

# 西藏某铜矿排水巷施工区域岩爆倾向性 多判据研究

Research on Multiple Criteria of Rockburst Tendency in the Construction Area of  
Drainage Lane of a Copper Mine in Xizang Province

范家斌(西藏巨龙铜业有限公司, 西藏 拉萨 850200)

**摘要:**本文以西藏某铜矿排水巷施工区域为背景,应用室内单轴抗压强度测试、巴西圆盘劈裂强度测试、加卸载测试等获取施工区域岩石物理力学特性,利用线弹性指数判据、强度脆性指数判据和变形脆性系数判据等岩爆判据对现场不同地点、不同埋深岩石进行复合岩爆预测。结论显示,施工区域岩石岩爆倾向性为弱岩爆倾向和无岩爆倾向,岩爆发生概率较小、程度较轻微。在排水巷施工过程中,采用一般支护措施可防控岩爆灾害。基于多重岩爆倾向性判据的岩爆预测分析为排水巷施工区域的岩爆灾害预防提供了理论依据。

**关键词:**岩爆判据; 岩爆倾向性分析; 单轴抗压强度; 巴西圆盘劈裂测试; 排水巷施工

**中图分类号:** O319.56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)03-0059-05

**Abstract:** Rock burst is a sudden dynamic disaster in the process of underground construction, which poses a serious threat to the safety of personnel and equipment. Based on the construction area of a drainage roadway in a copper mine in Xizang Province, this paper applied indoor uniaxial compressive strength test, Brazilian disc splitting strength test, loading and unloading test to obtain the rock physical and mechanical characteristics of the construction area. The composite rock burst prediction of rock at different locations and buried depths is carried out by using four rock burst criteria, namely linear elastic index criterion, strength brittleness index criterion and deformation brittleness coefficient criterion. The conclusion shows that the rock burst tendency in the construction area is weak rock burst tendency and no rock burst tendency, and the rock burst occurrence probability is small and the degree is slight. Rock burst disaster can be prevented and controlled by adopting general support measures in the construction process of drainage lane. The rock burst prediction analysis based on multiple rock burst tendency criteria provides a theoretical basis for rock burst disaster prevention in the construction area of drainage lane.

**Key words:** rock burst criterion; rock burst tendency analysis; uniaxial compressive strength; brazilian disk splitting test; drainage lane construction

## 1 前言

岩爆作为深地工程开挖过程中的一种突发性动力灾害,其发生不仅直接威胁到施工人员的安全,也可能直接对矿井施工和工程稳定性产生重大影响<sup>[1]</sup>。岩爆的本质是岩石内部储存能量的瞬时剧烈释放,而这种能量释放通常伴随着剧烈的破坏性作用<sup>[2]</sup>。岩爆根据其诱导因素可分为外因和内因,即岩石本身性质和人为扰动<sup>[3]</sup>。深部高应力环境

为能量积累提供了外部条件,而岩石的结构特性决定了能量的储存、释放和破裂模式。在实际工程中,岩爆倾向性分析常常依赖于多个判据的综合评估,以提高预测的准确性和可靠性。

现有的岩爆倾向性判据中,常见的有基于岩石的线弹性指数、强度脆性指数和变形脆性系数等多个判据。这些判据各自反映了岩石的不同力学特性和行为。胡军生等<sup>[4]</sup>通过 Barton 判据和冲击能量指标对深井局部岩爆倾向性进行分析预测,并通过数值模拟软件模拟了深部开采过程中能量释放率,验证了岩爆判据的准确性。王建华等<sup>[5]</sup>基于能量守恒准则以弹性能量法和脆性系数法对多宝山铜矿不稳固巷道岩爆倾向性进行了研究预测,提出了工

[作者简介] 范家斌(1989—),男,工程师,主要从事金属矿山开采生产及管理工作。

[基金项目] 国家自然科学基金(51804017)

[引用格式] 范家斌. 西藏某铜矿排水巷施工区域岩爆倾向性多判据研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(3): 59-63.

程加固措施。然而,单一判据在面对复杂的岩爆灾害时可能无法全面反映岩石的应力应变特性。因此,结合多种判据进行综合分析,将能够更准确地评估岩爆的倾向性,进而为岩爆防治提供更加科学的依据。

杨颂歌等<sup>[6]</sup>总结了现有岩爆倾向性的室内表征指标,并分析了各岩爆倾向性指标之间的关联。钱开龙等<sup>[7]</sup>以某矿6个中段3中岩性开展力学试验,基于E. Hoek判据、Russenes判据、徐林生判据、脆性判据等多重判据对岩石岩爆倾向性开展复合研判,为矿区岩爆倾向性分析、岩爆灾害预防提供了有效参考。与此同时,陈璐<sup>[8]</sup>分析总结了我国金属矿岩爆灾害发生特点及原因,同时归纳总结了岩爆预测的指标判据方法。指标判据方法根据所采用的岩爆影响因素的数量分为单指标判据和综合指标判据。较单指标判据而言,综合指标判据更有普适性。

本文以西藏某铜矿TBM排水巷施工区域为背景,基于线弹性指数、强度脆性指数和变形脆性系数三种岩爆倾向性判据,提出一种岩爆倾向性分析的综合判据方法。通过开展一系列室内试验,计算岩爆倾向性指标,分析总结铜矿排水巷施工区域岩爆倾向性。研究结果可为铜矿排水巷施工现场岩爆预测和灾害预防提供理论基础。

## 2 矿区地应力特征

西藏某铜矿排水巷施工区海拔一般在4 700 m以上,总体地形切割强烈,地势险峻,相对高差一般500~800 m,最大高差937.00 m。工作区内出露地层主要有中侏罗统叶巴组、中新统花岗岩和第四系沉积地层,在施工地质构造以及地下水方面较为复杂,整体构造活动活跃,部分巷道岩体节理裂隙发育,完整性较差,并且穿越多条断层带,减缓了工程施工效率。

在铜矿TBM排水巷施工过程中,岩爆是施工过程中,岩石内部应力集中产生的动力灾害。其本质是岩石内部储存的能量在短时间内剧烈释放的过程。诱发岩爆的因素主要包括外部应力条件和岩石本身的结构特性。深部高应力环境为岩石能量的积累提供了外部条件,而岩爆的发生与岩石的内部结构密切相关,能量的释放过程与岩石的物理特性直接挂钩。因此,开展排水巷施工区

岩爆倾向性研究,对矿山设计、施工和安全生产具有重要的现实意义。

## 3 岩爆倾向性判据准则

### 3.1 线弹性指数判别

线弹性指数判别方法原理是定义线弹性指数,该指数为单轴抗压强度与卸载曲线切线模量的比值,表达式为

$$PES = \frac{\sigma_c^2}{2E_s} \quad (1)$$

式中, $PES$ 为线弹性指数; $\sigma_c$ 为平均轴压指数; $E_s$ 为卸载曲线的切线模量。

线弹性指数的岩爆倾向性等级划分标见表1。

表1 线弹性指数判别等级

$PES/kJ \cdot m^{-3}$	岩爆倾向性
$PES < 40$	无岩爆倾向性
$100 > PES \geq 40$	弱岩爆倾向性
$200 > PES \geq 100$	中等岩爆倾向性
$PES \geq 200$	强岩爆倾向性

### 3.2 强度脆性指数判别

有学者认为,岩石脆性与岩爆倾向性有很大关联。基于此,提出强度脆性指数 $B$ 判别岩石岩爆倾向性。 $B$ 值定义为岩样的单轴抗压强度与其单轴抗拉强度的比值。表达式为

$$B = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (2)$$

式中, $\sigma_c$ 为岩石单轴抗压强度; $\sigma_t$ 为岩石单轴抗拉强度。

$B$ 值法的判定条件见表2。

表2  $B$ 值法判别等级

$B$	岩爆倾向性
$B < 15$	无岩爆倾向性
$18 > B \geq 15$	弱岩爆倾向性
$22 > B \geq 18$	中等岩爆倾向性
$B \geq 22$	强岩爆倾向性

### 3.3 变形脆性系数判别

变形脆性系数 $K_u$ 通过计算岩石在加卸载过程中的变形程度来判别岩爆倾向性,相关公式为

$$K_u = \frac{u}{u_1} = \frac{(\varepsilon_p + \varepsilon_c)}{\varepsilon_p} \quad (3)$$

式中, $u$ 为岩石峰值荷载的总变形; $u_1$ 为峰值荷载前

的永久变形; $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon_e$  分别代表岩石的塑性应变与弹性应变。

判定条件见表3。

表3 变形脆性系数判别等级

$K_u$	岩爆倾向性
$K_u < 2$	无岩爆倾向性
$6 > K_u \geq 2$	弱岩爆倾向性
$9 > K_u \geq 6$	中等岩爆倾向性
$K_u \geq 9$	强岩爆倾向性

为了增加岩爆倾向性预测的准确度,本文采用以上三种岩爆倾向性判据对施工区域岩石进行岩爆倾向性定量复合研判。

## 4 岩石室内试验及岩爆研判计算

### 4.1 岩石取样与加工

根据现场施工情况,试验岩石选取区域为排水巷施工位置,埋深在 80 ~ 120 m。选取 5 个不同地点、埋深的岩芯进行力学试验。编号依次为, N1、N2、N3、N4 和 N5。依据不同岩爆倾向性判别标准将岩芯加工成直径 50 mm、高度 100 mm 试样和直径 50 mm、高度 50 mm 试样两种。图 1 所示为测试岩石尺寸图。



图1 室内测试岩石尺寸

### 4.2 测试方法与设备

室内试验采用北京科技大学 30 t 液压伺服试验机,依次进行单轴压缩、巴西劈裂和加卸载测试。

#### 1) 单轴压缩测试

测试样品为直径 50 mm、高度 50 mm 的圆柱体。在测试前,需将岩石端部打磨平整,保持误差不大于 1 mm。试验时,保证试样置于圆形承压板正中心,压缩速率恒定为 500 N/s,压缩过程的力与位移由计算机端保存并输出。试验过程如图 2 所示。

#### 2) 巴西劈裂测试

巴西劈裂测试用于测定岩石的单轴抗拉强度。试样尺寸为直径 50 mm、高度 50 mm 的圆柱体。在



图2 单轴压缩测试现场图

同一材料试验机下,更换巴西劈裂夹具进行试验。试验过程如图 3 所示。

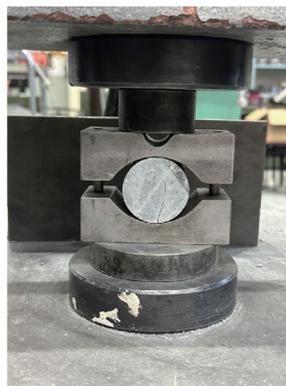


图3 巴西劈裂测试现场图

#### 3) 加卸载测试

岩石加卸载实验采用直剪仪,加载速度恒定为 500 N/s,卸载速度恒定 300 N/s。岩石加载至 250 ~ 280 kN 时卸载。岩石尺寸为直径 50 mm、高度 100 mm。



图4 加卸载测试现场图

### 5 室内试验结果与岩爆倾向性判别

#### 5.1 线弹性指数判别

依据岩石加卸载曲线计算 PES 值,加卸载曲线与计算结果如图 5 所示。

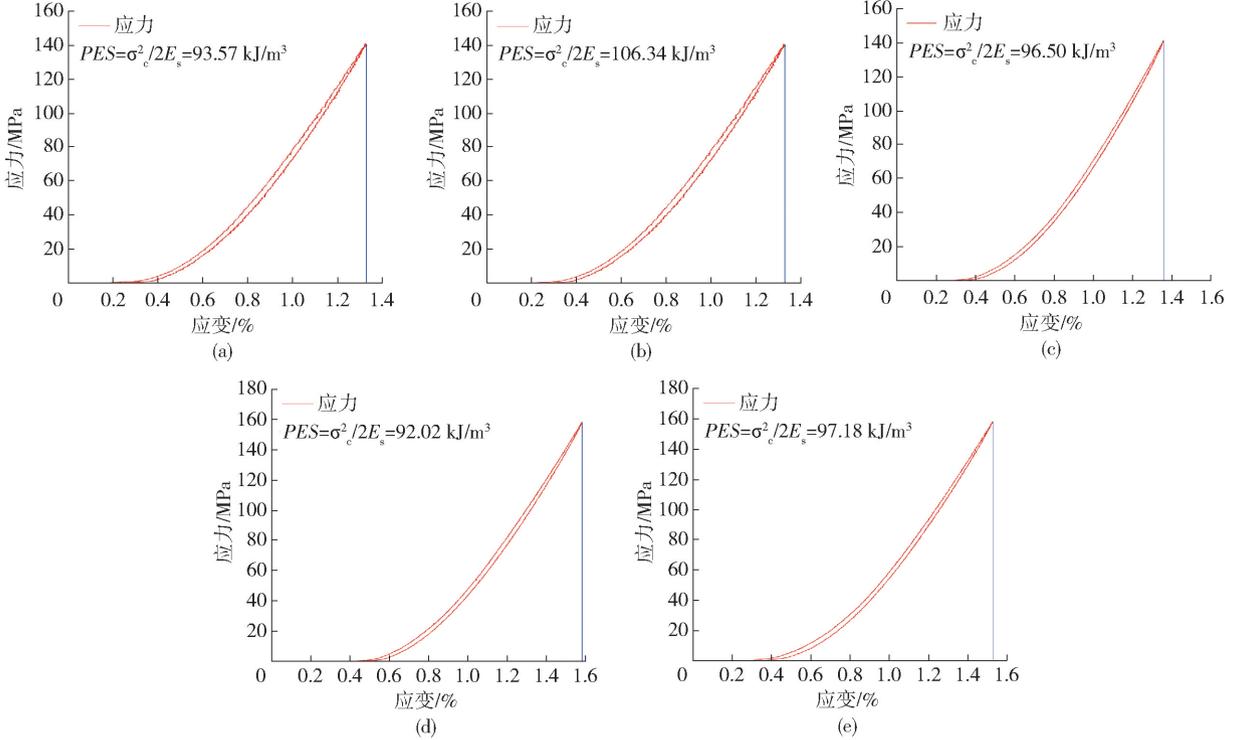


图 5 线弹性指数

表 4 基于线弹性指数岩爆判别结果

编号	PES/(kJ·m <sup>-3</sup> )	岩爆倾向性
N1	93.57	弱岩爆倾向
N2	106.34	中等岩爆倾向
N3	96.50	弱岩爆倾向
N4	92.02	弱岩爆倾向
N5	97.18	弱岩爆倾向

表 5 基于强度脆性指数岩爆判别结果

编号	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa	B 值	岩爆 倾向性
N1	13.23	64.50	4.876 463	无岩爆倾向
N2	13.70	80.60	5.884 338	无岩爆倾向
N3	8.79	74.69	8.498 2	无岩爆倾向
N4	17.08	33.30	1.949 577	无岩爆倾向
N5	10.36	23.72	2.289 659	无岩爆倾向

#### 5.3 变形脆性系数判别

依据岩石加卸载曲线计算 K<sub>u</sub> 值,曲线与计算结果如图 6 所示。

依据 K<sub>u</sub> 值判别岩石岩爆倾向性见表 6。

依据 PES 值判别岩石岩爆倾向性见表 4。

#### 5.2 强度脆性指数判别

依据岩石压缩强度与抗拉强度计算 B 值,单轴抗压、单轴抗拉与 B 值计算结果见表 5。

表 6 基于变形脆性系数岩爆判别结果

编号	K <sub>u</sub>	岩爆倾向性
N1	3.09	弱岩爆倾向
N2	3.23	弱岩爆倾向
N3	2.89	弱岩爆倾向
N4	2.56	弱岩爆倾向
N5	2.94	弱岩爆倾向

#### 5.4 岩爆倾向性复合判别

根据以上三种方法判定结果,岩爆倾向性总结见表 7。

根据以上复合判别结果,西藏某铜矿 TBM 排水巷岩爆倾向性为弱岩爆倾向或无岩爆倾向。弱岩爆倾向意味着岩石发生岩爆的几率小、程度轻微,但也存在岩爆发生的可能性。故在铜矿排水巷施工过程中,需要采用一般支护措施对岩爆进行防控。

### 6 结论

本文通过现场取样、试验计算等手段对西藏某铜矿排水巷施工区域岩石岩爆倾向性进行了预测和

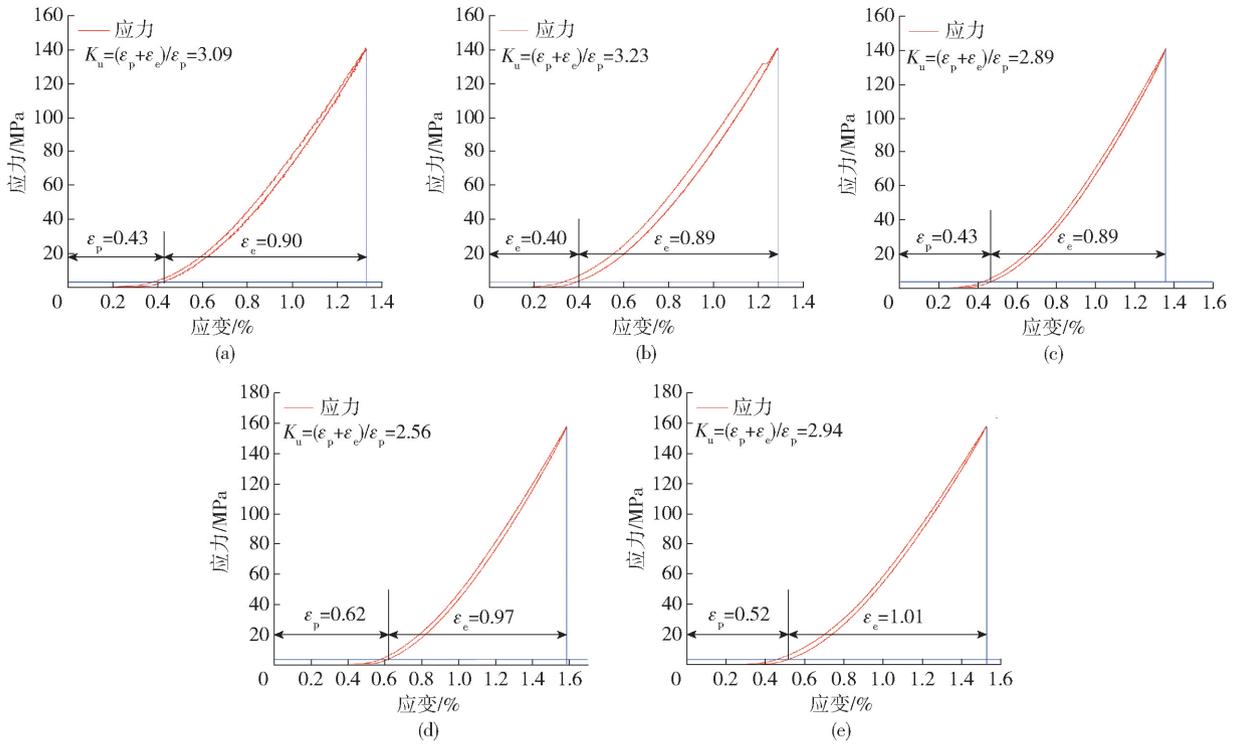


图6 变形脆性系数  $K_u$

表7 岩石岩爆判别结果

判定指标	判别结果		综合结果
	$PES/kJ \cdot m^{-3}$	岩爆倾向性	
线弹性指数 PES	93.57	弱岩爆倾向	弱岩爆倾向
	106.34	中等岩爆倾向	
	96.5	弱岩爆倾向	
	92.02	弱岩爆倾向	
	97.18	弱岩爆倾向	
强度脆性指数 B	B	岩爆倾向性	无岩爆倾向
	4.876 463	无岩爆倾向	
	5.884 338	无岩爆倾向	
	8.498 2	无岩爆倾向	
	1.949 577	无岩爆倾向	
	2.289 659	无岩爆倾向	
变形脆性系数 $K_u$	$K_u$	岩爆倾向性	弱岩爆倾向
	3.09	弱岩爆倾向	
	3.23	弱岩爆倾向	
	2.89	弱岩爆倾向	
	2.56	弱岩爆倾向	
	2.94	弱岩爆倾向	

评估。利用线弹性指数判据、强度脆性指数判据和变形脆性系数判据等四种岩爆判据对现场不同地点、不同埋深岩石进行复合岩爆预测。得出结论如下:施工区域岩石岩性以花岗岩为主,具有较大抗压和抗拉强度,储存能量能力强,发生岩爆概率小;综合三种岩爆判据可得出施工区域岩石岩爆综合结果,岩爆倾向性为弱岩爆倾向和无岩爆倾向;针对弱

岩爆倾向区域,铜矿排水巷施工过程中应开展一般支护防控措施,以避免岩爆对施工过程、生产安全造成不良影响。

[参考文献]

[1] 王辉,刘兴全. 岩爆倾向性综合评价方法评述[J]. 矿业工程,2024,22(5):16-20.

[2] 杨腾杰,高新强,王立川,等. 基于改进 TOPSIS-GRA 模型的岩爆倾向性预测[J]. 河南科学,2024,42(6):825-835.

[3] 贾义鹏,吕庆,尚岳全,等. 基于粗糙集-理想点法的岩爆预测[J]. 浙江大学学报(工学版),2014,48(3):498-503.

[4] 胡军生,熊晓晨,金长宇,等. 某深井矿山开采岩爆倾向性研究[J]. 矿业研究与开发,2024,44(11):110-117.

[5] 王建华,高永,秦绍龙,等. 多宝山铜矿非稳固巷道岩爆倾向性与楔形体稳定性分析[J]. 金属矿山,2024(11):37-44.

[6] 杨颂歌. 硬岩岩爆倾向性的室内表征指标及其测定方法和分级准则研究[D]. 长沙:中南大学,2023.

[7] 钱开龙,赵开伟,李明洁,等. 基于多重判据的六苴矿区深部岩爆倾向性研究[J]. 云南冶金,2024,53(5):28-35.

[8] 陈璐,郭利杰,杨小聪. 金属矿深部开采岩爆灾害防控研究进展与工程实践[J]. 矿冶,2024,33(4):482-494+514.