

金川深部典型岩石岩爆倾向性多因素综合评判

衣永亮, 曹平, 蒲成志

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 以金川二矿区深部为研究对象, 通过对其花岗岩等 6 种典型岩样进行峰前卸载等多种常规力学实验研究, 结合现场勘察数据, 采用基于岩性、围岩、应力条件等不同评判角度的单一岩爆判据: 强度脆性系数法、Barton 法、弹性应变能指数法和围岩质量 RMR 法, 分别对 6 种典型岩样进行岩爆倾向性理论预测, 并引入模糊数学综合预测方法, 以上述各单一判据结果为指标, 运用专家评估法确定因素影响权重, 多因素系统评价金川二矿区的岩爆倾向性。结果表明, 传统单一岩爆预测判据方法不适合金川特殊地质环境。采用模糊数学综合预测方法多因素系统分析发现, 花岗岩、大理岩等 6 种岩样均具有弱岩爆发生倾向, 其结果与现场符合较好, 对矿山下阶段安全、高效生产中的岩爆防治有一定的科学指导意义。

关键词 深部开采; 岩石力学; 岩爆倾向性; 综合评判方法

中图分类号 TU457

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)02-0076-05

Multi-factorial Comprehensive Estimation for Jinchuan's Deep Typical Rockburst Tendency

YI Yongliang, CAO Ping, PU Chengzhi

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The rocks in a deep mining area in Jinchuan 2nd mine are studied in this paper. Several mechanical experiments were conducted, including pre-peak loading and unloading, for six kinds of typical rocks, such as granite, marble and peridotite. Combined with the prospected data, different rockburst criteria, like the coefficient R method, Barton method, elastic strain energy index W_{ET} method and rock mass rating system method, are employed, respectively, according to different lithology and stress conditions to theoretically forecast the rockburst tendency of the rock mass. Fuzzy mathematics comprehensive prediction method is also used, with its index being based on each single criterion results, together with the expert-system evaluation method to determine the weight of every impact factor, to evaluate systematically the rockburst tendency of rock in Jinchuan No. 2 Mine. Results show that the single traditional rockburst forecast method is not suitable for the special geological environment in Jinchuan, while fuzzy mathematics comprehensive prediction method can provide better results. Six types of rock specimens, such as granite, marble, are of weak rockburst tendency, which are in accordance with the situ results. The forecast method proposed in this paper provides some guidance for preventing rockburst in mining excavation.

Keywords deep mining; rock mechanics; rockburst tendency; integrated evaluation method

0 引言

岩爆是高地应力区地下工程在开挖过程中或开挖完毕后, 围岩因开挖卸荷发生脆性破坏而导致储存于岩体中的弹性应变能突然释放, 产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象

的一种动力失稳地质灾害, 直接威胁人员、设备安全, 影响工程进度, 已成为地下工程的世界性难题之一^[1-3]。通过实验室常规岩石力学试验, 结合相关勘测数据, 在工程开挖的前期阶段分析评价岩体发生岩爆倾向的可能性, 对指导隧道开挖

收稿日期: 2009-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(50774093, 10972238); 中南大学学位论文创新项目(2009ssxt1225, 2009ssxt233)

作者简介: 衣永亮, 硕士研究生, 研究方向为岩层稳定性, 电子信箱: yiyongliang83@163.com; 曹平 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S330730017M), 教授, 研究方向为岩体力学理论及试验, 电子信箱: pcao_csu@sohu.com



和矿山开采设计、保证安全生产有着重要意义。

金川有色金属公司作为国内最大的镍生产基地,在国民经济中占有重要地位。随着采矿生产不断发展,目前其开采深度已达 1km,远远超出主要采矿国家岩爆发生的临界深度^[3]。同时,随着开采深度的增加,矿体倾斜、厚大、破碎软弱,围岩高地应力、节理裂隙发育,岩体单块强度高、整体强度低等复杂地质特征日益显现,使得岩爆发生与否及烈度的不确定性逐渐增强^[4-5]。鉴于诱发岩爆的多因素性和金川地质的复杂性,为避免分析过程的片面性和局限化,同时又不致太过繁杂,本研究从岩性条件、应力条件和围岩条件 3 个方面,选取岩体脆性指数、Barton 判据、弹性能量指数和围岩质量等级 4 个主要评定指标,引用模糊数学综合评判理论^[6-10],多角度综合分析金川二矿区深部花岗岩等 6 种典型岩性的岩爆倾向性及烈度。

1 金川岩石岩爆倾向性评价

结合金川公司生产实际,本次取样地点选为金川主力矿山二矿区 1[#] 矿体 1km 水平之间各段,采集了含辉橄榄岩、二辉橄榄岩、斜长角闪岩、大理岩、花岗岩和混合岩 6 种典型岩性进行研究。其中含辉橄榄岩、二辉橄榄岩为主要矿岩岩性,大理岩、花岗岩为主要上盘岩性,斜长角闪岩、大理岩、花岗岩、混合岩为主要下盘岩性。

试样加工时,根据相关实验规定,保证岩芯满足各试验条件要求。

1.1 强度脆性系数法评价

该方法是根据岩石的单轴抗压强度 σ_c 与抗拉强度 σ_t 之比来评价岩石的岩爆倾向性,强度脆性系数 R 为

$$R=\sigma_c/\sigma_t \tag{1}$$

一般来说, R 越大说明岩石的脆性越大,发生岩爆的倾向性也越大, R 的判别准则见表 1。

表 1 岩爆分级评价准则
Table 1 Evaluation principle of rockburst level

判据类型	岩爆等级			
	无岩爆	弱岩爆	中岩爆	强岩爆
R	<10	10~14	14~18	>18
α	<0.2	0.2~0.27	0.27~0.4	>0.4
W_{ET}	<2.0	2.0~3.5	3.5~5.0	>5.0
围岩等级	V	IV	III	II,I

根据实验测得的岩石单轴抗压强度 σ_c 、抗拉强度 σ_t ,运用式(1)及岩爆判别指标即可判定岩爆倾向性。各岩性力学参数及评价结果见表 2。从表 2 可见,6 种岩样中,二辉橄榄岩脆性系数最大,其余 5 种岩样脆性系数偏低。

表 2 实验测试及相关岩爆评价
Table 2 Experiments and related rockburst evaluations

	花岗岩	大理岩	混合岩	含辉橄榄岩	二辉橄榄岩	斜长角闪岩
σ_c /MPa	135	66.49	106.38	86.03	145.19	136.79
σ_t /MPa	15.04	9.72	11.2	7.14	9.3	10.42
σ_1 /MPa	30	30	30	30	30	30
R	8.98	6.84	9.5	12.05	15.61	13.13
W_{ET}	4.86	2.15	6.11	2.85	3.5	2.12
围岩等级	IV	IV	III	IV	IV	IV
等级量化	4	4	3	4	4	4
σ_t/σ_c	0.22	0.45	0.28	0.35	0.21	0.22
脆性系数法	无岩爆	无岩爆	无岩爆	弱岩爆	中岩爆	弱岩爆
Barton 判据	弱岩爆	强岩爆	中岩爆	中岩爆	弱岩爆	弱岩爆
W_{ET} 判据	中岩爆	弱岩爆	强岩爆	弱岩爆	中岩爆	弱岩爆
围岩等级法	弱岩爆	弱岩爆	中岩爆	弱岩爆	弱岩爆	弱岩爆

1.2 Barton 判据法评价

Barton 判据法是从岩爆发生的外部条件即围岩的应力条件入手,根据统计方法建立起来的岩爆倾向判别准则。其根据原岩应力中的最大主应力 σ_1 与单轴抗压强度 σ_c 之比评价岩石的岩爆倾向性,其表达式为

$$\alpha=\sigma_1/\sigma_c \tag{2}$$

一般来说, α 值与岩爆发生的倾向性呈正比,其判别准则见表 1。

根据金川二矿区深部地应力的测定,不同区段已进行了大量研究^[11-12]。结合讨论区域,本研究选用 30MPa 作为统一的最大主应力 σ_1 的量值。据此各岩性岩爆倾向性评价结果见表 2。

由表 2 可知,由于引入了金川二矿区显著的高地应力,各岩石的岩爆倾向性因单轴抗压强度的不同而不同。

1.3 弹性应变能指数判据法评价

岩石在压缩过程中,试件将聚积变形能并产生弹性和塑性变形。如果在岩石受压达到峰值强度前对试件进行卸载,

弹性变形可以得到恢复,而塑性变形则永久性保存。因此,通过岩石循环压缩实验可以检测岩石内部积聚能量的性质和特征。Kidybinski 引用 Stecowka 和 Domzal 等的弹性应变能储存指数的概念判定岩石发生岩爆的可能性^[13]。应变能储存指数 W_{ET} 系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,其无量纲计算表达式为

$$W_{ET} = \phi_{sp} / \phi_{st} \quad (3)$$

式中, W_{ET} 为应变能储存指数 (弹性能量指数), ϕ_{sp} 为滞留的弹性应变能, ϕ_{st} 为耗损的应变能。

弹性能量指数测定计算曲线见图 1。岩石在加载至 σ_0 时卸载, R_b 为单轴抗压强度。

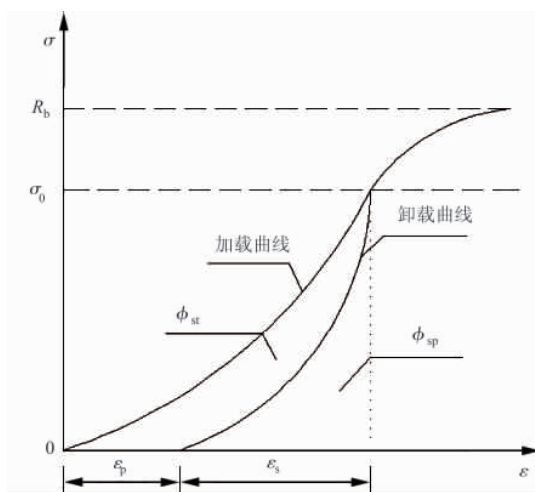


图 1 岩石试件加卸载时的能量计算示意

Fig. 1 Energy accumulation in rock specimen during loading and unloading

根据国内外现场试验与研究成果^[14-16], W_{ET} 值越大, 围岩破坏时产生的冲击就越强烈。因此, 其可较好地反映岩爆的可能性。波兰国家标准建议岩爆预测的能量判据 W_{ET} 同表 1。

本次试验将岩样加工成高径比为 2:1 的标准试件, 在中南大学微机控制电液伺服刚性试验机上进行峰值前的加卸载试验。首先以 200N/s 加载速率加载, 加载终值为岩样峰值强度的 80% 左右, 然后以 200N/s 卸载至零。根据试验记录的应力应变曲线, 用图形积分法求出岩石峰值载荷前的弹性变形储能与塑性变形耗能之比。实验结果及其岩爆倾向性如表 2 所示。

1.4 岩体结构与岩爆关系

一般情况下, 岩体的完整性较好, 易引起高应力集中和能量积聚, 使岩体具有较高的弹性应变能储能, 从而具有较大的岩爆倾向性。许多学者从不同角度讨论了两者的关系, 目前应用比较广泛的描述围岩完整性的参数主要有岩体质量 RQD 指标和围岩质量 RMR 等^[6], 本研究在充分考虑各评价方法评判内容的基础上, 结合金川现场调研及已有相关资料^[17-18], 采用 Z. T. Bieniawski 的标准划分^[19], 综合考虑完整岩石强度

指标、岩石质量、节理间距、节理条件及地下水影响等方面因素的围岩分类标准。一般认为, 围岩类别与岩爆等级关系如表 1 所示, 则金川深部围岩类别及岩爆倾向性如表 2 所示。同时, 为后续分析方便, 在此对其指标进行量化, 并设定 I 类围岩为 1, II 类围岩为 2, ..., 依此类推。

2 岩爆倾向性综合评价

使用不同判据可从岩爆诱发因素多角度探讨金川深部不同岩性的岩爆倾向性, 但限于各判据着力点的不同, 4 种判据评判同一岩性时, 其有不同的倾向烈度, 给矿山安全生产带来困扰。本研究在总结以往研究成果的基础上, 以上述判据为主要指标, 运用模糊数学方法, 综合评判金川各岩性的岩爆倾向。

2.1 建立模糊综合决策模型

因素集 U 、岩爆烈度评价集 V 、模糊矩阵 R 是模糊综合决策模型的三要素。

2.1.1 因素集

为对岩爆烈度程度作正确评判, 首先要建立相应的评判因素集, 取上述 4 个指标因素作为评价体系的因素集, 即

$$U = \{R, \alpha, W_{ET}, RMR\} = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$$

2.1.2 岩爆烈度评价集

4 个指标因素分别对岩爆发生程度进行了分级。以此为依据, 将个别判据分级界限进行调整, 统一将岩爆程度分为四级, 即无岩爆、弱岩爆、中岩爆和强岩爆, 则

$$V = \{\text{无岩爆、弱岩爆、中岩爆、强岩爆}\} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$$

2.1.3 单因素评判 f

由 $U \rightarrow g(V), u_i \rightarrow f(u_i)(v_j) = r_{ij}$, 则得模糊矩阵 R 如下

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

针对各评价指标进行统计分析, 根据其分布特点, 选取 k 次抛物线型模糊分布, 则标准方程式为

$$u_1(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i < a_i \\ \left(\frac{b_i - x_i}{b_i - a_i} \right)^k & a_i \leq x_i \leq b_i \\ 0 & x_i > b_i \end{cases} \quad (4)$$

$$u_2(x_i) = \begin{cases} \left(\frac{b_i - a_i}{b_i - x_i} \right)^k & x_i < a_i \\ 1 & a_i \leq x_i \leq b_i \\ \left(\frac{b_i - a_i}{x_i - a_i} \right)^k & x_i > b_i \end{cases} \quad (5)$$

$$u_3(x_i) = \begin{cases} \left(\frac{c_i - b_i}{c_i - x_i} \right)^k & x_i < b_i \\ 1 & b_i \leq x_i \leq c_i \\ \left(\frac{c_i - b_i}{x_i - b_i} \right)^k & x_i > c_i \end{cases} \quad (6)$$

3) 以模糊数学综合评判法综合考虑岩爆发生的影响因素,采用抛物型隶属度函数确定强度脆弱系数等 4 个指标因素对于岩爆烈度的隶属度,并运用专家打分的方法获得各指标权重,综合考虑各因素的权重及隶属度,进而采用加权平均模型得出金川二矿区深部花岗岩等 6 种典型岩性均具有弱岩爆倾向性,与二矿区既有相关资料相符,对矿山安全生产具有指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 陶振宇, 潘别桐. 岩石力学原理与方法 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 46-55.
Tao Zhenyu, Pan Bietong. Theory and method of rock mechanics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 46-55.
- [2] 徐林生, 王兰生, 李天斌. 国内外岩爆研究现状综述[J]. 长江学院院报, 1999, 16(4): 24-28.
Xu Linsheng, Wang Lansheng, Li Tianbin. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 24-28.
- [3] 唐绍辉, 吴壮军, 陈向华. 地下深井矿山岩爆发生规律及形成机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 23(8): 1250-1254.
Tang Shaohui, Wu Zhuangjun, Chen Xianghua. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1250-1254.
- [4] 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. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(3): 31-34.
- [5] 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. Mining and Metallurgical Engineering, 2003, 23(5): 8-11.
- [6] 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 411-416.
- [7] 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493-501.
- [8] 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. Gold, 2006, 27(11): 26-29.
- [9] 许梦国, 杜子建, 姚高辉, 等. 程潮铁矿深部开采岩爆预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 2): 493-501.
Xu Mengguo, Du Zijian, Yao Gaozhui, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 493-501.
- [10] 王湘锋. 锦屏二级水电站深埋特长引水隧洞岩爆模拟及预测研究[D]. 成都: 成都理工大学环境与土木工程学院, 2006: 64-87.
Wang Xiangfeng. Research of rockburst simulation and prediction in deep-buried extra long diversion tunnel at Jinping II hydroelectric power station [D]. Chengdu: College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, 2006: 64-87.
- [11] 蔡美峰, 乔兰, 于波, 等. 金川二矿区深部地应力测量及其分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 414-418.
Cai Meifeng, Qiao Lan, Yu Bo, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(4): 414-418.
- [12] 吴满路, 马宇, 廖椿庭, 等. 金川二矿深部 1000 米中段地应力测量及应力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 2): 3785-3790.

- Wu Manlu, Ma Yu, Liao Chunting, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3785-3790.
- [13] Kidybinski A. Bursting liability indices of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6): 295-304.
- [14] 徐林生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施的研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 61-64.
Xu Linsheng. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(1): 61-64.
- [15] 谷明成, 何发亮, 陈成宗. 秦岭隧道岩爆的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1325-1329.
Gu Mingcheng, He Faliang, Chen Chengzong. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1325-1329.
- [16] 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. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 38-42.
- [17] 包四根, 张玉祥. 金川贫矿体地质模型的建立[J]. 有色冶炼, 1999, 28(增): 97-100.
Bao Sigeng, Zhang Yuxiang. Non-Ferrous Smelting, 1999, 28(Suppl): 97-100.
- [18] 岳斌, 王永才. 金川二矿区深部工程地质研究与岩体质量评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 2): 2615-2619.
Yue Bin, Wang Yongcai. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2615-2619.
- [19] 王文星. 岩体力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004: 114-117.
Wang Wenxing. Rocks mass mechaucs [M]. Changsha: Central South University Press, 2004: 114-117.

(责任编辑 岳臣)

·学术动态·



“第六届中国测试学术会议 (CTC2010)”征文

由中国计算机学会主办、合肥工业大学承办的“第六届中国测试学术会议 (CTC2010)”将于 2010 年 7 月 24-25 日在合肥工业大学召开。

会议现面向相关科技工作者征文,征文范围(不仅限于下面的内容):ATPG;内建自测试(BIST);测试数据压缩;测试中的功耗问题;在线测试;板级测试;硅片验证与特性测试;生产测试;嵌入式系统设计与测试;SoC/NoC 测试;延迟和性能测试;电流测试;At-speed 测试;缺陷测试;故障诊断;微处理器测试;存储器测试;良品率分析测试;可测试性设计;可调试性设计;可靠性设计和测试;模拟和混合信号测试;测试综合;设计验证;ATE 硬件和软件;RF 测试;容错理论与体系结构;容错软件与应用;软件测试;软件可靠性;系统级测试和诊断;网络测试;信息安全;测试经济学;可信计算。论文提交截止日期:2010 年 3 月 30 日。

会议网站: <http://ctc2010.hfut.edu.cn>, 电子信箱: ctc2010@hfut.edu.cn。