

国家自然科学基金资助项目(50374084)
高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助

尹光志 鲜学福 代高飞 著

岩石非线性动力学 理论及其应用

岩石失稳破坏与冲击地压发生机理及预测

YANSHI FEIXIANXING DONGLIXUE LILUN JIQI YINGYONG

重庆大学出版社

国家自然科学基金资助项目 (50374084)
高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助

岩石

YANSHI FEIXIANXING DONGLIXUE LILUN JIQI YINGYONG

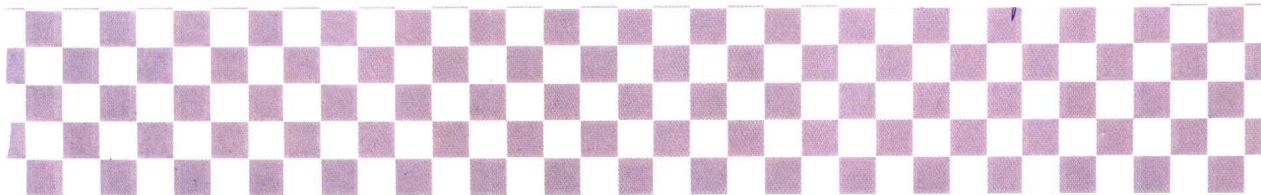
非线性动力学

理论及其应用

岩石失稳破坏与冲击地压发生机理及预测

尹光志 鲜学福 代高飞 著

重庆大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

岩石非线性动力学理论及其应用:岩石失稳破坏与冲击地压发生机理及预测/尹光志,鲜学福,代高飞著. —重庆:重庆大学出版社,2004.6

ISBN 7-5624-3074-8

I. 岩... II. ①尹...②鲜...③代... III. ①岩石力学:非线性力学:动力学②屈曲—岩石破坏机理—研究③矿山—冲击地压—研究 IV. TD313

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 014464 号

岩石非线性动力学理论及其应用

岩石失稳破坏与冲击地压发生机理及预测

尹光志 鲜学福 代高飞 著

责任编辑:李长惠 何明 版式设计:李长惠

责任校对:廖应碧 责任印制:张立全

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:240千 插页1页

2004年6月第1版 2004年6月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5624-3074-8/TU·135

定价:45.00元



本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

内 容 提 要

本书内容包括岩石非线性动力学的研究现状及研究方法,压缩荷载作用下煤岩的损伤扩展规律实验研究,煤岩体损伤力学分析,煤岩 CT 实验研究及其分叉与混沌特征分析,冲击地压的粘滑失稳机理及非线性动力学行为分析,冲击地压的自组织特征研究,冲击地压及其突变理论分析,人工神经网络和遗传算法相结合的方法在冲击地压预测中的应用。

本书反映了岩石非线性动力学中的新理论和新成果,可作为土木、采矿、地质等专业的高年级本科生和研究生的教学参考书,也可供从事地下工程方面的工程技术人员参考。

NEIRONG TIYAO

前 言

QIANYAN

近年来,现代非线性科学的分叉与混沌理论、突变理论、自组织理论、分形几何、神经网络方法等这些与非线性现象有关的新理论、新方法有了迅速的发展,并已不同程度地渗入到许多研究领域。在非线性科学的研究中,涉及到对确定论与随机性、有序和无序、简单性和复杂性、量变与质变、整体与局部等范畴和概念的认识上的深化,对整个自然科学的发展有着重大的影响。因此,采用这些新的理论和方法对岩石失稳破坏及冲击地压的发生机理、预测预报进行研究有望取得新的进展,并已受到岩石力学与工程学术界的高度重视。本书是作者近年来在煤岩实验研究的基础上,结合工程实际,采用非线性科学的相关理论对岩石失稳破坏与冲击地压发生机理及预测方面研究结果的总结。

全书共8章。第1章为绪论,主要介绍了非线性动力学理论的研究现状和冲击地压的研究现状;第2章主要介绍了压缩荷载作用下煤岩的损伤扩展规律和实验研究结果;第3章从动力损伤力学角度对煤岩体进行了分析研究;第4章为煤岩CT实验中的分叉与混沌特征研究,并对 Logistic 方程进行了剖析;第5章为冲击地压的粘滑失稳机理及非线性动力学行为分析,主要对冲击地压系统的静力特性和动力特性进行了研究;第6章为冲击地压的自组织特征研究,介绍了冲击地压系统的演化和突进,并就冲击地压和煤岩 CT 实验中的自组织特征进行了分析;第7章为砚石台矿冲击地压及其突变理论分析,建立了砚石台矿冲击地压的地质力学模型和突变理论模型,分析了砚石台矿冲击地压的发生机理;第8章主要介绍了人工神经网络和遗传算法相结合的方法在冲击地压预测中的应用。

由于本书作者的学识水平有限,文中难免存在不足、遗漏甚至错误之处,敬请批评指正。

在研究过程中得到了国家自然科学基金(50374084)和高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划等项目的资助,在此表示衷心感谢。

作者

2004年5月于重庆

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 非线性动力学研究现状	2
1.3 冲击地压研究现状	4
1.3.1 在冲击地压机理方面的研究	4
1.3.2 在实验方法和手段方面的研究	6
1.3.3 在损伤力学方面的研究	8
1.4 非线性动力学在冲击地压中的研究现状	11
1.5 研究方法和内容	13
第2章 压缩荷载作用下煤岩损伤扩展规律实验研究	15
2.1 CT检测理论	15
2.1.1 CT检测技术的发展历史	15
2.1.2 CT检测的数学原理	16
2.1.3 研究实验所用CT机	17
2.2 CT机专用煤岩单轴(三轴)加载系统	18
2.2.1 设备概况	18
2.2.2 实验方法	18
2.3 单轴压缩荷载下煤岩损伤扩展机理CT实验	19
2.3.1 实验概况	19
2.3.2 实验结果分析	20
2.3.3 单轴压缩时煤岩损伤扩展细观规律	29
2.4 结语	35
第3章 煤岩体损伤力学分析	37
3.1 煤岩体损伤描述	37

3.1.1	煤岩体损伤张量	37
3.1.2	净应力张量	40
3.1.3	本构关系和损伤演变方程	41
3.2	煤岩体动力损伤力学分析	42
3.2.1	煤岩体损伤的动力学方程	43
3.2.2	煤岩体动力损伤分析的数值方程	43
3.2.3	刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵与煤岩体损伤的关系	44
3.3	煤岩体动态 CT 实验的损伤描述	48
3.3.1	基于 CT 数的损伤变量	48
3.3.2	CT 数减小率	49
3.3.3	煤岩损伤 CT 数分布的特性规律	49
3.4	煤岩一维弹脆性损伤本构模型	51
3.4.1	煤岩损伤本构模型	51
3.4.2	单轴压缩下煤岩损伤本构模型及损伤演化方程	54
3.5	损伤结构的有限元分析	57
3.6	损伤结构有限元分析的实现	60
3.6.1	有限元分析方法	60
3.6.2	损伤及变形耦合计算的特点及方法	62

第 4 章	煤岩 CT 实验中的分叉与混沌特征	65
4.1	混沌的本质特征	65
4.2	混沌概念的界定	67
4.3	煤岩 CT 实验中的分叉和混沌特征	68
4.4	复杂构形与元胞自动机	74
4.4.1	一维元胞自动机	75
4.4.2	元胞自动机的推广	76

4.4.3	元胞自动机的动力学行为分类	77
4.4.4	用元胞映射求解 Logistic 方程	78
4.4.5	用迭代法求解 Logistic 方程	79
第 5 章	冲击地压的粘滑失稳机理及非线性动力学行为分析	83
5.1	引言	83
5.2	冲击地压的粘滑失稳机理	84
5.2.1	冲击地压的失稳机理	84
5.2.2	冲击地压系统的静力特性	85
5.2.3	冲击地压系统的动力特性	86
5.3	冲击地压系统的非线性动力学行为和演化行为	87
5.4	结语	102
第 6 章	冲击地压的自组织特征研究	105
6.1	引言	105
6.2	冲击地压系统的建模	107
6.3	复杂系统建模的自组织原理	108
6.3.1	复杂系统建模的基本途径	108
6.3.2	冲击地压系统模型自组织原理	109
6.4	冲击地压动力方程的基本反演方法	112
6.5	冲击地压系统的演化和突进分析	114
6.5.1	冲击地压两子系统相互作用时系统演化与突进的相图分析	114
6.5.2	一般两子系统相互作用时系统演化与突进的相图分析	118
6.5.3	相图法在冲击地压分析中的优点	122
6.6	冲击地压和煤岩 CT 实验中的自组织特征	123

6.6.1	自然界的自组织特性	123
6.6.2	冲击地压的分形特征	124
6.6.3	冲击地压中的自组织特征	125
6.6.4	砚石台煤矿冲击地压临界深度的确定	127
6.6.5	煤岩 CT 实验中的自组织特征	131
6.7	结语	137
第 7 章	砚石台矿冲击地压及其突变理论分析	139
7.1	引言	139
7.2	砚石台煤矿地质条件概述	139
7.2.1	井田地层	140
7.2.2	矿区地质构造	140
7.2.3	砚石台矿煤岩物理力学特性	141
7.2.4	砚石台煤矿地应力分析	142
7.3	砚石台矿冲击地压的地质力学模型	143
7.4	砚石台矿冲击地压的突变理论模型	145
7.4.1	引言	145
7.4.2	突变理论的数学模型	146
7.4.3	顶底板岩体和煤层系统的尖点突变模型	147
7.5	采掘活动诱发冲击地压的机制分析	152
7.5.1	临界微扰诱发冲击地压的机制	153
7.5.2	超前强扰诱发冲击地压的机制	154
7.6	结语	156
第 8 章	人工神经网络和遗传算法相结合的方法在冲击地压预测中的应用	157

8.1	引言	157
8.2	人工神经网络的预测方法	158
8.2.1	人工神经网络的基本原理	158
8.2.2	BP 人工神经网络算法的数学描述	159
8.2.3	标准 BP 算法存在的问题及其原因	160
8.2.4	BP 算法的改进	161
8.2.5	BP 神经网络的网络结构和参数 η, α 的确定	162
8.3	遗传算法(GA)的原理	167
8.3.1	GA 的生物学背景	167
8.3.2	简单遗传算法的原理介绍	168
8.3.3	简单遗传算法的选择、杂交、变异运算	169
8.3.4	遗传算法的数学基础	171
8.4	BP 神经网络和遗传算法相结合预测冲击地压	172
8.4.1	用遗传算法调节人工神经网络结构	173
8.4.2	GA 和 BP 神经网络相结合预测冲击地压的运算流程	173
8.5	冲击地压预测软件 BPAGA Tools 的实现	175
8.5.1	BPAGA Tools 面向对象性设计思想	175
8.5.2	BPAGA Tools C/S 模式数据库设计思想	175
8.5.3	BPAGA Tools 的系统结构及其实现	177
8.6	BPAGA Tools 的运行实例	178
8.6.1	BPAGA Tools 的使用指南	178
8.6.2	BPAGA Tools 的运行实例	182
8.6.3	BPAGA Tools 的其他功能	185
8.7	结语	185

参考文献

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

在 20 世纪后期,随着对非线性动力学理论研究的不断深入,不同研究领域相继掀起了转变认识观的重大变革。在对岩体动力行为的研究中,一些学者敏锐地观察到其非线性特征,进行了大量的基础性研究工作,并取得了重大进展。这些研究表明,岩体的动力行为是一种典型的非线性现象。冲击地压的演化和形成是一个非线性过程,而“非线性”是导致冲击地压的根本原因。因此,用传统的确定论观点来研究冲击地压这一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。

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冲击地压灾害的孕育、演化和发生机理,并建立相应的预测方法,是从本质上认识和解决冲击地压灾害的一条正确途径,这已经成为一种必然的发展趋势和一项十分紧迫的任务。由于岩石是一种十分复杂的地质材料,它具有模糊性和不确定性,从而造成了冲击地压的复杂性,而传统的研究方法和手段不能很好地解决这个难题。造成这种状况的原因是多方面的,而认识观的错误是最根本的原因。传统观点认为,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。也就是说,在描述冲击地压的形成和

演化时,若给定一个确定性的力学模型或经验模型,则其所表现出来的力学行为也是惟一确定的。但大量的现场监测表明,即使是在相同的岩层条件、地质条件和开采条件下,监测到的冲击地压演化和形成规律也会表现出很大差异。人们常常将这种差异归因于观测数据中噪声的干扰,并提出了相应的滤波、伪数据剔除等处理方法,但仍不能从根本上解决问题。这就迫使人们从另外的角度来认识冲击地压的复杂性。

在非线性动力学建立以前,人们对于自然界的认识被长期禁锢在“线性”范畴里。按照线性的分析观点,自然界的物质和运动最终将会有两种极端的归宿——无限的线性发展或消亡。以线性的认识观为基础,对事物的未来演化所做的评价是确定性的。但大自然却往往出现确定论难以解释的现象,于是又出现了概率论的观点。按照概率论的观点,任何事物和现象的未来状态都是不可知和无法预测的,这显然与现代科学的事实不相符。因此,上述两种观点都不能很好地解决人们对自然界的认识问题,第一种观点是形而上学的方法论,第二种观点将导致宿命论。科学的发展越来越显示出自然界本质上的非线性。正如直线是曲线的特殊情况一样,线性是非线性关系的特殊和简单形式。岩石力学中的线性关系只在特定条件下才近似成立,而非线性关系才是普遍存在的。20世纪70年代前后,以耗散结构论的创立为标志的非线性动力学理论的出现,从根本上打破了确定论和概率论对人们思想的束缚,掀起了20世纪继量子力学和相对论以后的第三次科学革命。

1.2 非线性动力学研究现状

广义上的非线性动力学理论体系主要包括耗散结构论、突变理论、协同论、混沌动力学、分形理论、神经网络方法、超循环理论、重正化群方法和细胞自动机理论等。耗散结构论(dissipative structure theory)由比利时化学家普里高津(Prigogine)^{[1],[2]}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。耗散结构论成功地解释了非线性系统的自组织现象。1971年,H. Haken创立并发展了协同学理论(synergetics)^{[3]-[5]},协同论克服了耗散结构论的局限性,从物理系统出发研究了系统如何在子系统的协同作用下由无序走向有序的过程。原西德生物学家曼弗德·艾根(Manfred Eigen)^[6]于1971年创立了超循环理论(super cycle theory),把信息、反馈、控制、耗散结构论及突变理论应用到一个细胞结构形成的分析中,从根本上回答了系统的进化发展问题。法国数学家Rene Thom创立了突变理论(catastrophe theory)^{[7],[8]},研究了连续变化如何引起突然变化以及突然变化与连续变化之间的关系。美籍法国数学家

B. B. Mandelbrot 创立了分形理论(fractals)^[9], 定量描述了各个层次系统的自相似行为。作为非线性动力学理论的重要组成部分之一, 混沌理论(chaotic theory)的研究可以追溯到 H. Poincare^[10]的工作。1963 年美国气象学家 E. N. Lorenz^[11]在研究天气预报模型时, 第一次发现了混沌现象。在此以后, Ruelle 和 Takens^[12]一起创造了“奇怪吸引子(strange attractor)”这一术语, 并将其形容为“一簇曲线, 一团斑点, 有时展现为光彩夺目的星云或烟火, 有时展现为非常可怕和令人生厌的花丛……”。1975 年, Ti. T. Y. 和 Yorke^[13]首次提出混沌(chaos)这一名词, 为以后的学者普遍接受。1978 年, M. J. Feigenbaum^[14]发现了倍周期分叉现象的标度行为, 并用重正化群方法证明了其普适性, 计算出普适标度常数。20 世纪 80 年代, J. M. Greene, R. S. Mackay 和 M. J. Feigenbaum^{[15], [16]}等把重正化群方法推广到保守系统普遍行为的研究上。近 20 年来, 对于 Hamilton 系统的内在随机性和一般系统的动力学混沌研究热潮方兴未艾, 关于混沌中的结构、随机性以及复杂性中的普适规律不断有新的发现。Arnold^[17], Smale^[18], Kolmogorov^[19], Melniko^[20], Moser^[21]等工作进一步丰富了混沌理论。为了刻画混沌吸引子, Packara^[22]提出了用时间序列重构吸引子相空间图像的方法。Takens^[23]于 1981 年提出的嵌入定理表明, 只要相空间的维数足够大, 就可以刻画混沌吸引子, 从而在混沌时间序列和分维之间架起了一座桥梁。Grassberger 和 Procaccia^[24]于 1984 年提出从时间序列中提取关联维的方法, 应用以上方法, Farmer^[25]、刘适达^[26]讨论了吸引子的分维特征, 安镇文^[27]、陈子林^[28]研究了孕震系统前兆场的分维和混沌吸引子特征。郝柏林^[29]等系统研究了分岔、混沌、奇怪吸引子之间的关系。1990 年, 郑伟谋、郝柏林^[30]等创立了研究混沌性态的符号动力学。郑祖光、刘适达^[31]对大气湍流的发生问题进行了探讨。朱照宣^[32]、吴祥宝^[33]、李继彬^[34]研究了混沌时间序列的特征。

随着非线性动力学研究的不断深入和应用的逐步推广, 非线性动力学与不同领域相结合产生了新的生命力, 如在气象、地震、经济等领域均取得了可喜的成果。已发展成熟的非线性动力学的研究方法主要包括拓扑学法、分维方法、混沌吸引子方法、功率谱分析、Poincare 映射法、重正化群方法、细胞自动机理论和胞映射方法等。对于混沌时间序列的研究主要集中在混沌吸引子的识别和提取 Lyapunov 指数^[35]、分维和信息熵等^[36]。

为了处理系统之间或系统各组成要素之间复杂的非线性关系, 始于 20 世纪 40 年代的神经网络方法在近年得到了迅速发展^{[37]-[41]}。神经网络成功地描述了系统各组成要素之间的复杂关系, 与重正化群方法、细胞自动机和胞映射理论一起, 已成为研究非线性动力学系统的重要方法和工具。

在非线性动力学理论研究中, 关于混沌的研究又是其中的重点和热点。1989 年, 在前苏联的基辅举行了全球第 4 届非线性动力学大会, 重点讨论了混沌问题。

自 1983 年 11 月中国力学学会召开“分叉、突变和混沌动力学”学术交流大会以来,我国掀起了非线性科学的研究热潮。近几年,为了推进非线性动力学理论由抽象的数学研究转向工程应用,国家自然科学基金委员会资助了一批相关的项目,如“板壳振动中的混沌现象研究”(严宗达)、“岩石切割破碎载荷谱的混沌力学模拟”(段雄)等。可以预见,非线性动力学必然会成为新世纪科学发展的主方向之一。

1.3 冲击地压研究现状

冲击地压是矿井生产活动中出现的一种矿山动力现象。它是井巷和采场周围的煤岩体,由于弹性能的释放而产生的以突然、猛烈破坏为特征的动力现象。它会对地下硐室、人员、设备以及地面建筑物等造成强烈的破坏。冲击地压最早发生在 1738 年的英国煤矿,距今已有 265 年的历史。目前,包括我国在内,德国、南非、前苏联、波兰、美国、加拿大、日本等 20 多个国家和地区的矿井都不同程度地受到冲击地压的威胁。为此,许多国家和地区的学者对此进行了长期研究。由于冲击地压问题的复杂性,它至今仍然是岩石力学与采矿工程中最困难的研究课题之一。专家们曾预言,冲击地压问题的预测将成为 21 世纪岩石力学研究的焦点之一。^{[42]~[48]}

1.3.1 在冲击地压机理方面的研究

目前,我国关于冲击地压的研究成果主要集中在冲击地压的发生机理、发生条件、预测预报及其防治方法上。在冲击地压发生机理的研究方面,主要有^{[44]~[48]}: 强度理论、能量理论、刚度理论、冲击倾向性理论。强度理论认为当煤岩体中的应力达到其极限强度时,煤岩发生破坏,从而形成冲击地压。在该理论指导下采取的降低应力集中的措施,对防治冲击地压起了重要作用。然而,在井巷和采场周围煤岩体经常出现局部应力超过其强度而又不发生冲击地压的情况,这表明根据强度理论提出的判据是不充分的。20 世纪 60 年代初期,库克在总结南非冲击地压研究的基础上,根据冲击地压发生时产生的震动、破坏和抛出煤岩等动力现象需要大量能量的事实,提出了随着采掘范围的不断扩大,矿体-围岩系统在其力学平衡状态破坏时,释放的能量大于消耗的能量,这种理论称为能量理论。但是,能量理论只说明了冲击地压是在矿体-围岩系统的力学平衡状态破坏时,释放能量大于消耗能量时发生,而没有说明平衡状态的性质及其破坏条件,特别是围岩释放能量的条件,因而作为冲击地压发生理论,它是不够完善的。20 世纪 70 年代,布莱克把矿柱

视为矿山结构,把围岩视为矿山负荷系统,提出了矿山结构的刚度大于矿山负荷系统的刚度是产生冲击地压的必要条件。20 世纪 80 年代,佩图霍夫也引用了刚度条件,但他把矿山结构的刚度视为达到峰值强度后的刚度,这种理论称为刚度理论。显然,布莱克在提出该理论时,只说明了冲击地压发生的必要条件,并没有述及其充分条件,也没有考虑冲击地压的发生与外部条件、煤岩的物理力学性质的关系,而且矿山结构达到峰值强度后的刚度是难以确定的。所以,国内外一些学者又提出了冲击倾向性理论。该理论认为,当煤岩的冲击倾向性大于其临界值时,则会发生冲击地压。我国学者李玉生^{[47],[48]}在总结强度理论、能量理论、冲击倾向性理论的基础上,提出了“三准则”理论。该理论认为强度准则是煤岩体的破坏准则,而能量准则和冲击倾向性准则是突然破坏准则,因而只有当这 3 个准则同时满足时,才会发生冲击地压。20 世纪 60 年代末期,国内外一些学者根据岩石变形的特点,结合地震、冲击地压、岩爆问题,开始对煤岩体及冲击地压失稳问题进行研究,这种研究已成为岩石力学与采矿工程的主要研究方向之一。目前,结构稳定性研究已发展成为固体力学的一个重要分支学科,其内容涉及对结构静动态弹塑性稳定性分析及失稳特性研究。对于岩石来说,当应力超过其峰值强度后,岩石开始破坏,其承载能力随变形的增加而降低,发生材料的软化。因此,其失稳破坏实质上是岩石结构系统的物理失稳问题。由于对岩石失稳问题的研究起步较晚,所以使得岩石变形稳定性的研究远远不如结构变形稳定性的研究。在采矿工程中,由于采掘活动的影响,煤岩体局部应力超过其强度而引起局部破坏的现象是十分常见的。冲击地压就是在有关载荷作用下,煤岩体处于不稳定平衡状态突然失稳破坏的结果。1965 年, Cook^{[49],[50]}首次采用刚性实验机得到了岩石应力应变全过程曲线,并研究了岩石试件在普通实验机上加载到峰值强度时发生突然、迅猛破坏的原因,表明其破坏是由于试件和实验机组成的系统的不稳定性引起试件变形失稳造成的,从而首次认识到冲击地压是煤岩失稳问题。1979 年, Salamon^[51]等提出煤岩进入峰值强度后,进一步增加应变,相对应的应力反而下降,出现应变软化,并按经典塑性力学的 Drucker 准则提出了以材料稳定性作为煤岩失稳及冲击地压的发生准则。1983 年, Zubelewicz^[52]等将冲击地压视为动力非稳定问题,并采用 Drucker 准则作为失稳判据对冲击地压进行了数值模拟。1987 年, Lippmann^[53]提出了考虑煤层与顶底板之间发生层间相对滑动的冲击地压失稳模型。1987 年, 章梦涛^[54]根据煤岩变形破坏的机理,提出了冲击地压的失稳理论。他认为在峰值强度后,煤岩变形出现包括裂纹、裂缝在内的广义变形集中区,其力学性质发生显著变化,并具有应变软化性质。冲击地压则是煤岩介质受扰动影响而产生应力集中,煤岩体内高应力区的介质局部软化与尚未形成应变软化(包括弹性和应变硬化)的介质处于非稳定平衡状态时,在外界扰动下的动力失稳过程。并且,采用了平衡状态非稳定判别准

则及动力失稳过程准则来作为冲击地压发生的判定准则。1995年,梁冰、章梦涛^[55]根据冲击地压失稳理论的能量判别准则,采用有限元数值计算方法,对开采过程中采区冲击地压的发生情况进行了数值预测。1996年,王来贵、潘一山^[56]等在分析了断层等不连续面发生冲击地压现象的基础上,用岩体振动与断层间刚体错动的叠加来描述不连续面冲击地压发生的动力失稳过程。1997年,齐庆新等^[57]开展了煤岩摩擦滑动实验研究,他认为冲击地压是煤岩体结构滑动破坏的一种形式,表现为瞬时的粘滑失稳过程。

冲击地压的预测预报是对其进行防治的重要方面,目前采用的方法主要有^{[55]-[57]}:经验类比法、钻屑法、地音与微震系统监测法、围岩动态监测法等,这些方法在各国都有不同程度的应用。在我国常用的预测方法有钻屑法、矿压监测法、地音与微震系统监测法及经验类比分析法等。虽然这些方法在一定程度上达到了预测预报的目的,但由于冲击地压是一种十分复杂的矿井动力现象,影响因素众多,且许多影响因素具有模糊性和不确定性,因而使得冲击地压的预测预报工作变得十分复杂和困难。况且不同矿区地质条件与开采技术水平千差万别,所以有针对性地选择不同的预测预报方法以达到较为准确的预报效果,仍需要不断探索。

1.3.2 在实验方法和手段方面的研究

突破传统的观点,运用先进的实验方法和手段,将岩石细观失稳机理与岩体宏观破坏现象联系起来,是从本质上认识和解决冲击地压灾害的一条正确途径,这已经成为一种必然的发展趋势和一项十分紧迫的任务。在众多的影响岩体稳定性的因素中,岩体中的宏观和微观缺陷是非常重要的方面^[58]。在岩体工程建设和营运过程中,由于开挖卸荷等因素促使原有的微裂纹发育、扩展直至出现宏观裂缝而失稳的例子已有许多。如法国的马耳帕塞(Malpasset)坝于1959年12月发生的溃坝事故就是由于该坝建在微裂隙发育的片麻岩上,因片麻岩中微裂隙扩展而导致坝踵前沿岩体出现了宽0.4~0.5m的裂缝所致^[59]。能否正确评价岩体稳定性,取决于对岩体破坏机理的认识程度。开展岩体破坏机理的研究,探寻科学合理的岩体本构模型是一项非常重要的基础性前沿课题。岩体破坏机理的研究已取得了大量成果,但煤岩(体)的破坏过程受各种因素的影响,对其破坏机理的研究仍需深入进行。近年来,煤岩(体)损伤力学的研究越来越受到广大岩土力学工作者的重视,它对煤岩(体)从微裂纹萌生、扩展、演化到宏观裂纹形成、断裂、破坏全过程进行研究,旨在通过建立煤岩(体)损伤本构模型和损伤演化方程,评价煤岩(体)的损伤程度,评估其稳定性。细观损伤扩展规律的研究可以为宏观损伤力学的研究提供

重要的实验基础,宏细观相结合的研究方法已成为煤岩损伤力学研究的重要手段^{[60]~[62]}。岩石受载后的宏观断裂失稳破坏与其内部微裂纹的产生、扩展和聚集密切相关。Cook^{[49],[50]}把裂隙当作影响岩石物理力学性质的重要因素,解释了岩石力学实验中观察到的许多现象。自从光学显微镜和扫描电镜观测技术被引入岩石微观断裂研究中以来,许多学者对受力岩石中微裂纹的产生、扩展及分布等进行了研究。1973年,Hallbauer, Wagner 和 Cook^[63]采用光学显微镜对刚性三轴压缩实验中岩石在不同受力阶段的切片进行了微裂纹发展及微观断裂的观察与分析。1974年,Sprunt 和 Brace^[64]将扫描电子显微(SEM)观测技术引入到岩石的微裂纹及微孔隙结构形态的研究中。1976年,Tapponnier 和 Brace^[65]对 Westerly 花岗岩试件中微裂纹的发展过程进行了研究。1979年,Kranz^{[66],[67]}研究了花岗岩在蠕变过程中裂纹的产生和发展以及裂纹和裂纹、裂纹和孔洞的相互作用。1982年,Wong^[68]采用扫描电镜观测技术对 Westerly 花岗岩微观断裂进行了研究。1987年,寇绍全^[69]在对不同温度热处理的花岗岩试件的裂隙微观特征及宏观力学性质考察之后,建立了微裂隙密度与抗拉强度的关系。但是,在早期的岩石微裂纹发展及微观断裂的研究中,多数是先将岩石加载到某一应力水平,卸载后切片抛光,再放到光学显微镜或扫描电镜下进行观测研究;而卸载、切片和磨片处理都有可能破坏原有的微裂纹分布,引入较大的不确定性,特别是卸载可能使相当一部分微裂纹因闭合而变得难以观察到,其结果很难说明受载时的情况^[70]。1976年,Aufmuth 等^[71]首次将受载试件表面裂纹发育的电镜实时观察方法引入到岩石力学的研究中,研究了岩石材料在拉伸、弯曲和压缩载荷下的破坏过程。1980年,Batzle 等^[72]在扫描电镜下观测了不同温度条件下,外载水平与微裂纹特征之间的关系。1984年,Lindqvist 等^[73]研究了压痕实验过程中不同岩石的破裂发育特征。1987年,Nolen-Hoeksema 等^[74]用光学显微镜观测了受载大理岩裂纹尖端的破裂扩展模式,检测了试件表面与内部的裂纹分布特征,并指出表面裂纹的发育能够很好地反映内部情况。1993年,Zhao 等^[75]对带斜向中心割缝的大理岩微破裂发育进行了扫描电镜实时研究。其研究表明,在试件的整个断裂发展过程中,不仅有微裂纹的产生和扩展,而且存在着微裂纹的闭合;在中心割缝的大理岩试件中,微裂纹总的扩展方向是由开始时与割缝垂直逐渐转向与加载方向平行,并且实验中观察到的微裂纹多数是张性裂纹。1998年,张梅英、袁建新等^[76]在扫描电镜下对单轴压缩过程中岩石变形破坏机理进行了研究,实时观察了岩石在受力过程中,其微裂纹的萌生、扩展和宏观断裂破坏过程。结果表明,其变形破坏由渐变性发展到突变性,并可分为3个阶段:压密阶段、微裂纹的萌生和扩展阶段、断裂破坏阶段。实验中以平行压力方向沿试件边缘的张性微裂纹为主,局部出现剪切破裂,最终发展为宏观的压剪断裂破坏。