

普通高等教育“十二五”规划教材

矿压测试技术

主编 张国华 李兴伟



煤炭工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

矿压测试技术

主 编 张国华 李兴伟
副 主 编 陈 刚 刘志军 王 琼
参编人员 宁建国 徐素国 刘 刚
 徐方程

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

矿压测试技术 / 张国华, 李兴伟主编. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2014

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5020-4530-2

I. ①矿… II. ①张… ②李… III. ①矿山压力—测试—高等学校—教材 IV. ①TD326

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 097528 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn

北京玥实印刷有限公司 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 14

字数 327 千字 印数 1—2 000

2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

社内编号 7373 定价 23.00 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

内 容 提 要

本书主要介绍了岩石的基本性质、巷道矿压显现规律、采场矿压显现规律、矿山压力观测设备、采煤工作面矿压观测、巷道矿山压力观测、煤矿动压现象及其控制、采场围岩应力分布的监测技术、矿山压力监测数据分析与预测方法等内容。

本书可作为高等学校采矿、安全工程等专业的教材，也可供从事采矿、安全工程的技术人员或管理人员学习参考。

前 言

近年来,我国煤炭开采技术取得了巨大的进步。全国煤矿安全生产状况总体上大有改善,其原因主要在于国家加强了煤矿安全生产的管控措施,加大了安全投入,同样,煤矿矿山压力监测手段和设备的更新功不可没。由于矿山压力的复杂性,地质条件、开采条件及矿山压力控制手段的多样性,矿山压力现场测试已成为解决矿山具体矿压问题以及进行矿压理论研究的主要依据和方法。本书重点介绍煤矿矿山压力显现基本规律、常用监测设备、工作面及巷道矿压监测技术、采场周围应力分布、煤矿动压现象监测技术及矿压观测数据分析预测方法,旨在为采矿、安全工程的学生和从业者提供必要的理论基础,以便于更好地应用不断更新的矿压监测设备和方法。

本书由黑龙江科技大学张国华、李兴伟任主编。全书共分9章,具体编写分工:哈尔滨学院王琼编写第1、2章,黑龙江科技大学李兴伟编写第4、5章,黑龙江科技大学刘志军编写第7章,黑龙江科技大学陈刚编写第6、8章,黑龙江科技大学张国华、太原理工大学徐素国编写第3章,山东科技大学宁建国编写第9章。书中部分绘图与制表工作由黑龙江科技大学刘刚、徐方程完成。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中可能存在不当和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014年3月

目 次

1	岩石的基本性质	1
1.1	岩石的结构与构造	1
1.2	岩石的物理性质	4
1.3	岩石的变形性质	9
1.4	岩石的流变性	15
1.5	岩石的强度性质及强度理论	17
2	巷道矿压显现规律	25
2.1	巷道围岩应力及变形规律	25
2.2	巷道围岩控制原理	32
2.3	巷道围岩支护方式	36
3	采场矿压显现规律	44
3.1	矿山压力显现程度的指标	45
3.2	基本顶的初次来压与周期来压	46
3.3	采煤工作面前后支承压力分布	49
3.4	采煤工作面矿压显现主要影响因素	50
4	矿山压力观测设备	57
4.1	概述	57
4.2	矿压观测仪器	59
5	采煤工作面矿压观测	79
5.1	概述	79
5.2	顶底板移近量和活柱下缩量观测	80
5.3	支架载荷的观测	89
5.4	采煤工作面顶板状况统计观测	94
5.5	采煤工作面采空区上覆岩层移动和破坏过程的观测	101
5.6	采煤工作面顶板运动的预测预报	105
5.7	底板比压的测定	115
5.8	单体支柱工作面支护质量监控	119

6	巷道矿山压力观测	127
6.1	围岩变形破坏监测方法	127
6.2	巷道支架载荷监测方法	134
7	煤矿动压现象及其控制	139
7.1	冲击地压的特征及分类	139
7.2	冲击地压发生的条件及开采技术因素	141
7.3	冲击地压的预测预报	143
7.4	冲击地压的防治	159
7.5	顶板大面积来压	165
8	采场围岩应力分布的监测技术	173
8.1	地应力及其测量	173
8.2	支承压力监测方法	187
9	矿山压力监测数据分析与预测方法	194
9.1	矿山压力监测数据的多元线性回归分析	194
9.2	矿压监测缺失数据的拟补方法	196
9.3	矿压监测信息的神经网络聚类分析	200
9.4	矿压监测数据分形特征分析	203
9.5	矿压监测信息的灰色预测方法	206
9.6	矿压监测信息的 BP 神经网络预测方法	211
	参考文献	215

1 岩石的基本性质

在地下工程稳定性研究当中，研究岩体或岩石首先是研究其物理性质和力学性质，其次是从微观上研究其矿物组成。煤矿井下工程者一是研究岩体的开挖问题，即采用何种方式方法和工艺过程对岩体进行开挖，从而形成所需要的地下空间，如井下巷道和硐室；二是研究岩体的维护问题，即采用何种支护方式来保证在岩体中所形成的地下空间能够确保使用期间的安全，也即通过何种方式来保证其围岩的稳定。

从地质学的基本知识可知，岩体是指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。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。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，可以把岩体看作是由结构面和受它包围的结构体两部分共同组成的。而岩石是不含有结构面的矿物集合体，故在这种条件下，可以将岩石近似看做岩块（结构体）进行分析和研究。

在岩体的两个基本组成部分中，首先要对岩石的基本性质进行全面的了解。

1.1 岩石的结构与构造

岩石作为多孔介质的一种，是各种矿物的集合体，是各种地质作用的产物，是构成地壳的物质基础。影响岩石基本性质的主要因素是岩石的矿物组成、岩石的结构与构造。

1.1.1 分类

1. 按成因分类

按岩石的成因可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。

岩浆岩是指在内力地质作用下，地球内部的岩浆沿地壳裂隙侵入地壳或喷出地面冷凝而成的岩石。岩浆岩又称火成岩，其中埋于地下深处或接近地表的称为侵入岩；喷出地表的称为喷出岩。

沉积岩是指岩石在外力地质作用下，经过风化、剥蚀成岩石碎屑，经流水、风等搬运作用搬运到低洼处沉积下来，而后再经过压紧或化学作用硬结而成的岩石。

变质岩是指地壳的原岩因地壳运动、岩浆活动，在高温、高压和易发生化学反应的物质作用下，改变原岩的结构、构造和成分形成的一种新的岩石。

2. 按坚固性分类

按岩石的坚固性可分为硬质岩石和软质岩石两类。

硬质岩石是指其饱和单轴极限抗压强度不小于 25 MPa（含 25 MPa）的岩石。常见的硬质岩石有花岗岩、石灰岩、石英岩、闪长岩、玄武岩、石英砂岩、硅质砾岩和花岗片麻岩等。

软质岩石是指其饱和单轴极限抗压强度小于 25 MPa 的岩石。常见的软质岩石有页岩、

泥岩、绿泥石片岩和云母片岩等。

除此之外，岩石按其风化程度可分为微风化、中等风化和强风化 3 类。

1.1.2 矿物成分

岩浆岩、沉积岩及变质岩的内部细划分种类繁多，组成其岩石的矿物成分也各不相同。

岩浆岩最常见的矿物成分包括浅色矿物（如石英、正长石、斜长石、白云母等）和深色矿物（如黑云母、角闪石、辉石、橄榄石等）。这些矿物除黑云母外，都是硬度较大的矿物，所以未经强烈蚀变和剧烈错动的岩浆岩一般强度都较大，稳定性都比较好，有利于采用高速度、高效率的采掘方法。此外，在酸性岩中，含有较大量的游离二氧化硅，在其中进行采掘作业时，会产生粉尘，易引起硅肺病，因此必须加强通风防尘措施。

沉积岩的矿物成分包括矿物和胶结物。矿物中有石英、长石、云母等原生矿物和方解石、白云石、石膏、黏土矿物等次生矿物。胶结物按其硬度与抗风化力的大小，有硅质（ SiO_2 ）、钙质（ CaCO_3 ）、铁质（ FeO 或 Fe_2O_3 ）和泥质 4 种。

变质岩的矿物成分除石英、长石、云母、方解石等矿物外，还具有特异的矿物滑石、绿泥石、蛇纹石和石榴石等。变质岩类岩石的矿物组成中，常因含一定数量的滑石、绿泥石和云母等而对采掘影响较大，这些矿物光滑柔软，且多呈片状，因而稳定性极差，不少矿山常因此而冒顶片帮，故在采矿过程中必须引起足够的重视。至于所含其他矿物组分，大多与岩浆岩和沉积岩相似，其采掘特点类似岩浆岩和沉积岩。

1.1.3 结构与构造

岩石的结构是指岩石中矿物的结晶程度、颗粒大小、形状以及彼此间的组合方式。这主要取决于地质作用进行的环境，在同一大类岩石中，由于它们生成的环境不同，就会产生种种不同的结构。

岩石的构造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，这反映着地质作用的性质。由岩浆作用生成的岩浆岩大多具有块状构造；由变质作用生成的变质岩多数情况下它们的组成矿物依一定方向作平行排列，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。

1. 岩浆岩的结构与构造

岩浆岩一般均较硬，绝大多数矿物均成结晶粒状紧密结合，常具块状、流纹状及气孔状结构，原生节理发育。岩浆岩根据矿物的结晶程度、颗粒大小和均匀程度分为显晶质结构、隐晶质结构、玻璃质结构、斑状结构。

岩浆岩的构造指岩浆岩的外貌整体特征，它是由矿物集合体的排列方式和充填方式决定的。常见的构造有 5 种：块状构造、流纹状构造、气孔状构造、杏仁状构造、带状构造。

常见的岩浆岩包括酸性、浅色的花岗岩、花岗斑岩和流纹岩；中性、浅色的正长岩、正长斑岩和粗面岩；中性、深色的闪长岩、玢岩和安山岩；基性、深色的辉长岩、辉绿岩和玄武岩；超基性、深色的橄榄岩和辉岩。

2. 沉积岩的结构与构造

沉积岩分布广泛，约占地球陆地上出露面积的 75%。沉积岩的结构按成因和组成物质不同分为碎屑结构、泥质结构、结晶结构、胶状结构和生物结构。

沉积岩最显著的构造特点是具有层理、碎屑状、鲕状等特殊结构及层状结构，并富含生物化石和结核。常见的沉积岩构造有层理构造、块状构造、鲕状构造。

沉积岩的种类包括碎屑岩、黏土岩、化学岩和生物化学岩 4 类。

3. 变质岩的结构与构造

变质岩的结构包括变晶结构、变余结构和压碎结构，其中多为变晶结构。

变晶结构是变质岩最重要的结构。由于这种结构是原岩中各种矿物同时再结晶所形成的，所以矿物晶体相互嵌生。晶形的发育程度并不取决于矿物的结晶顺序，而是取决于矿物的结晶能力，这是与岩浆岩的结晶结构不一样的。变晶结构又可细分为等粒变晶结构、斑状变晶结构和鳞片变晶结构 3 种。

变余结构是一种过渡型结构。由于变质作用进行得不彻底，在变质岩的个别部分还残留着原来岩石的结构。这种结构对于判断原来岩石属于何类别有着很大的意义。如变质岩的原岩是砂状沉积岩，则可出现变余砂粒结构或变余泥质结构；若变质岩的原岩是岩浆岩，则可能出现变余斑状结构。变余结构一般常见于变质较轻的岩石中。

压碎结构是由于动力变质作用使岩石发生破碎而形成的，如碎裂岩等。

变质岩的构造是识别各种变质岩的重要标志。变质岩的构造分为片理构造、块状构造、条带状构造和斑点构造。

片理构造是由于岩石中片状、板状和柱状矿物在定向压力的作用下重结晶，垂直压力方向成平行排列而形成的。顺着平行排列的面可以把岩石劈成一片一片的小型构造形态。

块状构造是指矿物无定向排列，其分布大致呈均一状，如石英岩、大理岩常具有这种结构。

条带状构造。岩石中的矿物成分分布不均匀，某些矿物有时相对集中呈宽的条带，有时呈窄的条带，这些宽窄不等的条带相间排列便构成条带状构造。混合岩常具有这种构造。

斑点构造。当温度升高时，原岩中的某些成分首先集中凝结或起化学变化，形成矿物集合体斑点，其形状、大小可有不同。某些板岩具有这种结构。

常见的变质岩有块状的大理岩和石英岩，板状的板岩，片状的云母片岩、绿泥石片岩、滑石片岩、角闪石片岩、片麻状的片麻岩等。

1.1.4 岩石结构与构造的研究意义

岩石具有许多结构，但对采掘影响最大的是颗粒的粗细。对于岩浆岩而言，在其他条件相似的情况下，隐晶质、细粒、等粒的岩石比粗粒和斑状的岩石强度大。例如，玄武岩为隐晶质结构，而辉长岩为粗粒结构，所以玄武岩的抗压强度可达 500 MPa，而辉长岩的抗压强度仅为 120 ~ 360 MPa；又如花岗斑岩具有斑状结构，其抗压强度只有 120 MPa，而同一成分的细粒花岗岩因具有等粒结构，其抗压强度可达 260 MPa。强度大的岩石虽然较难凿岩，但却容易维护，甚至可以支护，给采掘工作带来很大的方便。沉积岩与岩浆岩相似，但对于碎屑岩，其物理机械性质主要取决于胶结物的成分和性质，泥质胶结比铁质或硅质胶结的岩石硬度小，稳固性差。而变质岩的结构对采掘的影响不太突出。

岩浆岩多具有块状构造。这种构造的最大特点是岩石各个方向的强度相近，从而增加了岩石的稳定性。所以岩浆岩的块状构造不像沉积岩的层理构造和变质岩的片理构造那样对凿岩、爆破和支护等有明显的影响。值得注意的是岩浆岩的原生节理（即岩浆岩生成

时冷凝收缩所产生的裂隙)发育,如玄武岩的柱状节理、细碧岩的枕状节理等。这些节理的存在,降低了岩石的稳固性,影响了岩石的爆破效果。

沉积岩最大的特点是具有层理构造,这种构造的存在,使岩石在各个方向不同,在其他条件相同或相似的情况下,层理越发育,岩石的稳固性越低,各个方向差异也越大。一般是平行岩石层理方向的抗压和抗剪强度小、抗拉强度大;垂直层理方向,则情况正好相反。在这类岩石中开掘巷道时,若顺着层理方向掘进,不仅效果不好,而且容易产生冒顶、片帮事故,给采掘带来不利的影响;如果斜交,特别是层理方向掘进时,则可以提高爆破效果,也可增加顶板及两帮的稳固性。

变质岩的构造尤其是片理构造对采掘影响更大,其影响同沉积岩的层理构造相似。千枚岩、片岩及板岩的片理比较发育,岩石沿片理延伸方向结合力较低,故其稳定性差。一般情况下,岩石的片理越发育,各个方向的强度相差越大,在平行片理的方向抗压和抗剪强度小,抗拉强度大;垂直片理方向则恰好相反。岩石片理发育时,对采掘极为不利,必须加强支护,其有效的办法是在垂直片理的方向上采用锚杆喷浆,可增强该类岩石的稳定性,避免冒顶和片帮。露天矿开采时,因片理所造成的岩石稳定性差,从而影响岩体的边坡稳定,但另一方面有时也可以提高爆破效果。

1.2 岩石的物理性质

岩石的基本性质是岩石内部组成矿物成分、结构、构造的综合反映,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,而力学性质则是反映在外力作用下所表现出的响应特征。不同的岩石其物理、力学性质是不同的,即使是同一种性质的岩石,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别。

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,主要包括以下几个研究内容:

1.2.1 密度

岩石的密度是指单位体积岩石的质量。又可分为颗粒密度和块体密度。

岩石的颗粒密度(ρ_s)是指岩石固体骨架部分的质量与其对应的实体体积之比。它不包括岩石孔隙,其大小取决于组成岩石的矿物密度及其相对含量。

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \tag{1-1}$$

式中 M_s ——岩石固体部分的质量;

V_s ——岩石固体部分的体积。

岩石的块体密度是指岩块单位体积的质量。按其含水情况的不同,又可分为干密度(ρ_d)、天然密度(ρ)和饱和密度(ρ_{sat})。后两者又称为湿密度。岩石的块体密度除与矿物组成有关外,还与岩石的孔隙性及含水情况有关。致密而裂隙不发育的岩石,块体密度与颗粒密度很接近,随着孔隙、裂隙增加,块体密度相应减小。

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_s + V_v} \tag{1-2}$$

$$\rho = \frac{M_s + M_w}{V_s + V_v} \tag{1-3}$$

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{M_s + \rho_w V_v}{V_v + V_s} \quad (1-4)$$

式中 ρ_w ——水的密度；
 V_v ——单位体积岩石中孔隙所占的体积；
 M_w ——水的质量。

1.2.2 相对密度

岩石的相对密度是指单位体积岩石固体部分的质量与同体积水（4℃）的质量之比，即

$$G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (1-5)$$

式中 W_s ——体积为 V 的岩石固体部分的质量；
 γ_w ——单位体积水（4℃）的质量。

1.2.3 视密度

岩石的视密度是指单位体积岩石的质量，即

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-6)$$

式中 W ——岩石试件的质量；
 V ——岩石试件的体积（包括孔隙体积）。

按岩石的含水情况不同，视密度也可分为天然视密度、干视密度和饱和视密度（其意义参见岩石密度中的天然密度、干密度和饱和密度）。岩石的天然视密度取决于组成岩石的矿物成分、孔隙发育程度及其含水情况。大多数岩石的天然视密度在 23 ~ 31 kN/m³ 之间。

研究岩石的密度、相对密度、视密度对地下工程来说，其影响主要表现为能够对岩体的开挖方式进行定性分析。一般来说，岩石的密度或视密度越大，表明其质地越坚硬，因此在选择开挖方法和机械设备时宜采用炮掘或选用功率较大的开挖机械。但该性质绝不是决定性因素，因为岩体是否容易开挖还取决于其内部节理裂隙的发育程度。

1.2.4 孔隙性

岩石的孔隙性是岩石孔隙性和裂隙性的统称。岩石孔隙性的度量通常有两种：一种用孔隙率来表示，也可以用裂隙率来表示；另一种用岩石的孔隙比来表示。岩石的孔隙性对岩石的其他性质有重要的影响，如岩石的密度、含水性、透水性、变形性质等。

岩石的孔隙率是指岩石中孔隙体积与岩石总体积之比，以百分率表示。岩石中的孔隙有的与外界相通，有的则不相通。孔隙开口有大有小。因此，岩石的孔隙率可以根据孔隙类型分为总孔隙率、总开孔隙率、大开孔隙率、小开孔隙率和闭孔隙率 5 种。计算公式分别为

$$\text{总孔隙率:} \quad n = \frac{V_v}{V} \times 100\% = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \times 100\% \quad (1-7)$$

$$\text{总开孔隙率:} \quad n_0 = \frac{V_{v0}}{V} \times 100\% \quad (1-8)$$

$$\text{大开孔隙率:} \quad n_b = \frac{V_{vb}}{V} \times 100\% \quad (1-9)$$

$$\text{小开孔隙率:} \quad n_s = \frac{V_{vs}}{V} \times 100\% \quad (1-10)$$

$$\text{闭孔隙率:} \quad n_c = \frac{V_{vc}}{V} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 V ——岩石体积;
 V_v ——孔隙总体积;
 V_{v0} ——总开孔隙体积;
 V_{vb} ——大开孔隙体积;
 V_{vs} ——小开孔隙体积;
 V_{vc} ——闭孔隙体积。

岩石的孔隙比是指岩石中总孔隙的体积与岩石固体实体部分的体积之比,一般以 e 表示,即

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-12)$$

通过变化很容易得到岩石的孔隙率 n 与岩石的孔隙比 e 之间的关系,其关系为

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-13)$$

一般工程中所提到的岩石孔隙率是指总孔隙率。岩石因形成条件及其后期经受的变化和埋藏深度不同,孔隙率变化范围很大,可从小于百分之一到百分之几十。新鲜的结晶岩类孔隙率一般小于3%;而沉积岩则较高,为1%~10%;有些胶结不良的砂砾岩,孔隙率可以达到10%~20%,甚至更大。在煤矿生产中,研究岩石的孔隙性主要体现在瓦斯灾害和瓦斯资源开采以及矿井水害防治方面,主要是研究岩石的渗透性,即岩石的孔隙越发育,则为瓦斯赋存提供的空间越多,孔隙之间的贯通性就越好,岩石的渗透率就越高,瓦斯或水的外排越容易。

1.2.5 吸水性

由于岩石是一种多孔介质,在工程环境条件下(如井下潮湿的环境等)常常内部含有一定的水,由于水的侵入使得岩石的物理力学性质发生很大的变化,这在岩体工程体中是经常要考虑的。

岩石的吸水性是指岩石在一定试验条件下的吸水性能。它取决于岩石的孔隙数量、大小、开闭程度和分布情况。表征岩石吸水性的指标有吸水率、饱水率和饱水系数。

岩石的吸水率(w_a)是指岩石试件在一个大气压和室温条件下自由吸入水的质量(m_{w1})与试件干质量(m_s)之比,用百分率表示,即

$$w_a = \frac{m_{w1}}{m_s} \times 100\% \quad (1-14)$$

实测时先将岩石试样烘干并称干质量,然后浸水饱和。由于试验是在一个大气压(常压)下进行的,岩石吸水时,水只能进入大开孔隙,而不能进入闭孔隙和小开孔隙,因此可用吸水率来计算岩石的大开孔隙率,即

$$n_b = \frac{V_{vb}}{V} = \frac{\rho_d w_a}{\rho_w} = \rho_d w_a \quad (1-15)$$

式中 ρ_w ——水的密度, g/cm^3 。

岩石的饱和吸水率 (w_p) 是指岩石试件在高压 (一般为 15 MPa) 或真空条件下吸入水的质量 (m_{w2}) 与岩石试样干质量之比, 用百分数表示, 即

$$w_p = \frac{m_{w2}}{m_s} \times 100\% \quad (1-16)$$

这种条件下, 通常认为水能进入所有开孔隙中, 因此岩石的总开孔隙率为

$$n_0 = \frac{V_{v0}}{V} = \frac{\rho_d w_p}{\rho_w} = \rho_d w_p \quad (1-17)$$

岩石的吸水率与饱和吸水率之比称为饱水系数, 是评价岩石抗冻性的指标。一般来说, 岩石的饱水系数为 0.5 ~ 0.8。饱水系数越大, 说明常压下吸水后留余的空间有限, 岩石越容易被冻胀破坏, 因而岩石的抗冻性就差。

1.2.6 透水性

岩石能被水透过的性质, 称为岩石的透水性, 常用渗透系数表示。渗透系数的大小取决于孔隙的数量、大小、方向及连通情况。

一般认为, 水在岩石中的流动服从达西定律, 因此, 可用达西渗透仪在室内测定完整岩石试件的渗透系数。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; 而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的调整是有很影响的, 二者是处于耦合状态条件下的调整。这一点在坝体工程、地下岩石中的核废料处理、地下土体中的水污染处理等问题中经常涉及到, 其所提到的渗透性是多孔介质对流体通过能力的综合反映, 这里所提到的岩石透水性只不过是液体和多孔介质给界定了而已。

1.2.7 软化性

岩石遇水之后其强度往往会降低, 我们将岩石浸水后其强度降低的性质称为岩石软化性。岩石的软化性取决于它的矿物组成及孔隙性。当岩石中含有较多的亲水性矿物以及大开孔隙较多时, 则其软化性较强。

表征岩石软化性的指标是软化系数 (K_R), 为岩石饱水抗压强度 (σ_{cw}) 与干抗压强度 (σ_{cd}) 之比, 即

$$K_R = \frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{cd}} \quad (1-18)$$

显然, K_R 值越小则岩石的软化性越强。当岩石的 $K_R > 0.75$ 时, 软化性弱; 同时也可说明其抗冻性和抗风化能力强。

岩石的软化性对工程体的稳定性影响很大, 在设计中是必须要考虑的。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的采取、大面积来压中坚硬顶板的注水软化处理等。

1.2.8 抗冻性

岩石抵抗冻融破坏的性质称为岩石的抗冻性。岩石浸水后, 当水的温度降至 0°C 以下时, 孔隙中的水将冻结, 体积增大 (可达 9%), 对岩石产生冻胀力, 使其结构和联结遭到破坏, 反复冻融后, 将使岩石的强度降低。岩石的抗冻性常用抗冻系数和质量损失率两

个指标表示。

抗冻系数 (R_d) 是指岩石冻融试验后干抗压强度 (σ_{cd2}) 与冻融前干抗压强度 (σ_{cd1}) 之比, 以百分数表示, 即

$$R_d = \frac{\sigma_{cd2}}{\sigma_{cd1}} \times 100\% \quad (1-19)$$

质量损失率 (K_m) 是指冻融前后岩样干质量之差 ($m_{s1} - m_{s2}$) 与冻融前干质量 (m_{s1}) 之比, 以百分率表示, 即

$$K_m = \frac{m_{s1} - m_{s2}}{m_{s1}} \times 100\% \quad (1-20)$$

试验时, 要求先将试件浸水饱和, 然后在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻, 冻后融化, 融化后再冷冻, 如此反复冻融 25 次或更多。冻融次数可以根据工程地区的气候条件决定。

岩石的抗冻性主要取决于岩石中大开孔隙的发育情况、亲水性和可溶性矿物的含量及矿物颗粒间的联结力。大开孔隙越多、亲水性和可溶性矿物含量越高时, 岩石的抗冻性越低; 反之越高。一般认为, 抗冻系数大于 75%、质量损失率小于 2% 时, 为抗冻性好的岩石; 吸水率小于 5%、软化系数大于 0.75 以及饱水系数小于 0.8 的岩石, 具有足够的抗冻能力。

在四季温差比较大的地区, 岩石的抗冻性在工程设计中尤其重要, 往往其抗冻性直接影响到工程体的安全、稳定以及使用寿命。也正因为岩石具有冻胀自然解体的性质, 因此在煤矿生产中, 尤其在四季温差较大的北方地区, 要求进风井必须设置暖风炉, 以防井筒砌碇支护体发生冻胀破碎而自然解体, 导致碇体失去支护作用。需要说明的是, 设置暖风炉的作用并不是单纯地为了防治碇体破坏。

1.2.9 膨胀性和崩解性

膨胀性和崩解性主要是松软岩石所表现的特征。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, 由于其内部亲水性物质分布不均匀导致吸水后内部局部体积膨胀不均匀, 从而形成内部膨胀裂隙, 在裂隙发生相互贯通时便导致岩石解体的现象。岩石的膨胀和崩解作用往往对地下工程的稳定性带来不良影响。

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。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的膨胀率。这些指标是在实验室内借助于膨胀应力测定仪和膨胀仪按规定的测定方法加以确定。

岩石的崩解性是用耐崩解性指标表示的, 它是指岩石试件在承受干燥和湿润两个标准循环之后, 岩样对软化和崩解作用所表现出的抵抗能力。这个指标也可在实验室内借助耐崩解仪按有关规定确定。

基于软岩所具有的膨胀性和崩解性, 在对该类岩石中开掘的巷道等工程体进行支护时, 一般均采用喷浆封闭的形式, 其主要目的是保持岩石原始的湿度或含水状态, 防止其发生改变而导致膨胀或崩解现象发生。

1.2.10 碎胀性和压实性

岩石的碎胀性是指破碎后的岩石较破碎前的岩石体积增大的性质；而岩石的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。对于岩石的碎胀性通常用岩石的碎胀系数来表示，岩石的碎胀系数是指岩石破碎后的体积与破碎前的体积之比，表示为

$$k_p = \frac{V_h}{V_0} \quad (1-21)$$

式中 k_p ——岩石的碎胀系数；
 V_h ——岩石破碎后的体积；
 V_0 ——岩石破碎前的原体积。

另外，有时还要用到岩石的残余碎胀系数，是指破碎后的岩石经过一段时间压实后的体积和破碎前原体积之比，表示为

$$k'_p = \frac{V'_h}{V_0} \quad (1-22)$$

式中 k'_p ——岩石的残余碎胀系数；
 V'_h ——破碎后的岩石经重新压实后的体积。

岩石的碎胀系数和残余碎胀系数对工作面矿体采出后直接顶垮落形成堆积体高度，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。另外，岩石的碎胀性直接影响到煤体采出后上覆岩层的移动变形程度，即影响垮落带、裂隙带、弯曲下沉带的发育高度，进而对高位钻场瓦斯抽放、高位巷瓦斯抽放中钻孔布置参数确定和高抽巷位置确定等均有重要影响。

对于岩石的压实性，现在研究比较多的是据此来分析矿井采用上行式采煤和已有采空区上方采煤的可行性和安全性。

1.3 岩石的变形性质

岩石的力学性质是指岩石在外力作用下所表现的性质，即岩石的力学响应。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尺寸响应，而强度性质所表现的是岩石抵抗外力的破坏承受能力。

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，而岩石的变形性质主要是研究岩石在外力作用下所表现的应力-应变关系，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。

1.3.1 单向受压条件下的岩石变形

在外力作用下，岩石内部应力状态发生变化，由于质点位置的改变，引起岩石变形。岩石的变形可分为弹性变形和塑性变形两种。按固体力学定义，弹性变形是指物体受力后发生变形，当外力解除时变形立即消失，是可逆变形；塑性变形是指物体受力后发生变形，在外力解除后其变形也不再恢复，是不可逆变形，又称为永久变形或残余变形。

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，首先来研究

岩石的应力-应变关系。

1. 岩石的应力-应变曲线特征

岩石在连续加载条件下的应变可分为轴向应变 (ε_L)、横向应变 (ε_d) 和体积应变 (ε_v)。前两者可用电阻应变仪测量。体积应变则用 $\varepsilon_v = \varepsilon_L - 2\varepsilon_d$ 来进行计算求得。求得了各级应力下的这 3 种应变值, 就可绘出相应的应力-应变曲线, 也有的是由 X-Y 绘图仪直接自动绘出。该曲线是分析研究岩石变形机理的主要依据, 其中以压应力-轴向应变曲线 ($\sigma - \varepsilon_L$ 曲线) 应用最广。

根据大量的试验研究, 在单向压力作用下, 通过刚性试验机可获得岩石的典型应力-应变全程曲线, 它反映了单轴压缩岩石试件在破裂前后全过程的应力-应变对应关系, 如图 1-1 所示。

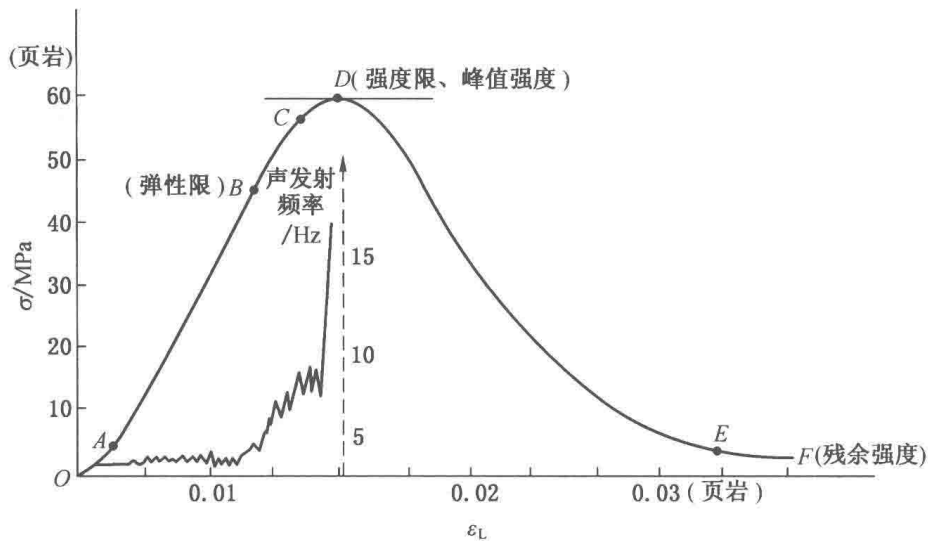


图 1-1 岩石全应力-应变曲线

从图 1-1 中可以将岩石的变形过程划分为 6 个阶段。

(1) 微裂隙及孔隙闭合阶段 (OA 段)。在载荷作用初期, 岩石中的裂隙及孔隙被逐渐压密, 形成早期非线性变形。曲线呈上凹形, 斜率随着应力增大而逐渐增大。表明裂隙、孔隙压密开始较快, 随后逐渐减慢。本阶段变形对裂隙化岩石来说比较明显, 但对坚硬少裂隙的岩石则不明显, 甚至不显现。

(2) 可恢复弹性变形阶段 (AB 段)。随着载荷增加, 轴向变形成比例增长, 即斜率保持不变, 并在很大程度上是可恢复的弹性变形。这一阶段的上界应力称为弹性极限, 其值约等于峰值强度的 30%~40%。此阶段过程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。这是由于岩石连续压缩所造成的。曲线 $\sigma - \varepsilon_L$ 仍呈近似直线, 而曲线 $\sigma - \varepsilon_v$ 则明显偏离直线。这一阶段的上界应力称为屈服极限, 这时岩石压密至最密实状态, 体积应变趋于零, 该点出现在 80% 峰值强度处。

(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。本阶段的上界应力称为峰值强度或单轴抗压强度。