

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

岩石力学与
工程研究著作 丛书

岩体非连续破坏模拟 与应用

◎ 崔铁军 王来贵 著

非连续



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
岩石力学与工程研究著作丛书

岩体非连续破坏模拟与应用

崔铁军 王来贵 著

国家自然科学基金项目(51704141)
国家重点研发计划项目(2017YFC1503102)

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合矿业工程中发生的一些灾害现象,研究其中岩体非连续破坏的定性和定量特征,使用颗粒流理论和方法对这些破坏现象进行模拟和分析。破坏现象包括岩体地震破坏、岩体爆破、煤岩体自燃、开采过程冲击地压等;研究对象包括尾矿库、边坡、巷道、采空区等。主要内容包括:岩体建模方法、岩体爆破过程模拟、岩体位移及沉降模拟、煤岩自燃过程模拟、岩体地震模拟与稳定性、冲击地压过程模拟。

本书适合于从事岩石力学非连续破坏现象研究和解决相应工程问题的科研人员,也可供矿业和地下工程专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

岩体非连续破坏模拟与应用/崔铁军,王来贵著. —北京:科学出版社,2019.3
ISBN 978-7-03-060161-2

(岩石力学与工程研究著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

I. ①岩… II. ①崔…②王… III. ①岩体破坏形态-研究 IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 290941 号

责任编辑:张艳芬 罗 娟 / 责任校对:王萌萌

责任印制:吴兆东 / 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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:233 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《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 何满潮

副主编:康红普 李术才 潘一山 殷跃平 周创兵

秘书长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(按姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	陈卫忠	陈云敏	陈志龙
邓建辉	杜时贵	杜修力	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙灵	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	蒋宇静	焦玉勇	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	刘大安	刘汉东
刘汉龙	刘泉声	吕爱钟	潘一山	戚承志
任辉启	余诗刚	盛 谦	施 斌	宋胜武
谭卓英	唐春安	汪小刚	王 驹	王 媛
王金安	王明洋	王旭东	王学潮	王义峰
王芝银	邬爱清	谢富仁	谢雄耀	徐卫亚
薛 强	杨 强	杨更社	杨光华	殷跃平
岳中琦	张金良	张强勇	赵 文	赵阳升
郑 宏	郑炳旭	周创兵	朱合华	朱万成

《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、向家坝等水电站,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,863 计划、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 20 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 计划、863 计划、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、岩土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,先后在武汉市与葫芦岛市召开《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参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程研究领域取得的最新成果。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 75 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、国防科研等领域大专院校、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。

在本丛书的策划、组织与出版过程中,得到各专著作者与编委的积极响应;得到各界领导的关怀与支持,特别是中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭教授、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉编辑做了许多烦琐而有成效的工作,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

目前基于连续介质理论的岩体破坏模拟研究比较充分,且一般用于静态或近似静态过程。但是,实际岩体破坏过程往往是静态到动态、连续到非连续的破坏过程,如岩体地震、煤岩自燃、岩体爆破、冲击地压等以及开采过程中岩体位移、断裂和堆积等。这些过程普遍存在,使用连续介质理论进行描述显然不合适。颗粒流方法可以同时描述固体在连续和非连续破坏过程中受到动力作用后的变形、破裂、分离、抛射和坍塌等过程,为解决上述问题提供了有效途径。

本书采用颗粒流理论和方法,并配合二次开发模型对岩体非连续动力破坏问题进行模拟和分析,主要内容如下。

第1章介绍研究的目的是和意义、研究现状和存在的问题、颗粒流理论、本书主要内容。

第2章包括山地造形方法、岩体建模方法和岩体界面建模方法。使用 PFC3D 的 FISH 语言构建复杂山地地形。提出构建岩体模型的下落法,包括整体下落法和分层下落法。利用下落法构建平行不整合和角度不整合岩体模型。

第3章岩体爆破过程模拟:提出基于颗粒流的爆破过程模型及其三维改进模型。根据能量守恒定律和能量分配方法进行颗粒流爆炸模型二次开发,并应用于多种工程问题分析。提出使用 PFC3D 结合爆炸区划理论的爆破模拟。在爆炸模型基础上改进得到三维爆炸模型,提出新能量分配方式,使该模型适合于三维岩体爆破模拟。

第4章对开采过程造成的岩层运移和地表沉降进行模拟分析。模型在不同充实率条件下模拟岩层运移情况。对直接顶板爆破、充填开采、充填开采+顶板爆破三种采空区处理方式建模。

第5章应用颗粒流理论的能量扩散模型和热力耦合模型并进行二次程序开发,模拟不同情况下的煤岩自燃现象。模拟采空区遗煤、煤堆及边坡内煤层自燃过程。

第6章对地震作用的岩体破坏过程进行模拟和分析,并完成二次程序开发。模拟不同峰值加速度的正弦地震波震动过程中的尾矿库、边坡及上覆岩层等的破坏过程。

第7章对矿业工程中出现的冲击地压现象进行模拟和研究。从能量角度对冲击地压过程进行划分和分析,运用颗粒流理论实现冲击地压模拟。提出冲击地压破坏过程是岩体系统为了保持自身能量平衡而向系统外释放能量的过程。

本书注重模拟过程与实际过程的一致性,强调理论联系实际的原则。创造性地提出了一些颗粒流二次开发数学模型并予以实现。使用这些模型在多个方面对矿业工程遇到的灾害进行模拟研究。本书内容新颖、通俗易懂,结合实例应用,进行了模拟现象与实际过程的对比分析。

本书主要内容为国家自然科学基金项目(51704141)和国家重点研发计划项目(2017YFC1503102)的研究成果。本书由崔铁军副教授和王来贵教授共同撰写,崔铁军负责第1~6章,王来贵负责第7章,全书由崔铁军统稿。在撰写书稿过程中,马云东、宋子岭、韩光、周玉祥、海龙、荣海、李莎莎、黄优、陈善乐、高会春等在工程分析、实验、力学数学模型构建等方面给予了大量帮助,在此表示衷心感谢。

书中引用了部分国内外专著、文章、规范等成果,在此向作者及相关人士表示感谢。辽宁工程技术大学提供了科研环境,Itasca公司提供了学习版PFC3D,这些为作者进行探索性研究提供了条件,在此表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

崔铁军

2018年3月

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 1 章 绪论	1
1.1 研究工作的目的和意义	1
1.2 研究现状和存在的问题	1
1.2.1 岩体建模方法	2
1.2.2 岩体爆破模拟方法	2
1.2.3 岩体位移及沉降模拟方法	3
1.2.4 煤岩自燃模拟方法	5
1.2.5 岩体地震模拟方法	6
1.2.6 冲击地压模拟方法	7
1.3 颗粒流理论	9
1.3.1 颗粒流与 PFC3D	9
1.3.2 物理模型	10
1.3.3 接触模型	11
1.3.4 阻尼模型	16
1.3.5 热力耦合模型	17
1.3.6 边界条件施加	18
1.3.7 一般构建过程	18
1.3.8 计算循环实现	19
1.3.9 细观参数标定	20
1.4 本书主要内容及研究特色	22
参考文献	22
第 2 章 岩体建模方法	31
2.1 山地造形方法	31
2.1.1 山形构建方法	32
2.1.2 山形网格构建	32
2.1.3 山形数据处理	33

2.1.4 山形模型构建	33
2.2 下落法构建岩体模型	34
2.2.1 尾矿库模型构建	35
2.2.2 PFC3D 模型构建	37
2.2.3 下落法建模过程	39
2.2.4 煤堆模型构建	42
2.3 岩体中不整合面构建	43
2.3.1 岩层接触形式	43
2.3.2 接触面构造方法	44
2.3.3 接触面模型构建	45
2.3.4 模拟与结果分析	52
2.4 小结	53
参考文献	54
第3章 岩体爆破过程模拟	55
3.1 边坡爆破过程模拟及稳定性分析	55
3.1.1 边坡模型构建	55
3.1.2 爆炸模型构建	57
3.1.3 模拟与结果分析	59
3.2 放顶爆破方案模拟	64
3.2.1 工程背景	64
3.2.2 采空区模型构建	66
3.2.3 模拟与结果分析	69
3.3 边坡爆破高度对边坡稳定性的影响	72
3.3.1 边坡模型构建	72
3.3.2 模拟与结果分析	73
3.4 边坡爆破与飞石距离分析	76
3.4.1 爆破方案设置	76
3.4.2 飞石模拟与距离统计分析	77
3.5 厚硬岩层回采处理方案模拟	79
3.5.1 工程背景	79
3.5.2 模型构建	80
3.5.3 模拟与结果分析	81
3.6 爆炸模型改进	84
3.6.1 三维爆炸模型构建	85
3.6.2 模拟与结果分析	87

3.7 小结	92
参考文献	93
第4章 岩体位移及沉降模拟	95
4.1 充填开采与地面路基沉降模拟	95
4.1.1 岩层模型构建	95
4.1.2 模拟与结果分析	96
4.2 采空区处理方式与上覆路基沉降模拟	100
4.2.1 3种方案模型构建	100
4.2.2 模拟与结果分析	101
4.3 岩层错动与复杂构造岩体破坏	105
4.3.1 工程背景	105
4.3.2 模拟与结果分析	105
4.3.3 最优巷道路径确定	107
4.4 急倾斜煤层开采模拟	108
4.4.1 开采方案	108
4.4.2 方案模型构建	109
4.4.3 模拟与结果分析	111
4.4.4 岩体加固建议	114
4.5 小结	115
参考文献	116
第5章 煤岩自燃过程模拟	117
5.1 采空区遗煤发火模拟	117
5.1.1 工程背景	117
5.1.2 遗煤发火细观模型构建	118
5.1.3 模拟与结果分析	119
5.1.4 模型改进研究	121
5.2 煤堆自燃模拟	122
5.2.1 工程实例	122
5.2.2 氧气流动模型构建	123
5.2.3 模拟与结果分析	123
5.3 残煤自燃与矿边坡稳定性	126
5.3.1 工程实例及模型构建	126
5.3.2 模拟与结果分析	127
5.4 边坡残煤自燃温场确定	130
5.4.1 氧流场及细观模型构建	130

5.4.2	模拟与结果分析	131
5.5	煤岩自燃与复杂边坡稳定性	133
5.5.1	自燃模型构建	133
5.5.2	模拟结果分析	134
5.6	小结	136
	参考文献	137
第6章	岩体地震模拟与稳定性	139
6.1	尾矿库地震稳定性	139
6.1.1	尾矿库模型构建	139
6.1.2	地震模型构建	139
6.1.3	模拟与结果分析	140
6.2	一般边坡的地震稳定性	141
6.2.1	工程实例及模型构建	142
6.2.2	模拟与结果分析	143
6.3	顺坡裂隙边坡地震破坏模拟	145
6.3.1	工程背景及模型构建	145
6.3.2	模拟与结果分析	146
6.3.3	地震模拟结果总结	148
6.3.4	治理方案及效果分析	149
6.4	逆坡裂隙边坡地震破坏	150
6.4.1	模型构建	150
6.4.2	模拟与结果分析	151
6.4.3	与顺坡裂隙边坡破坏的对比	153
6.5	废弃采空区地震与地表沉降	154
6.5.1	模型构建	154
6.5.2	模拟与结果分析	155
6.6	小结	159
	参考文献	160
第7章	冲击地压过程模拟	162
7.1	冲击地压细观过程	162
7.1.1	冲击地压与能量理论	162
7.1.2	细观过程与能量关系	163
7.2	不同深度冲击地压过程	168
7.2.1	冲击地压模型构建	168
7.2.2	冲击地压过程分析	170

7.3 深度及倾角对冲击地压的影响	175
7.3.1 模型构建	176
7.3.2 模拟与结果分析	177
7.4 冲击地压特征量数值关系	180
7.4.1 特征量提取	181
7.4.2 特征量关系分析	181
7.5 小结	184
参考文献	185

第 1 章 绪 论

1.1 研究工作的目的和意义

目前,岩体的灾变过程研究取得了较大进展,但也存在明显问题。

相似实验和基于连续性理论的岩体灾变过程研究存在先天不足,特别是对非连续性破坏的研究。对于实验台,其实验尺度对结果具有不可忽略的影响,模型难以 1:1 建立。另外,模型的制作相当耗费人力、财力和时间。为弥补实验的不足,提出使用模拟对难以制作的模型及难以出现的现象进行分析。对于模拟,基于连续性介质理论的模拟破坏过程也存在一定不符合实际过程的缺点。例如,ANSYS、FLAC 及 ADINA 等模拟软件是基于连续介质理论的,一般情况下只能模拟破坏后的岩体变形,即连续性破坏;不能模拟实际过程中的岩体断裂、破碎现象。这样的模拟结果难以描述岩体地震及爆破破坏、煤岩自燃破坏、冲击地压等动力作用后的岩体非连续破坏现象。但是,这些现象在实际生产生活中是普遍存在的,是不可回避的工程及科学问题。

上述问题的主要矛盾在于连续与非连续、静态与动态之间的转化。此时,需要同时具备连续与非连续、静态与动态模拟能力的理论与方法对该问题进行解决。颗粒流理论是目前较好的解决方案,可同时描述固体在连续和非连续过程中受到动力破坏作用后的变形、破裂、分离、抛射和坍塌等过程,是解决上述问题的有效途径。

因此,本书目的在于借助颗粒流理论,并进行二次模型开发,对岩体进行建模,从而研究其在动力作用下发生的从静态到动态、从连续到非连续的破坏过程。涉及的动力作用包括地震、爆破、自燃、冲击地压等;研究对象为岩体,包括尾矿库、边坡、采空区、上覆岩层等。

非连续破坏在实际生产生活中比连续破坏更为普遍。对岩体非连续破坏进行研究也是学术界的热点。本书进行的研究是探索性的,力求在定性和规律层面上得到一些有益的结果。

1.2 研究现状和存在的问题

学术界对岩体非连续破坏形式的研究是多样的,这里给出与本书相关的研究现状和存在的问题。

1.2.1 岩体建模方法

PFC3D 是 Itasca 公司 2008 年发布的一款高端产品,特别适合复杂机理性问题的研究^[1]。在岩体工程中可用来研究结构开裂、堆石材料特性和稳定性、矿山崩落开采、边坡解体、爆破冲击等一系列传统数值方法难以解决的问题。PFC3D 应用难度较大,对用户要求较高。

本书涉及使用 PFC3D 进行复杂山形建模、岩体建模和岩体接触面建模方面的研究。

对于复杂山形的建模,只有张龙等^[2]的鸡尾山高速远程滑坡运动过程 PFC3D 模拟中明确使用了山地造形,但并未说明造形的具体过程。

关于岩体建模研究主要有:陈宜楷^[3]对基于颗粒流离散元的尾矿库坝体进行了稳定性分析;李识博等^[4]研究了松散堆积物坝基渗透淤堵试验及颗粒流模拟;吴顺川等^[5]进行了卸载岩爆试验及 PFC3D 数值模拟研究;刘先珊等^[6]研究了三维颗粒流数值模型的胶结砂岩力学特性;姜春林等^[7]对微型抗滑桩土拱效应空间特征的细观力学进行了分析;周健等^[8]进行了基于三维离散-连续耦合方法的分层介质中桩端刺入数值模拟。但是,使用 PFC3D 所构建的模型形状都比较简单,尺寸也比较小,难以满足实际工程需要。

关于岩体中不同岩石接触面建模的研究主要有:毛先成等^[9]研究了基于不规则三角网的地质界面三维形态分析方法与应用;张燕等^[10]研究了开采扰动下不整合面附近的岩体变形特征;于福生等^[11]对龙门山前缘关口断裂典型构造剖面的物理模拟实验及其变形主控因素进行了研究;廖杰等^[12]对珠江口盆地白云凹陷裂后异常沉降进行了数值模拟。这些模拟的岩体中接触面构建得并不精细;更为重要的是,接触面之间的岩体力学性质与岩体内部完整部分的性质有很大差异,这对后期模拟施工等将有难以预料的影响。另外,多数岩土模拟软件应用连续介质理论,模拟包含接触面的连续-非连续岩体存在先天缺陷,在接触面构建和参数差异赋值控制方面比较困难,因此如何构造符合实际的接触面是值得研究的问题。

1.2.2 岩体爆破模拟方法

本节研究岩体颗粒流爆破模型的建立和应用,内容包括放顶爆破、边坡爆破、爆破飞石。

目前对爆破模型和过程的研究尚不充分。陈朝玉等^[13]研究了爆破对柔弱夹层层边坡的稳定性影响;王建国等^[14]进行了爆破震动对高陡边坡稳定性产生影响的数值模拟研究;钟冬望等^[15]进行了爆炸荷载下岩质边坡动力特性试验及数值分析研究;刘磊^[16]进行了岩质高边坡爆破动力响应规律数值模拟研究;谢冰^[17]实

现了岩体动态损伤特性分析及其在基础爆破安全控制中的应用。这些研究一般基于连续介质理论,其模拟研究难以实现爆破岩体的碎裂过程,也无法根据实际情况控制各破碎岩块状态,更无法进行宏观层面上的爆破过程模拟。

对上覆坚硬且构造复杂的岩体进行爆破强制放顶的相关研究包括:周登辉等^[18]对大倾角坚硬顶板深孔超前预爆破进行了研究;伍永平等^[19]对坚硬顶板综放工作面超前弱化进行了模拟研究;张杰^[20]对浅埋煤层顶板深孔预爆强制初放进行了研究;高魁等^[21]对深孔爆破在深井坚硬复合顶板沿空留巷强制放顶中的应用进行了研究;张春雷等^[22]对大倾角大采高综采工作面坚硬顶板控制技术进行了研究;曹胜根等^[23]对采场上覆坚硬岩层破断的数值模拟进行了研究。

露天矿边坡爆破是矿业生产的主要方式之一,而爆破产生的飞石也是重要的安全隐患。目前对于爆破飞石距离的研究主要是经验拟合和算法预测等。熊炎飞等^[24]总结了爆破飞石飞散距离计算公式;吴春平等^[25]研究了爆破飞石预测公式的量纲分析法;刘庆等^[26]进行了基于BP神经网络模型的爆破飞石最大飞散距离预测研究;周磊^[27]进行了台阶爆破效果评价及爆破参数优化研究;杨佑发等^[28]对爆破地震波模拟进行了研究;张东明等^[29]研究了预裂爆破在隧洞施工中的应用。这些研究基本上关注爆破状态,即通过对爆破开始状态参数设定和爆破结束后参数测量确定爆破性质。其最大问题在于,不考虑爆破过程中岩石之间的相互作用、能量传递、飞石在空中和落地后的运动状态。

1.2.3 岩体位移及沉降模拟方法

岩体位移及沉降模拟方法涉及开采过程中上覆岩层运移、地面路基沉降、岩层错动等模拟研究。

采空区上覆岩层应力应变变化致使上部地面既有建(构)筑物发生破坏,甚至失去正常使用能力,已经成为矿业工程中亟待解决的问题。目前解决方法主要是充填开采。对充填开采上覆岩层运移的研究主要有:何涛等^[30]对不同采空区处理方式上覆岩层活动规律进行了研究;黄艳利等^[31]对充填体压实率关于综合机械化固体充填采煤岩层移动控制作用进行了分析;白国良^[32]对膏体充填综采工作面地表沉陷规律进行了研究;王启春等^[33]对厚松散层下矸石充填开采地表移动规律进行了研究;苏仲杰等^[34]对基于数值模拟的充填开采地表下沉系数进行了分析;王家臣等^[35]对长壁矸石充填开采上覆岩层移动特征模拟进行了研究;甯瑜琳等^[36]对急倾斜矿体充填法开采的地表沉陷特性进行了研究;张普纲^[37]对采空区高速公路路基破坏进行了数值模拟分析;吴盛才等^[38]采用概率积分法预计高速公路采空区地表变形;童立元等^[39]对高速公路与下伏煤矿采空区相互作用规律进行了探讨。这些研究也存在一些问题:相似材料模拟实验存在的尺寸效应和地质构造建模误差等会使结果产生失真,且传感器的布置区域有限,难以全面监测;概率积分