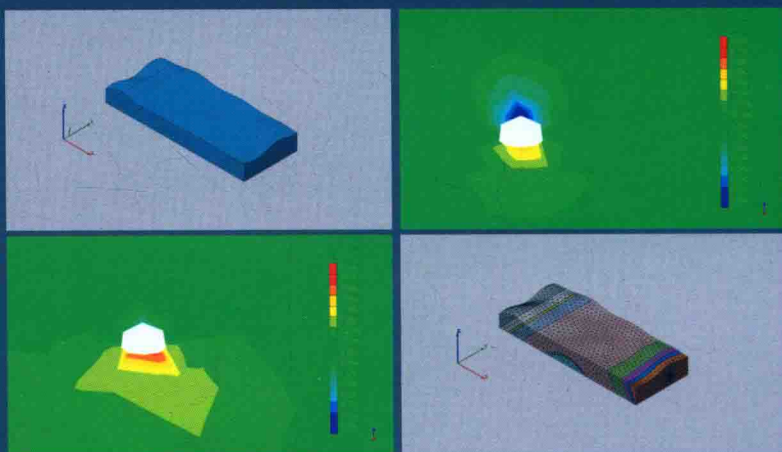


地下工程

岩土变形破坏机理与控制

Mechanism and Control Techniques
of Geotechnical Deformation and Failure in Underground Engineering

陈洪凯 姚光华 王林峰 李少荣 著
廖云平 杨 乐 任秀文 文光菊



科学出版社

地下工程岩土变形破坏机理与控制

陈洪凯 姚光华 王林峰 李少荣
廖云平 杨 乐 任秀文 文光菊 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先以重庆歌乐山轻轨一号线中梁山隧道以及丰盛场地下工程为研究对象,分析地下工程开挖前后山体的应力场和位移场变化特性;基于极限平衡理论构建岩溶塌陷力学模型,提出整体垮塌型岩溶塌陷的稳定性判据;然后实施降水致塌岩溶模型试验,提出确定真空负压的经验公式,针对地下工程钻爆法施工,研究爆破动荷载对滑坡和危岩的影响;最后介绍地面塌陷监测装置、地表沉降观测装置、危岩滑坡灾害监测预警的压电式应力采集传感器和危岩滑坡应力采集传感器等地质环境保护的新技术和新方法。

本书可供从事地下工程勘察、设计、施工、管理的科技人员和工程技术人员参考,也可供相应学科专业的高校研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地下工程岩土变形破坏机理与控制/陈洪凯等著.—北京:科学出版社,2015.12

ISBN 978-7-03-046577-1

I.①地… II.①陈… III.①地下工程—工程地质 IV.①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 280000 号

责任编辑:韩卫军/责任校对:唐静仪

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:18

字数:430 千字

定价:120.00 元

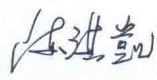
前 言

进入 21 世纪以来,我国公路铁路隧道及地下空间开发利用呈现加速发展之势,地下工程开发建设对地质环境造成了严重损伤破坏,尤其在岩溶地区,地表水漏失、地下水位降落、地面塌陷、地裂缝产生等地质灾害的发生发展造成了严重的社会和环境问题。截至 2013 年年底,我国高速公路总里程已达 104468km,铁路隧道也突破了 10 万 km 大关。地下工程大量建设的同时也出现了许多的地质环境问题,如重庆市歌乐山由于多条地下隧道的建设,导致山顶出现百余个地面塌坑,其中 2012 年 6 月 11 日,沙坪坝区歌乐山镇歌乐村对角桥社的凌云水库上游出现了一个地面塌坑,该坑长约 20m,宽约 10m,呈漏斗状,深不见底。另外,由于开采煤导致在丰盛—羊鹿范围内的重庆市巴南区双河口镇北隘口村湾里于 2010 年 9 月 8 日凌晨 4 时左右起连续出现多处地面塌陷、地面开裂,塌陷坑多呈“漏斗状”,坑口最大直径约 10.07m。2012 年 11 月 29 日上午 11 时许,由于南京地铁 3 号线施工,位于南京市太平南路与中山东路的十字路口处突发一起地陷事故,一辆由南向北行驶的公交车跟着陷下去。2011 年 4 月 26 日,北京丰台石榴庄路西口东侧 200m 处路面塌陷,直径 7~8m,深约 15m,一辆途经此处满载沙土的大货车被“吞噬”,其塌陷区域西侧 200m 处是在建的地铁 10 号线二期工程石榴庄站。显然,合理协调地下工程建设与地质环境保护已经成为当今地质灾害防治的新问题,换言之,研究地下工程岩土变形破坏机理与控制是地下工程建设和运营时亟待解决的重要科学问题。

本书研究团队近年来对重庆市中梁山轻轨 1 号线和丰盛场地下工程建设引起的地质环境问题,对地下工程围岩变形与损伤特性、地表岩溶塌陷形成机制、隧道施工爆破对地表危岩滑坡的影响、地下工程楔形体稳定性、基于地下工程施工控制的地质环境保护技术等科学技术问题进行了系统研究。全书包括 10 章,分工如下:第 1 章由陈洪凯和姚光华承担;第 2 章由姚光华、李衍翰和杨乐承担;第 3 章由唐红梅、李飘和杨乐承担;第 4 章由姚光华、周云涛和赵先涛承担;第 5 章由陈洪凯、胡婷和廖云平承担;第 6 章由姚光华、唐红梅和周云涛承担;第 7 章由廖云平和周云涛承担;第 8 章由王贺和任秀文承担;第 9 章由姚光华、王林峰、杨乐和董平承担;第 10 章由廖云平、董平、

文光菊和胡昌恒承担。全书由陈洪凯、姚光华、廖云平和王林峰统稿，延兆奇、文光菊和任秀文等同志校核了全书。

本书得到重庆市国土资源和房屋管理局 2011 年度市级地质灾害防治专项资金项目资助。地下工程建设的地质环境保护问题方兴未艾，本书仅仅起到抛砖引玉作用，书中不足之处在所难免，敬请各位同行批评指正。



2015 年 6 月 6 日

目 录

第 1 章 地下工程岩土变形破坏机理与控制研究评述	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 地下工程建设对应力场和变形场影响研究	2
1.2.2 围岩断裂损伤特性研究	3
1.2.3 地下工程施工诱发地面塌陷机制研究	9
1.2.4 地下工程施工爆破对地表环境影响研究	11
1.2.5 地下工程楔形体灾害研究现状	13
1.2.6 地下工程围岩变形控制和监测技术研究	15
1.3 主要研究内容	18
第 2 章 地下工程建设引起的应力场及变形场变化规律研究 ——歌乐山轻轨 1 号线中梁山隧道	20
2.1 工程概况	20
2.1.1 隧道结构	20
2.1.2 地质构造	20
2.2 隧址区域概况	22
2.3 隧道区域地质环境	23
2.3.1 地形及地貌	23
2.3.2 地质构造	23
2.3.3 地层及岩性	24
2.3.4 水文地质	27
2.3.5 地震及不良地质	28
2.4 地质模型与有限元模型	28
2.4.1 歌乐山三维地质模型	28
2.4.2 中梁山隧道模型	29
2.5 计算条件	30
2.5.1 材料参数	30
2.5.2 接触关系	31
2.5.3 边界条件与荷载	31
2.5.4 水平侧压力系数	32
2.5.5 屈服准则	32

2.6 模拟结果	32
2.6.1 计算结果规定	32
2.6.2 初始地应力场	32
2.6.3 位移场分析	35
2.7 不同地质构造不同岩性敏感性分析	46
2.7.1 不同地质构造影响	46
2.7.2 不同岩性影响	52
第3章 地下工程建设引起的应力场及变形场变化规律研究	
——丰盛场地下工程	58
3.1 工程概况	58
3.1.1 地形地貌	58
3.1.2 地层岩性	60
3.1.3 水文地质条件	62
3.1.4 煤层分布	63
3.2 地质构造及地震	63
3.2.1 褶皱	63
3.2.2 断层	64
3.2.3 地震	65
3.3 丰盛场地表灾害概况及分析	65
3.3.1 地面塌陷	65
3.3.2 水资源漏失	65
3.4 丰盛场数值模型建立	67
3.4.1 三维几何模型的构建	68
3.4.2 地层的添加	69
3.4.3 数值模拟工况拟定	70
3.5 模拟参数的选取	75
3.6 丰盛场数值模拟结果及分析	76
3.6.1 不同埋深隧道开挖应力结果分析	76
3.6.2 不同埋深隧道开挖位移结果分析	86
3.6.3 不同埋深施工的分析	98
3.6.4 不同岩性下变形场分析	103
第4章 地下工程围岩变形与损伤特性研究	109
4.1 不同应力条件下砂岩的变形与破坏特性	109
4.1.1 试验设备与试件的制备	109
4.1.2 单轴拉伸试验	109
4.1.3 单轴压缩试验	110
4.1.4 三轴压缩试验	112

4.1.5 强度包络线	114
4.2 不同地质条件下地下工程围岩变形与损伤特性	115
4.2.1 地下工程开挖引起围岩应力重分布	115
4.2.2 基于霍克-布朗准则的地下工程开挖引起的围岩参数劣化	118
4.2.3 不同地质条件下地下工程围岩变形与损伤特性	120
4.2.4 数值计算结果分析	122
4.3 地下工程施工爆破围岩损伤分区	131
4.3.1 爆破荷载下损伤变量定义	131
4.3.2 爆破损伤作用分区	131
4.3.3 工程实例分析	134
第5章 岩溶塌陷与地裂缝的形成机制研究	135
5.1 岩溶塌陷分类及形成条件	135
5.1.1 岩溶地面塌陷的形成条件	135
5.1.2 岩溶塌陷的分类	137
5.1.3 岩溶塌陷的形成机制分类研究及其主要特征	140
5.1.4 岩溶塌陷的形态特征与规模	142
5.2 地下工程建设诱发岩溶塌陷形成机制	142
5.2.1 地下工程建设诱发岩溶塌陷模式	142
5.2.2 直接垮塌型岩溶塌陷形成机制	142
5.2.3 地下水位位置对岩溶塌陷的影响分析	152
5.2.4 地下水位位于溶洞上覆盖层土体之下	152
5.2.5 地下水位位于溶洞上覆盖层土体表面	154
5.2.6 地下水位位于溶洞上覆盖层土体之中	154
5.3 歌乐山余家湾水库岩溶塌陷算例分析	155
5.3.1 歌乐山余家湾水库岩溶塌陷概况	155
5.3.2 歌乐山余家湾水库岩溶塌陷诱发因素分析	160
5.3.3 歌乐山余家湾水库岩溶塌陷机制分析及判据计算	160
5.3.4 歌乐山余家湾水库岩溶塌陷形成过程	161
5.4 地下水降落诱发地面塌陷模型试验	162
5.4.1 试验模型设计	162
5.4.2 试验工况与仪器介绍	163
5.4.3 试验过程及结果	165
5.4.4 试验结果分析	168
5.4.5 水位差不同情况下的真空负压力实测值与计算值比较分析	171
5.5 地裂缝形成机制	172
5.5.1 重庆地区地下工程建设诱发地裂缝形成条件	172
5.5.2 地裂缝形态研究	173
5.5.3 地裂缝形成的断裂力学机制	174

第 6 章 隧道施工爆破对地表危岩滑坡的影响研究	178
6.1 考虑隧道施工爆破荷载的滑坡传递系数修正法	178
6.2 滑坡稳定性对隧道施工爆破响应特性	180
6.2.1 分析模型	180
6.2.2 结果分析	181
6.3 多次爆破能量下滑块位移法	181
6.3.1 滑坡振动物理模型及滑动机理	181
6.3.2 爆破地震波能量衰减分析	183
6.3.3 滑坡体振动过程能量分析	183
6.3.4 滑坡爆破振动位移与振动破坏判据	185
6.3.5 工程实例分析	186
6.4 滑塌式危岩清除爆破动力稳定性分析方法	188
6.4.1 时程法分析滑塌式危岩动稳定性原理	189
6.4.2 危岩体爆破动力的确定	190
6.4.3 工程实例分析	192
6.5 地下工程爆破对危岩稳定性的影响研究	194
6.5.1 危岩主控结构面假定及爆破荷载计算	194
6.5.2 危岩动力稳定性计算方法	194
6.5.3 工程实例分析	197
第 7 章 地下工程爆破振动对地表建筑物振动位移研究	200
7.1 爆破振动下等效加速度计算	200
7.2 爆破振动条件下建筑物动力特性	201
7.3 工程实例分析	202
第 8 章 地下工程楔形体的形成机制研究	207
8.1 地下工程楔形体形成机制	207
8.1.1 地质因素	207
8.1.2 人为因素	208
8.2 地下工程楔形体识别方法	209
8.2.1 赤平极射投影法	209
8.2.2 滑动方式的判定	210
8.2.3 算例分析	210
8.3 关键块体力学分析	211
8.3.1 力学分析	215
8.3.2 块体的运动学分析	216
8.4 算例分析	218
第 9 章 基于地下工程施工控制的地质环境保护技术	223
9.1 地下工程施工方法介绍	223

9.1.1 新奥法	223
9.1.2 明挖法	224
9.1.3 盾构施工	225
9.1.4 掘进机法	225
9.2 地表位移控制技术	225
9.2.1 地表下沉控制技术	225
9.2.2 围岩补强技术	225
9.2.3 超前支护技术	228
9.3 围岩变形控制技术	232
9.3.1 围岩变形控制要点	232
9.3.2 整体现浇衬砌	235
9.3.3 掌子面超前注浆加固技术	243
9.3.4 冻结法加固围岩	247
9.4 城市隧道开挖钻爆施工围岩控制爆破技术	250
9.4.1 常用的控制爆破技术	250
9.4.2 爆破控制技术原理——屏蔽原理	251
9.4.3 一种新型城市隧道爆破控制技术	252
第 10 章 地下工程地质环境保护监测技术	255
10.1 常见监测技术介绍	255
10.2 地下工程地质环境保护监测新技术	255
10.2.1 针入式土体分层沉降测量装置	255
10.2.2 一种塌陷监测新方法	263
参考文献	267

第1章 地下工程岩土变形破坏机理与控制研究评述

1.1 研究背景

“19 世纪是桥梁的世纪，20 世纪是高层建筑的世纪，而 21 世纪则会是人类开发和利用地下空间的世纪”（关宝树等，2000）。人类开辟并利用地下空间的一种方式就是修建隧道和地下硐室。随着人类工程技术能力逐渐提升，一部分世纪性的大型、特大型地下工程项目也相继开始建设或竣工。截至 2012 年年底，我国公路隧道共 10022 处，长达 8052.7km，是目前世界上隧道里程数最大的国家。此外，我国还建设了大批地下工房、地下设备等洞库工事。最近几年，铁路隧道和公路隧道的建设速度分别达到了每年 300km 和 150km，增长趋势明显。总的来说，就目前新项目的数目、范围和建造进度来看，我国的隧道和地下工程建设堪称全世界之最（郭陕云，2004）。但是由于复杂地质条件（如地质结构、初始地应力和岩土体的力学特性等）的影响，地下工程的结构设计和施工要求往往比地面工程更高、更严格。

近年来随着我国交通、城市建设的快速发展，诸如基坑失稳、岩溶塌陷、地面沉降、硐室失稳、巷道突水等多种环境岩土工程问题经常出现在其地下施工过程中，这不仅严重影响地下工程建设和周围建筑物安全，而且给国家和人民群众造成了重大经济损失。2012 年 11 月 29 日上午 11 时许，位于南京市太平南路与中山东路的十字路口处突发一起地陷事故，一辆公交车陷了下去，发生地陷事故的现场紧邻南京地铁 3 号线施工工地；2011 年 4 月 26 日，北京丰台石榴庄路西口东侧 200m 处路面塌陷，其直径 7~8m，深约 15m，一辆途经此处满载沙土的大货车被“吞噬”，塌陷区域西侧 200m 处是在建的地铁 10 号线二期工程石榴庄站。当地面发生在岩溶地区时，这种塌陷就叫作岩溶塌陷。岩溶塌陷具有较强的隐蔽性和突发性。重庆地区地下工程建设众多，地质构造复杂，多有碳酸盐类岩石在地下水的腐蚀下形成各种岩溶地貌，因此地下工程施工大量排水导致地下水位下降从而极易诱发岩溶塌陷。如 2010 年 10 月 21 日、23 日和 24 日，重庆市沙坪坝区歌乐山镇接连发生地陷，灾害最严重的洞口有一间小屋大小，深不见底，且洞口还有继续增大的现象；2010 年 10 月 6 日，重庆巴南区与涪陵区交界处，位于巴南区麻柳嘴镇境内 S103 省道天池隧道发生一起突水事故，造成 3 人死亡、4 人受伤，13 辆汽车不同程度受损；2009 年 7 月 19 日，重庆沙坪坝区梨树湾货运场后（位于

高速公路桥下)的一个铁路隧道发生垮塌,2人被埋,生死不明。

楔形体破坏是地下硐室开发过程中的一种常见灾害类型。块体破坏的发生过程突然,造成的后果严重,对硐室的开挖及稳定性造成影响。山东某核电工程的基坑开挖过程中,基坑东部的边坡发生了楔形体滑塌破坏,对整个项目都造成了巨大的经济损失;满拉水利枢纽工程拦河坝上部,发现了体积巨大的楔形体。

地下工程爆破对地表地质环境的劣化作用也是地下工程建设施工和矿山开发中亟待解决的关键问题之一。初步统计发现,在我国18座大型冶金矿山中,有16座已经进入深凹露天开采,随着露天矿坑的逐渐加深,边坡在变高变陡,爆破地震效应对边坡稳定性的影响日益突出。如抚顺露天煤矿西北帮在1960~1984年先后发生过13次滑坡,其中有9次是由振动因素诱发引起的;大冶铁矿东露天采场自开采以来,至今发生较大滑坡20余起,其中以狮子山北帮西口滑坡、象鼻山北帮滑坡和尖山北帮A区滑坡最为典型;漫湾水电站爆破施工过程中产生了多个滑坡,处置费用达到1.2亿元,并使工程施工工期延长一年,经济损失超过10亿元。

因此,系统实施地下工程建设中岩土变形机理的研究,构建相应理论和技术体系,对减少和控制地下工程建设诱发的岩土体灾害、实现社会经济可持续发展,具有重要意义。

1.2 研究现状

1.2.1 地下工程建设对应力场和变形场影响研究

1. 国外隧道围岩支护理论

古典围岩压力理论认为,作用在支护结构上的压力是其上覆岩层的重量 γH 。这个理论在当时开挖深度较浅时曾得到广泛应用,不过随着开挖深度逐渐增加,人们发现古典压力理论在许多方面都不符合实际,于是太沙基等人提出了坍落拱理论。坍落拱理论提出,坍落拱的高度与地下结构的跨度和围岩性质有密切关系,坍落拱的形状为矩形,认为隧道围岩具有自承能力。

自20世纪50年代开始,人们就在隧道支护领域应用弹塑性力学方法来解决问题,这个时期的代表有:按连续介质力学方法计算出圆形衬砌内力的弹性解(Scheidegger, 1973);利用弹性力学进行围岩与支护在非均压地层下的弹塑性求解(Michel et al., 2011)。

20世纪60年代,奥地利工程师拉布采维茨在前人经验的基础上总结出了一种新的隧道设计施工方法——新奥法(Mandalsk et al., 2009)。新奥法的核心是利用隧道围岩的自承作用来支撑隧道,促使围岩本身变为支护结构的重要组成部分,使围岩与构筑的支护结构共同形成坚固的支承环。直至目前,新奥法仍然是应用最为广泛的隧道设计和施工方法,是现代支护理论的典型代表。在此期间,日本学者山地宏和樱井春辅提出了围岩支护的应变控制理论(汪成兵, 2007),该理论认为隧道的应变随支护结构的增加而减小,而容许应变随支护结构的增加而增大,因此通过增加支护结构能较容易地将围岩应变控制在容许范围之内。

20世纪70年代,萨拉蒙(Salamon)等提出能量支护理论,其认为围岩和支护结

构是相互作用和相互联系的,会共同发生变形(赖应得,2010)。在此过程中,围岩释放的部分能量被支护结构吸收,但其总的能量始终保持守恒,即认为支护结构能自动释放多余的能量。同时期,苏联专家提出了应力控制理论,即围岩弱化法、卸载法,原理是通过一定的技术手段改变某些部分围岩的物理力学性质,改善围岩内的应力及能量分布,人为降低支承压力区围岩的承载能力,使支承压力向围岩的内部转移,达到提高围岩稳定性的目的(程谦恭等,1999)。

2. 国内学者对隧道围岩稳定性的分析

20世纪60年代,于学馥提出“轴变论”理论,认为隧道坍塌能够自行稳定,应力超过岩体强度极限引起围岩破坏,坍塌能改变隧道轴比,产生应力重分布(石玉泉,1981);而隧道最稳定的轴比是应力均匀分布的轴比,其形状为椭圆形。轴变论对于解决采矿的稳定问题做出了极大贡献。

孙钧等认为,对软岩不能过度放压,应采用高标号、高强度钢筋混凝土弧板的刚性支护形式,坚决顶住和限制围岩向中空位移,并据此提出了锚喷-弧板支护理论,发展了联合支护理论(刘加旺,2009)。

方祖列提出主次承载区支护理论,此理论认为隧道在开挖后,围岩中会形成拉压域(王兵等,1998)。其中压缩域主要出现于围岩较深的部位,体现了围岩的自承能力,是维护隧道稳定的主承载区;而张拉区域位于隧道的周围,通过支护加固,也形成一定承载力,但其与主承载区相比,只起辅助作用,故称次承载区。主次承载区的协调作用决定了隧道的最终稳定。支护对象为张拉域,支护结构和支护参数要根据主次承载区相互作用过程中呈现的动态特征来决定,支护强度原则上要一步到位。

董方庭提出了围岩松动圈理论,认为凡是坚硬围岩的裸体隧道,通常其围岩松动圈都趋于零,此时围岩虽有弹塑性变形但无需支护。但是位移随松动圈的增大而增大,提升了支护难度,减弱了支护的实际效果,所以为了防止围岩松动圈的继续拓展和不利变形的增加,必须采取措施及时支护(秦帅等,2011)。

何满潮结合工程地质学和大变形力学的知识,提出软岩工程力学支护理论,并且通过分析围岩变形的力学机制,提出以转化复合型变形力学机制为核心的新软岩隧道支护理论(黄林伟等,2011)。

1.2.2 围岩断裂损伤特性研究

1. 岩石疲劳特性研究

岩石疲劳特性对受荷岩体的稳定性评价研究具有积极意义,备受国内外学者广泛关注。虽然静载下的岩石变形特性与循环荷载作用下岩石疲劳变形特性存在一定关系,但两者有着显著区别。研究循环荷载作用下岩石的疲劳变形特性及其演化规律,有利于正确认知岩体的破坏机制,为受荷岩体的长期稳定性评价和施工控制提供科学依据。迄今,国内外学者对岩体在循环荷载作用下的疲劳特性进行了大量的研究,取得了丰硕成果。

马林建等(2013)通过室内试验,深入研究了盐岩的三轴疲劳变形和强度特性,试验表明荷载波形参数中上限应力和应力幅值对循环荷载作用下盐岩变形速率影响最大。王者超等(2013)基于疲劳特性试验,发现在三轴剪切作用下,剪缩区内岩石变形模量

随循环次数增加而变大,而变形模量则相反。韩奔和刘平(2013)进行了循环荷载作用下的岩石疲劳变形特性试验研究,发现在不同偏应力条件下平均变形模量随着偏应力的增大逐渐增大且趋于收敛。祝效华等(2012)深入进行了动循环荷载对岩石的累积损伤研究,分析了PGP-X井钻井参量、空气锤结构参量与冲击功和破岩比功的关系,探讨了冲击功、转速、冲击频率和岩性等与破岩能效的响应关系。许宏发等(2012)将岩石在循环荷载下的疲劳损伤变量方程引入累积塑性应变方程中,推导了高周和低周疲劳循环条件下岩石轴向塑性应变的演化方程。倪骁慧等(2012)进行了不同频率循环荷载作用下花岗岩细观疲劳损伤量化试验研究,发现随着循环荷载频率的增加,微裂纹方位角发育离散性增加;微裂纹宽度发展较慢,而长度的发育则较快。周有成等(2011)以高强度白水泥为模拟材料,对含不同数目穿透裂纹的岩石进行了单轴压缩试验以及高频率疲劳破坏试验研究,揭示了裂纹扩展规律,构建了岩石材料的 $S\text{-lg}N$ 曲线和考虑裂纹相互作用的疲劳方程。郭印同等(2011)通过盐岩单轴循环荷载作用下的疲劳试验,深入探讨了盐岩的疲劳强度、变形及损伤特性。冯春林等(2011a)在单轴压缩、恒幅和变幅下,分别对花岗岩、砂岩和大理岩进行了疲劳特性试验,建立了一种测定岩石疲劳应变率的双因素实验模型。试验表明,变幅应力是影响岩石疲劳损伤特性的主要因素,疲劳寿命和临界强度分别降低了15.8%~18.0%和21.6%~25.8%,临界应变发展速率增加了17.3%~21.3%。冯春林等(2011b)通过单轴疲劳特性试验,提出了测定循环荷载下岩石临界强度和疲劳强度的新方法,认为岩石的临界强度不仅受岩石本身性质影响,而且受控于应力水平大小。冯春林等(2010)通过不同高、低应力水平的疲劳试验,提出了测定循环荷载下岩石临界应力的新方法,并通过MTS816岩石测试系统,进行了不同加载频率和幅值的砂岩疲劳强度和破坏试验研究,结果表明岩石在低频率下比高频率下更易破碎。岩石内部裂纹存在分支现象,频率越低,分支裂隙越发育。Poul等(2010)通过观察蠕变实验和应力松弛试验中砂的时间效应,发现砂粒表现出静态疲劳的现象,进而指出在岩石三轴试验中,岩样破碎过程显示出颗粒的时间效应。肖建清等(2010)对花岗岩进行常幅循环加载试验,研究了循环加载过程中岩石的变形特性。研究发现,从变形的角度建立岩石的疲劳破坏判据更可靠,采用横向变形或纵向变形发展速率作为岩石疲劳破坏或失效的判据,更有利于工程应用。肖建清等(2009)基于岩石倒S型损伤累积模型的特点,提出基于有限组合法的岩石疲劳损伤模型参数估算方法,研究表明,以有限组合法估算参数初始值,以Levenberg-Marquardt迭代计算总能收敛得到最优解。樊秀峰等(2009)系统研究了砂岩在单轴压缩循环荷载作用下的疲劳损伤特性,并对砂岩试件在疲劳损伤过程中的声学参数(超声波速、时域波幅、波形)进行了实时测量及深入研究。胡盛斌等(2009)通过相似模型进行了低频周期荷载下含缺陷岩石变形破坏的试验研究,分析了试样的轴向累积塑性变形阶段演化趋势,探讨了缺陷与岩石疲劳寿命、裂纹起裂扩展的响应关系。George等(2007)归纳总结了近二十年来岩石抗冲蚀性和程度预测技术方法,研究表明岩石破坏可能存在四种潜在破坏模式,并指出应用综合断裂力学方法,可以预测岩石的脆性断裂和疲劳破坏。左宇军等(2007)进行了岩石在周期静载荷作用下破坏的试验研究,指出在周期载荷作用下的应力-应变曲线表现为滞回圈先疏后密再疏,直至破坏。不同频率周期载荷作用与同频率周期载荷作用下疲劳破坏的极限变形规律一致,并且破坏岩石所消耗的有效全应变能有向相同值发展的趋势。

章清叙等(2006)系统研究了周期荷载作用下红砂岩的三轴疲劳变形特性,研究表明三轴疲劳特性与单轴情况非常相似,划分了三轴周期荷载作用下红砂岩轴向累积塑性变形发展阶段,指出上限应力和幅值对岩石疲劳特性影响显著。葛修润等(2003)深入研究了砂岩、花岗岩和大理岩在单轴循环荷载作用下的变形特性及其破坏机理,研究表明岩石的滞回曲线完全受控于静态单轴压缩破坏曲线,疲劳破坏变形量相当于循环荷载的上限应力在静态单轴压缩破坏曲线应变软化段对应的变形量。

2. 岩石损伤特性研究

岩石是一种隐含缺陷的多孔隙非均质介质,微观裂纹在荷载下张开扩展贯通,往往诱发岩石工程的失稳和破坏,许多学者将岩石类材料在荷载作用下的这种微观裂纹张开、扩展、贯通称为损伤。各种岩石材料微裂纹微孔隙的张开、闭合、扩展、汇合过程中所呈现的损伤特性是实施含缺陷岩体材料力学强度参数、岩体损伤范围和岩体损伤力学研究的关键问题,引起了国内外学术界的广泛关注。

彭瑞东等(2014)基于三轴循环加卸载试验,深入研究了煤岩损伤演化过程的能量转化机制,试验表明,在周期荷载下煤岩表现出明显的滞回环,且随应力增大煤岩的损伤耗散能增大,在低围压下煤岩的弹性模量随循环应力增大而下降,但在高围压下无此变化。杨建华等(2014)将统计损伤演化模型引入弹塑性本构材料中,模拟圆形隧洞全断面毫秒爆破过程中重复爆炸荷载作用下的岩体累积损伤效应,指出围岩损伤的临界峰值质点振动速度较单段爆破降低了12%,围岩地应力对爆破张拉效应起到非常明显的“抑制”作用。王振等(2014)基于RFPA有限元分析软件,探讨了深埋硬岩隧道落底开挖引起的围岩损伤破坏特性,认为围岩开挖卸载形成的二次分布应力场,诱发损伤向深处发展,同时引起已支护部分围岩出现损伤破坏。刘勇峰等(2014)分析了岩石损伤破坏不同阶段与声发射参数的内在联系与特征规律,认为声发射事件参数拟合出的理论应力应变曲线能够反映出岩石实际的本构关系和损伤演化特性。赵闯等(2013)分析了不同围压循环荷载作用下岩石的损伤变形与能量特征,基于损伤变量原理揭示了岩石损伤破坏过程中能量的转化规律,探讨了岩石疲劳破坏的阈值。朱珍德等(2013)基于细观损伤力学模型试验,定量分析了微裂隙的萌生、扩展及贯通过程,推导了微裂纹引起的非弹性应变与应力之间的定量关系,从试验和理论两方面探究了岩石试样单轴压缩过程中的破坏机制。Liu huibo等(2013)针对地下硐室损伤区的空间效应参数进行了深入研究,认为围岩的损伤将严重劣化弹性模量,并通过数值分析方法量化了硐室围岩参数劣化程度。严鹏等(2013)讨论了不同初始地应力状态下爆破荷载及地应力瞬态卸载所分别诱发围岩损伤的特性,研究表明爆炸荷载作用下损伤区的分布有随着侧压力系数的增大而向应力集中区发展的趋势,而地应力瞬态卸荷所产生的围岩破坏以受拉破坏为主,表层损伤区沿开挖轮廓呈均匀分布的趋势。张连英(2012)以煤系岩层中泥岩为研究对象,应用损伤断裂理论、黏弹塑性理论等,从宏观和细观不同尺度上,对高温作用下泥岩的损伤演化与断裂机理进行了系统的研究。周峙等(2012)进行了巴东组泥质粉砂岩损伤特性三轴试验研究,探讨了泥质粉砂岩的初始损伤特性,推导了岩石微元强度参量,构建了反映岩石破裂全过程的损伤软化本构模型。汪亦显等(2011)进行了冲击荷载下脆性岩板损伤断裂演化的实验模拟研究,揭示了脆性岩石损伤断裂演化过程,研究表明裂纹的发生发展有明显的孕育期,在入射能量达到临界值前主要表现为裂纹孕育

增长,在达到临界值后发生宏观断裂破坏,裂纹面积呈负增长,破裂区面积增大。许宝田等(2010)通过泥岩三轴试验深入探讨了泥岩损伤特性。试验表明,随着围压的增大,破坏荷载增大,塑性变形也明显增大,岩石破坏后,残余强度随围压增大而提高;泥岩初始损伤时的主应力差对数随围压增大而增大,两者呈线性关系;分析了泥岩损伤变量随主应力差变化关系。周家文等(2010)基于岩石细观力学研究了脆性岩石单轴循环加卸载的应力-应变曲线特征、峰值强度及断裂损伤力学特性,提出了一种根据应力-应变曲线的损伤变量计算方法,损伤变量计算结果和声发射测试数据变化规律较为一致。贾善坡等(2009)基于连续介质力学和不可逆热力学,将损伤引入修正的Mohr-Coulomb准则,构建了泥岩弹塑性损伤本构模型,推导了泥岩损伤演化方程,揭示了不同应力状态下的力学特性。王国艳等(2009)进行了单裂隙岩石损伤断裂过程的试验研究,揭示了单裂隙岩石损伤断裂过程,提取了损伤演化阈值和全应力。Zhang Guohua等(2009)研究指出短间距隧道爆破开挖引起围岩累积损伤,劣化其力学性能,通过对围岩中声波速度和形变位移分析,发现新建隧道与既有隧道,采用CRD技术的累积损伤量是全断面开挖的三倍多,认为在围岩累积损伤量和损伤范围研究中须充分考虑声波速率和位移的影响。项向荣(2008)分析了岩石结构模型及岩石爆破损伤模型的优缺点,建立了岩石动态爆破损伤模型,基于有限元分析方法深入研究了围岩在自重应力和爆破震动作用下的力学特性及损伤特性。张志呈等(2006)探讨了爆破引起岩石动态损伤断裂机理、岩石动态损伤特性与检验岩石损伤程度的方法和衡量岩石完整性的指标,分析了岩体内应力波的传播和作用特征。吴献强等(2006)从宏观力学性能和微观损伤两方面,对周期荷载作用下岩石疲劳损伤特性进行了深入分析,认为岩石疲劳损伤的宏观力学特性是微观损伤演化的综合表现。曾晟等(2005)基于岩石应变强度理论和岩石强度的Weibull分布假设,提取能合理描述岩石微元强度的参量;采用损伤力学理论构建了岩石损伤统计本构理论模型。张勇(2005)通过不同含水率下红砂岩单轴压缩试验和光学细观单轴压缩试验,得到了岩石全应力-应变曲线、宏观破坏形式、细观结构演化图像,基于岩石力学、损伤力学和断裂力学理论,深入研究了砂岩细观损伤演化特性及其本构模型。林英松等(2005)探讨了现有的岩石爆破损伤模型存在的不足及发展方向,并进行了水中爆炸实验,分析了冲击波对泥岩试样的损伤特性。朱珍德等(2003)探讨了渗透水压力对脆性岩石损伤劣化的影响,揭示了脆性岩石变形过程中渗透特性的变化规律,分析了渗透水压作用下岩石破裂产生的微观破坏力学机制。王辉(2003)基于断裂力学和损伤力学理论深入研究了爆炸作用下的岩石损伤断裂机理,提出了岩石爆破作用下损伤计算方法;建立了岩石爆破损伤断裂全过程演化模型,揭示了岩石内部微裂纹扩展、损伤演化和岩石破碎规律。杨小林等(2001)进行了爆破损伤岩石力学特性的试验研究,探讨了在不同爆点距离和爆破条件下爆破对岩石损伤作用的影响,分析了爆破损伤岩石的细观裂纹扩展规律及其损伤特性。赵明阶等(2000)基于损伤力学,采用岩石在未受荷载条件下的超声波速定义岩石的初始损伤变量,通过岩石声学特性模型推导了岩石损伤演化方程。杨更社等(1996)将CT检测技术应用于岩石损伤特性的研究,系统揭示了岩石损伤的定性和定量规律。凌建明等(1993)通过在单轴压缩和恒载蠕变条件下脆性岩石损伤动态全过程的细观试验,进行了细观裂纹的形式、扩展及其损伤效应研究;探讨了断裂过程区的细观裂纹损伤特性。Krajcinovic(1982)

基于损伤力学,结合岩石的微观结构特征,构建了岩石损伤破坏力学模型,揭示了岩石的损伤演化规律。Dragon 和 Morz (1979) 基于损伤理论建立了能够描述岩石与混凝土应变软化阶段的弹性本构模型,认为塑性膨胀率与材料损伤直接关联,并据此提出了连续介质损伤力学模型。Currna 等 (1973) 基于对动态破坏试样的显微观察,指出材料的损伤状态依赖于其内部微缺陷的统计分布规律及演化规律,提出了成核与扩展 (NAG) 模型。

3. 岩石断裂破坏机制研究

岩石裂纹在荷载作用下张开、闭合、滑移起裂分支扩展、相互作用及贯通直至破坏,这一过程称为断裂。为了防止岩体工程中出现岩石断裂造成灾难性的破坏,就必须了解岩石的断裂力学特性并研究其破坏机制,该研究是一个相当复杂的问题,涉及多学科交叉,目前国内外许多学者已经对岩石断裂破坏特性及机制展开了深入研究。

邓华锋等 (2014) 针对库岸边坡典型砂岩,通过长期浸泡试验,深入分析了浸泡作用下砂岩的断裂力学特性和劣化机理,发现砂岩的断裂韧度具有明显的劣化趋势而且劣化幅度有一个先增大后减小的趋势,指出浸泡作用引起微观裂纹裂隙的发展是导致砂岩断裂韧度及其他力学参数劣化的根本原因。赵延林等 (2014) 进行了高水压作用下岩体原生裂纹的变形和翼形裂纹的萌生、扩展、贯通的渗流 - 断裂耦合作用机制研究,构建了高水压作用下岩体裂纹的渗流 - 断裂耦合数学模型,提出了该模型的求解策略与方法,在 Fortran 95 平台下开发了岩体裂纹扩展分析程序 HWFSC.for。赵延林等 (2013) 通过室内试验和数值分析方法,探讨了单轴压缩下岩石材料有序多裂纹体破断特性,认为压剪裂纹尖端的拉应变集中是岩石翼形裂纹萌生的本质原因,而裂纹端部的双向压应力 - 应变集中导致次生剪切裂纹萌生,构建了基于 ANSYS 的岩石多裂纹体翼形断裂扩展的数值分析模型,阐明了单轴压缩下有序多裂纹体翼形断裂贯通的力学机制。任利等 (2013) 基于断裂力学,初步进行了裂隙岩体强度特征分析,修正了拉张破裂压剪准则,推导了裂隙岩体试件的抗压强度求解公式,深入探讨了摩擦系数、裂隙倾角、裂隙长度、黏结力以及围压与裂隙岩体试件抗压强度的响应机制。张文举等 (2013) 进行了由准静态和瞬态开挖卸荷引起的围岩开裂机制与开裂特征研究,分析了应力重分布对围岩开裂过程的影响,探讨了围岩断裂破坏机制,研究表明高地应力条件下围岩以剪切型断裂破坏为主,开挖卸荷时间越短,引起的拉应力区及围岩开裂范围越大。张天军等 (2013) 基于损伤断裂力学,分析了含瓦斯煤体内多场耦合及损伤断裂机理,推导了煤体受损伤后有效应力的变化方程,揭示了多场耦合作用下煤体内大量微损伤积累通过跨尺度的非线性串级发展而诱发煤体的宏观灾变,并从能量角度给出了含瓦斯煤体的损伤断裂准则。赵延林等 (2012) 进行了类岩石裂纹压剪流变断裂与亚临界扩展实验及破坏机制研究,推导以应力强度因子、翼形裂纹长度和时间为内变量的相应势函数,构建了压剪岩石裂纹的流变断裂判据和计算模型。高远等 (2012) 分析了岩石类材料的动态力学性能及动态破坏机理,发现花岗岩的动态断裂韧度与加载速率存在一定关系,随着加载速率的增加断裂韧性增大。赵小平等 (2012) 对比分析了层状大理岩不同层理方向的细观断裂机制及其与特征参数间的关系,探讨了研究层理与主应力方向的关系对硐室围岩破坏机制的影响。李夕兵等 (2012) 建立压剪应力场和渗流场共同作用下含预置裂纹类岩石材料的损伤断裂力学模型和裂纹尖端应力强度因子演化方程,提出运用裂纹尖端