

2020 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。2020 年，实验室共发表 SCI 论文 122 篇、EI 论文 31 篇，授权发明专利 107 件，获得包括教育部高等学校科学研究优秀成果奖、甘肃省科技进步奖、煤炭工业协会科技进步奖、安全生产协会安全科技进步奖在内的省部级与行业科技奖励 22 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。

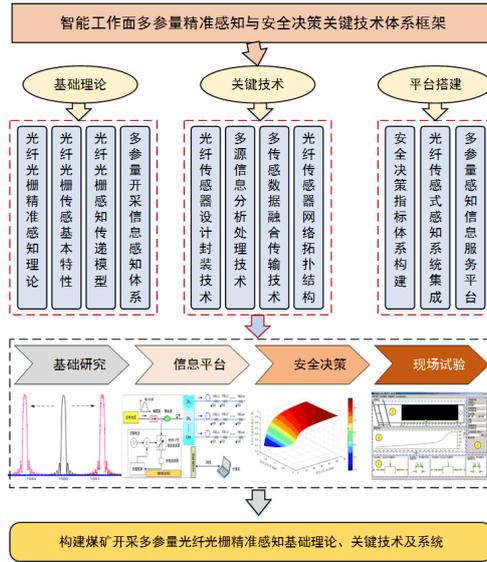


图 1 智能工作面多参量精准感知与安全决策关键技术体系

(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。

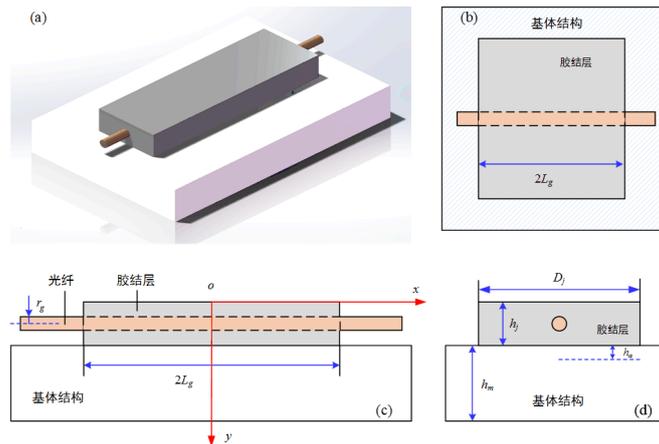


图 2 基体表贴光纤光栅感知传递模型

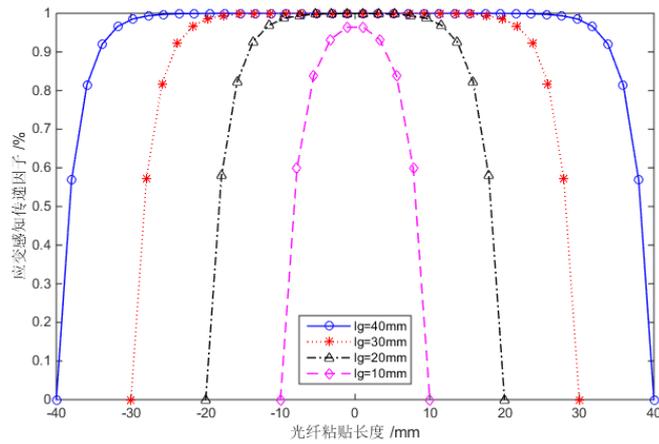


图 3 粘贴范围内光纤轴向应变分布规律

(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。

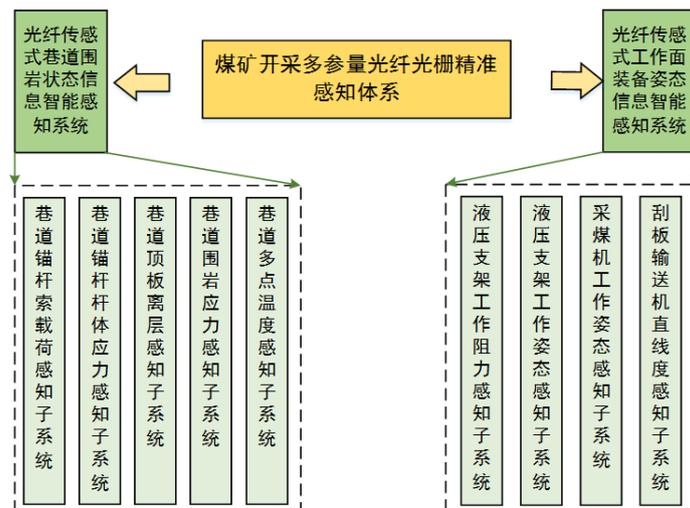


图 4 光纤传感式煤矿开采多参量信息感知体系

(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。

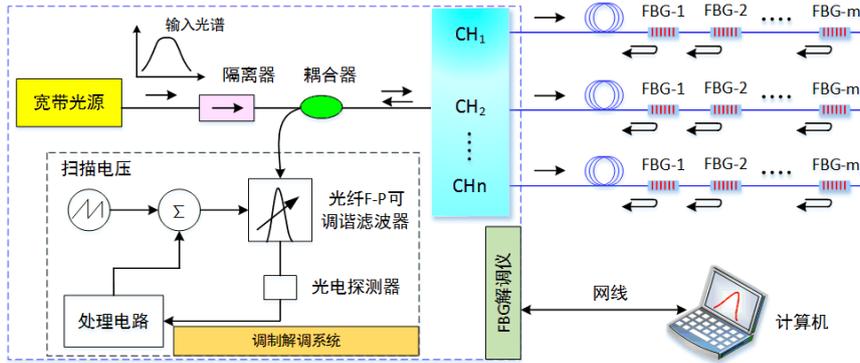


图 5 光纤光栅智能感知系统布置示意图

(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）。

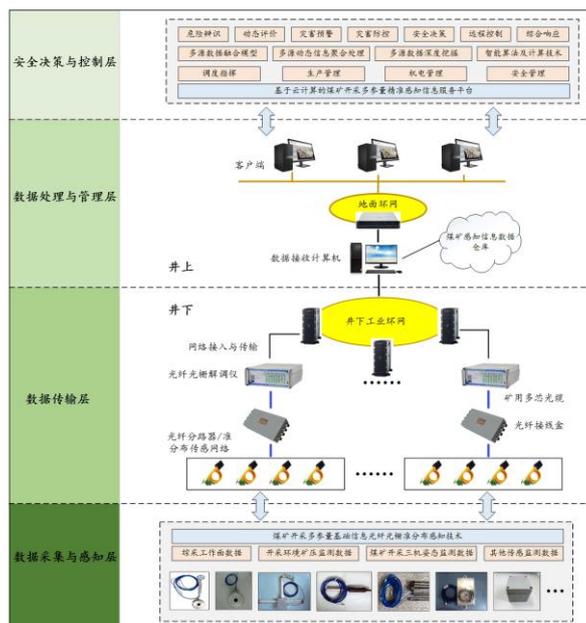


图 6 多参量光纤光栅精准感知与安全决策系统架构

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。

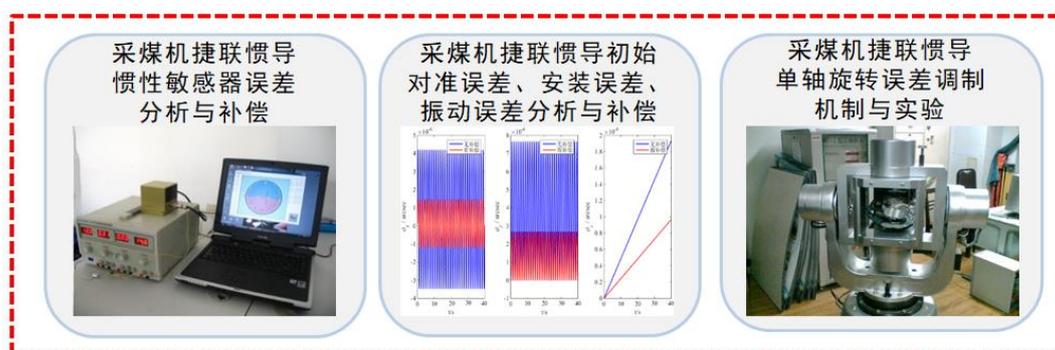


图7 采煤机运行姿态高精度感知研究方法

(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。

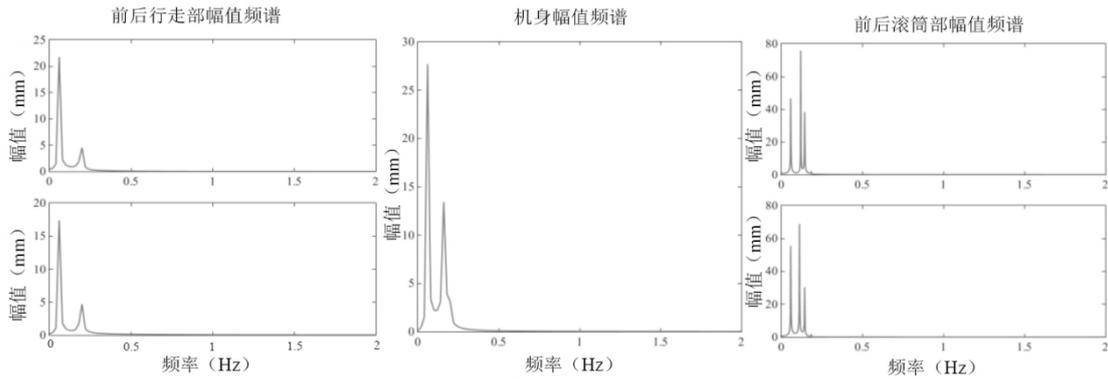


图 8 采煤机各个部件在 Z 轴方向的幅频特性

(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。

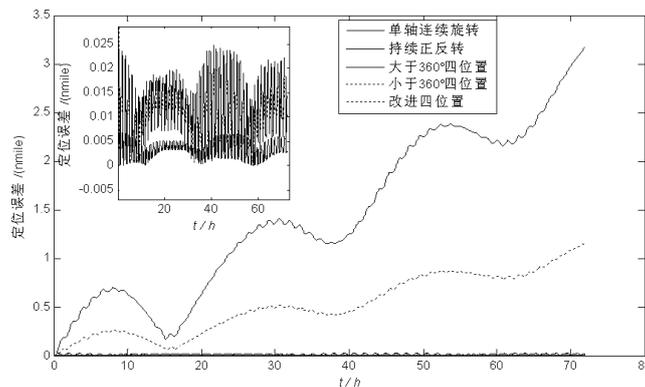


图 9 不同调制方案中陀螺仪零偏漂移引起的定位误差

2020 年度，本方向获批山西省重大专项课题 1 项、中央高校基本科研业务费重大项目培育专项 1 项、国家自然科学基金青年科学基金项目 1 项、江苏省自然科学基金青年科学基金项目 1 项；获中国煤炭工业协会科技进步一等奖 1 项、江苏省科技进步二等奖 1 项、首届徐州市专利项目优秀奖 1 项。出版教材 2 部，专著

2 部，发表高水平论文被 SCI 检索 5 篇，EI 检索 3 篇；获得授权国家发明专利 5 件，申请发明专利 2 件。

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诱冲机理及监测预警方面，依托国家“十三五”重点研发计划课题、国家自然科学基金及一批企业合作项目，针对特殊地质条件下煤层开采的冲击矿压问题，开展了急倾斜分段开采夹持型冲击失稳机理及多层厚顶板宽煤柱条件下的冲击矿压显现规律研究，揭示了不同地质条件下的冲击破坏机制，提出相应开采地质条件下顶板深孔爆破参数及方案，降低了冲击危险程度，为煤矿的安全生产提供了保障。

1) 急倾斜分段开采夹持型冲击失稳机理

(1) 急倾斜煤层的冲击显现特征。①急倾斜分段开采冲击显现与采动影响关系密切。②急倾斜开采巷道冲击显现次数多于采场冲击，且巷道冲击主要发生在回采巷道和受回采影响下的掘进巷道。③急倾斜顶板巷冲击显现多于底板巷，在煤层群开采条件下层间岩柱对冲击显现影响较大。④急倾斜分段开采采场冲击位置发生在顶板侧，回采巷道冲击破坏范围明显大于掘进巷道（图 10）。⑤采场冲击破坏程度一般较巷道冲击更严重，采场冲击同样值得关注。

(2) 阐述了急倾斜分段开采夹持型冲击失稳机理。夹持煤体所受采动应力是诱发冲击的静载力源，覆岩破断及结构失稳是急倾斜分段开采过程中产生动载扰动的主要诱因。急倾斜分段开采冲击矿压属于夹持型冲击，包括采场冲击型和巷道冲击型（图 11）。提出了相应采动应力估算模型，采动应力 $\sigma_{采}$ 是由原岩应力状态下的自重应力垂直煤层倾向的分量 $\sigma_1 \cos\theta$ ，水平应力垂直煤层倾向的分量 $\sigma_2 \sin\theta$ 以及在采动影响下采空区上覆岩层传递至夹持煤体的应力增量 $\Delta\sigma$ 共同组成，其中顶底板两侧采动应力分布的非对称性导致了冲击破坏区域的非对称性（图 12）。

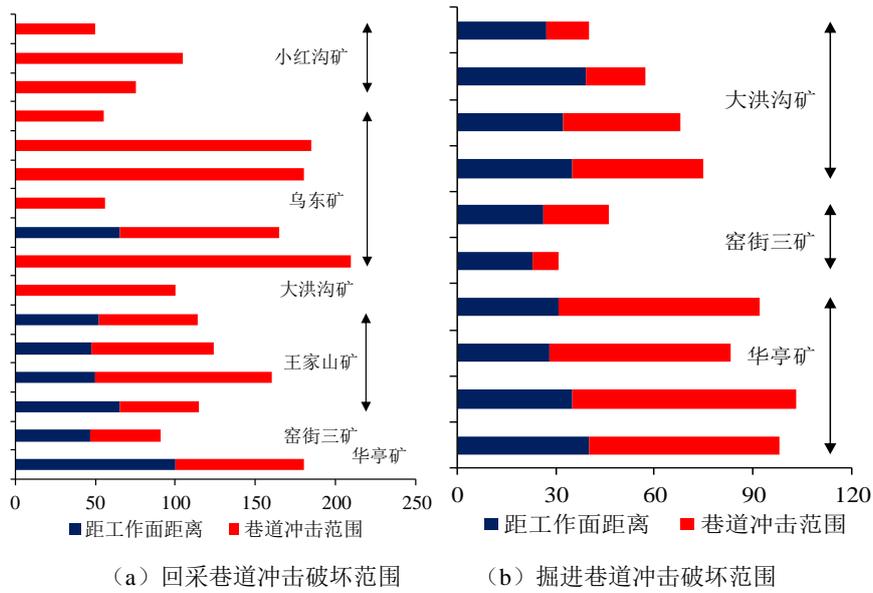


图 10 急倾斜分段开采冲击破坏位置及破坏范围

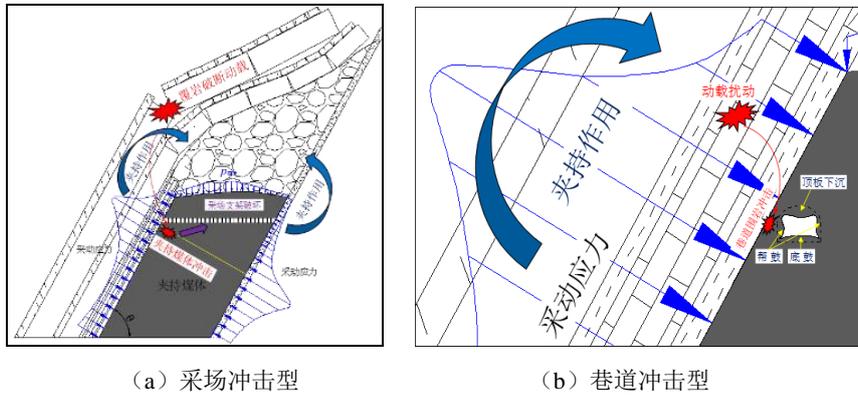


图 11 急倾斜分段开采冲击类型

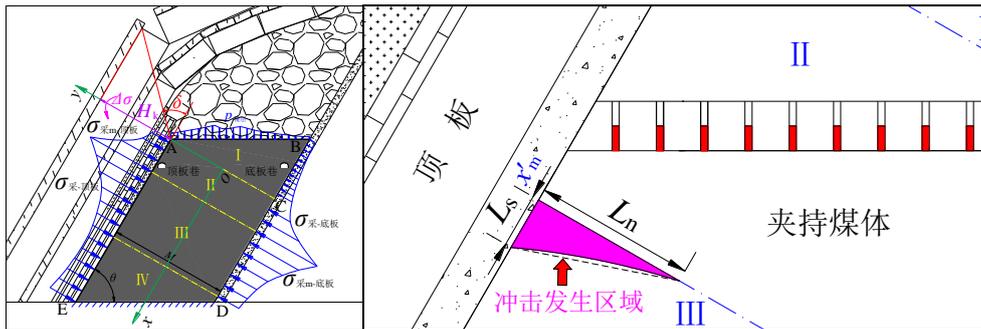
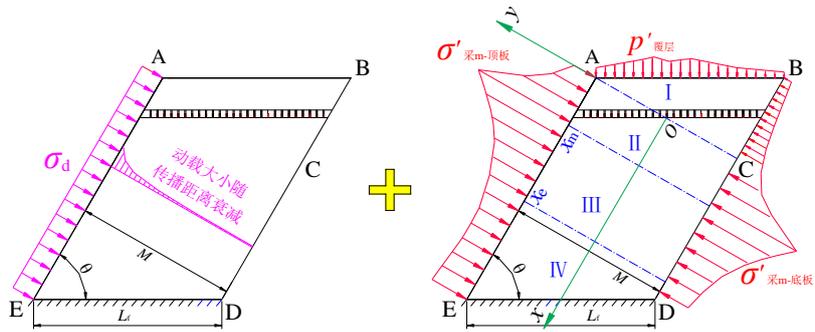
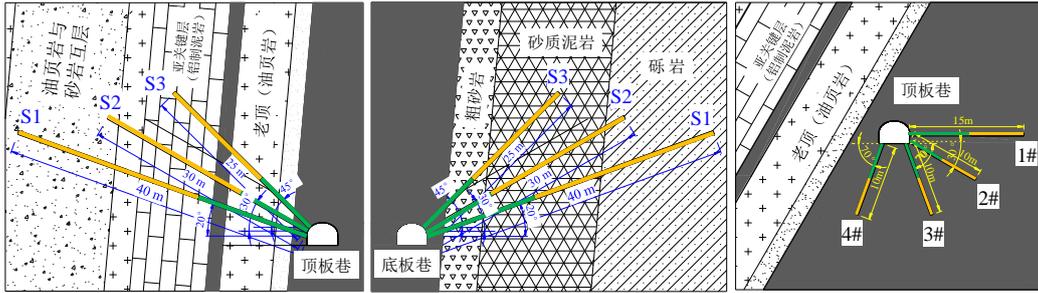


图 12 急倾斜分段开采冲击的非对称性

(3) 急倾斜分段开采冲击矿压防治实践。以急倾斜分段开采条件下夹持煤体承受动静载特征与夹持型冲击机制为基础，确定冲击危险区域及应力异常区域，提出冲击防控方法包括基于防冲的煤层开采设计、支护参数防冲优化以及降低动静载的控制措施并完成现场实践（图 13），其中考虑到近直立煤层分段开采下顶底板岩层对夹持煤体的影响基本一致，因此对底板同样采取了深孔爆破。



(a) 动载、静载应力场



(b) 动载应力防治

(c) 静载应力防治

图 13 急倾斜采场夹持煤体冲击动静载防治实践

2) 呼吉尔特矿区多层厚顶板宽煤柱条件下冲击显现规律

(1) 多层厚顶板宽煤柱条件开采冲击破坏规律。多层厚顶板宽煤柱采场的冲击矿压显现特征具有小周期显现、大周期显现与特殊显现三种显现形式（图 14、图 15），主要是关键层的周期性破断所引起的矿压显现。大、小周期冲击显现主要以煤柱冲击破坏为主，说明宽煤柱受侧向悬顶所施加的支承压力影响较为严重。

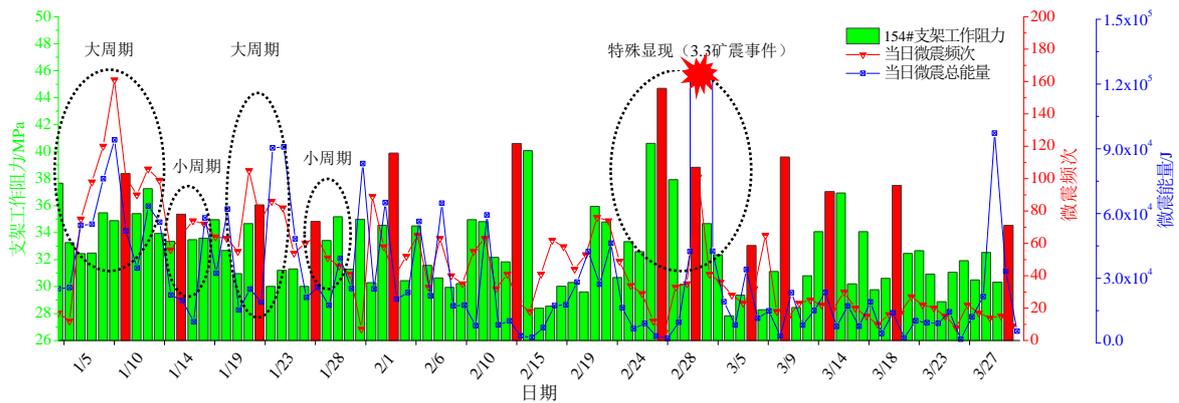


图 14 工作面支架压力与微震事件统计

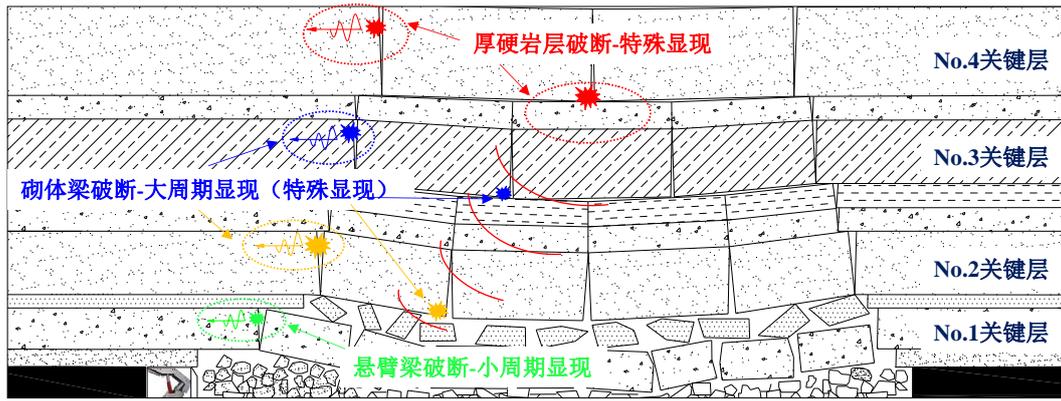


图 15 工作面覆岩结构及显现特征

(2) 多层厚顶板采场结构演化特性及冲击失稳机制。采场结构的冲击基本力源分为了“结构平衡静载荷”与“结构失稳动荷载”，两种荷载的叠加对整个系统结构起到了关键诱冲作用。“冲击施载结构”是“结构失稳动荷载”主要来源（图 16）。煤体内的应力主要来源于上覆岩层结构的压覆传导，而煤柱尺寸直接影响后方采空区和相邻采空区上方顶板覆岩结构特征。煤柱的破坏可分为流变与突变两个阶段，随时间的流变阶段改变了煤体的承载结构尺寸，使煤柱承载能力下降，当受本身承载的静载及顶板变化带来的动载影响下，会出现突变破坏。

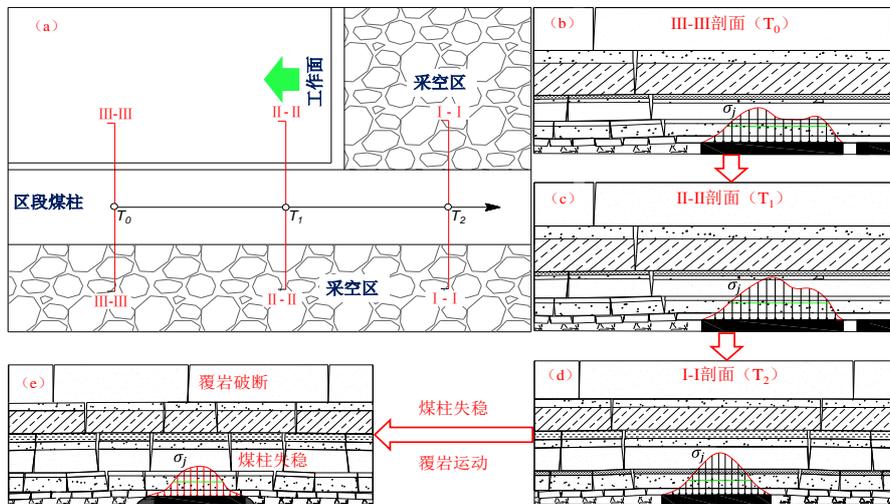
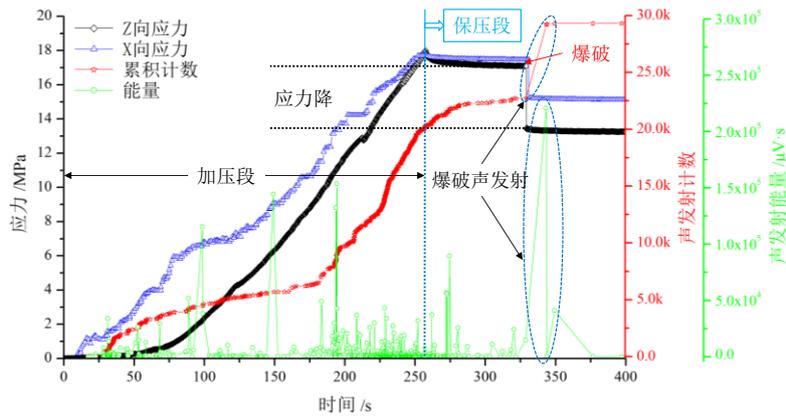
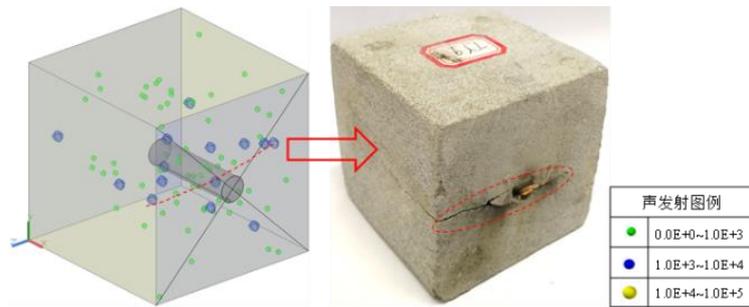


图 16 采场内煤柱应力演化示意图

(3) 爆破降冲机理试验研究及现场应用。实施了三向承压爆破诱能降载实验，验证了爆破诱能降载现象，揭示了降载效果主要依靠爆破动载与爆生致裂作用实现的规律（图 17）。基于冲击机理的研究，针对性的制定了爆破方案和参数，在厚层顶板宽煤柱条件下的煤层顶板实施了顶板深孔爆破。



(a) 三轴承压爆破应力及声发射时序变化曲线



(b) 炸药爆炸后试样声发射投影及裂隙发育图

图 17 三轴承压爆破试验结果图

该研究方向本年度共发表 SCI/EI 论文 11 篇，授权发明专利 1 项，申请发明专利 20 项，获中国煤炭工业协会科学技术特等奖 1 项、中国职业安全健康协会科学技术一等奖 1 项，中国职业安全健康协会科学技术二等奖 2 项，中国煤炭工业协会科技技术三等奖 1 项。

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 18 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°C（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。

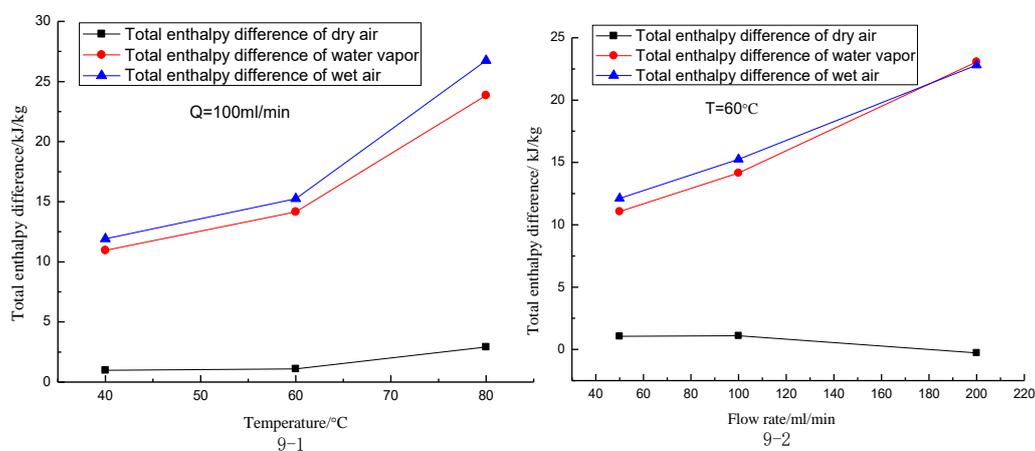


图 18 不同温度和流量下系统总焓差的变化曲线

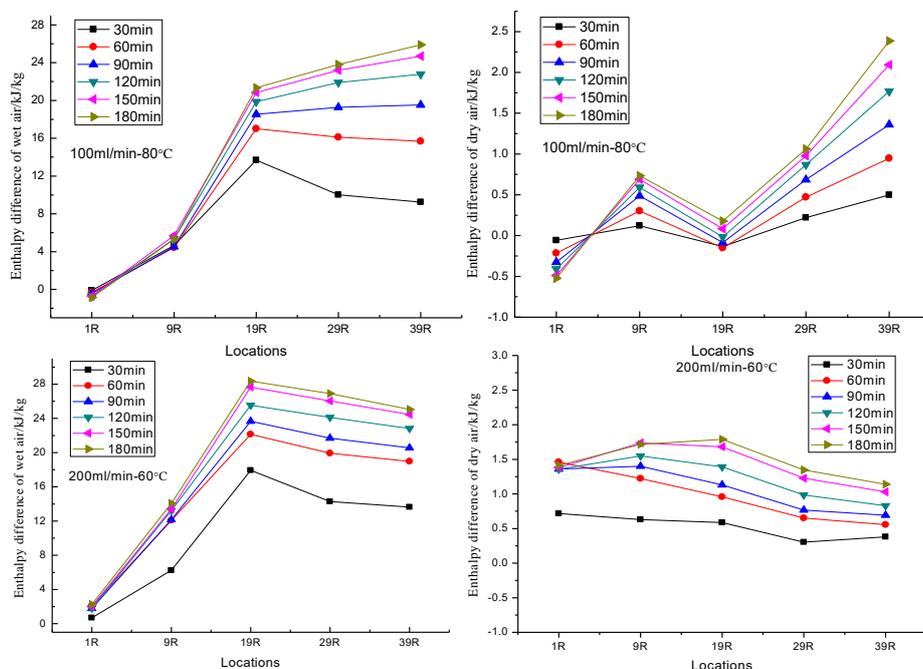


图 19 100-80 及 200-60 工况下涌水巷道的焓差空间分布特点

(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。

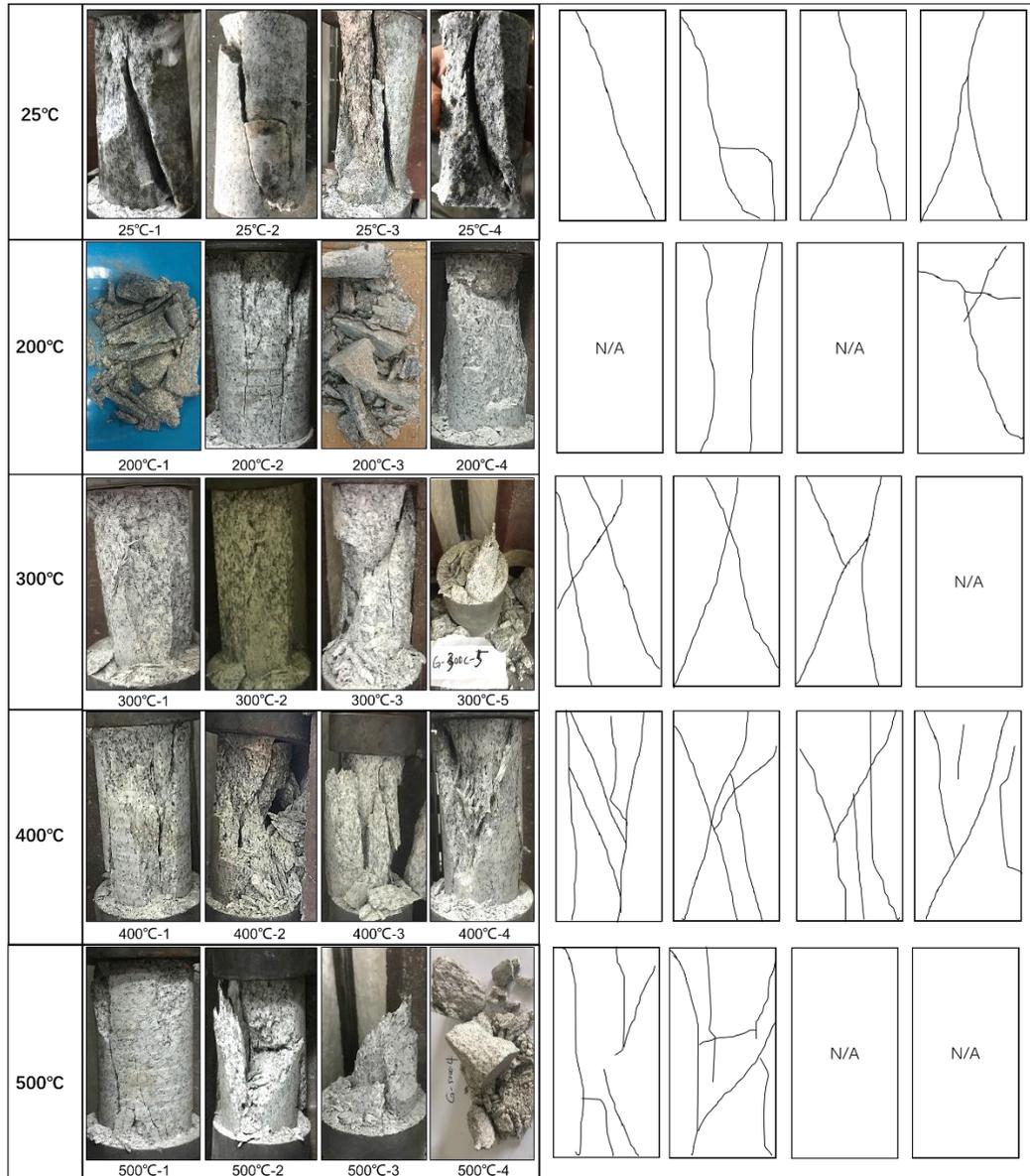


图 20 实时高温下花岗岩单轴压缩破坏形态

(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 21 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 22 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。

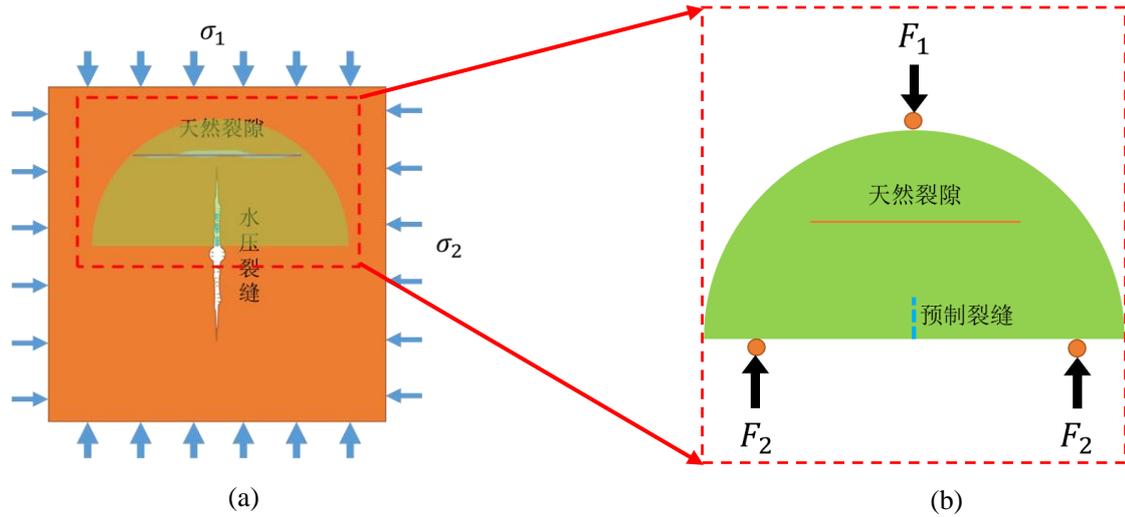


图 21 水压致裂模型示意图 (a) 水压致裂模型； (b) 半圆弯曲模型

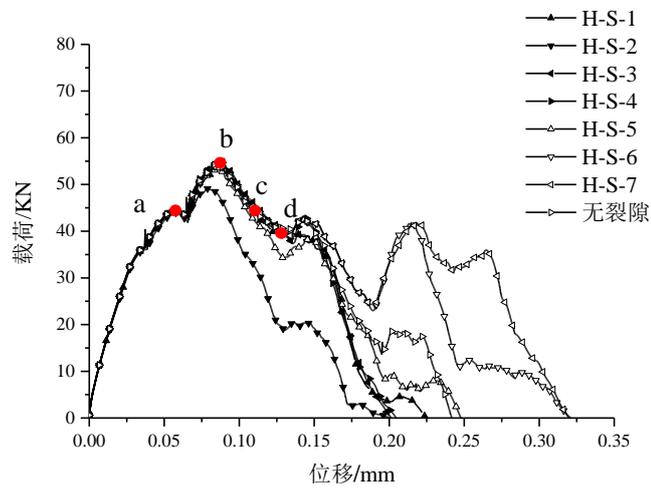


图 22 高温条件下半圆弯曲式样不同天然裂隙胶结强度载荷-位移曲线

该研究方向年度发表 SCI 论文 2 篇，EI 论文 1 篇，授权国家发明专利 2 项。