

全国煤炭高等教育专升本“十二五”规划教材

Quanguo Meitan Gaodeng Jiaoyu  
Zhuanshengben Shierwu Guihua Jiaocai

中国矿业大学图书馆藏书



C01726174

# 矿山岩体力学

● 陈学华 主编

Kuangshan Yanti Lixue

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

全国煤炭高等教育专升本“十二五”规划教材

# 矿山岩体力学

主 编 陈学华

中国矿业大学出版社

## 内 容 简 介

岩体力学是采矿工程、地质工程、石油工程、土木建筑、水利水电、铁道工程、公路工程等众多工程学科的专业基础课。本书是为煤炭高等教育专升本层次相关专业教学而编写的,还可为相关专业教师、科研人员、工程技术人员提供参考。

本书第一章到第三章讲述了岩体力学的基础理论、基础知识和基础技能,包括岩石的物理与力学性质、岩石的强度理论、岩体结构、岩体变形及强度特征;第四章介绍了岩体地应力及其测量技术;第五章介绍了巷道地压及其围岩的弹塑性应力与位移、围岩稳定性的判断、围岩与支架的力学模型、巷道地压的计算;第六章介绍了边坡岩体的变形与破坏、稳定性分析及计算、滑坡的监测与治理;第七章介绍了岩体工程的实验室模拟,包括相似材料模拟及数值模拟方法。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿山岩体力学 / 陈学华主编. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1117 - 0

I. ①矿… II. ①陈… III. ①矿山—岩体力学—高等学校—教材 IV. ①TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 130066 号

书 名 矿山岩体力学  
主 编 陈学华  
责任编辑 章 毅 张 岩  
责任校对 潘利梅  
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 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 14 字数 348 千字  
版次印次 2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 21.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 全国煤炭高等教育专升本“十二五”规划教材

## 建设委员会成员名单

主任:李增全

副主任:于广云 丁三青 王廷弼

委员:(按姓氏笔画排序)

王宪军 王继华 王德福 刘建中

刘福民 孙茂林 李维安 张吉春

陈兴华 周智仁 赵文武 赵济荣

郝虎在 荆双喜 徐国财 廖新宇

秘书长:王廷弼

秘书:何 戈

全国煤炭高等教育专升本“十二五”规划教材  
煤矿开采技术专业编审委员会成员名单

主任:张吉春

副主任:陈学华

委员:(按姓氏笔画排序)

王 猛 卢国斌 田成民 刘艳杰

李学忠 李德忠 杨艳国 张宝安

胡绍祥 胡海峰 南存全 贾喜荣

郭忠平

## 前 言

岩体力学是采矿工程、地质工程、石油工程、土木建筑、水利水电、铁道工程、公路工程、地下工程等众多工程学科的专业基础课。矿山岩体力学是岩体力学的一个重要组成部分,岩体力学是其理论基础,矿山岩体是其研究对象。本书是为煤炭高等教育专升本层次相关专业教学而编写的,还可为相关专业教师、研究人员、工程技术人员提供参考。

本书第一章到第三章讲述了岩体力学的基础理论,基础知识和基本方法,包括岩石的物理与力学性质、岩石力学试验技术、岩石的强度理论、岩体结构、岩体变形及强度特征;第四章介绍了地应力及其测量技术;第五章介绍了巷道地压及其围岩的弹塑性应力与位移、围岩稳定性的判断、围岩与支架的力学模型、巷道地压的计算;第六章介绍了边坡岩体的变形与破坏、稳定性分析及计算、滑坡的监测与治理;第七章介绍了岩体工程的实验室模拟,包括相似材料模拟及数值模拟方法。

几十年来,矿山岩体工程不断增多,矿山开采的规模及复杂程度不断加大,也出现了许多岩体工程方面的难题,越来越显现出岩体力学研究的重要性。矿山岩体力学研究的内容较多,本书主要侧重于基本知识与方法,具体的工程问题在相应专业课程中再明确讲述。为学习方便,本书将岩石力学试验的内容与基础知识一起编写,以便加深学生对相关知识的理解。

本书由陈学华教授编写并统稿,衷心感谢相关课程教师对本书编写提出的宝贵意见,同时感谢为本书编写提供帮助的教师及学生。

限于编者学识所限,书中如有错误或不妥之处,敬请批评指正。

编 者  
2011年7月

绪论	1
<b>第一章 岩石的物理力学性质</b>	<b>6</b>
第一节 岩石的物理性质	6
第二节 岩石的力学性质	12
第三节 影响岩石力学性质的主要因素	36
第四节 岩石的流变性质	40
本章小结	50
习题与思考题	50
<b>第二章 岩石强度理论</b>	<b>52</b>
第一节 岩石破坏机制及强度理论概述	52
第二节 岩石拉伸破坏的强度理论	54
第三节 岩石剪切破坏的强度理论	59
本章小结	66
习题与思考题	66
<b>第三章 岩体结构及岩体力学性质</b>	<b>67</b>
第一节 岩石、岩体与岩体结构	67
第二节 岩体结构基本类型	69
第三节 结构面及其充填特征	73
第四节 结构面的力学性质	80
第五节 岩体的变形特性	84
第六节 岩体的强度特性	88
第七节 岩体质量评价及分类	96
本章小结	101
习题与思考题	101
<b>第四章 岩体地应力及其测量方法</b>	<b>103</b>
第一节 概述	103
第二节 岩体中的初始应力场	104
第三节 地应力成因及分布规律	108

第四节 地应力测量方法·····	113
本章小结·····	128
习题与思考题·····	128
<b>第五章 巷道地压·····</b>	<b>129</b>
第一节 巷道地压及显现的基本原理·····	129
第二节 巷道周围的应力场·····	131
第三节 巷道围岩的弹性位移·····	139
第四节 塑性区的应力与位移·····	140
第五节 巷道围岩稳定性的判断·····	147
第六节 破坏区的应力与位移·····	153
第七节 弹黏性围岩的应力与位移·····	157
第八节 围岩与支架的力学模型·····	160
第九节 变形地压的计算·····	164
第十节 松脱地压的计算·····	167
本章小结·····	173
习题与思考题·····	173
<b>第六章 边坡岩体稳定性分析·····</b>	<b>174</b>
第一节 概述·····	174
第二节 边坡岩体中的应力分布特征·····	175
第三节 边坡岩体的变形与破坏·····	177
第四节 边坡岩体稳定性分析的步骤·····	180
第五节 边坡岩体稳定性计算·····	182
第六节 滑坡的监测与治理·····	189
本章小结·····	195
习题与思考题·····	195
<b>第七章 岩体工程模拟·····</b>	<b>197</b>
第一节 相似材料模拟法·····	197
第二节 数值分析方法·····	207
本章小结·····	214
习题与参考题·····	214
<b>参考文献·····</b>	<b>215</b>



# 绪 论

岩体力学是近代发展起来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基础学科。它的应用范围涉及采矿、土木建筑、水利水电、铁道、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋工程等众多的与岩体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。

## 一、岩体力学的发展历史和概貌

岩体力学按其发展进程可划分为4个阶段:初始阶段(19世纪末至20世纪初),经验理论阶段(20世纪初至20世纪30年代),经典理论阶段(20世纪30年代至20世纪60年代),现代发展阶段(20世纪60年代到现在)。

### 1. 初始阶段

这是岩体力学的萌芽时期,产生了以解决岩体开挖的力学计算问题的初步理论。在这个阶段,海姆提出了静水压力的理论。他认为地下岩体处于一种静水压力状态,作用在地下岩体工程上的垂直压力和水平压力相等,均等于单位面积上覆岩层的重量。朗金和金尼克也提出了相似的理论。但他们认为只有垂直压力等于单位面积上覆岩层的重量,而水平压力应为垂直压力乘一个侧压系数。由于当时地下岩体工程埋藏深度不大,因而曾一度认为这些理论是正确的。但随着开挖深度的增加,越来越多的人认识到上述理论是不准确的。

### 2. 经验理论阶段

该阶段出现了根据生产经验提出的地压理论,并开始用材料力学和结构力学的方法分析地下工程的支护问题。最有代表性的理论就是普罗托吉雅柯诺夫提出的自然平衡拱学说,即普氏理论。该理论认为,围岩开挖后自然塌落成抛物线拱形,作用在支架上的压力等于冒落拱内岩体的重量,仅是上覆岩体重量的一部分。于是,确定支护结构上的荷载大小和分布方式成了地下岩体工程支护设计的前提条件。太沙基也提出相同的理论,只是他认为塌落拱的形状是矩形,而不是抛物线形。但事实上,围岩的塌落并不是形成围岩压力的唯一来源,也不是所有的地下空间都存在塌落拱。进一步地说,围岩和支护之间并不完全是荷载和结构的关系问题,在很多情况下,围岩和支护形成一个共同承载系统,而且,维持岩体工程的稳定最根本的还是要发挥围岩的作用,因此,靠假定的松散地层压力来进行支护设计是不合实际的。尽管如此,上述理论在一定历史时期和一定条件下还是发挥了一定的作用。

### 3. 经典理论阶段

这是岩体力学学科形成的重要阶段,弹性力学和塑性力学被引入岩体力学,确立了一些经典计算公式,形成围岩和支护共同作用的理论。结构面对岩体力学性质的影响受到重视,

岩体力学文献和专著的出版、实验方法的完善、岩体工程技术问题的解决都说明岩体力学发展到该阶段已经成为一门独立的学科。

在经典理论发展阶段,形成了“连续介质理论”和“地质力学理论”两大学派。

连续介质理论以固体力学作为基础,从材料的基本力学性质出发来认识岩体工程的稳定问题,这是认识方法上的重要进展,抓住了岩体工程计算的本质性问题。早在 20 世纪 30 年代,萨文就用无限大平板孔附近应力集中的弹性解析解来分析岩体工程的围岩应力分布问题。20 世纪 50 年代,鲁滨涅特运用连续介质理论写出了求解岩体力学领域问题的系统著作。同期,开始有人用弹塑性理论研究围岩的稳定问题,导出著名的芬纳—塔罗勃公式和卡斯特纳公式。塞拉塔用流变模型进行了隧洞围岩的黏弹性分析。

20 世纪 60 年代,根据早期的有限差分 and 有限元等数值分析方法,得出了考虑实际开挖空间和岩体节理、裂隙的围岩和支护共同作用的弹性或弹塑性计算解,使运用围岩和支护共同作用原理进行实际岩体工程的计算分析和设计变得普遍起来。

地质力学理论注重研究地层结构和力学性质与岩体工程稳定性的关系,它是 20 世纪 20 年代由德国人克罗斯创立起来的,该理论反对把岩体当做连续介质简单地利用固体力学的原理进行岩体力学特性分析;强调要重视对岩体节理、裂隙的研究,重视岩体结构面对岩体工程稳定性的影响和控制作用。1951 年 6 月在奥地利成立了以斯梯尼和米勒为首的“地质力学研究组”,在萨尔茨堡举行了第一届地质力学讨论会,形成了“奥地利学派”。从此该理论迅速发展,并广泛应用于岩体工程,在全世界产生了广泛的影响。该理论对岩体工程的最重要贡献是提出了“研究工程围岩的稳定性必须了解原岩应力和开挖后岩体的力学强度变化”以及“节理裂隙对岩体工程稳定性有影响”等观点。该理论同时重视岩体工程施工过程中应力、位移和稳定性状态的监测,这是现代信息岩体力学的雏形。该学派重视支护与围岩的共同作用,特别重视利用围岩自身的强度维持岩体工程的稳定性。在岩体工程施工方面,提出了著名的“新奥法”,该方法特别符合现代岩体力学理论,至今仍被国内外广泛应用。1962 年 10 月,在第十三届地质力学讨论会上成立了国际岩石力学学会,米勒担任第一任主席,这是岩体力学发展史上的重要事件。

#### 4. 现代发展阶段

此阶段是岩体力学理论和实践的新进展阶段,其主要特点是,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、现代信息技术等的最新成果引入了岩体力学。而电子计算机的广泛应用为流变学、断裂力学、非连续介质力学、数值方法、灰色理论、人工智能、非线性理论等在岩体力学与工程中的应用提供了可能。

从总体上来讲,现代岩体力学理论认为:由于岩石和岩体结构及其赋存状态、赋存条件的复杂性和多变性,岩体力学既不能完全套用传统的连续介质理论,也不能完全依靠以节理、裂隙和结构面分析为特征的传统地质力学理论,而是要用系统论的方法来进行岩体力学与工程的研究。用系统概念来表征“岩体”,可使岩体的“复杂性”得到全面、科学的表述。从系统来讲,岩体的组成、结构、性能、赋存状态及边界条件构成其力学行为和工程功能的基础,岩体力学研究的目的是认识和控制岩石系统的力学行为和工程功能。

20 世纪 60 年代和 70 年代,原位岩体与岩块的巨大工程差异被揭示出来,岩体的地质结构和赋存状况受到重视,“不连续性”成为岩体力学研究的重点,从“材料”概念到“不连续介质”概念是岩体力学理论上的飞跃。

随着计算机科学的进步,20世纪60年代和70年代开始出现用于岩体工程稳定性计算的数值计算方法,主要是有限元法。20世纪80年代数值计算方法发展很快,有限元、边界元及其混合模型得到广泛的应用,成为岩体力学分析计算的主要手段。20世纪90年代数值分析终于在岩体力学学科中扎根,岩体力学专家和数学家合作创造出系列新的计算原理和方法,例如,损伤力学和离散元法的进步,DDA法和流形方法的发展,等等。

现代计算机科学技术的进步也带动了现代信息技术的发展。20世纪80年代和90年代,岩体工程三维信息系统、人工智能、神经网络、专家系统、工程决策支持系统等迅速发展起来,并得到普遍的重视和应用。

20世纪90年代现代数理科学的渗透是非线性科学在岩体力学中的重要应用。本质上讲非线性和线性是互为依存的。耗散结构论、协同论、分叉和混沌理论正在被试图用于认识和解释岩体力学的各种复杂过程。岩体力学和相邻的工程地质学都因受到研究对象“复杂性”的挑战,而对非线性理论倍加青睐。

由于岩体结构及其赋存状态、赋存条件的复杂性和多变性致使岩体力学所研究的目标和对象存在着大量不确定性,因而有人从20世纪80年代末提出不确定性研究理论,目前已被越来越多的人所认识和接受。现代科学技术手段如模糊数学、人工智能、灰色理论和非线性理论等为不确定性分析研究方法和理论体系的建立提供了必要的技术支持。可以说,从“材料概念”到“不连续介质概念”是现代岩体力学的第一步突破;进入计算力学阶段是第二步突破;而非线性理论、不确定性理论和系统科学理论进入实用阶段,则是岩体力学理论研究及工程应用的意义更为重大的第三步突破。

## 二、岩体力学的基本研究内容和研究方法

### 1. 研究内容

岩体力学服务对象的广泛性和研究对象的复杂性,决定了岩体力学研究的内容也必须是广泛而复杂的。但对任何岩体工程领域来讲,下列的基本内容都是要首先进行研究的。

(1) 岩石、岩体的地质特征。内容包括:① 岩石的物质组成和结构特征;② 结构面特征及其对岩体力学性质的影响;③ 岩体结构及其力学特征;④ 岩体工程分类。

(2) 岩石的物理、水理与热力学性质。

(3) 岩石的基本力学性质。内容包括:① 岩块在各种力学作用下的变形和强度特征以及力学指标参数;② 影响岩石力学性质的主要因素,包括加载条件、温度、湿度等;③ 岩石的变形破坏机理及其破坏判据。

(4) 结构面力学性质。内容包括:① 结构面在法向压应力及剪应力作用下的变形特征及其参数确定;② 结构面剪切强度特征及其测试技术和方法。

(5) 岩体力学性质。内容包括:① 岩体变形与强度特征及其原位测试技术与方法;② 岩体力学参数的弱化处理与经验估计;③ 影响岩体力学性质的主要因素;④ 岩体中地下水的赋存、运移规律及岩体的水力学特征。

(6) 原岩应力(地应力)分布规律及其测量理论与方法。

(7) 工程岩体的稳定性。内容包括:① 各类工程岩体在开挖荷载作用下的应力、位移分布特征;② 各类工程岩体在开挖荷载作用下的变形破坏特征;③ 各类工程岩体的稳定性分析与评价等。

(8) 岩体工程稳定性维护技术。包括岩体性质的改善与加固技术等。

(9) 各种新技术、新方法与新理论在岩石力学中的应用。

(10) 工程岩体的模型、模拟试验及原位监测技术模型模拟试验。包括数值模型模拟、物理模型模拟等,这是解决岩体力学理论和实际问题的一种重要手段。而原位监测既可以检验岩体变形与稳定性分析成果的正确与否,同时也可以及时地发现问题并采取合理的措施加以解决。

## 2. 研究方法

由于岩体力学是一门边缘交叉科学,研究的内容广泛,对象复杂,这就决定了岩体力学研究方法的多样性。根据所采用的研究手段或所依据的基础理论所属学科领域的不同,岩体力学的研究方法可大概归纳为以下 4 种:

(1) 工程地质研究方法。着重于研究与岩石和岩体的力学性质有关的岩石和岩体地质特征。如用岩矿鉴定方法,了解岩体的岩石类型、矿物组成及结构构造特征;用地层学方法、构造地质学方法及工程勘察方法等,了解岩体的成因、空间分布及岩体中各种结构面的发育情况等;用水文地质学方法了解赋存于岩体中地下水的形成与运移规律;等等。

(2) 科学实验方法。科学实验是岩体力学发展的基础,它包括实验室岩体力学参数的测定、模型试验、现场岩体的原位试验及监测技术、地应力的测定和岩体构造的测定等。试验结果可为岩体变形和稳定性分析计算提供必要的物理力学参数。同时,还可以用某些试验结果(如模拟试验及原位应力、位移、声发射监测结果等)直接评价岩体的变形和稳定性,以及探讨某些岩体力学理论问题。随着岩体力学的不断发展,其涉及的实验范围也越来越宽,如地质构造的勘测、大地层的力学测定等,可为岩体力学提供必要的研究资料。另一方面,室内岩石的微观测定也是岩石力学研究的重要手段。近代发展起来的新的实验技术都已不断地应用于岩体力学领域,如遥感技术、激光散斑和切层扫描技术、三维地震勘测成像和三维地震 CT 成像技术、微震技术等,都已逐渐为岩体工程服务。

(3) 数学力学分析方法。数学力学分析是岩体力学研究中的一个重要环节。它通过建立工程岩体的力学模型和利用适当的分析方法,预测工程岩体在各种力场作用的变形与稳定性,为岩体工程设计和施工提供定量依据,其中建立符合实际的力学模型和选择适当的分析方法是数学力学分析中的关键。目前常用的力学模型有:刚体力学模型、弹性及弹塑性力学模型、流变模型、断裂力学模型、损伤力学模型、渗透网络模型、拓扑模型等。常用的分析方法有:① 数值分析方法,包括有限差分法、有限元法、边界元法、离散元法、无界元法、流形元法、不连续变形分析法、块体力学和反演分析法等;② 模糊聚类和概率分析,包括随机分析、可靠度分析、灵敏度分析、趋势分析、时间序列分析和灰色系统理论等;③ 模拟分析,包括光弹应力分析、相似材料模型试验、离心模型试验等。在边坡研究中,还普遍采用极限平衡的分析方法。

(4) 整体综合分析方法。整体综合分析方法是就整个工程应用多种方法并以系统工程为基础的综合分析方法。它是岩体力学与岩体工程研究中极其重要的一套工作方法。由于岩体力学与工程研究中每一环节都是多因素的,且信息量大,因此必须采用多种方法并考虑多种因素(包括工程的、地质的及施工的等)进行综合分析和综合评价,特别是要注重理论和经验相结合,这样才能得出符合实际情况的正确结论。就岩体工程而言,整体综合分析方法又必须以不确定性分析方法为指导,因为在岩体工程问题中,存在着工程的、地质的及施工的多方面的不确定性因素。只有采用不确定性研究方法,才能彻底摆脱传统的固体力学、结

构力学的确定性分析方法的影响,使研究和分析的结果更符合实际,更可靠和实用。现代非线性科学理论、信息科学理论、系统科学理论、模糊数学、人工智能、灰色理论和计算机科学技术的发展等为不确定性分析方法奠定了必要的技术基础。

### 三、岩体力学研究的主要问题

矿山岩体力学的服务对象是矿山岩体工程,其具体研究内容没有明确界定,但目前其主要研究的工程问题可表述如下:

- (1) 地下原岩体中及工程开挖后围岩的应力状态、测试方法与技术;
  - (2) 井工开采中巷道围岩稳定性及矿压显现规律,特别是软岩巷道和深部开采地压控制问题;
  - (3) 采场稳定性及矿压显现规律,采场开采优化(采场结构、开采顺序、开挖步骤等)设计问题;
  - (4) 岩爆(冲击地压、矿震)、煤与瓦斯突出预测及治理的理论和技術;
  - (5) 矿井突水预测、预报及治理的理论和技術;
  - (6) 采场底板变形及破坏规律;
  - (7) 采空区处理、岩层与地表移动规律及控制;
  - (7) 露天采矿边坡设计及稳定加固技术;
  - (8) 岩石破碎问题;
  - (9) 矿山岩体力学实验室试验及现场测试的技术方法。
- 随着矿山工程建设的不断发展,还会有新问题不断提出。

# 第一章 岩石的物理力学性质

**【本章重点】** 岩石的水理性质;岩石的各种强度含义及测试方法;岩石的变形性质及变形指标;岩石力学性质的主要影响因素。

**【本章难点】** 岩石三轴抗压强度、剪切强度及岩石强度包络线;全应力—应变曲线的绘制及应用;岩石变形指标。

**【学习目标】** 通过本章的学习,理解和掌握岩石的各项物理、力学性质,了解岩石的流变性质。

## 第一节 岩石的物理性质

岩石的物理性质是指由岩石固有的物质组成和结构特征所决定的相对密度、容重、含水率、孔隙率等基本属性。

### 一、岩石的容重

单位体积岩石(包括岩石内孔隙体积)的重量称为岩石的容重,岩石容重的表达式为

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

式中: $\gamma$  为岩石容重, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $W$  为被测岩样的重量, $\text{kN}$ ;  $V$  为被测岩样的体积, $\text{m}^3$ 。

岩石容重取决于组成岩石的矿物成分、孔隙发育程度及其含水量。岩石容重的大小,在一定程度上反映出岩石力学性质的优劣。一般地,岩石容重愈大,其力学性质也愈好,反之,则愈差。常见岩石的容重见表 1-1。

表 1-1 部分岩石的天然容重

岩石名称	天然容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	岩石名称	天然容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	岩石名称	天然容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
花岗岩	23.0~28.0	砾岩石英	24.0~26.6	新鲜花岗片麻岩	29.0~33.0
闪长岩	25.2~29.6	石英砾岩	26.1~27.0	角闪片麻岩	27.6~30.5
辉长岩	25.5~29.8	硅质胶结砂岩	25.0	混合片麻岩	24.0~26.3
斑岩	27.0~27.4	砂岩	22.0~27.1	片麻岩	23.0~30.0
玢岩	24.0~28.6	坚固的页岩	28.0	片岩	29.0~29.2
辉绿岩	25.3~29.7	砂质页岩	26.0	特别坚硬的石英岩	30.0~33.0
粗面岩	23.0~26.7	页岩	23.0~26.2	片状石英岩	28.0~29.0
安山岩	23.0~27.0	硅质灰岩	28.1~29.0	大理岩	26.0~27.0
玄武岩	25.0~31.0	白云质灰岩	28.0	白云岩	21.0~27.0

续表 1-1

岩石名称	天然容重 /kN·m <sup>-3</sup>	岩石名称	天然容重 /kN·m <sup>-3</sup>	岩石名称	天然容重 /kN·m <sup>-3</sup>
凝灰岩	22.9~25.0	泥质灰岩	23.0	板岩	23.1~27.5
凝灰角砾岩	22.0~29.0	灰岩	23.0~27.7	蛇纹岩	26.0

岩石力学计算及工程设计中常用到岩石容重,根据岩石的含水状况,将容重分为天然容重( $\gamma$ )、干容重( $\gamma_d$ )和饱和容重( $\gamma_w$ )。在岩石力学试验中,容重一般用视密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )来表达,而单位体积岩石(不包括岩石内孔隙体积)的质量称为岩石的真密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

测定岩石的容重可采用量积法(又叫直接法)、水中法或蜡封法。具体采用何种方法,应根据岩石的性质和岩样形态来确定。

凡能制备成规则试样的岩石,均宜采用量积法测定其容重。用量积法测定岩石容重时,需测定规则试样的平均面积、平均高度以及试样的重量,算出岩石的天然容重。将试样在105~110℃温度下烘干24h称重,可测定出干容重( $\gamma_d$ )。

用水中法测定岩石容重时,首先称量出不规则岩样的重量,再根据阿基米德原理测定出不规则岩样的体积,计算出天然容重( $\gamma$ )。可用同一岩样测定岩样的吸水率和饱和吸水率。遇水崩解、溶解和干缩湿胀的岩石不能用此法测其容重。

蜡封法适用于不能用量积法或水中法测定岩石容重的情况。首先选取有代表性的岩样在105~110℃温度下烘干24h。取出,系上细线,称量岩样重量,持线将岩样缓缓浸入刚过熔点的蜡液中,浸入立即提出,检查试样周围的蜡膜,若有气泡应用针刺破,再用蜡液补平,冷却后称蜡封岩样的重量,然后将蜡封岩样浸没于纯水中称其重量,则可计算出岩石的干容重( $\gamma_d$ )。

## 二、岩石的相对密度

岩石的相对密度是指岩石单位体积(不包括岩石内孔隙体积)的重量与4℃时同体积纯水重量的比值,即

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} \quad (1-2)$$

式中: $G_s$ 为岩石的相对密度; $W_s$ 为体积 $V_s$ 的岩石固体部分的重量,kN; $V_s$ 为岩石固体部分(不包括孔隙)的体积,m<sup>3</sup>; $\gamma_w$ 为4℃时单位体积水的重量,kN·m<sup>-3</sup>。

岩石的相对密度取决于组成岩石的矿物相对密度及其在岩石中的相对含量。成岩矿物的相对密度愈大,则岩石的相对密度愈大。常见岩石的相对密度见表1-2。

表 1-2 常见岩石的相对密度

岩石名称	相对密度	岩石名称	相对密度	岩石名称	相对密度
花岗岩	25.0~28.4	砾岩	26.7~27.1	片麻岩	26.3~30.1
闪长岩	26.0~31.0	砂岩	26.0~27.5	花岗片麻岩	26.0~28.0
橄榄岩	29.0~34.0	细砂岩	27.0	角闪片麻岩	30.7
斑岩	26.0~28.0	黏土质砂岩	26.8	石英片岩	26.0~28.0
玢岩	26.0~29.0	砂质页岩	27.2	绿泥石片岩	28.0~29.0

续表 1-2

岩石名称	相对密度	岩石名称	相对密度	岩石名称	相对密度
辉绿岩	26.0~31.0	页岩	25.7~27.7	黏土质片岩	24.0~28.0
流纹岩	26.5	石灰岩	24.0~28.0	板岩	27.0~29.0
粗面岩	24.0~27.0	泥质灰岩	27.0~28.0	大理岩	27.0~29.0
安山岩	24.0~28.0	白云岩	27.0~29.0	石英岩	25.3~28.4
玄武岩	25.0~33.0	石膏	22.0~23.0	蛇纹岩	24.0~28.0
凝灰岩	25.0~27.0	煤	19.8		

### 三、岩石的孔隙性

天然岩石中包含着数量不等、成因各异的孔隙和裂隙，是岩石的重要结构特征之一。它们对岩石力学性质的影响基本一致，在工程实践中很难将二者分开，因此通称为岩石的孔隙性。岩石的孔隙性常用孔隙率  $n$  表示。

岩石的孔隙率  $n$  是指岩石孔隙的体积与岩石总体积的比值，以百分数表示。孔隙率是衡量岩石工程质量的重要物理性质指标之一，岩石中的孔隙和裂隙愈多，岩石的力学性能则愈差。表 1-3 列出部分岩石的孔隙率。

表 1-3 部分岩石的孔隙率

岩石名称	孔隙率/%	岩石名称	孔隙率/%	岩石名称	孔隙率/%
花岗岩	0.5~4.0	砾岩	0.8~10.0	石英片岩及角闪岩	0.7~3.0
闪长岩	0.18~5.0	砂岩	1.6~28.0	云母片岩及绿泥石片岩	0.8~2.1
辉长岩	0.29~4.0	泥岩	3.0~7.0	千枚岩	0.4~3.6
辉绿岩	0.29~5.0	页岩	0.4~10.0	板岩	0.1~0.45
玢岩	2.1~5.0	石灰岩	0.5~27.0	大理岩	0.1~6.0
安山岩	1.1~4.5	泥灰岩	1.0~10.0	石英岩	0.1~8.7
玄武岩	0.5~7.2	白云岩	0.3~25.0	蛇纹岩	0.1~2.5
火山集块岩	2.2~7.0	片麻岩	0.7~2.2		
火山角砾岩	4.4~11.2	花岗片麻岩	0.3~2.4		
凝灰岩	1.5~7.5				

### 四、岩石的水理性

岩石与水相互作用时所表现的性质称为岩石的水理性，包括岩石的吸水性、渗透性、软化性、抗冻性、溶蚀性和膨胀性等。

#### 1. 岩石的天然含水率 $\omega$

天然状态下岩石中水的质量  $m_w$  与岩石的烘干质量  $m_{dr}$  的比值，称为岩石的天然含水率，以百分率表示，即

$$\omega = \frac{m_w}{m_{dr}} \times 100\% \quad (1-3)$$

#### 2. 岩石的吸水率 $\omega_a$



岩石在一定条件下吸收水分的性能称为岩石的吸水性。它取决于岩石孔隙的数量、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、饱和吸水率和饱水系数。

岩石吸水率  $\omega_a$  是岩石在常温常压下吸入水的质量与其烘干质量  $m_{dr}$  的比值,以百分率表示,即

$$\omega_a = \frac{m_o - m_{dr}}{m_{dr}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中:  $m_o$  为烘干岩样浸水 48 h 后的总质量,其余符号意义同前。

岩石吸水率  $\omega_a$  的大小取决于岩石中孔隙的多少及其连通情况。岩石的吸水率愈大,表明岩石中的孔隙大,数量多,并且连通性好,岩石的力学性质差。表 1-4 列出了部分岩石的吸水率。

表 1-4 部分岩石的吸水率

岩石名称	吸水率/%	岩石名称	吸水率/%	岩石名称	吸水率/%
花岗岩	0.1~4.0	砾岩	0.3~2.4	石英片岩及角闪片岩	0.1~0.3
闪长岩	0.3~5.0	砂岩	0.2~9.0	云线片岩及绿泥石片岩	0.1~0.6
辉长岩	0.5~4.0	泥岩	0.7~3.0		
玢岩	0.4~1.7	页岩	0.5~3.2	板岩	0.1~0.3
辉绿岩	0.8~5.0	石灰岩	0.09~4.5	大理岩	0.1~1.0
安山岩	0.3~4.5	泥灰岩	0.5~3.0	页英岩	0.1~1.5
玄武岩	0.2~2.8	白云岩	0.1~3.0	蛇纹岩	0.2~2.5
火山集块岩	0.5~1.7	片麻岩	0.1~0.7		
火山角砾岩	0.2~5.0	花岗片麻岩	0.1~0.85		
凝灰岩	0.5~7.5	千枚岩	0.5~1.8		

岩石的饱和吸水率亦称饱水率,是岩石在强制状态(高压或真空,煮沸)下,岩石吸入水的质量与岩样烘干质量的比值,以百分率表示,即

$$\omega_{sa} = \frac{m_{sa} - m_{dr}}{m_{dr}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中:  $\omega_{sa}$  为岩石的饱和吸水率;  $m_{sa}$  为真空抽气饱和或煮沸后试件的质量, kg;  $m_{dr}$  为岩样在 105~110 °C 温度下烘干 24 h 的质量, kg。

在高压条件下,通常认为水能进入岩石中所有张开的孔隙和裂隙中。国外采用高压设备测定岩石的饱和吸水率,国内常用真空抽气法或煮沸法测定饱和吸水率。饱水率反映岩石中总的张开型孔隙和裂隙的发育程度,对岩石的抗冻性和抗风化能力具有较大影响。

岩石饱水系数  $k_w$  是指岩石吸水率与饱水率的比值,即

$$k_w = \frac{\omega_a}{\omega_{sa}} \quad (1-6)$$

表 1-5 列出了几种岩石的吸水性指标值。