

岩爆和冲击地压数值模拟 与评估预测方法

周 辉 杨凡杰 著
张传庆 卢景景



科学出版社

岩爆和冲击地压数值模拟 与评估预测方法

周 辉 杨凡杰 张传庆 卢景景 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对深部工程经常遇到的岩爆和冲击地压等动力灾害展开研究,首先介绍一种模拟岩体非线性破坏演化过程的广义数值模型——物理细胞自动机模型,并用于研究岩爆和冲击地压形成过程中的混沌性及其演化规律;运用非线性动力学的理论和方法,对岩爆和冲击地压灾害的非线性动力学预测方法进行研究;对高应力硬岩的力学响应行为和强度的时间效应特性展开研究,并探讨了相应的力学模型;介绍目前应用较多的岩爆风险评估指标和方法,并提供工程应用实例;最后,研究深部岩体两种开挖方式(钻爆法和TBM)的数值计算方法,并对岩爆和冲击地压等动力灾害发生过程中的新生边界条件及对其周围岩体扰动影响的数值计算方法进行了探索性研究。

本书主要读者对象是岩土工程相关专业的高年级本科生和研究生,以及从事深部高应力地下工程、煤岩动力灾害、岩爆和冲击地压等研究的科技工作者和工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

岩爆和冲击地压数值模拟与评估预测方法/周辉等著. —北京:科学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-03-046679-2

I. ①岩… II. ①周… III. ①岩爆-击地压-数值模拟-评估 ②岩爆-冲击地压-数值模拟-预测 IV. ①P642 ②TU456

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 304245 号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 钟 洋

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

*

2015 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 315 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

为了适应我国经济的快速健康发展,在能源、交通、水利水电等领域需要建设大量深部硐室、矿井及隧道(洞)等工程。由深埋高应力导致的动力灾害(如深埋隧洞岩爆和深部矿山巷道冲击地压等)在深部工程建设中频发,已成为深部工程施工的普遍问题。国际上,如发生在南非、智利、加拿大、澳大利亚、俄罗斯等国的矿井,以及挪威、美国、中国、瑞典、瑞士等国的隧道工程中的岩爆和冲击地压等动力灾害,不仅严重威胁到施工人员的安全,而且造成了巨大的经济损失。因此,深部工程施工时遭遇的岩爆和冲击地压等动力灾害已严重制约着地下工程的安全建设,成为目前工程中亟需解决的难题。

众多学者从不同角度对岩爆和冲击地压展开了大量研究,对其机理、特征和规律积累了丰富的认识与理解,但由于岩爆和冲击地压的发生条件复杂,影响因素众多,仍有诸多问题尚待研究和解决。例如,在岩爆和冲击地压的非线性动力学机理研究中,岩体破坏演化过程的混沌性规律和非线性预测方法等方面的定量研究与实际工程需求仍有距离;岩爆和冲击地压的数值模拟方法中,在诸如物理意义明确、理论上较为完善、能较好描述深部岩体变形和强度特性的力学模型,以及能合理描述岩爆和冲击地压的孕育发生过程,并能对其进行准确预报与预测的判据指标等方面仍需深入研究。此外,由于岩爆和冲击地压的孕育发生过程实际是岩体从静力状态向动力状态转换的过程,采用数值模拟方法对围岩稳定性进行评估以及对岩爆和冲击地压进行预测时,就必须考虑岩体由静转动的这一过程,于是有必要对描述岩爆和冲击地压实际物理过程的数值计算方法展开深入研究。

本书总结了作者围绕岩爆和冲击地压所开展的十多年研究成果。首先介绍一种模拟岩体非线性破坏演化过程的广义数值模型——物理细胞自动机模型,并以此研究岩爆和冲击地压形成过程中的混沌性及其演化规律;考虑到岩爆和冲击地压的发生过程是一个典型的非线性过程,运用非线性动力学的相关理论和方法,对岩爆和冲击地压灾害的非线性动力学预测方法进行了研究;再次,对深埋地下工程中高应力硬岩的力学响应行为和强度的时间效应特性展开研究,并探讨了其相应的力学模型;之后,介绍了目前应用较多的岩爆风险评估指标和方法,并提供了部分工程应用例证;最后,对深部岩体两种开挖方式(钻爆法和TBM)的数值计算方法进行研究,并对岩爆和冲击地压等动力灾害发生过程中的新生边界条件及其周围岩体扰动影响的数值计算方法进行了探索性研究。本书的具体内容安排如下:

第一章,绪论。论述本书的研究依据与意义,对国内外的研究现状进行综述,

从岩爆和冲击地压经典理论研究、实验研究、非线性动力学研究以及预测评估方法研究等几方面系统总结了此领域内的相关研究进展和基础,并介绍了本书的主要内容。

第二章,岩爆和冲击地压孕育演化特征的细胞自动机制论研究。考虑到非线性动力学特征决定着岩爆和冲击地压的演化进程与突变等特性,为深入揭示岩爆和冲击地压的动力学特征,本书第二章介绍了一种模拟岩体非线性破坏演化过程的广义数值模型——物理细胞自动机模型,并用于研究岩爆和冲击地压形成过程中的混沌性及其演化规律。

第三章,岩爆和冲击地压的非线性动力学预测分析方法研究。由于岩爆和冲击地压的发生过程是一个典型的非线性现象,第三章运用非线性动力学的理论和方法对岩爆和冲击地压灾害的非线性动力学预测方法进行了研究,主要包括动力灾害系统状态变量的确定及其对应的非线性动力学方程的反演,以及混沌系统的预测理论等方面的研究内容,其中混沌系统的预测理论研究又包括可预测尺度理论和预测预报理论两方面的内容。

第四章,高应力硬岩力学模型。硬岩广泛存在于深埋隧道(洞)、边坡和采矿等工程中,其在开挖过程中的变形和破坏特征关系到工程的安全性。同时,大量地下工程实践表明硬岩岩体的强度均具有较强的时间效应,且对工程安全方面有着重大影响。结合本研究团队最新的研究成果,第四章对高应力硬岩的力学响应和其强度的时间效应展开深入研究,并探讨了其相应的力学模型。

第五章,基于静力数值分析的岩爆/冲击地压预测评价指标与评估方法介绍。数值模拟方法是岩爆和冲击地压等动力灾害预测评估的重要手段,目前岩爆和冲击地压等动力灾害的数值模拟预测评估多是在静力计算的结果上,采用合适的评价指标对动力灾害风险进行定性判别。第五章主要介绍了目前应用较多的岩爆/冲击地压预测评估指标和方法,如局部能量释放率(local energy release rate, LERR)指标,破坏接近度(FAI),能量释放率(energy release rate, ERR)和超剪应力(ESS)指标等。

第六章,岩爆/冲击地压孕育演化过程的动力学数值分析方法研究。考虑到岩爆和冲击地压等动力灾害的孕育发生过程实际是岩体从静力状态向动力状态转换的过程,第六章首先介绍了一个新的单元发生岩爆的能量判据——单位时间相对局部能量释放率指标(unit time relative local energy release index, URLERI),对深部岩体两种开挖方式(钻爆法和TBM)的数值计算方法进行研究,同时对岩爆和冲击地压等动力灾害发生过程中的新生边界条件及其对周围岩体扰动影响的数值计算方法进行了探索性研究。

本书中的主要研究成果是在国家重点基础研究发展计划(973)项目:深部复合地层围岩与TBM的相互作用机理及安全控制——第2课题:TBM掘进扰动

下深部复合地层围岩力学行为响应规律 (2014CB046902)、中国科学院知识创新工程青年人才类重要方向项目: 深埋长隧洞围岩层裂机理与岩爆预测研究 (KZCX2-EW-QN115)、中国科学院科技创新“交叉与合作团队”: 深部工程动力灾害防治和防护的支护理论与技术研究 (人教字 [2012]119 号), 以及国家自然科学基金项目 (51427803, 50204009, 50579091, 10772190, 50979104, 41172288, 51009132, 51104151, 51404240) 等项目的资助下完成的。在本书主要内容研究过程中, 得到了 [王泳嘉] 教授、冯夏庭教授、谭云亮教授、钱七虎院士、何满潮院士等老师和专家多年的精心指导和关怀, 在撰写中也得到了有关专家的指导和帮助, 引用了多位学者的文献资料, 在此一并表示感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在不妥之处, 敬请读者和有关专家批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 岩爆和冲击地压灾害概述	1
1.2 岩爆和冲击地压形成机制研究现状	2
1.2.1 岩爆和冲击地压经典理论	2
1.2.2 岩爆和冲击地压实验	3
1.2.3 岩爆和冲击地压非线性动力学研究	3
1.3 岩爆和冲击地压的预测评估方法研究现状	5
1.4 本书的主要内容	6
参考文献	8
第二章 岩爆和冲击地压孕育演化特征的细胞自动机制论	14
2.1 引言	14
2.2 物理细胞自动机的基本规则	15
2.3 物理细胞自动机对岩体物理力学性质及应力的模拟	16
2.3.1 对岩体材料性质的模拟	16
2.3.2 对岩体内裂纹(或宏观“软弱区”)的模拟	19
2.3.3 对应力环境的模拟	19
2.3.4 对能量耗散的模拟	20
2.3.5 对系统失稳的判别	20
2.3.6 对单轴拉(压)条件下力-变形曲线的表达	21
2.4 物理细胞自动机对岩体破坏特征的模拟	23
2.4.1 对岩体破坏过程中力-变形-声发射演化关系的模拟	23
2.4.2 对循环加载的模拟	25
2.4.3 对不同声发射模式的模拟	26
2.4.4 对裂纹尖端塑性破坏区形态的模拟	28
2.4.5 改进的物理细胞自动机模型及岩石破坏过程中的变量相关性分析	30
2.5 岩爆和冲击地压非线性特征的描述方法	47
2.5.1 Lyapunov 指数的定义及计算方法	47
2.5.2 关联维的定义及其提取方法	52
2.6 物理细胞自动机对岩体破坏演化混沌性的模拟分析	54

2.6.1	不同能量输入方式对岩体破坏演化混沌性的影响	55
2.6.2	裂纹(或局部宏观“软弱区”)对岩体破坏演化混沌性的影响	59
2.6.3	不同初始均质程度对岩体破坏演化混沌性的影响	62
2.6.4	能量耗散系数的物理意义及对岩体破坏过程混沌性的影响	64
2.6.5	岩体破坏演化全过程中不同时间段的混沌性	68
2.6.6	岩体破坏演化中的定常运动行为	76
2.6.7	不同观测时间间隔对岩体破坏混沌性的影响	78
2.7	小结与讨论	80
	参考文献	81
第三章	岩爆和冲击地压的非线性动力学预测分析方法	84
3.1	系统状态变量的确定及其非线性动力学方程反演	84
3.1.1	岩爆和冲击地压系统观测变量的神经网络聚类分析	85
3.1.2	系统独立主变量的构造	87
3.1.3	系统非线性动力学方程的反演方法	93
3.1.4	算例	95
3.2	岩爆和冲击地压系统的可预测性理论研究	99
3.2.1	不同因素对系统可预测尺度的影响规律	101
3.2.2	基于胞映射理论的可预测尺度理论模型	102
3.3	岩爆和冲击地压系统的非线性预测理论研究	116
3.3.1	系统演化状态的数值预测方法	116
3.3.2	岩爆和冲击地压系统的突变预测及评价	122
3.3.3	冲击地压灰色-尖点突变预测的评价实例	128
3.4	小结与讨论	129
	参考文献	130
第四章	高应力硬岩力学模型	132
4.1	考虑围压效应的硬岩弹塑性耦合力学模型	132
4.1.1	不同围压下两种大理岩的试验结果	133
4.1.2	考虑围压效应的大理岩力学模型的建立	137
4.1.3	力学模型的数值验证	155
4.2	硬脆性岩石强度时效性演化模型	158
4.2.1	硬脆性岩石时效性破裂机制的试验研究	158
4.2.2	硬脆性岩石强度时效性演化模型研究	173
4.3	小结与讨论	186
	参考文献	187

第五章 基于静力数值分析的岩爆/冲击地压预测评价指标与评估方法	190
5.1 深埋地下隧道/巷道的数值计算方法	190
5.2 基于静力计算的岩爆/冲击地压预测理论及其指标	191
5.3 基于数值模拟的岩爆/冲击地压预测评估方法	196
5.4 小结与讨论	203
参考文献	203
第六章 岩爆/冲击地压孕育演化过程的动力学数值分析方法	206
6.1 岩爆/冲击地压发生过程的能量判别指标	206
6.1.1 动力灾害的形成机制研究	206
6.1.2 单位时间相对能量释放率指标的提出	207
6.2 动力灾害演化过程的数值计算方法	212
6.2.1 钻爆法的开挖荷载数值计算方法研究	213
6.2.2 TBM 的开挖荷载数值计算方法研究	220
6.2.3 岩爆/冲击地压发生过程中新生边界条件的数值处理	221
6.2.4 岩爆/冲击地压数值计算中的其他问题	226
6.3 工程案例计算	228
6.3.1 应变型岩爆案例 —— 钻爆法开挖	229
6.3.2 时滞性岩爆案例计算	234
6.3.3 动力激励型岩爆计算	238
6.4 小结与讨论	243
参考文献	243
索引	247

第一章 绪 论

随着经济和交通的发展,诸如硐室、矿井及隧道(洞)等深部工程需要大量建设。因深埋高应力导致的动力灾害(如深埋隧洞岩爆和深部矿山巷道冲击地压)在深部工程建设中频发,已成为深部工程施工的普遍问题^[1]。例如,发生在南非、智利、加拿大、澳大利亚、俄罗斯等的矿井以及挪威、美国、中国、瑞典、瑞士等的隧道工程中的岩爆和冲击地压等动力灾害^[2],不仅严重威胁到施工人员的安全,而且造成了巨大的经济损失。因此,深部工程施工时遭遇的岩爆和冲击地压等动力灾害已严重制约了地下工程的安全建设,成为目前工程中亟需解决的难题。

1.1 岩爆和冲击地压灾害概述

岩爆和冲击地压均为岩石的动力破坏形式。一般认为,岩爆是高地应力条件下地下工程开挖时,硬脆性围岩因开挖卸荷导致储存于岩体中的弹性应变能突然释放,因而产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷的一种动力失稳地质灾害^[3-5],主要出现于水电、交通及金属矿山等工程领域;冲击地压则限于煤炭行业,通常是指在高地应力条件下,煤岩破坏所释放的变形能超过了破坏过程中所消耗的能量而引发的煤体以突然、急剧、猛烈的破坏为特征的动力现象,往往造成矿山设备的损坏、上百米的井巷破坏以及人员的伤亡^[6,7]。

可见,岩爆和冲击地压都意味着岩体由一个平衡状态向另一个状态的突变,同时伴随有剩余能量以应力波形式向四周释放。对于二者的异同,在现象和构成介质的岩性上,岩爆和冲击地压之间存在着明显的差异^[8],但在发生机制上,二者具有一定的相似性,或者在一定程度上冲击地压可以归入岩爆的范畴。例如,Hoek 依据原有裂隙面的滑移以及完整岩体的裂隙化将岩爆分为应变型和断裂型。钱七虎院士则将断裂型岩爆扩展为断层滑移或者剪切断裂型,而统计分析表明,矿井中的大部分冲击地压究其发生机制,是与断裂滑移型或剪切型岩爆为同一类型,也是广义岩爆的一类^[2]。

岩爆和冲击地压等动力灾害发生时,由于伴随有巨大应变能的释放,对深部工程的安全施工造成了严重威胁。例如,在岩爆方面,冬瓜山铜矿在开拓期间,井巷围岩中发生了多起岩爆,严重影响了正常开采^[9];二郎山隧道施工期间先后共发生 200 多次岩爆,连续发生岩爆的洞段累计总长度达 1095 m,对施工过程造成了不同程度的影响^[10];雅砻江锦屏二级水电站的引水隧洞、施工排水洞和辅助洞均发生

了强烈与极强岩爆破坏；二滩水电工程地下厂房洞室群开挖过程中，发生了数十次规模不等的岩爆，甚至出现百吨级预应力锚索被拉断现象，对洞室围岩造成了较大破坏，严重影响了施工进度^[11]；另外，天生桥、瀑布沟和拉西瓦等水电站地下洞室群开挖过程中均发生了不同程度的岩爆灾害，严重影响了工程的安全施工。在冲击地压方面，我国在 1933 年的抚顺胜利矿最先发生冲击地压。随着煤矿平均开采深度的增加，我国发生冲击地压灾害的区域越来越广，先后在北京、辽源、通化、阜新、北票、枣庄、大同、开滦、天府、南桐、徐州、大屯、新汶等矿务局都相继发生过冲击地压^[12]。例如，北京矿务局 1974 年在城子矿回收煤柱时发生了 3.4 级矿震，造成 29 人死亡；北票台吉矿在 1994 年发生了 4.5 级矿震，竖井附近建筑物和民房 2000 余间遭到破坏，近 3000 米长井下巷道遭到损毁，死亡 5 人，伤 12 人^[13]；义马煤业集团的千秋煤矿在 2008 年发生冲击地压，造成 13 人死亡^[14]，之后，在 2011 年该矿区又发生严重冲击地压，造成 10 人死亡，直接经济损失两千多万^[15] 等。

由于岩爆和冲击地压等动力灾害形成机制复杂，影响因素众多，且造成后果严重，长期以来一直受到国内外岩石力学理论与工程领域专家学者的广泛重视，也是深部岩体力学发展前沿的关键科学问题和亟待解决的重大课题。

1.2 岩爆和冲击地压形成机制研究现状

由于岩爆和冲击地压等动力灾害对地下工程具有极大的破坏性，自出现以来就受到国内外岩石力学工作者的高度重视，特别是其形成机制问题，更是过去几十年国内外有关专家与学者共同关注的焦点。因岩爆和冲击地压在形成机制上具有一定的相似性，国内外专家和学者在研究时并未将二者进行明显区分。

1.2.1 岩爆和冲击地压经典理论

岩爆和冲击地压的形成机制十分复杂，各国学者在对其形成机制展开研究时，从不同角度相继提出了一系列的重要理论。较早的是源于普通压力机岩石力学试验的经典刚度理论^[16,17]、强度理论和能量理论^[18]。在倾向性理论方面，主要是根据岩石力学试验提出定量的倾向性评价指标，包括脆性系数、冲击能量指标、应变能储存指数法、能量比法、动态 (DT) 法、应力法等数十种^[19-21]。此外，还包括“三准则”理论^[22]、压杆失稳理论^[23]、岩体失稳理论^[24]、突变理论^[25]、分形理论^[26-28]、损伤理论^[29-33] 以及基于细观力学试验的形成机制研究^[34] 等。近些年来，人们已经意识到动力扰动作用对触发岩爆和冲击地压的重要性，特别是对于深部的岩体，由于隧 (巷) 道周边的应力集中更加明显，动力扰动对于岩爆和冲击地压的触发作用也更加突出^[35]。即扰动理论指出，储存大量的应变能仅仅是发生岩爆和冲击地压的必要条件，不是充分条件，而必须有外部因素的扰动才能触发^[36]。

朱万成等^[35,37]认为扰动应力波的波形也是影响巷道破裂的重要因素。邵鹏^[38]建立了周期力和随机动力扰动影响下的岩板结构演化方程,讨论了动力扰动能量向周期力能量转移的现象。康政虹^[39]基于扰动响应判据对岩爆进行了解释分析。动力扰动理论从岩爆的外部触发机制出发,是对岩爆机制认识的有益补充。

1.2.2 岩爆和冲击地压实验

由于岩爆和冲击地压发生的突然性和灾害性,其发生过程难以在现场观测,则在其机制研究中,实验研究占有十分重要的地位。实验研究不仅是再现岩爆和冲击地压破坏过程的重要手段,还可以与理论结果相互印证。关于岩爆和冲击地压形成机制的试验研究,很多学者做了大量的工作。例如, Burgert 等在煤岩冲击地压平移模型方面进行了试验研究^[40]; Vardoulakis 经试验研究提出了冲击地压是结构面的一种不稳定现象^[41]; Linkov 研究认为冲击地压与岩体的不稳定性存在着一定的联系^[42]; Lee 等对 Lac Du Bonnet 花岗岩进行了钻孔试验研究^[43]; Braeuner 开展了煤样孔洞冲击试验^[44]; 张晓春^[45]和 Kemeny^[46]分别采用相似材料和煤质材料对煤矿冲击地压进行了模拟试验; 潘一山等^[47]研究了可在实验室模拟岩爆发生的系列脆性破坏材料; 张晓春等^[48]采用相似材料和煤质材料模拟了煤矿冲击地压发生的过程和现象; 郭文奇等^[49]利用单轴加载系统和红外热成像技术,对煤岩变形过程中的红外辐射变化进行了探测试验研究; 李长洪等^[50]对煤矿冲击性灾害类型进行了研究; 茅献彪^[51]利用试验分析方法,系统测定了煤层冲击倾向性与煤层含水率以及煤层含水率与煤层孔隙度之间的关系; 齐庆新^[52]研究了单轴抗压强度与煤层冲击倾向强弱的关系; 张志镇等^[53]研究了温度对花岗岩冲击倾向性的影响机制。

1.2.3 岩爆和冲击地压非线性动力学研究^[54]

目前,国内外学者从经典理论和实验方面对岩爆和冲击地压的发生机制开展了大量研究。然而,由于岩爆和冲击地压发生机制和形成过程的极端复杂性及多样性,上述研究尚不能很好地解释和预测该类动力灾害。造成这种状况的主要原因是,上述研究基本上还都停留在静态的或牛顿确定论的水平上,即认为一个确定性的系统在确定性的激励影响下,其响应也是确定性的,而大量的实验观察和现场监测表明,岩体的动力行为是一个典型的非线性现象,这种“非线性”也是导致岩爆和冲击地压发生机制和形成过程的复杂性及多样性的根本原因。因此,用传统的确定论观点来研究岩爆和冲击地压等非线性动力学过程无异于用静止的眼光来看待不断发展的问題,故而发生认识和预测上的误差甚至错误就不可避免了。因此,突破传统的确定论观点,运用非线性动力学的理论和方法来研究岩爆和冲击地压动力灾害的孕育、演化和发生机制,并建立相应的预测方法,是从本质上认识和解决

该类动力灾害的一条正确途径,已经成为一种必然的发展趋势。

非线性动力学理论体系广义上主要包括^[55]:耗散结构论、突变理论、协同论、混沌动力学、分形理论、神经网络理论、细胞自动机制论、超循环论和重正化群方法等。其中,耗散结构论(dissipative structure theory)由比利时化学家 Prigogine 于 1969 年在一次“理论物理与生物学”国际会议上首次提出,并逐渐发展成为一种完整的理论体系^[56,57];Haken 于 1971 年创立并发展了协同学理论(synergetics)^[58-60];西德生物学家 Manfred 于 1971 年创立了超循环理论(super cycle theory)^[61];法国数学家 Rene 创立了突变理论(catastrophe theory)^[62,63];美籍法国数学家 Mandelbrot 创立了分形理论(fractals theory)^[64];混沌理论(chaotic theory)的研究最早可追溯到 Poincare 的工作^[65],之后,美国气象学家 Lorenz^[66]于 1963 年在研究天气预报模型时首次发现了混沌现象,Li 和 Yorke^[67]则于 1975 年首次提出“混沌(chaos)”这一名词并为广大学者所接受。我国学者在非线性动力学的基础理论和应用研究领域也取得了一系列重大进展。如郝柏林^[68]等系统研究了分岔、混沌、奇怪吸引子之间的关系;郑伟谋和郝柏林^[69]创立了研究混沌性态的符号动力学;刘适达^[70]对大气湍流的发生问题进行了探讨;朱照宣^[71]、吴祥宝^[72]、李继彬^[73]研究了混沌时间序列的特征。

在非线性动力学的上述理论中,特别值得一提的是细胞自动机制论和胞映射理论(cell mappings theory)。源于计算机领域的细胞自动机制论^[74]被引入到非线性动力学的研究中后,在众多领域得到广泛关注,并迅速发展成为一种重要的非线性动力学理论的研究方法。如 Hardy 等^[75]、Hasslacher^[76]、d'Humières^[77]分别建立了模拟流体非线性行为的细胞自动机——格子气自动机;在地震研究领域也出现了相应的细胞自动机模型^[78-85],并由此得到了地震的许多非线性规律;周辉等^[86,87]建立了模拟岩体非线性破坏演化的物理细胞自动机,使细胞自动机由数学模型向物理模型的转化迈出了有意义的一步。从本质上来看,细胞自动机是用简单的局域规则的综合作用来体现整个系统的高度复杂性。作为非线性系统的一种重要的数值模拟手段,细胞自动机具有广阔的应用前景。胞映射理论由 Hsu 提出并发展^[88-92],是非线性动力系统(特别是强非线性动力系统)全局分析的一种有效工具,它以胞映射代替点映射,以有限代替无限,以概率转移代替差分迭代,克服了舍入误差和观测误差的影响,对于混沌吸引子的分析具有特殊意义。

针对岩爆和冲击地压等岩体的非线性动力行为,一些学者采用上述相关的非线性动力学理论已经进行了大量的基础性研究。例如,突变理论研究方面,唐春安等^[93,94]应用突变理论来描述岩石的破坏过程,并提出了岩石破坏过程的突变模型;徐增和等^[95]建立了坚硬顶板条件下煤柱岩爆的尖点突变模型;潘岳等^[96]研究了折断式顶板大面积冒落的尖点突变模型;周辉等^[97]提出了薄隔水层并筒底板突水的尖点突变模型,并利用突变理论较准确地计算出并筒底板的最小隔水层安全厚

度;秦四清等^[98]分析了顺层斜坡失稳的突变模型;黄润秋等^[99]则较系统地分析了突变理论在工程地质中的应用。在分形理论研究方面,谢和平等^[100-103]创立了分形-岩石力学;秦四清等^[104]、濑户政宏^[105]等研究了岩石声发射事件在空间上的分形分布及演化特征;谢和平^[106]、谭云亮等^[107,108]和冯夏庭等^[109]分别研究了冲击地压、坚硬顶板冒落和岩石试件受力破坏过程中声发射序列的分维特征。此外,非线性动力学理论的其他分支在岩石力学中的应用研究也取得了部分进展。例如,谭云亮^[110]研究了矿山压力的混沌现象和顶板运动过程的自组织演化特征;秦四清等^[111]应用重正化群方法研究了滑动面演化的普适性质;黄润秋等^[55]提出了斜坡失稳时间的协同预测模型和崩滑地质灾害的全息预报理论;同时,非线性岩石动力系统的可预测尺度问题也逐渐受到关注^[112]。

但总的来说,目前,非线性动力学在岩石力学中的应用研究主要集中在突变和分形理论方面,而且与工程的实际应用尚有较大距离,运用混沌、自组织和协同论对岩体动力行为的研究才刚刚起步,且大都停留在定性分析的水平上,还很不系统。至于岩爆和冲击地压等岩体灾害性动力行为的混沌性和非线性预测方面的研究成果更不多见。而由于岩体动力行为的混沌性特征是控制其发展方向的主导力量,是决定系统突变和协同等特性的本质因素,且对岩体系统演化的准确预测又是工程实践的主要目标之一,因此,岩体破坏演化过程的混沌性规律和非线性预测方法是目前亟待研究的领域。

1.3 岩爆和冲击地压的预测评估方法研究现状

岩爆和冲击地压预测评估是制定其防治策略和采取合理防治手段的重要前提。岩爆和冲击地压的预测评估,主要是对岩爆和冲击地压的发生地点、发生规模和发生时间进行预测评估。由于岩爆和冲击地压的复杂性,目前而言,准确评估其发生时间是很难实现的,故现阶段对岩爆和冲击地压预测评估的研究主要集中在发生地点和发生规模这两部分。目前,岩爆和冲击地压的预测评估方法主要包括经验类比法、综合指数法、数值模拟法、可能性指数诊断法、地质动力区划方法、钻屑法、微震法、声发射法、电磁辐射法、微重力法等。其中,经验类比法是利用工程经验评估待开挖位置的岩爆和冲击地压的危险性^[113];综合指数法是在分析岩爆和冲击地压的各种影响因素基础上,确定各种因素的影响权重,然后综合判断岩爆和冲击地压的危险性^[114];数值模拟法通过对工程区域及开挖过程进行数值模拟,以此确定工程区域不同部位和不同开挖阶段的应力集中程度及分布规律,再结合相应评判指标预测岩爆和冲击地压的危险性^[115];可能性指数诊断法认为在岩爆和冲击地压危险程度的众多因素中,应力状态和岩体的性质是最主要的因素,并以构造分析、工程类比等为辅助方法对岩爆和冲击地压危险性进行综合研究^[116];地质动力区划

方法中,首先依据开采区域的地质构造环境及原岩应力分布状态,圈定构造影响区及应力升高区、降低区及高应力梯度区,再基于多因素耦合致灾机制,确定岩爆和冲击地压的主要影响因素,并采用多因素耦合方法确定岩爆和冲击地压危险性指数^[117];钻屑法是通过在煤层中打直径为 42~50 mm 的钻孔,根据排出的煤粉量及其变化规律和有关动力效应判断冲击危险的一种方法^[118];微震法就是记录采矿震动的能量,分析震动的方向,在震中定位来评价和预测矿山动力现象^[119];声发射法即 Acoustic-Emission 方法,又称亚声频探测法,通过探测岩石变形时发生的亚声频噪音(即微震),确定异常高应力区的位置,从而对岩爆和冲击地压的危险性进行预测^[120];电磁辐射法是通过监测煤岩体受载变形破裂过程中向外辐射的电磁能量信号,并通过数据处理和分析研究,来预测岩爆和冲击地压的危险性^[121];微重力法认为在岩体发生震动和岩爆前,岩体的体积将会变化,导致岩体的密度将发生改变,从而可根据岩体的变形、重力强度的变化以及密度分布的变化对岩爆和冲击地压的危险性进行预测^[122]。

在岩爆和冲击地压的上述预测评估方法中,数值模拟法因其经济性、可重复性及定量性等显著特点,使得该方法在岩爆和冲击地压等工程动力灾害的预测与预报中具有较大优势。此外,实践经验表明,岩体内的应力分布状态和应力值大小对岩爆和冲击地压的发生影响很大。一般情况下,应力越高的区域越容易积蓄弹性能,其发生岩爆和冲击地压的危险性也越高。而数值模拟方法正是通过确定工程区域不同部位和不同开挖阶段的应力集中程度及分布规律,对岩爆和冲击地压的危险性进行预测。该方法的主要优点是通过对工程区域及开挖过程的数值模拟,可提前确定岩爆和冲击地压防治的重点区域,对于任意地点,特别是未施工区域,可提前预测其岩爆和冲击地压的危险状态,可确定施工过程中各部位出现最大应力的时间,以及可预测不同施工参数对岩爆和冲击地压的影响。但数值模拟方法的缺点是计算时需对煤岩体进行简化处理,不能充分考虑煤岩体的局部非均质性和各向异性。而通过多年的实践证明,数值模拟结果对于确定冲击地压危险区域是有效的^[114]。同时,随着数值模拟技术和现场监测手段的发展,岩爆和冲击地压研究的权威学者认为在数值模拟和现场观测精细结合的基础上,采用数值模拟方法对岩爆和冲击地压开展定量预测的时代已经到来^[123,124]。

1.4 本书的主要内容

如前所述,众多学者从各个角度对岩爆和冲击地压展开了研究,对其特征和规律有了一定的认识与理解。但由于岩爆和冲击地压的发生条件复杂,影响因素众多,目前的研究还不充分。例如,在岩爆和冲击地压的非线性动力学机制研究中,岩体破坏演化过程的混沌性规律和非线性预测方法等方面的研究成果还不多

见；而在岩爆和冲击地压的数值模拟方法中，如物理意义明确、理论上较为完善、能较好描述深部岩体变形和强度特性的力学模型，以及能合理描述岩爆和冲击地压的孕育发生过程并能对其进行准确预报与预测的判据指标等仍需深入研究。此外，由于岩爆和冲击地压的孕育发生过程实际是岩体从静力状态向动力状态转换的过程，采用数值模拟方法对围岩稳定性进行评估以及对岩爆和冲击地压进行预测时，就必须考虑岩体由静转动的这一过程，于是有必要对描述岩爆和冲击地压实际物理过程的数值计算方法展开深入研究。因此，为能充分解释岩爆和冲击地压的形成机制，并较准确地进行预测和预报，还需从多方面进行大量的研究工作。

结合作者课题组多年的研究成果，本书针对岩爆和冲击地压的孕育演化机制及其预测评估方法进行了初步的分析和思考，包括应用非线性动力学理论的最新成果，研究岩爆和冲击地压孕育过程中的混沌性特征及其演化的非线性预测方法和理论，以及对深埋硬岩力学模型、岩爆和冲击地压的数值模拟方法等进行的一些研究与探讨。具体包括以下几方面内容：

(1) 非线性动力学特征决定着岩爆和冲击地压的演化进程与突变等特性，因此，为正确认识其动力学特征，本书第二章介绍了一种模拟岩体非线性破坏演化过程的广义数值模型——物理细胞自动机模型，并借以研究岩爆和冲击地压形成过程中的混沌性及其演化规律。

(2) 由于岩爆和冲击地压的发生过程是一个典型的非线性现象，为对其进行准确的预测与预报，本书第三章运用非线性动力学的理论和方法对岩爆和冲击地压灾害的非线性动力学预测方法进行了研究，主要包括动力灾害系统状态变量的确定及其对应的非线性动力学方程的反演，以及混沌系统的预测理论等方面的研究，其中混沌系统的预测理论研究又包括可预测尺度理论和预测预报理论两方面的内容。

(3) 硬岩广泛存在于深埋隧道(洞)、边坡和采矿等工程中，其在开挖过程中的变形和破坏特征关系到工程的安全性。同时，大量地下工程实践表明，硬岩岩体的强度均具有较强的时间效应，且对工程安全方面有着重大影响。结合作者课题组最新的研究成果，本书第四章对高应力硬岩的力学响应和其强度的时间效应展开深入研究，并探讨了其相应的力学模型。

(4) 数值模拟是预测、预报岩爆和冲击地压等动力灾害的重要手段。限于岩爆和冲击地压等动力灾害的复杂性，目前的数值模拟预测一般是在静态定量计算的结果上，采用合适的评价指标对动力灾害的风险情况进行定性的判别。本书第五章主要介绍目前应用较多的岩爆/冲击地压预测评估指标和方法，如局部能量释放率(local energy release rate, LERR) 指标^[125]，破坏接近度(FAI)^[126]，能量释放率(energy release rate, ERR)^[127] 和超剪应力 ESS^[128] 指标等。

(5) 考虑到岩爆和冲击地压等动力灾害的孕育发生过程实际是岩体从静力状

态向动力状态转换的过程,本书第六章首先介绍了一个新的岩爆的能量判据——单位时间相对局部能量释放率指标 (unit time relative local energy release index, URLERI),并针对两种开挖条件下 (钻爆法和 TBM) 深部岩体的计算方法开展研究,同时对岩爆和冲击地压等动力灾害发生过程中的新生边界条件及其对其周围岩体扰动影响的数值计算方法进行了一些探索性的研究。

参 考 文 献

- [1] Stacey T R. Dynamic rock failure and its containment//Proceedings of the First International Conference on Rock Dynamics and Applications. Lausanne: CRC Press, 2013: 57-70.
- [2] 钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型. 岩土力学, 2014, 35(1): 1-6.
- [3] 徐林生, 王兰生, 李天斌. 国内外岩爆研究现状综述. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 24-27.
- [4] 谭以安. 岩爆形成机制研究. 水文地质与工程地质, 1989, (1): 34-38.
- [5] 徐林生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究. 岩土力学, 2002, 23(3): 300-303.
- [6] Boler F M, Billington S, Zipf P K. Seismological and energy balance constraints on the mechanism of a catastrophic bump in the cliffs coal mining district, Utah, USA. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1997, 34(1): 27-43.
- [7] 窦林名, 何学秋. 冲击矿压防治理论与技术. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 1-17.
- [8] 齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1852-1858.
- [9] 唐礼忠, 潘长良, 王文星. 深埋矿床井巷岩爆特性分析. 矿冶工程, 2001, 21(4): 19-21.
- [10] 徐林生, 王兰生. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 569-572.
- [11] 王志国, 周宏伟, 谢和平. 深部开采上覆岩层采动裂隙网络演化的分形特征研究. 岩土力学, 2009, 8(30): 2403-2408.
- [12] 窦林名, 杨思先. 煤矿开采冲击矿压灾害防治. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.
- [13] 金志成. 不耦合装药爆破方法防治冲击地压的研究. 中北大学硕士学位论文. 2013.
- [14] 张寅. 深部特厚煤层巷道冲击地压机理及防治研究. 中国矿业大学博士学位论文, 2010.
- [15] 国家安全监管总局. 国家煤矿安监局关于河南省义马煤业集团千秋煤矿“11·3”重大冲击地压事故的通报. 国家安全生产监督管理总局国家煤矿安全监察局公告, 2011, (12): 37-38.
- [16] Salamon M D G. Stability, instability and design of pillar workings. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1970, 7(6): 613-631.
- [17] Starfield A M, Fairhurst C. How high-speed computers design of practical mine pillar system. Engng. Min. J., 1968, 169(5): 78-84.
- [18] Cook N G W, Hoek E, Pretorius J P G, et al. Rock mechanics applied to the study of rockbursts. SAIMM, 1966, 66(10): 436-528.