



深部硬岩靶向精准诱变改性非爆机械连续开采理论与技术

王少锋 石利伟 石鑫垒 杜坤 周子龙

Theory and technologies for targeted precision-induced modification in non-explosive mechanized continuous mining of deep hard rock

WANG Shaofeng, SHI Liwei, SHI Xinlei, DU Kun, ZHOU Zilong

引用本文:

王少锋, 石利伟, 石鑫垒, 杜坤, 周子龙. 深部硬岩靶向精准诱变改性非爆机械连续开采理论与技术[J]. 北科大: 工程科学学报, 优先发表. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2025.09.18.001

WANG Shaofeng, SHI Liwei, SHI Xinlei, DU Kun, ZHOU Zilong. Theory and technologies for targeted precision-induced modification in non-explosive mechanized continuous mining of deep hard rock[J]. *Chinese Journal of Engineering*, In press. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2025.09.18.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2025.09.18.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深部隧道切缝装药爆破岩体损伤演化及致裂特征

Study on the evolution of rock damage and blasting characteristics of deep tunnel splitting and drilling with explosives
工程科学学报. 2025, 47(6): 1191 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.07.09.002>

我国深部高温地层井巷建设发展路径与关键技术分析

Development path and key technology analysis of shaft and tunnel construction in deep stratum with high temperature
工程科学学报. 2022, 44(10): 1733 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.04.08.004>

深部金属矿开采关键理论技术进展与展望

Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines
工程科学学报. 2023, 45(8): 1281 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.11.12.004>

基于岩爆碎屑研究的高楼山隧道岩爆机理分析与类型判定

Mechanism analysis and type determination of the rockburst of the Gaoloushan tunnel based on a study of rockburst fragments
工程科学学报. 2023, 45(3): 337 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.12.16.003>

多炮孔岩体等离子体爆破定向致裂机理研究

Research on the directional fracturing mechanism of multiborehole rock mass plasma blasting
工程科学学报. 2025, 47(2): 259 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.04.01.001>

深部矿山非规则矿岩点载荷强度指标分布特性

Distribution characteristics of the point load strength index of irregular ore rock samples in deep mines
工程科学学报. 2023, 45(3): 349 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.11.12.004>

深部硬岩靶向精准诱变改性非爆机械连续开采理论与技术

王少锋[✉], 石利伟, 石鑫垒, 杜 坤, 周子龙

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

✉通信作者, E-mail: sf.wang@csu.edu.cn

摘 要 本文聚焦深部硬岩矿体开采面临的三大难题: 矿岩特性原位感知困难、深部硬岩矿体精准改性机理不清、非爆机械连续破岩技术欠缺, 开展深部硬岩靶向精准诱变改性非爆机械连续开采理论与技术研究, 提出“深部硬岩靶向精准诱变改性”理论构想, 构建硬岩矿体“表征-改性-开采”协同方法体系. 开发深部矿岩力学特性原位智能感知与结构面识别方法, 实现矿岩特性的实时精准表征; 探究深部硬岩矿体原位诱变改性机理, 揭示高应力与高储能的双重作用机制, 提出将潜在岩爆风险致灾能转化为促进硬岩破碎致裂能的诱变调控方法; 建立机械化破碎与智能调控技术体系, 集成智能感知、实时反馈与自适应控制功能, 实现深部硬岩的高效智能连续破碎. 系统梳理了深部硬岩矿体非爆机械连续开采理论、技术及装备的发展方向, 为深部硬岩矿体开采技术变革与升级提供有益参考.

关键词 深部硬岩; 靶向致裂; 诱变改性; 非爆机械破岩; 连续开采

分类号 TD85

Theory and technologies for targeted precision-induced modification in non-explosive mechanized continuous mining of deep hard rock

WANG Shaofeng[✉], SHI Liwei, SHI Xinlei, DU Kun, ZHOU Zilong

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

✉Corresponding author, E-mail: sf.wang@csu.edu.cn

ABSTRACT This study focuses on addressing three major challenges encountered in the mining of deep hard rock ore bodies: difficulty in real-time *in situ* perception of ore-rock characteristics, unclear mechanism of precision-induced modification of deep hard rock ore bodies, and lack of non-explosive mechanized continuous rock-breaking technologies. To systematically resolve these issues, comprehensive theoretical and technical investigations are conducted with respect to targeted precision-induced modification for non-explosive mechanized continuous mining in deep hard rock. An innovative theoretical concept of “targeted precision-induced modification of deep hard rock” is proposed, and a synergistic methodological system integrating “characterization–modification–mining” is established for hard rock ore bodies. An *in situ* intelligent sensing method for mechanical properties and structural surface identification of deep rock is developed, achieving real-time and accurate characterization of ore-rock properties. This method utilizes multi-physical sensor arrays, including torque, thrust, rotational speed, specific energy, borehole imaging, and acoustic emission parameters, combined with deep-learning inversion algorithms to dynamically interpret rock strength, integrity, and structural plane occurrence. Furthermore, computer vision and deep neural networks are employed for intelligent recognition of structural planes from borehole panoramic images and face digital images, enabling three-dimensional reconstruction and achieving a paradigm shift from

收稿日期: 2025-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52474168, 52174099); 湖湘青年英才资助项目(2023RC3050)

“single-parameter measurement” to “multi-source information perception” of ore-rock characteristics. The *in situ* induced modification mechanism of deep hard rock ore bodies is thoroughly examined, revealing the dual mechanism of high stress and high energy storage. A mutation regulation method is proposed to transform the disaster-causing energy of potential rockbursts into fracturing energy, which promotes hard rock fragmentation. This is achieved *via* a synergistic induction modification technology that combines high-stress/high-energy induction control with array-based pulsed hydraulic fracturing. Targeted fracturing of deep ore rock is achieved by dynamically guiding the distribution of high-stress fields and high-energy storage and coupling it with modification media such as high-pressure pulsed water. This approach significantly improves the cuttability of ore rock while converting rockburst energy into controlled rock fracturing energy. This effectively suppresses the occurrence of dynamic disasters, such as rockbursts, and realizes the transformation of deep high-stress/high-energy rock mass from sudden “disaster-causing” to gradual “fracturing” mechanical behavior. A mechanized crushing and intelligent control technology system is established, integrating intelligent sensing, real-time feedback, and adaptive control functions to achieve efficient and intelligent continuous fragmentation of deep hard rock. Innovative designs include a mechanical tool concept integrating rotary cutting, rolling, and impact functions, and the development of new continuous rock-breaking cutterheads for high-stress conditions. Research on intelligent control technology for non-explosive mechanical mining of deep hard rock ore bodies has provided key technologies such as ore-rock characteristic perception while mining and fine control of rock-breaking parameters. A non-explosive mechanical continuous mining environment monitoring and self-organizing interactive feedback system is constructed. This system incorporates a new deep hard rock non-explosive continuous mining mode centered on “our-process synergy” comprising *in situ* ore-rock characterization, *in situ* hard rock modification, original-state rock-breaking interaction, and *in situ* environmental monitoring. Additionally, this study systematically outlines the development directions of theory, technology, and equipment for the non-explosive mechanized continuous mining of deep hard rock ore bodies, providing a useful reference for the transformation and upgrading of mining technologies for deep hard rock ore bodies. The research outcomes offer systematic theoretical and technical support for achieving safe, efficient, green, and intelligent mining of deep hard rock resources. This consequently promotes the historic transition from “drill-and-blast mining” to “non-explosive continuous mining” in deep hard rock ore bodies.

KEY WORDS deep hard rock; targeted-fracturing; precision-induced modification; non-blasting mechanized rock breakage; continuous mining

矿产资源是国民经济发展的基础性战略资源,其开发利用直接关系国家经济安全.最新统计数据显示:我国 95% 的能源供应和 80% 的工业原材料直接依赖于矿产资源的开发利用.《中国矿产资源报告(2024)》权威指出:2023 年度国内矿产资源开发利用总量达 60 亿吨.在国家安全战略层面,2021 年 11 月,中共中央政治局将“能源矿产安全”首次提升至与粮食安全同等地位,标志着资源保障正式嵌入国家安全顶层架构.党的二十大随后明确要求,以系统性手段巩固粮食与能源资源供给韧性,确保关键产业链供应链稳固.回溯至 2016 年 5 月,习近平总书记在两院院士大会等场合提出“向地球深部进军”的战略命题,为深部资源技术攻关定下基调.此后,国家对深部资源开发的重视持续升温,2020 年发布的“十四五”规划将深地列入前沿科技版图,要求强化矿产资源开发-保护协同;2022 年中央经济工作会议将“加大国内能源矿产勘探开发”写入行动清单,并同步部署新型能源体系与战略储备升级;2023 年中央经济工作会议进一步提出,以节约集约、循环高效为抓手,夯实能源资源安全底座;2024 年国务院政府工

作报告则明确,强化能源资源安全保障,继续加大油气及战略性矿产勘探开发力度,形成深部资源增储上产的持续推力^[1-5].

随着长期大规模持续开采,浅部矿产资源逐渐减少,深部正成为矿产资源开发的主阵地.全球千米级深部资源开发以战略金属矿产为核心,岩性多以高硬度硬岩为主.然而,传统钻爆工艺在向深部延伸开采过程中暴露出明显瓶颈,已难以契合“安全-绿色-高效-智能”的未来矿业发展复合需求^[3].深部金属矿山普遍采用多采场、多中段交互协同开采,导致地下空间呈现岩体结构不连续、材质非均匀、应力高梯度的复杂异构特征,该条件下开采动力扰动极易诱发岩爆等岩体动力灾害,大幅度增加了开采难度^[6].为此,亟需突破钻爆法主导的开采模式,建立硬岩非爆机械开采理论与技术体系,这一技术革新对深部硬岩矿体开采技术变革具有重要的理论价值与实践意义,不仅保障了硬岩矿山安全、高效、绿色开采,同时还将推动金属矿产资源向智能化、无人化、集约化发展^[7-8].

以往机械刀具破岩特性研究,系统揭示了钻进、切削、滚压及冲击破岩的破岩机理.其中,钻

进破岩效率可通过转速与单位进尺成本综合评估; 切削破岩中, 以镐型截齿为破岩刀具的横轴式、纵轴式悬臂掘进机通过其截割部刀具与岩石相互作用, 在岩石内部产生赫兹裂纹并在岩石内部以密实核储能传递实现高效破碎^[9]。数值模拟研究中, 有学者采用有限元与离散元方法分析了刀具-岩石相互作用规律, 研究表明多刀具协同作用可显著降低破岩比能(岩石破碎比能耗), 三刀配置较双刀效率高, 且研究表明岩石强度差异导致剪切与张拉破坏模式的分化^[10-13]。试验研究通过全尺寸截割平台与缩尺压痕实验验证了截齿类型对截割力的影响规律, 并发现自由面与滚刀侵入方向平行时可优化裂纹扩展路径, 降低破岩能耗^[14-16]。现场应用中, 全断面隧道掘进机(Tunnel boring machine, TBM)技术通过智能感知与数据驱动模型实现复杂地层适应性提升, 而深部高应力诱导调控技术结合悬臂掘进机突破硬岩非爆连续开采瓶颈^[17], 在开阳磷矿等典型硬岩矿山进行深部高应力诱导调控技术现场施工实测, 与传统单机设备施工相比, 开采效率由原来的 $32.6 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ 提升至 $107.7 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$ ^[18-19]。装备发展方面, 高功率掘进机与自适应 TBM 在极端地质条件下表现突出^[20]。刀具技术聚焦热稳定性优化与结构创新, 聚晶金刚石复合片(Polycrystalline diamond compact, PDC)与冠型截齿分别在硬地层适应性及破碎均匀性方面展现潜力^[21]。开采工艺方面, 通过悬臂掘进机与综采一体化系统实现硬岩连续高效开采, 工效提升超 30%^[22]。当前机械开采的挑战集中于复杂地层动态响应预测、刀具长寿命设计及破岩比能多目标优化, 未来需融合智能算法、高性能材料与跨尺度仿真技术, 推动硬岩破碎向智能化、低耗能与高可靠性方向发展^[23]。

现场开采实践表明, 非爆机械开采相较传统钻爆法开采, 具有安全、生产效率高、资源损失小、环境破坏扰动小、工艺简单、智能化水平高等优点。然而, 由于深部硬岩矿体具有高强度、高地应力以及复杂赋存环境等特点, 导致其可切割性低、岩爆风险高、刀具磨损严重, 这使得非爆机械连续开采在硬岩矿山中的规模体系化应用成为国际性技术难题^[24-27]。

1 靶向精准诱变改性非爆机械连续开采构思

深部采矿实践发现, 深部高应力在易引发岩体非常规破坏的同时具有利于岩石破碎的倾向

(深部硬岩表现出“好凿好爆”的倾向)^[28-30]。研究发现, 地应力对刀具破岩具有双重作用: 中等应力的侧限作用阻碍刀具破岩, 高应力的预裂作用促进刀具破岩。据此, 可基于高应力诱导致裂与能量调控策略, 将原本易诱发岩爆的岩体高应力和高储能转化为利于机械刀具破岩的有序破碎能, 实现“变害为利”, 显著改善深部硬岩的可切割性, 为非爆机械开采提供关键支撑^[31-34]。鉴于此, 在综合分析深部采矿工程涉及的两大命题(图 1: 破碎和稳定)和三大要素(图 2: 环境条件、岩体特性、采掘参数)的基础上, 分析梳理出深部硬岩矿体非爆机械连续开采的核心科学问题, 在于如何通过“诱变改性”将原本难以切割、极易诱发灾害的高危岩体转化为安全可控、易于机械破碎的矿岩, 该命题可拆解为三项亟待突破的关键技术瓶颈: 矿岩特性原位智能感知困难(如何获得矿岩特性, 即认识矿岩)、深部硬岩矿体精准改性机理不明(如何改善矿岩特性, 即改变矿岩)、非爆机械连续破岩技术欠缺(如何开采矿岩, 即破碎矿岩)。目前缺乏有效的矿岩特性原位监测与实时建模方法, 难以快速准确认识和表征矿岩的区域化特征, 导致基于高应力区域性诱导调控的硬岩诱变改性措施效果不佳, 最终造成硬岩矿山的非爆机械开采应用困难重重。因此, 为破解深部硬岩矿体“高应力-高储能-难切割”的系统性难题, 亟需开展深部硬岩矿体靶向精准诱变改性非爆连续开采理论与关键技术的研究, 突破传统钻爆的局限性, 推动深部战略资源向安全、高效、绿色、智能开采的范式跃迁^[35]。

现有岩体力学与结构特性参数的获取范式仍以离散取心-离线试验或表层地质勘探为主, 其固有的靶点参数单一、时效滞后、原位信息残缺等缺陷, 导致深部非均质岩体的结构-力学耦合特性无法实时精准原位解译表征, 进而使开采参数设计缺乏针对性和自适应能力。为此, 亟需构建“随钻-随掘-随采”全域原位感知技术体系: 以钻进响应、掘进反馈及回采工况为连续数据源, 融合多物理场传感器阵列(扭矩、推力、转速、比能、孔壁成像、声发射等)与深度学习反演算法, 实现岩体强度、完整性及结构面产状的在线刻画^[36-37]; 并引入计算机视觉与深度神经网络, 对孔内全景影像及掌子面数字图像进行结构面智能识别与三维重构, 实现矿岩特性由“单一信息测量”向“多元信息感知”的范式跃迁。构建矿岩全信息数字孪生模型和快速智能在线分级系统, 实现矿岩特性从“知识驱动型参量表征”向“数据驱动型精准表征”的手

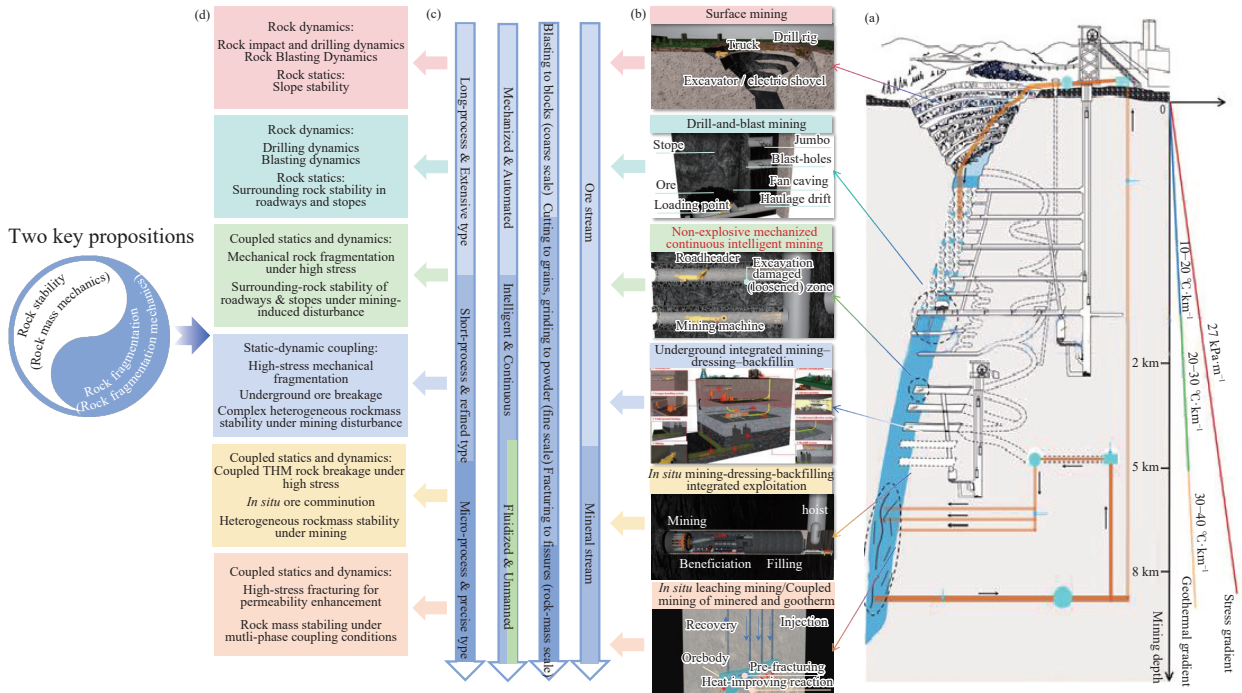


图 1 硬岩金属矿山开采中的岩石力学问题。(a) 硬岩金属矿山布置场景；(b) 开采方法；(c) 开采工艺特点；(d) 岩石力学问题

Fig.1 Rock mechanics in hard rock metal mining: (a) hard rock and metal mine layout scenarios; (b) mining methods; (c) characteristics of the mining process; (d) rock mechanics problems

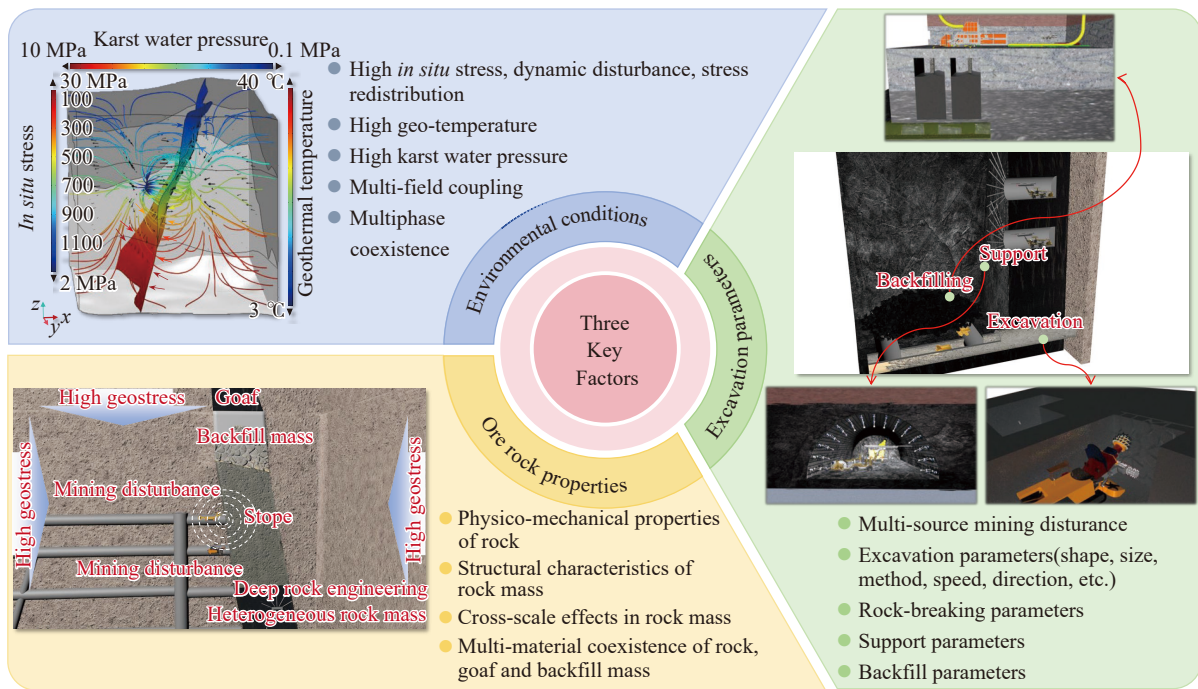


图 2 硬岩金属矿山开采需要考虑的三大要素

Fig.2 Three major elements considered in hard rock metal mining

段创新. 此外, 深部硬岩普遍表现出高强度、高应力的典型特征, 同时具有低可切割性和显著岩爆倾向性. 这种复杂的力学行为导致深部硬岩机械破碎过程中面临极大的能量耗散, 显著降低了破岩效率. 同时深部岩体中积聚的高弹性储能往往

以岩爆等动力灾害形式突然释放, 严重危害作业安全. 为此, 亟需构建“高应力/高储能诱导调控-孔阵脉冲水力压裂”协同联合诱导改性技术: 依托实时获取的矿岩特性原位感知数据, 动态引导深部高应力场与高储能分布, 耦合高压脉冲水等改

性介质协同作用, 实现深部矿岩精准靶向致裂, 在显著改善矿岩可切割性能的同时, 将岩爆能量转化为可控岩体致裂扩展能, 有效抑制岩爆等动力灾害的发生, 实现深部高应力/高储能岩体由突发性跃升“致灾”向渐进式缓释“致裂”的力学行为转换; 同步研发针对深部开采扰动区异构岩体的区域能量诱导调控方法, 形成以区域性诱变改性为核心的非爆机械连续开采新范式, 推动深部硬岩矿体由“钻爆法开采”向“非爆连续化开采”的历史性变革.

如图 3 所示, 深部硬岩矿体靶向精准诱变改性非爆机械连续开采研究可采取岩石力学、岩石破碎学、采矿学、计算机学等多学科交叉融合和室

内试验、理论分析、数值模拟、现场监测与试验、数据密集型科学发现等多方法联合互证的研究方法, 以深部硬岩矿体为研究对象, 针对深部硬岩靶向精准诱变改性机理与方法等关键科学问题和技术难题, 开展深部矿岩特性原位多元感知与全息建模、深部硬岩矿体水力脉冲靶向诱变改性、深部硬岩矿体非爆连续破碎与智能调控、深部开采扰动异构岩体区域能量诱导利用等内容研究, 探究深部高应力硬岩区域性“灾敏储能”向“致裂耗能”良性转化的靶向精准诱变方法和内在机制, 形成矿岩“感知-改性-开采-监控”全链协同开采模式, 为深部硬岩矿体“安全-高效-绿色-智能”开采提供系统性理论与技术支撑.

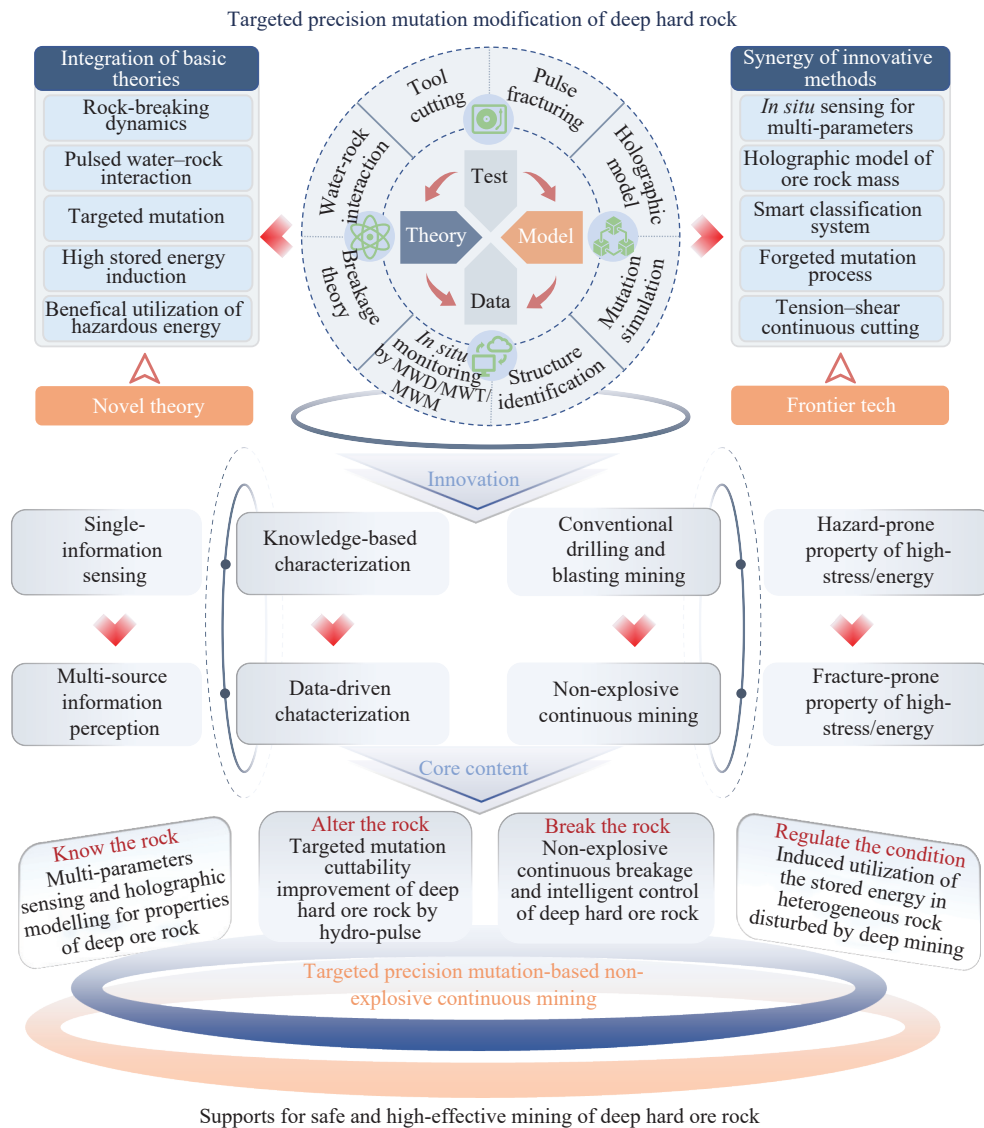


图 3 研究技术路线

Fig.3 Technical routes

1.1 深部矿岩特性原位多元感知与全息建模

针对传统取样试验方法靶点参数单一、时效滞

后、原位信息获取难等技术瓶颈, 自主研发深部高温高压多场耦合机械刀具连续破岩试验台(图 4),

系统揭示高应力条件下刀具破岩动力学行为, 建立与之匹配的深部岩体机械破碎动力学理论模型, 提出深部矿岩可切割性多源数据指标综合表征方法, 开发基于“随钻-随掘-随采”一体化原位触探感知的深部矿岩力学特性原位多元感知方法及配套装置(图 5), 通过钻进响应、掘进反馈与开采实时数据的耦合挖掘, 建立岩体强度、结构面产状及应力状态的动态反演模型; 同时, 通过构建深部矿岩数字图像数据库, 结合深度学习算法, 开展矿岩形貌特征的智能识别、矿岩数字实时建模与快速智能分级研究, 建立涵盖深部矿岩材质、力学、结构多元信息以及从微观到细观再到宏观融合矿物、岩心、岩体、岩层的跨尺度全息数字模型和快速智能在线分级系统. 矿岩特性原位监测与全息数字建模流程如图 6 所示.

1.2 深部硬岩矿体水力脉冲靶向诱变改性

为攻克深部硬岩“高硬度-高应力-低可切割性-高岩爆风险”的复合技术难题, 自主研发高应力(σ)硬岩孔阵水力脉冲诱变改性试验系统(图 7), 系

统研究高应力下脉冲水与矿岩的动力耦合作用机理, 揭示高压脉冲水力压裂对硬岩破碎的“降危-增割”双效耦合作用机制, 定量表征不同应力条件下高压脉冲水力致裂诱导岩体弱化的关键控制参数. 基于高应力硬岩孔阵脉冲水力致裂动力学响应特征分析, 阐明多孔脉冲水力压裂与深部高地应力环境的协同耦合诱导改性致裂机理, 提出考虑应力-渗流-损伤多场耦合的诱变改性理论模型, 并通过实验优化获得最佳的致裂孔阵空间布局参数; 进而提出“应力原场实时监测+孔阵脉冲水力致裂”协同的靶向诱变改性技术路线, 并针对原位多元感知标定的难采矿岩开展区域性靶向诱变改性原位试验, 获得深部硬岩矿体靶向诱变高效改性工艺.

1.3 深部硬岩矿体非爆连续破碎与智能调控

针对当前非爆机械破岩仍面临的刀具急剧磨损、作业不连续、设备自适应性弱、智能化水平低等技术瓶颈. 系统开展深部矿岩诱变改性非爆机械化连续破碎特性研究, 揭示诱变改性矿岩可切

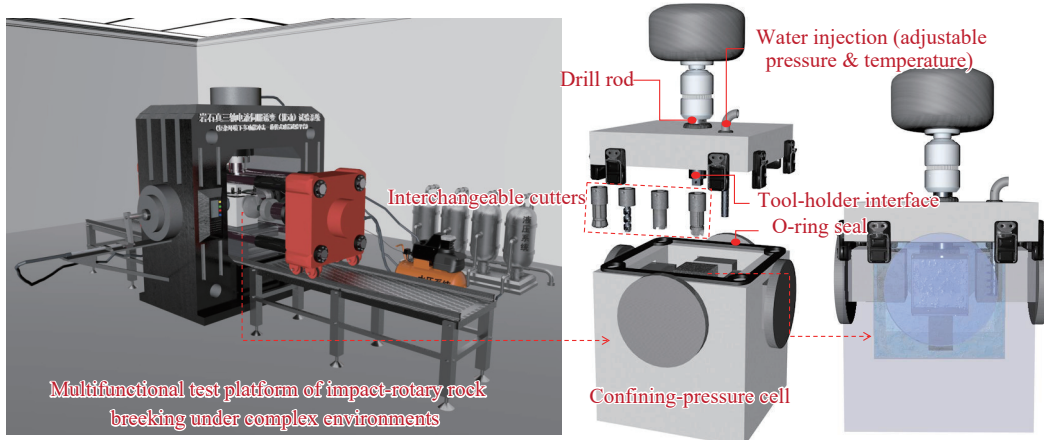


图 4 深部高温高压多场耦合机械刀具连续破岩试验台

Fig.4 Deep high-temperature and high-pressure multifield coupling mechanical tool continuous rock breaking test bench

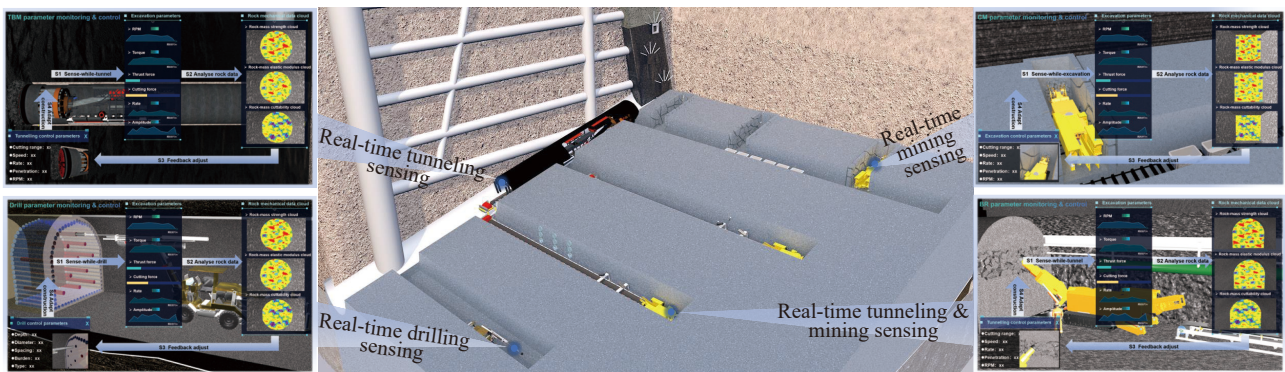


图 5 矿岩力学特性随钻、随掘、随采原位触探感知方法及装置

Fig.5 In situ sensing methods and devices for rock mechanics based on monitoring during drilling, tunnelling, and mining



图 6 矿岩特性原位多元监测与全息数字建模流程。(a) 矿岩特性原位多元监测与全息数字建模流程; (b) 区域岩体特性原位多元监测与全息数字建模流程

Fig.6 *In situ* multivariate monitoring and holographic digital modeling of ore and rock characteristics: (a) *in situ* multi-parameter monitoring and holographic digital modelling workflow for ore rock properties; (b) multi-parameter monitoring and holographic digital modeling workflow for mine-scale rock mass characteristics

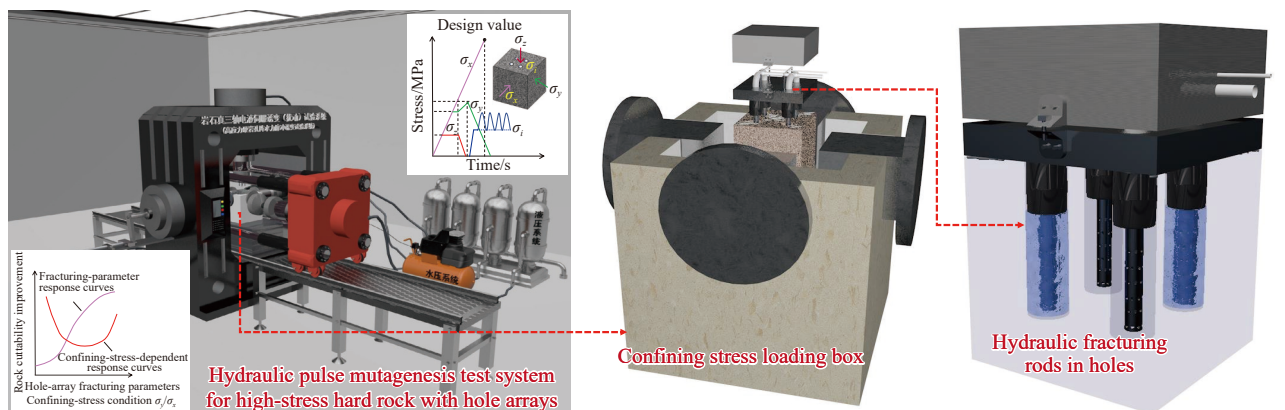


图 7 深部硬岩孔阵水力脉冲透变改性试验

Fig.7 Hydraulic pulse mutagenesis modification test of deep hard rock array

割性和岩爆倾向性的改善提质规律, 提出机械刀具集旋切-滚压-冲击“三合一”可调式破岩理念, 研发高应力下硬岩新型连续破岩刀盘; 开展深部

硬岩矿体非爆机械开采智能调控技术研究, 重点突破矿岩特性随采感知与破岩参数精细调控容差交互等关键技术, 构建非爆机械连续开采环境监

测与自组织互馈系统, 最终形成以“四原协同”(矿岩原性感知、硬岩原位改性、破岩原态交互、环境

原场监控)为核心的深部硬岩非爆连续开采新模式(图 8), 实现开采过程的智能化与高效化。

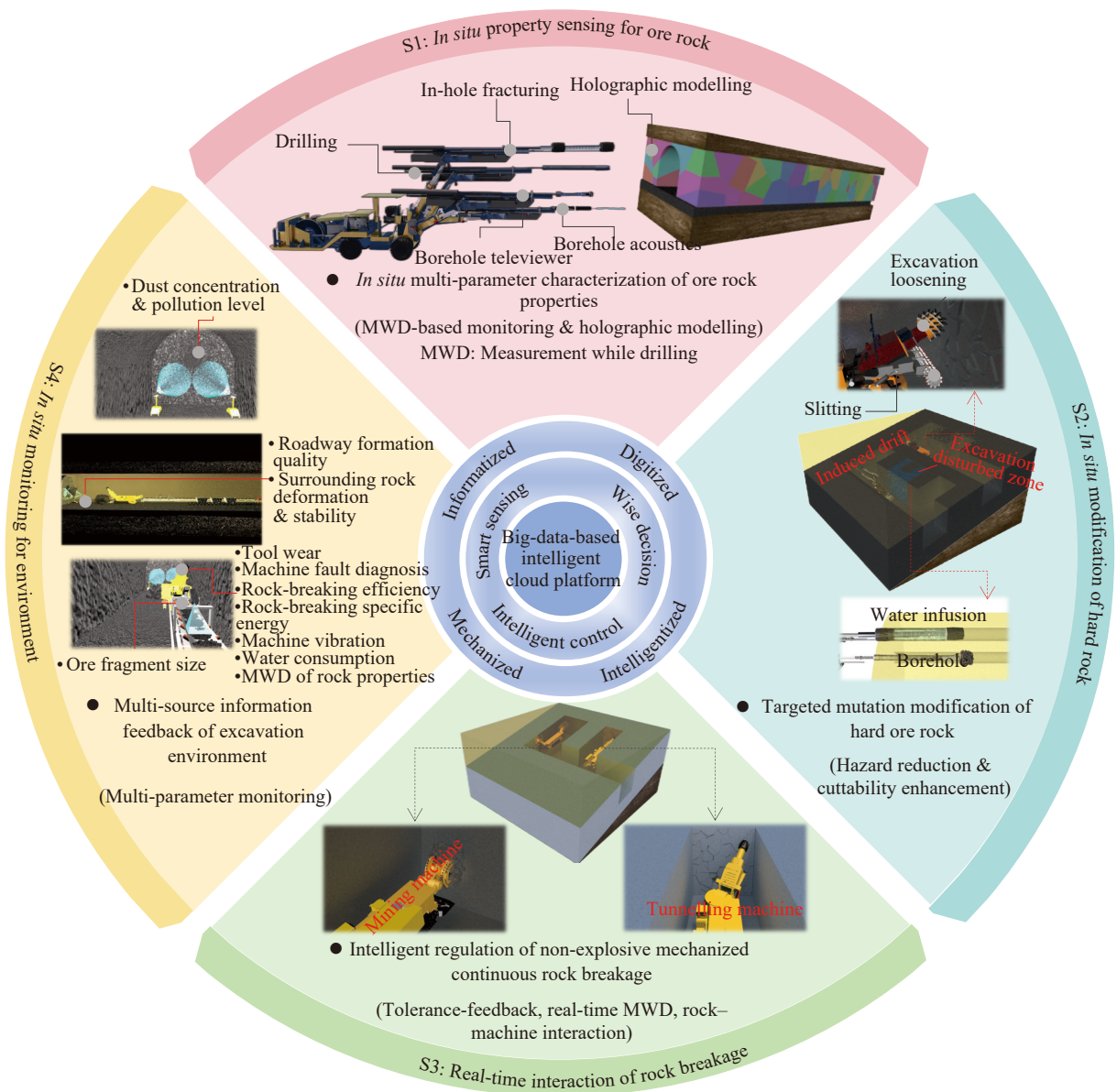


图 8 深部硬岩矿体“四原”协同非爆机械化智能连续开采模式^[38]

Fig.8 “Four process” synergistic non-explosive mechanized intelligent continuous mining mode of deep hard rock ore body^[38]

1.4 深部开采扰动异构岩体区域能量诱导利用

针对深部硬岩开采扰动区域内岩体异构特性显著、应力变异性明显、储能大、灾敏性高等问题, 研究深部开采扰动异构岩体区域能量流程, 获得深部高储能异构岩体灾变敏感度定量表征方法, 阐明异构岩体关键结构近区能量积聚和致裂耗散特征; 研究高储能岩体异构区注水诱变改性对能量迁移的影响规律, 获得高储能异构岩体注水改性作用关键靶点, 明晰注水诱变改性对高储能岩体异构区域高能态灾变敏感度的降危机理, 阐明深部硬岩高储能从无序灾变释能向有序破碎用能转

化的调控机理, 建立开采扰动异构岩体区域能量诱导利用与灾害防控技术体系. 深部开采扰动异构岩体区域能量流程分析示例如图 9 所示。

2 深部硬岩特性表征与非爆机械开采实践

围绕“深部硬岩靶向精准诱变改性”关键科学问题, 采用室内试验、理论分析、数值模拟和现场实践等手段相结合的方法, 探索了深部硬岩矿体非爆机械开采的新理论、新方法和新应用, 形成了“深部硬岩力学特性和碎裂表征方法”、“深部硬岩截割特性和降危增割”机制和“深部硬岩非爆机

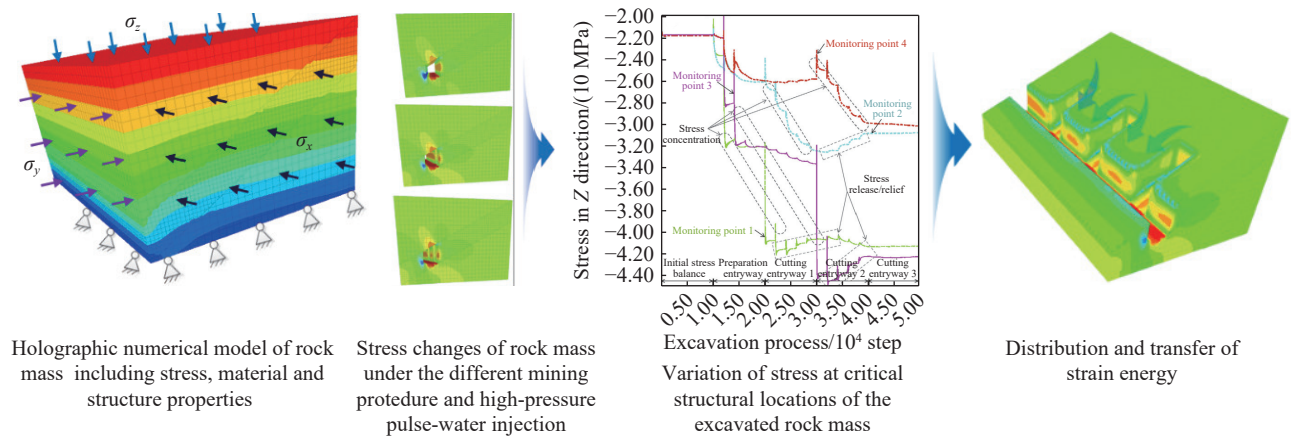


图9 深部开采扰动异构岩体区域应力和能量流程分析示例图^[39]

Fig.9 Example of regional energy flow analysis of a disturbed isomeric rock mass in deep mining^[39]

械开采判据与实践”的核心学术成果. 研究思路与主要成果如图10所示.

2.1 深部岩石强度与碎裂特性表征

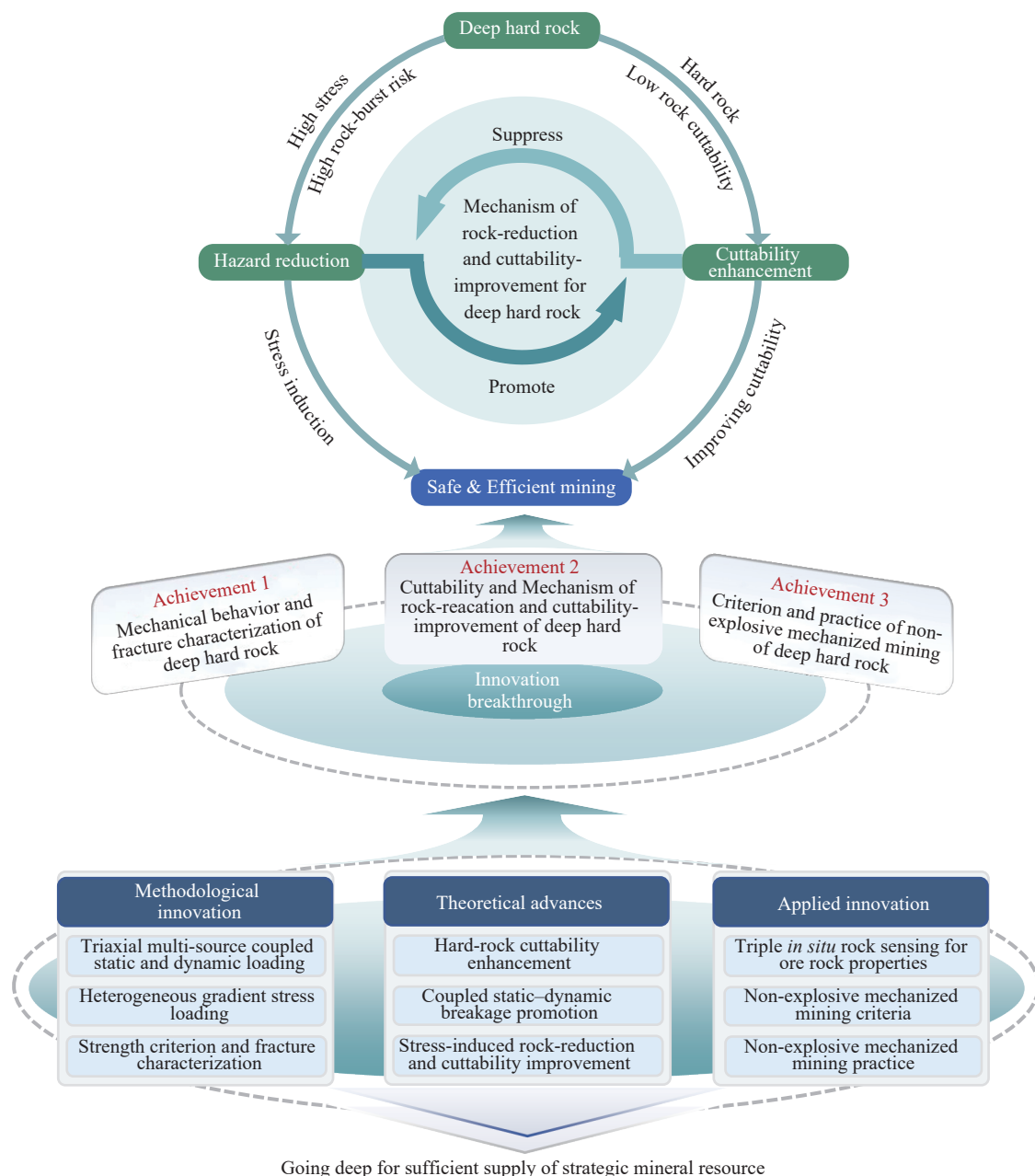
20世纪以来, Kármán教授(1911年)、Mogi教授(1970年)以及Hudson教授(1971年)先后在常规三轴、真三轴和刚性试验机的研制方面取得了开创性突破^[40]. 深部采矿工程岩石力学试验研究不仅要实现高地应力的精准加载, 又要考虑施加多源采掘扰动载荷, 对试验机提出了更高的功能需求. 同时, 采矿复杂应力条件下岩石的破裂、破碎过程更为复杂, 快速精确表征深部岩石的碎裂特征面临众多挑战. 针对上述挑战, 本文提出岩石多源动静载荷协同加载和非均匀梯度应力加载方法, 开发岩石碎裂特性表征方法与模型, 探明深部硬岩非线性力学行为和非常规破裂特征, 为深部矿山工程稳定性分析和安全高效开采奠定理论基础.

为系统探究深部硬岩的力学特性, 开展岩石真三轴压缩试验, 测定2000~4000 m埋深下硬岩真三轴抗压强度, 揭示深部开采复杂应力条件下岩石强度和破坏特性, 在此基础上, 构建基于强度增幅比和峰值位置参数的岩石真三轴强度准则, 可为深部开采界定提供理论依据(图11). 进一步地, 开展岩石多类型拉、压、剪破坏试验, 研究岩石破裂过程声发射时频特征, 提出基于声发射特征数据(RA-AF, Rise angle-average frequency)的岩石拉、剪破坏形式区分判据, 为评判机械刀具破岩主控致裂模式提供可靠方法(图12). 在碎裂特性表征方面, 提出一种基于数字图像处理 and 颜色梯度特征提取的岩石裂纹/岩块边界自动识别和碎裂特性表征方法, 能有效评价开采矿岩碎裂表现(图13, 图中 a_{\min} , b_{\max} 为阈值参数, 分别表示平均梯度的下限和上限; $c(i, j, k)$ 为位于位置 (i, j) 的第 k 个颜

色通道像素值; d 为等效直径, 表示将不规则区域转换为等效圆的直径; A 表示某个区域或碎片; $N(\delta)$ 为盒子计数, 在盒子尺寸为 δ 时, 与裂缝相交的盒子数量; VRF为空隙率分布; s 为碎片区域的面积; D 为分形维数; C 为回归常数(截距)). 此外, 通过融合计算机视觉中的优化灰度均值法与分形维数理论, 构建一种粉尘污染评价数字模型, 同时在此基础上, 融合对粉尘扩散图像颜色和纹理的计算参数, 用于对地下开采或施工过程中产生尘点的粉尘污染情况实现精准监测(图14, 图中LED为稳定光源; BGR为蓝-绿-红颜色模型; HSV为色调-饱和度-明度颜色模型, H 为色调, 表示颜色种类; S 为饱和度, 表示颜色的纯度; V 为明度, 表示颜色的亮度; Lab为CIE Lab颜色模型, L 为亮度分量; a 为从绿色到红色的颜色分量; b 为从蓝色到黄色的颜色分量; E 为经归一化处理的图像灰度级分布均匀性度量; D 为分形维数).

2.2 不同应力条件下硬岩截割特性

随着岩石破碎理论与技术的发展, 地面及浅部岩石破碎工程得到了长足发展, 人们对浅部岩石的截割破碎特性有了较为全面的认识. 然而, 由于高应力环境下硬岩具有极高的硬度和显著的岩爆倾向, 目前机械破岩技术在深部硬岩中的应用实践受阻, 导致人们对深部硬岩截割特性认识不够, 加之对高应力环境下硬岩矿体“降危增割”的作用机理研究不够深入, 有效技术手段匮乏, 严重制约了高效机械破岩技术的研发进程, 最终造成深部硬岩矿体机械开采理论体系和技术方法发展滞后. 因此, 基于真三轴试验机研制的高应力下机械刀具破岩试验系统, 可开展不同开采应力条件下机械刀具静力侵入、动静组合侵入切削破岩特性研究, 从而揭示机械刀具与高应力耦合破岩机



Going deep for sufficient supply of strategic mineral resource

图 10 研究思路与主要成果

Fig.10 Research ideas and main results

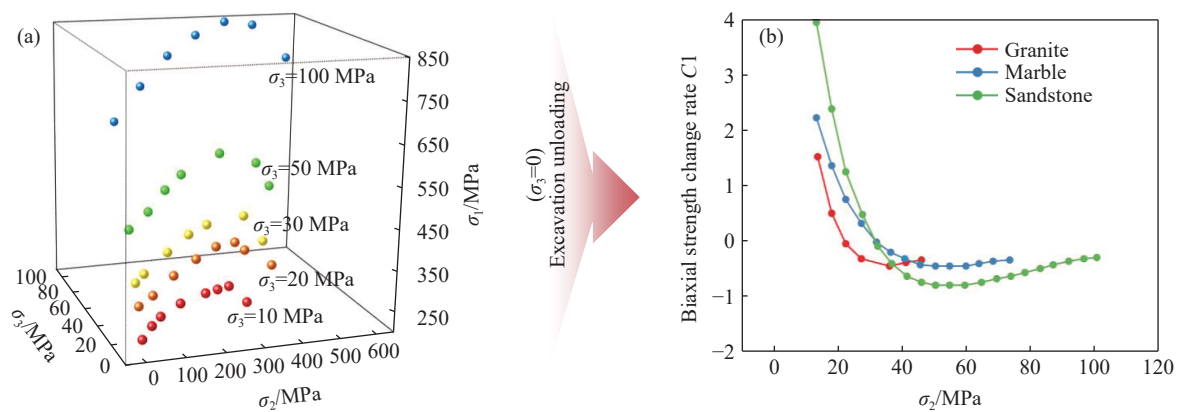


图 11 岩石 (a) 真三轴破坏强度及 (b) 开挖卸荷双轴强度变化^[41]

Fig.11 True triaxial failure strength of rock and double-axis strength variation under excavation unloading^[41]

理, 阐明深部硬岩“降危增割”机制, 提出深部硬岩“降危增割”双效提质方法, 为深部硬岩非爆机械开采奠定关键理论与方法支撑。

开展深部开采多样受限应力(双向、单向、无

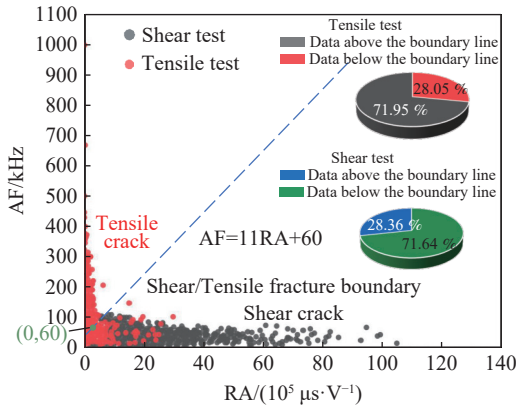


图 12 拉伸裂缝和剪切裂缝之间的分界线^[42]

Fig.12 Division line between tensile and shear cracks^[42]

受限应力)条件下完整岩石和含预造缺陷(加卸荷损伤、预切槽、预钻孔)岩石的截齿破岩特性试验, 获得破岩峰值载荷、破岩比能等破岩参数的变化规律, 构建考虑受限应力条件的截齿破岩峰值载荷理论模型, 发现深部高应力对机械刀具破岩的促进效应, 阐明深部开采受限应力对机械刀具破岩的非单调作用过程(随偏应力增大, 其先抑制后促进破岩)(图 15(a)); 通过解析机械刀具破岩扰动诱发深部岩爆的链式演化过程, 揭示高应力矿柱岩爆的诱发机理, 厘清深部开采应力条件对硬岩可切割性影响的促效转折点和开采扰动诱发岩爆的风险临界点; 研究预造缺陷对硬岩可切割性的促进作用, 明确各类预造缺陷的可切割性促进作用优先级(图 15(b)、(c)), 揭示深部高应力诱导致裂和预造缺陷对硬岩可切割性的改善机制, 为深部硬岩增割提供理论依据。开展高应力硬岩异源点/局部变截面扰动破岩试验, 阐释深部硬岩

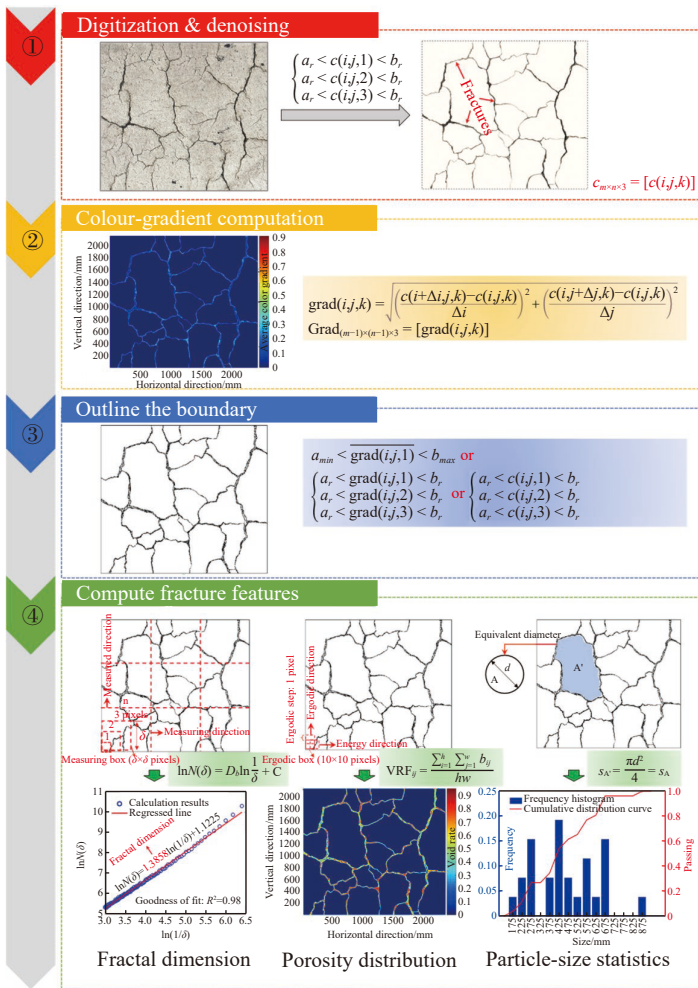
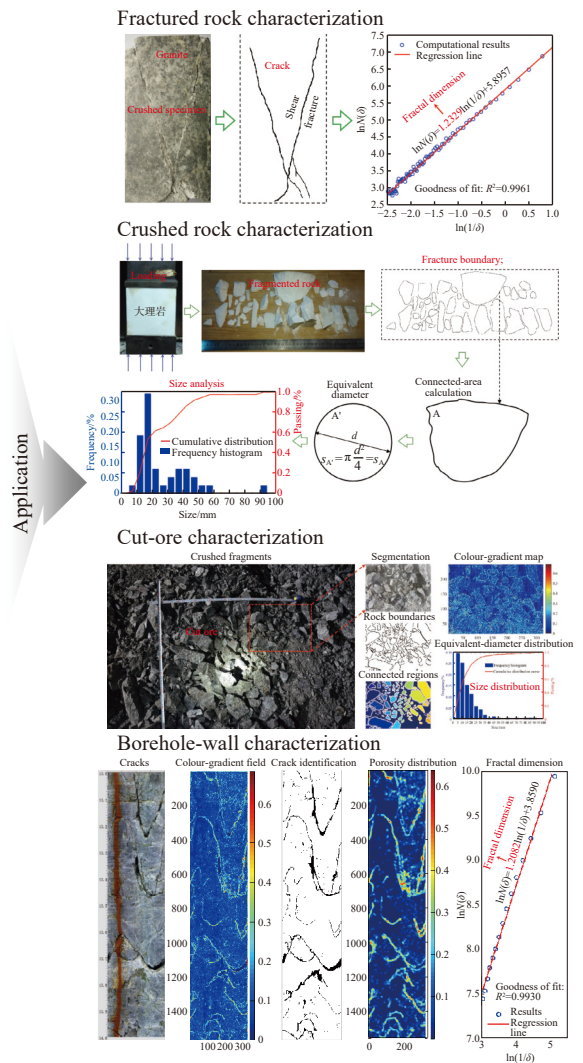


图 13 岩石裂纹/岩块边界自动识别和碎裂特性表征^[43]

Fig.13 Automatic identification of rock crack/block boundaries and characterization of fractures^[43]



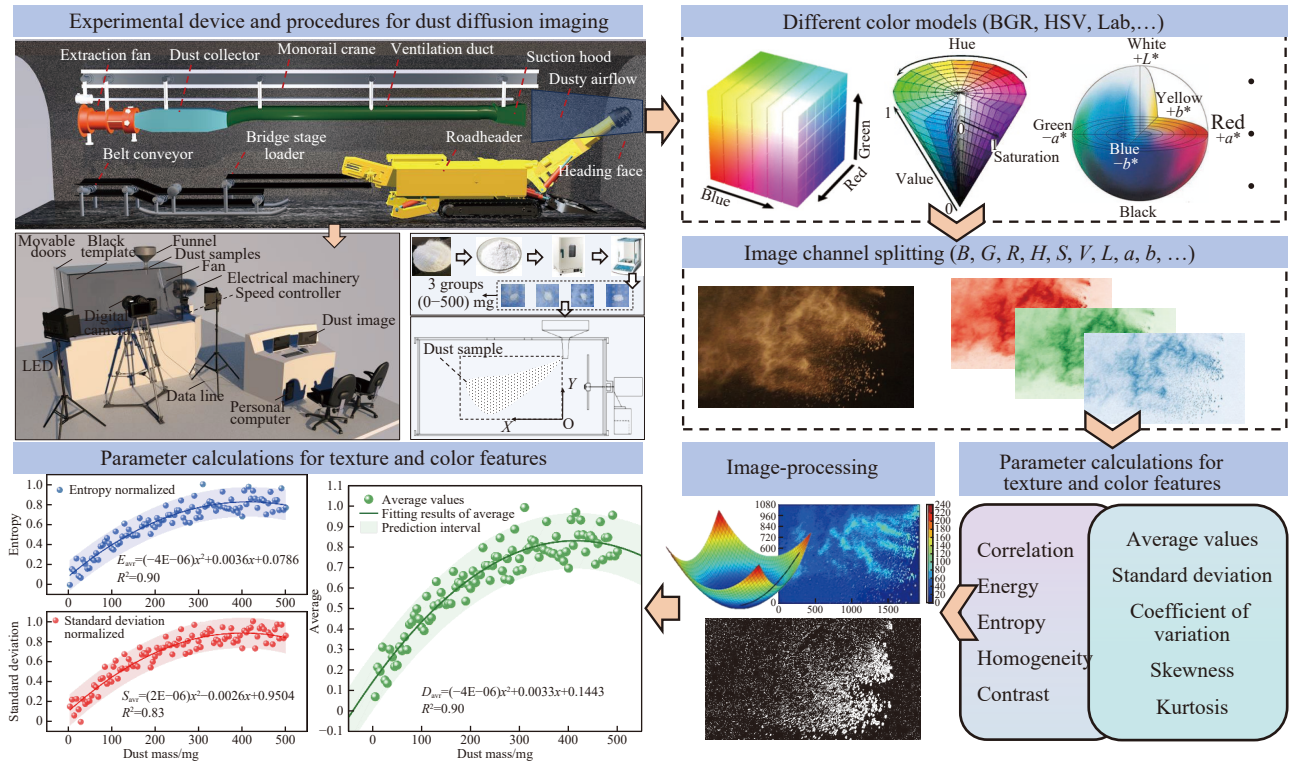


图 14 粉尘污染在线监测与评价^[44]

Fig.14 Online monitoring and assessment of dust pollution^[44]

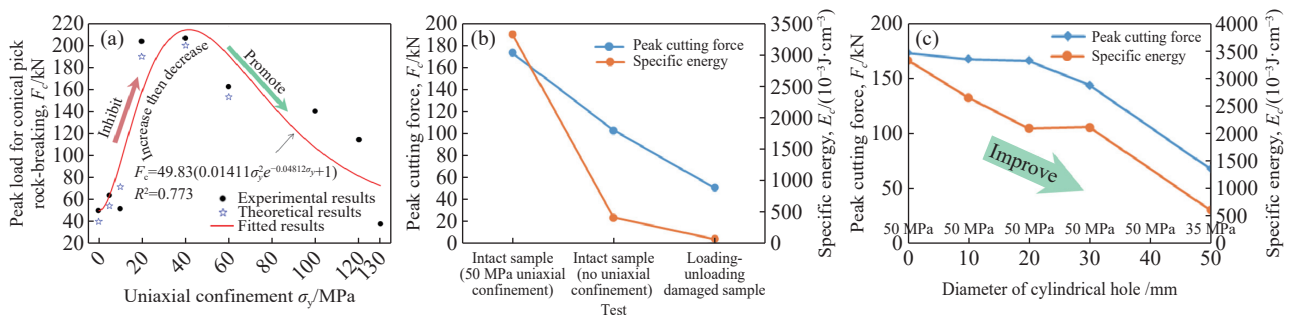


图 15 不同应力条件下完整岩样和含预造缺陷岩样的截齿破岩试验结果。(a) 单轴受限应力下完整试样结果对比; (b) 完整试样和加卸荷损伤试样结果对比; (c) 单轴受限应力下含孔洞试样结果对比^[45]

Fig.15 Pick rock breaking test results for the intact and samples with prefabricated defects under various stress conditions^[45]: (a) comparison of results of intact specimens under uniaxial constrained stress; (b) change curves of peak force and specific energy of breakage for intact and fractured rock specimens; (c) change curves of peak force and specific energy of breakage for pre-hole rock specimens under uniaxial confining stress condition

承载未超限而发生破坏的外源扰动诱发机制, 揭示高应力硬岩破裂的刀具动静组合扰动促发机制, 获得深部高应力硬岩的动静组合扰动促效门槛载荷条件, 明晰高应力和刀具动静组合载荷的耦合破岩促效机理(图 16, 图中 ϕ 为扰动接触面积圆柱直径, σ_{bcS} 为围压极限强度)。基于上述研究, 明晰机械刀具与高应力耦合破岩和致灾机理, 提出基于深部高应力诱导利用和预造缺陷联合作用的硬岩“降危增割”成套方法(图 17), 为深部硬岩矿体非爆机械连续安全高效绿色开采提供重要理论与关键技术支撑。

2.3 矿岩特性原位监测与非爆机械开采

随着国民经济和制造业的飞速发展, 地下矿产资源开采装备不断革新。煤炭开采出现了能够保证千万吨矿井规模化生产的综采、综掘成套设备, 煤炭开采由此迈入规模化、连续化、智能化新阶段, 带动资源利用向安全高效、绿色低碳迈升。然而, 目前主导的传统钻爆法在地下非煤硬岩矿体回采中难以满足深部开采需求。同时, 爆破动力扰动极易诱发岩爆、突水、冒顶片帮等灾害, 且难以均匀控制的爆破碎石块度带来了较高的二次破碎成本。如果直接将煤矿综采、综掘技术应用于深

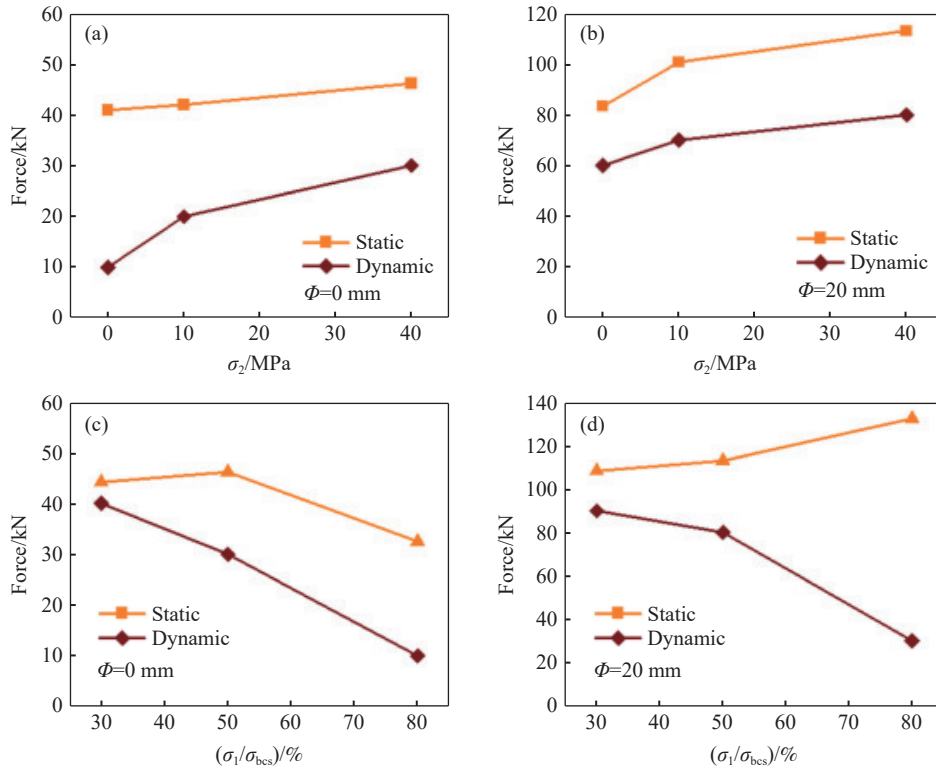


图 16 静荷载和动荷载作用下岩石破坏的破碎力^[46]. (a, b) 围压(σ_2); (c, d) 预应力(σ_1)

Fig.16 Breaking force for rock failure under static loading and dynamic loading^[46]: (a, b) confining pressure (σ_2); (c, d) predefined stress (σ_1)

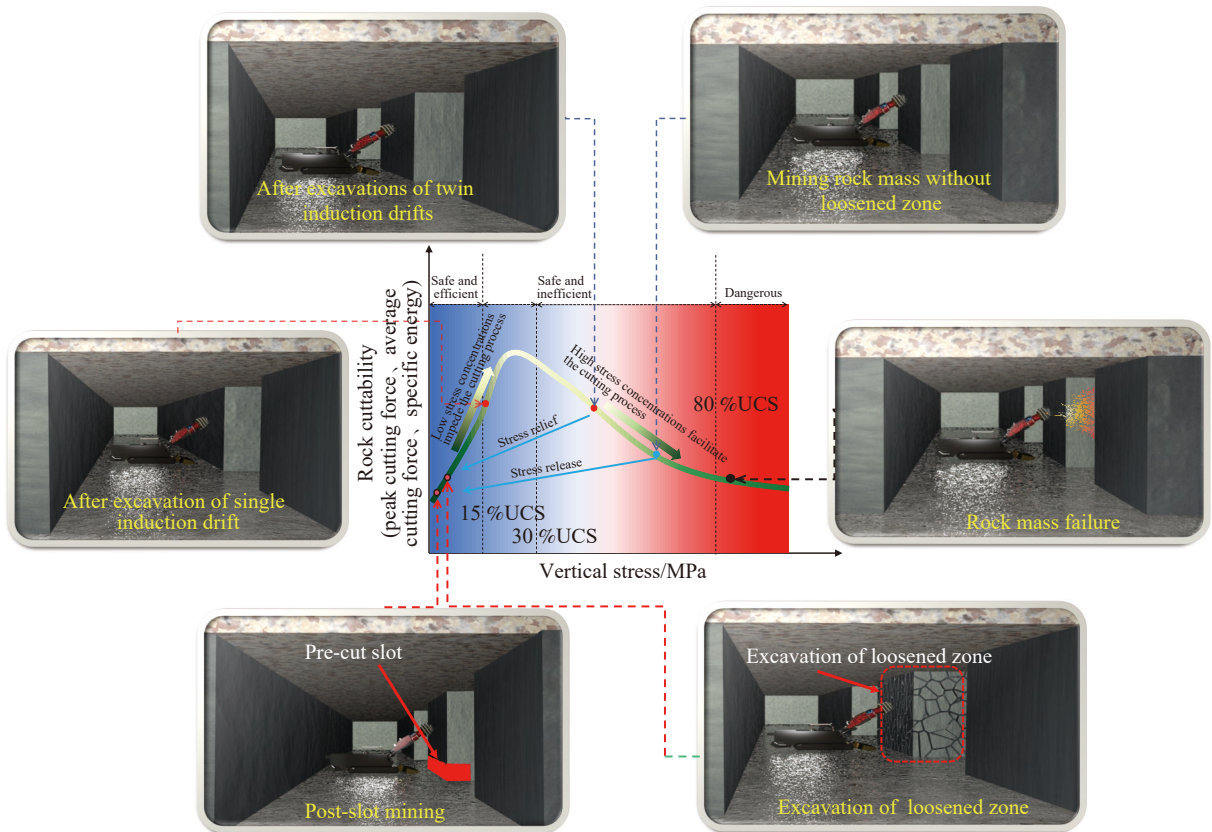


图 17 深部硬岩“降危增割”方法^[47]

Fig.17 Methods for reducing risk and increasing the cuttability of deep hard rock^[47]

部硬岩矿体开采, 则会因为深部硬岩坚硬、地应力高、赋存条件复杂等因素而使开采成本高、效率低、安全性差. 机械破岩方法在深部硬岩中的应用尚缺乏判别依据, 致使非爆机械连续开采在硬岩矿山中的应用缺乏科学指导. 因此, 本文构建非爆机械开采适用性判据模型, 提出矿岩特性感知、硬岩“降危增割”、破岩智能调控协同开采方法, 实践证明深部硬岩矿体非爆机械开采的可行性和有效性.

提出矿岩特性“三随”(随钻/随采/随掘)原位监测方法, 构建基于机械破岩随钻/随采/随掘参数的矿岩强度和可切割性智能预测模型如图 18 所示, 图中 F 为推进力; T 为扭矩; n 为转速; V 为推进速度; SE 为破岩比能; RPM 为盾构机转速; PR 为穿透率; α 为前角; β 为后角; φ 为仰角; θ 为拾

取角; MFC 为平均切削力; PFC 为峰值切削力; HOA (Hiking optimization algorithm) 为远足优化算法; $IVYA$ (Ivy algorithm) 为常春藤算法; $GBDT$ (Gradient boosting decision tree) 为梯度提升决策树模型. 创新深部硬岩可切割性综合表征方法, 为深部硬岩增割提供关键靶点标定方法. 通过对开阳磷矿等典型硬岩矿山现场实测, 系统研究了不同开采深度下岩体松动区的发育特征. 基于实测数据, 建立矿柱松动区厚度与开采深度、矿岩特性及工程参数之间的定量关系模型, 构建非爆机械开采适用性判据模型, 确定了不同强度矿岩适合非爆机械开采的矿体埋深(图 19, 图中 γ 为岩石容重, H 为矿体埋深; M 为岩体质量等级), 为深部硬岩非爆机械开采提供了适用性评判准则.

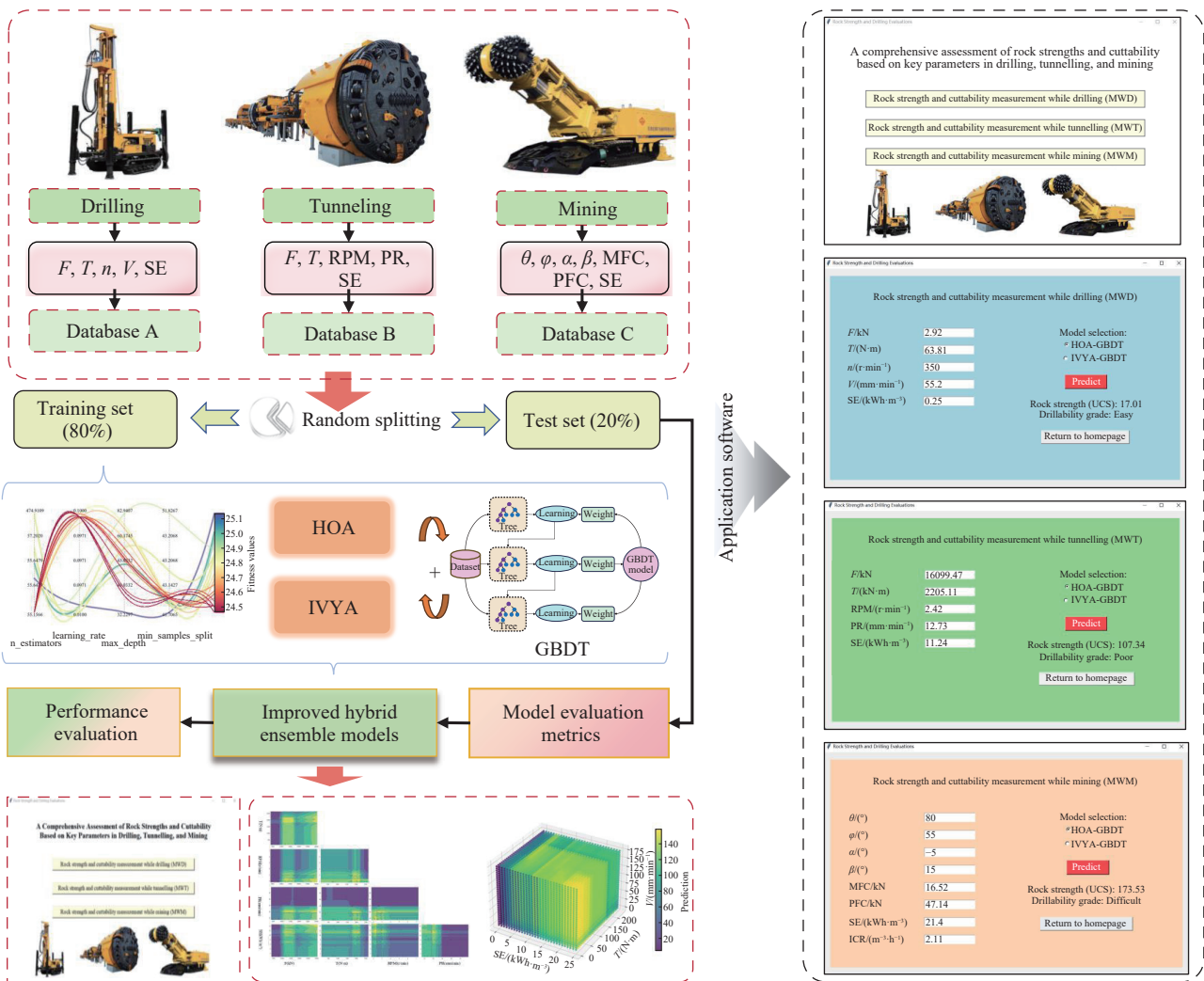


图 18 矿岩特性“三随”(随钻/随采/随掘)原位监测方法^[48]

Fig.18 In situ monitoring method of ore and rock characteristics while drilling/mining/while excavating^[48]

开发地下矿岩数字模型虚拟开采和采切参数容差互馈自适应优化方法, 提出矿岩特性感知、硬

岩“降危增割”、破岩智能调控协同非爆机械开采模式; 针对增割前后的深部坚硬矿体, 开展基于悬

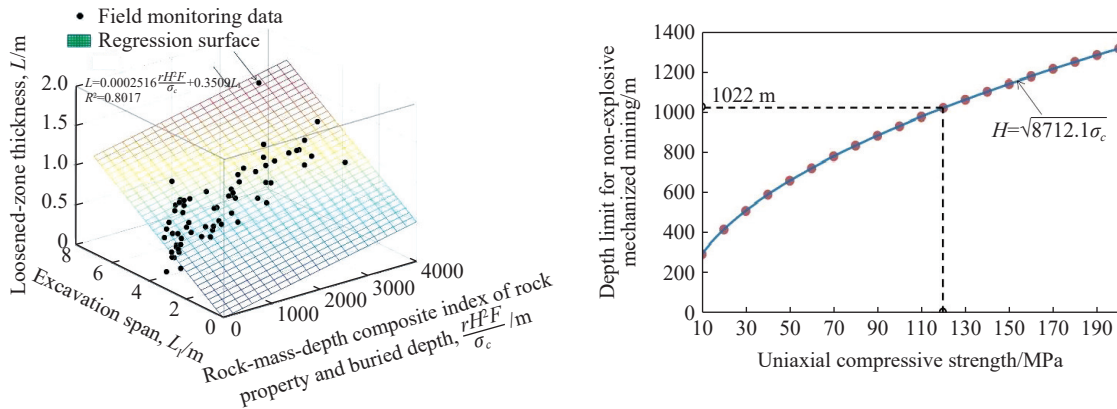


图 19 非爆机械开采适用性判据^[49]

Fig.19 Applicability criterion for non-explosive mechanized mining^[49]

臂式掘进机和挖掘机载高频冲击破碎头等非爆机械破岩方法的采矿现场试验, 增割优化后多截齿旋转切割破岩方法的单机采矿效率从 32.6 t·h⁻¹ 提高到 107.7 t·h⁻¹^[18-19,50], 液压高频冲击破岩方法的单机采矿效率从 49.6 t·h⁻¹ 提高到 158.2 t·h⁻¹, 矿石损

失率降至 10% 以下, 贫化率降至 5% 以下, 实现深部坚硬矿体的非爆破机械连续开采(图 20), 建立集“高效破岩-能量调控-灾害防控”于一体的深部硬岩开采技术体系, 为深部矿产资源的安全高效开发提供了可推广的工程范式和技术标准。

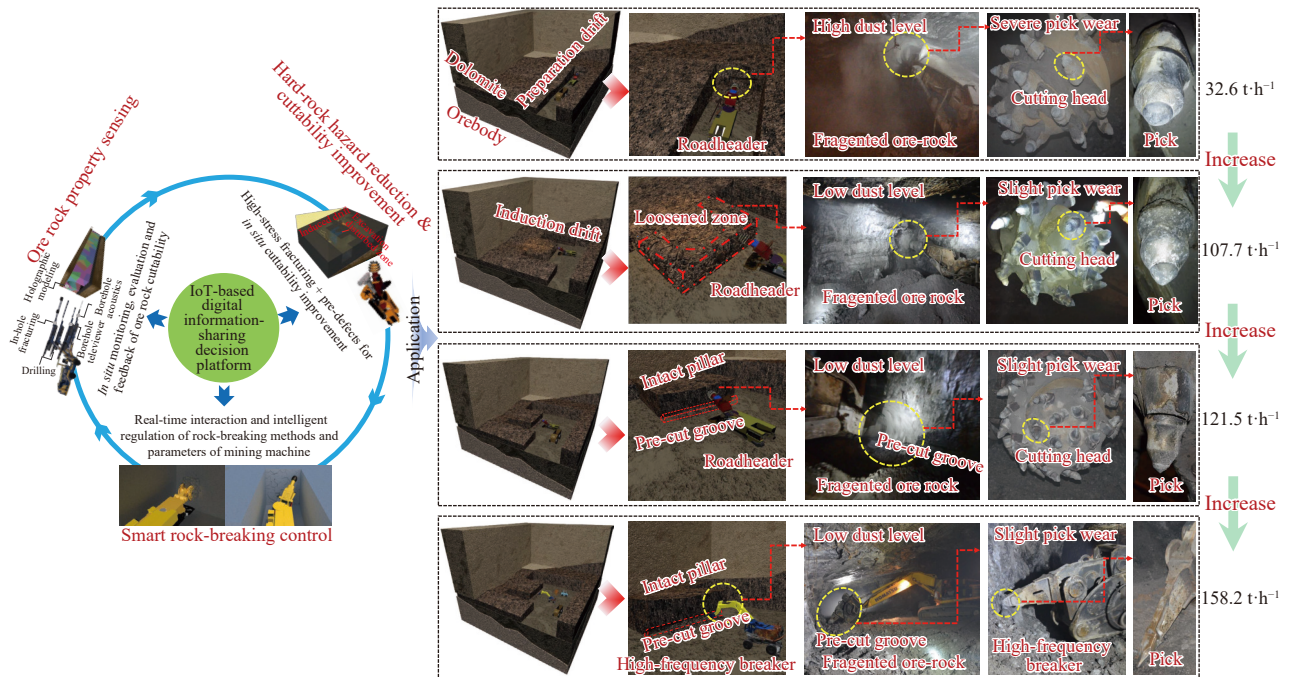


图 20 深部硬岩矿体非爆机械开采实践^[19]

Fig.20 Non-blast mechanized mining practice for deep hard rock ore bodies^[19]

3 深部硬岩非爆机械连续开采展望

3.1 破岩刀具

如图 21 所示(图中 HVOF 为超音速火焰喷涂技术, CVD 为化学气相沉积技术), 提高破岩刀具性能, 需要从刀具材质与结构上进行优化. 掘进机刀盘以超高强钢为梯度基体, 通过界面冶金复合工艺与 WC-Co 硬质合金刃口(硬度 ≥ 1500 HV)实

现跨尺度强韧化匹配, 配套的截齿采用钨钴硬质合金(YG 系列, 1400 ~ 1600 HV)与金刚石复合片(PDC)分级配置, 其中梯度结构截齿通过钢基-WC 梯度设计(表层 1800 HV, 芯部韧性 ≥ 100 J·cm⁻²), 可显著提升抗冲击疲劳性能. 表面强化体系融合激光熔覆 Ni60-WC 涂层(62 ~ 65 HRC)与等离子喷涂 WC-Co 耐磨层(孔隙率 ≤ 1.5%), 可协同抵抗 200 J 级

冲击载荷与低磨损工况 (SiO_2 磨蚀率 $< 0.15 \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$). 结构设计集成模块化分块拓扑优化, 并嵌入光纤传感网络与微胶囊自修复系统 (损伤修复率 $> 85\%$), 实现动态载荷监测与损伤自主修复. 未来将通过数字孪生驱动的寿命预测模型、高熵

合金增材制造及生物仿生超硬材料的交叉融合, 推动刀具在极硬岩地层中的服役寿命大幅度提升, 掘进效率进一步优化, 同时钛基复合材料与预应力装配技术将进一步优化刀具的功率密度与对深部地质的适应性.

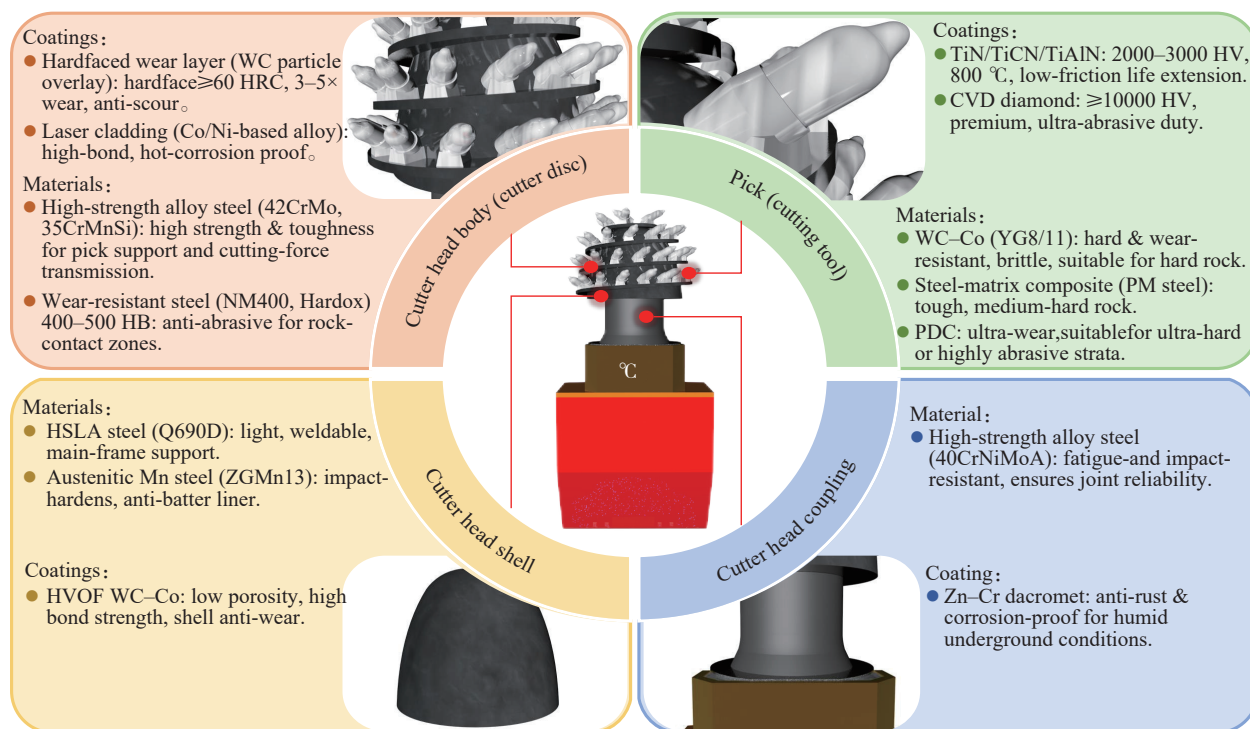


图 21 破岩刀具复合结构材料及涂层

Fig.21 Composite structural materials and coatings for rock-breaking tools

3.2 破岩刀盘

现有破岩设备如悬臂式掘进机依赖单向截割、滚筒采煤机受限于旋转切削路径单一、TBM 全断面推进缺乏局部灵活性、天井钻机仅适用垂直钻进、液压锤/高频锤冲击载荷能耗高, 以及 MC51 切盘摆动幅度固定, 并且普遍存在破岩载荷模式单一、地质适应性不足的问题. 因此, 综合考虑破岩刀盘结构与破岩载荷作用方式, 设计 3 种新型破岩装备概念样机如图 22 所示.

图 22(a)所示的基于多模态联合破岩的硬岩机械化掘采装备融合了冲击、滚压、截割、辅助破岩四种破岩方式, 利用开槽装置切割预切槽, 为破岩提供自由面, 多源诱导致裂增割辅助破岩作用臂能够搭载水力、热力等辅助破岩装置, 三级变锥面刀盘集合了柱齿、滚刀、截齿、高速子弹四种破岩器具, 具备了开挖自由面、冲击/辅助预裂、多刀具联合破岩的多模态破岩方式. 该装备具有机动灵活、适应性高的特点, 尤其适用于硬岩掘进, 能

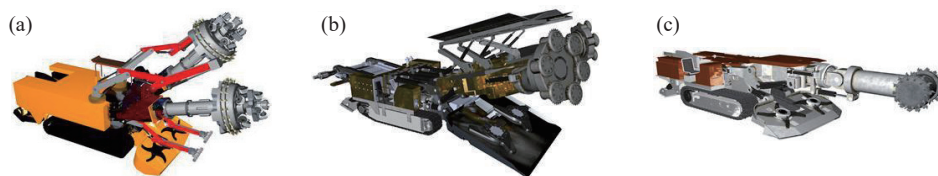


图 22 破岩刀具与装备. (a) 多模态联合破岩式硬岩机械化掘采装备^[51]; (b) 多刀具圆周阵列切盘摆动式破岩装备^[52]; (c) 镐形截齿高频微幅振动破岩装备^[53]

Fig.22 Rock-breaking tools and equipment: (a) hard rock multi-source mutagenic cutting and multi-modal non-explosive mechanized mining and excavation equipment^[51]; (b) multi-tool circular array disc swing type hard rock mining equipment^[52]; (c) mechanical mining and excavation equipment for non-explosive mining of ore and rock based on reciprocating vibration rock breaking^[53]

显著提高现阶段硬岩掘进效率^[51]。图 22(b)所示多刀具圆周阵列切盘摆动式破岩装备则融合了复合破岩机制,通过水平转盘与竖直摆臂实现切割臂的多自由度空间定位,结合圆周阵列刀具的高频摆动与旋转复合运动,形成冲击-切削多模式协同破岩,并且配备弹性缓冲与多维传感器实时反馈系统,可动态调节摆动幅度、频率及切入角度,实现硬岩/软岩的自适应破岩^[52]。图 22(c)所示镐型截齿高频微幅振动破岩装备,相邻两组镐型截齿呈反向螺旋式布置,结合特定的驱动组件使刀头实现高频微幅振动,并搭载多维传感器实时反馈系统,可动态调节振动频率、方向,以适应复杂岩体的岩性变化^[53]。

3.3 非爆机械连续开采装备

连续化采掘是矿山规模化生产的重要保障,设计的多功能一体化连续开采装备作业示意图如图 23 所示。图 23(a)为开槽装置,利用其对岩体进行切割预切槽,为破岩创造自由面,提高破岩效率。图 23(b)为钻孔和劈裂一体化集成装备,其主要搭载钻孔钻机以及劈裂棒,钻孔的同时可以实现岩体特性的随钻监测,在钻孔完成后通过设备原位旋转在钻孔内伸缩劈裂棒进行精准劈裂,该设备可实现钻孔刚性劈裂以及地应力和岩体各向异性测定。图 23(c)为孔阵劈裂工况布置过程,通过合理的孔阵布置,借助水力压裂、液压劈裂、相变膨

胀劈裂、静态膨胀剂劈裂、电爆炸冲击波劈裂、微炸药劈裂等方法对掌子面岩体进行精准预裂,以实现硬岩的可控块状化致裂。图 23(d)为多源诱变致裂增割辅助破岩作用臂,其主要功能是搭载水力(高压水射流、磨料粒子水射流等)以及热力(微波、激光、高温火焰、等离子体、电脉冲、液氮射流等)等辅助破岩装置,对岩石进行靶向精准诱变改性致裂。图 23(e)为随采、随掘监测系统,基于随采、随掘实时采集的刀具推力、刀盘钻速、扭矩、掘进速率等多元参数,通过深度学习模型对岩体强度、可切割性以及质量等级等矿岩特性参数进行在线预测,实现岩石特性的原位智能监测与动态分级。图 23(f)为岩体不连续结构、飞石、粉尘监测装置。图 23(g)为块度在线监测仪,块度监测仪位于带式输送机中部,由两台数字相机构成,粉尘、飞石检测主要集成于设备前部,直接观察工作面开采作业现场,其主要功能是对岩体裂纹、飞石、岩块块度以及粉尘精准识别及统计,将宏观现象通过数字图像以及深度学习技术进行详细分析,进而反馈岩体性质和实时调整掘进参数,实现破岩原态交互。图 23(h)为矿渣转运,其相关设备包括前部的刮板输送机、尾部的带式输送机以及后续矿车运输,是矿石运输的“桥梁”,其主要作用是将工作面开采已落矿石进行转运至带式输送机,进行连续性运输。同时对筛选出的废石、矿渣或矸



图 23 多功能一体化连续开采装备作业示意图度监测

Fig.23 Schematic of multifunctional integrated continuous mining equipment

石进行井下铲装转运, 运输至采空区进行井下充填, 实现废石不上井, 推动高效绿色连续性开采作业。

3.4 非爆机械连续开采工艺

图 24 为非爆机械连续开采工艺流程, 包含矿岩特性原位监测(S1)、矿岩原位改性(S2)、破岩原态交互(S3)和环境原场监控(S4)。矿岩特性原位监测阶段, 基于一体化台车集成的多方位刚性压裂地应力计、孔内电视、声波探头与随钻传感器协同作业, 实时同步采集矿岩力学参数、数字图像信息及地应力数据, 基于数字孪生与虚拟现实融合技术, 建立开采扰动区矿岩材质-结构-应力多元物理场全息数字模型。结合图像处理算法、机器视觉和深度学习方法, 开发具有原位采集、智能识别、三维重构与自动分级功能的矿岩智能评价分级系统。该系统可实现矿岩可切割性及质量等级的实时在线评估, 完成岩体材质、结构、应力、力学特性及可切割性多维度工程特性的原位精准量化表征。矿岩原位改性阶段, 采用高应力诱导致

裂-孔阵劈裂协同控制技术, 通过高应力场与高压水等改性介质的耦合作用, 实现深部硬岩的精准靶向诱导弱化改性。在显著提升矿岩可切割性的同时, 通过超前能量释放有效控制了岩爆风险。破岩原态交互阶段, 基于矿岩特性随采、随掘感知与机械破岩参数优化, 构建机械化采掘自适应组织模式, 实现机械破岩参数的实时自适应反馈调控。环境原场监控阶段, 构建采掘环境多参数全时空监测体系, 集成通风质量、粉尘浓度、环境温度、岩渣与飞石等伴生介质的实时在线监测网络, 并与采掘装备智能控制系统、环境监测控制系统形成多向协同信息流, 实现复杂地质环境的“超前感知-智能破岩-适配装运-协同运维”的全流程一体化闭环采掘智能管控系统。上述全过程依托大数据智能云平台耦合, 打造“感知-评价-决策-执行-调控-反馈”自组织机制, 实现采掘全流程“智慧感知-智慧决策-智能控制”的闭环耦合和深度融合, 驱动深部硬岩矿体全流程数字化智能开采。

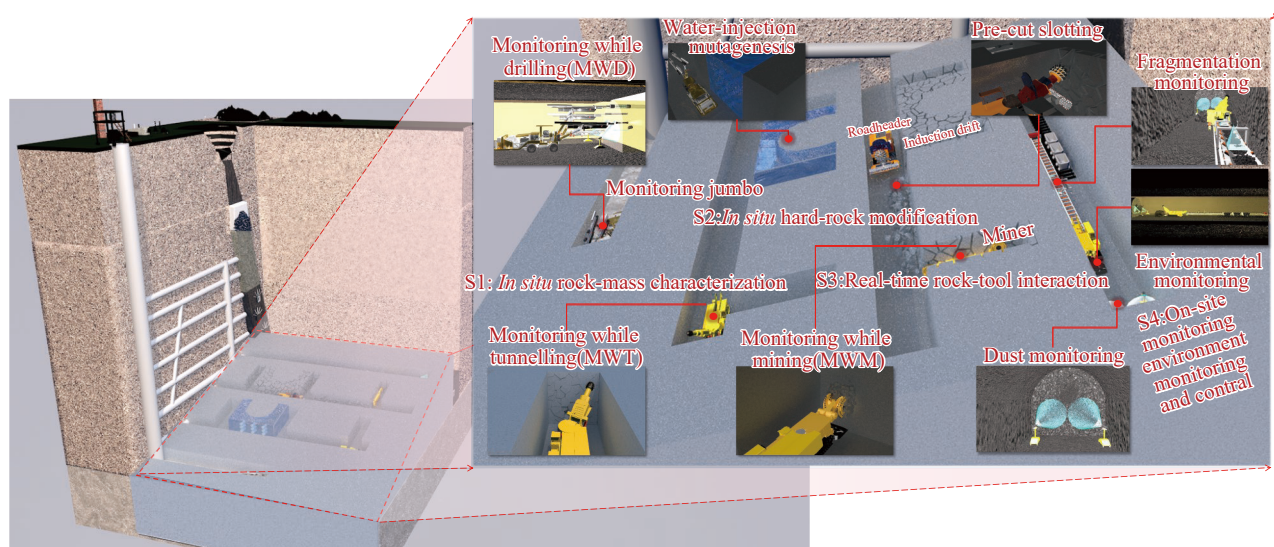


图 24 非爆机械连续开采工艺流程

Fig.24 Non-explosive mechanized continuous mining process

4 结论

本文提出了“深部硬岩靶向精准诱变改性”理论构想, 构建了深部硬岩“表征-改性-开采”的协同方法体系, 实现了深部硬岩矿体“降危”和“增割”的双效提质。具体研究结论如下:

(1) 构建了深部岩石力学特性表征与破裂特性判定方法, 提出了岩石多源动静载荷协同加载和非均匀梯度应力加载方法, 获得了岩石碎裂特性表征方法与模型, 探明了深部硬岩非线性力学行为和非常规破裂特征, 为深部硬岩的力学性质

研究提供了新途径。

(2) 阐明了深部采矿应力条件下机械刀具与高应力耦合破岩机理, 明晰了深部硬岩高应力诱导致裂机制, 提出了深部硬岩“降危增割”双效诱变改性方法, 为提高深部硬岩可切割性、降低岩爆风险提供了关键理论与方法支撑, 有助于优化开采工艺参数。

(3) 构建了非爆机械开采适用性判据模型, 提出了矿岩特性感知、硬岩“降危增割”、破岩智能调控协同开采方法, 实践验证了深部硬岩矿体非

爆机械开采的可行性, 为深部硬岩的安全、高效开采提供了技术保障, 推动了深部硬岩开采技术的连续化和智能化发展。

展望深部硬岩非爆机械连续开采研究方向。在上述研究基础上, 亟需开展深部硬岩矿体非爆连续开采基础理论和关键技术研究, 提出矿岩特性原位多元感知与全息建模方法, 研发高应力硬岩新型连续破岩方法与刀盘, 开发深部硬岩矿体非爆连续破碎与智能调控技术体系, 阐明孔阵脉冲水力压裂等预裂方法与深部高应力的耦合致裂改性机理, 揭示诱变改性过程对深部异构岩体高储能的调控机制, 建立深部硬岩矿体精准靶向诱变改性技术体系, 实现深部硬岩高储能诱导利用和灾变控制, 为深部硬岩矿体安全高效开采提供关键理论与技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Xie H P. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory. *J China Coal Soc*, 2019, 44(5): 1283
(谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283)
- [2] Wang L C, Shao A L, Qu F M, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines. *Chin J Eng*, 2025, 47(5): 971
(王连成, 邵安林, 曲福明, 等. 金属矿山开采技术发展现状与展望. 工程科学学报, 2025, 47(5): 971)
- [3] Wang Y, Wu A X, Yang J, et al. Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines. *Chin J Eng*, 2023, 45(8): 1281
(王勇, 吴爱祥, 杨军, 等. 深部金属矿开采关键理论技术进展与展望. 工程科学学报, 2023, 45(8): 1281)
- [4] Li X B, Zhou J, Wang S F, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources. *Chin J Nonferrous Met*, 2017, 27(6): 1236
(李夕兵, 周健, 王少锋, 等. 深部固体资源开采评述与探索. 中国有色金属学报, 2017, 27(6): 1236)
- [5] Wang S F, Zhou Z L, Shi X L. Bottleneck and coping strategy for the exploitation of strategic mineral resources. *Nonferrous Met (Mine Sect)*, 2025, 77(3): 1
(王少锋, 周子龙, 石鑫垒. 战略性矿产资源开发瓶颈与应对策略. 有色金属(矿山部分), 2025, 77(3): 1)
- [6] Cai M F, Xue D L, Ren F H. Current status and development strategy of metal mines. *Chin J Eng*, 2019, 41(4): 417
(蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略. 工程科学学报, 2019, 41(4): 417)
- [7] Wang S F, Sun L C, Zhou Z L, et al. Development and prospect of non-blasting rock breakage theory and technology. *Chin J Nonferrous Met*, 2022, 32(12): 3883
(王少锋, 孙立成, 周子龙, 等. 非爆破岩理论和技术发展与展望. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3883)
- [8] Wang S F, Wu Y M, Zhou Z L. Development and prospect of drilling and mechanized excavation of rock under complex deep underground/sea/space conditions. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2023, 54(3): 819
(王少锋, 吴毓萌, 周子龙. “三深”复杂环境下岩石钻进与机械化开挖技术发展及展望. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 819)
- [9] Duan L Z, Xu G Y, Zhu C Z. Numerical simulation investigation for the development of the rock fracture area in dynamic indentation. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 1998, 29(5): 425
(段乐珍, 徐国元, 朱成忠. 冲击破岩时破碎区扩展规律数值模拟. 中南工业大学学报, 1998, 29(5): 425)
- [10] Liao Z Y, Liang Z Z, Tang C N, et al. Numerical simulation of rock fracture mechanism induced by a drill bit under combined dynamic and static loading. *Rock Soil Mech*, 2013, 34(9): 2682
(廖志毅, 梁正召, 唐春安, 等. 动静组合作用下刀具破岩机制数值分析. 岩土力学, 2013, 34(9): 2682)
- [11] Liang Z Z, Yu Y, Tang S B, et al. Numerical modeling of rock fracture mechanism under disc cutters and associated cutter spacing optimization. *J Min Saf Eng*, 2012, 29(1): 84
(梁正召, 于跃, 唐世斌, 等. 刀具破岩机理的细观数值模拟及刀间距优化研究. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 84)
- [12] Sun J S, Chen M, Chen B G, et al. Numerical simulation of influence factors for rock fragmentation by TBM cutter. *Rock Soil Mech*, 2011, 32(6): 1891
(孙金山, 陈明, 陈保国, 等. TBM滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究. 岩土力学, 2011, 32(6): 1891)
- [13] Zhang K, Xia Y M, Xu Z J. Effects of confining pressure and cutting sequence on the rock-breaking mechanism by TBM cutter. *China Civ Eng J*, 2011, 44(9): 100
(张魁, 夏毅敏, 徐孜军. 不同围压及切削顺序对TBM刀具破岩机理的影响. 土木工程学报, 2011, 44(9): 100)
- [14] Copur H, Bilgin N, Balci C, et al. Effects of different cutting patterns and experimental conditions on the performance of a conical drag tool. *Rock Mech Rock Eng*, 2017, 50(6): 1585
- [15] Pan Y C, Liu Q S, Peng X X, et al. Full-scale rotary cutting test to study the influence of disc cutter installment radius on rock cutting forces. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51(7): 2223
- [16] Xu H G, Geng Q, Sun Z C, et al. Full-scale granite cutting experiments using tunnel boring machine disc cutters at different free-face conditions. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2021, 108: 103719
- [17] Yu H G, Tao J F, Qin C J, et al. A novel constrained dense convolutional autoencoder and DNN-based semi-supervised method for shield machine tunnel geological formation recognition. *Mech Syst Signal Process*, 2022, 165: 108353
- [18] Li X B, Yao J R, Du K. Preliminary study for induced fracture and non-explosive continuous mining in high-geostress hard rock

- mine—a case study of Kaiyang phosphate mine. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(6): 1101
(李夕兵, 姚金蕊, 杜坤. 高地应力硬岩矿山诱导致裂非爆连续开采初探——以开阳磷矿为例. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1101)
- [19] Wang S F, Sun L C, Huang L Q, et al. Non-explosive mining and waste utilization for achieving green mining in underground hard rock mine in China. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2019, 29(9): 1914
- [20] Zhou Z L, Dong J P, Wang S F, et al. Typical difficulties and improvement measures in TBM excavation of hard rock tunnels. *Chin J Nonferrous Met*, 2023, 33(4): 1297
(周子龙, 董晋鹏, 王少锋, 等. 硬岩隧道 TBM 施工中的典型掘进破岩难题与对策. *中国有色金属学报*, 2023, 33(4): 1297)
- [21] Zhao E X. Development trend of diamond drill bit. *Superhard Mater Eng*, 2015, 27(1): 52
(赵尔信. 金刚石钻头的发展趋势. *超硬材料工程*, 2015, 27(1): 52)
- [22] Wu X F. Application of mechanical mining technology in mines of Kailin Group. *Min Technol*, 2012, 12(6): 7
(吴西富. 机械采矿技术在开磷集团矿山的应用. *采矿技术*, 2012, 12(6): 7)
- [23] Yao J R. *Non-explosive Continuous Mining Theory and Technology Research in Deep Phosphate Mine* [Dissertation]. Changsha: Central South University, 2013
(姚金蕊. 深部磷矿非爆连续开采理论与工艺研究[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2013)
- [24] Zhou Z L, Wang S F, Cai X, et al. Control for rock dynamic disasters induced by blasting mining disturbance under heterogeneous condition in deep metal mines. *Chin J Nonferrous Met*, 2025, 35(1): 306
(周子龙, 王少锋, 蔡鑫, 等. 深部金属矿异构环境爆破开采诱发岩体动力灾害防控. *中国有色金属学报*, 2025, 35(1): 306)
- [25] Yang D L, Li J P, Wang L P, et al. Experimental and theoretical design for decreasing wear in conical picks in rotation-drilling cutting process. *Int J Adv Manuf Technol*, 2015, 77(9): 1571
- [26] Dewangan S, Chattopadhyaya S. Characterization of wear mechanisms in distorted conical picks after coal cutting. *Rock Mech Rock Eng*, 2016, 49(1): 225
- [27] Zhao G F, Jiang B Y, Rui F X, et al. TBM tunneling performance evaluation model in complex rock masses based on numerical simulation. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2023, 54(3): 984
(赵高峰, 姜宝元, 芮福鑫, 等. 基于数值仿真的复杂岩体 TBM 掘进性能评估模型. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54(3): 984)
- [28] Gehring K H. Design criteria for TBM's with respect to real rock pressure//Schulter A, Wagner H. *Tunnel Boring Machines: Trends in Design and Construction of Mechanical Tunnelling*. London: CRC Press, 1996: 43
- [29] Innaurato N, Oggeri C, Oreste P P, et al. Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement. *Rock Mech Rock Eng*, 2007, 40(5): 429
- [30] Kaiser P K. Rock mechanics considerations for construction of deep tunnels in brittle rock// *Proceedings of the ISRM International Symposium 2006 and the 4th Asian Rock Mechanics Symposium*. Singapore, 2006: 47
- [31] Yin L J, Gong Q M, Ma H S, et al. Use of indentation tests to study the influence of confining stress on rock fragmentation by a TBM cutter. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2014, 72: 261
- [32] Ma H S, Gong Q M, Wang J, et al. Study on the influence of confining stress on TBM performance in granite rock by linear cutting test. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2016, 57: 145
- [33] Yin L J, Gong Q M, Zhao J. Study on rock mass boreability by TBM penetration test under different *in situ* stress conditions. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2014, 43: 413
- [34] Li X B, Wang S F, Wang S Y. Experimental investigation of the influence of confining stress on hard rock fragmentation using a conical pick. *Rock Mech Rock Eng*, 2018, 51(1): 255
- [35] Wang S F, Shi X L, Zhou Z L, et al. Practice and prospects for non-explosive mechanized mining in deep hard rock based on rockburst-risk reduction and cuttability improvement using induced-mutation modification. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2025, 56(3): 979
(王少锋, 石鑫垒, 周子龙, 等. 深部硬岩诱变改性降低增割非爆机械化采掘实践与展望. *中南大学学报(自然科学版)*, 2025, 56(3): 979)
- [36] Wang S F, Tang Y, Cao R L, et al. Regressive and big-data-based analyses of rock drillability based on drilling process monitoring (DPM) parameters. *Mathematics*, 2022, 10(4): 628
- [37] Wang S F, Wu Y M, Cai X, et al. Strength prediction and drillability identification for rock based on measurement while drilling parameters. *J Cent South Univ*, 2023, 30(12): 4036
- [38] Wang S F, Wu Y M, Shi X L. Non-explosive mechanized and intelligent mining/heading in underground mine. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2024, 34(1): 265
- [39] Wang S F, Li X B, Yao J R, et al. Experimental investigation of rock breakage by a conical pick and its application to non-explosive mechanized mining in deep hard rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2019, 122: 104063
- [40] Hudson J A, Crouch S L, Fairhurst C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines: a review with reference to rock failure. *Eng Geol*, 1972, 6(3): 155
- [41] Du K, Yang C Z, Su R, et al. Failure properties of cubic granite, marble, and sandstone specimens under true triaxial stress. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2020, 130: 104309
- [42] Du K, Li X F, Tao M, et al. Experimental study on acoustic emission (AE) characteristics and crack classification during rock fracture in several basic lab tests. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2020, 133: 104411
- [43] Wang S F, Yin J J, Pi Z Z, et al. Automatic detection and characterization of discontinuity traces and rock fragment size

- distribution using a digital image processing method. *Measurement*, 2024, 228: 114343
- [44] Yin J J, Wang S F, Shi L W, et al. Image-based dust quantification: A novel approach using texture and color features. *Environ Pollut*, 2025, 375: 126309
- [45] Wang S F, Li X B, Du K, et al. Experimental investigation of hard rock fragmentation using a conical pick on true triaxial test apparatus. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2018, 79: 210
- [46] Du K, Bi R Y, Sun Y, et al. Failure behaviors of granitic rocks induced by point/local loads under biaxial compression stress state. *Acta Geotech*, 2023, 18(9): 4645
- [47] Wang S F, Huang L Q, Li X B. Analysis of rockburst triggered by hard rock fragmentation using a conical pick under high uniaxial stress. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2020, 96: 103195
- [48] Wang M, Mitri H S, Zhao G Y, et al. Data-based assessment of rock strengths and cuttability using the monitored parameters while drilling, tunneling, and mining. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2025, 165: 106901
- [49] Wang S F, Li X B, Wang S Y, et al. Fragmentation characteristics of deep hard rock and improvement for rock cuttability. *Chin J Nonferrous Met*, 2022, 32(3): 895
(王少锋, 李夕兵, 王善勇, 等. 深部硬岩截割特性及可截割性改善方法. *中国有色金属学报*, 2022, 32(3): 895)
- [50] Wang S F, Li X B, Gong F Q, et al. Breakage characteristics and mechanized mining experiment in deep hard rock. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2021, 52(8): 2772
(王少锋, 李夕兵, 宫凤强, 等. 深部硬岩截割特性与机械化破岩试验研究. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(8): 2772)
- [51] Wang S F, Shi J L, Shi X L, et al. *Hard Rock Multi-Source Mutagenic Cutting and Multi-Modal Non-explosive Mechanized Mining and Excavation Equipment and Technology*: China Patent, CN120402070A. 2025-08-01
(王少锋, 石建龙, 石鑫垒, 等. 硬岩多源诱变增割与多模态非爆机械化采掘装备及工艺: 中国专利, CN120402070A. 2025-08-01)
- [52] Wang S F, Shi J L. *A Multi-Tool Circular Array Disc Swing Type Hard Rock Mining Equipment and Mining Method*: China Patent, CN120007237A. 2025-05-16
(王少锋, 石鑫垒. 一种多刀具圆周阵列切盘摆动式硬岩采掘装备及采掘方法: 中国专利, CN120007237A. 2025-05-16)
- [53] Wang S F, Nie W, Shi X L. *Mechanical Mining and Excavation Equipment and Methods for Non-explosive Mining of Ore and Rock Based on Reciprocating Vibration Rock Breaking*: China Patent, CN120291871A. 2025-07-11
(王少锋, 聂唯, 石鑫垒. 基于往复振动破岩的矿岩非爆机械化采掘装置及方法: 中国专利, CN120291871A. 2025-07-11)