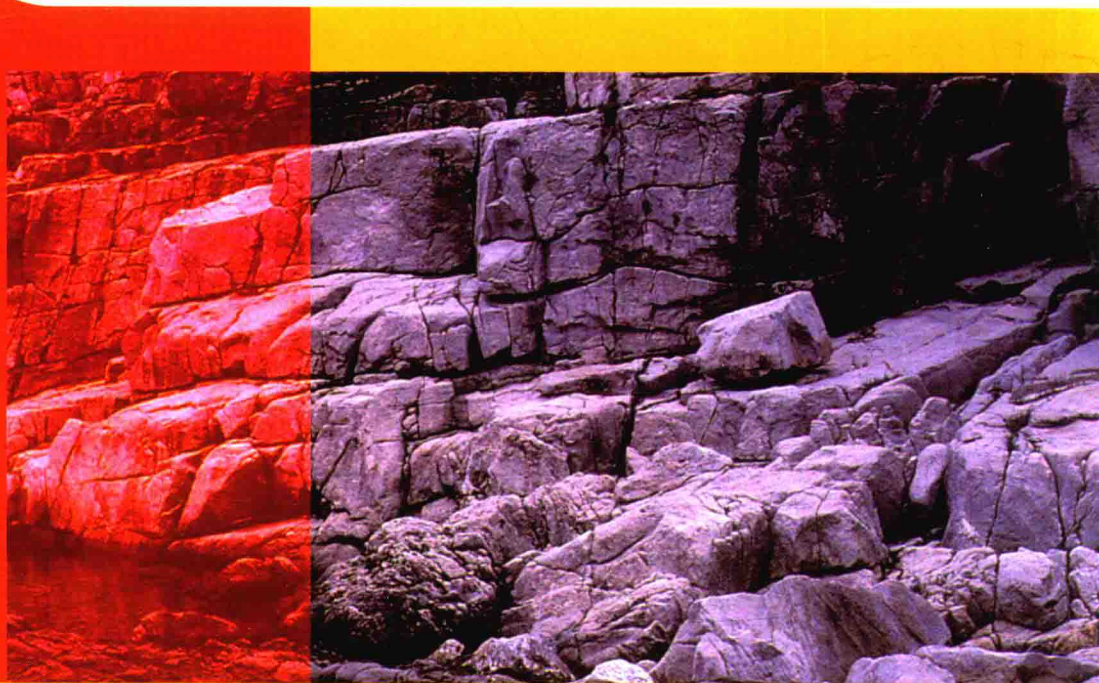


节理岩体损伤本构模型 及工程应用

刘红岩 张力民 苏天明 马平 张吉宏 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

节理岩体损伤本构模型 及工程应用

刘红岩 张力民 苏天明 马 平 张吉宏 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 简 介

本书系统介绍了节理岩体损伤力学试验、理论模型及其初步工程应用。全书共8章,分别介绍节理岩体损伤力学的发展现状及存在问题;节理岩体的静态、动态试验研究,包括单轴压缩试验、SHPB试验及摆锤式冲击试验等;基于统计损伤模型的贯通节理岩体静态、动态损伤本构模型;基于元件模型的贯通节理岩体静态、动态损伤本构模型;基于TCK模型的贯通及非贯通节理岩体动态损伤本构模型;节理岩体静态损伤本构模型在边坡溃屈破坏分析及在岩体强度分析中的应用;非贯通节理岩体动态损伤本构模型在地下矿山矿柱尺寸设计中的应用等内容。

本书可供具有一定力学基础且从事岩体力学研究工作的技术人员学习参考,也可供高等院校岩土工程相关专业的教师及研究生等参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

节理岩体损伤本构模型及工程应用/刘红岩等著. —北京:
冶金工业出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5024-7198-9

I. ①节… II. ①刘… III. ①节理岩体—损伤(力学—
岩土力学模型—研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第039499号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 徐银河 美术编辑 吕欣童 版式设计 杨 帆

责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7198-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016年3月第1版,2016年3月第1次印刷

169mm×239mm;14.25印张;277千字;217页

49.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

近年来,随着人类工程活动的日益频繁,涉及岩体的工程活动也越来越多,如岩体边坡、地下硐室、采矿巷道、石油及地下水资源开发等工程,在静载及动载下的力学响应问题一直是科学家和土木工程师最关心的问题。如何定量评价和预测人类工程活动及地震等外力作用对岩体工程的影响,一直是国内外岩石力学与工程界所关注的重要研究课题。而上述问题的解决都离不开一个重要的核心问题,即节理岩体静态及动态损伤本构模型的建立。

自然界中的岩体是包含了微观、细观到宏观等多种不同尺度缺陷的天然损伤地质材料,上述缺陷均会从不同侧面对岩体的静态及动态力学特性产生影响。目前学术界已认为损伤力学是研究含微裂纹等细观缺陷的岩石材料在外载下力学响应的有利工具,并提出了岩石损伤力学的学术观点。实际工程岩体几乎都含有数量众多、规模中等的宏观缺陷即节理,而如何描述这些节理对岩体力学特性的影响是目前亟待研究的一个重要课题。目前尽管也有不少学者采用损伤理论对其进行研究,但是仍处于发展阶段,还很不完善。为此,本书主要基于岩体是同时包含宏观、细观等多种不同尺度缺陷的复合损伤地质材料的观点,并采用损伤耦合理论对节理岩体的静态、动态力学行为进行描述。

本书共分为8章,分别介绍了节理岩体损伤力学的发展现状及存在问题;节理岩体的静态、动态试验研究,包括单轴压缩试验、SHPB试验及摆锤式冲击试验等;基于统计损伤模型的贯通节理岩体静态、动态损伤本构模型;基于元件模型的贯通节理岩体静态、动态损伤本

构模型；基于 TCK 模型的贯通及非贯通节理岩体动态损伤本构模型；节理岩体静态损伤本构模型在边坡溃屈破坏分析及在岩体强度分析中的应用；非贯通节理岩体动态损伤本构模型在地下矿山矿柱尺寸设计中的应用等内容。

书中的很多内容为国家自然科学基金项目（41002113/41162009）、教育部科学技术研究重点项目（211175）、中央高校基本科研业务费专项资金项目（2010ZY45/2652014019/2652015263）和国家留学基金项目研究成果，在此深表谢意！

本书在编写过程中还得到了袁小平、邢闯锋、刘冶、黄妤诗、邓正定、阎锡东、李超、袁小清、李俊峰、夏超、张亚东、裴小龙、朱晓鹏、李凯、侯思雨、冯鑫、何健等诸位博士及硕士的帮助，谨此表示感谢！感谢河南理工大学土木工程学院的王新生副教授在试验研究中给予的大力支持和帮助！

由于节理岩体损伤力学是一门正在发展的边缘性交叉学科，有许多理论和实际应用问题仍需要进一步地探索和研究，加之作者水平及经验有限，书中不妥之处恳请前辈及同仁不吝赐教。

作 者

2016 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 岩体动态、静态力学特性试验研究进展及评述	4
1.2.1 岩体静态力学特性的试验研究进展	4
1.2.2 岩体动态力学特性的试验研究进展	12
1.2.3 研究评述	16
1.3 岩体动态、静态损伤本构模型研究进展及评述	16
1.3.1 岩体静态损伤本构模型研究进展	17
1.3.2 岩体动态损伤本构模型研究进展及评述	23
1.3.3 研究评述	30
1.4 岩体动态、静态损伤数值计算研究进展及评述	31
1.4.1 岩体静态损伤数值计算研究进展	31
1.4.2 岩体动态损伤数值计算研究进展	32
1.4.3 研究评述	32
1.5 本书的主要内容	33
2 节理岩体力学特性的试验研究	35
2.1 引言	35
2.2 节理岩体静态单轴压缩试验	36
2.2.1 试验概况	36
2.2.2 试验结果及分析	38
2.2.3 试验结论	47
2.3 同时考虑宏观、细观缺陷的节理岩体静态单轴压缩试验	48
2.3.1 试验概况	48
2.3.2 试验结果及分析	49
2.3.3 试验结论	52
2.4 节理岩体动态 SHPB 试验	53
2.4.1 试验概况	53

2.4.2	试验结果及分析	55
2.4.3	试验结论	64
2.5	石灰岩节理试件动态 SHPB 试验	65
2.5.1	试验概况	65
2.5.2	试验结果及分析	67
2.5.3	试验结论	76
2.6	节理岩体动态摆锤式冲击试验	77
2.6.1	摆锤式冲击试验原理及试验方案	77
2.6.2	试验结果及分析	78
2.6.3	试验结论	82
3	基于统计损伤模型的贯通节理岩体损伤本构模型	83
3.1	引言	83
3.2	岩石损伤统计本构模型	84
3.2.1	岩石微元强度准则	86
3.2.2	岩石微元强度随机分布函数及相应的损伤模型	87
3.3	节理岩体损伤介质力学模型	90
3.3.1	损伤张量的定义	90
3.3.2	损伤演化方程	93
3.3.3	含损伤的本构方程	94
3.4	考虑宏观、细观缺陷耦合的节理岩体静态损伤本构模型	96
3.4.1	宏观、细观缺陷耦合损伤变量计算方法	96
3.4.2	岩体静态损伤本构模型的建立	100
3.4.3	算例分析	100
3.5	含单条贯通节理的岩体单轴压缩损伤本构模型	106
3.5.1	贯通节理岩体的破坏机理分析	107
3.5.2	贯通节理岩体损伤变量的计算	108
3.5.3	考虑宏观、细观缺陷耦合的贯通节理岩体单轴压缩损伤 本构模型	110
3.5.4	算例分析	111
3.6	考虑宏观、细观损伤耦合的贯通节理岩体动态损伤本构模型	113
3.6.1	本构模型的建立	114
3.6.2	参数确定	114
3.6.3	算例分析	115

4 基于元件模型的贯通节理岩体损伤本构模型	117
4.1 引言	117
4.2 元件模型理论	117
4.2.1 结构体变形机制元件	118
4.2.2 结构面变形机制元件	119
4.3 贯通节理岩体单轴压缩静态损伤本构模型	121
4.3.1 基于岩块和节理变形组合的岩体压缩变形本构方程	121
4.3.2 算例分析	123
4.4 贯通节理岩体三轴压缩静态损伤本构模型	126
4.4.1 三轴压缩下岩块与节理面的变形本构方程	126
4.4.2 算例分析	129
4.5 考虑节理剪切强度的贯通节理岩体单轴压缩静态损伤本构模型	130
4.5.1 考虑节理剪切强度对模型的修正	130
4.5.2 算例分析	131
4.6 考虑节理剪切强度的贯通节理岩体动态单轴压缩变形本构模型	133
4.6.1 本构模型的建立	133
4.6.2 本构模型的参数确定方法	135
5 基于 TCK 模型的贯通节理岩体动态损伤本构模型	137
5.1 引言	137
5.2 岩石细观动态损伤本构模型	138
5.2.1 基于 TCK 的岩石细观动态损伤本构模型	138
5.2.2 算例分析	140
5.3 基于宏观、细观缺陷耦合的贯通节理岩体复合损伤张量	143
5.3.1 贯通节理岩体细观损伤变量	143
5.3.2 贯通节理岩体宏观损伤张量	144
5.3.3 贯通节理岩体宏细观缺陷耦合损伤变量	144
5.4 基于宏观、细观缺陷耦合的贯通节理岩体动态损伤本构模型	144
5.4.1 基于 TCK 模型的岩体动态损伤本构方程	144
5.4.2 算例分析	145
5.4.3 模型验证	149
6 基于 TCK 模型的非贯通节理岩体动态损伤本构模型	151
6.1 引言	151

6.2 单轴压缩下非贯通节理岩体宏观损伤张量计算	151
6.2.1 非贯通节理岩体单轴压缩荷载作用方向上的损伤变量计算	152
6.2.2 应力强度因子计算	153
6.2.3 损伤变量的张量化	155
6.2.4 算例分析	156
6.3 双轴压缩下非贯通节理岩体宏观损伤张量计算	159
6.3.1 非贯通节理岩体双轴压缩荷载作用方向上的损伤变量计算	159
6.3.2 应力强度因子计算	160
6.3.3 算例分析	161
6.4 考虑宏细观缺陷耦合的非贯通节理岩体动态损伤本构模型	165
6.5 非贯通节理岩体弹性矩阵的确定	165
6.6 算例分析	169
6.6.1 含单组非贯通闭合节理的岩体力学特性	169
6.6.2 载荷应变率对岩体动力学特性的影响	170
6.6.3 节理内摩擦角对岩体动力学特性的影响	170
6.6.4 节理法向及切向刚度对岩体动力学特性的影响	171
6.6.5 节理厚度对岩体动力学特性的影响	172
6.6.6 节理倾角对岩体动力学特性的影响	172
6.7 模型验证	174
7 综合考虑宏观、细观缺陷的岩体静态破坏机理及强度分析	176
7.1 引言	176
7.2 综合考虑宏观、细观缺陷的岩体破坏机理	177
7.2.1 岩体材料破坏现象及破坏机理	177
7.2.2 直立层状岩质边坡溃屈破坏机理研究	179
7.2.3 顺倾层状岩质边坡溃屈破坏机理研究	186
7.3 综合考虑宏观、细观缺陷的岩体强度分析	187
7.3.1 仅考虑宏观缺陷时的岩体强度分析	187
7.3.2 综合考虑宏观、细观缺陷时的岩体强度分析	190
8 考虑采矿爆破荷载的地下矿山矿柱尺寸设计	192
8.1 引言	192
8.2 石人沟铁矿地下开采工程简介	193
8.2.1 矿山概述	193
8.2.2 矿山地质概况	193

8.2.3 矿体开采总体设计	194
8.2.4 采场爆破设计方案	195
8.3 考虑爆破动荷载时的矿柱尺寸设计	196
8.3.1 动载荷作用下完整矿柱尺寸计算方法	197
8.3.2 动载荷作用下含非贯通节理的矿柱尺寸计算方法	199
参考文献	200

1 绪 论

1.1 引言

随着人类社会的发展岩体工程显得日趋重要,岩体是自然界最重要的构成要素之一。认识岩体材料,利用岩体材料,研究岩体材料与人类工程活动之间的相互作用等日益成为当今工程建设中的重大问题,涉及矿山开采、水利水电、环境评估、地质灾害、交通运输等国民经济的众多领域。尤其是近年来随着国民经济的迅猛发展,我国水电、交通、铁道、能源、矿山、国防等领域的基础设施建设进入高速发展期,出现一大批规模宏大、地质条件极为复杂的重大工程,如南水北调、西气东输、西电东送等。与此同时,世界范围内的岩体工程也达到了前所未有的规模,如目前国际上已建和正建的大坝,最大高度超过 300m,地下洞室的最大开挖跨度超过 50m,矿山开采深度超过 4000m,边坡垂直高度达 1000m,石油开采深度超过 9000m,深部核废料处理需要考虑的时间效应至少为 1 万年,研究地壳形变涉及的深度达 50~60km、温度在 1000℃ 以上、时间效应为几百万年^[1,2]。今后,随着能源、交通、环保、国防等事业的发展,更为复杂、巨大的岩体工程将日益增多。同时岩体承受的荷载也越来越复杂,不但包括自重、上部建筑物荷载等静态载荷,而且还经常承受冲击、爆破、地震等动态载荷,例如岩体爆破开挖及其对周围建(构)筑物的影响;地震条件下岩体工程的稳定性问题;深埋岩体工程在开挖过程中产生的岩爆问题;国防领域中的岩体防护工程在高速弹体作用下的侵彻问题等,所有这些问题均涉及岩体的动态特性。已有研究表明^[3~6],在动载下岩体承受的是快速变化的外载荷,会表现出很强的动态特性,这与其静态力学特性、破坏模式等存在很大区别。一方面导致岩体的力学参数与静态时相比有很大变化,如弹性模量增加、强度提高及泊松比减小等;另一方面岩体破坏模式也更加复杂。翟越等人^[7]通过研究认为随着应变率的增加,岩体的抗压强度明显提高,破碎程度明显增大,表现为碎块数量的增加和尺寸的减小,如图 1.1 所示。

但与此同时,国际上的岩体工程事故也屡见不鲜,其中最著名的是 20 世纪下半叶发生的 3 次震惊水利水电工程界的重大工程事故^[8]:法国 Malpasset 双曲拱坝溃坝、意大利 Vajont 双曲拱坝近坝库区左岸发生 2.5 亿立方米的大滑坡和美国 Teton 土坝在岩基坝段溃决。目前的调查结论认为,上述工程事故的主要原因是岩体中的断层和裂隙在水压力或渗流力的作用下扩展促成的。由此可见,正确

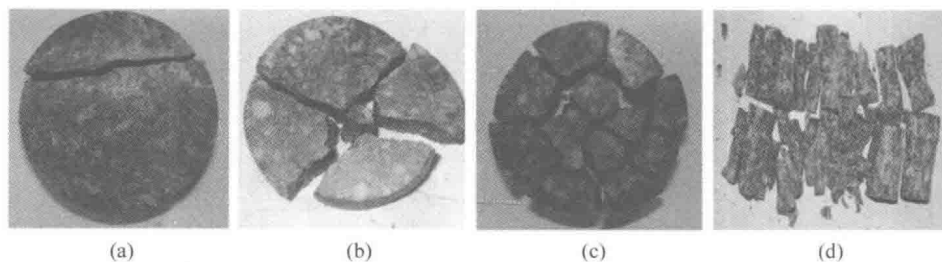


图 1.1 花岗岩在不同应变率下的冲击破碎形式

(a) 应变率: 50/s; (b) 应变率: 75/s; (c) 应变率: 97/s; (d) 更高的应变率

认识岩体的结构特征及其在外力作用下的变形、破坏及失稳机理对保证工程结构的安全运行有着至关重要的作用。

岩体是由众多规模不一、产状不同的结构面纵横切割而成具有一定结构的地质体,它包括了从微观到细观直至宏观的各种尺度缺陷。结构面是岩体中没有或具有低抗拉强度的力学不连续面的总称,岩体中的结构面对岩体的变形和破坏起着控制作用。本书把除大型断层以外对岩体力学特性有影响的结构面,如节理、裂隙、层理和其他软弱结构面统称为节理,对包含节理的工程岩体则称为节理岩体。与一般的工程材料相比,岩体最大的特点是具有结构上的不连续性,即包含由于长期反复地质构造作用而形成的节理面。这些节理面根据有无充填可分为刚性节理和充填节理,根据力学成因又可分为剪节理和张节理等。节理面的空间状态及其表面形态对两侧岩体相互作用影响也很大,不同岩体所处地质环境也不一样。因此,节理的存在导致岩体变形特征和破坏机理都极其复杂,而且多半都是高度非线性或黏弹塑性的。

人们对岩体的认识也是有一个过程的。早期是把孤立完整的岩石试件作为研究对象,直接利用从材料力学研究中发展起来的连续介质力学理论进行研究(见图 1.2 (a))。但由于材料力学假设材料是各向同性的均匀介质,而岩石是一种天然的地质材料,即使是宏观上相对完整的岩石试件在显微镜下也可以看到其组织远非均匀,更不可能是各向同性的。因此针对岩石中存在的微裂纹、微孔洞等细观缺陷,不少学者又提出了损伤力学的方法,即把岩石中存在的天然微裂纹作为一种损伤^[9~11],把岩体看作是一种含有初始损伤的材料(见图 1.2 (b))。而对于岩体中存在的个别规模较大的节理或断层,则通常采用节理单元或接触摩擦单元来考虑其力学行为,对其余部分仍采用连续介质力学方法来考虑(见图 1.2 (c))^[12,13]。而对于存在着大量节理且每一条节理对岩体力学性能的影响又不可忽略时(见图 1.2 (d)、图 1.2 (e)),如果采用有限元方法用节理单元模拟每一个节理,由于庞大的网格生成工作量,则几乎是不可能的。因此对于这种情况,基于采用的理论方法不同,目前也主要分为两大类:一类是基于连续介质力

学的方法,即把这些节理看作是岩体内部的一种宏观损伤,采用损伤理论进行研究,如 Kyoya 和 Kawamoto 等人^[14]将损伤力学应用于节理岩体,建立了节理岩体的初始损伤张量,提出了损伤的扩展方程及计算损伤场的有限元方法。该方法的提出对损伤力学应用于节理岩体力学特性的研究具有开创性意义。另一类是基于离散介质力学的方法,即把被节理切割的岩体看作是非连续介质,进而采用非连续介质力学的方法研究其力学行为,如 Cundall^[15]和石根华^[16]等人分别提出了离散单元法和非连续变形分析方法来解决这类岩体的力学行为。尽管这两类方法在节理岩体力学特性分析中都有一定的成功应用,但是两者的应用范围还是有一定区别的,如节理岩体损伤力学模型是一种基于连续介质力学的模型,其主要应用于含有众多宏观节理的岩体边坡及地下硐室等在外力作用下的强度及小变形问题研究,即变形范围仍基本属于连续介质力学范畴;而基于离散介质力学的分析方法则主要是研究被节理切割成块体的岩体在爆炸、冲击等荷载作用下发生的块体转动、分离甚至抛掷、飞散等非连续变形问题,但是其不太适用于连通率低的节理岩体。本书主要是对前者进行研究,因而采用基于连续介质力学的节理岩体损伤力学方法。

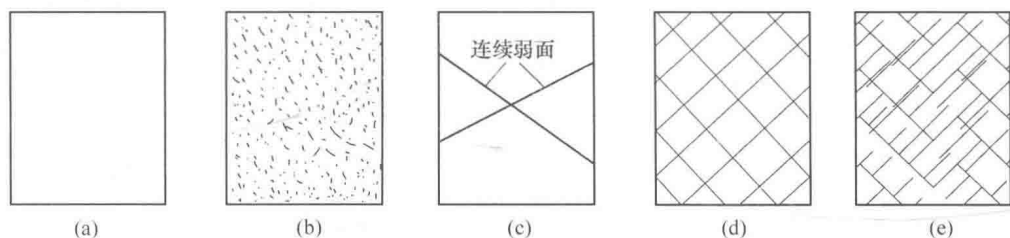


图 1.2 岩体结构及其力学模型

(a) 均匀介质; (b) 损伤介质; (c) 含少数节理; (d) 含成组节理; (e) 含断续节理 (随机分布节理)

节理岩体损伤力学的主要研究内容是基于损伤力学基本原理寻求准确反映其应力应变关系的本构模型和强度准则,进而利用相应的研究成果解决岩体工程中遇到的强度、变形及稳定性等问题。近年来,随着岩体力学理论和工程实践的不断发展,岩体损伤力学的研究取得了长足发展^[17~24]。然而由于问题的复杂性,尽管目前已经提出了较多的节理岩体损伤本构模型,但仍无一个公认的能够很好地客观反映节理岩体力学特性的本构模型,因而迫切需要对该问题进行更为深入的研究。同时当前损伤力学与断裂力学的迅速发展以及数值计算技术的提高,也为节理岩体力学研究带来了前所未有的发展空间。

为此,本书拟基于试验力学、岩体力学、损伤及断裂力学等对节理岩体的变形及破坏机理进行深入研究,期望能够针对不同的岩体结构特征建立更为合理的节理岩体静、动态损伤本构模型。本书的研究不仅是对现有节理岩体损伤模型的进一步发展与完善,而且更是基于当前大规模岩体工程建设的迫切需要,因而具有十分重要的理论价值和广泛的工程应用背景。

1.2 岩体动态、静态力学特性试验研究进展及评述

试验研究是进行岩体损伤本构模型和数值计算研究的基础,同时由于岩体是一种非均匀、非连续的材料,其力学特性很难直接通过理论分析及数值方法获得,因此通过试验方法研究岩体的力学特性则具有十分重要的意义。首先根据有无节理面,岩体可分为完整岩石和节理岩体。一方面由于人们对岩石材料的试验研究开展得较多,目前很多节理岩体的力学试验方法都是由岩石材料试验方法发展而来;另一方面由于节理岩体中的绝大部分组成成分仍为岩石材料,因此岩石材料的力学性质在一定程度上影响着节理岩体的力学性质。所以首先对岩石材料的试验研究进展情况进行回顾,进而探讨节理岩体的试验研究进展情况;其次,根据表 1.1 所示的荷载应变率的不同,岩石力学试验又可以分为静载试验和动载试验。为此,下面拟从上述几个方面对岩体力学特性的试验研究进展进行回顾与评述。

表 1.1 荷载应变率等级分类^[6]

荷载状态	$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	试验方式	动静态区别
蠕变	$<10^{-5}$	蠕变试验机	惯性力可忽略
静态	$10^{-5} \sim 10^{-1}$	普通试验机和刚性伺服试验机	
准动态	$10^{-1} \sim 10^1$	气动快速加载机	惯性力不可忽略
动态	$10^1 \sim 10^4$	Hopkinson 压杆及其变形装置	
超动态	$>10^4$	轻气炮、平面波发生器	

1.2.1 岩体静态力学特性的试验研究进展

1.2.1.1 岩石材料静态力学特性试验研究进展

压缩荷载下的岩石变形问题已在很多文献中有所描述^[25,26]。图 1.3 是典型的岩石压缩应力-应变曲线及其相关性质的变化规律,该应力-应变曲线可分为 5 个不同的变形阶段。阶段 I 即 OA 段,曲线向上凹,代表着岩石内部微裂纹的闭合。这是典型的多孔弹性介质的变形行为,但是由于局部破坏和压碎导致其中一部分变形不可恢复^[27]。其后是近似线弹性阶段 II 即 AB 段。从 B 点开始有非弹性应变出现,这也标志着阶段 III 的开始。在该阶段,杨氏弹性模量几乎保持为常数,但是泊松比开始有所增加。在单轴压缩实验中,阶段 III 通常在轴向应力约达到单轴抗压强度 C_0 的 50% 时开始,通常实验观察到的 B 点应力一般为 (30~70)% C_0 ,在该阶段将有一些微裂纹产生,但几乎没有扩展。在阶段 I、II 中几乎没有出现的声发射现象在此阶段也开始出现,然而数量还相对较少。随着应力

的继续增加,试件的声波波速开始下降,但是其下降的幅度还不是很大^[25],电阻系数也呈现出同样的变化规律。裂纹尺寸也仅局限于大约构成岩石的矿物颗粒大小^[28],并且裂纹通常出现在矿物颗粒内部且其扩展方向近似平行于最大主应力 σ_1 的方向。该阶段有时被称为裂纹的稳定扩展阶段,此时试件的总体力学行为受微裂纹的影响变化较小。

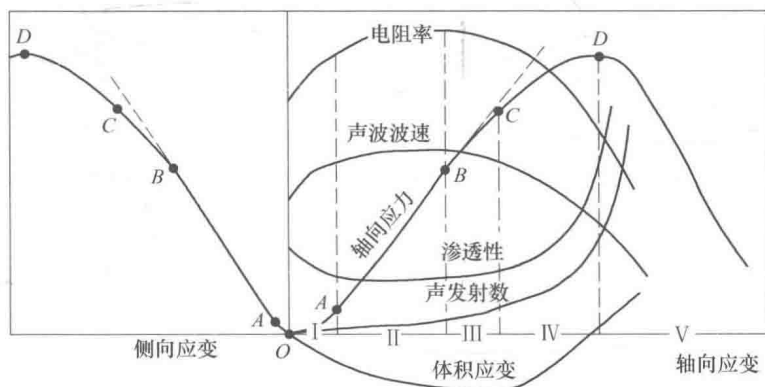


图 1.3 岩石试件压缩变形阶段

当应力继续增加到 $(50\% \sim 90\%) C_0$,对单轴压缩试验来说约为 $75\% C_0$ 时,曲线将进入阶段Ⅳ即 CD 段。从 C 点开始,应力-轴向应变曲线将明显偏离线性,并且侧向应变也快速增加。同时还可以观察到,在该应力值附近,体积应变开始逆转,标志着试件由压缩变形进入相对侧向膨胀变形。同时声发射数增加、波速及电阻系数的显著下降等也都表明了试件内部裂纹数的增加。进入阶段Ⅳ(有时也被称为裂纹非稳定扩展阶段)后,将会出现沿裂纹面的滑移,进而由于已有裂纹的闭合而出现更大的裂纹。然而同阶段Ⅲ类似,在该阶段试件内裂纹的分布也比较均匀^[28]。只有当应力达到峰值强度点 D 时,才能观察到更大的裂纹和应变局部化现象^[29]。峰值点 D 代表了试件在加载条件下所能承受的最大应力值。同时因为该点的应力值通常会受到试件尺寸、载荷速率等多种因素的影响,因此过了 D 点后,曲线将进入峰后强度阶段,此时试件将变得不连续,且其响应也取决于加载系统的性质。

图 1.3 是岩石在压缩荷载作用下的典型曲线,但是由于岩石种类繁多、试验条件不尽相同,因此不同学者得出的岩石压缩试验结果也有所差异,下面主要从 3 个方面对岩石压缩试验研究现状进行回顾。

A 岩石试件力学性质的尺寸效应

尺寸效应是该问题研究中的一个热点。Hudson J A 等人^[30]首次利用简单的试验设备观测到岩石受压试件随高度的增加承载能力降低,显示出岩石破坏的尺寸效应,但并未对其进行更为深入的研究。Rilem T C^[31]对混凝土的尺寸效应进

行了详细的试验研究,得出试件受力随着细长比的减小而增加;Bazant Zdenek P 等人^[32]以简单的基于断裂力学的受压破坏模型为基础,对准脆性材料的尺寸效应进行了理论探讨。而后 Bazant Z P 等人^[33]对结构破坏的尺度律和尺寸效应的研究进行了详细回顾,认为准脆性材料强度的随机性应该是引起尺寸效应的重要原因。尤明庆等人^[34~36]通过岩石压缩试验对这一问题进行了大量的研究,他认为尺寸效应是指大量形状和大小完全相同的岩样,其强度平均值具有随着直径或边长的增大而减小的规律,而且尺寸效应不仅体现在强度的平均值上,而且还体现在强度的离散性上^[35]。同时通过对直径相同而长度不同的大理岩试件的单轴压缩试验,发现试件强度随长度减小而增加,而使用柔性垫片时强度则随着长度的减小而减小,认为试件强度不仅与其尺寸有关,而且还受端部摩擦效应影响^[34]。刘宝琛等人^[37]在对 7 种岩石的抗压强度试验基础上,提出了岩石抗压强度尺寸效应的经验公式(见式(1.1)):

$$\sigma_c = \gamma_c + \alpha_c \exp(-\beta_c D) \quad (1.1)$$

式中 σ_c ——受力断面边长(长方柱岩体)或受力断面直径(长圆柱岩样)为 D (单位为 cm)的岩样的单向抗压强度,MPa;

$\alpha_c, \beta_c, \gamma_c$ ——取决于岩石性质及其中天然缺陷状态的待定常数。

理论上,当 $D \rightarrow \infty$ 时,岩样强度 σ_c 趋于岩体强度 σ_m , 即 γ_c 。

潘一山等人^[38]通过对直径相同而高度不同的一组粉砂岩试件的压缩试验,提出了岩石破坏应变软化的尺寸效应,认为试件尺寸对岩石峰值强度前的变形几乎没有影响,但对峰值后的应变软化影响显著,即随着试件高度的增加,超过峰值强度后的曲线下降越陡,并用梯度塑性理论进行解析分析,验证了岩石应变软化尺寸效应的存在。王学滨等人^[39]也利用剪切梯度塑性理论,建立了单轴受压下岩样尺寸效应的塑性剪切应变梯度模型。杨圣奇等人^[40]通过对同直径而不同长度的大理岩试件的单轴压缩试验,认为岩石长度对峰值应力前的变形特性没有显著影响,但明显改变峰后的变形特性,长度越大的试样,峰后越脆,这与潘一山等人^[38]的结论基本一致。同时他还发现当直径一定时随着长度增大,试件破坏形式由竖向劈裂变为剪切破坏,岩石材料强度的长度效应是由岩样端部摩擦效应所致,而并非根源于材料的非均匀性。杨友卿^[41]将损伤力学与分形几何理论相结合起来,定量分析了岩石强度的尺寸效应。李宏等人^[42]根据统计细观和系统结构的观点和方法,从理论上探讨了岩石稳定变形以及失稳破坏时的两种尺寸效应机理。杨圣奇等人^[43]基于岩石应变强度理论和岩石强度服从随机统计分布的假设,采用损伤力学理论建立了单轴压缩下考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型,从理论上探讨了岩石强度的尺寸效应。洪亮等人^[44]对岩石动态强度的尺寸效应进行了研究,认为在相同的应变率加载条件下,岩石动态强度随试件尺寸的增大而增加,与静载条件下岩石强度的尺寸效应相反;岩石动态强度的尺寸效

应随着应变率的降低而减弱,并由此推断存在一个对应岩石尺寸效应消失的临界应变率。Tang C A 等人^[45]对岩石材料单轴抗压强度尺寸效应进行了数值模拟研究,并得出强度随尺寸增大而呈幂率减小。吕兆兴等人^[46]在上述研究的基础上,通过数值模拟方法研究了非均质参数 m 对岩石材料强度尺寸效应的影响,提出尺寸效应影响参数 η ,其值越大尺寸效应越明显。张明等人^[47]基于最弱链模型和缺陷的泊松分布假设,综合体积和材质因素,建立准脆性材料破坏概率和强度尺寸效应的统计模型和一般表达式;得出物体的破坏概率随体积单调增加,强度随体积单调减小,无缺陷材料则没有尺寸效应的结论;并利用典型岩石强度试验结果验证其适用性。王家来等人^[48]基于通过建立单轴压缩情况下含裂纹岩石试件的功能平衡方程,运用概率统计的方法,推导了岩体弹性模量尺度效应的表达式,揭示了岩体弹性模量尺度效应的内部结构本质。陈瑜等人^[49]通过贫矿和白云石大理岩试样的单轴压缩试验表明,岩石的变形模量和弹性模量随高径比的增大而呈现非线性增大;在小高径比时岩石的破裂形式较复杂,在大高径比时,呈劈裂破坏和剪切破坏;岩石的抗压强度随高径比的增大呈增大趋势。这一结论与目前大多数研究结论相反。倪红梅等人^[50]采用数值模拟的方法对同直径不同长度的试件进行计算,结果表明:岩石强度的长度效应根源于端面摩擦效应,并非根源于材料的非均质性。靖洪文等人^[51]的单轴及三轴压缩试验表明:随岩样高径比的增大,单轴强度的衰减值不断减小,但减小的趋势逐渐平缓,并提出单轴强度衰减的理论模型(见式(1.2)):

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0(a + b/\lambda) \quad (1.2)$$

式中 $\Delta\sigma$ ——任意损伤岩样的单轴强度衰减值;

$\Delta\sigma_0$ ——标准损伤岩样的单轴强度衰减值;

λ ——圆柱体岩样的高径比;

a, b ——材料参数。

另外还有其他很多学者对该问题进行了较为深入的研究。

总之,由前人的研究成果可以看出,尺寸效应对岩石强度及变形的影响机理是十分复杂的,而且目前仍没有一个统一的认识,甚至不同研究者得出的结论可能是正好相反的。不过有一点可以肯定的是,尺寸效应对岩石力学性质肯定是有影响的,至于其影响机理则还需要更为深入的研究。

B 试验条件对试件强度的影响

试验条件主要是指加载速率及加载边界条件等试验加载条件,其中加载速率(或材料应变率)是影响岩石类脆性材料强度的重要因素。李海波等人^[53]对软岩(砂浆模拟材料)进行了应变速率范围为 $10^{-5} \sim 10^1/\text{s}$ 的动单轴压缩实验,结果表明:试样的抗压强度随应变速率的增加有较明显的增加趋势,且增加幅度大于硬岩。另外,还有许多学者^[54~59]从多个方面证明了岩石强度随着应变率的增