基于模糊数学法的深部砂岩岩爆倾向性评价*

任湘霖[1],曹发跃[2],王硕[1],魏更强[1],徐世达[1]

(1.东北大学 深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2.紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭县 364200)

摘要:随着矿山开采深度增加,高地应力和复杂地质环境的共同作用导致岩爆灾害事故频发,但目前缺乏考虑多因素影响的深部矿岩岩爆倾向性综合评价方法。基于新疆某铁矿矿岩岩石力学参数测试,分别采用强度脆性系数、改进脆性指数、最大储存弹性应变能和应变能指数4种指标对-450~-600 m中段矿岩的岩爆倾向性进行评价,发现基于不同的单个指标得到的评价结果离散性较大,仅凭单一指标难以准确判定实际岩爆倾向性。在此基础上,构建了基于模糊数学法与熵权法相结合的的岩爆倾向性综合评价模型,对该矿-450~-600 m各中段的砂岩岩爆倾向性进行综合评判,岩爆倾向性均为中等岩爆倾向。现场实地勘察结果显示,基于模糊数学法的多指标岩爆倾向性综合评价方法得到的评价结果与现场破坏情况一致,能够准确评价岩爆倾向性等级。研究成果可为矿山安全生产和岩爆防治提供理论依据与技术支持。

关键词:岩爆倾向性;埋藏深度;模糊数学;硬岩开采;砂岩

中图分类号:TD32 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0029-08

Evaluation of Rock Burst Proneness of Deep Sandstone Based on Fuzzy Mathematics Method

REN Xianglin[1], *CAO Fayue*[2], *WANG Shuo*[1], *WEI Gengqiang*[1], *XU Shida*[1]

(1.National Key Laboratory of Intelligent Mining and Equipment for Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;
2.Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang, Fujian 364200, China)

Abstract: As mining depths increase, the synergistic effect of high in-situ stress and complex geological environments leads to frequent rock burst incidents. However, there is carrently a lack of comprehensive evaluation methods for the rock burst proneness of deep rock masses that accounts for multi-factor influences. Based on rock mechanics parameter tests conducted at an iron mine in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, the rock burst proneness of the rock mass in the -450 m to -600 m level was evaluated using four indicators: the strength brittleness coefficient, the improved brittleness index, the maximum storage elastic strain energy, and the strain energy index. The results indicate significant dispersion among the evaluation results obtained by using different single indicators, rendering it difficult to accurately determine the actual rock burst proneness relying solely on an individual metric. Consequently, a comprehensive evaluation model for rock burst proneness was established by integrating the fuzzy mathematics method and the entropy weight method. A comprehensive assessment of the sandstone rock burst proneness in the -450 m to -600 m level of the mine was performed, revealing a moderate rock burst proneness across all cases. On-site investigations demonstrate that the evaluation results generated by the multi-indicator comprehensive evaluation method based on fuzzy mathematics align closely with the actual in-situ damage conditions, facilitating an accurate assessment of the rock burst proneness grade. These findings provide a rock bust theoretical basis and technical support for safe mine production and rock burst mitigation.

Key words: Rock burst proneness, Burial depth, Fuzzy mathematics, Hard rock mining, Sandstone

* **收稿日期**:2025-03-28
基金项目:国家自然科学基金项目(62276058)
作者简介:任湘霖(2001—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要从事地压监测方面的研究工作。E-mail:1656959282@qq.com
通信作者:徐世达(1987—),男,山东济宁人,博士,副教授,博士生导师,主要从事爆破振动控制理论与技术等方面的研究工作。E-mail:xushida@mail.neu.edu.cn

0 引言

岩爆作为常见的地下深部工程灾害,具有极强的突发性和极高的破坏性,可导致支护结构失效、巷道坍塌、设备损毁甚至人员伤亡,严重威胁矿山、隧道等地下工程的安全。对岩爆倾向性进行精准评价是实现地下工程灾害主动防控的核心手段,通过科学量化风险等级,可为地下工程灾害防控提供关键决策依据。

自岩爆灾害被首次记录起,国内外学者从不同角度构建了岩爆倾向性评价体系[1-4]。目前主要的岩爆预测方法有单指标判据法、综合指标判据法、应用数学法。单指标判据法因其参数意义明确而被国内外学者广泛应用,但乔兰等[5]研究表明,该方法的结果易受工程条件与核心指标选择的影响。近年来,岩爆预测研究逐渐向复合多元判据转变,但现有成果仍依托特定案例的经验总结,并不具有普适性。在此背景下,应用数学法通过构建数学模型降低主观因素的影响,大幅提高了岩爆预测的精准度[6-7]。

根据选取样本方式不同,应用数学法可分为机器学习法与综合指标分析法。机器学习法依托 BP 神经网络、支持向量机、Fisher 判别分析、Bayes 判别分析和高斯过程等[8-9]算法构建实例样本与岩爆等级之间的非线性映射关系。高卫东[10]基于 Fisher 判别法构建了岩爆预测模型,通过工程数据训练,验证预测结果与实际高度吻合。张研等[11]提出高斯过程二元分类模型,通过少量样本建立了岩爆等级与影响因素之间的非线性映射关系,并将其应用于锦屏二级水电站隧洞岩爆评估。靳春玲等[12]构建了 WOA-SVM 岩爆烈度评估模型,以多组岩爆案例为样本,实现了高精度数据驱动的岩爆评估。李康楠等[13]开发 MICE-CNN 岩爆预测模型,验证了深度学习在岩爆烈度预测中的有效性和工程适用性。综合指标分析法运用未确知测度模型、模糊理论模型、云模型、灰色评估模型、理想点法等[14-16]数学模型整合多源岩爆影响因素,合理分配各影响因素的权重系数,构建复合判据指标评价体系。施建俊等[17]采用模糊数学多因素综合评价法整合了 5 项指标,解决了单一判据离散性问题,并验证了复合方法的可靠性。陈超[18]结合信息熵理论优化指标权重,提出集对-多维正态云模型,显著降低了未确知信息对评价的干扰。崔鹏艳等[19]通过乘法合成法整合主客观权重,提出专家打分法与熵权法相结合的组合赋权策略,构建可拓综合评价模型,用于预测岩爆等级。曲宏略等[20]选取强度脆性系数等 4 项指标,建立了模糊综合判别模型,预测结果与现场岩爆分布高度一致。

综上所述,传统单指标评价方法受限于复杂岩体力学特性,难以实现精准评价,应用数学法则通过挖掘共性规律与多参数协同分析,在保持高精度的同时增强了跨地质条件的适用性。本文依托新疆某铁矿进行岩爆风险评估,针对深部开采情况下单一指标评价的局限性,构建了基于模糊数学理论的多指标综合评价模型,通过引入熵权法客观计算指标权重,依据最大隶属度原则判定最终岩爆等级。该方法弥补了模糊数学法在动态赋权与综合评价中的缺陷,既能提高评价结果的可靠性,又可为深部矿山开采的岩爆风险分级提供精准依据。

1 工程背景

矿区地处新疆维吾尔自治区阿勒泰地区,目前矿区开采深度超过 800 m,在-450～-600 m 各中段由高地应力引起的岩爆灾害频发,在施工时出现岩石响动、岩块弹射等岩爆现象。该地区地层由第四系沉积层及下泥盆统康布铁堡组岩层构成,按胶结与成岩程度,将第四系沉积层划分为松散岩类,下泥盆统康布铁堡组下亚组(D1k1)为火山-沉积变质岩类;按岩石坚硬程度划分,前者为松散岩组,后者为坚硬岩、半坚硬岩和软弱岩组。

火山-沉积变质岩类岩体结构以块状结构为主、层状或薄层状结构次之,矿体直接围岩主要成分为变粒岩,岩性较单一,抗压强度、抗剪强度较高,岩石坚固程度为中等至坚固,整体属中等稳固至稳固岩组。矿体形态比较简单,多呈似层状、透镜状,走向稳定,倾角为 75°,以中厚至厚大的急倾斜矿体为主。开采范围内矿体数量众多,呈脉状平行产出,倾向方向夹石较多,矿床平均品位低,整体呈薄厚相间的层状分布,且具有走向长、埋深大等特点。

2 岩石力学参数测试

测定岩石物理力学参数是评价岩爆倾向性的基础工作。采集不同中段岩石样本,并制备成试验所需标准岩样,对试样进行波速测试以确保其内部均质稳定。通过单轴压缩试验、巴西劈裂试验测定单轴抗压强度、抗拉强度。试验所得数据为评估岩体脆性特征、储能能力和破坏模式提供参考,直接影响

岩爆风险的预测准确性。

2.1　试件制备

试验所用砂岩试样取自矿区－450～－600 m各中段不同位置的钻孔，按50 m深度间隔选取没有明显节理和裂纹的岩芯，将其制成Φ50 mm×100 mm和Φ50 mm×25 mm的圆柱体试件。为降低试验过程中试样的端部效应，弱化试验数据误差，采用磨石机对试样两端进行打磨，保证试样的平行度满足两端面之间平整度误差小于0.05 mm，直径误差小于0.3 mm。岩芯获取与加工流程如图1所示。

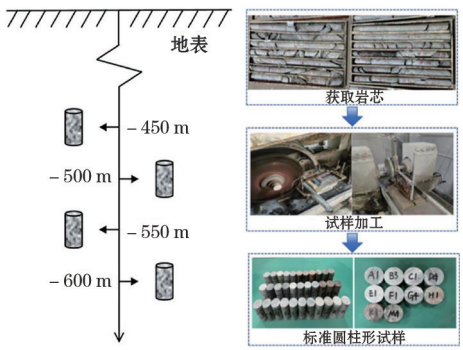


图1　岩芯获取位置与与加工流程

Fig.1　Core acquisition position and processing flow

2.2　试验方案

依据埋深条件选取完整度较好的砂岩试样测定其基本物理力学参数，利用Pundit Lab＋超声波检测仪获取试样平均纵波波速，并按波速相近的原则对试样进行分组，以确保室内试验数据准确与可靠。

单轴压缩试验在YAW-2000B压力试验机上进行，采用位移控制加载模式对试件施加轴向荷载，直至试样破坏。为降低端部效应影响，试验前在试样两端涂抹凡士林，并通过垫块连接压力机与试样，加载速率为0.05 mm/s。

巴西劈裂试验采用100 kN压力试验机，以应力加载方式对试样施加荷载，直至试样出现劈裂破坏，加载速率为0.4 MPa/s。

2.3　试验结果

表1为不同埋深砂岩试样的基本物理力学参数。由表1可以看出，随埋深由450 m增加至600 m，单轴抗压强度从77.62 MPa增加至122.17 MPa，平均值为99.36 MPa；弹性模量从22.490 GPa增加至33.249 GPa，平均值为28.39 GPa。二者均呈显著上升趋势且整体数值较高，表明岩石较为坚硬且储能能力较强。抗拉强度在－550 m中段达到峰值，为7.83 MPa，－600 m中段略有下降，究其原因可能为高压环境致使岩石内部形成微裂隙，从而导致抗拉强度降低。不同埋深条件下砂岩试样纵波波速为4 508～4 657 m/s，平均波速为4 583.5 m/s；密度为2.57～2.87 g/cm^3，平均密度为2.76 g/cm^3。纵波波速、密度波动较小，表明岩石试样内部整体致密性较好。根据工程岩体分级标准(GB/T 50218—2014)对岩石坚硬程度的定量分级标准中岩石单轴抗压强度与岩石坚硬程度的对应关系，该矿4个中段采样区域内的矿岩均属于硬岩。

表1　砂岩试样物理力学参数

Table 1　Physical and mechanical parameters of sandstone specimens

埋深/m	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	纵波波速/(m/s)	密度/(g/cm^3)
450	77.62	22.490	5.99	4 508	2.57
500	87.06	25.643	7.54	4 573	2.77
550	110.60	32.159	7.83	4 596	2.81
600	122.17	33.249	7.45	4 657	2.87

3　不同埋深条件下砂岩岩爆倾向性单因素评价

3.1　岩爆倾向性评价指标

Kidybinski岩爆倾向性理论表明，岩爆是岩石固有属性与外界压力共同作用的结果，当外部压力突破岩石固有属性极限时，即发生岩爆。选取强度脆性系数B表征材料相对硬脆性质，利用改进脆性指数BIM反映材料在破坏前塑性变形的大小，通过弹性应变能E_s和应变能指数W评估材料在破坏前储存弹性应变能的能力及岩石破坏时释放能量的大小。综合考虑岩石脆性破裂与能量释放的协同作用，实现对不同埋深砂岩岩爆倾向性等级的精准判定。

3.1.1　强度脆性系数

强度脆性系数法利用岩石的单轴抗压强度和抗拉强度之比来评价岩石的岩爆倾向性，该方法常用于对岩爆倾向性进行初步分析，其表达式为：

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

式中：σ_c为岩石单轴抗压强度；σ_t为岩石抗拉强度。

3.1.2　改进脆性指数

改进脆性指数法根据峰前加载过程中储存的变形能与按弹性模量计算的峰值弹性变形能之比来评估岩爆倾向性，其表达式为：

$$BIM=A_2/A_1 \tag{2}$$

式中:A_1 为按弹性模量计算的峰值弹性变形能;A_2 为峰前加载储存的变形能,即峰前加载曲线面积。

3.1.3 最大储存弹性应变能

单位体积岩体的弹性应变能可以通过弹性应变势能进行表示。在单轴压缩条件下,岩石试样在峰值强度前储存的弹性应变能为岩石单轴抗压强度的平方与 2 倍弹性模量的比值,其表达式为:

$$E_s=\sigma_c^2/2E \tag{3}$$

式中,E 为岩石弹性模量。

3.1.4 应变能指数

王维庆[21]根据能量守恒定律,推断得到导致岩爆的原因是岩石内部能量突然释放,其在单轴压缩过程中所做的功等于岩石内部储存的应变能。推导公式为:

$$W=\sigma_c\times\varepsilon\times V \tag{4}$$

式中:W 为岩石在单轴压缩过程中所做的功;ε 为岩石的应变量;V 为岩石的体积。

根据岩爆现场特征调查统计分析,将岩爆倾向表现分为以下三个等级:弱岩爆倾向表现为巷道壁岩石破裂、松脱,伴随有微弱声响;中等岩爆倾向表现为岩片脱落、弹射,并伴有破裂声;强岩爆倾向表现为围岩、顶板破裂,岩石强烈弹射且变形严重,伴有巨大响声。结合现场调查结果将岩爆倾向性等级划分为无岩爆倾向、弱岩爆倾向、中等岩爆倾向、强岩爆倾向 4 个等级[22],划分标准见表 2。

表 2 岩爆倾向性等级划分标准

Table 2 Classification standards of rock burst proneness

岩爆倾向性等级	岩爆倾向性判据			
	强度脆性系数 B	改进脆性指数 BIM	最大储存弹性应变能 E_s	应变能指数 W
无岩爆倾向	(0,10)	—	[0,50]	(0,7.85)
弱岩爆倾向	[10,14)	(1.5,+∞)	(50,100]	[7.85,19.625)
中等岩爆倾向	[14,18)	(1.2,1.5]	(100,150]	[19.625,39.25)
强岩爆倾向	[18,+∞)	[1.0,1.2]	(150,+∞)	[39.25,+∞)

3.2 各指标单因素岩爆倾向性评价结果

根据强度脆性系数、改进脆性指数、最大储存弹性应变能、应变能指数 4 个评价指标评判各中段岩爆倾向性,不同埋深砂岩岩爆倾向性单因素评价结果见表 3。

表 3 不同埋深砂岩岩爆倾向性单因素评价结果

Table 3 Single factor evaluation results of rock burst proneness of sandstone with different burial depths

埋深/m	强度脆性系数		改进脆性指数		最大储存弹性应变能		应变能指数		岩爆倾向性等级
	实测值	评价结果	实测值	评价结果	实测值	评价结果	实测值	评价结果	
450	12.96	弱	1.7	弱	133.95	中等	18.74	弱	弱至中等
500	11.55	弱	1.7	弱	147.79	中等	20.12	中等	弱至中等
550	14.13	中等	1.5	中等	190.19	强	28.11	中等	中等至强
600	16.40	中等	1.2	强	224.45	强	32.72	中等	中等至强

由表 3 可知,不同指标的岩爆倾向性评价结果离散性较大,−450 m、−500 m、−550 m、−600 m 中段岩爆倾向性均跨越 2 个等级,无法精准确定实际岩爆倾向性。由于单指标评价方法侧重点各异,且考察因素较为单一,难以系统分析岩爆的多因素耦合影响机制,导致其判别结果与实际岩爆倾向性存在较大偏差,无法精准确定实际岩爆倾向性。因此,本文在上述单因素评价结果的基础上,采用模糊数学法建立岩爆倾向性评价矩阵,通过整合各单因素指标信息,综合考虑评价结果,以弥补单因素分析的不足。

4 岩爆倾向性多因素模糊数学评价

模糊数学法基于模糊集合理论,能够量化边界不清晰、难以精确分类的问题,通过隶属度函数将事物归属某一类别的程度从“非此即彼”扩展为“部分属于”。该方法基于单因素指标建立评判因素集和岩爆倾向性等级评判集,进而选取隶属度函数建立模糊关系矩阵,最终通过权重分配和模糊运算实现对岩体岩爆倾向性的综合评价。

4.1 建立评判因素集

结合单因素岩爆倾向性评价结果选取 4 个岩爆倾向性评价指标构建评判因素集 U:

$$U=\{B,BIM,E_s,W\}=\{u_1,u_2,u_3,u_4\} \tag{5}$$

4.2 建立岩爆倾向性等级评判集

根据上述 4 个岩爆倾向性等级的分级判据标准,建立岩爆倾向性等级评判集 V。

$V=${无岩爆倾向,弱岩爆倾向,中等岩爆倾向,

强岩爆倾向}$=\{v_1,v_2,v_3,v_4\}$ (6)

4.3 确定模糊关系矩阵与隶属度函数

应用模糊数学方法建立数学模型的关键在于建立符合实际的隶属度函数,根据隶属函数所建立的模糊评价矩阵得出的各因素隶属度决定了最终评价结果准确性。根据岩爆倾向性等级评判集的特点,采用指派法选定梯型分布构造隶属度函数。隶属度函数见式(7),其模糊分布图如图 2 所示。

$$\begin{cases} A_1(x)=\begin{cases}1, x\leqslant a_i\\ \dfrac{b_i-x_i}{b_i-a_i}, a_i<x\leqslant b_i\\ 0, x>b_i\end{cases}\\ A_2(x)=\begin{cases}\dfrac{b_i-a_i}{b_i-x_i}, x\leqslant a_i\\ 1, a_i<x\leqslant b_i\\ \dfrac{b_i-a_i}{x_i-a_i}, x>b_i\end{cases}\\ A_3(x)=\begin{cases}\dfrac{c_i-b_i}{c_i-x_i}, x\leqslant b_i\\ 1, b_i<x\leqslant c_i\\ \dfrac{c_i-b_i}{x_i-b_i}, x>c_i\end{cases}\\ A_4(x)=\begin{cases}0, x\leqslant b_i\\ \dfrac{x_i-b_i}{c_i-b_i}, b_i<x\leqslant c_i\\ 1, x>c_i\end{cases}\end{cases} \tag{7}$$

式中:x_i为对应指标下实测数值;A_1、A_2、A_3、A_4 为 x_i对应的 4 个岩爆倾向性等级的隶属度函数;a_i、b_i、c_i分别为对应指标下岩爆倾向性等级界限值。各中段隶属度矩阵如式(8)所示。

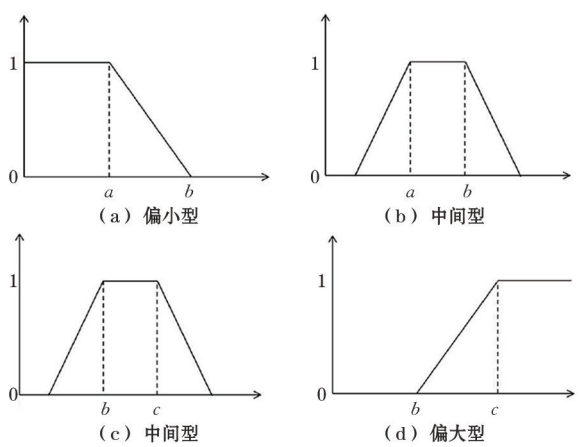


图 2 梯形模糊分布图

Fig.2 Ladder fuzzy distribution diagrams

$$\begin{cases} \boldsymbol{R}_{-450\ \mathrm{m}}=\begin{cases}0.26,1,0.79,0\\ 0,0.29,0.6,1\\ 0,0.6,1,0.68\\ 0.075,1,0.96,0\end{cases}\\ \boldsymbol{R}_{-500\ \mathrm{m}}=\begin{cases}0.61,1,0.62,0\\ 0,0.29,0.6,1\\ 0,0.51,1,0.96\\ 0,0.96,1,0.03\end{cases}\\ \boldsymbol{R}_{-550\ \mathrm{m}}=\begin{cases}0,0.97,1,0.03\\ 0,0.4,1,1\\ 0,0.36,0.55,1\\ 0,0.58,1,0.43\end{cases}\\ \boldsymbol{R}_{-600\ \mathrm{m}}=\begin{cases}0,0.63,1,0.6\\ 0,1,1,0\\ 0,0.29,0.4,1\\ 0,0.47,1,0.67\end{cases}\end{cases} \tag{8}$$

4.4 确定倾向性指标权重

根据各单一指标对岩爆倾向性的影响程度对其赋予相应权重。常用的赋权方法包括 AHP 层次分析法、优序图法、CRITIC 法以及熵权法等。通过对比分析可知,熵权法可以基于数据的离散程度客观地量化权重,避免人为主观判断带来的偏差,从而显著提升模型的科学性与准确性。因此,本文采用熵权法确定岩爆倾向性指标权重,具体步骤如下。

(1) 数据标准化。针对岩爆评价指标体系中各参数的量纲差异,采用极差法对原始数据进行标准化处理,处理后各指标均在[0,1]区间,标准化计算公式如下。

当 Y_{ij} 为正向指标时:

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{9}$$

当 Y_{ij} 为负向指标时:

$$Y_{ij}=\frac{X_{\max}-X_{ij}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{10}$$

式中:Y_{ij} 为标准化处理后的指标值;X_{ij} 为第 i 个样本在第 j 个指标上的原始值;$X_{\max}$、$X_{\min}$ 为第 j 项指标的最大值和最小值。

(2) 计算各指标比重。将原始数据矩阵内数值进行标准化处理后,计算第 i 个样本在第 j 个指标上的比重 P_{ij},计算公式如下。

$$P_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}Y_{ij}} \tag{11}$$

(3) 计算信息熵。信息熵可以反映各指标提供信息的离散程度,计算公式如下。

$$E_j = -\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n} P_{ij} \times \ln P_{ij} \tag{12}$$

式中:$\frac{1}{\ln n}$ 为比例系数;n 为样本数;E_j 为第 j 个指标的信息熵,$E_j \in [0,1]$。

(4) 计算冗余度。冗余度 d_j 是信息熵的补数,反映了指标信息的集中程度,计算公式如下。

$$d_j = 1 - E_j \tag{13}$$

(5) 计算权重。根据冗余度计算各指标权重,公式如下。

$$a_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^{n} d_j} \tag{14}$$

将表 3 中各单因素指标岩爆倾向性判定值代入上述计算公式,采用熵权法对各指标权重进行赋值,得 $\boldsymbol{A} = (a_1, a_2, a_3, a_4) = (0.24, 0.23, 0.26, 0.27)$

4.5 岩爆倾向性判定

确定各指标权重后,将其与隶属矩阵进行模糊合成,选择“相乘-求和”型合成算子进行计算,该方法通过加权累加综合各指标数据,既避免了主因素突出,又能完整保留隶属度矩阵数据,在减小评价误差的同时能准确反映各因素的重要性差异。计算公式如下:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{R} = (a_1, a_2, a_3, a_4)\begin{bmatrix} r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14} \\ r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{24} \\ r_{31}, r_{32}, r_{33}, r_{34} \\ r_{41}, r_{42}, r_{43}, r_{44} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3, b_4) \tag{15}$$

式中,b_j 为被评级对象对 V_j 等级的模糊子集隶属程度。

各中段最大可能判据为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{B}_{-450\ \mathrm{m}} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{R} = (0.08, 0.73, 0.85, 0.41) \\ \boldsymbol{B}_{-500\ \mathrm{m}} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{R} = (0.15, 0.70, 0.82, 0.49) \\ \boldsymbol{B}_{-550\ \mathrm{m}} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{R} = (0, 0.56, 0.88, 0.61) \\ \boldsymbol{B}_{-600\ \mathrm{m}} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{R} = (0, 0.58, 0.84, 0.59) \end{cases} \tag{16}$$

基于最大隶属度原则对不同埋深砂岩岩爆倾向性进行综合评判,-450 m、-500 m、-550 m、-600 m 中段的最大隶属度分别为 0.85、0.82、0.88、0.84,对应评价集均为 v_3 级,综合评判结果为中等岩爆倾向性。具体结果见表 4。

表 4 不同埋深岩爆倾向性综合评判结果

Table 4 Comprehensive evaluation results of rock burst proneness of different burial depths

埋深/m	最大隶属度	所属评价集	岩爆倾向性综合评判结果
450	0.85	v_3	中等岩爆倾向
500	0.82	v_3	中等岩爆倾向
550	0.88	v_3	中等岩爆倾向
600	0.84	v_3	中等岩爆倾向

对矿区-450~-600 m 各中段进行实地勘察,发现巷道围岩表层呈现断续片状剥落特征,局部伴随岩块弹射及破裂声响,破坏多集中在巷道交叉段、岩性突变带或高地应力区等节理裂隙密集发育部位,弹射活动在支护薄弱和岩体完整性较差区域更为活跃,整体未出现大规模岩块抛射或剧烈动力破坏现象,符合中等岩爆特征。

选取辽宁某铜矿-647 m、-587 m 中段巷道破坏位置,采用本文方法进行评价:-647 m 中段与-587 m 中段最大隶属度分别为 0.82、0.75,对应评价集为 v_3、v_2 级,综合评判结果为中等岩爆倾向与弱岩爆倾向。现场勘察结果表明,-647 m 中段巷道表面岩层以浅表断续片状剥落为主,伴随低能量弹射及低频破裂声,符合中等岩爆特征;-587 m 中段仅局部偶见轻微表层剥落或碎裂,偶发微弱破裂声响,多集中于岩体裂隙稀疏发育区,符合弱岩爆特征。

5 结论

(1) 采用强度脆性系数、改进脆性指数、最大储存弹性应变能、应变能指数 4 种指标分别对新疆某矿区-450 m、-500 m、-550 m、-600 m 中段矿岩岩爆倾向性进行评价,评价结果表明,-450 m、-500 m 中段岩爆倾向性评价结果为弱至中等岩爆倾向性;-550 m、-600 m 中段岩爆倾向性评价结果为中等至强岩爆倾向性。不同指标的岩爆倾向性评价结果离散性较大,无法精准确定实际岩爆倾向性。

(2) 基于单因素评价结果建立了模糊数学法与熵权法相结合的岩爆倾向性综合评价模型。结果表明,基于最大隶属度原则对-450 m、-500 m、-550 m、-600 m 中段的砂岩岩爆倾向性进行综合评判,最大隶属度分别为 0.85、0.82、0.88、0.84,岩爆倾向性均为中等岩爆倾向。

(3) 实地勘察结果表明，该矿区－450～－600 m各中段巷道围岩表层呈现断续片状剥落特征，局部伴随岩块弹射及破裂声响，整体未出现大规模岩块抛射或剧烈动力破坏现象，符合中等岩爆特征。应用实践表明，岩爆倾向性多指标综合评价方法所得评价结果与现场破坏情况一致，能够准确评价岩爆倾向性等级。

参考文献(References)：

[1] 朱永生，李振，梁久正.基于经验方法的铁矿深井围岩岩爆倾向性预测[J].地下空间与工程学报，2020，16(2)：591-598.
ZHU Yongsheng，LI Zhen，LIANG Jiuzheng. Prediction of rockburst proneness of surrounding rock in iron mine based on empirical method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2020，16(2)：591-598.

[2] 周子龙，王少锋，蔡鑫，等.深部金属矿异构环境爆破开采诱发岩体动力灾害防控[J].中国有色金属学报，2025，35(1)：306-322.
ZHOU Zilong，WANG Shaofeng，CAI Xin，et al. Control for rock dynamic disasters induced by blasting mining disturbance under heterogeneous condition in deep metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2025，35(1)：306-322.

[3] 王云飞，宋梦怡，焦华喆，等.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.
WANG Yunfei，SONG Mengyi，JIAO Huazhe，et al. Experimental study on strength and rockburst proneness of granite under loading and unloading[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2024，6(3)：47-56.

[4] 张镜剑，傅冰骏.岩爆及其判据和防治[J].岩石力学与工程学报，2008(10)：2034-2042.
ZHANG Jingjian，FU Bingjun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2008(10)：2034-2042.

[5] 乔兰，董金水，刘建，等.我国地下金属矿山岩爆灾害发生机制及预测方法研究进展[J].金属矿山，2023(3)：14-28.
QIAO Lan，DONG Jinshui，LIU Jian，et al. Review on the study progress of rockburst mechanism and prediction in underground metal mines in China[J]. Metal Mine，2023(3)：14-28.

[6] 黄宁，卢海珠，彭庚，等.岩爆判据与监测预测技术研究进展[J].中国钼业，2023，47(6)：55-62.
HUANG Ning，LU Haizhu，PENG Geng，et al. Research progress of rock burst criterion and monitoring prediction technology[J]. China Molybdenum Industry，2023，47(6)：55-62.

[7] 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.
CHEN Lu，GUO Lijie，YANG Xiaocong. Research progress and engineering practice of rockburst disaster prevention and control in deep mining of metal mines[J]. Mining and Metallurgy，2024，33(4)：482-494＋514.

[8] 满轲，武立文，刘晓丽，等.基于CNN-LSTM模型的TBM隧道掘进参数及岩爆等级预测[J].煤炭科学技术，2024，52(增刊2)：21-37.
MAN Ke，WU Liwen，LIU Xiaoli，et al. Prediction of TBM tunneling parameters and rockburst grade based on CNN-LSTM model[J]. Coal Science and Technology，2024，52(Suppl.2)：21-37.

[9] 杨玲，魏静.基于支持向量机和增强学习算法的岩爆烈度等级预测[J].地球科学，2023，48(5)：2011-2023.
YANG Ling，WEI Jing. Prediction of rockburst intensity grade based on SVM and adaptive boosting algorithm[J]. Earth Science，2023，48(5)：2011-2023.

[10] 高卫东.基于Fisher判别的地下工程岩爆预测[J].金属矿山，2010(11)：140-142.
GAO Weidong. Forecast of rock-burst in underground engineering based on Fisher discriminant[J]. Metal Mine，2010(11)：140-142.

[11] 张研，苏国韶，燕柳斌.基于高斯过程机器学习的岩爆等级识别方法[J].地下空间与工程学报，2011，7(2)：392-397.
ZHANG Yan，SU Guoshao，YAN Liubin. Method of identifying rockburst grades based on gaussian process machine learning[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering，2011，7(2)：392-397.

[12] 靳春玲，姬照泰，贡力，等.基于WOA-SVM的引水隧洞岩爆烈度评估模型[J].中国安全科学学报，2023，33(9)：41-48.
JIN Chunling，JI Zhaotai，GONG Li，et al. Evaluation model of rockburst intensity of diversion tunnel based on WOA-SVM[J]. China Safety Science Journal，2023，33(9)：41-48.

[13] 李康楠，吴雅琴，杜锋，等.基于卷积神经网络的岩爆烈度等级预测[J].煤田地质与勘探，2023，51(10)：94-103.
LI Kangnan，WU Yaqin，DU Feng，et al. Prediction of rockburst intensity grade based on convolutional neural network[J]. Coal Geology & Exploration，2023，51(10)：94-103.

[14] 景杨凡，陈玉明，李岳峰，等.基于判别分析法的岩爆烈度预测研究[J].有色金属(矿山部分)，2022，74(1)：97-102.
JING Yangfan，CHEN Yuming，LI Yuefeng，et al. Study on rockburst prediction based on discriminant analysis method[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2022，74(1)：97-102.

[15] 胡星淼.基于博弈论和改进未确知测度的岩爆评判及应用研究[D].长沙：中南大学，2023.
HU Xingmiao. Rockburst evaluation and application research based on game theory and improved unascertained measurement [D]. Changsha：Central South University，2023.

[16] 乔木，周宗红，李岳峰，等.基于主客观赋权－物元可拓模型优选岩爆倾向性预测方法[J].有色金属工程，2022，12(8)：119-130.
QIAO Mu，ZHOU Zonghong，LI Yuefeng，et al. Optimization of rockburst tendency prediction method based on subjective and objective weighting-matter-element extension model [J]. Nonferrous Metals Engineering，2022，12(8)：119-130.

[17] 施建俊,郭书成,张伟.基于模糊数学的黄台隧道深埋段岩爆预测[J].工程爆破,2023,29(3):71-79+146.
SHI Jianjun, GUO Shucheng, ZHANG Wei. Analysis of rockburst tendency in deep buried section of Huangtai tunnel based on fuzzy mathematics[J]. Engineering Blasting,2023,29(3):71-79+146.

[18] 陈超.基于不确定性理论的冲击地压和岩爆灾害分类及控制技术评估[D].长沙:中南大学,2022.
CHEN Chao. Coalburst and rockburst classification and control technology evaluation based on uncertainty theory [D]. Changsha: Central South University,2022.

[19] 崔鹏艳,陈玉明,杨宫印,等.基于组合赋权的可拓综合评价岩爆预测模型[J].有色金属(矿山部分),2022,74(4):64-69.
CUI Pengyan, CHEN Yuming, YANG Gongyin, et al. Extension comprehensive evaluation rockburst prediction model based on combination weighting [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2022,74(4):64-69.

[20] 曲宏略,张新尚,张勇,等.基于倾向性指标的深埋隧道岩爆预测研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(增刊 2):949-955.
QU Honglue, ZHANG Xinshang, ZHANG Yong, et al. Prediction of rock burst in deep-buried tunnel based on tendency index[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(Suppl.2):949-955.

[21] 王维庆.苏家坡磷矿岩爆倾向性评价及岩爆灾害处置方法研究[D].武汉:武汉工程大学,2022.
WANG Weiqing. Evaluation of rockburst propensity and rockburst hazard management methods at Sujiapo phosphate mine[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technolog,2022.

[22] 季红瑜.基于信息融合的矿山岩爆特征分析及预测方法的研究[D].唐山:华北理工大学,2022.
JI Hongyu. Research on mine rockburst feature analysis and prediction method based on information fusion [D]. Tangshan: North China North China University of Science and Technology, 2022.