

深部硬岩开采岩爆倾向性 分析与防治技术

SHENBU YINGYAN KAICAI YANBAO QINGXIANGXING
FENXI YU FANGZHI JISHU

苗胜军 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

深部硬岩开采岩爆倾向性 分析与防治技术

苗胜军 编著

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

岩爆是地下工程活动中由高地应力主导的一种动力灾害,给矿山深部开采带来巨大安全隐患。本书以河南灵宝地区金矿深部硬岩开采为背景,进行了岩爆倾向性分析及其防治技术的基础理论与实验研究。内容包括:深部开采岩爆灾害的研究概述,灵宝地区金矿深部硬岩开采工程地质环境,基于声发射特征的岩石损伤破坏规律研究,岩石加卸载过程中的能量演化机制,基于多种判据的岩爆倾向性分析,灵宝地区金矿深部采场及井巷工程能量分布与岩爆预测,以及岩爆灾害防控技术与措施。本书内容广泛,理论联系实际,既注重新理论的总结与分析,又强调了新技术、新方法的推广和应用。

本书可供矿业工程、水利水电工程、安全工程、隧道工程等专业的科研和工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深部硬岩开采岩爆倾向性分析与防治技术/苗胜军

编著. —北京:冶金工业出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-5024-7359-4

I. ①深… II. ①苗… III. ①硬岩矿山—矿山开采—岩爆—研究 IV. ①TD8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 246723 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 吕欣童

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7359-4

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

2016 年 8 月第 1 版, 2016 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12 印张; 232 千字; 181 页

54.00 元

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

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

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

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjcs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

经济高速持续发展与国家安全战略离不开能源和矿产资源的开发,随着资源需求量的增加,以及浅部资源的不断消耗,地下矿山陆续转入深部开采。深部开采工程岩体处于高应力、高井温、高岩溶水压和采矿扰动(即“三高一扰动”)的工程地质环境下,致灾机理复杂,采动灾害频发、突发。其中,岩爆作为采动灾害的一种剧烈表现形式,给矿山深部开采带来了巨大安全隐患。随着国内外矿山开采深度的不断加深,岩爆发生频率和强度也逐渐增大。但是,由于深部金属矿山开采所处的复杂地质力学环境,以及岩爆诱发因素的复杂性和岩爆发生的突然性及不确定性,目前对岩爆的发生机理、监测、预测及防控的基础理论研究还远远不足。

本书以河南灵宝地区金矿深部硬岩开采为背景,进行了岩爆倾向性分析及其防治技术的基础理论与实验研究,主要内容如下:

(1) 首先介绍了深部开采动力灾害及其复杂的工程地质力学环境,叙述了岩爆的分类、机理及国内外理论和技术研究现状与趋势;然后以灵宝地区金矿深部硬岩开采为例,对其工程地质及水文地质环境进行了调研,并对该地区金矿主要围岩类型开展了各种岩石力学实验,获取了相应的物理力学参数。

(2) 开展了单轴压缩、不同围压三轴压缩及单轴周期加卸载、不同围压周期加卸载作用下岩石的声发射试验,总结了不同荷载模式下岩石的声发射特征及岩石损伤破坏规律。基于岩石单轴和三轴刚性循环加卸载试验,分析了两种加卸载模式下岩石能量演化规律及分配规律,探讨了加卸载过程中岩石能量演化的围压效应以及卸围压试验下岩石的应力-应变演化机制。

(3) 理论结合实际,提出了岩爆的发生需同时具备两个必要条件:一是岩体具备存储高应变能的能力,即岩爆发生时能形成较强的冲击破坏性;二是开挖等工程活动引起局部区域高应变能聚集,即具备岩

爆发生所需能量环境。通过岩石强度脆性系数法、冲击能系数判据、线弹性能判据、岩性判别法、临界深度等多种岩爆预测判据准则,对灵宝地区金矿深部硬岩开采岩体储存高应变能的能力,即发生岩爆的倾向性,作出了定量的分析与评价。在此基础上,运用有限差分FLAC^{3D}软件进行数值模拟,定量计算出深部开采引起的采场围岩能量聚集与分布状况以及随开采过程的变化规律,依据岩体中聚集能量的大小及其分布状况与发展规律,借助地震学的知识,对深部未来开采过程中可能诱发岩爆的时间、地点和级别作出了预测。

(4) 针对金属矿山深部硬岩开采复杂的工程地质力学环境,提出了相应的岩爆监测、预测及预警技术,并从能量角度出发提出了基于能量孕育机制的岩爆防控措施。最后,基于大量实验测试成果,提出并探讨了一种适应于深部硬岩开采环境的岩爆防控措施。

本书为我国金属矿山深部的岩爆预控与安全开采提供了宝贵的经验,为有效解决类似条件矿山地压问题提供了示范作用。研究所取得的理论、方法与技术成果,可以推广应用于其他矿山,解决深部开采生产中的岩爆、矿震等技术难题,具有一定的学术价值。本书的研究成果已经在灵宝金源矿业股份有限公司得到应用,项目的实施为金源矿业股份有限公司深部安全开采提供了技术保障,具有重大的经济效益和社会效益。

本书的出版得到了国家自然科学基金(51574014)、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2015CB060200)的资助,并得到了灵宝金源矿业股份有限公司晋建平总经理、李宗彦总工程师等的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。本书参阅和借鉴了有关专家的文献与研究成果,在此对这些文献的作者致以崇高的敬意。另外,感谢北京科技大学郭奇峰和黄正均老师,以及硕士研究生王子木、梁明纯、郝欣、张邓、白玉冰、王浩、刘亚运,他们参与了本书的实验、模拟、文献查询、绘图、文字编校等工作,付出了辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者
2016年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 深部开采概述	1
1.1.1 深部开采动力灾害	1
1.1.2 深部开采的界定	2
1.1.3 深部开采工程地质环境	3
1.2 岩爆的分类及机理研究	4
1.2.1 岩爆的分类	4
1.2.2 岩爆机理研究	4
1.3 深部开采岩爆灾害研究趋势	6
2 灵宝地区金矿深部硬岩开采工程地质环境	8
2.1 灵宝地区金矿硬岩开采概况	8
2.2 区域地质概况	9
2.2.1 区域地质	9
2.2.2 工程地质	10
2.2.3 水文地质	11
2.2.4 灵宝地区金矿开采技术条件及相应问题	12
2.3 灵宝地区金矿主要围岩物理力学参数	12
3 基于声发射特征的岩石损伤破坏规律研究	14
3.1 实验概述	14
3.1.1 声发射系统	14
3.1.2 岩石试件的制备	15
3.1.3 降噪措施	15
3.2 声发射表征参数及分析	16
3.2.1 声发射信号的表征参数	16
3.2.2 声发射的 Kaiser 效应	17
3.3 单调加载条件下岩石的声发射特征	18

3.3.1	岩石单轴压缩的声发射特征	18
3.3.2	固定围压下岩石加载的声发射特征	28
3.3.3	单调加载条件下岩石的声发射能量五阶段规律	32
3.4	周期加卸载作用下岩石的声发射特性	32
3.4.1	单轴周期荷载作用下岩石的声发射特征	32
3.4.2	不同围压、周期荷载作用下的岩石声发射特征	38
3.5	不同荷载模式下岩石的损伤破坏规律	40
4	岩石加卸载过程中的能量演化机制	42
4.1	研究方法及其岩石试样制备	42
4.2	岩石单轴刚性循环加卸载压缩试验	43
4.2.1	片麻岩单轴循环加卸载试验曲线	43
4.2.2	辉绿岩单轴循环加卸载试验曲线	45
4.2.3	花岗岩单轴循环加卸载试验曲线	47
4.2.4	石英岩单轴循环加卸载试验曲线	49
4.3	岩石刚性三轴压缩循环加卸载试验	50
4.3.1	片麻岩三轴压缩循环加卸载试验曲线	50
4.3.2	辉绿岩三轴压缩循环加卸载试验曲线	52
4.3.3	花岗岩三轴压缩循环加卸载试验曲线	55
4.4	单轴循环加卸载下岩石能量演化与分配规律	57
4.4.1	单轴循环加卸载曲线及破坏形态	57
4.4.2	单轴循环加卸载过程中的岩石能量演化规律	60
4.4.3	单轴循环加卸载过程中的能量分配规律	62
4.5	三轴循环加卸载下岩石能量演化与分配规律	64
4.5.1	三轴循环加卸载曲线及破坏形态	64
4.5.2	三轴循环加卸载过程中岩石的能量演化规律	68
4.5.3	三轴循环加卸载过程中的能量分配规律	69
4.6	岩石能量演化的围压效应	71
4.6.1	岩石加卸载过程中的围压效应	71
4.6.2	岩石卸围压试验及其应力-应变演化机制	73
5	基于多种判据的岩爆倾向性分析	77
5.1	岩爆等级划分	77
5.2	岩爆倾向性的预测方法	77
5.2.1	现场实测法	77

5.2.2	数值模拟法	78
5.2.3	理论分析法	79
5.3	基于实验数据判据的深部岩体岩爆倾向性分析	79
5.3.1	岩石强度脆性系数法	79
5.3.2	冲击能系数判据	80
5.3.3	线弹性能 (W_e) 判据	81
5.3.4	岩性判别法	82
5.3.5	临界深度	83
5.4	基于地应力值判据的深部岩体岩爆倾向性分析	83
5.4.1	硐室围岩最大主应力	83
5.4.2	Russenses 判据	85
5.4.3	陶振宇判据	85
5.5	适于灵宝地区金矿深部开采的岩爆倾向性评价指标	86
6	灵宝地区金矿深部采场及井巷工程能量分布与岩爆预测	88
6.1	FLAC ^{3D} 有限差分数值计算软件	88
6.2	灵宝地区金矿主要开采方法	91
6.2.1	开采技术条件	91
6.2.2	留矿全面法	91
6.2.3	全面法	92
6.2.4	浅孔留矿法	93
6.2.5	浅孔房柱法	94
6.2.6	削壁充填法	95
6.3	模拟开采方案与计算模型	96
6.3.1	模拟开采方案	96
6.3.2	力学参数	96
6.3.3	边界条件	96
6.3.4	强度准则	96
6.3.5	数值计算模型	96
6.4	全面法开采数值模拟	98
6.4.1	应力分析	98
6.4.2	位移分析	98
6.4.3	能量分布与岩爆倾向分析	102
6.5	房柱法开采数值模拟	104
6.5.1	应力分析	104

6.5.2	位移分析	106
6.5.3	能量分布与岩爆倾向分析	108
6.6	水平巷道开挖数值模拟	108
6.6.1	模拟方案	108
6.6.2	模拟结果	109
6.6.3	应力分析	114
6.6.4	位移分析	116
6.6.5	能量分布与岩爆倾向分析	116
6.7	竖井开挖稳定性模拟	117
6.7.1	模拟方案	117
6.7.2	结果分析	117
6.8	岩爆倾向性说明	117
7	岩爆灾害防控技术与措施	120
7.1	岩爆的监测、预测及预警	120
7.1.1	岩爆灾害前兆信息特征	120
7.1.2	硬岩矿山深部开采岩爆监测、预测与预警	123
7.2	基于能量孕育机制的岩爆防控措施研究	132
7.2.1	基于能量角度的岩爆防控的总体思想	132
7.2.2	减小能量集中法	133
7.2.3	能量预释放、转移法	135
7.2.4	能量吸收法	137
7.2.5	深部硬岩开挖岩爆防治措施与管理规程	142
7.3	一种深部硬岩环境开采岩爆防控措施的探讨	146
7.3.1	酸性化学溶液作用下花岗岩力学特性与参数损伤效应	146
7.3.2	酸性化学溶液作用下花岗岩损伤时效特征与机理	157
7.3.3	深部硬岩环境开采预注化学溶液防控岩爆的探讨	172
	参考文献	174

1 绪 论

1.1 深部开采概述

1.1.1 深部开采动力灾害

我国是矿山采动灾害多发国家,2001年~2014年9月,全国非煤矿山累计发生事故19364起、死亡24472人;其中,地下矿山事故与死亡人数均超过70%。

经济高速持续发展与国家安全战略离不开能源和矿产资源的开发,随着资源需求量的增加,以及浅部资源的不断消耗,地下矿山陆续转入深部开采。据不完全统计,国外开采深度超千米金属矿山已有近百座。南非的TauTona金矿是目前世界上最深的矿山,开采深度超过4000m,而同一地区的Mponeng金矿未来计划拓展到4500m;印度的Kolar金矿开采深度已达3300m;加拿大的LaRonde金矿3号矿井已超过3100m深……与国外相比,国内金属矿山开采深度普遍较浅,但随着浅部资源的逐渐枯竭和深部资源勘探力度的加强,一批矿山已进入或将逐步进入深部开采行列。例如:辽宁红透山铜矿开采最深已达1280m;安徽冬瓜山铜矿主井已建至1220m;吉林夹皮沟金矿二段盲竖井已建至1390m,并将延深到1635m;河南崑鑫金矿竖井掘进深度已达1550m。此外,山东玲珑金矿、辽宁弓长岭铁矿、甘肃金川镍矿、云南会泽铅锌矿、广东凡口铅锌矿、湖北程潮铁矿等很快将进入千米深部开采,而未来10~15年,我国将有2/5的有色金属矿山开采深度达到或超过1000m。2009年,中国科学院公布了中国2050年科技发展路线图,提出了针对深部资源勘探开发的“中国地下四千米透明计划”。

深部开采工程岩体处于高应力、高井温、高岩溶水压和采矿扰动(即“三高一扰动”)的复杂力学环境,致灾机理复杂,采动灾害频发、突发。世界金属矿山深部开采有记录的第一次强岩爆1900年发生在印度Kolar金矿,释放能量达106MJ。南非是世界金属矿山采动灾害最严重的国家,深度开采初期,仅岩爆事故就从1908年的7起上升至1918年的233起;随着开采深度增加,灾害发生频次和强度不断增大,仅1975年南非的31个金矿就发生岩爆680起,造成73人死亡和4800个工班损失;1976年Welkom金矿发生了史上强度最大的金属矿山岩爆,震级 $ML=5.1$ 级,致使一栋六层楼房倒塌;此外,深部开采高地应力导致围岩流变性显著,Hartebeestfontein金矿巷道最大收缩率曾达500mm/月。近年来,

虽然拥有世界最先进的深部采矿技术、设备及动力灾害监控系统,但 TauTona 金矿每年仍有 5 人死于采动灾害,深部开采已成为南非最危险的工业之一。

我国的红透山铜矿 20 世纪 70 年代就有弱岩爆发生,进入深部开采,岩体动力灾害的频度和强度明显增大,1999 年 5 月和 6 月, -467m 水平(埋深 900m)发生两次较大规模岩爆,采场斜坡道和二、三平巷遭到破坏,巷道边壁呈薄片状弹射出来,最大片落厚度达 1m。冬瓜山铜矿井巷施工期间即发生 10 多起弱岩爆事件,2006 年 10 月, -775m 水平(埋深近千米)发生岩爆,巷道片帮和冒顶垮落近百米。金川镍矿深部开采受高地应力影响,新掘巷道最短 2~3d 即发生侧帮、顶板开裂、整体规格缩小的现象,最严重地段开掘仅一个月,巷道就由 4m 收敛至 2m。近年来,随着深部开采矿山的增多、深度增大,岩爆、岩体碎裂、围岩变形、冒落和垮塌、矿柱坍塌、井筒破裂、突水以及岩体失稳等一系列工程动力灾害事故时有发生,严重威胁生产人员的生命安全和工程设施的生产安全。

1.1.2 深部开采的界定

在采矿学的相关领域中,对于“深部”的界定,并没有一个明确、科学、量化的表述。对于不同的国家、地区,由于矿山所处的工程地质条件、开采技术水平以及相关的管理协调能力各不相同,因此在国际上对于“深部”的界定及其划分指标也各不相同。在我国,一般按开采的实际深度进行划分,例如:金属矿山将 1000~2000m 界定为深部开采;而煤矿相对较浅,800~1500m 即界定为深部开采。日本和俄罗斯等较早进行矿业开采的国家,将超过 600m 的深度界定为深部开采;而南非和加拿大等采矿业相对发达的国家和地区,则将 800~1000m 界定为深部开采。

由于按埋深的“深部”界定相对较为宽泛,在实际科研中有很多局限性,所以各国学者在对深部岩体进行研究时,以各自研究方向为基础,给出了对于“深部”更多的界定方式。他们描述“深部”的指标以及参数也相差较大,例如:Nikolaevshij 等人以高地应力作为指标,对深部进行界定;李化敏等经过研究提出了深井的概念,并给出了深部的一些相应的判别标准;李海燕和崔希民等分别从经济效益角度和安全开采目标两个方向入手,对深部进行了各自的界定,并定义了合理的经济深度以及安全深度;梁政国通过分析采场中岩体所处地应力水平、岩体弹性强度极限、岩体表现的异常动力程度和岩体的低温梯度表现出的异常现象,以及采用一次性支护对于岩体稳定性的适用程度等对深部开采的范围进行了界定。钱七虎通过对深埋隧洞围岩分区破裂化现象的一系列研究,定义了岩体的“深部”范围,将岩体开始出现非线性力学特征的深度定义为“深部”。此外,何满潮以深埋隧洞所处的特殊地质环境作为研究基础,将岩体开始出现浅部不具有的非线性动力特征所对应深度作为“深部”的界定,并在此基础上提出

了判定“深部”的经验公式：

$$H_{\text{erl}} = \frac{2C}{[1 - (1 + \alpha)\tan\varphi]\gamma} \quad (1.1)$$

式中 H_{erl} ——深部概念的上部深度；

C ——深部岩体的平均黏聚力；

γ ——上覆岩体的重度；

α ——隧洞开挖卸荷的围岩应力集中系数，取 0.5；

φ ——隧洞围岩体的内摩擦角。

1.1.3 深部开采工程地质环境

深部岩体地下工程区别于浅埋岩体工程的特殊之处就在于“三高一扰动”，所谓的“三高一扰动”是指“高地应力、高地温、高渗透压和强烈的开挖扰动”。

(1) 高地应力。处于深部环境中的岩体，不仅承受着上覆岩层自重产生的垂直应力，还承受着由于地质构造运动产生的构造应力，当深度达到数千米时，深部岩体中将产生巨大的原岩应力场。根据南非地应力测试结果，当深度达到 3500 ~ 5000m 时，地应力数值高达 95 ~ 135MPa，在如此高的应力环境下进行工程开挖，将面临巨大的挑战。

(2) 高地温。测量结果显示，越往岩体深处地温越高。地温通常以 30 ~ 50℃/km 的梯度递增。而有些局部区域地温梯度变化异常明显，比如断层附近或热导率高的地区，地温梯度有时高达 200℃/km。岩石内部温度变化 1℃ 一般可产生 0.4 ~ 0.5MPa 的地应力变化，因此，高温会对深部岩体的力学特性产生显著的影响。所以深部高地应力和高地温下岩体的流变和塑性失稳与浅部环境下具有巨大的差异。

(3) 高渗透压。深部原岩应力增大的同时渗透压也明显升高。经测量，在开采深度约 1000m 的地方，渗透压可高达 7MPa。随着渗透压的升高，深部岩体的孔隙水压力增大，并驱动裂隙扩展，使地下工程遭受突水灾害的概率增大，安全隐患增加。

(4) 强烈的开挖扰动。对于岩体工程而言，开挖卸荷引起的岩体扰动会造成岩体裂隙的萌生、扩展与贯通，弱化岩体的力学性能。进入深部开采后，在承受高地应力的同时，大多数巷道、硐室围岩要经受开挖或回采引起的强烈应力集中作用，这种作用能达到原岩应力的数倍，甚至十余倍，导致深部巷道、硐室围岩的稳定性远远低于浅部围岩。当深部岩体工程受到爆破等强烈的开挖扰动影响时，岩体内部原始结构面加速扩展、贯通，并不断生成新的裂隙，从而增大了岩爆等采动灾害发生的概率与强度。

1.2 岩爆的分类及机理研究

1.2.1 岩爆的分类

目前,国内外大部分学者主要依据岩体破坏形式、应力作用方式、弹性应变能储存与释放特征等方面对岩爆进行分类。

在影响岩爆的应力方式上,左文智、张齐桂等根据岩爆内部发生的机理把岩爆类型划分为水平构造应力型、垂直压力型和综合型三大类。根据地应力条件(地应力成因、最大主应力方向)不同,谭以安把岩爆分为水平、垂直和混合三种应力型与六个亚类。徐林生、王兰生等把岩爆分成自重、构造、变异和综合四种应力型,并细分为八个亚类。

在岩爆的破坏形式上,武警水电指挥部天生桥二级水电站岩爆课题组分别按照破裂程度和规模对岩爆进行划分。按破裂程度划分为破裂松弛型岩爆和爆脱型岩爆,按规模划分为零星岩爆、成片岩爆和连续岩爆。郭志等根据岩体破坏方式,将岩爆划分为爆裂弹射型岩爆、片状剥落型岩爆和洞壁垮塌型岩爆三大类。

此外,张倬元等从冲击地压的大小和发生部位两个方面对岩爆进行了分类,包括围岩表面突然产生的岩爆、断层伴随产生的岩爆、矿柱和其他大范围的围岩突然损伤破裂产生的岩爆。赵国斌则从岩爆的破坏形式和影响岩爆的应力条件两个方面将岩爆分成两大类,在破坏形式上将岩爆分成松弛型岩爆和爆脱型岩爆两种,在应力条件上则将岩爆分成构造、垂直和混合三种应力型岩爆。

1.2.2 岩爆机理研究

到目前为止,国内外研究学者并未彻底弄清岩爆产生的机制,也未在认识上达成一致,因为岩爆发生的整个过程比较复杂,影响因素较多,不仅与地形地貌、地层岩性、岩体的结构构造、地质构造、深部复杂地质作用等因素有关,而且还与地应力大小及其分布规律、作用特征,以及外界扰动、工程活动的方式方法等密切相关。

岩爆的破坏力十分巨大,各国学者对深部岩体工程岩爆开展了大量而深入的研究。1983年苏联学者提出了超1600m深井开采研究专题,同期联邦德国对1600m深的Hirschberg矿井进行了大型三维矿压模拟试验,而岩爆即是其中的重要研究内容之一;1985年加拿大启动了为期10年的两个深部开采研究计划:“Canadian - Ontario - Industry Rockburst Project (1985—1990)”和“Canadian Rockburst Research Program(1990—1995)”,对微震与岩爆统计预测的计算机模型、岩爆潜在区域的支护体系和岩爆危险评估等进行了研究;1998年南非耗资1.38亿美元启动了“Deep Mine”和“Future Mine”研究计划,开展包括深部开

采安全技术、地质构造、采场布置与采矿方法、岩爆控制、降温与通风、采场支护、超深竖井掘进、钢绳提升和无绳提升等技术的研究,旨在解决 3000 ~ 5000m 深度金矿安全经济开采面临的一些关键技术问题;21 世纪初美国在三个深度达 1650m 生产矿井,就深部开采岩爆引发的地震信号和天然地震及化爆与核爆信号的差异与辨别进行了研究。近年来,国外主要围绕深部开采动力灾害监测与控制技术进行了系列研究。

国内“九五”期间,中南大学开展了“深井硬岩矿山岩爆预测与控制研究”,提出了岩爆倾向性综合指标体系和测试方法,建立了硬岩矿山岩爆预测理论;同期,国家科技攻关重点项目“千米深矿井 300 万吨级矿山强化开采综合技术研究”对冬瓜山铜矿床深部开采方法、岩爆倾向、开采热源与地温规律、地热防治、尾矿充填等进行了前期探索性试验研究,该项目的设立开启了我国深部资源安全开采技术研究;“十五”期间,先后开展的国家科技攻关课题“深部矿床开采关键技术研究”和“复杂难采深部铜矿床安全高效开采关键技术研究”,对大规模深部开采地压活动规律、岩爆监测技术、岩爆倾向性预测,以及岩爆控制措施等进行了理论和技术研究;2004 年,国家自然科学基金委员会启动了国家自然科学基金重大项目“深部岩体力学基础研究与应用”,2010 年,科技部又启动了国家重点基础研究发展规划(973)项目“深部重大工程灾害的孕育演化机制与动态调控理论”和“深部硬岩爆破开挖诱导岩爆与破裂诱变机理”,旨在建立起深部岩体力学理论与技术框架,为我国深部资源安全开采提供科学依据。

目前对岩爆机理的研究主要包括以下四个方面:

(1) 强度理论。它是岩石出现脆性破坏时的理论判断依据,即当开采进入深部阶段时,认为深部巷道和采场围岩存在并出现高应力集中现象,随着应力集中增大,当达到岩石强度极限时,围岩发生突发性破坏。目前摩尔-库仑强度准则和霍克-布朗强度准则研究在岩爆机理方面已经得到广泛的认可和应用。

(2) 能量理论。目前库克等人提出的能量理论已得到主流认可。库克等认为:随着开采不断加深,范围不断扩大,岩体-围岩系统的力学平衡状态遭到破坏,当其所释放的能量高于岩石破坏所需要的能量时,多余的能量致使岩石出现岩爆等动力冲击现象。

(3) 刚度理论。Bieniawski 和 Cook 在 20 世纪 60 年代发现,采用常规压力试验机进行单轴压缩试验时,试样破坏现象比较明显剧烈;而采用刚性试验机时,试样裂隙发展及破坏现象则比较平缓,而且刚性试验可以得到应力-应变全过程曲线。他们认为正是由于试样的刚度高于试验机的刚度才致使试样出现猛烈破坏。结合强度理论与实际工程,Black 提出矿山发生岩爆的必要条件就是矿山结构的刚度要大于矿山所负荷的刚度。而佩图霍夫则指出矿山结构的刚度是指峰后应力-应变曲线阶段的刚度。

(4) 岩爆倾向性理论。国内外很多学者采用岩石物理力学性质对应的一些指标来衡量岩石的岩爆倾向性,而岩石的物理力学性质本身就体现了岩爆发生的岩石内在条件。目前岩爆倾向性判据指标很多,主要包括弹性应变能指数(PES)、岩石的脆性系数(B)、切向应力判据指标(T_s)、RQD指标等。

近年来,国内谢和平、唐春安、潘岳、徐曾和、费鸿禄、潘一山、傅鹤林和李玉等学者将突变理论、分叉理论、耗散结构理论、混沌理论等应用于岩石变形的局部化问题以及岩石力学系统的稳定性问题研究,推动了我国岩爆及岩石失稳理论的发展。此外,陶振宇等对岩爆的物理过程、形成条件和判别准则等进行了相关的研究。谢和平利用分形几何学研究了岩爆发生的机制及其预测预报方法。谭以安结合模糊数学判断选择方法提出了岩爆预测的模糊数学法。为了建立岩爆的力学模型,潘一山等提出了岩爆的稳定性动力准则、岩爆的突变理论模型。周瑞忠等探讨了岩爆的断裂力学机理,建立了岩爆的损伤断裂模型。这些学者的研究成果为岩爆机理的研究指明了方向,奠定了理论基础。

1.3 深部开采岩爆灾害研究趋势

随着国内外矿山开采深度的不断加深,岩爆发生频率也逐渐增大。但是,由于深部硬岩开采所处的复杂地质力学环境,以及岩爆发生机理与诱发因素的复杂性和岩爆发生的突然性及不确定性,目前对岩爆的预测及防控技术的研究还远远不足,应该在以下几个方面继续开展更加深入的研究:

(1) 地应力测试技术。根据目前地应力测试技术发展水平,可以从两方面对地应力测试技术进行深入的研究。一方面,提高地应力测试设备的精度,以获得更加准确的地应力数据;另一方面,研究新的地应力测试方法,以降低测试成本,增加测试点,最终提升地应力反演精度。

(2) 岩爆发生机理。目前对岩爆发生机理的研究及成果基本上还停留在“假说”和“经验”两个层面上,尚未掌握岩爆发生机理的本质细节,相关研究进展也比较迟缓。在岩爆的预测预警方面虽然进行了大量实践性的探索和研究,并获得了许多经验,但是尚未形成系统的理论,接下来还应该继续深入系统地研究岩爆的发生机理。

(3) 岩爆预测。目前国内外岩爆预测的主要方法包括:岩爆倾向性判据、现场监测和结合数学方法的综合预测。1) 岩爆倾向性判据。岩爆倾向性判据很多,但每种判据都仅仅针对岩爆某一具体指标进行计算;实际上岩石处在非常复杂的地质环境中,受多种因素影响,单一的评价指标难以全面、准确地预测岩爆发生的可能性,甚至有时候,不同的评价指标预测的结果又可能是相互矛盾的,所以探索适应于多种指标的岩爆倾向性判据是未来研究的主要方向。2) 现场监测。现场监测成果较实验室岩石力学测试数据更加贴近实际情况,具有针对性

强、预测较准确等优点。但现场施工环境复杂,监测费用较高,从而造成监测点布设不具全面性,监测数据信息少,受环境影响大,无法在施工前进行预报等缺点。所以,亟须寻找一种低成本、高效率的现场监测方法。3) 综合预测。结合数学方法的综合预测法是岩爆预测的一个研究方向,但各种方法的准确性及适应性还需要不断地研究分析和验证。

针对深部开采岩爆灾害理论研究趋势,本书拟以河南省灵宝地区金矿深部硬岩开采为例,开展岩爆倾向性分析及其防治技术基础理论与实验研究。

2 灵宝地区金矿深部硬岩 开采工程地质环境

2.1 灵宝地区金矿硬岩开采概况

灵宝地区金矿床主要位于灵宝市西南,属阳平镇管辖,北距陇海铁路阌乡车站 15km,东距灵宝和三门峡站分别为 33km 和 70km,交通十分方便。地理坐标:北纬 $34^{\circ}27'35'' \sim 34^{\circ}28'34''$;东经 $110^{\circ}36'29'' \sim 110^{\circ}38'1''$ 。

灵宝地区金矿床位于小秦岭山脉北麓山前基岩与黄土层的交接带上,地势南高北低,南部最高山峰海拔 2400m,北侧河床最低高程 640m,高程差 1760m,属浅切割的低中山区。大湖河与小湖河分别自南向北流经该区域,在五坡寨村汇合,到张村北注入黄河,为常年性水流。区域内属中温带亚干旱地区大陆性气候,据华山气象站三门峡水文站资料,春季气候温和,但少雨水;冬季和早春多风,风向以西北为主,风力一般 2~4 级,最大达 8~9 级;夏季炎热,气温一般 $15 \sim 30^{\circ}\text{C}$,最高达 42.7°C ;夏秋多暴雨,降雨多集中在 7~9 月,晚秋多连阴雨;冬季寒冷干燥、多风。12 月初开始降雪,12 月至来年 3 月为冰冻期,冻土最大深度达 32cm。冬季气温一般为 10°C 至零下 5°C ,最低零下 16.2°C 。年平均降水量为 606.7mm,最大日降水量 84.9mm,年平均蒸发量 1629.9mm。

灵宝地区金矿床位处西安—怀来地震带的汾渭强震带上。史料记载,公元前 413 年至 1958 年间总共发生地震 103 次,其中烈度在 $6^{\circ} \sim 9^{\circ}$ 的破坏性地震有 31 次。据运城、渭南、洛阳三地区地震办公室编纂的《晋、豫、陕联防区地震目录》记载,公元 1556 年 1 月 23 日陕西省华县发生 8 级地震,烈度 11 度,灵宝属极震区。自公元 1829 年至今的 187 年间,区域内发生的地震均在 5 级以下;20 世纪 70 年代以来多在 3 级以下。近代虽未发生强震,但因具有强震带背景,在进行矿山设计及建设过程中应充分考虑并采取必要的防震措施,以确保矿山生产的安全。

灵宝地区农业较发达,盛产小麦、玉米、豆类、棉花、苹果、大枣等作物,其中后三者驰名全国。地方工业以采选金矿为主,其他尚有机械、化肥、水泥等。区内有小秦岭金矿、金碛盆金矿、文峪金矿等一批大型国有黄金采选骨干企业。自 20 世纪 80 年代以来,地方性黄金企业如雨后春笋般蓬勃发展,一批市县联营的黄金矿山如大湖、灵湖、抢马、樊岔、金渠、桐沟、安底、苍珠峪等金矿相继建成投产,乡镇办矿山更是不计其数。目前,灵宝市黄金年产量高达 20 万两。