

文章编号: 1004-4051(2024)05-0009-13

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240905

新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采: 以毛坪铅锌矿深部开采实践为例

杨小聪¹, 蒋合国²

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 102628;

2. 彝良驰宏矿业有限公司, 云南 昭通 657600)

摘要: 金属矿深部开采将面临“三高一扰动”的复杂工程地质环境, 势必造成高应力地压灾害、高压水害、高温热害等灾害风险显著提高, 全面有效管控和处治工程灾害风险对深部金属矿山的安全高效开采至关重要, 发展新质生产力是引领深部金属矿山安全高效开采的战略选择。为系统总结我国在发展深部金属矿山安全高效开采新质生产力方面的有益探索, 以毛坪铅锌矿深部开采实践为例, 重点介绍了深部金属矿山开采安全风险管控与处治技术的新进展, 讨论了未来需重点关注的新质生产力发展方向和思考。研究创新了考虑地压灾害风险源头管控的矿体全生命周期整体开采规划方法, 提出了进路式充填体顶板稳定性控制方法, 形成了基于管道压力监测的充填管输优化技术; 提出了动力灾害风险预评价、动力灾害风险识别与分析、动力灾害风险处治等系列方法与技术, 形成了深部高应力强扰动动力灾害风险分级分区控制技术, 初步实现了深部金属矿开采动力灾害风险的动态管控; 开发了矿区涌突涌水预警系统, 实现了涌突水趋势的精准预警和应急响应, 提出了以精细刻画矿山水文地质结构、系统构建水害预测评价体系、综合防治水技术为主的深井水害综合防控关键技术; 开发了矿山多源数据融合三维可视化管控系统, 实现了多源数据融合共享与分析, 辅助实现矿山生产过程的安全预警决策和工程设计优化。未来深部金属矿开采领域应全面提升深部灾害风险管控水平, 充分发挥新质生产力的引领作用, 助力实现深部金属矿山的本质安全高效开采。

关键词: 新质生产力; 金属矿山; 深部开采; 采矿方法; 地压; 防治水; 通风; 风险管控
中图分类号: TD853 **文献标识码:** A

New quality productive forces leads the safe and efficient mining of deep metal mines: taking deep mining practice of Maoping Lead-Zinc Mine as an example

YANG Xiaocong¹, JIANG Heguo²

(1. BGRIMM Technology Group Co., Ltd., Beijing 102628, China;

2. Yiliang Chihong Mining Co., Ltd., Zhaotong 657600, China)

收稿日期: 2024-04-30 责任编辑: 赵奎涛

基金项目: 国家重点研发计划项目“深井大规模开采岩体力学理论与动力灾害防治技术”资助(编号: 2022YFC2904102)

第一作者简介: 杨小聪, 江西泰和人, 正高级工程师, 博士生导师, 矿冶科技集团有限公司首席专家、矿山工程研究设计所所长、国家金属矿绿色开采国际联合研究中心主任, 长期从事金属矿采矿及安全技术的研究工作, E-mail: yxcong@bgrimm.com。

第二作者简介: 蒋合国, 贵州兴义人, 高级工程师, 彝良驰宏矿业有限公司副总经理、安全总监, 长期从事金属矿山采矿与安全技术的研究和管理, E-mail: jiangheguo2003@163.com。

引用格式: 杨小聪, 蒋合国. 新质生产力引领深部金属矿山安全高效开采: 以毛坪铅锌矿深部开采实践为例[J]. 中国矿业, 2024, 33(5): 9-21.

YANG Xiaocong, JIANG Heguo. New quality productive forces leads the safe and efficient mining of deep metal mines: taking deep mining practice of Maoping Lead-Zinc Mine as an example[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 9-21.

Abstract: Deep metal mining will face the complex engineering geological environment of “three highs and one disturbance”, which will inevitably lead to a significant increase in the disaster risk such as high-stress geopressure disasters, high-pressure water hazards, and high-temperature heat hazards, etc. Comprehensive and effective control and management of engineering disaster risks in deep mining is essential for the safe and efficient mining of deep metal mines. And the development of new quality productive forces is a strategic choice to lead the safe and efficient mining of deep metal mines. In order to systematically summarize China’s useful exploration in developing new quality productive forces for safe and efficient mining in deep metal mines, new progress in risk control and treatment technology of deep metal mine mining safe is systematically introduced with the deep mining practice of Maoping Lead-Zinc Mine as an example, and the future development directions of new quality productive forces is discussed and pondered. The research has innovated the overall mining planning method for the whole life cycle of the ore body considering the source control of geopressure disaster risk, put forward the roof stability control method of the filling body in roadhead mining, and established the optimization technology of filling and pipeline transportation based on the monitoring of pipeline pressure; put forward a series of methods and technologies such as pre-evaluation of the dynamic disaster risk, identification and analysis of the dynamic disaster risk and treatment of the dynamic disaster risk, and formed the risk grading and zoning control technology of deep high stress and strong disturbing dynamic disaster, and initially realized the dynamic control of dynamic disaster risk in deep metal mine mining; developed a mine water surge early warning system, realized the accurate early warning and emergency response of water surge trend, and put forward the key technology of comprehensive prevention and control of water hazards, which is mainly based on the fine depiction of the hydrogeological structure in mines, the systematic construction of the water damage prediction and evaluation system, and the comprehensive water prevention and control technology; a set of mine multi-source data fusion 3D visualization and control system has been developed, which realizes multi-source data fusion sharing and analysis, and assisted in realizing the safety early warning decision-making and engineering design optimization of the mine production process. In the future, the field of deep metal mining should comprehensively improve the level of deep disaster risk control, give full play to the leading role of new quality productive forces, and help to realize the intrinsic safety and high efficiency mining of deep metal mines.

Keywords: new quality productive forces; metal mine; deep mining; mining method; geopressure; water control; ventilation; risk management

金属矿产资源是我国产业发展与国家安全的重要保障。当前,金属矿产资源刚性需求持续旺盛且长期保持高位态势,浅地表矿产资源供给不足且日益减少,深部金属矿产资源开发是未来发展的必然趋势和保障国家资源安全的必然选择。深部资源赋存的工程地质、水文地质条件复杂,地应力高、地下含水及导水通道隐伏性强、地温高且通风困难,致使资源开采难度加大、作业环境恶化、作业风险陡增。2024年政府工作报告中明确提出要加快发展新质生产力,在此背景下,充分发挥新质生产力在深部金属矿开采领域的引领作用,探究深井工程灾害孕育的内在发生及发展机制,开发面向深部开采全过程灾害风险管控与处治的系列技术,构建矿山生产全要素的监测预警及数据融合分析技术体系,对于实现深部金属矿山本质安全高效开采至关重要。

近年来,创新和发展新质生产力引领深部金属

矿本质安全高效开采,国内外众多学者已开展了一系列卓有成效的研究与探讨。在深部充填采矿方法与工艺方面,以深部岩体力学理论^[1-4]和充填体力学^[5-7]基础创新为依托,创造性地提出了卸荷开采思想与方法^[8-10],旨在源头控制地压灾害风险;突破浅埋矿山经济最优的开采设计理念,发展了考虑风险管控为约束的整体规划方法^[11];初步形成了融合先进制造、智能信息化与充填采矿的智能化充填技术与工艺^[12-14]。在地压灾害风险处治方面,提出了“战略”和“战术”两步走策略,在以灾害风险源头控制的战略技术措施层面最大限度降低地压灾害风险,将地压灾害风险在战术措施层面进一步降低和化解^[15-25]。在深部水害监测预警与防治方面,形成了以水害监测预警-水害管理-水害防治为主线的综合防控技术^[26-32]。在深部高温热害防治方面,建立了以通风为主、机械制冷和人体防护为辅的立体化多热源差异化高效治理技

术^[33]。在安全监测辅助分析软件方面,初步探索了深井安全管控与快速决策辅助系列程序,实现了深部开采过程高应力环境的动态支护设计^[34-36]。

通过以上检索和总结不难发现,虽然在深部金属矿开采领域的新质生产力已取得了一些基础性创新和突破,但许多技术方案仍处于理念与顶层设计层面,尚未形成实质的应用性突破,相关技术并未得到实践的检验与证明;此外,相关技术理论体系尚不完善,面对不同技术条件约束下的深部矿山开采并未能给出广泛适用的解决方案。因此,仍需开展理论创新和实践应用探索,持续发挥新质生产力在深部金属矿开采领域的引领作用,实现深部金属矿山本质安全高效开采。

据此,本文以毛坪铅锌矿为典型案例,立足目前矿山生产中凸显的各种问题,聚焦未来深部采矿面临的诸多难题,围绕深部大突涌水矿床开采条件、采矿过程及风险管理的可视化表征与分析、深部开采的全生命周期规划及机械化高效采矿、深部采矿全过程的地压管控、深部采矿的高承压水害防控、深部采矿通风与高温热害控制等关键技术问题,系统介绍毛坪铅锌矿在深部金属矿安全高效开采新质生产力方面的攻关与探索,建立适应深部大突涌水矿床开采新的认识、新的设计理论、新的工作方法和新的实用技术,讨论未来深部金属矿开采灾害风险防控与处治的发展方向,为充分发挥新质生产力在深部金属矿安全高效开采技术领域的引领作用提供支撑。

1 工程概况

1.1 矿山概况

毛坪铅锌矿位于云南省昭通市彝良县,地处四川盆地与云贵高原连接地带,由于洛泽河流经矿区,区内地形陡峻,侵蚀切割剧烈,形成幼年期“V”字形河谷地形,两岸喀斯特地貌发育,形成阶地、陡崖,平均坡度在 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。区内海拔 $879\sim 2\,013\text{ m}$,相对高差 $1\,134\text{ m}$ ^[37]。

矿床类型属碳酸盐岩型铅锌矿,含矿地层主要为泥盆系上统宰格组和石炭系威宁统,围岩为中粗晶白云岩,矿体呈隐伏-半隐伏状赋存于石门坎背斜西翼,多向南西侧伏,矿体产状与地层基本一致,走向北东-南西,倾向南东,矿体倾角集中在 $75^{\circ}\sim 80^{\circ}$,倾斜延深较大。矿体埋深在 $50\sim 1\,600\text{ m}$ 之间。矿体呈似层状或扁柱状产出,形态较为规则,倾向上矿体大体随地层产状变化而波状弯曲。

矿石矿物主要由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿组成。节理裂隙及小断层发育,切割矿体,破坏其完整性。复杂的构造特征使矿体的整体强度分布不均衡,结

构疏松的黄铁矿降低了矿体的整体强度,属坚硬、半坚硬岩组,稳固性中等。矿区工程地质条件属中等-复杂类型。

矿区内洛泽河河床高程 $891\sim 940\text{ m}$,河水对矿坑水的补给不强,矿体最低开采深度位于当地最低侵蚀基准面之下,矿区构造发育,地下含水系统在平面及垂向上强弱相间、结构复杂,主要充水含水层为石炭系和泥盆系碳酸盐岩岩溶裂隙水含水层,富水性、透水性中等-弱。水文地质边界随着帷幕工程的实施而逐渐简单。矿区水文地质条件属以岩溶裂隙含水层直接充水为主的中等偏复杂类型。

矿区矿床开采技术条件为水文地质问题为主的复杂类型(Ⅲ-1型)。

1.2 矿山深部开采技术难题

基于现有的技术资料分析不难预见,未来毛坪铅锌矿深部开采将面临严峻的技术挑战。

1)开采技术条件愈发复杂。深部开采水文地质条件偏复杂,呈现三维空间流场,承压水头高达 $1\,100\text{ m}$;深部开采岩层自重应力显著升高,且复杂的地形导致构造应力显著差异,应力环境更加复杂;目前,生产中段局部采场气温高达 33.4°C 、湿度 99.8% ,预计深部地温将达 30°C 以上,采场温度将进一步上升。

2)深部地压管控及围岩控制难度显著提高。随着毛坪铅锌矿的开采深度越来越大,受到深部复杂地质力学环境与人为采矿活动的叠加影响,导致矿岩赋存高地应力并储存高应变能,势必造成深部开采过程中的地压显现更加明显;岩体力学行为相较于浅部的显著改变,造成深部开采出现了与浅部截然不同的非线性破坏现象,甚至是动力破坏现象。深部截然不同的灾害特征和表现形式将威胁采矿作业人员安全和机械设备高效运行,成为深部开采的较大安全隐患。

3)深部突涌水灾害风险显著增加。矿山开采进入 $1\,000\text{ m}$ 深部以后,地质力学环境更加复杂,在强烈的开采扰动下,高承压水带来的突涌水安全隐患机理更加错综复杂。此外,水文地质勘查空间受限,常规勘查手段已不能完全适应;现有技术装备稳定性、灵敏度和耐高温高压性能未能较好地适应深部复杂环境条件,造成对深部水害治理技术不系统、监测预警不可靠。

4)深部开采高温热害环境治理难度更大。随着开采深度不断的增加,矿井通风系统将更加复杂,各种热量及湿气难以排出,聚集后导致作业环境温度增高、湿度增大,井下热害问题将愈发突出,高温高湿环境可能导致机电设备故障显著增加,且极易影

响工作人员的作业状态,使得人员和设备的工作效率明显下降,最终将对矿井安全稳定的生产造成不利影响。

5)系统性的深部灾害风险管控方法与措施相对匮乏。国内深井开采技术方兴未艾,尚无成熟的成套技术可供参考,如适合深部开采的全生命周期开采规划技术、高应力区域卸荷采矿技术、充填与输送工艺技术深部高效采矿技术;基于三维场景交互式的开采设计、生产计划与开采环境间的联动分析与精细化管理技术等。

1.3 深部开采全过程解决方案

针对毛坪铅锌矿未来深部开采面临的高地应力

诱发的地压灾害风险、高承压水诱发的水害风险、高温导致的热害风险,以及深部开采强扰动带来的技术条件进一步恶化的难题,本文提出了以深部安全高效采矿方法为核心,高应力强扰动地压灾害风险控制、深部开采突涌水灾害预警与防治、深部通风优化与热害控制等专项技术为支撑,集成开发矿山安全生产监测预警与管控平台为主要抓手,面向毛坪铅锌矿未来深部开采技术需求的深部开采灾害风险全过程解决方案,旨在创新探索深部安全高效开采的关键共性技术,打造深部金属矿开采的新质生产力,引领深部金属矿开采行业发展。形成的技术体系如图 1 所示。

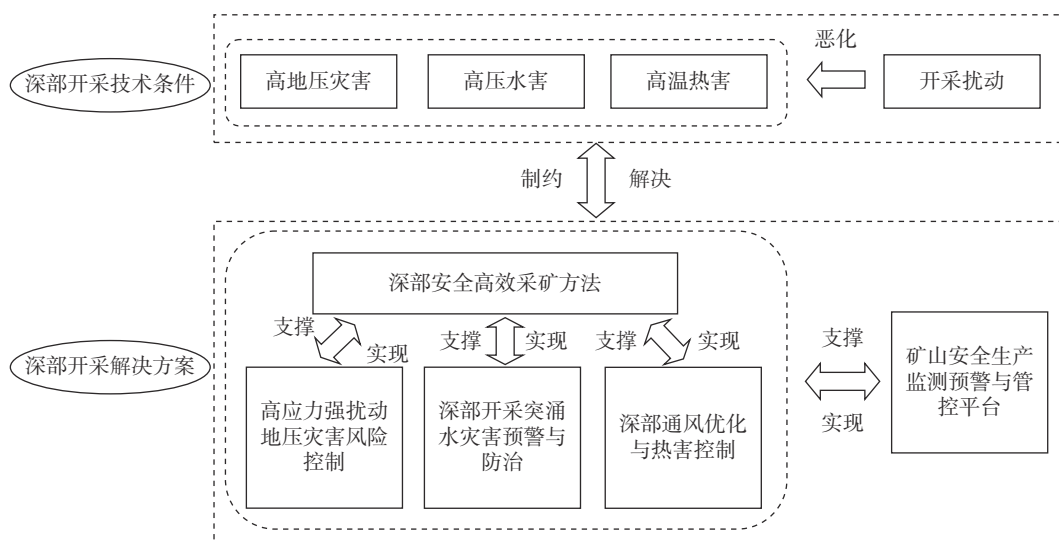


图 1 深部开采技术体系

Fig. 1 Technology system of deep mining

2 矿山安全绿色高效开采技术

2.1 深部安全高效采矿方法

2.1.1 深部开采全过程规划设计方法

针对矿山深部开采高应力、大突涌水及安全高效开采的需求,以地质状况的适应性、开采设计的优化性、资源的最大回收利用性为原则,提出了一种基于边界元精细化数值模拟的深部环境动态综合评价与采场浮动优化设计方法。从采矿规划的源头层面,大幅度减少非线性动力灾害(岩爆和矿震)发生频次和量级,使得动力灾害发生与发展处于受控状态。如图 2 所示,毛坪铅锌矿全生命周期开采规划的源头控制对象为不同类型的动力灾害,整体规划的原则为动力灾害控制效果最佳、当前与未来收益统筹考量。

通过建立 Map3D 数值分析模型,分析对比不同回采方向、回采顺序条件下动力灾害风险显现规律,如图 3 所示。评估得到了毛坪铅锌矿 I-8 号矿体较

为合理的总体开采方案,即,采用下向水平分层进路式开采方案、进路垂直矿体走向的布置、隔三采一、

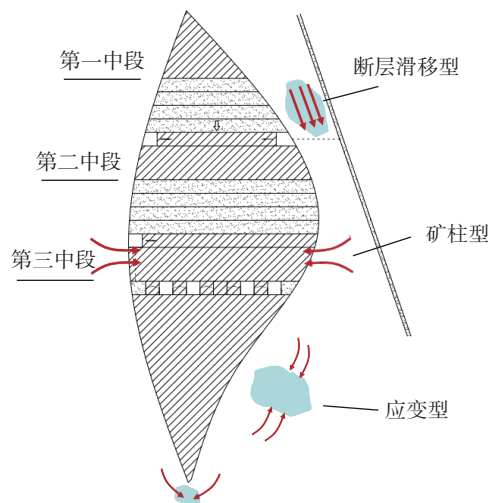


图 2 深部开采源头规划

Fig. 2 Source planning of deep mining

分段内从中间向两边开采, 该方案较常规的动力灾害风险降低约 20%。

2.1.2 充填体强度需求分析

与国外采用充填采矿法矿山相比, 国内矿山充填体的强度要求普遍过高, 极大地增加了矿山的生产成本。毛坪铅锌矿采用下向进路充填采矿法, 进路断面为 3.5 m×3.0 m, 前期设计通过工程类比提出充填假底层和接顶层的强度要求分别为 4.5 MPa 和 1.5 MPa。针对毛坪铅锌矿井下采场涌水量大及开采深度不断增加的现状, 通过数值模拟研究了充填体强度的理论需求强度。研究表明: 矩形进路尺寸为 3.5 m×3.0 m 时, 打底层的极限强度需求为 0.96 MPa; 矩形进路尺寸为 4.5 m×4.0 m 时, 打底层的极限强度需求为 1.13 MPa; 矩形进路尺寸为 5.5 m×5.0 m 时, 打底层的极限强度需求为 1.71 MPa。优化后的充填体强度较常规设计方案提出的充填体强度需求降低了 150%。

2.1.3 充填体底部铺筋方案优化

利用 FLAC^{3D} 数值分析软件研究了下向进路充填体内配置底筋网度为 35 cm×35 cm、50 cm×50 cm 时, 充填体顶板下向揭露时的安全稳定性, 分析结果如图 4 所示。由图 4 可知, 与不加钢筋网的充填体最

大竖向位移约 9.97 cm 相比, 目前矿山设计采用的钢筋网度 35 cm×35 cm 能使充填体最大竖向位移降低约 16.6%; 当钢筋网度采用 50 cm×50 cm 时, 能使充填体最大竖向位移降低约 15.5%。研究结果表明: 在当前打底层充填体强度参数保持不变的前提下, 将底筋网度由 35 cm×35 cm 扩大至 50 cm×50 cm 安全可行, 优化后的铺筋网度较原方案降低 40%, 铺筋成本降低 50%; 同时, 极大地提高了工作效率, 铺筋时间由原来的 3 班降低至 1 班。

2.1.4 充填管输压力监测与分析

通过在充填管道安装压力监测装置研究井下采场充填管道压力分布规律, 监测结果如图 5 所示。得到实测比摩阻为 5 392 Pa/m, 与采用白金汉公式推导的比摩阻解析计算结果相差较小^[38], 利用钻孔底部压力监测数据可反推得到钻孔料位高度, 结果表明: 290 m 垂差的钻孔料浆高度在 150 m 以下, 满管率(钻孔内料浆料位/钻孔垂深)低于 50%。

2.2 深部高应力强扰动动力灾害风险分级分区控制技术

随着开采深度的不断增加, 毛坪铅锌矿受到高地应力、局部扰动应力集中以及回采动力扰动等多机制力学作用的叠加影响, 潜在的动力灾害风险逐

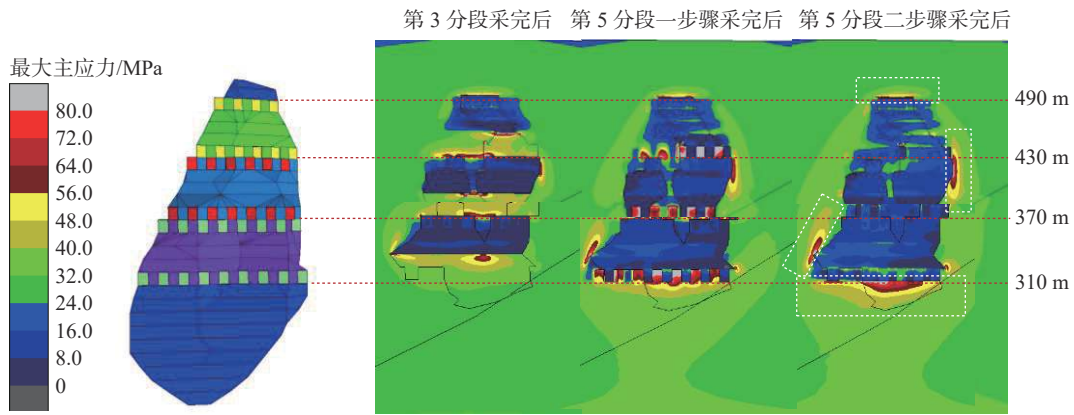


图 3 基于动力灾害风险的回采方案优化

Fig. 3 Optimization of the mining scheme based on the dynamic disaster risk

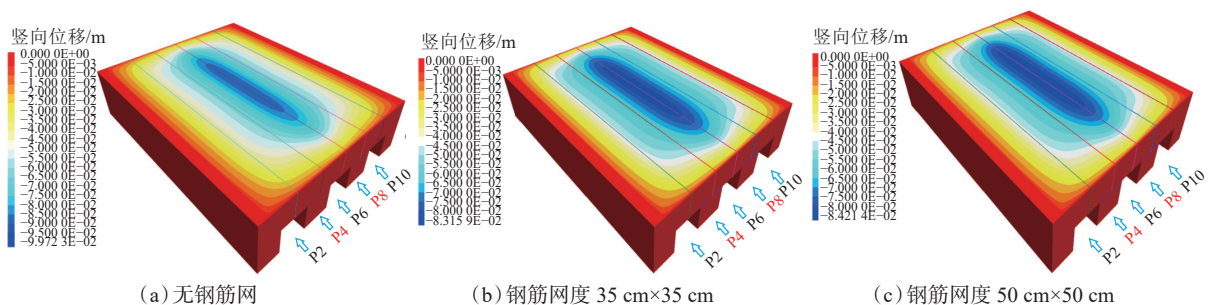


图 4 不同网度钢筋网竖向位移分布

Fig. 4 Vertical displacement distribution of reinforcing mesh with different mesh degrees

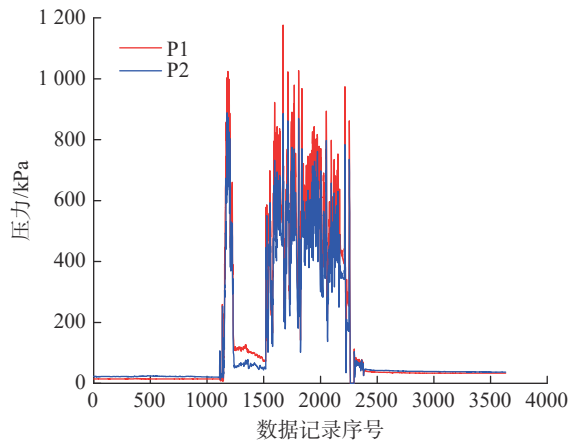


图 5 充填管道压力分布规律

Fig. 5 Pressure distribution law of filling pipeline

渐升高,已出现了一些较为轻微的动力显现事件,如分段巷道与沿脉巷道间矿柱的轻微动力破坏、深部巷道贯通期孤立矿柱掌子面的异常垮冒、多中段回采渐进减小的水平矿柱区域异常破坏现象、回采影响区域断层活化诱发的异常震动事件等。

针对前述提及的动力灾害风险显现特征,本文针对性提出了动力灾害风险预评价、动力灾害风险识别与分析、动力灾害风险处治等系列方法与技术,形成了深部高应力强扰动动力灾害风险分级分区控制技术,初步实现了毛坪铅锌矿动力灾害风险的动态管控。

2.2.1 动力灾害风险预评价方法

在深部开采规划与设计阶段,面向未工程揭露的与采矿密切相关的工程岩组,通过深部勘探钻孔采取岩芯,选取有代表性的不同埋深、不同岩组的岩石,开展单轴压缩-卸载试验,将试件加载至应力达到其强度的 80%~90%,然后卸载至零,得到应力-应变曲线,计算弹性变形能指数 W_{et} ,通过计算不同埋深和不同岩组岩石的岩爆倾向性,进而预先评估深部开采可能面临的动力灾害显现深度及圈定风险范围。弹性变形能指数 W_{et} 计算公式见式(1)。

$$W_{et} = W_{sp} / W_{st} \quad (1)$$

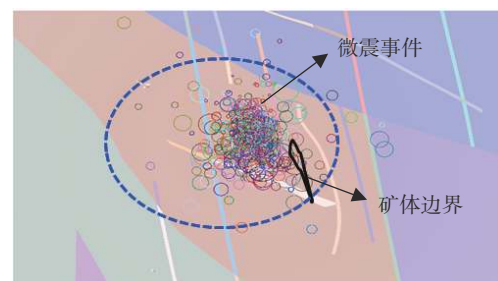
式中: W_{et} 为弹性变形能指数; W_{sp} 为恢复的弹性应变能, J/m^3 ; W_{st} 为消耗的能量, J/m^3 。

根据弹性变形能指数确定岩石的岩爆倾向性等级,当弹性变形能指数 $W_{et} < 2.0$ 时,认为岩石无岩爆倾向性;当弹性变形能指数 $2.0 \leq W_{et} < 3.5$ 时,认为岩石具有弱岩爆倾向性;当弹性变形能指数 $3.5 \leq W_{et} < 5.0$ 时,认为岩石具有中等岩爆倾向性;当弹性变形能指数 $W_{et} \geq 5.0$ 时,认为岩石具有强烈岩爆倾向性。

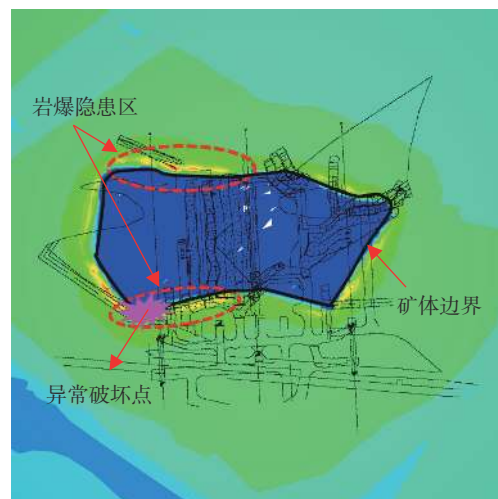
2.2.2 动力灾害风险识别与分析方法

动力灾害发生的两个必要条件为具有潜在的岩爆倾向性和达到动力灾害发生的应力环境,应力环境的合理分析与评估是动力灾害风险识别的重要内涵之一。此外,针对正在开采的深部矿山,建立以微震监测为主的地压监测系统是实现地压灾害风险有效识别与跟踪分析的必要手段,微震事件表征了岩体的破坏和力学参数的衰减,将对开采的应力环境产生直接的影响。

据此,本文提出了一种基于微震监测与数值模拟耦合影响的动力灾害风险识别与分析方法。具体流程为:构建深部矿山回采精细化数值分析模型→基于实测地应力开展地应力反演分析→根据实际回采进度开展数值模拟分析→引入对应时期的微震监测数据进行对应区域的岩体力学参数折减→计算给出考虑微震特征的应力分布特征→基于岩爆风险判据识别动力灾害风险。如图 6 所示,采用前述提出的动力灾害风险识别与分析方法,分析圈定了毛坪铅锌矿 381 m 回采水平的动力灾害风险区,对应的动力灾害风险区内,在现场发生了一次轻微异常垮冒事件,侧面验证了本方法的有效性。



(a) 微震导入数值模型



(b) 岩爆隐患区识别

图 6 动力灾害风险识别

Fig. 6 Risk identification of dynamic disaster

2.2.3 抗岩爆冲击吸能支护装置

深部开采发生岩爆的本质在于围岩积聚能量的突然释放, 采用吸能支护技术减少岩体能量积聚程度, 降低岩爆发生的可能性是最为有效的防护手段。吸能支护结构能使岩体中积蓄的高弹性能以和缓的方式释放, 使高应力岩体处于低储能、缓变形的稳定状态, 有效抵抗岩爆等动力灾害的往复冲击作用。目前, 深部金属矿山常用吸能锚杆与普通锚网喷支护组合抗岩爆支护手段, 该技术中吸能锚杆是核心, 能够控制围岩能量的突然释放, 因此, 组合抗岩爆支

护手段, 是控制深部开采岩爆发生的重要手段。

基于此, 本文在总结现有技术基础上, 研发了一种低成本、高吸能、大行走距离且与现有施工工艺无缝衔接的吸能锚杆以及组合抗岩爆支护技术。吸能锚杆的研发, 通过室内及现场的静力拉拔试验, 进行吸能锚杆静力性能的测试, 保持承受的荷载 100 kN, 累计位移量达 90 cm, 试验过程及结果如图 7 和图 8 所示。新型吸能锚杆的能量吸收能力较常规锚杆提高一倍以上, 能够用于岩爆冲击能量较大区域的安全防护。



图 7 吸能锚杆现场拉拔试验

Fig. 7 Field pullout test of energy absorbing anchors

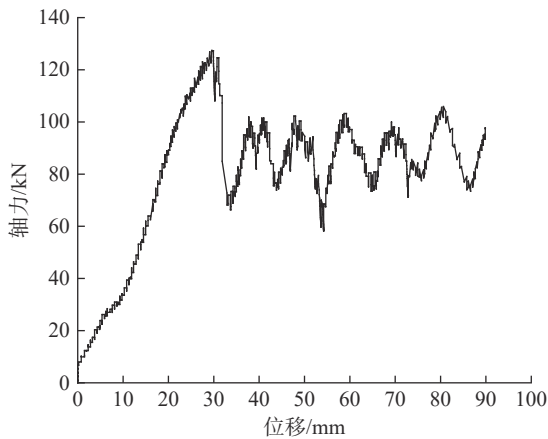


图 8 吸能锚杆拉拔试验结果

Fig. 8 Pullout test results of energy absorbing anchor

2.2.4 抗岩爆冲击吸能支护设计方法

结合前述研发的吸能锚杆与毛坪铅锌矿实际情况, 提出一种针对深部岩爆控制的抗岩爆冲击吸能支护设计方法, 具体流程为: ①结合微震监测数据, 确定深部巷道岩爆灾害风险较大区域; ②计算设计巷道岩块抛掷的总动能; ③结合设计巷道岩块抛掷的总动能、支护构件的吸能性能参数, 确定吸能支护基础参数; ④对支护基础参数进行支护强度与经济

性验算, 确定最优支护基础参数, 形成巷道支护方案。

依据上述设计方法, 统计 2023 年 1 月至 2024 年 1 月毛坪铅锌矿典型巷道区域发生的微震信息, 共计发生 10 次较大震级事件, 距离试验段仅有 30 m, 且最大能量值为 103.9 J。以此为依据, 设计锚杆吸能能力不应小于 1 039 J(安全系数为 10)。参考吸能锚杆结构参数试验, 确定吸能锚杆结构头长度 40 mm、直径 26 mm, 现场拉拔试验值行程长度均超过 80 mm, 平均拉拔力为 100 kN, 能量为 8 000 J, 满足 1 039 J 的微震能量, 同时结合矿山运输巷道锚网喷标准支护方案, 形成组合式抗岩爆冲击支护方案。具体方案如图 9 所示。

2.3 深部开采突涌水灾害预警与防治

2.3.1 深部开采突涌水危险性评价方法

为了探索深部矿体采动条件下的突涌水机理, 以及危险性分布特征, 结合毛坪铅锌矿的实际情况, 构建帷幕注浆后矿山突涌水危险性评价指标体系, 如图 10 所示。

本文提出了一种基于层次分析法(AHP)-熵权法(EWM)的综合权重计算方法, 结合三维数字化建模技术, 形成了适用于毛坪铅锌矿的深部开采突涌水

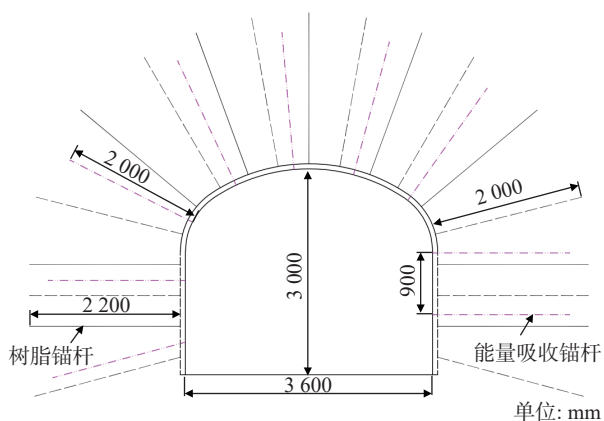


图 9 吸能支护设计方案

Fig. 9 Design solutions of energy absorbing support

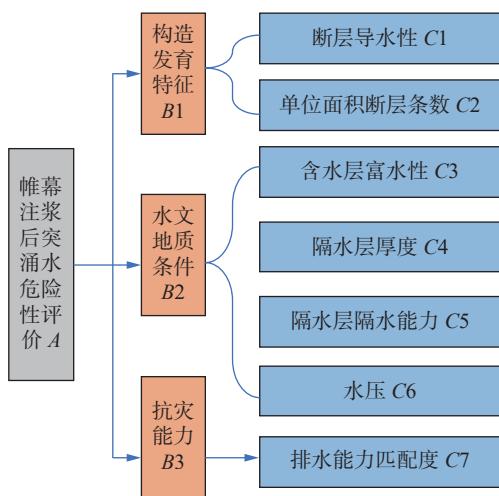


图 10 水害风险评价指标体系

Fig. 10 Evaluation indicator system for water hazard risk

危险性评价方法。结合不同中段情况进行了危险性评价,得到突涌水危险性的三维评价模型,如图 11 所示。

2.3.2 超前疏水降压技术

通过构建现场疏放水试验系统,开展了超前疏水降压的现场试验探索,给出了疏水量和疏水降深的关系曲线,如图 12 所示,并据此提出了疏水孔布置建议,即:① II 号矿带最大疏降水平为 500 m,且疏水量控制在 2 370 m³/d;②疏水钻孔的建议孔径为 Φ75 mm,疏水孔数为 5 个。

2.3.3 新型充水构造注浆改造材料

研发了一种新型注浆材料,该注浆材料具有快速凝结、结石率高、零泌水率、强度增长快速、最终强度高、环保性能较好等特点,可以通过调整浆液含水量适应不同的水文地质条件和受注体,相比传统的水泥注浆材料具备明显的优势,强度增长速度提高 50% 以上,最终结石体强度较常规注浆材料提高约 60%。

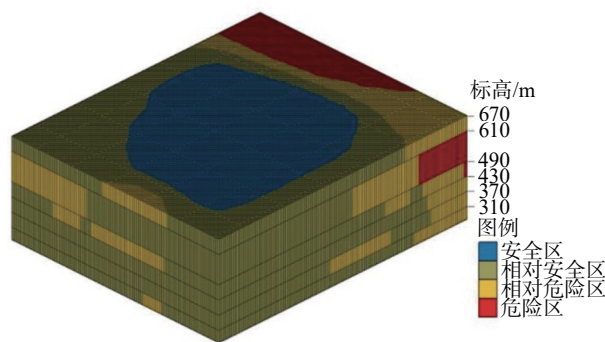


图 11 突涌水危险性三维评价模型

Fig. 11 Three-dimensional evaluation model of water inrush hazard

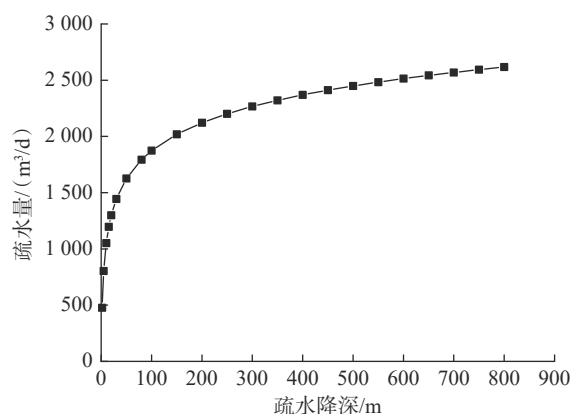


图 12 疏水量与降深关系曲线

Fig. 12 Relationship curve between hydrophobicity and depth reduction

2.3.4 矿山突涌水应急决策系统

为应对突发险情,如矿山突涌水的应急处置,构建了矿山深部突涌水应急决策系统,系统架构如图 13 所示。该系统通过三维建模直观展示矿山结构,提供动态逃生路线,模拟水流动态,预测水害扩散路径,可以实现基于实时水情提供最优逃生路线,确保涉险人员安全撤离。系统可以通过预演险情场景,制定应急计划,提升团队准备水平和矿工安全意识;通过集成 GIS、传感器数据等提供全面信息支持,实

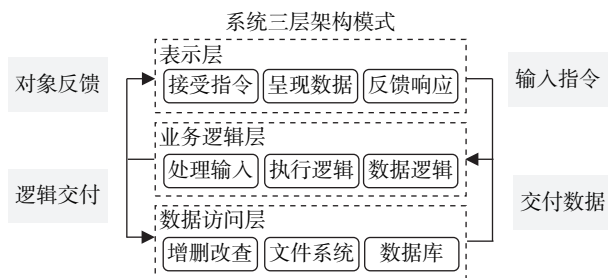


图 13 突涌水应急决策系统架构模式

Fig. 13 Pattern of emergency decision making system of water inrush

现远程监控、实时分析和跨部门协作。该突涌水应急决策系统是深部金属矿山开采领域首创平台, 对行业内的其他大突涌水矿山的应急决策起到了很好的示范引领作用。

2.4 深部通风优化与热害控制

2.4.1 通风系统三维仿真与系统优化

研发了适用于深井矿山的矿井通风可视化仿真系统。本次开发的三维通风可视化仿真软件, 是基于.NET、GIS理论和可视化基础平台 MineMap 组件实现的。矿井通风仿真系统是应用型信息系统, 以通风网络可视化分析及研究作为主要内容, 具有通风网络空间数据输入、存储、处理、分析和输出等功能。MVSE 基于.NET 计算机编程, 对已知的矿井通风基础参数进行高速运算, 可快速计算出矿井通风阻力、风阻及摩擦阻力系数等所需参数; 基于 GIS 理论和计算机图形学实现了矿井通风二维、三维可视化仿真等功能。

2.4.2 矿山深部气候环境参数监测预测系统

为解决井下气候环境参数监测不全面、人工测量工作量大、难以实现矿井通风参数及时准确测定等问题, 构建了井下气候环境基础参数连续监测系统, 实现减少井下人员工作量及井下气候环境参数的全面性、精确性、实时性, 监测参数包括风速、气压、温度、湿度等, 实现了大量数据的长期记录与分析, 为矿井的通风管理及异常变化情况的获取等提供了帮助。

2.4.3 矿山深部热环境治理新模式

随着地下矿山的深部开采, 矿井热害势必会发生, 改善矿内气候条件的方式很多, 但归纳起来有采取非人工空调措施和采取人工制冷空调措施两个方面。随着矿山开采中段延深, 矿体围岩水头压力、矿坑涌水量明显增大, 不仅恶化井下作业环境, 易造成安全隐患, 更有每年巨额的排水费用需要负担。结合现场的实际工况, 矿坑涌水中部分为 19~21 °C 的低温涌水, 部分采场区域低温涌水量高达 300 t/h, 对采场热环境具有较大的冷却能力, 因此, 创新性地利用矿井低温涌水作为冷源, 通过管路布置与风流进行热交换实现采场降温, 系统如图 14 所示。该项技术对于类似的具有现场低温涌水源矿山的的热害处治起到很好的示范作用, 具有很好的行业推广应用价值。

2.5 矿山安全生产监测预警平台

2.5.1 预警平台系统架构

在深部金属矿山安全开采管控领域, 首创了矿山多源数据融合三维可视化系统整体采用客户端和

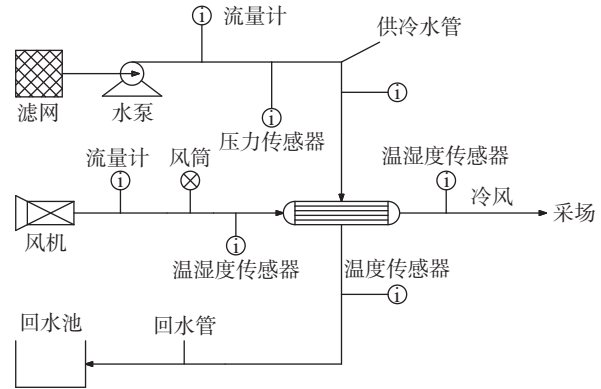


图 14 低温涌水降温除湿系统

Fig. 14 Cooling and dehumidifying system of low temperature surging water

服务端相结合的软件结构设计理念。客户端软件(矿山开采过程数据融合三维可视化分析软件)以建立面向矿山的风险数据融合分析、安全态势预判、时空规律反演并最终实现随开采过程的工程设计优化等典型应用为目标; 服务端软件(矿山安全生产监测预警平台)以构建在线数据管理、统计分析、风险预警、信息发布等多维一体的在线服务模式为目标。两款软件互相补充, 通过对在线数据和离线数据的分类管理、融合分析, 实现结果数据共享, 进而辅助实现矿山生产过程的安全预警决策和工程设计优化。矿山多源数据融合三维可视化系统软件架构如图 15 所示。

2.5.2 矿山安全生产监测预警平台

根据平台架构及各业务类型数据采集方式、数据统计形式、安全风险预警特点及三维可视化要求等, 按照前后端分离结构设计模式, “矿山一张图”开发设计理念, 首页按照工程类别进行三维模型的分层加载, 各类型业务数据统计曲线灵活配置, 预警预报信息分级分类实时展示, 预警类型、分类及精确位置的动画模拟, 形成如图 16 所示的矿山安全生产监测预警平台。

2.5.3 矿山开采过程数据融合三维可视化分析软件

以矿山开采过程的相关地压控制、深部岩体力学、水文地质学、流体力学及热力学等领域的成熟理论及研究成果为基础, 综合采用计算机图形学及三维可视化技术, 实现矿山开采过程多源数据的集成管理、融合分析以及三维可视化展示, 建立面向矿山的风险数据挖掘、安全态势预判、时空规律反演, 并最终实现伴随采动过程的工程设计优化等典型应用, 分析软件界面如图 17 所示。

3 未来深部金属矿开采新质生产力发展方向

尽管毛坪铅锌矿围绕上述深部金属矿开采灾害

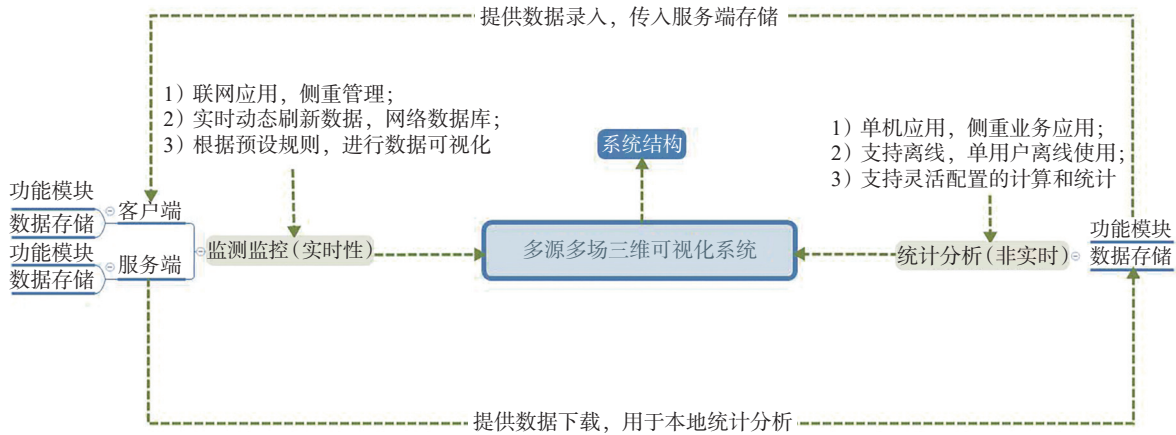


图 15 矿山多源数据融合三维可视化系统软件结构

Fig. 15 Software structure of 3D visualization system of mine multi-source data fusion

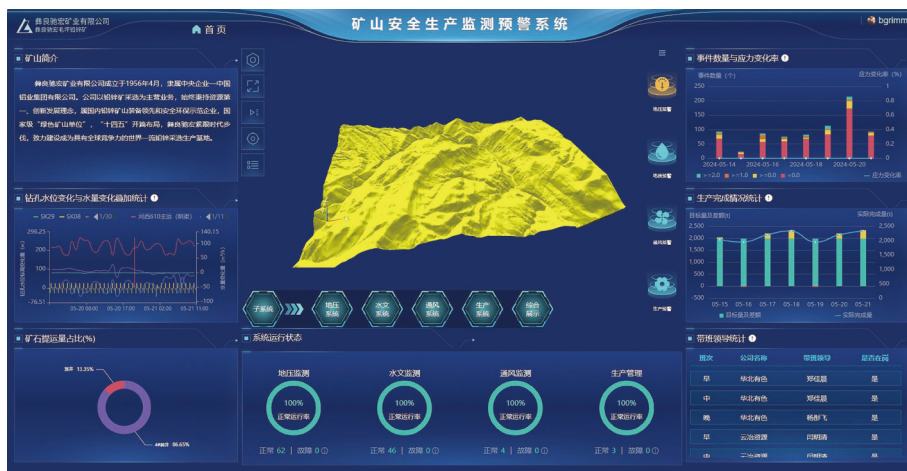


图 16 矿山安全生产监测预警平台

Fig. 16 Monitoring and arning platform of mine safety production

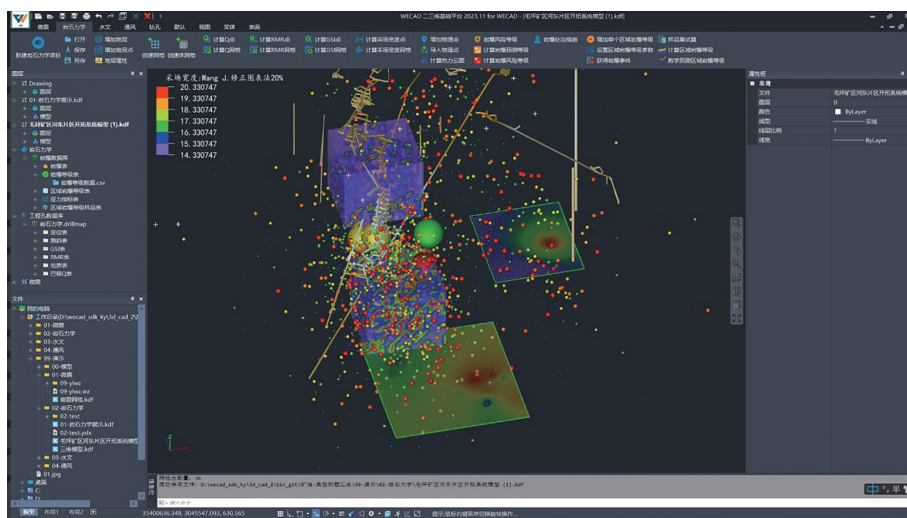


图 17 矿山开采过程数据融合三维可视化分析软件

Fig. 17 3D visualization and analysis software for data fusion in mining process

风险管控理论和技术方面已取得了一些富有成效的成果,但面向更加复杂多变的金属矿深部开采技术条件、开采过程的规模化,仍有许多理论方法有待进

一步改进,有很多问题需要进一步深入研究,充分发挥新质生产力在深部金属矿开采领域的引领作用。

1)基于矿体全生命周期开采活动规划,采取长

远视角提前制定经济、安全、高效的回采总体方案,提出不同开采时期的针对性解决技术措施;平衡矿体回采过程中施工难度增大、工作环境条件劣化以及矿体品位下降等问题,优化资源利用;推动深井矿山无人、少人开采,降低井下作业风险,提高本质安全性,克服深井温度、压力、地层复杂等恶劣条件限制,拓展开采深度极限。

2)开展井下充填无人化建设探索,利用新一代信息技术开展井下充填管网三维可视化自动监测预警和机器人巡管技术的研究,实现危险作业无人化、繁重作业机械化;开展深井充填料浆减压输送的研究,创新研发长距离高落差管道输送工艺技术,采用新材料充填管道提高其服务寿命,降低故障率。

3)全面推行灾害风险动态互馈管理模式,实现深部开采地质与工程三维模型-采掘生产过程-在线监测数据-灾害多场场量的一体化可视化综合管理,动态评估生产过程灾害风险程度,全面提升深部灾害风险管控水平。

4)面向金属矿深部开采面临的多因耦合、多机制地压灾害风险,从战略和战术两个维度,实现深部开采地压灾害风险的源头控制-大尺度区域卸荷-高应力采场尺度卸荷-高应力巷道随掘预处理-局部抗岩爆冲击支护的开采全过程地压灾害风险的有效防控和处治。

5)随着开采深度的延深,地质体在空间上的不均一更加明显,三维空间流场更加典型,基于深井三维水文地质概念模型如何刻画,需开展深井矿山水文地质概念模型构建研究。

6)井下开展工作面注浆或近矿体注浆是封堵导水通道的有效办法,但深井矿山井下注浆普遍存在高水压、强动水、破碎带含泥含砂等注浆难题,传统注浆技术手段、工艺材料很难应对,需要开展钻探技术、注浆工艺、注浆材料、幕体监测评价等体系性研究。

7)水害风险应急处置决策系统仍需不断创新技术,整合地质、水文、气象等多源数据,实现智能化预警和跨部门协作,提高预警平台的整体应用效能。引入新的监测技术和数据处理方法,如人工智能、大数据分析等,提升预警系统的准确性和及时性,更加准确及时地应对地质灾害和水灾风险,提高安全管理水平。

8)随着矿山开采工作的逐步推进,深部矿山开采面临的地压显现、突涌水、通风热害等与生产间的矛盾将进一步凸显,平衡安全与生产之间的矛盾,归根到底需要解决人的问题,大幅减少人员投入,提升单位人员生产效率,必须推进矿山智能化建设,进

一步推进以数据为驱动的智能采矿设计,以矿山装备及业务数据全要素采集为基础的矿山地、采、选全工艺流程智能管控系统建设,从而在解决人员投入、人员效率、人员安全的基础上,达到平衡深井采矿安全与生产间矛盾的目的。

4 结 论

1)创新了考虑地压灾害风险源头控制的矿体全生命周期整体开采规划方法,可为矿山开采的回采方案、回采顺序等设计提供建议。

2)深井矿山开采中充填体可改善开采中地压应力集中现象,提高采场充填体的均质性可间接降低充填体强度需求;下向进路开采铺设钢筋网有利于提高充填体假顶的稳定性;通过建设井下充填管道监测系统可替代人工巡管,兼具监测分析管道运行规律的功能,深井充填中需增设减压装置或增加比摩阻以提高管道输送的满管率。

3)提出了动力灾害风险预评价、动力灾害风险识别与分析、动力灾害风险处治等系列方法与技术,形成了深部高应力强扰动动力灾害风险分级分区控制技术,初步实现了深部金属矿开采动力灾害风险的动态管控。

4)搭建了矿区突涌水预警系统,采用多时空尺度的预测模型和可视化三维技术,实现了突涌水趋势的精准预警和应急响应;提出了精细刻画矿山水文地质结构、系统构建水害预测评价体系、综合防治水技术为主的深井水害综合防控关键技术,为矿山构建安全、可靠、稳定、经济的矿井水综合防控系统提供支持。

5)开发了矿山多源数据融合三维可视化系统,通过对在线数据和离线数据的分类管理、融合分析,实现结果数据共享,进而辅助实现矿山生产过程的安全预警决策和工程设计优化。

6)未来深部金属矿开采领域应重点发展全生命周期开采规划方法、井下智能化装备与技术、智能化充填系统建设、灾害风险动态互馈管理、地压灾害风险有效防治、矿山水文地质概念模型、注浆堵水新材料新工艺、水害风险应急决策系统以及矿山生产智能管控系统等方向,全面提升深部灾害风险管控水平。

参考文献(References):

- [1] WAGNER H. Deep mining: a rock engineering challenge[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(4): 1417-1446.
- [2] 周昌台,谢和平,朱建波.基于能量理论的岩石动态破坏准则[J].岩石力学与工程学报, 2023, 42(8): 1890-1898.

- ZHOU Changtai, XIE Heping, ZHU Jianbo. A dynamic strength criterion of rock materials based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(8): 1890-1898.
- [3] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [4] 刘立顺, 杨小聪, 万串申, 等. 金属矿山深井开采中的力学问题研究进展[J]. 有色金属(矿山部分), 2022, 74(4): 14-18, 25.
- LIU Lishun, YANG Xiaocong, WAN Chuanchuan, et al. Research progress on mechanical problems in deep mining of metal mines[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2022, 74(4): 14-18, 25.
- [5] 唐国星, 郭利杰, 刘光生, 等. 尾砂胶结充填体抗拉强度试验及其影响因素研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(4): 124-131.
- TANG Guoxing, GUO Lijie, LIU Guangsheng, et al. Experimental study on tensile strength of cemented tailings backfill and influencing factors[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(4): 124-131.
- [6] 彭啸鹏, 郭利杰, 杨小聪, 等. 尾砂胶结充填体孔隙水特征探索试验研究[J]. 中国矿业, 2022, 31(3): 106-110.
- PENG Xiaopeng, GUO Lijie, YANG Xiaocong, et al. Experimental study on pore water characteristics of tailings cemented backfill[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(3): 106-110.
- [7] 刘光生, 杨小聪, 郭利杰. 基于采充时序的空场嗣后充填体强度要求优化研究[J]. 有色金属工程, 2019, 9(10): 85-94.
- LIU Guangsheng, YANG Xiaocong, GUO Liji. Optimization research on backfill strength requirement of open stoping with subsequent backfill mining based on excavating and filling sequences[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(10): 85-94.
- [8] 于世波, 杨小聪, 王志修, 等. 深部非爆卸荷帷幕的等效力学作用研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(5): 20-23.
- YU Shibo, YANG Xiaocong, WANG Zhixiu, et al. Study on equivalent mechanical action of non-explosive destressing curtain at depth[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2021, 73(5): 20-23.
- [9] 于世波, 杨小聪, 王志修, 等. 深部高应力矿柱应力隔断帷幕的卸荷效应研究[J]. 金属矿山, 2020(8): 8-12.
- YU Shibo, YANG Xiaocong, WANG Zhixiu, et al. Research on the destress effect of stress curtain to highly-stressed pillar at depth[J]. Metal Mine, 2020(8): 8-12.
- [10] 刘锋, 王昭坤, 马凤山, 等. 矿山深部卸压技术研究现状及展望[J]. 黄金科学技术, 2019, 27(3): 425-432.
- LIU Feng, WANG Zhaokun, MA Fengshan, et al. Current situation and prospect of destressing techniques in deep mine[J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(3): 425-432.
- [11] 吴姗, 杨小聪, 郭利杰. 高应力环境下深部金属矿整体规划的思考与展望[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1432-1436.
- WU Shan, YANG Xiaocong, GUO Lijie. Thinking and prospect of overall planning for deep metal mine in high stress environment[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1432-1436.
- [12] 杨小聪, 郭利杰. 尾矿和废石综合利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [13] 吴爱祥, 王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [14] 陈鑫政, 杨小聪, 郭利杰, 等. 矿山充填智能控制系统设计及工程应用[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 114-120.
- CHEN Xinzhen, YANG Xiaocong, GUO Lijie, et al. Intelligent control system design on mine filling and engineering applications[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 114-120.
- [15] SALAMON M. Rockbursts: prediction and control[M]. London: IMM., 1983.
- [16] YAO M, FORSYTHE A, CHINNASANE D R. De-stress blasting strategy for mining in highly stressed sill pillars at Vale's Sudbury mines: two case studies[C]. Sudbury, Canada: Workplace Safety North's Mining Health and Safety Conference, 2016.
- [17] MORISSETTE P, HADJIGEORGIOU J, PUNKKINEN A R, et al. The influence of change in mining and ground support practice on the frequency and severity of rockbursts[C]. Sudbury, Canada: Deep Mining 2014, 2014.
- [18] 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.
- [19] ZHANG X Y, YAN P, LU W B, et al. Energy release and damage characteristics induced by fracture planes in face destress blasting[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 173(10): 1-15.
- [20] KONICEK P, CHEN T, HANI S M. Numerical modeling of destress blasting for strata separation[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(4): 2238-2249.
- [21] ISAAC V, HANI M, DAMODARA R C, et al. Large-scale destress blasting for seismicity control in hard rock mines: a case study[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(1): 141-149.
- [22] 孙承超, 魏筱乐, 周锐, 等. 基于微震中长期监测的地下开采对地表影响分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 243-247, 262.
- SUN Chengchao, WEI Xiaole, ZHOU Rui, et al. Impact analysis of underground mining on surface based on long-term monitoring of microseismic[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(S1): 243-247, 262.
- [23] 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 mining disasters in deep metal mines[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(8): 2522-2538.
- [24] 王贺, 陈何, 曹辉. 我国大变形锚杆研究现状及发展趋势[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(1): 112-123.
- WANG He, CHEN He, CAO Hui. Research status and trends of large deformation rock bolts in China[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(1): 112-123.
- [25] 杜久华, 刘海波, 高新雨, 等. 深部金矿岩爆倾向性分析与防控支护设计研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 404-408.
- DU Jiuhua, LIU Haibo, GAO Xinyu, et al. Research on rockburst tendency analysis and control support design of deep gold mine[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(S1): 404-408.
- [26] 陈歌, 孙亚军, 徐智敏, 等. 微震监测技术在矿井水害防治中的研究进展[J]. 金属矿山, 2019(1): 7-15.

- CHEN Ge, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Study progress for micro-seism monitoring technique on the predication and control in mine water disaster[J]. *Metal Mine*, 2019(1): 7-15.
- [27] 乔伟,靳德武,王皓,等.基于云服务的煤矿水害监测大数据智能预警平台构建[J].*煤炭学报*, 2020, 45(7): 2619-2627.
- QIAO Wei, JIN Dewu, WANG Hao, et al. Development of big data intelligent early warning platform for coal mine water hazard monitoring based on cloud service[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2619-2627.
- [28] 鲁晶津,王冰纯,颜羽.矿井电法在煤层采动破坏和水害监测中的应用进展[J].*煤炭科学技术*, 2019, 47(3): 18-26.
- LU Jingjin, WANG Bingchun, YAN Yu. Advances of mine electrical resistivity method applied in coal seam mining destruction and water inrush monitoring[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3): 18-26.
- [29] 谢世平,杨柱,罗舸旋子.金属矿山水害监测预警研究现状与展望[J].*现代矿业*, 2023, 39(1): 10-13.
- XIE Shiping, YANG Zhu, LUO Gexuanzi. Research status and prospect of water disaster monitoring and early warning in metal mines[J]. *Modern Mining*, 2023, 39(1): 10-13.
- [30] 霍亚军.矿井水害防治技术研究进展分析[J].*能源与节能*, 2020(2): 111-112.
- HUO Yajun. Analysis on research progress of mine water disaster prevention technology[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2020(2): 111-112.
- [31] 孙帮涛.滇东北岩溶大水深部矿山突水危险性评价研究[J].*中国矿业*, 2023, 32(S1): 440-446.
- SUN Bangtao. Study on the risk assessment of water inrush of karst deep mines in Northeast Yunnan, China[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(S1): 440-446.
- [32] 李鑫,孙亚军,徐智敏,等.矿山采动突水危险源划分与致灾危险性评价研究[J].*煤炭工程*, 2023, 55(9): 108-115.
- LI Xin, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Water sources classification and inrush hazard assessment approach in coal mining[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(9): 108-115.
- [33] 韩颖,李向威,闫志佳.我国高温矿井热害防治技术研究进展及展望[J].*煤炭技术*, 2023, 42(10): 186-189.
- HAN Ying, LI Xiangwei, YAN Zhijia. Research progress and prospect of heat damage prevention technology in high temperature mines in China[J]. *Coal Technology*, 2023, 42(10): 186-189.
- [34] 刘艳红.超深井多源信息集成与安全管控平台应用研究[J].*矿业研究与开发*, 2022, 42(1): 181-186.
- LIU Yanhong. Application research on integrated platform of multi-source information integration and security management for ultra deep well[J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(1): 181-186.
- [35] DADASHZADEH N, MOREAU V, KALENCHUK L. Delineation of hazard-based design events for dynamic support system analysis[C]. Perth, Australian: Ground Support 2023: Proceedings of the 10th International Conference on Ground Support in Mining, 2023.
- [36] 徐晓冬,朱万成,张鹏海,等.金属矿山采动灾害监测预警云平台搭建与初步应用[J].*金属矿山*, 2021(4): 160-171.
- XU Xiaodong, ZHU Wancheng, ZHANG Penghai, et al. Construction and preliminary application of cloud platform for monitoring and early warning of mining disasters in metal mines[J]. *Metal Mine*, 2021(4): 160-171.
- [37] 孙承超,罗磊,梁燕兵.下向水平分层进路胶结充填采矿法在毛坪铅锌矿的应用[J].*中国矿业*, 2023, 32(S1): 382-385, 397.
- SUN Chengchao, LUO Lei, LIANG Yanbing. Application of downward horizontal layered drift cementing and filling mining method in Maoping Lead Zinc Mine[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(S1): 382-385, 397.
- [38] 王劼,杨超,张军,等.膏体充填管道输送阻力损失计算方法[J].*金属矿山*, 2010(12): 33-36.
- WANG Jie, YANG Chao, ZHANG Jun, et al. Calculation method of the resistance loss in pipeline transportation of paste filling slurry[J]. *Metal Mine*, 2010(12): 33-36.