

程潮铁矿深部开采岩爆预测

许梦国, 杜子建, 姚高辉, 刘振平

(武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘要: 程潮铁矿经过近 40 a 的开采, 已初步进入深度开采阶段。为预测岩爆发生可能性及其烈度, 对程潮铁矿深度 -430~-700 m 的部位多种岩样进行岩石力学试验, 提出岩爆倾向性的多种判据。通过理论预测法分别对各种岩样的倾向性及烈度进行预测, 得到程潮铁矿围岩的岩爆倾向性顺序, 总结出可能强度较高的几种岩石类型及其所在深度; 最后结合模糊数学综合预测法, 针对已有多种指标进行岩爆倾向的综合评价, 得到矿区总体岩爆倾向性及岩爆临界深度, 为矿区开采设计和岩爆监测预报提供了依据。

关键词: 采矿工程; 深部开采; 岩爆预测; 岩爆烈度; 判别指标

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 1 - 2921 - 08

ROCKBURST PREDICTION OF CHENGCHAO IRON MINE DURING DEEP MINING

XU Mengguo, DU Zijian, YAO Gaohui, LIU Zhenping

(College of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China)

Abstract: After 40 years' mining in Chengchao iron mine, now it is coming into deep mining. To predict the possibility and intensity of rockburst, the author obtained rocks from the depth underground -430 to -700 m. Based on systematical mechanical experiments of rocks, various prediction criteria for rockburst are brought forward through many testing methods. With the theoretical methods, rocks which have the different possible intensities for rockburst are checked up by the criteria, and some types of rocks in the mine which has high possibility and severe intensity are confirmed. At last, combined with the comprehensive prediction methods in fuzzy mathematics, synthesized prediction upon those criteria is made that the orientation of rockburst and critical depth are ascertained in the mass, which can be the basic theory in the mining design and rockburst prediction.

Key words: mining engineering; deep mining; rockburst prediction; rockburst intensity; criteria of rockburst

1 引言

岩爆是地下工程高地应力岩石中的一种常见灾害。其经常表现为地下工程开挖过程中或之后围岩的爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷^[1]。近几十年国内外采矿界和岩体工程界的专家、学者关于岩爆预测方面进行了大量研究, 取得了一定的成果。运用

的预测方法有理论分析法和现场实测法等, 主要的判据指标为应力判据、岩性判据、能量判据、临界深度判据等, 采用的实测方法主要为地震法、钻屑法、声发射法、微重力法、电磁辐射法、振动法、光弹法、流变法、气体测定法和电阻法等^[2, 3]。以上两类预测方法各有优缺点, 理论分析法适用于工程初期, 通过对岩石的取样分析, 预测将来是否有岩爆的发生, 可以实现长期预测, 但理论分析法是

收稿日期: 2006 - 12 - 26; **修回日期:** 2007 - 03 - 29

作者简介: 许梦国(1958 -), 男, 1987 年毕业于武汉科技大学资源工程系采矿专业, 现任教授, 主要从事岩土力学、资源开发工程等方面的教学与研究工作。E-mail: Xumg2@263.net

表 1 矿岩物理力学性质参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of the rocks

样号	深度 /m	岩石类型	方向	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
AMS01H	428	大理岩	//	81.2	10.60	31.2	0.26
AMS02H	510	大理岩	//	82.8	11.20	35.1	0.21
BMS01H	460	花岗斑岩	//	123.6	11.50	36.5	0.17
BMS02V	580	花岗斑岩	⊥	120.5	14.90	34.2	0.21
CMS01H	460	闪长岩	//	132.2	7.80	50.2	0.23
CMS02H	530	闪长岩	//	130.5	11.09	49.5	0.24
CMS03H	569	闪长岩	//	135.2	10.90	51.6	0.27
CMS04V	650	闪长岩	⊥	129.5	11.30	48.5	0.20
DMS01H	515	闪长玢岩	//	156.3	10.20	58.3	0.18
DMS02H	650	闪长玢岩	//	155.8	11.77	55.6	0.19
EMS01H	520	磁铁矿	//	92.6	9.52	40.8	0.35
EMS02V	550	磁铁矿	⊥	90.1	10.20	37.6	0.29
EMS03H	630	磁铁矿	//	95.6	8.69	39.8	0.31
FMS01H	560	花岗岩	//	126.8	6.56	59.7	0.18
FMS02H	670	花岗岩	//	128.5	9.63	61.2	0.21
GMS01H	570	砂卡岩	//	96.5	8.00	35.9	0.29
HMS01H	600	石英长石斑岩	//	106.8	6.10	56.0	0.25

注：“//”代表平行层理，“⊥”代表垂直层理。

抗压强度的计算公式为

$$\sigma_c = P/S \quad (1)$$

式中： σ_c 为单轴抗压强度， P 为破坏载荷， S 为岩样的受荷面积。计算所得的岩石单轴抗压强度的平均值列于表 1。

2.2 岩石抗拉强度的测定

抗拉强度的测定采用常规的巴西劈裂法，该方法要求圆盘的厚度与其直径的比值为 0.5~1.0，试验时沿圆盘形岩石试件轴面平行黏贴两根金刚丝，然后将试件置于试验机上平行于该轴面加压(静荷载)，借助金刚丝将集中荷载转变为线荷载，从而产生垂直于该轴面的拉应力，最后导致试件拉伸破坏。抗拉强度的计算公式为

$$\sigma_t = 2P/(\pi dl) \quad (2)$$

式中： σ_t 为单轴抗拉强度， d 为岩样的直径， l 为岩样的厚度。矿岩抗拉强度测试结果见表 1。

2.3 岩石崩裂试验

岩石崩裂试验在普通压力机上完成。试验时，用常规试验加载速度加载，使岩样自由破坏并测量碎岩石片飞行距离 r 和各距离范围内碎片质量 m ，

依据碎片弹射飞行距离 r 换算出碎片初始弹射速度 v ，崩裂小岩石片的崩出动能 Φ 可表示为

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (3)$$

式中： n 为抛出岩块的个数， m_i 和 v_i 分别为第 i 快岩块的质量和弹射速度，所获得的试验结果列于表 2 中。

表 2 岩石崩裂试验结果表

Table 2 Results of the crack experiments

样号	岩石类型	试件尺寸		试件质量 /g	各距离对应碎片质量/g			动能总和 /J
		直径 /mm	长度 /mm		$5 < r < 11$	$11 < r < 24$	$r > 24$	
AMS01H	大理岩	50.2	100.1	481	19	1.0	12.0	17.0
AMS02H	大理岩	50.2	100.5	495	12	4.0	4.0	10.0
BMS01H	花岗斑岩	50.3	100.6	497	8	19.0	11.0	13.0
BMS02V	花岗斑岩	50.2	100.8	499	25	34.0	16.0	51.0
CMS01H	闪长岩	50.2	100.6	501	170	7.0	69.0	40.8
CMS02H	闪长岩	50.2	100.3	509	17	7.0	32.0	45.0
CMS03H	闪长岩	50.1	100.8	502	18	14.5	80.0	38.2
CMS04V	闪长岩	50.2	100.6	505	17	69.0	110.0	36.0
DMS01H	闪长玢岩	50.2	100.3	503	16	117.0	27.0	60.6
DMS02H	闪长玢岩	50.2	100.5	507	63	32.0	82.0	50.6
EMS01H	磁铁矿	50.2	100.8	809	28	6.2	20.0	24.8
EMS02V	磁铁矿	50.3	100.3	810	15	27.0	4.0	20.6
EMS03H	磁铁矿	50.1	100.2	799	12	20.0	5.0	9.2
FMS01H	花岗岩	50.2	100.5	505	56	52.0	42.5	70.6
FMS02H	花岗岩	50.2	100.4	506	53	85.0	38.0	81.0
GMS01H	砂卡岩	50.1	100.5	482	12	1.0	5.0	13.8
HMS01H	石英长石斑岩	50.3	100.2	512	105	23.0	25.0	66.3

注： r 为碎片飞行距离，单位 cm。

2.4 岩石全应力 - 应变曲线的测定

岩石全应力 - 应变曲线是在静态荷载条件下测得的岩石在受力变形直至破坏的全过程曲线，本试验在 MTS - 815.3 型岩石试验机上完成。试验过程中，采用横向应变控制加载，加载控制速率 $(1 \sim 5) \times 10^{-6}$ [7]。

2.5 岩石加卸载试验

岩石的加卸载试验也是在静态荷载作用下，测定岩石在峰值强度时一次性应力卸载至零的过程曲线，本试验亦是在 MTS - 815.3 型试验机上完成的。试验过程中，加载是采用纵向应变控制的，加载控

制速率为(1~5)×10⁻⁶。

3 岩爆倾向性结果分析

为了全面、系统和可靠地分析和预测程潮铁矿深部开采过程中岩体发生岩爆的可能性与岩爆强度，作者采用多种岩石动力学准则，分别进行分析和评价。

3.1 强度脆性系数法试验及评价结果

根据试验测得的岩石的单轴抗压强度和抗拉强度，再根据岩石脆性指标，即抗压强度与抗拉强度的比值 *B* 来衡量岩爆倾向性^[8]。脆性系数为

$$B = \sigma_c / \sigma_t \tag{4}$$

根据所得力学试验结果，程潮铁矿深部岩石的脆性系数 *B* 计算结果如表 3 所示。

表 3 程潮铁矿深部岩石脆性系数 *B* 计算结果

Table 3 Coefficient *B* of deep rocks in Chengchao iron mine

岩石类型	平均 σ_c /MPa	平均 σ_t /MPa	脆性系数 <i>B</i>	岩爆倾向
大理岩	10.90	82.0	7.5	无岩爆
花岗斑岩	11.95	122.1	10.2	弱岩爆
闪长岩	11.45	131.9	11.5	弱岩爆
闪长玢岩	10.80	156.1	14.5	中岩爆
磁铁矿	9.47	92.8	9.8	无岩爆
花岗岩	6.29	127.7	20.3	强岩爆
砂卡岩	11.70	96.5	8.2	无岩爆
石英长石斑岩	6.10	106.8	17.6	中~强岩爆

已有研究表明，根据脆性系数 *B* 进行岩爆判别情况见表 4。

表 4 脆性系数 *B* 值与岩爆判别

Table 4 Coefficient *B* and discrimination of rockburst

脆性系数 <i>B</i>	判别情况
≤10	无岩爆
10~14	弱岩爆
14~18	中岩爆
>18	强岩爆

根据表 3 的计算结果，程潮铁矿深部除矿体上盘大理岩和砂卡岩以及矿岩没有岩爆倾向以外，其他岩石均有岩爆倾向，其中石英长石斑岩和花岗岩属于强岩爆岩石。

3.2 变形脆性系数法试验及评价结果

根据试验确定矿体岩石峰值前的总变形和永久变形，用变形脆性系数法确定岩石岩爆倾向，即

$$K_U = U / U_1 \tag{5}$$

式中：*U* 为岩石峰值强度前的总变形，*U*₁ 为峰值前的永久变形或称塑性变形。依据岩石压缩变形试验所得脆性系数 *K*_U 列于表 5，其临界判别指标为见表 6。

表 5 程潮铁矿深部岩石 *K*_U 值计算结果

Table 5 Value *K*_U of deep rocks in Chengchao iron mine

岩石类型	平均 <i>U</i> /10 ⁻³	平均 <i>U</i> ₁ /10 ⁻³	<i>K</i> _U	岩爆倾向
大理岩	10.2	3.64	2.8	弱岩爆
花岗斑岩	12.8	2.46	5.2	弱岩爆
闪长岩	9.8	1.11	8.8	中岩爆
闪长玢岩	9.5	1.04	9.1	强岩爆
磁铁矿	8.7	1.21	7.2	中岩爆
花岗岩	9.5	1.00	9.5	强岩爆
砂卡岩	8.2	2.16	3.8	弱岩爆
石英长石斑岩	11.5	1.08	10.6	强岩爆

表 6 *K*_U 值与岩爆判别

Table 6 Value *K*_U and discrimination of rockburst

<i>K</i> _U	判别情况
≤2.0	无岩爆
2.0~6.0	弱岩爆
6.0~9.0	中岩爆
>9.0	强岩爆

试验时，由于峰值点处难以控制，一般只加载至岩石峰值强度的 90% 左右即开始卸载，各岩石试验及岩爆倾向性评价结果见表 6，从表 6 可看出，程潮铁矿深部岩石均有岩爆倾向，而闪长玢岩、花岗岩和石英长石斑岩具有强岩爆倾向。

3.3 弹性能量指数法及评价结果

A. Kidybinski^[9]引用了 Stecowka 和 Domzal 等人的弹性应变能储存指数的概念，来判定岩石发生岩爆的可能性。用 *W*_{ET} 表示应变能储存指数，它是岩石的峰值强度前岩样中弹性应变能储存能量与塑性变形耗散的能量之比。则其量纲一的计算表达式为

$$W_{ET} = \phi_{sp} / \phi_{st} \tag{6}$$

式中： Φ_{sp} 为变形后储存的最大弹性应变能， Φ_{st} 为耗损的应变能。

由图 2 所示的加、卸载应力-应变曲线下包围的面积求得。从理论上讲，在试验中应从岩石的峰值强度点开始卸载，以求算 W_{ET} 。但由于试验时难以控制到峰值点，所以一般均只加载至岩石峰值强度的 80%~90%时就开始卸载^[10, 11]。

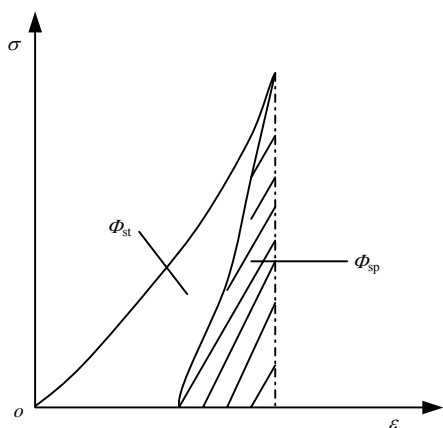


图 2 弹性能量指数的测定曲线

Fig.2 Test curves for elastic energy index

弹性能量指数也叫冲击倾向指数。其值越大，破坏时释放的能量也越多，能较好地反映岩爆的存在及烈度。依据岩石加卸载荷试验所得数据算得 W_{ET} 列于表 7。

表 7 程潮铁矿深部岩石 W_{ET} 计算结果

Table 7 Value W_{ET} of rocks in Chengchao iron mine

岩石类型	平均 Φ_{sp}/J	平均 Φ_{st}/J	W_{ET}	岩爆倾向
大理岩	288.8	192.5	1.5	无岩爆
花岗斑岩	558.3	223.3	2.5	弱~中岩爆
闪长岩	530.8	115.4	4.6	中岩爆
闪长玢岩	621.9	119.6	5.2	中~强岩爆
磁铁矿	317.8	85.9	3.7	中岩爆
花岗岩	540.3	66.7	8.1	强岩爆
矽卡岩	254.3	141.3	1.8	无岩爆
石英长石斑岩	539.3	74.9	7.2	强岩爆

其评判指标见表 8。从表 8 中可以得出除大理岩与矽卡岩外，其他岩石均有岩爆倾向，而闪长玢岩、花岗岩和石英长石斑岩有强岩爆倾向。

3.4 岩爆能量比法及评价结果

表 8 W_{ET} 值与岩爆判别

Table 8 Value W_{ET} and discrimination of rockburst

W_{ET} 值	判别情况
$W_{ET} < 2.0$	无岩爆
$2.0 \leq W_{ET} < 5.0$	中岩爆
$W_{ET} \geq 5.0$	强岩爆

Motycaka(1973 年)定义岩爆能量比指标 η : 岩样在单轴抗压试验破坏时， η 值越大，则岩爆倾向性越大。 η 用破碎岩片抛出的能量 Φ_k 与试块储存的最大弹性应变能 Φ_0 之比表示，即

$$\eta = (\Phi_k / \Phi_0) \times 100\% \quad (7)$$

其中，

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (8)$$

式中： n 为抛出岩块的个数， m_i 和 v_i 分别为第 i 块岩块的质量和弹射的速度。

试块储存的弹性应变能 Φ_0 可以由试验测得的最大应力值 σ_{max} 和最大弹性应变 ϵ_{max} 按下式求出：

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \sigma_{max} \epsilon_{max} \quad (9)$$

依据岩石崩落和峰值前的加载试验算得 Φ_k 和 Φ_0 ，并计算 η 值得于表 9。

表 9 程潮铁矿深部岩石 η 值计算及评价结果

Table 9 Value η of rocks in Chengchao iron mine

岩石类型	平均值 Φ_k/J	平均值 Φ_0/J	$\eta\%$	岩爆倾向
大理岩	13.5	481.2	2.8	无岩爆
花岗斑岩	32.0	781.4	4.1	弱岩爆
闪长岩	40.0	646.3	6.2	强岩爆
闪长玢岩	55.6	741.5	7.5	强岩爆
磁铁矿	18.2	403.7	4.5	中岩爆
花岗岩	75.8	606.6	12.5	强岩爆
矽卡岩	13.8	395.7	3.5	弱岩爆
石英长石斑岩	66.3	614.1	10.8	强岩爆

从表 9 中可以看出各种岩石除了大理岩以外都具有发生岩爆的倾向性，其中闪长岩、闪长玢岩、花岗岩和石英长石斑岩具有强烈岩爆倾向。

矿山岩爆临界判别指标见表 10。

表 10 η 值判别岩爆情况计算结果
Table 10 Value η and discrimination of the rockburst

η 值/%	岩爆倾向
$\eta \leq 3.5$	无岩爆
$3.5 < \eta \leq 4.2$	弱岩爆
$4.2 < \eta \leq 4.7$	中岩爆
$\eta \geq 4.7$	强岩爆

3.5 切向应力准则及评价结果

切向应力准则同时考虑了岩体的应力状态和岩石的力学性质^[12]。将围岩中的切向应力 σ_θ 和岩石的抗压强度 σ_c 之比定义为 $T(=\sigma_\theta/\sigma_c)$ ，根据研究结果^[13, 14] T 值与岩爆判别关系见表 11。

表 11 T 值与岩爆判别
Table 11 Value T and discrimination of rockburst

T 值	岩爆倾向
$T \leq 0.3$	无岩爆
$0.3 < T \leq 0.5$	弱岩爆
$0.5 < T \leq 0.7$	中岩爆
$T > 0.7$	强岩爆

根据现场地应力实测结果，得到程潮铁矿深部围岩切向应力状态如表 12 所示，相应所得 T 值及岩爆评价结果见表 12^[15]。

从表 12 中可以看出，当深部开采达到-533 m 深度时将会有岩爆发生，局部花岗岩层不排除有中等岩爆的可能性。越开采到深部，围岩切向应力变的越大，促进了强岩爆的发生，达到-600 m 深度时，在完整石英长石斑岩岩层、闪长岩岩层和花岗岩层，强岩爆发生的几率将变得很大。

3.6 岩体 RQD 指标准则及岩爆评价

一般情况下，裂隙发育的岩体完整性较差，不易引起高应力集中和能量积聚。因此，岩体裂隙的发育程度，从一个侧面反映了岩体产生岩爆的倾向。岩体质量系数(RQD)是描述岩体完整性好坏的一个简单而实用的指标，根据岩体的 RQD 值可以近似分析和掌握岩体的岩爆倾向。表 13 中列出了程潮铁矿深度-500 m 以下岩芯钻取所得围岩岩石的 RQD 值。

表 12 程潮铁矿深部围岩 T 值评价结果^[15]
Table 12 Value T and results estimation of the deep surrounding rocks in Chengchao iron mine^[15]

样号	深度/m	岩石类型	σ_θ /MPa	σ_c /MPa	T	岩爆倾向
AMS01H	428	大理岩	18.7	81.2	0.225	无岩爆
BMS01H	460	花岗斑岩	28.6	123.6	0.232	无岩爆
CMS01H	460	闪长岩	29.8	132.2	0.226	无岩爆
AMS02H	510	大理岩	23.6	82.8	0.285	无岩爆
DMS01H	515	闪长玢岩	33.6	156.3	0.215	无岩爆
EMS01H	520	磁铁矿	26.9	92.6	0.291	弱岩爆
CMS02H	530	闪长岩	44.6	130.5	0.342	弱岩爆
EMS02V	550	磁铁矿	38.3	90.1	0.425	弱岩爆
FMS01H	560	花岗岩	55.9	126.8	0.441	弱岩爆
CMS03H	569	闪长岩	66.1	135.2	0.489	弱~中岩爆
GMS01H	570	砂卡岩	59.9	96.5	0.621	弱岩爆
BMS02V	580	花岗斑岩	72.0	120.5	0.598	弱~中岩爆
HMS01H	600	石英长石斑岩	68.0	106.8	0.637	中~强岩爆
EMS03H	630	磁铁矿	83.9	95.6	0.878	强岩爆
CMS04V	650	闪长岩	99.4	129.5	0.768	强岩爆
DMS02H	650	闪长玢岩	109.8	155.8	0.705	强岩爆
FMS02H	670	花岗岩	109.9	128.5	0.856	强岩爆

根据表 13 发现，程潮铁矿深部-500~-700 m 岩体的平均 RQD 为 60%~80%，可以纳入较好完整性岩石一类，因此，预示深部岩体有较大的岩爆倾向。

表 13 程潮铁矿深部围岩岩石 RQD 值统计表
Table 13 RQD of rocks in Chengchao iron mine %

岩石类型	RQD 值					平均值
	<25	25~50	50~75	75~90	>90.0	
砂卡岩	10	15	32	43	0	75.28
闪长岩	2	12	45	41	0	74.52
石英长石斑岩	15	10	23	52	0	69.85
花岗岩	12	25	13	50	0	63.57
闪长玢岩	5	21	36	38	0	70.46
大理岩	9	15	51	25	0	68.87
磁铁矿	7	17	49	27	0	69.88
花岗斑岩	6	10	32	52	0	78.12
备注	极差	差	较差	较好	好	

4 岩爆综合评价

节 3 讨论了多种方法, 但仅考虑了个别判别指标, 难免有一定的片面性和局限性, 作者在总结以往研究成果以及对照上述分析评价结果的基础上, 结合模糊综合评判理论, 针对上述六种指标, 即强度脆性系数、变形脆性系数、弹性能量指数、岩爆能量比指数、切向应力指数、岩体 *RQD* 指标作为主要指标进行岩爆倾向的模糊评价^[16~18], 采用专家系统方法依次确定主控因素的权重分配, 用 *A* 表示: $A = \{0.15, 0.15, 0.2, 0.2, 0.2, 0.1\}$, 具体评价方法可参考有关研究^[17], 得到各类围岩在不同深度的岩爆综合评价结果, 见表 14。

表 14 围岩岩爆综合评价结果
Table 14 Integrated results of rockburst prediction

深度/m	大理岩	闪长岩	矽卡岩	石英长石斑岩	磁铁矿	花岗岩	花岗斑岩	闪长玢岩
428	无							
460		无						无
510	无							
515								无
520					无			
530		弱						
550					弱~中			
560						弱		
569		弱~中						
570			弱					
580								中
600				强				
630					强			
650		强						强
670								较强

分析结果表明, 总体上岩爆初始发生在-530 m 水平阶段, 即岩爆临界深度, 花岗岩、石英长石斑岩、闪长玢岩和闪长岩围岩随着开采深度的增加, 到-600 m 时就有很大的发生较强岩爆的可能性, 应注意岩爆的预处理与防治问题。

5 结 论

(1) 通过程潮深部岩体岩样的单轴抗压、抗拉试验、循环加卸载试验、压缩破坏试验以及岩石崩裂试验, 结合实测地应力资料分析, 从整体上揭示了 W39 线 V 号矿体深部围岩地应力较大, 围岩硬度和脆性很高, 完整性也很好, 能集聚较高弹性应变能的情况。

(2) 根据强度脆性系数准则、变形脆性系数法、弹性能量指数法、能量比法、切向应力准则和岩体 *RQD* 准则及其评判标准, 得出了程潮铁矿深部围岩岩爆强度的倾向性, 并确定了程潮铁矿矿岩的岩爆倾向性顺序: 花岗岩 > 石英长石斑岩 > 闪长玢岩 > 闪长岩 > 花岗斑岩 > 矽卡岩 > 大理岩, 矿岩岩爆倾向性介于闪长岩与花岗斑岩之间, 发生岩爆强度较高的几种岩石类型为花岗岩、石英长石斑岩和闪长玢岩。

(3) 针对深部开采地应力较大的现象, 采用了切向应力准则, 同时考虑了岩体地应力分布和岩石的力学性质, 得出当深部开采达到-533 m 时将有岩爆发生的可能, 局部花岗岩层、闪长岩层和石英长石斑岩层不排除有中等~强烈岩爆的可能性。越开采到深部, 围岩切向应力变的越大, 岩体较好的完整性更促进了强岩爆发生的可能性, 达到-600 m 深度时, 在完整石英长石斑岩岩层、闪长岩岩层和花岗岩层, 强岩爆发生的几率将变得很大。

(4) 运用模糊数学理论综合考虑了强度脆性系数、变形脆性系数、弹性能量指数、岩爆能量比指数、切向应力指数和岩体 *RQD* 指标六个指标, 对不同深度的各类围岩岩爆的可能性进行了综合预测, 并判断岩爆临界深度在-530 m 水平阶段, 得到了比较合理的总体评价结果。

参考文献(References):

[1] 徐林生, 王兰生, 李天斌. 国内外岩爆研究现状综述[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 24 - 28.(XU Linsheng, WANG Lansheng, LI Tianbin. Present situation of rockburst research at home and abroad[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 24 - 28.(in Chinese))

[2] 郭 雷, 李夕兵, 岩小明. 岩爆研究进展及发展趋势[J]. 采矿技术,

- 2006, 6(1): 16 - 21.(GUO Lei, LI Xibing, YAN Xiaoming. Review of rock burst research and its development[J]. Mining Technology, 2006, 6(1): 16 - 21.(in Chinese))
- [3] 王伟, 王恩元. 岩爆预测技术综述及发展分析[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(4): 12 - 15.(WANG Wei, WANG Enyuan. Review of rock burst prediction technique and its development[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2003, 30(4): 12 - 15.(in Chinese))
- [4] 徐林生, 王兰生, 李永林, 等. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300 - 303.(XU Linsheng, WANG Lansheng, LI Yonglin, et al. Study on mechanism and judgement of rockbursts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 300 - 303.(in Chinese))
- [5] 徐林生. 地下工程岩爆发生条件研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(3): 31 - 34.(XU Linsheng. Research on rockburst formation condition in underground engineering[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(3): 31 - 34.(in Chinese))
- [6] 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.(PENG Zhenbin, FANG Jianqin, YAN Ronggui, et al. Study on prediction method of deep wall rockburst of hard rock mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2003, 23(5): 8 - 11.(in Chinese))
- [7] 李长洪, 蔡美峰, 乔兰, 等. 岩石全应力-应变曲线及其与岩爆关系[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(6): 513 - 515.(LI Changhong, CAI Meifeng, QIAO Lan, et al. Rock complete stress-strain curve and its relationship to rock burst[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21(6): 513 - 515.(in Chinese))
- [8] 冯涛, 谢学斌, 王文星, 等. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 18 - 19.(FENG Tao, XIE Xuebin, WANG Wenxing, et al. Brittleness of rocks and brittleness indexes for describing rockburst proneness[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2000, 20(4): 18 - 19.(in Chinese))
- [9] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6): 295 - 304.
- [10] 冯涛, 潘长良, 王宏图, 等. 测定岩爆岩石弹性变形能量指数的新方法[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(2): 352 - 354.(FENG Tao, PAN Changliang, WANG Hongtu, et al. A new method for determining elastic strain energy index of burst rocks[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(2): 352 - 354.(in Chinese))
- [11] 蔡美峰, 王金安, 王双红. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38 - 42.(CAI Meifeng, WANG Jin'an, WANG Shuanghong. Analysis of energy distribution and prediction of rock burst during deep mining excavation in Linglong gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 38 - 42.(in Chinese))
- [12] 唐宝庆, 曹平. 评岩爆的有关应力判据[J]. 湖南有色金属, 2001, 17(2): 1 - 3.(TANG Baoqing, CAO Ping. Discussions on stress criterions rockburst[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2001, 17(2): 1 - 3.(in Chinese))
- [13] 康勇, 李晓红, 王青海, 等. 隧道地应力测试及岩爆预测研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 959 - 963.(KANG Yong, LI Xiaohong, WANG Qinghai, et al. Research on in-situ stress measurement and rockburst forecast in tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 959 - 963.(in Chinese))
- [14] 许东俊, 章光, 李廷芥, 等. 岩爆应力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 169 - 173.(XU Dongjun, ZHANG Guang, LI Tingjie, et al. On the stress state in rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 169 - 173.(in Chinese))
- [15] 尹健民, 罗超文, 艾凯. 某隧道区地应力测量与岩爆分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(增): 28 - 30.(YIN Jianmin, LUO Chaowen, AI Kai. Geostress determination and rockburst analysis for an expressway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.): 28 - 30.(in Chinese))
- [16] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493 - 501.(WANG Yuanhan, LI Wodong, LEE P K K, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493 - 501.(in Chinese))
- [17] 杜子建, 许梦国, 刘振平, 等. 工程围岩岩爆的试验室综合评判方法[J]. 黄金, 2006, 27(11): 26 - 29.(DU Zijian, XU Mengguo, LIU Zhenping, et al. Laboratory integrated evaluation method for engineering wall rock rock-burst[J]. Gold, 2006, 27(11): 26 - 29.(in Chinese))
- [18] 杨健, 武雄. 岩爆综合预测评价方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 411 - 416.(YANG Jian, WU Xiong. Comprehensive forecasting method for estimating rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 411 - 416.(in Chinese))