



岩石力学与
工程研究著作丛书

深部岩体动态损伤与 破裂过程

◎朱万成 唐春安 左宇军 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
岩石力学与工程研究著作丛书

深部岩体动态损伤与破裂过程

朱万成 唐春安 左宇军 著

国家自然科学基金项目(50504005、50934006、51222401、51374049)

教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-06-0291)

教育部科学技术研究项目(113019A)

中央高校基本科研业务费资助项目(N100601004、N110201001、N120101001)

科技部中国-南非联合研究计划项目(2012DFG71060/CS06-L01)

霍英东教育基金会青年教师基金资助(122023)

教育部博士点基金资助课题(20110042110035)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以动态扰动触发深部岩体失稳破裂这一科学问题为研究目标,提出动态载荷(包括爆破载荷)作用下岩石的损伤力学本构关系,通过有限元编程,研发了数值模拟系统,并基于此开展动态扰动触发岩石破裂的数值试验。然后,基于对岩石剥落破裂、岩石霍布金森压杆冲击破裂和岩石爆破损伤的数值试验,分析了动态载荷作用下岩石损伤与破裂的基本特征;通过对动态扰动触发深部岩巷失稳破裂的数值试验,阐明动态扰动触发深部巷道发生岩爆的力学机理,揭示动态扰动触发岩巷发生岩爆的条件。书中所述的理论模型和数值试验方法可用于岩石的动力损伤与破裂、冲击破碎、爆破损伤、岩爆发生机制等问题的研究,并为此类科学及工程问题的解决提供理论上的参考。

本书可作为高等院校采矿工程、隧道与地下工程、岩体力学、防护工程等专业研究生的教学参考书,也可供从事相关专业教师、工程技术人员、研究生及高年级的本科生阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部岩体动态损伤与破裂过程/朱万成,唐春安,左宇军著. —北京:科学出版社,2014.6

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-041055-9

I. ①深… II. ①朱…②唐…③左… III. ①岩体-动态-过程-研究
IV. ①P583

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 127168 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 6 月第一次印刷 印张:19 3/4 彩插:2

字数:398 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

朱万成,男,博士,东北大学教授,博士生导师,德国洪堡学者。1974年2月出生,生于新疆呼图壁县,2001年于东北大学获得采矿工程博士学位。2006年晋升为教授,同年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”,获得第六届辽宁青年科技奖,并被遴选为辽宁省高等学校优秀青年骨干教师,2008年获得中国岩石力学与工程学会第五届青年科技奖(金奖),2009年入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选和辽宁省百千万人才计划(百人层次),并获得霍英东教育基金会第十二届高等院校青年教师奖(二等奖)和应用类项目资助;2010年被评选为第七届辽宁省先进科技工作者,2012年获得国家自然科学基金委优秀青年科学基金资助,并享受国务院特殊津贴,2013年获得中国青年科技奖。自1999年起多次应邀赴香港理工大学进行合作研究,2004年2月至2006年2月赴澳大利亚西澳大学进行博士后研究和学术访问,2006年10月至2007年11月在德国波鸿大学做洪堡学者,曾在瑞士洛桑联邦理工学院、英国曼彻斯特大学、韩国首尔国立大学、澳大利亚西澳大学、南非金山大学等进行短期学术访问。现兼任国际岩石力学学会会员,中国岩石力学与工程学会理事和该学会下属的“岩石破碎工程专业委员会”的副主任,“地下工程分会”的常务理事,“岩体物理与数学模拟专业委员会”、“教育工委会员”和“岩石动力学委员会”的委员。

朱万成博士一直从事岩石类材料的损伤与断裂过程、岩石动力学和岩体工程中的多物理场耦合问题的研究,已主持或参加国家自然科学基金等纵向科研课题20余项。由中国科学院出版基金资助出版学术专著1部,出版译著1部,在 *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*、*Rock Mechanics and Rock Engineering*、*Tunnelling and Underground Space Technology*、《力学进展》、《工程力学》、《岩石力学与工程学报》和《岩土工程学报》等期刊和学术会议上发表论文170余篇(43篇被SCI收录,这其中有22篇为第一作者;113篇被EI收录;31篇被ISTP收录),发表的论著被他引2000余篇次,其中被SCI收录的引用150余篇次,被ISTP收录的引用有34篇次。获得国家科学技术进步奖二等奖一项(排名第二),省部级自然科学奖二等奖两项(排名第一),省级教学成果奖一等奖一项(排名第四),其他省部级奖二等奖五项(排名为第三或第四)。

唐春安,男,1958年3月生于湖南省黔阳县。1982年毕业于中南矿冶学院(现为中南大学)采矿专业,1984年和1988年分别获得东北大学硕士和博士学位。

曾任国家教育部长江学者特聘教授(东北大学)、国务院第五届学科评议组成员、中国岩石力学与工程学会副理事长、国际岩石力学学会中国国家小组主席。现为大连理工大学教授、博士生导师,兼任《岩石力学与工程学报》副主编, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*、*GeoMechanics and GeoEngineering* 杂志编委。1991~1992 年赴英国帝国理工学院做博士后研究,多次应邀学术访问加拿大、英国、瑞典、美国、日本、瑞士、韩国、新加坡及我国香港等国家和地区。

主要从事岩石破坏机理及岩石工程灾害分析、监测预警方面的研究工作,研究领域涉及岩爆、突水、瓦斯突出、矿震、地表沉陷以及岩石工程结构或边坡稳定性分析等。近年来,在国内外多种学术刊物和会议上发表各类学术论文 400 多篇(其中 SCI 收录 120 多篇, EI 收录 300 多篇,国内外“他人引用”达 5000 多次)。出版 *Rock Failure Mechanism*、《岩石破裂过程中的灾变》、《岩石破裂过程数值试验》等学术专著六部。

1988 年以来,先后主持国家自然科学基金和部委级基础性研究课题 30 余项,主持国家自然科学基金重点项目和国际重大合作项目各一项,研究成果分别在“淮南矿业集团瓦斯突出监测预警”、“雅砻江锦屏一级水电工程(世界第一高坝)左岸高陡边坡稳定性分析与监测预警”和“锦屏二级水电工程(世界最大规模深埋隧洞群)岩爆监测预警”等 10 余个典型或重大工程中得到应用。获得国家科技进步奖二等奖、省部级奖二等奖以上科技成果奖励七次。分别于 1994 年和 1995 年获得国家教委“跨世纪优秀人才培养计划”和“国家杰出青年科学基金”的资助。曾荣获第四届中国青年科技奖、辽宁省青年五四奖章、宝钢教育基金优秀教师奖,辽宁省第四批省级优秀专家,并首批入选“国家百千万人才工程计划”。

左宇军,男,1965 年生,博士后,贵州大学教授,矿业工程学院副院长。1987 年和 1989 年毕业于东北大学分获学士和硕士学位,1990~2002 年在长沙矿山研究院从事爆破技术研究,2005 年毕业于中南大学获博士学位,2005~2007 年在东北大学从事博士后研究,2010 年调入贵州大学。现兼任中国岩石力学与工程学会破碎专业委员会委员、辽宁省工程爆破协会常务理事、公安部高级爆破工程师。

主要从事采矿技术、岩石动力学、爆破技术及数值模拟研究。承担或参加国家自然科学基金等科研课题 10 余项,在国内外发表学术论文 50 余篇,其中 SCI 收录 10 余篇, EI 收录 20 余篇。1993 年,获中国有色金属工业总公司科技进步奖二等奖(排名第三),2007 年获国家科技进步奖二等奖(排名第十二),2007 年获辽宁省自然科学学术成果(学术论文类)奖二等奖(排名第一)。

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编:孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编:冯夏庭

副 主 编:何满潮 黄润秋 周创兵

秘 书 长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(以姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘宝莉	刘汉东	刘汉龙	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、 CO_2 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO_2 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

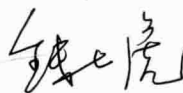
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

前 言

随着采矿转向深部,地质环境趋于复杂,高应力、高地温和高水压等引起的突发性矿山动力灾害呈增加趋势,针对深部开采过程中矿山动力灾害发生机理方面的岩石力学研究已成为国内外研究的焦点。岩爆是深部金属矿山开采面临的主要问题之一,对于岩爆研究的学术著作颇多,以往人们在研究岩爆等工程问题时,往往把所涉及的力学过程视为准静态或动态的,把两种载荷作用下岩石的响应作为相互独立的过程来研究,岩体工程设计计算则一般都采用静态载荷作用下的强度准则。实践证明,静荷载理论在岩爆研究中的重要性举足轻重,但它不能阐明岩爆的全部机理,岩体内储存有大量的应变能仅仅是发生岩爆的必要条件,不是充要条件,外部动态扰动(如爆破)往往是触发岩爆的关键性因素。因此,作为岩爆机理研究的重要方面,我们需要研究岩体在静态和动态载荷作用下的变形、损伤与破裂过程,以探讨动态扰动触发高应力的岩体发生岩爆的力学机制。因此,进行动态扰动触发深部高应力岩体失稳破裂的研究,是深部岩体力学的重要组成部分,对于认识岩爆发生机制,提高采矿的安全性具有重要的学术价值。本书的出版希望能够起到一个抛砖引玉的作用,为促进深部岩石动力学的发展和深部开采诱发矿山动力灾害的分析预测贡献微薄之力。

岩体力学问题的研究分为理论研究、实验研究和数值模拟三个方面。由于岩体破裂过程问题的复杂性给理论和实验所带来的困难,伴随着高速电子计算机和数值计算方法的发展,数值模拟的作用日益显得重要,本书主要介绍作者在数值模拟方面的研究成果。当然,为了保证内容的完整性和系统性,书中对应力波的基本理论、霍布金森杆(SHPB)试验等部分成果也进行了简单的介绍。

本书共七章。第一章绪论部分主要介绍“动态扰动触发深部岩体失稳破裂”的学术思想,指出研究动态扰动触发深部岩体失稳破裂的必要性和重要性,对动态载荷作用下岩石损伤与破裂过程的研究成果进行了广泛的综述,并阐述了作者的研究思路。第二章首先介绍应力波(主要是弹性波)的基础理论和应力波诱致的破裂现象,然后基于作者先前在岩石静态破裂过程方面的研究成果,提出动态扰动条件下岩石破坏过程的损伤力学本构关系,研发了动态载荷作用下岩石破裂过程的数值模拟工具,并对该数值工具的有效性进行了多方面的验证。第三章开展了岩石动态剥落破裂的数值试验,这里也包含了作者在混凝土构件动态剥落方面的研究成果。第四章介绍岩石爆破损伤的数值计算模型,对单孔爆破围岩损伤和裂纹扩展及双孔同时起爆时两孔之间裂纹贯通规律进行了数值试验;第五章介

绍岩石试样动态破裂过程的数值试验结果,阐明了不同应力波波形对于岩石破裂过程的影响。第六章对岩石试样的 SHPB 试验进行了数值模拟及数值试验,分析了静态初应力水平对动态破裂过程的影响。第七章则针对深部岩巷的岩爆问题开展了数值试验,分析了不同的地应力和动态扰动波形条件对于巷道岩爆的触发机理。

本书的内容来自作者近十年来参加或主持完成的一系列科研项目成果。包括国家自然科学基金项目(50504005、50934006、51222401 和 51374049)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-06-0291)、教育部科学技术研究项目(113019A)、中央高校基本科研业务费资助项目(N100601004、N110201001 和 N120101001)、科技部中国-南非联合研究计划项目(2012DFG71060/CS06-L01)、霍英东教育基金会青年教师基金资助(122023)、教育部博士点基金资助课题(20110042110035)等。

在本书即将出版之际,对曾经给予我指导的各位老师表示衷心的感谢。作为我的博士研究生导师,唐春安教授指引我走上了学术研究的道路,他长期以来对我的培养和关怀,我多年一直铭记在心;作为学术界老前辈的徐小荷教授,多年来一直关心我的成长,给予了我许多的鼓励和无私的帮助;香港理工大学的周锦添教授为我提供了在香港开展合作研究和学习的机会,在他的资助和指导下,我开始涉足动态载荷作用下岩石的破坏过程这一研究领域;中南大学的李夕兵教授为我提供了开展 SHPB 试验的条件,许多的数值模拟研究工作更是得益于李教授学术思想的启迪;澳大利亚西澳大学的刘继山教授为我在澳期间的博士后访问和研究提供了资助;我在德国期间,洪堡基金会给予了经济上的资助,波鸿大学工程力学研究所的 Otto Bruhns 教授对我开展该方面的研究提供了良好的工作条件。在此对他们表示衷心的感谢!此外,我的研究生逢铭彰、段进超、尚世明、李占海、魏晨慧、朱亮、牛雷雷、李帅、魏炯和白羽等,都参加了与本书内容相关的研究工作,在此也对他们表示感谢!

由于作者在深部动态损伤与破裂方面的研究尚处于探索阶段,且限于作者的研究水平和文字表述能力,书中难免有缺点和疏漏,恳请同行专家批评指正!

朱万成

2013 年 11 月 15 日于沈阳

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第一章 绪论	1
1.1 深部开采面临的岩爆问题	1
1.1.1 岩爆的定义	3
1.1.2 开采诱发岩爆的因素分析	4
1.1.3 动态扰动是触发深部矿山岩爆的关键性因素	5
1.2 动态扰动作用下岩石破裂过程的研究现状	6
1.2.1 试验研究方面	6
1.2.2 理论及数值模拟研究方面	8
1.3 本书的研究工作	11
参考文献	14
第二章 动态扰动下岩石破裂的数值试验方法	22
2.1 动载荷与弹性波	22
2.1.1 静载荷和动载荷	22
2.1.2 弹性体的振动和弹性波	23
2.2 动态扰动激发的应力波	24
2.2.1 介质的弹性常数及弹性波类型	25
2.2.2 杆中的一维纵波	27
2.2.3 三维固体中的应力波	29
2.2.4 平板中的平面波	33
2.2.5 球面波与柱面波	34
2.2.6 应力波的反射与折射	36
2.2.7 应力波的能量及其衰减	38
2.3 动态扰动诱致的岩石破裂	39
2.3.1 动载荷(应力波)作用下岩石的力学特性	39
2.3.2 剥落破裂	42
2.3.3 会聚效应造成的破裂	46
2.4 岩石类介质非均匀性的表征方法	48

2.4.1 基于统计分布的方法	48
2.4.2 基于数字图像处理技术的方法	50
2.5 弹性动力学方程的有限元求解	56
2.5.1 中心差分法	57
2.5.2 线性加速度法和 Wilson- θ 法	57
2.6 动态应力作用下岩石的损伤力学本构关系	59
2.7 应力波诱致破裂的数值模拟程序——RFPA-Dynamics	62
2.7.1 材料参数的赋值	62
2.7.2 应力波诱发破裂的数值模拟流程	64
2.7.3 静-动组合加载下岩石破裂的数值模拟流程	65
2.7.4 结果显示及处理	67
2.8 RFPA-Dynamics 的验证	67
2.8.1 与理论解的对比	67
2.8.2 对一维波传播过程的模拟	69
2.8.3 与试验结果的对比——巴西圆盘中的应力分布	71
2.8.4 动态破裂过程分析功能的验证	72
2.9 数值模拟与数值试验	74
2.10 本章小结	75
参考文献	76
第三章 动态剥落破裂的数值试验	79
3.1 平板波传播的数值试验	79
3.2 非均匀岩板试样的剥落破裂及动态剥落强度	80
3.2.1 非均匀岩板试样的数值模型	80
3.2.2 数值试验结果及分析	81
3.2.3 非均匀性对动态强度的影响	83
3.2.4 应力波作用时间对试件剥落模式的影响	86
3.3 单骨料混凝土板中的应力波传播及动态剥落	89
3.3.1 数值模型	89
3.3.2 应力波的传播及其诱致的破裂	90
3.3.3 不同应力波作用时间时试样的破坏过程	92
3.3.4 不同应力波峰值时试样的破坏过程	93
3.3.5 试样中的应力变化	95
3.4 混凝土杆试样的动态剥落破裂	96
3.4.1 混凝土杆状试样数值模型	96
3.4.2 混凝土试样在静态载荷下强度	97

3.4.3 动载荷作用下非均匀混凝土试样的破裂	99
3.5 混凝土梁的动态剥落破裂	102
3.5.1 混凝土梁的数值模型	102
3.5.2 砂浆梁试样的剥落破裂过程	103
3.5.3 应力波作用时间对梁剥落破坏的影响	103
3.5.4 应力波峰值对梁剥落破坏的影响	106
3.6 本章小结	109
参考文献	109
第四章 岩石爆破损伤的数值试验	110
4.1 岩石爆破损伤研究的意义	110
4.2 爆炸载荷下岩石的力学响应	111
4.3 岩石爆破损伤的研究现状	112
4.3.1 岩石爆破作用机理	112
4.3.2 岩石爆破损伤模型及数值模拟	114
4.3.3 地应力的影响	119
4.3.4 切缝药包定向断裂爆破	121
4.4 岩石爆破损伤的数值计算模型	124
4.4.1 爆破应力波	124
4.4.2 爆破应力波的传播特征与衰减规律	125
4.4.3 爆生气体的膨胀压力	126
4.4.4 力平衡方程	127
4.4.5 初始条件和边界条件	128
4.4.6 岩石爆破损伤的本构关系	128
4.4.7 方程的有限元求解及其验证	129
4.5 应力波作用下单孔爆破损伤的数值模拟	136
4.5.1 与文献[27]结果的对比分析	136
4.5.2 爆生气体压力作用的影响	142
4.6 两孔爆破损伤数值试验	146
4.6.1 岩体爆破损伤的力学模型	146
4.6.2 应力波单独作用下双孔爆破损伤数值试验	146
4.6.3 爆破应力波和爆生气体共同作用下双孔爆破损伤数值试验	150
4.6.4 炮孔间距影响规律的数值试验	155
4.7 地应力对爆破损伤及裂纹扩展的影响	162
4.7.1 地应力分布的一些基本规律	162
4.7.2 单孔单向地应力下爆破损伤的数值试验	163

4.7.3 双孔双向地应力下的爆破损伤的数值试验	167
4.8 切缝爆破成缝规律的数值试验	169
4.8.1 定向切缝控制爆破原理	169
4.8.2 数值模型及计算结果分析	172
4.9 本章小结	177
参考文献	178
第五章 动载荷作用下岩石试样的破裂过程	187
5.1 平面压缩应力波作用下岩石的破裂过程	187
5.1.1 应力波幅值的影响	187
5.1.2 应力波持续时间的影响	189
5.2 巴西圆盘试样的动态破裂过程	192
5.2.1 数值模型	192
5.2.2 静载荷作用下的破坏过程	193
5.2.3 动载荷作用下的破坏过程	196
5.3 含预裂纹巴西圆盘试样的动态破裂过程	207
5.3.1 含预裂纹巴西圆盘试样的数值模型	207
5.3.2 静载荷作用下的破裂过程	208
5.3.3 动载荷作用下的破裂过程	211
5.4 不规则岩块的破裂过程	215
5.4.1 不规则岩块的数值模型	216
5.4.2 不同动态应力波幅值对破裂过程的影响	216
5.4.3 不同动态应力波持续时间的影响	219
5.5 冲击载荷作用下球形试样的破碎过程	220
5.5.1 相似模拟试验简介及数值模型	220
5.5.2 试样中应力分布的数值试验	221
5.5.3 球试样破碎过程的数值试验	223
5.6 本章小结	224
参考文献	225
第六章 静-动组合加载下岩石的破裂过程	228
6.1 岩石破裂的 SHPB 试验及结果	228
6.1.1 SHPB 试验设备及其原理	228
6.1.2 磁铁矿石试验结果分析	231
6.1.3 片麻岩试验结果分析	234
6.2 SHPB 试验中应力波传播的一维波动理论分析	236
6.2.1 一维波动理论及分析程序	236

6.2.2 程序验证	239
6.2.3 不同冲头形状时 SHPB 试验的一维波动分析	241
6.3 SHPB 试验中的应力波传播过程分析	242
6.3.1 开展 SHPB 试验数值模拟的必要性	242
6.3.2 数值模型的建立	244
6.3.3 数值试验结果分析	245
6.4 动态扰动下岩石破裂过程的数值试验	249
6.4.1 应力波的作用时间对损伤机制的影响	249
6.4.2 应力波峰值对损伤机制的影响	252
6.4.3 岩石均质度的影响	256
6.5 静-动组合加载下岩石破裂过程的数值试验	258
6.6 本章小结	263
参考文献	263
第七章 动态扰动触发深部岩巷岩爆的数值试验	265
7.1 静态地应力条件下巷道围岩的应力分布及破裂特征	265
7.1.1 地下巷道的力学模型	265
7.1.2 巷道周边的应力分布	265
7.1.3 RFPA-Dynamics 程序用于巷道围岩损伤及破坏的验证	269
7.1.4 不同断面形状巷道的破坏过程分析	274
7.2 动态扰动触发深部巷道失稳破裂的数值试验	281
7.2.1 圆形巷道的数值模型	281
7.2.2 动态扰动触发岩巷岩爆的机理分析	282
7.3 本章小结	289
参考文献	290
索引	292
彩图	

第一章 绪 论

1.1 深部开采面临的岩爆问题

矿产资源是发展国民经济、保障国家安全的物质基础。目前,我国 90%以上的能源和 80%左右的工业原料都取自矿产资源。矿业是我国国民经济的一个重要传统基础性产业。随着我国对矿产资源需求的日益增加,地表资源已日趋短缺,人们正不断地向地球深部寻求所必需的矿产资源,深部开采已成为未来采矿发展的趋势。由深部开采带来的岩爆(煤矿称为冲击地压)问题也随之凸现。

目前,国际上开采深度超过 1000m 的矿山已达 100 多座。南非绝大多数金矿的开采水平大都在 1000m 以下,Anglogold 有限公司的西部深井金矿的开采深度达 3700m。West Driefovten 金矿矿体赋存于地下 600m,并一直延伸至 6000m 以下。印度的 Kolar 金矿区,已有 3 座金矿采深超过 2400m,其中,钱皮恩里夫金矿共开拓 112 个阶段,总深 3260m。俄罗斯的克里沃罗格矿区,已有捷尔任斯基、基洛夫等 8 座矿山采准深度达 910m,开拓深度到 1570m,将来要达到 2000 ~ 2500m。另外,加拿大、美国、澳大利亚的一些有色金属矿山采深也超过 1000m。国内外矿山已达到的开采深度统计见表 1.1^[1~3]。图 1.1 给出一些国外的深部矿井,同时也列出了最大主应力及其与岩石强度之间的关系。

表 1.1 国内外矿山已达到的开采深度统计^[1~3]

矿产地	矿种	开采深度/m	矿产地	矿种	开采深度/m
山东玲珑金矿	金矿	800	开滦赵各庄煤矿	煤矿	1159
冬瓜山铜矿	铜矿	1100	加拿大 Kidd Creek	铜锌矿	2100
云南会泽铅锌矿	铅锌矿	1000	俄罗斯克里沃罗格	铁矿	1570
铜陵狮子山铜矿	铜矿	1100	印度 Kolar	金矿	3260
抚顺红透山铜矿	铜矿	1360	南非 Anglogold	金矿	3700

在我国,抚顺红透山铜矿^[4]、冬瓜山铜矿^[5]等深部矿山都有不同程度的岩爆灾害。红透山铜矿位于浑河大断裂带上盘,系寒武纪生成的块状硫化物矿床。围岩上下盘均为片麻岩,目前采深已经超过 1300m,岩石单轴抗压强度 100 ~ 110MPa。红透山铜矿自 1976 年开始发生轻微岩爆,随着采深的增加,于 1999 年