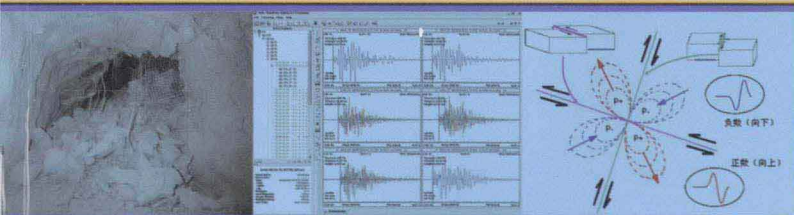


深井开采岩爆灾害 微震监测预警及控制技术

王春来 吴爱祥 刘晓辉 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

本书得到以下基金资助:

国家“十二五”科技支撑计划(No. 2012BAB08B02)

国家“十一五”科技支撑计划(No. 2006BAB02A01)

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20120023120008)

中央高校基本科研业务费专项基金(No. 2011QZ01)

2012 年北京市共建项目专业建设项目——采矿工程

深井开采岩爆灾害 微震监测预警及控制技术

王春来 吴爱祥 刘晓辉 著

北 京

冶金工业出版社

2013

内 容 提 要

本书结合工程实例,全面分析和论述了深井开采硬岩岩爆的前兆信息特征、影响因素、破坏特征、监测预警方法和工程控制技术。全书共7章,内容包括:深井岩爆灾害研究现状、深井开采岩爆灾害孕育机理、基于模糊物元理论的岩爆倾向性分析、深井开采岩爆灾害震源机制、深井开采岩爆灾害微震监测预测预警研究、基于灰色-突变理论的岩爆预测模型和深井开采岩爆灾害工程控制研究。

本书可供矿业工程、工程力学、岩土工程、交通工程、水利建设及地质工程等专业的师生阅读,也可供相关生产企业和科研单位的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

深井开采岩爆灾害微震监测预警及控制技术/王春来,
吴爱祥,刘晓辉著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-5024-6259-8

I. ①深… II. ①王… ②吴… ③刘… III. ①深井—
岩爆—小地震—地震监测 ②深井—岩爆—小地震—地震
控制 IV. ①TD713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 077178 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6259-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013 年 5 月第 1 版, 2013 年 5 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 8.125 印张; 230 千字; 247 页

29.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



前 言

随着我国矿产资源开发力度加大，浅部资源日趋枯竭，复杂难采的深部资源成为开采的主要对象。不利的采矿条件不仅提高了采矿成本、降低了生产效率，而且大大增加了岩爆灾害发生的可能性，使得我国矿山的安全形势更加严峻。因此，开展矿山深部开采岩爆灾害预警与控制技术的研究便显得尤为重要。到目前为止，世界各国采矿界和岩土工程界的学者在岩爆灾害形成机理、预警及防治等方面已进行了大量的研究，但对岩爆灾害形成机理的认识以及预警模型判据的研究等还只停留在假说和经验阶段，利用岩爆灾害预测理论指导工程实践还相距甚远，而能够满足工程需要的预测与防治技术又多偏重于已发生过的灾情分析，不具预知性和普适性。因此，直接套用现有的理论成果来解决深井开采岩爆灾害问题是不适宜的。

近年来，作者结合国家“十一五”科技支撑计划

(No. 2006BAB02A01)、国家“十二五”科技支撑计划(No. 2012BAB08B02)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20120023120008)、中央高校基本科研业务费专项基金(No. 2011QZ01),以云南驰宏锌锗股份有限公司会泽铅锌矿为工程实例,对深井高应力条件下安全高效回采技术开展了系统的研究工作,本书就是作者在这些方面所取得的主要研究成果的初步总结。作者希望书中介绍的理论和方法,能对从事相关生产和研究工作的同行们有所裨益。由于深井开采岩爆灾害诱发机理、预警及控制方法研究涉及多学科理论和方法,因而仍有许多理论和实际问题有待于业内学者深入探讨和研究。

本书的完成和出版,得到了国家科技部科技支撑计划、国家教育部博士点基金和中央高校基本科研业务费专项基金的支持和帮助;撰写过程中得到了长沙矿山研究院徐必根高工(教授级)、唐绍辉高工(教授级)、刘小林高工(教授级)、谢长江高工(教授级)、唐海燕工程师、黄英华工程师、潘懿工程师、廖文景工程师和文兴工程师,以及云南驰宏锌锗股份有限公司会泽铅

锌矿陈进总经理（教授级高工）、吉学文高工、曾普海高工、何世林高工、李祥高工、严庆文高工、黄学贵工程师、吴顺江工程师和侯小兵工程师等多位领导和朋友的帮助；在此一并表示感谢。

限于作者水平，书中不当之处，恳请广大读者不吝赐教。

作 者

2013 年 3 月于北京

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
中国冶金百科全书·采矿卷	本书编委会 编	180.00
现代金属矿床开采科学技术	古德生 等著	260.00
我国金属矿山安全与环境科技发展前瞻研究	古德生 等著	45.00
爆破手册	汪旭光 主编	180.00
采矿工程师手册(上、下册)	于润沧 主编	395.00
现代采矿手册(上、中、下册)	王运敏 主编	1000.00
深井硬岩大规模开采理论与技术	李冬青 等著	139.00
高瓦斯煤层群综采面瓦斯运移与控制	谢生荣 等著	26.00
地下金属矿山灾害防治技术	宋卫东 等著	75.00
燃烧与爆炸学	张英华 编著	30.00
采空区处理的理论与实践	李俊平 等著	29.00
矿山安全工程(国规教材)	陈宝智 主编	30.00
采矿学(第2版)(国规教材)	王 青 主编	58.00
矿井通风与除尘(本科教材)	浑宝炬 等编	25.00
复合矿与二次资源综合利用(本科教材)	孟繁明 编	36.00
矿产资源开发利用与规划(本科教材)	邢立亭 等编	40.00
金属矿床地下开采(第2版)(本科教材)	解世俊 主编	33.00
矿山岩石力学(本科教材)	李俊平 主编	49.00
高等硬岩采矿学(第2版)(本科教材)	杨 鹏 编著	32.00
矿山充填力学基础(第2版)(本科教材)	蔡嗣经 编著	30.00
碎矿与磨矿(第3版)(本科教材)	段希祥 主编	35.00
现代充填理论与技术(本科教材)	蔡嗣经 等编	25.00
金属矿山环境保护与安全(高职高专教材)	孙文武 主编	35.00
金属矿床开采(高职高专教材)	刘念苏 主编	53.00

仅供参考

目 录

1 深井岩爆灾害研究现状	1
1.1 深井开采岩爆灾害概述	3
1.2 岩爆灾害诱发机理研究现状	6
1.3 岩爆灾害预警研究现状	9
1.3.1 时空分布特征研究现状	9
1.3.2 岩爆灾害 b 值研究	10
1.4 深井开采岩爆灾害预警存在的主要问题	12
1.4.1 监测系统定位精度低	12
1.4.2 大规模较强岩爆灾害预警研究相对较少	14
1.4.3 缺少普适性较强的岩爆灾害孕育过程研究方法	14
1.4.4 矿山对岩爆灾害关切度不够高	15
2 深井开采岩爆灾害孕育机理	17
2.1 引言	17
2.2 开采技术条件	18
2.2.1 矿床水文地质概况	18
2.2.2 原岩应力	22
2.2.3 岩石力学特征	24
2.3 微震事件诱发机理	30
2.3.1 应力诱发微震事件	30
2.3.2 采矿诱发微震事件	37

2.3.3	地质结构面活动诱发微震事件	43
2.4	岩爆灾害前兆信息特征	45
2.4.1	岩芯饼化现象	45
2.4.2	巷道围岩片状剥落现象	46
2.4.3	微震事件前兆变化特征	47
2.5	会泽铅锌矿深部围岩失稳特征	48
2.6	岩爆灾害演化过程	51
2.6.1	岩石受力变形破坏演化过程	52
2.6.2	岩爆类型与岩爆烈度分级	54
2.6.3	岩爆影响因素及形成机理	56
	结语	58
3	基于模糊物元理论的岩爆倾向性分析	60
3.1	引言	60
3.2	模糊物元理论原理	60
3.2.1	基本概念	62
3.2.2	关联分析	64
3.2.3	权重的确定方法	68
3.3	岩爆倾向性分析	70
3.3.1	基于模糊物元理论的岩爆倾向性评价的 一般步骤	70
3.3.2	岩爆倾向性评价指标的选取	71
3.3.3	岩爆倾向性评价隶属函数的确定	72
3.3.4	岩爆倾向性模糊物元分析	76
3.3.5	岩爆优劣评价	81

结语	84
4 深井开采岩爆灾害震源机制	85
4.1 引言	85
4.2 震源机制研究现状	86
4.2.1 震源机制基本理论	86
4.2.2 震源机制表示方法	89
4.3 震源机制解的确定	94
4.3.1 双力偶模型基本理论	95
4.3.2 求解震源机制解实例	100
结语	106
5 深井开采岩爆灾害微震监测预测预警研究	108
5.1 引言	108
5.2 微震监测系统构建	109
5.2.1 微震监测系统设计	110
5.2.2 微震监测系统方案优化	116
5.2.3 微震监测系统定位精度分析	119
5.3 预测预警模型的建立	125
5.3.1 微震监测参数的确定	125
5.3.2 微震监测相关参数的幂律特性	127
5.3.3 微震参数与岩体裂隙演化关系	130
5.3.4 模型建立的原则	135
5.4 岩爆灾害预警关键点识别研究	136
5.4.1 常规监测岩爆灾害预警关键点识别	136
5.4.2 微震监测岩爆灾害预警关键点识别	141

5.5 微震监测预测模型研究·····	146
5.5.1 现场监测数据分析·····	148
5.5.2 灰色预测分析·····	149
5.6 微震监测预警模型研究·····	151
5.6.1 基于微震事件时空分布特征研究·····	151
5.6.2 基于微震监测事件参数位移变化的预警研究·····	157
5.6.3 基于微震事件参数视应力变化的预警研究·····	161
5.6.4 基于微震事件活动率的预警研究·····	163
5.6.5 基于微震活动性参数 b 值的预警模型研究·····	164
结语·····	170
6 基于灰色-突变理论的岩爆预测模型·····	173
6.1 微震活动时间序列分析·····	174
6.2 微震监测数据的尖点突变分析·····	179
6.2.1 突变理论·····	179
6.2.2 尖点突变模型及稳定判据·····	182
6.2.3 尖点突变模型模拟岩爆过程的可行性·····	184
6.2.4 监测数据的尖点突变分析·····	186
6.3 基于灰色建模理论的岩爆模型·····	188
6.3.1 $GM(1,1)$ 模型原理·····	188
6.3.2 微震监测数据的灰色建模·····	190
6.3.3 模型精度检验·····	192
6.4 利用灰色-突变模型预测岩爆的一般步骤·····	193
6.5 模型应用实例·····	194
6.5.1 微震活动实测·····	194

6.5.2 监测数据的灰色-突变分析	198
结语	201
7 深井开采岩爆灾害工程控制研究	202
7.1 引言	202
7.2 采矿工艺	203
7.2.1 采矿方法	205
7.2.2 采准工程布置	206
7.2.3 采场布置	207
7.2.4 回采工艺	209
7.3 工程主动控制	210
7.3.1 前期回采顺序存在的问题	212
7.3.2 基于微震监测和数值模拟的回采顺序优化	217
7.4 工程被动控制	223
7.4.1 水砂充填存在的问题	224
7.4.2 膏体充填工艺	226
7.4.3 膏体充填和水砂充填对比	229
7.4.4 膏体充填对采动围岩作用分析	230
结语	233
参考文献	235

深井岩爆灾害研究现状

矿产资源是国民经济和社会高速发展的重要物质基础。人口、资源、环境和灾害是社会经济发展的四个基本影响因素，也是关系人类生存与发展的四大基本问题。据统计，目前我国 92% 以上的一次性能源、80% 以上的工业原料和 70% 的农业生产资料均取自矿产资源。矿产资源开发与综合利用成为我国社会经济发展的重要支柱。我国经济的持续高速发展和全面建设小康社会的进程对矿产资源的开发利用提出更高的要求，而目前的现状却是，我国钢铁缺口总量 30 亿吨，铜缺口超过 5000 万吨，精炼铝缺口 1 亿吨^[1]。据预测，未来 10 年，我国对铜、铝等矿产资源的累计需求总量至少是目前储量的 2~5 倍。

随着国民经济的持续快速发展，我国对金属矿产资源的需求急剧增加^[2]。大部分金属矿产资源对国外资源的依存度增加，当前铁矿石的 75%、铜矿石的 86%、铝土矿的 52% 以上均依赖进口，矿产资源的短缺已成为制约国民经济稳定发展的瓶颈，并对国家经济安全构成严重威胁。随着我国矿产品消费量的不断增长，矿产资源的开发力度也逐步加大。开采条件较好的浅部矿产资源逐渐枯竭，矿山开采逐渐向深部发展。然而，由于矿床水文地质条件和工程地质条件复杂、围岩破碎，矿体埋藏深，矿石品

位低等不利因素,使得我国很多资源难以开采。显然,不利的采矿条件不仅提高了采矿成本、降低了国际竞争力,而且还大大增加了采矿诱发岩爆灾害发生的概率^[3]。

深井开采成为矿产资源开发的必然趋势。由于开采条件日益恶化,使得我国矿山的安全形势更加严峻,事故数与伤亡人数一直居高不下。据国家安全生产监督管理总局统计,近年来我国矿山事故起数在 3401 ~ 5978 起之间波动,死亡人数在 3780 ~ 9050 人之间波动,尽管我国矿山事故起数和死亡人数连续 8 年实现“双下降”,但群死群伤事故仍时有发生,事故总量依然很大,长期以来尚未得到切实有效遏制,已经严重影响到我国矿业可持续发展。

由于浅地表金属矿产资源消耗殆尽,当前我国约有三分之一的金属矿山已经或即将进入深部开采。随着开采深度的增加,深部开采必将遇到高应力、大变形等一系列地压问题,从而诱发岩爆灾害^[4]。为了防止或避免高应力下深部开采岩爆灾害的发生,多年来,我国科研人员针对深部开采岩爆发生机理、预防和治理等开展了一系列的研究工作,并取得了一定的成果,而针对复杂高应力环境下基于微震监测技术的深部开采岩爆灾害监测预警的研究工作还较少。目前,我国金属矿山大多采用声发射技术进行井下安全监测。但是,针对深部开采条件,声发射监测技术存在一定的局限性,不能很好地适应深部开采高应力、大变形和灾害突发性的要求。由于矿山岩爆灾害具有复杂性、多变性与突发性,而致灾载体基本属性的研究不成熟、灾害孕育过程与诱发机理不清楚、灾害预警及防控理论不完善,导致我国深部开采矿山岩爆灾害防控技术严重滞后。因此,研究深部开采岩爆灾害监测预警技术的关键在于:掌握微震事件诱发机理及岩爆灾害发生机

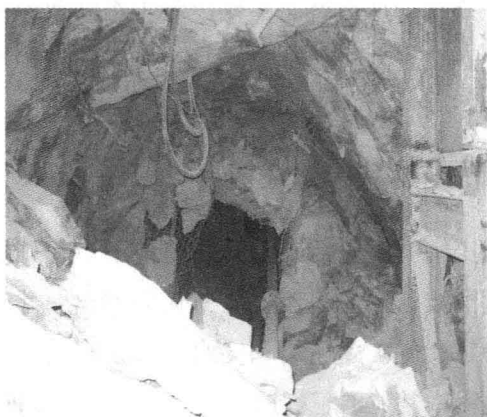
制,识别岩爆灾害预警关键点,提出基于微震监测技术的预警模型,掌握失稳岩体运动规律,给出有效的工程控制措施,从而达到安全高效回采的目的。

1.1 深井开采岩爆灾害概述

矿山动力灾害主要包括矿山开采与地下工程开挖活动中诱发的岩爆、高速滑坡、冲击地压、煤与瓦斯突出、井下泥石流、采空区大面积垮冒、尾矿库崩塌和突水等,是国内外矿山特别是深井矿山开采过程中常见的工程诱发灾害,如图 1-1 所示。Cook^[5]、Salamon^[6]、Ortlepp 和 Stacey^[7]将岩爆灾害定义为人工开挖导致岩体开挖面破坏诱发的微震事件。

矿产资源开发由浅向深发展是客观的必然趋势。1980 年我国煤矿平均开采深度为 288m,2000 年为 500m,20 年内开采深度增加为 212m,平均降深速度约为 10m/a。原煤炭部 1995 年初对 599 个国有重点煤矿开拓参数的调查结果显示,未来开采深度小于 400m 的浅矿井数目将大为减少,400~800m 的中深矿井开采数目将明显增加,800~1200m 的深井开采数目将成倍增加,并将出现一批超过 1200m 的特深矿井。我国埋藏在 600~1000m 以下的煤炭资源达 83%,伴随着全面大规模进入深部开采,地下采空区容积也必将不断增大,岩爆(冲击地压)灾害将逐步显现^[8~10]。

大量事实证明,随着开采深度和地下特大采空区的增加,深井开采岩爆灾害诱发的可能性和频度、强度将同步增强。开采工作面 and 巷道附近的岩爆灾害对采矿人员的生命和矿井安全构成很大威胁,强岩爆灾害还将造成工程损失、破坏人居环境和对公共安全构成威胁。因此,深入开展深井开采岩爆灾害研究和治理意义重大。



(a)



(b)

图 1-1 岩爆灾害

(a) 岩爆; (b) 井下突水

金属矿和煤矿岩爆（冲击地压）灾害是现阶段我国矿山动力灾害中的最主要部分^[11]。我国井工煤矿占 95%，平均采深达 400m 以上。与世界主要产煤国相比，我国煤矿地质构造复杂，矿井事故多发，平均百万吨死亡率在 6 左右，是美国的 145 倍，年死亡人数在 6000 人左右，是全球其他产煤国家死亡人数总和的 3

倍。与同属发展中国家的邻国印度（百万吨死亡率 0.42）相比，我国煤矿百万吨死亡率仍高出 13 倍。近年来，虽然关闭了数万个乡镇煤矿，但我国煤矿伤亡事故的严重局面仍然没有得到有效控制。矿井因采动引起的煤与瓦斯突出、突水、冲击地压、冒顶等事故仍然频繁发生，死亡超过 10 人的重大瓦斯爆炸和透水事故在地方煤矿和部分国有重点煤矿中时有发生。尤其近几年国有煤矿在装备投入不足（特别是安全检测和决策手段短缺）的情况下盲目扩大生产，发生了几十起伤亡数十人到数百人的重大恶性事故。自 2005 年以来，我国煤矿矿难发生的一个重要特点是：南部地下突水，北部瓦斯爆炸。国有大中型煤矿发生岩爆灾害事故所占的比重明显加大，“大矿大难”已显现为一种趋势。

近年来，我国非煤矿山每年事故死亡人数约占工矿商贸企业事故死亡总数的四分之一。而澳大利亚矿山每年的死亡人数不超过 20 人；美国矿山生产事故的每百人死亡率从 1920 年的 0.321 降低到 1996 年的 0.0296，2002 年美国非煤矿山生产事故的死亡人数为 40 人，由此可以看出我国矿山安全生产水平与发达国家之间存在巨大的差距。如图 1-2 所示为我国 2001 ~ 2009 年较大事故累计死亡人数比例统计。

随着我国人口的持续增长和国民经济的高速发展，人们对矿产资源的需求量也日益增加，复杂难采和深部开采诱发的安全问题日益突出，岩爆、煤与瓦斯突出、滑坡等重大的工程地质灾害和事故隐患骤增，严重制约着矿产资源合理的开发与利用。多年来尽管我国已经开展了大量矿山岩爆灾害机理和防治技术的研究，但目前我国矿山安全生产形势依然严峻，如果短期内不能在矿山岩爆灾害孕育机理、预警和控制方面有所突破，其势必成为制约矿山（特别是深井开采矿山）发展乃至我国国