

鄂西磷矿岩爆现状及治理措施研究^①

柴修伟¹, 盛益明¹, 张龙^{1,2}

(1. 武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北武汉 430073; 2. 黄石市自然资源与规划局开发区铁山区分局, 湖北黄石 435115)

摘要: 针对鄂西磷矿, 在深入调查苏家坡磷矿、麻坪磷矿、桃郁溪磷矿等矿山地质特征及岩爆现象的基础上, 分析了鄂西磷矿岩爆灾害主要发生部位、埋深及岩性等影响因素, 提出了适合鄂西磷矿岩爆的治理措施; 对鄂西地下磷矿进行地应力测试, 根据地应力测试结果, 优化回采顺序, 减少应力集中区域, 并在局部区域开展卸压和支护措施, 保障井下安全开采。

关键词: 鄂西磷矿; 岩爆; 治理措施; 深部开采; 卸压

中图分类号: TD871

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.002

文章编号: 0253-6099(2024)02-0005-03

Status and Control Measures of Rock Burst in Phosphate Mines in Western Hubei

CHAI Xiuwei¹, SHENG Yiming¹, ZHANG Long^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, Hubei, China; 2. Tieshan District Branch of Huangshi Natural Resources and Planning Bureau, Huangshi 435115, Hubei, China)

Abstract: Based on the in-depth investigation of the geological characteristics of the phosphate mines in western Hubei, including Sujiapo Phosphate Mine, Maping Phosphate Mine and Taoyuxi Phosphate Mine, rock burst phenomena were analyzed in terms of influencing factors of occurrence position, buried depth and lithology. The appropriate control measures are proposed for rock burst in those phosphate mines in western Hubei. In-situ stress of underground phosphate rock in western Hubei was tested. Based on the obtained results, the mining sequence was optimized to avoid mining operation in the stress concentration area as much as possible, and pressure relief and support measures were taken in local areas to ensure safe underground mining.

Key words: phosphate mines in western Hubei; rock burst; control measures; deep mining; pressure relief

由于浅层矿产资源的逐步匮乏, 矿山企业逐步转向深部开采, 岩爆现象呈频发趋势, 严重影响了人员安全及工程进度, 研究岩爆治理措施已成为地下工程的重要课题^[1-2]。

针对岩爆产生的原因与机制, 岩爆预防的基本思路包括降低应力集中程度和改变岩体物理力学性能^[3]。降低应力集中程度的方法主要是按照主应力的方向布置巷道走向^[4], 这就要求对矿山进行地应力测试; 也可通过孔槽卸压法、钻眼爆破法^[5]达到卸压效果。高压注水^[6]可改变岩体的物理力学性能, 减弱岩体聚集应变能。对于不同烈度的岩爆, 一般需采取

不同的加固措施^[7], 主要包括锚杆、锚网及喷射混凝土等。

目前, 岩爆治理措施包括加固围岩、改善围岩受力状况、改进施工方法^[8]等。本文针对鄂西磷矿的地质特征及岩爆现状, 研究制定鄂西磷矿岩爆的治理措施。

1 鄂西磷矿地质特征

地质特征是导致岩爆发生的重要因素。岩爆与断层、褶皱及岩石类型密切相关^[9]。对鄂西地区磷矿断层及顶底板岩性进行了总结, 如表 1 所示。

① 收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 2021年湖北省安全生产专项资金科技项目(SJZX20211004); 武汉工程大学科研启动基金项目(23QD82)

作者简介: 柴修伟(1980—), 男, 安徽亳州人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为爆破理论与技术、岩土工程与安全监测技术。
E-mail: 342650018@qq.com

通信作者: 张龙(1993—), 男, 湖北仙桃人, 博士, 讲师, 主要研究方向为深部矿山安全开采理论与技术。E-mail: 22109201@wit.edu.cn

表1 鄂西磷矿地质特征

序号	矿区名称	断层情况	顶底板岩性
1	苏家坡磷矿	矿区内未发现大的断裂构造,构造复杂程度属简单类型	矿层顶板为白云岩,矿层底板为含钾页岩
2	麻坪磷矿	矿段内主要断裂构造为 F_1, F_2 断层规模小,对磷矿层影响不大	矿层直接顶板为含炭泥质白云岩,底板为上白云岩
3	桃郁溪磷矿	区内构造较简单,地表尚未发现较大断层和褶皱	主矿层顶板为粉晶白云岩,底板为含磷泥页岩
4	响水槽磷矿	F_{12} 断层规模较大,对矿层影响较大,破碎带零乱	顶板为白云岩,底板为含钾页岩
5	鱼林溪磷矿	区内褶皱及断裂构造不发育,对矿层的主体稳定性影响较小	矿层顶板为硅质岩、硅质白云岩,底板为含钾泥页岩
6	龙蟒磷矿	F_1 为区域性断层,破坏了矿层的连续性; F_8 逆断层倾角 $36^\circ \sim 70^\circ$,对块段内磷矿层影响较大	Ph_3 矿层底板为磷块岩,顶板为白云岩; Ph_1 矿层底板为含磷泥页岩,顶板为磷块岩
7	武山磷矿	探明有 NE 向和近 EW 向两组主要断层,对矿层影响较大	顶板为白云岩或含磷白云岩;矿层底板为钙质页岩

断层错动将触发断裂滑移型岩爆,断裂构造带附近部分区域构造应力可能更高,易引发岩爆^[10]。结合现场岩爆情况,在断层、褶皱带附近的区域,岩爆发生情况较多。鄂西磷矿矿层顶板多为白云岩,属于脆性岩石,且完整性较好,易储存弹性应变能。从现场调查情况来看,岩爆大多发生在褶皱构造的坚硬岩石中。

2 鄂西磷矿岩爆现状分析

大多工程实例表明,造成岩爆的因素主要包括地质特征、矿物性质、应力大小和方向以及开挖几何形状^[11]。

2.1 鄂西磷矿岩爆现状

在总结鄂西磷矿岩爆地质特征的基础上,系统分

析了鄂西磷矿岩爆灾害发生的位置、岩爆区域埋深、岩性条件及岩爆现象,详见表2。

2.2 鄂西磷矿岩爆现象分类

鄂西岩爆现象大致分为两类:一类是岩爆程度较为严重,围岩表面岩体突然冒落,对施工人员安全威胁较大;另一类是岩爆程度轻微,包括小范围片帮、塌落现象,伴随着埋深和地压增大、采空区变多,初步判断各矿岩爆风险会增大。

岩爆主要存在于有褶皱构造影响的工作面、巷道掌子面及两侧帮壁与顶板接触处、掘进区域巷道工作面及采场顶板和矿柱结合处、基建期的开拓巷道和首采等区域。

表2 鄂西磷矿岩爆灾害调查表

序号	单位	岩爆发生位置	岩爆区域埋深/m	岩性条件	岩爆现象
1	苏家坡磷矿	白云岩顶板	280,380	白云岩	炮后2 h内,局部有5~10 cm的岩片弹出,弹射距离2 m以上
2	麻坪磷矿	300,200中段	450,550	泥质白云岩	顶板剥落,呈薄片状
3	桃郁溪磷矿	勘探前期巷道	400	泥质白云岩	在勘探前期,烈度较小,逐步减小,至稳定
4	响水槽磷矿	开拓巷道;首采区域	200	上白云岩	主要集中在开拓巷道和首采区域,发出类似鞭炮声
5	鱼林溪磷矿	斜坡道;下山、掘进巷道	600~1000	泥质白云岩;页岩;上白云岩	主要发生在井巷基建期,内部会发出清脆的“噼、啪”异响,持续时间长
6	楚磷磷矿	开拓巷道掘进	176	磷块岩;白云岩	岩体内部偶尔会发出清脆的“噼”“啪”异响
7	武山磷矿	开拓巷道掘进;工作面	270	白云岩	有“啪、啪”“滋滋”声及清脆的爆竹声,岩体具有突发冒落现象

3 鄂西磷矿岩爆治理措施研究

根据鄂西磷矿地质特征及岩爆现象,从回采顺序优化、卸压措施及支护措施三个方面,对鄂西磷矿岩爆治理措施进行分析和总结。

3.1 回采顺序优化

地应力是影响岩爆的重要因素,处于高地应力的岩石更容易发生岩爆^[12]。因此,地应力测量是避免应力集中、确定回采顺序的基本工作。采用中科院武汉岩土所自主研发的水压致裂地应力测量系统(如图1所示)测试鄂西磷矿地应力,并根据 GB/T 50218—2014

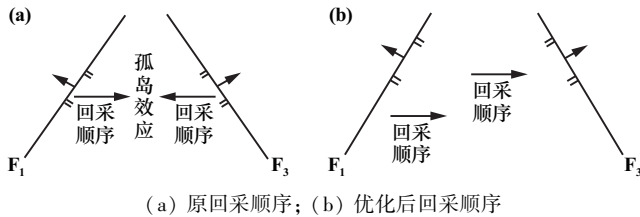
《工程岩体分级标准》^[13]判断是否为高地应力区,还可结合测试结果,沿最大水平主应力方向布置巷道走向,



图1 地应力测量系统

有效减少水平主应力对巷道围岩稳定性的不利影响^[14]。目前,地应力测试已在鄂西东达晒旗河磷矿完成,水压致裂法测得最大水平主应力方向为近东西方向,下一步计划将巷道布置在这一方向上。

根据地应力测量结果,对断层附近回采顺序进行优化,避免产生“孤岛效应”。回采顺序由原来的靠近 F_1 、 F_3 断层附近向中部推进改为由靠近 F_1 断层方向向 F_3 断层方向沿走向推进,如图2所示。



(a) 原回采顺序; (b) 优化后回采顺序

图2 优化前后回采顺序对比

在断层附近回采过程中,随着开采的进行,高应力集中区不断向深处推移,使得回采过程一直处于低应力范围内^[15],有效降低了在采矿范围内发生岩爆灾害的风险。

在断层附近采用此方法开采,因岩爆引起的岩石飞溅现象得以明显缓解,作业人员的安全性大幅增加,2019年至今未发生因岩爆导致的人员伤害。鄂西磷矿瓦屋IV矿段试验结果表明,回采率大幅提升,试验前预计回采率45%~50%,试验后回采率可到60%以上,该区域总储量300万吨(27%以上),预计可增加矿石产量22.5万吨。

3.2 卸压措施

3.2.1 钻孔卸压

钻孔卸压防治岩爆的本质是改变开挖后围岩区域结构,提前释放岩体内部的弹性应变能^[16]。在采区矿体中进行钻机钻孔,使岩体的应力集中位置向围岩深处转移,还可利用卸压孔少量装药,进行松动爆破。

3.2.2 采场卸压

巷道开挖过程中的岩爆主要发生在巷道顶板含白云岩较多的矿体,可通过改变原来开挖设计的巷道矩形断面为圆拱形断面(如图3所示),改变巷道应力状况,实现采场卸压。

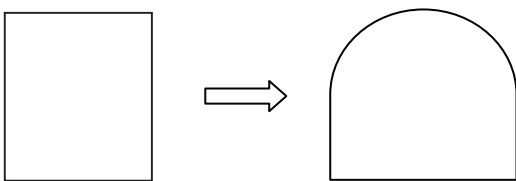


图3 巷道开挖断面示意图

3.2.3 喷水卸压

鄂西磷矿岩爆区域的岩性多为白云岩,而硅质白云岩具有很强的吸水性,对其进行喷水处理,并在凿岩、出矿前进行冲洗顶帮,通过岩石水软化效应可降低岩体储存应变能的能力,降低发生岩爆的可能。

在鄂西瓦屋矿区IV矿段进行了为期3个月的喷水卸压试验,发现岩爆总次数与同期相比明显下降,岩爆频次下降了82%,抛掷现象下降了94%。

3.3 支护措施

柔性支护系统主要包括锚杆、锚网及喷射混凝土等方法,是防治岩爆灾害较为合适的支护类型。除传统的岩爆支护措施,鄂西磷矿发展了适合其自身岩爆特点的支护措施。

1) 顶板岩爆防治措施——便携式单体支柱与柔性网联合支护。柔性网紧贴岩面,防爆破损坏,尺寸可调。便捷式单体支柱简单轻便、方便柔性网施工。

便携式单体液压支柱能够快速完成临时支护,降低在岩爆顶板下的暴露时间。柔性网片能够紧贴不平整的岩面,将岩爆顶板全面隔离,避免了岩爆产生的岩块弹射伤人。通过锚杆将网片锚固于顶板上,长时间隔离巷道开挖后的岩爆危害。

2) 帮壁岩爆防治措施——便携式施工防护网与锚网联合支护隔离。对于连带矿柱一同产生岩爆的掌子面,采用便携式施工防护网与锚网联合支护隔离措施,在完成防护网架设后,可确保岩爆弹射碎片不会造成人员及设备损伤。

两种支护措施均已在鄂西苏家坡磷矿应用,在巷道开挖后,根据岩爆烈度情况,采取刚性、柔性支护相结合的方式,对巷道进行支护。

4 结 论

根据鄂西岩爆现状分析,提出了鄂西岩爆治理措施,得出以下结论:

1) 对鄂西磷矿地质特征进行总结分析,发现各岩爆矿山基本都存在断层结构,且矿层顶板多为白云岩,在这两个因素的共同影响下,断层、褶皱带附近的区域岩爆发生情况较多。

2) 鄂西磷矿岩爆主要存在于有褶皱构造影响的工作面、采场顶板和矿柱结合处、平巷与斜坡道交汇三角区域、基建期的开拓巷道和首采等区域。伴随着埋深和地压增大、采空区增多,初步判断各矿岩爆风险会增大。

3) 从回采顺序优化、卸压措施及支护措施等方面,提出地应力测量后的巷道走向布置、断层附近回采顺

(下转第12页)

从表2可见,预测模型准确度为80%,该模型对边坡稳定性的分类预测有较高的实际应用价值,能较为准确地通过边坡地质条件等因素综合判断边坡稳定状态。

4 结 论

通过混沌粒子群优化了SVM支持向量机、DT决策树、KNN邻近、BP神经网络4种分类算法模型,并通过4种算法模型预测了露天矿边坡的稳定状态,探究了6项边坡参数与边坡稳定性之间的非线性关联,并结合实例进行了验证,证实混沌粒子群优化机器学习模型预测准确度高,有实际工程应用价值。

参考文献:

- [1] ZAN W B, ZHANG W J, WANG N, et al. Stability analysis of complex terrain slope based on multi-source point cloud fusion[J]. *Journal of Mountain Science*, 2022,19:2703-2714.
- [2] ZHOU J, LI E, YANG S, et al. Slope stability prediction for circular mode failure using gradient boosting machine approach based on an updated database of case histories[J]. *Safety Science*, 2019, 118: 505-518.
- [3] 李佳伦,张志贵,李 斌,等. 露天矿采场边坡稳定性概率分析[J]. *化工矿物与加工*, 2022,51(9):15-18.
- [4] 赵 亮. 多岩性分布的露天采场边坡稳定性分析[J]. *西部探矿工程*, 2022,34(9):10-12.
- [5] Chakraborty A, Goswami D. Three-dimensional (3D) slope stability

analysis using stability charts[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018,15(5):642-649.

- [6] Ahour M, Hataf N, Azar E. A mathematical model based on artificial neural networks to predict the stability of rock slopes using the generalized hoek-brown failure criterion[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019,38(1):587-604.
- [7] 肖支才,龙玉峰,郭家豪,等. 基于非线性变因子的粒子群算法[J]. *电子测量技术*, 2020,43(5):67-70.
- [8] 刘 卓,韩凯越,聂 彬,等. 基于混沌粒子群优化算法的NOMA功率分配研究[J]. *电子测量技术*, 2022,45(16):159-163.
- [9] 周立栋. 基于改进混沌粒子群算法的多源微网优化运行模型[D]. 北京:华北电力大学, 2018.
- [10] 黄 华. 基于DT和SVM算法的科技文献分类研究[C]//中国武汉决策信息研究开发中心,决策与信息杂志社,北京大学经济管理学院.“决策论坛——区域发展与公共政策研究学术研讨会”论文集(上), 2016:125.
- [11] 毋雪雁,王水花,张煜东. K最近邻算法理论与应用综述[J]. *计算机工程与应用*, 2017,53(21):1-7.
- [12] 陈奂良,李常锁,高 帅,等. 基于遗传算法优化BP神经网络的岩溶泉水位预测研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022,33(4): 50-57.
- [13] Kim J R, Salgado, YU H S. Limit analysis of soil slopes subjected to pore-water pressures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999,125(1):49-58.
- [14] 范永东. 模型选择中的交叉验证方法综述[D]. 太原:山西大学, 2013.

引用本文: 赵国彦,邹景煜,王 猛. 基于混沌粒子群改进支持向量机对露天矿边坡稳定性的分类预测[J]. *矿冶工程*, 2024,44(2):8-12.

(上接第7页)

序优化及改变断面形状等措施。根据鄂西磷矿岩爆发生特点,开展适合其自身岩爆特点的支护措施,降低岩爆对从业人员的安全风险。并通过现场试验验证了支护措施的科学性和可行性。

参考文献:

- [1] 李彤彤,王 玺,刘焕新,等. 基于组合赋权的T-FME岩爆倾向性预测模型研究及应用[J]. *黄金科学技术*, 2020,28(4):565-574.
- [2] 彭振斌,方建勤,颜荣贵,等. 硬岩矿山深井岩爆预测方法的研究[J]. *矿冶工程*, 2003,23(5):8-11.
- [3] 窦林名,何学秋. 冲击矿压防治理论与技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2001.
- [4] 熊祖强,贺怀建. 深井矿山硬岩巷道岩爆治理方案研究[J]. *化工矿物与加工*, 2006,35(9):25-27.
- [5] 刘美山,吴新霞,丁秀丽,等. 弱能量爆破技术在地下隧洞工程岩爆治理中的应用试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013,32(增刊2): 3675-3680.
- [6] 吝曼卿,柯晓苏,张电吉,等. 基于“协同开采”理念的深部磷矿岩爆防控研究[J]. *金属矿山*, 2020,55(5):158-163.
- [7] 王维庆. 苏家坡磷矿岩爆倾向性评价及岩爆灾害处置方法研究[D].

武汉:武汉工程大学, 2022.

- [8] 贾月卿. 改建铁路成昆线老鼻山隧道岩爆倾向性预测分析与防治技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- [9] 樊玉峰,肖晓春,丁 鑫,等. 岩煤结构静动组合加载试验系统研制及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2023,52(3):502-512.
- [10] 张清怡. 地下磷矿岩爆灾害风险管控体系研究[D]. 武汉:武汉工程大学, 2022.
- [11] Keneti A, Sainsbury B A. Review of published rock burst events and their contributing factors[J]. *Engineering Geology*, 2018(1):361-373.
- [12] 刘 栋,李夕兵,刘志祥,等. 群采空区下浅部岩爆诱发机制研究[J]. *矿冶工程*, 2016,36(2):23-27.
- [13] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- [14] 周亚博,柏 杨,赵学平,等. 阿尔哈达铅锌矿深部地应力分布特征及其应用[J]. *矿业研究与开发*, 2022,42(6):85-89.
- [15] 裴 峰. 纱岭金矿深部地层岩体力学性能与深竖井围岩稳定性分析及控制[D]. 北京:北京科技大学, 2020.
- [16] 吝曼卿,孙郡阳,张继豹,等. 地下磷矿山岩爆研究进展及防控措施[J]. *化工矿物与加工*, 2023,52(4):16-21.

引用本文: 柴修伟,盛益明,张 龙. 鄂西磷矿岩爆现状及治理措施研究[J]. *矿冶工程*, 2024,44(2):5-7.