

2019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。2019年，实验室共发表第一单位标注SCI论文62篇、EI论文12篇，授权发明专利79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19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“煤炭安全智能精准开采”理念指导下，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，针对智能工作面开采过程中遇到的关键难题，建立了煤矿工作面设备智能感知理论与技术体系，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，达到了智能工作面安全高效开采的目标。建立了煤矿采掘面环境智能感知理论与技术体系，提出了深部矿井采动灾害光纤监测预警关键技术，形成了高精度光纤智能感知监测体系，为深部矿井智能化开采提供保障。取得如下成果：

1) 煤矿工作面设备智能感知理论与技术体系

(1) **工作面采煤机姿态智能感知**。为解决采煤机运行姿态的高精度感知的技术难题，深入研究分析了当前采煤机姿态监测理论与技术，创新了基于捷联惯导的采煤机自主定位技术与系统（图1），建立了采煤机自主定位系统误差补偿模型，通过导航降误与误差处理技术，提高了采煤机定位精度。构建了可解算采煤机姿态的动力学模型，优化了采煤机姿态解算算法，实现了采煤机运行姿态智能感知（图2）。

(2) **液压支架姿态智能感知**。为精确求解智能工作面液压支架的姿态参数，研究了液压支架姿态监测的运动学原理，基于光纤传感技术的应力应变和温度传感原理，建立了液压支架姿态监测的系统结构，分析了支架顶梁的理论回转角、支架姿态与工作阻力的关系、支架围岩刚度耦合理论，以及支架稳定性，借助BP神经网络的多传感融合算法，提出了液压支架姿态智能感知理论与方法体系（图3），并明确了姿态感知参数的安全范围，实现了支架姿态对顶板运动状态、矿压强度、支架-围岩耦合关系、支架稳定性、支架关键结构工况等的全面实时

监测（图4）。构建了智能工作面自动移架约束模型，实现了割煤过程中液压支架的自动化跟机。



图1 采煤机自主定位技术

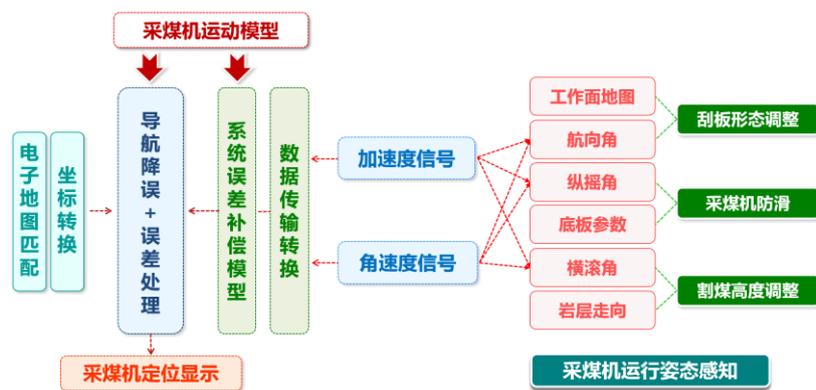


图2 采煤机运行姿态智能感知

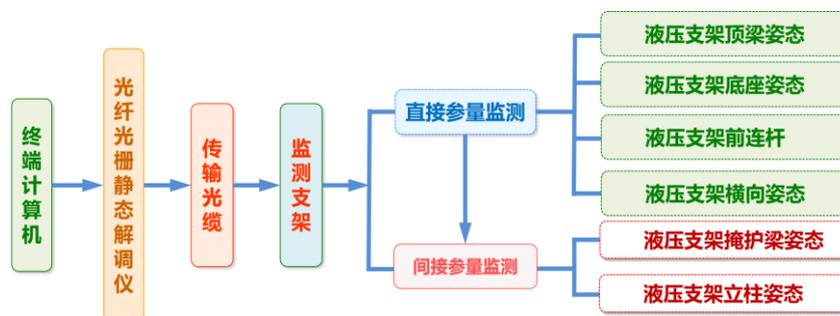


图3 液压支架姿态监测系统机构

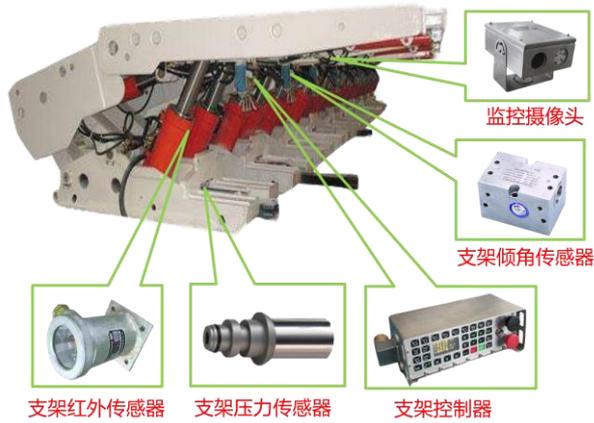


图 4 液压支架姿态实时感知

(3) 刮板输送机直线度智能感知。为解决工作面开采过程中刮板输送机直线度感知手段缺失的关键难题，基于光纤光栅曲率传感原理，实现了刮板输送机三维弯曲形态拟合感知与重建。建立了刮板输送机三维弯曲测试实验平台，分析了刮板机三维弯曲状态下感知形态的观测结果，实现了刮板输送机三维形态的实时动态感知与修正（图 5），为刮板输送机直线度的精准控制奠定了基础。

(4) 工作面设备智能协同控制。配套研发了工作面设备智能感知传感器（光纤光栅倾角传感器、光纤光栅支架压力传感器、光纤光栅加速度传感器、光纤光栅三维曲率传感器等），基于多信息融合技术，集成了工作面智能开采装备，结合上述“三机”姿态的实时感知，实现了工作面设备智能协同控制，可自主操控采煤工艺的全过程，达到了智能工作面安全高效开采的目标（图 6）。

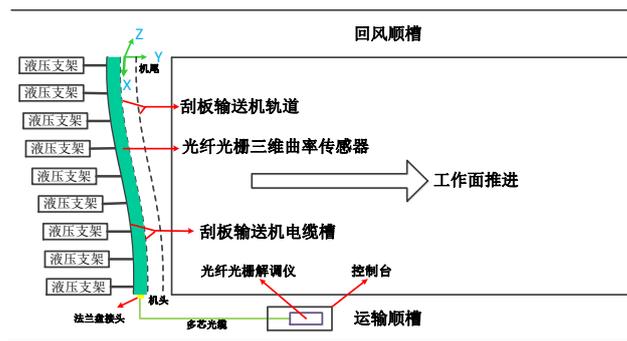


图 5 刮板输送机形态智能感知系统



图 6 智能工作面现场应用

2) 煤矿采掘面环境智能感知理论与技术体系

长期以来，煤矿采掘面的监测预警技术手段落后，监测效果不理想，远不能有效满足煤矿生产安全要求。为解决上述难题，引入了先进的光纤传感技术，充分发挥光纤传感技术优势，为煤矿采掘面环境高精度感知提供重要的技术支撑。

(1) **岩体-光纤光栅应变传递规律与计算方法。**提出并设计了基体粘贴光纤光栅的封装工艺，构建了不同封装形式下的光纤光栅-基体耦合应力应变智能感知理论模型，揭示了光纤光栅-基体在粘贴长度范围内的应变感知分布规律，分析了光纤光栅-基体应变感知传递影响因素，研究了光纤光栅在（非）均匀应力场下传感机理及光谱特性，建立了岩体-光纤光栅应变传递数学方程并揭示了其规律，提出了岩体-光纤光栅应变传递效率的理论计算方法（图 7），为光纤传感器的结构设计及封装形式提供理论基础。

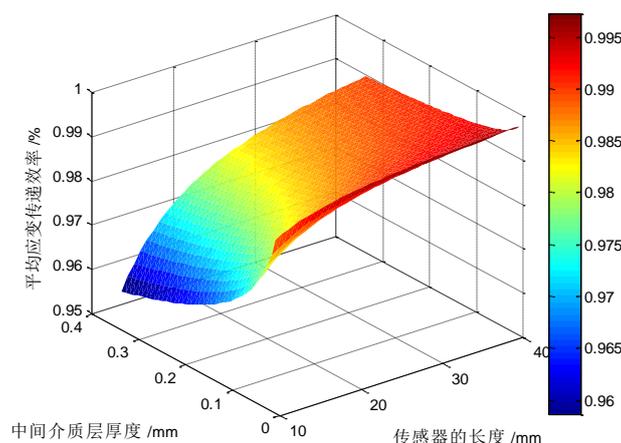


图 7 岩体变形光纤应变传递变化规律

(2) **矿井采动灾害光纤监测预警关键技术。**构建了多场耦合作用下矿井采动致灾的数力模型，揭示了矿井采动灾害致灾机理与围岩结构变形破坏演化规律，提出了深部矿井采动灾害光纤监测预警关键技术，建立了矿井采动灾害光纤光栅监测预警专家系统（图 8）。

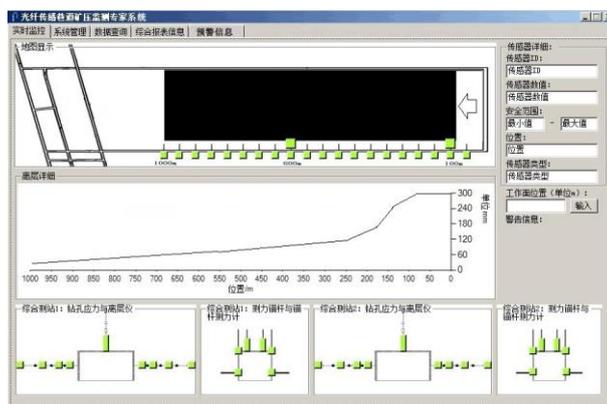


图 8 光纤光栅监测预警专家系统

(3) **采掘面环境智能感知理论与技术体系。**提出了煤矿采掘面环境智能感知方法，自主研制了一系列矿井安全监测传感器（光纤光栅锚杆测力传感器、光

纤光栅测力锚杆、光纤光栅顶板离层传感器、光纤光栅围岩应力传感器、光纤光栅温度传感器等), 集成了工作面环境安全智能感知与巷道围岩环境安全智能感知, 建立了煤矿采掘面环境智能感知理论、技术及传感装备体系, 为深部矿井智能化开采的全面感知提供理论和技术保障。

2019 年度, 本方向获得中国安全生产协会安全科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 1 项、三等奖 1 项。发表高水平论文 11 篇, 其中已被 SCI 检索 10 篇; 获得授权国家发明专利 2 件, 国际发明专利 1 件, 申请发明专利 5 件。研究成果在山西焦煤、阳煤集团、华电煤业等矿区进行了推广应用, 取得了较好的经济效益与社会效益, 应用前景广阔。

2、绿色开采、巷道智能掘进与岩层控制理论与技术

我国 1000m 埋深以下的煤炭资源占总量 53% 以上, 是国家能源的重要支撑。煤巷作为深部煤炭开采的核心保障, 长期以来普遍存在围岩变形过大、支护效果不佳、支护效率不足、掘进速度过慢的重大问题, 一直制约着现代化矿井的高效生产。由于深部煤层应力高、条件差, 煤巷锚杆支护密度大, 导致支护环节耗时平均高达 60%, 造成掘进速度低, 采掘接替矛盾突出。同时, 现有的高密度锚杆索组合支护技术存在承载性能难以协同的问题, 在提高掘进速度的压力之下, 施工质量和安全性能亦难得到保障, 安全问题凸显。煤巷支护安全和掘进效率的矛盾极大制约着深部煤炭开发, 亟需技术创新实现高效支护和快速掘进, 以快掘保障快采、以支护保障安全。

1) 提出了以掘进方式和掘进效率为导向的新型煤巷围岩分类方法。

(1) 提出了新型高效快掘煤巷围岩分类方法, 建立了合理掘进速度的评判标准。揭示了围岩应力强度因子影响下煤巷迎头顶板的时效空顶自稳特性, 考虑三类综合要素(应力强度因子、工程环境要素和顶板赋存结构)和六个关键指标(应力强度因子、巷道受扰动次数、巷道断面大小、巷道受扰动时间、原生裂隙化程度、顶板结构状态), 提出了新型高效快掘煤巷围岩分类方法, 建立了煤巷合理掘进速度的评判标准, 为科学确定掘进效率、科学选择掘支工艺、科学评判顶板安全提供了方法和依据。

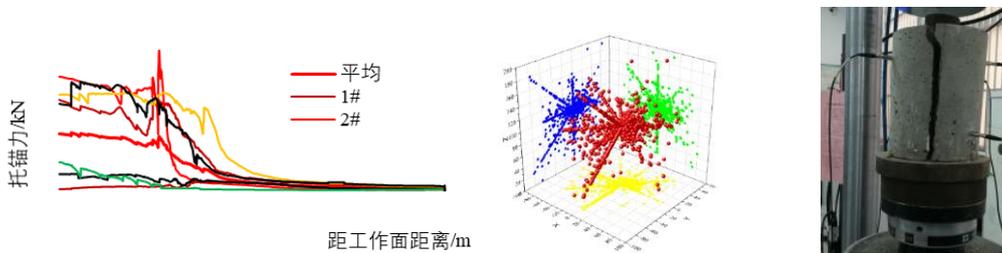
(2) 实现了对我国各类条件煤巷掘支方式选择的科学指导。运用多因素分级处理方法科学确定指标权重, 按照四级评判标准分析了掘进迎头待支护状态下层状岩体损伤和离层的时空演变特征, 制定了掘进循环约束条件和掘锚工艺选择

方式，指出我国煤巷多属迎头空顶自稳距离 1~5m 以内的相对复杂条件，重点是突破单排循环下煤巷高效快掘的技术瓶颈，为掘支技术攻关明确了方向。

2) 建立了深井巷道时效控制理论。

(1) **巷道迎头区围岩的应力优化机理。**系统分析了迎头区围岩应力变形的演变特征，得到了掘进破岩的速度效应、锚杆支护的时间效应和变形控制的增阻效应。高效破岩支护、减少循环时间，可促使超前支承压力峰值点向前方深部煤岩体转移；同时更大范围煤岩体参与掘进应力调整，降低应力集中程度，形成“应力均化”效果，实现巷道迎头应力优化；锚杆参与掘进初始影响区的调整，实现快速增阻，从而显著缓解围岩损伤程度。围岩低损伤状态下实施锚杆支护，最大化维持支护围岩体的承载能力和长期稳定性。

(2) **揭示了采动作用下锚固结构变形破坏机理。**建立了锚固空洞树脂锚固体拉拔状态下的长时蠕变力学模型，在考虑时间效应基础上分析了锚固空洞对杆体应力分布、承载弱化等响应特征。研发了预应力锚固系统综合实验平台，实测获得了锚杆托锚力掘采全过程演化类型，发现了采动巷道锚杆托锚力振荡波动特征。研究了采动作用下树脂锚固锚杆荷载响应特征和破坏形式，分析了采动荷载下锚固体承载性能及失效形式，揭示了采动作用下锚固体变形破坏机理。



(a) 锚杆托锚力曲线 (b) 采动加载损伤源空间定位 (c) 采动加载锚固失效

图 9 采动作用下锚杆托锚力及锚固体损伤变形

(3) **揭示了巷道长锚固控顶机理和厚锚固层抗动载性能。**阐明了支护作用下顶板锚固端头损伤裂隙区的渐进消退规律，揭示了巷道长锚固控顶机理。提出临界锚固层厚度和锚杆支护体敏感度概念，临界锚固层厚度确定了锚杆长度下限，支护杆体敏感度确定了锚杆长度上限，建立了深井采动巷道顶板合理锚固层厚度的参数设计方法。锚杆支护物理实验结果表明合理长度的单一长锚杆构建的顶板厚锚固层，相对于常规锚杆锚索组合支护，能够承受更大的冲击载荷和强采动应力影响。

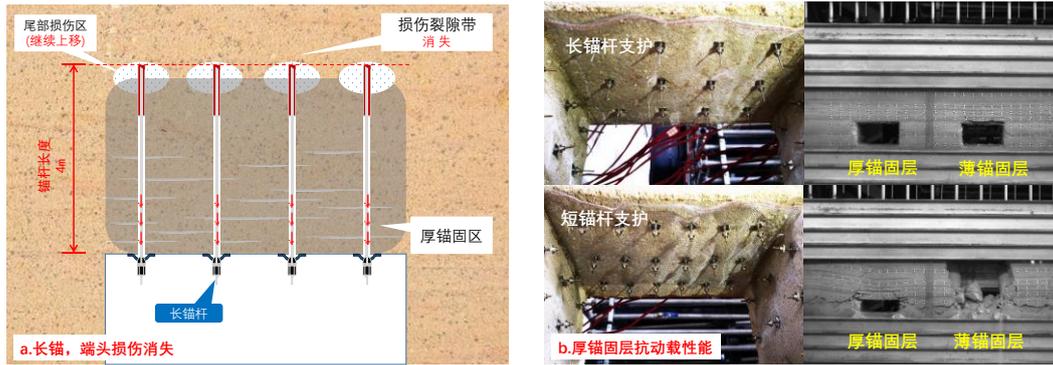


图 10 顶板长锚杆端头损伤裂隙演变及厚锚固层抗动载性能

(4) 建立了煤巷顶板连续梁力学模型，阐明了顶板岩层应力双向连续传递的稳定机理。建立了煤巷顶板连续梁力学模型，得到了顶板安全判据，阐述了连续梁控顶理论的内涵，揭示了顶板岩层应力双向连续传递的稳定机理：巷道顶板及时构建超过临界锚固长度的厚层高预应力稳态岩梁，实现岩层垂直方向不离层、水平方向不破裂，保持顶板结构的整体性，促使应力传递介质不间断，达到顶板应力均化和岩体变形弱化的良性循环，实现顶板低损伤微破坏的时效连续控制效果。设计了能够精准施加预紧力的锚杆支护物理实验，结果表明连续梁能够承受更大的冲击载荷，验证了长锚固连续梁顶板结构的安全性。

3) 提出了深井巷道围岩强化控制技术体系。

(1) 形成了适应深井采动巷道的跨界长锚固技术。深井采动巷道围岩破坏范围大，而普通刚性锚杆长度受巷道尺寸制约，锚杆整体位于破坏圈层内，矿压显现和顶板安全问题凸显，只能采取锚杆锚索低效组合支护。研发了锚杆长度超过临界锚固层厚度(深井采动巷道破坏范围常超过巷道高度)的跨界长锚固技术，开发了两种端尾紧固结构柔性锚杆和一种杆体可接长锚杆等三种不受巷道高度限制的新型锚杆结构，实现了锚杆承载性能的强化和顶板锚固体结构的强化，为深井采动巷道提供了单一高效的基础支护方式。

(2) 开发了适应破裂岩体的深锚浅注技术。深部围岩层状赋存导致各向非均质特征明显，浅表围岩的碎裂尤为显著，导致锚杆托锚力损失，对围岩加固作用减弱。研制了新型中空注浆锚索结构，开发了适应破碎岩体的深锚浅注技术，通过长锚调动深部稳定岩体承载能力，再以注浆提高浅部碎裂岩体承载性能，锚杆两端着力可靠，锚固应力传递高效，从而达到围岩结构稳定目标，实现了浅部破裂围岩体强度强化和锚固承载性能强化。

(3) 提出了巷道渐进掩护增压注浆加固技术和底板锁注一体化技术，实现了深井强采动巷道破裂围岩体强度强化及底板承载结构强化。深部强采动巷道底鼓剧烈，常需多次卧底、返修，底板松散破碎范围大。提出了巷道渐进掩护增压注浆加固技术，在浅部破碎区形成渐进止浆层，保障注浆压力不断增加，利用注浆对破裂围岩体进行渐进增压式改性；明确了巷道底板低效加固区范围，得到了巷道底板最小加固深度，结合底板锚索、锚索束支护，提出底板锁注一体化技术，实现了深井强采动巷道破裂围岩体强度强化及底板承载结构强化。

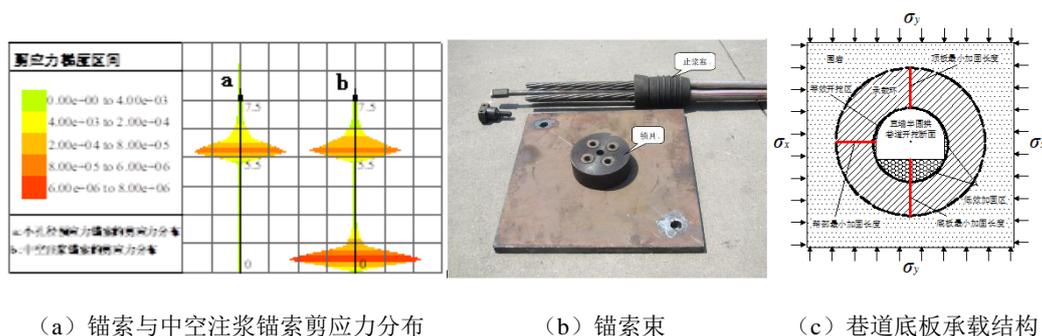


图 11 中空注浆锚索、锚索束及底板承载结构

(4) 开发了煤帮螺旋自锚技术。针对深部煤帮易塌孔导致树脂药卷难以送入、严重影响施工效率的问题，开发了煤帮螺旋自锚锚杆，该锚杆将金属三角丝焊接在杆体上形成大螺纹，通过钻机直接将螺旋锚杆旋入钻孔，利用锚杆和钻孔之间的直径差（钻孔直径略小 2~3mm）形成嵌固力，实现了煤帮支护“去药卷化”，显著提高了帮部锚杆的安装效率。

(5) 提出了薄层喷体承载壳护表技术。采用低粉尘、无回弹的非反应型粉末状薄喷材料，通过专用设备喷涂于巷道围岩表面，起到封闭和加固围岩、防止杆体锈蚀腐蚀的作用，经现场系统性试验测试，在空顶自稳距离 10m 以上的条件下可取代金属网护表，节省了铺网和联网作业时间，从而为探索煤巷“无网化”支护提供了技术手段。

4) 研制了掘锚护一体机和大扭矩气动锚杆钻机，为我国复杂多样工程条件提供了两种主导工艺装备。

(1) 研发了掘锚护一体机。研发了集掘进、临时支护、锚网支护于一体的掘锚护一体机，实现了掘进切割、锚网支护、临时支护的连续机械化作业。将磁致伸缩位移传感技术应用在机载临时支护结构上，达到了任意位置的自动同步控制，同步精度达到 5mm。实施了掘进机与锚护系统之间的操作闭锁，确保人员

施工安全。以机械化钻锚取代人工作业，显著降低工人的劳动强度；提高钻锚作业效率，锚杆施工速度提高 30% 以上。

(2) 开发了大扭矩锚杆钻机。开发了集钻孔、锚杆安装、螺母大扭矩预紧于一体的全新的多功能高度集成的大扭矩气动锚杆钻机，最大预紧力矩高达 550N m，如图 13 所示，实现了普通气动锚杆钻机与扭矩倍增器或大扭矩预紧扳手设备合二为一，钻机无反扭矩，操作过程稳定安全。不再需要在不同设备间更换，提高了钻孔和预紧的施工效率，解决了煤矿锚杆支护锚杆螺母预紧和快速安装技术难题。

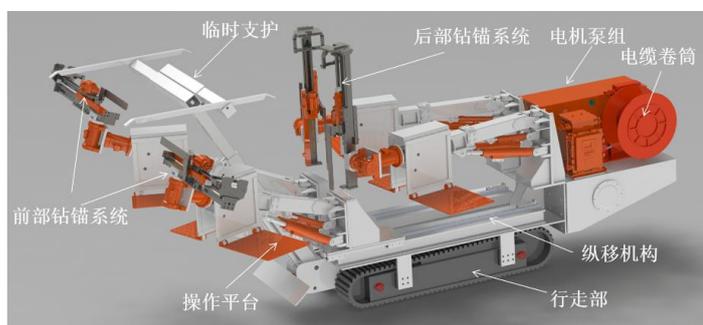


图 12 掘锚护一体机总体方案



图 13 大扭矩气动锚杆钻机

(3) 研发了联动式柔性网自动铺设装置和机械化钢带输送装置。研发了柔性网自动铺设装置（图 14a），掘进设备增设滚网轴和网卷存放架，实现金属网随机自动铺设，减少了送网、铺网和联网的时间。发明了柔性网自动铺设装置（图 14b）通过增设水平输送部、倾斜输送链条、驱动部和高度调整油缸，在锚杆钻机的配合下实现钢带自动输送和安装，从而减少了钢带安装时间、消除了人工铺设带来的安全风险。

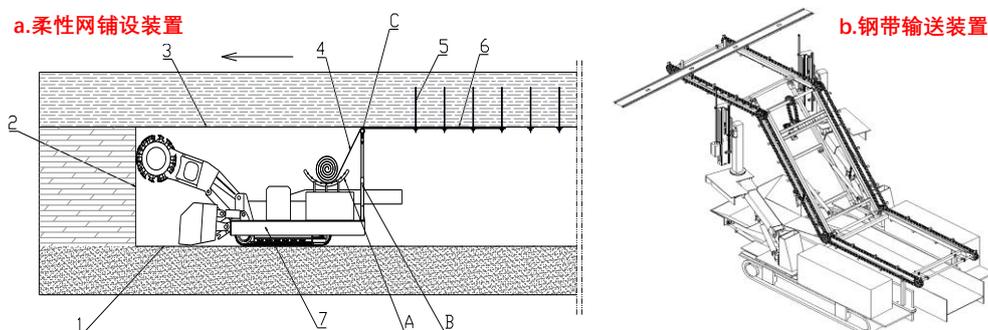


图 14 研发的材料输送安装机构

(4) 形成了适应我国复杂多样工程条件的三种工艺装备方式。我国煤矿条件复杂多样，根据巷道掘进空顶自稳的时空条件，在上述三种装备研发成功的基

基础上，提出三种配套方式：顶板稳定条件下掘锚平行作业和柔性长锚固技术相结合的高效支护与快速掘进配套方式；顶板相对稳定条件下掘锚护一体化设备和长锚固时效控制技术相结合的快速掘进配套方式；顶板稳定性差条件下普通掘进机和大扭矩气动锚杆钻机相结合的灵活掘进配套方式，可满足我国 95% 以上的工程地质条件，显著提高了掘进效率和安全保障。

该研究方向本年度共发表 SCI 论文 13 篇，授权发明专利 24 项，获江苏省科学技术一等奖 1 项、煤炭工业协会科学技术一等奖 1 项、中国质量技术二等奖 1 项，研究成果已在内蒙古中天合创葫芦素矿和门克庆矿、江苏大屯姚桥矿、安徽新集刘庄矿等类似地质条件矿井进行了推广应用，取得了显著的经济效益和社会效益。

3、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 15）。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 16）。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 17)。

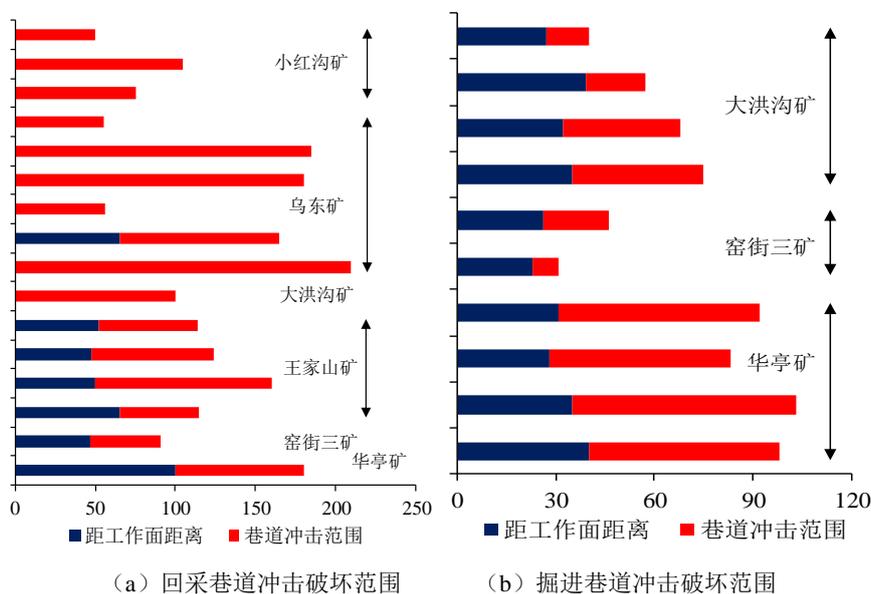


图 15 急倾斜分段开采冲击破坏位置及破坏范围

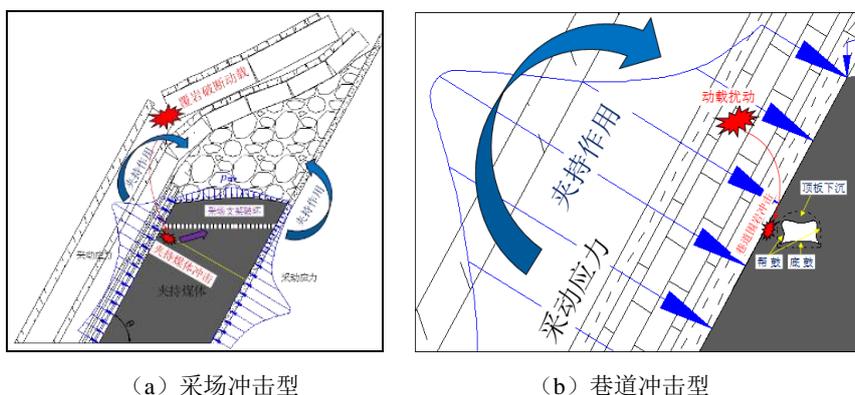


图 16 急倾斜分段开采冲击类型

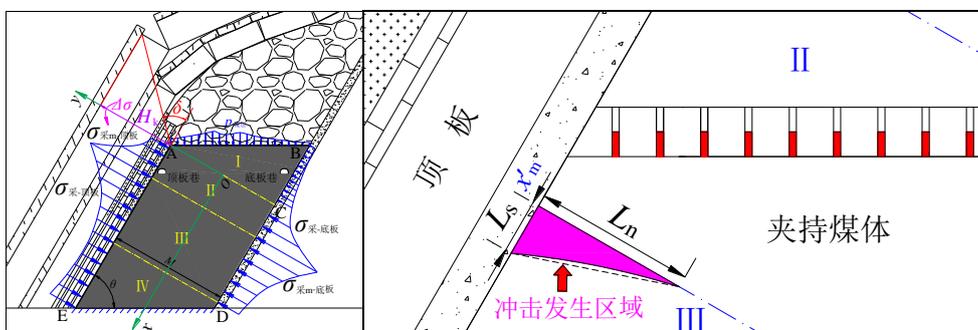


图 17 急倾斜分段开采冲击的非对称性

(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 18），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。

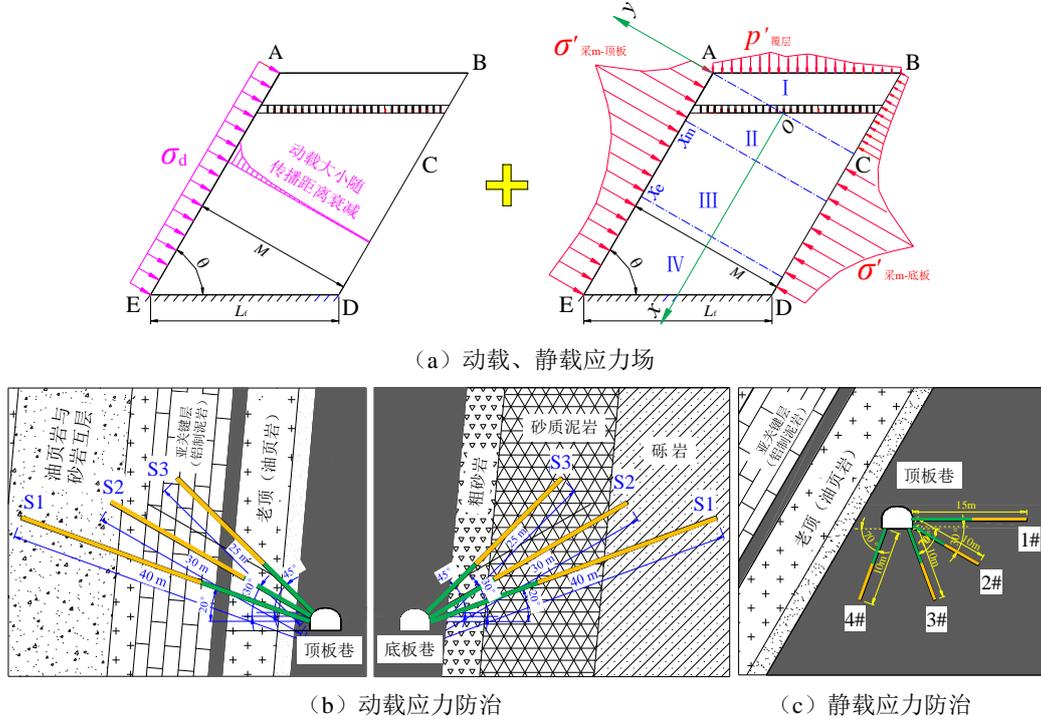
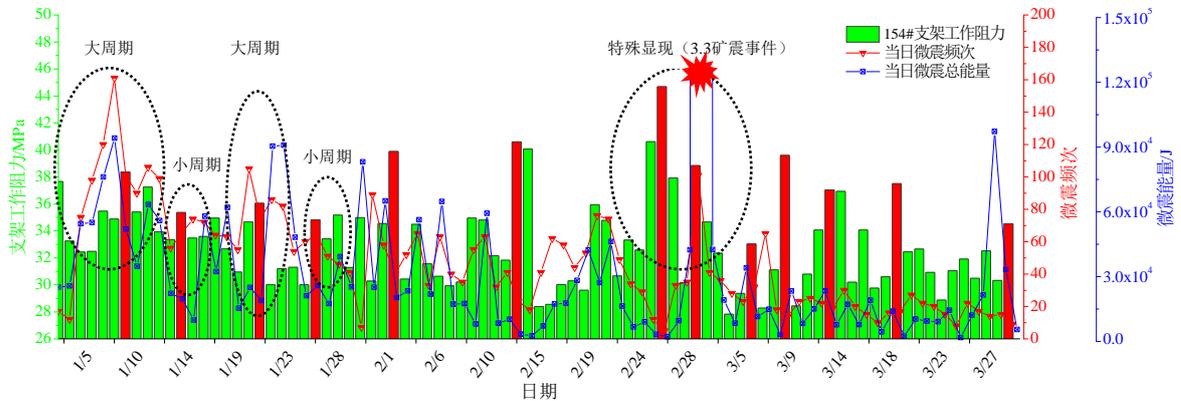


图 18 急倾斜采场夹持煤体冲击动静载防治实践

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 19、图 20），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。



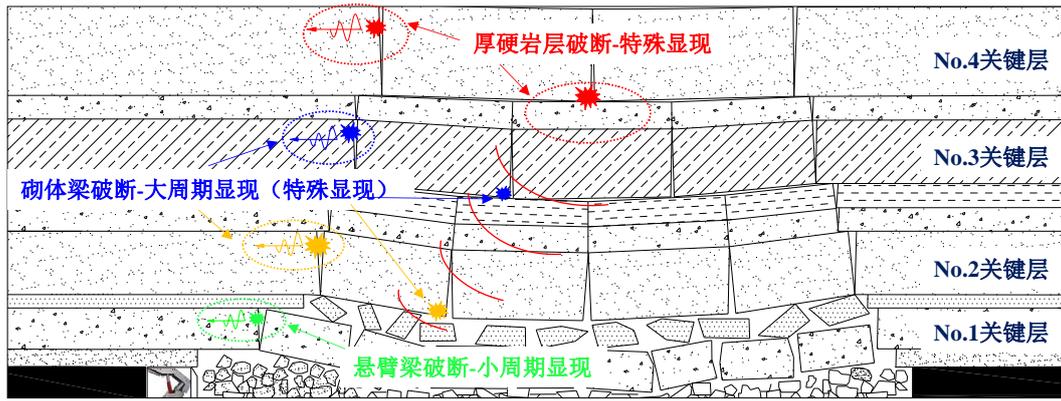


图 20 工作面覆岩结构及显现特征

(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 21）。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。

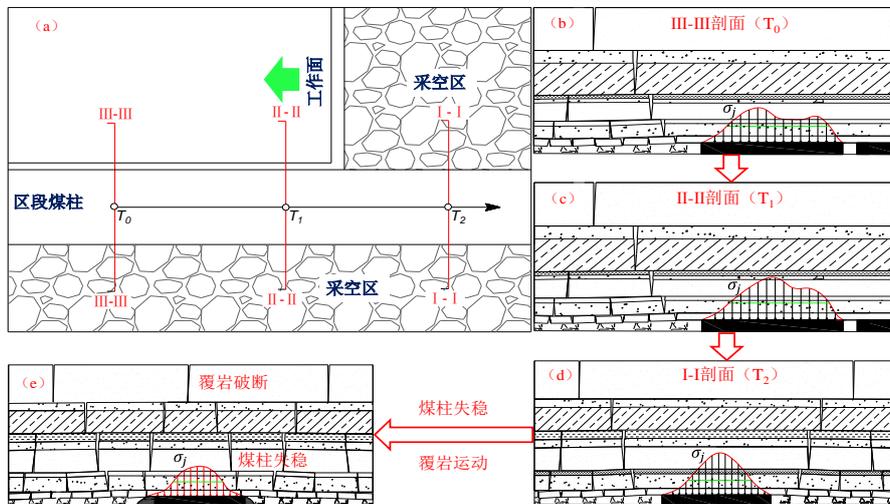
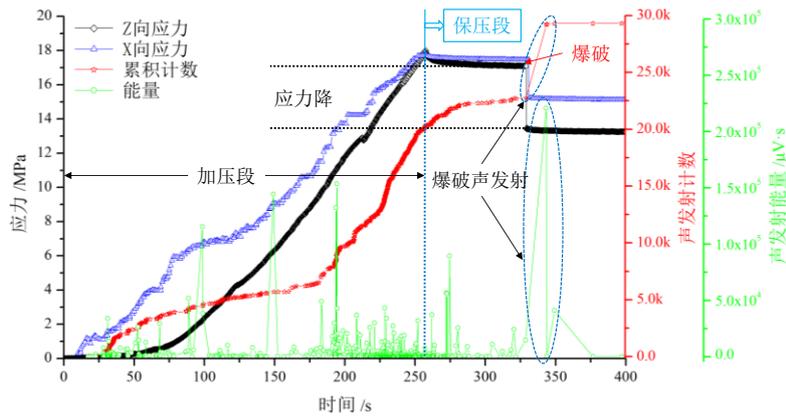
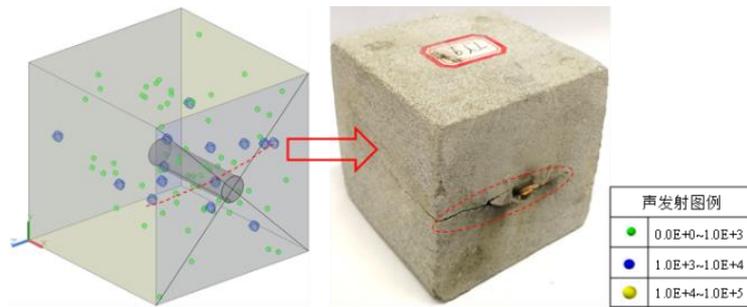


图 21 采场内煤柱应力演化示意图

(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 22）。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 22 三轴承压爆破试验结果图

该研究方向本年度共发表 SCI 论文 14 篇，授权发明专利 6 项，申请发明专利 9 项，获高等学校科学研究优秀成果奖（科学技术）科学技术进步奖二等奖 1 项、甘肃省科技进步二等奖 1 项、煤炭工业协会科学技术二等奖 1 项、煤炭工业协会科技技术三等奖 1 项，研究成果已在窑街三矿、门克庆煤矿等类似地质条件矿井进行了推广应用，取得了显著的经济效益和社会效益。

4、深部煤矿井下分选与就地充填理论与技术

针对我国深部煤炭资源开发遇到的难题与绿色化开采的发展趋势，建立了深部煤矿井下分选与就地充填理论与技术体系，提出了矸石井下分选与就地充填开采的协调设计方法，以形成煤矿矸石井下分选及就地充填的开采模式，并在平煤集团十二矿等多个深部矿井进行了初步工程应用。

1) 深部煤矿井下分选与就地充填理论与技术体系

基于生态环境保护、煤炭开采环境污染源头治理的理念，提出深部煤矿井下分选与就地充填概念，即在井下实现煤炭开采、煤矸分离及矸石就地充填，直接生产出清洁煤炭，包含煤流矸石井下分选与分选矸石就地充填两大技术体系。重点从井下分选与就地充填的技术原理、关键装备、工艺、控制指标参数以及效果

保障等方面开展研究，并结合具体煤矿的工程地质条件以及实际工程需求，提出矸石井下分选与就地充填开采的协调设计方法，以形成煤矿矸石井下分选及就地充填的开采模式，总体技术框架如图 23 所示。

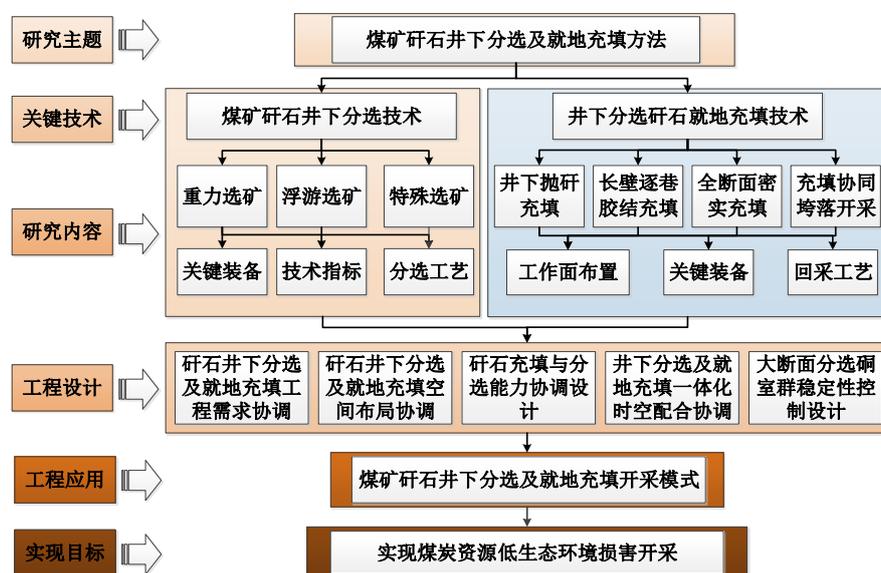


图 23 井下分选与就地充填理论与技术体系研究框架

2) 矸石井下分选及就地充填开采协调设计方法

矸石井下分选与就地充填开采协调设计方法是指在井下布置一套完整的矸石分选和就地充填系统，将工作面割落的原煤输送至矸石井下分选系统，分选后的煤炭运输至地面，矸石输送至就地充填系统，经处理加工成充填物料后输送至充填工作面进行充填利用。通过两个系统之间紧密结合，实现矸石井下分选与就地充填，达到矸石不升井直接置换煤炭的目的。矸石井下分选及就地充填以低生态环境损害为控制目标，基于煤层安全开采、矸石近邻排放、瓦斯近零排放、地下水环境保护、地表沉陷控制以及煤层高效开采的工程需求，将矸石井下分选与就地充填技术紧密结合，在井下进行煤炭开采、煤矸分选、矸石就地充填的同时，实现煤炭资源安全、绿色、高效开采，如图 24 所示。

3) 平煤集团十二矿工程实践

河南省平顶山天安煤业股份有限公司下属十二矿生产能力 1.3Mt/a，煤层埋深达 1100m，现剩余可采储量为 2384.9 万 t，其中“三下”压煤量达 1234.3 万 t。目前主采采区为三水平的已₁₅煤层，埋深 1005~1166 m。已₁₅煤原始瓦斯含量高达 15.3m³/t，瓦斯压力 1.78MPa，透气性系数仅 0.078m²/MPa²d；已₁₅煤上覆已₁₄煤层赋存不稳定，煤厚仅 0.5m。主采煤层开采面临四大技术难题：一是开

阻力 7800kN；多孔底卸式输送机运输能力 500t/h。该矿首采充填面为已₁₅₋₃₁₀₁₀混合工作面，目前共开采出 3 个充填工作面，累计采出“三下”煤炭资源约 515.95 万 t、处理井下矸石 42.00 万 t，抽采瓦斯 9656.22 万 m³，瓦斯发电 4829.29 万 kW h，取得显著经济社会效益。

该研究方向本年度发表高水平学术论文 15 篇，其中 SCI 论文 13 篇，EI 论文 2 篇，授权国际发明专利 5 项，授权中国发明专利 11 项。

5、深部矿井降温与煤-热共采理论与技术

制约深部开采的难题之一是矿井热害问题，而地热本身是一种清洁能源。改变传统的深井“热害”观念，基于煤矿绿色开采及资源高效利用理念，把深部矿井降温与地热能开发相结合，建立了深部矿井降温与煤-热共采的理论与技术框架，同时，着眼更深地层地热能开采，开展了深层干热岩水压致裂与水力剪切增透机理及相关理论的研究，并取得若干研究成果。

1) 深部矿井降温与煤-热共采的理论与技术框架

基于绿色开采及资源高效利用理念，提出了深部矿井降温与煤-热共采的概念，从工程背景、科学问题、关键技术和工程实践等方面阐述了煤-热共采的基本理论与技术框架（图 26）和煤与地热资源共采工艺概念模型。

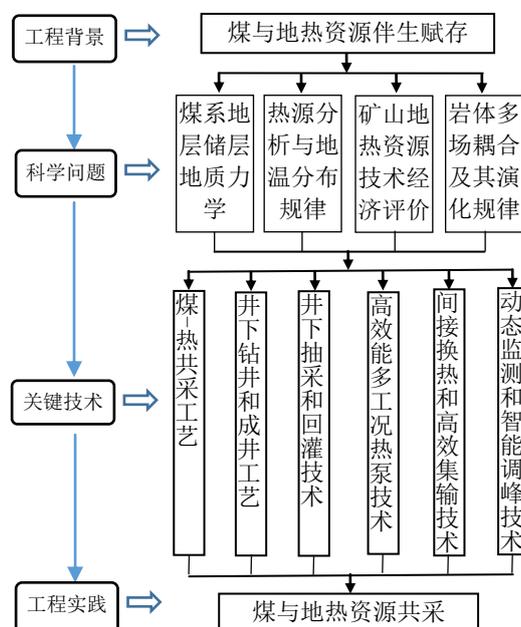


图 26 煤与地热资源共采理论及技术框架

结合唐口煤矿地质与水文条件，采用数值模拟方法对矿区地热水资源量进行了估算与评价。矿井排水、深部地热水、矿井回风和生活洗浴用水四个方面，余

热资源日可回收能量为 22.09×10^5 MJ，折合日可回收功率为 12.45MW。基于深部矿井煤-热共采理论，提出了唐口煤矿的矿井地热综合利用方案（图 27）。

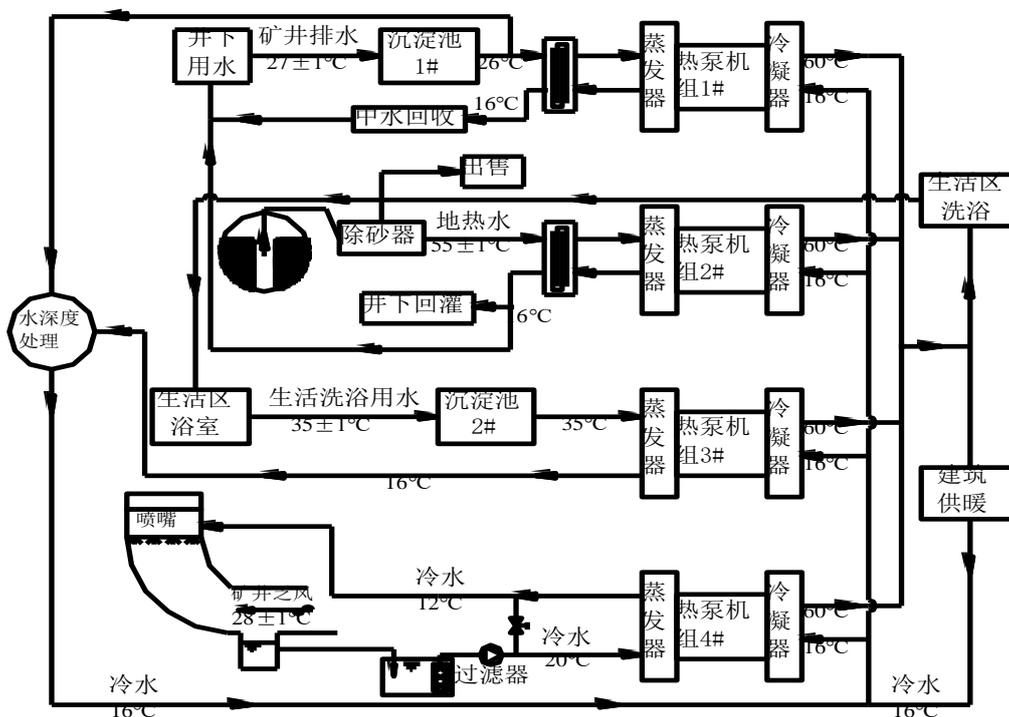


图 27 唐口煤矿的矿井地热综合利用方案

2) 高地温及深循环热水上涌所致高温巷道风流温湿度变化特征

以三河尖煤矿为例，通过分析深部热害的地质成因，揭示了热害形成的两个主要因素：高地温和深循环热水上涌，进而开展了高地温及深循环热水上涌条件下围岩-风流湿湿度演化的相似模拟实验，研究了涌水温度和流量对风流温度、湿度和焓差增值的影响（图 28）。研究表明：

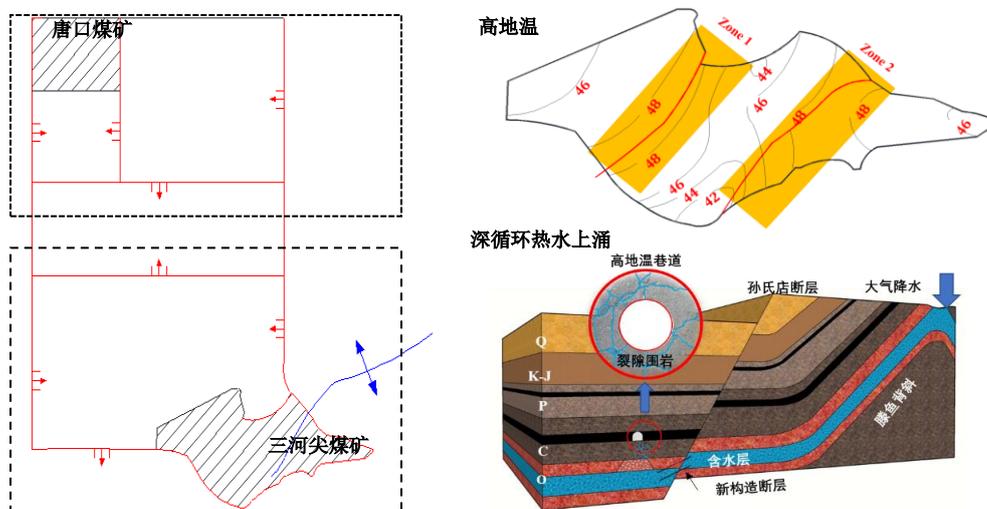


图 28 三河尖煤矿高地温及深循环热水上涌模型

(1) 随着涌水温度增加，实验时间内巷道风流的干空气总焓差小范围的上升，湿空气总焓差非线性上升，但涌水流量增加对风流显热影响不大，主要引起风流潜热的增加（图 29）。

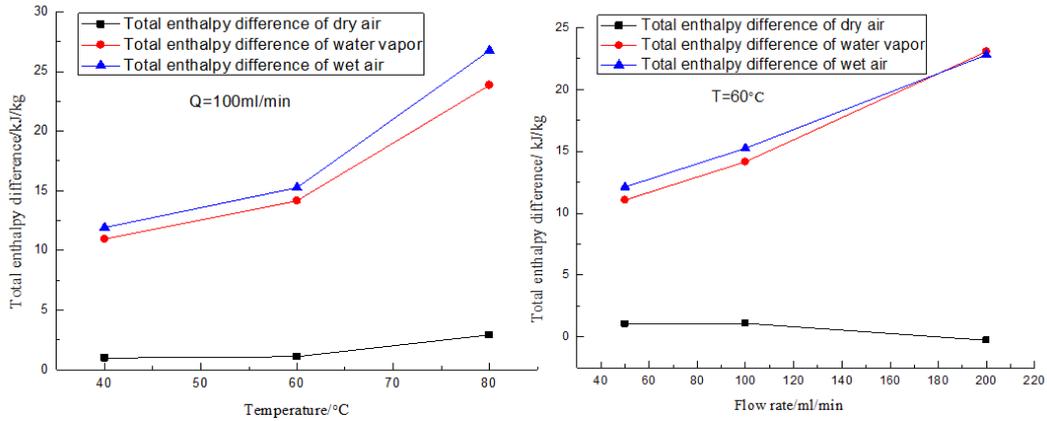


图 29 不同温度和流量下系统总焓差的变化曲线

(2) 通水初期，过涌水段处各点的湿空气焓差值依次降低，涌水流量的增大不会明显改变巷道各点湿空气焓差值的空间分布趋势，但涌水温度的增加导致的结果不同（图 30）。

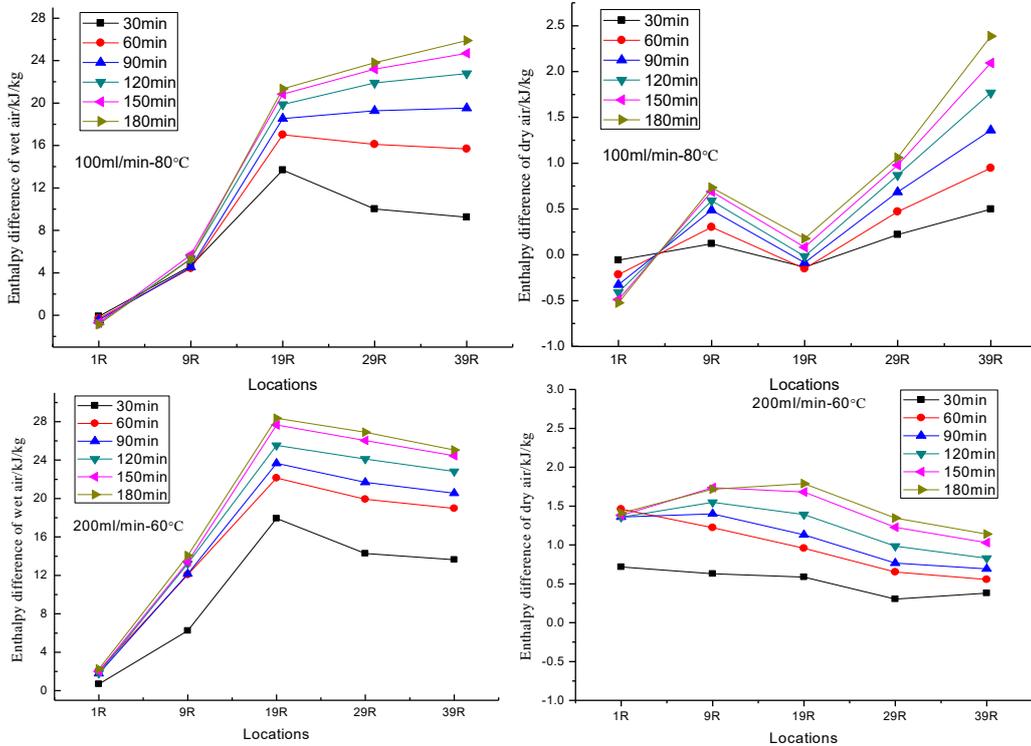


图 30 100-80 及 200-60 工况条件下涌水巷道的焓差空间分布特点

(3) 当涌水温度为 80°C（或涌水流量为 200 ml/min）时，末端的湿空气焓差值随时间有明显的激增（图 31）。

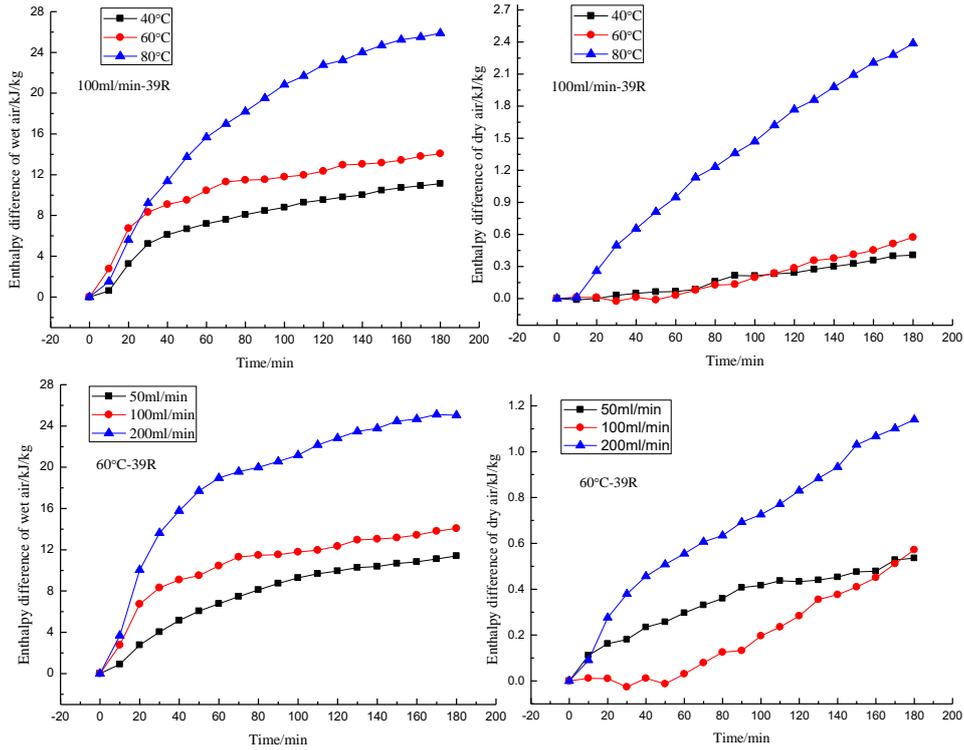


图 31 不同涌水温度及流量条件下巷道末端焓差随时间变化

3) 地热储层水力剪切增透理论与技术

建造增强型地热系统该系统的关键技术之一是水力剪切增透，即通过注水诱发地热储层中的裂隙剪切滑动，增大裂隙张开度，提高热储渗透性。采用理论分析、实验探究、建立模型和数值实验相结合的方法，系统研究了地热储层水力剪切增透技术的原理和实现方法，主要成果如下：

(1) 提出了考虑裂隙表面粗糙度、倾角、注水压力等多因素影响下的裂隙岩体水力剪切破坏准则，并验证了其适用性；分析了多因素影响下裂隙网络水力剪切滑动特征，揭示了表面粗糙度、倾角、注水压力等因素对裂隙水力剪切的影响机理（图 32）。

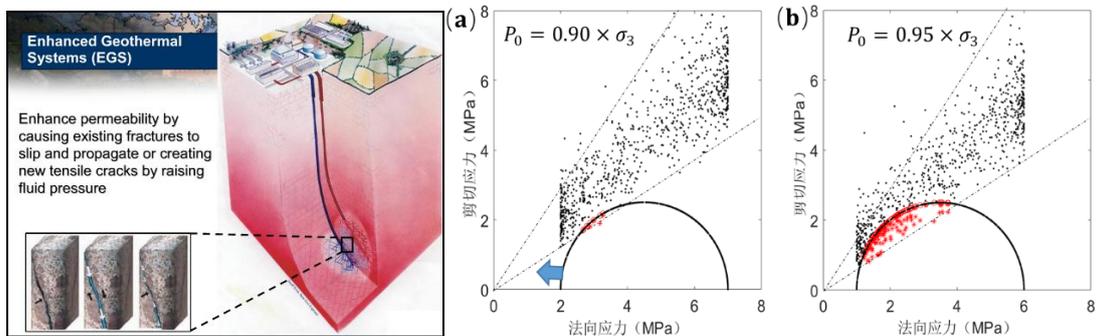


图 32 水力剪切增透机理示意图及注水诱发裂隙剪切滑动原理

(2) 研发了实时高温下裂隙岩体直剪实验系统，研究得到了表面粗糙度、法向应力和温度共同作用下的裂隙岩体剪切力学行为特征，揭示了不同温度条件下表面粗糙度和法向应力对裂隙岩体剪切变形的影响机理（图 33）。

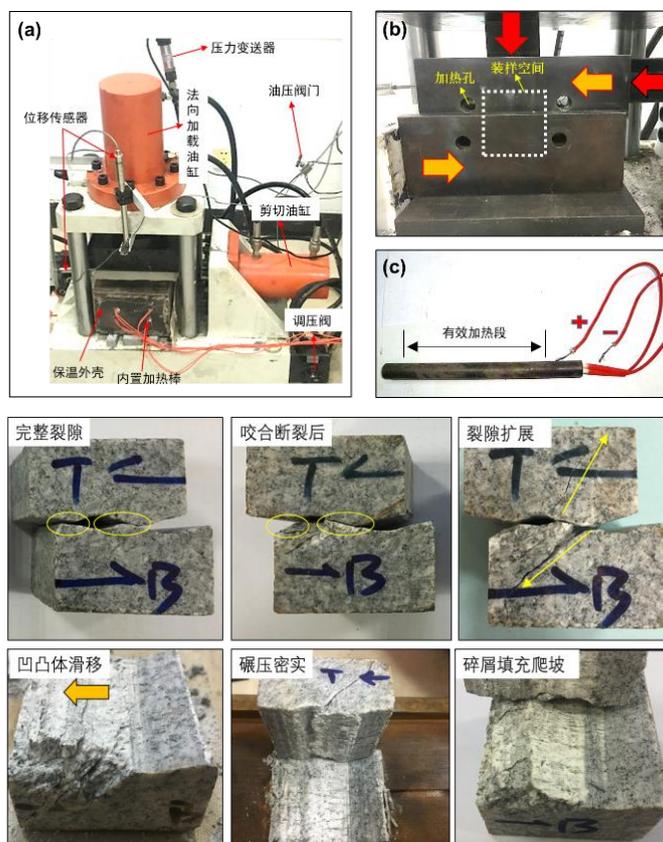


图 33 高温高压裂隙岩体剪切系统及破坏后的样品

(3) 提出了裂隙岩体剪切过程中的表面粗糙度退化模型，建立了基于该退化模型的裂隙岩体剪切本构模型和剪切-渗流模型；建立了热流固耦合作用下裂隙岩体剪切-渗流-传热耦合方程并求解，揭示了单裂隙及裂隙网络的剪切-渗流-传热特性和温度场演化规律（图 34）。

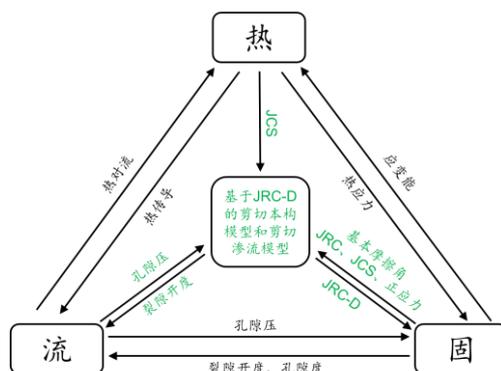


图 34 裂隙岩体剪切-渗流-传热耦合原理图

(4) 根据西藏羊八井实际地质条件，建立了断层地热开发利用模型，并进行了应用分析，揭示了背压、流速等因素对出水温度、发电功率和累计发电量的影响规律，提出了提高断层地热系统热量采出率的技术策略（图 35）。

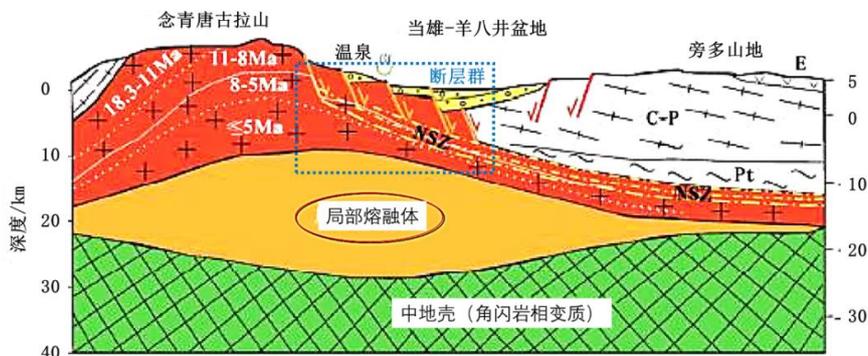


图 35 当雄-羊八井盆地壳结构及构造样式图

本研究方向本年度发表 SCI 论文 11 篇，EI 论文 3 篇，核心论文 3 篇，申请国家发明专利 17 件，获得省部级科技进步三等奖 1 项；培养博士生 1 名，硕士生 4 名。