

高等教育“十三五”规划教材

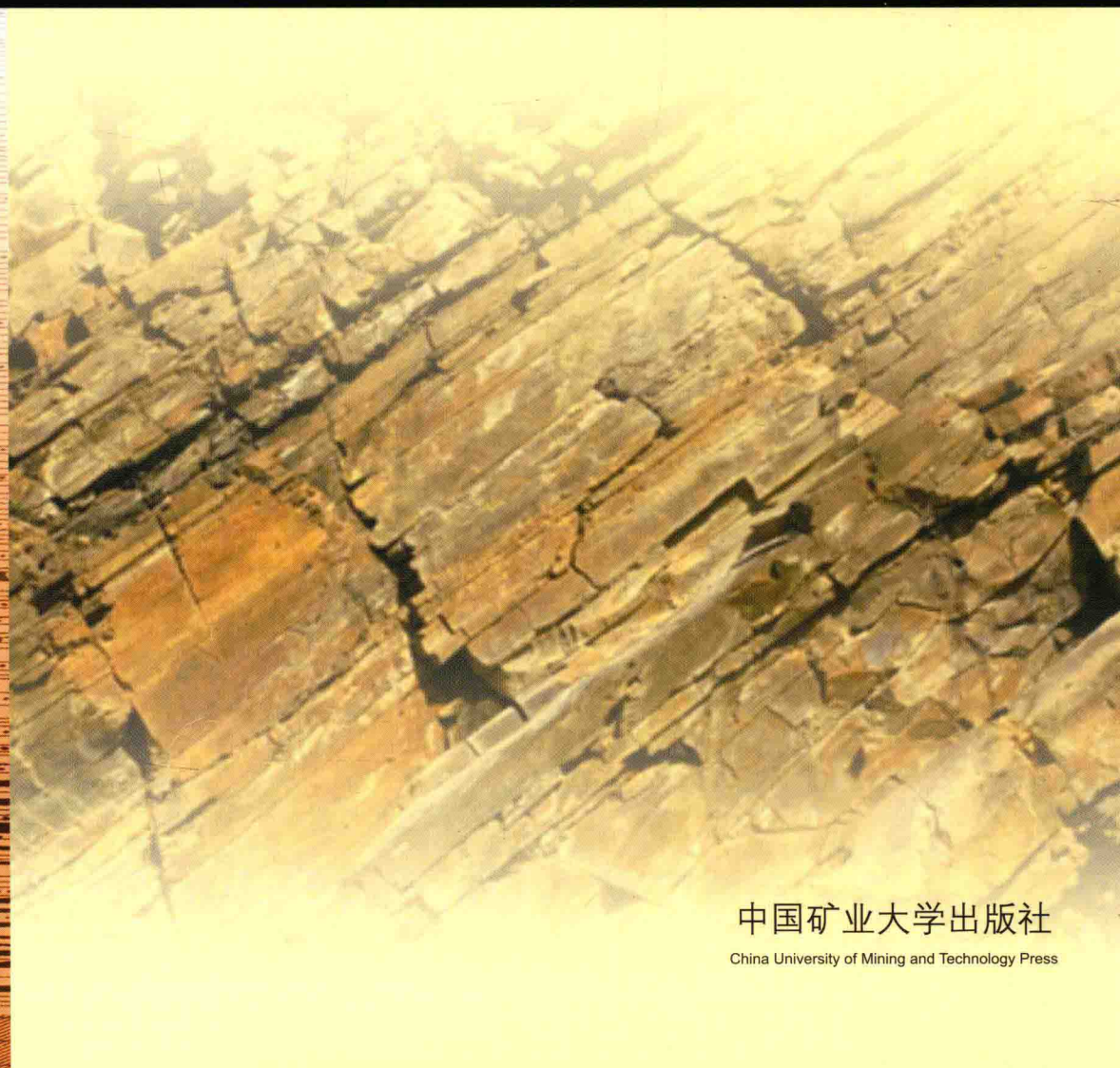


岩石力学

第二版

贾喜荣 弓培林 编著

Yanshi Lixue



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

“”规划教材

岩石力学

贾喜荣 弓培林 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是关于岩石力学及其在地下工程中应用的教学用书。书中系统地阐述了岩石基本物理力学性质试验与分析、岩石强度准则、岩石的流变性质与模型理论、节理岩层力学性状及其工程分类、原岩应力、岩层巷道的稳定性分析等基本内容。书中内容反映了国际上岩石力学教科书中较成熟的教学内容和工程中普遍采用的较成熟技术,以及作者在岩石强度准则间的相关性、构造应力场力学模型方面的探讨和在教学实践中对岩石力学这门学科的理解。

本书可作为采矿工程、地下工程、地质工程专业的本科生、研究生的教学用书和教学参考书,也可作为相关专业工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

岩石力学/贾喜荣,弓培林编著. —2版. —徐州:中国矿业大学出版社,2018.1

ISBN 978-7-5646-3644-9

I. ①岩… II. ①贾… ②弓… III. ①岩石力学—高等学校—教材 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 185705 号

书 名 岩石力学
编 著 贾喜荣 弓培林
责任编辑 王美柱
责任校对 杨 洋
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 13 字数 324 千字
版次印次 2018年1月第2版 2018年1月第1次印刷
定 价 22.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

固体力学——研究可变形固体, 在外界因素作用下所产生的应力、应变; 载荷(如: 矿山压力)、位移(如: 矿山压力显现); 运动、破坏及其力学效应。

固体力学理论——对固体力学问题客观规律的解析表达(并非定性描述)。特征: ① 需要逻辑上的论证; ② 需要与事实的一致。

岩石力学、岩层控制学——研究围岩的物理力学性质、力学结构、支护系统须承担载荷的量值以及围岩稳定性判据。

物性、结构、载荷、强度准则——岩石力学、岩层控制学研究的“四项任务”。其中: 物性、结构、载荷是“三大主题”; 载荷是“核心”。

——作者

序 言

岩石力学以岩石物理学为基础,最早开始于20世纪50年代,直到20世纪60年代才逐渐发展成为一门独立的学科。岩石力学是一门研究岩石对人为工程扰动响应的学科。对于自然扰动的情况,属地质力学范畴,即在造山运动或其他地质作用过程中,研究随着地质构造应力的变化,褶皱、断层以及裂隙如何发展等。

岩石力学具有广泛的工程应用范围,从水电工程、核电站基础工程、隧道工程、采矿工程,到石油钻井的稳定性分析,以及在一些新的研究领域的应用,如地热能开发、放射性废物的处置。然而,在本书中,重点关注的是岩石力学的基本研究内容及其在地下工程、煤矿井巷工程中的应用。

如同其他工程学科一样,工程设计的严密性与精确性的迫切要求,促进了岩石力学的迅速发展。目前,相关领域可以进行专门的岩石工程设计,并在相当程度上满足了工程要求。

岩石力学区别于其他工程学科的主要特征在于,它把力学原理应用于存在有天然应力和裂隙的很大规模的地质体。岩石力学是固体力学的一个分支,但由于问题的复杂性,实验力学是岩石力学的基础。

通常情况下,土木工程中的结构受力与变形的规律,在很大程度上已经达到了科学的程度,但岩石地下工程却远非如此。岩石是天然的地质体,而非人工设计加工的工程构件或构筑物;岩石的工程强度往往表现为它的残余强度,且其值处在一个小于峰值和大于零的区间中。因此,围岩的载荷与位移间的关系会存在各种不同状况,且多属大变形问题,已不再是经典力学意义上的应力—应变关系。所以在研究工程结构的变形与载荷间的力学关系时,所面临的困难就可想而知。

在工程设计上,地下工程与土木工程同属于工程结构可靠度设计问题;但在问题的难易程度上,两者截然不同。土木工程的可靠度设计,通常是在工程构件的物理力学性质指标、工程结构尺寸和载荷均确定的条件下,对工程结构的可靠度进行校核,即土木工程结构可靠度设计多属定解问题;而在地下工程中,多数情况是在物性(围岩的物理、力学性质)、结构(围岩的承载结构)和载荷(围岩作用于加固或支护系统上的载荷)都难以确定的情况下,进行围岩的加固与支护设计,并对工程结构的可靠度做出判断,即地下工程结构可靠度设计往往属于不定解问题。

物性、结构和载荷是地下工程结构可靠度研究的三大主题。围岩的物性指标是确定工程可靠度计算参数的依据;围岩的承载结构特征是建立理论模型和进行理论分析的依据;围岩作用于支护系统上的载荷量值是围岩加固与支护设计的依据。三者中,最核心的问题是支护系统须承担的载荷量值的确定。

地下采矿工程中的岩石力学问题,之所以受到岩石工程领域的特别关注,其一是因为岩石性态的许多有趣形式正是在地下采矿工程中才得以充分显现,地下采矿工程中岩石出现的极限承载和大变形现象是其他岩石工程所无法容忍的,生产矿井常常是观测岩石不同组

成部分极限性态的理想场所。其二,地下采矿工程中的岩石力学问题是最复杂的岩石工程问题。

矿井岩石力学是结合地下采矿工程的特点,研究岩石力学性质和开采过程中围岩内发生的力学响应的科学。广义上,矿井岩石力学属于岩石力学研究的重要领域,同时它也是采矿科学的基础性学科之一。

岩石力学涉及的研究内容十分广泛,除书中内容外,还应包括岩石工程的测试技术、数值模拟技术、物理模拟技术以及不断发展的各种新技术等内容。但是,作为采矿工程和地下工程专业的教材,岩石力学的课时一般控制在50~60课时,为此在内容筛选上,主要考虑岩石力学的基础内容,针对煤系地层的工程力学特征以及知识的普适性,并考虑国际上岩石力学教科书中较成熟的教学内容和工程中普遍采用的较成熟技术等要求,全书在内容上分为四大部分,以便于学生对课程有一个整体内容上的把握。在具体内容方面,还意在培养学生在学习岩石力学课程中应用数学、力学知识的兴趣,以及分析问题和解决问题的能力。希望能在严格遵循基本力学原则的同时,注重对岩石力学原理的理解和工程应用的把握。比如,对于数学力学公式,适当给出详细的求解步骤,便于了解公式的推导过程,以利于重点掌握表达式中的结论及其工程价值。

目前,通常把煤矿地下开采中的岩石力学内容划分为两大部分:一部分是重点研究开拓系统中的岩石力学问题,属岩石地下工程,其特点是工程结构位于各种岩层之中,工程断面尺寸通常为 20 m^2 左右,矿井开拓巷道的长度可能会达数千米到数十千米,要贯穿各种岩层,会遇到各种不同的工程问题,工程的服务年限可达数年到数十年;另一部分是重点研究回采系统中的岩石力学问题,其属岩层控制学,采区巷道和采煤工作面的显著特点是工程结构位于煤层之中,回采巷道的服务年限仅几年,回采工作面空间的服务期可以用小时计。尽管岩层控制同属岩石地下工程问题,但由于工程环境和工程结构的截然不同,回采系统中涉及的岩石力学问题,远比开拓系统中复杂困难得多。

在教材编写和教学安排上,现已习惯于把煤矿地下开采中的岩石力学内容分为两门课程,即“岩石力学”、“岩层控制学”。

本书在注重内容与结构体系的同时,还侧重于探讨解决地下采矿工程中出现的一些岩石力学问题的方法与途径。希望该书能够成为普通高等学校采矿工程及相关专业本科生、研究生以及现场相关专业工程技术人员的有益读本。

在本书出版之际,对提供帮助和书中引用材料所涉及的个人和组织表示感谢,同时对为本书编辑出版付出辛劳的团队深表敬意和感谢。

限于水平和经验,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2017年10月于太原

目 次

第一章 岩石基本物理力学性质试验与分析	1
第一节 引言.....	1
第二节 实验室试件样品及其制备.....	2
第三节 岩石的基本物理性质.....	4
第四节 单轴压缩下岩石的变形性质.....	11
第五节 岩石的单轴抗压强度.....	17
第六节 岩石的抗拉强度试验.....	27
第七节 岩石的抗弯强度试验.....	30
第八节 岩石的点载荷试验和捣碎试验.....	31
第九节 岩石的抗剪强度及其变形.....	34
第十节 岩石物理力学性质间的相关性.....	44
第十一节 岩石力学性质的各向异性特征.....	48
第十二节 岩石的三轴强度准则.....	51
第十三节 岩石的流变性质与模型理论.....	72
提示与练习.....	86
第二章 岩层的力学性状	88
第一节 引言.....	88
第二节 岩层的结构特征.....	93
第三节 结构面的剪切性状.....	101
第四节 多结构面岩层的力学性质.....	112
第五节 节理岩层(岩体)的工程分类.....	119
第六节 节理岩层(岩体)的变形特性及其强度准则.....	135
提示与练习.....	140
第三章 原岩应力	142
第一节 地球构造的一般概念.....	142
第二节 原岩应力.....	143
提示与练习.....	157
第四章 岩层巷道稳定性分析	158
第一节 引言.....	158

第二节 整体岩层中巷道围岩的应力状态·····	159
第三节 巷道围岩的支护与加固·····	173
第四节 散体地压假说·····	188
提示与练习·····	195
参考文献·····	196

第一章 岩石基本物理力学性质试验与分析

第一节 引言

在所有的岩石工程中,对岩体进行破碎与维护其稳定的两个方面,构成了工程岩石力学的一对基本矛盾。无论是破岩还是支护与加固,为了取得最佳经济效益和确保工程的安全可靠性,掌握岩石特性方面的知识是极为重要的。

固体力学的基本研究方法是根据外载条件和材料的力学性能推断物体的变形与破坏。岩石的力学性质主要取决于其矿物成分和结构与构造特征,同时还取决于其物理性质(如含水率、孔隙率等)。

工程岩体通常包含各种节理和由其分割的岩石单元(完整的岩石块体)。完整岩石试件的力学性质不仅取决于各种矿物的性质,而且取决于各种矿物的组合方式。有关这方面的资料,要从充分的岩石学方面的描述来提供,它们包括晶体、颗粒、胶结物、变异产物的矿物成分以及结构和构造(包括晶体、颗粒、孔隙和裂纹的大小、形状、分布和方位)。均质性和各向异性的程度是岩石力学性质的重要特征,它往往随所研究的岩石体积的尺度大小而异。例如,在片岩、片麻岩或其他叶理化岩石中,甚至微观尺度上,其基本性质也随方向不同而异,以致使小块试件的力学性质也受其影响。然而,在一般纹理化的沉积岩中,一个纹层之内的岩石可能是相对均质的;反之,如果包含纹层之间的分离面,则同一岩石也可能是相对各向异性的。

在决定测试岩石物理力学性质的试验方案时,所研究工程中的岩石相对尺寸是一个重要的影响因素。在岩石粉碎、研磨和钻凿等作业中,岩石的弱面通常并不是一个有意义的问题。然而,所研究的岩体是大规模的,其破坏面通常由弱面控制,则岩块的力学性质可能就显得并不十分重要。

事实上,关于岩石的力学性质的全部数据都来源于小型试验和有限规模的原位试验。人们试图通过数量上和体积上有限的试件试验,应用分析的方法确定不同载荷条件下岩体的强度和变形性状,以设法满足工程设计的要求。

试验标准化是岩石试验应该遵循的基本原则。众所周知,岩石试验的测试结果,既取决于岩石本身的性质,也受试件形态、测试条件和试验环境的影响,因此它只能是某种指定条件下的特征值。但由于岩石力学还是一门新兴的学科,在试验方法方面还不完善,目前各有关部门都制定了一些相应的试验规程。如中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会发布的《煤和岩石物理力学性质测定方法》(GB/T 23561—2009),中华人民共和国原地质矿产部颁发的《岩石物理力学性质试验规程》(DY—94),中华人民共和国水利部发布的《水利水电工程岩石试验规程》(SL 264—2001)等均属行业试验规程。国

际岩石力学学会(International Society for Rock Mechanics, ISRM)早在 1967 年就成立了专门的岩石实验室和现场试验标准委员会,编制了《室内和现场岩石力学试验建议方法》,并建议各会员国译成本国文本,以便在世界范围内推广试行。显然,这种在一定程度上标准化,并不意味着限制测试技术的发展与改进,而是力图最大可能地将相近试验条件下获得的试验成果进行广泛交流,并应用于工程实践中。

第二节 实验室试件样品及其制备

岩石试件的工程取样和样品制备是一项很细致的工作。采取样品必须能真实地反映岩体客观情况。通常,制备样品要比试验花费更多的时间。如果试验的结果很分散,则要有足够的试件才能满足试验要求。

一、样品选取

对选取样品进行性质测定是为了能反映岩体的客观实际,所以正确取样是一项十分重要的工作。一般地说,岩体是一种非均质体,从不同部位(包括同一岩层)采集的样品,其性质往往有很大差异,这就要求应当从岩体(层)的各个部位采取样品。若岩体的某些部位缺乏样品,则从试验结果计算得到的平均值会受到影响。

为了保证正确取样,要对岩体组成特征进行分析,并将矿物成分,胶结材料的性质、结构和风化程度等有显著差异的情况标绘在岩体剖面图上。在层状岩体中,层面是很容易识别的重要控制线。在煤系地层中,不同成分的岩石,其性质变化很大,而且也很容易用肉眼观察,并可把层面划分为不同的剖面。

叶理、节理、裂缝和其他不连续面的存在也应予考虑,并应沿岩体横剖面的这些区域分别采取样品。断层、岩脉和褶皱区域的岩石性质变化很大,出现这些构造时,也要引起足够的重视。

若样品取自工程母体或大块岩石,对于软弱岩石(如煤、页岩和岩盐等),要用专门的机具从岩体上切割;对于坚硬岩石,用彼此接触的排孔法钻取。制样时,要保持叶理或其他弱面不受扰动。当需要测定地下深部的岩石性质时,须采用金刚石钻钻取岩芯。

有时,采用爆破方法采取大的岩块。这种岩块受到爆破时产生的很强烈的冲击应力波的作用,其原生裂隙扩展,甚至产生某些新的微裂隙。在地下开采中,通常是从巷道或工作面采取小尺寸样品。采取这些样品比较容易,但其本质的缺陷是软弱部分易破裂成碎块,而通常取得的总是岩体中较强的部分。此外,采取的这些样品,往往很难说是代表哪一部分。况且由于采动影响,样品经受了高应力的作用。如果样品是从人工打碎的一块或几块岩石中采取,则可以克服某些不利影响。

应在现场采样记录图上标明所取样品在原来岩体中所处的部位和方向。

采好岩样后,用纸包好,标明编号,浸蜡整体封固。对于松软易吸水风化的样品,最好在現場立即包装封固。在运输样品过程中,需要注意的是不要过分震动,以免样品产生新的裂缝或使原有裂缝扩展。

二、样品制备

试验试件的形状可以分为三类:规则试件(圆柱体、棱柱体或立方体)、不规则试件和特

殊形状的试件。

在力学性质试验中,大多数规则试件是用薄壁钻头钻取成圆柱体,可制备成直径为1.3~15.0 cm的试件,典型试件的直径多采用2.5~5.0 cm。试件的高度是按照不同参数测定的要求,用圆盘锯将岩芯切割成所需要的高度。棱柱体试件的制备是用圆盘锯将样品先切割成板状,再切割成条状,最后加工成一定高度的棱柱体。在岩石很脆且强度很低的情况下,加工比较困难,此时可将样品浇铸到硬蜡中,硬化后再进行切割。

在对试件进行强度试验之前,须使试件端面符合试验标准的要求,这一点很重要。因为在加载过程中,会在试件端面的横沟和孔洞处形成应力集中,使试件在低载荷情况下发生破坏,从而导致试验失败。端面粗糙度对试验值的影响也比较大,且对高强度岩石的影响要比对软弱岩石的影响更为敏感。对于所有类型的岩石,试验结果的标准差都随试件表面结构的变化而增大。

粗糙的试件周边,必须修整光滑,特别是在用电阻应变片测变形时,这项工作会显得更为重要。试件上下端面应平行,且垂直于试件轴线。磨光试件上下端面是最好的方法,这样容易保证两端面垂直于试件轴线,而且其平行度可控制在合理界限之内。

通常,在钻、切和磨光等操作过程中,需要用冷却剂消散刀具在加工过程中产生的热量,否则极易损坏试件和刀具。水是最常用的冷却剂,在水对岩石性质有影响的情况下,可用压缩空气作为冷却剂,但冷却缓慢。刀具需经常调换,以便使刀具和样品能得到适当的冷却。此时,还要增加吸尘设备。

在制备不规则试件时,要用小锤轻敲去尖角,按照样品的质量选择其大小。

特殊形状的试件是根据专门的试验要求而制备的。如在直接拉伸试验中,考虑试件的夹持问题,要求加工成变直径试件。南非国立工程力学研究所岩石力学部采用的抗拉试验试件如图1-1所示。这种试件是在安装有金刚石砂轮的车床上完成的,用水作为冷却剂。

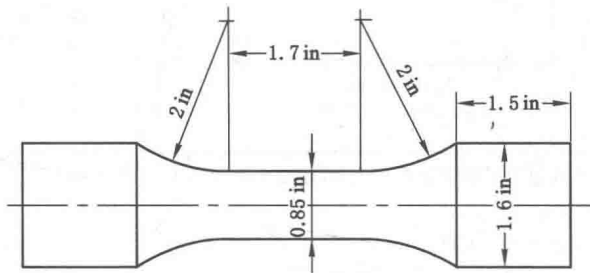


图1-1 南非国立工程力学研究所采用的抗拉试验样品

(1 in=25.4 mm)

圆环形试件是用于间接拉伸试验的一种试件,空心圆柱体试件是用于三轴强度试验的一种试件。这些试件的制作,是靠备有水冲洗功能的双层金刚石空心钻头在岩石样品上取芯来实现的。

在某些情况下,也采用球形试件,主要用于测定岩石在不同方向的某些力学性质。

三、试验样品的数量与试验标准

由于岩石的非均质性,单个样品试验结果不能说明岩体的情况。样品试验理论上不可

能得到绝对值,但大量样品试验结果会接近绝对值。然而,有限的试验费用不可能提供大量的试验结果,因此需要确定试验样品的最小数量。

确定试验样品的数量,必须考虑试验结果的波动幅度和平均值的精度与可靠性。波动幅度取决于岩石的非均质性和样品尺寸等。尺寸较小的样品往往显示出较大的偏差。实验室用小尺寸样品进行试验,相应的样品数量需要多些。

为了便于试验结果的比较,国际岩石力学学会陆续提出关于岩石试件的形状、尺寸、数量、加工精度、加载速度和加载时间的建议。有关岩石试件性质试验的主要内容见表 1-1。

表 1-1 国际岩石力学学会(1979年)有关岩石试件性质试验的建议表

项 目	单轴压缩	单轴拉伸		三轴压缩	
		直接	间接		
试件形状	圆柱体 ^①	圆柱体	圆柱体	圆柱体	
试件直径/mm	≥54 ^①	≥54	≥54	≥54	
高径比	2.5~3.0 ^①	2.5~3.0	0.5	2~3	
试件直径与最大粒径之比	10:1	10:1	10:1	10:1	
试件数量	≥5	≥5	≥10	≥5	
含水量	天然	天然	天然	天然	
保存天数/d	30	30	30	30	
加工精度要求	端面磨平度/mm	0.02 ^②	0.02	0.25	0.02
	轴线垂直度	0.001 弧度或 3.5", 或每 50 mm 不超过 0.05 mm	同左	0.25°	同单轴压缩
	侧面不平度/mm	≤0.3	≤0.1	厚度不平度 <0.025	≤0.3
加载速度/(MPa·s ⁻¹)	0.49~0.98	0.49~0.98	>200 N/s	0.49~0.98	
加载时间/min	5~10	5~10	>15~30 s	5~10	

注:① 中国煤炭、地质行业规定可采取直径为 50 mm,高径比为 1:(2~2.5)的圆柱体试件,也可采用尺寸为 5 cm×5 cm×5 cm 的立方体试件;

② 中国煤炭、地质行业规定不大于 0.1 mm。

试验结果如果以平均值给出,则衡量试验结果优劣的标准是离散系数。岩石的均质性比其他材料差,一般要求离散系数小于 15%~20%。实际工作中,为了获得可靠的试验结果,用 10 个或更多的样品确定岩石强度是可取的。

第三节 岩石的基本物理性质

岩石的物理性质指标不仅有其实用的物理意义,同时还有重要的力学意义。岩石材料结构中孔隙的存在降低了其强度,增加了它的变形性。一个小的孔隙会产生明显的力学效果。孔隙率变动范围很大的砂岩和碳酸盐岩,其力学性质也很悬殊。那些黏土含量高的松软岩石,在短期湿的或干的风化作用下,就容易膨胀松动或者崩解。

在试验中,为了有力地揭示岩石性质之间的内在联系及阐明物理和化学风化作用对改变岩石性质的规律性,采用同一试样测定多种物理力学指标是一种较好的方法。这样,不但能反映实际情况,还可以节省试样的数量。

一、岩石的密度

岩石的(真)密度是指单位实体体积(不包括孔隙)的岩石,在温度为 105~110 °C 下,干燥 24 h 后的质量,即

$$\rho = \frac{M^*}{V^*} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——岩石的密度, kg/m^3 ;

M^* ——实体岩石的质量, kg ;

V^* ——实体岩石的体积, m^3 。

岩石的密度仅取决于组成岩石的矿物成分,它与岩石的孔隙率和含水量无关。通常情况下,岩石的矿物成分被鉴定后,可以对其密度进行粗略估计。例如,石灰岩的密度与方解石的密度相近,砂岩的密度则接近于石英的密度。因此,那些含有密度较大的矿物的岩石,其密度一般就较大。沉积岩的密度一般在 $2.7 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 左右。表 1-2 给出了一些常见岩石的密度值。

表 1-2 几种常见岩石的密度和视密度

岩石名称	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	视密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
花岗岩	$(2.50 \sim 2.84) \times 10^3$	$(2.3 \sim 2.8) \times 10^3$
石灰岩	$(2.48 \sim 2.85) \times 10^3$	$(2.2 \sim 2.6) \times 10^3$
砂岩	$(2.60 \sim 2.75) \times 10^3$	$(2.0 \sim 2.6) \times 10^3$
页岩	$(2.57 \sim 2.77) \times 10^3$	$(2.0 \sim 2.4) \times 10^3$
煤		$(1.11 \sim 1.45) \times 10^3$

二、岩石的视密度

岩石的视密度是指单位体积岩石(包括孔隙)的质量,即

$$\rho_{\text{视}} = \frac{M}{V} \quad (1-2)$$

式中 $\rho_{\text{视}}$ ——岩石的视密度, kg/m^3 ;

M ——岩石的质量, kg ;

V ——岩石的体积, m^3 。

几种常见岩石的视密度见表 1-2。

岩石的视密度除与其矿物成分有关外,还与岩石的孔隙率和含水率有关。根据岩石试样含水状态的不同,岩石视密度可分为天然视密度、饱和视密度和干视密度三种,前两种称为岩石的湿视密度。天然视密度是指岩石在天然含水状态下的视密度;饱和视密度是指岩

石在吸水饱和状态下的视密度；干视密度是指岩石在 105~110 °C 温度下，干燥 24 h 后的视密度。

一般情况下，岩石的干视密度与湿视密度在数值上的差别并不大。但对某些黏土岩，区分干、湿视密度具有重要的工程意义。多孔性岩石（如浮石及其某些火山熔岩）孔隙率很高，其视密度可能小于 1 000 kg/m³，因而可浮于水上。在其他条件相同的情况下，通常岩石的视密度在一定程度上与埋藏深度有关，靠近地表的岩石，其视密度往往较小，而深层的岩石则致密并具有较大的视密度。

三、岩石的孔隙性

岩石的孔隙性是指岩石的裂隙和孔隙的发育程度，用孔隙率表示。所谓孔隙率，是指岩石中各种裂隙和孔隙体积的总和与岩石（包含孔隙）总体积之比，常用百分比表示，即

$$n = \frac{V_p}{V} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 n ——岩石的孔隙率，%；

V_p ——岩石中裂隙和孔隙的总体积，cm³；

V ——岩石的总体积，cm³。

根据以上定义，岩石的孔隙率可借助于密度和视密度通过计算求得，其关系式为

$$n = \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 ρ_T ——岩石的干视密度，kg/m³。

岩石的孔隙性有时也用孔隙比表示。孔隙比是指岩石中各种裂隙、孔隙体积的总和与组成岩石的固体矿物的实体积之比，可表示为

$$e = \frac{V_p}{V_s} \quad (1-5)$$

式中 e ——岩石的孔隙比。

孔隙比与孔隙率之间有如下关系

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-6)$$

一些常见岩石的孔隙率和孔隙比见表 1-3。

表 1-3 一些常见岩石的孔隙率和孔隙比

岩石名称	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

一般而言，随着孔隙率的增大，岩石的强度会有所削弱，而岩石的透水性会随之增强。

四、岩石的水理性质

1. 岩石的吸水性

岩石的吸水性,是指遇水不崩解的岩石在一定试验条件下(规定的试样尺寸、试验压力和浸泡时间)吸入水分的能力。岩石的吸水性可用自然吸水率和强制吸水率表示。自然吸水率,是指岩石试件在大气压力作用下吸入水分的质量与试件的干质量之比。强制吸水率,是指岩石试件在真空或加压(压力一般为 15 MPa)状态下吸入水分的质量与试件的干质量之比,也称为饱和吸水率。岩石的这两种吸水率可表示为

$$w = \frac{M_w}{M_d} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$w_{\text{sat}} = \frac{M_{w,s}}{M_d} \times 100\% \quad (1-8)$$

式中 w, w_{sat} ——岩石的自然吸水率和饱和吸水率, %;

M_w ——岩石试件在大气压力下吸入水分的质量, g;

$M_{w,s}$ ——岩石试件在强制条件下吸入水分的质量, g;

M_d ——岩石试件烘干后的质量, g。

表 1-4 给出了几种岩石的自然吸水率。

表 1-4 几种岩石的自然吸水率

岩石名称	吸水率 w /%	岩石种类	吸水率 w /%
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		

吸水率的大小,取决于岩石所含孔隙和裂隙的数量、大小、张开程度及其分布状态等,同时也受试验方法和浸水时间的影响。一般随着浸水时间的增加,吸水率也会有所增大;整体试件的吸水率要比同一岩石碎块试样的吸水率小。在工程应用方面,往往用吸水率指标来评价岩石的抗冻性能。当吸水率小于 0.5% 时,一般认为该岩石是耐冻的。由于吸水率能有效地反映岩石中孔隙的发育程度,因此它是评价岩石性质的一个重要指标。

2. 岩石的透水性

地下水存在于岩石的孔隙和裂隙中,而且大多数岩石的孔隙相互贯通,因而在一定压力作用下,地下水可以在岩石中通过(渗流)。岩石的这种能够被水透过的性能称为岩石的透水性。岩石透水性能的大小,除了与地下水水头压力和岩体应力状态有关外,还与岩石孔隙率、孔隙大小及其贯通程度和岩层构造等相关,而且后者为主要影响因素。

衡量岩石透水性的指标为渗透系数,其单位与速度相同。由达西定律 $Q = KAI$ 可知,单位时间内的渗水量 Q 与渗透面积 A 和水力坡度 I 成正比关系,渗透系数 K 为比例系数。渗透系数一般是通过在钻孔中进行抽水试验或者压水试验来测定。

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 1-5 给出了几种岩石的渗透系数。

表 1-5 几种岩石的渗透系数

岩石类型	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	备注
泥岩	10 ⁻⁴	现场测定
粉砂岩	10 ⁻⁸ ~10 ⁻⁹	实验室测定
细砂岩	2×10 ⁻⁷	实验室测定
坚硬砂岩	4.4×10 ⁻⁵ ~3.9×10 ⁻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	2~4	

3. 岩石强度的弱化性

某些岩石浸水后其强度往往会明显降低,通常用岩石强度弱化系数来表示水分对岩石强度的影响程度。所谓弱化系数,是指水饱和和岩石试件的单轴抗压强度与干燥岩石试件的单轴抗压强度之比,即

$$K_s = \frac{\sigma_{c,w}}{\sigma_c} \quad (1-9)$$

式中 K_s ——岩石强度的弱化系数;

$\sigma_{c,w}$ ——水饱和和岩石试件的单轴抗压强度,MPa;

σ_c ——干燥岩石试件的单轴抗压强度,MPa。

岩石浸水后其强度的弱化程度,与岩石中亲水性矿物和易溶性矿物的含量有关,也与岩石的孔隙发育程度、水的化学成分以及浸水时间等因素相关。表 1-6 给出了煤系地层中几种岩石的单轴抗压强度和弱化系数。

表 1-6 几种岩石的弱化系数值

岩石名称	干试件抗压强度/MPa	水饱和试件抗压强度/MPa	弱化系数 K_s
黏土岩	20.3~57.8	2.35~31.2	0.08~0.87
页岩	55.8~133.3	13.4~73.6	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

4. 岩石的膨胀性和崩解性

膨胀性和崩解性是松软岩石所具有的重要特性。岩石的膨胀性和崩解性主要取决于其胶结方式和组成矿物的亲水性。特别是黏土矿物(如蒙脱石、高岭土和水云母等)含量高的岩石,在短期湿的和干的风化作用下,很容易产生膨胀松动或崩解。岩石的膨胀和崩解作用,对地下工程的施工和维护都会产生极为不利的影响。因此,专门测定某些松软岩石在这方面的性能指标就显得非常重要。

岩石的膨胀性一般用膨胀应力和膨胀率来表示。

具有膨胀性的岩石试件浸水后,会发生物理变化和化学反应,且体积随时间增加而增

大。如图 1-2 所示,在岩石膨胀应力测定试验中,在试件底部和侧向都受到约束的条件下,在试件顶部施加约束载荷,使得试件的膨胀变形维持不变。此种情况下,用测得的试件最终的轴向膨胀压力(轴向约束载荷)除以试件的横截面积,就可得到岩石的膨胀应力,即

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-10)$$

式中 p ——岩石膨胀应力,MPa;
 P ——试件轴向最终膨胀力,N;
 A ——试件断面面积, mm^2 。

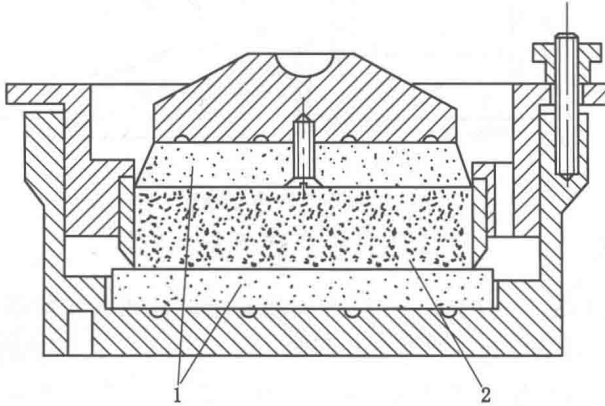


图 1-2 侧限膨胀试验模具组件及试件
 1——多孔板;2——试件

岩石膨胀率有非侧限膨胀率和侧限膨胀率之分。非侧限膨胀率,是指岩石试件浸水后,在无约束和非加载条件下,允许在轴向或侧向产生自由的膨胀变形。非侧限试件在每个测量方向上的膨胀率为

$$V_x = \frac{\Delta l}{L} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 V_x —— x 方向(如相对于层理或片理)的非侧限膨胀率;
 Δl —— x 方向上产生的最终膨胀位移量,mm;
 L —— x 方向上计量基准点之间的初始距离,mm。

非侧限膨胀率测定仅适用于在水解过程中几何形状不发生显著改变的岩石试样。对于耐久性差的岩石,以用侧限膨胀试验法为宜。

侧限膨胀率,是指浸入水中的岩石试件只受径向约束,在给定轴向压力条件下产生的轴向变形率。其计算表达式为

$$V_i = \frac{\Delta H_i}{H} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中 V_i ——在给定轴向压力 F_i 条件下岩石的侧限膨胀率;
 ΔH_i ——在给定轴向压力 F_i 条件下产生的最终膨胀位移量,mm;
 H ——试件初始高度,mm。

显然,当试件直径一定时,侧限膨胀率是轴向压力 F_i 的函数,随 F_i 的减小而增加。当 $F_i=0$ 时,为有侧限且无载荷条件下的膨胀率。