深部硬岩矿山岩爆现状、预测与防治研究进展

赵兴东[1,2],曹学文[1,2],王　昌[1,2],秦绍龙[1,2],宋景仪[1,2]
(1. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室,辽宁 沈阳　110819;
2. 东北大学 资源与土木工程学院,辽宁 沈阳　110819)

摘要: 岩爆是深部硬岩矿山建设与开采过程中的主要动力灾害,严重威胁施工安全. 为系统梳理深部硬岩矿山岩爆领域的研究进展与发展趋势,在全面调研国内外相关文献的基础上,结合典型岩爆案例,从发生现状、发生机制、影响因素、风险评估方法及防治技术等方面开展了系统分析. 结果表明:我国已有20余座深部硬岩矿山发生过岩爆灾害,岩爆集中发生于600 m以深,现有数据揭示岩爆发生地点最大水平主应力通常大于30 MPa,且发生频率随埋深增加呈上升趋势;岩爆发生机制研究可分为2类:一是基于岩石材料力学状态的研究,二是基于工程系统演化角度的孕育过程研究;岩爆影响因素可归纳为岩石基本性质、开挖扰动、地应力及岩体质量4个方面,各因素既相互独立又相互关联,共同控制岩爆的孕育与发生;深部硬岩矿山岩爆风险评估方法主要包括经验判据法、数学模型法、数值模拟法和微震监测法,各方法具有独特的优势、局限性与适用条件;岩爆防治工作根据干预时机可分为主动调控技术与主动防控技术,前者贯穿矿山设计、建设、生产全过程,后者主要应用于建设与生产阶段,岩爆防治工作可依照"区域应力调控+局部应力释放+围岩主动支护"的基本原则逐级推进. 最后,基于上述分析对深部硬岩矿山建设、岩爆预测及防治研究的未来发展进行了展望,以期为深部开采矿山设计和岩爆灾害防控研究提供参考.

关键词: 深部硬岩矿山;井巷岩爆;采场岩爆;岩爆预测;岩爆防治
中图分类号: TD 853　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)03-0559-22

Research progress on rockburst status, prediction, and prevention in deep hard rock mines

ZHAO Xingdong[1,2], CAO Xuewen[1,2], WANG Chang[1,2], QIN Shaolong[1,2], SONG Jingyi[1,2]
(1. Key Laboratory of Ground Control Management Plan in Deep Metal Mines, National Mine Safety Administration, Shenyang, Liaoning 110819, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Rockbursts are a major dynamic hazard in deep hard-rock mining, posing significant threats to operational safety. This study presented a systematic review of recent advances and research trends in rockburst management by synthesizing global literature and representative case histories. The analysis covered occurrence characteristics, failure mechanisms, triggering factors, risk assessment methods, and control strategies. The results show that: Rockburst events have been reported in more than 20 deep hard-rock mines in China, predominantly occurring at depths

收稿日期: 2025-12-15　　**修回日期:** 2026-04-27　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250584
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52130403);深地国家科技重大专项(2024ZD1003801)
通信作者: 赵兴东(1975—),男,辽宁省沈阳市人,教授,博士生导师. E-mail:NEU537zhaoxingdong@126.com
引用格式: 赵兴东,曹学文,王　昌,等.深部硬岩矿山岩爆现状、预测与防治研究进展[J].中国矿业大学学报,2026,55(3):559-580.
ZHAO Xingdong, CAO Xuewen, WANG Chang, et al. Research progress on rockburst status, prediction, and prevention in deep hard rock mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(3): 559-580.

greater than 600 m. Available data indicate that the maximum horizontal principal stress at rockburst sites generally exceeds 30 MPa, and the frequency of occurrence increases with depth. Research on rockburst mechanisms can be broadly categorized into material-scale mechanical failure mechanisms and engineering-scale system evolution mechanisms. The main influencing factors include intrinsic rock properties, excavation-induced disturbances, in-situ stress conditions, and rock mass quality, which collectively control rockburst initiation. Risk assessment primarily relies on empirical criteria, analytical and numerical modeling, and microseismic monitoring, each with specific advantages and limitations. Control measures can be broadly divided into design-based strategies and operational interventions, depending on the stage of implementation. Effective mitigation typically follows a hierarchical approach combining regional stress optimization, localized stress relief, and energy-absorbing support. Finally, future directions for deep mining design and rockburst prediction are discussed to inform further research and engineering practice.

Key words: deep hard-rock mining; tunnel and shaft rockbursts; stope rockbursts; rockburst prediction; rockburst mitigation and control

岩爆多发生于高地应力条件下工程开挖后形成的应力集中区内,如水利水电、交通隧道、金属/非金属矿山及核废料地下处置等各类岩体工程中,这类区域岩体条件都具有一定的储能能力和脆性破坏特征[1]. 对于硬岩矿山开采领域而言,近10年来随着矿山开采强度增加,多数矿山由浅部转向深部开采,受高地应力、强开采扰动影响,岩爆灾害发生频率和破坏能力显著提升. 由于岩爆的发生往往导致严重的设备损毁、人员伤亡与经济损失,现已成为制约深部矿山安全高效生产的关键因素. 因此,岩爆作为深部硬岩矿山开采领域的核心挑战备受国内外学者关注.

世界上首次对岩爆的报道发生在上世纪英国的锡矿[2],后续以美国、加拿大、南非、中国为代表性的20多个国家的硬岩矿山陆续发生不同规模、不同强度的岩爆事件. 国外针对岩爆研究起步较早,20世纪60年代,美国开始研究岩爆作用机理并建立岩爆监测系统;20世纪80年代,加拿大在为期10 a的深部采矿计划中完成微震监测网络的优化布置,着重研究深部开采的岩爆实时预警与控制;20世纪90年代,南非开展极端深度(3 500~5 000 m)下的深部开采与岩爆防控的关键技术研究[3]. 相比而言,国内针对硬岩矿山岩爆研究起步较晚,但我国依托“九五”、“十五”、“十一五”、“十二五”、“十三五”、“十四五”等科技攻关计划,着重展开了岩爆机制及其预警和防控技术的研究.

与交通、水利等岩土工程领域相比,深部硬岩矿山岩爆的发生具有其特殊性,且主要体现在以下3个方面:1)深部硬岩矿山涉及采场、巷道、竖井及不同功能的硐室共同构成了复杂空间体系,开挖工程存在先后顺序,形成复杂叠加应力场,更易引发围岩岩爆;2)由于采空区处理方法的差异,不同采矿方法形成的采空区,其围岩、矿柱的受力环境差异巨大,从而导致发生岩爆的概率存在差异;3)钻爆法掘进和采场爆破均会对已开挖采场和井巷工程造成动力扰动,围岩在静载与动力扰动的叠加作用下更易发生岩爆.

综上所述,由于硬岩矿山向深部延伸的开采趋势及自身独特复杂的岩体力学环境,使得岩爆成为制约深部开采的核心问题. 因此,有必要立足深部硬岩矿山开采的独特性,系统调研国内外岩爆研究现状、发生机制、风险评估及防治技术,以此为基础,明确未来研究重点与方向,探索贴合工程实际的岩爆预测与防治方法,以期为深部硬岩矿山岩爆理论研究与工程实践提供参考.

1 深部硬岩矿山岩爆发生现状

关于岩爆的定义国际上仍存在一定争议,文献[4]根据岩体微震监测得到的突发性能量释放特征,从岩石破坏角度定义岩爆;文献[5]认为岩体开挖过程中出现的围岩裂纹扩展声音和围岩的剥落、弹射、产生新的断裂面等现象即可称为岩爆;文献[6]认为岩爆是当应力超过岩体强度时,由于弹性能的迅速释放而导致围岩突然破坏的现象;近年国内外专家学者认为,岩爆是集突发性、破坏性和复杂性的岩石动力地质灾害现象[7]. 为便于统计国内外深部硬岩矿山岩爆发生现状,本文提出岩爆是在具备高储能能力的坚硬岩体中,岩体以突然、猛烈

的弹射或崩出形式释放弹性能而引发的动力地质灾害现象. 在下文岩爆矿山统计中,以岩石弹射或造成较大破坏认定为岩爆事件,不包括围岩异响、巷道破碎、顶板冒落和围岩层裂等现象.

目前,我国先后有20余座硬岩矿山已经发生或正在遭受岩爆灾害困扰,表1为我国典型深部硬岩矿山岩爆案例. 其中,首次发生或集中发生岩爆的硬岩矿山埋藏深度分布于600～1 276 m,其中岩爆活动埋深最浅的矿山为玲珑金矿(630 m),该处最大水平主应力为37.55 MPa;埋深最深矿山为会泽铅锌矿(1 276 m),该处最大水平主应力为37.21 MPa. 分析表1发现,不同矿山岩爆发生位置的埋藏深度虽有差异,但其最大主应力均在30 MPa以上,且岩爆等级均为轻微岩爆. 因此,当硬岩矿山开采位置的最大水平主应力约为30 MPa时可能存在岩爆风险,应结合岩爆预测方法提前考虑岩爆防治策略. 此外,硬岩矿山在首次出现岩爆后,埋藏深度越深岩爆发生频率越高,破坏程度越严重,如红透山铜矿、玲珑金矿、焦家金矿、新城金矿和三山岛金矿等[8].

据不完全统计,我国采矿深度超过1 000 m的深部硬岩矿山已超过30座,分布在胶东半岛、辽宁中部等区域,主要有中国黄金纱岭金矿(1 600 m)、山东黄金新城金矿(1 527 m)、山东招金瑞海矿业(1 500 m)和山东黄金三山岛金矿(1 100 m);辽宁抚顺红透山铜矿(1 600 m)、辽宁本溪思山岭铁矿(1 506 m)、辽宁本溪大台沟铁矿(1 500 m)、辽宁鞍山陈台沟铁矿(1 600 m)等,我国硬岩矿山岩爆防治工作迫在眉睫[9].

经总结、分析可知,我国深部硬岩岩爆矿山具有以下特点:1)岩爆活动分布于埋深600～1 276 m之间,决定岩爆发生的首要条件是开采位置的最大水平主应力,当应力达到约30 MPa时即存在岩爆风险,与开采深度关联较小;2)岩爆大多发生于花岗岩、大理岩、闪长岩等脆性硬岩中,但凝灰岩、玄武岩及粉砂岩等非脆性岩石也可能发生岩爆;3)在发生岩爆活动的矿山中,采用空场法作为主体采矿方法的矿山其岩爆程度较充填法和崩落法更为强烈,表明大规模空场回采容易诱发岩爆灾害.

表1　国内典型深部硬岩矿山岩爆实例

Table 1　Instances of rockburst in typical deep hard rock mines in China

矿山名称	采矿方法	岩爆地点埋深/m	最大水平主应力/MPa	岩石单轴抗压强度/MPa	主要岩石种类	岩爆现象描述	岩爆程度
山东鑫汇金矿[8]	充填法	600	—	139.00	黑云母花岗岩	岩石弹射声响强烈	轻微
山东焦家金矿[8]	充填法	630	—	157.00	绢云母化花岗岩	顶板、两帮围岩岩石弹射	轻微
山东玲珑金矿[8]	充填法	630	37.55	124.00	钾质花岗岩	巷道顶板、两帮围岩岩石弹射	轻微
山东新城金矿[8]	充填法	830	31.15	150.00	绢云母化花岗岩	巷道围岩岩石弹射,锚杆脱落	轻微
山东三山岛金矿[8]	充填法	915	37.62	148.00	绢云母化花岗岩	采场岩石弹射	轻微
山东玲南金矿[10]	充填法	1 000	57.60	106.44	黄铁绢英岩化花岗岩	岩石抛射	轻微
河南崟鑫金矿[11]	空场法	360～1 200	—	126.50	片麻岩、角闪岩、石英岩	片帮、底岩上崩	轻微～强烈
河南枪马金矿[12]	空场法	900	—	—	片麻岩、角闪岩、石英岩	井巷围岩片帮	轻微～中等
河南鸿鑫金矿[12]	—	848	—	—	角闪岩、石英岩	井巷围岩片帮、冒顶	轻微～中等
辽宁二道沟金矿[13]	空场法、充填法	800～1 000	—	132.39 161.09	火山岩 侵入岩	爆裂声、无岩石弹射	中等～强烈
辽宁红透山铜矿[14]	空场法、充填法	780	30.40	103.70	黑云、角闪斜长片麻岩	岩块弹射、冒落,巷道帮裂	轻微～中等
云南大红山铁矿[15]	崩落法	807	38.93	127.60 135.34	大理岩 磁铁矿、赤铁矿	冒顶、片帮	轻微～中等

续表1

矿山名称	采矿方法	岩爆地点埋深/m	最大水平主应力/MPa	岩石单轴抗压强度/MPa	主要岩石种类	岩爆现象描述	岩爆程度
云南会泽铅锌矿[16]	充填法	1 276	37.21	96.80	白云岩	片状剥落,巷道肩部岩石剥落	中等~强烈
				69.31	石灰岩		
湖北鸡冠嘴铜金矿[17]	充填法	800~1 000	—	118.91	闪长岩	岩爆声音、岩石片状剥落	轻微
				78.91	大理岩		
湖北铜录山铜铁矿[13]	充填法	700~1 000	—	—	大理岩、石英二长闪长岩	岩爆声音、岩块冒落	轻微
甘肃金川二矿[18]	充填法	800	40.64	66.49	大理岩	脆性破裂声响	轻微
				135.00	花岗岩		
				106.38	混合岩		
甘肃厂坝铅锌矿[19]	崩落法	850	33.47	93.60	黑云方解石英片岩	片帮冒顶、巷道变形开裂	轻微~中等
				56.30	大理岩		
安徽冬瓜山铜矿[20]	充填法	800	34.33	132.20	大理岩 石英闪长岩	伴随清脆的响声,突出的炸裂声	轻微
四川白马铁矿[21]	—	400~600	—	—	角闪岩	岩爆声音、片帮、岩块弹射	轻微~中等
新疆阿舍勒铜矿[22]	崩落法、充填法	968	38.44	55.30	玄武岩	混凝土开裂、围岩垮落	轻微~中等
				32.50	凝灰岩		
湖南渣滓溪锑矿[23]	充填法	600	19.61	65.17~76.11	凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩、凝灰质板岩	岩爆声音、岩石崩落	轻微~中等
广东凡口铅锌矿[24]	充填法	800	31.20	63.83	粉砂岩、粉砂质灰岩	岩爆声音、岩石片状脱落	轻微

2 岩爆特征、发生机制及影响因素

2.1 岩爆类型

关于岩爆类型的划分标准,学术界至今尚未形成统一认识.随着相关研究的进一步发展,学者们从成因机制、诱发条件、破坏特征及力学性质等多角度,陆续提出了多种岩爆分类方案,如表2所示.在深部硬岩矿山开采中,依据岩爆震源机理将其归纳为以下5类:应变型岩爆、弯曲破坏型岩爆、矿柱破坏型岩爆、剪切破坏型岩爆及断层滑移型岩爆.其中,应变型岩爆的出现频率最高,主要源于巷道掘进或回采过程中局部应力集中与弹性应变能的累积释放,该类型岩爆破坏范围较小、程度较轻.

表2 岩爆类型划分

Table 2 Classification of rockburst types

参考文献	划分依据	类型划分结果
文献[25]	震源机制	1)应变型岩爆;2)弯曲破坏型岩爆;3)矿柱破坏型岩爆;4)剪切破坏型岩爆;5)断层滑移型岩爆
文献[26]	发生机制	1)应变型岩爆;2)构造型岩爆;3)应变和构造混合型岩爆
文献[27]	发生机制	1)应变型;2)应变-结构面滑移型;3)断裂滑移型
文献[28]	岩爆发生时的力学状态	1)应变型岩爆;2)冲击型岩爆
文献[29]	岩爆发生时间	1)即时型岩爆;2)时滞型岩爆
文献[30]	岩体结构	1)诱发型岩爆;2)触发型岩爆;3)自发型岩爆

2.2 岩爆发生机制

岩爆发生机制主要包含2种:震源机制和破坏机制.文献[25]根据岩爆震源的差异提出应变岩爆机制、屈曲岩爆机制、矿柱岩爆机制和剪切滑移岩爆机制.对于岩爆破坏机制的研究主要基于室内岩石力学框架下的理论分析,代表性理论包括强度理论、能量理论、刚度理论、失稳与突变理论以及断裂破坏理论等[27].强度理论认为岩体开挖

后岩体产生应力集中现象，当岩体集中应力超过岩体强度极限时发生岩爆；能量理论认为，当岩体力学平衡状态被打破时岩体所释放的能量超过破坏消耗的能量时，即可发生岩爆；刚度理论认为，岩体开挖后塑性区岩体刚度若大于周围弹性围岩刚度，当塑性区岩体达到其极限承载力时，就会发生岩爆；断裂破坏理论则指出，岩爆的发生是岩体在外荷载作用下产生大量微裂纹扩展、汇聚形成宏观裂缝造成的岩体失稳现象.

目前，岩爆破坏机制研究多集中于室内试验研究，主要通过观察岩石试样破坏时的特征总结得到岩石试样尺度的岩爆力学机制，主要可归纳为压致拉裂、压致剪切拉裂及弯曲鼓折3种. 室内岩爆机制试验研究对象主要聚焦于应变型岩爆，但随研究推进，国内外学者发现岩爆案例中包含一定数量的以结构面为主导的滑移型岩爆事件[31]，因此部分学者基于试验研究展开对断裂滑移型及应变-结构面滑移型岩爆机制的探索[32-34]. 已有研究表明，应变型岩爆在孕育过程中以张拉破裂为主导，而滑移型岩爆孕育过程中剪切破裂所占比例明显高于应变型岩爆[13].

当前国内外学者对岩爆发生机制研究的关注点已不再局限于岩石试样破坏时的瞬间状态分析，而是演进到涵盖岩爆孕育过程的监测预警与动态调控研究. 文献[27]基于室内试验、物理模型试验、数值模拟及现场监测等手段，深入探究了不同类型岩爆的孕育过程机制，阐明了其微震信息的演化特征. 文献[35]通过对含结构面试样的声发射特征研究，指出含结构面试件岩爆破坏强度大于非结构试件原因是无结构面岩体破坏过程是非线性和渐进性的，结构面岩爆具有突发性和瞬时性的特点. 文献[36]认为岩爆孕育机理是指在井巷、采区开挖后，岩体应力重新分布，形成应力集中、弹性能聚集，随之发生损伤、裂隙扩展直至围岩弹性能突然释放这一系列复杂的动力学变化.

2.3　岩爆影响因素

2.3.1　岩石基本性质

岩爆通常被认为是发生在脆性和硬岩中的一种特殊破坏模式，不同岩石其组成成分略有差异，进而导致岩石强度、脆性特征存在差异，这些特性常被用来评估岩爆发生的可能性[6]. 从能量角度考虑[32]，岩爆与围岩储存的弹性能突然释放有关. 国内外早期针对岩爆机理的研究普遍从岩石单轴压缩试验着手，通过研究岩石试样应力-应变曲线，发现在加载过程中岩石试样在峰前会依次经历能量积聚的弹性形变和能量耗散的塑性形变过程，当弹性能超过储能极限后，岩石试样储存弹性能突然释放、试样崩坏，峰后曲线瞬间跌落. 根据该特点国内外学者基于单轴压缩试验和单轴加卸载试验提出多种基于室内岩石力学试验的岩爆能量判据.

2.3.2　开挖扰动

1)静力学状态

深部硬岩矿山井巷、采场未开挖时，岩体处于平衡状态(即三向压缩状态). 岩体开挖后，该处岩体形成一个或多个自由面，应力状态从三向压缩变为两向压缩，甚至在极端情况下转变为单向压缩状态，如图1所示. 在受力状态变化过程中，岩体受集中应力作用，内部弹性能逐渐积累，为岩爆的发生提供基础条件. 这意味着在静态应力场中，当深部硬岩相对应力从三向受力逐渐转变为单向受力时，岩体存在发生岩爆的风险.

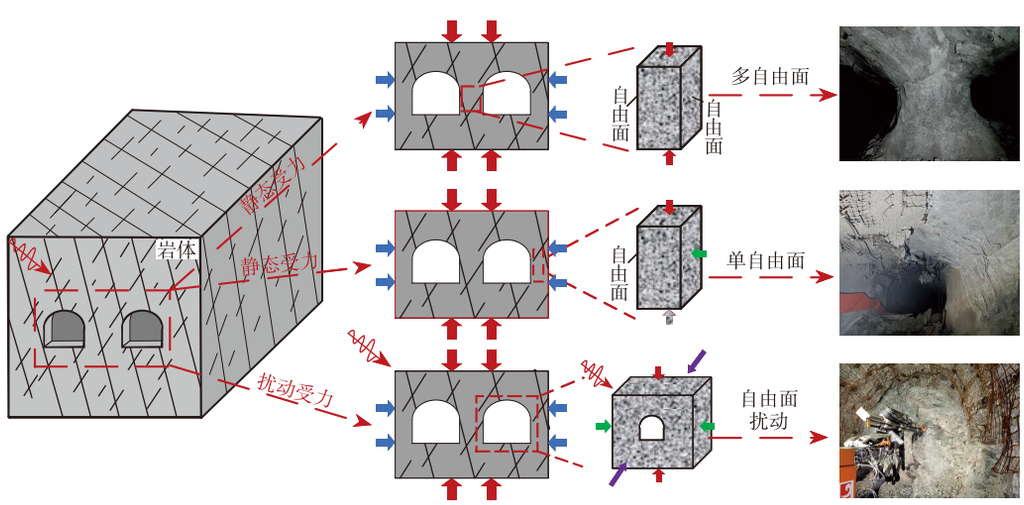


图1　岩体开挖扰动应力路径

Fig. 1　Stress path of rock mass excavation disturbance

2)动力学状态

深部岩体开挖后,应力重分布后的围岩受力逐渐稳定.但在机械振动、爆破扰动和断层活化等扰动作用下,围岩受应力波影响静态应力平衡被破坏,为开挖现场岩爆的发生提供动力学条件.需要说明的是,扰动产生的应力波不仅提供额外的应力,而且还诱发岩体振动,进一步破坏围岩的稳定性,极大增加发生岩爆的风险.

2.3.3 地应力和岩体结构

1)地应力

地应力是深部硬岩矿山岩爆发生的主导因素之一,其影响贯穿于岩体储能、裂纹萌生与动力释放全过程.高地应力条件下,硬岩表现出由脆性向延性转化的趋势,但在开挖卸荷引起的应力重分布过程中,当应力集中程度超过岩体强度极限时,储存的能量将以动力形式突然释放,诱发岩爆.

2)岩体结构

地应力和岩体结构对深部开挖岩体的破坏起至关重要的作用,HOEK 和 BROWN 基于应力参数和地质强度指数(GSI),定义了不同地应力和岩体质量组合下包括岩爆在内的 9 种岩体潜在破坏类型[37].其根本原因在于岩体强度受结构面影响较大,岩体结构越完整、节理裂隙越不发育,岩体强度越大,从而具有较强储存弹性能的能力,更容易发生岩爆.反之,如果岩体较为破碎、结构面密度大,则岩体储存弹性能的能力较小,岩体发生岩爆的可能性也越小.

关于结构面与岩爆间关系的研究,文献[38]通过总结某隧道岩爆事故案例发现围岩岩体质量为 III、IV 级时最易发生岩爆,结构面组数为 2 组,节理密度为 3~7 条/m 时岩体发生岩爆越频繁;文献[39]通过分析 56 个岩爆案例发现结构面滑移型岩爆分布规律受控于结构面方向和地应力方向,与最大主应力方向夹角更小的结构面更有利于发生结构面滑移型岩爆.除此之外,结构面的张开和滑移会增加围岩的附加变形,文献[40]就某隧道断层滑动岩爆事故展开机理研究,通过微震监测发现受集中应力和大型结构面影响,在岩爆发生过程中,结构面周围岩体发生多次张拉破坏和剪切破坏,缩短了断层侵彻路径,导致断层滑移进而引发岩爆.

3 岩爆风险评估研究进展

针对岩爆发生频率增加和破坏能力增强等现象,自 20 世纪 60 年代起研究人员就已开展岩爆预测的技术研究.现阶段,根据技术方法差异可将岩爆风险评估方法分为 2 类:岩爆预测和岩爆预警.其中岩爆预测方法包括:经验判据法、数学模型法、数值模拟法;岩爆预警方法为微震监测法.岩爆风险评估方法如图 2 所示.尽管岩爆风险评估方法种类繁多,但因地质因素、应力条件及开挖方式等复杂因素影响,现有岩爆风险评估方法的可靠性和可复制性较差,岩爆的精准预测与有效预警仍是当前深部开采研究中亟待突破的瓶颈.

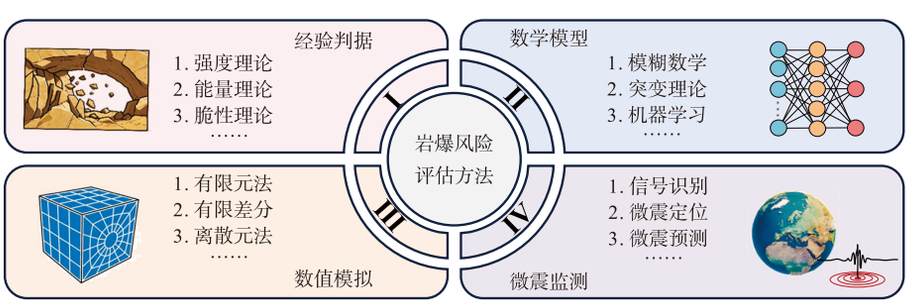


图 2 岩爆风险评估方法

Fig. 2 Rockburst risk assessment methods

3.1 基于经验判据的岩爆风险评估方法

矿山设计、建设阶段,通常基于岩爆案例中的地应力、岩石强度、岩石储能能力等基本力学性质形成一系列经验判据评价矿山岩爆倾向性,为开拓和支护工作提供指导.其中,经验判据包括单因素判据和多因素判据.

3.1.1 单因素判据

单因素判据包括 TURCHANINOV 准则[41]、BATON 准则[42]、RUSSENSE 准则[5]、HOEK 准则[43]、陶振宇准则[44]等.现有单因素判据主要是通过应力判据和能量判据预测岩爆,主张应力判据的专家学者通过分析大量现场岩爆案例,发现岩爆主要发生在岩体开挖后围岩的应力集中区内,并根据岩石发生屈服、破坏时对应的特征地应力与岩石强度的关系形成岩爆判据[45].能量判据主要考虑岩体开挖后,岩体储存的弹性能量与岩

体最大储能能力间的关系．与应力判据相比能量判据能够详细描述岩体在应力作用下能量的储存、释放和耗散过程，能够更直接地反映岩爆孕育特征、发生趋势和破坏程度．单因素经验判据岩爆风险评估方法如表3所示．

表3　单因素经验判据岩爆风险评估方法

Table 3　Risk assessment method for rockburst using single-factor empirical criteria

理论依据	评价指标	参考文献/提出年份	岩爆等级划分标准				备注
			无岩爆	轻微岩爆	中等岩爆	强烈岩爆	
强度理论	$3\sigma_1/\sigma_c$	文献[46]/1966	<0.2	0.2～<0.4	0.4～<0.8	0.8～1	σ_1为最大水平主应力，σ_c为岩石单轴抗压强度
	σ_c/σ_1	文献[42]/1974	>10	5～10	2.5～<5.0	<2.5	
	σ_θ/σ_c	文献[5]/1974	<0.3	0.3～<0.5	0.5～0.7	>0.7	σ_θ为切向应力
	σ_θ/σ_c	文献[43]/1980	<0.2	0.2～<0.3	0.3～0.55	>0.55	
	$(\sigma_\theta+\sigma_L)/\sigma_c$	文献[41]/1981	<0.3	0.3～<0.5	0.5～<0.8	≥0.8	σ_L为最大轴向应力
	σ_c/σ_1	文献[44]/1988	>14.5	5.5～14.5	2.5～<5.5	<2.5	
能量理论	W_{et}	文献[47]/1981	<2	—	2～5	>5	W_{et}为单轴压缩加卸载试验存储的弹性能与耗散能之比
	$\sigma_c^2/(2E_u)$	文献[48]/1994	<40	40～<100	100～200	>200	E_u为卸载切向模量
	$\frac{\varphi_{sa}}{\varphi_{sc}}\frac{\varepsilon_{sa}}{\varepsilon_{sc}}$	文献[49]/2014	<10	10～20	—	>20	φ_{sa}，ε_{sa}，φ_{sc}，ε_{sc}分别为动静组合加载应力-应变曲线峰前储存能量、峰后消耗能量、峰前应变及峰后总应变
	U^e-U^a	文献[50]/2018	<50	50～<150	150～200	>200	U^e为峰前弹性能密度及总应变能密度，U^a为峰后破坏能密度
脆性理论	σ_t/σ_c	文献[42]/1974	<0.33	0.16～0.33	—	>0.16	σ_t为岩石抗拉强度
	D_T	文献[51]/1997	>500	—	50～500	<50	D_T为岩石动态破坏时间
	σ_c/σ_t	文献[52]/2008	<10	10～<14	14～18	>18	

3.1.2　多因素判据

单因素判据通常基于室内岩石力学试验获得参数，并结合现场经验进行简单评估．然而，这类方法仅从单一维度评判岩爆风险，既割裂了复杂的现场真实环境，也难以全面揭示岩爆的发生机制．因此，部分专家学者结合多个岩爆诱发因素，通过联合手段得到岩爆联合判据即多因素判据．如文献[53]基于现场地应力条件、支护系统能力、开挖跨度及地质结构，提出岩爆评价指标；文献[54]基于地应力条件、岩石基本力学性质、岩体系统刚度、地质条件提出岩爆倾向性指标I_{RV}，通过拟合岩爆案例中爆坑深度与I_{RV}之间的关系验证I_{RV}的普适性；文献[55]基于侧应力系数(λ)、强度条件(σ_θ/σ_c)及弹性应变能指数(W_{et})，以体积应变特征点改进岩爆倾向性指数试验，建立$(3-\lambda)W_{et}\ \sigma_1/\sigma_c$指标；文献[56]基于地应力、岩体完整性、岩石抗拉强度、泊松比及储能因素提出弹性应变能岩爆判据；文献[57]基于现场地质调查结合岩爆强度条件、岩石脆性指标(σ_θ/σ_t)及岩体完整性指标(K_v)，提出$K_v\sigma_\theta/\sigma_t$指标，并根据各因素确定各岩爆强度阈值．

可以发现，多因素判据以地质条件、岩体应力条件、岩体储能条件、支护系统能力和爆坑深度为核心参数，通过室内试验和现场调研将获取的参数以不同方法组合得到，各判据如表4所示．

表4　多因素经验判据岩爆风险评估方法[58]

Table 4　Risk assessment method for rockburst using multi-factor empirical criteria

指标	评价方法	备注
$\frac{E_1}{E_2}\frac{E_3}{E_4}$	<50，无；50～<85，轻微；85～<105，中等；105～140，强烈；>140，极强烈	E_1为应力集中系数，E_2为支护系统能力，E_3为开挖跨度，E_4为地质结构因子
$I_{RV}=F_sF_rF_mF_g$	岩爆风险随指标值增大而增大，$D_f=R_f(0.000\,8I_{RV}+0.232\,7)$	F_s为应力控制因子，F_r为岩石物性因子，F_m为岩体系统刚度因子，F_g为地质构造因子，D_f为岩爆破坏深度，R_f为水力半径

续表4

指标	评价方法	备注
$K_v\frac{\sigma_\theta}{\sigma_t}$	<1.7,无;1.7~<3.3,弱;3.3~9.7,中等;>9.7,强烈	K_v为岩体完整性指标
$R_i=K_v^2\frac{\sigma_i}{\sigma_c}\frac{\sigma_c}{\sigma_t}\frac{2EU^e}{\sigma_t^2}$	<3,无;3~<10,弱;10~110,中等;>110,强烈	R_i为岩爆倾向性指标,σ_i为i方向初始地应力,E为岩石弹性模量
$(3-\lambda)W_{et}\frac{\sigma_1}{\sigma_c}$	<0.40,无;0.40~<1.05,弱;1.05~2.50,中等;>2.50,强烈	λ为侧应力系数

3.2 基于数学模型的岩爆风险评估方法

经验判据在创建过程中掺杂大量主观因素,在只使用一种经验判据预测风险时,存在岩爆预测精度差的问题[59]. 为解决这一问题,可通过构建数学模型对不同经验判据进行数据驱动预测,可以显著提高预测的客观性与准确率. 根据数据量的差异可将数据驱动预测分为不确定性理论和机器学习.

岩爆案例不足情况下,研究学者通过引入不确定性理论减小岩爆预测时因统计学方法的局限性和岩爆随机性造成的影响. 不确定性理论包括:模糊数学理论、未确知测度理论、突变理论、灰色系统理论、粗糙集理论、靶心贴近度模型、外延理论、属性识别模型、区间数理论、云模型和集对分析等[58].

岩爆案例充足的情况下,机器学习因具有较强非线性问题处理能力,可以对分析对象进行有效分类并减少人为干预,能够提供更客观的岩爆预测结果. 常被用于岩爆预测的机器学习算法有:神经网络、支持向量机(SVM)、逻辑斯蒂回归、决策树(DT)、贝叶斯网络、随机森林(RF)和K近邻(KNN)等[58]. 然而,岩爆预测是一个典型的类别不平衡问题,单一学习很容易偏向多数类,进而影响预测结果. 此外,受表征容量限制,单一学习难以充分捕捉多个经验判据间的高阶非线性耦合关系,其决策边界精度显著低于集成学习的协同拟合结果. 而集成学习通过组合多个弱学习器,能有效降低方差和偏差,对不平衡数据更具鲁棒性,使岩爆预测结果准确率更高[60]. 文献[61]以Grand Canyon隧道岩爆案例为背景,发现Stacking集成学习对单因素经验判据的预测精度优于单一学习;文献[62]以19种算法训练了6 783个微型机器学习模型,发现基于决策树的集成算法在捕捉岩爆特征时效率最高.

RF,XGBoost,ANN等集成学习虽然在许多研究中表现出较高的平均精度,但是SVM在小样本案例情况下更有优势[63];使用经验判据预测岩爆时,在强调算法与物理机理内在契合度测试中KNN的稳定性显著优于各类集成学习[64]. 所以,在机器学习预测岩爆领域没有绝对的万能模型,模型的性能高度依赖于数据集的大小、质量、特征维度和问题本身.

3.3 基于数值模拟的岩爆风险评估方法

岩爆预测精度难以提升的原因主要与岩性、岩体结构、地应力、地下空间布置、开挖几何形状和开挖速率相关. 受工程现场条件限制,诸多判据通常忽略地质因素对岩爆的影响,使得岩爆预测精度更难以保证. 随着数值计算的发展,可将地质参数输入数值模拟软件中,模拟岩体开挖的真实受力环境,进一步完善岩爆预测手段. 如文献[65]通过特征值法证明有限元法研究岩爆问题的有效性. 文献[66]比较有限元法和有限差分法后发现有限差分法更适用于岩爆模拟. 基于强度理论,文献[67]通过数值模拟计算发现岩爆主要由剪切断裂或滑移引起,提出超剪应力(ESS)指标. 文献[68]考虑了偏应力的影响,提出脆性剪切比(BSR)指标. 基于能量角度,文献[69]通过数值模拟验证了岩爆的根本原因是岩体的能量释放的猜想,并提出能量释放率(ERR)指标来区分岩爆等级.

3.4 基于微震监测的岩爆风险评估方法

在岩爆孕育过程中,岩体在集中应力作用下常伴有裂隙萌生、扩展和失稳过程. 此时,微震事件呈现出典型的时间和空间特征. 因此,岩爆的空间聚集与时间序列预警是可能的,并可通过时间序列规则来预测未来趋势并估计风险[70]. 然而,该方法仍存在一定局限性,主要体现在微震数据拾取准确性、震源定位精度以及预警时效性难以得到有效保证. 现阶段借助微震监测实现岩爆的实时精准预测仍面临较大挑战[71]. 为应对这些挑战,

文献[72]提出一种无需预测速波的微震源定位理论体系，自研微震数据处理全自动软件，提高了微震定位精度．此外，机器学习因其较强的非线性复杂问题处理能力，被广泛应用于岩爆预警、预测中．如：随机梯度提升算法、BP神经网络算法、人工神经网络、平均影响值算法、改进的萤火虫算法、概率神经网络、随机森林、AdaBoost、梯度提升树、XGBoost和LightGBM等[73]．基于集成学习优势，文献[74]应用3种元启发式算法增强互相关的性能堆叠能力，提高计算效率；文献[75]利用随机森林(RF)和CRITIC组合赋权法优化微震指标权重，提高计算效率，岩爆预测准确率较单一学习模型提升14.3%；文献[76]对比了6种机器学习算法发现Adaboost算法表现最优，其岩爆预测准确率可达93.8%，并精确预测了10次强岩爆事件．与传统机器学习方法相比，深度学习方法在时间序列预测岩爆时更具优势[63]．文献[77]提出了融合CNN-GRU与原型学习(Prototype Learning)的算法模型；文献[78]引入快速近似卷积方法，通过学习微震数据的空间非结构化分布及其与岩爆前兆的演化关系，发现微震事件的空间聚集性比时序相关性对岩爆预警更为关键；文献[79]针对人为干预模型计算影响岩爆预警模型精度的问题，利用RNN模型学习微震事件与施工进度的演化规律，提出基于RNN的动态预警机制，经验证该模型预测准确率达91.2%，岩爆级别预测准确率达86.0%；文献[80]构建了CNN-GRU与CNN-FNN级联分类回归网络模型，通过提取微震序列特征，实现了融合时间、位置及烈度三要素的岩爆预测．

综上所述，岩爆风险评估方法可归为经验判据法、数学模型法、数值模拟法及微震监测法4类，各具优势与局限，不同岩爆风险评估方法的优缺点如表5所示．经验判据法形式简洁、工程应用便捷，能提供较为直观的评估结果，然而部分分类阈值存在不一致甚至相互矛盾的情况，致使其普适性与可靠性难以保证．数学模型法通过对已有岩爆案例的分析与拟合，具备对未来工况的预测与延展能力，且随前沿技术演进而不断显现出改进岩爆预测效能的潜力，但其关键参数的正确标定需要大量岩爆案例数据作为支撑．数值模拟法同时考虑应力、岩石本构特性、动力扰动等因素的综合影响，所需数据规模较小，有助于再现岩体破坏过程与能量演化机制，但受岩石非均质性影响，岩爆风险评估可靠性受到一定限制，仍需整合大量岩爆案例对模拟结果的可靠性进行逆向验证．微震监测法能够实时、连续地采集基础数据，通过识别岩爆前兆信号为揭示其形成机制与演化规律提供直接依据，从而开展动态风险评估与即时预警，但如何从海量微震信号中高效且有效地甄别并提取可用信息，尚属亟待突破的技术难题．随着深度学习等技术的日趋成熟，未来岩爆预测的发展需着力构建集详细地质资料与微震监测前兆信号于一体的大型岩爆案例数据库，并在此基础上实现监测数据的实时获取与动态处理，以支撑岩爆风险的即时评估与预警决策．

表5　不同风险评估方法的优缺点

Table 5　Advantages and limitations of different risk assessment methods

方法	优点	不足	适用阶段
单因素经验判据法	简单实用、易于理解、数据易获取．	根据不同现场经验可能会得到不同、甚至相互矛盾的阈值划分方法；不同方法评估结果可能不一致或互相矛盾．	矿山设计阶段及建设初期
多因素经验判据法	综合多因素影响，简单易操作．	岩爆等级阈值划分存在一定主观性；集结成单一指标后含义不够明确．	矿山设计阶段及建设初期
不确定性理论	考虑多因素综合影响及评估过程存在的不确定性，能同时处理定性和定量信息．	较难确定各指标对应不同岩爆等级的阈值，各指标对应的隶属度函数难以精确确定；需确定各指标权重．	矿山设计阶段及建设初期
机器学习	综合多因素影响，具有很强处理非线性问题的能力．	需大量现场岩爆案例数据；难以处理不确定性问题；结果受模型参数影响较大．	矿山设计阶段
数值模拟	能模拟岩体脆性破坏行为及能量聚集、转移及释放过程，可确定岩爆等级、发生位置及爆坑深度．	本构模型及岩石力学参数较难可靠确定；难以确定各风险等级具体值；需确定岩爆风险评估指标．	适用于矿山设计阶段及建设初期
微震监测	能同时获得岩爆风险及其发生概率．	需建立包含微震指标的岩爆案例数据库；各指标对应不同等级的概率密度函数较难准确确定．	矿山全生命周期

4 岩爆防治技术研究进展

从本质上讲,岩爆发生主要受内部因素和外部因素共同作用.内部因素包括:岩石基本力学性质、地应力和岩体质量.外部因素为岩体开挖扰动.根据以上岩爆影响因素的不同,深部硬岩矿山岩爆防治工作可分为2个部分:主动调控技术和主动防控技术.主动调控技术包括:区域应力调控方法、局部应力释放技术;主动防控技术包括:围岩主动支护技术,岩爆防控方法如图3所示.

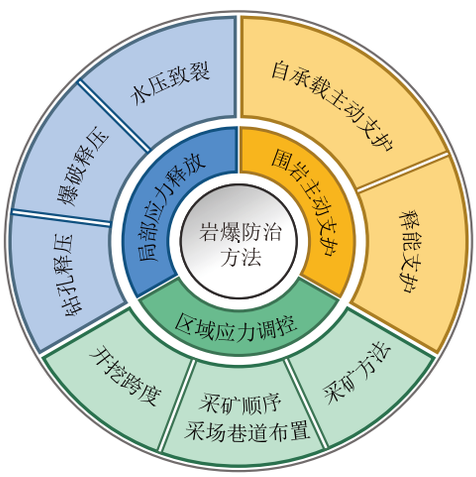


图3 岩爆防治方法

Fig. 3 Rockburst prevention and control methods

4.1 区域应力调控方法

区域应力调控主要指在矿山设计阶段、开拓阶段和回采阶段,基于目标区域的地应力、地质条件及岩石力学参数,通过调整矿山采场巷道布置方式、开挖顺序、开挖跨度和采矿方法设计等手段减小区域围岩的应力集中程度,降低岩爆发生概率.

4.1.1 巷道布置

岩体应力重分布与巷道开挖密切相关.基于理论计算方法,文献[81]使用复变函数方法研究巷道受力,发现侧压力系数越大,巷道越容易发生破坏.文献[82]通过研究矩形巷道宽高比对集中应力的影响,发现当侧压系数为0~2,巷道宽高比为1.0~2.2时,巷道应力峰值呈现出先增大后减小的趋势.分析上述研究成果可以发现,合理设置巷道宽高比及巷道走向与地应力夹角的位置关系能够改善巷道围岩的受力情况.在巷道设计时应减小走向与最大水平主应力的夹角,夹角越小,应力集中程度越小,巷道越稳定.除此之外,也应结合具体地质和岩石力学条件,通过合理的增大巷道宽高比的方法减小巷道应力集中.

4.1.2 采矿顺序

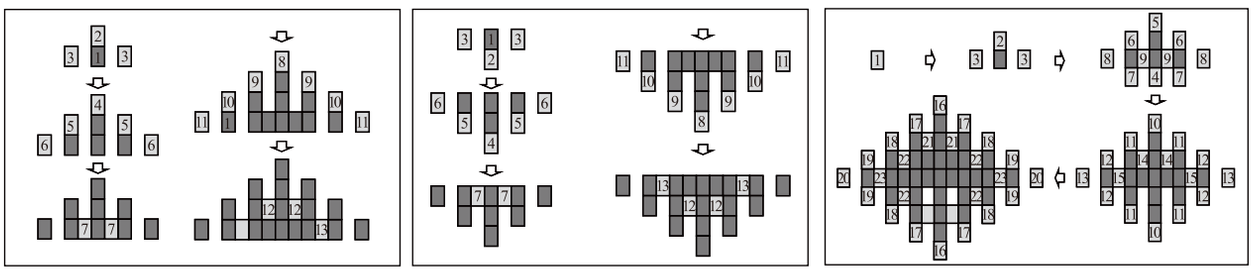
深部硬岩矿山采矿顺序基于空间位置划分主要有2种:垂直采矿顺序和水平采矿顺序.其中垂直采矿顺序包括倒"V"形采矿顺序、正"V"形采矿顺序和"四周型"采矿顺序.

加拿大LaRonde矿[83]和Nickel Rim South矿[84]采用倒"V"型采矿设计方案,如图4a所示,图中矩形代表待采采场,数字代表各采场的开采顺序.随采矿工作推进,LaRonde矿通过现场钻孔工作发现一步骤采场在钻孔过程中十分困难,孔洞呈现出不同程度的变形状态,而在二步骤采场中钻孔较为容易,孔洞中几乎看不到任何压力迹象.Nickel Rim South矿通过微震监测发现在新布置采场外侧围岩及采场上方出现密集微震事件,如图5所示.这些微震事件说明该区域围岩在高应力作用下屈服形成宏观裂纹,进一步证明通过调整采矿顺序后高应力集中区转移至回采区域深部岩体.已采采场内部没有任何微震事件,说明该区域未发生岩石破裂事件,体现该区域应力未达到围岩屈服极限,即该区域为低应力卸荷区.

加拿大Creighton矿[85]深部开采使用了正"V"型采矿顺序,可以将开采形成的集中应力转移到临近围岩区域,如图4b所示,通过不预留底柱,下分段采矿作业在上分段的充填体下进行,虽然避免作业人员在暴露的采空区下作业,增加了开采的安全性,但该种方法采矿生产能力较低.

加拿大LaRonde矿基于倒"V"形采矿顺序提出了四周型开采顺序,如图4c所示,该种采矿方法可实现多个采场同时向四周扩散布置.但在实际开采过程中,并未对采场应力状态进行着重分析.文献[86]采用FLAC3D对会泽铅锌矿埋深1 500 m处的待采区域进行采矿顺序数值模拟研究,并基于偏应力比方法对一步骤、二步骤采场岩爆倾向性进行判别.研究发现,该待采区域均属于低岩爆应力风险级别,且二步骤采场岩爆应力风险指标低于原岩应力场区域的应力风险指标,证实二步骤待采采场为低压卸荷区.

针对水平开采顺序,学者们结合工程实例开展了一定的研究工作.文献[87]通过数值模拟方法发现,大间隔分散布置的采矿方案应力集中程度明显低于隔-采-集中布置的效果且采场位移变化小,采场安全性高,由中央向四周的方式能够渐进的将重分布的应力推移到相邻区域.



(a) 倒“V”型采矿顺序　　(b) 正“V”型采矿顺序　　(c) LaRonde矿四周型采矿顺序

图 4　不同采矿顺序示意

Fig. 4　Schematic diagram of different mining sequence methods

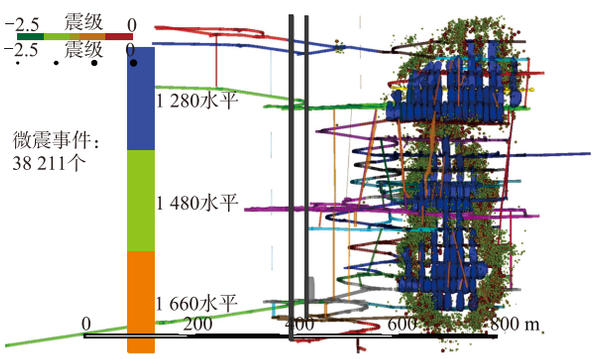


图 5　Nickel Rim South矿“倒 V 型”采矿微震监测事件[84]

Fig. 5　MS events for "inverted V-shape" mining in Nickel Rim South mine

4.1.3　采矿方法

深部开采硬岩矿山采矿方法主要分为3类：空场法、崩落法和充填法. 研究发现，发生岩爆事件的矿山中，采用空场法的矿山最多(接近1/2)，其次是充填法和崩落法，可见大规模空场回采容易诱发岩爆灾害的发生. 采用空场法开采时，采空区顶板大面积暴露将采动应力转移至矿柱，导致矿柱在高应力环境下承压，从而显著增加了岩爆发生的风险. 崩落法在岩石崩落时岩体发生大量断裂事件，其内部积聚能量得到有序释放，降低了岩爆发生的几率. 文献[88]基于三维物理试验展开了对Dabeishan铁矿崩落法采矿的研究，发现崩落初期破碎岩石消耗更多能量且堆积岩石对采场围岩起到一定的支撑作用，有利于围岩的稳定性；文献[89]对Jinshandian铁矿进行了长期现场监测，研究发现，由于上覆岩层存在采空区和破裂带导致矿体开采后上覆岩层快速垮落至地表，自重应力不再传递到侧向岩体，采场围岩更加稳定. 具体表现为，微震事件数量多但集中在采空区附近，且信号衰减弱. 充填法通过充填料对采空区及时回填以支撑顶板，能有效控制岩层移动，减少采动应力集中. 尽管采用充填法回采无法消除和完全避免岩爆活动，但文献[90]通过理论分析指出，在对采空区进行充填时较小的充填体围压值即可有效抑制岩爆的发生.

4.2　局部应力释放技术

局部应力释放技术通过采取不同措施将巷道围岩中的高应力转移至岩体深部，从而降低开挖区域应力水平. 目前常见的释压方法包括：钻孔释压、释压爆破、水压致裂等，各释压技术优缺点如表6所示.

表 6　不同释压技术的优缺点

Table 6　Advantages and disadvantages of different stress relief techniques

释压技术	优点	缺点
钻孔释压[91]	1)设计考虑参数较少，参数易于确定；2)技术操作相对简便，对复杂地质条件适应性强.	1)单孔影响范围有限，为达到理想效果需布置密集钻孔，导致工程量大、施工时间长；2)释压效果具有时效性，会随时间推移逐渐减弱.
释压爆破[92]	1)释压与弱化双重作用：兼具裂隙区释压与主动破碎岩体功能，应力转移和释能效果显著；2)适用场景广泛：可用于工作面前方、巷道两帮等多种高应力区域的应力释放.	1)存在围岩损伤风险：装药量控制不当易引发震动与裂隙过度扩展，可能诱发结构面失稳；2)技术操作要求高：释压效果受钻孔与爆破协同影响，且需确保相邻钻孔破裂区相互连通，设计施工不当则难以形成均匀释压带.
水压致裂[45]	1)预处理能力强：可形成区域性释压带，尤其适用于崩落法矿山；2)可控性好：通过调节泵注压力、流量等参数，可控制裂隙致裂范围、方向与程度.	1)地质与应力条件依赖性强：裂缝扩展受应力场与结构面控制，对岩体完整性要求高；2)应用局限：主要用于崩落法预处理，局部即时释压灵活性不及钻孔释压或释压爆破.

4.2.1　钻孔释压

钻孔释压通过向高应力区域钻进释压孔改变围岩结构，进而缓解围岩高应力状态. 释压孔钻进过程中，一方面围岩受钻进影响，释放部分弹性能

降低围岩能量积聚.另一方面,在高集中应力作用下,释压孔周围的岩体裂纹更易发育,在钻孔周围形成微破碎带,围岩应力集中区随破碎带的形成向深部岩体转移.当释压孔达到一定数量后,各释压孔周围微破碎带汇聚、贯通,在掌子面前方形成更大体积的破碎区域,构成岩体释压区.

钻孔释压最早在德国应用,随后在前苏联、波兰、荷兰和日本等国家研究和应用.为了研究钻孔释压技术在深部硬岩矿山的释压特性,文献[93]在渣滓溪锑矿通过向采场中钻进释压孔试验,发现钻孔释压具有时效性,释压孔钻进48 h后释压作用逐渐减弱;文献[94]针对三山岛金矿深部巷道高应力环境,联合现场应力监测与数值模拟结果分析发现,钻孔释压后巷道应力向岩体深部转移,有效缓解岩爆危害;文献[95]基于对数值模拟和现场监测,发现在井筒最大主应力方向的剪切区外钻进释压孔可有效转移应力峰值,减小围岩应力集中;文献[96]开展了动静组合作用下受载试件钻孔释压单轴压缩试验,研究发现考虑扰动载荷的影响,钻孔直径与围岩高度比大于0.06,可获得较好的释压效果;文献[97]通过对比Zinkgruvan矿掘进巷道钻孔释压前后的点云数据发现钻孔释压能有效降低围岩应力集中,释压效果与围岩岩性、岩体结构密切相关,释压效果有明显的时效性,释压孔钻进后经3次掘进循环后,围压应力集中显现.

尽管专家学者对钻孔释压机制进行了大量研究,但是由于深部硬岩矿山地质条件的复杂性以及硬岩自身的岩石力学性质,导致目前无法判断工程现场释压孔的裂纹发育情况,进而仍无法确定其释压效果,极大限制钻孔释压防治岩爆技术的推广[98].

4.2.2 释压爆破

释压爆破利用炸药爆炸后产生的冲击波、应力波和爆生气体的联合作用,诱导炮孔周围岩石破碎、远场岩体受控破裂,从而在炮孔周围形成破碎区.该破碎区既能释放岩体储存的弹性能,又能阻断应力向临空面方向的传递,迫使应力向深部岩体转移,进而形成释压区达到防治岩爆的目的,释压爆破机制如图6所示.

释压爆破技术起始于加拿大新斯科舍省的斯普林希尔煤矿,因其出色的岩爆治理效果,被国内外矿山企业广泛应用.硬岩矿山首场释压爆破现场试验在加拿大安大略省柯克兰湖矿山进行[100],随后在南非开展了首次系统性试验研究[101].最初研究认为,爆破只活化了原生裂隙而不产生新裂隙,而文献[102]研究表明在裂隙和爆破振动耦合作用下产生新的裂隙,是实现释压效果的主要原因;文献[103]通过研究释压爆破前后应力和应变条件提出释压爆破的亚临界、临界和超临界程度;文献[104]通过数值模拟和现场监测手段证明释压爆破后岩体破碎区边界较开挖面更远、更加深入围岩,说明释压爆破能够改善围岩应力集中情况,降低围岩发生岩爆的可能性.文献[105]基于LS-DYNA软件展开了对释压爆破前后产生的破坏区域及应力状态的研究,发现炮孔间距是控制释压效果的关键参数;文献[92]采用离散元方法开展了释压炮孔间距对释压效果影响的研究,发现随炮孔孔间距减小,释压爆破的效果可分独立作用阶段、叠加作用阶段和耦合作用阶段,不当的炮孔间距会增加岩爆风险.现阶段,由于释压爆破过程的力学性质复杂且难以监测,对释压爆破力学机制及释压效果的研究主要采用数值模拟方法,所以针对释压爆破岩体力学参数的研究也较为关键.在释压爆破岩体力学参数研究领域,文献[65]给出了释压爆破后岩体弹性模量计算方法:

$$E_{db}=\alpha E, \tag{1}$$

式中:E_{db}为释压爆破后的弹性模量,GPa;α为岩石破碎系数,取值范围为0~1.

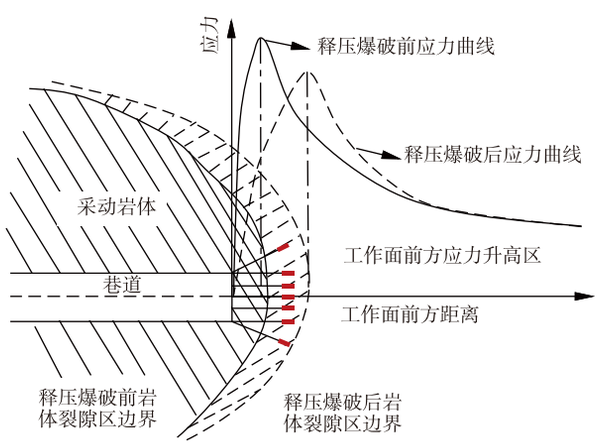


图6 巷道掘进工作面释压爆破应力调控机制[99]

Fig. 6 Stress control mechanism of destress blasting at a tunnel heading

文献[106]确定了释压爆破后岩体的泊松比和应力值计算方法:

$$\begin{aligned}\nu_{db}&=\nu(2-\alpha),\\ \sigma_{ijdb}&=(1-\beta)\sigma_{ij},\end{aligned} \tag{2}$$

式中：ν_{db}为释压爆破后岩体泊松比；ν为岩石泊松比；β为应力耗散系数，取值范围为0～1，反映释压爆破区应力释放程度；σ_{ij}为初始应力，MPa；σ_{ijdb}为释压爆破后应力，MPa.

文献[107]提出释压爆破的本构方程：

$$\begin{aligned} E_{idb} &= \alpha_i E, \\ \sigma_{idb} &= (1-\beta_i)\sigma_i, \end{aligned} \tag{3}$$

式中：下标“i”表示主应力方向．该本构方程假设岩体为正交各向异性材料．

4.2.3　水压致裂

水压致裂通过钻孔向岩体高应力区注入高压水，促使岩体原生裂隙扩展，破坏岩体完整性并弱化其力学性能，从而减小围岩的储能能力并转移集中应力至深部岩体，最终降低岩爆灾害风险．

该技术在硬岩矿山现场实践案例主要来自于智利El Teniente铜矿及澳大利亚Cadia East铜金矿等少量采用崩落法开采硬岩矿山，如图7、图8所示．

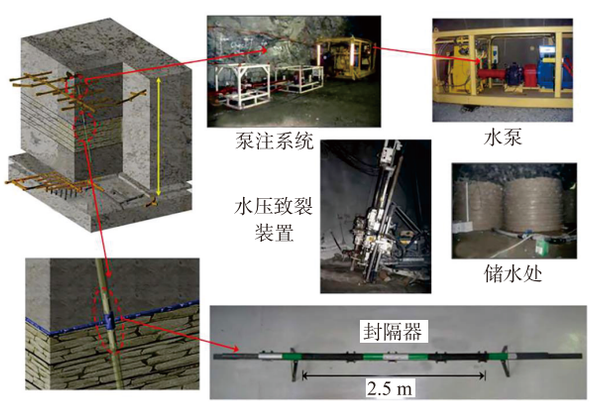


图7　Cadia East铜金矿现场水压致裂系统[45]

Fig. 7　On-site hydraulic fracturing system in the Cadia East copper-gold mine

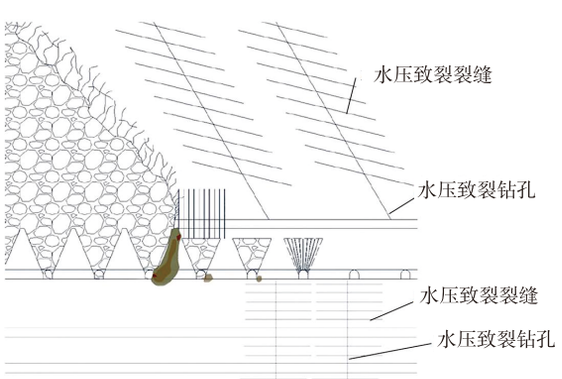


图8　EITeniente铜矿水压致裂现场应用[45]

Fig. 8　Field application of hydraulic fracturing system in the EI Teniente copper mine

El Teniente铜矿通过微震监测发现，岩体经水压致裂处理后，矿山整体的微震振幅明显下降，说明该矿山岩体大型破坏次数减小且以小破坏为主，进而证明水压致裂法有较好的释压效果[45]．文献[108]基于XFEM方法展开对智利El Teniente铜矿水压致裂的数值模拟研究，发现顺序压裂能利用应力阴影效应使先前裂缝重新扩展，最终获得更长、更平行的裂缝网络，进一步扩大岩体释压区．文献[109]基于DFN建模和地质统计学模拟，发现相同区域内水压致裂后岩体的体积裂隙强度较天然状态提升了17.6%，说明水压致裂能够加剧岩体的破碎程度，从而实现释压的目的．目前国内硬岩矿山采用水压致裂法释压案例较少，文献[110]在某铁矿开展了水压致裂工业试验，发现试验区域岩石起裂压力最大值约为31.64 MPa；当泵送流量为150 L/min时，水力裂缝的最大扩展半径约34 m.

4.3　围岩主动支护技术

4.3.1　自承载主动支护

目前，深部巷道面临高地应力、强扰动引发的岩爆等动力灾害风险，专家学者已逐步将支护设计理念从被动抵抗转向主动协同．文献[111]提出的早期岩石压力理论与文献[112]倡导的新奥法(NATM)，为支护与围岩的协同承载奠定了理论基础；文献[113]提出隧道支护系统刚度设计理论，强调支护刚度与围岩变形的协调性，为岩爆易发区的变形控制提供了思路；文献[114]将收敛-约束法应用于HOEK-BROWN准则下的隧道设计，为协同承载分析提供了量化计算方法．

然而，现有研究多聚焦于单一支护构件的参数优化，缺乏对“锚杆-网-梁-喷-锚索”多组件支护系统协同承载机制的定量表征，难以准确描述围岩自承能力的激发效应．尤其在岩爆防控场景中，传统主动支护方案虽能缓解部分变形，但面对高应力破碎围岩的能量积聚与瞬时释放特性，仍存在自承效率量化不足、刚度匹配设计缺乏理论依据等问题，未能从根本上解决刚性支护与围岩动态变形的协调性矛盾，难以有效遏制岩爆动力失稳．

在此背景下，文献[115]基于深部硬岩岩爆孕育与发生的动力学特征，结合极破碎岩体落锤冲击试验与工程实践，提出自承载主动支护技术．该技术的核心理念在于通过支护结构与围岩体的深度力学耦合，主动激活围岩自承潜力，将松散破碎

或应力失衡的岩体重塑为“自稳承载结构体”，从根源上优化应力场、抑制能量积聚，为岩爆防控提供稳定力学基础，如图 9 所示.

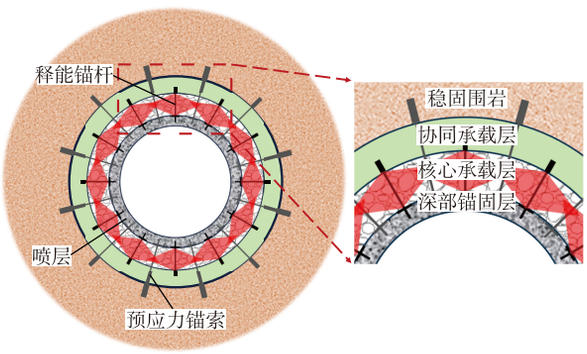


图 9 抗岩爆释能支护系统

Fig. 9 Anti-rockburst energy-releasing support system

其核心机制体现在两方面：一是应力场主动重构，通过高强预应力锚杆(索)的施加，在围岩内激发锥形压应力区，相邻锚杆的压应力区叠加形成连续的挤压加固拱，将洞壁径向拉应力转化为锚固区均布压应力，显著缓解岩爆孕育的应力集中程度；二是岩体结构强化，依托锚杆的结构面加固效应抑制岩体节理裂隙的张开与滑移，提升岩体完整性，同时通过金属网和喷射混凝土的面约束作用将松散颗粒的散体滑移模式转变为协同变形模式，强化岩体抗冲击稳定性，减少因岩体破碎导致的能量瞬时释放风险[116]. 该技术通过预应力耦合与结构约束的协同，充分调动围岩自身的抗剪、抗压性能，形成支护结构-围岩协同承载体，可为后续释能支护的能量耗散创造稳定环境，从源头降低岩爆发生概率.

4.3.2 释能支护

目前，应对常规及轻微岩爆支护，由传统锚杆组成的锚网喷支护即可控制. 但因传统锚杆的吸能能力和变形或滑移性能限制，发生强岩爆时常规支护难以吸收岩石动力破裂变形时释放的能量，导致锚杆被拉断，支护系统失效，难以保持岩体的稳定性. 为解决此问题，国内外专家学者研发出具有高强度、高锚固力、强吸能、大变形或大滑移量特点的释能锚杆进行岩爆支护工作. 经室内试验和现场验证，释能锚杆可凭借杆体变形或杆体滑移吸收冲击能，抵抗动载荷多次冲击，进而实现爆而不倒的支护效果. 目前，世界上主流释能锚杆如表 7 所示.

表 7 释能锚杆类型及其典型技术特征[120]

Table 7 Types of energy-absorbing rockbolts and their typical technical characteristics

释能锚杆类型	主要技术特征
Cone 锚杆	锚杆一端为圆锥形体，在锚杆杆体喷涂脱脂剂：锚固力为 160 kN 以上，静载拉拔位移为 200 mm，总释能量为 10～25 kJ.
Durabar 锚杆	对锥体锚杆进行了改进，在光滑杆体设计几个褶皱，锚杆的尾部设计成一个光滑的圆环，锚固力为 120 kN，静载拉拔位移为 600 mm，总释能量为 48 kJ.
Hybrid 锚杆	为管缝锚杆与螺纹钢锚杆组合而成，锚固力为 160 kN，静载拉拔位移为 120 mm 以上.
Swellex 锚杆	是一种水力膨胀锚杆，注入高压水致使锚杆杆体变形，锚杆管壁与锚杆孔壁产生高摩擦力锚固岩体；锚固力为 200 kN，静载拉拔位移为 80 mm，总释能量为 18～29 kJ.
Garford 锚杆	由圆钢、锚头及粗牙螺纹钢套组成，采用树脂锚固，锚固力为 190 kN，静载拉拔位移为 390 mm，总释能量为 27～33 kJ.
Roofex 锚杆	由锚固端和圆钢组成，采用树脂锚固，锚固力为 80 kN，静载拉拔位移为 200 mm；总释能量为 12～27 kJ.
D 锚杆	由圆钢带一定数量的具有一定间隔的锚固点组成，锚固力为 200 kN，静载拉拔位移为 100～120 mm，总释能量为 36～39 kJ.
Yield-Lok 锚杆	杆体直径为 17.2 mm，端部布置有若干锥形体，锥形体外部套有高分子涂层：静载拉拔位移为 175～230 mm；总释能量为 16.4 kJ
VersaBol	锚杆有 2 种型号直径(20，22 mm)，锚固器的位置和数量可以根据需求加工；静载拉拔位移为 86.55～205.72 mm；总释能量＞37 kJ.
He-Bol	恒阻大变形锚杆由恒阻装置、连接套、杆体、托盘、球垫和螺母组成：恒阻体通过连接套与杆体连接成一体，恒阻套管内外表面均有螺纹；该锚杆通过杆体在连接套内滑动和杆体弹性变形释能(伸长量达 1 m)，锚杆具有恒阻特性；总释能量高达 200 kJ.
MCB-Superbolt 和 Versa-Superbolt	和 Cone 锚杆形式一样，锚杆端部有一屈服模块(滑动或杆体伸长)，区别在于杆体外部有波纹状套管，端部与 MCB 锚杆相同的是 MCB-Superbolt，端部与 Versa 锚杆相同的是 Versa-Supemolt；静载拉拔位移约为 278 mm；总释能量分别高于 50 和 70 kJ.
J 锚杆	J 释能锚杆由锚固(阻尼)模块、变形模块、搅拌模块、锚固端四部分组成；静载拉拔位移为 15.2～15.3 mm；总释能量为 24.0～46.5 kJ.

释能锚杆自发明以来，国内外研究人员基于释能锚杆作用机理不断升级改造提高其支护能力．文献[117]基于弹塑性理论及能量守恒定律，分析了围岩弹性变形能、耗散能和外力功之间的关系，给出锚杆吸能表达式，并优化锚杆布置方式；文献[118]采用数值模拟的方法，通过对锚固结构的强度特性、冲击损伤和应力状态变化特征展开研究，得到了锚杆冲击损伤准则；文献[119]通过优化锚固模块、变形模块、搅拌模块，研制J释能锚杆，基于静动力学试验得到J释能锚杆静止拉拔受力模型与动力冲击过程本构方程，验证了J释能锚杆良好的释能支护特性．

综上所述，深部硬岩矿山岩爆防治技术可参考“区域应力调控—局部应力释放—围岩主动支护”的优先层级进行岩爆防治，各类方法机理迥异且适用条件与效果各有优劣．区域应力调控方法立足于矿山设计、开拓与回采阶段的宏观布局优化，通过合理调整巷道方位、宽高比、采矿顺序及采矿方法以减小围岩应力集中程度，其优势在于从源头降低岩爆发生概率且工程成本相对可控，受既有工程布局制约难以在已投产矿山中完全重构．局部应力释放技术旨在将开挖面附近高应力人为转移至岩体深部，其中钻孔释压参数明确、工艺相对简单，但影响范围有限且时效性显著，释压效果随钻孔裂隙闭合而衰减；释压爆破施工便捷、释压效率高，但因爆破力学过程复杂与效果监测困难，释压范围的准确界定仍具挑战；水压致裂在煤矿等软岩矿山应用成熟，而在硬岩矿山因岩体强度高、裂隙扩展受限，实践案例集中于少数崩落法开采矿山．围岩主动支护技术作为岩爆防控体系的末端屏障，强调通过支护结构引导围岩有序释放弹性能并维持残余承载能力，然而目前相关设计理论与定量化判据尚不完善．随着深部开采向更高应力环境推进，从应力调控的角度分析，未来岩爆防治仍需构建“区域应力调控—局部应力释放—围岩主动支护”的多层级协同防控体系，并借助微震监测与数值模拟等技术手段对防治效果进行实时评估与动态反馈，以实现从被动抵御向主动调控的根本性转变．

5　未来发展方向

基于国内外硬岩矿山岩爆发生现状，通过对岩爆特征、岩爆发生机制与岩爆防治方法等方面的分析、总结，发现目前关于深部硬岩矿山岩爆研究仍存在许多有待解决的难题．因此，本文对深部硬岩矿山岩爆研究的未来发展建议如下：

1)拟解决深部硬岩矿山全生命周期内力学与地质信息碎片化、孤立化，导致岩爆定量化分析程度低，进而制约预测精度与机理认知的关键问题．为此，从矿山设计阶段出发，系统开展地应力场分布、岩石强度及地质条件的统计，构建以“力学＋地质”为核心的透明化数字矿山模型，并建立岩爆案例库，揭示“力学—地质—岩爆”之间的响应关系，实现岩爆定量化分析，为准确预测及孕育机制研究提供支撑．

2)拟解决现有岩爆经验判据因缺乏地应力、岩体质量及地下水等多因素协同评价机制，导致工程适用性差、预测准度低，进而造成防控措施滞后且针对性不足的问题．针对不同地质条件，构建以地应力与岩体质量为主导、融合地下水信息的多因素协同评估体系，实现“地应力-岩体质量-地下水”耦合的岩爆风险分级，并基于分级结果建立动态预警机制，以实施差异化防控措施．

3)拟解决深部硬岩矿山地压调控中，风险评估与开采全过程脱节，且缺乏融合能量释放机理与围岩自承载能力的协同调控手段，导致防控策略单一、时效性差，难以系统性化解岩爆风险的问题．基于超前序次释压机理(图10)，构建深部硬岩地压调控理论与技术体系，使岩爆风险评估贯穿矿山全生命周期，并依据动态评估结果实施分阶段差异化地压调控策略，从而引导围岩能量平稳释放并降低岩爆发生风险．

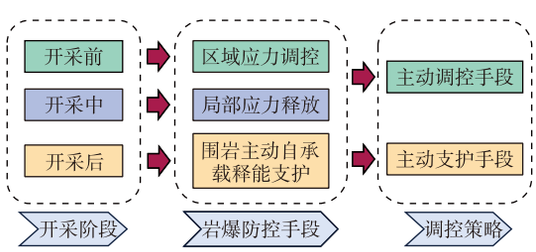


图10　超前序次释压流程

Fig. 10　Technical process of advanced sequential pressure relief

6　结　论

1)我国硬岩矿山岩爆多发于600 m以深，且随埋深增加，发生频率呈递增态势．发生或集中发生岩爆的地点，其最大水平主应力均大于30 MPa；目前，采矿深度超过1 000 m的硬岩矿山已超过30座，岩爆威胁日益严峻．

2)鉴于岩爆机制的复杂性及理论指导的滞后性,为确保工程建设安全,现阶段岩爆研究应重点构建以“区域应力调控—局部应力释放—围岩主动支护”为核心的综合防控体系.

3)本文提出深部硬岩矿山岩爆防控的3点建议:构建“力学+地质”透明矿山与岩爆案例库;发展基于“地应力+岩体质量”协同的风险评估方法;完善以超前序次释压为核心的“区域应力调控—局部应力释放—围岩主动自承载释能支护”地压调控体系,以期为岩爆研究提供系统参考.

参考文献:

[1] HE B G, WANG B, FENG X T, et al. A review of rockburst: Insights from engineering sites to theoretical investigations[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(8): 2607-2643.

[2] 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.

[3] 李夕兵,周 健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
LI Xibing, ZHOU Jian, WANG Shaofeng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.

[4] COOK N G W. A note on rockbursts considered as a problem of stability[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1965, 65(8): 437-446.

[5] RUSSENES B. Analysis of rock spalling for tunnels in steep valley sides [D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1974.

[6] HE M C, CHENG T, QIAO Y F, et al. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(5): 1312-1353.

[7] ASKARIPOUR M, SAEIDI A, ROULEAU A, et al. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods [J]. Underground Space, 2022, 7(4): 577-607.

[8] XIAO P, LI D Y, ZHAO G Y, et al. Characteristics and mechanism of rockburst at five deep gold mines in Jiaodong Peninsula of China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 171: 105574.

[9] 赵兴东,周 鑫,赵一凡,等.深部金属矿采动灾害防控研究现状与进展[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(8):2522-2538.
ZHAO Xingdong, ZHOU Xin, ZHAO Yifan, et al. Research status and progress of prevention and control of miningdisasters in deep metal mines[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(8): 2522-2538.

[10] 张子健,纪洪广,张月征,等.基于声发射试验与线弹性能判据的玲南金矿岩爆研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增1):3249-3255.
ZHANG Zijian, JI Hongguang, ZHANG Yuezheng, et al. Rockburst research of lingnan gold mine based on acoustic emission test and linear elastic energy criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup 1): 3249-3255.

[11] 王军强.崟鑫金矿岩爆与发生机理初探[J].采矿与安全工程学报,2005(4):121-122.
WANG Junqiang. Preliminary exploration on rockburst and its occurrence mechanism in Yinxin Gold Mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2005(4): 121-122.

[12] 王军强.金矿岩爆危险程度评估与防治措施:以崟鑫、枪马、鸿鑫金矿为例[J].黄金,2007(6):24-28.
WANG Junqiang. Rock burst criticality evaluation and prevention countem easures in gold deposits[J]. Gold, 2007(6): 24-28.

[13] 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 inround metal mines in China [J]. Metal Mine, 2023(3): 14-28.

[14] 石长岩.红透山铜矿深部地压及岩爆问题探讨[J].有色矿冶,2000,16(1):4-8.
SHI Changyan. Study and discussion on deep rock burst of Hongtoushan Mine[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2000, 16(1):4-8.

[15] 马春德,徐纪成,陈 枫,等.大红山铁矿三维地应力场的测量及分布规律研究[J].金属矿山,2007(8):42-46.
MA Chunde, XU Jicheng, CHEN Feng, et al. Research on in-situ stress measurement and its distribution law in Dahongshan iron mine[J]. Metal Mine, 2007(8): 42-46.

[16] CHU C Q, XIA L, WU S C, et al. Research on the mechanical behavior and rockburst risk of the deep-buried roadway at the stratigraphical boundary of different lithologies [J]. Applied Sciences, 2025, 15

(13)：7026.

[17] 院　雷，王　璇，岳树宇，等．鸡冠嘴金矿深部岩爆倾向性预测[J]．现代矿业，2013，29(11)：34-36.
YUAN Lei, WANG Xuan, YUE Shuyu, et al. Prediction of the rock burst tendency of Jiguanzui Gold Ore[J]. Modern Mining, 2013, 29(11): 34-36.

[18] 石　雨．金川二矿区 1 000 m 中段水平矿柱的屈服破坏过程及其对上盘巷道稳定性的影响[D]．兰州：兰州大学，2020.
SHI Yu. Yield failure process of 1 000 m middle horizontal pillar in Jinchuan No. 2 Mine and its influence on the stability of the roadway [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.

[19] 严文炳，王添天，刘　涛．厂坝铅锌矿深部矿区岩爆发生机制及危险区域划分[J]．矿业研究与开发，2018，38(5)：50-55.
YAN Wenbing, WANG Tiantian, LIU Tao. Rock burst mechanism and danger zone division of deep mining area in Changba lead-zinc mine[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(5): 50-55.

[20] 姚道春，汪令辉．冬瓜山铜矿深部矿体地压灾害治理方案研究[J]．中国矿山工程，2019，48(5)：6-9.
YAO Daochun, WANG Linghui. Study on control scheme of ground pressure disaster in deeporebody of Dongguashan copper mine[J]. China Mine Engineering, 2019, 48(5): 6-9.

[21] 向世东．白马铁矿 1600 主平硐深埋段岩爆特征与施工对策[J]．山西建筑，2018，44(7)：179-180.
XIANG Shidong. Rock burst characteristics and construction counter measures in deep buried section of Baima iron mine[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(7): 179-180.

[22] 龙　翼．阿舍勒铜矿深部开采过程地压演化规律与控制[D]．沈阳：东北大学，2022.
LONG Yi. The evolution and control of ground pressure during deep mining of ashele copper mine[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.

[23] 马元军．急倾斜薄矿脉群开采矿压显现规律研究[D]．长沙：中南大学，2014.
MA Yuanjun. Study on the law of strata behaviors in mining steeply inclined thin veins group[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[24] 李庶林，杨念哥．凡口铅锌矿深部矿床地应力测试[J]．矿业研究与开发，2003(4)：15-17.
LI Shulin, YANG Niange. Strata stress measurement for the deep orebody in Fankou lead-zinc mine [J]. Mining Research and Development, 2003(4): 15-17.

[25] ORTLEPP W, STACEY T J. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(1): 59-65.

[26] 钱七虎．岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]．岩土力学，2014，35(1)：1-6.
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecastmodel for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1-6.

[27] 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.
FENG Xiating, XIAO Yaxun, FENG Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649-673.

[28] 何满潮，刘冬桥，宫伟力，等．冲击岩爆试验系统研发及试验[J]．岩石力学与工程学报，2014，33(9)：1729-1739.
HE Manchao, LIU Dongqiao, GONG Weili, et al. Development of a testing system for impact rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1729-1739.

[29] 陈炳瑞，冯夏庭，明华军，等．深埋隧洞岩爆孕育规律与机制：时滞型岩爆[J]．岩石力学与工程学报，2012，31(3)：561-569.
CHEN Bingrui, FENG Xiating, MING Huajun, et al. Evolution Law and mechanism of rockburst in deep tunnel: Time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561-569.

[30] DENG J, GU D S. Buckling mechanism of pillar rockbursts in underground hard rock mining[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2018, 13(3): 168-183.

[31] CHENG T, HE M C, LI H R, et al. Effects of structural plane on rockburst in tunnel: A review based on published cases[J]. Engineering Geology, 2025, 356: 108245.

[32] BI R Y, XU C S, LIU M H, et al. Failure mechanisms and mechanical behavior of wedge-containing tunnel roof rock mass under biaxial loading[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2025, 35(7): 1107-1127.

[33] ZHANG W, FENG X T, YAO Z B, et al. Development and occurrence mechanisms of fault-slip rockburst in a deep tunnel excavated by drilling and blasting: A case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(9): 5599-5618.

[34] 李　群，胡子浩，李示波，等．真三轴条件下含隐伏结构面岩体的岩爆特征研究[J]．中国矿业大学学

报,2025,54(3):623-639.
LI Qun, HU Zihao, LI Shibo, et al. True-triaxial study on the rockburst characteristics of rock mass with a hidden structural plane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 623-639.

[35] ZHANG Z R, WU S C, XIA Z Y, et al. The role of burial depth on the structural plane-controlled rock burst failure characteristics of circular hard rock tunnels under true triaxial conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 319: 111003.

[36] 江飞飞,周 辉,刘 畅,等.地下金属矿山岩爆研究进展及预测与防治[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):956-972.
JIANG Feifei, ZHOU Hui, LIU Chang, et al. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 956-972.

[37] MCCREATH D R, MARTIN C D, KAISER P K, et al. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 136-151.

[38] CHEN B R, FENG X T, LI Q P, et al. Rock burst intensity classification based on the radiated energy with damage intensity at Jinping II Hydropower Station, China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(1): 289-303.

[39] HE B G, MENG X R, LIN B, et al. Effects of in-situ stress direction and orientation of structure planes on rockburst generation in deep tunnels: 56 case studies[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2026, 169: 35.

[40] ZHANG W, FENG X T, YAXUN X, et al. A rockburst intensity criterion based on the geological strength index, experiences learned from a deep tunnel[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7): 3585-3603.

[41] TURCHANINOV I A, MARKOV G A, GZOVSKY M V, et al. State of stress in the upper part of the earth's crust based on direct measurements in mines and on tectonophysical and seismological studies[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1972, 6(4): 229-234.

[42] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechanics, 1974, 6(4): 189-236.

[43] HOEK E, BROWN E. Underground excavation in rock, the institute of mining and metallurgy[M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.

[44] TAO Z Y. Support design of tunnels subjected to rockbursting[J]. ISRM International Symposium, 1988: ISRM-IS-1988-1049.

[45] 梁伟章,赵国彦.深部硬岩矿山岩爆风险防控技术研究进展[J].岩土力学,2022,43(增2):454-468.
LIANG Weizhang, ZHAO Guoyan. Research progress of rockburst risk prevention technology in deep hard rock mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Sup 2): 454-468.

[46] HAWKES I. Significance of in-situ stress levels[C]//Proceedings of the 1st International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Congress. Lisbon, 1966: 3.

[47] KIDYBIŃSKI A. Bursting liability indices of coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 295-304.

[48] KWASNIEWSKI M, SZUTKOWSKI I, WANG J. Study of ability of coal from seam 510 for storing elastic energy in the aspect of assessment of hazard in Porabka-Klimontow Colliery[R]. Gliwice: Silesian Technical University, 1994.

[49] 殷志强,李夕兵,董陇军,等.动静组合加载条件岩爆特性及倾向性指标[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3249-3256.
YIN Zhiqiang, LI Xibing, DONG Longjun, et al. Rockburst characteristics and proneness index under coupled static and dynamic loads[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9): 3249-3256.

[50] 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 Fengqiang, YAN Jingyi, LI Xibing. 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.

[51] WU Y, ZHANG W. Evaluation of the bursting proneness of coal by means of its failure duration[C]//Proceedings of Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 45-48.

[52] 许梦国,杜子建,姚高辉,等.程潮铁矿深部开采岩爆预测[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增1):2921-2928.
XU Mengguo, DU Zijian, YAO Gaohui, et al. Rockburst prediction of Chengchao Iron Mine during deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup 1): 2921-2928.

[53] HEAL D. Observations and analysis of incidences of rockburst damage in underground mines[D]. Perth: University of Western Australia, 2010.

[54] 邱士利,冯夏庭,张传庆,等.深埋硬岩隧洞岩爆倾向性指标RVI的建立及验证[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1126-1141.
QIU Shili, FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, et al. Development and validation of rockburst vulnerability index (RV) in deep hard rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1126-1141.

[55] 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1):341-349.
ZHANG Chuanqing, YU Jin, CHEN Jun, et al. Evaluation method for potential rockburst in underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 1): 341-349.

[56] 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):1886-1893.
GUO Jianqiang, ZHAO Qing, WANG Junbao, et al. Rockburst prediction based on elastic strain energy[J]. Chinese Jounal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1886-1893.

[57] 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 Yanjun, ZHANG Jingjian, FU Bingjun. Analyses of three parameters for strain mode rockburst and expression of rockburst potential[J]. Chinese Joural of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(8): 1520-1527.

[58] 梁伟章,赵国彦.深部硬岩长短期岩爆风险评估研究综述[J].岩石力学与工程学报,2022,41(1):19-39.
LIANG Weizhang, ZHAO Guoyan. A review of long-term and short-term rockburst risk evaluations in deep hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2022,41(1): 19-39.

[59] QIU Y G, ZHOU J. Short-term rockburst prediction in underground project: Insights from an explainable and interpretable ensemble learning model[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(12): 6655-6685.

[60] WANG S M, ZHOU J, LI C Q, et al. Rockburst prediction in hard rock mines developing bagging and boosting tree-based ensemble techniques[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(2): 527-542.

[61] LUO H, FANG Y, WANG J F, et al. Combined prediction of rockburst based on multiple factors and stacking ensemble algorithm [J]. Underground Space, 2023, 13: 241-261.

[62] PANG H L, GONG F Q, GAO M Z, et al. Improved expert system of rockburst intensity level prediction based on machine learning and data-driven: Supported by 1114 rockburst cases in 197 rock underground projects[J]. Journal of Central South University, 2026, 33(1): 335-356.

[63] BASNET P M S, MAHTAB S, JIN A B. A comprehensive review of intelligent machine learning based predicting methods in long-term and short-term rock burst prediction [J]. Tunnelling Underground Space Technology, 2023, 142: 105434.

[64] HAFIZ H, LI D Y, LUO P K, et al. Interpretable k-nearest neighbors for rockburst risk prediction: Robust performance and mechanistic insights for deep rock engineering[J]. Engineering Failure Analysis, 2026, 186(Part A): 110443.

[65] BLAKE W. Destressing test at the Galena mine, Wallace, Idaho[J]. Transactions of the Society of Mining Engineers of AIME, 1972, 252: 294-299.

[66] MÜLLER W. Numerical simulation of rock bursts [J]. Mining Science and Technology, 1991, 12(1): 27-42.

[67] JAGER A J. Two new support units for the control of rockburst damage[J]. International Symposium on Rock Support, 1992: 621-631.

[68] CASTRO L A M, BEWICK R P, CARTER T G. An overview of numerical modelling applied to deep mining [C]//Proceedings of Innovative Numerical Modelling in Geomechanics. London: CRC Press, 2012: 393-414.

[69] COOK N G W. The design of underground excavations[C]//Proceedings of the 8th Rock Mechanics Symposium. Minnesota: American Rock Mechanics Association, 1966: 45-52.

[70] ZHANG H, ZENG J, MA J J, et al. Time series prediction of microseismic multi-parameter related to rockburst based on deep learning[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(12): 6299-6321.

[71] ZHU Q F, SHI Y F, WEN J Q, et al. A type of time-symmetric stochastic system and related games [J]. Symmetry, 2021, 13(1): 118.

[72] LI X B, DONG L J. An efficient closed-form solution for acoustic emission source location in three-dimensional structures[J]. AIP Advances, 2014, 4(2): 027110.

[73] FENG G L, XIA G Q, CHEN B R, et al. A method for rockburst prediction in the deep tunnels of hydropower stations based on the monitored microseismicity and an optimized probabilistic neural network model[J]. Sustainability, 2019, 11(11): 3212.

[74] ZHOU J, SHEN X J, QIU Y G, et al. Cross-correlation stacking-based microseismic source location using three metaheuristic optimization algorithms[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 126: 104570.

[75] SUN J H, WANG W J, XIE L K. Predicting short-term rockburst using RF-CRITIC and improved cloud model[J]. Natural Resources Research, 2024, 33(1): 471-494.

[76] MA K, SHEN Q Q, SUN X Y, et al. Rockburst prediction model using machine learning based on microseismic parameters of Qinling water conveyance tunnel[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(1): 289-305.

[77] ZHANG X F, LI G Y, CHEN Y, et al. A prototype-based rockburst types and risk prediction algorithm considering intra-class variance and inter-class distance of microseismic data[J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 13: 1601090.

[78] TANG S B, WANG J X, TANG L X, et al. Automatic early warning of rockbursts from microseismic events by learning the feature-augmented point cloud representation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 147: 105692.

[79] ZHANG S C, MU C M, FENG X H, et al. Intelligent dynamic warning method of rockburst risk and level based on recurrent neural network[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(5): 3509-3529.

[80] LI J M, TANG S B, ZHANG J L, et al. Multitask intelligent early warning of rockbursts based on classification-regression cascaded network model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2025, 189: 106103.

[81] 施高萍,祝江鸿,李保海,等.矩形巷道孔边应力的弹性分析[J].岩土力学,2014,35(9):2587-2593.
SHI Gaoping, ZHU Jianghong, LI Baohai, et al. Elastic analysis of hole-edge stress of rectangular roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2587-2593.

[82] 咎超宇,张国恩,史洪恺,等.矩形巷道围岩应力的分布规律与实例分析[J].煤炭科学技术,2022,50(增1):112-118.
ZAN Chaoyu, ZHANG Guoen, SHI Hongkai, et al. Distribution law and case analysis of surrounding rock stress in rectangular roadway[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(Sup 1): 112-118.

[83] MERCIER-LANGEVIN F. LaRonde Extension - mine design at three kilometres[J]. Mining Technology, 2011, 120(2): 95-104.

[84] CAI M. Rockburst risk control and mitigation in deep mining[J]. Deep Resources Engineering, 2024, 1(2): 100019.

[85] MALEK F, SUORINENI F T, VASAK P. Geomechanics strategies for rockburst management at Vale Inco Creighton Mine[C]//Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium. Toronto, 2009: 1-12.

[86] 于世波,杨小聪,原 野,等.深部区域采矿时序的地压调控卸荷效应研究[J].黄金科学技术,2020,28(3):345-352.
YU Shibo, YANG Xiaocong, YUAN Ye, et al. Research on destress effect of ground pressure control for the time-space mining sequence at depths[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(3): 345-352.

[87] 安 龙,徐 帅,任少峰,等.深部厚大矿体回采顺序设计及优化研究[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(11):1642-1646.
AN Long, XU Shuai, REN Shaofeng, et al. Study on design and optimization of mining sequence for deep and large ore body[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2013, 34(11): 1642-1646.

[88] LU Y, LIU Y, WANG W C, et al. Experimental study on the load-bearing capacity of crack granular in the goaf under the caving mining method[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2025, 42(3): 1471-1486.

[89] XIA K Z, CHEN C X, WANG T L, et al. Investigation of mining-induced fault reactivation associated with sublevel caving in metal mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(10): 5953-5982.

[90] 冯 帆,李夕兵,李地元,等.正交各向异性板裂屈曲岩爆机制与控制对策研究[J].岩土工程学报,2017,39(7):1302-1311.
FENG Fan, LI Xibing, LI Diyuan, et al. Mechanism and control strategy of buckling rockbursts of orthotropic slab[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1302-1311.

[91] 李俊平,王红星,王晓光,等.卸压开采研究进展[J].

岩土力学，2014，35(增 2)：350-358.
LI Junping, WANG Hongxing, WANG Xiaoguang, et al. Research progress in pressure-relief mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup 2): 350-358.

[92] YAO Z G, HAN M C, LIAO H, et al. Tunnel face preconditioning using destress blasting under high geo-stress: A discrete element method considering crack evolution[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy Geo-Resources, 2026, 12(1): 44.

[93] 胡毅夫，张常亮．钻孔卸压技术在渣滓溪锑矿岩爆防治中的应用[J]．有色金属工程，2016，6(1)：63-66.
HU Yifu, ZHANG Changliang. Application of pressure relief technology by drilling holes to rock burst preventionin Zhazixi Antimony Mine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(1): 63-66.

[94] 田莉梅，张　英，张景华．深部开采高地应力区钻孔卸压数值模拟及应用[J]．金属矿山，2017(4)：31-35.
TIAN Limei, ZHANG Ying, ZHANG Jinghua. Numerical simulation and application of borehole destressing technology in high in-situ stress zone during deep mining[J]. Metal Mine, 2017(4): 31-35.

[95] 李华华，汪小东．深竖井围岩变形破坏规律及控制技术[J]．金属矿山，2020(11)：11-18.
LI Huahua, WANG Xiaodong. Deformation and failure law and control technology of surrounding rock in deep shaft[J]. Metal Mine, 2020(11): 11-18.

[96] 张玉江，李书乐，杨永聪，等．动静耦合加载下受载钻孔试件力学特性及破坏特征研究[J]．中国矿业大学学报，2025，54(3)：577-594.
ZHANG Yujiang, LI Shule, YANG Yongcong, et al. Research on mechanical properties and failure characteristics of loaded borehole specimens under static-dynamic coupled loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 577-594.

[97] ZVARIVADZA T, AVRAMOV I, YI C P, et al. Assessment of destress drilling as a rockburst management method for a stressed exploration drift at Zinkgruvan mine, Sweden[J]. Results in Engineering, 2025, 189: 106103.

[98] 王　猛，王襄禹，肖同强．深部巷道钻孔卸压机理及关键参数确定方法与应用[J]．煤炭学报，2017，42(5)：1138-1145.
WANG Meng, WANG Xiangyu, XIAO Tongqiang. Borehole destressing mechanism and determination method of its key parameters in deep roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1138-1145.

[99] ROUX A J A, LEEMAN E R, DENKHAUS H G. Destressing: A means of ameliorating rockburst conditions. Part 1: The concept of destressing and results obtained from its application[J]. Journal of South Africa Institute of Mining and Metallurgy, 1958, 59(1): 66.

[100] HANSON D, QUESNEL W, HONG R. Destressing a rockburst prone crown pillar Macassa Mine[R]. Ottawa: CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, 1987.

[101] TOPER A Z, GRODNER M, STEWART R D, et al. Preconditioning: A rockburst control technique[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Rotterdam: A. A. Balkema, 1997: 267-272.

[102] BRAEUNER G. Rockbursts in coal mines and their prevention[M]. Boca Raton: CRC Press, 1994.

[103] CROUCH S L. Analysis of rock bursts in cut-and-fill stopes[J]. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1974, 256: 298-303.

[104] 赵兴东，武　桐，况丹阳，等．2005 m 超深竖井超前释压建造工艺[J]．金属矿山，2026(3)：11-23.
ZHAO Xingdong, WU Tong, KUANG Danyang, et al. Construction technology for advanced pressure relief of 2005 m ultra-deep shaft[J]. Metal Mine, 2026(3): 11-23.

[105] SAADATMAND H A, KATSABANIS P. Tunnel face preconditioning using destress blasting in deep underground excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 117: 104126.

[106] TANG B, MITRI H. Numerical modelling of rock preconditioning by destress blasting[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2001, 5(2): 57-67.

[107] SAHARAN M R, MITRI H. Destress blasting as a mines safety tool: Some fundamental challenges for successful applications[J]. Procedia Engineering, 2011, 26: 37-47.

[108] MEJIA C, ROEHL D. Induced hydraulic fractures in underground block caving mines using an extended finite element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 170: 105475.

[109] HEKMATNEJAD A, MANSCILLA F, SCHACHTER P, et al. Enhancing production

rates at El Teniente's black cave mine through optimizing HF hole distribution using discrete fracture network modeling and geostatistical simulation methods[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2025, 4(2): 100165.

[110] 刘育明,陈晓云,彭 华,等.硬岩金属矿水压致裂矿岩预处理现场试验研究[J].中国矿山工程,2020,49(2):1-4.
LIU Yuming, CHEN Xiaoyun, PENG Hua, et al. Field test of preconditioning by hydraulic fracturing in hard rock metal mine[J]. China Mine Engineering,2020,49(2):1-4.

[111] HE M C, WANG Q. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control [J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106784.

[112] LI M F, PENG L M, SHI C H. Calculation of the surrounding rock pressure on a shallow buried tunnel using linear and nonlinear failure criteria[J]. Automation in Construction, 2014, 37: 191-195.

[113] WANG Y Q, LUO M R. Analysis of support reaction curves considering time-varying effect of shotcrete [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 6069432.

[114] LEE Y L, MA C H, LEE C M. An improved incremental procedure for the ground reaction based on Hoek-Brown failure criterion in the tunnel convergence-confinement method [J]. Mathematics, 2023, 11(15): 3389.

[115] QIN S L, ZHAO X D, SONG J Y, et al. Mechanical mechanism and theoretical analysis of anchor net support based on model test and numerical simulation [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2024, 15(1): 2350484.

[116] QIN S L, ZHAO X D, WU T, et al. Comprehensive prevention and control research on rockburst in ultradeep shaft based on theoretical deepening and practical verification [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 164: 106805.

[117] 孟庆彬,门燕青,杨以明,等.巷道围岩松动圈支护理论及测试技术[J].中国矿山工程,2010,39(3):47-51.
MENG Qingbin, MEN Yanqing, YANG Yiming, et al. Roadway surrounding rock loose circle supporting theory and testing technology [J]. China Mine Engineering, 2010, 39(3): 47-51.

[118] 焦建康,鞠文君.动载扰动下巷道锚固承载结构冲击破坏机制[J].煤炭学报,2021,46(增1):94-105.
JIAO Jiankang, JU Wenjun. Burst failure mechanism of roadway anchorage bearing structure under dynamic load disturbance[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(Sup 1): 94-105.

[119] 赵兴东,朱乾坤,牛佳安,等.一种新型J释能锚杆力学作用机制及其动力冲击实验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(1):13-21.
ZHAO Xingdong, ZHU Qiankun, NIU Jia'an, et al. Mechanical mechanism analyses and dynamic impact experimental tests of a kind of novel J energy-releasing bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 13-21.

[120] 赵兴东,朱乾坤,代碧波,等.深部金属矿超前序次释压机理与调控方法研究进展[J].金属矿山,2023(8):153-161.
ZHAO Xingdong, ZHU Qiankun, DAI Bibo, et al. Research progress of advanced sequential pressure relief mechanism and regulation method for deep metal mines[J]. Metal Mine, 2023(8): 153-161.

(责任编辑 沈 菊 宋 爽)