

# 基于弹性应变能指标与脆性改进指标的 某铜矿岩爆倾向性预测

Prediction of Rockburst Tendency in a Certain Copper Mine Based on Multiple Criteria

王志勇, 郑晓黎(西藏巨龙铜业有限公司, 西藏 拉萨 850200)

**摘要:**岩爆是矿山深部开采过程中常见的一种地质灾害,岩爆的发生具有突发性、瞬时性和破坏性。本文为预测岩爆发生,基于弹性应变能理论和改进脆性指标,通过处理单轴抗压强度试验结果计算出弹性应变能,根据最大储存弹性应变能指标和改进脆性指标判别岩爆倾向性。研究表明,岩芯试样岩爆倾向性皆为无岩爆倾向或弱岩爆倾向。此方法从能量指标角度为预测岩爆倾向性,提供了科学的理论依据。

**关键词:**岩爆预测; 能量演化; 单轴抗压强度; 脆性指数

**中图分类号:** P584 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)05-0049-05

**Abstract:** Rock burst is a common geological disaster in the process of deep mining. The occurrence of rock burst is sudden, instantaneous and destructive. In order to predict the occurrence of rockburst, this paper calculates the elastic strain energy based on the uniaxial compressive strength test results, and identifies the rockburst tendency according to the maximum storage elastic strain energy index and the improved brittleness index. The results show that the rock burst tendency of core samples is either no rock burst tendency or no rock burst tendency. This method provides a scientific theoretical basis for predicting rockburst tendency from the perspective of energy index.

**Key words:** rockburst prediction; energy evolution; uniaxial compressive strength; brittleness index

## 1 前言

岩爆属于常见的地质灾害,是指在高地应力的条件下,对硐室进行开挖,由于硐室围岩的应力集中和重分布,使地应力超过岩石本身所能承受的应力,从而导致岩石突发性的产生猛烈的脆性破坏<sup>[1]</sup>。这种破坏行为常表现为岩体松脱、剥落、崩出或弹射,甚至对整个硐室造成不可逆转的重大损害<sup>[2]</sup>。岩爆的发生也会影响矿业工作人员的生命安全和矿山经济和施工进度。现阶段,随着矿山开采深度的持续增加,地应力不断增加,岩爆发生频率也逐步增长。因此,加强对岩爆倾向性预测的研究已经是当下刻不容缓的事情。

针对岩爆预测,国内外学者对岩爆倾向性开展了大量的研究。胡军生等<sup>[3]</sup>根据力学试验以及岩爆经验判据准则预测深井开采过程中岩爆发生的可能性。钱开龙等<sup>[4]</sup>通过测量地应力、单轴抗压强度并结合徐林生判据等复合判据研究了深部岩爆倾向

性。徐柳等<sup>[5]</sup>采用多维正态云模型对岩爆倾向性进行了评估。薛亚东等<sup>[6]</sup>基于强度准则和能量理论对隧道岩爆等级进行了判断。胡澳玲等<sup>[7]</sup>基于变权贝叶斯理论建立岩爆预测模型判断金川二矿的岩爆倾向性,其预测结果和实际基本一致。陈贤丰等<sup>[8]</sup>将实测数据与数值模拟演变进行结果对岩爆倾向性进行预测。杨腾杰等<sup>[9]</sup>基于改进 TOPSIS- GRA 模型,从地应力、岩性等方面选取 4 个评价指标对岩爆倾向性进行预测和验证。王云飞等<sup>[10]</sup>开展了 3 种不同的岩石力学试验判断其围压速率,并提出了简化剩余弹性能指数来判断岩爆倾向性。郑龙菲等<sup>[11]</sup>综合乘法组合赋权等 4 种方法得出博弈论综合赋权-物元可拓理论的预测模型对岩爆倾向性进行预测,其准确率高达 95%。王建华等<sup>[12]</sup>根据弹性能量法和 Q 系统分级等方法对岩爆倾向性以及岩体质量进行评估。张如九等<sup>[13]</sup>提出了基于最大能量耗散率的岩爆倾向性评价指标,通过全过程的能量特征分析,

[作者简介] 王志勇(1983—),男,采矿工程师,主要从事金属矿采矿技术与安全管理等方面工作。

[引用格式] 王志勇,郑晓黎. 基于弹性应变能指标与脆性改进指标的某铜矿岩爆倾向性预测[J]. 中国矿山工程,2025,54(5):49-53.

较好体现了脆性对岩爆倾向性的影响。岩爆倾向性评价指标主要从岩爆发生机理、多因素组合指标和基于机器学习方法3个方面进行判据。

目前,对岩爆倾向性已进行了一定的研究。但尚未从峰前阶段能量角度进行分析。从能量的角度将岩爆可以认为是围岩内部在未经开挖扰动时已经存在弹性应变能,在开采的过程中,已经储存的弹性应变能突发性的立即释放,导致硐室出现局部失稳现象。因此,本文从峰前阶段的弹性应变能角度对岩爆倾向性进行预测,通过分析单轴抗压强度试验所得的应力-应变曲线,计算得出弹性应变能,进而基于弹性应变能理论对岩爆倾向性进行评价。通过本研究,为岩爆倾向性的预测提供了更加科学的理论依据,同时可以为施工安全性提供参考。

## 2 工程背景

巨龙矿区位于拉萨市墨竹工卡县甲玛乡境内,该矿区主要位于青藏高原冈底斯山脉东段,该地段属于极高山地带。所处地带属于温带高原半干旱季风气候,空气较为稀薄,昼夜温差大,能够长时间照射到太阳,季节变化分明。该区域大地构造主要位于冈瓦纳大陆北缘,其大地构造位于冈底斯-念青唐古拉板块中段南部边缘的冈底斯陆缘火山-岩浆弧的东段。排水巷道施工区域主要位于冈底斯山脉与念青唐古拉山脉结合部位以北,属于高山和雅鲁藏布江中游河谷区,为南高北低的地势,地形坡度较大,其海拔基本在4 700 m以上,相对高差一般为500~800 m,最大高差为1 000 m以上。该矿区的断裂构造主要以近东西向,北西南东向为主。排水巷道所在区域恰好位于断裂带围限地块中,产生地震活动的可能性较低,并且其强度和频率也较低。根据调查,目前该工作区域地层主要有第四层地层(人工填土、坡残积碎石等)、中新统花岗岩和中侏罗统叶巴组。预计在该区域建设两条平行主巷道,五条采场支巷道及一个安全出口竖井和联络道,其主巷道断面分别为4.4 m×4.4 m的方形截面和直径为6.3 m的圆形截面,巷道全长为7 500 m。排水及安全出口竖井的地貌主要为山麓堆积坡地,其坡地主要以草皮植被为主。主要采用硬岩掘进机(TBM)和钻爆法对相应巷道及硐室进行施工,排水巷道主要包含五级围岩,其中巷道围岩以Ⅱ-Ⅲ类围岩为主,排水巷道施工位置的地质构造和水文条件较为复杂,整体地质构造活动较为活跃。

## 3 试样制备与试验方案

### 3.1 岩样采集与制备

根据现场情况以及岩石力学试样规范,在巨龙排水巷道施工区域地表进行钻孔取样,选取不同深度的岩芯制备成圆柱体试样,具体尺寸见表1。利用抛光机对岩样进行研磨和抛光处理,确保岩样表面的平整度,将制备好的试样放置于16℃~28℃的室温环境中自然风干两周,以此来确保实验结果的准确性。岩芯试样实物如图1所示。

表1 岩芯具体尺寸

花岗岩试样编号	1	2	3	4	5
直径/mm	47.5	47.5	47.5	47.5	47.5
高度/mm	97	100	104	101	103

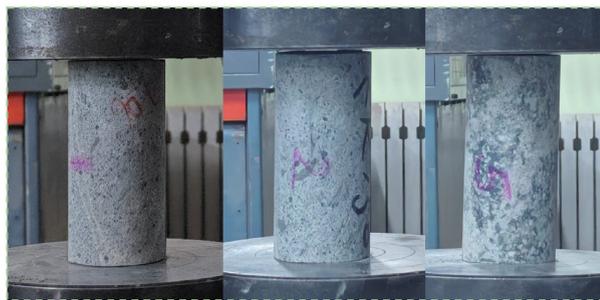


图1 岩芯试样实物图

### 3.2 实验方案

对抛光并自然风干的岩芯试样进行单轴抗压强度实验,采用北京科技大学60t液压伺服试验机,该系统主要由实验主机、传动系统和液压系统组成。本次实验采500N/s的加载速度,在实验过程中设备记录岩样的应力-应变曲线,加载至岩样最终发生破坏后停止试验,试验过程如图2所示。

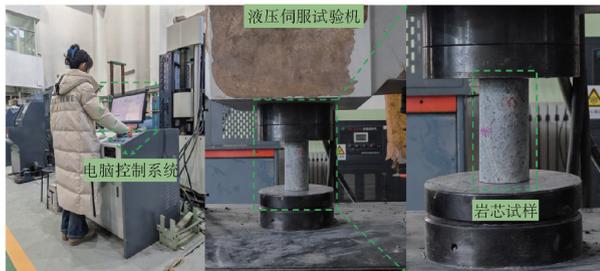


图2 单轴抗压强度试验

## 4 弹应变能理论及其与岩爆倾向性的关联

### 4.1 弹性应变能概念及原理

弹性应变能是指在岩体变形过程中,外力做功

转变为储存于试样中的能量。当岩体因外力作用而发生形状或大小的改变,这种变化在弹性范围是可以逆转的,则在变形过程中,外力做功转化为储存在岩体中的弹性应变能。

#### 4.2 弹性应变能力学模型及计算公式

基于弹性力学的原理,弹性应变能的力学模型主要为胡克定律,依据胡克定律可得,在弹性范围内,岩体的应力与应变为成正比关系,其对应的比例常量为岩体的弹性模量。胡克定律的关系式可用下述数学表达式为<sup>[14]</sup>:

$$\sigma = E\varepsilon$$

式中: $\sigma$ 为岩体应力,MPa; $\varepsilon$ 为岩体应变; $E$ 为材料弹性模量,MPa。

基于胡克定律,可以构造弹性应变能的力学模型。在该力学模型中,岩体被视作为一个弹性体,其岩体中每个点的应力及应变皆满足胡克定律。当岩体受到外部应力作用时,其内部各点会发生相应的应变,进而储存为弹性应变能。

弹性应变能的计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$U = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2E_0} \sigma^2$$

式中: $U_e$ 为岩体单元释放的弹性应变能, $\text{MJ}/\text{m}^3$ ; $\sigma$ 为岩体应力,MPa; $\varepsilon$ 为岩体应变; $E$ 为材料弹性模量,MPa。

#### 4.3 弹性应变能与岩爆倾向性的关联

岩爆倾向性起源于冲击倾向原理<sup>[16]</sup>,该原理主要是指岩体具有积聚变形的能量并产生冲击破坏的性质。基于此理论可知,岩爆倾向性是指岩石本身具有能在某种环境下发生岩爆的剧烈性和活跃性。岩爆发生的活跃性即为在岩石所在的地质环境、地应力条件、岩体开挖方法等开采行为都相同的情况下,岩石发生岩爆的难易程度。岩爆发生的剧烈性即为在相同(地质环境、应力条件、开采情况等)情况下岩石发生破坏时释放能量的程度以及应力产生响应的距离程度。

基于弹性应变能和岩爆倾向性的基础理论,分析得出弹性应变能和岩爆倾向性之间具有密切的关联性,岩石在达到峰值强度之前内部储存的弹性应变能是岩石能否发生破坏的重要依据,未经开挖扰动的岩体具有一定的能量,随着对岩石开采程度的增加,岩石积聚的能量也持续增加,当岩石储存的弹性应变能超过所能承受的范围时,岩石就会发生岩爆。能量指标也是岩爆倾向性评价指标中的一个,

通过分析岩石中所能储存的最大弹性应变能的程度,判断岩爆倾向性。同时,弹性应变能也会对岩爆烈度产生一定影响。

#### 4.4 基于弹性应变能理论的岩爆倾向性评价指标

近年来,国内外众多学者对评价岩爆倾向性进行了不同角度不同条件下的研究,得出众多岩爆倾向性指标与判据的方法,基于弹性应变能和岩爆倾向性的关联性,运用最大储存弹性应变能 $E_s$ 和改进脆性指标 $BIM$ 对岩爆倾向性做出评价。

1) 最大储存弹性应变能指标 $E_s$

岩石储存的最大弹性应变能 $E_s$ 的计算式为<sup>[17]</sup>:

$$E_s = \frac{R_c^2}{2E}$$

式中, $R_c$ 为岩石单轴抗拉强度,MPa; $E$ 为岩石的弹性模量,MPa。

岩石储存的最大弹性应变能的获取方法如图3所示。

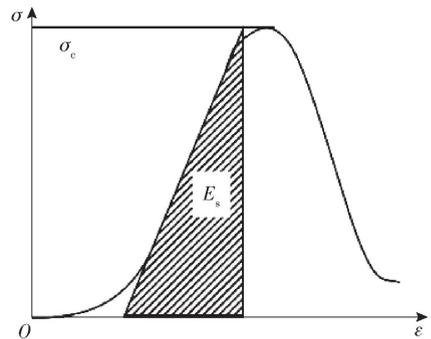


图3 最大弹性应变能指标( $E_s$ )

基于最大储存弹性应变能指标( $E_s$ )判断岩爆倾向性程度具体标准见表2。

表2 最大储存弹性应变能判断依据

判据	岩爆倾向性
$E_s < 0.2 \text{ MJ}/\text{m}^3$	无岩爆倾向
$0.2 \text{ MJ}/\text{m}^3 < E_s < 0.5 \text{ MJ}/\text{m}^3$	弱的岩爆倾向
$0.5 \text{ MJ}/\text{m}^3 < E_s < 0.75 \text{ MJ}/\text{m}^3$	中等岩爆倾向
$E_s > 0.75 \text{ MJ}/\text{m}^3$	强烈岩爆倾向

2) 改进脆性指标 $BIM$

改进脆性指标也为能量指标,需要根据应力-应变曲线峰前阶段相应数据进行计算,改进脆性指标 $BIM$ 的计算式为

$$BIM = \frac{A_2}{A_1}$$

式中, $A_1$ 为按弹性模量50%计算峰值时岩石储存的

弹性变形能;  $A_2$  为峰前加载曲线下的面积, 即峰前加载储存的变形能。

改进脆性指标的获取方法如图 4 所示。

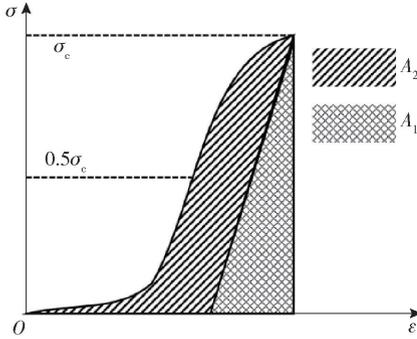


图 4 改进脆性指标 (BIM)

表 3 改进脆性指标判断依据

判据	岩爆倾向性
$BIM > 1.5$	低岩爆倾向
$1.2 < BIM \leq 1.5$	中等岩爆倾向
$1.0 < BIM \leq 1.2$	高岩爆倾向

### 5 基于应变能理论的岩爆倾向性方法

#### 5.1 最大弹性应变能指数 $E_s$

根据单轴抗压强度试验结果得出应力-应变曲线, 首先根据下述岩石抗压强度计算公式得出单轴抗压强度:

$$R = P/A$$

式中,  $R$  为岩石单轴抗压强度, MPa;  $P$  为最大应力值, kN;  $A$  为试样垂直于荷载方向的面积,  $m^2$ 。

经计算:

$$R_{c1} = 62.74 \text{ MPa}, E_1 = 76.26 \text{ GPa}$$

$$R_{c2} = 69.50 \text{ MPa}, E_2 = 84.19 \text{ GPa}$$

$$R_{c3} = 44.80 \text{ MPa}, E_3 = 49.99 \text{ GPa}$$

$$R_{c4} = 108.30 \text{ MPa}, E_4 = 143.82 \text{ GPa}$$

$$R_{c5} = 56.67 \text{ MPa}, E_5 = 89.98 \text{ GPa}$$

根据单轴抗压强度  $R_c$  和最大弹性应变能指数  $E$  分析, 不同试件结果的差异可能是因为岩石本身材质不均匀。试样 4 的数据为  $R_{c4} = 108.30 \text{ MPa}$ ,  $E_4 = 143.82 \text{ GPa}$ , 这可能是因为该试样的微裂隙较少, 当受到外部荷载作用时应力集中较小, 其抗压强度和弹性模量会增加。

经最大储存弹性应变能  $E_s$  计算公式计算得出如下结果:

$$E_{s1} = R_c^2 / (2E) = 0.03 \text{ MJ/m}^3$$

$$E_{s2} = R_c^2 / (2E) = 0.03 \text{ MJ/m}^3$$

$$E_{s3} = R_c^2 / (2E) = 0.02 \text{ MJ/m}^3$$

$$E_{s4} = R_c^2 / (2E) = 0.04 \text{ MJ/m}^3$$

$$E_{s5} = R_c^2 / (2E) = 0.02 \text{ MJ/m}^3$$

将最终结果汇总为表 4。

表 4 最大储存弹性应变能指标  $E_s$

编号	$E_s / \text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$	岩爆倾向性
1	0.03	弱岩爆倾向
2	0.03	弱岩爆倾向
3	0.02	无岩爆倾向
4	0.04	弱岩爆倾向
5	0.02	无岩爆倾向

从表 4 可以看出,  $E_s$  增大, 岩爆倾向性越大。试样 3 和 5 的抗压强度和弹性模量较低, 因此其能量释放较少, 可能导致最大弹性应变能较低, 从而减少发生岩爆的概率。

#### 5.2 改进脆性指标 BIM

经计算:

$$\text{试样 1: } E_{s0} = 4.58 \text{ GPa}, A_1 = 0.09 \text{ MJ/m}^3, A_2 = 0.29 \text{ MJ/m}^3$$

$$\text{试样 2: } E_{s0} = 2.28 \text{ GPa}, A_1 = 0.15 \text{ MJ/m}^3, A_2 = 0.33 \text{ MJ/m}^3$$

$$\text{试样 3: } E_{s0} = 1.54 \text{ GPa}, A_1 = 0.15 \text{ MJ/m}^3, A_2 = 0.32 \text{ MJ/m}^3$$

$$\text{试样 4: } E_{s0} = 6.61 \text{ GPa}, A_1 = 0.14 \text{ MJ/m}^3, A_2 = 0.42 \text{ MJ/m}^3$$

$$\text{试样 5: } E_{s0} = 5.41 \text{ GPa}, A_1 = 0.07 \text{ MJ/m}^3, A_2 = 0.22 \text{ MJ/m}^3$$

经计算: 根据数据可以分析得出, 不同试样的  $E_{s0}$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  存在差异, 这可能是因为岩石内部结构与成分等特性有差异。试样 4 的弹性模量较大, 这可能是因为试样内部结构较为坚硬, 因此试样承载时发生变形难度增加。

将最终结果汇总为表 5。

表 5 改进脆性指标 (BIM)

编号	BIM	岩爆倾向性
1	3.22	低岩爆倾向
2	2.20	低岩爆倾向
3	2.13	低岩爆倾向
4	3.00	低岩爆倾向
5	3.00	低岩爆倾向

$BIM$  越大,其发生岩爆的风险会增加。表5中试样均为低岩爆倾向,其中试样3的 $BIM$ 最低,而试样1的 $BIM$ 最高。这表明 $BIM$ 在一定范围内,岩爆倾向性均为低岩爆倾向。同时,弹性模量与 $BIM$ 呈现正相关分布,弹性模量减少反应试样在弹性阶段储能减少,因此能力难以集中释放,发生岩爆概率会略有降低。

## 6 结论

本文以巨龙铜矿为工程背景,通过对最大储存弹性应变能 $E_s$ 和改进脆性指标 $BIM$ 进行了岩爆倾向性相似评价,判断岩石产生岩爆倾向性的具体情况,研究结果:

(1)根据最大储存弹性应变能指标评价岩爆倾向性,试件 $E_s$ 分别为 $0.03 \text{ MJ/m}^3$ 、 $0.03 \text{ MJ/m}^3$ 、 $0.02 \text{ MJ/m}^3$ 、 $0.04 \text{ MJ/m}^3$ 和 $0.02 \text{ MJ/m}^3$ ,基于本次实验,根据现场具体情况,得出有可能为无岩爆倾向或弱岩爆倾向。

(2)根据改进脆性指标评价岩爆倾向性,试件 $BIM$ 分别为3.22、2.20、2.13、3.00和3.00,基于本次实验,根据现场具体情况,得出有可能为低岩爆倾向。

本文主要从能量指标的角度,揭示了弹性应变能和岩爆倾向性的内部联系,建立了基于弹性应变能理论的岩爆倾向性预测方法,通过与实际工程案例的对比验证,分析可得其结果与实际基本保持一致,该方法具有较高的可靠性。今后,此方法可为矿业工程中岩爆防治提供科学依据。

### [参考文献]

[1] 李时宜. 基于 IDBO-XGBoost 的铁路隧道岩爆烈度等级预测方法与应用[J]. 铁道建筑,2024,64(11):118-123.

[2] 贺振祥. 岩爆预测的非对称变权的云模型及应用[J]. 中国矿业,2025(1):1-9.

[3] 胡军生. 某深井矿山开采岩爆倾向性研究[J]. 矿山研究与开发,2024(11):44-11.

[4] 钱开龙. 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.

[5] 徐柳. 基于多维正态云模型的岩爆倾向性评价与三维可视化表征[J]. 有色金属(中英文),2025,15(1):150-160.

[6] 薛亚东. 基于强度和能量理论的应变型岩爆机理研究[J]. 工程地质学报,2025,33(2):471-481.

[7] 胡澳玲. 基于变权贝叶斯理论的岩爆预测模型及应用[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(6):1837-1845.

[8] 陈贤丰. 特长深埋隧道岩爆倾向性预测与影响因素研究[J]. 防灾减灾工程学报,2024,44(5):1184-1192.

[9] 杨腾杰. 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.

[10] 王云飞. 加卸载花岗岩强度与岩爆倾向性试验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2024,6(3):47-56.

[11] 郑龙菲. 基于博弈论综合赋权-物元可拓理论的岩爆倾向性预测[J]. 化工矿物与加工,2023,52(12):44-51.

[12] 王建华. 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.

[13] 张如九. 基于最大能量耗散率的岩爆倾向性指标研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(12):2993-3009.

[14] 蒋金鑫. 基于广义胡克定律与压痕实验的磷化钢晶圆力学特性各向异性计算[J]. 材料科学与工程学报,2023,41(3):359-365.

[15] 刘冬桥. 单轴压缩下脆性岩石损伤破坏能量演化规律试验研究[J]. 工程地质学报,2023,31(3):843-853.

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

[17] 张传庆. 岩爆倾向性指标及其相互关系探讨[J]. 岩土力学,2017,38(5):1397-1404.