

文章编号: 1674-2869(2017)06-0571-05

# 磷块岩地下开采的岩爆机理及处理对策

张电吉<sup>1</sup>, 杨丹丹<sup>1</sup>, 吝曼卿<sup>1,2</sup>, 习本军<sup>2</sup>, 倪小山<sup>2</sup>, 张卫中<sup>1,2</sup>, 潘登<sup>1</sup>

1. 武汉工程大学磷工程中心, 湖北 武汉 430074;

2. 湖北兴发化工集团股份有限公司, 湖北 宜昌 443700

**摘要:** 中国某磷块岩矿床地下开采过程中, 采场顶板及巷道有明显的岩爆现象发生. 通过现场岩爆的实地调查, 了解现场岩爆的发生频度及发生规律, 在岩爆区域现场采样进行室内微观实验分析, 发现磷块岩宏观力学行为很大程度上符合其微观结构构造和矿物组成的微观力学行为, 微观裂纹试验发现磷块岩晶界弱面为白云石与胶磷矿之间的接触晶界. 现场研究发现, 岩爆多发生在爆破后环境干燥的区域, 且多发矿段为白云石含量较高的岩层. 提出了岩爆的产生判据, 并给出了岩爆的防治对策.

**关键词:** 磷块岩; 高应力; 采场顶板; 微观裂纹; 岩爆控制

中图分类号: TD803 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2017.06.008

## Rock Burst Mechanism and Treatment Strategy of Phosphorite Underground Mining

ZHANG Dianji<sup>1</sup>, YANG Dandan<sup>1</sup>, LIN Manqing<sup>1,2</sup>, XI Benjun<sup>2</sup>, NI Xiaoshan<sup>2</sup>,  
ZHANG Weizhong<sup>1,2</sup>, PAN Deng<sup>1</sup>

1. Phosphorous Engineering Center, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei XINGFA Chemicals Group Co., LTD, Yichang 443700, China

**Abstract:** Remarkable rock burst occurred in the roof and roadway of a stope during underground mining phosphate rock deposits in China. The occurrence frequency and regularity of rock burst at site were investigated through the field investigation of site rock burst. Site sampling and the microscopic experimental were carried out in the area of rock burst. It was found that to a large extent, the macro mechanical behavior of phosphorite was in good agreement with micro-structure configuration and micro-mechanical behavior of mineral composition. The microscopic crack test demonstrated that the weak boundary of the phosphate rock grain boundary was the interface between dolomite and phosphate rock. The site-investigation found that rock burst occurred mostly in the area where the environment is dry after blasting and the dolomite content is high in rock strata. The criterion and the prevention strategies of rock-burst were finally proposed.

**Keywords:** phosphorite; high in-situ stress; stope roof; micro-crack; rock-burst control

在采矿工程中, 由于开采深度的增加, 不可避免的会出现高地应力、断层等复杂地质环境<sup>[1]</sup>. 此外, 深部岩体在地下高地应力作用下进行开挖扰动时, 围岩应力受开挖扰动影响而重新分布, 随着

采空区暴露面积的逐渐增加, 受开挖卸荷和复杂地质构造作用, 使坚硬脆性岩体发生爆裂、松脱、剥离、弹射乃至抛射性破坏等岩爆现象<sup>[2-3]</sup>. 岩爆的发生受多因素影响<sup>[4]</sup>, 严重威胁着矿下的开采安

收稿日期: 2017-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(51474159, 51504167)

作者简介: 张电吉, 博士, 教授, 博士研究生导师. E-mail: dianjizhang@wit.edu.cn

引文格式: 张电吉, 杨丹丹, 吝曼卿, 等. 磷块岩地下开采的岩爆机理及处理对策[J]. 武汉工程大学学报, 2017, 39(6): 571-575.

ZHANG D J, YANG D D, LING M Q, et al. Rock burst mechanism and treatment measures of phosphorite underground mining[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2017, 39(6): 571-575.

全,将会在矿山生产中造成重大的安全事故和较大的经济损失。

笔者以宜昌某磷矿工程的岩爆特点为基础,通过详细记录和统计矿山开拓巷道和采场的岩爆现象,在岩爆区域现场采样进行室内微观实验分析,寻找磷块岩宏观力学行为与其微观结构构造和矿物组成的微观力学的关系,结合矿山岩爆发生的基本规律和矿山的地质环境,分析引起该矿山岩爆发生的主要原因,并提出了岩爆的防治对策与措施。

## 1 工程概况

所研究的矿段内磷矿层赋存于震旦系上统陡山沱组第二段,为沉积型磷矿岩(胶磷矿),开采深度为+112.17 m~+1 021.97 m标高,矿层连续稳定,呈缓倾斜且向东南倾,倾角为 $17^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。工业矿床主要是 $\text{Ph}_3$ 磷矿层,矿层结构单一,平均厚度为5.46 m。

矿区顶板围岩为白云岩,岩石坚硬、强度高、完整性好; $\text{Ph}_3$ 磷矿层致密坚硬、完整性好;底板围岩为含磷泥岩,较软弱、强度低,故矿段内工程地质条件属于中等类型。

该磷矿属缓倾斜薄至中厚矿体,顶、底板围岩稳定性较好,节理、裂隙不发育,但因矿石为胶结结构,块状发育导致矿石极易松散,容易发生片帮,同时顶板硅质岩、硅质白云岩中含有方解石,方解石吸水之后容易膨胀,从而导致工作区内顶板存在炸顶、脱层的现象,这将成为开采中的不稳定因素。

现场开采主要采用无轨运输、锚网护顶、轮式出矿的房柱法。矿块按矿体走向布置,采场结构参数如下:矿块走向长度,200 m;矿块倾向长度(斜长),190 m;阶段高度,60 m;矿房宽度,32 m;矿柱,6 m $\times$ 7 m;顶柱,6 m;底柱,6 m;间柱,5 m;断层边缘保安矿柱,6 m。

## 2 现场岩爆情况

在进行矿区开采时,顶板岩爆最活跃,侧壁次之。在进行现场观测时,从岩体内不时会传来“啪”、“啪”的声音。在临近空区的已开挖巷道顶板已出现明显的冒落现象,钢筋网已明显变形,大部分锚杆已变形,还有部分锚杆端部溜在岩层中,如图1所示。



图1 采区现场顶部岩体破坏现状

Fig. 1 Failure status of top rock mass in mining area

冒顶岩爆事故频繁发生,如图2所示。可以看出冒顶范围较大,破坏力强,锚网失效,造成掌子面前部的凿岩台车受理,险些造成人员伤亡事故。另外,从冒落下来的岩石来看,部分冒落下来的岩块高度超过1.8 m,整个锚杆没入其中,没能起到真正的锚固作用。在切割巷道的推进过程中,发现冒顶、片帮现象较为严重,不宜进行切割巷道的工作。



图2 采区工作面岩爆现象

Fig. 2 Rock burst in working face of mining area

此外,某采区前期开采过程中分别由靠近F1、F3断层附近向中部推进,随着开采工作的进行,两边采场中间的距离逐渐减少,开采过程中岩爆现象更加剧烈。具体表现为:岩爆频率和岩爆力度明显增加。统计结果如表1所示:8月~11月份岩爆声响次数分别为:74次,147次,268次,292次。岩爆次数随着开采工作面的靠近呈明显增长态势;特大型11月份较前期3个月明显增加,11月份主要以特大型岩爆为主。

表1 岩爆发生频度

Tab. 1 Occurrence frequency of rock burst

月份 month	各等级岩爆发生次数 occurrence times of rock burst in different grades				
	特大 oversize	大 large	中 middle	小 small	总次数 total times
	8	2	53	7	12
9	10	79	44	14	147
10	7	159	79	23	268
11	15	72	50	157	292

### 3 岩样微观结构分析

采用宏观加载破坏的试样断面切片进行电镜扫描和元素分析,观察岩石微观裂纹破坏的情况及其发展趋势.图3为岩样破坏面放大10 000倍的微观电镜扫描,结果显示,岩石受力破坏失稳后其微观结构也发生了断裂等形式的破坏,由于岩石切片上有较多的残留碎屑,在放大10 000倍的电镜扫描结果中可见受力后的岩石已经发生开裂现象,但未完全破坏的晶界,观察裂纹的发展趋势和晶粒胶结情况,可推断出此裂纹的发展方向,如图3中箭头所指.由微观电镜扫描图3可推测出图3中的裂纹为胶磷矿和白云石的接触晶界,此晶界即磷块岩微观结构中的晶界弱面.该试样元素分析结果如图4所示.

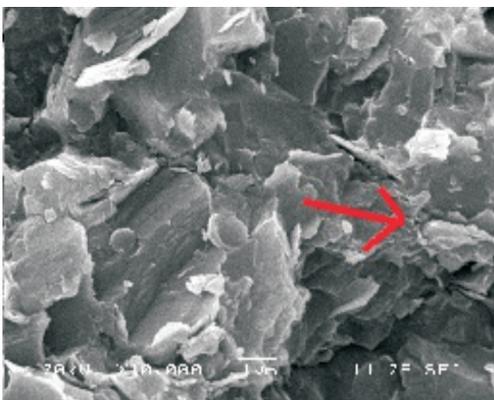


图3 岩样断面切片SEM扫描结果(10 000倍)

Fig. 3 SEM image of the section slices of rock samples (10 000X)

从图4中可以看到,岩样断面切片含Si和Al元素较多,含磷量较少.岩体中大量硅质的存在,提高了岩石储存弹性应变能的能力,使得岩体具有较高岩爆倾向性.

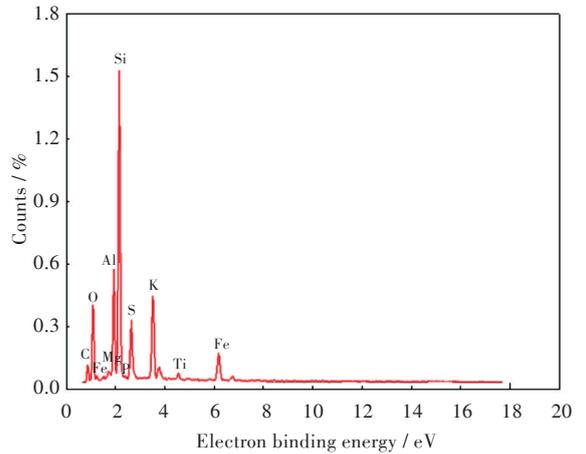


图4 岩样断面切片试样元素分析结果

Fig. 4 Element analysis results of the section slices of rock samples

### 4 岩爆形成机理及判定标准

岩爆的产生是地下岩体内外因素共同作用而导致的<sup>[5-8]</sup>.Hoek根据南非采矿巷道发生岩爆破坏的经验结果,提出了对所产生的岩爆进行分级的判别式<sup>[9]</sup>:

- 当  $\sigma_0/\sigma_c=0.34$  时,少量片帮
- 当  $\sigma_0/\sigma_c=0.42$  时,严重片帮
- 当  $\sigma_0/\sigma_c=0.56$  时,需重型支护
- 当  $\sigma_0/\sigma_c=0.70$  时,严重岩爆

在上述的经验判别式中,  $\sigma_0$  为围岩最大切向应力;  $\sigma_c$  为岩石单轴抗压强度.

片帮是一种轻微或中等程度的岩爆形式.按照上述产生岩爆的判断依据,岩爆一般产生在围岩的应力状态不理想的部位,其环向应力普遍较大.在巷道开挖后,巷道围岩形成的应力状态刚好与这些岩爆产生的条件相符合.

然而,产生岩爆的倾向性取决于岩体自身的力学性质.对产生岩爆的倾向性研究就是利用某些与岩体力学性质相关的参数来判断其发生岩爆的可能性<sup>[10-12]</sup>.这些参数包括弹性能量指数、岩石脆性系数、有效冲击能量指数等产生岩爆倾向性指标.

陶振宇根据巴顿法提出了一种基于最大主应力的岩爆危险性判据<sup>[13-14]</sup>.岩爆的产生可以根据完整岩石的单轴抗压强度  $\sigma_c$  和巷道周边最大主应力  $\sigma_{max}$  的比值来判定,如表2所示.

表2 岩爆分级表  
Tab. 2 Classification of rock burst

岩爆等级 rockburst grade	$\sigma_c/\sigma_{max}$	岩爆特征 rockburst characteristics
I	<2.5	高岩爆, 伴有很强的爆裂声
II	2.5~5.5	中等岩爆, 伴有较强的爆裂声
III	5.5~14.5	弱岩爆, 伴有轻微声发射
IV	>14.5	无岩爆, 无声发射

## 5 矿区岩爆防治措施

对于所研究的矿区, 目前存在如下问题: 矿区顶板岩爆破坏严重, 现场支护投入较高, 且效果不明显, 而通过对矿区岩爆现场的初步调研, 发现矿区岩爆的产生主要与矿区岩体及矿区应力环境、应力路径相关<sup>[15]</sup>. 因此, 岩爆防治主要从以下几方面开展:

1) 岩性实验分析: 矿区岩体含白云岩较多, 矿区的岩爆倾向性较高的位置是含白云岩的磷块岩部分, 富含白云岩较多的岩体受力特性, 已进行相关试验, 可为矿段顶板岩爆产生机理分析提供依据.

2) 危险区应力场分析与优化: 根据现场的施工工况、室内岩体参数数据, 对现场地质结构进行数值模拟, 分析开采对现场围岩应力分布的影响, 找出高应力集中程度与集中范围.

3) 为降低开挖自由面的岩爆烈度, 可以打一定深度的卸压孔, 并对开挖面岩体喷水.

4) 锚网的优化设计: 在保证安全的条件下, 对岩体开挖过程中的锚固能力进行分析与优化, 提出合理的锚网支护方案. 对于少数特别部位, 可以适当采用锚索加固支护方案. 对岩爆区域锚网支护. 在经仔细敲帮问顶立即出渣, 然后进行锚网支护. 现场采用2 m长的一般摩擦性锚杆, 锚杆间距均为1 m. 如图5所示.



图5 顶部锚杆锚网支护形式

Fig. 5 Bolt and anchor net support form on roof

5) 优化合理开采顺序: 根据矿区的地质构造、断层的分布, 优化合理的开采工作面推进方向, 避免在地下形成孤岛矿柱, 以改善采场的应力环境, 减少应力集中.

## 6 结语

综上所述, 得出以下结论:

1) 对所采集试样的微观结构进行观察后发现, 磷块岩宏观力学行为基本与其微观结构构造和矿物成分的微观力学行为相符. 晶界弱面的存在是影响岩石(磷块岩)抗压强度和变形等的重要因素.

2) 岩样断面切片微观结果及元素分析显示, 受力晶界破坏普遍发生在白云石与胶磷矿接触晶界处, 微观结构存在的破坏形式主要是沿晶界破坏和穿晶破坏. 岩体中大量硅质的存在, 提高了岩石储存弹性应变能的能力, 使得岩体具有较高岩爆倾向性.

3) 在岩石单轴试验过程中, 出现类似岩爆的试样表面片状鳞块状弹射现象, 微观裂纹试验最重要的结果是发现磷块岩晶界弱面为白云石与胶磷矿之间的接触晶界. 现场考察发现, 岩爆多发生在爆破后环境干燥的区域, 高峰期开挖后一至两小时以内, 且多发矿段为白云石含量较高的岩层, 白云石含量越高发生几率就越大, 与试验结果一致.

4) 对于岩爆的产生, 可采用避开高应力区、降低围岩应力、强化围岩、弱化围岩等综合措施加以防治.

### 参考文献:

- [1] 闵瑞. 大断层两侧岩体采动效应数值模拟研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015.
- [2] 赵红亮, 周又和. 深埋地下洞室断裂型岩爆机理的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3): 343-349.  
ZHAO H L, ZHOU Y H. Numerical simulation on mechanism of fractured rock burst in deep underground tunnels[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3): 343-349.
- [3] 赵康, 赵红宇, 贾群燕. 岩爆岩石断裂的微观结构形貌分析及岩爆机理[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(6): 913-918.  
ZHAO K, ZHAO H Y, JIA Q Y. Microstructure analysis and rockburst mechanism of rockburst rock fracture[J]. Explosion and Shock, 2015, 35(6): 913-918.
- [4] 齐曼卿. 模拟地下工程应力梯度环境梯度加载下的岩

- 爆机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.
- [5] 于群. 深埋隧洞岩爆孕育过程及预警方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- [6] 邓天赐,张电吉,齐曼卿,等. 地下磷矿开采岩爆机理及防治对策[J]. 有色金属(矿山部分),2017,65(5):67-70.  
DENG T C, ZHANG D J, LIN M Q, et al. Rock burst mechanism and prevention countermeasures of underground phosphate mining [J]. Nonferrous Metals (Part of Mine),2017,65(5): 67-70.
- [7] 张子健. 岭南金矿深部开采岩爆危险性分析与危险区域预测[D]. 北京:北京科技大学,2015.
- [8] 王来贵,习彦会,潘纪伟. 动力弹射型岩爆发生机理及反馈机制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(4):365-370.  
WANG L G, XI Y H, PAN J W. Occurrence and feedback mechanism of dynamic ejection rock-burst [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition),2016,35(4):365-370.
- [9] HOEK E, BROWN E T. 岩石地下工程[M]. 北京:冶金工业出版社,1986:128-130.
- [10] 郭然,潘长良,于润仓. 有岩爆倾向深埋硬岩矿床采矿理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.
- [11] 徐林生,王兰生,李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学,2002,23(3):300-302.  
XU L S, WANG L S, LI Y L. Study on mechanism and judgement of rock burst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(3):300-302.
- [12] 兰天伟,张宏伟,韩军,等. 基于应力及能量条件的岩爆发生机理研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(6):840-844,875.  
LAN T W, ZHANG H W, HAN J, et al. Study on Mechanism of rockburst based on stress and energy conditions [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2012,29(6):840-844,875.
- [13] 陶振宇. 岩石力学的理论与实践[J]. 岩土力学,1980,10(2):81-82.  
TAO Z Y. Theory and practice of rock mechanics [J]. Geotechnical Mechanics,1980,10(2):81-82.
- [14] 李永松. 复杂条件下岩体应力综合分析及岩爆控制研究[D]. 武汉:中国地质大学,2015.
- [15] 刘元坤,李永松,许静. 基于切向应力指数及能量原理的岩爆机理分析[J]. 人民长江,2016,47(增刊2):105-108.  
LIU Y K, LI Y S, XU J. Analysis of rock burst mechanism based on tangential stress exponent and energy principle [J]. People's Yangtze River, 2016, 47 (Suppl. 2):105-108.

本文编辑:陈小平