

地下金属矿山 开采过程人机环境安全机理辨析 与灾害智能预测

左红艳 罗周全 著

DIXIA JINSHU KUANGSHAN
KAICAI GUOCHENG
RENJI HUANJING ANQUAN
JILI BIANXI
YU ZAIHAI ZHINENG YUCE



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

地下金属矿山 开采过程人机环境安全机理辨析 与灾害智能预测

左红艳 罗周全 著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

在经济全球化的今天,如何更有效地减小因安全事故带来的损失,降低安全管理费用和生产成本,是中国金属矿资源企业提高金属矿资源开采盈利水平的十分重要的关键因素。而多学科设计优化方法、模糊理论、人因工程、熵理论、时滞微分方程理论、神经元网络理论等非线性理论与人工智能方法在有效地减小因安全事故带来损失,降低安全管理费用和生产成本方面具有明显的优势,可望为中国金属矿资源企业开采盈利水平的提高提供理论基础与技术保障。为此,本专著重点研究了地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模辨析、地下金属矿山开采过程人机环境安全动态演化机理辨析、地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵辨析、地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测与地下金属矿山开采灾害征兆参数时间序列智能预测等问题。

本专著的读者以安全科学与工程、矿业工程、管理科学与工程、系统工程等领域的科研工作者为主;也可供各高等院校以上相关领域的研究生、教师作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

地下金属矿山开采过程人机环境安全机理辨析与灾害智能预测 / 左红艳, 罗周全著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014.1

ISBN 978-7-5170-1727-1

I. ①地… II. ①左… ②罗… III. ①金属矿开采—地下开采—安全人机学—研究 IV. ①TD7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第020998号

书 名	地下金属矿山开采过程人机环境安全机理辨析与灾害智能预测
作 者	左红艳 罗周全 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9印张 172千字
版 次	2014年1月第1版 2014年1月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

随着中国入世以来的经济全球化的飞速发展,中国金属矿资源市场已不可避免地融入金属矿资源国际市场。世界金属矿资源市场的需求变化与价格波动及国际金属矿资源开采形势的发展对中国金属矿资源开采企业的影响十分巨大。因此,中国金属矿资源企业在市场需求与价格竞争等方面面临着前所未有的非常严峻的挑战。如何有效地减小因安全事故带来的损失,降低安全管理费用和生产成本,是中国金属矿资源企业提高金属矿资源开采的盈利水平的十分重要的关键因素。而多学科设计优化方法、模糊理论、人因工程、熵理论、时滞微分方程理论、神经元网络理论等非线性理论与人工智能方法在有效地减小因安全事故带来损失,降低安全管理费用和生产成本方面具有明显的优势,可望为中国金属矿资源企业开采盈利水平的提高提供理论基础与技术保障。

为此,本专著以国家“十一五”科技支撑计划课题——金属矿大范围隐患空区调查及事故辨识关键技术研究[2007BAK22B04-12]和国家自然科学基金项目——金属矿山采场冒顶声发射信号混沌辨析及其智能预报研究[51274250]为依托,采用多学科设计优化方法、模糊理论、人因工程、熵理论、时滞微分方程理论、神经元网络理论等非线性理论与人工智能方法重点对地下金属矿山开采过程安全生产规模、地下金属矿山开采过程人机安全非线性动态演化机理、地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵、地下金属矿山开采过程多因素耦合灾害智能预测与地下金属矿山开采过程灾害征兆参数时间序列智能预测等问题进行了研究。

应该指出,地下金属矿山开采过程人机环境安全机理辨析与灾害智能预测是一门涉及非线性科学、矿业科学、管理科学、信息科学和人工智能科学的复合型学科,是一个正处于发展中的研究方向,

其工程应用领域更加宽广，许多问题尚有待于进一步的研究和探索，对其进行完整和系统地研究是一项艰巨而又困难的工作。因此，本专著仅仅在某种程度上起到抛砖引玉的作用，希望有更多的科技工作者能参加到地下金属矿山开采过程人机环境安全机理辨析与灾害智能预测研究中来，以推动它的进一步发展。

由于著者水平所限，难免有不足之处，欢迎读者批评指正。

著者

2013年6月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 国内外研究现状	4
1.1.1 地下金属矿山开采灾害机理研究现状	4
1.1.2 矿资源开采安全机理研究现状	6
1.1.3 矿资源开采安全预测方法研究现状	12
1.2 研究内容、方法与技术路线	14
1.2.1 研究内容	14
1.2.2 研究方法	17
1.2.3 研究技术路线	18
1.3 本章小结	19
参考文献	21
第2章 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模辨析	27
2.1 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模多学科设计优化方法	28
2.1.1 多学科设计优化方法研究现状	28
2.1.2 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模多学科设计优化特点	28
2.1.3 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模多学科设计优化要素	30
2.2 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模辨析	34
2.2.1 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模多学科设计优化思路	34
2.2.2 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模多学科设计优化模型	35
2.2.3 自适应变尺度混沌免疫优化算法	37
2.2.4 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模多学科设计优化目标函数	39

2.2.5 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模辨析仿真流程	40
2.3 地下金属矿山开采过程人机环境安全生产规模辨析应用	41
2.3.1 某地下铅锌矿山生产过程概述	42
2.3.2 地下金属矿山安全开采生产规模多学科设计优化结果	42
2.4 本章小结	46
参考文献	46
第3章 地下金属矿山开采人机环境安全动态演化机理辨析	49
3.1 地下金属矿山开采过程安全人机环境系统分析	49
3.1.1 地下金属矿山开采过程人机环境系统认识	49
3.1.2 地下金属矿山开采过程安全事故发生的潜在性	51
3.1.3 地下金属矿山开采安全事故发生的人因分析	51
3.2 地下金属矿山开采人机环境安全动态演化模型	52
3.2.1 地下金属矿山开采人机环境安全动态演化模型建立	52
3.2.2 地下金属矿山开采过程人机环境安全动态演化模型数学分析	54
3.2.3 地下金属矿山开采过程人机环境安全非线性动态演化分析	63
3.2.4 地下金属矿山开采过程人机环境安全非线性动态演化趋势 定性分析	70
3.3 地下金属矿山开采安全动态演化仿真研究	71
3.4 本章小结	73
参考文献	73
第4章 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵辨析	76
4.1 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵理论基础	76
4.1.1 熵的产生与发展	76
4.1.2 热熵、信息熵与安全信息熵	77
4.2 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵阈限分析	79
4.2.1 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵阈限	79
4.2.2 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵演变模型	80
4.3 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵辨析模型	83
4.3.1 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵辨析指标体系	84
4.3.2 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵辨析方法	84
4.3.3 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵模糊隶属函数确定	86
4.3.4 地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵辨析模型应用	87
4.4 本章小结	89
参考文献	90

第5章 地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测	93
5.1 地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测模型	93
5.1.1 径向基函数神经网络	93
5.1.2 地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测模型构建	96
5.1.3 地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测模型隐含层确定	98
5.1.4 地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测模型仿真	99
5.2 地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测应用研究	103
5.2.1 地下金属矿山大规模采空区失稳现象	104
5.2.2 地下金属矿山大规模采空区失稳预测模型研究	105
5.3 地下金属矿山开采多因素耦合灾害智能预测模型实际应用	112
5.4 本章小结	113
参考文献	114
第6章 地下金属矿山开采灾害征兆参数时间序列智能预测	117
6.1 地下金属矿山开采灾害征兆参数时间序列智能预测模型研究	118
6.1.1 函数链神经网络结构概述	118
6.1.2 地下金属矿山开采灾害征兆参数时间序列智能预测模型建立	119
6.1.3 函数链神经网络拟合充要条件	120
6.1.4 模糊自适应变权重算法	121
6.2 地下金属矿山开采灾害征兆参数时间序列智能预测模型仿真	124
6.2.1 函数链神经网络拟合充要条件分析	124
6.2.2 预测结果分析	124
6.3 地下金属矿山开采灾害征兆参数时间序列智能预测应用实例	125
6.3.1 尖点突变模型	126
6.3.2 尖点突变模型的正则函数拟合	127
6.3.3 铅锌矿冒顶预测实例	128
6.4 本章小结	129
参考文献	130
第7章 结论与展望	132
7.1 结论	132
7.2 展望	133
参考文献	134

第1章 绪 论

在矿业技术发达的美国、加拿大、澳大利亚等国家,凭借着先进的技术、装备和管理,基本实现了对金属矿资源的安全高效开采。而在中国,由于采矿技术、装备和管理的相对落后,有色金属资源在经过长期的大规模开发后,不可避免地导致安全隐患大、多中段分散作业,设备利用率低,管理复杂等弊端^[1]。因此,如何安全高效地开采地下金属矿山,是我国有色金属工业目前所面临的一个重大挑战^[2]。

为此,在现有金属矿山开采工艺流程、开采设备的情况下,如何充分利用地下金属矿山开采过程信息,合理确定金属矿资源开采过程参数,并使地下金属矿山开采过程人机环境系统运行于最佳安全状态,是目前我国地下金属矿山开采过程所要解决的重大问题,也是目前我国地下金属矿山最为关注并亟待解决的关键问题之一。

由于地下金属矿山开采过程具有大时滞、非线性、时变、强耦合等特征^[3,4],而目前对地下金属矿山开采过程大部分安全管理或安全技术又建立在线性思维基础之上,没有充分利用地下金属矿山开采的过程信息,其主要原因至少包括以下几个方面:

- (1) 建立地下金属矿山开采过程安全生产规模合理数学模型困难。
- (2) 地下金属矿山开采过程人机安全动态演化模型难以构建,且地下金属矿山开采过程中人具有的马虎性(或警觉性)存在一定的时滞现象。
- (3) 未明晰地下金属矿山开采过程人机环境系统安全熵产生机理。
- (4) 对地下金属矿山开采过程多影响因素耦合灾害难以实施有效的预测。
- (5) 对于地下金属矿山开采过程这样的复杂系统,信息获取过程中多次改变系统控制量的设定点会影响实际系统的正常运行,故需要一种只需少量征兆参数的时间序列样本就能获得对地下金属矿山开采过程灾害实现较好预测预报的智能预测方法。

以上这些问题严重影响了地下金属矿山开采过程安全管理的实现。为此,基于地下金属矿山开采过程安全操作和管理的研究现状及其特点,建立地下金属矿山开采过程安全机理模型和性能优越的智能预测方法,将十分有利于地下金属矿山开采过程安全操作和管理的真正实现。

地下金属矿山开采过程人机环境系统是一个不断地与外界环境发生物质



流、能量流、信息流和人流的动态交换的、开放的，且各个因素彼此渗透与互相制约的非线性非平衡耗散结构系统，如图 1.1 所示。其开采环境、地域范围、人员素质、设备状态、安全状况和开采水平等方面都会随时间的变化而变化；此外，地下金属矿山开采过程中内部要素之间往往呈非线性结构，并存在着相互制约、相互推动的正反馈的倍增效应及负反馈的饱和效应等非线性关系，是一个包含影响地下金属矿山开采过程安全的诸要素集聚与扩散的耗散结构动力系统。因此，地下金属矿山开采过程安全的实现，自然离不开地下金属矿山开采过程安全机理理论的有力指导。

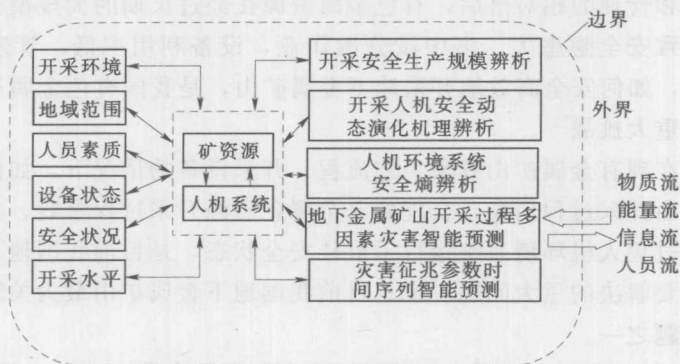


图 1.1 地下金属矿山开采过程人机环境安全系统图

由图 1.1 可以看出，地下金属矿山开采过程人机环境安全涉及影响要素较多，且目前地下金属矿山开采过程中广泛存在安全生产规模建模困难、时滞效应下的人机安全动态演化模型难以构建、未明晰人机环境系统安全熵产生机理、多影响因素耦合灾害预测预报难以有效实施以及征兆参数的时间序列灾害预测预警精度较低等问题。因此，这些问题的解决与否成为制约地下金属矿山开采过程人机环境协同安全实现的主要理论瓶颈。

由于地下金属矿山开采过程中开采安全生产规模辨析、开采人机安全非线性动态演化机理辨析、人机环境系统安全熵辨析和多影响因素耦合灾害预测预报以及征兆参数的时间序列灾害预测预警等逻辑关系错综复杂，是不易于理解和难于解释的问题。因此，在我国目前地下金属矿山开采条件下，寻求一条摒弃传统的安全管理模式，利用非线性系统科学理论（如神经网络^[5,6]、模糊理论^[7]、熵理论^[8,9]以及人因安全理论^[10]等）从系统角度去研究我国地下金属矿山开采过程中的人机环境安全辩证关系，开创地下金属矿山开采过程人机环境安全局面是十分紧迫的。将非线性系统科学理论应用于地下金属矿山开采过程中，以期探索一种更为有效、合理的地下金属矿山开采安全理论方法，明晰地下金属矿山开采过程安全机理和增强灾害预测预警能力，这对于促进我国地下



金属矿山开采可持续协调发展是十分必要的。

为此,本专著紧密结合我国地下金属矿山开采的实际情况,依托国家“十一五”科技支撑计划课题——金属矿大范围隐患空区调查及事故辨识关键技术研究[2007BAK22B04-08]和国家自然科学基金项目——金属矿山采场冒顶声发射信号混沌辨析及其智能预报研究[51274250],开展对地下金属矿山开采过程安全机理辨析的探索工作,旨在揭示地下金属矿山开采过程人机环境安全系统内在的规律,通过提升安全生产能力,系统提高我国地下金属矿山开采安全水平,以达到安全生产、提升竞争力的目的。选题紧密联系工程实际,力求在实现理论创新的同时,为地下金属矿山开采过程安全管理与灾害智能预测预报提供理论支撑。

为更好地确保地下金属矿山开采过程中的安全性,许多在安全科学与工程领域有着丰富经验的科研工作人员不断研究国内外地下金属矿山各类事故的致灾原因,并结合我国地下金属矿山实际开采过程中所面临的安全管理现状,得出了在我国现有条件下,可以通过有效的灾害预测以及强化安全管理实现对地下金属矿山安全高效的开采。

所谓地下金属矿山开采过程安全机理及灾害预报是以系统工程理论为基础,运用非线性系统科学理论,如多学科设计优化^[11](Multidisciplinary Design Optimization, MDO)、神经网络、模糊理论、熵理论、人因安全理论等方法对地下金属矿山开采过程存在的安全隐患进行辨识、评估分析与预测预报,并提出安全可行的技术措施与管理策略,为地下金属矿山的安全开采提供重要的理论依据和技术支撑。

对地下金属矿山来说,开展安全机理辨析与灾害预测研究,能够有效地加强矿山开采安全,并对开采人员的人身安全提供一定的保障。强化地下金属矿山开采安全管理,可以防止和减少各类事故的发生,减少财产损失和人员伤亡、伤害。通过安全机理辨析与灾害预测研究可确定被辨析与预测地下金属矿山开采的安全水平,揭示事故的主要因素和次要因素,分析事故产生的规律,找出地下金属矿山开采过程安全的预测工作与安全管理的难点、关键、重点问题及主要研究方向,有利于对地下金属矿山事故隐患进行主动监测,及时采用相关的安全措施将安全隐患事前消除。

因此,本专著拟采用多学科设计优化方法、神经网络、模糊理论、熵理论、人因安全理论等非线性科学理论和人工智能方法对地下金属矿山开采过程人机环境安全机理辨析与灾害智能预测进行研究,以期消除事故隐患或将事故危险性降至最低。

本专著的研究成果将为进一步科学和深入地研究分析和揭示地下金属矿山开采过程安全机理,促进灾害预测预报理论方法与技术发展,并进一步丰富和



发展地下金属矿山安全管理与预测理论方法,为地下金属矿山开采过程安全管理与灾害预防提供良好的理论基础与参考依据;同时,也将对保障地下金属矿山开采过程的安全乃至提高地下金属矿山开采质量和效率,都具有十分重要的现实意义。

1.1 国内外研究现状

1.1.1 地下金属矿山开采灾害机理研究现状

1. 地下金属矿山开采现状

金属矿产资源的利用对人类社会的进步和经济快速发展起着关键作用,金属矿产资源开采和利用水平是体现社会生产力水平高低的指标之一,也是社会文明程度的重要体现。

进入 21 世纪的 10 多年间,随着我国工业化和城镇化进程不断推进,对金属矿产资源的需求不断增大。据文献报道,一个国家的国民生产总值人均达到 1000~2000 美元时期可以判断其处于工业化进程阶段。统计数据表明,2004 年我国人均 GDP 为 1269 美元,而 2011 年则为 5414 美元,由此看来,我国已经进入工业化进程中后期阶段,并在今后几十年间,其金属矿产资源开采需求量将持续增大,且其资源的消耗也必将进入一个新的高峰阶段。

由于我国工业化和城镇化进程的不断推进,使得金属矿产品的需求量急剧增加,而且金属矿产资源属于不可再生资源,因此其会面临枯竭的情况^[12]。目前我国金属矿行业存在两大方面的问题:

(1) 由于金属矿开采力度加大,使得不少金属矿山资源消失加快,以致相关的金属矿产品在供求方面出现矛盾加剧的情况。

(2) 采矿科技相对落后,矿产资源远未充分开发。矿山的技术装备水平总体落后,大部分金属矿山仍处在 20 世纪 80、90 年代的装备水平和科技水平,且采矿规模小,效率低,管理粗放,导致采空区隐患已成为影响地下金属矿山安全生产最主要的危险源之一。

大规模或大面积采空区的存在必然导致其地下金属矿山的开采条件变得十分恶劣,容易造成大规模的岩石移动和冒落,引起采空区垮塌和地表沉陷,对其开采工作人员和开采设备安全构成巨大隐患。目前,我国地下金属矿山开采过程虽存在一些安全事故,但我国地下金属矿山开采总体上还是比较安全的,重大特重大事故发生频率仍呈上升趋势,需要引起足够重视^[13,14]。

此外,地下金属矿山开采过程安全事故的发生不仅与原有开采环境遭到破坏有关,而且也与地下矿山工程的复杂形态^[15]关系密切。对于某一特定的复杂地下金属矿山开采过程,其运动方程、甚至系统方程中应包含哪些变量都难



以确定,而这些变量的微变均有可能导致复杂地下金属矿山开采过程发生剧变^[3,16]。

2. 地下金属矿山开采灾害机理研究现状

近年来,随着我国社会生产力的飞速发展,现代化建设也步入了快速发展的阶段,各项建设事业都需要钢铁等金属原材料,所以也带动了金属矿产品等需求量的剧增,这在一定程度上加剧了金属矿资源开采的灾害事故的发生^[17,18]。有关资料显示,最近10年,各种地下金属矿山被大幅度开采,开采过程中各类安全问题也逐渐凸显并越来越多。因此,地下金属矿山开采所引发的灾害问题是亟待解决并需要长期研究的工作重点。

地下金属矿山开采过程中,容易引发一系列灾害,主要有地表沉陷、矿震、火区复燃、岩爆等问题^[19-23]。地下金属矿山开采过程中的安全影响因素较多,主要有矿体的埋藏和储存条件、矿体和围岩的力学性质等自然方面的原因,还与采矿方法、工程布置、回采顺序和支护方式等技术方面原因有关。除此之外,还与安全管理制度的具体落实情况关系密切。

地表沉陷是由于存在地下采空区的顶板发生冒落而引起的地面形变。19世纪以来,不少学者都对地表沉陷深入研究,通过各种方法探索开采沉陷的原因所在以及其岩移规律,建立了较多的开采矿层上覆岩层直至地表的数学模型,并对其预测理论和方法进行了研究,主要有剖面函数法、经验公式法和物理模拟法^[24]等。在这些方法中比较成功且应用比较广泛的方法有概率积分法、典型曲线法和剖面函数法,其中概率积分法是由国外学者李特维尼在基于随机介质理论的基础之上提出的一种分析方法。该理论将岩石移动的实际过程视为一个随机的过程。李特维尼通过概率理论,并使用阿尔莫哥洛夫公式对岩石下沉场进行分析与验证。我国学者刘宝琛在20世纪60年代首次引入随机介质理论,通过深入分析,将其不断验证修改,并运用概率积分法对地表移动的规律进行了预测^[25]。以上有关对地表沉陷机理的研究方法,大部分是研究煤矿地表的移动规律,并且都是在自重应力的作用范围内,而并不适合对于处于构造应力作用下的开采方法,如空场法、留矿法等。另外,我国学者寇新建等^[26]还认为金属矿山的岩石移动规律与煤矿不同的原因是还受到残余构造应力影响。节理裂隙在发育过程中会对岩移有影响,岩移呈现出阵发式和周期性。但是,就当前情况来看,只有随机介质理论还算比较成熟,其他的理论还在探究阶段^[27]。而贺跃光^[28,29]将随机介质理论进行了拓展,研究了矿山地表在构造应力作用下所体现出的沉陷规律,尤其对由于倾斜崩落法开采的矿山岩石塌陷进行了研究,并提出了一种针对地表水平移动和圆形塌陷坑的计算方法。目前,对地下金属矿山的地表沉陷的研究是亟待解决的重要问题之一。在矿山开采中影响事故发生的重要因素来源于采空区隐患及地压灾害。我国由于采空区



隐患所造成的地压灾害有河北省铜矿龙潭沟发生的采空区崩落、江西省盘古山钨矿发生的地压灾害、广西壮族自治区南丹高峰矿发生的透水灾害、湖南省花垣锰矿发生的顶板冒落和峰城石膏矿区发生的塌陷事故等。可以看出,对于地下矿山安全来说,采空区存在着重大的危险隐患。目前,有许多学者都对顶板的结构力学特性和破坏机制进行研究^[30-32],主要有顶板受拉应力型冒落、断层受剪型冒落破坏与矿柱失稳破坏型顶板冒落等。在梁板结构理论中,能够对破坏条件与顶板岩层中的应力作出正确解释,但是当顶板岩层遭到损害以后,在岩石中会有许多不同的接触方式,导致各自的平衡规律与承载能力也有所不同,所以会影响其采场压力的力学平衡与承载规律以及顶板的移动规律,进而影响其地压控制参数。

对于深部岩爆,最早是国外开始研究的。在1738年,英国莱比锡煤矿首次记录了岩爆的情况,在1906年,美国Atlantic矿最早现场勘察并研究了岩爆现象。从此之后,世界上许多国家都投入不少人力、物力和财力开展了深部岩爆灾害事故的研究^[33-36]。我国对岩爆现象的研究较晚,最早是在1933年记录了抚顺胜利煤矿岩爆现象,并引起较大的重视。国家在“九五”至“十五”期间不断增加了其研究的支持力度,并一直为研究工作提供资金上的扶持。在2003—2008年间多次在国家自然科学基金重大项目上立项研究,比如岩体力学特性与时效特征、岩爆灾害的机理和防治措施等。通过这些项目的开展为我国岩石力学与深部采矿研究奠定了一定的基础。岩爆发生机理主要有能量、刚度、强度以及冲击倾向等方面的理论,其中对岩爆现象的倾向性预测则是根据机理模型和实际情况来进行相应判断。比如,在波兰有冲击倾向性的指标判据^[37],同样在南非有比较著名的最大主应力判据。但是由于各种原因,比如对岩爆的各种机理分析不够以及相关力学理论体系尚不完善等,因此主要还是依靠防治的经验来判断。

在地下金属矿山开采灾害中,除了以上所述问题之外,还包括地下水灾害、尾矿库溃坝等。目前,对于矿山灾害的研究,大部分还是局限于一个或者几个问题的研究,其系统科学的研究工作开展较少。文献[39]较系统地对深部矿床开采可能发生的灾害事故的机理,监控的网络、发生的规律以及数据可视化分析模型等一系列都进行探讨,但是仍然需要进一步深入研究。由此看来,矿山的防灾减灾研究工作是需要长期的研究以及探索的,不能单从技术上来治根,而需要引入更科学更有价值的灾害研究理论和模式。

1.1.2 矿资源开采安全机理研究现状

安全事故理论研究领域属于系统安全科学范畴^[40,41],是社会、人文和自然等多学科交叉融合的一门学科。通过使用系统论中的有关理论和方法对系统



的事故过程^[42-49]分析,并根据事故发生的原因和发生机制,研究出如何进行预防以及控制方法。国外在这方面的研究成果十分丰富^[50-60],主要包括事故单因素理论和事故因果链理论:

(1) 事故单因素理论。该理论偏重于单方面的因素,认为事故的起因是一或两个因素,而这些因素主要是指环境的某种性质或者人在某方面的特性,代表性的理论有事故倾向性理论和社会环境理论。

(2) 事故因果链理论。该理论认为事故的致因不是由单方面的因素造成的,而是由一系列因素按照因果顺序发生所导致的。比较具有代表性理论有博德的管理失误连锁论和海因里希事故因果连锁论。海因里希研究事故的致因是以大量的事实和数据为根据的,通过统计方法找到其真正原因。海因里希既强调在事故发生中人的不安全操作起着主要作用,也强调了其他客观因素的不安全状态直接导致了事故的发生。

在探索事故的原因方面,我国学者从事事故致因这方面来研究较晚^[41,48],且多引用国外的先进理论来从事实证性研究,这些理论涉及哲学、心理学、人机工程学等多种学科。我国学者崔国璋,冯肇瑞从因果角度出发,为了能够更好地系统分析在生产系统中存在的不安全因素及其可能造成的危害,充分运用事故树、事件树、安全检查表等方法进行分析。另有学者陈昌棋认为事故的发生原因主要在于人为的因素。尹贻勤结合实际生产情况,认真研究在事故尤其是在致人死亡的事故中,人为的心理以及行为所产生的原因、作用规律、表现形式及控制措施。林泽炎通过研究得出结论,由于人为因素所造成的事故率以及死亡人数相比偶然情况下要高出许多。而在事故发生的原因中由于人的自身情绪以及意识方面出现异常是主要原因。赵朝义则从人为失误的角度分析事故发生的原因,并讨论管理失误对事故安全的影响。1995年陈宝智^[48]则更加系统的对安全理论进行研究,并提出了事故原因的两类危险源理论。

1. 人机安全机理研究现状

在人机系统中,安全性为其主要综合指标之一,人机系统中许多因素均能对综合指标产生影响。文献[61]基于有关资料从理论上对系统人员警觉性与系统安全性两大指标之间的关系进行了分析,并根据两者的非线性函数关系提出了相应的动态演化模型。在模型中将警觉性与安全性相图分为了4部分,分别是安全有保障区、安全水平提升区、安全形势振荡区和安全形势恶化区。通过对这4部分区域之间相互作用的模式来探究不同的参数下,安全形势振荡区所表现出的类型。一共有3种类型,分别为渐进稳定、周期振荡和振荡恶化。同时对相图进行演化,分析其趋势,并通过警觉性与安全性离散化量表来推断演化特征。文献[62]从人机系统的角度出发,对露天开采的作业规程中的操作技术规程、作业技术规程和安全规程作了进一步划分。作为机械化生产的露



天开采平台,对作业人员制定了严格执行的规程,并从人机系统角度分析研究了露天开采作业中的规程的特性。文献[63]阐述了现代复杂人机系统中,人的因素已成为制约整个系统安全性的关键因素。本专著通过对个人安全能力的探讨,对其管理者和操作者的安全能力进行了量化评测,并采取必要措施对其加以改正。文献[64]从理论上对人机系统的安全性能进行了分析,提出的对人的因素必须从生理、心理及动态特性协调的观点并在实践中不断深化认识和验证。本专著从两方面对其进行了阐述:其一要使机械、环境适合人的特性;其二要使人的素质和能力适应工作、机械和环境的要求。文献[65]针对目前矿山安全评价方法的不足,采用模糊数学的方法对矿山这一复杂的多因素、多变量和多层次人机系统进行了安全评价,并通过分析得到影响矿山安全的各个因素及因素之间的相互关系,建立了较合理的矿山安全评价指标体系。文献[66]通过运用概率统计的方法对人机系统中的人的可靠性进行了研究,提出一个利用模糊理论来研究人机系统的数学模型。文献[67]针对专业性系统事故分析技术的发展进行了研究,提出了应用要求。本专著提出了一种已应用于事故分析工程技术的评估和修订分类标准。并运用Piper Alpha事件对事故分析技术的优势和劣势进行了进一步的阐述。文献[68]针对人机交互领域内的一些关键性问题进行了探讨,并针对人为因素在核电厂的安全性进行了分析和评价。

2. 安全生产规模研究现状

安全生产能力是目前安全生产工作的重中之重,在安全生产能力管理的基础性工作中评价安全生产能力是重要的内容之一。由于安全生产能力是技术、管理和环境等多种因素作用的结果,决定安全能力的因素复杂多变且人为因素较多,如何正确认识各种因素对安全能力的影响,是进行安全管理和安全评价的基础,也是建立健全全社会安全生产管理体系的一个重要环节。文献[69]从矿山安全生产能力明显有复杂性、多样性及渐变性的角度,使用模糊综合评价方法创建模糊数学模型,并对矿山安全生产的能力进行具体评价。在矿山地质分析调查的层面上,创建矿山安全生产能力的数据库。研究结果表明,该模糊综合评价方法具有一定的实用性。文献[70]运用层次分析法的理论并从系统工程的观点,创建煤矿安全能力的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)的演化模型,作为煤矿安全评价因子的权重是成对比较矩阵的特征向量,并明确了相关因子在影响力方面的排序。研究结果表明,对我国煤矿安全生产能力有影响最重要的因素是人因;第二是技术及管理因素;最后是包括地质条件在内的环境因素。文献[71]针对某包装企业,综合影响其安全生产的各种因素,通过层次分析方法来构建其包装企业的安全生产指标体系,并对各相关影响因素进行重要性排序,为其安全生产能力评价及方案选择



决策提供了有力的依据。文献 [72] 对于矿业联合企业的特点, 从随机查找的遗传算法的角度, 考虑到采、选、冶生产的平衡, 设立了地下金属矿开采最优生产经济数学模型。并利用其模型对铜矿锡矿等矿体生产指标进行优化, 得到了该矿体最优的生产能力。

企业在投资时首先考虑的是在产出与投入之间存在的效率问题, 尤其是对生产规模的确定较为关键。通过规模经济以及工程数学等方面的相关理论, 对特定条件下与生产规模有关的一系列问题进行研究, 比如最佳生产规模、警惕生产规模、最低生产规模与安全生产规模等, 以期达到降低成本, 提高产量的目的。文献 [73] 从分析我国煤层气开发利用的投资活动入手, 通过充分的分析、研究, 建立了我国煤层气开发利用投资的最佳生产规模、警惕生产规模、最低生产规模与安全生产规模的数学模型, 并通过分析得出利润最大时的煤层气最佳生产能力。文献 [74] 针对各种生产投资活动, 利用管理学中的盈亏平衡原理, 建立了某企业在一定条件下的最佳生产规模、警惕生产规模、最低生产规模与安全生产规模的数学模型, 并用数学理论, 提供了规模经济的定量分析方法。文献 [75] 研究了露天矿区集中化开采模式和综合工艺匹配模式, 并根据开采规模的制约因素, 以收益最大化为目标, 构造了单坑合理规模的收益函数, 通过整数规划方法, 建立了多坑的合理生产规模模型, 得出了某露天矿合理生产规模。文献 [76] 提出了一种可计算地下有色金属矿扩大化生产的智能系统。基于对扩大化生产的主要影响因素的分析, 本专著提出了智能系统的设计原则和结构, 并引入了人工神经网络子系统, 本专著对该智能系统进行了验证, 结果证明系统效率良好。文献 [77] 提出了不确定金属供应及其长期储存的露天开采作业的金属的最优生产规模, 并依据模拟金属矿石开采过程的一系列多阶吨位曲线来决定露天金属矿山的最优生产能力。通过在发展要素阶段重置原始投资值, 该模型不但可使操作系统的现有流动值最大化, 同时也可使金属矿山最优生产能力不受金属矿石长期大量储备的影响。文献 [78] 为高科技人工智能系统提出了多信息管理系统 (Multi Information Platform, MIP) 来确定最优供应网络链的设计方法, 并采用模拟退火的启发性来解决优化问题。结果表明, 当要确定多家工厂的产量问题时, 有着低资本和生产资本的大规模生产公司却有着高的利润来补偿生产能力, 当客户的需求是大到足以抵消较高的资本成本时, 运行一些较大规模的生产能力的工厂更符合其效益的提高。

3. 地下采空区失稳研究现状

地下采空区失稳是矿山重大危险源之一, 目前由于其问题的复杂性和对其研究的不足, 导致对地下采空区失稳缺少科学系统的辨识方法。因此, 对地下采空区失稳进行辨识研究是十分关键和重要的研究课题。文献 [79] 探讨了在