

高等学校教材

岩石力学

第三版

河海大学 徐志英 主编



水利电力出版社

高等学校教材

岩石力学

第三版

河海大学 徐志英 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书为高等院校“水利水电工程地质”、“水工建筑力学”专业的本科教材,也可供从事岩石力学工作的水利水电、土木建筑、地质、矿山、冶金、交通以及国防等工程技术人员和高等院校其它有关专业师生参考。

本书系第三版,作者对前二版作了许多重要的修改和补充。书中共分十一章,分别论述了绪论、岩石的物理性质、岩石的强度、岩石的变形、岩体天然应力与洞室围岩的应力分布、山岩压力、有压隧洞计算、岩基稳定分析、岩坡稳定分析、有限单元法在岩石力学中的应用以及模型试验在岩石力学中的应用。

书内附有大量插图,大多数章内附有例题和习题。

高等学校教材 岩 石 力 学 (第三版)

河海大学 徐志英 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17.25印张 389千字

1981年1月第一版

1993年6月第三版 1993年6月北京第四次印刷

印数43171+13360册

ISBN 7-120-01742-X/TV·626

定价4.50元

第二版前言

本书按照一九八二年十二月高等学校水利水电类专业教材编审委员会会议审订的“工程地质”专业《岩石力学》教学大纲，对本书的第一版作了全面修订和一系列重要补充而成。修订中，改进了本书的系统结构，各章节做了较大调整，多数章节作了重写。为了兼顾“水工建筑力学”专业以及其它有关专业的需要，同时便于工程技术人员参考。因此，在本次修订时还增加了这方面相应的内容。在教学时可根据专业需要酌情取舍。

书中删除了与其它课程重复的材料（工程地质基础知识——属于“工程地质学”课程，应力应变的某些计算方法——属于“材料力学”和“弹性力学”课程等等）以及一些不常用的繁杂内容，以达到少而精的目的。“岩体现场试验”和“岩体渗流理论”均不列为单独一章，而是将其主要内容分别编入有关章节中去，以加强系统性和避免某些不协调性。

全书加强了迫于解决岩石力学与工程设计中的问题，并增加了许多补充资料。最有意义的是如下内容：不连续结构面的分析、裂隙（孔隙）水压力对岩体强度和稳定的影响、岩石破坏准则判别式、岩石应力应变非线性概念、岩石蠕变性、赤平投影对岩体稳定分析的应用等等。它基本上概括了本书第一版问世后岩石力学的新发展。全书的宗旨是力图使读者在掌握基本理论的基础上能够善于分析建筑物岩基、岩坡、地下洞室围岩中发生的物理力学现象，以及不仅可预估建筑物建造时岩石性质变化的可能性，而且也可预见其变化特性。

参加本书修订的有河海大学徐志英同志（第一章、第三章、第四章、第六章、第七章、第九章第一节至第九节、第十一节、第十章、第十一章、第十二章）、卢盛松同志（第五章、第八章）和吕庆安同志（第二章、第九章第十节）。全书由徐志英同志主编，华北水利水电学院王正宏同志审查。

我们衷心感谢有关兄弟院校和读者对本书第一版提出的宝贵意见和建议，恳切希望兄弟院校和广大读者继续对本书的缺点、错误给以批评指正。

徐 志 英

1985年11月于河海大学

目 录

第二版前言	
第三版前言	
第一章 绪论	1
第一节 岩石力学的定义和任务	1
第二节 岩石力学在水工建设中的重要性	2
第三节 发展简史	2
第二章 岩石的物理性质	4
第一节 概述	4
第二节 岩石的物理性质指标	4
第三节 岩石的热学和电学性质	8
第四节 岩石的渗透性及水对岩石性状的影响	11
第五节 岩体结构	16
第六节 岩石(体)的工程分类	21
第三章 岩石的强度	30
第一节 概述	30
第二节 岩石的破坏形式	31
第三节 岩石的抗压强度	31
第四节 岩石的抗拉强度	35
第五节 岩石的抗剪强度	37
第六节 岩石的破坏准则	45
第七节 岩石中水对强度的影响	57
第八节 岩体强度分析	59
第九节 结构面方位对强度的影响	64
第十节 结构面粗糙度对强度的影响	65
第四章 岩石的变形	69
第一节 概述	69
第二节 实验室变形试验	71
第三节 岩石变形性质	73
第四节 岩石应力-应变曲线的影响因素	79
第五节 现场变形试验	82
第六节 岩石弹性常数测定的动力法	88
第七节 破碎岩石的变形性质	90
第八节 岩石的蠕变	92
第五章 岩体天然应力与洞室围岩的应力分布	102

第一节	概述	102
第二节	岩体中的地应力	102
第三节	岩体应力的现场量测	105
第四节	水平洞室围岩的应力计算	111
第六章	山岩压力与围岩稳定性	119
第一节	概述	119
第二节	山岩压力的形成及其影响因素	120
第三节	坚硬岩体的应力和稳定验算	123
第四节	压力拱理论	124
第五节	太沙基理论	130
第六节	弹塑性理论	131
第七节	地质分析法计算山岩压力	141
第八节	喷锚支护原理和设计原则	146
第七章	有压隧洞围岩的应力与稳定性	156
第一节	概述	156
第二节	围岩内附加应力的计算	156
第三节	有压隧洞围岩和衬砌的应力计算	160
第四节	隧洞围岩蠕变计算	164
第五节	有压隧洞围岩最小覆盖层厚度问题	167
第八章	岩基的应力与稳定性分析	176
第一节	概述	176
第二节	岩基内应力分布的一般概念	176
第三节	岩基承载力	180
第四节	岩基抗滑稳定计算	184
第九章	岩坡稳定分析	191
第一节	概述	191
第二节	岩坡的破坏类型	191
第三节	圆弧法岩坡稳定分析	194
第四节	平面滑动岩坡稳定分析	196
第五节	双平面滑动岩坡稳定分析	199
第六节	力多边形法岩坡稳定分析	200
第七节	力的代数叠加法岩坡稳定分析	202
第八节	楔形滑动岩坡稳定分析	203
第九节	岩坡加固	205
第十章	有限单元法在岩石力学中的应用	208
第一节	概述	208
第二节	各向同性弹性体有限单元法简述	209
第三节	横观各向同性岩体的分析	215
第四节	岩体的无拉应力分析	223
第五节	断层、裂隙和软弱夹层的分析	229

第六节	岩体的弹塑性应力分析	233
第十一章	模型试验在岩石力学中的应用	237
第一节	概述	237
第二节	相似原理	237
第三节	相似材料、模拟和试验技术	242
第四节	用模型试验测定弹性应力	246
第五节	用模型试验测定抗滑安全系数	247
第六节	裂隙性各向异性岩基的应力与变形	250
第七节	大坝岩基应力和变形模型研究实例	253
附录一	有关蠕变公式的推导	257
附录二	应用弹塑性理论求山岩压力的数学推演	259
附录三	工程单位制和国际单位制对照表	265
参考文献		267

第一章 绪 论

第一节 岩石力学的定义和任务

岩石是经过地质作用而天然形成的（一种或多种）矿物集合体，地壳的绝大部分都是由岩石构成。岩石通常按照其成因可分为三类：岩浆岩、沉积岩和变质岩。不同成因类型的岩石的物理力学性质是不同的。

岩石力学，顾名思义，它是研究岩石的力学性态的理论和应用的科学，是探讨岩石对其周围物理环境中力场反应的学科，具体而言，研究岩石在荷载作用下的应力、变形和破坏规律以及工程稳定性等问题。它是固体力学的一个分支。

岩体是指在一定地质条件下，含有诸如裂隙、节理、层理、断层等不连续的结构面组成的现场岩石，它是一个复杂的地质体。由于岩石力学中的许多研究对象是岩体，所以岩石力学也称为岩体力学。

人类生活在地球上，很多活动都离不开以岩石工程为对象的经济建设。例如开发地下资源、修建水库以及开凿隧道和运河等等。从前开发地下资源时，只是在浅部开采即可取得矿石，修建水库也总是选择在良好岩石的地段，并且坝的高度也只有数十米，就连隧道的掘进也常常避开不良岩层而绕道进行。可是，在近代，随着生产的发展，地下资源已由浅部转入深部岩层开采，不仅需要控制强大的地层压力，而且还可能遇到岩石崩塌的危险。造在岩石上的建筑物也愈来愈高大，特别是各种类型的高坝、水电站厂房、核电站等。目前国际上有的坝高已超过 300m，大型地下水电站、隧道和矿山巷道的深度已超过 3000m，地下洞室的跨度已近百米。这些生产上的高速发展，都对岩石力学的研究提出新的要求和课题。岩石力学的任务，就是从生产实践中总结同岩石斗争的经验，提高为理论知识，再回到实践中去解决生产中提出的有关岩石工程问题。现代岩石力学研究的主要领域，概括起来有下列三方面：

- 1) 基本原理，包括岩石的破坏、断裂、蠕变以及岩石内应力、应变理论等的研究。
- 2) 实验室试验和现场（原位）试验，包括各种静力和动力方法，以测定岩块和岩体在静力和动力荷载下的性状以及岩体内的初始应力。
- 3) 实际应用方面，包括地表岩石地基（如高坝、高层建筑、核电站地基的稳定和变形问题）、地表挖掘（如水库边坡、高坝岸坡、渠道、路堑、露天开采坑等人工和天然岩石边坡的稳定问题）、地下洞室（如地下电站、水工隧洞、交通隧道、采矿巷道、战备地道等围岩的稳定、变形和加固问题）、岩石破碎（如将岩石破碎成所要求的规格）、岩石爆破、地质作用（如分析因开矿而地表下陷、解释地球的构造理论、预估地震与控制地震）等问题的研究。

要全部研究上述内容，不是本课程的任务。本书只介绍有关的基本原理和试验方法以及与水利建设密切相关的岩基、岩坡、地下洞室围岩等问题，着重于基础知识。

第二节 岩石力学在水工建设中的重要性

在上节的讨论中, 岩石力学在工程中的重要性已涉及到了; 显然, 岩石力学在水工建设中的重要性是不言而喻的。水工建设中常遇到的岩基、岩坡以及地下洞室的安危成败都与岩体的稳定和变形息息相关, 而这些问题正是需要在岩石力学中研究的。国内外过去由于岩体不稳定而失事的例子实属不少, 今列举数例如下:

1) 1959年12月2日, 法国马尔帕塞 (Malpasset) 薄拱坝 (坝高67m), 由于坝基失稳而导致整个拱坝倒毁, 顷刻间 $49 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的洪水突然奔腾下泄, 流速 70 km/h , 对下游造成重大损失, 致使384人死亡, 110人下落不明, 财产损失不计其数。

2) 1963年10月9日, 意大利瓦依昂 (Vajont) 水库岩坡由于石灰岩层理强度减弱而发生大规模滑坡运动, 在一分多钟内大约有 2.5 亿 m^3 的岩石崩入水库内, 顿时造成高达150m到250m的水浪, 洪水漫过270m高的拱坝, 致使下游的郎加朗市镇遭到了毁灭性破坏, 数百人死亡。

3) 第三个例子是奥地利格尔利斯水电站。在使用期间, 由于输水压力隧洞的围岩 (最大压力水头为600m) 破坏, 致使衬砌破裂, 高压水冲入电站厂房, 使机组受到很大损失, 迫使停产处理。

这些例子都说明了岩石力学的研究在水工建设中的重要性。

第三节 发展简史

在人类的生产实践中, 早就与岩石有了密切关系。原始人利用岩石做成简陋的工具和兵器。稍后, 开采矿石要求开挖采石坑、巷道和开凿竖井。古埃及金字塔, 中国万里长城、都江堰都以岩石为建筑材料。这些都说明了古代劳动人民在岩石工程上使用岩石上已有悠久的历史。

尽管人类在生产实践中与岩石打交道已有悠久的历史, 但是岩石力学却是一门新兴学科。岩石力学成为一门技术科学, 只有30多年的历史, 它比土力学的发展要迟30年。发展迟缓的原因主要是由于岩石性质极为复杂, 种类繁多, 岩体内节理、裂隙、断层等结构面千变万化等缘故。就目前而言, 岩石力学尚未形成一套独立的、完整的理论。

50年代以来, 世界上高坝、高边坡、大跨度高边墙地下建筑等的兴建, 对岩石研究提出了新的要求, 促进了岩石力学的较系统的发展。1956年4月, 在美国的科罗拉多矿业学院 (Colorado School of Mines) 举行的一次专业会议上, 开始使用“岩石力学”这一名词, 并由该学院汇编了“岩石力学论文集”。在论文集的序言中说: “它是与过去作为一门学科而发展起来的土力学, 有着相似概念的一种学科, 对这种有关岩石的力学方面的学科, 现取名为岩石力学”。1957年在巴黎出版的塔洛布尔 (J. Talobre) 的专著“岩石力学”是这方面最早的一本较系统的著作。其后, 有关刊物又发表了许多论文, 并开始形成了不同的学派 (如法国学派, 偏重于从弹塑性理论方面来研究; 奥地利学派, 偏重于地

质构造方面来研究)。1959年法国马尔帕塞拱坝失事以及1963年意大利瓦依昂水库岩坡的大规模滑坡,都与岩石强度变弱密切相关。这两次事件都引起了世界各国岩石力学研究者的关注,进一步促进了岩石力学研究的发展。1963年在奥地利萨尔茨堡成立了“国际岩石力学学会”(International Society for Rock Mechanics)。1966年在里斯本召开了第一次国际岩石力学会议,从此每四年召开一次,迄今已开了七次。

建国以来,随着社会主义建设事业的发展,大规模的矿山、交通、国防和水利建设(例如上犹江、佛子岭、梅山、新安江、刘家峡、丹江口等大坝的兴建)对岩石力学的发展起了重大促进作用,这阶段为我国岩石力学的初创阶段。从1958年三峡岩基组成立起,许多部门相继建立了岩石力学的专门研究机构,较全面而系统地进行岩石力学的研究,促进了岩石力学的发展,同时从事岩石力学研究的科技人员也大幅度增加。1966年召开了全国岩土测试技术会议。70年代以来,葛洲坝等大型水利工程和大型地下电站的兴建促进岩石力学的发展进入新阶段,研制出大批实验仪器设备,理论水平和测试技术不断提高,一些高等院校相继开设了“岩石力学”课程。80年代初编写了不同专业的“岩石力学”教材以及“水利水电工程岩石试验规程”,学术交流活动日益频繁,科研成果丰硕。1985年,中国岩石力学与工程学会正式成立。我们深信,随着我国四个现代化建设,随着三峡等大坝的兴建,岩石力学必然将会得到更进一步的发展。

第二章 岩石的物理性质

第一节 概 述

岩石与土一样也是由固体相、液体相和气体相组成的多相体系。理论认为,岩石中固体相的组分和三相之间的比例关系及其相互作用,决定了岩石的性质。在研究和分析岩石受力后的力学表现时,必然要联系到岩石的某些物理性质指标。为了让读者掌握明确的概念和合理的选用指标,本章分步介绍岩石的基本物理性质及水理性质指标,并阐述了与岩石的电学性质及热力学性质有关的某些指标。

岩体经常是工程建筑的地基和环境。它是由地质结构面和形状各异、大小不同的岩石块体聚合而成的,并具有多种结构类型。岩体的力学性质不同于一般固体介质,它具有显著的不连续性、不均匀性和各向异性。因此,在做岩体力学分析和计算时,必须区分岩体结构类型,并要充分考虑结构面的力学效应。

在工程实践中,通常要对地基、边坡和洞室围岩的岩体质量作出评估,因而形成了岩体质量工程分类的研究领域。本章介绍了几种有代表性的岩体评估方法,期望达到认识岩体、合理利用岩体的目的。

第二节 岩石的物理性质指标

用某种数值来描述岩石的某种物理性质,这些数值就是岩石的物理性指标。在工程上常用到的物理性指标有容重、比重、孔隙率、吸水率、膨胀性、崩解性等等。

为了测定这些指标,一般都采用岩样在室内作试验,必要时也可以在天然露头上或探洞(井)中进行现场试验。在选用岩样时应考虑到它们对所研究地质单元的代表性,并尽可能地保持其天然结构。最好采用同一岩样逐次地测定岩石的各种物理性质指标。下面分述各种物理性质指标。

1. 容重和密度 岩石的单位体积(包括岩石孔隙体积)的重力,称为岩石的容重。根据试样的含水情况不同,岩石容重可分为干容重、湿容重和饱和容重,一般未说明含水状态时是指湿容重。

岩石的容重可用下式表示:

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2-1)$$

式中 γ ——容重(kN/m³);

W ——岩石的重力(kN);

V ——岩石的体积(m³)。

岩石密度的定义为:岩石单位体积(包括岩石中孔隙体积)的质量,用 ρ 表示,以kg/m³

计。它与岩石容重之间存在如下关系:

$$\gamma = 9.80 \times \rho (\text{kN/m}^3)$$

岩石的容重取决于组成岩石的矿物成分、孔隙大小及含水的多少。表2-1列出了某些岩石的容重值,可供参考。从表上可以看出,岩石的容重一般在 26.5~28.0(kN/m³)的范围内变化。

岩石的容重可在一定程度上反映出岩石的力学性质情况。通常,岩石的容重愈大,则它的性质就愈好,反之愈差。在图 2-1 上绘有各种碳酸盐类岩石的单轴抗压强度与容重的相关关系。从图上可以看出,随着岩石容重的增加,极限抗压强度也相应地增大。

今后在岩石力学计算中,常用到这项指标,现规定用 γ_d 和 γ_m 分别表示干容重和饱和容重,而 γ 则表示一般的湿容重。

2.比重 岩石的比重就是岩石的干的重力除以岩石的实体体积(不包括孔隙),再与4℃时水的容重相比:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \tag{2-2}$$

式中 G_s ——岩石的比重;

W_s ——绝对干燥时体积为 V 的岩石重力(kN);

V_s ——岩石的实体体积(不包括孔隙体积)(m³);

γ_w ——水的容重,在4℃时等于10(kN/m³)。

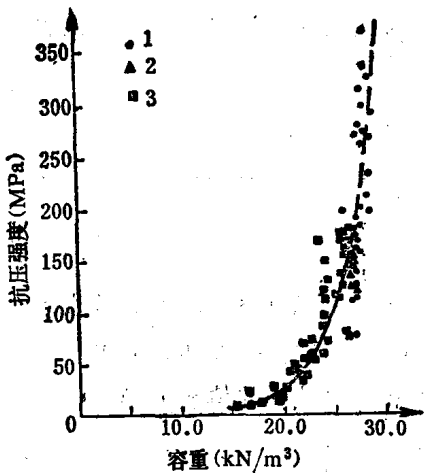


图 2-1 碳酸盐类岩石的抗压强度与容重的关系
1—大理岩; 2—大理岩化石灰岩; 3—石灰岩和白云岩

表 2-1 各种岩石的容重、比重、孔隙率、孔隙指数

岩 石	容 重 γ (kN/m³)	比 重	孔 隙 率 n (%)	孔 隙 指 数 i (%)
花 岗 岩	26~27	2.5~2.84	0.5~1.5	0.1~0.92
粗 玄 岩	30~30.5		0.1~0.5	
流 纹 岩	24~26		4~6	
安 山 岩	22~23	2.4~2.8	10~15	0.29
辉 长 岩	30~31	2.70~3.20	0.1~0.2	
玄 武 岩	28~29	2.60~3.30	0.1~1.0	0.31~2.69
砂 岩	20~26	2.60~2.75	5~25	0.20~12.19
页 岩	20~24	2.57~2.77	10~30	1.8~3.0
石 灰 岩	22~26	2.48~2.85	5~20	0.10~4.45
白 云 岩	25~26	2.2~2.9	1~5	
片 麻 岩	29~30	2.63~3.07	0.5~1.5	0.10~3.15
大 理 岩	26~27	2.60~2.80	0.5~2	0.10~0.80
石 英 岩	26.5	2.53~2.84	0.1~0.5	0.10~1.45
板 岩	26~27	2.68~2.76	0.1~0.5	0.10~0.95

岩石的比重取决于组成岩石的矿物比重，大部分岩石比重介于2.50至2.80之间，而且随着岩石中重矿物含量的增多而提高。因此，基性和超基性岩石的比重可达3.00~3.40甚至更高，酸性岩石例如花岗岩的比重仅为2.50~2.84。某些岩石比重见表2-1。

3. 孔隙率 岩石试样中孔隙体积与岩石试样总体积的百分比称为孔隙率，岩石的孔隙率与土的孔隙率相类似，可用下式表示：

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\% \quad (2-3)$$

根据干容重 γ_d 和比重 G_s 也可计算孔隙率

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w} \quad (2-4)$$

式中 n ——孔隙率，以百分数表示；
 V_v ——试样孔隙体积（ m^3 ），其中也包括裂隙体积；
 V ——试样的体积（ m^3 ）；

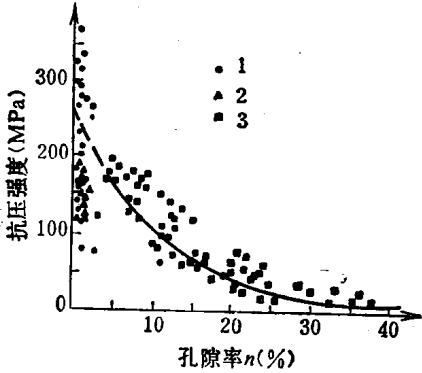


图 2-2 碳酸盐类岩石的抗压强度与孔隙率之关系
 1—大理岩；2—大理岩化石灰岩；3—石灰岩与白云岩

其余记号意义同前。
 孔隙率分为开口孔隙率和封闭孔隙率，两者之和总称孔隙率。由于岩石的孔隙主要是由岩石内的粒间孔隙和细微裂隙所构成，所以孔隙率是反映岩石致密程度和岩石质量的重要参数。图 2-2 表示几种碳酸盐类岩石的孔隙率与极限抗压强度的相关关系。孔隙率愈大表示空隙和细微裂隙愈多，岩石的抗压强度随之降低。

某些岩石的孔隙率变化范围见表2-1。
 4. 吸水率和饱水率 岩石的吸水率是指干燥岩石试样在一个大气压和室温条件下，岩石吸入水的重力 W_{w1} 对岩石干重力 W_d 之比的百分率，一般以 w_a 表示，即

$$w_a = \frac{W_{w1}}{W_d} \times 100\% \quad (2-5)$$

岩石的吸水率在室内通过试验测定。在试验时可将岩样放在保持105℃的烘箱内烘干（烘的时间不少于12小时），求得岩石干重 W_d ，然后再将它放入水中浸润12~24小时，称得岩石湿重后再算出被试样吸入的水重 W_{w1} ，从而求得 w_a 。

岩石吸水能力大小，一般取决于岩石所含孔隙的多少以及孔隙和细微裂隙的连通情况。岩石中包含的孔隙和细微裂隙愈多，连通情况愈好，则岩石吸入的水量就愈多。因此，有时也把岩石吸水率这项指标称为孔隙指数，用符号 i 表示。

孔隙指数与岩石的种类和岩石的生成年代有关。在表2-1中列有某些岩石孔隙指数的变化范围。在图2-3上分别绘有砂岩和页岩的孔隙指数随地质年代不同而变化的情况。

在工程上常用岩石吸水率作为判断岩石的抗冻性及风化程度的指标，并广泛地与其它物理力学特征值建立关系。例如图2-4即表示纵波速度与吸水率之间的关系，从图中可以

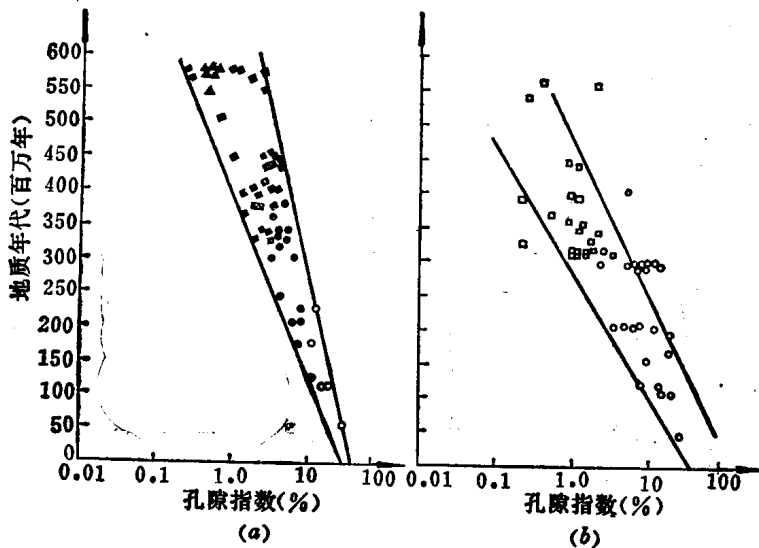


图 2-3 岩石的孔隙指数与地质年代的关系

(a)砂岩和石灰岩: ▲—固结砂岩; ■—石灰岩; ●—胶结砂岩; ○—弱胶结砂岩
(b)页岩: □—固结的; ○—压实的

看出, 随着岩石吸水率的增加, 弹性波在介质中的传播速度 C_p 相应地降低。

岩石的饱水率是指岩石试样在高压 (一般为150个大气压)或真空条件下, 强制吸入水的重量 W_w 对于岩石干重 W_d 之比的百分率, 以 w_w 表示, 即

$$w_w = \frac{W_w}{W_d} \times 100\% \quad (2-6)$$

测定饱和吸水率的方法, 目前多采用煮沸法和真空抽气法。用高压法可能会提高试样的饱和程度, 但设备条件比较复杂, 一般不常用。

通常把岩石的吸水率与饱水率之比值称为饱水系数, 以 K_w 表示, 即

$$K_w = \frac{w_s}{w_w} \quad (2-7)$$

一般岩石的饱水系数 K_w 介于0.5~0.8之间。

饱水系数对于判别岩石的抗冻性具有重要意义。当 $K_w < 0.91$ 时, 表示岩石在冻结过程中, 水尚有膨胀和挤入剩余的敞开孔隙和裂隙的余地。而当 $K_w > 0.91$ 时, 在冻结过程中形成的冰会对岩石中的孔隙和裂隙产生“冰劈”作用, 从而造成岩石的胀裂破坏。

5. 抗冻性 岩石的抗冻性就是岩石抵抗冻融破坏的性能, 常用作评价岩石抗风化稳定性的重要指标。岩石抗冻性的高低取决于造岩矿物的热物理性质, 粒间联结强度以及岩石的含

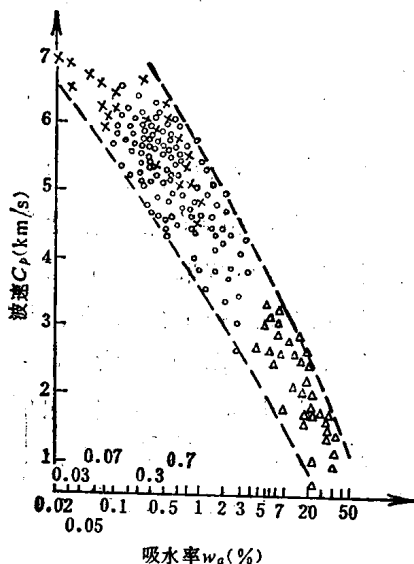


图 2-4 纵波波速与吸水率的关系

○—岩浆岩; △—沉积岩(第三纪); ×—变质岩

水特征等因素。由坚硬矿物的刚联结组成的致密岩石抗冻性能高，而富含长石、云母和绿泥石类矿物及结构不致密的岩石抗冻性能低。

岩石的抗冻性能可用两个指标表示：

(1) 抗冻系数：冻融后的岩石干抗压强度与冻融前岩石干抗压强度的比值称抗冻系数。可以用下式表示：

$$R_d = \frac{R_{c2}}{R_{c1}} \quad (2-8)$$

式中 R_d ——岩石的抗冻系数；

R_{c1} ——冻融前岩石干抗压强度 (MPa)；

R_{c2} ——冻融后岩石干抗压强度 (MPa)。

(2) 重力损失率：岩石冻融前后干试样的重力差与冻融前干试样的重力的比值，用百分数表示，即

$$K_m = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2-9)$$

式中 K_m ——岩石的冻融重力损失率 (%)；

W_1 ——冻融前岩石试样的重力 (N)；

W_2 ——冻融后岩石试样的重力 (N)。

岩石的冻融试验是在实验室内进行的。一般要求按规定制备试样 6~10 块，分两组。一组进行规定次数的冻融试验，另一组做干燥状态下的抗压强度试验。将做冻融试验的试样进行饱和处理后，放入 $-20 (\pm 2)^\circ\text{C}$ 温度下冷冻 4 小时，然后取出放置在水温为 $20 (\pm 5)^\circ\text{C}$ 水槽中融 4 小时，如此反复循环达到规定次数（月平均气温低于 -15°C 时为 25 次，高于 -15°C 时为 15 次）后取出测定岩石在冻融前后的强度变化和重力损失。一般要求抗压强度降低不大于 25%，重力损失不大于 5%，才算是抗冻性能好的岩石。

第三节 岩石的热学和电学性质

1. 容热性 岩石的容热性就是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 $4Q$ ，由此而引起的岩石温度升高为 $4t$ 时，则岩石的容热性可用使其温度升高 1°C 所需的热量来度量。通常采用岩石的比热和容积热容两项指标表示。

(1) 比热：在不存在相转变条件下，为使单位质量岩石温度变化 1°C 时所需输入的热量。用符号 C 表示，单位为 $\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ 或 $\text{cal}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ 。

(2) 容积热容：单位体积的岩石，在温度变化 1°C 时所需要的热量。用符号 C_v 表示，单位为 $\text{J}/\text{m}^3\cdot^\circ\text{C}$ 或 $\text{cal}/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$ 。

比热和容积热容均表示岩石储热的能力，二者之间的关系可用 $C_v = \rho \cdot C$ 表示，式中 ρ 为岩石密度。

岩石的比热大小决定于矿物成分及其含量，大多数的矿物比热介于 $0.5 \sim 1.0 \text{ J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ 之间，尤其是以 $0.70 \sim 0.95 \text{ J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ 更为常见。当温度和压力变化范围不大时，岩石的比

热可作为常数看待。由于各种类型水的比热较之矿物的比热高出许多，所以在计算岩石比热时，应根据其含水状态加以修正。含水状态岩石的比热可以用干试样的比热等指标进行换算。其换算公式为：

$$C_s = \frac{mC + m_{wt}C_{wt}}{m + m_{wt}} \quad (2-10)$$

式中 C_s ——含水试样的比热[J/(g·℃)]；
 m ——干燥试样的质量(g)；
 m_{wt} ——含水试样的质量(g)；
 C ——温度 t 时干试样的比热[J/(g·℃)]；
 C_{wt} ——温度 t 时水的比热[J/(g·℃)]。

2. 导热性 岩石的导热性就是指岩石传导热的能力，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cal/cm²·s·℃。

大多数造岩矿物的导热系数介于0.40~7.00之间，一般为0.80~4.00。冰的导热系数约等于2.10，水为0.63，空气为0.021。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%~20%时，导热性将提高一倍。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%~30%。

3. 热膨胀性 温度的变化不仅能改变岩石试件的形状和尺寸，也会引起岩石内部应力的变化。一般用线膨胀系数（或体膨胀系数）表示岩石的热膨胀性。膨胀系数定义是，岩石的温度升高1℃所引起的线性伸长量（体积增长量）与其在温度为0℃时的长度（体积）之比值。如果用 $L_0(V_0)$ 和 $L_t(V_t)$ 分别代表岩石试件在0℃和 t ℃时的长度（体积），则热膨胀系数可用下式表示

$$\text{线膨胀系数} \quad \alpha = \frac{L_t - L_0}{L_0 t} \quad (2-11)$$

$$\text{体膨胀系数} \quad \beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t} \quad (2-12)$$

岩石的体膨胀系数大致为线膨胀系数的3倍。岩石的线膨胀系数是随其矿物成分不同而变化的，如矿物组分复杂的粗粒花岗岩的 α 值在 $(0.6 \sim 6) \times 10^{-5} (1/^\circ\text{C})$ 范围内变化，而石英岩的矿物成分单调，它的 α 值变化范围比较小，在 $(1 \sim 2) \times 10^{-5} (1/^\circ\text{C})$ 之间。

4. 导电性 岩石的导电性为岩石介质传导电流的能力。常用电导率 ξ 或电阻率 K_r 两种指标表示。

$$K_r = \frac{1}{\xi} = \frac{RS}{L} \quad (2-13)$$

式中 R ——岩石试件的电阻值(Ω)；
 S ——通过电流的试件截面积(m²)；
 L ——试件的长度(m)。

电阻率是沿试样体积电流方向上的直流电场强度与该处电流密度的比值，在数值上等于单位体积岩石中的电阻大小，单位用 $\Omega \cdot m$ 。岩石的导电性具有复杂易变的特点，其大小与岩石本身的矿物成分、结构、孔隙溶液的化学组成及浓度等许多因素有关。对于大部分金属矿物来说，导电性极好，电阻率在 $10^{-8} \sim 10^{-7} \Omega \cdot m$ 范围内，然而最常见的造岩矿物，如石英、长石、云母、方解石等的导电性极差，电阻率都在 $10^6 \Omega \cdot m$ 以上，属劣导电性矿物。从理论上讲水也属劣导电性的，可是水中所含的盐分都是良好的导电介质。因此，充填在岩石孔隙和裂隙中的水多是良导电性的。岩石的导电性除了矿物成分不同造成的差别外，岩石的孔隙率和含水状况也很重要，有众多孔隙和裂隙岩石的电阻率比致密岩石的大得多，一般情况下岩石电阻率与孔隙率的关系可用以下公式表示

$$K_p = K_{\rho M} \frac{2+n}{2(1-n)}$$

(2-14)

式中 $K_{\rho M}$ ——岩石固相电阻率；
 n ——孔隙率，以小数表示。

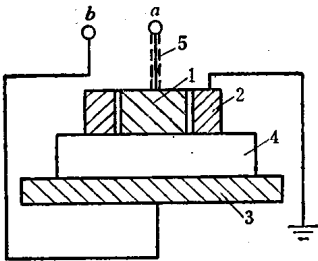


图 2-5 电阻率测试装置
1—测量电极；2—保护电极；3—高压电极；
4—试样；5—屏蔽

根据大量试验资料证明，岩浆岩类岩石电阻率普遍较高，变质岩类岩石电阻率次之，而沉积岩类岩石的电阻率变化范围很大，并且垂直层理通常比平行层理方向的电阻率高。表 2-2 列举了几种常见岩石的电阻率数值以供参考。

岩石电阻率测试是在实验室内进行的，测量电阻率的方法很多，有电容器充电法、高阻计法、电桥法等。图 2-5 是用检流计直接偏转法测量岩石电阻率的装置。

表 2-2

各类岩石的电阻率值

(单位: $\Omega \cdot m$)

岩 石 名 称	K_p 变 化 范 围	岩 石 名 称	K_p 变 化 范 围
花 岗 岩	$3 \times 10^3 \sim 10^4$	片 岩	$20 \sim 10^4$
花 岗 斑 岩	4.5×10^3 (湿) $\sim 1.3 \times 10^4$ (干)	片 麻 岩	6.8×10^4 (湿) $\sim 3 \times 10^5$ (干)
长 石 斑 岩	4×10^3 (湿)	板 岩	$6 \times 10^3 \sim 4 \times 10^7$
正 长 岩	$10^3 \sim 10^5$	大 理 岩	$10^3 \sim 2.5 \times 10^5$ (干)
闪 长 岩	$10^4 \sim 10^5$	砂 卡 岩	2.5×10^3 (湿) $\sim 2.5 \times 10^4$ (干)
闪 长 斑 岩	1.9×10^3 (湿) $\sim 2.8 \times 10^4$ (干)	石 英 岩	$10 \sim 2 \times 10^3$
英 安 岩	2×10^4 (湿)	固 结 页 岩	$20 \sim 2 \times 10^3$
辉 绿 斑 岩	10^3 (湿) $\sim 1.7 \times 10^5$ (干)	砾 岩	$2 \times 10^3 \sim 10^4$
辉 绿 岩	$20 \sim 5 \times 10^7$	砂 岩	$1 \sim 6.4 \times 10^3$
辉 长 岩	$10^3 \sim 10^5$	石 灰 岩	$50 \sim 10^7$
熔 岩	$10^3 \sim 5 \times 10^4$	白 云 岩	$3.5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$
玄 武 岩	$10 \sim 1.3 \times 10^7$ (干)	泥 灰 岩	$3 \sim 70$
橄 榄 岩	3×10^3 (湿) $\sim 6.5 \times 10^3$ (干)	未硬结湿粘土	20
角 页 岩	8×10^3 (湿) $\sim 6 \times 10^7$ (干)	粘 土	$1 \sim 100$
凝 灰 岩	2×10^3 (湿) $\sim 10^5$ (干)	冲 积 层 (砂)	$10 \sim 800$