

国家级高技能人才培训特色教材

HANG DAO JUE JIN

巷道掘进

李兆敏 主编



煤炭工业出版社

国家级高技能人才培养特色教材

巷道掘进

李兆敏 主编

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

巷道掘进 / 李兆敏主编. -- 北京: 煤炭工业出版社,
2015

国家级高技能人才培养特色教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4791 - 7

I. ①巷… II. ①李… III. ①巷道掘进—技术培训—
教材 IV. ①TD263.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 038444 号

巷道掘进 (国家级高技能人才培养特色教材)

主 编 李兆敏
责任编辑 罗秀全 袁 筠 肖 力
责任校对 姜惠萍
封面设计 安德馨

出版发行 煤炭工业出版社 (北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010 - 84657898 (总编室)
010 - 64018321 (发行部) 010 - 84657880 (读者服务部)
电子信箱 cciph612@126.com
网 址 www.cciph.com.cn
印 刷 煤炭工业出版社印刷厂
经 销 全国新华书店

开 本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 5³/₄ 字数 123 千字
版 次 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷
社内编号 7646 定价 12.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010 - 84657880

内 容 提 要

本书由五个模块组成，主要内容包括井巷的概念与岩石的工程分级、钻眼机具与爆破技术、巷道掘进、巷道支护、巷道施工组织与管理等。

本书内容选择科学实用，文字精练，语句通顺易懂，知识点和技能点简单易学，能帮助读者很好地掌握理论知识、提升技能。

本书是中职学校相关专业高技能人才培养的特色教材，也可作为矿山职工的学习和培训用书。

教材编审委员会

主 任	田继恒	毛静梅			
副 主 任	霍春福	高 波	梁加利	李 华	
委 员	孙福贵	吴彦杰	刘 利	张景库	潘远东
	金日新	付希瑞	刘丽杰	马 良	李兆敏
	陈 静	马积德	徐荣涛		

主 编	李兆敏	
副 主 编	霍春福	孙福贵
参编人员	李 慧	郭 莹
主 审	马芝文	

前 言

为贯彻落实《教育部关于印发〈中等职业教育改革创新行动计划（2010—2012年）〉的通知》（教职成〔2010〕13号）精神，深入推进中等职业教育改革创新，加快培养高素质劳动者和技能型人才，切实提升中等职业教育服务经济社会发展的能力和水平，培养具有与本专业岗位群相适应的文化水平和良好职业道德、了解企业生产全过程、掌握本专业基本专业知识和技术的技能型人才，辽宁煤炭高级技工学校以建设国家中等职业教育改革发展示范学校为契机，组织骨干教师和相关企业专家编写了这套体现学校专业特色和学生实际情况、满足企业岗位能力需求的国家级高技能人才培训特色教材，以适应新形势下职业教育教学的要求。

学校高度重视教材的编写工作，专门成立了国家级高技能人才培训特色教材编审委员会（以下简称教材编审委员会），多次召开教材编审会议，统一了思想，明确了目标，制定了标准。在教材编审委员会的领导和组织下，编写人员深入企业开展调研工作，了解企业对技能型劳动者的要求，掌握企业高新技术的应用水平和发展趋势，认真研究相关的国家职业技能鉴定内容。教材编写以“实用、够用”为原则，以典型工作任务为主体，以工作过程为导向，注重理论知识、实际操作能力和职业技能鉴定标准的融合，并在此基础上构建各教材的整体框架和具体内容。

《巷道掘进》是这套教材中的一本，由辽宁煤炭高级技工学校李兆敏任主编，霍春福、孙福贵任副主编，李慧、郭莹参与编写，辽宁石油化工大学矿业工程学院马芝文主审。

由于本教材涉及学科较多，覆盖面广，加之作者水平有限，时间紧迫，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

教材编审委员会

二〇一四年六月

目次	
模块一 井巷的概念与岩石的工程分级.....	1
课题一 井巷的概念.....	1
课题二 岩石的性质及其工程分级.....	3
复习思考题	14
模块二 钻眼机具与爆破技术	15
课题一 钻眼机具	15
课题二 工业炸药	22
课题三 电雷管起爆法	26
课题四 爆破技术	30
复习思考题	31
模块三 巷道掘进	33
课题一 钻眼爆破	33
课题二 掘进通风与综合防尘	41
课题三 装岩工作	44
课题四 运输工作	48
课题五 岩巷掘进机械化作业线的配套方式	52
复习思考题	54
模块四 巷道支护	55
课题一 支护材料	55
课题二 棚式支护	61
课题三 浇(砌)筑整体支架支护	63
课题四 喷射混凝土支护	66
课题五 锚杆支护	70
复习思考题	73
模块五 巷道施工组织与管理	74
课题一 一次成巷及其作业方式	74
课题二 施工组织	76

课题三 掘进队的组织与管理制度	78
复习思考题	80
参考文献	81

模块一 井巷的概念与岩石的工程分级

【学习目标】

1. 掌握各种巷道的概念、用途。
2. 掌握岩石的工程分级。
3. 了解煤田不同开拓方式的井巷系统。
4. 理解岩石的物理力学性质。

课题一 井巷的概念

一、井巷的概念及分类

1. 矿山巷道

为了勘探、开拓及开采矿床，或为达到其他目的（如为了满足提升、运输、通风、排水、动力供应等），在有用矿物矿床或岩石中进行开凿作业时所形成的孔洞叫做矿山巷道。矿山巷道是由几个岩面围成的空间，其中两侧的面叫做墙帮或两帮，上面的叫作顶板，下面的叫作底板。而随着掘进工作向前推进的面叫作掘进工作面。

2. 矿山巷道分类

巷道按照其用途和服务范围的不同可分为勘探巷道、开拓巷道、准备巷道及回采巷道。为勘查矿床赋存状态而开掘的巷道称为勘探巷道。为全矿井、一个水平或若干采区服务的巷道，如井筒、井底车场、主要石门、运输大巷和回风大巷（或总回风巷）称为开拓巷道。为一个采区或数个区段服务的巷道，如采区上下山、采区车场、采区硐室称为准备巷道。仅为采煤工作面生产服务的巷道，如区段运输平巷、区段回风平巷、开切眼（形成初始采场的巷道）叫做回采巷道。

巷道根据其空间形态的不同分为水平巷道、倾斜巷道和垂直巷道。

水平巷道——巷道的长轴线与水平面近似平行，如平硐、平巷、石门等。

倾斜巷道——巷道的长轴线与水平面有一定夹角，如斜井、上山、下山、斜巷等。

直立巷道——巷道的长轴线与水平面垂直，如立井、暗立井等。

硐室——空间三个轴线长度相差不大且又不直通地面的地下巷道，如绞车房、变电所、煤仓等。

常见的矿井巷道的布置如图 1-1 所示。

二、井巷设计的概念

根据煤系地层距离地表深度的不同，井田的开拓方式分为立井开拓、斜井开拓、平硐

开拓和综合开拓四类，如图 1-1 所示。井巷工程是指服务于地下煤炭生产的井筒（包括立井和斜井）、平硐和各种巷道、硐室工程，井巷是煤炭生产的动脉和必要的工作空间。

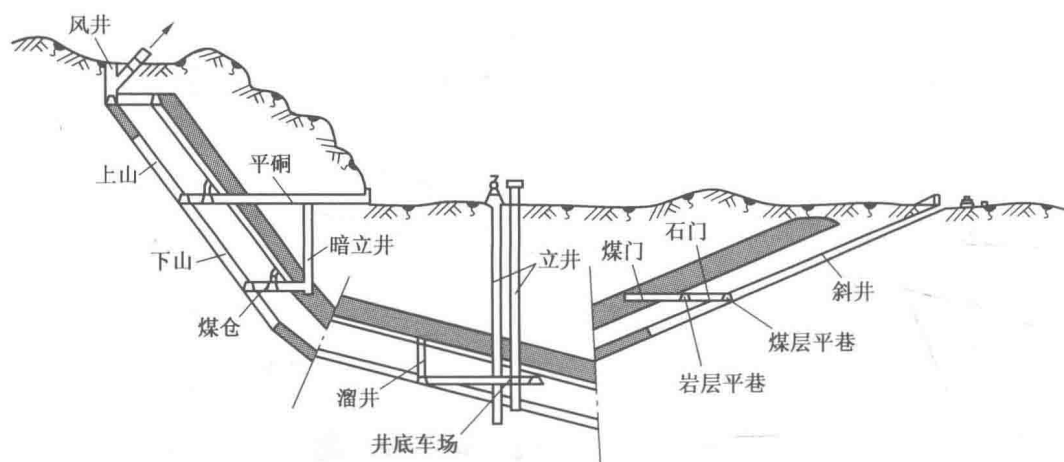


图 1-1 煤田不同开拓方式的井巷系统

井巷设计是指根据井田的开拓方式、提升及运输设备选型、地质条件以及服务年限等条件进行的立井井筒断面、斜井断面、平硐断面和巷道断面的设计计算，并绘制相应施工图纸的工作。井巷设计是矿井施工的基础和依据，要从井田开拓的主观要求和客观条件出发，对井巷断面的形状、宽度、高度、支护参数、管线布置、风速等内容进行科学的计算和设计，在此基础上绘制井巷断面施工图，为矿井建设施工提供依据。

井巷设计中应当遵循以下原则：

- (1) 安全原则；
- (2) 经济原则；
- (3) 技术可行原则；
- (4) 设计可变更原则；
- (5) 环境保护原则。

三、井巷施工的概念

井巷施工是指根据井巷设计施工图，以及具体井巷工程的地质条件，编制施工组织设计并据此组织施工，开凿井巷通道的作业过程。井巷施工是矿井建设的关键。

根据施工内容的不同，井巷施工分为立井井筒施工、斜井施工、平硐施工、巷道（岩石巷道、煤巷和半煤岩巷道）施工以及井底车场硐室工程的施工。对于立井井筒工程，根据井筒穿过地层的不同，井筒施工又包括表土施工和基岩施工。根据所采用施工方法的不同，立井井筒表土施工又可分为普通法施工和特殊法施工。

井巷施工应当依据井巷施工图纸，以及井巷工程所在区域的工程地质条件、水文地质条件和其他相关条件，认真编制施工组织设计，并严格按设计图纸和施工组织设计以及井巷工程质量检验评定标准组织施工。在施工过程中，要根据地质条件的变化，及时修改和

完善井巷设计和施工组织设计。施工组织设计的编制是井巷施工必须首先进行的重要工作。

施工组织设计的编制,也应当坚持安全上可靠、技术上可行和经济上合理以及可以补充修正和保护环境的原则。

课题二 岩石的性质及其工程分级

井巷施工最基本的过程,就是把一部分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,接着对这些地下井巷进行必要的维护,防止围岩继续破碎或垮落。因此,破碎岩石与防止岩石破碎就成为井巷工程的主要问题。为了有效、合理地进行破岩和维护井巷,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,以便为井巷设计、施工和成本计算提供依据。

岩石是由一种或多种矿物组成的集合体,是各种地质作用的产物,是构成地壳的物质基础。岩石也是一种三相体,即由固体矿物、气体、水组成。

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、黏土、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。

一、岩石的物理性质

研究岩石的基本性质对研究工程体的稳定性具有重要意义,其研究内容包括岩石的物理性质和力学性质。其中,物理性质是自然状态下所表现出的特征,而力学性质则是在外力作用下所表现出的特征。不同的岩石,其物理力学性质是不同的,即使是同一种岩石,由于其形成过程及赋存环境等多种外界因素的不同,其所表现出的性质也有差异。

岩石的物理性质是其内部矿物基本性质、结构与构造的综合反映,主要包括以下几方面的内容。

1. 岩石的结构与构造

1) 岩石的结构

岩石的结构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组合方式。它主要取决于成岩的环境。在同一大类岩石中,由于生成的环境不同,就产生了各种不同的结构。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。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现各向同性。沉积岩如砾岩和砂岩的力学性质,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。

对于煤矿中常见的沉积岩来说,根据岩石结构可分为以下几种:

- (1) 砾状结构——粒径大于 2 mm 的岩石碎屑胶结而成的碎屑结构类型,如砾岩。
- (2) 砂质结构——粒径在 2~0.05 mm 之间的碎屑结构类型,如砂岩。

(3) 粉砂质结构——粒径在 0.05 ~ 0.005 mm 之间的碎屑结构类型, 如粉砂岩。

(4) 泥质结构——粒径小于 0.005 mm 的碎屑结构类型, 如泥岩、黏土岩。

2) 岩石的构造

岩石的构造是指岩石中矿物颗粒的集合体之间, 以及它与其他组成部分之间的排列方式和充填方式。岩石的构造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。常见岩石的构造有下列三种:

(1) 体结构——岩石的颗粒互相严密地紧贴在一起, 没有固定的排列方式。

(2) 多孔状构造——岩石的颗粒彼此相接并不严密, 颗粒之间有许多小孔隙(微孔)。

(3) 层状构造——岩石的颗粒相互交替, 表现出层次叠置现象(层理)。

2. 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的比值。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矿物的密度。一般而言, 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估计了。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。干密度是指岩石在绝对干燥时的密度, 湿密度是指岩石在天然含水或饱水状态下的密度:

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

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

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 。

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,区分干、湿密度却具有重要的意义。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,而深部的致密岩石一般具有较大的密度。

3. 岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是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、孔隙的总体积与试件总体积 V 之比,用百分数表示;孔隙比则是指岩石试件内各种裂隙、孔隙的总体积与试件内固体矿物颗粒体积 V_c 之比,用小数计。岩石的孔隙度和孔隙比通常由岩石的相对密度 d 和干密度 ρ_c 计算求得:

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

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

岩石的孔隙性对岩石的其他性质有显著的影响。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会加快风化速度,从而进一步增大透水性和降低力学强度。

4. 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

岩石吸水率用 ω 表示,它是指岩石试件在大气压力下吸入水的质量 M_w 与试件烘干后的质量 M_d 之比值:

$$\omega = \frac{M_w}{M_d} \quad (1-6)$$

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		相对密度 d	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 $e/\%$	吸水率 $\omega/\%$
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

表 1-1 (续)

岩石名称		相对密度 d	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙比 $e / \%$	吸水率 $\omega / \%$
沉积岩	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	1.10 ~ 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,因而在一定的水压力作用下,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。渗透系数一般通过在钻孔中进行抽水试验或压水实验来确定。

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。

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 ℃ 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。溶蚀作用可使岩石的致密程度降低、孔隙度增大,导致岩石强度降低。溶蚀现象在某些围岩为石灰岩的矿井中是常见的。

4) 岩石的软化性

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

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

式中 η_c ——岩石的软化系数;

R_{gw} ——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。亲水矿物和易溶性矿物含量愈多,开口孔隙愈发育,岩石浸水后强度降低程度愈大。岩石浸水时间愈长,其强度降低程度亦愈大。

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性往往对地下工程的施工和巷道的稳定性带来不良影响。

5. 岩石的碎胀性

岩石破碎以后因碎块间空隙增多而导致总体积比原整体状态下增大的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在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,可用下式表示:

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

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,若破碎后块度较小且排列较杂乱,则碎胀系数较大。

几种常见岩石的碎胀系数见表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性问题。岩石爆破所需膨胀空间大小也与该岩石的碎胀系数有关。

表1-2 几种常见岩石的碎胀系数

岩石名称	砂、砂石	砂质黏土	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

二、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。岩石的力学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形状尺寸响应,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。研究岩石的力学性质主要是研究岩石的变形、破坏和强度等性质。

1. 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,下面就岩石的变形性质加以阐述。

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和变形参数来说明。首先研究岩石的应力-应变关系。根据大量的试验资料,在单向压力作用下,岩石典型的应力-应变全程曲线如图1-2所示。

I段(OA段):应力-应变曲线呈凹形,这是由于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，这个阶段很短甚至没有。

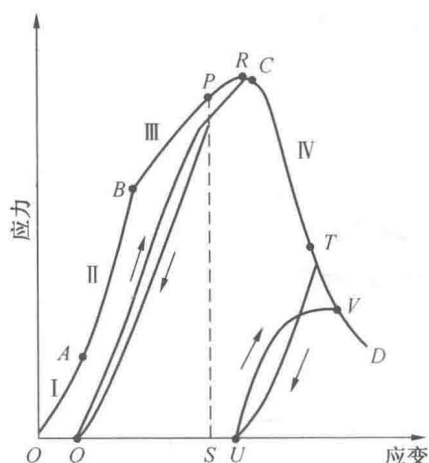


图 1-2 一般岩石在室温和大气条件下单向压缩试验曲线

Ⅱ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。在 I 和Ⅱ段内, 如果卸除荷载, 变形能够完全恢复。B 点对应的应力称为弹性极限或屈服应力。

Ⅲ段 (BC 段): 应力 - 应变曲线呈凸形, 曲线斜率逐渐减小。这一阶段内岩石局部破损逐渐增大而导致岩石达到强度极限 C 点, 称为裂隙发展阶段。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段 (CD 段): 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,

当岩石继续破裂发展到 D 点时才最终破裂, 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破裂, 破裂后仍然具有一定强度。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减缓岩体变形, 则岩体破坏就会停止而仍然保持相当大的承载能力。锚喷支护就是控制岩体变形十分有效的措施。

岩石受单轴压缩时, 体积始终在变化, 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:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_y + \varepsilon_x + \varepsilon_z$$

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后再超过原体积。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。这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。

2) 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。大理岩在不同围压下的应力 - 应变曲线如图 1-3 所示。首先, 岩石破坏前的应变随着围压的增大而增加。另外, 随着围压的增大岩石的塑性也不断增大, 即随着围压增大岩石逐渐由脆性转化为延性 (即岩石能承受大量永久变形而不破坏的性质)。图 1-3 中大理岩在围压为零或较小时, 岩石呈现出脆性性质; 当围压增大到 50 MPa 时, 显示出由脆性向塑性转化的过渡状态; 围压增大到 68.5 MPa 时, 呈现出延性流动; 围压增大到 165 MPa 时, 岩石屈服后的应力差值 ($\sigma_1 -$

σ_3) 随应变的增加而稳定增长, 出现所谓的应变硬化现象。

总之, 岩石在三轴压缩条件下, 随着围压的增加其变形特征如下:

- (1) 弹性阶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比关系。
- (4) 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。

2. 岩石的强度特征

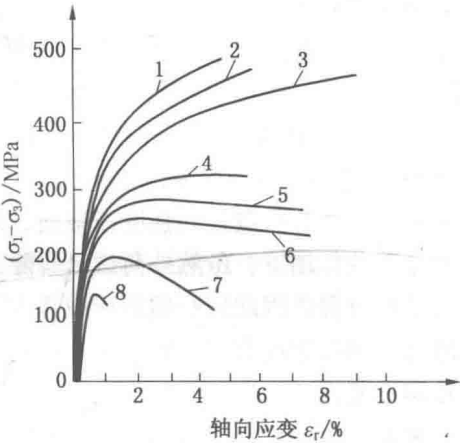
在外荷载作用下岩石抵抗破坏的能力称为岩石强度。岩石在静荷载作用下的强度和在动荷载作用下的强度是不同的。

1) 静荷载下岩石的强度性质

按外力性质不同, 可将岩石强度分为抗压强度、抗拉强度和抗剪强度等。岩石静荷载强度的测定方法, 是将岩石制成规定形状和尺寸的试件, 在材料试验机或三轴试验机上进行拉、压、剪、弯等强度试验, 或者利用点荷仪进行点荷试验。煤矿中常见岩石的强度指标见表 1-3。

表 1-3 煤矿中常见岩石的各种强度

岩石名称	抗压强度 σ_c /MPa	抗拉强度 σ_t /MPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	内聚力 C /MPa
花岗岩	100 ~ 250	7 ~ 25	45 ~ 60	14 ~ 50
流纹岩	180 ~ 300	15 ~ 30	45 ~ 60	10 ~ 50
闪长岩	100 ~ 250	10 ~ 25	53 ~ 55	10 ~ 50
安山岩	100 ~ 250	10 ~ 20	45 ~ 50	10 ~ 40
辉长岩	180 ~ 300	15 ~ 36	50 ~ 55	10 ~ 50
玄武岩	150 ~ 300	10 ~ 30	48 ~ 55	20 ~ 60
石英岩	150 ~ 350	10 ~ 30	50 ~ 60	20 ~ 60
片麻岩	50 ~ 200	5 ~ 20	30 ~ 50	3 ~ 5
千枚岩、片岩	10 ~ 100	1 ~ 10	26 ~ 65	1 ~ 20



1— $\sigma_3 = 325$ MPa; 2— $\sigma_3 = 249$ MPa;
3— $\sigma_3 = 165$ MPa; 4— $\sigma_3 = 84.5$ MPa;
5— $\sigma_3 = 62.5$ MPa; 6— $\sigma_3 = 50$ MPa;
7— $\sigma_3 = 23.5$ MPa; 8— $\sigma_3 = 0$ MPa;

图 1-3 德国大理岩单轴和三轴应力-应变全图

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、