井巷断面设计;第二部分是井巷建设施工,简称为井巷施工;第三部分是井巷施工组织与管理,其中主要部分是井巷施工。

井巷施工一般包含破岩、装岩、运岩和支护四项基本工作。从工作的性质、目的以及施工技术特点等考虑,这四项工作可分为两部分:破岩、装岩、运岩为一部分,称为井巷掘进;支护为另一部分,称为井巷支护。

井巷工程技术是采矿技术的主要组成部分,与矿井开采技术一起构成地下采矿技术的两大主体。井巷工程贯穿于矿井设计、建设与生产的全过程,其中井巷断面设计是矿井设计的主要内容之一,井巷建设是矿井建设的主要工程,而在矿井生产中井巷施工更是与采矿施工一起被视为两大中心任务,合起来称为采掘工作(这里的“掘”指井巷施工,而非井巷掘进)。

采掘也是矿井生产中的一对主要矛盾,两者共处于矿井生产的同一体中,相互依存、相互影响;其对立在于两者之间存在巨大的利益反差,采矿是矿井生产效益的主要来源,而掘进是矿井生产成本的主要构成部分。井巷工程与矿井开采关系密切。首先,井巷是为开采服务的,井巷设计必须满足开采的要求,即从空间上满足建立各种生产系统和保障生产与安全的要求,从时间上满足服务年限的要求;其次,矿井系统的建立也受井巷施工技术的制约和影响,先进的施工技术有利于提高成巷速度和降低井巷工程投资与成本,从而有利于建立更加完善、安全可靠程度更高的矿井系统。井巷工程技术与矿井开采技术为同源技术,两者相互促进、共同发展。在矿井生产中,采掘工作之间必须保持良好的平衡关系,否则矿井将无法正常工作并取得良好的效益;在采矿技术发展与应用中,井巷工程技术和开采技术也必须保持良好的平衡关系,否则采矿技术的发展将会停滞。

过去很长一段时期,我国煤矿井巷施工主要采用爆破破岩和依靠完全作用在围岩表面的棚架结构支护的传统技术,矿井巷道较多采用岩石巷道,因此成巷速度慢,井巷工程投资大、成本高,严重影响和制约了矿井建设与生产的发展,不但使矿井产量、效率、效益处于较低的水平,而且给矿井安全和矿区环境保护带来了很大的隐患,甚至造成了严重的灾难。

近年来,井巷工程技术与矿井开采技术在相互支持和促进下得到了快速发展,为我国矿井生产实现高产、高效、安全、环保、节能,以及今后的现代化建设提供了有力的支持和可靠的保障。煤层巷道综合机械化掘进技术与锚杆支护技术相得益彰,使我国煤层巷道的掘进速度不断提高。其中利用连续采煤机多巷掘进技术不仅使掘进速度加快,而且使“采掘一体化”成为现实。这些技术的应用与发展不但极大地丰富了井巷施工的内容,而且也在改变着井巷工程的内涵。本书将力求体现这些发展与变化。

“井巷工程”是采矿工程专业的一门重要的专业课程。过去很长一段时间,矿井设计、建设与生产中的井巷工程技术工作由矿井建设专业和采矿工程专业共同承担,“井巷工程”是这两个专业的主要专业课程之一,但由于专业分工不同,其教学内容有很大区别。按照专业分工,矿井建设专业主要承担矿井设计与建设中的井巷工程任务,重点是井筒、井底车场和主要硐室的设计与施工;而采矿工程专业主要承担矿井生产期间的井巷工程任务,重点是采区巷道的设计与施工。采矿工程专业的“井巷工程”课程的教学内容一直就是按照这一分工安排的。在矿井建设专业被合并后,过去由该专业承担的工作究竟由哪个专业接替,到目前还不是十分明确。但有一点可以肯定,专业调整后,采矿工程专业的专业面扩大,对井巷工程技术承担的责任也相应增加。另外,采掘一体化技术的发展和应用使井巷工程与采矿工程专业联系更加密切和广泛,生产期间大量的开拓巷道(主要是大巷)与采区巷道的施工在技术和装备上已完全相同,其施工采矿工程专业工程技术人员完全可以胜任。为了适应上述变化和发展,必须对采矿工程专业“井巷工程”课程的教学内容进行调整。本书的内容即是根据采矿工程专业最新的教育教学改革研究成果,按照采矿工程专业新的知识体系和课程体系所要求的“井巷工程”课程教学大纲进行安排的。

本书将主要作为采矿工程专业教材,建议按 48 个学时组织教学。也可供现场从事相关工作的工程技术人员参考。

第一章 钻眼及爆破技术

爆破破岩是矿井巷道掘进中的两种主要破岩方法之一,目前在煤矿岩巷掘进中几乎全部采用该法,在煤巷掘进中仍有很多矿井采用该法。

爆破破岩需要在岩石中钻眼,因此也叫钻眼爆破。钻眼爆破就是在岩石中用钻眼机具钻凿炮眼,在炮眼里装入炸药,依靠炸药爆炸产生的巨大能量破碎岩石。钻眼爆破由钻眼和爆破两项主要工序组成,其中钻眼是小范围破岩,目的在于将炸药按要求装入一定的深度,以提高爆破效果;爆破则是较大范围破岩,目的是将巷道空间内的岩石从母体上分离下来,并使其破碎成一定的块度,以便装运。

钻眼及爆破技术是爆破掘进的关键技术。掌握和合理利用这些技术对提高矿井建设速度,保证采掘平衡,实现矿井安全、高效、节能、环保生产都具有重要意义。

第一节 岩石的可钻性和可爆性

岩石力学研究的目的主要是破碎岩石和维护岩石稳定(即井巷维护)。与井巷维护有关的岩石力学知识在“岩石力学”课程中已经介绍很多,本书仅介绍与爆破破岩有关的岩石力学知识。

一、岩石的可钻性和可爆性

(一) 岩石的概念及其基本特性

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。在爆破破岩中所涉及的岩石一般指基岩。煤系地层亦属于基岩。在煤矿中最常遇到的岩石是各种沉积岩,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。

岩石作为岩石力学的研究对象,研究的范围不同,所包含的“成分”不同,其物理力学性质也不同。例如,在实验室用来测定岩石物理力学参数的试样是从岩石中切取出来的一部分,尺寸小,一般不包含大的结构面;而在地下工程周围较大范围的岩石则属于自然地质体,其中可能包含各种较大的结构面。一般将前者称为岩块,后者称为岩体。岩石则是一种泛称。

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,岩石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)越多,岩石的强度就越高;含硬度小的片状矿物(如云母、绿泥石、滑石、蒙脱石和高岭石等)越多,岩石的强度就越低。

岩石的结构和构造对岩石的性质也有重要影响。岩石的结构表征岩石的微观组织特

征,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,其性质各异。当矿物成分一定,呈现细晶、隐晶结构时,岩石强度往往比较高。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,含粒状矿物较多的岩石常呈各向同性,而含片状矿物较多的岩石往往呈现较强的各向异性。沉积岩(如砾岩和砂岩)的力学性质,除了与矿物成分有关以外,还与胶结物的性质有很大关系,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。岩石的构造则表征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。

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,必须注意岩石的非均质性、各向异性和不连续性问题。一般岩体(少数除外)属于非均质、各向异性的不连续介质,而通常把岩块近似地视为均质、各向同性的连续介质来处理。

(二) 岩石的物理性质

岩石由固体、水和气体三相组成。在固体岩石中分布着大量空隙(包括孔隙、裂隙等),水和气体主要存在于这些空隙中。岩石的物理性质与岩石的组成密切相关,对井巷工程施工有重要影响。

1. 岩石的相对密度和密度

① 相对密度。指岩石固体实体积的质量与同体积水的质量之比值。岩石固体实体积指不包括空隙体积在内的实在体积。岩石的相对密度按式(1-1)计算。

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

式中 d ——岩石相对密度;

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。

② 密度。指岩石单位体积(包括空隙体积)的质量。岩石的密度分为干密度和湿密度两种。干密度指单位体积岩石绝对干燥时的密度,湿密度指天然含水或饱水状态下的密度,分别按式(1-2)和式(1-3)计算。

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

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

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 ——岩石试件天然含水或饱水状态下的质量, g;

V ——岩石试件的体积, cm^3 。

在一般情况下,岩石干、湿密度差别并不大。但对于某些黏土类岩石,区分其干、湿密度却具有重要意义。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,而深部的致密岩石密度一般较大。

2. 岩石的孔隙性

岩石的孔隙性,指岩石的裂隙和孔隙发育的程度,通常用孔隙率(n)和孔隙比(e)来表示。

孔隙率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,按式(1-4)计算。

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

岩石孔隙比则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之比。

岩石的孔隙性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,使岩石的密度和强度降低、透水性增大;另一方面,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。

3. 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重要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。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,用 ω 表示,由式(1-5)计算。

$$\omega = \frac{g}{G} \quad (1-5)$$

岩石吸水率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;随着浸水时间增加,吸水率也会有所增大。

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和岩体应力状态有关外,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称为渗透系数,其单位与速度单位相同。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。岩层的渗透系数一般通过在钻孔中进行抽水试验或压水试验测定。不同岩石的透水性差别极大。

③ 岩石的溶蚀性。由于水化学作用把岩石中某些组成物质带走的现象称为岩石的溶蚀性。溶蚀作用可使岩石致密程度降低、孔隙率增大,从而导致岩石强度降低。溶蚀现象在某些岩层,如石灰岩中很常见。

④ 岩石的软化性。岩石浸水后其强度会降低,通常用软化系数来表示水对岩石强度的

影响程度。软化系数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,用式(1-6)表示。

$$\eta_c = \frac{R_{cw}}{R_c} \leq 1 \quad (1-6)$$

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,岩石浸水后强度降低程度越大。岩石浸水时间越长,其强度降低程度亦越大。

⑤ 岩石的膨胀性和崩解性。膨胀性和崩解性是软弱岩石所表现出的特征。前者指软岩浸水后体积增大和相应地引起压力增大的性能,后者指软岩浸水后发生的解体现象。岩石的膨胀性和崩解性往往给地下工程的施工和巷道稳定性带来不良影响。

4. 岩石的碎胀性

岩石破碎以后碎块总体积比整体状态下体积增大的性质称为岩石的碎胀性。岩石的碎胀性可用岩石的碎胀系数表示,岩石碎胀系数用式(1-7)计算。

$$K = \frac{V_1}{V} \quad (1-7)$$

式中 K ——岩石碎胀系数;

V_1 ——岩石破碎膨胀后的体积;

V ——岩石处于整体状态的体积。

岩石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。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,破碎后块度较小且排列较杂乱,则碎胀系数较大。

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性问题。岩石爆破所需膨胀空间大小也与岩石碎胀系数有关。

(三) 岩石在冲击载荷作用下的变形破坏特性

岩石的变形破坏主要是外载荷作用的结果。变形和破坏是岩石在载荷作用下的两个发展阶段。变形中包含着破坏的因素,破坏是变形发展所致。外载荷按作用性质分为静载荷和动载荷。钻眼和爆破主要靠冲击载荷破岩,在冲击载荷作用下岩石的变形破坏与静载荷作用下完全不同。

无论是冲击式凿岩机破碎岩石还是爆破破碎岩石,岩石承受的外力都不是静载荷,而是一种动载荷(冲击载荷)。冲击载荷是随时间变化的一种载荷。凿岩机活塞冲击钎尾时作用力随时间变化实测曲线如图 1-1 所示。从图中可以看出,作用力在数十微秒内由零骤增到数万牛,经数百微秒后又重新下降到零。

岩石在这种急剧变化载荷作用下,产生运动和变形。这种动载荷作用下的变形用肉眼看不出,可用图 1-2 示意说明。当冲击载荷 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。这样一个接一个的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

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应力波或应变波。图中 Δl 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,在动载荷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,岩石的动载荷变形特征同静载荷变形特征有本质区别。

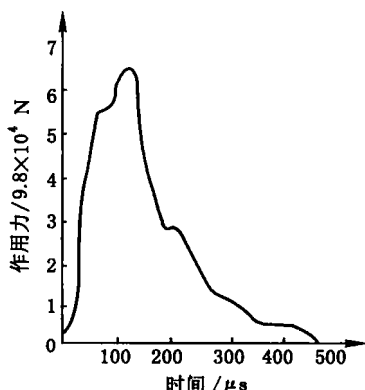


图 1-1 凿岩机活塞冲击力—时间曲线

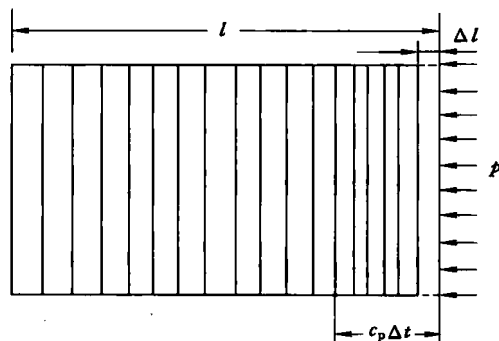


图 1-2 岩石在冲击端产生的变形

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,波分为体积波和表面波。在介质内部传播的波叫体积波,只沿介质的边界面传播的波叫表面波。体积波又可分为纵波和横波两种。波的传播方向同介质质点振动方向一致的波叫纵波,它可引起介质体积的压缩或膨胀(拉伸)变形,故又叫压缩波或拉伸波。波的传播方向同介质质点振动方向垂直的波叫横波,它可引起介质体形状改变的纯剪切变形,故又称为剪切波。这些波都叫应力波或应变波,但通常应力波指纵波。

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:

$$p \Delta t = m v_p \quad (1-8)$$

式中 m —— $c_p \Delta t$ 段的质量, $m = \rho \omega c_p \Delta t$, kg。

则

$$p = \rho \omega c_p v_p \quad (1-9)$$

$$\sigma = \frac{p}{\omega} = \rho c_p v_p \quad (1-10)$$

式中 ρ ——介质的密度, kg/m^3 ;

ω ——受冲击的截面积, m^2 。

ρc_p (介质密度与纵波波速乘积)称为波阻抗,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(如从钎头到岩石界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 1-3 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垂直入射时, 就会产生垂直反射和垂直透射。由于交界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:

$$v_i - v_r = v_t \quad (1-11)$$

式中, 下标 i, r, t 分别表示入射、反射和透射。

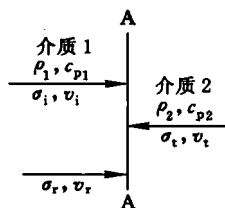


图 1-3 纵波垂直入射

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相等, 即:

$$\sigma_i + \sigma_r = \sigma_t \quad (1-12)$$

根据式(1-10)得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \rho_1 c_{p1} v_i, v_i = \frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{p1}} \\ \sigma_r &= \rho_1 c_{p1} v_r, v_r = \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{p1}} \\ \sigma_t &= \rho_2 c_{p2} v_t, v_t = \frac{\sigma_t}{\rho_2 c_{p2}} \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

将式(1-13)代入式(1-11)得:

$$\frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{p1}} - \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{p1}} = \frac{\sigma_t}{\rho_2 c_{p2}} \quad (1-14)$$

将式(1-14)与式(1-12)联立求解得:

$$\sigma_r = R_r \sigma_i \quad (1-15)$$

$$\sigma_t = R_t \sigma_i \quad (1-16)$$

式中, R_r 为应力波的垂直反射系数; R_t 为应力波的垂直透射系数。用式(1-17)和式(1-18)计算。

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

$$R_t = \frac{2\rho_2 c_{p2}}{\rho_2 c_{p2} + \rho_1 c_{p1}} \quad (1-18)$$

式(1-15)至式(1-18)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 $\rho_2 c_{p2} > \rho_1 c_{p1}$, 即 $\sigma_r > 0$, $\sigma_t > 0$ 时, 说明交界面上既有反射波, 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 $\sigma_r = \sigma_i$, $\sigma_t = 2\sigma_i$, 说明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 2 倍。叠加的结果使交界面处的应力值为入射应力波的 2 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, $\sigma_i = -\sigma_r$, $\sigma_t = 0$, 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, $\sigma_r < 0$, $\sigma_t > 0$, 即交界面处既有透射压缩波, 又有反射拉伸波, 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越好, 传给岩石的能量就越多, 在岩石中引起的应变值也越大。

几种材料和岩石的密度、纵波速度和波阻抗值见表 1-1。

表 1-1 几种材料和岩石的密度、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	1 270~1 470
花岗岩	2.6~3.0	4 000~6 800	1 040~2 040
玄武岩	2.7~2.86	4 300~7 000	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	5 600~6 300	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	3 500~6 000	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

(四) 岩石的可钻性和可爆性

可钻性和可爆性用来表示钻眼或爆破岩石的难易程度, 是岩石物理力学性质在钻眼或爆破的具体条件下的综合反映。

岩石的可钻性和可爆性, 常用工艺性指标来表示。如用钻速、钻每米炮眼所需要时间、钻头进尺(钎头在变钝以前的进尺数)、钻每米炮眼磨钝的钎头数或破碎单位体积岩石消耗的能量等来表示岩石的可钻性, 用单位炸药消耗量、爆破单位体积岩石所需炮眼长度或单位质量炸药的爆破量、每米炮眼的爆破量等来表示岩石的可爆性。显而易见, 上述工艺性指标, 必须在相同条件下测定, 才能进行比较。

测试岩石可钻性的方法是, 利用重锤自由下落时产生的固定冲击功(40 J)冲击钎头破碎岩石, 根据破岩效果来衡量岩石破碎的难易程度。其可钻性指标包括以下两个。

① 凿碎比功。即破碎单位体积岩石所做的功, 用 a 表示, 单位为 J/cm^3 。

② 钎刃磨钝宽度。即量出钎刃两端向内 4 mm 处的磨钝宽度, 用以说明岩石的磨蚀