



高等学校教材

# 岩石力学

(水利水电工程地质、水工建筑力学专业适用)

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

(水利水电工程地质、水工建筑力学专业适用)

河海大学 徐志英 主编

水利电力出版社



## 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。

本书系第二版，作者对一九八一年的第一版作了许多重要的修改和补充。书中共分十二章，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、模型试验在岩石力学中的应用以及岩石动力学基础。

书内附有大量插图，大多数章内附有例题。

高等学校教材

岩 石 力 学

(水利水电工程地质、水工建筑力学专业适用)

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

水利电力出版社印刷厂印刷

•

787×1092毫米 16开本 21.75印张 491千字

1986年11月第一版 1986年11月北京第一次印刷

印数0001—4910册 定价2.90元

书号 15143·6171

# 目 录

## 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 岩石的物理性质指标        | 4   |
| 第二节 岩石的热学和电学性质       | 8   |
| 第三节 岩石的渗透性及水对岩石性状的影响 | 10  |
| 第四节 岩体结构             | 16  |
| 第五节 岩石(体)的工程分类       | 22  |
| 第三章 岩石的强度            | 29  |
| 第一节 概述               | 29  |
| 第二节 岩石的破坏形式          | 29  |
| 第三节 岩石的抗压强度          | 30  |
| 第四节 岩石的抗拉强度          | 34  |
| 第五节 岩石的抗剪强度          | 37  |
| 第六节 岩石的强度理论          | 46  |
| 第七节 岩石中水对强度的影响       | 58  |
| 第八节 岩体强度分析           | 60  |
| 第九节 结构面方位对强度的影响      | 65  |
| 第十节 结构面粗糙度对强度的影响     | 66  |
| 第四章 岩石的变形            | 70  |
| 第一节 概述               | 70  |
| 第二节 实验室变形试验          | 72  |
| 第三节 岩石变形性质           | 75  |
| 第四节 岩石应力-应变曲线的影响因素   | 81  |
| 第五节 现场变形试验           | 86  |
| 第六节 动力法岩石弹性常数测定      | 92  |
| 第七节 破碎岩石的变形性质        | 96  |
| 第八节 岩石的蠕变            | 99  |
| 第五章 岩体天然应力与洞室围岩的应力分布 | 109 |
| 第一节 概述               | 109 |
| 第二节 岩体的初始应力          | 109 |

|     |                         |     |
|-----|-------------------------|-----|
| 第三节 | 岩体应力的现场量测 .....         | 112 |
| 第四节 | 圆形洞室围岩应力重分布概念 .....     | 118 |
| 第五节 | 水平洞室围岩的应力计算 .....       | 119 |
| 第六章 | 山岩压力与围岩稳定性 .....        | 129 |
| 第一节 | 概述 .....                | 129 |
| 第二节 | 围岩的应力和稳定验算 .....        | 134 |
| 第三节 | 压力拱理论 .....             | 141 |
| 第四节 | 太沙基理论 .....             | 151 |
| 第五节 | 弹塑性理论 .....             | 153 |
| 第六节 | 地质分析法计算山岩压力 .....       | 168 |
| 第七节 | 喷锚支护原理和设计原则 .....       | 170 |
| 第八节 | 围岩与时间有关的问题 .....        | 178 |
| 第七章 | 有压隧洞围岩的应力与稳定性 .....     | 181 |
| 第一节 | 概述 .....                | 181 |
| 第二节 | 围岩内附加应力的计算 .....        | 181 |
| 第三节 | 有压隧洞围岩和衬砌的应力计算 .....    | 185 |
| 第四节 | 围岩渗水条件下的应力计算 .....      | 189 |
| 第五节 | 隧洞围岩蠕变计算 .....          | 194 |
| 第六节 | 有压隧洞围岩最小覆盖层厚度问题 .....   | 196 |
| 第八章 | 岩基的应力与稳定性分析 .....       | 207 |
| 第一节 | 岩基内应力分布的一般概念 .....      | 207 |
| 第二节 | 岩基承载力 .....             | 210 |
| 第三节 | 岩基抗滑稳定计算 .....          | 214 |
| 第四节 | 拱坝坝肩岩体的抗滑稳定分析 .....     | 220 |
| 第九章 | 岩坡稳定分析 .....            | 225 |
| 第一节 | 概述 .....                | 225 |
| 第二节 | 岩坡的破坏类型 .....           | 225 |
| 第三节 | 圆弧法岩坡稳定分析 .....         | 228 |
| 第四节 | 平面滑动岩坡稳定分析 .....        | 231 |
| 第五节 | 双平面滑动岩坡稳定分析 .....       | 234 |
| 第六节 | 力多边形法岩坡稳定分析 .....       | 235 |
| 第七节 | 力的代数叠加法岩坡稳定分析 .....     | 237 |
| 第八节 | 楔形滑动岩坡稳定分析 .....        | 237 |
| 第九节 | 赤平板射投影在岩坡稳定分析中的应用 ..... | 240 |
| 第十节 | 岩坡加固 .....              | 249 |
| 第十章 | 有限单元法在岩石力学中的应用 .....    | 252 |
| 第一节 | 概述 .....                | 252 |
| 第二节 | 各向同性弹性体有限单元法简述 .....    | 253 |
| 第三节 | 横观各向同性岩体的分析 .....       | 259 |
| 第四节 | 岩体的无拉应力分析 .....         | 266 |

|      |                         |     |
|------|-------------------------|-----|
| 第五节  | 断层、裂隙和软弱夹层的分析 .....     | 273 |
| 第六节  | 岩体的弹塑性应力分析 .....        | 281 |
| 第十一章 | 模型试验在岩石力学中的应用 .....     | 284 |
| 第一节  | 概 述 .....               | 284 |
| 第二节  | 相似原理 .....              | 284 |
| 第三节  | 相似材料、模拟和试验技术 .....      | 289 |
| 第四节  | 用模型试验测定弹性应力 .....       | 293 |
| 第五节  | 用模型试验测定抗滑安全系数 .....     | 294 |
| 第六节  | 裂隙性各向异性岩基的应力与变形 .....   | 297 |
| 第七节  | 大坝岩基应力和变形 模型研究实例 .....  | 299 |
| 第十二章 | 岩石动力学基础 .....           | 304 |
| 第一节  | 概 述 .....               | 304 |
| 第二节  | 岩体中波的传播 .....           | 304 |
| 第三节  | 波动引起的应力与应变 .....        | 309 |
| 第四节  | 应力波的折射与反射 .....         | 317 |
| 第五节  | 地下结构的抗爆设计与计算 .....      | 322 |
| 附录一  | 应用弹塑性理论求山岩压力的数学推演 ..... | 328 |
| 附录二  | 工程单位制和国际单位制对照表 .....    | 336 |
| 参考文献 | .....                   | 338 |

# 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300米，大型地下水电站、隧道和矿山巷道的深度已超过3000米，地下洞室的跨度已近百米。这些生产上的高发展，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67米 )，由于坝基失稳而导致整个拱坝倒毁，顷刻间 $49 \times 10^6$ 立方米的洪水突然奔腾下泄，流速70千米/时，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2.5亿立方米的岩石崩入水库内，顿时造成高达150米到250米的水浪，洪水漫过270米高的拱坝，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600米 ) 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和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，只有二十多年的历史，它比土力学的发展要迟三十年。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。

五十年代以来，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有关。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，迄今已开了五次。

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。七十年代以来，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。八十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、随着三峡等高坝的兴建，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

岩石力学中研究的岩体，是由各种地质作用综合而成的地质体，它具有特殊的结构和不同于一般固体介质的力学性质。为了正确地掌握在外力作用下岩体的变形和破坏规律，对岩体的稳定性作出合乎实际的分析和评价，首先就需要对岩石和岩体的物理力学性质、水理性质以及岩体结构特征有清晰的概念，然后，再进行能够反映岩体的变形和破坏规律的岩体工程分类。

### 第一节 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（孔隙指数）、饱水率、抗冻性等等。

为了测定这些指标，一般都采用钻探的方法获得岩心，在室内作试验，或者直接在天然和人工露头（探井、探洞）处采取岩样进行试验。选用岩样时应当考虑到它们对所研究地质单元的代表性，并尽可能保持其天然结构。最好是用同一岩样逐次地测定岩石的各种物理性质指标。下面分述岩石的各种物理性指标。

1. 容重 岩石单位体积（包括岩石孔隙体积在内）的重量，称为岩石的容重。它和土的容重相类似，也可以分为干容重、湿容重和饱和容重等，但是这三者在数值上一般差别不大。

岩石的容重可以用下式表示：

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

式中  $\gamma$  —— 容重（千牛/米<sup>3</sup>）；  
 $W$  —— 岩石的重量（千牛）；  
 $V$  —— 岩石的体积（米<sup>3</sup>）。

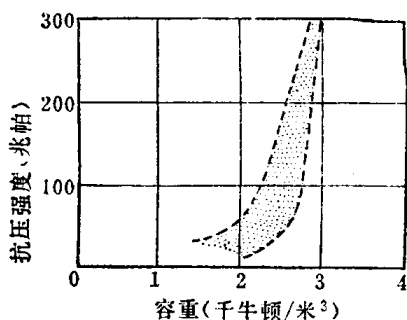


图 2-1 岩石的抗压强度与岩石容重的关系

岩石的容重取决于组成岩石的矿物成分、孔隙及含水的多少。当其它条件相同时，岩石的容重在一定程度上与它的埋藏深度有关。一般而言，靠近地表的岩石容重往往较小，而深层的岩石具有较大的容重。表2-1列出了某些岩石的容重值，可资参考。可以看出，岩石的容重一般在26.5~28（千牛/米<sup>3</sup>）的范围内变化。

岩石容重的大小在一定程度上反映出岩石的力学性质的情况。通常，岩石的容重愈大，则它的力学性质就愈好，反之愈差。在图2-1上绘有岩石的单轴抗压强度与容重的相互关系，这个关系是由特安德里埃（D'Andrea）等人对多种来源的许多岩石资料分析统

表 2-1

各种岩石的容重、比重、孔隙率、孔隙指数

| 岩 石   |  |  | 容 重 $\gamma$<br>(千牛/米 <sup>3</sup> ) | 比 重       | 孔 隙 率 $n$<br>(%) | 孔隙指数 $i$<br>(%) |
|-------|--|--|--------------------------------------|-----------|------------------|-----------------|
| 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            | 0.10~0.89       |
| 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       |

计而得的。由此可见，容重对岩石的力学性质的影响是显著的。

在岩石力学的计算中，常常需要用到这个指标。今后我们分别用 $\gamma_d$ 和 $\gamma_m$ 表示干容重和饱和容重，而 $\gamma$ 则表示一般的湿容重。

2.比重 岩石的比重就是岩石的干重量除以岩石的实体体积（不包括孔隙体积），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 $V$ 的岩石重量（千牛）；

$V_s$ ——岩石的实体体积（不包括孔隙体积）（米<sup>3</sup>）；

$\gamma_w$ ——水的容重，在4℃时等于10（千牛/米<sup>3</sup>）。

岩石的比重取决于组成岩石的矿物的比重。显然，矿物的比重愈大，则岩石的比重也愈大，反之愈小。例如，含有矿物比重较大的基性和超基性岩石，一般具有较大的比重，而含有矿物比重较轻的酸性岩石，一般具有较小的比重。又如石灰岩的比重接近于方解石，砂岩的比重接近于石英。岩石的比重一般在2.7左右。

也像土的比重一样，岩石的比重在实验室内用比重瓶进行测定。对于无裂隙或只有张开裂隙的岩石试样，国内也有人建议用“静水称重法”测定。某些岩石的比重见表2-1。

3.岩石的孔隙率 岩石的孔隙率，同土的孔隙率相类似，用下式表示：

$$n = \frac{V_r}{V} \times 100\% \tag{2-3}$$

根据干容重 $\gamma_d$ 和比重 $G_s$ 也可计算孔隙率

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w} \tag{2-4}$$

式中  $n$ ——孔隙率，以百分数表示；

$V_v$ ——试样孔隙体积（米<sup>3</sup>），其中也包括裂隙体积；

$V$ ——试样体积（米<sup>3</sup>）；

其余记号同前。

由于岩石的孔隙主要是由岩石内的粒间空隙和细微裂隙所构成，所以孔隙率也是判定岩石质量的重要物理性指标。孔隙率愈大，空隙和细微裂隙也就愈多，岩石的力学性质就愈差，反之愈好。

某些岩石的孔隙率见表2-1。

4. 孔隙指数 岩石的孔隙指数是指干燥岩石试件在0.1兆帕下吸入水的重量  $W_w$  对于岩石干重  $W_s$  之比，一般以  $i$  表示，即

$$i = \frac{W_{w_1}}{W_s} \quad (2-5)$$

岩石的孔隙指数在室内通过试验测定。在试验时，可将岩石试样放在保持105℃的烘箱内烘干（一般要烘12小时，也有烘24小时的），求得岩石干重  $W_s$ ，然后将它放入水中，浸润12或24小时，称得岩石湿重，算出被试样吸入的水重  $W_{w_1}$ ，从而求得  $i$ 。

从意义上来看，孔隙指数也可称为吸水率，即岩石的吸水百分率。岩石吸水的能力，一般取决于岩石所含孔隙的数量和大小以及孔隙、细微裂隙的连通情况。孔隙愈大、愈多以及孔隙和细微裂隙的连通情况良好，则岩石吸水愈多，因之孔隙指数也就愈大，反之愈小。在工程上往往可用孔隙指数的大小来评价岩石的抗冻性能。当孔隙指数  $i$  小于0.5%时，一般认为该岩石是耐冻的。

孔隙指数  $i$  与岩石的种类有关，花岗岩、砂岩、页岩等等都各不相同，而且对于同一种岩石来说，它又与岩石的生成年代有关。在表2-1中列有某些岩石的孔隙指数（吸水率）的数值。在图2-2(a)上绘有砂岩的  $i$  随着地质年代的变化。在图2-2(b)上绘有页岩的  $i$  随着地质年代的变化。

研究已经证明，孔隙指数是岩石的一个重要物理性指标，它与岩石的一些力学性质之间有着密切的关系。作为一例，在图2-3上示有孔隙指数  $i$  与岩石地震波速之间的关系。

5. 饱水率 岩石的饱水率是指岩石在高压（一般为15兆帕）下或真空下吸入水的重量  $W_{w_2}$  对于岩石干重  $W_s$  之比，以  $w_2$  表示，即

$$w_2 = \frac{W_{w_2}}{W_s} \quad (2-6)$$

在这样的压力条件下，通常认为水能够进入所有的（大的和小的）敞开裂隙和孔隙中去。实验室测定时高压设备较为复杂，一般不常用。比较广泛采用的是真空抽气法。当岩石比较坚硬，不与水起其它作用时，用煮沸法亦可得到较好的结果。

通常把吸水率（孔隙指数）与饱水率之比，称为饱水系数，用  $K_w$  表示

$$K_w = \frac{i}{w_2} \quad (2-7)$$

一般岩石的饱水系数为  $K_w = 0.5 \sim 0.8$ 。

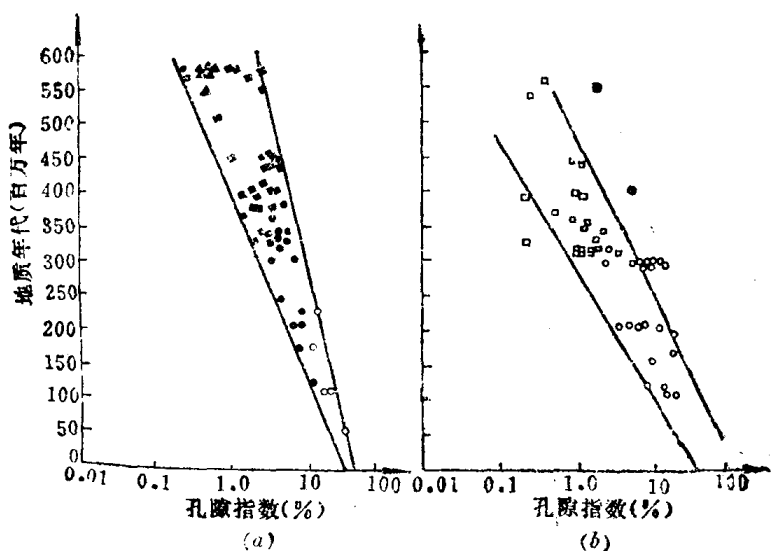


图 2-2 (a)砂岩的孔隙指数与地质年代关系

▲—固结砂岩；■—石灰岩；●—胶结砂岩；○—弱胶结砂岩

(b)页岩的孔隙指数  $i$  与地质年代的关系

□—固结的，○—压实的

饱水系数对于岩石的抗冻性具有重要意义。当饱水系数  $K_w < 0.91$  时,在冻结过程中一般还会有尚未被水充满的小的敞开孔隙和裂隙,岩石中的水尚有膨胀和挤入小的敞开孔隙和裂隙的余地。而当饱水系数  $K_w > 0.91$  时,在冻结过程中形成的冰就会对岩石的孔隙、裂隙产生很大的额外的压力,从而造成岩石的破坏。

6. 岩石的抗冻性 岩石的抗冻性就是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。

岩石经过若干次的冻结和融解后,它的强度往往就降低,甚至破坏。岩石在多次冻融过程中逐渐破坏的过程,一方面是由于不同矿物在温度升降时的膨胀和收缩不同从而使岩石的结构逐渐破坏之故,另一方面也是由于岩石裂隙、孔隙中水结冰时体积膨胀,在岩石的裂隙、孔隙内产生附加压力,因而造成岩石破坏。

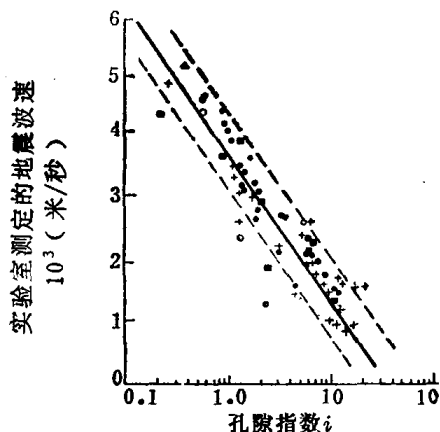


图 2-3 岩石的孔隙指数  $i$  (%) 与岩石的地震波速关系

+—页岩；●—砂岩；■—石灰岩；○—花岗岩；  
△—玄武岩

岩石的抗冻性可用下列两种指标来表示:

(1) 重量损失率: 重量损失率就是试件在冻融试验前后的干重量的差数对于试验前干重之比,以百分率表示。

(2) 抗冻系数: 试件在冻融试验后的抗压强度对于未经冻融的试件的抗压强度的比值,以百分率表示。

## 第二节 岩石的热学和电学性质

### 一、岩石的热胀性与地热梯度

当温度升高时，组成岩石的大小颗粒的体积要产生膨胀，同时引起岩石内部的应力状态发生变化，相应地岩石的强度要降低、变形特性要改变。例如石灰岩在室温条件下，由脆性转化为塑性需要增加100兆帕围压；而当温度在500℃时，只需要0.1兆帕就可以使它转化成塑性状态。随着地下工程愈来愈多的向深部发展，况且有些地下工程会在地热异常地带通过，因此在研究岩石的力学性质时，就不能忽视温度的效应。同时对岩石的热学性质也应当有一定的了解。

1. 岩石的热胀性 热胀性指岩石受热后体积或长度发生膨胀的现象，通常可用热膨胀系数表示。即用体膨胀系数与线膨胀系数表示。膨胀系数的定义是：岩石温度上升1℃所引起的体积（线度）增长与它在温度为0℃时的体积（线度）之比。如果用 $V_0$  ( $L_0$ )和 $V_t$  ( $L_t$ )分别代表试件在0℃和 $t$ ℃时的体积（线度），则膨胀系数可分别用下式表示

$$\text{体膨胀系数} \quad \alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t} \quad (2-8)$$

$$\text{线膨胀系数} \quad \beta = \frac{L_t - L_0}{L_0 t} \quad (2-9)$$

体膨胀系数可近似地认为是线膨胀系数的三倍。岩石的线胀系数是随其矿物成分的不同而变化的，如表2-2中所列，粗粒花岗岩的线膨胀系数在 $(0.6 \sim 6) \times 10^{-5}$ /摄氏度范围内变化，而页岩的变化范围是 $(0.9 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ /摄氏度这种差别主要是由于岩石中矿物成分的含量变化大小不同引起的，显然粗粒花岗岩的矿物成分的含量变化要比页岩大得多。

工程实践证明，从地表往地下深部温度越来越高。但是各地温度增加的情形是不相同的。如果绘制各个地区的地下等温面，则可发现地下的等温面一般不是平面，而是随地区和地带起伏变化而变化，同时等温面之间的间隔也是各处不等的。在等温面隆起或间隔较小的地方可能是地热异常区。

表 2-2 岩石热学性质参数表

| 岩石类型  | 线膨胀系数<br>$\beta$ (1/度) $\times 10^{-5}$ | 弹性模量<br>$E \times 10^4$ 兆帕 | 岩石类型 | 线膨胀系数<br>$\beta$ (1/度) $\times 10^{-5}$ | 弹性模量<br>$E \times 10^4$ 兆帕 |
|-------|-----------------------------------------|----------------------------|------|-----------------------------------------|----------------------------|
| 辉长岩   | 0.5~1                                   | 9~6                        | 石英岩  | 1~2                                     | 4~2                        |
| 辉绿岩   | 1~2                                     | 4~3                        | 页岩   | 0.9~1.5                                 | 4                          |
| 粗粒花岗岩 | 0.6~6                                   | 3~1                        | 石灰岩  | 0.6~3                                   | 4                          |
| 细粒花岗岩 | 1                                       | 4                          | 白云岩  | 1~2                                     | 4.2                        |
| 片麻岩   | 0.3~2                                   | 6~3                        |      |                                         |                            |

地热特征一般用地温梯度和热流量表示。

2. 地温梯度 地温梯度也称地温增加率，它是指地温每升高1℃时所需增加的深度。

根据资料统计，亚洲大陆约40米深增加1℃，欧洲大部分地区约32米深增加1℃，北美洲绝大多数地区约为45米深增加1℃。这个数值对某个具体地区又可能不同，因为它和靠近地下热源体的远近有很大关系，如北京西郊测定是50米，大庆油田则只有20米。有的文献上使用地温梯度的概念，它是指深度每增加100米，地温升高的度数，在数值上它与地温梯级成反比；在实际应用上，它能反映岩石热传导性的差异。岩石的热传导性能常用热传导率表示，它的物理意义是当温度升高1℃时，热量在单位时间内传递单位距离时的热量损耗，单位用卡/厘米·秒·度。表2-3是安徽罗河地区地温实测资料，它反映出地温梯度因岩性差异而发生的变化。

3. 热流密度 热流密度是指地温梯度与岩石热导率的乘积，对于某一地区来说它是一个常数。如表2-3中所列资料，罗河地区的热流密度大致在 $(1.8\sim1.88)\times10^{-6}$ 卡/厘米<sup>2</sup>·秒之间。而有些地区热流密度的变化就很大，其原因在于它与区域构造活动特征有密切关系，在活动构造地区热流密度可高达 $(2.0\sim2.5)\times10^{-6}$ 卡/厘米<sup>2</sup>·秒，而在古老的地台区只有 $(1.1\sim1.3)\times10^{-6}$ 卡/厘米<sup>2</sup>·秒；另一个原因是年青的盖层要比古老的结晶基底低许多。因此，在一些年青的构造活动剧烈地区，地温大致在30~50℃/公里范围内变化，在活火山活动地带可高达200℃/公里；而在稳定地台区多在15~30℃/公里以下。

| 表 2-3 罗河地区地温梯度与岩性的关系                               |          |       |       |              |
|----------------------------------------------------|----------|-------|-------|--------------|
| 岩 性                                                | 凝灰角砾岩    | 粗 安 岩 | 石 英 岩 | 矿 体          |
| 热 导 率<br>$\times 10^{-3}$ (卡/厘米·秒·摄氏度)             | 4.33     | 4.48  | 9.88  | $\approx 10$ |
| 地 温 梯 度<br>(℃/公里)                                  | 40~50    | 35~40 | 17~20 | 17~20        |
| 热 流 密 度<br>$\times 10^{-6}$ (卡/厘米 <sup>2</sup> ·秒) | 1.8~1.88 |       |       |              |

二、岩石的电阻率 电阻率是度量岩石导电性的一种重要指标。电阻率在数值上等于，当电流均匀通过介质时，单位体积内所产生的电阻。它的单位为欧米，记作ΩM，1欧米等于1立方米岩石具有1欧姆的电阻值。

大部分金属矿物的导电性极好，电阻率在 $10^{-8}\sim10^{-7}$ 欧米范围内；而最主要的造岩矿物，如石英、长石、云母、方解石等的导电性极差，它们的电阻率都大于 $10^6$ 欧米，属劣导电性矿物。从理论上讲水也是属劣导电性的，可是水中所含的盐分都是良好的导电介质，因此，自然界中的水多是良导电性的。岩石在干燥的情况下导电性很差，这是因为主要造岩矿物的电阻率普遍较高之故。除矿物成分以外，各类岩石的导电性还与岩石的孔隙裂隙发育程度有关系，与岩石的含水性及岩石中水的矿化度的高低有关系。例如花岗岩干燥时的电阻率高达 $1\times10^{10}$ 欧米，当含水量由零增至0.19%时，电阻率降为 $1.8\times10^6$ 欧米；当含水量增至0.31%时，电阻率可降至 $4.4\times10^3$ 欧米。又如岩石中含氯化钠类型的水，当矿化度为零时，水的电阻率为 $25\times10^4$ 欧米；矿化度为0.10克/升时，电阻率为55.2欧



表 2-4 各类岩石的电阻率值 (单位: 欧米)

| 岩石名称 | $\rho$ 变化范围                                      | 岩石名称    | $\rho$ 变化范围                                      |
|------|--------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------|
| 花岗岩  | $3 \times 10^3 \sim 10^6$                        | 片岩      | $20 \sim 10^4$                                   |
| 花岗斑岩 | $4.5 \times 10^3$ (湿) $\sim 1.3 \times 10^6$ (干) | 片麻岩     | $6.8 \times 10^4$ (湿) $\sim 3 \times 10^6$ (干)   |
| 长石斑岩 | $4 \times 10^3$ (湿)                              | 板岩      | $6 \times 10^3 \sim 4 \times 10^7$               |
| 正长岩  | $10^3 \sim 10^6$                                 | 大理岩     | $10^3 \sim 2.5 \times 10^3$ (干)                  |
| 闪长岩  | $10^4 \sim 10^5$                                 | 砂卡岩     | $2.5 \times 10^3$ (湿) $\sim 2.5 \times 10^3$ (干) |
| 闪长斑岩 | $1.9 \times 10^3$ (湿) $\sim 2.8 \times 10^4$ (干) | 石英岩     | $10 \sim 2 \times 10^8$                          |
| 英安岩  | $2 \times 10^4$ (湿)                              | 固结页岩    | $20 \sim 2 \times 10^8$                          |
| 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      | $1 \sim 6.4 \times 10^8$                         |
| 辉长岩  | $10^3 \sim 10^6$                                 | 石灰岩     | $50 \sim 10^7$                                   |
| 熔岩   | $10^3 \sim 5 \times 10^4$                        | 白云岩     | $3.5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^8$             |
| 玄武岩  | $10 \sim 1.3 \times 10^7$ (干)                    | 泥灰岩     | $3 \sim 70$                                      |
| 橄榄岩  | $3 \times 10^3$ (湿) $\sim 6.5 \times 10^3$ (干)   | 未硬结湿粘土  | 20                                               |
| 角页岩  | $8 \times 10^3$ (湿) $\sim 6 \times 10^7$ (干)     | 粘土      | $1 \sim 100$                                     |
| 凝灰岩  | $2 \times 10^3$ (湿) $\sim 10^5$ (干)              | 冲积层 (砂) | $10 \sim 800$                                    |

米; 矿化度为1.0克/升时, 电阻率减小为5.83欧米。

根据大量试验资料证明, 岩浆岩类岩石的电阻率普遍较高, 变质岩类岩石的电阻率次高, 而沉积岩类岩石的电阻率变化范围很大, 它随着岩石结构的变化而异。表2-4列举了常见岩石的电阻率数值以供参考。

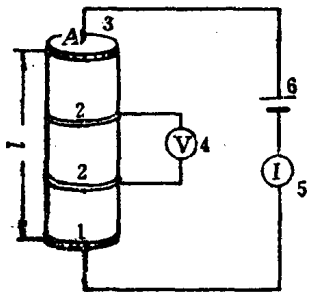


图 2-4 岩心标本电阻率测定  
1—岩心, 2—金属环, 3—金属帽, 4—电压表,  
5—电流表, 6—干电池

岩石电阻率通常用岩心标本或在野外露头上进行测定。图2-4是用于测定岩心电阻率的装置。供电电极为两个金属帽, 与岩心端面必须接触良好。测量电极是两个金属环。在供电回路上测电流强度  $I$ , 在测量回路上测电位差  $\Delta V$ , 然后分别量度岩心的截面积  $A$  和岩芯柱长度  $l$ , 用下式计算电阻率  $\rho$ :

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad (2-10)$$

这种测定岩心电阻率的方法简便, 但要注意保持岩石的天然状态如湿度、孔隙率及孔隙水的矿化度等, 以保证资料的准确性。

第三节 岩石的渗透性及水对岩石性状的影响

水普遍地存在于岩体之中, 当有水力坡降存在时, 水就会透过岩体中的孔隙、裂隙以及空洞而流动, 即在岩体中渗流。为了准确地研究岩体的力学性质和物理性状及其变化, 必须了解水在岩体中渗流的性质、条件及其对岩体性状的影响。此外, 岩石在水溶液作用下所表现的性质, 一般称为岩石的水理性质, 如岩石的膨胀性、崩解性和软化性都是由于