

DOI: 10.11779/CJGE202011015

# 引入梯度应力的岩爆预测方法

何佳其<sup>1</sup>, 吝曼卿<sup>1</sup>, 刘夕奇<sup>2</sup>, 张 兰<sup>1</sup>, 张电吉<sup>1</sup>, 熊 文<sup>2</sup>, 彭亚利<sup>3</sup>

(1. 武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

3. 湖北兴发化工集团股份有限公司, 湖北 宜昌 443711)

**摘 要:** 地下工程开挖过程中, 深部岩体在开挖扰动作用下, 洞壁附近围岩所受切向应力呈梯度分布。为探索梯度应力对岩体产生岩爆特性的影响, 借助自主研发的 YB-A 型气液复合岩爆模拟试验装置对大尺寸试件进行不同梯度应力作用下的岩爆试验, 且在结合大量工程实例的基础上, 引入梯度应力强度比对强度 - 应力比判据进行优化, 建立一种引入梯度应力的岩爆预测方法。结果表明, 岩体岩爆烈度与其所受梯度应力存在明显的相关性, 考虑梯度应力的岩爆判据克服了传统的强度 - 应力比指标区间不均匀的问题, 预测准确率提高到 90.4%, 为地下工程岩爆预测提供理论依据。  
**关键词:** 梯度应力; 岩爆预测; 烈度; 强度比

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2020)11 - 2098 - 08

**作者简介:** 何佳其(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下工程稳定性等方面的研究。E-mail: 18872156996@163.com。

## New method for introducing gradient stress into rock-burst prediction

HE Jia-qi<sup>1</sup>, LIN Man-qing<sup>1</sup>, LIU Xi-qi<sup>2</sup>, ZHANG Lan<sup>1</sup>, ZHANG Dian-ji<sup>1</sup>, XIONG Wen<sup>2</sup>, PENG Ya-li<sup>3</sup>

(1. School of Resources of Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. Hubei Xing-fa Chemical Group Co., Ltd., Yichang 443711, China)

**Abstract:** During the excavation of underground projects, the tangential stress in the surrounding rock near the cave wall is distributed in a gradient because of the disturbance of excavation unloading in the deep rock mass. In order to explore the effects of gradient stress on rock-burst characteristics, the rock-burst tests under the effects of different gradient stresses on large-sized specimens are conducted with the help of the independently developed rock-burst test simulation device. It is found that there is an obvious correlation between the intensity of rock-burst of rock mass and the gradient stress that it is subjected to. On the basis of considering a large number of engineering examples, the intensity ratio of gradient stress is introduced to optimize the intensity stress ratio criterion so as to establish a prediction method for rock-burst with gradient stress. The results show that there is a clear correlation between the intensity of rock-burst of rock mass and the gradient stress it is subjected to. The criterion considering the gradient stress of the rock-burst overcomes the uneven problem of the traditional intensity-stress ratio index, and the prediction accuracy is raised to 90.4%, which provides a theoretical basis for the prediction of rock-burst of underground projects.

**Key words:** gradient stress; rock-burst prediction; intensity; intensity ratio

## 0 引 言

随着浅层资源日益短缺<sup>[1]</sup>, 资源开采已转向深部地区。随着地下工程开挖深度的增加, 开挖造成的岩爆风险逐步提高, 并直接威胁到井下工作人员的人身安全<sup>[2]</sup>。岩爆是深部岩体工程中常见的一种灾害现象, 具有围岩突然、猛烈地向开挖临空面弹射、抛掷、喷出的现象<sup>[3]</sup>。由于岩爆的产生会造成采掘空间中支护设备的破坏及采掘空间的变形, 严重时造成人员伤亡和采掘设备的破坏, 甚至引起局部矿震。因此, 提前对施工过程中的岩爆进行准确预测, 对保障深部工程施工人员安全具有十分重要的指导意义。

早期的岩爆研究中, 各国学者从单一因素角度进行岩爆预测研究<sup>[4]</sup>, 并提出相应的岩爆倾向性评价方法。这些方法从能量、刚度、弹性能量指数  $W_{et}$ <sup>[5]</sup>、冲击能量指数  $W_{cr}$ <sup>[6]</sup>、脆性系数  $B$ <sup>[7]</sup>、岩体完整性指数  $K_v$  及强度应力比等角度出发对岩爆烈度进行预测。随着

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51504167, 51474159); 武汉工程大学研究生创新基金项目 (CX2019093); 2018 年第一批产学研合作协同育人项目 (201801081001); 武汉工程大学校基金项目 (K201856); 中央高校基本科研业务费资助项目 (2017-YB-022); 湖北省中央引导地方科技发展专项项目 (2017ZYDD007)

**收稿日期:** 2019 - 12 - 25

\*通信作者 (E-mail: manqing\_lin@foxmail.com)

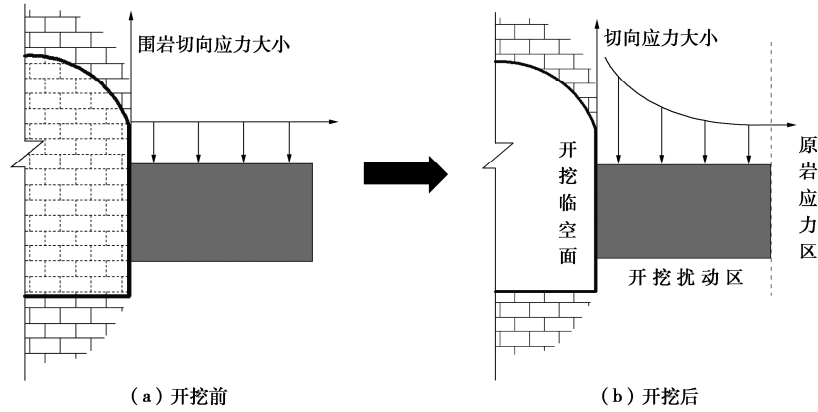


图 1 隧道开挖前后围岩的切向应力分布图

Fig. 1 Distribution of tangential stress of surrounding rock before and after tunnel excavation

研究的深入, 研究者们发现, 岩爆是一种非常复杂的非线性动力学现象, 单因素预测方法很难准确预测岩爆。因此借助非线性理论<sup>[8]</sup>, 将影响岩爆的多个因素综合分析来对岩爆进行预测, 使得岩爆预测取得一定进展。然而, 这些综合预测方法受制于岩爆预测理论的创新, 要做到更为精准的岩爆预测, 还需从岩爆孕育的理论角度进行深入研究。强度应力比判据分类见表 1。

表 1 强度应力比判据分类

Table 1 Classification of stress intensity ratio criterion

判据	工程实例	判断指标
挪威 Russense 判据	挪威矿山	$\sigma_{\theta_{max}} / R_c$
苏联 Turchaninov 判据	科拉半岛矿井	$(\sigma_{\theta_{max}} + \sigma_1) / R_c$
中国陶振宇判据	中国隧道	$R_c / \sigma_1$
Hoek 判据	南非矿山	$\sigma_{\theta_{max}} / R_c$
徐林生等	二郎山隧道	$\sigma_{\theta_{max}} / R_c$

由于在地下洞室开挖过程中, 岩体原岩应力状态被破坏, 围岩内各质点应力重新分布直至到达新的平衡。围岩的切向应力在洞壁处较大, 并以一定梯度向围岩内部递减, 呈现出在洞壁处的应力集中现象<sup>[9-10]</sup>, 如图 1 所示。

由此可见, 无论是单因素应力比岩爆判据还是多因素非线性预测方法, 若简单地以应力相对大小作为岩爆判据的依据, 而忽略了围岩梯度应力分布对岩爆孕育的影响, 则在一定程度上会影响岩爆预测的准确性。

## 1 不同梯度应力加载下的试验探究

### 1.1 试验简介

为研究梯度应力对岩爆孕育的影响, 借助自主研发的 YB-A 型气液复合岩爆模拟试验装置对模型试件进行梯度应力作用下的加载试验, 拟在室内再现岩体在不同梯度应力作用下的岩爆现象, 分析应力梯度改

变对产生岩爆特性的影响, 试验装置如图 2 所示。

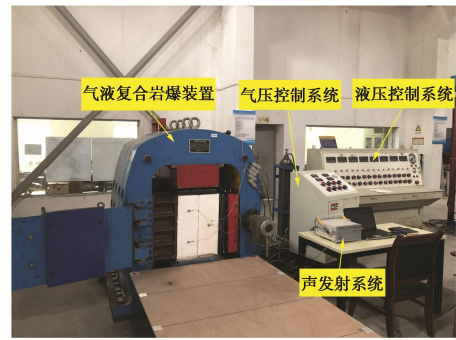


图 2 自主研发的 YB-A 型岩爆模拟试验装置

Fig. 2 Developed YB-A type rock-burst simulation test device

为模拟地下开挖洞室围岩受力状态, 试件在岩爆试验装置中受三向六面加载, 顶部为分级梯度加载, 右侧和后侧为均布加载, 其受力如图 3 所示。

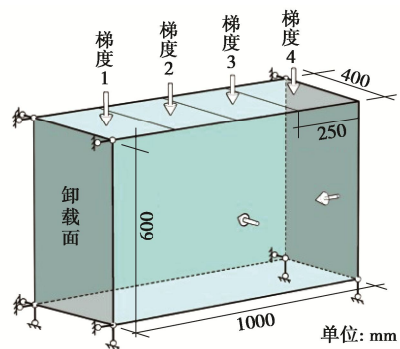


图 3 试件梯度应力加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of specimen loading under gradient stress

地下空间岩体开挖后, 洞室切向应力随围岩内部某点距洞壁水平距离的增大而减小, 可用函数  $y=ae^{-bx+c}$ <sup>[11]</sup> 近似模拟。其中,  $y$  是地下洞室围岩内部某点沿洞室切向的应力,  $x$  为围岩内部 (试件内部) 某点到洞壁 (卸载面) 的距离;  $a+c$  为洞壁围岩 ( $x=0$ ) 切向应力;  $c$  是原岩初始顶部压力;  $b$  为梯度系数, 其

值越大，代表模型顶部应力梯度差越大。加载路径 I 为大梯度加载，选取  $b=4$ ；加载路径 II 为小梯度加载，选取  $b=2$ ；加载路径 III 为均布加载，选取  $b=0$ ；具体路径如图 4 所示。

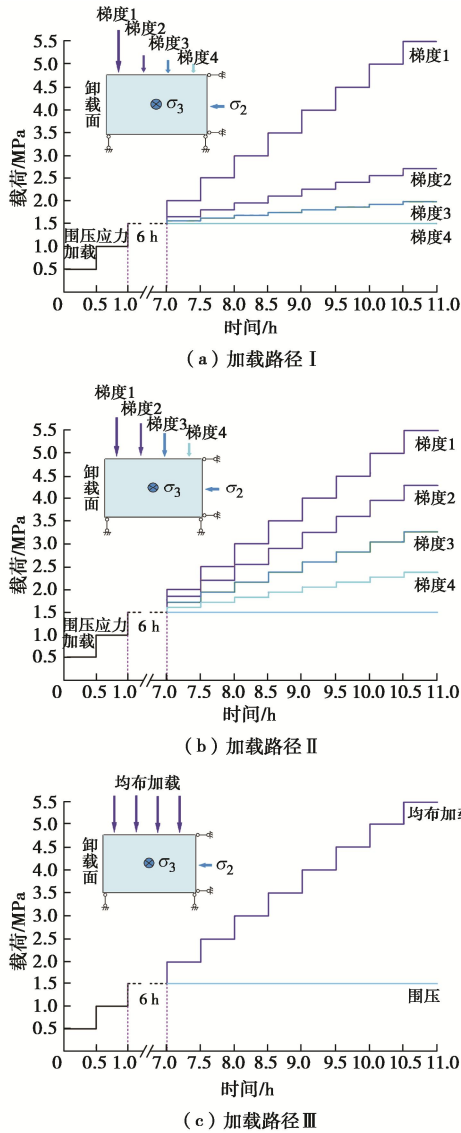


图 4 试件应力加载路径

Fig. 4 Stress loading paths of specimen

### 1.2 试验结果及分析

试件在不同加载路径下的岩爆宏观破坏图见图 5。试件在加载路径 I 的作用下发生岩爆时，试件卸载面突然崩出几块体积较大的岩块，且弹射距离较远，岩爆碎屑最远崩射距离达 1.2 m，具有明显的动力学特征，发生岩爆时，试件所受梯度 1 最大载荷为 5.0 MPa。

试件在加载路径 II 的作用下发生岩爆时，试件卸载面弹射出大量岩块碎屑，岩爆碎屑弹射距离主要集中在 0~1 m 以内，发生岩爆时，试件所受梯度 1 最大载荷为 5.3 MPa。

试件在加载路径 III 的作用下发生岩爆时，试件卸

载面短时间出现大量片状岩块剥落，试件破坏特征与井下片帮较为相似，试件碎屑抛射距离主要集中在 0~0.5 m 之间，试件岩爆瞬间，所受梯度 1 最大载荷为 5.5 MPa。



(a) 加载路径 I 下 (b) 加载路径 II 下 (c) 加载路径 III 下  
图 5 试件在不同加载路径下的岩爆宏观破坏图

Fig. 5 Macroscopic failure of rock-burst of specimens under different loading paths

此外，统计试件在 3 种加载路径下产生的碎屑、分析宏观特征及耗能大小，其结果见表 2。

表 2 3 种加载路径下的各项差异

Table 2 Differences of three loading paths

加载路径	梯度	岩爆 声响	抛射距离 /m	耗能	岩爆 烈度
加载路径 I	大	清脆	0~1.2	低	强
加载路径 II	小	清脆	0~1	中	中
加载路径 III	无	低沉	0~0.5	高	弱

注：耗能相对大小 =  $\Sigma$  加载时间  $\times$  载荷。

由表 2 发现，随着加载梯度的增加岩爆烈度越大、碎屑抛射距离越远且发生岩爆时消耗的能量越少。由此说明，岩爆发生不仅与岩体所受应力大小相关，也与岩体所受的梯度应力分布相关。因此，很有必要在岩爆预测公式中引入梯度应力因子。

## 2 预测公式的提出

### 2.1 应力路径的简化表示

为在岩爆预测公式中引入梯度应力，对围岩应力扰动区做一定的简化。理论分析可知，由荷载释放引起的洞周介质应力和位移变化，3 倍洞径之外小于 5%。因此，假定三倍洞径处等于原岩应力（图 6）。

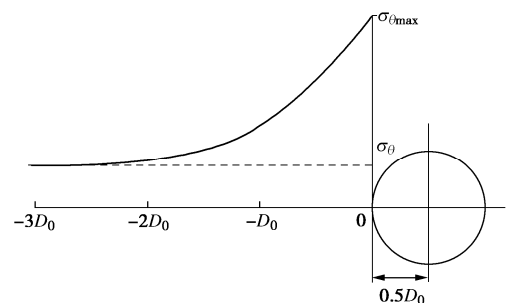


图 6 开挖洞室围岩的切向应力分布形式

Fig. 6 Distribution of tangential stress of surrounding rock of excavation chamber

由于围岩应力的变化率并非定值, 为方便表征二次应力在围岩扰动区的集中程度, 可通过计算围岩应力的平均变化率  $\bar{k}$ ,

$$\bar{k} = \frac{\int_0^{3R_0} f'(x) dx}{3R_0 - 0} = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{3R_0} \quad (1)$$

式中  $f(x)$  为围岩应力分布曲线的函数表达式,  $R_0$  为开挖洞径 (m), 对于非圆形硐室, 采用当量方法来计算其洞径;  $\sigma_{\theta}$  为开挖前隧道横截面最大初始应力 (MPa);  $\sigma_{\theta\max}$  为洞壁切向应力最大值 (MPa)。

将平均变化率命名为应力集度  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{3R_0} \quad (2)$$

为简化计算过程, 去掉公式中的常数项:

$$\eta = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{R_0} \quad (3)$$

本判据考虑硐室开挖引起扰动区围岩切向梯度应力对岩爆的影响, 提出梯度应力强度比  $\beta$ , 用应力集度除以应力强度比来将岩爆等级线性表示:

$$\beta = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{R_0} \cdot \frac{R_c}{\sigma_{\theta\max}} \quad (4)$$

## 2.2 岩爆工程实例统计分析

用梯度应力强度比判据预测岩爆烈度, 需代入岩爆实例数据计算公式结果, 并对结果进行区域划分(表 3)。通过搜集大量国内外岩爆工程实例, 主要对各地下隧道工程的最大主应力  $\sigma_{\theta}$ 、最大切向应力  $\sigma_{\theta\max}$ 、洞径  $R_0$ 、岩石单轴抗压强度及岩爆等级进行统计。

据上述数据计算各实例中的应力强度比  $\sigma_{\theta\max} / R_c$ 、应力集度  $\left( \eta = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{R_0} \right)$  及梯度应力强度比  $\left( \beta = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{R_0} \cdot \frac{R_c}{\sigma_{\theta\max}} \right)$  同时对比传统岩爆判据 ( $\sigma_{\theta\max} / R_c$  判据) 对案例的预测结果。具体数据见表 4~6 所示, 数据引自文献[12~20]。

表 3  $\sigma_{\theta\max} / R_c$  判据关系式<sup>[21]</sup>

分段区间	岩爆等级
$\sigma_{\theta\max} / R_c < 0.3$	无岩爆
$0.3 \leq \sigma_{\theta\max} / R_c < 0.5$	弱岩爆
$0.5 \leq \sigma_{\theta\max} / R_c < 0.7$	中岩爆
$\sigma_{\theta\max} / R_c \geq 0.7$	强岩爆

表 4 现场工程岩爆统计 ( $\sigma_{\theta\max} / R_c \leq 0.3$ )

Table 4 Statistics of field rock-bursts ( $\sigma_{\theta\max} / R_c \leq 0.3$ )

隧道名称	$\sigma_{\theta\max} / R_c$	$\eta / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$\beta$	实际岩爆等级	$\sigma_{\theta\max} / R_c$ 法预测结果
鲁布革	0.23	2.13	9.24	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K261+701)	0.28	3.73	13.34	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K262+740)	0.11	0.58	5.31	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K262+461)	0.12	0.55	4.54	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K262+444)	0.10	0.59	5.87	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K262+445)	0.08	0.39	4.90	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K262+298)	0.26	1.49	5.72	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K261+701)	0.11	1.04	9.45	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道	0.28	1.94	7.00	无岩爆	无岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K262+29)	0.26	2.652	10.20	弱岩爆	弱岩爆

表 5 现场工程岩爆统计 ( $0.3 < \sigma_{\theta\max} / R_c \leq 0.4$ )

Table 5 Statistics of field rock-bursts ( $0.3 < \sigma_{\theta\max} / R_c \leq 0.4$ )

隧道名称	$\sigma_{\theta\max} / R_c$	$\eta / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$\beta$	实际岩爆等级	$\sigma_{\theta\max} / R_c$ 法预测结果
太平驿	0.38	3.48	9.16	弱岩爆	弱岩爆
中天山隧道 (SZ-2)	0.33	1.99	5.96	弱岩爆	弱岩爆
中天山隧道 (SZ-2-1)	0.33	1.82	5.47	弱岩爆	弱岩爆
中天山隧道 (SZ-5)	0.34	2.14	6.31	弱岩爆	弱岩爆
中天山隧道 (SZ-6)	0.35	1.65	4.71	弱岩爆	弱岩爆
秦岭公路隧道 2 号竖井	0.36	2.33	6.54	弱岩爆	弱岩爆
巴陕高速米仓山隧道	0.35	6.44	18.39	弱岩爆	弱岩爆
瑞典 Headrace 隧道	0.38~0.41	5.195~5.844	12.67~15.38	弱岩爆	弱岩爆
挪威 Eikesdal 公路隧道	0.35	5.91	16.74	弱岩爆	弱岩爆

表6 现场工程岩爆统计 ( $0.4 < \sigma_{\theta_{\max}} / R_c$ )  
 Table 6 Statistics of field rock-bursts ( $0.4 < \sigma_{\theta_{\max}} / R_c$ )

隧道名称	$\sigma_{\theta_{\max}} / R_c$	$\eta / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$\beta$	实际岩爆等级	$\sigma_{\theta_{\max}} / R_c$ 法预测结果
Mine-by 试验洞	0.77	31.10	40.39	弱岩爆	强岩爆
锦屏II引水隧洞	0.82	3.45	4.21	中岩爆	强岩爆
锦屏II排水隧洞	0.82	7.02	8.56	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+700.00)	1.80	13.76~14.87	7.64~8.26	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+693.33)	1.76	13.77~14.89	7.82~8.46	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+685.75)	1.73	13.67~14.80	7.9~8.55	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+675.30)	1.83	13.56~14.78	7.4~8.07	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+670.70)	1.86	13.44~14.6	7.26~7.85	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+663.25)	1.82	14.05~15.11	7.72~8.3	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+653.77)	1.84	14.06~15.14	7.64~8.23	强岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+644.55)	0.89	5.25~6.10	5.9~6.85	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+633.73)	0.85	5.14~5.99	6.05~7.05	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+629.63)	0.85	5.12~5.98	6.02~7.04	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+626.28)	0.88	5.18~6.05	5.89~6.88	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+622.66)	0.86	5.14~6.01	5.98~6.99	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+619.16)	0.89	5.11~5.98	5.74~6.72	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (09+610.02)	0.96	5.11~5.99	5.32~6.24	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+989.87)	1.56	16.16~17.17	10.36~11.01	弱岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+977.90)	1.45	16.13~17.19	11.12~11.86	弱岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+970.93)	1.60	16.17~17.22	10.1~10.76	弱岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+959.89)	1.83	16.11~17.16	8.8~9.38	弱岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+956.59)	2.21	16.15~17.21	7.3~7.79	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+941.71)	1.68	16.13~17.18	9.6~10.22	弱岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+937.23)	1.70	16.20~17.26	9.53~10.15	弱岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+926.18)	2.42	15.97~17.06	6.60~7.05	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+915.57)	1.78	16.00~17.09	8.99~9.6	弱岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+893.42)	3.09	15.96~17.05	5.17~5.52	中岩爆	强岩爆
Neelum-Jhelum 引水隧洞 (07+889.00)	2.84	15.97~17.05	5.62~6	中岩爆	强岩爆
二滩水电站	0.41	4.92	12.00	弱岩爆	弱岩爆
中天山隧道	0.56	3.18	5.72	中岩爆	中岩爆
巴玉隧道 (DK193+566)	0.463	3.87	8.36	强岩爆	弱岩爆
巴玉隧道 (DK201+410)	0.378	2.58	7.56	弱岩爆	弱岩爆
巴玉隧道 (DK195+443)	0.596	2.86	7.99	强岩爆	中岩爆
巴玉隧道 (DK196+726)	0.586	4.68	7.99	强岩爆	中岩爆
巴玉隧道 (DK193+545)	0.459	3.84	8.37	强岩爆	弱岩爆
巴玉隧道 (DK194+637)	0.559	4.45	7.96	强岩爆	中岩爆
猴子山	0.72	3.53	4.90	中岩爆	强岩爆
秦岭公路隧道2号竖井	0.45	2.86	6.36	中岩爆	弱岩爆
秦岭公路隧道2号竖井	0.57	3.55	6.23	中岩爆	中岩爆
秦岭公路隧道2号竖井	0.44	2.77	6.25	弱岩爆	弱岩爆
挪威西玛水电站地下厂房	0.71	2.45	3.47	中岩爆	强岩爆
日本关越公路隧道	1.06	15.56	14.64	弱岩爆	强岩爆
挪威 Sewage 隧道	0.56	22.31	39.56	弱岩爆	中岩爆
中国天生桥引水隧洞	0.68	4.367~4.937	6.39~7.23	中岩爆	中岩爆
中国锦屏水电地质探洞	0.386~0.588	10.65	27.59~18.11	弱岩爆	弱岩爆—中岩爆
中国太平峰水工隧洞	0.410~0.431	5.00	12.20~11.60	弱岩爆	弱岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K261+ 939)	1.38	7.82	5.68	中岩爆	强岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K261+ 905)	0.64	0.03	0.05	中岩爆	中岩爆
二郎山公路隧道 (平导 K261+ 761)	0.48	0.03	0.06	弱岩爆	弱岩爆



续表 6

隧道名称	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c$	$\eta/(MPa \cdot m^{-1})$	$\beta$	实际岩爆等级	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c$ 法预测结果
二郎山公路隧道	0.71	4.66	6.56	强岩爆	强岩爆
锦屏 I 级	1.00	3.21	3.21	弱岩爆	强岩爆
渔子溪一级水电站引水隧洞	0.53	7.26	13.72	弱岩爆	中岩爆
冬瓜铜矿	0.80	5.15	6.45	中岩爆	强岩爆
中国凡口铅锌矿	0.42	3.60	8.57	强岩爆	弱岩爆

表 7 双江口坝区岩爆情况及预测结果

Table 7 Rock-bursts in Shuangjiangkou dam area and predicted results

岩爆的位置	破坏现象与岩爆烈度	应力特征	本文的预测结果	传统 $\sigma_{\theta_{max}}/R_c$ 预测
SPD9 (115 m)	多呈爆裂脱落、少量弹射。(中岩爆)	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c = 0.62$ $\beta = 3.80$	中岩爆	中岩爆
SPD9 (205 m)	出现片帮 (弱岩爆)	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c = 0.78$ $\beta = 3.31$	弱岩爆	强岩爆
SPD9 (301~305 m)	零星岩爆 (弱岩爆)	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c = 0.57$ $\beta = 3.67$	弱岩爆	中岩爆
SPD9 (400~405 m)	多呈爆裂脱落、最大块度 1.2 m×0.6 m, 厚 70~100 mm。(中岩爆)	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c = 1.21$ $\beta = 3.73$	中岩爆	强岩爆
SPD10 (300 m)	壁面出现短小裂隙。(弱岩爆)	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c = 0.64$ $\beta = 3.62$	弱岩爆	中岩爆
SPD10 (300 m)	(中岩爆)	$\sigma_{\theta_{max}}/R_c = 0.84$ $\beta = 3.94$	中岩爆	强岩爆

对大量数据整理可知, 当强度应力比小于 0.4 时, 只会发生弱岩爆或不发生岩爆; 当强度应力比大于 0.4 时, 应力路径对岩爆等级的影响增强。根据梯度应力比与岩爆等级的经验拟合可知双方存在一定的线性关系, 即岩爆等级可由梯度应力强度比来确定。岩爆等级二维分布图如图 7 所示。

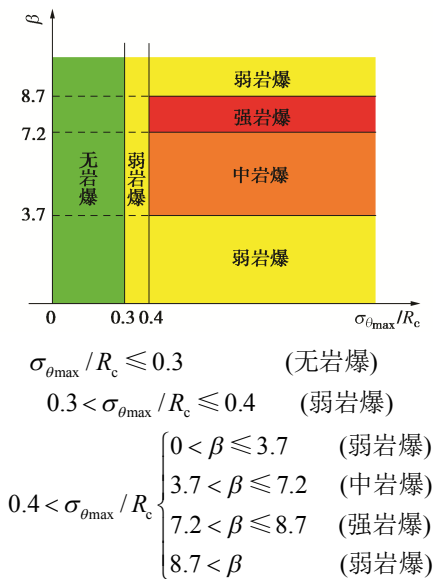


图 7 岩爆等级二维分布图

Fig. 7 Two-dimensional distribution of rock burst grade

由应力强度比  $\sigma_{\theta_{max}}/R_c$  分组数据见表 4~6。对表中数据统计可得, 统计总案例 73 件, 当梯度应力强度比计算所得预测岩爆烈度与实际岩爆烈度不符视为失败, 其中预测失败的案例为 7 件, 即该岩爆预测方法预测准确率为 90.4%, 而根据传统岩爆判据  $\sigma_{\theta_{max}}/R_c$  判据对该 73 件案例进行预测, 成功案例数仅为 36 件, 预测准确率为 49%。说明引入梯度应力比判据极大提高了岩爆预测准确率。

### 3 案例分析

双江口水电站地处深山峡谷之中, 新构造运动总体表现为以升降运动为主的整体、间歇性强烈抬升, 区域构造应力作用方向表现为近 EW 向的挤压。花岗岩生成于燕山期, 岩体致密坚硬完整, 抗变形性能强, 故容易蓄集较高的应变能, 应力相对集中且地应力较高。前期勘探平硐已发现有片帮、弯折内鼓现象; 筹建期在多处公路隧道、导流洞均可见岩爆发生, 爆坑深度达 0.1~0.6 m, 影响施工进度, 给工程造成安全隐患, 也增加了工程投资。其中部分典型区域岩爆特征及预测结果见表 7<sup>[22-23]</sup>。

从表 8 预测结果可知, 双江口坝区不同位置岩爆案例共 6 件, 传统应力强度比判据的预测结果成功案例仅为 1 件, 与实际岩爆强度存在一定差异。然而,

采用梯度应力强度比预测,发现6件案例全部预测成功,说明梯度应力强度比较传统应力强度比有一定优势,对于预测岩爆更具有适用性。

## 4 结 论

(1) 本文借助自主研发的 YB-A 型气液复合岩爆模拟试验装置对大尺寸试件进行不同梯度应力作用下的岩爆试验,通过观察岩爆宏观破坏现象,并统计岩爆碎屑分布,分析岩爆烈度与应力梯度大小之间的关系发现,岩体所受的应力梯度越大,产生岩爆的烈度越大,且发生岩爆时消耗能量较小。

(2) 为正确刻画梯度应力对岩爆的影响,引入应力集度描述梯度应力对岩爆影响程度,并提出梯度应力强度比刻画梯度应力与岩爆烈度的关系,应力集度和梯度应力强度比的表达式分别为  $\eta = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{R_0}$ ,

$$\beta = \frac{\sigma_{\theta\max} - \sigma_{\theta}}{R_0} \cdot \frac{R_c}{\sigma_{\theta\max}}。$$

(3) 通过对大量国内外工程实例进行划分岩爆区间,并对其验证,得知该判据具有 90.4% 的准确率,克服了传统的强度-应力比指标区间不均匀的问题。该预测方法对地下工程设计、施工和室内岩爆模拟试验具有重要的指导意义。

## 参考文献:

[1] GUO Z P, YANG H Z, XIE W W, et al. Analysis of rock burst risk of roadway in lower seam “knife handle” type isolated working face[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019: 1 - 13.

[2] 徐琛, 刘晓丽, 王恩志, 等. 基于组合权重-理想点法的应变型岩爆五因素预测分级[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(12): 103 - 110. (XU Chen, LIU Xiao-li, WANG En-zhi, et al. Prediction and classification of strain mode rock-burst based on five-factor criterion and combined weight-ideal point method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(12): 103 - 110. (in Chinese))

[3] JIANG F X, WEI Q D, WANG C W, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 2014, **39**(7): 1191 - 1196.

[4] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, **26**(5): 1012 - 1018. (GONG Feng-qiang, LI Xi-bing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and

classification of rockburst and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(5): 1012 - 1018. (in Chinese))

[5] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. *Rock Mech and Min Sci*, 1981, **18**(6): 295 - 304.

[6] 宫凤强, 闫景一, 李夕兵. 基于线性储能规律和剩余弹性能指数的岩爆倾向性判据[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(9): 1993 - 2014. (GONG Feng-qiang, YAN Jing-yi, LI Xi-bing. A new criterion of rock burst proneness based on the linear energy storage law and the residual elastic energy index[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(9): 1993 - 2014. (in Chinese))

[7] 李庶林, 冯夏庭, 王泳嘉, 等. 深井硬岩岩爆倾向性评价[J]. *东北大学学报*, 2001, **22**(1): 60 - 63. (LI Shu-lin, FENG Xia-ting, WANG Yong-jia, et al. Evaluation of Rockburst Proneness in a Deep Hard Rock Mine[J]. *Journal of Northeastern University*, 2001, **22**(1): 60 - 63. (in Chinese))

[8] 高 玮. 基于蚁群聚类算法的岩爆预测研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(6): 874 - 880. (GAO Wei. Prediction of rock burst based on ant colony clustering algorithm[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(6): 874 - 880. (in Chinese))

[9] LIU X Q, XIA Y Y, LIN M Q. Experimental study of rockburst under true-triaxial gradient loading conditions[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2019, **18**(5): 481 - 492.

[10] 夏元友, 吝曼卿, 廖璐璐, 等. 大尺寸试件岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, **33**(7): 1358 - 1365. (XIA Yuan-you, LIN Man-qing, LIAO Lu-lu, et al. Fractal characteristic analysis of fragments from rock-burst tests of large-diameter specimens[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(7): 1358 - 1365. (in Chinese))

[11] BROWN E T, HOEK E. Trends in relationships between measured in-situ, stresses and depth[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 1978, **15**(4): 211 - 215.

[12] 黄 海. 中天山隧道地应力测量及岩爆预测研究[J]. *国防交通工程与技术*, 2011, **9**(3): 45 - 48. (HUANG Hai. Study of the crustal stress survey and rock burst prediction for the Zhongtianshan Tunnel[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2011, **9**(3): 45 - 48. (in Chinese))

[13] 尚彦军, 张镜剑, 傅冰骏. 应变型岩爆三要素分析及岩爆势表达[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, **32**(8): 1520 - 1527.

- (SHANG Yan-jun, ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Analyses of three parameters for strain mode rockburst and expression of rockburst potential[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1520 - 1527. (in Chinese))
- [14] 张志强, 关宝树, 翁汉民. 岩爆发生条件的基本分析[J]. 铁道学报, 1998(4): 83 - 86. (ZHANG Zhi-qiang, GUAN Bao-shu, WEN Han-ming, Basic Analysis of Rock Bursting Occurrence Condition[J]. Journal of the China Railway Society, 1998(4): 83 - 86. (in Chinese))
- [15] 刘章军, 袁秋平, 李建林. 模糊概率模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 3095 - 3103. (LIU Zhang-jun, YUAN Qiu-ping, LI Jian-lin. Application of fuzzy probability model to prediction of classification of rockburst intensity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 3095 - 3103. (in Chinese))
- [16] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 基于改进的灰评估模型在岩爆中的预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(10): 2088 - 2093. (PEI Qi-tao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. Rockburst prediction based on a modified grey evaluation model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(10): 2088 - 2093. (in Chinese))
- [17] 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(3): 31 - 34. (XU Lin-sheng. Research of rockburst formation condition in underground engineering[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005(3): 31 - 34. (in Chinese))
- [18] 张传庆, 俞 缙, 陈 珺, 等. 地下工程围岩潜在岩爆问题评估方法[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 1): 341 - 349. (ZHANG Chuan-qing, YU Jin, CHEN Jun, et al. Evaluation method for potential rockburst in underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S1): 341 - 349. (in Chinese))
- [19] 陈卫忠, 马池帅, 田洪铭, 等. TBM 隧道施工期岩爆预测方法探讨[J]. 岩土力学, 2017, **38**(增刊 2): 241 - 249. (CHEN Wei-zhong, MA Chi-shuai, TIAN Hong-ming. Discussion on rockburst predictive method applying to TBM tunnel construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(S2): 241 - 249. (in Chinese))
- [20] ZHOU J, LI X B, SHI X Z. Long-term prediction model of rockburst in underground openings using heuristic algorithms and support vector machines[J]. Safety Science, 2012, **50**(4): 629 - 644.
- [21] 徐林生, 王兰生. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(5): 569 - 572. (XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng. Study on the laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang Mountain road[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(5): 569 - 572. (in Chinese))
- [22] 赵 军, 袁国庆, 唐世明. 双江口水电站地应力特征及岩爆成因分析与防治建议[J]. 四川地质学报, 2010, **30**(4): 500 - 503. (ZHAO Jun, YUAN Guo-qing, TANG Shi-ming. Characteristics of Ground Stress, Genesis and Control of Rock Burst for the Shuangjiangkou Hydropower Station[J]. Acta Geologica Sichuan, 2010, **30**(4): 500 - 503. (in Chinese))
- [23] 郭建强, 赵 青, 王军保, 等. 基于弹性应变能岩爆倾向性评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(9): 164 - 171. (GUO Jian-qiang, ZHAO Qing, WANG Jun-bao, et al. Rockburst prediction based on elastic strain energy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(9): 164 - 171. (in Chinese))