



高等教育“十二五”规划教材

矿山岩石力学

Kuangshan Yanshi Lixue

赵光明 主编

中国矿业大学出版社



高等教育“十二五”规划教材

矿山岩石力学

主 编 赵光明

副主编 孟祥瑞 孙 建 刘钦节

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了岩石力学、矿山岩石力学的基础知识和理论。全书共 11 章,其中,第一至第七章为基础岩石力学,第八至第十一章为矿山岩石力学,每章配有习题。本书为高等教育“十二五”规划教材,不仅继承了传统矿山岩石力学的理论精华,而且增加了学科最新发展的软岩力学和岩石动力学等内容;内容紧贴专业要求和学生的实际,既体现实用性、可读性,又体现与时俱进的时代特征。

本书可作为工科院校采矿工程、安全工程、土木工程、交通工程、地质工程、地下空间工程等涉及岩石力学专业的本科生和研究生教材,也可作为有关工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

矿山岩石力学/赵光明主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2015. 7

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2753 - 9

I. ①矿… II. ①赵… III. ①矿山—岩石力学—高等学校—教材 IV. ①TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 168011 号

书 名 矿山岩石力学

主 编 赵光明

责任编辑 王美柱

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

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

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数 381 千字

版次印次 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 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

能源和矿产资源制约着国民经济的发展,随着浅部资源的日益枯竭,国内外都陆续进入深部资源的开采。作为我国的主体能源,煤炭产能目前已经达到 40 亿 t 以上,占一次性能源的 70% 以上。作为一次性能源消费的主体,为保证煤炭资源在我国矿产资源中的主导地位,进行深部资源开采是必然趋势,我国的煤炭资源埋深在 1 000 m 以下的为 2.95 万亿 t,占煤炭资源总量的 53%,其中,埋深 1 000~1 500 m 的煤炭储量为 1.2 万亿 t,这一部分储量将为我国 21 世纪后备能源保障。同时,由于国家建设大规模的需求,大批金属和有色金属矿山也已进入采深超过 1 000 m 的深部开采阶段。深部开采与浅部开采的明显区别在于深部岩石所处的特殊环境(高地应力、高地温、高岩溶水压、开采扰动),深部岩石的组织结构、基本行为特征和工程响应发生根本性变化。

同时,几十年来,岩石力学领域研究取得了重大进展,矿山岩石力学课程内容也得到了很大丰富。由于隧道工程、水利工程、矿山工程、交通工程以及建筑工程等相关岩土工程实际的需要,随着现代数学、力学、计算机科学及实验实测方法的迅速发展,许多相关学科、边缘学科和交叉学科不断渗透到岩石力学领域,新兴的科学理论应用于岩石力学,促进岩石力学研究领域的不断拓展、理论体系的不断丰富与完善,大大推动了岩石力学的发展。

本教材吸收了李通林、吴德伦、徐志英教授等主编的传统教材的精髓,同时为了在教学中体现矿山岩石力学的新发展领域,编写过程中注意吸收矿山岩石力学新理论、新技术,既反映了我国研究矿山岩石力学所取得的科研成果和生产实践经验,也扩充及开辟了适合当前矿山开采中岩石力学的新研究领域。

本书在篇章结构上根据学科内容体系的特点,围绕矿山岩石的基本物理力学性质、岩石的变形、岩石的强度理论、结构面的力学性质、岩体力学性质与岩体分类、原岩应力及其测量、软岩力学、岩石动力学、巷道围岩应力与稳定性、井巷地压等章节进行编写,兼顾工程实用知识及必要的分析理论与方法,力求内容系统性、完整性、前沿性,引导学生融会贯通、学以致用并为今后从事本学科相关研究奠定基础。

本书为高等教育“十二五”规划教材,由安徽理工大学组织编写,赵光明任主编,孟祥瑞、孙建、刘钦节任副主编。具体编写分工为:第一章由赵光明编写;第二至第四章由刘钦节编写;第五至第七章由孙建编写;第八、第十章由张小波编写;第九章由谢理想编写;第十一章由孟祥瑞编写。全书由赵光明统稿,孟祥瑞审校。

由于编写人员水平及时间所限,缺点和错误在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2015 年 7 月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 岩石的基本物理力学性质	4
第一节 概述	4
第二节 岩石的物理性质	4
第三节 岩石的应力状态	12
第四节 岩石的扩容	15
第五节 岩石的流变性质	16
第六节 岩石的各向异性	22
习题	27
第三章 岩石的变形	28
第一节 岩石在单轴压缩状态下的力学特性	28
第二节 单轴压缩状态下反复加卸载时的岩石变形特性	29
第三节 岩石应力—应变全过程曲线	29
第四节 三轴压缩状态下的岩石变形特性	32
第五节 岩石变形特性参数的测定	33
习题	36
第四章 岩石的强度理论	37
第一节 岩石的破坏形式	37
第二节 岩石的抗压强度	38
第三节 岩石的抗拉强度	40
第四节 岩石的抗剪强度	43
第五节 岩石的破坏准则	46
第六节 岩石中水对岩石强度影响	50
习题	51
第五章 结构面的力学性质	53
第一节 结构面类型及其特征	53
第二节 结构面的变形特征	60
第三节 结构面的抗剪强度	63

第四节 结构面的力学效应	71
习题	75
第六章 岩体力学性质和岩体分类	77
第一节 岩体的强度	77
第二节 岩体的变形	83
第三节 岩体的分类	87
习题	90
第七章 原岩应力及其测量	91
第一节 概述	91
第二节 自重应力	92
第三节 构造应力	94
第四节 温度应力	97
第五节 地壳浅部原岩应力及变化规律	97
第六节 原岩应力测量	99
习题	115
第八章 软岩力学	116
第一节 概述	116
第二节 软岩的基本力学属性	118
第三节 软岩的力学特性	119
第四节 软岩的工程力学特性	123
第五节 软岩的抗剪强度恢复	129
习题	131
第九章 岩石动力学	132
第一节 概述	132
第二节 岩石动态力学性质与本构关系	133
第三节 应力波传播及衰减规律	140
第四节 破岩机理与爆炸效应	145
第五节 冲击地压	156
习题	161
第十章 巷道围岩应力与稳定性	163
第一节 弹性岩体巷道围岩应力	164
第二节 弹塑性岩体巷道围岩应力	177
第三节 巷道围岩位移	183
第四节 巷道围岩的蠕变计算	187

第五节 圆形巷道的温度应力·····	192
第六节 地质分析法计算围岩应力·····	196
习题·····	199
 第十一章 井巷地压·····	 201
第一节 概述·····	201
第二节 变形地压·····	207
第三节 水平巷道松动地压·····	212
第四节 竖井地压·····	222
习题·····	229
 参考文献·····	 231

第一章 绪 论

岩石力学主要是研究岩石和岩体力学性能的一门学科,是探讨岩石和岩体在其周围物理环境发生变化后作出响应的一门力学分支。从岩体力学的定义来看,本学科具有以下特点:岩体力学研究的对象是一个非常复杂的天然介质,岩石和岩体存在着巨大的差异;岩体力学和岩体工程有着密切的联系,岩体工程成为岩体力学发展的原动力。岩体力学的原名是岩石力学,岩石与岩体已有严格的区分,因而将岩石力学改为岩体力学更切合实际。但是,岩石力学这名词沿用已久,且使用很普遍,在许多研究岩体力学的著作中,都称其为“岩石力学”。因而,岩石力学一词又可理解为“‘广义的’岩力学”。

一、岩石和岩体

岩石是在一定的生成条件下,具有一定的矿物成分和一定的结构、构造特征的地壳的组成材料或物质,是各种裂隙切割而成的岩块,又称结构体。

岩体是个地质体,它包括岩石和各种地质构造形迹,如节理、裂隙、褶皱等结构面,岩体是岩石和这些结构面的统一体。

岩石和岩体是既有区别又互相联系的两个概念。岩石是岩体的组成物质,岩体是岩石和结构面的统一体。

二、岩体力学与岩体工程的研究对象

岩体力学研究的主要对象是岩体,是研究岩体在力场作用下,所发生的变形、破坏和移动规律的理论及其实际应用的科学,是一门应用型基础学科。

三、岩体力学的研究方法

岩体力学的研究采用科学实验、理论分析与工程紧密结合的方法。科学实验是岩体力学研究工作的基础,是岩体力学研究中的第一手资料。岩体力学工作的第一步就是对现场的地质条件和工程环境进行监测分析,建立地质力学模型,进而开展室内外的物理力学性质实验、模型实验和原型实验,作为建立岩体力学的概念、模型和理论分析的基础。岩体力学的研究方法主要包括工程地质研究法、实验法、数学力学分析法、综合分析法等。

工程地质研究法:研究岩块和岩体的地质与结构特征,为岩体力学的进一步研究提供地质模型和地质资料。

实验法:为岩体变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。

数学力学分析法:通过建立岩体力学模型和利用适当的分析方法,预测岩体在各种力场作用下的变形与稳定性,为设计和施工提供定量依据。

综合分析法:采用多种方法考虑各种因素(包括工程的、地质的及施工的等)进行综合分析和综合评价,得出符合实际情况的正确结论。

四、岩石力学的产生和发展

岩体力学是伴随着采矿、土木、水利、交通等岩石工程的建设 and 数学力学等学科的进步而逐步发展形成的一门新兴学科和边缘学科,是一门应用性和实践性很强的应用基础学科,它的应用范围涉及采矿、土木建筑、水利水电、铁路、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋工程等众多的与岩石工程相关的工程领域。一方面,岩体力学是上述工程领域的理论基础;另一方面,正是上述工程领域的实践促使了岩体力学的诞生和发展。

岩体力学按其发展进程可划分为四个阶段:

1. 初始阶段(19 世纪末~20 世纪初)

岩体力学最早起源于采矿工程领域,在这个阶段,开采规模小,开采深度近于地表,开采空间不大,岩石力学的问题主要是巷道顶板垮落和地下开采所引起的地表移动。在该阶段,岩石力学处于萌芽时期,产生了初步理论以解决岩体开挖的力学计算问题。例如,1912 年海姆(A. Heim)提出的静水压力理论,他认为地下岩石处于一种静水压力状态。

2. 经验理论阶段(20 世纪初~20 世纪 30 年代)

该阶段为岩石力学发展的第二阶段,出现了根据生产经验提出的地压理论,并开始应用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。在这个阶段,松散介质学派(如普氏理论)占主导地位,借助土力学理论解决岩石力学的问题,提出巷道地压计算原理和采场地压假说,更加深入地研究了岩石的破坏机理。

3. 经典理论阶段(20 世纪 30 年代~20 世纪 60 年代)

该阶段是岩石力学学科形成的重要阶段,岩石力学以弹塑性理论为基础,将岩体视为弹塑性介质,应用弹塑性力学方法来研究岩体的应力、应变和位移,确定了一些经典计算公式,形成了围岩和支护共同作用的理论。目前,又在弹塑性分析的基础上引入流变理论,将某些岩体视为带黏性的介质,考虑时间因素对岩体应力、应变和位移的影响,同时,结构面对岩体力学性质的影响也受到重视。

4. 现代发展阶段(20 世纪 60 年代至今)

应用更为复杂的多种多样的力学模型来分析岩体力学问题,把力学、物理学、系统工程、现代数理科学、现代信息技术等最新成果引入岩体力学。同时,随着计算机技术的发展,使用有限元、边界元、离散元等解算岩体力学问题得以实现。

20 世纪 70 年代以后岩石力学发展比较迅速,岩体力学测试技术不断完善,应力解除法可测试深部岩体应力。刚性压力机的出现,可测试应力—应变全过程曲线,从而更深刻地揭示岩石的力学特性。岩体力学已逐渐形成完整的学科体系,作为力学的一个分支,成为一门独立的力学学科,服务于岩体工程。

五、岩石力学的形成历史

1951 年,在奥地利创建了地质力学研究组,并形成了独具一格的奥地利学派。同年,国际大坝会议设立了岩石力学分会。

1956 年,美国召开了第一次岩石力学讨论会。

1957 年,第一本《岩石力学》专著出版。

1959 年,法国马尔帕塞坝溃决,引起岩体力学工作者的关注和研究。

1962 年,国际岩石力学学会(ISRM)成立。

1966 年,第一届国际岩石力学大会在葡萄牙里斯本召开。

六、矿山岩石力学的特点

① 采矿工程结构多处于地下较深处,而其他地下工程多在距地表较近(几十米)的范围内。

② 对矿山构筑物,只要求在开采期间不破坏,在采后能维持平衡状态不影响地表安全即可。因此,其计算精度、安全系数及加固等方面均低于国防、水利工程的标准。

③ 矿山地质条件复杂,又受矿床赋存条件的限制。因此,采矿工程结构物的位置选择性不大,同时,采掘工作面不断变化,造成采矿工程岩石力学具有复杂性的特点。

第二章 岩石的基本物理力学性质

第一节 概 述

岩石的基本物理力学性质是岩体最基本、最重要的性质之一,也是整个岩体力学性质中研究最早、最完善的内容之一。作为描述完整岩石的物理力学性质参数,从其大类上说大致有岩石的质量指标、水理性质指标、描述岩石抗风化能力的指标以及完整岩石的单轴抗压强度、抗拉强度、剪切强度、三向压缩强度和与各种受力状态相对应的变形特性等。在获得这些参数时,实验方法和环境的不同会产生较大的影响。加载的速度、实验机的刚度、实验试件的形状和尺寸等甚至会改变岩石的力学性质。而刚性实验机的诞生,应力—应变全过程曲线的获得,使得对岩石变形特性的认识进入一个全新的阶段,有人甚至说这是岩石力学实验的一次革命。

岩石是具有一定化学成分和一定结构、构造特征的矿物集合体,是构成地壳的主要物质,它可以是尺寸很小的矿物颗粒,也可以是很大的岩体。岩体力学将岩石分成岩块和岩体;岩块是指从地壳岩层中切取出来,无显著软岩面的岩石块体。

第二节 岩石的物理性质

岩石按其成因可分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三大类。这三大类有着很明显的区别,各类岩石由于各种矿物的组成成分、结构构造和成岩条件的不同,岩石的物理力学性质有很大差异。岩石由固体、水、空气等三相组成。

一、岩石的质量指标

1. 密度(ρ)和重度(γ)

单位体积岩石的质量称为岩石的密度,单位体积岩石的重量称为岩石的重度。所谓单位体积,就是指包括孔隙体积在内的体积。

$$\rho = \frac{W}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}, \gamma = \rho g \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

岩石的密度可分为天然密度、干密度和饱和密度。相应地,岩石的重度可分为天然重度、干重度和饱和重度。

(1) 天然密度(ρ)和天然重度(γ)

天然密度是指岩石在天然状态下的密度,相应的重度即为天然重度。

$$\rho = \frac{W}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (2-1)$$

$$\gamma = \rho g \text{ (kN/m}^3\text{)} \tag{2-2}$$

式中 W ——天然状态下岩石试件的质量, g;
 V ——岩石试件的体积, cm³;
 g ——重力加速度。

(2) 干密度(ρ_d)和干重度(γ_d)

干密度是指岩石孔隙中的液体全部蒸发后单位体积岩石的质量, 相应的重度即为干重度。

$$\rho_d = \frac{W_s}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \tag{2-3}$$

$$\gamma_d = \rho_d g \text{ (kN/m}^3\text{)} \tag{2-4}$$

式中 W_s ——岩石试件烘干后的质量, g。

通常所说岩石密度即指干密度。表 2-1 给出了一些常见岩石密度值。

表 2-1 几种常见岩石的密度		g/cm ³	
岩石种类	密 度	岩石种类	密 度
花岗岩	2.3~2.8	页 岩	2.0~2.4
石灰岩	2.2~2.6	煤	1.11~1.45
砂 岩	2.0~2.6	板 岩	2.5~3.3

(3) 饱和密度(ρ_w)和饱和重度(γ_w)

饱和密度就是饱水状态下岩石试件的密度, 相应的重度即为饱和重度。

$$\rho_w = \frac{W_w}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \tag{2-5}$$

$$\gamma_w = \rho_w g \text{ (kN/m}^3\text{)} \tag{2-6}$$

式中 W_w ——饱水状态下岩石试件的质量, g。

2. 相对密度(Δ)

岩石的相对密度是指岩石的干质量除以岩石的固体体积, 再与 4℃ 时水的密度之比。岩石的固体体积指不包括孔隙体积在内的体积。岩石的相对密度可在实验室进行测定, 其计算公式为:

$$\Delta = \frac{W_s}{V_s \rho_w} \tag{2-7}$$

式中 Δ ——岩石的相对密度;
 W_s ——干燥岩石的质量, g;
 V_s ——岩石固体体积, cm³;
 ρ_w ——4℃ 时水的密度, g/cm³。

二、岩石的孔隙性

孔隙: 岩石中孔隙和裂隙的总称。

孔隙度: 岩石的孔隙和裂隙发育程度, 其衡量指标为孔隙率(n)或孔隙比(e)。

闭型孔隙: 岩石中不与外界相通的孔隙。

开型孔隙:岩石中与外界相通的孔隙,包括大开型孔隙和小开型孔隙。

在常温下水能进入大开型孔隙,而不能进入小开型孔隙。只有在真空中或 150 个大气压以上,水才能进入小开型孔隙。

1. 孔隙率

根据岩石孔隙类型不同,岩石的孔隙率分为:总孔隙率 n 、大开孔隙率 n_b 、小开孔隙率 n_1 、总开孔隙率 n_0 和闭孔隙率 n_c 。

一般提到岩石的孔隙率时均指岩石的总孔隙率。

① 总孔隙率 n : 岩石试件内孔隙的体积 (V_v) 占试件总体积 (V) 的百分比。

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \tag{2-8}$$

② 大开孔隙率 n_b : 岩石试件内大开型孔隙的体积 (V_{n_b}) 占试件总体积 (V) 的百分比。

$$n_b = \frac{V_{n_b}}{V} \times 100\% \tag{2-9}$$

③ 小开孔隙率 n_1 : 岩石试件内小开型孔隙的体积 (V_{n_1}) 占试件总体积 (V) 的百分比。

$$n_1 = \frac{V_{n_1}}{V} \times 100\% \tag{2-10}$$

④ 总开孔隙率 n_0 : 岩石试件内开型孔隙的总体积 (V_{n_0}) 占试件总体积 (V) 的百分比。

$$n_0 = \frac{V_{n_0}}{V} \times 100\% \tag{2-11}$$

⑤ 闭孔隙率 n_c : 岩石试件内闭型孔隙的体积 (V_{n_c}) 占试件总体积 (V) 的百分比。

$$n_c = \frac{V_{n_c}}{V} \times 100\% \tag{2-12}$$

2. 孔隙比(e)

所谓孔隙比,是指岩石试件内孔隙的体积 (V_v) 与岩石试件内固体矿物颗粒的体积 (V_s) 之比。

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{n}{1 - n} \tag{2-13}$$

一些常见岩石的孔隙率和孔隙比见表 2-2。

表 2-2 一些常见岩石的孔隙率和孔隙比

岩石种类	孔隙率 $n/\%$	孔隙比 e
板 岩	0.1~1.0	0.001~0.010 1
石灰岩	5~20	0.053~0.25
砂 岩	3~30	0.031~0.429
页 岩	10~35	0.111~0.538

三、岩石的水理性

岩石遇水后会引起某些物理、化学和力学性质的改变,岩石的这种性质称为岩石的水理性。

1. 岩石的吸水性

岩石吸收水分的性能称为岩石的吸水性,其吸水量的大小取决于岩石孔隙体积的大小及其密闭程度。岩石的吸水性指标有吸水率、饱水率和饱水系数。

(1) 岩石吸水率(ω_1)

岩石吸水率是指岩石试件在标准大气压力下吸入水的质量 W_{w_1} 与岩石干质量 W_s 之比,用百分数表示。

$$\omega_1 = \frac{W_{w_1}}{W_s} \times 100\% \tag{2-14}$$

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,并且还与实验条件(整体和碎块,浸水时间等)有关。

根据岩石的吸水率可求得岩石的大开孔隙率 n_b 为:

$$n_b = \frac{V_{n_b}}{V} = \frac{W_s}{V} \frac{V_{n_b}}{W_s} = \frac{W_s}{V} \frac{V_{n_b} \omega_1}{W_{w_1}} = \frac{\gamma_d \omega_1}{\gamma_w}$$

式中, γ_d, γ_w 分别为干燥岩石和水的重度。

(2) 岩石饱水率(ω_2)

岩石饱水率指在高压(150 个大气压)或真空条件下,岩石吸入水的质量 W_{w_2} 与岩石干质量 W_s 之比,即:

$$\omega_2 = \frac{W_{w_2}}{W_s} \times 100\% \tag{2-15}$$

根据饱水率求得岩石的总开孔隙率 n_0 为:

$$n_0 = \frac{V_{n_0}}{V} = \frac{W_s}{V} \frac{V_{n_0}}{W_s} = \frac{\gamma_d \omega_2}{\gamma_w}$$

(3) 岩石饱水系数(K_s)

岩石吸水率与饱水率之比称为岩石的饱水系数,即:

$$K_s = \frac{\omega_1}{\omega_2} \tag{2-16}$$

饱水系数反映了岩石中大开孔隙和小开孔隙的相对含量。饱水系数越大,岩石中的大开孔隙越多,而小开孔隙越少。

吸水性较大的岩石吸水后往往会产生膨胀,给井巷支护造成很大压力。表 2-3 给出了几种岩石的吸水率。

表 2-3 几种岩石的吸水率

岩石种类	吸水率 $\omega_1 / \%$	岩石种类	吸水率 $\omega_1 / \%$
花岗岩	0.10~0.92	石灰岩	0.10~4.45
砂 岩	0.20~12.19	板 岩	0.10~0.95
页 岩	1.8~3.0		

2. 岩石的软化性

岩石的软化性是指岩石在饱水状态下其强度相对于干燥状态下降低的性能,可用软化系数 η 表示。软化系数是指岩石试样在饱水状态下的抗压强度 σ_{cb} 与在干燥状态下的抗压

强度 σ_c 之比,即 $\eta = \frac{\sigma_{cb}}{\sigma_c}$ 。表 2-4 给出了煤系地层中几种岩石的单轴抗压强度和软化系数。

表 2-4 几种岩石的软化系数值

岩石名称	干试件抗压强度/MPa	水饱和试件抗压强度/MPa	软化系数 η
黏土岩	20.3~57.8	2.35~31.2	0.08~0.87
页 岩	55.8~133.3	13.4~71.6	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

3. 岩石的膨胀性

岩石的膨胀性是指岩石浸水后体积增大的性质。岩石的膨胀性一般用膨胀力和膨胀率指标表示,其测定方法是平衡加压法。实验装置如图 2-1 所示。

实验中不断加压,并保持体积不变,所测得的最大压力即为岩石的最大膨胀力;然后逐级减压,直至载荷为零,测定其最大膨胀变形量,膨胀变形量与试件原始厚度的比值即为膨胀率。

4. 岩石的崩解性

岩石的崩解性是指岩石与水相互作用时失去黏结性并变为完全丧失强度的松散物质的性质。岩石的崩解性一般用耐崩解指数 I_{d_2} 表示,其指标可在实验室用干湿循环实验(装置见图 2-2)确定。实验过程中,将经过烘干的试块(500 g,分成约 10 块)放在带有筛孔的圆筒内,使该圆筒在水槽中以 20 r/min 连续旋转 10 min,然后将留在圆筒内的岩块取出烘干称重,如此反复进行两次,按下式计算耐崩解指数。

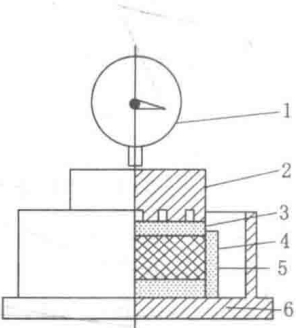


图 2-1 侧限膨胀仪

1——千分表;2——上压板;
3——透水石;4——套环;
5——试件;6——容器

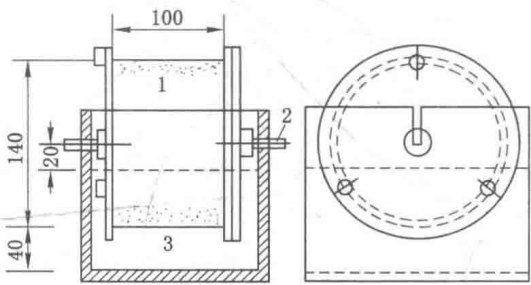


图 2-2 干湿循环测定仪

1——圆筒;2——轴;3——水槽

$$I_{d_2} = \frac{m_r}{m_d} = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\% \tag{2-17}$$

式中 I_{d_2} ——两次循环实验求得的耐崩解指数,在 0~100%之间变化;

m_d ——实验前试块的烘干质量,g;

m_r ——残留在圆筒内试块的烘干质量,g;

W_1 ——实验前试件和圆筒的烘干质量,g;

W_2 ——第二次循环后试件和圆筒的烘干质量, g;

W_0 ——实验结束冲洗干净后圆筒的烘干质量, g。

岩石的崩解性指数反映了岩石在浸水和温度变化的环境下抵抗风化作用的能力。

5. 岩石的抗冻性

岩石的抗冻性是指岩石抵抗冻融破坏的性能,是评价岩石抗风化稳定性的重要指标。岩石的抗冻性用抗冻系数 C_f 表示,指岩石试样在 $\pm 25\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内,反复降温、冻结、融解、升温,然后测量其抗压强度的下降值($\sigma_c - \sigma_f$),以此强度下降值与融冻实验前的抗压强度 σ_c 之比的百分数表示抗冻系数 C_f ,即:

$$C_f = \frac{\sigma_c - \sigma_f}{\sigma_c} \times 100\% \quad (2-18)$$

可见,抗冻系数 C_f 越小,岩石抗冻融破坏的能力越强。

6. 岩石的透水性

地下水存在于岩石孔隙、裂隙之中,而且大多数岩石的孔隙、裂隙是连通的,因而在一定的压力作用下,地下水可以在岩石中渗透,岩石的这种能透水的性能称为岩石的透水性。岩石的透水性大小不仅与岩石的孔隙率大小有关,而且还与孔隙大小及其贯通程度有关。衡量岩石透水性的指标为渗透系数(K),一般来说,完整密实岩石的渗透系数往往很小。岩石的渗透系数一般是在钻孔中进行抽水或压水实验而测定的。

不同岩石的透水性差别很大,甚至同一类岩石的透水性也可能在很大范围内变化。表 2-5 给出了几种岩石的渗透系数。

表 2-5 几种岩石的渗透系数

岩石名称	渗透系数/(cm/s)	备 注
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	$2 \sim 4$	

四、岩石的碎胀性

岩石破碎后的体积 V_p 比原体积 V 增大的性能称为岩石的碎胀性,用碎胀系数 K_p 来表示。

$$K_p = \frac{V_p}{V} \quad (2-19)$$

碎胀系数不是一个固定值,是随时间而变化的。不能再压密时的碎胀系数称为永久碎胀系数。永久碎胀系数最小,也称残余碎胀系数。岩石碎胀系数与破碎后岩石的破碎程度有关,如在煤矿采场或巷道中,顶板冒落后的碎胀系数与岩层的分层厚度、冒落高度和冒落岩石的堆积形式有关。表 2-6 给出了部分岩石的碎胀系数和残余碎胀系数。

表 2-6 部分岩石的碎胀系数和残余碎胀系数

岩石名称	碎胀系数 K_p	残余碎胀系数 K_p'
砂	1.06~1.15	1.01~1.03
黏 土	<1.20	1.03~1.07
碎 煤	<1.20	1.05
黏土页岩	1.40	1.10
砂质页岩	1.60~1.80	1.10~1.15
硬砂岩	1.50~1.80	—

五、岩石的热学和电学性质

1. 容热性

岩石的容热性是指进行热交换时岩石吸收热量的能力。当传导给岩石的热量为 ΔQ ，由此而引起的岩石温度升高为 Δt 时，则岩石的容热性可用使其温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需的热量来度量。通常采用岩石的质量热容表示。

在不存在相转变条件下，单位质量岩石温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所需的热量，称为质量热容。用符号 c 表示，单位为 $\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

岩石的质量热容大小决定于矿物成分及其含量，大多数矿物质量热容介于 $0.5\sim 1.0\text{ J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，尤其以 $0.70\sim 0.95\text{ J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 更为常见。当温度和压力变化范围不大时，岩石的质量热容可作为常数看待。由于各种类型水的质量热容较之矿物的质量热容高出许多，在计算岩石质量热容时，应根据其含水状态加以修正。含水状态岩石的质量热容可以用试样的质量热容等指标进行换算。其换算公式为：

$$c_s = \frac{mc + m_{wt}c_{wt}}{m + m_{wt}} \quad (2-20)$$

式中 c_s —— 含水试样的质量热容， $\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；

m —— 干燥试样的质量， g ；

m_{wt} —— 含水试样的质量， g ；

c —— 温度 t 时干试样的质量热容， $\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ ；

c_{wt} —— 温度 t 时水的质量热容， $\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

2. 导热性

岩石的导热性是指岩石传热的能力，常用导热系数(热导率)来度量。其定义是当温度梯度为 1 时，单位时间内通过单位面积岩石所传导的热量。用符号 λ 表示，单位为 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

大多数造岩矿物的导热系数介于 $0.40\sim 7.00\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，一般为 $0.80\sim 4.00\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。冰的导热系数约等于 $2.10\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，水为 $0.63\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，空气为 $0.021\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。当岩石中全部孔隙被水所充满时，它的导热性达到最高，并且与孔隙内溶液的浓度无关。实验表明，导热性与岩石的密度有关，当沉积岩的骨架密度增加 $15\%\sim 20\%$ 时，导热性提高一倍。大部分沉积岩和变质岩的导热性是各向异性的，顺层理方向比垂直层理方向的导热系数平均高出 $10\%\sim 30\%$ 。