

岩爆预测研究现状综述

王晓祎

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年12月1日; 录用日期: 2025年12月22日; 发布日期: 2026年1月5日

摘要

岩爆是严重威胁深部地下工程安全的关键动力灾害, 其精准预测是岩石力学领域的研究热点与难点。文章系统梳理了国内外岩爆预测的研究现状, 将现有预测方法归纳为三大类: 理论判据预测、现场监测预测及人工智能模型预测。详细阐述了各类方法的核心原理、研究进展与应用实例, 并对比分析了其适用条件与局限性。综述表明, 理论判据是基础但普适性不足, 声发射与微震等监测技术能实现动态预警但易受干扰, 而机器学习等智能模型虽预测性能优异但其“黑箱”特性导致可解释性较差。最后, 展望了未来岩爆预测向多源信息融合、智能化与精准化发展的趋势, 为深化岩爆机理研究与提升灾害防控水平提供了系统性参考。

关键词

岩爆, 岩爆预测, 理论判据, 监测技术, 人工智能

A Review of the Current Status of Rockburst Prediction Research

Xiaoyi Wang

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: December 1, 2025; accepted: December 22, 2025; published: January 5, 2026

Abstract

Rockburst is a critical dynamic disaster that severely threatens the safety of deep underground engineering, and its accurate prediction remains a major research focus and challenge in rock mechanics. This paper systematically reviews the current state of rockburst prediction research, categorizing existing methods into three main types: theoretical criterion-based prediction, on-site monitoring-based prediction, and artificial intelligence model-based prediction. It elaborates on

the core principles, research progress, and application cases of each method, while providing a comparative analysis of their applicability and limitations. The review indicates that theoretical criteria, while fundamental, often lack universality; monitoring techniques like acoustic emission and microseismic enable dynamic early warning but are susceptible to interference; and intelligent models such as machine learning show superior predictive performance but suffer from poor interpretability due to their “black-box” nature. Finally, the paper discusses future trends, pointing towards the integration of multi-source information, intelligent systems, and precision in rockburst prediction, offering a systematic reference for advancing mechanistic studies and improving disaster prevention and control capabilities.

Keywords

Rockburst, Rockburst Prediction, Theoretical Criterion, Monitoring Technique, Artificial Intelligence

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

岩爆是指在地下工程开挖或受到外界干扰时, 岩体内积蓄的弹性势能突然释放, 引发周围岩体发生爆裂、脱落和弹射等动力现象, 该现象的发生严重威胁工作人员的生命和财产安全, 是阻碍大型水电、交通、矿山及地下工程向深部发展的重要问题[1]。

世界上对岩爆进行有组织的系统研究始于 20 世纪 50 年代。南非、波兰、加拿大等采矿与深部工程较为发达的国家, 在岩爆发生机理、预测预报方法和工程防治技术等方面开展了深入研究, 并取得了较大进展。1977 年, 国际岩石力学学会(ISRM)牵头成立了专门的岩爆研究组, 系统收集、整理了世界各国相关的岩爆案例资料与数据, 在此基础上编写出版了《1900~1977 年岩爆注释资料》一书, 为后续研究奠定了重要基础。随着岩石力学学科的发展, 岩爆已成为该领域的核心议题之一。近年来, 几乎所有大型国际岩石力学学术会议都设有岩爆研究专题, 反映出学界对其持续的高度关注。其中, 系列性的“国际岩爆与微震活动性学术研讨会”自 1982 年首次在南非召开以来, 已成功举办了七届, 并出版了多部具有影响力的会议论文集, 极大地推动了全球范围内岩爆研究的交流与深化[2]。

本文在系统梳理与分析大量国内外文献的基础上, 从岩爆理论判据预测、现场监测预测, 以及与人工智能技术结合的模型预测这三个主要方向, 全面归纳了当前岩爆预测技术的研究进展与发展动态, 并深入剖析了各类方法的适用条件、优势与局限性, 以期为岩爆风险精准研判与防控实践提供参考。

2. 国内外研究现状

2.1. 岩爆理论判据研究

目前现有岩爆倾向性评价指标很多, 国内外学者普遍应用的评价指标有: 强度脆性系数 Be、动态破坏时间 DT、冲击能量指数 WCF 及岩爆倾向性指数 WET 等[3]。Ortlepp [4]从 60 年代起跟踪了南非金矿中几百次岩爆, 详细阐述了岩爆源机制和破坏机制, 指出应变岩爆的特点是岩爆发生在应力集中区, 岩爆发生之后才会出现矿震, 岩爆源和破坏源可能并不完全一致。隧道岩爆灾害图片见图 1。

Singh [5]和 Kidybinski [6]分别对岩石进行压缩试验, 获得矿区岩石岩体岩爆倾向性判别指标, 进而

判定岩石岩爆倾向性。Cook [7]通过地震网对矿震进行了大量检测, 观察到矿震次数远远大于岩爆次数, 说明只有小部分矿震与岩爆有关, 并认为在岩石受力达到极限后的变形阶段, 如果存在能量过剩的情况, 岩体将发生剧烈破坏。Bagde [8]等采用单轴循环加卸载试验对在开采过程中有岩爆倾向性的岩石的稳定性进行了评价。



Figure 1. Rockburst hazard in a tunnel

图 1. 隧道岩爆灾害

刘晓辉等[9]利用 RFPA3D 对深部大理岩开展常规三轴加载、恒轴压卸围压、加轴压卸围压 3 种不同应力路径下的渐进破坏试验, 提出基于能量指标的渐进破坏阶段划分方法, 并分析其对应特征应力阈值、特征能量变化规律, 最终完成岩爆指标 Re 、脆性指标 Be 的优化讨论, 为深部地下工程勘察设计、地下能源开采提供一定的理论支撑。王云飞等[10]对花岗岩系统开展了巴西劈裂、单轴及三轴和不同卸围压速率应力路径下的岩石力学试验, 提出了简化剩余弹性性能指数岩爆分级法, 详细分析了花岗岩强度和岩爆倾向性特征, 进一步提高了硬性花岗岩岩爆倾向性预测水平。栗盼平[11]采用岩石强度脆性系数评价法、弹性能量指数评价法及能量冲击性指标判据法对阿舍勒铜矿深部具有代表性的岩石进行岩爆倾向性评价。马池帅[12]以典型硬岩——N~J 水电站 TBM 引水隧洞砂岩为研究对象, 建立基于能量耗散的硬脆性岩石损伤模型, 定量跟踪分析了岩爆孕育过程中的能量积聚情况, 综合脆性指数和能量判据, 提出基于能量原理的修正岩爆判别指标 Prb 。马天昌[13]以双江口水电站洞室溢洪道为工程背景, 通过有限元软件构建了洞室的初始应力场, 将有限元得出的洞室损伤区云图与现场微震监测结果进行对比分析。在此基础上, 分析了洞室溢洪道变形和应力变化规律, 揭示了洞室变形机制, 探讨了洞室岩爆等级。通常在岩爆灾害发生后, 评估专家对岩体的岩爆类型进行划分, 烈度分级如表 1 所示, 而岩爆造成的直接损失和间接损失已经无法挽回, 因此在实际工程施工过程中, 工程技术人员需要对可能发生岩爆的岩体进行实时监测。对工程岩体进行岩爆倾向性研究, 一直是岩爆问题研究的热点问题。

Table 1. Rockburst intensity classification

表 1. 岩爆烈度分级

级别	能量(J)	烈度(级)	造成的损害程度
微爆	$<10^0$	<1	岩体的表面或深部局部破坏
弱岩爆	$10^0\sim10^2$	1~2	抛出少量的岩块, 有声响和地震效应, 设备无严重破坏
中等岩爆	$10^2\sim10^4$	2~3.5	抛出大量的带粉尘岩块, 形成气浪, 造成巷道支护破坏
强烈岩爆	$10^4\sim10^7$	3.5~5	造成几十米巷道破坏
灾害性岩爆	$>10^7$	>5	整个采区或整个水平范围内受破坏

2.2. 岩爆监测预测技术研究

岩体由于外部荷载的作用,产生裂缝扩展、塑性变形或者相变而释放“应力波”的过程被称为声发射。声发射监测(Acoustic Emission, 简称 AE)又称地音法,是通过接收并分析岩体内部传出的“声”信号事件数和能率,判定岩体内部结构的演化规律[14]。具体示意图如图 2 所示。

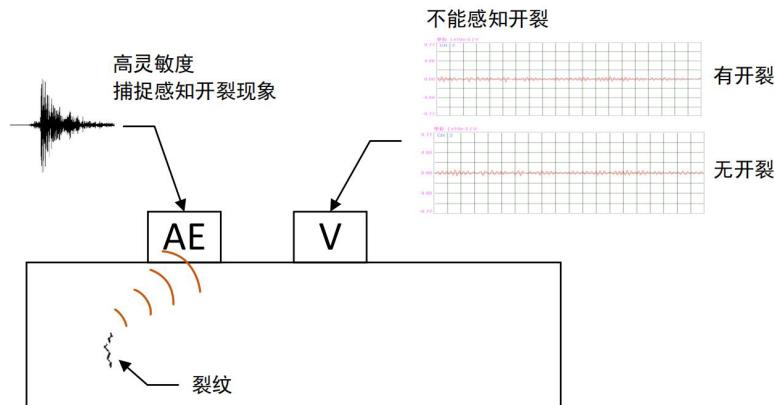


Figure 2. Schematic diagram of acoustic emission monitoring
图 2. 声发射监测示意图

在岩石力学领域,Goodman [15]首先通过试验发现岩石同样具有 Kaiser 效应,也就是声发射不可逆效应,这在岩石的塑性变形、微观破裂和裂纹扩展方面都有显著的表现。这项研究为声发射技术在岩石材料中的应用奠定了基础。罗丹旎等[16]设计了单裂隙花岗岩真三轴单面临空试验,采用高速摄像系统和声发射系统联合监测不同产状岩石的声发射演化特性,揭示了裂隙产状与岩爆弹射动能的关系,研究成果为裂隙岩石的岩爆灾变机制和声发射监测的有效性提供了科学依据。王亚磊等[17]认为对岩爆等级进行精准分级是岩爆灾害预警的重要基础,其采用声发射监测不同方向条件下岩样单轴压缩试验的声发射特征,并基于此特征提出了基于试件主破裂前的累积声发射能量 E_q 与最终破裂后的累积声发射能量 E 之比的岩爆等级预判方法。

微震监测技术是现行的一种高科技、信息化的地下工程岩体监测技术。微震是指目标岩体在外力作用下,材料内部的一个或多个局域源以顺位弹性波的形式快速向外释放能量的过程,目标能量传递起源于材料的裂纹、岩体的破坏。岩体的破坏是一系列岩石损伤的演化过程,通过分析蕴含在岩体内部的微震数据,能够得到岩体在破坏演化过程中应力和能量的传递信息,可以从侧面推演出岩体的稳定性和破坏机理[18]。

李天斌等[19]研发的微震监测预警系统被应用于峨汉高速大峡谷隧道高地应力段,实现了对微震活动的自动一体化监测与数据处理,并多次成功预警了异常的微震活动与岩爆,具有重要的工程实用价值。可为隧道工程岩爆灾害预警以及工程支护策略设计提供有效支撑,进而提高工程的安全性和可靠性。于群等[20]利用微震监测技术,对岩爆孕育及发生过程中微震事件的产生及发展规律进行了深入研究,实现了对岩爆发生的等级和位置较高精度的预测。马春驰等[21]结合微震监测技术,开展了岩体脆性破裂及岩爆发育过程的解译研究,建立了隧道掘进的岩爆预警方法。魏秀琪等[22]以岩爆经验预测为基础,提出基于微震前兆信息的岩爆要素综合预测预警方法。

Zhao 等[23]在天山 - 胜利隧道中采用新开发的微震(MS)监测系统来检测微震活动,进而对岩爆灾害进行预测和预警。该系统不仅具有人工分析的准确性,还具有实时分析和预警的优点。

2.3. 岩爆预测模型

目前,随着机器学习领域的快速发展和岩爆数据量的增多,岩爆预测的研究朝着更加智能化的方向发展,大量研究者已将不同类型的机器学习模型应用在岩爆预测上,并取得了较好的预测效果。

董益和李宁[24]针对岩爆等级短期预测,通过贝叶斯优化算法,建立了考虑岩体力学参数、地质条件、支护参数、开挖跨度及现场微震监测数据的BO-XGB机器学习模型,并将优化后的XGBoost模型同XGBoost、随机森林、神经网络和决策树模型进行比较分析,证明贝叶斯优化后的XGBoost模型具有更高的准确性和可靠性,以及很高的工程利用价值。高永涛等[25]将模糊物元和K均值与D-S证据理论相结合,引入蒙特卡洛模拟方法,建立了基于D-S证据理论岩爆预测模型,为岩爆预测领域的研究提供新的思路。将其应用在秦岭终南山公路隧道2号竖井工程的5个岩爆案例中,其预测结果与岩爆实际等级完全吻合,同时将其与经验方法对比,再次证明了模型的有效性和实用性。陈龙[26]以板裂化岩爆重要因素作为特征参数,采用并行的集成学习算法极限梯度提升树作为基础算法,构建了板裂化岩爆预测模型,并结合网格搜索和交叉验证法提出一套超参数优化步骤,提升了模型的预测性能。模型采用softprob目标函数,实现了不同岩爆等级-概率预测。采用SHapley Additive exPlanations方法实现了各特征参数对岩爆发生影响程度的重要性分析。通过工程实例应用以及与其他机器学习模型对比,验证了该预测方法的准确性与可靠性。

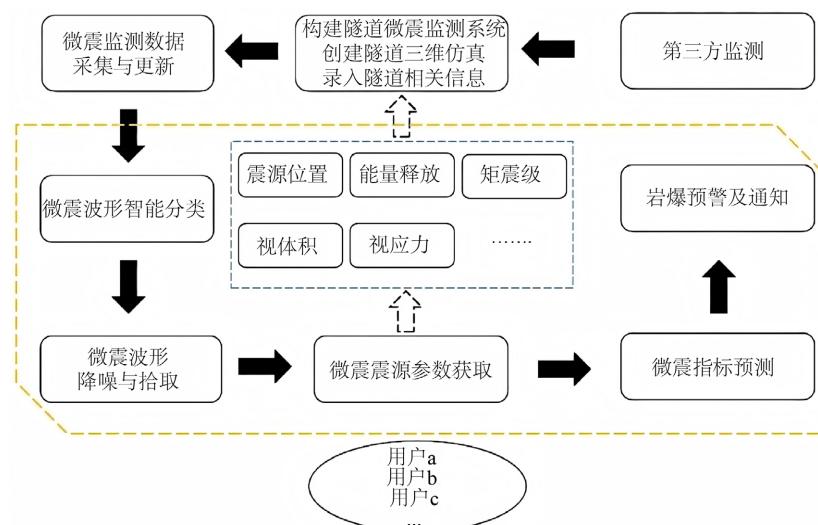


Figure 3. System operation flowchart

图3. 系统运行流程图

Ke等[27]基于秦岭输水隧洞289天微震监测数据和岩爆事件,构建了岩爆烈度等级预测数据集,引入了六种机器学习算法,并建立了六种岩爆预测模型。通过Borderline-SMOTE1消除数据不平衡对模型性能的影响,又引入了Adaboost算法,最后,将Borderline-SMOTE1-Adaboost模型应用于秦岭输水隧洞的岩爆烈度等级预测,验证了利用微震参数预测岩爆烈度等级的有效性。结果表明,Borderline-SMOTE1-Adaboost岩爆预测模型可为深埋隧洞施工过程中岩爆灾害预警提供参考。Afraei等[28]收集了一个由188个数据集组成的岩爆数据库,每个数据集对应于一系列预测变量和一个为因变量“岩爆强度”定义的类,对数据进行了包括统计分析策略、用于特征(变量)子集选择的元启发式技术和一些特征提取技术的预处理,揭示了对因变量建模具有最高优先级的重要预测变量的特定组合。Shukla等[29]采用XGBoost、决策树和支持向量机三种机器学习方法,预测地下工程中岩爆的发生,并对比了三种方法的预测效果。

张航[30]基于微震监测技术、微震信号处理、震源定位、参数计算、微震预测和岩爆预警等各类智能

算法和模型，结合 Java 和 Python 编程语言，运用 B/S 构架体系，构建了基于全时域信号的隧道围岩微震分类 - 降噪 - 拾取智能处理方法体系，并建立了隧道微震自动化监测及岩爆智能预警系统平台，如图 3 所示。

周煦桐[31]对岩爆评价指标与烈度之间进行 Spearman 相关性分析，构建高效准确的反向传播神经网络预测模型(Back-Propagation Network)，并用三个代表性地区共 20 个工程实例对预测模型进行验证，结果评价表明该模型具备可行性和有效性，为长期岩爆预测提供了参考。满轲等[32]提出了一种结合卷积神经网络(CNN)和长短时记忆神经网络(LSTM)优势的 CNN-LSTM 模型，依托引汉济渭工程，预测 TBM 隧道稳定段掘进参数和岩爆等级，并且将 CNN-LSTM 模型与其它模型的预测结果进行比较分析。结果表明 CNN-LSTM 模型对于相同容量的不同岩爆样本敏感性较高，具有较高的鲁棒性，明显优于其他模型。

3. 岩爆预测面临的共性挑战和应对策略

岩爆预测在深部地下工程中仍面临四类共同制约：强岩爆记录稀少导致样本失衡、深度模型缺乏物理解释而难以被工程人员接受、微震与声发射信号受施工噪声干扰显著、模型换隧道精度骤降。针对这些问题，近期研究通过将能量守恒、刚度退化等岩爆判据写入损失函数，使网络输出与力学指标对应，提高了透明度；同时利用迁移、联邦和元学习在保护数据隐私的前提下共享跨工程特征，缓解标签不足问题。结合自编码器 U-Net 框架对原始波形进行多源降噪，事件识别率提升约一成。此外，建立行业共享数据联盟、制定统一测试基准并推广机理 - 数据融合范式，是岩爆预警走向可信与标准化的关键。

4. 总结

综上所述，岩爆预测是目前深部岩体工程的研究热点和难点。各种预测方法都有其独特的优点和局限性，应根据工程实际情况选择合适的预测方法或综合多种方法进行预测。

理论是一切监测及防治手段的基础，当前盛行的能量理论、刚度理论、强度理论、倾向性理论等学说均仅适用于某些特定地质条件或者某种实验状态，不具备普适性。因此，为确保监测手段和防治方法的有效、准确，对岩爆发生机理和理论支撑应做进一步研究明确。

AE 法具有实时监测和快速响应的能力，能够及时发现岩爆征兆。但在实际应用中可能受到噪声干扰、信号传输损耗等因素的影响，导致预测结果不准确。岩爆微震监测预警可以实时了解岩土内部的应力状态和变化趋势，不会对岩土结构造成干扰或损害，从而保持了岩土的原始状态和完整性。但是微震信号有效识别、干扰噪声的去除、波形到时检测、微震震源定位大多强烈依赖于工程师的操作，在自动化、智能化和实时性方面进展缓慢，严重影响岩爆预警的时效性和准确性。

随着人工智能的发展，机器学习理论已成为岩爆预测的重要发展方向，然而基于机器学习理论的岩爆预测模型存在可解释性较差的问题，另外，这些研究中的预测结果往往只得到最大可能发生的岩爆等级，难以做到全等级的概率预测。

未来岩爆预测方法的发展将趋向于智能化、自动化和精准化。随着人工智能技术的不断发展，岩爆预测将更加依赖于数据驱动和模型驱动相结合的方法。同时，随着新材料、新技术和新工艺的不断涌现，岩爆防治措施也将得到进一步发展和完善。跨界融合将成为未来岩爆预测和防治的重要方向之一。

参考文献

- [1] 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 649-673.
- [2] 李果, 周承京, 张勇, 等. 地下工程岩爆研究现状综述[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3): 77-83+94.
- [3] 周佳佩. 基于数字钻技术的深部硬岩力学特性及岩爆倾向性预测研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [4] Ortlepp, W.D. and Stacey, T.R. (1994) Rockburst Mechanisms in Tunnels and Shafts. *Tunnelling and Underground*

- Space Technology*, **9**, 59-65. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0886-7798(94)90010-8)
- [5] Singh, S.P. (1988) Burst Energy Release Index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **21**, 149-155. <https://doi.org/10.1007/bf01043119>
- [6] Kidybiński, A. (1981) Bursting Liability Indices of Coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **18**, 295-304. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)91194-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)91194-3)
- [7] Cook, N. (1966) The Design of Underground Excavations. American Rock Mechanics Association.
- [8] Bagde, M.N. and Petroš, V. (2005) Waveform Effect on Fatigue Properties of Intact Sandstone in Uniaxial Cyclical Loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **38**, 169-196. <https://doi.org/10.1007/s00603-005-0045-8>
- [9] 刘晓辉, 李泓颖, 张旭, 等. 不同应力路径下深部大理岩渐进破坏能量指标研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(3): 72-83.
- [10] 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.
- [11] 栗盼平. 阿舍勒铜矿深部岩石岩爆倾向性评价及防治措施研究[J]. 新疆有色金属, 2024, 47(2): 45-46.
- [12] 马池帅. 基于能量原理的岩爆倾向性评判[J]. 土工基础, 2024, 38(1): 96-102.
- [13] 马天昌. 高地应力区深埋洞室开挖过程岩体力学响应与岩爆倾向性分析[J]. 铁道建筑技术, 2024(1): 148-153.
- [14] 王炀, 何满潮, 刘冬桥, 等. 深部椭圆形洞室围岩冲击岩爆实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(11): 2214-2228.
- [15] Goodman, R.E. (1963) Subaudible Noise during Compression of Rocks. *Geological Society of America Bulletin*, **74**, 487-490. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1963\)74\[487:sn\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1963)74[487:sn]2.0.co;2)
- [16] 罗丹旎, 卢思航, 苏国韶, 等. 含预制单裂隙花岗岩的真三轴单面临空岩爆试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 75-87.
- [17] 王亚磊, 徐金明, 吴述宽. 使用声发射测试结果预判岩爆等级[J]. 金属矿山, 2022(1): 170-177.
- [18] 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.
- [19] 李天斌, 许韦豪, 马春驰, 等. 基于深度学习的隧道微震监测及岩爆预警技术与系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(5): 1041-1063.
- [20] 于群, 唐春安, 李连崇, 等. 基于微震监测的锦屏二级水电站深埋隧洞岩爆孕育过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 36(12): 2315-2322.
- [21] 马春驰, 李天斌, 张航, 等. 基于 EMS 微震参数的岩爆预警方法及探讨[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 765-774.
- [22] 魏秀琪, 唐春安, 张世超, 等. 秦岭隧道四号支线微震规律与岩爆预警研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1866-1874.
- [23] Zhao, J., Huang, D., Cai, Y., Huang, D., Zhou, X., Wang, F., et al. (2024) Rockburst Prediction and Early Warning for a Highway Tunnel Excavated by TBM Based on Microseismic Monitoring. *Frontiers in Earth Science*, **12**, Article 1391509. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1391509>
- [24] 董益, 李宁. 基于贝叶斯优化 XGBoost 模型的岩爆等级短期预测研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(3): 48-52.
- [25] 高永涛, 朱强, 吴顺川, 等. 基于 D-S 证据理论的岩爆预测方法研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 244-251.
- [26] 陈龙. 深地高应力环境岩体破裂演化机理及岩爆预测研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [27] Ma, K., Shen, Q.Q., Sun, X.Y., et al. (2023) Rockburst Prediction Model Using Machine Learning Based on Microseismic Parameters of Qinling Water Conveyance Tunnel. *Journal of Central South University*, **30**, 289-305. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5233-8>
- [28] Afraei, S., Shahriar, K. and Madani, S.H. (2019) Developing Intelligent Classification Models for Rock Burst Prediction after Recognizing Significant Predictor Variables, Section 1: Literature Review and Data Preprocessing Procedure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **83**, 324-335. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.022>
- [29] Shukla, R., Khandelwal, M. and Kankar, P.K. (2021) Prediction and Assessment of Rock Burst Using Various Meta-Heuristic Approaches. *Mining, Metallurgy & Exploration*, **38**, 1375-1381. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00415-w>
- [30] 张航. 基于深度学习的隧道微震信号处理及岩爆智能预警研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [31] 周煦桐. 基于神经网络算法的岩爆预测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
- [32] 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/OL]. 煤炭科学技术, 1-19. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231026.1344.003.html>, 2024-06-17.