

2021 年以来，实验室研究团队在科研、教学、承担国家项目、发表学术论文等方面取得了较大的进展，在实验室主要研究方向上取得了较好的创新性成果。2021 年，实验室共发表 SCI 论文 154 篇、EI 论文 36 篇，授权发明专利 71 件，获得包括江苏省科技进步奖、煤炭工业协会科技进步奖在内的省部级与行业科技奖励 17 项。

本年度实验室主要研究方向取得的创新性成果包括如下：

1、深部煤炭资源开采智能感知理论与技术体系

在“科学采矿”和“智能精准开采”等理念的指导下，依托江苏省优势学科建设项目、国家“863 计划”项目、国家自然科学基金项目、国家安监总局重大事故防治关键技术项目及一批企业合作项目，针对煤矿开采基础信息采集传感不全面、可靠性差、灵敏度低及安全决策技术落后等问题，建立了智能工作面开采信息多参量精准感知与安全决策关键技术体系，提出了基于光纤光栅智能感知技术的大容量、准分布传感网络拓扑结构，构建了多参量光纤光栅精准感知与安全决策系统架构，开展了多参量矿山感知与智能化决策系统在煤矿开采中的具体工程应用，研究成果为我国煤矿智能化开采的研究与应用提供重要监测手段和技术补充。取得如下成果：

1) 智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术体系

智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术体系（图 1）的基础理论是光纤光栅精准传感原理，关键是煤矿开采多参量信息的精准感知、信息分析处理与安全智能决策，核心是前端精度高、可靠性好的传感器，主要功能是实现工作面开采的巷道围岩状态感知、工作面三机姿态协同感知与安全决策。关键技术主要包括光纤光栅精准传感技术、煤矿开采环境多参量信息感知体系、光纤传感器设计封装技术、多源信息分析处理与融合传输、准分布式光纤传感网络拓扑结构、感知系统信息服务平台及安全智能决策技术等。

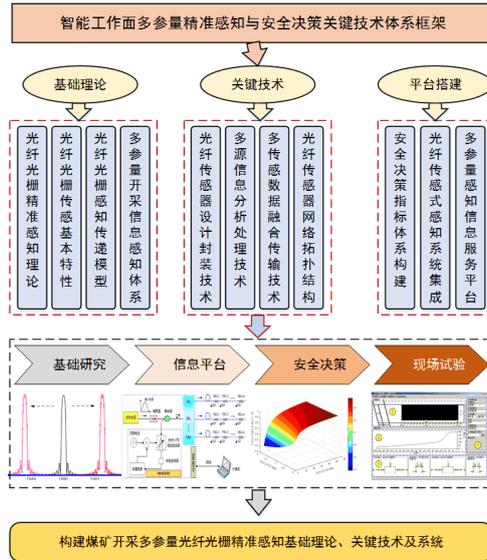


图 1 智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术体系

(1) 光纤光栅感知传递模型

针对光纤光栅传感器测量应变和被测基体真实应变不一致的问题，研究分析了光纤光栅与基体之间的感知传递特性，建立了表贴式光纤光栅感知传递结构模型（图 2），基于力学分析获得了基体表面粘贴光纤光栅应变感知传递因子，揭示了通过胶结层传递后光纤轴向应变的分布规律（图 3），确定了实际封装过程中光纤光栅在胶结层的合理位置，使基体结构应变充分感知并传递到光纤光栅。

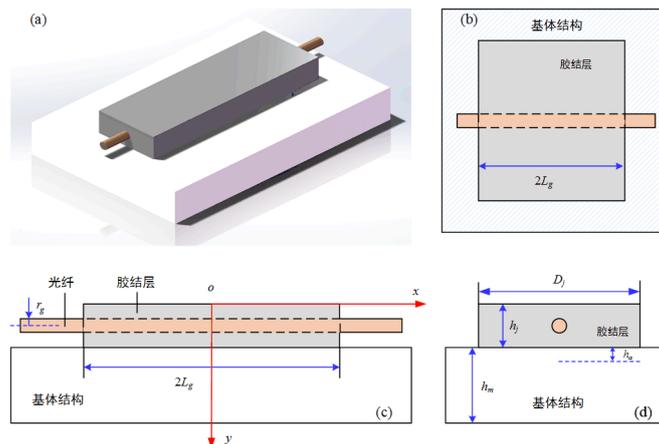


图 2 基体表贴光纤光栅感知传递模型

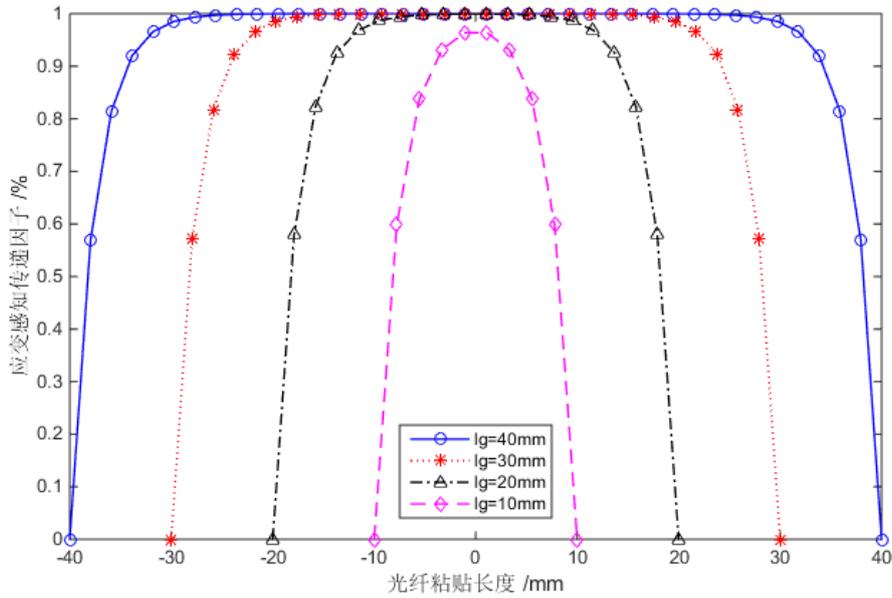


图 3 粘贴范围内光纤轴向应变分布规律

(2) 煤矿开采环境多参量信息感知体系

针对煤矿智能化开采过程的实际应用中，需对巷道、工作面环境及支护设备等多个物理参量进行精确感知，构建了光纤传感式煤矿开采多参量信息感知体系（图 4），不仅可以实现煤矿开采中多种参数的智能感知，还可以更加全面的体现煤矿开采环境的安全生产状态。自主研发了新型灵敏度高、可靠性好的光纤光栅矿用传感器对煤矿开采过程中巷道围岩安全状态信息全面感知，构建了光纤传感式巷道围岩状态信息智能感知系统，实现了巷道围岩安全实时监测和灾害预警。建立了光纤传感式工作面设备姿态智能感知系统，集成了智能工作面开采装备，实现了工作面“三机”姿态的实时感知与协同控制。

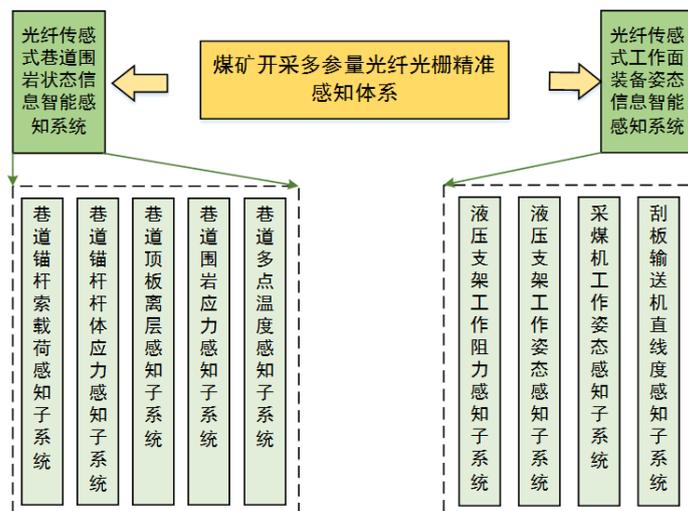


图 4 光纤传感式煤矿开采多参量信息感知体系

(3) 准分布式传感网络结构

基于自主研发的多参量 FBG 传感器，采用 WDM（波分复用）和 SDM（空分复用）的混合复用方法，建立了煤矿开采光纤光栅智能感知网络（图 5），通过切换光开关中不同的通道，实现了 FBG 传感器的空分复用，显著增大了系统中传感器容量，最终实现了系统多通道、大容量、多参量、准分布式的智能感知。

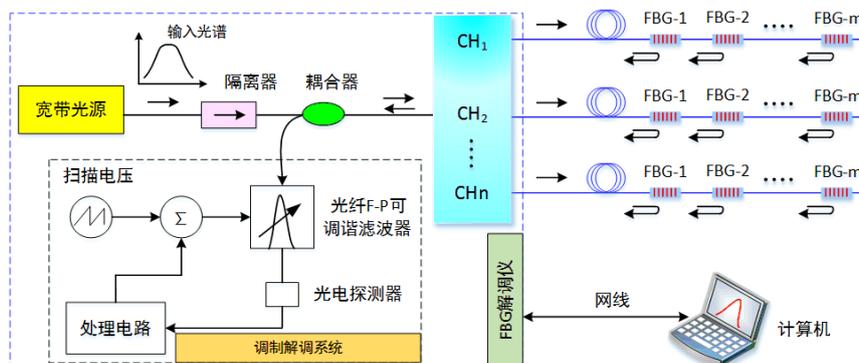


图 5 光纤光栅智能感知系统布置示意图

(4) 多参量精准感知与安全决策系统架构

智能工作面多参量光纤光栅精准感知与安全决策系统是在科学采矿和智能精准开采的理念指导下，利用自主研发的系列矿井多参量光纤光栅传感器与自主开发的监测系统软件、多源数据信息提取及决策，实现煤矿开采多参量信息智能感知及安全决策的新理论、新方法与技术。其系统架构主要包括数据采集与感知层、数据传输层、数据处理与管理层和安全决策与控制层（图 6）。

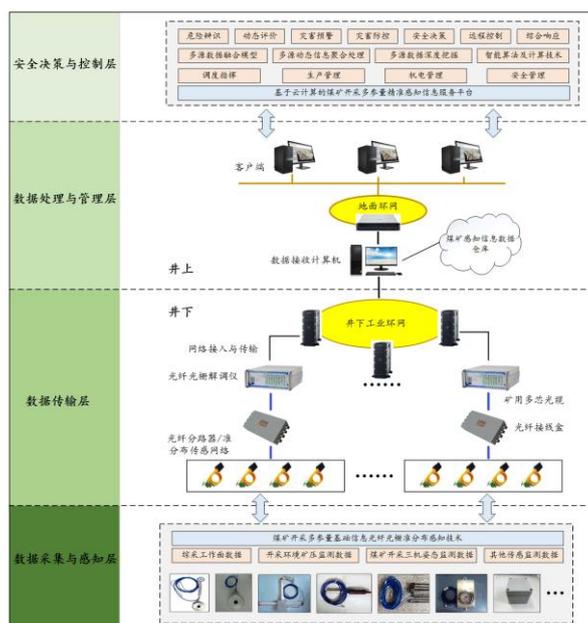


图 6 多参量光纤光栅精准感知与安全决策系统架构

2) 采煤机运行姿态高精度感知理论与技术体系

智能化开采是我国煤炭工业发展的需求和必然方向，基于三维空间尺度的采煤机运行姿态是实现智能化开采的必需性基础信息。采煤机运行姿态的精确感知不仅能为探知、预测智能化工作面的生产状态提供途径，而且能为采煤机自主调高、记忆割煤等智能控制过程提供基础信息。针对实时精确的采煤机运行姿态信息缺失的技术难题，引入捷联惯导技术，结合实验测试、误差补偿算法优化及单轴旋转调制等方法，以采煤机“惯性测量组件误差补偿——系统误差补偿算法——单轴旋转调制”为研究主线，深入研究了采煤机运行姿态高精度感知时的元件级、系统级与捷联惯导级三个层面（图7），提高了采煤机运行姿态的感知精度，为综采工作面的生产状态预测及采煤机智能化控制提供了理论基础与技术参考。

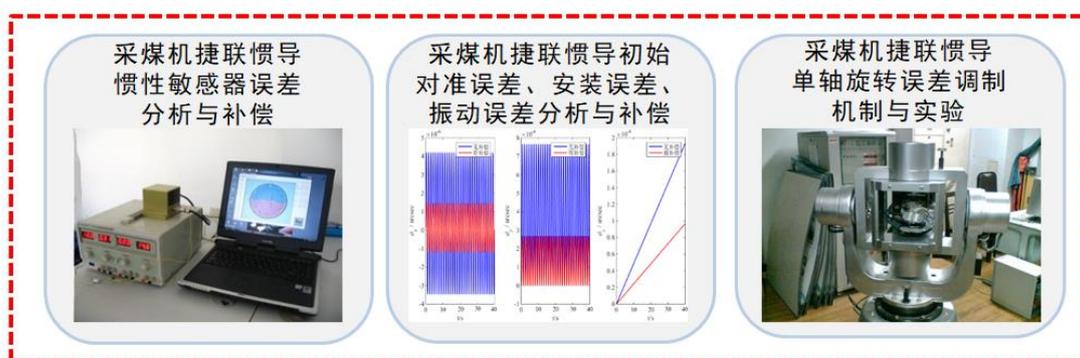


图7 采煤机运行姿态高精度感知研究方法

(1) 采煤机运行姿态感知误差分析与补偿

针对捷联惯导系统长航时的积累误差难以得到有效修正的缺陷，明确了捷联惯导系统主要误差项包括：惯性传感器误差、初始对准误差及安装误差，并对主要误差项进行了逐一补偿。针对采煤机的强振动环境对捷联惯导系统精度的影响，建立了采煤机振动力学模型，仿真获取了采煤机整机的振动响应特征（图8），有效抑制了采煤机振动引起的圆锥误差与划船误差。

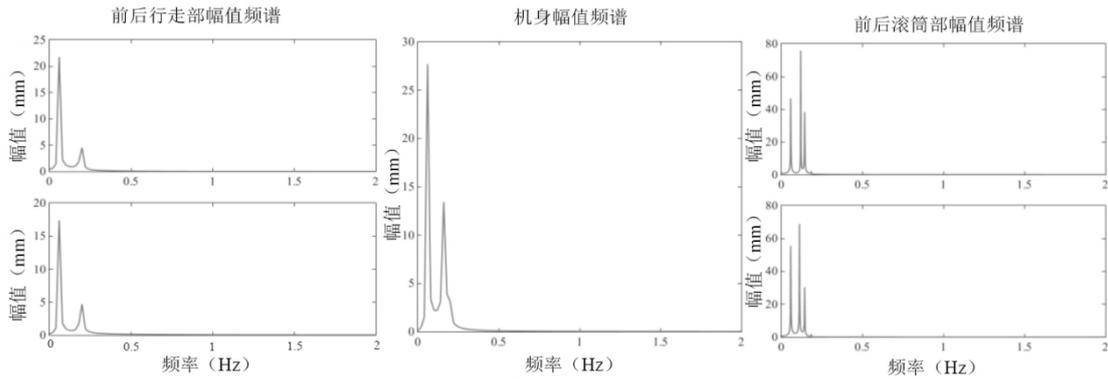


图 8 采煤机各个部件在 Z 轴方向的幅频特性

(2) 采煤机捷联惯导单轴旋转误差调制机理与技术

在无法进一步提升惯性传感器精度的条件下，提出了旋转调制误差自补偿技术，建立了实际转位机构的旋转模型，揭示了不同单轴旋转调制方案误差传播特性。基于不同单轴旋转调制方案的仿真结果，优选了最佳的旋转调制方案(图 9)，推导了四位置转停时间与转位机构角加速度和调制角速度有关的表达式，理论证明了该方案可以完全消除陀螺仪零偏漂移的影响。设计了单轴旋转误差调制实验方案，研究设定了最佳的旋转调制参数，验证了单轴旋转调制能够有效提高惯导系统的姿态感知精度。

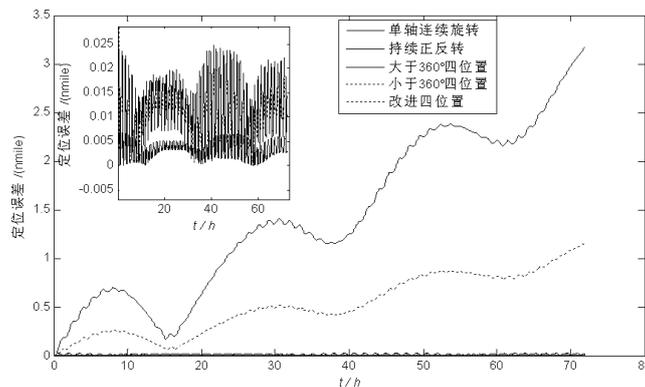


图 9 不同调制方案中陀螺仪零偏漂移引起的定位误差

2021 年度，本方向发表 SCI/EI 论文 3 篇，获得授权国家发明专利 4 件；获批国家自然科学基金青年基金项目 1 项、山西省重大专项课题 1 项、江苏省自然科学基金青年基金项目 1 项；获中国煤炭工业协会科技进步奖一等奖 1 项、江苏省科技进步二等奖 1 项、徐州市优秀专利项目奖 1 项；出版教材 2 部，专著 2 部。

2、深部围岩动力灾害控制理论与技术

在深部煤炭资源开采冲击矿压机理、监测预警与防治研究方面，依托国家自然科学基金及一批企业合作项目，围绕煤层分叉、不规则煤柱以及巨厚“红层”等复杂地质条件下的冲击矿压防治问题，研究了赵楼煤矿、运河煤矿煤层分叉区域冲击地压孕育机理、前兆信息特征以及防治关键技术；研究了东滩煤矿不规则煤柱区域煤柱破坏失稳机理、震源机制、应力场演变以及卸压关键技术参数；开展了东滩煤矿受巨厚红层影响的六采区矿震震源机制以及应力场反演工作，提出了东滩煤矿矿震的类型以及防治总体思路。上述研究为煤矿的冲击矿压防治与安全生产提供了有效保障。

（1）组合结构滑移失稳的多参量前兆信息特征研究

针对赵楼煤矿 5304 工作面和运河煤矿 C5301 工作面存在煤层分叉现象，开展了煤-夹矸-煤组合试样滑移失稳的实验室试验，发现了三种破坏失稳模型，揭示了组合结构滑移失稳的多参量前兆信息特征，现场分析了煤层分叉区域微震活动规律，开展了冲击地压危险的地震波主/被动 CT 反演，提出了分叉区“煤层注水+大直径卸压钻孔+深孔断顶”的冲击地压综合防治技术。

（2）断层区域不规则煤柱失稳破坏机理研究

针对赵楼煤矿 7301 工作面 and 东滩煤矿 14320 工作面冲击地压的监测预警难题，围绕断层、不规则煤柱和巷道交叉这三个关键因素，以现场调研与理论分析为指导、数值试验为核心，开展了断层区域不规则煤柱失稳破坏机理的研究，揭示了采动影响下煤柱变形破坏全过程的声发射、应力、变形等信息特征，现场开展了不规则煤柱区应力分布的地震波主/被动 CT 反演探测，可为煤矿采掘活动作用下不规则煤柱冲击地压的前兆信息研究提供借鉴。

（3）巨厚红层破断的矿震类型、震源机制研究

针对大范围巨厚红层下回采易诱发冲击矿压/矿震的现状，调研发现巨厚红层破断与否与工作面围岩应力演化及能量分布关系密切，据此开展了东滩煤矿六采区工作面开采过程中巨厚红层的稳定性、工作面的围岩应力演化特征及巨厚红层对工作面冲击矿压的影响三个方面的研究，初步提出了巨厚红层破断的矿震类型、震源机制以及应力场反演，研究成果可为大范围巨厚红层下回采诱冲/矿震机理研究及防治提供理论依据。

2021 年度，本方向发表 SCI/EI 论文 3 篇，授权发明专利 1 项，申请发明专利 2 项，获批国家自然科学基金青年基金项目 1 项，研究成果已在多个煤矿推广应用，取得显著的经济效益和社会效益。

3、矿井热害防治与地热资源开发

在矿井热害防治与地热资源开发方面，依托国家自然科学基金及一批企业合作项目，开展了高地温巷道地热水致灾机理、高温下裂隙岩体剪切滑移力学行为、高温岩体中天然裂隙对裂纹扩展的影响等方面的研究，初步揭示了地热涌水对巷道热湿环境的影响规律及高温下裂隙岩体的剪切滑移特性。

(1) 高地温巷道地热水致灾机理研究

采用自主研发的“高温井巷热湿环境物理相似模拟试验系统”，研究了地热涌水对巷道热湿环境的影响规律，主要结论：①随着涌水温度增加，巷道风流中干空气总焓差小幅度上升，湿空气总焓差非线性上升；②涌水流量对风流显热影响不大，对风流潜热影响较大，如图 10 所示；③涌水初期，涌水段处各点的湿空气焓差值依次降低，涌水流量不会明显改变巷道湿空气焓差的空间分布，如图 19；④当涌水温度为 80℃（或涌水流量为 200 ml/min）时，筒体末端的湿空气焓差值随时间增加明显激增。

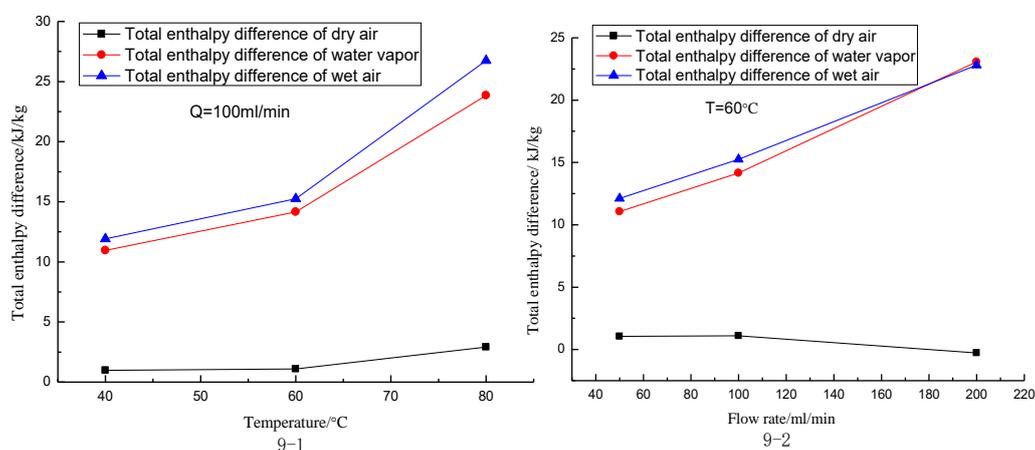


图 10 不同温度和流量下系统总焓差的变化曲线

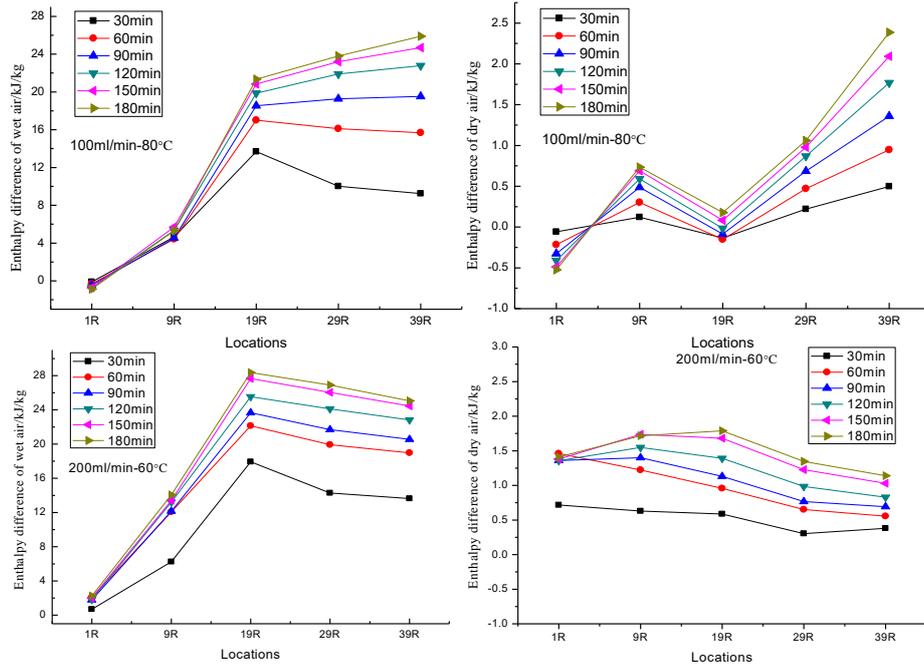


图 11 100-80 及 200-60 工况下涌水巷道的焓差空间分布特点

(2) 高温下裂隙岩体剪切滑移的力学及变形特性研究

开展了实时高温下花岗岩单轴压缩实验和裂隙岩体直剪实验,得到了高温岩石的力学性质及岩石破坏后的碎屑粒径分布规律,揭示了高温下裂隙岩体剪切滑移的力学及变形特性。主要结论:①温度升高会弱化岩石的强度和弹性模量。②高温加剧了岩石的破碎程度。随着温度的增高,中粒碎屑整体呈现降低趋势,细粒和微粒碎屑呈现增加趋势。③高温环境会提高岩体的水力剪切刺激效果和热储渗透性。

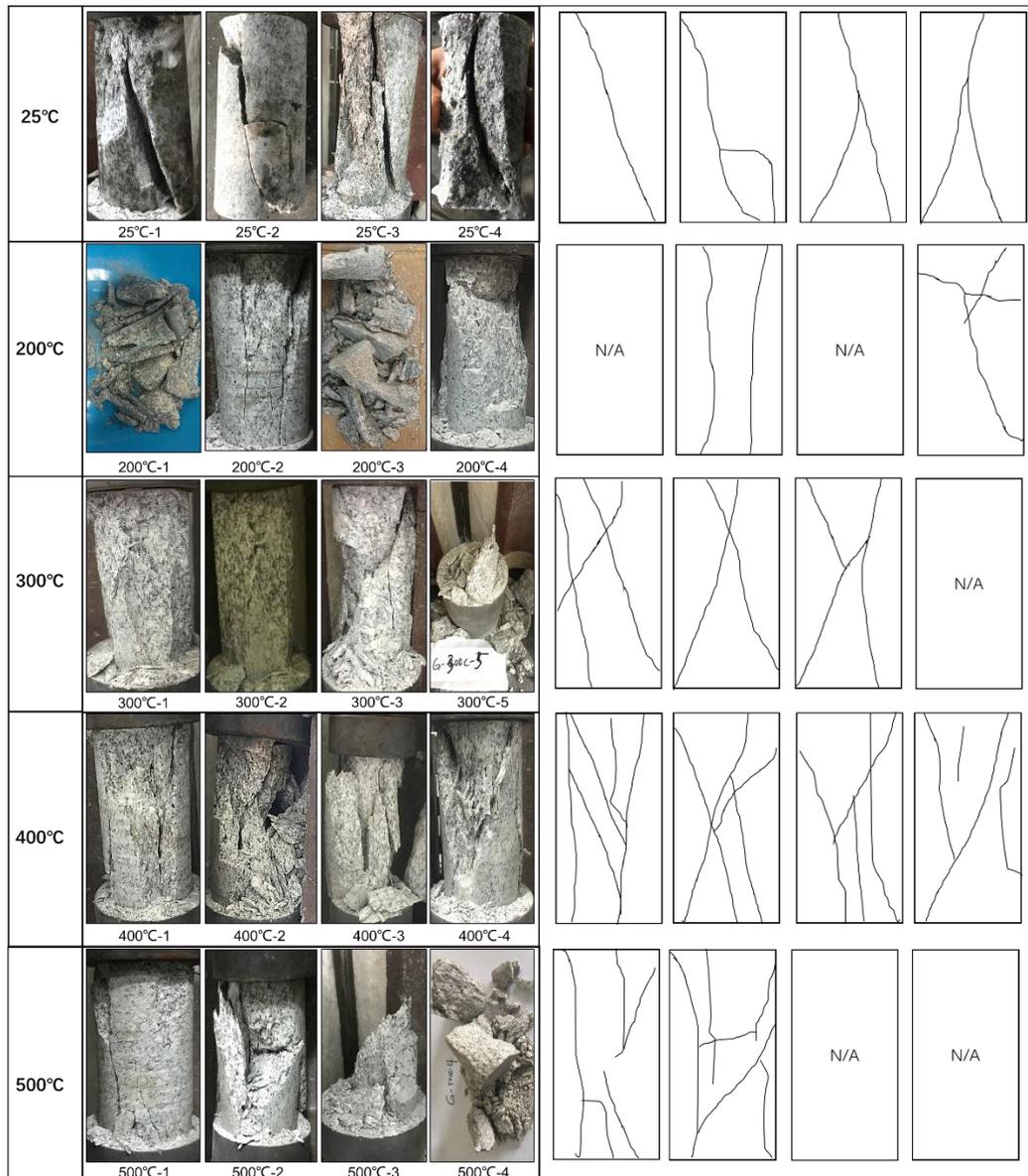


图 12 实时高温下花岗岩单轴压缩破坏形态

(3) 高温岩体中天然裂隙对裂纹扩展的影响研究

采用数值模拟方法，开展了含天然裂隙的半圆弯曲实验，研究了常温和高温（400°C）条件下不同胶结强度、角度、开度的天然裂隙对 I 型裂纹扩展的影响，如图 13 所示。主要结论：①常温和高温下含天然裂隙的岩石 I 型裂纹的发展过程包括裂纹起裂前的弹性阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹不稳定扩展阶段和天然裂隙影响阶段，如图 14 所示；②高温会对 I 型裂纹的发展产生影响，主要体现在两方面，一方面高温增加试样的塑形，降低裂纹扩展的能量；另一方面，试样内的热破裂将会改变试样内的应力分布，从而增加裂纹扩展的复杂度，但不会决定主裂纹扩展方向。

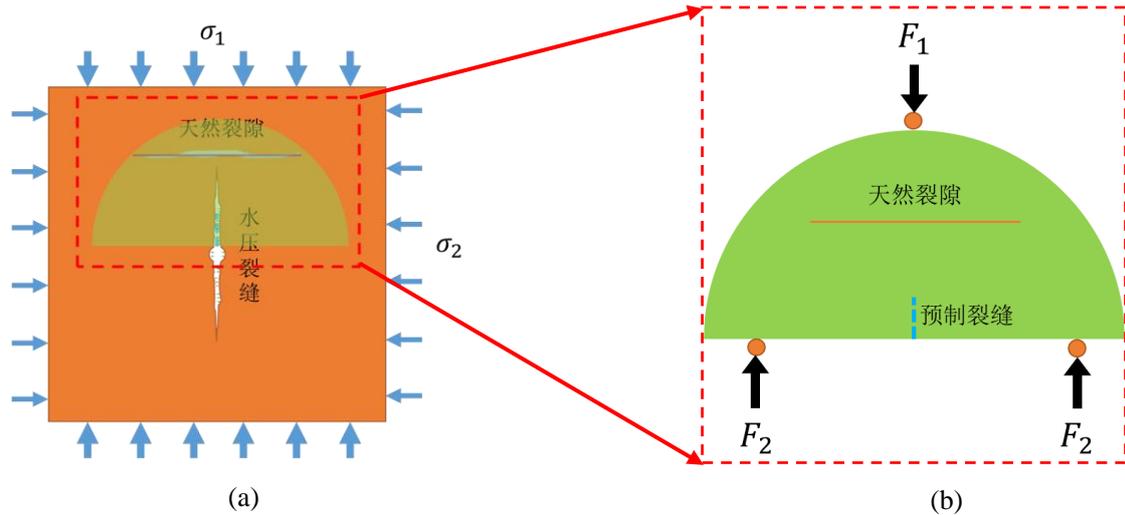


图 13 水压致裂模型示意图 (a) 水压致裂模型; (b) 半圆弯曲模型

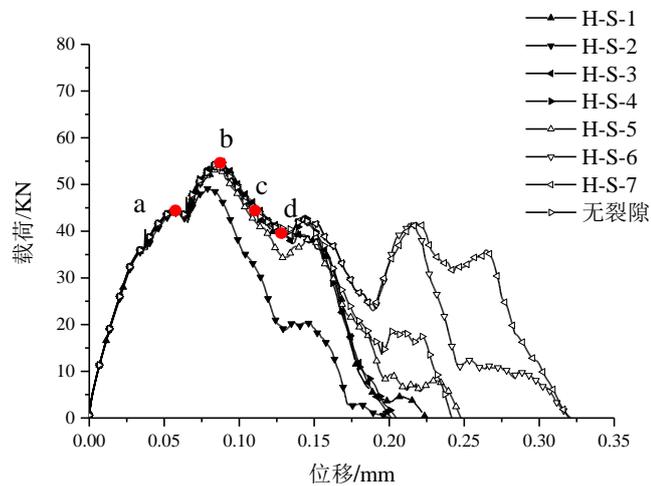


图 14 高温条件下半圆弯曲式样不同天然裂隙胶结强度荷载-位移曲线

2021 年度，本方向发表 SCI 论文 2 篇，EI 论文 1 篇，授权国家发明专利 2 项。

4、深部坚硬顶板动载防控理论与技术

在深部坚硬顶板动载防控理论与技术方面，依托国家联合基金重点项目、国家重点研发计划子课题、国家自然科学基金面上项目及一批校企合作项目，围绕国内中西部坚硬顶板矿井的典型工程问题，如临空巷道切顶卸压、切眼/回撤通道大面积悬顶治理、沿空留巷厚硬顶板分层有控切顶、煤层群多组顶板联合失稳防治等，开展坚硬顶板原生节理裂隙及非均匀应力分布监测、卸压区围岩结构三维重置模型校正、支承应力及原生裂隙对定向卸压裂缝扩展扰动机制等研究工

作，形成了工程尺度下深部坚硬顶板动载精准防控技术。上述研究成果对国内外深部坚硬顶板灾害防治的理论研究与现场应用具有重要借鉴意义。

(1) 坚硬顶板岩体中的节理裂隙分布

针对深部坚硬顶板受采动影响下出现遍布节理裂隙、应力分布不均等现象，基于统计窗法和钻孔摄像法分别对岩体表层宏观裂隙和内部裂隙进行概率统计，采用离散裂隙网络（DFN）建模方法研究坚硬顶板岩体中的节理裂隙分布；通过理论研究和现场监测分析侧向支承应力、超前采动应力、底板集中应力等叠加作用机制，得出压裂区域支承应力的时空演化特征。

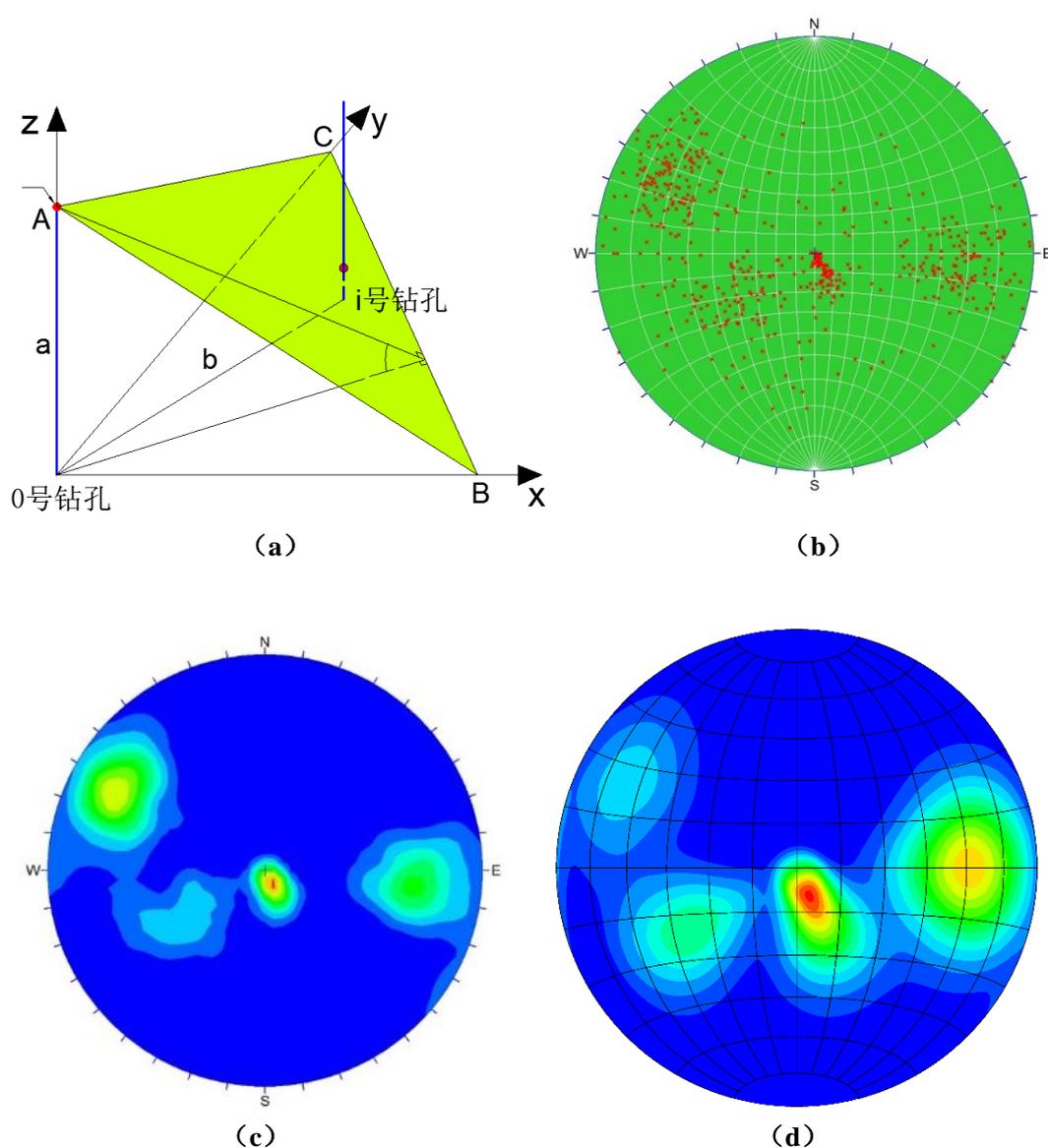
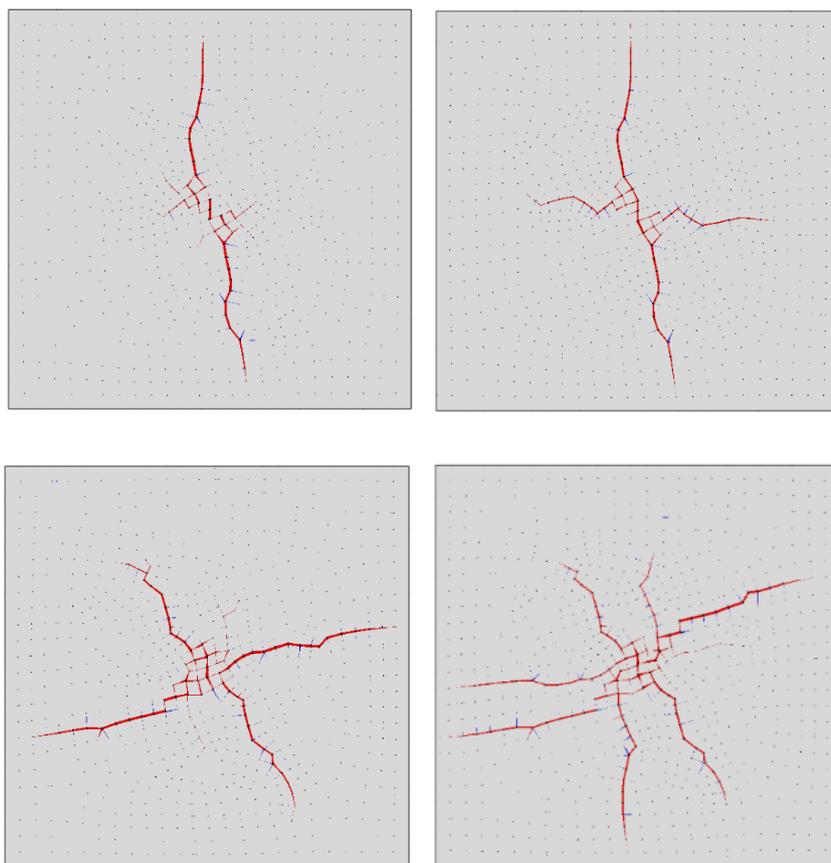


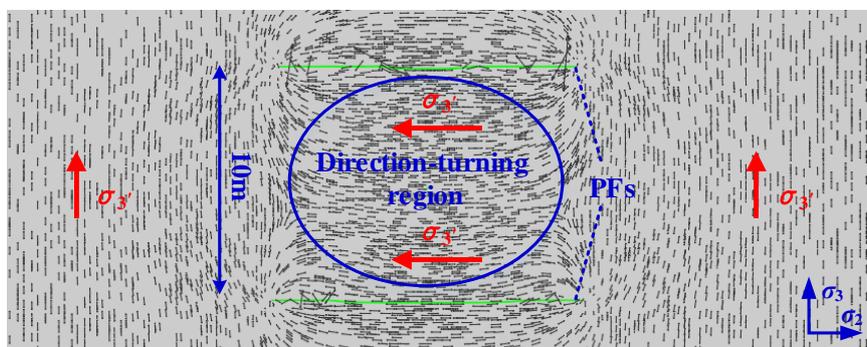
图 15 DFN 模型模拟统计窗与实际裂隙特征匹配性验证 (a) 钻孔间几何关系；(b) 裂隙赤平极射投影图；(c) 实际裂隙产状；(d) 由 DFN 生成的裂隙产状

(2) 非均布应力下定向卸压裂缝受原生裂隙扰动机制

针对动载防控区域应力环境和岩体裂隙对定向卸压裂缝扩展的影响，通过 Cohesive 单元法构建了遍布裂隙节理的岩体模型，基于扩展有限元方法 (XFEM) 模拟支承应力环境中不同流量、压裂时间、切缝角度下的裂缝扩展特征研究，研究了非均布应力下定向卸压裂缝受原生裂隙张开度、产状及力学性质的扰动机制。



(a)



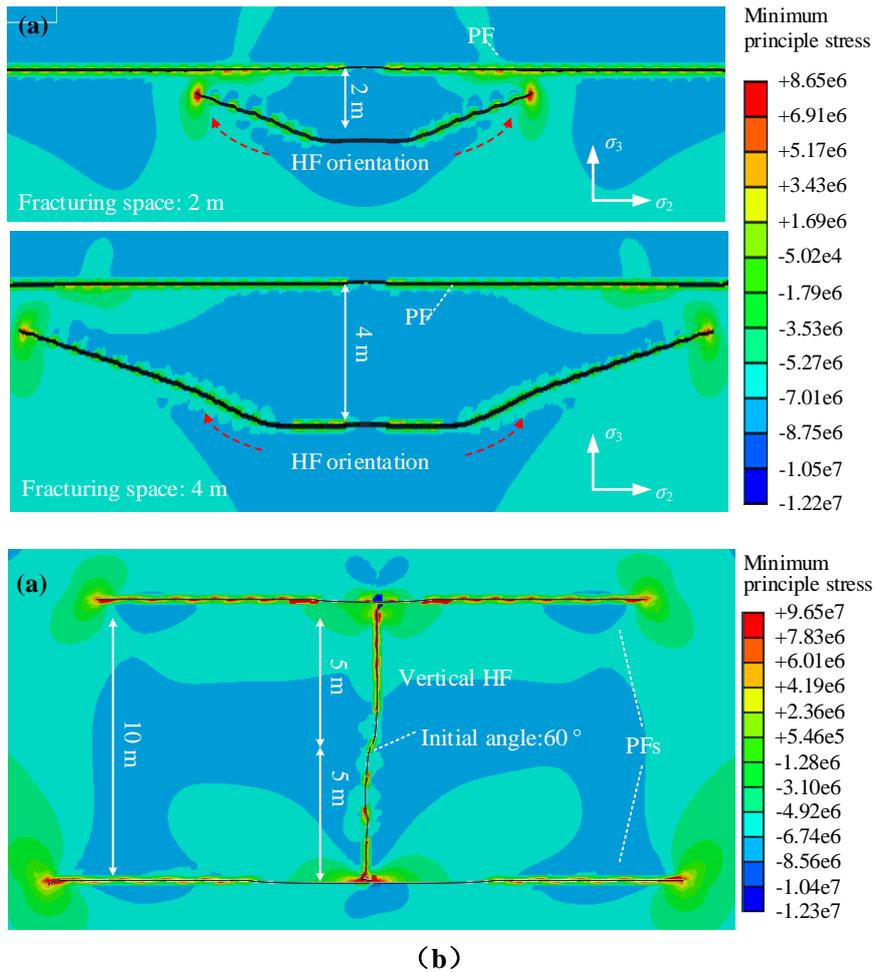
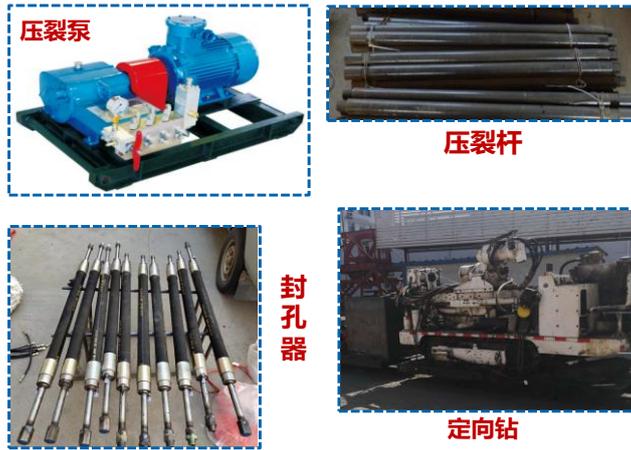


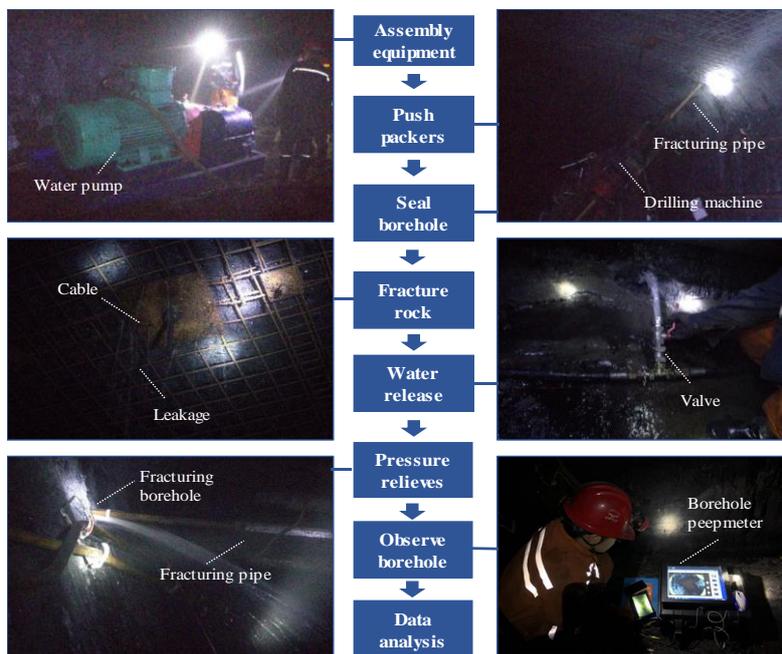
图 16 水力裂缝扩展的数值模拟 (a) 遍布节理岩体定向水力裂缝扩展 (Cohesive 单元法); (b) 顶板大尺度定向水力压裂模拟 (扩展有限元法)

(3) 裂缝扩展和转向轨迹的诱导机制

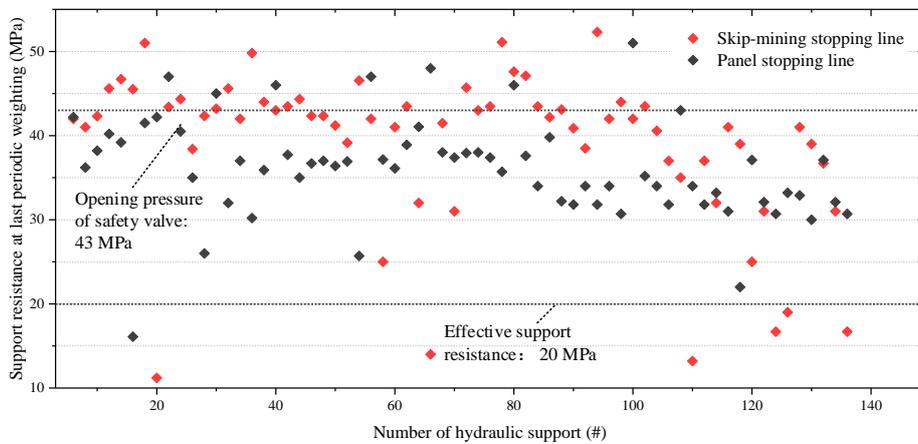
针对深部坚硬顶板动载灾害问题,提出基于定向裂缝切顶技术的动载防控与技术,构建了定向裂缝沿初始切缝扩展的渐进式破坏本构模型,研究了定向缝空间形态、压裂区域非均布应力环境、岩层原生裂隙参数等对裂缝扩展和转向轨迹的诱导机制,确定工程尺度下坚硬顶板最优定向卸压裂缝参数,提出深部坚硬顶板动载精准防控技术。



(a)



(b)



(c)

图 17 坚硬顶板成套压裂技术 (a) 设备示意图; (b) 施工流程图; (c) 基于支架压力统计数据的压裂效果评价

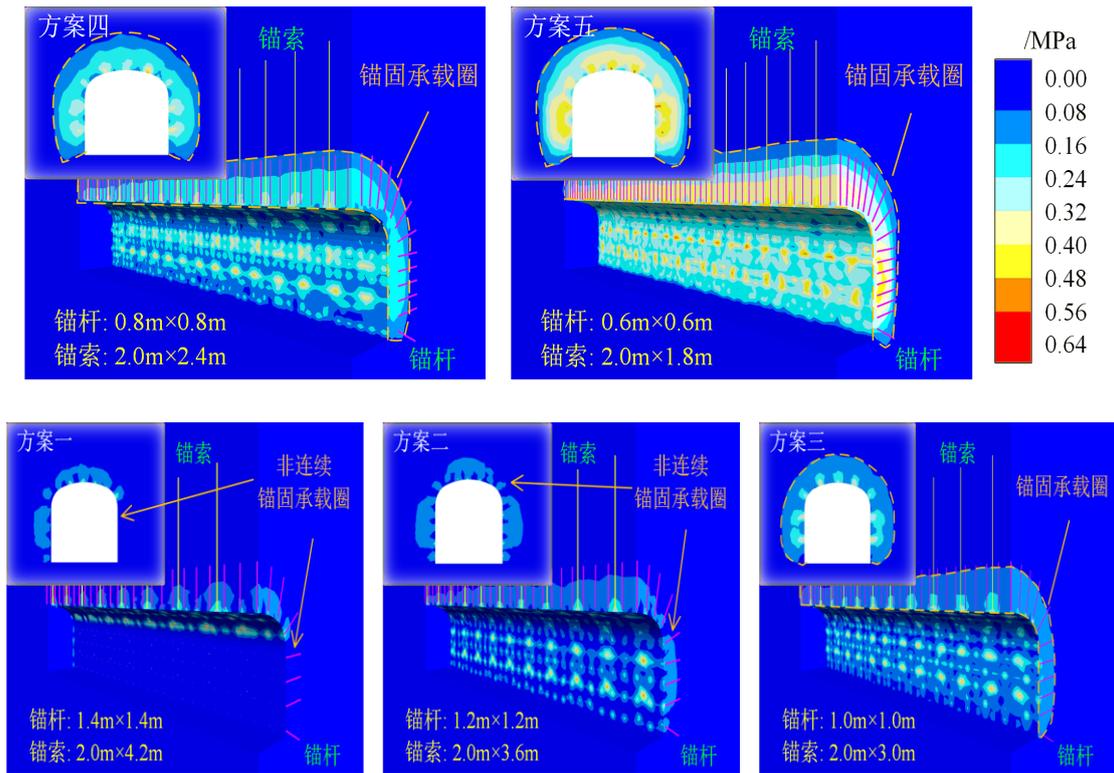


图 19 加固承载壳围岩控制效果分析

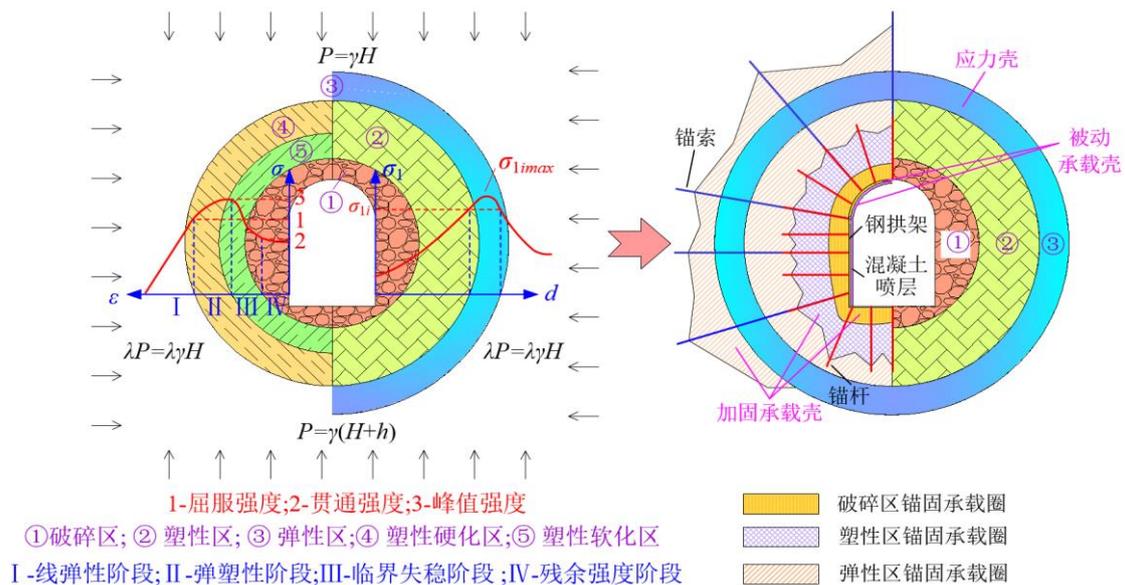


图 20 “三壳”协同支护力学模型

(2) 大断面硐室围岩位移场与塑性区发育范围的演化规律

考虑了地应力场类型、侧压系数变化及大断面硐室轴向与最大水平主应力所成夹角三个因素，共设计了 151 组数值模拟方案，研究了不同类型应力场中大断面硐室围岩位移场与塑性区发育范围的演化规律，建立了围岩稳定性综合评价指标体系，确定了不同类型地应力场中大断面硐室的优化布置方式。

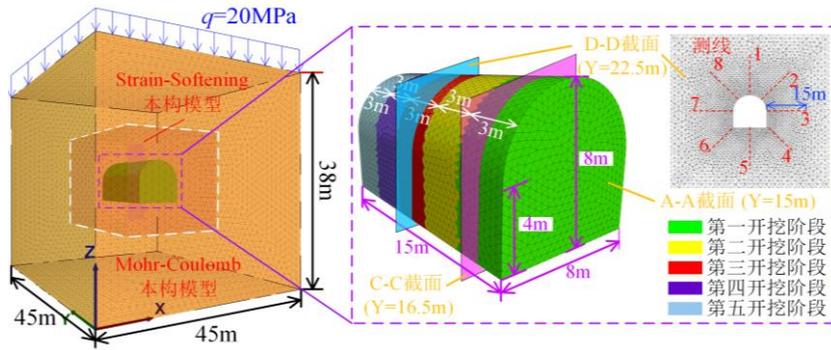


图 21 大断面硐室分布开挖

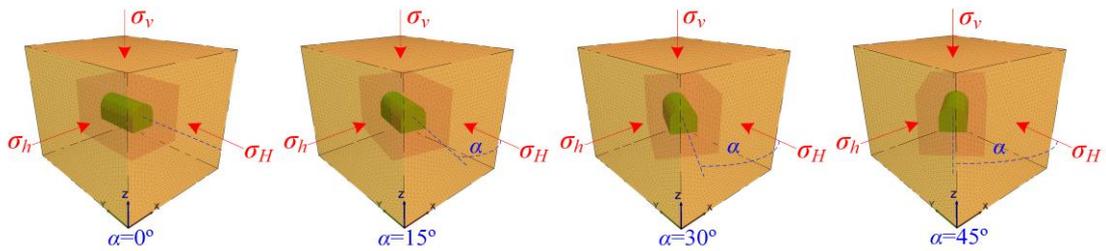


图 22 不同地应力场大断面巷道开挖模型

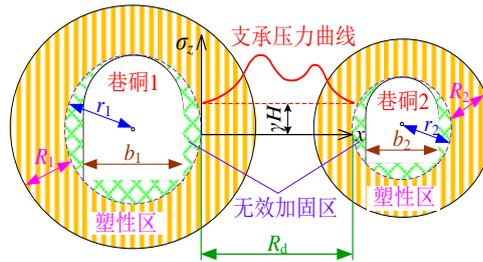


图 23 巷硐群围岩损伤规律分析

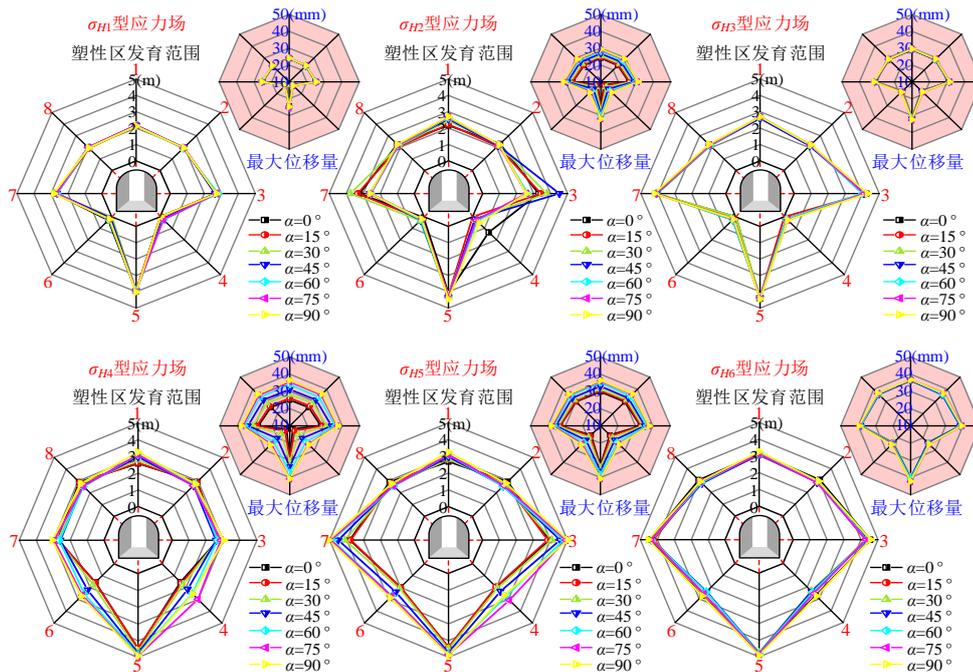


图 24 不同地应力场围岩位移量与塑性区发育范围

(3) 不同支护参数对围岩控制效果的影响

为确定加固承载壳与被动承载壳不同支护参数对深井大断面硐室围岩控制效果的影响程度，基于正交试验方法设计了 27 组多因素多水平支护方案，采用极差分析法对试验结果进行分析，确定了不同支护参数对围岩控制效果的影响程度由大到小依次为喷层厚度、锚杆间排距、喷层强度、锚索直径、锚杆长度、锚杆直径、锚索间排距、锚杆预紧力、锚索长度、锚索预紧力。

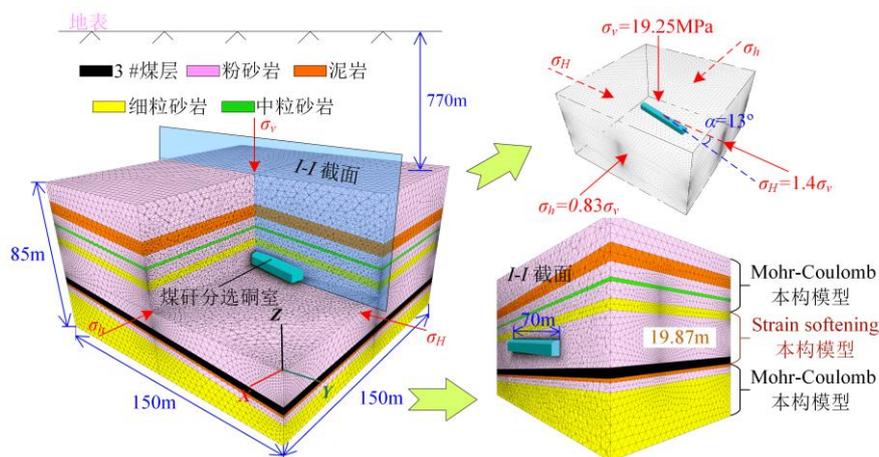


图 25 关键支护参数分析数值模型

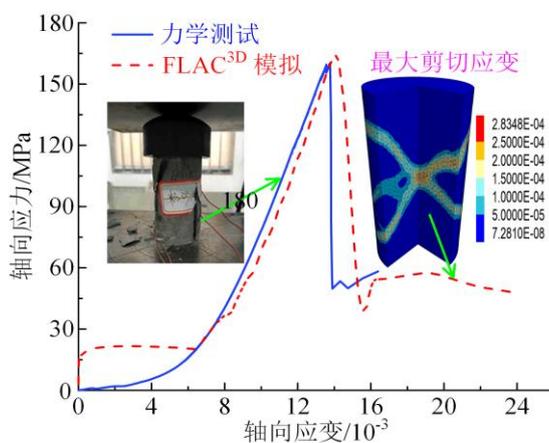


图 26 围岩力学性质模拟试验

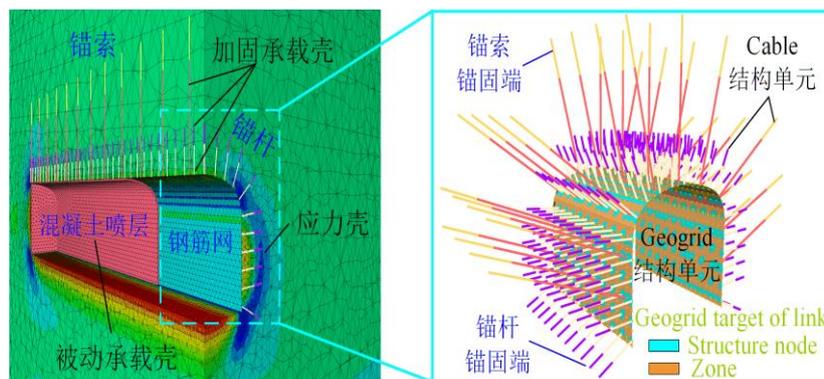


图 27 锚网索喷支护的数值模型

(4) “三壳”协同支护技术模拟及现场应用

基于不同支护参数对于围岩控制效果的影响程度,优化了煤矸分选硐室支护方案,模拟分析了煤矸分选硐室分别采用锚网索支护、喷层支护、锚网索喷支护时围岩内最大主应力场、塑性区发育范围及位移场的演化规律,结果表明“三壳”协同支护技术可充分发挥主、被动支护结构的协同承载作用,实现应力壳对围岩的稳态控制。现场观测结果表明,采用“三壳”协同支护技术后煤矸分选硐室顶底板最终移近量为48mm,两帮最终移近量为65mm,围岩控制效果良好,可满足深井大断面硐室围岩长时稳定控制要求。

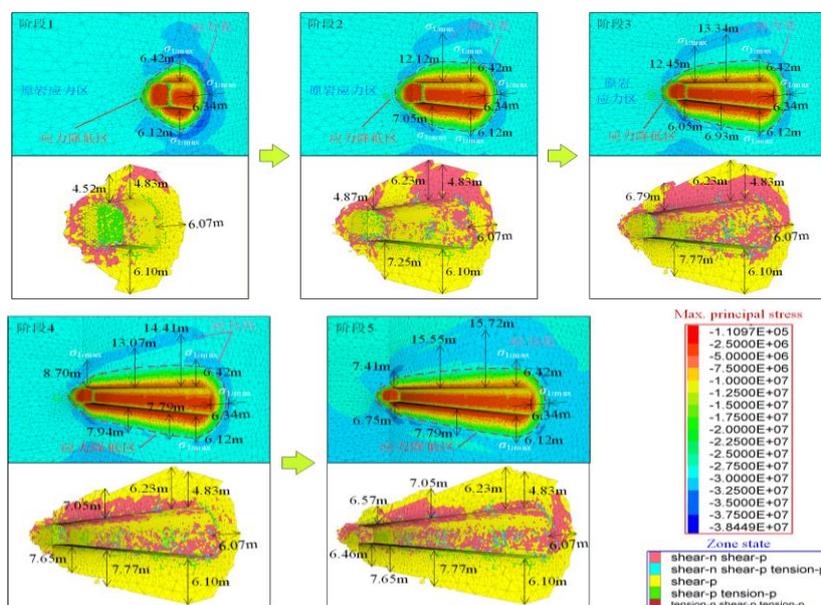


图 28 围岩损伤规律模拟分析

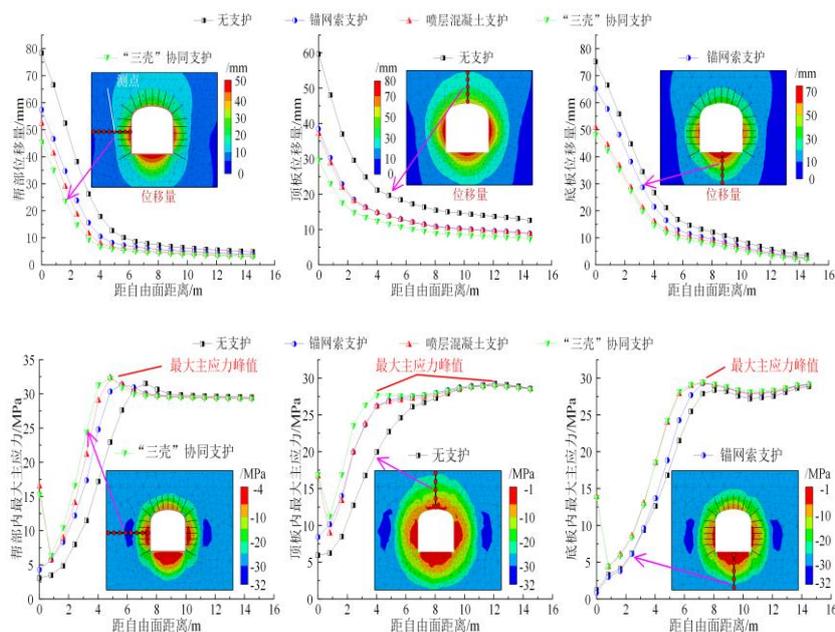


图 29 不同支护方案的围岩控制效果

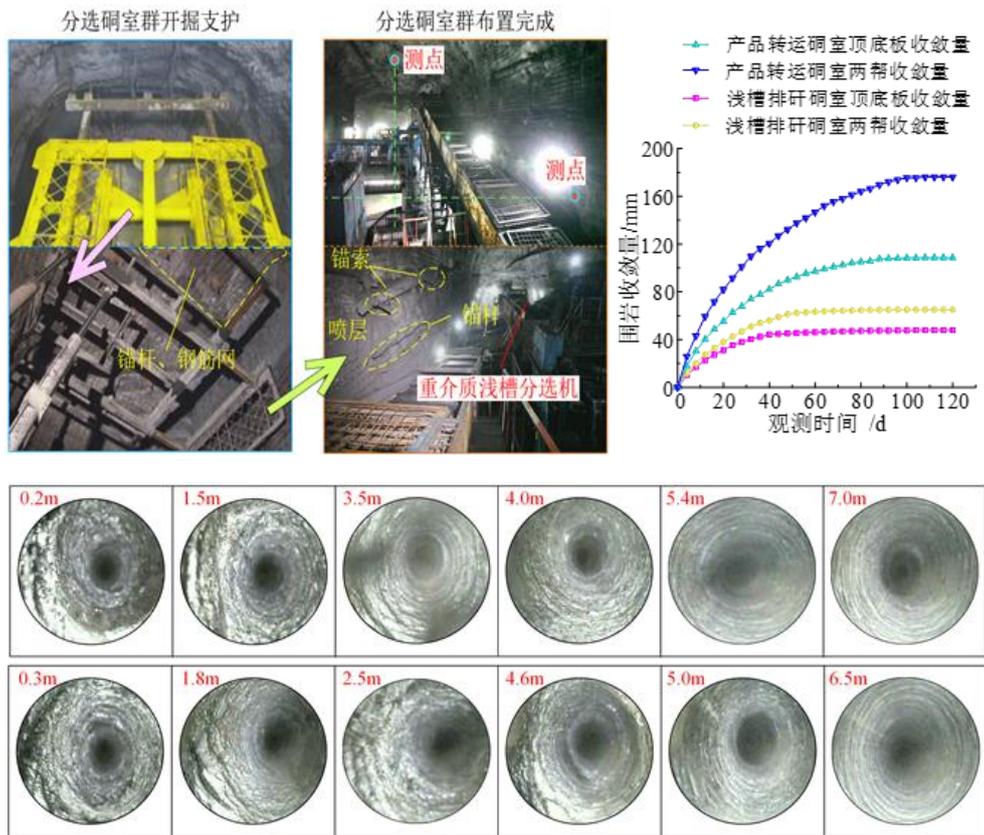


图 30 现场工业性试验