

高等学校教学用书

井巷工程

(修订二版)

中国矿业大学 等编

煤炭工业出版社

T 226
T 226.2

3

高等学校教学用书

井巷工程

(修订二版)

中国矿业大学 等编

W)

0

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书介绍钻眼爆破、井巷设计与施工的基本理论,基本知识,施工方法,施工技术,施工工艺,施工设备、器材与结构物,以及施工组织管理等内容。在井巷设计与施工部分,本书以平巷为主进行系统的阐述,对其它巷道及井筒亦作了介绍。对一些具体施工方法,注意归纳、综合而后进行概括的论述。

本书是煤炭高等学校采矿工程专业“井巷工程”课程通用教材,亦可供其它专业、函授、业余大学和有关工程技术人员采用或参考。

责任编辑:吴秀文 张乃新

高等学校教学用书

井 巷 工 程

(修 订 二 版)

中国矿业大学 等编

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092mm¹/₁₆ 印张17¹/₄

字数412千字 印数1—10,065

1980年8月第1版 1984年12月第2版

1991年8月第3版 1991年8月第1次印刷

ISBN 7-5020-0566-8/TD·521

书号 3341

定价 4.50元

739914

前 言

本书于1980年8月初版,1984年12月修订再版,到1989年10月已五次印刷,并于1987年7月获得煤炭工业部高等学校优秀教材三等奖。现全面修改补充,重新出版,以满足教学及各有关方面的需要。

这次修改主要有以下几个方面:一是将原书陈旧的内容删去,补充了近几年井巷工程出现的新技术、新方法、新经验、新设备与器材以及其它方面的发展和成就。二是根据这几年新编制的有关规程、规范及技术文件,全面修改了书中各有关内容;全书采用法定计量单位。三是在广泛征求意见与总结多年教学实践的基础上,对内容的有关方面进行了增删,例如,鉴于煤炭高等院校采矿工程专业已增设岩石力学课程,为避免课程内容重复,将本书中原有巷道地压一章删去,并将第一章中的静荷载下的岩石力学性质从简叙述,而新增加动荷载下岩石力学性质的简述;又如根据西南等地区的特点及重庆大学的建议,在第八章中增加了揭开煤与沼气突出煤层的施工方法一节,作为选修内容;其它还有删繁就简、强干削枝的修改。四是根据教学实践的经验,对一些章节的叙述方法及次序的安排进行了修改,使本书更符合学生的认识规律而便于接受。五是对文字与图表进行了进一步的精练与加工。

考虑到本书中岩石力学内容的删减,专设的岩石力学课程应作为井巷工程课程的先修课程安排。

本书由中国矿业大学主编,前后参加编写的单位有:山东矿业学院、山西矿业学院、西安矿业学院、阜新矿业学院、焦作矿业学院及中国矿业大学。

参加初版编写人员有:丁克宽、马光弟、刘会文、杨铁春、和心顺、袁传国、高树棠。并由刘会文、高树棠担任统编与总审校。

修订本主编:刘会文、高树棠;参加编写人员有:丁克宽、马光弟、刘会文、杨铁春、袁传国、高树棠、桂美堃。

第三版(本版)主编:刘会文

编写人员及分工章次为:

绪论、第一章、第二章、第四章、第五章及第六章由刘会文编写;第三章及第九章由何心顺编写;第七章及第八章由袁传国编写;第十章及第十一章由杨铁春编写。

在这次酝酿修改时,承蒙使用本书的有关院校的老师提出了宝贵的意见,初稿完成后,又蒙崔云龙、王树仁、莫国震、吴秀文等老师提出了有益的改进意见,修改过程中还参考了有关文献,在此谨向上述老师及文献作者致谢。

由于我们水平有限,错漏之处,在所难免,欢迎批评指正。

编 者

1989年12月

目 录

绪 论	1
第一章 岩石性质与工程分级	3
第一节 概述	3
第二节 岩石的物理性质	4
第三节 岩石的力学性质	6
第四节 岩石的工程分级	12
第二章 钻眼爆破	15
第一节 钻眼机械	15
第二节 钻眼工具	27
第三节 炸药和爆炸概论	32
第四节 矿用炸药	43
第五节 起爆材料	48
第六节 电雷管起爆法	54
第七节 破岩原理与爆破技术	59
第三章 巷道断面设计	64
第一节 巷道断面形状	64
第二节 巷道断面尺寸	65
第三节 巷道断面内水沟和管线布置	78
第四节 巷道断面设计示例	80
第四章 水平岩石巷道施工	84
第一节 巷道施工中的钻眼爆破法	84
第二节 掘进通风与综合防尘	94
第三节 岩石的装载与转运	97
第四节 岩石平巷掘进机械化作业线	106
第五章 巷道支护	112
第一节 支护材料	112
第二节 锚喷支护	125
第三节 普通支架	141
第六章 巷道施工组织与管理	148
第一节 一次成巷及其作业方式	148
第二节 施工组织	149
第三节 掘进队的组织与管理制度	153
第七章 采区巷道及采区煤仓施工	155
第一节 概述	155
第二节 采区巷道掘进顺序及定向方法	155
第三节 煤巷施工	158

第四节	半煤岩巷道施工	166
第五节	上下山施工	167
第六节	采区巷道施工技术安全措施	172
第七节	采区煤仓施工	173
第八章	特殊条件下的巷道施工	180
第一节	松软岩层巷道施工	180
第二节	揭开煤与沼气突出煤层的施工方法	190
第九章	硐室及交岔点	198
第一节	硐室施工	198
第二节	平巷交岔点设计	201
第三节	交岔点施工	219
第十章	井筒施工	223
✓ 第一节	概述	223
第二节	井筒断面设计	224
第三节	井筒表土施工	231
第四节	立井基岩施工	239
第十一章	立井井筒延深	256
第一节	利用辅助水平延深井筒	256
第二节	利用延深间延深井筒	261
第三节	利用反井延深井筒	263
第四节	延深井筒的保护设施	268
参考文献		271

2-4-5.6

破岩与支护

绪 论

采掘工业是国民经济中的基础工业，它为许多重要工业部门提供原料和能源，直接影响着国民经济的发展和城乡人民生活。

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的要求。而煤炭工业生产的发展，又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地。为了将煤从地下采出，首先要从地表开始，开凿一系列的井筒、硐室与巷道到达煤层，这便是矿山基本建设的主体工程——矿建工程；移交生产后，随着采煤工作面和采区的不断推进，还要继续不断地及时准备好巷道，以保证采煤工作面 and 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，只有及时地作好矿井建设与开拓延深工作，才能保证煤炭工业稳产、高产并不断发展。在煤炭工业中，采煤依赖井巷掘进为其创造生产条件，而掘进又是服务于采煤的。二者相互依存，必须并重，决不能有所偏颇，否则，采掘比例失调，将严重影响煤炭工业的正常生产与发展。

建国以来，煤炭工业矿井建设得到了迅速的发展，恢复和改造老矿井，建设了几十个新矿区，并相继进行了开拓延深与扩建工程，为我国煤炭产量从1949年的3243万t增长到1990年的10.8亿t，跃居世界第一位，奠定了基础。与此同时，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、锚喷和滑模筑壁等配套的机械化作业线，达到了世界80年代水平；立井混合作业也得到了应用，并在逐步改进提高；井筒防腐技术有了提高，到目前为止，全国新建的立井井筒装备绝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104个井筒推广应用，它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，愈来愈多的遇到比较复杂的工程地质和水文地质条件，因此，特殊凿井的比重逐渐增加。据统计，采用冻结法施工的井筒已近300个，累计冻结总深度近5万m，最大冻结深度415m；采用注浆法施工的井筒已有100多个，其中采用地面预注浆的有60个，最大注浆深度达665m；采用钻井法施工的井筒已有40个，成井累计深度8600m，最大钻井直径9.3m，最大钻井深度508.2m；采用沉井法施工的井筒达156个，创造了下沉192.78m的纪录，接近世界最大下沉深度200m的水平；采用帷幕法施工的井筒已达24个，井径一般4.5~6m，最大达8m，深度一般为30~40m，最大达57m。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都在积极试验与推广中；全断面掘进机正在努力进行试验；带调车盘耙斗装载机作业已开始成为我国煤炭战线平巷快速施工的主要方式；光面爆破、锚喷支护也已得到了广泛推广与应用，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具有我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,保证了我国斜井施工在世界上的领先地位。在施工管理技术方面也在不断改进与提高。

根据国民经济发展的需要,到2000年我国煤炭产量要达到年产14亿t。为了适应这一要求,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任务,以保证煤炭产量按期增长;也要积极提高井巷施工机械化程度,推广使用新技术,加强科学管理,使井巷工程发展到一个新水平。

《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,以便使学生较好的掌握其内容。本书主要是供煤炭高等院校采矿工程专业教学之用。因此,根据采矿工程专业的实际需要,在内容上作了主次不同的安排,在平巷、斜巷、立井三者中,以平巷设计与施工为主进行系统的阐述,其它内容也都考虑了专业特点,有主有次,力求做到点面结合、重点突出、举一反三。对一些具体施工方法,注意归纳、综合而后进行概括的论述,避免罗列现象,并减少篇幅。

第一章 岩石性质与工程分级

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、合理地进行破岩与井巷维护,就要对岩石与岩体的物理力学性能有所了解,并在此基础上制定出岩石的工程分级方法,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与形态。所以,岩石性质与它的矿物组成有关。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。

岩石的结构与构造对其性质也产生重要影响。岩石的结构说明岩石微观的组织特征,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。当矿物成份一定,呈现细晶、隐晶结构时,岩块强度往往较高。粒状矿物较片状矿物不易形成定向排列,所以当其它条件相同时,含片状矿物较多的岩块,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能,除了与砾石与砂粒的矿物成份有关外,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相继次之。岩石的构造说明岩石宏观的组织特征。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,均可使岩块在力学性质上呈现显著的各向异性。

研究岩石性质时,常用到岩石、岩块与岩体这三个术语。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内的自然地质体,岩石则是不分岩块与岩体的泛称。

由于各种地质作用,岩体中往往具有明显的地质遗迹,如层理、节理、断面及裂隙面等。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、流砂、淤泥、砂等,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的侵入。

最深海结深处。425m 10.12.15

第二节 岩石的物理性质

一、岩石的比重和密度

岩石由固体、水、空气三相组成，具有比重、密度、重度等指标。

1. 比重

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

$$\Delta = \frac{G}{V_0 \rho_w} \quad (1-1)$$

式中 Δ ——岩石比重；

G ——绝对干燥时体积为 V_0 的岩石质量，g；

V_0 ——岩石固体实在体积， cm^3 ；

ρ_w ——水的密度， g/cm^3 。

岩石的比重取决于组成岩石的矿物的比重。一般已鉴定出岩石的矿物成分后，岩石的比重就可以粗略地进行估计，例如石灰岩的比重与方解石的比重相近，砂岩的比重接近于石英。

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。岩石的密度又分为干密度和湿密度。干密度是单位体积岩石绝对干燥后的质量；湿密度是天然含水或饱水状态下的密度。

$$\rho_0 = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

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

式中 ρ_0 ——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 。

在一般情况下，岩石干、湿密度的数值差别不大。但对于某些粘土质岩石，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、孔隙及含水量。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程度，它通常用空隙度 α 和孔隙比 e 来表示。空隙度即岩石试件内各种裂隙、孔隙的体积总和对于试件总体积 V 之比；空隙比即岩石试件内各种裂隙、孔隙的体积总和对于试件内固体矿物颗粒体积 V_s 之比。岩石的空隙度和空隙比通常是根据岩石的比重 Δ 及干密度 ρ_0 计算求得。

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

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

岩石的孔隙性对岩石的其他性质有显著的影响。随着岩石孔隙度的增大，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、岩石的吸水率

岩石吸水率 w 就是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、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要比同一岩石的碎块试样吸水率小；随着浸水时间的增加，吸水率也会有所增大。

表1-1为某些岩石的比重、密度、孔隙比及吸水率指标。

最新修订 105001

表 1-1 某些岩石的比重、密度、孔隙比以及吸水率指标

岩石名称		比重 Δ	密度 $\rho, \text{g/cm}^3$	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	2.60~3.10	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

四、岩石的碎胀性

岩石破碎后因碎片间孔隙增多而总体积增大的性质称为碎胀性。碎胀性可用碎胀系数来表示。碎胀系数 K 是指岩石破碎后的总体积 V_1 对原岩破碎前体积 V 之比，即

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

表1-2中列出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

表 1-2 几种岩石的碎胀系数

岩石名称	砂、砾石	砂质粘土	中硬岩石	坚硬岩石
碎胀系数 K	1.05~1.2	1.2~1.25	1.3~1.5	1.5~2.5

系数有关。

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,因应力增加而发生相应的应变。当荷载增大到破坏值,或荷载超过某一数值而保持恒定,随着时间的推移,这两种情况均会导致岩石的破坏。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) 静荷载下岩石变形特征

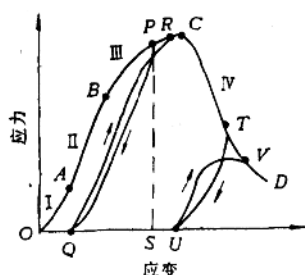


图 1-1 一般岩石在室温和大气条件下的单轴压缩试验曲线

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,曲线的斜率逐渐增大,这是岩石中原有的裂隙受压后逐渐闭合所致。称为裂隙压密闭合阶段。

II—AB段,曲线近似直线,即曲线的斜率近似为常数,称为线弹性阶段。

III—BC段,曲线的斜率逐渐减小,此阶段内局部破损逐渐增大而导致岩石达到强度极限C,称为破裂发展阶段。如为普通试验机,则到达C值后,由于加载系统储存弹性能量的释放而很快使岩块破坏,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小荷载,则可以观察到第IV阶段。

IV—CD段,应力随应变而下降,在这个阶段内,岩石仍保持一整体继续抵抗荷载,岩石破裂仍继续发展,直到D点才最终破裂。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,如巷道围岩多数是平稳地破裂,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继续发展,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。

OB段为弹性变形阶段,B点为弹性极限,BC段为弹塑性变形阶段,C点为极限抗压强度。

在BC段内任一点P卸载时,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。

在CD段内任一点T卸载时,曲线按TU变化;重新加载,曲线按UV变化。

单向压力下性质

① OA 压密阶段 EI ② 屈服 BC (点弹性阶段)
③ AB 弹性 E ④ 残余 CD ⑤ 残余阶段

7

岩石受载后变形很小就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% 是过渡状态。

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，脆性岩石在破坏前却表现出很大的塑性；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。

在岩石的弹性变形与塑性变形过程中，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，易于冲击破碎；脆性大也易于爆破碎岩，并宜于选用高猛度炸药。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，与选用低猛度、静力作用大的炸药。三向应力下，脆性岩石塑性增大

(二) 动荷载下岩石变形特征 ① 冲击力增大，变形增大 ② 脆性岩石塑性增大

无论是冲击式凿岩机凿碎岩石或是爆破破碎岩石，岩石承受的外力不是静荷载，而是一种冲击荷载。它不是一个常数，而是时间的函数。图 1-2 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。从图可以看出，作用力在数十微秒内由零骤增到数万牛顿，再经数百微秒又重新下降到零。

岩石在这种急剧变化的荷载作用下，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 1-3 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，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连锁反应地由冲击端面向另一端传播下去，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 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，其它部分仍处于原来的静止状态。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的区别。

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面波。在介质内部传播的波叫体积波；只沿介质体的边界面传播的波叫表面波。体积波又可分为纵波和横波。介质质点振动方向同波的传播方向一致的叫纵波，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。介质质点振动方向同波的传播方向垂直的叫横波，它可引起介质体形状改变的纯剪切变形，故又称剪切波。这些波又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 之间的数量关系，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 ——某区段 $c_p \Delta t$ 的质量， $M = \rho \omega c_p \Delta t$ 。

38859 |

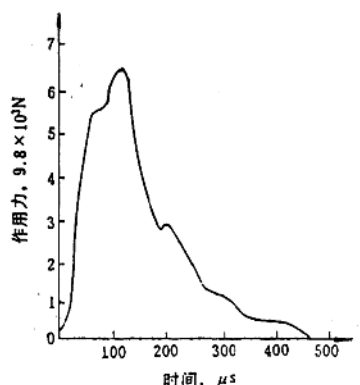


图 1-2 作用力-时间曲线

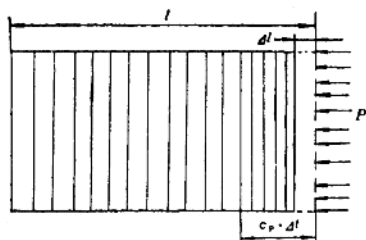


图 1-3 由冲击端面产生的变形

则

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

$$\sigma = \frac{P}{\omega} = \rho c_p v_p \quad (1-8)$$

式中 ρ ——介质的密度;
 ω ——某区段的截面积。

ρc_p 称为波阻抗,即介质密度与纵波波速的乘积,它表征介质对应力波传播的阻尼作用。

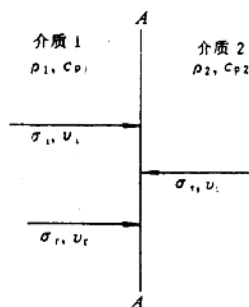


图 1-4 纵波垂直入射

应力波在传播过程中,遇到岩石中的层理、节理、裂隙、断层和自由面,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1-4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,即不考虑应力波的衰减和损失,则质点的振动速度相等,即

$$v_i - v_r = v_t \quad (1-9)$$

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

$$\sigma_i + \sigma_r = \sigma_t \quad (1-10)$$

式中,下标*i*、*r*、*t*分别表示入射、反射和透射。

根据公式(1-8)得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \rho_1 c_{p1} v_i & v_i &= \frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{p1}} \\ \sigma_r &= \rho_1 c_{p1} v_r & v_r &= \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{p1}} \\ \sigma_t &= \rho_2 c_{p2} v_t & v_t &= \frac{\sigma_t}{\rho_2 c_{p2}} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

将公式(1-11)代入公式(1-9)得

$$\frac{\sigma_i}{\rho_1 c_{p1}} - \frac{\sigma_r}{\rho_1 c_{p1}} = \frac{\sigma_t}{\rho_2 c_{p2}} \quad (1-12)$$

将公式 (1-12) 与公式 (1-10) 联立求解得

$$\sigma_r = R_r \sigma_i \quad (1-13)$$

$$\sigma_t = R_t \sigma_i \quad (1-14)$$

式中 R_r ——应力波的垂直反射系数, $R_r = \frac{\rho_2 c_{p2} - \rho_1 c_{p1}}{\rho_2 c_{p2} + \rho_1 c_{p1}} \quad (1-15)$

R_t ——应力波的垂直透射系数, $R_t = \frac{2\rho_2 c_{p2}}{\rho_2 c_{p2} + \rho_1 c_{p1}} \quad (1-16)$

公式 (1-13) 到公式 (1-16) 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, $\sigma_r = 0$, $\sigma_t = \sigma_i$, 说明透射波与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, 则 $\sigma_r > 0$, $\sigma_t > 0$, 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、大小与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, 即应力波到达的交界面是自由面, 则 $\sigma_r = -\sigma_i$, $\sigma_t = 0$ 。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最小, 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, 则 $\sigma_r < 0$, $\sigma_t > 0$, 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, 反射波与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。

几种材料及岩石的密度、纵波速度及波阻抗值列于表1-3。

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也是不同的。

1. 静荷载下岩石的强度性质

岩石静载强度的测定方法, 是将岩石做成规定的形状和尺寸的试件, 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; 或者是利用点荷仪进行点荷试验。试验表明, 岩石的静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) 同一种岩石的强度也并非常数。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。

强度 ① 岩石强度指标

② 作为安全系数 断裂工程 岩石力学

③ 在不同条件下 不同强度 岩石力学

表 1-3 几种材料的密度、纵波速度及波阻抗值

材 料 名 称	密度, g/cm ³	纵波速度, m/s	波阻抗, kg/(cm ² ·s)
钢	7.8	5130	4000
铝	2.5~2.9	5090	1370
花 岗 岩	2.6~3.0	4000~6800	800~1900
玄 武 岩	2.7~2.86	4500~7000	1400~2000
辉 绿 岩	2.85~3.05	4700~7500	1800~2300
辉 长 岩	2.9~3.1	5600~6300	1600~1950
石 灰 岩	2.3~2.8	3200~5500	700~1900
砂 岩	2.1~2.9	3000~4600	600~1300
板 岩	2.3~2.7	2500~6000	575~1620
片 麻 岩	2.5~2.8	5500~6000	1400~1700
大 理 岩	2.6~2.8	4400~5900	1200~1700
石 英 岩	2.65~2.9	5000~6500	1100~1900

3) 在不同受力状态下, 岩石的各种强度极限不同, 相差悬殊。但一般可归纳为以下规律: 从荷载性质来看, 单向抗压强度 > 单向抗剪强度 > 单向抗弯强度 > 单向抗拉强度; 从应力状态看, 三向抗压强度 > 双向抗压强度 > 单向抗压强度。有关岩石强度试验结果列于表1-4。

表 1-4 岩石 的 强 度

岩石名称	单向抗压强度, MPa 范围/一般	单向抗拉强度, MPa 范围/一般	抗剪强度, MPa 范围/一般	抗弯强度, MPa 范围/一般
煤	4.9~49/9.81~15.7	0.24~5.79/1.47~2.45	1.08~16.2/2.45~4.9	4.71~5.96
页岩	4.5~78.5/19.6~49	0.98~39.6/1.96~9.81	3.92~34.1/3.92~11.8	1.96~29.4/4.9~14.7
砂质页岩	19.6~88.3/39.2~68.6	1.96~17.7/2.94~11.8	15.3	2.45~44.1/9.81~15.2
砂岩	19.6~294/58.8~98.1	2.94~19.6/3.92~12.7	3.92~206/9.81~30.4	4.12~58.8/9.81~15.7
石灰岩	9.81~255/78.5~137	0.98~24.5/4.9~12.7	8.53~205.9/10.8~26.5	4.12~27.6/9.81~19.6
白云岩	39.2~245/98.1~137	11.4~15.3	23.3~27.5	
花岗岩	49~245/98.1~147	3.92~28.4/9.81~14.7	9.81~275/9.81~29.4	11.7~19.6/12.7~16.7
玄武岩	147~294/196~245	7.61~39.2	17.2~45.6	
辉绿岩	98.1~294.0	9.6~39.2	13.1~43.1	
大理岩	29.4~186/78.5~118	4.9~19.6/3.92~12.7	12.7~30.4	
石英岩	88.3~491/167~343	8.33~39.4/8.83~34.3	14.7~20.3	

2. 动荷载下的岩石强度性质

当岩石承受静荷载达到强度极限前, 外荷载卸除后, 岩石立即恢复到原来的静止状态。而在动荷载作用下, 虽然外荷载已解除, 但岩石的质点由运动恢复到静止状态还需有一个持续过程。所以, 岩石的动荷载强度不同于静荷载强度。岩石在动荷载作用下, 其强度的增加与加载速度有关。岩石在冲击荷载作用下, 无论是抗压强度还是抗拉强度都比静荷载作用下大。

表1-5中列出了几种岩石的动、静荷载强度值。

三、岩石的硬度

岩石的硬度, 一般理解为岩石抵抗其他较硬物体侵入的能力。硬度与抗压强度有联系

表 1-5 几种岩石的动、静荷载强度值

岩石名称	抗压强度, MPa		抗拉强度, MPa		加载速度	荷载持续时间
	静态	动态	静态	动态	MPa/s	ms
大理岩	90~110	120~200	5~9	20~40	$10^7 \sim 10^8$	10~30
和泉砂岩	100~140	120~200	8~9	50~70	$10^7 \sim 10^8$	20~30
多湖砂岩	15~25	20~50	2~3	10~20	$10^8 \sim 10^7$	50~100
石英-闪长岩	240~330	300~400	11~19	20~30	$10^7 \sim 10^8$	30~60

又有区别。对于凿岩, 岩石的硬度比岩石单向抗压强度更具有实际意义, 因为钻具对孔底岩石的破碎方式多数情况下是局部压碎。所以, 硬度指标更接近于反映凿岩岩石的实质和难易程度。

岩石硬度因试验方式不同, 有静压入硬度与回弹硬度两类。

静压入硬度是采用底面积为 $1 \sim 5 \text{ mm}^2$ 的圆柱形平底压模压入岩石试件, 以岩石产生脆性破坏(对脆性岩石)或屈服时(对塑性岩石)的强度, 作为岩石硬度指标。其值比岩石单向抗压强度高几十倍。岩石试件尺寸可采用尺寸不小于 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ 的立方体, 也可采用尺寸为 $\phi 50 \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱体。试件上、下两端面要用金刚砂磨平, 不平行度不大于 0.1 mm 。压模高度一般为 16 mm 。

回弹硬度是以重物落于岩石表面后的回弹高度来表示。岩石越硬, 回弹高度越大。常用肖氏硬度计和L型施米特锤来测定。肖氏硬度计有C型和D型两种。C-2型肖氏硬度计是利用直径 5.94 mm , 长度 $20.7 \sim 21.3 \text{ mm}$, 质量 $2.3 \pm 0.5 \text{ g}$ 的冲头(其前端嵌有端面直径为 $0.1 \sim 0.4 \text{ mm}$ 的金刚石), 在玻璃管中从 $251.2 \pm 0.3 \text{ mm}$ 的高度自由下落到试件表面的回弹高度(0~140的标度)来测定。我国生产的HS-19型肖氏硬度计属于D型, 冲头下落高度为 19 mm 。

施米特锤最初用来测定混凝土强度, 现在也用来测定岩石硬度。施米特锤的型号根据冲击能量来划分, L型施米特锤的冲击能量为 0.75 J 。我国生产的施米特锤叫回弹仪。

四、岩石的可钻性和可爆性

可钻性和可爆性是用来表示钻眼或爆破岩石难易程度的一种概念, 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。例如: 可以采用钻速、钻每米炮眼所需要的时间、钻头的进尺(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; 采用爆破单位体积岩石所消耗的炸药、爆破单位体积岩石所需的炮眼长度、或单位重量炸药的爆破量、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(除岩石条件外)来测定, 才能进行比较。

下面介绍测试岩石可钻性的一种方法, 这个方法是从冲击式凿岩中抽象出来的。它是利用重锤自由下落时产生的固定冲击功(40 J), 冲击钎头而破碎岩石, 根据破岩效果来衡量岩石破碎的难易程度。其可钻性指标包括两项:

1. 凿岩比功: 即破碎单位体积岩石所作的功, 现以 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, 它说明岩石的磨蚀性,