

引用格式: 刘峰,曹文君,张建明,曹光明,郭林峰.我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J/OL].煤炭学报:1-16[2021-01-21].<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.0042>.

doi:10.13225/j.cnki.jccs.2021. 0042

我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向

刘 峰^{1,2} 曹文君¹ 张建明¹ 曹光明¹ 郭林峰¹

(1.中国煤炭工业协会,北京 100013; 2. 中国煤炭学会,北京 100013)

摘 要: 煤炭是我国的基础能源和工业原料,长期以来为经济社会发展和国家能源安全稳定供应提供了有力保障。作为煤炭工业健康有序发展的核心动力,“十三五”以来,我国煤炭行业自主创新能力得到了大幅提升,实现了从跟踪、模仿到部分领域并跑、领跑的转变,取得了突出的成就。系统总结了“十三五”以来我国煤炭科技取得的主要成果,梳理了煤炭地质勘探、矿井建设、煤及共伴生资源开采、矿井灾害防治、煤机装备与智能化、洁净煤技术、节能环保与职业健康等七个领域所取得的理论、技术及工程应用方面的进展。分析了当前煤炭科技发展面临的共性问题,指出煤炭科技创新支撑我国煤炭工业高质量发展的能力依然不足。提出了煤炭科技自立自强、完善现代化煤炭开发利用理论与技术体系的“十四五”煤炭科技发展目标。围绕煤炭安全绿色智能开采和清洁高效低碳利用,明确了“31110”科技创新主要任务,包括煤炭绿色智能开采、煤矿重大灾害防控、煤炭清洁高效转化三大煤炭基础理论研究,煤炭资源勘查与地质保障、大型现代化矿井建设、煤炭与共伴生资源协调开采、煤矿灾害防治、煤矿智能化与机器人、煤炭清洁高效加工、煤炭高效转化利用、煤矿职业危害防治、煤矿应急救援、资源综合利用与生态保护十大重点领域核心技术攻关,煤矿井巷全断面快速掘进、复杂地质条件煤层智能综采、智能化煤矿建设、智能精细高效洗选、煤炭分质利用技术、煤炭液化及高端化工品制备、废弃矿井地下空间资源综合利用、矿区大宗固废资源利用、大型矿区生态修复、煤炭产品质量精准调控十项重大技术创新示范,复杂地质构造槽波地震探测、导井竖井掘进机凿井、掘支运一体化全断面岩巷掘进、煤矿井下水力压裂增透、干法矿物高效分离、采煤沉陷区土地复垦与农业生态再塑、智能无人综采工作面等百项先进适用技术推广应用,为“十四五”时期煤炭科技的发展方向提供了指导意见。

关键词: 煤炭科技; 煤炭开发; 主要任务; 清洁利用; 发展方向

中图分类号: TD

文献标识码: A

The Technological Innovation Progress and Development Direction of the 14th Five-Year Plan Period in Chinese Coal Industry

LIU Feng^{1,2}, CAO Wen-jun¹, ZHANG Jian-ming¹, CAO Guang-ming¹, GUO Lin-feng¹

(1. China Coal Industry Association, Beijing 100013, China; 2. China Coal Society, Beijing 100013, China)

Abstract: As the basic energy and industrial raw material, coal has provided an effective guarantee for the

收稿时间: 2021-01-

基金项目:

作者简介: 刘 峰 (1967—), 男, 甘肃平凉人, 研究员, 现任中国煤炭工业协会副会长、中国煤炭学会理事长, 从事煤炭科技管理工作。

socio-economic development and the national energy security and stable supply in China. Since the 13th Five-Year Plan period, the independent innovation capability of the coal industry has been significantly improved as the core driving force for the coal industry healthy and orderly development, which has been realized the transformation from tracking, imitating to parallel running and leading in some areas, and has been achieved the outstanding achievements. This paper systematically summarizes the main achievements in Chinese coal technology during the 13th Five-Year Plan period, and teases out the progress of theory, technology and engineering applications in seven fields, including coal geological exploration, mine construction, coal and associated resource mining, mine disaster prevention, coal machinery and equipment and their intelligence, clean coal technology, energy conservation and occupational health. Then this paper analyzes the common problems the current coal technology development faced and points out that the coal technological innovation abilities are still inadequate to support the high-quality development of Chinese coal industry. The coal scientific and technological development goals of the 14th Five-Year Plan period are put forward to improve the modern development, utilization theory and technical system of coal technology towards self-reliance. In order to provide guidance for the development direction of coal technology in the period of the 14th Five-Year Plan, the main tasks of “31110” scientific and technological innovation are specified around the coal safe, green, intelligent mining and clean, efficient, low-carbon utilization, which include the three basic coal theories research: green intelligent coal mining, prevention and control of major coal mine disasters and coal cleanness conversion; the core technical research of ten key fields: coal resource exploration and geological protection, large-scale modern mine construction, coordinated mining of coal and associated resources, coal mine disaster prevention, coal mine intelligence and robots, clean and efficient coal processing, efficient conversion and utilization of coal, prevention of occupational hazards in coal mine, coal mine emergency rescue, and comprehensive utilization of resources and ecological protection; ten major technological innovation demonstrations: full-face rapid excavation of coal mine shaft, intelligent fully mechanized coal mining in complex geological conditions, intelligent coal mine construction, intelligent, fine and efficient washing, coal utilization technology, coal liquefaction and high-end chemical preparation, comprehensive utilization of underground space resources in abandoned mines, utilization of bulk solid waste resources in mining area, ecological restoration of large mining areas, accurate control of coal product quality; and hundreds of the promotions and applications of advanced applicable technologies, such as full-face rapid excavation of coal mine, intelligent coal mine construction, high effective dry coal beneficiation technology, *et al.*

Key words: Coal science and technology; coal exploitation; main tasks; clean utilization, development direction.

煤炭作为我国的基础能源和工业原料，长期以来为经济社会发展和国家能源安全稳定供应提供了有力保障。“十三五”以来，在国家推动供给侧结构性改革政策措施指导下，经过5年的不懈努力，过剩产能得到了有效化解，煤炭生产结构优化，市场供需实现了基本平衡，行业效益回升，转型升级取得实质进展，煤炭行业改革发展迈上新台阶。

作为煤炭工业健康有序发展的核心动力，煤炭行业自主创新能力得到了大幅提升，建立起以企业为主体、市场为导向、产学研协同创新的科技创新体系，初步形成功能互补、导向明确的行业研发平台和创新基地合理布局，煤炭科技实现了从跟踪、模仿到部分领域并跑、领跑的转变，取得了突出的成就。其中，在大型矿井建设、地质精细化勘探、特厚煤层综放开采、燃煤超低排放发电、高效煤粉型和水煤浆浆体化工业锅炉、现代煤化工等领域的共性关键技术达到国际领先水平；煤机装备实现了国产化，装备制造水平位于世界前列，引领了国际煤炭智能化开采发展方向；超大采高智能开采关键

技术与成套装备研发应用，煤制油品/烯烃大型现代煤化工成套技术开发及应用，煤间接液化成套技术创新开发及产业化等大型示范工程项目实施取得成功，为行业平稳运行，提高发展质量和效益，推动现代化煤炭经济体系建设奠定了坚实基础。

因此，总结“十三五”期间煤炭行业科技创新成果，回顾各领域取得的进展，分析煤炭科技面临的共性问题，确定“十四五”科技创新发展目标，厘清煤炭科技发展所面临的制约因素，部署科技创新重点任务，对于引导煤炭行业深化改革创新及供给侧结构性改革，推动新时期煤炭工业高质量发展具有重要意义。

1. “十三五”煤炭工业科技创新进展

1.1 煤炭地质勘探

“十三五”以来，煤炭地质勘查理论体系不断完善，形成了具有中国特色的煤炭地质学新理论与综合勘查技术体系、矿井复杂地质构造与灾害源探测

体系、矿井灾害源超深探测地质雷达装备及技术方法、采煤工作面涌水量多阶动力学动态预测技术等代表性理论与技术成果。

在资源勘查方面，发展出适合中国煤炭资源分布特点的煤炭资源综合勘查技术体系，将“煤田地质勘探”发展为以煤为主、包含煤层气、页岩气、致密砂岩气以及高岭土、铝土矿、“三稀（稀有、稀土、稀散金属）”等多能源矿产协同勘查，并涵盖煤炭勘查、矿井建设、安全生产、环境保护等内容的“煤炭资源综合勘查”。

在地质构造探测方面，建立了矿井复杂地质构造与灾害源探测体系，“地震主导、多手段联合、采前采中配合”矿井地质保障技术的成熟应用，可查明1000m深度以内落差3~5m以上的断层和直径20m以上的陷落柱。国产井下随钻测量定向钻进技术与装备取得重要进展，创造了井下深孔定向钻进3353m的新记录。开发了矿井灾害源超深探测地质雷达装备及技术方法^[1]，国内外首次实现了80m范围内的地质构造和灾害源的精细探测，探测距离提高1.6倍以上，地质构造验证率平均达75%；开发矿井低频地质雷达探测系统及CT透视反演软件，首次实现了透射法300米跨度工作面的地质构造和灾害源的精细探测，探测精度提高30%以上^[2]。

在矿井水害预测方面，发明了工作面涌水量采前快速预测与采中动态校正方法，开发了涌水量动态预测软件，实现了工作面推采过程采空区峰值涌水量、动态稳定涌水量及发生位置的精细预测，将应用矿井工作面涌水量预测精度从70%以下，提高到85%以上，完善了矿井涌水量预测技术体系^[3]。

1.2 矿井建设

“十三五”以来，矿井建设理论体系不断完善，立（斜）井凿井、快速高效掘进、巷道支护等关键技术取得历史性突破，形成了以冻结、钻井、注浆为主的建井理论与技术体系，研制出超大直径深立井建井技术和大型成套装备。

在立（斜）井凿井建设方面，攻克了深厚岩层中新型单层冻结井壁技术、深部冻土成套实验装置与技术和冻结孔固管充填缓凝水泥浆液及施工技术，使得深立井建设最大主井井筒净直径达到9.6m^[4]；建立了复杂地层深长斜井冻结壁三维动态模型和冻结壁设计计算体系，研发了深厚含水砂层深长斜井冻结段井壁结构、施工工艺技术及装备，解决了深长斜井冻结调控难题和“冻掘”矛盾^[5]；形成了盾构施工煤矿斜井的成套装备与技术体系，解决了煤矿长距离斜井深埋超长、连续下坡、富水高压、地层多变等重大技术难题^[6]；变革了竖井和斜井施

工方法，攻克了深井、大直径、坚硬岩石和复杂地层反井钻井的破岩、排渣、偏斜和井帮稳定性控制等难题，并研发了大直径反井钻井成套技术与装备^[7-8]。

在巷道掘进方面，发明了井巷掘进爆破新技术和液压凿岩控制的钻装锚一体机，解决了钻爆施工中存在的“周边成型差、炮孔利用率低、围岩损伤严重”等难题^[9]；引入日臻成熟的山岭隧道、城市地铁全断面掘进机施工技术和装备，降低了劳动强度、提高了煤矿深井岩巷掘进效率；研发了煤矿深井巷道全断面硬岩掘进机，实现了掘进、支护、排矸、辅助运输同步作业；研发了国内首台煤矿大直径、大埋深、长距离煤矿岩巷全断面盾构机（新矿1号）；应用了掘支运一体化快速掘进技术与装备的应用；形成了掘锚一体机、锚杆转载机和柔性连续系统为主体的智能快速掘进成套装备，突破了掘支运一体化快速掘进技术，实现了高效掘进；并研发了首套集智能截割、自动运网、自动钻锚等技术为一体的智能快速掘进系统，有效提高了掘进水平和支护质量。

在巷道支护方面，创建了国际上唯一能测试井下锚杆支护系统复杂受力状态的综合试验平台，攻克了高强度锚杆受冲击载荷作用易破断难题，形成了煤矿巷道抗冲击预应力支护成套技术体系^[10]；首次提出了冲击地压巷道防冲吸能支理论及技术体系，发明了系列巷道防冲吸能支护装备，有效降低了冲击地压巷道破坏程度^[11]；研发了具有NPR结构的新型恒阻大变形锚杆/索，并成功应用于巷道大变形控制与预测^[12]；研发了锚架充协同控制技术，实现了千米深井软岩大巷围岩大变形的有效控制。

1.3 煤及共伴生资源开采

“十三五”以来，煤及共伴生资源绿色开采理论与技术创新百花齐放，形成了厚及特厚煤层开采、煤炭资源绿色开采、煤与瓦斯共采、煤与油气气共采等代表性理论与技术成果。

在厚及特厚煤层开采方面，开发了7.0m特厚硬煤层超大采高智能化综放开采成套技术与装备，研发了8.2m一次采全高综采工艺及装备技术，形成了千万吨级综放工作面智能控制关键技术，创建了特厚煤层开采坚硬顶板大空间采场坚硬岩层控制理论，研发了基于地面压裂技术与井下预裂的远近场协同控制技术体系，实现了特厚煤层安全开采理念、技术和装备的重大突破^[13-15]。在急倾斜煤层开采方面，揭示了急倾斜特厚煤层综放开采覆层形成和顶煤结构畸变致灾机制，创建了急倾斜厚煤层综放开采顶煤放出理论（BBR理论），研发了急倾

斜厚煤层综放开采的专用支架与采场围岩控制技术^[16]。

在煤炭资源绿色开采方面,提出了西部浅埋地层隔水岩组隔水性判据和保水开采分类方法,开发了柔性条带充填保水开采技术,建立了保水采煤技术体系,有效指导了生态脆弱矿区煤炭资源开采和生态环境^[18];发现了遗煤开采的扰动面接触块体梁岩体结构,提出了遗煤柱群链式失稳的关键柱理论,研发了遗煤开采可行性定量判定方法,研发了遗煤开采岩层控制的关键技术,指导优质遗煤高效回收^[19-20];提出了“切顶短臂梁”理论,研发了无煤柱自成巷 110 工法和 N00 工法,实现了采(盘)区内无煤柱和无巷道掘进,形成了具有我国自主知识产权的采煤工艺和装备系统^[21];发明了柔模支护无煤柱开采技术及其配套装备,开发了柔模支护充填开采技术和柔模充填支架,提出了锚杆与柔模混凝土硐相结合的巷道支护方法;提出了煤炭资源“采选充+X”绿色化开采技术构想,形成了煤炭“采选充+X”(控、留、抽、防、保)协同生产模式^[22-23]。除此之外,还开发了露天矿区绿色开发的系列关键技术^[24]。

在煤与瓦斯共采方面,开发了碎软低渗煤层顶板岩层水平井分段压裂成套开发技术工艺^[25],研发了煤矿用履带式钻进高压旋转水射流破煤钻扩造穴一体化技术,提出了高压水压裂-冲孔联作的煤岩缝网改技术^[26],发明了脉动水力压裂裂缝导向控制高效致裂增透技术^[27-28],创建了以全孔段均衡作业为核心技术思想的可控冲击波煤层增透技术^[29],研发了水平井与千米钻孔对接抽采、大孔径裂隙带定向长钻孔抽采、厚煤层沿空留巷及留巷钻孔抽采、双向立体交错抽采、大直径水平钻孔桥接抽采、双管柱筛管完井与洗井增产、采动卸压瓦斯分域联动导流抽采、软岩保护层卸压抽采等瓦斯增产技术等,完善了煤层气高效抽采数系统^[25-31];除此之外,还发明了煤层气高效开发无线随钻测量钻进技术,研制了具有多逻辑保护回路与钻进参数监测功能的超长定向孔钻进装备,研制了 $\Phi 89\text{mm}$ 高强度大通孔无缆定向钻杆、磁吸牙片限位反转式钻头和内附导向衬管式钻杆,研发了煤矿井下 3000m 超长距离传输的泥浆脉冲无线随钻测量系统,发明了复杂结构井导向钻井随钻测控技术^[1]。

在煤与油型气共采方面,建立了油型气(瓦斯)勘查技术,创新了油型气(瓦斯)“预-探-抽”一体化精准防治技术,研究了油型气爆炸与巷道扩散规律,研制了煤矿油型气检测装置;发明了油型气不均匀涌出工作面连续高效开采方法,研发了超前预

测多机联动智能控制系统,首创了煤与油型气共生矿区安全智能开采技术体系;研发了煤与油型气共生矿井安全保障及智能开采配套技术与装备,制定了安全智能开采技术和管理标准体系^[32]。

1.4 矿井灾害防治

“十三五”以来,矿井灾害防治理论体系不断完善,冲击地压防治、瓦斯灾害防控、矿井水害防治、煤层自燃与火灾防治、复合动力灾害防控等关键技术取得历史性突破,形成了以灾害预测和防控为核心的理论与技术体系。

在冲击地压防治方面,建立了集中静载荷疏导的区域防范冲击地压的理论与技术体系,开发了以诱发冲击启动的载荷源为中心,分源监测、分源防治的局部冲击地压防治技术^[33];研发了冲击地压危险动静载区域探测技术与装备,研发了冲击地压危险多尺度多元融合预警关键技术与方法^[34];构建了以“分类分治”为核心的深部煤层冲击地压防治“七模块”技术体系^[35];提出了冲击地压巷道防冲吸能支理论论及技术体系,发明了系列巷道防冲吸能支护装备,发明了冲击地压能量释放与吸收监测装置^[11]。

在瓦斯灾害防治方面,论证了瓦斯含量法指标预测煤与瓦斯突出的科学性,发展了基于瓦斯含量法预测煤与瓦斯突出的瓦斯含量临界值^[36];在煤与瓦斯突出防控方面,确定了矿井煤与瓦斯突出的力学作用机理,发明了全过程监测、多元信息融合的突出预警方法^[37];创建了多尺度强湍流瓦斯爆炸动态传播和湍流-火焰-超压多场耦合理论,形成了矿井瓦斯封闭抑爆与隔爆协同防控技术体系^[38]。

在矿井水害防治方面,制订和实施了有效的底板寒武灰岩水害防治措施和地热水利用方案^[39],创建了“直孔水平三支互嵌”和“直孔垂向两分层重叠”的射流孔含水层改造技术^[40],提出了砂-土-基岩水害、高承压基岩水害、白垩系巨厚砂层离层水害和地表水-薄基岩水害 4 种顶板水害模式,制定了不同模式下水害防治技术,构建了“系统解析→动态预测→分区防控→控制疏放”的矿井顶板水害综合防控体系,并开发了烧变岩帷幕墙注浆保水技术^[3,41-42]。

在煤层自燃与火灾防治方面,研发了基于热-磁-电位复合异常响应的火区范围初探技术与附带导温杆的红外热像测温反演高温点精探相结合的火源探测成套技术,提出了煤自燃阶段跃迁理论及其预警决策体系,研发了适用于容易自燃复杂采空区下开采的风压自动调节技术,提出了 CO 气体分源治理方法;发明了多种等高效抑制煤层发火的材

料,研发了非间隔连续拖管注氮防火装备与防灭火工艺;在此基础上,集成创新形成了堵漏控风、覆盖隔氧、阻化降温的井上下联动防灭火技术体系[43-44]。

在复合动力灾害防控方面,应用蝶形破坏理论解释了巷道冒顶、底鼓、非对称大变形、冲击地压、煤与瓦斯突出以及地震等动力灾害形成的机理[45];研发了双系煤层开采水气下泄灾害预警系统和安全开采技术体系[46];界定了控制复合煤岩动力灾害的“主控地质体”概念,研发了基于声发射和微震技术的复合煤岩动力灾害微震预警新方法[47];研发了深部区采场矿压控制技术系统、巷道支护辅助决策支持系统、采场矿压预警系统、采空区煤自燃灾害预测系统、综采工作面综合防尘系统等5大系统,实现了多灾害数据开发与管理、海量数据压缩保真及多灾害智能预测与防控[48]。

除此之外,我国学者还走出国门服务孟加拉国煤炭资源安全开采,构建了特厚煤层多灾源安全开采模式,形成了极强含水层下特厚煤层开采顶板水害“上保下疏”、冲击地压“动静转移”、自燃火灾“时空适配”的综合防控技术体系,形成了中国-孟加拉国煤电联营模式,为推进“一带一路”建设做出重大贡献[49]。

1.5煤机装备与智能化

“十三五”以来,煤炭行业综采装备、巷道掘进装备、主要运输装备和辅助运输装备等实现了重大革新,保障了煤炭资源的安全高效开采。

在综采装备研发方面,研制出能够适应于7.2m厚煤层开采的MG1000/2540-GWD型采煤机,研发了基于30CrNiMo的中碳合金钢高强度厚煤层摇臂,形成了高承载能力行走系统,开发了工况自适应智能截割技术[50];研发了8.8米大采高智能化液压支架、22000kN四柱支撑掩护式强力放顶煤液压支架、20000kN急倾斜强力液压支架、纯水液压支架和巷道防冲液压支架[14,51-52];制造了高性能3×1600kW系列智能型刮板输送机,研发出直角转弯大功率重型刮板输送机,形成了主要部件整体铸造重型刮板输送机制造技术[53-55]。在此基础上,研发了适应0.65~10m煤层高智能综采成套技术装备[56]。同时,在煤矿综采成套装备再制造的设计方法、新型激光器研制、激光熔覆用合金粉末研发、采煤机械设备典型零部件绿色清洗与再制造成形加工关键技术等方面也取得了突破。

在巷道掘进装备研发方面,制造了大功率全断面自动截割成形远控掘进机,发明了掘支运三位一体巷道掘进方法,开发了智能快速掘进成套装备,

形成了掘进、支护、运输一体化智能快速掘进生产线[9]。

在主要运输装备研发方面,研制了6000米超长运距低阻智能机头集中驱动矿用顺槽胶带机,发明了长距离大运力带式输送系统永磁电机直驱、分布式张力调节、空间转弯等本体关键技术,研发了长距离大运力带式输送系统控制与监测技术,发明了长距离大运力带式输送系统安全保障技术[57-58];研发了“矿山超大功率提升机全系列变频智能控制技术”与装备”,攻克了重载平稳启动、宽范围精确调速、高精度定位、整流器无网侧电动势传感器电网优化接入、低开关频率整流器柔性启动、超大功率三电平高功率密度变频调速等核心技术,建立了基于物联网的二维远程故障预测诊断系统,实现了大型提升机的智能化控制、无人化运行和远程监控[59-60]。

在辅助运输装备研发方面,发明了隔爆型永磁交流变频同步电机系统和隔爆型锂离子蓄电池电源,设计了整车智能主动安全防护体系,发明了矿用防爆车辆整车控制系统,形成了矿用防爆锂电池无轨胶轮车系列产品;开发一种新型摩擦轮与齿轮混合驱动电喷柴油单轨吊,首创性研发出矿用大功率防爆蓄电池、柴油机混合驱动单轨吊,全方位满足煤矿辅助运输需求;研发了无人驾驶矿用自卸卡车,实现了装运排一体化运行作业。此外,还研发了基于机器视觉的煤矿运输节能与安全智能控制关键技术,实现了危险区域的人员监测、皮带防纵撕和振动筛流量异常监测功能[61-62]。除此之外,研发了千万吨级综采工作面智能高压型大流量乳化液泵站系统,发明了矿用隔爆兼本质安全型高压变频调速一体机,开发出基于一体机的智能驱动综采装备,实现了煤炭开采装备传动技术升级换代[63]。

基于上述煤机装备,我国煤炭智能开采格局初步形成。“十三五”以来,煤炭绿色开发与智能精准开采技术体系逐步建立。同时,制定了煤矿智能化发展规划和实施方案,为煤矿智能化建设描绘了路线图和施工图。具体地,

在智能开采装备研发方面,发明了工作面直线度精确检测与智能控制、采煤机记忆截割控制、刮板机智能控制、工作面集中远程智能控制等多个关键技术,研发了适用各种煤层条件具有较高智能化水平的系列化综采(放)成套装备使不同区域、不同煤层条件实现了智能安全高产高效生产[64]。

在智能远程管控研发方面,提出了智能化与远程干预结合的综合机械化采煤新模式,研发了综采工作面采煤、支护、运输等工序的智能化协调控

制技术，开发了矿井人员与车辆等动目标精确定位关键技术与系统，开发了煤矿供电无人值守及防越级跳闸技术与系统，研发了一体化矿山生产综合智能监控系统，研发了面向智能开采的煤矿安全高效生产空间信息处理关键技术，创建了亿吨级矿区复杂系统的全流程信息协同系统平台，实现了矿井群资源的智能配置和管理^[65-66]。

此外，提出了数字孪生智采工作面新系统(DTSMW)，并把物联网、5G通信、云计算等技术融合于智采工作面，创建精确的虚拟智采工作面模型，实现智采工作面生产、管理的高度数字化及模块化^[67]；提出了煤矿机器人的分类方法，构建了科学合理的煤矿机器人分类体系，规划了不同种类、层次煤矿机器人的研发路径^[68]；开通并优化了井上井下5G网络，建成了矿用高可靠5G专网系统，研发出3:1时隙配比5G网络，开展了5G成套装备规模化应用，发布《5G+煤矿智能化白皮书》，倡议建设煤矿5G应用生态，引导煤矿有序开展5G网络建设^[69]。

截至目前，全国已建成约五百个智能化采煤工作面，形成薄、中厚、厚煤层的完整智能化开采实践应用示范体系，构建了“有人巡视、无人操作”的智能开采工作面新模式^[67-69]。

1.6 洁净煤技术

煤炭是高碳化石能源，煤炭资源的洗选加工与清洁高效利用，是社会主义生态文明建设的要求，同时对缓解油气资源短缺、降低对外依存度、保障国家能源安全、降低碳排放都具有十分重大的现实意义，也是贯彻落实“六保”工作的重要途径。“十三五”以来，形成了包含煤炭洗选、提质加工、清洁转化与污染物控制的洁净煤技术体系。

在选煤技术方面，千万吨级湿法全重介选煤技术、大型复合干法和块煤干法分选技术、大型井下选煤排矸技术和新一代空气重介干法选煤技术成功应用；发明了大型复合式干法分选技术和干法重介质流化床分选技术，开发了世界上首套模块式高效干法选煤工艺系统，形成了煤炭高效干法分选关键技术，解决了长期影响干法选煤工程化的技术难题^[70]；此外，还研发出了融合图像识别和X射线识别的高压喷嘴式高精度智能干选机，以及超大处理能力原料煤、粗煤泥重介质分选及煤泥水浓缩设备等^[71]。

在提质加工及污染物控制方面，中小型高效煤粉工业锅炉、水煤浆浆体化CFB供热供暖锅炉、大容量高效煤粉工业锅炉、民用固硫抑尘型煤、烟煤解耦新型炉具、大型低阶煤热解分质分级利用等技

术取得突破；同步建设和投入运行废水处理、VOCs治理与脱硫、脱硝等装置，研发了具有靶向清洗、选择性活性补充、结构补强和脱硝催化剂全寿命管理解决方案的神华脱硝催化剂再生技术，实现了兰炭粉燃料无助燃稳定运行，攻克了粒径小于30mm、产量占低阶煤总产量80%以上的混煤热解的系列关键技术难题，突破了煤焦油分质转化高性能油品及高附加值产品的瓶颈，构建了低阶煤分质清洁高效利用技术体系。

“十三五”以来，我国现代煤化工产业快速发展，在煤制油、煤制天然气、煤制烯烃、煤制乙二醇等方面都取得了较大突破，在生产工艺、关键大型装备和特殊催化剂等领域逐步实现了国产化，传统煤化工的大型合成氨行业已全面升级换代为煤炭高温气化技术。

在煤气化方面，攻克了大型、超大型水煤浆气化和干煤粉气流床高压气化成套关键技术与装备，研发了多喷嘴对置式水煤浆气流床加压气化技术、航天干煤粉气流床加压气化技术、水煤浆水冷壁废锅流程气流床加压气化技术(晋华炉)、“神宁炉”干煤粉气流床加压气化技术、“东方炉”干煤粉气流床加压气化技术等，建成单炉日处理3000吨级、4000吨级煤气化示范工程，解决了“三高”煤难气化等煤种适应性问题；开发出气化煤浆粒控提浓系列工艺及装备，并完成了工业化，缓解了煤浆浓度低影响气化效率、煤化工污泥难处理且成本高、中浓度管输煤浆直接气化效率低等痛点。

在煤直接液化方面，完成了煤制油品/烯烃大型现代煤化工成套技术开发与应用，首创了高效大型现代煤制油品和烯烃工程化技术，突破了超大超厚装备设计及制造技术，实现了核心装备的国产化，世界首个煤直接液化和煤制烯烃工程长周期稳定运行；

在煤间接液化方面，根据费托反应的温度不同，开发出三种不同的工艺：(1)实现了超大型工业反应器放大设计制造的重大突破，建成国内首套百万吨级煤间接液化工业示范装置；(2)解决了中温条件下铁基催化剂活性结构控制和产物选择性控制的技术难题，建设成世界上单厂生产能力最大的400万吨/年煤间接液化产业化示范项目；(3)研发了高温流化床费托合成催化剂YHFT[®]-C01的制备工艺，并在国内首套10万吨/年高温费托合成工业示范装置上成功应用。

在碳减排方面，习近平总书记在联合国成立75周年大会上向世界做出庄严承诺，中国将“采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030

年前达到峰值，争取在 2060 年前实现碳中和。煤炭行业主动作为，首创了煤化工 CO₂ 捕集、咸水层封存与监测成套技术，建成了世界首个 10 万吨级煤化工 CCS 示范工程，提高了我国在国际气候战略博弈的话语权；开发了低渗咸水层多地层分类改造与多组同注、多维度监测与安全预警等成套 CO₂ 封存关键技术。

1.7 节能环保与职业健康

“十三五”以来，我国在低浓度瓦斯利用、矿井余热利用、煤矿低品位热能利用、采煤沉陷区治理、矿井生态环境修复和矿井粉尘防治等方面取得了显著的进展。

在低浓度瓦斯利用方面，系统开展了集瓦斯治理、抽采、发电、制冷、热害治理为一体的瓦斯综合治理与循环利用关键技术与示范研究；发明了瓦斯自适应混配和自回热蓄热氧化技术，研发了瓦斯阶梯式清洁利用技术，破解了低品质瓦斯化学能的热电转换、高效氧化提热的难题^[30]。

在矿井余热利用方面，研发了低浓度瓦斯蓄热氧化井筒加热技术，开发了风排瓦斯引风技术、风排瓦斯与抽采瓦斯混配技术、远距离安全输送技术、大型脱水技术、蓄热式非催化氧化技术（RTO）和热电联供技术等关键技术研究，发明了焦化厂荒煤气高温余热回收技术^[74]。

在煤矿低品位热能高效利用方面，发明了兼顾煤矿通风安全与热能高效提取的系列喷淋式矿井回风换热器，开发了喷淋式矿井回风余热利用成套装备；研发了壳管式防结垢、防堵塞、强换热的换热器以及与其配套的矿井排水余热利用成套装备。

在采煤沉陷区治理方面，创建了采煤沉陷区中高层建筑群建设技术体系，提出了采煤沉陷区城市服务功能开发理念，研发了采煤沉陷区湿地建设、城市功能开发等关键技术，研发了高强度开采矿区生态环境修复与调控技术^[75-77]，并首次在沉陷治理中创新性采用定向钻探、城市建筑废弃物再生利用、分布式光纤动态监测、深层地热资源利用等先进工艺技术，建成了全国首例条带式采煤沉陷区综合治理与利用项目，改善了沉陷区生态环境，增加了采空区土地再利用，实现了人与自然和谐共生的重大民生工程。

在矿井生态环境修复方面，发明了煤矸石山自燃污染控制与生态修复关键技术^[78]，构建了矿区生态环境与地质灾害时空信息多尺度监测技术体系，发展了高强度开采矿区生态环境演变链式响应理论和生态环境损害动态预警方法；研发了采煤沉陷区土壤重构、植被恢复和区域尺度农业景观再塑关

键技术，形成了能促进植物根系生长发育、抗拉伤能力强的微生物修复技术，研发了集约化开采源头减损与地表生态修复一体化技术^[79]。

在矿井粉尘防治方面，揭示了机械化掘进巷道煤岩尘微观理化特性对其润湿性影响规律，确定了综掘面宏观粉尘团及细观颗粒流扩散规律，揭示了巷道喷雾细观降尘机制；发明了射流汽化吸液及低阻高效产泡方法与装置，研制了环形承压泡沫的喷射装置，研发了活性磁化水幕帘与泡沫联用除尘系统；发明了三向旋流全断面风幕控尘方法及关键技术，研发了综掘面高效小型化风雾双幕协同增效控除尘成套装备^[80]。

2. “十四五”煤炭科技发展目标

经过“十三五”期间的快速发展，煤炭行业科技创新取得了长足的进步。同时，煤炭资源开发面临着地质条件复杂、采深逐年增加、灾害频发等多重压力，资源采出率有待提高；2020 年，全国煤矿采煤、掘进机械化程度已分别达到 78.5%、60.4%，已建成约五百个智能化采掘工作面，但智能化水平仍需进一步提高；动力煤入洗率偏低，褐煤转化利用率低，废弃矿井空间、矿井水、地热等伴生资源利用率低；煤炭开发造成的土地塌陷面积大，且产生大量的煤矸石等固体废物；煤矿职业危害问题突出，累计煤矿职业病发病人数占全国职业病发病总数的一半左右。

当前，我国煤炭工业发展面临着煤炭产能过剩与先进产能占比不高的矛盾、规模资源开发与刚性环境约束的矛盾、灾害威胁加重与安全生产保障的矛盾。煤炭科技创新支撑我国煤炭工业高质量发展的能力依然不足。行业基础理论研究相对薄弱分散，关键技术原创性突破、颠覆性创新仍然较少，高端装备未能完全满足应用需求，科技创新领军人才和高技能人才大量缺乏，研发经费投入强度达不到全社会平均水平，知识产权保护运用和标准引领水平滞后。因此，煤炭行业必须以新发展理念为引领，主动适应新一轮科技革命与产业变革的发展趋势，加快构建现代化煤炭安全绿色智能开发和清洁高效低碳利用技术体系，引领煤炭行业步入具有高科技特点的高质量发展道路。

为实现煤炭科技自立自强、完善现代化煤炭开发利用理论与技术体系，提出“十四五”煤炭科技的发展目标是：到 2025 年，行业自主创新能力大幅提升，实现科技自立自强，产业重点领域关键技术自主可控，现代化煤炭开发利用理论与技术体系明显完善，科技创新人才队伍建设取得显著成效，建成特色鲜明、产学研深度融合的行业科技创新体系；煤炭绿色智能开采、煤矿重大灾害防控、煤炭清洁高效转化基础理论研究取得突破；大型煤矿和灾害严重煤矿基本实现智能化，实现井下重点岗位机器人作业，露天煤矿智能连续作业和无人化运输，建

立煤矿智能化技术规范与标准体系；冒顶、火灾、爆炸、冲击地压、水害、煤与瓦斯突出等灾害防治能力进一步提升，工作面粉尘防治取得明显成效，煤矿作业人员安全防护与职业健康保障更加完备，矿山应急救援体系与技术更加完善；大型煤机装备、露天开采装备、煤炭洗选装备与煤化工装备的智能化和可靠性水平大幅提升，关键零部件、核心元器件、控制系统与软件实现自主化；现代煤化工实现高效、环保、低耗发展，突破煤油共转化制清洁燃料与化学品、煤制芳烃、煤制乙醇等关键工艺技术；煤转化有机固废和污水、矿井水低成本资源化利用技术，千万吨级煤炭分质分级利用技术取得积极

进展；矿区生态环境显著改善；采煤沉陷区土体整治与生态修复技术不断完善，矿区大宗固废资源利用取得明显成效；减碳减量可行先进技术取得突破，实现矿区生态与碳汇减排协同发展。

3. “十四五”科技创新重点任务

为实现新时期煤炭科技发展目标，提出开展“31110”科技创新主要任务，包括三大基础理论研究，十大重点领域核心技术攻关，十项重大技术创新示范和百项先进适用技术推广应用。科技创新主要任务框架图如下。



图1 “十四五”科技创新主要任务框架图

Figure 1 Main tasks of scientific and technological innovation in the 14th Five-Year Plan period

3.1 煤炭基础理论研究

在煤炭绿色智能开采、煤矿重大灾害防控、煤炭清洁高效转化等领域开展基础理论研究，为我国煤炭资源的安全绿色智能开发和清洁高效低碳利用提供基础支撑。

(1) 煤炭绿色智能开采

重点研究煤系矿产资源精细勘查与生态地质理论，时空变化条件下的矿井地质精准探测及建模理论，面向矿井复杂环境的自适应感知理论，矿山多源异构数据融合及信息动态关联理论，复杂条件下采掘设备群的协同控制理论，面向复杂矿井环境的动态协同控制与数据驱动决策理论，黄河流域等重点区域煤炭开发生态大尺度演变规律与生态修复方法等；探索深部原位流态化开采的采动岩体力学理论和采矿方法。

(2) 煤矿重大灾害防控

重点研究深部矿井多灾种一体化智能防控理论，煤岩瓦斯复合动力灾害发生机制，煤矿冲击地压主控地质因素及发生机理，冲击地压风险判识理论与防控方法，复杂地质条件下顶板水害形成机理，大采深矿井煤层底板岩溶发育规律，高地应力及高压条件下深部煤层底板突水机理，采空区遗煤自

燃引爆机理，露天开采与生态环境动态响应耦合机理，露天矿滑坡灾害精准化预警理论，矿井粉尘产生机理，风流—水雾—粉尘多相流多场耦合机理，职业危害接触限值与致病机制等。

(3) 煤炭清洁高效转化

重点研究原煤多尺度精细化深度分离与高效提质基础理论，微细粒难选煤分选过程强化基础理论，煤系稀贵矿产和关键元素、有毒有害物质资源高效分选加工理论，煤炭智能分选加工基础理论，煤基原料协同制备功能化材料基础理论，煤制大宗清洁燃料与化学品新工艺及催化基础理论，煤炭气化、液化在原料、工艺过程匹配和产品灵活性调控理论，煤炭利用多点源、多污染物协同控制理论与方法等；探索煤制氢理论与方法。

3.2 重点领域核心技术攻关

开展煤炭资源勘查与地质保障、大型现代化矿井建设、煤炭与伴生资源协调开采、煤矿灾害防治、煤矿智能化与机器人、煤炭清洁高效加工、煤炭高效转化利用、煤矿职业危害防治、煤矿应急救援、资源综合利用与生态保护10个重点领域的核心技术攻关。

(1) 煤炭资源勘查与地质保障

研究煤系资源与生态环境的空天地一体化协同勘查方法，侏罗纪煤田地层沉积相与构造控水机理，华北型煤田深部煤层底板岩溶水精准探查与防控方法，西南地区岩溶复杂地形条件下高分辨率地球物理探测方法等；研发全数字高密度三维三分量地震技术、矿区地质灾害精准监测预警技术、水文地质三维高精度动态表征技术，采掘工作面地质异常体高精度超前探查技术等。

(2) 大型现代化矿井建设

研发千米深井地层冻结及地面预注浆改性技术，大型矿井井巷工程机械破岩全断面钻进技术，超长定向钻孔为基础的斜井沿轴线冻结技术，复杂地层大断面斜井盾构机掘进技术，韧性为基础材料的地层加固和薄喷支护技术等；研制千米竖井掘进机、千米反井钻机、变径巷道全断面掘进机及掘进机器人；构建矿井构筑物智能建设及全生命周期智能检测控制体系。

(3) 煤炭与共生资源协调开采

深入研究充填开采、无煤柱开采、保水开采、采动围岩大范围超前控制等绿色安全开采技术；研发遗留煤炭资源安全复采技术，复杂难采煤层高效综采技术，煤炭地下气化开采技术，流态化开采技术，大型露天煤矿强化内排开采技术，煤与油、气、稀贵关键元素等共生资源协调开采技术，碎软低渗煤层区地质条件和产能预测评价方法，地面水平井工厂化抽采技术，复杂储层煤层气高效立体抽采技术，深部煤系气一体化共采技术。

(4) 煤矿灾害防治

研发矿井通风系统灾变状态识别及控制技术，突出矿井分级预警及高效防控减灾技术，高瓦斯矿井低透气性煤层瓦斯高效抽采技术，采空区自燃诱发瓦斯爆炸灾害预测预警预控技术，近距离煤层群防灭火技术，矿井爆炸灾区残存火源、顶板垮塌或突出瓦斯逆流等继发性灾害特征识别技术，火区惰化短期有效性判别技术，火灾、突出、冒顶、冲击地压、瓦斯（煤尘）爆炸等多灾害协同防治技术，冲击地压智能预警与共性关键因素防控技术，采掘工作面顶板水害精细控制疏水治理技术，全空间水情水害智能精准监测预警技术，烧变岩区等特殊区域水害防治技术，滑坡灾害智能感知与早期识别技术，千米深井强采动巷道围岩大变形与破坏机理及长期稳定性控制技术等。

(5) 煤矿智能化与机器人

研发复杂地质条件的工作面智能开采技术，4D-GIS透明地质技术，煤矿5G无线通信技术，井下视频高效处理及AR/VR技术，井下精确定位与设备

导航技术，辅助运输系统连续化和无人化技术，智能化无人快速掘进技术，重大危险源智能感知与预警预报技术，高可靠性智能装备（终端）技术，煤矿机器人路径规划与长时供电技术，露天开采无人化连续作业技术，煤炭智能化采样检测技术，矿井机电设备在线监测与诊断维护技术等。

(6) 煤炭清洁高效加工

研发高硫、高氯、高氟煤分选新技术与新工艺，湿法全重介选煤设备智能控制技术，干法选煤智能化工艺技术，微细粒难选煤泥强化重力场高效分级分选技术，煤岩深度解离与高效富集技术装备，煤矿井下大型智能分选排矸装备，大型智能选煤厂关键传感、闭环控制和辅助决策技术与系统等。

(7) 煤炭高效转化利用

研发低阶煤大型分质分级转化技术及装备，超临界煤气化、加氢煤气化、催化气化等新型煤气化技术，煤炭温和加氢直接液化和间接液化耦合新工艺及催化剂技术，煤炭液化制取特种油品、富氧油品添加剂技术，高可靠性余热回收技术，高温煤气深度除尘净化技术，液化残渣综合利用技术，煤耦合甲烷等离子体合成乙烯、乙炔技术，高效高选择性丙烯丙烯灵活调控的甲醇制烯烃催化剂、反应器及工艺，多污染物联合精确控制和脱除技术，低能耗CO₂捕集、封存及碳循环利用技术。

(8) 煤矿职业危害防治

研发粉尘在线高精度感知技术，高通量气水两相流云雾产生与喷嘴布控技术，采掘工作面尘源有效控制技术，矿井高温热害高性价比防治技术及个人防护装备，作业现场噪声消除技术，职业危害研判与快速筛查技术，职业危害分级防护技术，职业病危害信息化监管云平台技术等。

(9) 煤矿应急救援

研发矿山灾害救援信息化技术与智能决策系统，矿山应急救援通讯技术装备，灾后救援快速自组网技术装备，矿灾应急救援智能专业服务机器人，复杂环境水陆两栖侦检机器人，灾后多维度生命保障技术装备，井下坍塌松散体快速构建救援通道技术，地面快速构建救援通道技术，矿山应急救援综合培训演练系统等。

(10) 资源综合利用与生态保护

研发矿区水环境保护与水资源一体化利用技术，高矿化度矿井水净化和利用技术，矿区煤矸石等固废资源化利用与污染防治技术，矸石山综合治理技术，采煤沉陷区治理及土地利用技术，矿区土壤改良技术，低浓度瓦斯高效提浓技术，超低浓度乏风瓦斯销毁和余热利用技术，闭坑矿井地下空间资源

开发与维护技术，共伴生矿产资源和稀贵关键元素无害化利用技术，矿区生态环境管理信息化技术等。

3.3 重大技术创新示范

积极培育技术创新示范企业，重点推进煤矿井巷全断面快速掘进、复杂地质条件煤层智能综采、井工煤矿智能化建设、露天煤矿智能高效开采、智能精细高效洗选、煤炭分质利用、煤炭液化及高端化工品制备、废弃矿井地下空间资源综合利用、矿区大宗固废资源利用、大型矿区生态修复等10项重大技术创新示范。

(1) 煤矿井巷全断面快速掘进示范

针对特大型矿井竖井、斜井和巷道的快速非爆破建设，研制煤矿防爆型竖井掘进机、竖井钻机、全断面岩巷掘进机与后配套运输及支护装备，形成井巷结构设计方法和技术标准体系，开发远程可视化掘锚支监控平台，满足掘进直径5.0~10.0m竖井、斜井、巷道需求，综合掘进速度达到200~300m/月、作业人员减少40%的目标，构建煤矿硬岩井巷智能快速掘进示范工程。

(2) 复杂地质条件煤层智能综采示范

针对复杂地质条件煤层（大倾角、薄煤层、高瓦斯、多构造），因地制宜研发配套智能综采技术及成套装备，建设智能综采示范工程；针对西部矿区特厚硬煤层资源不宜采用放顶煤开采方式，研发特厚煤层一次采全高智能化综采技术与成套装备，设计生产能力5000吨/小时，倾角 $\leq 15^\circ$ ，年产能力10Mt。

(3) 智能化煤矿建设示范

建设以采掘生产为核心，融人员、设备、环境为一体的智能化井工煤矿，实现不同地质条件的智能综采和快速掘进、智能主运输和连续化辅助运输、智能供配电、安全生产监测监控、矿井综合管控和大数据分析等；建设高效开采智能化露天煤矿，研制大运量带式输送机组、自移式破碎站、自动穿孔爆破设备、大容量轮斗挖掘机、柴油发动机重型运输卡车、矿用卡车无人驾驶系统和智能生产调度系统等。

(4) 智能精细高效洗选示范

研制千万吨级特大型湿法智能选煤厂的关键设备和在线检测仪器，包括大型破碎机、跳汰机、旋流器、振动筛、浮选机、渣浆泵和高效脱介、脱水设备，原煤和产品质量在线检测仪器等；研发重介、浮选分选过程大数据平台，建立煤炭洗选工艺智能化控制平台；研制千万吨级干法分选智能化装备，研究干湿混合流程新工艺，建立千万吨级智能选煤厂示范工程。

(5) 煤炭分质利用技术示范

研发单炉50万吨级块煤热解和单线100万吨级粉煤热解新技术，完善中/低温煤焦油全馏分加氢多产中间馏分油（FTH）、中低温煤焦油制取轻质化燃料工艺，以及煤气无变换提浓制氢、煤化工多联产废水分质利用处理、煤焦油加氢废气回收利用等关键技术，建成200万吨级兰炭示范厂和千万吨级粉煤热解低阶煤（富油长焰煤）煤炭分质利用工业化示范工程。

(6) 煤炭液化及高端化工品制备示范

完善日投煤量3000~4000t/d的大型高效气化炉和大型高效空分装置、大型甲醇合成塔、甲烷化反应器、大型高压压缩机等关键技术装备，建立百万吨级及以上煤炭间接液化及高端化工产品（如 α -烯烃、高档润滑油、茂金属聚乙烯等）工业化生产示范工程。

(7) 废弃矿井地下空间资源综合利用示范

系统评价井工煤矿地下空间开展地质存储的适应性和可改造性，开展关闭矿井地下空间资源定量评估；选择地热资源丰富的废弃矿井，研究地热资源反季节循环利用技术和关键装备、设计智能监控系统，实现地热资源利用；推进废弃矿井地下仓储、煤层气抽采等其它综合利用技术的应用，建设废弃矿井地下空间资源利用示范工程。

(8) 矿区大宗固废资源利用示范

以煤矸石、尾煤、粉煤灰等大宗固废资源多元化利用为对象，建设矿区固废资源利用示范工程。主要研究矿区大宗固废资源化及协同处置技术，高效低成本煤矸石充填置换技术，高渗量高强度粉煤灰水泥制备技术，煤矸石和粉煤灰制备陶粒、加气混凝土技术，粉煤灰中有价元素提取技术等，推动建筑垃圾、尾矿等大宗固废与矿井充填协同处置技术发展，扩大矿井充填材料来源，拓宽其它大宗固废的处置途径。

(9) 大型矿区生态修复示范

以华北、华东、西北等大型矿区采煤沉陷区土地损毁与生态修复为主，创建大型矿区生态修复示范工程。研究应用采煤沉陷区建筑群建设技术，复垦土壤重构与区域农业、景观、林果、养殖、光伏协同技术，人工湿地构建及城市功能开发技术等，形成东部矿区以土地复垦、沉陷地建筑利用和人工湿地构建为主，西部生态环境薄弱矿区以水资源保护、植被恢复、绿化固沙抑尘、特色无公害绿色林果产业和荒漠化治理为主的生态修复模式。

(10) 煤炭产品质量精准调控示范

以满足动力煤、化工用煤、炼焦煤等消费端不

同用户的定制需求为主,创建生产端的煤炭产品质量精准调控示范工程。研究用户需求驱动的煤炭定制生产技术,包括精益生产、精准配煤以及数据分析平台,贯通生产端和消费端的数据链条,推动煤炭生产过程的智能调控和节能,通过精准供给为生产端低碳化提供更有力的支撑。

3.4 先进适用技术推广

“十四五”期间,大力加强先进适用技术推广,促进科技成果规模化转化应用。

(1) 煤矿地质保障方面,重点推广高精度高密度全数字三维地震勘探、复杂地质构造槽波地震探测、地理信息系统与遥感遥测资源勘测、掘进巷道超前定向长钻孔探查等先进适用技术。

(2) 现代化矿井建设方面,重点推广“一扩成井”软岩地层钻井法凿井、导井竖井掘进机凿井、定向控斜大直径反井钻井凿井、多圈孔深厚冲积层控制冻结等先进适用技术。

(3) 煤炭绿色高效开采方面,重点推广掘支运一体化全断面岩巷掘进、无煤柱自成巷110/N00工法、直角拐弯大功率重型刮板输送机、矿用新能源防爆无轨胶轮辅助运输等先进适用技术。

(4) 煤层气开发利用方面,重点推广煤层气抽采地面远距离自动控制钻进、煤矿井下大功率定向钻进、煤矿井下水力压裂增透、低浓度瓦斯发电等先进适用技术。

(5) 煤矿安全方面,重点推广煤矿水害区域治理地面超前注浆加固、矿井通风智能决策与远程控制、煤层可变径造穴卸压增透一体化、露天煤矿边坡合成孔径雷达监测预警等先进适用技术。

(6) 煤炭加工与清洁利用方面,重点推广干法矿物高效分离、高硫煤矸石高密度重介分选硫精砂、煤泥循环流化床洁净燃烧利用、工业和民用兰炭清

洁替代等先进适用技术。

(7) 资源综合利用与生态保护方面,重点推广采煤沉陷区土地复垦与农业生态再塑、西部干旱半干旱煤矿区土地微生物修复、煤矿矿井水深度处理、矿井乏风源和矿井水源余热综合利用等先进适用技术。

(8) 煤矿智能化与机器人方面,重点推广智能无人综采工作面、井下智能巡检机器人、智能煤矸分选机器人、基于UWB的井下精确定位等先进适用技术。

4. 结 语

(1) 面对“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的目标,作为我国基础能源的煤炭,无论是其开发还是利用必须走减碳化的道路,大力推广应用煤炭清洁生产、低碳利用和高效转化技术,加强开发利用全过程的节能。

(2) 煤矿智能化是煤炭工业高质量发展的核心技术支撑。一方面,应靠提升自动化和智能化水平将矿工从危险繁重一线解放出来,实现煤矿开采总体少人化、主要工艺流程无人化;另一方面需提升煤炭开采技术水平,保证在少人(无人)情况下的煤炭安全高效开采,以满足经济社会的发展需求。

(3) 煤炭开发过程必须坚持绿水青山就是金山银山理念,推动实现开发过程的近零生态环境损伤,不断提高矿井水、煤层气(瓦斯)的资源综合利用率,减少煤矸石等大宗固废的排放并提升其利用水平,加强废弃矿井的资源化和功能化。

(4) “十四五”及未来更长一段时间,煤炭科技发展应坚持目标导向和问题导向,以现代化煤炭开发利用技术体系构建为目标,不断创新新理论、新技术和新方法,支撑煤炭工业转型升级和高质量发展。

参考文献

[1]石智军,董书宁,杨俊哲,等. 煤矿井下3000 m顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(06):1-7.

SHI Zhijun, DONG Shuning, Yang Junzhe, et al. Key technology of drilling in-seam directional borehole of 3 000 m in underground coal mine[J]. Coal Geology & Exploration,2019,47(06):1-7.

[2]彭苏萍.我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J].煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.

PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(7):2331-2345

[3]董书宁,姬亚东,王皓,等.鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J].煤炭学报,2020,45(07):2367-2375.

DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(07):2367-2375.

[4]张博,杨维好,王宝生.考虑大变形特征的超深冻结壁弹塑性设计理论[J].岩土工程学报,2019,41(7): 1288-1295.

ZHANG Bo, YANG Weihao, WANG Baosheng. Elastoplastic design theory for ultra-deep frozen wall considering large deformation features[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2019,41(7): 1288-1295.

[5]李功洲.中国冻结法凿井理论与技术综述[J].建井技术,2017,38(4): 1-10.

LI Gongzhou. China mine shaft sinking theory and technology summary with ground freezing method[J]. Mine Construction Technology,2017,38(4):

1-10.

[6]李守彪.煤矿长斜井双模式盾构施工风险及技术对策[J].铁道建筑技术,2018(7): 81-85.

LI Shoubiao. Construction risk and technical countermeasure of double-mode shield in long coal mine inclined shaft[J]. Railway Construction Technology,2018(7): 81-85.

[7]刘志强.煤矿井孔钻进技术及发展[J].煤炭科学技术,2018,46(04):7-15.

LIU Zhiqiang. Well drilling technique and development in coal mine shaft construction[J].Coal Science and Technology,2018,46(04):7-15.

[8]程桦,唐彬,唐永志,等.深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J].煤炭学报,2020,45(9):3314-3324.

CHENG Hua, TANG Bin, TANG Yongzhi, et al. Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(9):3314-3324.

[9]王虹,王建利,张小峰.掘锚一体化高效掘进理论与技术[J].煤炭学报,2020,45(06):2021-2030.

WANG Hong, WANG Jianli, ZHANG Xiaofeng. Theory and technology of efficient roadway advance with driving and bolting integration[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(06):2021-2030.

[10]康红普,姜鹏飞,黄炳香,等.煤矿千米深井巷道围岩支护-改性-卸压协同控制技术[J].煤炭学报,2020,45(3):845-864.

KANG Hongpu, JIANG Pengfei, HUANG Bingxiang, et al. Roadway strata control technology by means of bolting-modification-destressing in synergy in 1000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(3) :845-864.

[11]潘一山,肖永惠,李国臻.巷道防冲液压支架研究及应用[J].煤炭学报,2020,45(01):90-99.

PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Guozhen. Roadway hydraulic support for rockburst prevention in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(01):90-99.

[12]何满潮,李晨,宫伟力,等.NPR锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J].岩石力学与工程学报,2016,35(8):1513-1529.

HE Manchao, LI Chen, GONG Weili, et al. Support principles of NPR bolts/cables and control techniques of large deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(8):1513-1529.

[13]孟祥军,李明忠,岳宁,等.兖矿集团综放开采技术的创新性发展与应用[J].煤矿安全,2020,51(10):159-163.

MENG Xiangjun, LI Mingzhong, YUE Ning, et al. Innovative development and application of fully mechanized caving mining technology in Yankuang Group [J]. Safety in Coal Mines,2020,51(10):159-163.

[14]王国法,庞义辉.特厚煤层大采高综采放适应性评价和技术原理[J].煤炭学报,2018,43(01):33-42.

WANG Guofa, PANG Yihui. Full-mechanized coal mining and caving mining method evaluation and key technology for thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(01):33-42.

[15]于斌,高瑞,孟祥斌,等.大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术

[J].岩石力学与工程学报,2018,37(05):1134-1145.

YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbi, et al. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(05):1134-1145.

[16]张锦旺,王家臣,魏炜杰.工作面倾角对综放开采散体顶煤放出规律的影响[J].中国矿业大学学报,2018,47(04):805-814.

ZHANG Jinwang, WANG Jiachen, WEI Weijie. Effect of face dip angle on the drawing mechanism in longwall top-coal caving mining[J].Journal of China University of Mining & Technology, 2018,47(04):805-814.

[17]许家林.煤矿绿色开采20年研究及进展[J].煤炭科学技术,2020,48(9): 1-15.

XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years [J]. Coal science & technology,2020,48 (9):1-15.

[18]FAN Limin, MA Xiongde.A review on investigation of water-preserved coal mining in western China[J].International Journal of Coal Science & Technology,2018,5(4) :411-416.

[19]冯国瑞,张玉江,戚庭野,等.中国遗煤开采现状及研究进展[J].煤炭学报,2020,45(01):151-159.

FENG Guorui, ZHANG Yujiang, QI Tingye, et al. Status and research progress for residual coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(01):151-159.

[20]冯国瑞,白锦文,史旭东,等.遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论及其应用展望[J/OL].煤炭学报: <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2020.0927>.

FENG Guorui, BAI Jinwen, SHI Xudong, et al. Key pillar theory in the chain failure of residual coal pillars and its application prospect[J]. Journal of China Coal Society, <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2020.0927>.

[21]何满潮,王琦,吴群英,等.采矿未来——智能化5G N00矿井建设思考[J].中国煤炭,2020,46(11):1-9.

HE Manchao, WANG Qi, Wu Qunjian, et al. The future of mining —— thinking on intelligent 5G N00 mine construction[J]. China Coal, 2020,46(11):1-9.

[22]刘建功,毕锦明,赵利涛,等.综合机械化固体充填采煤自动控制研究与应用[J].煤炭科学技术,2016,44(01):149-156.

LIU Jianguo, BI Jiming, ZHAO Litao, et al. Research and application on automatic control of comprehensive mechanized solid backfill coal mining [J]. Coal Science and Technology,2016,44(01):149-156.

[23]张吉雄,屠世浩,曹亦俊,等.深部煤矿井下智能化分选及就地充填技术研究进展[J].采矿与安全工程学报,2020,37(01):1-10+22.

ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, et al. Research progress of technologies for intelligent separation and in-situ backfill in deep coal mines in China [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020,45(1) :141 – 150.

[24]杨汉宏,王金山,翟正江,等.准格尔矿区露天矿开采扰动效应评价[J].煤炭科学技术,2018,46(05):87-92+119.

YANG Hanhong, WANG Jinjin, ZHAI Zhengjiang, et al. Evaluation on

disturbance effect of open-pit mine in Jungar Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 87-92, 119.

[25] 张群, 葛春贵, 李伟, 等. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J]. 煤炭学报, 2018, 43(01): 150-159.

ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(01): 150-159.

[26] 郝从猛, 刘洪永, 程远平. 穿层水力造穴钻孔瓦斯抽采效果数值模拟研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(05): 1-4.

HAO Congmeng, LIU Hongyong, CHENG Yuanping. Numerical simulation study on gas drainage effect by through-beds hydraulic flushing hole[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(05): 1-4.

[27] 刘晓, 张帆, 马耕, 苏现波. 煤层缝网改造关键因素分析及应用研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(06): 85-89+169.

LIU Xiao, ZHANG Fan, MA Geng, et al. Analysis and applied study on key factors of coal and rock crack network reconstruction[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(06): 85-89+169.

[28] 李全贵, 林柏泉, 翟成, 等. 煤层脉动水力压裂中脉动参量作用特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(07): 1185-1190.

LI Quanguai, LIN Baiquan, ZHAI Cheng, et al. Experimental study on action characteristic of pulsating parameters in coal seam pulse hydraulic fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(07): 1185-1190.

[29] 张永民, 蒙祖智, 秦勇, 等. 松软煤层可控冲击波透透瓦斯抽采创新实践——以贵州水城矿区中井煤矿为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(08): 2388-2400.

ZHANG Yongmin, MENG Zuzhi, QIN Yong, et al. Innovative engineering practice of soft coal seam permeability enhancement by controllable shock wave for mine gas extraction: A case of Zhongjing Mine, Shuicheng, Guizhou Province, China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(08): 2388-2400.

[30] 林柏泉, 刘厅, 邹全乐, 等. 割缝扰动区裂纹扩展模式及能量演化规律[J]. 煤炭学报, 2015, 40(04): 719-727.

LIN Baiquan, LIU Ting, ZOU Quanle, et al. Crack propagation modes and energy evolution within slotting disturbed zone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(04): 719-727.

[31] 李树刚, 赵鹏翔, 林海飞, 等. 煤岩瓦斯“固-气”耦合物理模拟相似材料特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(01): 80-86.

LI Shugang, ZHAO Pengxiang, Lin Haifei, et al. Study on character of physical simulation similar material of coal-rock and gas solid-gas coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(01): 80-86.

[32] 范京道, 闫振国, 李川. 基于5G技术的煤矿智能化开采关键技术探索[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(07): 92-97.

FAN Jingdao, YAN Zhenguo, LI Chuan. Exploration of intelligent coal mining key technology based on 5G technology[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 92-97.

[33] 潘俊锋. 煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究[J]. 煤炭学

报, 2019, 44(01): 173-182.

PAN Junfeng. Theory of rockburst start-up and its complete technology system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(01): 173-182.

[34] 窦林名, 何学秋, REN Ting, 等. 动静载叠加诱发煤岩瓦斯动力灾害原理及防治技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(01): 48-59.

DOU Linming, HE Xueqiu, REN Ting, et al. Mechanism of coal-gas dynamic disasters caused by the superposition of static and dynamic loads and its control technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(01): 48-59.

[35] 杨光宇, 姜福兴, 曲效成, 等. 特厚煤层掘进工作面冲击地压综合监测预警技术研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1949-1958.

YANG Guangyu, JIANG Fuxing, QU Xiaocheng, et al. Comprehensive monitoring and early warning technology for rock burst of tunneling face with thick coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1949-1958.

[36] 陈鲜展, 袁亮, 薛生, 等. 瓦斯含量法在煤与瓦斯突出能量分析中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 93-98.

CHEN Xianzhan, YUAN Liang, XUE Sheng, et al. Energy analysis of coal and gas outburst process based on gas content method[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(10): 93-98.

[37] 周伟, 袁亮, 张国亮, 等. 采空区瓦斯涌出来源量化判识方法——以寺河矿为例[J]. 煤炭学报, 2018, 43(04): 1016-1023.

ZHOU Wei, YUAN Liang, ZHANG Guoliang, et al. A new method for determining the individual sources of goaf gas emissions: A case study in Sihe Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1016-1023.

[38] 罗振敏, 王子瑾, 苏彬, 等. 多元可燃气体对CH₄爆炸及其自由基发射光谱影响试验[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(04): 1-7.

LUO Zhenmin, WANG Zijing, SU Bin, et al. Influence of multi-component combustible gases on explosion characteristics and free radical emission spectrum of CH₄ [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(04): 1-7.

[39] 张建国, 宋德熹. 平顶山矿区灰岩水区域治理技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(09): 71-74.

ZHANG Jianguo, SONG Dexi. Technology of limestone water regional control in pingdingshan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(09): 71-74.

[40] 赵庆彪, 赵兵文, 付永刚, 等. 大采深矿井地面区域治理奥灰水害关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(08): 14-20.

ZHAO Qingbiao, ZHAO Bingwen, FU Yonggang, et al. Research on key technology to control Ordovician limestone water disaster on surface region of deep mining depth mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(08): 14-20.

[41] 李文平, 乔伟, 李小琴, 等. 深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J]. 煤炭学报, 2019, 44(08): 2437-2448.

LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaoqin, et al. Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining[J]. Journal of China Coal

Society,2019,44(08):2437-2448.

[42]刘基,靳德武,姬亚东,等.复杂水文地质条件下大型帷幕截流工程效果数值仿真分析[J].煤炭学报,2019,44(08):2427-2436.

LIU Ji, JIN Dewu, JI Yadong, et al. Numerical simulation analysis of closure effect of large curtain work with complex hydrogeological conditions[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(08):2427-2436.

[43]朱红青,王海燕,宋泽阳,等.煤绝热氧化动力学特征参数与变质程度的关系[J].煤炭学报,2014,39(3):498-503.

ZHU Hongqing, WANG Haiyan, SONG Zeyang, et al. The relationship between oxidation kinetics characteristic parameters of coal adiabatic progress and metamorphic degree[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(3):498-503.

[44]程卫民,张孝强,王刚,等.综放采空区瓦斯与遗煤自燃耦合灾害危险区域重建技术[J].煤炭学报,2016,41(03):662-671.

CHENG Weimin, ZHANG Xiaoqiang, WANG Gang, et al. Reconstruction technology of gas and coal spontaneous combustion coupled hazard in fully mechanized caving goaf [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(3):662-671.

[45]郭晓菲,郭林峰,马念杰,等.巷道围岩蠕形破坏理论的适用性分析[J].中国矿业大学学报,2020,49(04):646-653,660.

GUO Xiaofei, GUO Linfeng, MA Nianjie, et al. Applicability analysis of the roadway butterfly failure theory[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2020,49(04):646-653,660.

[46]杜锋,李振华,姜广辉,等.西部矿区突水溃沙类型及机理研究[J].煤炭学报,2017,42(07):1846-1853.

DU Feng, LI Zhenhua, JIANG Guanghui, et al. Types and mechanism of water-sand inrush disaster in west coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(07):1846-1853.

[47]董国伟,胡千庭.煤岩瓦斯动力灾害主控地质体理论及地质作用机理[J].西安科技大学学报,2017,37(01):7-14.

DONG Guowei, HU Qianting. Main controlling geological body theory and geological effect mechanisms of coal and gas dynamic disaster[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2017,37(01):7-14.

[48]袁亮.煤矿典型动力灾害风险判识及监控预警技术研究进展[J].煤炭学报,2020,45(05):1557-1566.

YUAN Liang. Research progress on risk identification, assessment, monitoring and early warning technologies of typical dynamic hazards in coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(05):1557-1566.

[49]余学义,毛旭魏,郭文彬.孟巴矿厚松散含水层下协调保水开采模式[J].煤炭学报,2019,44(03):739-746.YU XU Xueyi, MAO Xuwei, GUO Wenbin. Coordinated waterproof mining mode under thick loose sand stratum in Barapukuria coal mine[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(03):739-746.

[50]葛红兵.7m厚煤层MG1000/2600-GWD型采煤机研制[J].煤矿机械,2018,39(03):71-72.

GE Hongbin. Development of MG1000/2600-GWD shearer for 7 m thick

coal seam[J]. Coal Mine Machinery,2018,39(03):71-72.

[51]原长锁,张兴辉.8.8 m超大采高液压支架支护强度计算分析与应用[J].煤炭科学技术,2019,47(S2):21-26.

YUAN Changsuo, ZHANG Xinghu. Calculation analysis and application of support strength of 8.8 m ultra large mining height hydraulic support[J]. Coal Science and Technology,2019,47(S2):21-26.

[52]周如林.综采工作面纯水液压系统应用研究及展望[J].液压气动与密封,2014,34(11):11-13.

ZHOU Rulin. Water hydraulic system applications and prospects of mechanized coal face[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals,2014,34(11):11-13.

[53]孟国营,李国平,沃磊,等.重型刮板输送机成套装备智能化关键技术[J].煤炭科学技术,2014,42(09):57-60.

MENG Guoying, LI Guoping, WO Lei, et al. Intelligent key technologies of complete heavy scraper conveyor equipment[J]. Coal Science and Technology, 2014,42(09):57-60.

[54]史志远,朱真才.复合工况条件下刮板输送机运料中板磨损行为研究[J].摩擦学学报,2017,37(04):472-478.

SHI Zhiyuan, ZHU Zhencai. Wear behaviors of middle pan of armoured face conveyor under composite operating conditions[J]. Tribology,2017,37(04):472-478.

[55]王昆宏,温宝卿.直角转弯大功率重型刮板输送机的研究与应用[J].中国煤炭,2019,45(11):94-97.

WANG Kunhong, WEN Baoqing. Research and application of high power heavy scraper conveyor with right-angle turning[J]. China Coal,2019,45(11):94-97.

[56]王国法,庞义辉,任怀伟,等.煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践[J].煤炭学报,2018,43(04):903-913.

WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. Coal safe and efficient mining theory, technology and equipment innovation practice[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(04):903-913.

[57]王海军,郭建雄,汪爱明.超长运距机头集中驱动顺槽带式输送机研究[J].煤矿机械,2020,41(01):123-126.

WANG Haijun, WU Jianxiong, WANG Aimin. Study on head-driven super long belt conveyor in crossheading[J]. Coal Mine Machinery,2020,41(01):123-126.

[58]涂兴子,王万龙,杨建伟,等.芳纶输送带和永磁电机新技术的研究及应用[J].能源与环保,2018,40(05):163-166.

TU Xingzi, WANG Wanlong, YANG Jianwei, et al. Research and application of new technology of aramid conveyer belt and permanent magnet motor[J]. China Energy and Environmental Protection,2018,40(05):163-166

[59]朱真才,李翔,沈刚,等.双绳缠绕式煤矿深井提升系统钢丝绳张力主动控制方法[J].煤炭学报,2020,45(01):464-473.

ZHU Zhencai, LI Xiang, SHEN Gang, et al. Wire rope tension active control of double-rope winding deep well hoisting systems[J]. Journal of

China Coal Society,2020,45(01):464-473.

[60]王峰,何凤有,谭国俊.矿井提升机自适应神经模糊故障诊断策略研究[J].煤炭科学技术,2014,42(02):78-81.

WANG Feng, HE Fengyou, TAN Guojun. Study on adaptive neuro- fuzzy fault diagnosis strategy of mine hoist[J]. Coal Science and Technology, 2014,42(02):78-81.

[61]谢进.防爆电动无轨胶轮车在神东矿区井下应用研究[J].煤炭科学技术,2017,45(S2):87-91.

XIE Jin. Application study on trackless rubber tyred vehicle with explosion proof electric in underground Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology,2017,45(S2):87-91.

[62]梁椿豪,从佩超,薛安东.新型摩擦轮与齿轮混合驱动蓄电池单轨吊设计[J].机电产品开发与创新,2018,31(06):50-51.

LIANG Chunhao, CONG Peichao, XUE Andong. Design of a new type of friction wheel and gear hybrid drive battery monorail crane[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Product,2018,31(06):50-51.

[63]张纯,沈宜敏,张纯宪.BPJV-1400/3.3矿用隔爆兼本质安全型高压变频器的研制及应用[J].煤矿机电,2013(02):83-84+87.

ZHANG Chun, SHEN Yimin, ZHANG Chunxia. Research and Application of BPJV-1400 /3.3 Flame-Proof and Intrinsically Safe High Voltage Inverter[J]. Mine Machinery,2013(02):83-84+87.

[64]王国法,赵国瑞,任怀伟.智慧煤矿与智能化开采关键技术分析[J].煤炭学报,2019,44(01):34-41.

WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huaiwei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(01):34-41.

[65]毛善君,崔建军,王世斌,等.煤矿智能开采信息共享管理平台构建研究[J].煤炭学报,2020,45(06):1937-1948.

MAO Shanjun, CUI Jianjun, WANG Shibin, et al. Construction of information sharing platform of mine safe production for intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(06):1937-1948.

[66]孙哲星,孙继平.异步测时矿井人员精确定位方法[J].煤炭学报,2018,43(05):1464-1470.

SUN Zhexing, SUN Jiping. Underground coal mine accurate personnel positioning method based on asynchronous time-measuring[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(05):1464-1470.

[67]张帆,葛世荣,李闯.智慧矿山数字孪生技术研究综述[J].煤炭科学技术,2020,48(07):168-176.

ZHANG Fan, GE Shirong, LI Chuang. Research summary on digital twin technology for smart mines[J].Coal Science and Technology, 2020, 48(07):168-176.

[68]葛世荣,胡而已,裴文良.煤矿机器人体系及关键技术[J].煤炭学报,2020,45(01):455-463.

GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. Journal of China Coal Society,2020, 45(01):455-463.

[69]赵国瑞.煤矿智能开采初级阶段问题分析与5G应用关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(07):161-167.

ZHAO Guorui. Analysis of problems in primary stage of intelligent coal mining and key technology of 5G application[J].Coal Science and Technology,2020,48(07):161-167.

[70]赵跃民,李功民,骆振福,等.模块式干法重介质流化床选煤理论与工业应用[J].煤炭学报,2014,39(08):1566-1571.

ZHAO Yuemin, LI Gongmin, LUO Zhenfu, et al.Theory of modularized dry coal beneficiation and its application based on an air dense medium fluidized bed[J].Journal of China Coal Society,2014,39(08):1566-1571.

[71]梁兴国,李云峰,李燕,等.智能干选技术研究应用及发展趋势[J].选煤技术,2019(01):92-96,102.

LIANG Xingguo, LI Yunfeng, LI Yan. The intelligent dry cleaning technology-study, application and developing trend[J]. Coal Preparation Technology,2019 (1):92-96,102.

[72]徐振刚.中国现代煤化工近25年发展回顾·反思·展望[J].煤炭科学技术,2020,48(08):1-25.

XU Zhengang. Review, rethink and prospect of China's modern coal chemical industry development in recent 25 years[J]. Coal Science and Technology,2020,48(08):1-25.

[73]杜春涛,董志峰,孟国营,等.矿井回风喷淋换热器节水及换热效率影响因素研究[J].煤炭科学技术,2012,40(12):80-83.

DU Chutao, DONG Zhifeng, MENG Guoying. Influence factor research on water saving and heat exchange efficiency of spraying heat exchanger in mine air return roadway[J]. Coal Science and Technology,2012,40(12): 80-83.

[74]元玉栋,程卫民,于岩斌,等.高温矿井低品位余热综合利用技术研究[J].中国矿业,2015,24(02):60-66.

YUAN Yudong, CHENG Weimin, YU Yanbin, et al. Resarch of the complex utilization for waste heat energy in high temperature mine[J]. China Mining Magazine,2015,24(02):60-66.

[75]白二虎,郭文兵,谭毅,等.厚煤层高强度开采对地表响应的特征与机理[J].安全与环境学报,2018,18(02):503-508.

BAI Erhu, GUO Wenbing, TAN Yi. Special features and mechanism of the surface response to the high-intensity mining in the thick seam mining activities [J]. Journal of Safety and Environment,2018,18(02):503-508.

[76]李树志,李学良,门雷雷,等.高潜水位平原矿区采煤塌陷地复垦方向划定及规划分区[J].煤炭科学技术,2020,48(04):60-69.

LI Shuzhi, LI Xueliang, MEN Leilei, et al. Reclamation direction delimitation and planning division of coal mining subsidence areas with high water level plain mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(04):60-69.

[77]刘峰,李树志.我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J].煤炭学报,2017,42(09):2205-2213.

LIU Feng, LI Shuzhi. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines[J]. Journal of China

Coal Society,2017,42(09):2205-2213.

[78]胡振琪,龙精华,王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报,2014,39(08):1751-1757.

HU Zhenqi, LONG Jinghua, WANG Xinjing. Self-healing,natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(08):1751-1757.

[79]王志刚,毕银丽,宋子恒,等.东部草原露天矿区粘土改良模拟研究[J].生态学报,2018,38(16):5865-5875.

Wang Zhigang, BI Yinli, Song Ziheng. Substrate compositions facilitate clay restoration of the simulation study in an opencast coal mine in the eastern steppe of China [J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(16):5865-5875.

[80]袁亮.煤矿粉尘防控与职业安全健康科学构想[J].煤炭学报,2020,45(01):1-7.

YUAN Liang. Scientific conception of coal mine dust control and occupational safety[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(01):1-7.