

深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术

秦秀山^{1,5}, 陈何^{1,5}, 刘建坡², 曾宪涛³, 詹光⁴

- (1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 沈阳 110819;
3. 金诚信矿业管理股份有限公司, 北京 100089;
4. 中国有色矿业集团有限公司, 北京 100029;
5. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628)

摘要: 针对深井开采中高应力、强扰动、难调控等行业共性难题, 开展深部大矿段采动地压动态调控技术研究。通过研发基于正演数值模拟和反演定位补偿的高精度微震定位技术、适用深井高温条件的智能化分布式微震监测装备以及高能量吸收支护系统, 建立深部金属矿床开采过程应力转移与开采工艺参数的相关性关系模型、动力灾害安全定量预警方法, 进而实现采动地压动态调控。深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术研究实现了基于开采环境模型-多源实测数据感知-分析与反分析判别-开采工艺调整-地压实测反馈的深井开采地压动态调控新模式, 提高了矿山本质安全, 可为深部规模化开采地压控制提供技术保障。

关键词: 深部大矿段开采; 采动环境监测; 地压动态调控; 多维数据融合; 一体化平台

文章编号: 1004-0609(2022)-12-3871-12

中图分类号: TD324

文献标志码: A

引文格式: 秦秀山, 陈何, 刘建坡, 等. 深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3871-3882. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-42976

QIN Xiu-shan, CHEN He, LIU Jian-po, et al. Mining environment monitoring and dynamic control technology of ground pressure in deep large ore sections[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3871-3882. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-42976

随着浅部资源日益枯竭, 矿产资源开发走向深部已成必然。我国未来十年将有超过30%的金属矿山进入千米采深, 深部开采已成为金属矿山资源开发的新常态。随着开采深度的增加, 在高地应力与频繁开采扰动下, 采场及巷道发生大面积冒顶、两帮坍塌、支护结构破坏等地压问题日益突出, 给矿山带来重大安全隐患, 严重威胁井下人员生命安全。

深部金属矿存在如下典型特征^[1-4]: 1) 高应力条件突出且分布复杂。随采深增加, 垂向应力和构造应力均显著增大, 多数深采矿山呈现以水平应力为主的三向不等压空间应力场^[5-7], 且经多次开采扰动后空间分布状态复杂。2) 开采范围大、井巷工程分布复杂。一般来说, 深部金属矿山井巷工程累积延伸长度可达数千米, 呈垂直上千米、水平数千米的空间立体型复杂交错布置。开采位置分布广,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602904)

收稿日期: 2022-03-02; 修订日期: 2022-04-01

通信作者: 陈何, 教授级高工, 博士; 电话: 13621381054; E-mail: chen_h@bgrimm.com

数十个甚至更多的采场在不同中段同时开采作业。

3) 开采规模大、开采扰动强。由于提升、运输、充填等开采过程成本高, 新建深井矿山为保证开采经济性, 在设计开采方法时往往以规模换效益, 开采规模显著增大。大规模开采所普遍采用的深孔、中深孔爆破单次最大药量可达数吨, 其带来的开采强卸荷、爆破强扰动且叠加效应更加显著。

鉴于地质条件、开采系统和开采过程的复杂性, 深部金属矿井巷地压显现形式相对于线性结构的隧道工程和层状结构的煤矿更具复杂性, 呈现大范围开采区域内的空间分散性和时间随机性。在高应力环境下, 不同频率、强度、位置的开采扰动作用会使围岩的稳定性更脆弱, 导致支护措施失效、巷道失稳坍塌, 甚至诱发突发性的、无前兆的破坏性动力型灾害。

深井开采的地压控制成为重要的采矿工程问题, 国内外进行了大量的技术方案改进的设计与实践^[8-10]。由于深部矿山开采环境复杂、岩体内部信息不确定, 采用传统模拟、点监测、类比等方法难

以准确获取采动应力场、位移场、能量场等地压变化特征, 因此, 亟需研发基于多源监测系统的地压动态调控方法、技术与装置, 开展深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术研究, 主要技术路线如图1所示。

根据图1所示技术路线, 深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术研究主要技术内容包括如下几个方面:

1) 通过研发智能化分布式微震监测装备、基于高精度微震定位技术的采动环境多源感知系统, 提高微震监测系统的精度, 并结合工程岩体动力危险区划分析, 及时准确的掌握采动区域地压活动变化规律特征。

2) 通过研发基于多源监测数据的深部开采过程应力场反演技术, 建立深部规模化开采典型开采顺序和开采区域的动力灾变模型及判别准则, 形成深部大矿段开采诱发动力灾变准则及安全定量预警技术。

3) 通过研发高能量吸收支护材料及装置, 形成

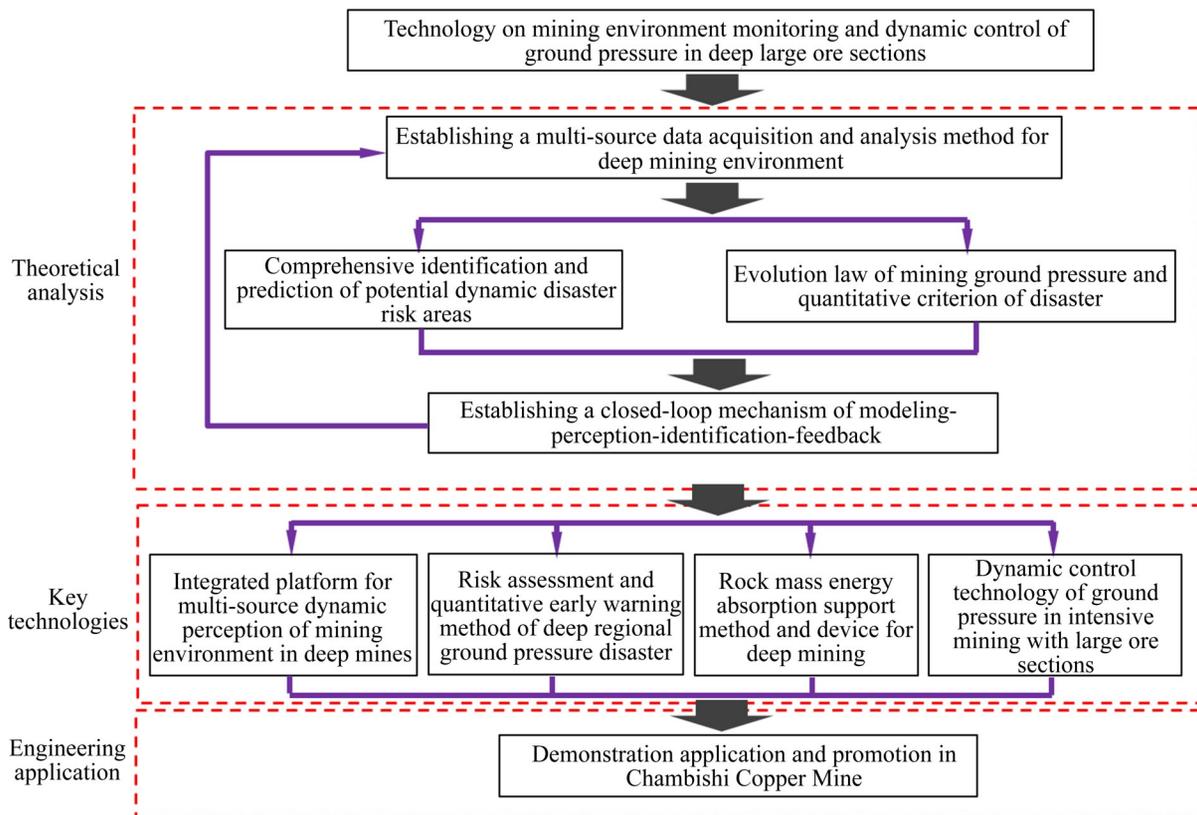


图1 深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术路线图

Fig. 1 Technology roadmap for mining environment monitoring and dynamic control technology of ground pressure in deep large ore sections

一套深部井巷高强度能量吸采过程应力转移与开采工艺参数的相关性关系模型, 实现深部规模化开采采动环境地压的动态调控。

4) 从地压控制方面创新深部金属矿床开采理论与技术, 建立深部采动环境多源数据采集、分析方法, 综合识别、预测潜在动力灾害危险区, 揭示采动地压演化规律及灾变定量化判别准则, 建立模型-感知-判别-反馈的闭环机制, 解决深部大矿段集约化采场的地压动态调控问题, 为深部规模化开采提供技术保障。

1 深部矿山采动环境多源动态感知一体化平台

研发基于正演数值模拟和反演定位补偿的高精度微震定位技术、适用于高温条件的智能化分布式微震监测传感装置, 建立集岩体区域微震监测、岩体深部应力监测、岩体深部及表面位移监测于一体的采动环境多源动态感知系统, 实现深部开采环境动态变化的量化表达, 构建多源监测信息的一体化平台。

1) 针对当前微震监测技术普遍存在的定位精度一致性差、动态修正难度大等难题, 通过研发深部复杂矿岩环境微震信号噪声压制技术、微震震相自动识别及到时自动拾取技术、基于正演数值模拟和反演定位补偿的高精度微震定位技术, 形成矿山高

精度微震定位技术及设备。采用阵列结构检波器设计、检波器布设方式优化、滤噪和阻抗匹配电路、高防护传感器封装结构, 研制适用于深部高温条件的智能化分布式微震监测传感装置, 克服现有微震监测系统的应用壁垒^[11], 高灵敏度传感器阵列技术如图 2 所示。

2) 针对大矿段集约化开采地压动态调控技术特点, 开展多源三维异质模型与多源监测信息的融合处理与分析信息技术研究, 结合矿山开采过程的三维模型数据、生产系统数据、实时监测数据, 通过开采过程中的多源信息三维可视化技术研究, 模拟和表征矿床地质体结构特征的地理信息。将多源多场信息数据与三维模型进行映射关联, 建立基于矿山地质信息、采掘工程、岩体质量、数值计算以及地应力、监测信息等多参数耦合的三维数字化、可视化模型^[12], 构建矿山全生命周期的深部岩体力学环境的立体可视化和动态模拟的过程。通过建立集微震、应力、位移等监测信息于一体的采动环境多源动态感知系统, 实现深部开采环境动态变化的量化表达。采用模块化设计方法, 进行分析、归纳和抽象, 构建动实时动态计算与并行交互分析、风险数据挖掘与安全态势预判、时空规律反演与工程设计优化的多源多场信息融合的地压监测一体化综合管控平台。

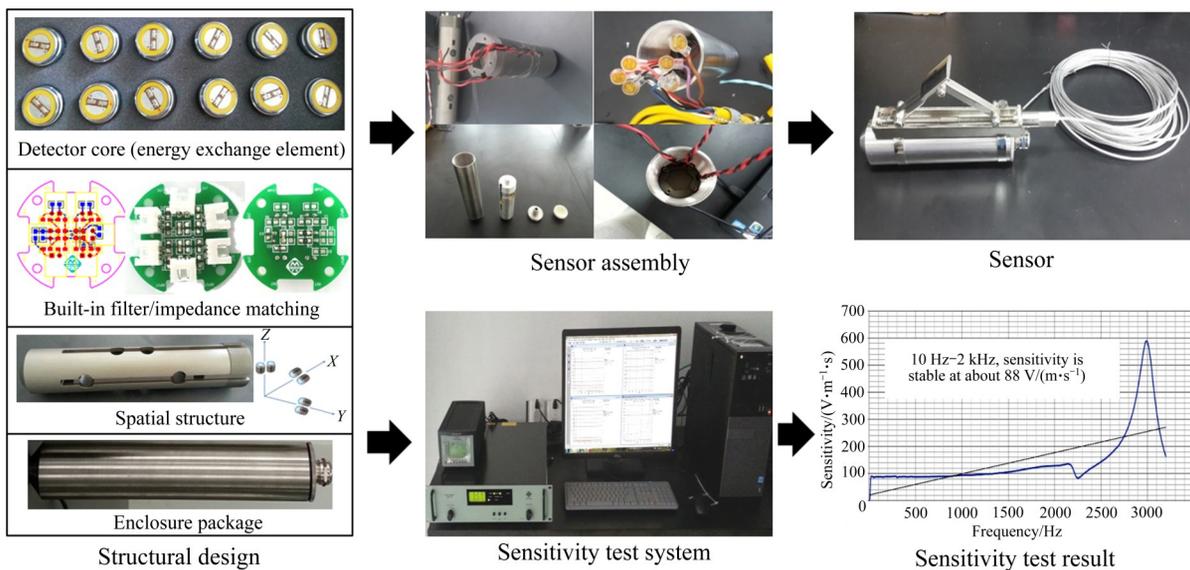


图 2 高灵敏度传感器阵列技术
Fig. 2 High sensitivity sensor array technology

2 深部区域性地压灾害风险评估与定量预警方法

基于深部金属矿山采动过程中的多源监测信息融合统计分析及采动地压规律模拟分析,研发开采扰动围岩内部应力场反演算法,揭示深部规模化开采强卸荷作用下岩体应力释放、迁移和重新分布的时空演化规律,获得开采后岩体应力集中区域和释放区域的准确区划,建立深部大矿段开采不同回采顺序和开采区域的动力灾变模型及判别准则,提出了基于模糊综合评价和云模型的大范围地压灾害发生风险定量评估方法。

1) 通过开展深部区域岩体工程地质调查、开采区域地应力分布测试、深部矿岩物理力学性质测试,掌握开采区域工程地质及应力环境特征,建立三维可视化岩体质量分类评价模型及工程地质力学模型,分析不同回采方案下围岩应力场、位移场变化转移规律及采动地压活动特征,实现潜在动力灾害危险区区划。探明地应力及开采扰动围岩内部应

力场,确定深部大矿段岩体力学特征,对于巷道围岩稳定性分析和支护参数选取具有重要意义,有助于开采方案设计的科学化、合理化。深井地应力现场测试工作及数据分析如图3所示。

2) 基于岩石破裂声发射试验、爆破扰动下的巷道稳定性监测和采场开采过程围岩稳定性监测,研究构建岩石、巷道围岩、整体采场三种尺度岩石(体)在扰动后微震速率衰减特征模型,揭示深部开采扰动围岩损伤规律,建立稳定性评估准则。基于微震应力场和变形场时空分布差异性特征,融合微震监测数据,实现深部开采大范围不同类型地压灾害危险区域识别^[13]。采场冒落前后应力场和变形场演化差异性特征分析如图4所示。

3) 综合考虑微震监测数据、地质赋存条件、开采扰动因素构建深部区域性井巷地压灾害评价指标体系。权重分析表明,微震参数指标具有主导作用,权重占比超过70%。建立了基于模糊综合评价和云模型的大范围地压灾害发生风险定量评估方法^[14]。基于不同破坏等级隶属度分布的数学期望,采用归一化的方式对破坏等级进行客观赋值,降低

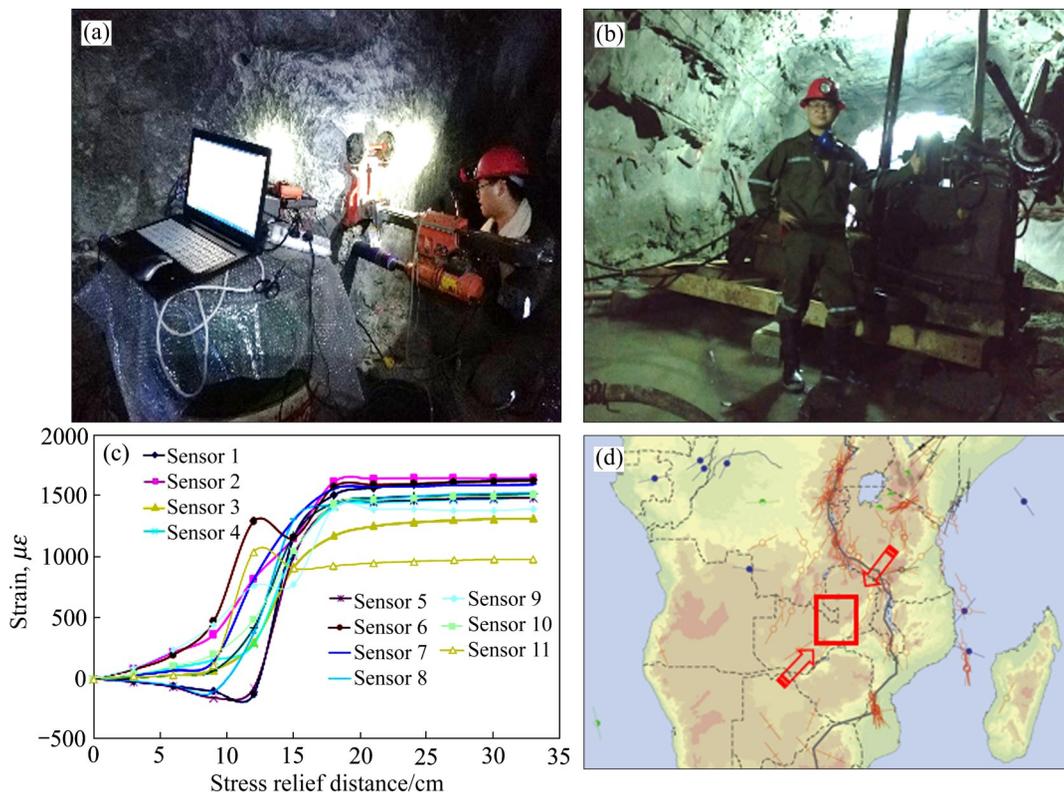


图3 深井地应力测试工作及数据分析

Fig. 3 Deep mine in-situ stress test and data analysis: (a) Stress relief test preparation; (b) Stress relief drilling; (c) Strain with stress release distance curves; (d) Trend of maximum horizontal principal stress

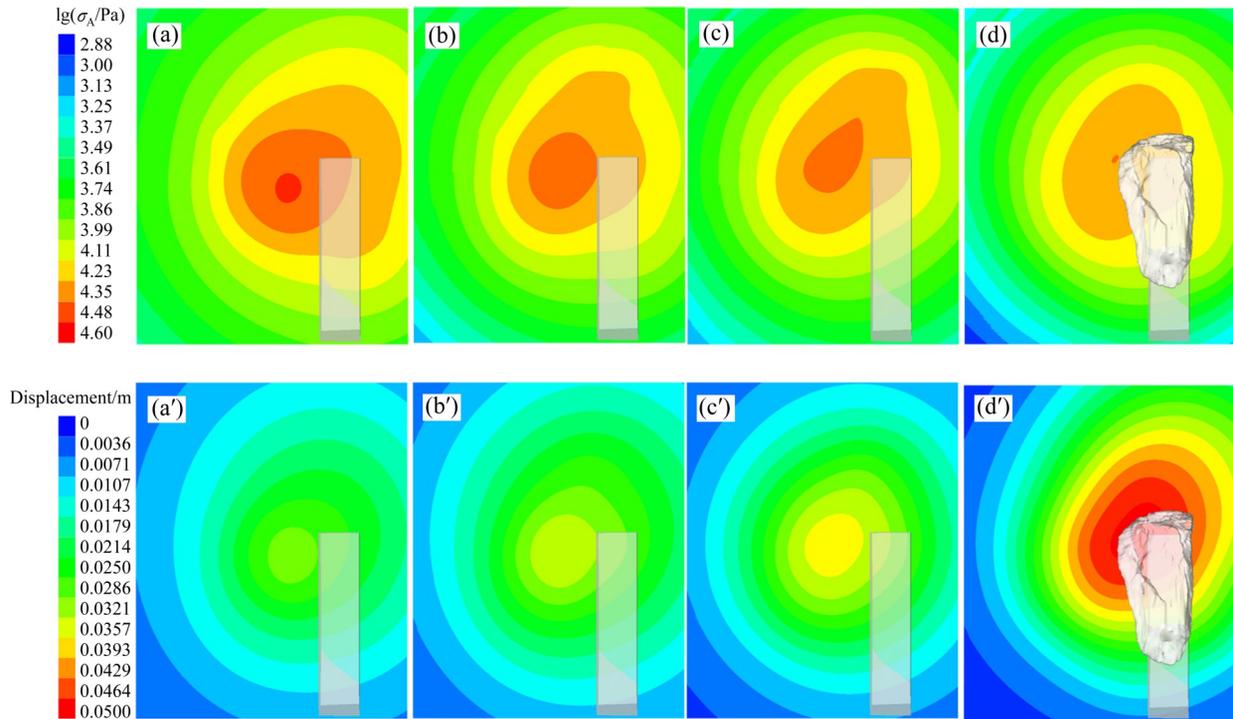


图4 2020年采场冒落前后应力场和变形场演化差异性特征分析

Fig. 4 Evolution difference characteristics analysis of stress field and deformation field before and after stope caving in 2020: (a)–(d) $\lg\sigma_A$ at different periods; (a')–(d') Displacement at different periods; (a), (a') Apr. 7–Apr. 11; (b), (b') Apr. 9–Apr. 13; (c), (c') Apr. 11–Apr. 15; (d), (d') Apr. 13–Apr. 17

了各破坏等级综合评价值的波动幅度。采用“最大隶属原则+综合评价”相结合的方法可以提升评估模型5%以上的准确率。深部区域性地压灾害发生风险评价指标体系及评估流程如图5所示。

评估模型分类性能表明, 基于AHP-属性相似法的中间型模糊综合评价模型分类性能最优, 地压灾害破坏等级评估准确率超过90%。深部开采区域性地压灾害发生风险定量评估方法的建立, 转变了目前普遍采用的“局部性”巷道围岩破坏风险评估研究模式, 可以满足金属矿山区区域性地压灾害防控与系统性开采过程优化调控的需要。

3 深井岩体能量吸收支护方法及装置

当深埋岩体处在高应力、强卸荷和外在爆破扰动的复杂应力状态下, 易发生岩爆等冲击灾害, 形成冲击应力波。针对深井开采动力灾害特点, 发明了适应深部岩爆控制和大变形的高韧性新型喷浆支

护材料、基于岩爆演化过程控制的削波吸能支护锚杆、高强度拉力分散型能量吸收锚杆、短行程岩体让压单体支柱等能量吸收支护材料及装置, 如图6所示。建立能量吸收锚杆与巷道围岩耦合作用关系力学模型^[5], 构建高强度复合支护结构, 建立矿山分区分级支护体系, 提高了支护效率与动力灾害防控水平。

高韧性新型喷浆支护材料比普通纤维混凝土材料抗拉强度提高28%; 削波锚杆较普通锚杆对爆破冲击波的削波能力平均提高30%, 韧性得到明显改善, 抗开裂性能更佳。在爆破振动波作用下, 削波锚杆较普通锚杆在不同方向的削波能力平均提高30%, 最高可以提高70%。拉力分散型能量吸收锚杆可实现恒定吸能阻力150 kN, 恒定刚性变形长度能够达到500 mm; 让压型单体支柱额定承载力大于450 kN, 极限承载力可达1000 kN。吸能支护和常规支护工程应用效果对比如图7所示, 高能量吸收支护材料和装置的技术参数指标达到行业领先水平。

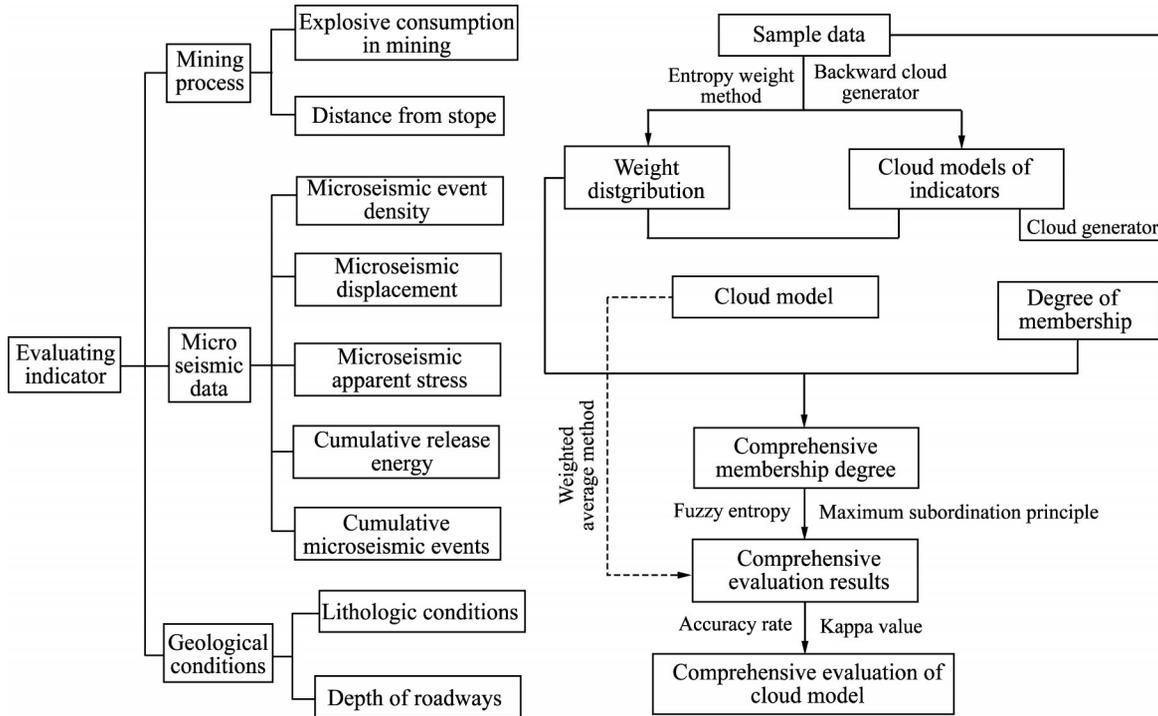


图5 深部区域性地压灾害发生风险评价指标体系及评估流程

Fig. 5 Risk evaluation index system and evaluation process of deep regional ground pressure disaster

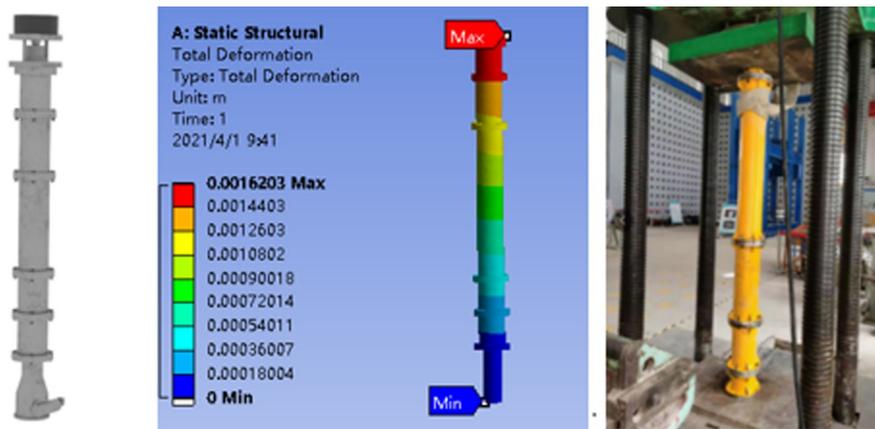


图6 高能量吸收支护装置研发

Fig. 6 Research and development of high energy absorption support device

4 大矿段集约化开采地压动态调控技术

建立了“基于开采环境模型-多源实测数据感知-分析与反分析判别-开采工艺调整-地压实测反馈”的深井开采地压动态调控新技术。通过控制回采速率、回采方向、充填体强度、充填速率、切缝释压等工程技术方法，动态调控大矿段采场地应力能量的释放强度，形成复合应力免压拱地压控制的

大矿段采矿新模式，降低了地压灾害发生风险。

1) 基于广义开尔文模型构建深部开采扰动能量场演化理论模型，提出一种采动围岩扰动能量场定量化计算方法，揭示围岩开挖过程能量的积聚、传递与转化规律，建立了深部开采采动地压动态调控的理论基础。假定巷道截面为圆形，岩体开挖前为均质、连续和各向同性的弹性体，仅考虑岩体弹性或粘弹性状态。且沿巷道掘进方向不产生变形，视为平面问题。在深部三维地应力场环境中，一个主应力方向与巷道掘进方向相同，随着岩体开挖而完



图7 吸能支护和常规支护工程应用效果对比

Fig. 7 Application effect comparison between energy absorbing support and conventional support

全释放, 因此, 地应力场可简化为无穷远处的主应力 σ 和 $\lambda\sigma$, 其中 λ 为应力比系数, 地应力假定计算模型如图8所示。深部岩体开挖过程中, 开挖面上径向卸荷会导致围岩应变能积聚。开挖面附近应变能积聚主要由远场岩体对开挖面附近岩体做功引起, 而且越靠近开挖面应变能聚集程度越高。围岩弹性应变能和储能极限在距临空面不远处相交, 说明只有在围岩近区内储存弹性能量会超过储能极限, 发生能量释放现象。距临空面距离增加, 能量释放系数快速减小, 表明越靠近临空面, 围岩内积聚弹性能量释放越彻底。在围岩近区, 聚集有较高的可释放弹性应变能即剩余弹性, 其随距临空面距离增加表现出先增加后减少的趋势分布。

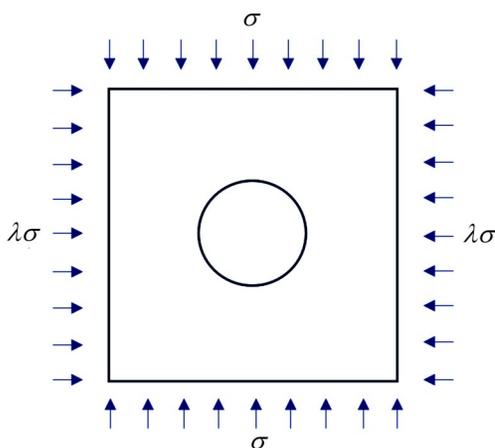


图8 地应力假定计算模型

Fig. 8 Assumed calculation model of in-situ stress

采用温克尔弹性地基梁模型, 分析充填体矿柱刚度对压力分布的影响, 揭示充填体矿柱支撑作用下围岩及矿柱压力分布规律^[6]、充填体刚度特性对采场顶板地压的控制特征, 为采场地压动态调控方案制定提供支撑, 如图9所示。首先考虑将待采区域全部由充填体回填, 采用温克尔弹性地基梁模型计算此时边界围岩与充填体内压力分布理论解析解, 其后将矿房内的充填体移除, 同时对顶板梁施加与原充填体中支撑荷载大小相等、方向相反的荷载, 并通过静力平衡分析, 将该荷载再次重新分配至矿柱及原岩内, 求得最终的压力分布特征方程。

2) 在深井高应力条件下, 原岩应力值接近或超过岩石强度, 在围岩应力释放区应增加工作面稳定性。采场顶板位移和受力与采场支撑强度相关^[7], 适当的采场支撑强度有利于在采场工作面形成应力卸压区。由能量释放原理, 初始开挖较小的空间, 形成局部较强支撑和应力释放; 再整体从一端向另一端连续推进回采。开挖区内形成不同应力水平的卸压区, 采场顶板位于强应力释放拱范围内。通过建立基于时间和空间的采动地压动态调控体系, 融合多源监测数据的连续采集分析, 动态更新深部开采环境模型, 形成地压环境变化反馈机制, 通过调整深部开采工程技术方法, 动态调控大矿段采场地应力能量释放强度, 构建地压环境变化实时反馈调控机制, 如图10所示。

3) 针对深井开采高地应力, 传统方法受多次采

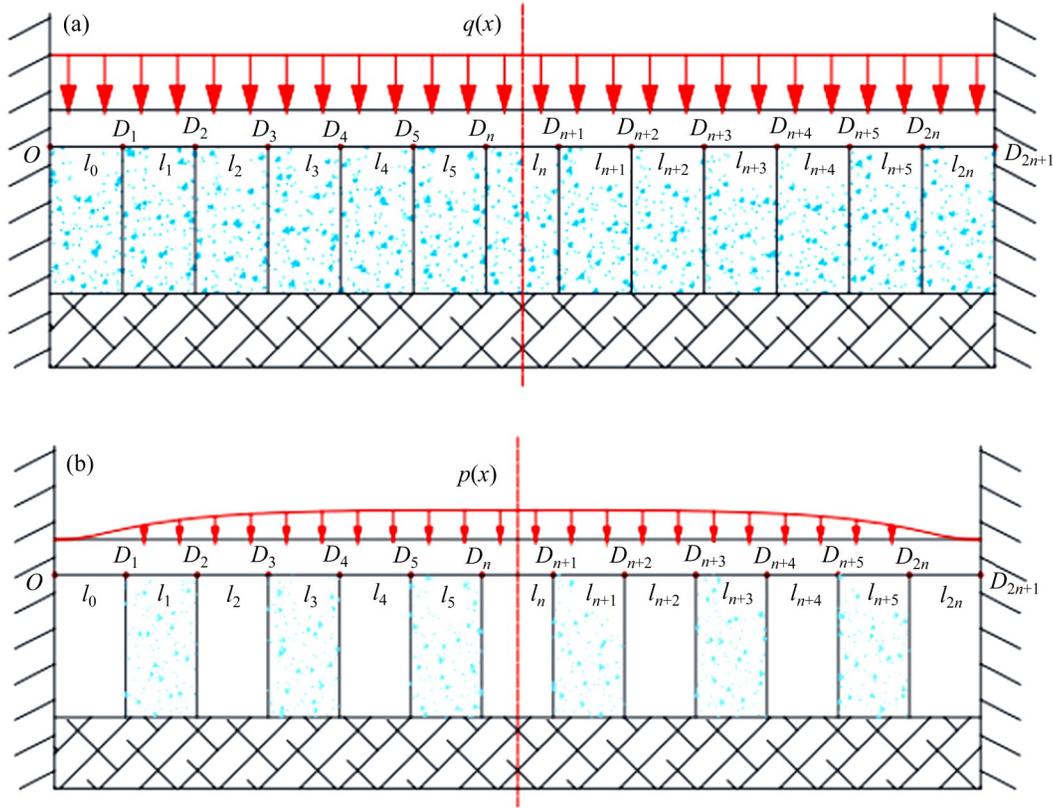


图 9 充填体矿柱刚度对压力分布的影响规律模型

Fig. 9 Influence law model of pillar stiffness of filling body on pressure distribution: (a) Winkler elastic foundation beam model; (b) Static equilibrium analysis

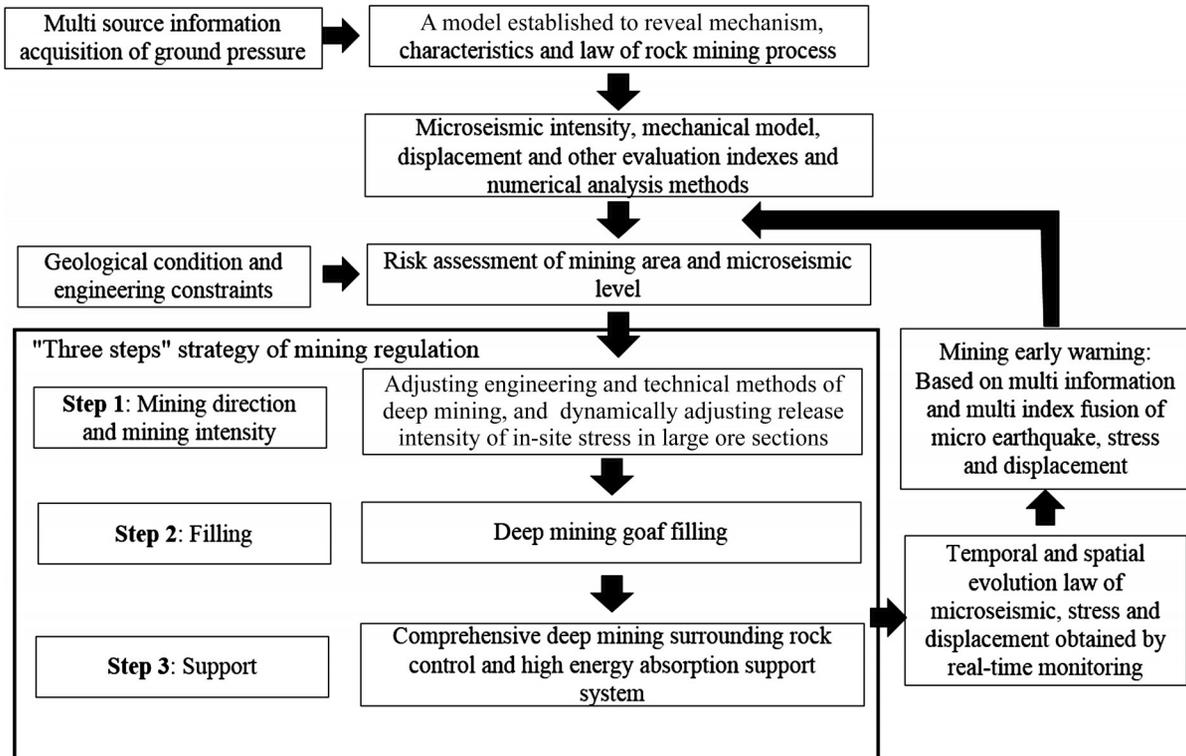


图 10 大矿段集约化开采地压动态调控流程

Fig. 10 Dynamic regulation process of ground pressure in intensive mining of large ore block

动影响, 采场稳定性差。一般卸荷方法存在实施工程量较大、工艺复杂、开采效率低、地压控制难等问题, 为此, 本文作者发明了一种大矿段充填采矿方法。

矿段两端的间柱为原生矿柱, 对顶板起强支撑作用。在回采大采场时, 将在上部围岩中形成复合卸压拱。矿段两侧间柱的强支撑及矿段中央高强度充填体、次级采场充填体、两端采场充填体的支撑相协调, 将上部的地应力转移至矿段两侧的间柱上。中央充填体矿柱、次级采场充填体矿柱仅承受卸压拱内矿岩的重力。矿段两侧间柱的强支撑形成较大的卸压拱、大采场上部围岩中形成较小的卸压拱, 矿段内形成复合卸压应力拱结构^[18], 如图 11 所示。

该方法利用充填体与围岩支撑能力(弹性模量)

的匹配与协同, 实现在复合应力免压拱下的大矿段开采, 可有效控制地压, 提高开采的效率与安全性。以矿段为生产单元, 替代传统的矿块生产单元, 可加大回采采场尺寸 30%~50%; 矿段内生产作业集中, 生产能力可提高 40%~50%, 实现规模化采矿。

5 相关技术指标先进性

深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术研究形成的主要技术指标与国内外现有技术指标对比见表 1。

深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术在赞比亚谦比希铜矿、我国广西珊瑚矿和新疆阿舍

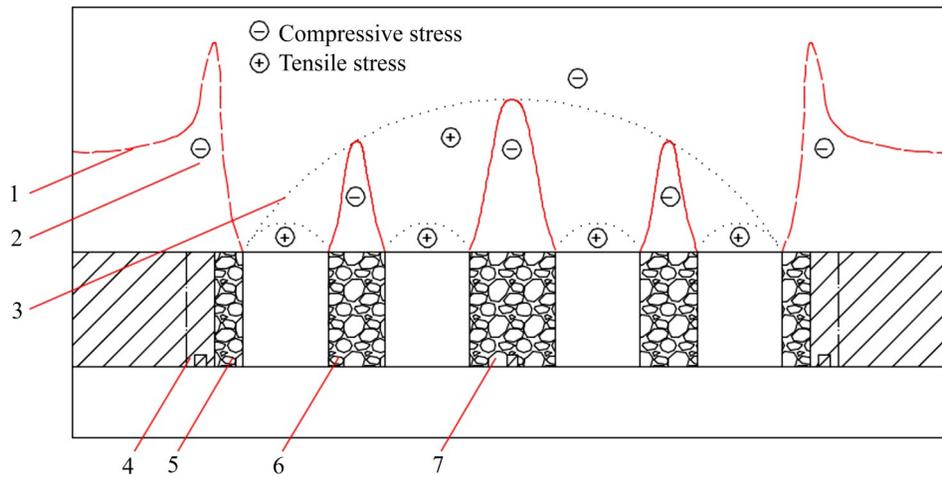


图 11 复合卸压应力拱条件下的大矿段开采^[18]

Fig. 11 Mining of large ore section under compound pressure relief stress arch^[18]: 1—Stress distribution curve; 2—Tensile stress and compressive stress; 3—Stress arch; 4—Inter column; 5—Pillar of filling body at side of ore section; 6—Secondary stope filling pillar; 7—Central stope filling pillar

表 1 国内外相关技术指标对比

Table 1 Comparison of relevant technical indicators at home and abroad

Comparison content	Existing technical indicators at home and abroad	Technical indicator of project
Mine microseismic positioning error	6.5% AHD	≤2.84% AHD
Constant energy absorption resistance of energy absorption bolt	20–100 kN	≥150 kN
Deformation range of energy absorbing bolt	75–400 mm	≥500 mm
Bearing capacity of hydraulic prop	250–350 kN	≥450 kN
Quantitative early warning method of ground pressure disaster safety	Mostly qualitative early warning	Realize quantitative early warning of ground pressure

勒铜矿等矿山成功进行了示范与应用。通过建设高精度微震监测、监测数据综合分析、深部巷道围岩破坏风险预测、动力灾害定量预警方法等一体化系统平台,实现了深部巷道围岩破坏风险预测和动力灾害定量预警。

深部大矿段采动环境监测及地压动态调控技术研发克服了深井开采中高应力、强扰动、难调控等行业共性难题,实现了基于开采环境模型-多源实测数据感知-分析与反分析判别-开采工艺调整-地压实测反馈的深井开采地压动态调控新模式,提高了矿山本质安全。相关技术成果在谦比希铜矿进行了示范应用,在我国广西珊瑚矿、新疆阿舍勒铜矿等矿山进行推广应用,使矿山在地压安全可控基础上实现大规模开采,经济和社会效益显著。

6 结论

1) 研发了适应深部高温条件的智能化分布式高精度微震监测传感装置和深部矿山采动环境多源动态感知一体化平台。

2) 建立了基于多源信息融合的深部区域性井巷地压灾害评价指标体系,提出了基于模糊综合评价和云模型的大范围地压灾害发生风险定量评估方法。

3) 发明了适应深部岩爆控制和大变形的喷浆材料和吸能锚杆、让压型单体支柱等能量吸收支护装置,提高了支护效率与动力灾害防控水平。

4) 首创了“基于开采环境模型-多源实测数据感知-分析与反分析判别-开采工艺调整-地压实测反馈”的深井开采地压动态调控新技术及复合应力免压拱地压控制的大矿段采矿新模式。

REFERENCES

- [1] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [2] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004, 25(1): 18-22.
- GU De-sheng. The development tendency of mining science and technology of underground metal mine[J]. Gold, 2004, 25(1): 18-22.
- [3] 蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417-426.
CAI Mei-feng, XUE Ding-long, REN Fen-hua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.
- [4] 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 Xi-bing, ZHOU Jian, WANG Shao-feng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [5] 谢和平. “深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 1-16.
XIE He-ping. Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 1-16.
- [6] 杜良平. 终南山隧道大直径深竖井围岩稳定性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
DU Liang-ping. Surrounding rock stability study of ZhongNanShan large section and deep shaft[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [7] 李夕兵, 姚金蕊, 宫凤强. 硬岩金属矿山深部开采中的动力学问题[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2551-2563.
LI Xi-bing, YAO Jin-rui, GONG Feng-qiang. Dynamic problems in deep exploitation of hard rock metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2551-2563.
- [8] 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 Shi-bo, YANG Xiao-cong, 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.
- [9] 杨承祥, 罗周全, 唐礼忠. 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 818-824.
YANG Cheng-xiang, LUO Zhou-quan, TANG Li-zhong. STUDY on rule of geostatic activity based on microseismic monitoring technique in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 818-824.
- [10] 唐绍辉, 潘懿, 黄英华, 等. 深井矿山地压灾害微震监测技

- 术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3597-3603.
- TANG Shao-hui, PAN Yi, HUANG Ying-hua, et al. Application research of micro-seismic monitoring technology to geostress hazards in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3597-3603.
- [11] 冀虎, 张达, 乔莎. 基于 CompactRIO 的矿山岩体动力灾害多参数采集系统的设计与实现[J]. 有色金属(矿山部分), 2018(4): 1-5.
- JI Hu, ZHANG Da, QIAO Sha. Design and implementation of multi-parameter acquisition system for mine rock mass dynamic disaster based on compactRIO[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2018(4): 1-5.
- [12] 王国法, 任怀伟, 庞义辉, 等. 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 1-27.
- WANG Guo-fa, REN Huai-wei, PANG Yi-hui, et al. Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 1-27.
- [13] LIU Jian-po, XU Shi-da, LI Yuan-hui. Analysis of rock mass stability according to power-law attenuation characteristics of acoustic emission and microseismic activities[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 303-312.
- [14] LIU Jian-po, LI Yuan-hui, XU Shi-da. Relationship between microseismic activities and mining parameters during deep mining process[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 159: 814-823.
- [15] 张宇. 深部巷道蠕变大变形失稳机理与控制技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- ZHANG Yu. Research on creep large deformation instability mechanism and control technology of deep roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [16] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922-928.
- LI Xi-bing, LI Di-yuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 922-928.
- [17] QIN X S, CAO H, GUO L J. Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in deep stope of underground salt mine[C]// 2020 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol, UK: IOP Publishing, 2020: 022002.
- [18] 陈何, 秦秀山, 王贺, 等. 采矿方法: 中国, ZL202111267227.9[P]. 2022-01-25.
- CHEN He, QIN Xiu-shan, WANG He, et al. Mining Method: China, ZL202111267227.9[P]. 2022-01-25.

Mining environment monitoring and dynamic control technology of ground pressure in deep large ore sections

QIN Xiu-shan^{1,5}, CHEN He^{1,5}, LIU Jian-po², ZENG Xian-tao³, ZHAN Guang⁴

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. JCHX Mining Management Co., Ltd., Beijing 100089, China;

4. China Nonferrous Metal Mining (Group) Co., Ltd., Beijing 100029, China;

5. National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China)

Abstract: Aiming at the common problems, such as high stress, strong disturbance and difficult regulation in deep mining, the research on the dynamic regulation technology of mining ground pressure in deep large ore sections was carried out. By developing high-precision microseismic positioning technology based on forward numerical simulation and inversion positioning compensation, the intelligent distributed microseismic monitoring equipment suitable for deep well high temperature conditions and high-energy absorption support system, the correlation models between stress transfer and mining process parameters in the mining process of deep metal deposits and the quantitative early warning method of dynamic disaster safety were established, so as to realize the dynamic regulation of mining environmental ground pressure in deep large ore section. Research on mining environment monitoring and dynamic regulation technology of ground pressure in deep large ore section achieves a new mode of dynamic regulation of ground pressure in deep mining based on mining environment model-perception of multi-source measured data-analysis and back analysis discrimination-mining process adjustment-ground pressure measured feedback, which improves the intrinsic safety of the mine and provides technical guarantee for ground pressure control in deep large-scale mining.

Key words: mining in deep large ore sections; mining environment monitoring; dynamic regulation of ground pressure; multidimensional data fusion; integration platform

Foundation item: Project(2017YFC0602904) supported by the National Key Research and Development Program of China

Received date: 2022-03-02; **Accepted date:** 2022-04-01

Corresponding author: CHEN He; Tel: +86-13621381054; E-mail: chen_h@bgrimm.com

(编辑 李艳红)