

## 中国大型煤炭企业高质量发展专栏



孟祥军(1963—),山东金乡人,研究员,博士生导师,博士。1988年毕业于山东矿业学院,获采矿工程专业学士学位;2003年毕业于中国矿业大学,获控制工程硕士学位;2013年毕业于山东科技大学,获安全技术与工程博士学位。自1988年起入职兖矿集团有限公司工作,历任兴隆庄煤矿总工程师、东滩煤矿矿长、兖矿集团有限公司总工程师、山东能源集团有限公司首席技术专家,现为山东能源集团有限公司高级顾问。兼任中国煤炭工业协会理事会理事、技术委员会委员,中国煤炭学会副理事长,中国矿业科学协同创新联盟理事会理事,济宁市科学技术协会副主席等。

孟祥军研究员始终致力于综采(放)高效生产关键技术、装备配套及重大灾害综合预控保障体系研究及实践,有效破解了长期制约煤炭安全高效生产的关键共性技术难题,建立了适应于多种赋存条件煤层的安全高效生产“兖矿模式”,并将其推广至国内外其他矿区。提出了复杂地质条件大断面巷道高强让压布局理念,创新了支撑高产高效开采的大断面巷道围岩支护理论;主持研制了世界首台套8.2 m一次采全高及西部特厚硬煤层7 m大采高综放开采成套装备,屡次刷新一次性开采厚度极限,实现了超大采高综采(放)装备设计、加工、制造的国产化,使兖矿集团有限公司煤炭开采技术始终处在世界领先地位;系统阐释了矿井开拓布局与重大灾害预控治理协同耦合机理,创新建立不同地质条件综采(放)安全高效生产技术保障体系,推动了矿井灾害多维识别与预警技术的重大变革;主导构建了行业竞争优势突出的技术创新体系和煤炭开发利用核心技术支撑体系。承担完成国家重点研发计划项目、山东省重大科技创新工程等国家及省部级重大研发课题20余项。

孟祥军研究员先后荣获孙越崎能源大奖、中华国际科学交流基金会“杰出工程师鼓励奖”、山东省“泰山产业领军人才”、山东省有突出贡献的中青年专家、山东省“杰出工程师”、山东省“杰出创新人才”、“科技尖兵”、“煤炭工业最美科技工作者”等荣誉,并享受国务院政府特殊津贴。他所带领的兖矿集团有限公司技术中心综合排名连续多次位列全国煤炭企业技术中心的榜首。获得国家及省部级科技奖励50余项,授权专利40余项,发表学术论文40余篇,主持、参编专著7部,制定国家标准2项。



移动扫码阅读

孟祥军,李伟.山东能源集团煤炭产业技术创新体系建设[J].煤炭科学技术,2022,50(4):1-41.

MENG Xiangjun. Construction of Shandong Energy Group coal industry technological innovation system [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4):1-41.

## 山东能源集团煤炭产业技术创新体系建设

孟祥军,李伟

(山东能源集团有限公司,山东 济南 250014)

0 引言	4	2.1 兖矿集团技术创新体系建设经验和成效	5
1 山能煤炭产业高质量发展总体布局	4	2.2 山能技术创新体系建设	7
1.1 山能产业布局	4	3 厚煤层放顶煤技术创新实践	7
1.2 山能区域布局	5	3.1 厚煤层综采放顶煤发展历程	7
2 兖矿集团技术创新体系建设经验与山能技术创新体系建设	5	3.2 厚煤层综采放顶煤主要技术创新	8

4	8.2 m 超大采高智能综采技术创新实践	9	8.4 深部复杂条件巷道围岩控制技术与应用	20
4.1	超大采高综采技术及装备	9	9 深井冲击地压治理与安全高效开采	21
4.2	超大采高综采围岩控制理论	9	9.1 山能冲击地压矿井现状	21
4.3	超大采高液压支架	10	9.2 山能典型矿区冲击地压防治实践	22
4.4	超大采高刮板运输系统	10	10 矿井热害与煤自然防治技术创新实践	23
4.5	超大采高综采成套设备配套系统	11	10.1 矿井热害防治技术应用与实践	23
5	7 m 超大采高智能综放开采方法和工艺体系	11	10.2 煤自燃防控技术应用与实践	24
5.1	超大采高综放围岩控制理论	12	11 “三下一上”采煤治理实践	25
5.2	超大采高综放开采工艺	12	11.1 开采沉陷规律及地表沉陷预测	26
5.3	超大采高综放液压支架	12	11.2 松散层含水层下煤炭资源开采实践	26
5.4	超大采高综放成套装备配套系统	12	11.3 陕蒙地区矿井水害模式及防治关键技术	
6	中厚煤层工作面年产千万吨智能开采创新实践	13	11.4 “三下”压煤开采及治理技术实践	27
6.1	千万吨级工作面成套装备及生产工艺	13	12 深井建设技术与实践	29
6.2	基于惯性导航的工作面直线度监测与自动找直控制技术	14	12.1 大型矿井立井凿井创新与实践	29
6.3	采煤机自适应全作业循环双向智能截割技术	14	12.2 陕蒙富水软岩大直径立井凿井实践	30
6.4	刮板输送机智能柔性变频调速控制技术	15	13 海外煤炭开发与实践	30
7	高端装备制造技术体系	15	13.1 发展历程	30
7.1	端液压支架研发设计体系	15	13.2 澳洲矿井建设经验	31
7.2	智能制造技术研发实践	16	14 煤间接液化技术	32
7.3	高端液压支架制造实践	17	15 大规模煤气化技术研究与发展	33
8	巷道支护技术创新实践	18	16 煤炭清洁利用	34
8.1	兗州矿区巷道支护技术发展历程	18	16.1 煤炭高效提质技术	34
8.2	大断面沿空掘巷围岩控制技术与应用	19	16.2 煤粉清洁利用技术	35
8.3	陕蒙基地小煤柱沿空掘巷技术与应用	20	16.3 煤炭清洁燃烧技术	35
			16.4 煤系固废资源化利用	36
			17 山能创新发展方向	36
			18 结语	36
			参考文献	37

**摘要:**山东能源集团有限公司(简称“山能”)是由兖矿集团有限公司、原山东能源有限公司(简称“原山能”)联合重组成立的山东省属大型能源集团,在煤炭安全高效开采、高端装备制造、煤气化、煤液化、煤炭清洁利用、深部建井、海外煤炭开发等方面取得了显著成就,为全国煤炭行业发展起到了引领和示范作用。文章系统总结了山能发展布局及创新体系建设成就,梳理了厚煤层放顶煤、超大采高综采、中厚煤层智能化开采、冲击地压治理、巷道支护技术、矿井热害与煤自然防治、“三下一上”采煤治理、深井建设、澳大利亚煤炭开发实践、高端装备制造和煤炭清洁利用等15个重点领域所取得的进展,并列举了部分典型案例。系统阐述了山能在科技投入、平台建设、产业转型、新型产业、数字化和智能化方面的发展布局,介绍了兖矿集团创新体系建设经验和建设成效以及山能技术创新体系建设方面政策方针;回顾了山能在厚煤层放顶煤开采技术推广和应用方面所做出的巨大贡献,介绍了在综放开采工艺、综放开采装备配套方面的技术创新;针对不同地质生产条件下煤炭安全高效开采问题,研发应用了适于不同埋深、不同煤层赋存条件的3~4、5.5、6.0、6.8、8.2 m大采高和超大采高综采技术与成套装备,完成了5.5、7.0 m大采高、超大采高综放开采技术与装备研制和应用,刷新了我

国综放开采高度;阐述了山能冲击地压矿井现状,分析了在冲击地压治理方面的思路和技术,重点探讨了鄂尔多斯、菏泽、新疆三类典型地层条件下的冲击地压治理工程实践;回顾了山能锚网支护的发展与改革历程,总结了大断面沿空巷道、小煤柱沿空巷道、深部复杂巷道布局原理和支护技术研究成果;针对矿井热害与煤自然灾害治理,介绍了赵楼煤矿井下集中式冷水降温系统和全风量降温系统的原理与应用情况,总结了在煤自然早期识别技术、采空区封闭控制技术和自然灾害应急控制技术的研究和应用情况;阐述了采动覆岩破坏规律、开采沉陷规律和防水煤柱合理留设方面的研究成果;总结了河流、村庄建筑物、矿区铁路、高压输电线路、输油管线下压煤开采实践经验;介绍了深井建设过程的地面前注浆、深井冻结施工、井壁砌筑、井筒支护、井壁破裂治理等方面成熟经验;梳理了澳大利亚煤炭开发、收购历程及矿井建设、智能化工作面开发经验与成就;研发了具有自有知识产权的多喷嘴水煤浆气化技术,形成了日处理煤量1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、4 000 t和4.0、6.5 MPa不同压力等级的系列炉型;总结了煤间接液化技术方面取得的成果,介绍了在高低温费托合成工艺、固定定流化床费托合成反应器及高效费托合成催化剂方面的研究成果和煤炭提质加工与清洁高效利用实践,重点介绍了煤炭高效提质、粉煤清洁利用、煤系固废资源化等方面的重大进展。通过对山能技术创新体系和创新成果的总结,分析并探讨了其未来科技创新和高质量发展思路,明确了山能“十四五”期间的重点发展方向。

**关键词:** 山东能源集团;智能开采;高端装备制造;煤炭清洁利用;矿区建设;大采高;放顶煤;冲击地压;矿井热害;巷道支护

**中图分类号:** TD82-9; TD75; TD94; TD981   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0253-2336(2022)04-0001-41

## Construction of Shandong Energy Group coal industry technological innovation system

MENG Xiangjun, LI Wei

(Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

**Abstract:** Shandong Energy Group Co., Ltd. is a large state-owned energy enterprise group in Shandong Province, upon an agreed merger between the former Yankuang Group and the former Shandong Energy Group. It has made remarkable achievements in safe and efficient coal mining, high-end equipment manufacturing, coal gasification, coal liquefaction, coal clean utilization, and overseas development, and has played a leading and exemplary role in the development of the national coal industry. This paper systematically summarized the development layout and innovation system construction achievements of Shandong Energy Group, progressed in 15 key areas including the top coal caving in thick coal seams, fully-mechanized mining with super large mining height, intelligent mining in medium-thickness coal seams, rock burst control, roadway support technology, mine heat hazard and coal spontaneous combustion prevention, mining "under the buildings, the railway and the water and above confined water", deep well construction, Australian coal development practice, high-end equipment manufacturing and coal clean utilization are sorted out, and some typical successful cases. This paper systematically expounded the development layout of Shandong Energy Group in the aspects of investment in science and technology, platform construction, industrial transformation, new industry, digitalization and intelligence, and introduced the experience and achievements of innovation system construction of Yancoal Group and the policies and guidelines of technological innovation system construction of new Shandong Energy Group. The great contribution made by the group in the popularization and application of top-coal caving mining technology in thick coal seam was reviewed, and the technological innovation in fully-mechanized top-coal caving mining technology and supporting equipment was introduced. For safe and efficient mining of coal under different geological and production conditions, the fully-mechanized mining technology and complete equipment with high and super-high mining height of 3~4, 5.5, 6.0, 6.8, 8.2 m with different burial depths and different coal types have been studied and developed. The development and application of technology and equipment for 5.5 m and 7.7 m large and super-large mining height fully-mechanized top-coal caving mining have been completed, and the mining height of fully-mechanized top-coal caving in China has been updated. The current situation of rock burst mines in Shandong Energy Group were illustrated, the group's ideas and technologies in rock burst control were analyzed, the engineering practice of rock burst control under three typical strata conditions of Ordos, Heze and Xinjiang were mainly discussed. The development and reform process of anchor-net support in the group were reviewed, and the research results of large-section gob-side entry, small coal pillar gob-side roadway, deep complex roadway layout principle and support technology were summarized. Aiming at the management of mine heat hazard and coal spontaneous combustion prevention, the principle and application of the centralized cold water cooling system and the total air volume cooling system in Zhaolou Coal Mine were introduced, and the research and application of early identification technology of coal spontaneous combustion, closed control technology of

gob and emergency control technology of spontaneous combustion fire were summarized. The research results of overburden failure characteristics, mining subsidence law and reasonable retention of water proof coal pillars were introduced, and the practical experience of coal mining under rivers, village buildings, railways, high-voltage transmission lines, and oil pipelines were summarized. The mature experience in the process of deep shaft construction was introduced, such as surface pre-grouting, deep shaft freezing construction, shaft wall masonry, shaft support, shaft wall rupture prevention etc. The development experience and achievements of Yankuang Australia's development, acquisition process, mine construction, and intelligent working face were sorted out. The multi-nozzle coal-water slurry gasification technology with its own intellectual property rights was developed, and a series of furnace models with different pressure grades of 4.0 MPa and 6.5 MPa for daily coal treatment of 1 000, 1 500, 2 000, 2 500, 3 000 and 4 000 were formed. The achievements in indirect coal liquefaction technology were summarized, and the research achievements in high and low temperature Fischer-Tropsch synthesis process, fixed fluidized bed Fischer-Tropsch synthesis reactor and high-efficiency Fischer-Tropsch synthesis catalyst were introduced. The practice of coal quality improvement processing and clean and efficient utilization were expounded, and the major progress in efficient coal quality improvement, clean utilization of pulverized coal, and resource utilization of coal-measure solid wastes was highlighted. Based on the summary of Shandong Energy Group's technology innovation system and innovation achievements, the future scientific and technological innovation and high-quality development ideas of Shandong Energy Group were analyzed and discussed, and the key directions of Shandong Energy Group during the 14th Five-Year Plan were put forward.

**Key words:** Shandong Energy Group; intelligent mining; high-end equipment manufacturing; clean utilization of coal; mining area construction; large mining height; top-coal caving; rock burst; mine heat damage; roadway support

## 0 引言

山东能源集团有限公司(简称“山能”)是山东省委、省政府于2020年7月联合重组兖矿集团有限公司(简称“兖矿集团”)、原山东能源集团有限公司(简称“原山能”)2家省属重要骨干企业,组建成立的大型能源企业集团。山能是以矿业、电力、高端化工、高端装备制造、新能源新材料、现代物流贸易为主导产业的能源产业国有资本投资公司。拥有兖矿能源等30多个二级企业,产业主要分布在国内山东、内蒙古、新疆、陕西、贵州、甘肃、海南、上海等19个省(区、市)以及澳大利亚、加拿大、泰国、拉美等9个国家和地区。2021年实现营业收入7 520亿元、年末资产总额7 510亿元,位居2021年世界500强第70位。

作为煤炭行业的领军企业,山能以产业实际为主体,发展战略为导向,解决煤炭产业发展技术瓶颈为目标,以技术进步带动产业进步,形成了产学研协同创新的科技创新体系,在行业竞争中处于国际领先地位。其中,在煤炭安全智能高效开采、高端装备制造、水煤浆气化、煤间接液化、建井技术等领域的共性关键技术达到国际领先水平。从优化开拓布局、巷道布置与重大灾害防治关系入手,探索出全新的灾害防治技术模式,成功突破区段平巷超前支护、远距离供电供液<sup>[1]</sup>、智能化综采等关键技术;先后研发了适用于不同埋深、不同煤层赋存条件的大采高、超大采高综采(放)成套技术与装备,不断刷新我国综采(放)开采高度;自主研发的掩护式综采放顶煤支架,达到欧

美标准,先后向德国DBT公司和美国比塞洛斯国际公司实施许可,成为卡特彼勒全球供应商,实现了我国煤炭行业对外技术输出零的突破;在矿井建设技术方面,创新了立井冻结、大硐室施工、锚喷支护等先进技术,加速了深部矿井建设的步伐;煤化工核心技术实现了大型高端化发展,开发了具有自主知识产权的多喷嘴对置式水煤浆气化技术,成功完成4 000 t水煤浆气化技术示范工程;1 500 t/a高温费托合成催化剂工业化装置综合技术指标达到国际领先水平,实现了我国自主知识产权的煤液化产业化生产。

笔者系统地论述了山能取得的重大科技创新成果,回顾了重要领域在理论、技术和设备等方面取得的进展,总结了在技术创新和高质量发展方面的经验,明确了山能未来科技发展方向。

## 1 山能煤炭产业高质量发展总体布局

### 1.1 山能产业布局

山能依托产业基础,由规模拼组式产业组合向有机整合式产业组合升级,构建结构更加科学、协同更加有力的“一基两链三新”的产业结构。

“一基”以煤炭为基干产业提升可持续发展能力,加强国内国际资源布局,夯实煤炭发展基础,创新产业运作模式,凸显价值支撑功能;“两链”做强做大煤电联营产业链和煤化一体产业链,抓住政策机遇壮大煤电联营规模,提升煤化工产业链高附加值环节占比,实现煤炭价值衍生;“三新”依托产业特色优势,拓展高端装备制造、新能源新材料、现代物流贸易三大新兴产业领域,拓展高质量增长空间,

打造重要增长极;同时,依托金融、科技、资产管理、综合服务等专业力量,整合打造金融投资、科技创新、资产管理、综合保障4类专业服务,助力主业发展。

在新的产业结构下,煤炭是推动跨越发展的基础;煤电、煤化工是战略性发展业务,是发展的重要增长极;高端装备制造、新能源新材料是培育性业务,是支撑中长期发展的重要增长极;现代商贸是业绩规模与质量的重要保障,是综合影响力的有效支撑;金融投资、科技创新、资产管理、综合保障四类专业服务,以专业能力、专业人才、专业服务助力主业高质量发展。

## 1.2 山能区域布局

依据产业结构,优化区域战略布局,打造“一核心三基地五平台”的区域结构,即山东—战略核心;陕甘蒙、澳洲、新疆—产业支撑保障基地;济南、青岛、上海、海南、欧洲—创新集聚平台。

山能发挥多元产业协同、总部战略引领优势,打造成推动新旧动能转换、引领高质量发展的战略核心。产业方面,多点布局打造省内产业集群,在济南、济宁、青岛、枣庄、日照、菏泽等区域建设一批重点项目,推动煤炭精细发展、煤电煤化工高端发展、高端装备制造集聚发展、新能源新材料规模发展、现代物流贸易高效协同发展。能源保障方面,提高能源供应掌控力,加强全球资源调配,统筹推进全省能源基础设施建设,构建全省能源运输、销售和服务体系,保障区域能源总量安全、结构安全。矿区转型方面,充分借鉴国内外转型经验及政策机遇,推进后煤矿时代产业体系接续,盘活矿区存量资产,打造资源型企业向新能源型企业转型发展的示范标杆。

陕甘蒙、澳洲、新疆,发挥煤电煤化联动、省外资源优势统筹优势,打造成行业领先、助力省内能源结构优化的产业支撑保障基地。

1)陕甘蒙基地:依托丰富的资源储备,以煤为基础构建煤电、煤化、新能源多元产业体系;煤炭方面,抓住政策机遇,加大兼并重组力度,最大限度释放增量潜能,打造全国一流示范矿井群;煤化工方面,积极推动项目建设,构建从“原料到终端”的全产业链布局,培植新的价值增长点,形成高端化工园区集群;煤电及新能源方面,加快推进一批煤电、风电、光伏项目建设,打造成核心的外电入鲁基地。

2)澳洲基地:充分发挥澳洲基地海外运营经验,积极实施优质煤炭资源兼并重组,扩大资源储备,瞄向南亚东南亚国家,拓展销售市场,实现“资源储备、资源开发、资源转化”的新跨越;同步实施多元化发展策略,由单一煤炭经营横向扩展到基础金属、能源矿

产、天然气等其他领域,纵向延伸到可再生能源发电、能源贸易、能源零售、能源科技等新能源业务领域,建设成国际一流的大型综合能源基地。

3)新疆基地:协同煤炭资源开发,抓住建设现代煤化工产业示范园区的机遇,把握开发节奏、谋划发展策略,有序推进新疆资源开发利用,培育建设煤化一体化综合发展基地,支撑中长期发展。在三大产业支撑保障基地建设同时,稳步推进加拿大、南美等矿权和矿业资产的开发及运作,增强非煤矿业对煤炭产业的对冲、协同功能,培育成海外业务重要增长极。

济南、青岛、上海、海南、欧洲,发挥物流、贸易、金融、科技、人才等资源要素集聚优势,打造模式领先、合作开放的创新集聚平台。济南:发挥总部优势,整合内部电商平台,建设统一的数字化供应链平台,运用互联网思维覆盖大宗商品贸易流通领域的长尾市场,打造物流贸易线上线下创新运作的新平台。青岛:借力区位优势和自贸区政策优势,依托物流贸易产业基础,打造油气全产业链的国际能源交易中心,建立世界级油气储运、销售和交易的大市场。上海:充分利用贸易、金融、科技创新人才资源,发挥上海中期牌照优势,积极升级物流贸易商业模式,同时,整合金融服务资源,打造以融助产的金融服务平台,建设贸易金融科技创新发展平台。海南:积极对接海南自贸港的建设,构建智慧供应链为基础的能源大宗商品现货交易平台,拓展供应链集成服务,积极对接国内外的大宗商品期货交易所,打造具有国际影响力的能源定价中心。欧洲:集聚欧洲先进企业煤炭、高端化工、高端装备制造、新能源、新材料的先进技术资源,加强技术合作、产业合作,建设一批高端产业研究及技术创新中心,打造科技创新海外平台。

## 2 兖矿集团技术创新体系建设经验与山能技术创新体系建设

### 2.1 兖矿集团技术创新体系建设经验和成效

兖矿集团历来高度重视技术创新工作,集团内部通过建设创新管理体系、创新机制、创新平台和创新人才及团队建设,不断激发集团内部创新活力和创造潜能。在创新体系建设方面,健全并完善了以技术委员会为决策层、专家委员会为咨询层、技术中心为管理层、专业技术研发机构为开发层、高等院校和科研院所为支持层的产学研相结合的技术创新运行体系。

兖矿集团在发展过程中,不断健全了技术创新管理制度,制订并不断完善《科技创新工作管理办法》《专利工作管理办法》《科学技术奖励办法》《标

准化工作管理办法》《纵向课题管理办法》《重大专项管理制度》等关键性管理机制,从技术创新立项、实施、评价和推广应用全过程所涉及的项目论证、资金使用、过程控制及研发成果、知识产权等方面强化制度保障。

山能还先后与高等院校、科研院所合作,充分发挥国家级技术中心、重点实验室、博士后工作站等研

发平台在人才引进、培养中的作用,注重引进高层次领军人才。2015年,相继引进两位国家“千人计划”专家。以科研课题为载体,推进创新团队建设,在科技攻关中培养人才、锤炼队伍。综采放顶煤开采技术等31个创新团队被认定为集团公司级技术创新团队。山能获国家奖情况见表1。

表1 山能获国家级奖项情况

Table 1 Statistics of National awards for Shandong Energy Group

序号	项目	获奖类别	奖项等级	年份
1	兗州矿区工程建设施工新技术	国家科技进步奖	特等奖	1992
2	“光爆锚喷”新技术在矿井支护及引深工程中的应用	国家科技进步奖	一等奖	1985
3	水煤浆加压气化及气体净化制合成氯新工艺	国家科学技术奖	一等奖	1995
4	兗州矿区煤炭综合生产技术研究与开发	国家科技进步奖	一等奖	1998
5	矿井均压防灭火技术	国家科技进步奖	二等奖	1985
6	特厚煤层综机分层顶水平开采条件下提高回采上限试验研究	国家科技进步奖	二等奖	1996
7	软岩工程岩体力学理论与实践	国家科技进步奖	二等奖	2001
8	煤矿巷道高效安全支护成套技术创新体系及应用	国家科技进步奖	二等奖	2005
9	千米埋深矿井建设技术及应用	国家科学技术奖	二等奖	2006
10	多喷嘴对置式水煤浆气化技术	国家科技进步奖	二等奖	2007
11	等离子控制原位冶金反应技术与工程应用	国家科技进步奖	二等奖	2008
12	自动放顶煤关键技术与装备研发及其在国内外的应用	国家科技进步奖	二等奖	2009
13	高效洁净煤制甲醇与联合循环集成系统研发和示范	国家科技进步奖	二等奖	2009
14	面向数字化采矿的软件关键技术及应用	国家科技进步奖	二等奖	2013
15	兗矿集团煤炭安全高效开采与洁净利用技术创新工程	国家科技进步奖	二等奖	2013
16	大型高效水煤浆气化过程关键技术创新及应用	国家科技进步奖	二等奖	2016
17	煤矿深部开采突水动力灾害预测与防治关键技术	国家科技进步奖	二等奖	2017
18	树脂锚杆固定井筒装备新技术	国家科技进步奖	三等奖	1989
19	复杂工况下电动机系统高效能运行与控制关键技术及其应用	国家科技发明奖	二等奖	2013
20	带辨通气道急救呼吸器	国家科技发明奖	三等奖	1990

经过兗矿集团长期的研发和攻关,形成了以大型矿井建设、厚煤层综放开采、煤矿防灭火、薄煤层综采、水煤浆气化、粉煤加压气化、煤气化发电与甲醇联产、煤炭间接液化为核心的煤炭安全高效开采与洁净利用技术体系,并实现了由引进消化吸收到技术引领的根本性转变,支撑和引领了煤炭高效开采、煤化工产业、大型铝合金型材制造等行业发展方向。

1)矿井建设技术方面。创新了立井冻结、大硐室施工、锚喷支护等先进技术,兗州矿区工程建设施工新技术荣获1992年度国家科技进步特等奖,加速了我国高产高效矿井建设的步伐。2006年,千米埋深矿井建设技术再次荣获国家科技进步奖。兗矿集团牵头实施的“煤矿深井建设与提升基础理论及关键技术示范工程”课题被列入国家2016年重点研发计划。

2)综合机械化放顶煤开采技术方面。自主开

发综合机械化放顶煤开采技术,采煤工作面效率提高8倍以上,获得国家科技进步一等奖(1998年)。成功研制出结构简单、支护效率高、稳定性好、可靠性强、便于电液程序控制的两柱掩护式综采放顶煤液压支架,技术先后向德国DBT公司和美国比塞洛斯国际公司实施许可,实现了我国煤炭行业对外技术输出零的突破。以两柱掩护式综采放顶煤液压支架为关键设备的“自动化放顶煤关键技术与装备研发及其在国内外的应用”项目,获2009年度国家科技进步二等奖。

3)厚煤层开采防灭火技术方面。成功开发了煤层自燃液态二氧化碳防灭火技术、火灾隐患识别及控制新技术、煤层自燃隐蔽火源红外成像探测技术,松软煤层综放面自然火灾预测及防治技术、基于粉煤灰资源化的矿井防灭火成套技术及装备。多项成果获山东省和煤炭工业科技进步一、二等奖,使兗矿集团的煤矿防灭火技术走在行业前列。

4) 极薄煤层综采技术方面。通过对薄煤层机械化开采关键装备与工艺技术进行攻关,首次实现了1 m以下含坚硬夹矸与硫化铁硬结核薄煤层的安全高效综合机械化开采。“一米以下含坚硬夹矸薄煤层安全高效综采成套装备与技术”获2010年度中国煤炭工业科学技术一等奖。

5) 水煤浆气化技术方面。自主开发了水煤浆加压气化及气体净化制合成氨新工艺,荣获国家科技进步一等奖(1995年)。在此基础上,开发了具有自主知识产权的多喷嘴对置式水煤浆气化技术,实现了我国自主知识产权的多喷嘴对置式水煤浆气化技术的工业化应用,该技术获2007年度国家科技进步二等奖。依托具有自主知识产权的核心技术,承担并完成了国家“十一五”863计划“日处理2 000 t煤新型水煤浆气化技术”课题。2014年7月,国家“十二五”863计划3 000 t级超大型化水煤浆气化技术示范装置在兖煤鄂尔多斯能化荣信化工公司投产。“高效大型水煤浆气化技术”研究成果获得2015年度山东省科技进步一等奖及2016年度国家科技进步二等奖。

6) 煤气化发电与甲醇联产技术方面。承担完成国家“863”计划“煤气化发电与甲醇联产系统关键技术研发与示范”课题,首次实现了高效煤气化发电与甲醇多联产系统商业化运行,打破了国外垄断,填补了国内空白,该成果获2009年度国家科技进步二等奖。

7) 在煤间接液化技术方面。历经10余年坚持不懈的研究与攻关,承担6项国家973、863等重大课题,成功完成了高低温费托合成煤间接液化制油技术的实验室研究、中试研究和产业化示范,取得发明专利33项。该技术实现了我国自主知识产权的煤间接液化制油技术的产业化生产,是我国煤清洁高效利用技术产业发展史上重要的里程碑,对保障国家能源安全、实现国家能源多元化发展战略具有重要意义。

## 2.2 山能技术创新体系建设

山能按照“对标接轨、放管结合、分级管理”原则,构建了以集团公司、二级公司、三级单位为主体的三级研发体系,充分激发各级创新活力和创造潜能,山能科技创新制度体系如图1所示。

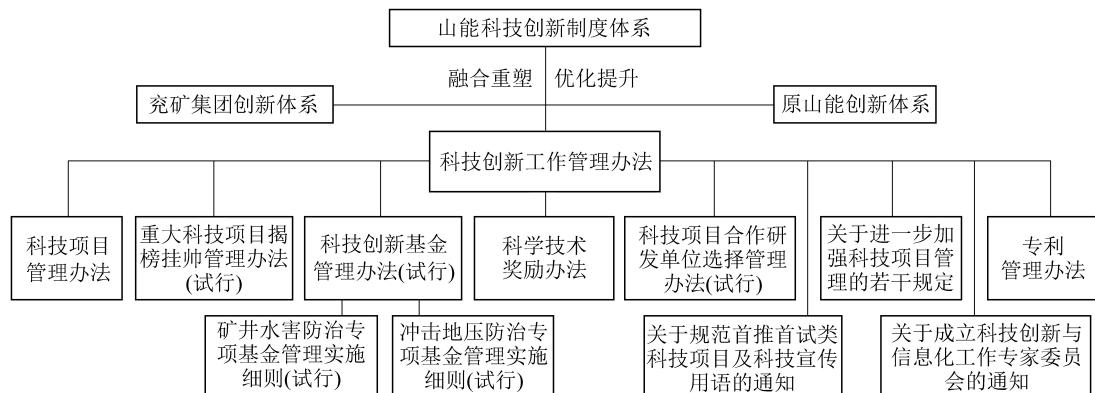


图1 山能科技创新制度体系

Fig.1 Science and technology innovation system of Shandong Energy Group

打破原有研发机构组织设置,组建集科技管理、生产技术管理、重大技术研发及成果转化为一体的集团总部研发机构(技术研究总院),填补了在重大技术研发、重大灾害治理和成果转化等创新服务职能上的空白,进一步促进人才、平台、项目、资金等资源要素集约高效配置。

## 3 厚煤层放顶煤技术创新实践

### 3.1 厚煤层综采放顶煤发展历程

我国厚煤层约占煤炭总储量的45%,厚煤层过去一直沿用分层开采方法,存在巷道掘进率高、工序复杂、效率低和成本高的问题<sup>[2-4]</sup>。兖矿集团自1992年开始进行综采放顶煤技术实践,取得了巨大

的成功,使之成为6 m以上厚煤层安全高效采煤方法。但综放开采普遍采用人工操作,用人多、效率低、安全隐患大<sup>[5]</sup>,严重制约了综放开采技术的发展和技术出口。

1996年兖矿集团承担了煤炭行业“九五”攻关重点项目“缓倾斜特厚煤层高产高效综放开采成套技术与装备研究”项目,对综放开采工艺与成套设备进行了一系列卓有成效的研究与开拓创新,其中包括地质条件适应性、技术装备、综掘配套技术、开拓系统、采场与回采巷道矿压控制技术、煤炭采出率控制技术成套设备与工艺研究,针对兖州矿区综放工作面存在的问题,研制成功适用于缓倾斜厚煤层综放开采放顶煤液压支架、可放煤排头支架;研制配

套成功综放工作面前后部刮板输送机及区段巷道运输系统。使综放工作面整体配套综合生产能力达到年产量400万t以上,体现出了技术先进、国产设备成套性强、生产能力大、质量可靠、安全性好的特点,是当时我国最先进的国产综机设备,填补了我国高性能参数综采设备的空白。

随后“十五”科技攻关项目“600万t/a综放工作面设备配套与技术研究”首次将电液控核心技术应用于综放液压支架,使兴隆庄煤矿日产突破了2万t。新型高效两柱式综采放顶煤液压支架获得了行业首个国际专利,在澳大利亚建成了第一个全自动化综放工作面,并完成向德国DBT公司、美国Bucyrus公司的技术转让,实现我国向发达国家输出采煤技术装备零的突破。实现了我国煤炭工业综采放顶煤技术及装备升级,达到了“一矿一井一面”安全高效生产格局。



图2 600万t/a 自动化综放工作面

Fig.2 Six million tons/year automatic fully-mechanized top-coal caving mining face

### 3.2 厚煤层综采放顶煤主要技术创新

经过近20多年的开拓创新,使得综放开采这种有争议的开采方法成为一种技术成熟、高产高效的先进开采方法,从而使我国进入一个全新发展的时期。事实证明,放顶煤开采技术和方法是我国煤层开采方法的一次革命,是我国厚煤层开采实现高产、高效、低耗和安全生产的有效途径。兖矿集团在综采放顶煤技术取得成就体现在自动化放煤、两柱掩护式综采放顶煤液压支架、综放开采截割工艺与半刀截割工艺、区段平巷超前液压支架制造、负压降尘等5个方面。

1) 自动化放顶煤开采方法。以电液控支架和采煤机之间联动为核心,通过工控机实现综放工作面配套设备和外围系统的高效联动,建立了自动化、信息化综放工作面安全高效运行控制体系;开发了综放工作面采煤机自动记忆切割、支架自动跟机移架、前部刮板输送机和后部刮板输送机及转载机的自动推移、自动化放顶煤工艺、煤流自动平衡监控、

工作面工况自动监控以及远程数据通讯等自动化技术(图3),实现综采放顶煤工作面自动化生产。



图3 厚煤层放顶煤开采工艺

Fig.3 Top-coal caving mining technology in thick coal seam

2) 两柱掩护式综采放顶煤液压支架。在兴隆庄煤矿首次将电液控制系统应用于综放液压支架,并发明了适宜自动化开采的两柱掩护式放顶煤液压支架,实现了综放自动化开采技术的重大突破;与天地科技股份有限公司合作,推动电液控制系统的国产化,两柱掩护式放顶煤液压支架专利成功转让德国DBT公司,并在澳大利亚得到应用,开创了国内煤炭开采技术向世界先进采矿国家技术输出的先例。

3) 综放开采截割工艺与半刀截割工艺。开发了适应智能开采的18段截割工艺,在传统采煤机截割工艺基础上,通过传感系统的精度和可靠性提升,实现全作业循环的自动化智能截割<sup>[6]</sup>;创新试验半刀截割工艺,通过中部半刀截割,端头全刀截割,简化端头三角煤截割过程,满足智能高效开采需求。

4) 综放工作面端头和区段平巷超前液压支架支护系统。提出了端头与超前巷道半卸载联合支护原理,创新研发了新型工作面端头液压支架和区段平巷超前液压支架支护系统,首次实现了工作面端头和区段平巷超前机械化支护作业,填补了我国区段平巷超前支护采用液压支架的空白,实现了端头液压支架与刮板输送机驱动部及转载机之间的高效协调作业,解决了工作面出口和超前支护段的安全,提高了端头和区段平巷超前支护的效果,实现了综采设备的成套性和回采工艺的连续性,图4为东滩煤矿自动化综放工作面。

5) 综放工作面负压二次降尘技术。揭示了喷雾降尘的多种联合作用机理,研制了合适孔径的喷嘴并选定了相应的喷雾供水压力;优选了综放工作面支架喷雾降尘装置的现场配套设计方案,发明了综放工作面负压二次降尘方法,开发研制了采煤机高压水雾吸尘装置、两柱掩护式放顶煤液压支架高压自动喷雾引射降尘和工作面架间冲尘技术。



图4 东滩煤矿自动化综放工作面

Fig.4 Automatic fully-mechanized top-coal caving face in Dongtan Coal Mine

#### 4 8.2 m 超大采高智能综采技术创新实践

在大采高开采方面,传统综采工作面开采高度为3.2 m;早在2005年,为满足3号煤联合开采需求,兖矿集团研发出4.0、3.8 m大采高支架,并在兴隆庄、东滩煤矿进行试验。2010年以来,兖矿集团煤炭开采向陕蒙基地拓展,陕蒙煤炭基地煤层赋存的条件优越,具有厚度稳定、结构致密、整体性强、硬度大、瓦斯低、埋深浅等优点,但采用综采放顶煤开采存在顶煤冒放性差、采出率低等问题,大采高综采是最理想的开采方法。围绕建设“千人千万吨”安全高效示范矿井,针对陕蒙基地矿井地质条件,兖矿集团先后研发应用了适于不同埋深、不同煤层赋存

条件的3~4、5.5、6.0、6.8、8.2 m大采高和超大采高综采技术与成套装备(表2)。

表2 安全高效开采技术装备

Table 2 Safe and efficient mining technology and equipment

采高/m	开采工艺	支架型号	应用条件
3~4	综采	ZY16000/23/43D	浅埋深厚3~4 m煤层
5.5	综采	ZY17000/27/55D	大采深厚5 m复杂煤层
6.0	综采	ZY13000/26.5/57D	深井厚5~6 m松软煤层
6.8	综采	ZY20000/33.5/68D	厚6~7 m坚硬煤层
8.2	综采	ZY21000/38/82D	厚7~8 m坚硬煤层

金鸡滩煤矿一盘区东西长11.5 km,南北宽5.1 km,埋深210~287 m,在中间布置大巷,分为东、西两翼开采。西翼煤层厚度5.5~8.5 m,东翼煤层厚度9~13 m,煤层平均普氏系数2.8,属于典型坚硬、特厚煤层。金鸡滩矿积极承接了8.2 m超大采高综采智能开采的可行性项目,并在西翼进行了超大采高综采配套技术及装置的研究开发与智能控制技术的应用试验,实现8 m厚煤层大采高一次采全厚综采;形成了拥有自主知识产权的超大采高综采成套工艺技术及装置,大幅提高了工作面开采效率和资源采出率,取得巨大经济效益和社会效益,达到国际领先水平,引领了世界大采高综采技术与装备的发展(图5)。在金鸡滩煤矿成功应用,达到日产5.7万t,月产150万t以上水平,具备了年产2 000万t能力。



图5 8.2 m 超大采高综采技术及成套装备

Fig.5 Whole set equipment of 8.2 m super-large mining height fully-mechanized mining face

#### 4.1 超大采高综采技术及装备

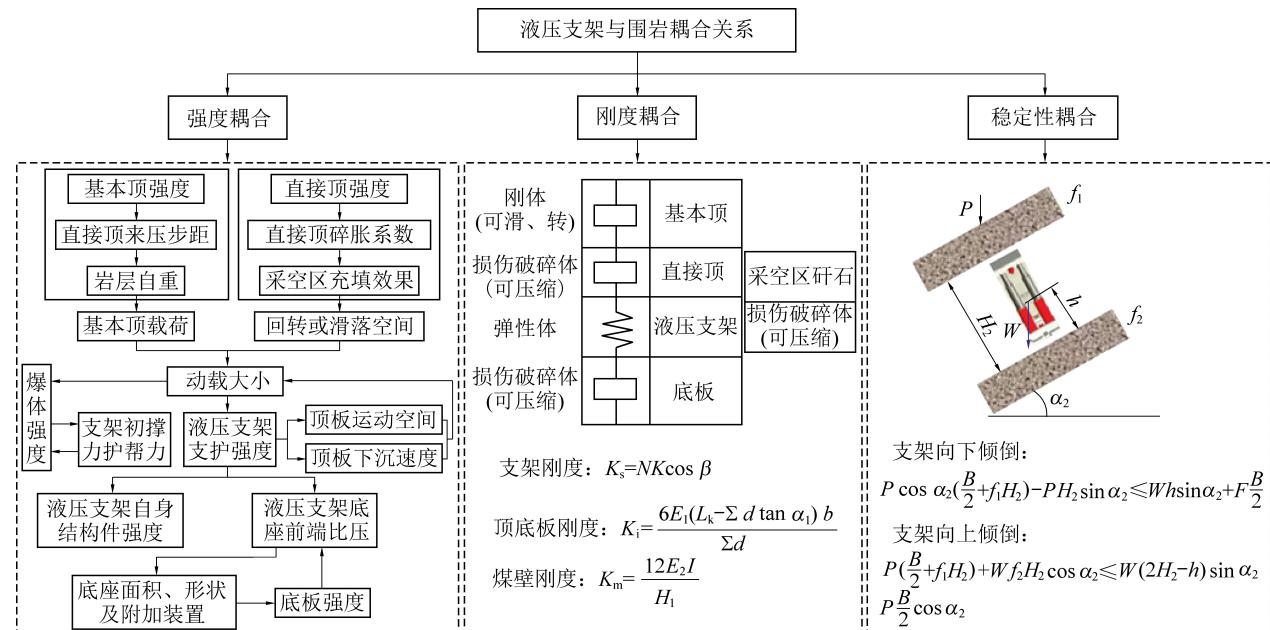
1)液压支架与围岩耦合状态在线监测及评价方法。液压支架与围岩力学系统的稳定性控制是超大采高综采需解决的首要难题,为此发明液压支架与围岩耦合(图6)状态在线监测及评价方法,实时获取、分析支架与围岩的耦合状态<sup>[7]</sup>,及时发现系统的失稳倾向,快速控制支架采取措施保持顶板、煤壁的稳定力学状态,解决超大采高工作面稳定性控制的技术难题。

2)适用于超大采高工作面的采煤机以及开采方法。针对普通采煤机无法满足超大采高工作面割

煤效率、尺寸、可靠性及生产工艺要求的难题,发明适用于7~10 m厚煤层的三滚筒采煤机以及开采方法改变传统的双滚筒采煤机截割方式,将7~10 m厚煤层分为上部、中部、下部3部分截割,并通过与刮板输送机、超大采高液压支架配套实现端部斜切进刀,实现7~10 m厚煤层高效回采。

#### 4.2 超大采高综采围岩控制理论

针对超大采高工作面矿山压力显现具有明显的动载冲击及大小周期来压的特征,建立了超大采高工作面顶板岩层的“悬臂梁+砌体梁”结构模型<sup>[8~10]</sup>及煤壁片帮的“拉裂滑移力学模型”,解决了超大采



N—立柱数量;K—立柱刚度; $\beta$ —立柱倾角; $E_1$ —顶底板岩体弹性模量; $L_k$ —控顶距; $d$ —水平合力与底板的距离; $b$ —煤壁片帮深度; $\alpha_1$ —岩层破断角; $H_1$ —煤壁高度; $E_2$ —煤体弹性模量; $I$ —惯性矩; $P$ —工作面压力; $\alpha_2$ —煤层倾角; $B$ —支架宽度; $f_1$ —支架与顶板摩擦因数; $f_2$ —支架与底板摩擦系数; $H_2$ —支架高度; $h$ —支架中心高度; $W$ —支架重力; $F$ —液压支架工作阻力

图6 液压支架与围岩的耦合关系

Fig.6 Coupling relationship between hydraulic support and surrounding rock

高工作面煤壁稳定性控制难题。

针对超大采高工作面动载矿压及超高煤壁特征,提出了超大采高液压支架合理工作阻力确定的“双因素控制法”,即同时考虑液压支架对顶板与煤壁的控制(图7),临界护帮力不仅是支架护帮结构的设计依据,也是工作面是否需要采取额外防片帮措施的判据。

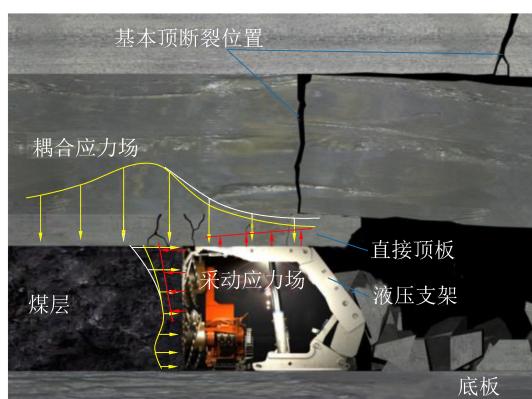


图7 超大采高工作面围岩-支架结构模型

Fig.7 Surrounding rock-hydraulic support structure model of super high mining face

#### 4.3 超大采高液压支架

1) 大缸径能量耗散抗冲击立柱及三级协动护帮装置。为满足超大采高工作面动载矿压支护要求,基于能量耗散原理,发明了增容缓冲抗冲击双伸

缩立柱;发明了超大采高液压支架三级协动护帮装置,采用伸缩梁与护帮板分体结构型式,护帮高度可以达到4.0 m以上,大幅提高了护帮板对煤壁的护帮效果。

2) 高强度超大采高液压支架研发。研发了煤机装备用Q890~Q1150高强度易焊接结构钢,创新焊接机器人多层多道焊接工艺;首次进行支架大结构件残余应力测试,开发不完全退火消除残余应力的工艺技术,超大采高液压支架结构件减重15%以上,整体可靠性与使用寿命大幅提升。

3) 液压支架三维动态优化设计方法。针对超大采高液压支架承受动载冲击加剧的情况,发明了大缸径增容缓冲抗冲击立柱(图8),支架承载峰值压力下降20%,有效克服了大采高工作面的动载效应;建立支架与围岩动力学耦合模型,得出了支架在动载冲击工况下的力学响应状态,进而确定支架薄弱受力点和高敏感区;将支架所受的非线性时变载荷作为支架强度校核、稳定性计算的外载,开发了动态优化设计软件系统,将国内外普遍采用的静载计算升级为动态耦合计算。

#### 4.4 超大采高刮板运输系统

1) 超大采高煤量自适应智能变频集中控制的刮板运输系统,创新研发了基于变频调速的SGZ1400/3×1600重型刮板输送机主从控制、主控

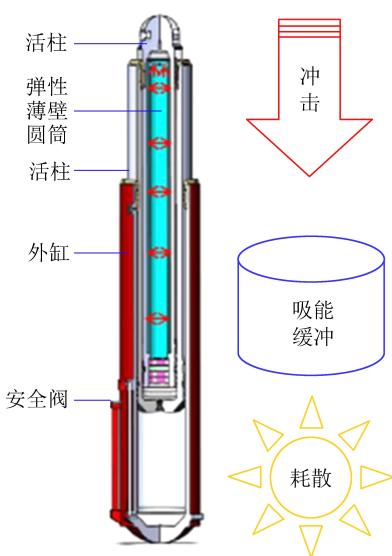


图 8 液压支架三维动态优化设计方法

Fig.8 Three-dimensional dynamic optimization design method for hydraulic support

速度、多电动机功率协同的智能变频控制技术<sup>[11]</sup>，实现了真正意义上的无级软启动，大幅降低了机械冲击及电网冲击，极大改善设备启动、运行过程中的各项性能。

2) 超大规格链传动系统。研制了  $\phi 56\text{ mm} \times 187\text{ mm}$ 、 $\phi 60\text{ mm} \times 181/197\text{ mm}$  紧凑型高强度圆环链，链条的破断强度、疲劳试验循环次数均达到国际水平；研制出轧焊一体结构的中部槽体、超长双向对称模锻刮板，大幅提高槽体及刮板的强度及寿命，如图 9 所示。



图 9 超大规格链传动系统和大块煤连续破碎装置

Fig.9 Super specification chain drive system and large coal continuous crushing device

3) 齿辊式大块煤连续破碎装置。针对超大采高工作面在过渡段易发生大块煤堵塞问题，创新研发了重型刮板输送机卸载区电直驱齿辊式连续破碎装置，解决了工作面输送机卸载点和转载机入口点大块煤堵塞难题，保证了工作面连续快速推进。

#### 4.5 超大采高综采成套设备配套系统

1) 超大采高综采“大梯度+小台阶”短缓过渡配套方式。创新了超大采高工作面大梯度过渡配套方式，通过特殊设计的大侧护板过渡液压支架，实现由

工作面中部(高 8.0 m)到上、下两端头巷道(高 4.5 m)的“大梯度+小台阶”直接过渡(图 10)，解决了工作面端头三角煤损失问题，单个工作面可多回采煤炭超过 40 万 t。

2) 超大采高工作面支护系统群组协同控制方法。在单架稳定性控制的基础上，采用分布式控制策略进行液压支护系统群组协同控制，大幅提升系统对地质条件的适应性，提高系统整体稳定性，实现超大采高液压支架支护系统对围岩的自适应控制。

3) 超大采高工作面集成配套技术及装置。发明了适用于超大采高的开切眼及区段平巷超前支护、智能喷雾、视频监控系统、快速折叠输送带自移系统及超大流量高压自动补偿快速移架系统等工作面集成配套技术及装置，支撑超大采高工作面实现自动化、智能化开采。

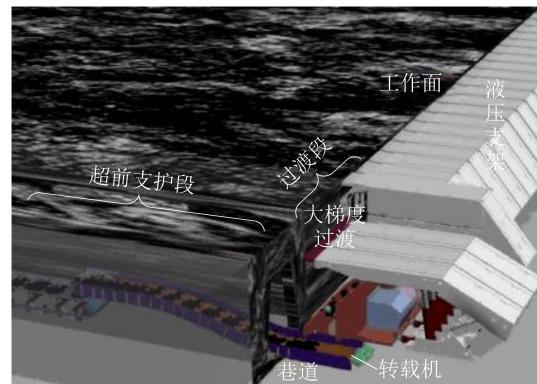


图 10 “大梯度+小台阶”方法

Fig.10 “Big gradient+small step” mining method

#### 5 7 m 超大采高智能综放开采方法和工艺体系

西部特厚硬煤开采实践表明，采用 3~5 m 普通综放和大采高综采等工艺，因煤层硬度大、完整性好、顶煤不易垮落，存在悬顶和易成拱等问题，提高顶煤冒放性与控制煤壁稳定性协调采放空间的矛盾突出。实现西部矿区特厚硬煤层的高产、高效和高采出率开采是目前亟需解决的重大难题，主要面临 3 大科学技术问题：① 特厚硬煤层高效开采理论和工艺；② 特厚煤层综放开采高效采-运-支-放成套装备开发与配套；③ 智能化放煤理论与控制策略。

兖矿能源集团股份有限公司金鸡滩煤矿在西翼 8.2 m 超大采高综采成功后，如何对东翼 9~13 m 煤层安全高效开采成为新的研究课题。2017—2018 年，针对金鸡滩煤矿东翼 9~13 m 坚硬、特厚煤层，研制了 7 m 超大采高综放开采成套技术及装备，成套装备可满足年产 2 000 万 t。经过近 10 a 的技术储备与持续攻关，山能自主创新 4 项核心技术工

程保障体系,通过开采理论、成套装备、开采工艺和智能化系统等创新研发与应用实践,研发了具有自主知识产权的世界首套超大采高综放开采成套技术与装备。

### 5.1 超大采高综放围岩控制理论

1)采-支-运-放协同优化的“四位一体”采放比优化方法。提出了加大割煤高度、增强矿压显现强度、增大顶煤破碎度、提高采出率的特厚硬煤超大采高综放开采方法;首创了7 m超大采高综放开采工艺,为西部煤炭基地9 m以上特厚硬煤高效、高采出率开采提供了新的技术途径。揭示了不同采放比时顶煤塑性破坏范围、破裂强度和放煤空间的变化规律;创立了超大采高综放工作面煤壁稳定性与顶煤采出率协同控制的超大采高、小采放比开采工艺。提出了主动支撑降负重、水平分力抑位移、扩大防护增稳定的煤壁稳定性控制方法。确定了适应金鸡滩煤层赋存条件的采放比 $1:0.5\sim1:1$ ,割煤高度6~7 m,放煤高度3~7 m。

2)超大采高综放支架-围岩耦合协调采放空间控制方法。建立了支架-围岩近场初次耦合模型,发现了支架主动支撑次数和强度与顶煤预裂的规律,揭示了主动增裂提高顶煤冒放性的机理;建立了远场围岩组合悬臂梁结构与不稳定砌体梁交替的支架-围岩二次耦合力学模型;揭示了远场结构破碎顶煤的机理,提出了通过增大矿压显现强度提高顶煤破碎度的采放空间控制方法。

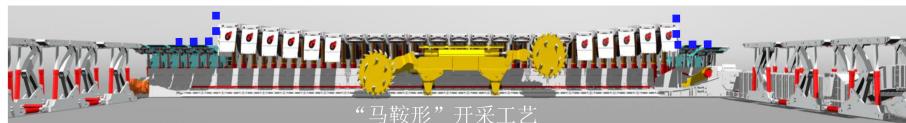


图 12 超大采高综放“马鞍形”开采工艺

Fig.12 “Saddle shape” mining technology for super-large mining height fully-mechanized top-coal caving mining face

端部悬顶不易垮,增加过渡段采高至7 m,应用此工艺首采工作面多采出煤炭约6万t。

### 5.3 超大采高综放液压支架

1)研制了世界首套7 m超大采高综放液压支架。开发世界最大高度、最高工作阻力ZFY21000/35.5/70D两柱掩护式超强力综放液压支架;发明了带弹性薄壁圆筒的530 mm大缸径增容缓冲抗冲击立柱,冲击峰值压力下降20%,有效克服超大采高综放工作面冲击载荷的动载效应。

2)综放工作面大梯度过渡液压支架。研发了综放工作面大梯度过渡液压支架,改善了支架受载状态,便于工作面两巷端头液压支架管理。减少了工作面上、下两端部过渡段顶部三角煤损失,首采工

### 5.2 超大采高综放开采工艺

1)超大采高综放顶煤瀑布式运移规律。研究了掩护梁倾角、长度、摩擦系数对顶煤运移的影响,揭示了超大采高综放顶煤“瀑布式”运移规律(图11),从拉架被动放煤变成主动滑移冒落,减少了煤矸混层,提高顶煤采出率。根据煤矸滑落至放煤口的时间差,确定最佳放煤口动作时间,实现了顶煤混矸率小于5%的控制目标。改变了传统“见矸关门”作业方式。

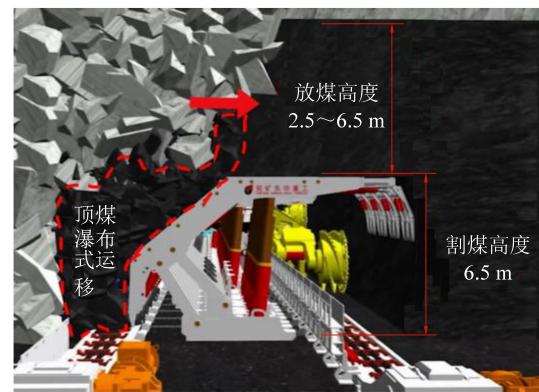


图 11 超大采高综放顶煤瀑布式运移规律

Fig.11 Waterfall migration law of fully-mechanized top-coal caving with super-large mining height

2)超大采高综放“马鞍形”开采工艺。根据采场应力分布规律,首次提出并应用了“马鞍形”开采工艺(图12),提高了煤炭采出率。综合考虑煤壁稳定性及顶煤冒落块度,确定中部采高6.0~6.5 m;因

### 5.4 超大采高综放成套装备配套系统

作面可多回采三角煤40万t。两巷采用超前液压支架,运输巷首创在破碎机前端布置超前支架,有效减少了转载机的长度。

3)研制了液压支架状态精确监控系统。建立了放顶煤液压支架空间位姿与受力状态解算模型,攻克恶劣工况下信号传输及供电、数据处理等技术难题,研制了液压支架状态监控系统,具有支架高度、姿态和受力监测功能,为液压支架姿态精确感知提供了保障,为超大采高综放多应力场耦合围岩稳定性智能控制和智能放煤提供基础。

### 5.4 超大采高综放成套装备配套系统

1)开发了国产IMOSS惯性导航系统。研发了具有自主知识产权的IMOSS惯性导航技术,并能实

现5G传输,消除国内智能化开采核心部件对国外敏感产品的依赖,如图13所示。通过惯导成套系统获取采煤机三维运行曲线,结合自主研发的智能零速校正、偏转差角补偿和轨迹拟合等算法,通过联动电液控对液压支架推移进行单独闭环控制,实现工作面取直动态调整。



图13 自主研发的IMOSS惯性导航定位装置

Fig.13 Self-developed IMOSS inertial navigation and positioning device

2)发明地下开采液压支护系统群组自组织协同控制方法。根据工作面不同区域支护策略,发明了基于“自适应稳定性控制+队列保持推进”2个控制线程的液压支架群组稳定支护和高效推进协同控制方法;与IMOSS惯性导航技术配合保证了工作面设备间的有序运行。

3)开发多点多级破碎自适应超大运力运输系统。研发了3000 kW+2000 kW(2个电动机)后部交叉侧卸刮板输送机,研制了多点多级煤流预破碎装置;开发了以刮板输送机运行电流为主,煤量、采煤机位置和方向为辅的智能调速方法,基于多电机转矩平衡等控制,实现智能判断、主动适应和固定调速区间的自动调速。

## 6 中厚煤层工作面年产千万吨智能开采创新实践

我国大部分矿区的主采煤层是中厚煤层,综合机械化生产是当前最主要的生产方式<sup>[12]</sup>。国外从20世纪90年代开始研发煤矿自动化技术,并在地质条件较好的矿区实现了高效自动化开采;我国从21世纪初开始了自动化的探索,2000年兖矿集团在国内首次使用了液压支架电液控制系统,2006—2013年研发国内首套年产600万t自动化、信息化综放成套装备,并在东滩煤矿成功应用;同期与德国DBT公司合作,在澳大利亚澳思达煤矿成功实现自

动化综放开采;2007年,国内研制出首套替代进口的液压支架电液控制系统,奠定了综采自动化系统国产化最重要的基础<sup>[13-15]</sup>。中厚煤层要达到年产千万吨的产能还存在至少3个方面的技术难题:首先是采煤机割煤速度慢,以往国内采煤机制割煤速度普遍在10 m/min以下;其次是液压支架自动跟机过程中存在丢架、错位现象,严重影响了工作面快速连续推进;再者综采装备可靠性差,开机率普遍较低<sup>[14,16]</sup>。针对上述存在的3个难题,根据转龙湾煤矿3~4 m中厚煤层的赋存条件,开发了煤矿成套综采智能控制系统和智能化开采工艺,形成了综采智能化技术体系和解决方案,建设了3~4 m中厚煤层年产千万吨级矿井智能开采的工程示范,实现了综采工作面设备安全、智能、高效、协调的连续运行,如图14所示。



图14 中厚煤层年产千万吨智能开采工作面

Fig.14 Intelligent mining working face with annual output of 10 million tons for medium-thickness coal seam

### 6.1 千万吨级工作面成套装备及生产工艺

1)宽中心距、高可靠性强力液压支架。根据中厚煤层赋存情况及矿山压力显现特征,为保证设备的稳定性,提升支护强度,研制了宽中心距、高可靠性强力液压支架。将支架中心距由1.5 m提升到2.05 m,采用缸径为500 mm的大缸径立柱,支护强度达到1.4 MPa以上,工作阻力达到16 000 kN;降低工作面支架数量30%以上;研制了机器人自动化焊接制造技术,对主体结构件采用自动化焊接,自动焊接可达率提升10%以上,液压支架整体可靠性明显提升,液压支架寿命试验达到50 000次。

2)大运量、高可靠、超重型刮板输送机。针对刮板输送机存在输送能力裕度过大、效能低、空耗磨损严重的现象,研制了大运量、高可靠、超重型刮板输送机。该刮板输送机槽宽达到1 250 mm,运输能力达到3 000 t/h;链轮具有表面自强化特性,牵引轮与销排啮合性好、强度高,中部槽体耐磨性能好,可靠性高;采用智能柔性变频调速系统,使得减速器传动平稳、重载启动性能更好。

3)高速高可靠性电牵引采煤机。根据矿井年产千

万吨生产能力的需求,结合工作面设备总体设计要求,通过优化生产工艺,研制了新型采煤机。该采煤机采用交流变频调速齿轮销轨式无链牵引,具有恒功率自动调速功能;配置瓦斯断电装置,实现瓦斯报警、断电功能;采煤机机身预留合理且安全的集控系统 RFID 发射器安装位置和集控系统惯性导航安装位置。整机装机功率 2 395 kW,重载割煤速度 17 m/min;截割效率高,破岩能力达到普氏系数 6;基于惯性导航和高精度传感器,显著提升整机智能化水平,如图 15 所示。



图 15 高速高可靠性电牵引采煤机

Fig.15 High speed and high reliability electric haulage shearer

## 6.2 基于惯性导航的工作面直线度监测与自动找直控制技术

1) 液压支架快速自动跟机移架控制技术。针对自动化开采过程中对液压系统供液能力不足的问题,为保证采煤机重载速度 17 m/min 时液压支架的移架速度,加大了液压系统管理力度,增大了泵站压力和流量以提高供液能力,加大巷道管路直径,提高了液压系统维护标准,调整支架自动移架流程控制方案,改进液压控制软件等措施,保证了单架自动降-移-升时间在 10 s 以内,4 架同时移架总时间 25 s 以内,实现了工作面供液状态的有效提升,满足了液压支架跟机自动化控制。

2) 基于惯性导航的厘米级精度直线度检测技术。针对工作面移动过程中存在丢架及拉移不平直的现象,引入澳大利亚 LASC 惯性导航技术,首次在国内综采工作面实际生产过程中应用惯性导航技术绘制工作面曲线,实现了 LASC 惯性导航系统与国产综采自动化系统的深度融合,实现了综采工作面直线度控制,找直效果显著,该技术满足了智能化开采工作面在直线度控制下的连续推进常态化应用,工作面自动找直效果如图 16 所示。

3) 基于逻辑阀的精确推移刮板输送机拉架及销耳间隙控制技术。要实现综采工作面直线度控制,需要对液压支架的动作(推移刮板输送机与移架)进行精确控制,为此专门研制成功了推移专用双速控制阀,当支架完成自动移架后,使用推移双速控制阀慢速推移千斤顶,消除销孔间隙,使推移千斤顶与刮板输送机槽充分接触,消除由于支撑力不够



图 16 工作面自动找直效果

Fig.16 Automatic straightening effect of working face

造成刮板输送机槽被移架支架拽回的情况,保证支架在下一循环移架时有统一行程,提升工作面液压支架直线度控制。

## 6.3 采煤机自适应全作业循环双向智能截割技术

1) 基于惯性导航的采煤机定位定姿以及滚筒截割高度精确检测技术。在工作面开采作业过程中,实现采煤机相对于煤层和开拓巷道的三维空间定位与姿态的实时检测,是实现工作面连续自动化截割推进的必要条件。应用惯性导航系统可以精确检测移动设备在运动过程中三维姿态和空间位置,将惯性导航系统安装在采煤机上,将高精度的惯性导航系统与采煤机控制系统相融合,精确描述出采煤机在工作面的三维运行轨迹,为工作面输送机及液压支架的自动调直提供数据支撑,并与工作面的 GIS 数据融合,完成先进的自动化开采水平控制,实现采煤机的连续自动化运行,如图 17 所示。

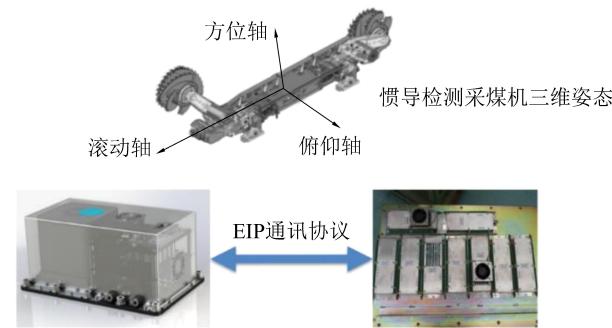


图 17 采煤机电控与惯性导航系统融合

Fig.17 Integration of electric control system and inertial navigation of coalcutter

2) 自适应全作业循环的智能截割技术。采高控制自动化是采煤机真正实现自动化运行的关键点,采用基于记忆截割技术实现采高自动调节,使用循环深度(层数)来描述作业工艺特征实现记忆截割。采煤机记忆截割支持在线学习模式,支持多达

18个截割工艺段运行状态的记忆和准确再现,近乎完美地支持国内工作面复杂的端头截割工艺,实现了采煤机循环作业全过程的自动化智能截割,如图18所示。自动运行的采煤机在长300 m的工作面

上,最高牵引割煤速可达14 m/min以上,行走位置控制精度优于 $\pm 3$  cm,滚筒截割高度的稳态重复误差小于 $\pm 4$  cm。

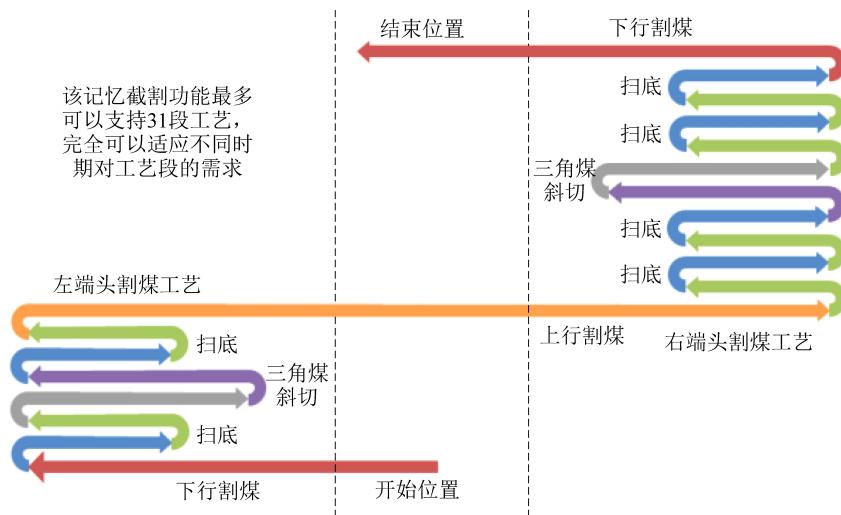


图18 全工作面作业循环记忆截割工序

Fig.18 Automatic intelligent cutting process for the whole process of shearer cycle operation

#### 6.4 刮板输送机智能柔性变频调速控制技术

在实际生产中,由于工作面片帮、落煤不可控,刮板输送机有1/2时间在空载运行,或刮板输送机以1/2的设计输送能力在工作,导致刮板输送机的空耗磨损严重。为解决刮板输送机上述问题,控制刮板输送机的运行速度以调节刮板输送机的输送能力,提高其“效能”,借助采煤机机身安装的高精度惯性导航系统和可靠的信息通信技术,使刮板输送机智能控制器与惯导控制器直接通信,获取采煤机实时准确的位置等物理属性参数。通过计算采煤机任一时刻理论上的瞬时落煤量和刮板输送机整机的煤流覆存量,将这2个量综合后与刮板输送机输出转矩对应的理论负载比较,得出实际负载情况,实现相对准确的调速控制。

采用智能柔性变频调速系统,使链速调控范围缩小20%,链速匹配控制精度提高了60%,正常采煤班刮板输送机链条的行程降低了32.9%,能源消耗降低17.3%,降低刮板输送机自身机械损耗20%以上。

### 7 高端装备制造技术体系

随着我国煤矿对智能化开采的需求不断加快,煤矿装备的高可靠性、适应性成为了煤矿智能化高效安全开采发展的瓶颈;而液压支架作为煤矿地下开采最为重要的支护设备,其高可靠性、高适应性显得尤为重要<sup>[17]</sup>。兖矿东华重工有限公司液压支架的生产历

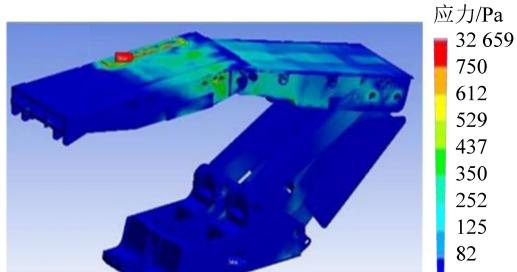
史已有30多年,液压支架的生产由大修、部件生产发展到整台套批量生产,形成一套成熟的高端液压支架制造体系<sup>[18-19]</sup>。完善了集云端高效设计运算与性能综合分析一体化的高端液压支架精准设计系统<sup>[20]</sup>,应用了多种高端液压支架智能制造工艺保障技术<sup>[21-23]</sup>,形成了高端液压支架全过程质量管控体系,满足了国内外先进煤矿对高端液压支架的需求。

#### 7.1 高端液压支架研发设计体系

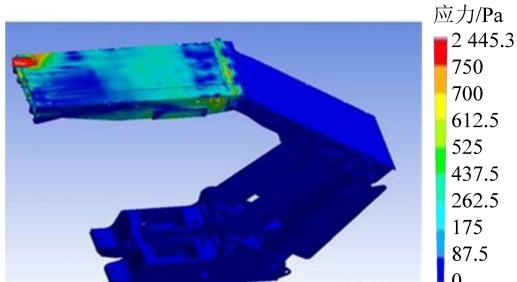
基于已有液压支架设计系统,融合模块化设计、骨架设计、协同设计、参数化设计理念,集成管路智能化布局设计软件模块和产品数据及生命周期管理平台,开发出集云端高效设计运算+性能综合分析的一体化系列化高端液压支架精准设计云平台系统,该系统不仅能够适应当前日益复杂多样的液压支架设计发展形式,还大幅提高新型液压支架、设计效率,实现了不同型号间设计数据实时交互<sup>[24]</sup>。

1)高端液压支架精准设计云平台。高端液压支架设计基于Windchill的模块化+骨架设计+参数化设计理念,该理念的核心充分发挥了Creo骨架建模、参数化设计的优势、运用模块化思想将支架拆分为更为紧凑的装配模块,更为符合车间直接装配的模块BOM需求,在模块化的基础之上发挥Windchill图纸协同工作的优势,实时同步更新主设计师设计意图,将设计参数变化传递到各个骨架建模模块,完成模块设计师主要参数的同步更新。该设计理念将

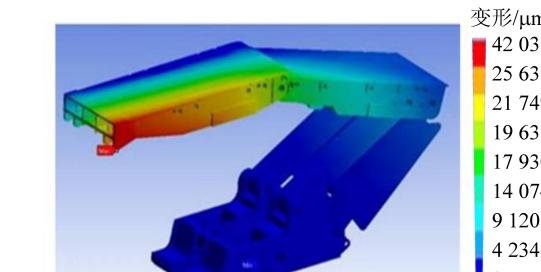
传统二维设计与三维造型设计相结合,实现了从产品参数化建模到产品结构的快速改型设计,大幅提高了设计和变型设计效率和产品设计的准确性,缩短了设计周期,提高了设计效率,满足了客户对产品性能的需求。



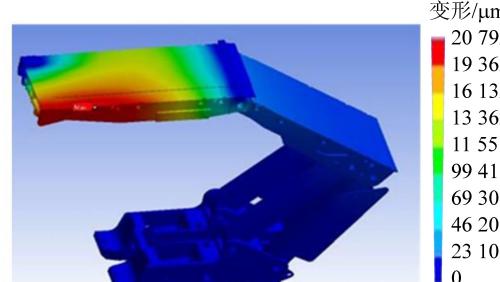
(a) 偏心加载应力云图



(c) 顶梁扭转应力云图



(b) 偏心加载变形云图



(d) 顶梁扭转变形云图

图 19 液压支架 ANSYS Workbench 应力和变形

Fig.19 Stress nephogram and deformation nephogram of hydraulic support in ANSYS Workbench

基于 MSC Easy5 仿真软件,自主开发管路智能化布局设计软件模块。结合管路布局中的工程约束,研究改进的人工高效输入路径算法,快速地完成复杂空间内的管路路径布置;通过路径优化输出合理可行的管路路径,为实际液压支架产品的开发提供依据,如图 20 所示。

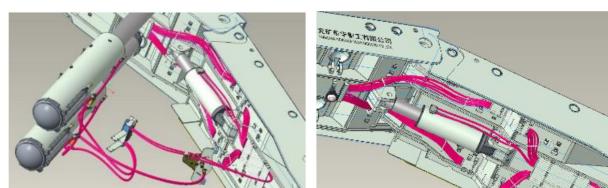


图 20 液压系统智能化管路系统

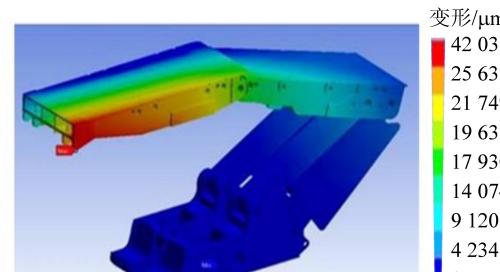
Fig.20 Intelligent piping layout design system for hydraulic system

## 7.2 智能制造技术研发实践

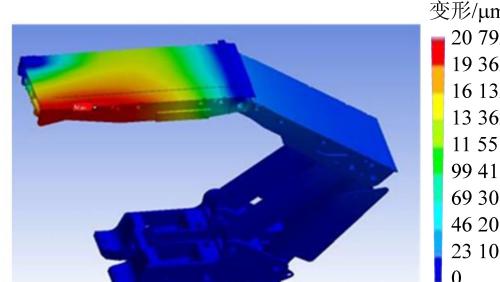
东华重工集团通过对原有的落后旧工艺装备体系进行研发升级优化,积极研发应用新工艺提升制造质量,先后研发了防腐节能环保粉末涂装技术、应用集群式焊接机器人、自动化锯切下料装备、激光增材强化智能工艺装备、油缸内孔熔覆工艺装备等。

1)重防腐节能环保粉末涂装技术。研发了煤

2)高可靠性虚拟化分析平台。运用 ANSYS Workbench 软件进行液压支架有限元分析,用于解决产品研发过程中 CAE 软件的异构问题,并用 ANSYS Workbench 进行产品的性能优化。ANSYS Workbench 得到的支架应力和变形,如图 19 所示。



(b) 偏心加载变形云图



(d) 顶梁扭转变形云图

图 19 液压支架 ANSYS Workbench 应力和变形

矿机械装备零 VOC 粉末涂装工艺,制定了高压清洗、硅烷化学前处理和“环氧底粉+聚酯面粉”粉末双涂体系,首次在液压支架涂装上采用智能输送、智能识别、智能喷涂技术,建成了国内首套现代化、自动化、智能化液压支架粉末涂装生产线和热处理生产线(图 21)。应用喷涂工艺所得的涂层饱满度好、机械强度和耐磨性高、防腐性能优良,同时实现了液压支架绿色环保涂装,此研究应用在国内外尚属首创。



图 21 油缸喷粉生产线

Fig.21 Powder coating line for oil cylinder

2)应用集群式焊接机器人。优化支撑拼装工艺,提升打底焊交检效率,实现机器人不停机,一次性全打底作业,优化焊接接头预留方式,提升焊接覆盖率。实现了制造的自动化、智能化、高端化,大幅提高了制造能力,为高端液压支架的制造,提供了有力的保障。采用焊接机器人后掩护梁焊接覆盖率提升15%,如图22所示。



图22 机器人焊接掩护梁

Fig.22 Robot welding shield beam

3)自动化锯切下料装备。油缸车间采用锯切效率和锯切质量更好的高速圆锯床下料方式,使用高速圆锯床并配合下料自动化线对管、棒料进行锯切下料,其效率将是传统带锯床的5~10倍。使用该自动化线进行下料,既提高了锯切效率和锯切质量,又减少了人力、物力的支出。

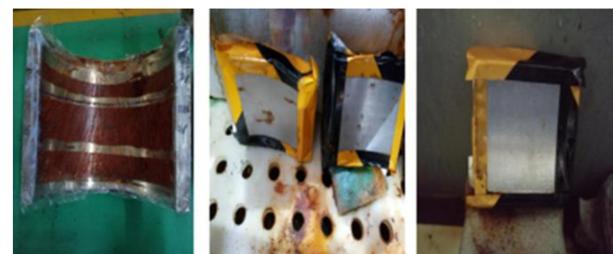
4)激光增材强化智能工艺装备。通过分析典型矿山水剂环境对增材成形层的侵蚀失效机制,相应调整、选配增材粉料配方,激光增材增强矿用设备在矿山环境的适用性和服役性能得到极大提高。研发了激光增材强化温度场在线智能监控系统,建立了一套基于CCD测温的装置,实时监控激光增材强化过程熔池温度;采用标准黑体炉用于红外测温热像系统的温度标定,得到了热辐射图像比色值与温度关系式;采用此温度监控系统可以分析激光功率、扫描速度、送粉量等参数对熔池温度的影响关系,实现了对工艺参数的优化。该系统将激光增材强化过程中熔池温度检测误差控制在5%以内。激光增材强化后立柱及中部槽工件的耐磨性能是传统堆焊、喷涂工艺的5~6倍;激光增材强化的液压千斤顶耐腐蚀性能达到9级(GB/T6461—2002),服役寿命是镀铬千斤顶的3倍;增材强化层高低差控制精度高,确保后续机加工一次合格率达到95%以上,如图23所示。

5)油缸内孔熔覆工艺装备。研发应用了内孔熔覆不锈钢及其机加工工艺,该熔覆层结合强度高、组织细密均匀、硬度高、耐磨损、耐腐蚀、耐高温、抗氧化,整套工艺具有环保、效率高、成本低等特点;研



图23 激光增材强化智能工艺装备

Fig.23 Laser additive strengthens intelligent process equipment  
发了新型无接头送丝机构,成功解决熔覆时换丝造成的接头问题,有效避免熔覆缺陷(图24),防腐性能在行业内首次做到中性盐雾试验720 h无锈蚀,达到国内领先水平。从熔覆前、后机加工工艺及熔覆工艺入手,通过解决机加工中的同轴度、盲孔根部加工、铁屑排出以及熔覆工艺中的连续送丝、变形控制、防腐、耐磨等一系列问题,最终形成一套成熟、稳定的工艺流程体系。



(a) 铜基熔丝 (b) ER304及ER316熔丝 (c) 新开发不锈钢熔丝

图24 不同熔丝中性盐雾试验720 h 对比效果

Fig.24 Comparison effect diagram of different fuses in neutral salt spray test for 720 hours

### 7.3 高端液压支架制造实践

1)超大采高掩护式液压支架。基于先进的设计研发平台,东华重工有限公司先后成功研制出ZFY21000/35.5/70D、ZY21000/38/82D等超大采高液压支架。其中,ZY21000/38/82D超大采高液压支架是世界上首套投入使用的高度超8 m掩护式液压支架,该液压支架的成功应用在煤炭开采历史上具有里程碑式的重要意义,如图25所示。该套支架打破国外大型煤机制造企业技术行业的垄断,提升了我国煤机装备制造业的整体水平和能力,推动煤机行业向成套化、集约化、智能化方向发展。

ZFY21000/35.5/70D型两柱掩护式放顶煤液压支架是全球采高最高、工作阻力最大、姿态感知能力最强的两柱放顶煤液压支架,开创的超大采高综放



图 25 ZY21000/38/82D 超大采高液压支架

Fig.25 ZY21000/38/82D super-large mining height hydraulic support

开采工作面两端头“大梯度”配套和后部刮板输送机交叉侧卸配套模式(图 26),技术先进合理;创新应用二级协动强力护帮机构、抗冲击超大流量双伸缩立柱系统、快速移架技术、支架多维度姿态感知预警控制技术及工作面联合支护技术,有效提高了支护系统的稳定性和适应性,如图 27 所示。

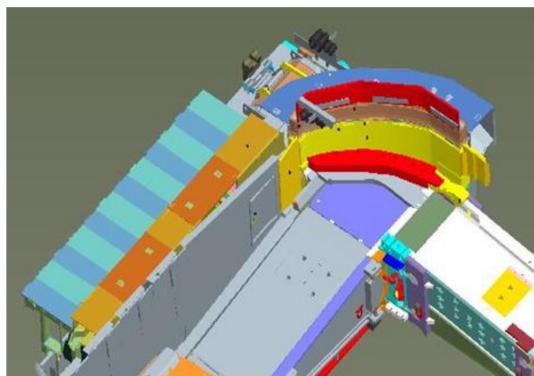


图 26 刮板输送机交叉侧卸配套模式

Fig.26 Scraper conveyor cross side dumping matching mode



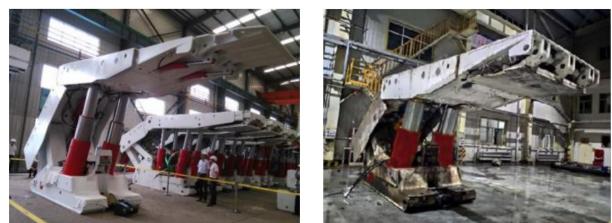
图 27 ZFY21000/35.5/70D 型两柱掩护式放顶煤液压支架

Fig.27 ZFY21000/35.5/70D type two pillar shield top-coal caving hydraulic support

2)薄煤层掩护式液压支架系列。研发的薄煤层掩护式液压支架系列性能达到国际领先水平,以

ZY9000/10/18D 型两柱掩护式液压支架、ZYT9000/17/30D 型端头液压支架、ZT14000/17/28 型超前液压支架为代表的综采成套关键技术与装备的研发,使兖矿集团引领国内薄煤层采矿技术和装备的技术发展,达到国际领先水平。

3)中厚煤层掩护式液压支架。所设计研发的 ZY16000/23/43D 型中厚煤层高效开采液压支架是集团公司首个大工作阻力液压支架,支架所使用的双伸缩立柱缸径 500 mm,为集团公司在之后更大架型支架的设计制造方面积累经验。该支架产品质量可靠,故障率低,工作面具有年产 1 000 万 t 的能力。2015 年下井投入使用 2021 年升井维修,实现 6 a 不升井的质量目标,如图 28 所示。



(a) 2015年

(b) 2021年

图 28 2015 年下井及 2021 年升井后支架状态

Fig.28 Comparison of support status between lowering in 2015 and lifting in 2021

## 8 巷道支护技术创新实践

### 8.1 兖州矿区巷道支护技术发展历程

兖州矿区是国家“五五”计划以来重点建设的特大型现代化煤炭生产基地。在兖州矿区 40 多年的发展过程中,矿区采矿技术由普采发展到普通综采,又从普通综采发展为大功率装备的高效综采和综采放顶煤开采,采矿技术的不断发展促使矿区煤巷支护技术发生了 2 次重大的变革。在 20 世纪 70 年代末,兖州矿区推行普通综采之后,逐步淘汰了支护强度低、安全可靠性差、巷道维修及材料消耗大的木支护,代之以支护强度相对较高、制作使用比较方便、并可多次重复使用的金属棚支护。在 90 年代初期,随着综放技术在兖州矿区试验成功,大功率装备的高效综采和综放开采技术逐渐推广,兖州矿区综采工作面单产及矿井集中化程度大幅度提高,在这种新的形势下原有的金属棚支护已明显不适应综采技术发展的需要。自 1993 年开始,兖州矿区在煤巷支护中进行了锚网支护试验。按照“先易后难,积极稳妥,突出重点,总体推进”的指导方针,首先在南屯煤矿 1301 综放工作面实体煤区段平巷进行了锚网支护试验,成功之后在类似条件的综放区段平

巷进行了推广应用;然后重点对工作面沿空巷道的锚网支护技术进行了探索和研究,并先后在南屯煤矿、兴隆庄煤矿、东滩煤矿等单位选点试验,取得了显著效果后进行全面推广应用;在推广应用的过程中又进一步对大断面开切眼、煤层特别松软破碎区以及煤层埋藏深、地压大等特殊条件下的综放工作面沿空巷道锚网支护技术进行了攻关,均取得较好的效果;同时对煤巷锚网支护技术配套的施工机具和支护材料也进行了相应的研究和开发,最终使兖州矿区在煤巷锚网支护方面形成了一整套比较完善的综合技术<sup>[25-27]</sup>。

经过数年的研究、开发、试验和推广,兖州矿区的煤巷锚网支护技术日趋完善,应用范围逐步扩大,煤巷锚网支护进尺及煤巷锚网化程度逐年提高。尤其是1997—1999年,煤巷锚网支护得到了全面快速的推广应用。1997年,矿区煤巷锚网支护进尺完成20 009 m,煤巷锚网化程度达到了39.65%;1998年煤巷锚网进尺达到了44 088 m,煤巷锚网化程度达到80.14%,其中综放锚网进尺32 091 m,占全部煤巷锚网进尺的72.8%,沿空巷道锚网支护进尺7 942 m,占全部煤巷锚网进尺的18%,1999年煤巷锚网进尺达到57 000 m,煤巷锚网化程度达到85.8%,其中综放锚网进尺36 000 m占全部煤巷锚网进尺的63%,沿空巷道锚网支护进尺15 900 m,占全部煤巷锚网进尺的28%。推广应用煤巷锚网支护为兖州矿区带来了显著的经济效益和社会效益,以每米巷道锚网支护比架棚支护平均节约成本925.73元计算,1997年、1998年、1999年可为兖州矿区矿井分别节约资金1 852万元、4 081万元和5 276万元。此外,推广煤巷锚网支护还具有改善支护效果、提高支护质量、减少工作面工字钢回撤工作量和运输量、减轻工人劳动强度、简化工作面端头支护、加快综采工作面推进速度、杜绝区段平巷掘进期间煤层自燃发火隐患等优点。

进入21世纪以来,巷道锚网支护技术不断发

展<sup>[28-31]</sup>,支护材料不断升级改造,支护标准不断完善;大范围推广了高预紧力锚网支护技术<sup>[32-35]</sup>,提高锚杆锚索预紧力、研发T型钢护板加大护表构件强度、实现锚杆主动及时支护,显著提高了巷道支护效果。

## 8.2 大断面沿空掘巷围岩控制技术与应用

在工作面超前采动影响下,传统小断面巷道极易发生大变形破坏,巷道断面急剧收缩,影响通风、运输、行人,矿方不得不安排大量作业人员进行巷道扩帮、挖底作业,极大限制了大型化煤矿装备的应用,影响了煤炭开采的安全高效。针对此问题,兖矿集团率先开展了高效生产综采(放)区段平巷强支护大断面布局方式,并一举获得成功。在大断面巷道围岩稳定性原理方面(图29),发现了同等深度和地质条件下大小断面巷道变形量相近的现象,揭示了大断面巷道围岩“内外应力场”演化规律;创新了基于钻孔煤粉量确定基本顶侧向断裂线位置的技术方法,构建了“钻进煤粉量-围岩应力-顶板断裂”关系模型,发展了大断面“内、外应力场”理论,创新了沿空巷道大断面布置方式,在受压收缩变形的情况下满足区段平巷超前支架的正常使用;结合大断面巷道高强与让压功能协调作用原理,建立了大断面巷道围岩结构力学模型及双参数弹塑性基础梁理论。在大断面巷道围岩控制技术方面,研发了大断面巷道特殊锚网索带整体结构的协同支护技术、综采(放)大断面区段平巷超前液压支架支护装备及技术;发明了交替前移式液压支架,变革了传统工作面端头区段平巷密排单体支柱支护工艺,有效解决了区段平巷掘采中的顶板软、维护难、影响生产等技术问题,推动了区段平巷超前支护的技术变革,大幅降低了职工劳动强度,将煤矿工人从繁重的体力劳动中解放出来,为综采(放)工作面高效推进提供了安全稳定可靠的空间保障。该技术在兖州矿区各大矿井的成功实践,使综采大型装备的顺利应用成为可能,工作面产能得到了显著提高。



图29 小断面和大断面沿空巷道支护效果

Fig.29 Supporting effect of small section and large section along goaf

### 8.3 陕蒙基地小煤柱沿空掘巷技术与应用

自陕蒙基地开发建设以来,工作面普遍采用宽20~30 m区段大煤柱布置模式,造成了大量优质煤炭资源浪费;同时,随着煤炭进入深部开采状态,遗留大煤柱导致深部煤层处于应力增高区,且大煤柱护巷使巷道应力进一步增高,巷道严重变形破坏甚至发生冲击地压等动力灾害事故,葫芦素、纳林河、布尔台等陕蒙深部矿井都遭受了大煤柱护巷带来的巷道大变形问题。大煤柱布置模式已成为制约该地区安全高效开采的重大安全技术瓶颈。

针对上述问题,兖矿集团开展系统攻关,提出了陕蒙深埋矿井小煤柱沿空掘巷开采布置模式,分析了留小煤柱沿空掘巷采空侧预裂断顶围岩稳定主控因素,提出了深埋厚煤层大跨度留小煤柱沿空掘巷多灾耦合下小煤柱合理尺寸的设计原则;提出了采空侧断顶卸压控制技术,在上区段工作面回采过程中对采空侧悬臂顶板提前断顶,减小悬臂长度,优化下区段沿空掘巷围岩应力环境;提出了深埋厚煤层大跨度小煤柱沿空掘巷损伤围岩双层强化控制机理和关键技术体系,形成了综采工作面掘-采全周期安全保障综合技术。

小煤柱沿空掘巷技术在鄂尔多斯石拉乌素煤矿(埋深703 m)(图30)、营盘壕(埋深730 m)2座千万吨级矿井展开工业性试验,在深埋高应力复合顶板留顶煤条件下,以长3.0 m锚杆+长6.1~7.1 m锚索支护完成了大断面煤巷(宽5.5~6.0 m、高4.3 m)的有效控制,掘进期间和回采期间巷道围岩损伤深度和变形量减少了50%以上,提高工作面煤炭采出率4.9%,保障了矿井工作面安全高效开采,为西部矿区深埋冲击厚煤层推广应用小煤柱沿空掘巷技术提供了工程示范。

### 8.4 深部复杂条件巷道围岩控制技术与应用

山东省内煤矿平均埋深超过660 m,其中埋深800 m以上的34处,千米深井共有20处,占全国的42%,且采深正以每年约40 m的速度增加。受深部高应力、极软岩、强采动及断层破碎带等复杂条件影响,巷道围岩裂隙发育、松散破碎、变形剧烈、破坏范围大,传统支护方式难以稳定控制,巷道复修率增加,支护成本升高,易造成大变形、冒顶、片帮、底鼓等安全事故,已成为制约深部矿井安全高效生产的重要难题。

兖矿集团历经10 a科技研发和工程实践,对深部巷道支护材料、机具和工艺进行了创新研发。将锚杆杆体轧制成单向无纵筋左旋螺纹钢,



图30 石拉乌素矿辅运巷小煤柱沿空巷道

Fig.30 Gob-side entry with small coal pillar in auxiliary transportation roadway in Shilawusu Coal Mine

对锚杆杆体表面结构进行了优化;研制了锚杆加工滚压无热处理技术,保证了丝扣段与杆体强度的一致性;设计了与异型带钢的冠状孔相配合的球形螺母,发明了提高帮部锚杆护帮效果T型钢护板,提升了锚杆群各锚杆之间组合件的效果;研制了超快速树脂药卷,可在30 s内能够快速、充分反应,实现快速凝固,快速承载,实现了锚杆的快速安装;将整根锚杆由里到外分段配制不同凝固时间的锚固剂,从而满足锚杆到位时的不同时间要求;研制了具有高发泡、较强渗透能力、固化硬化时间可调节、锚固力比较大等优点的聚氨酯锚固剂;提出了采用29U型钢组合锚索的思路,解决了锚索组合性差、锚索支护难以在巷道表面形成刚度较大的梁性结构的难题;通过在螺母与托板之间加减摩垫圈,减少了螺母与托盘之间的摩擦阻力和摩擦转矩,提高了支护系统的刚度。

针对深部巷道围岩大变形控制难题,提出了深部巷道破碎围岩分级模型及方法,形成了基于支护围压与围岩等级的锚注强度设计理论;提出了深部巷道钻进分级、初次锚固、注浆充填、拱架强化、实时评价的分阶段完整控制方法;构建了由外部锚注自承层、中间充填调整层与内部高强承载层组成的深部复杂条件巷道分阶段完整控制体系;研发了组合式高强注浆锚杆(索)、预应力定量施加装置、高强约束砼定量让压拱架及巷道原位数字钻探测试系统等成套关键技术;首创了组合式高强注浆锚杆预应力定量施加、高强约束砼定量让压拱架拼装、柔性壁后充填等成套支护体系施工技术,组合式高强注浆锚杆承载力为常规中空注浆锚杆承载力的5.3倍以上,配套预应

力定量施加装置可实现“一次施打、定量预紧、控注协同”支护效果;高强约束砼定量让压拱架承载力为常规U型钢拱架承载力的2.1倍以上。该技术有效控制了围岩变形破坏,降低了巷道复修,攻克了深部复杂条件巷道围岩支护难题(图31),并成功在超大断面隧道工程中进行了推广应用。

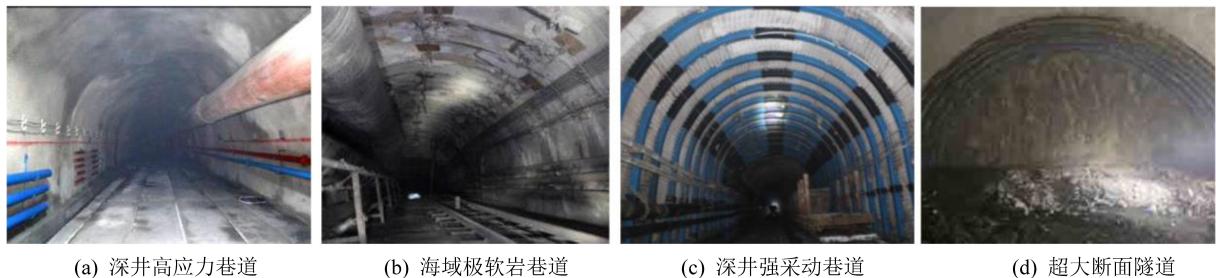


图31 深部巷道分阶段完整控制体系现场推广应用

Fig.31 Field promotion and application of phased complete control system in deep roadway

## 9 深井冲击地压治理与安全高效开采

### 9.1 山能冲击地压矿井现状

山能共有36对冲击地压矿井,省内27对,省外9对,大多分布在山东、内蒙古、新疆、陕西等地区,国内主要矿区(除东北外)均有山能冲击地压矿井。山能冲击地压矿井分布情况如图32所示,山能冲击地压矿井煤层赋存特征见表3。

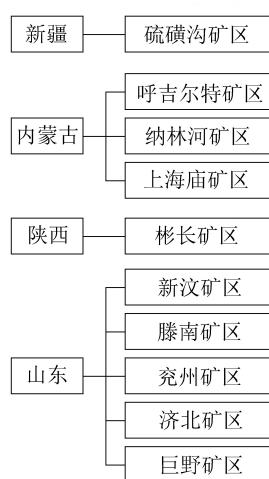


图32 山能冲击地压矿井分布

Fig.32 Distribution of rockburst mines of Shandong Energy Group

制了围岩变形破坏,降低了巷道复修,攻克了深部复杂条件巷道围岩支护难题(图31),并成功在超大断面隧道工程中进行了推广应用。



图33 山能冲击地压矿井煤层赋存特征

山能冲击地压矿井多具有埋深大、地质结构复杂、煤层结构复杂、覆岩类型及开拓开采方式多样的特点。总体而言,埋深600~1 000 m,埋深超过800 m的矿井25对;省内冲击地压矿井构造复杂,省外冲击地压矿井水文类型复杂;煤层厚度1.1~31 m;煤体普氏系数0.18~4.80,陈蛮庄3煤硬度系数0.18,硫磺沟9~15煤体硬度系数4.8;煤层结构复杂,华丰、陈蛮庄、硫磺沟、上海庙为大倾角煤层,不同煤矿软硬煤层分层明显,见表3。

就各矿区冲击地压类型而言<sup>[36~40]</sup>,山能冲击地压可划分为3种类型。鲁西南巨野矿区以新巨龙为代表,具有薄基岩、巨厚松散层的赋存特点,煤层开采后地表沉降系数达到97%,是典型的高静载与构造应力叠加的冲击灾害。陕蒙基地以巴彦高勒、高家堡为代表,上覆巨厚白垩系岩层,地表沉降系数极低,煤层偏硬,具有强冲击倾向性,同时底板具有弱冲击倾向,煤层和底板同时冲击破坏的案例较多,营盘壕、石拉乌素等矿井都有强烈显现。新汶矿区主要是多煤层开采、相邻煤层遗留煤柱、不规则开采可能导致的冲击灾害,同时受到深埋开采因素影响,主要是孙村和协庄煤矿。

表3 山能冲击地压矿井煤层赋存特征

Table 3 Occurrence characteristics of coal seams in rockburst mines of Shandong Energy Group

煤层性质	厚度	硬度	倾角	结构
特点	厚度跨度大	硬度系数不均	倾角变化大	硬软分层明显
参数	1.1~31 m	0.18~4.8	近水平~急倾斜	软硬软互层
代表矿井	极软煤层:陈蛮庄3煤(0.18)等; 极硬煤层:亭南4煤(4.7)、 硫磺沟9~15煤(4.8)			“软-硬-软”:巴彦高勒煤矿; “硬-软-硬”:华丰煤矿、石拉乌素煤矿; “上硬-下软”:亭南煤矿、正通煤矿; “三软煤层”:陈蛮庄煤矿

就矿震问题而言,当前山能突出的矿震类型可划分为3大类:①高位关键层破断型矿震,如华丰煤矿的高位砾岩层、王楼煤矿高位岩浆岩、彬长矿区亭南、高家堡煤矿的高位洛河组砂岩、东滩煤矿的侏罗纪红层等;②构造失稳型矿震,代表矿井是梁宝寺煤矿;③薄基岩厚冲积层赋存条件下,大跨度连续采空区高静载边坡失稳型矿震,代表矿井是新巨龙公司。防范大能量矿震诱发冲击地压是山东能源冲击地压矿井灾害防治关键。

## 9.2 山能典型矿区冲击地压防治实践

### 9.2.1 鄂尔多斯深部矿区冲击地压防治实践

鄂尔多斯是国家“十五”建设的4个超亿吨煤炭基地之一,约占我国总产量的18.6%,该地区一直没有深部冲击地压灾害治理的基础数据和开采经验;建井初期,鄂尔多斯地区周边矿井如红庆河、纳林河二号、门克庆、葫芦素、母杜柴登等矿井都采用20~40 m大煤柱护巷方式,造成了靠采空区侧巷道强烈矿山压力,不少矿井均出现了冲击地压事故,冲击地压已被列为地区煤炭开采的主要灾害。兖煤鄂尔多斯能化公司下属是石拉乌素煤矿、营盘壕煤矿采深均已超过600 m,且煤岩层均具有冲击倾向性。为解决严重冲击地压灾害问题,兖矿集团围绕小煤

柱沿空掘巷、超前预测、精准治理、智能化监测预警等工程技术难题展开一系列研究与工程实践,并率先形成该地区冲击地压防治的示范性成果。

兖矿集团本着“提前研究、提前规划、提前预防”防冲理念,以鄂尔多斯深部矿区典型开采地层条件为工程背景,揭示了多区段平巷、宽煤柱上覆岩层侧向应力场的变化规律,通过优化工作面合理布局和开采接续计划,采用宽3~5 m小煤柱护巷和宽工作面(“大煤柱”护实体侧巷道)布置技术,实现巷道低应力区布置,有效降低冲击地压的发生机率;揭示了“冲击地压-顶板疏水-地表沉降”等3种类型复合冲击地压机理(图33);进行了防冲开采设计优化,攻克了回采工作面围岩大变形协同控制、“远距离辅巷多通道”的快速撤面、“三位一体”精准应力防控等关键防冲技术,掌握了巷道高预应力、高冲击韧性强力锚杆-锚索支护技术,建立了深部采场、巷道有效防冲体系;研发了“冲击地压-顶板水-地表沉陷”复合灾害监测预警平台系统,开创性集成了矿山灾害相关的地质水文数据、井上井下全空间多参数监测数据和开采条件等有效信息,融合“静态”理论评价与“动态”监测和开采信息,大幅提高了冲击地压监测预警准确率。

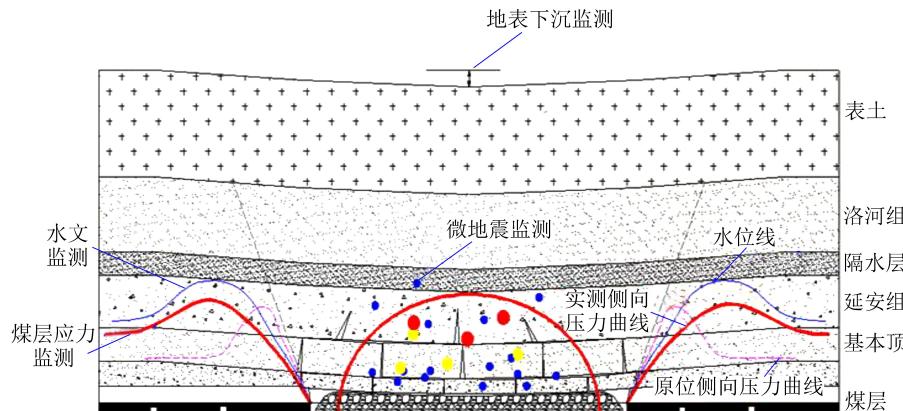


图33 陕蒙地区冲击-突水-地表沉陷复合型动力灾害机理

Fig.33 Mechanism of dynamic disaster of impact-water inrush-surface subsidence in Shaanxi and Inner Mongolia

兖矿集团经过多年研发与实践,揭示了陕蒙地区冲击地压类型和发生的机理,攻克了陕蒙地区的防冲难题并建立技术体系,在监管上逐步形成陕蒙地区冲击灾害监管体系,项目研究成果在鄂尔多斯典型冲击地压矿井得到成功应用,率先形成该地区冲击地压防治的示范性成果。至2020年底,石拉乌素、营盘壕两矿安全采出煤量1 282万t,提高了资源采出率,创造了巨大的经济效益,延长了矿井服务年限,保障了工人的人身安全,确保了矿井安全持续运行,促进了深部冲击地压灾害理论技术的

发展<sup>[41-45]</sup>。

### 9.2.2 巨野矿区巨厚表土层下冲击地压防治实践

巨野煤田是我国近几年新开发的优质焦煤基地,具有表土层厚(400~750 m)、煤层厚(6~10 m)、埋深大(800~1 200 m)等特点,建设有新巨龙、赵楼、梁宝寺、李楼、郭屯等7对大型矿井,曾发生过若干起冲击地压灾害,严重制约了安全高效生产。

针对深厚表土强冲击煤层开采冲击动力灾害防治技术难题,山能与北京科技大学合作攻关,厘清了深井厚表土地层和深井厚基岩开采应力演化特

点(图34),揭示了深厚表土薄基岩地层条件下“应力击穿型”冲击地压发生机理和孤岛综放工作面整体失稳型冲击地压发生机理;开发了冲击地压多参数综合监控预警平台系统,提出了基于“云计算”的大数据冲击危险性智能辨识算法;提出了深厚表土强冲击煤层沿空工作面合理区段煤柱宽度4~6 m,确定了深厚表土强冲击煤层沿空工作面超前支护强度和支护方式,提出了深厚表土薄基岩矿井防冲开采设计关键参数,建立了深厚表土强冲击煤层采掘工作面冲击地压防治技术体系。该研究成果显著提高了冲击地压灾害预测预警可靠性、准确率和防治效果,对于提高我国深厚表土薄基岩煤层高效安全开采水平意义重大,具有广阔应用前景。该技术成果先后在山能赵楼煤矿和新巨龙煤矿开展应用,2017—2019年安全采出受冲击地压灾害危险煤炭833万t,经济效益显著。

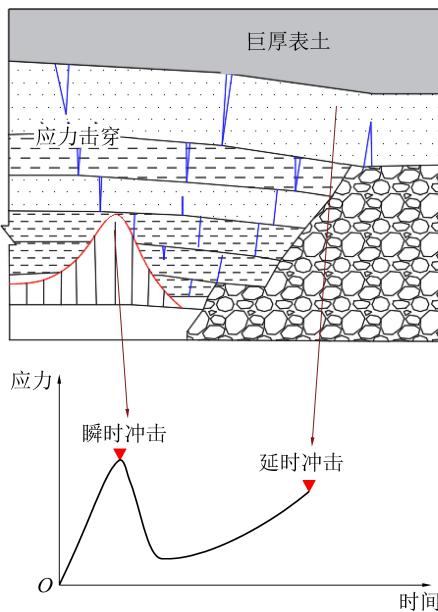


图34 巨厚表土层条件下冲击地压发生机理  
Fig.34 Mechanism of rock burst under condition of extremely thick topsoil

### 9.2.3 特厚煤层冲击地压防治实践

新疆、内蒙古、陕西等多个特厚煤层采掘过程中具有震动频繁、煤爆和动力性片帮冒顶严重、临界冲击深度小等特点,先后发生10余起恶性冲击地压事故。兖矿新疆业有限公司硫磺沟煤矿在2013年1月至2014年12月期间因冲击地压灾害频发导致全矿采掘工程趋于停滞,矿井面临停产关矿的境地。

兖矿集团针对特厚煤层采掘工作面冲击地压防治技术难题,经科攻关,建立了特厚煤层3种典型的冲击地压发生机理的力学模型,提出了以煤体倾向性和动静应力比值为基础的冲击危险评价方法,揭

示了特厚煤层围岩分区蠕变特征及诱冲机制;研发了特厚煤层掘进工作面多参数冲击地压综合监测预警系统,分别提出了地音、应力、锚杆索压力的单指标和多指标综合预警值及预警方法,显著提高了特厚煤层掘进工作面冲击危险性预警的准确率;建立了倾斜特厚煤层综放工作面采空区侧向支承压力分布特征计算理论模型,提出了以避开采空区侧向支承压力峰值影响、隔离采空区为基础的区段煤柱宽度确定方法(图35),形成了特厚煤层冲击地压治理成套技术。



图35 宽4 m小煤柱沿空掘巷  
Fig.35 Gob-side entry driving with 4 m coal pillar width

## 10 矿井热害与煤自燃防治技术创新实践

### 10.1 矿井热害防治技术应用与实践

随着煤矿开采深度的增加,地温和围岩温度大幅提高,高温热害已成为制约深部矿井安全高效开采的重要灾害<sup>[46-47]</sup>。兖矿集团省内老区矿井数量较多,由于地质条件、服务年限延长和开采深度增加,存在不同程度的高温热害。其中,菏泽地区的赵楼煤矿、李楼煤矿、新巨龙煤矿因煤层埋藏深(埋深700~1200 m),原始岩温高(37~45 °C),高温热害影响最为突出;济宁地区的二号井、三号井随着开采深度超过800 m,季节性热害影响越来越突出。面对日益严重的矿井热害问题,兖矿集团不断探索高温热害防治技术与方法,通过风温预测技术、建井时期临时降温系统、井下集中式冷水降温系统、全风量降温系统,有效解决了矿井高温热害问题<sup>[48-49]</sup>。这里以赵楼煤矿为例,对集团矿井热害防治技术进展进行说明。

1) 高温矿井风温预测技术。矿井风温预测是确定井下空气状态参数的基础,有利于掌握井下热害分布规律。根据矿井各类巷道中风流与环境之间的热湿交换原理,应用数学分析和数理统计相结合的方法,推导出各类井巷风流温度的计算公式,对赵楼煤矿风流温度进行预测。以单一井巷风温预测模

型为基础,建立了以赵楼煤矿全风网解算为基础的矿井风温、湿度预测模型<sup>[50]</sup>,编制了井下巷道风温、湿度计算的预测软件,通过对现场相关参数的测定和对比,实现矿井风温的预测。

2)高温矿井建井时期临时降温系统。针对赵楼煤矿在建井时期高温热害十分突出的问题,赵楼煤矿利用矿井冻结井筒施工的设备(图36),产出5~6℃冷水,采用喷水风室制造5~6℃的冷风,利用局扇压入式送风方式,将冷风送至井下工作面实现降温;同时,首次应用临时降温系统,将掘进工作面风流温度降低到26℃以下,成功解决了建井期间的热害治理问题,为高温矿井建井期间高温热害治理提供了新思路<sup>[51]</sup>。

3)井下集中式降温系统。为降低井下工作面温度,使得通过采煤或掘进工作面的空气温度达到《煤矿安全规程》要求的工作温度,赵楼煤矿引进了德国WAT公司KM3000型井下集中式降温系统,建设了国内首套集中式冷水降温系统,将制冷机组及其辅助设备设置在井下,制冷机组制出的冷冻水(1~3℃)通过冷冻水循环水泵送至采煤工作面或掘进工作面的空气冷却器,冷却后的空气与未通过空气冷却器温度较高的空气在巷道混合后,达到良好的降温效果;地面冷却塔将井下制冷机组产生的冷凝热排入大气,从而将井下热量排放到地面。赵楼煤矿永久降温系统运行后,采煤工作面风温度降低3~5℃,相对湿度降幅在15%左右,取得了良好的降温效果,成功解决了井下制冷机组热量排放难的问题<sup>[52]</sup>。

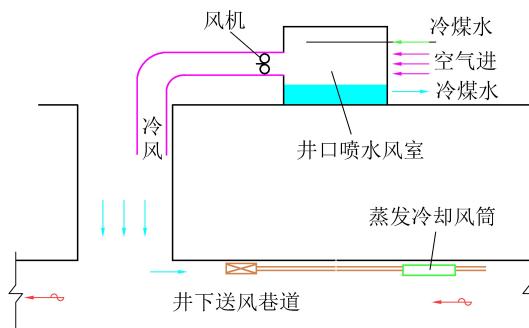


图36 赵楼煤矿基建时期临时降温工艺流程

Fig.36 Flow chart of temporary cooling process during the infrastructure construction period of Zhaolou Coal Mine

4)高温矿井全风量降温系统。井下集中降温系统在应用过程中,由于夏季地面高温造成工作面、大巷、硐室和零星作业地点的热害程度加剧。针对此问题,研发了矿井全风量制冷降温系统,系统由水源热泵机组、井口房降温气室、无动力空气换热器等组成,总制冷量为18 MW,形成了全风量与井下集中式相结合的制冷降温模式。其中,水源热泵机组

地面集中降温系统是在地面设置集中式能源站,由热泵机组制备低温冷冻水,通过管道将低温冷冻水输送到设置的井口空气换热站,将进入矿井的空气实现降温除湿后再送入井下工作面,最终达到降温目的;矿井井口房封闭降温系统是在井口房附近设置封闭装置,通过雷达感应系统及时关闭或开启卷门,从而减少漏风率8%~9%,保障全风量降温系统的稳定运行;井口无动力空气换热器,是将集中式制冷站制备的冷冻水由水泵驱动进入空气冷却器内,室外空气从空气冷却器外侧进入,与换热组件进行热交换,冷却后的空气与一部分室外空气混合后进入进风副井,并可调节各换热器组件的进风量、流速和流速分布。

自高温矿井全风量降温系统投入使用以来(图37),夏季井口进风温度小于20℃,湿度约75%,下井口23℃以下,工作面进风在26℃以下。相比制冷降温之前,湿度降幅约15%,温度降幅在4~5℃。有效分担了集中式集中制冷降温系统的工作负荷,改善了整个矿井制冷降温系统的稳定性和可靠性。目前已在山东境内高温热害矿井广泛应用。

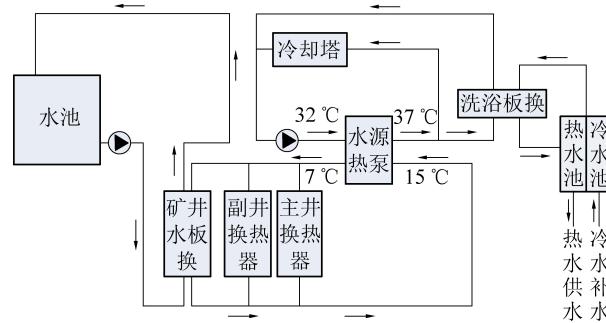


图37 夏季矿井水余热利用系统

Fig.37 System diagram of waste heat utilization of mine water in summer

## 10.2 煤自燃防控技术应用与实践

山能集团下属数十个矿井受煤层自然发火威胁,其中瓦斯与火并存灾害矿井达十余对,煤自燃与瓦斯灾害事故潜在威胁较大<sup>[53~55]</sup>。近30 a,先后发生自燃火灾事故数十起,严重威胁着矿井安全生产,烧毁煤炭和矿井设备,造成工作面封闭与停产等事故。为科学防控煤自燃发火灾害,山能在煤层自燃发火灾害监测、识别与防控关键技术方面进行了深入的研究与实践,有效消除煤自燃发火灾害<sup>[56~59]</sup>,并在管理、装备和技术上形成了科学的煤自燃发火技术与管理体系,如图38所示。

1)煤自燃早期识别技术方法。由于煤自然发火具有很强的自燃、阴燃和复燃特性,火源相当隐蔽,火区特征信息难以提取的原因,造成煤自燃防控

针对性差,治理成本高等问题。2002年开始,山能开展了煤自燃过程、煤自燃隐患识别、火区探测等研究,开展了煤自燃发火全过程实验测试,研发了煤自燃指标气体的连续监测分析技术,基于气体表征参

数的煤自燃程度识别和煤温判定技术,研发了煤自燃氮探测技术及煤自燃危险区域无线监测技术,解决了煤自燃早期预测预报的“位置判定、温度判定、时间判定”三大技术难题,建立和完善了煤自燃发

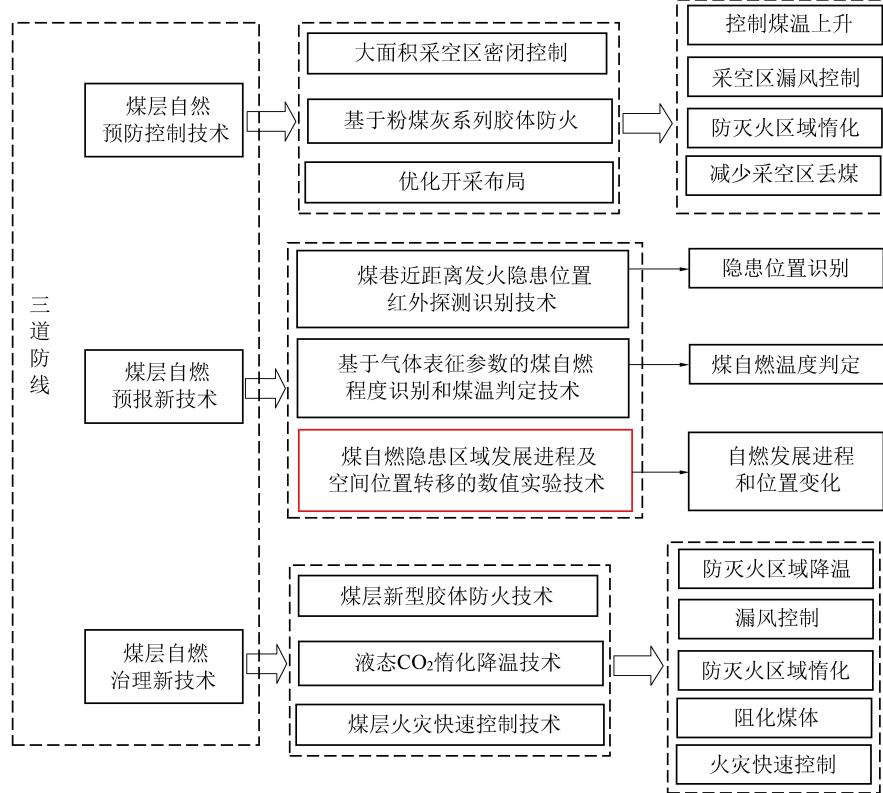


图 38 煤层自然火灾防控总体技术体系

Fig.38 Overall technical system of coal seam natural fire prevention and control

火预报体系,解决了煤自燃火灾早期识别难题。

2) 大面积采空区自燃灾害密闭控制技术。针对采空区密闭漏风造成煤层自燃火灾事故,研究确定了采空区密闭墙体构建原则,保证采空区密闭墙体有足够的承压强度、气密性能和使用寿命等,且必须具备抗冲击性能;全面应用充填密闭和钢筋混凝土密闭的柔性与刚性相结合密闭墙构建方式,永久密闭优先选择充填方式封闭,密闭位置选择在动压影响小、围岩稳定、巷道规整的巷段内,且永久密闭墙体必须与巷壁紧密结合,使能够有效承受冲击压力。近几年以来,能源集团累计加固密闭 688 道,新建高标标准充填密闭 463 道,全面提高采空区密闭的气密性能和抗冲击性能。

3) 自然火灾应急控制技术。由于工作面推进速度慢或揭露采空区时煤自燃超过发火期,常规的注氮惰化采空区难以带走热量、注胶降温范围小难以控制漏风,火灾难以有效控制。针对该问题,山能集团研发了液态二氧化碳火区快速熄灭和控制技术、火区快速钻孔施工技术、高分子胶体快速灭火技

术、惰气泡沫快速抑制技术,形成一整套适合煤火灾害快速控制的关键技术,实现了自然火灾的应急控制。

4) 粉煤灰系列胶体防灭火材料与系统。充分发挥粉煤灰成本低和凝胶材料堵漏风效果好、流失量小的特点,研发了具有充填裂隙、包裹煤体、隔氧降温、作用时间长、受压不开裂等特点的基于粉煤灰的胶体防灭火材料,可对移架、矿压等造成的新裂隙进行二次封堵,常用在工作面后部采空区、开切眼、终采线等易自燃发火位置,解决了凝胶防灭火材料用量大、成本高、受压易开裂等问题。同时对粉煤灰多功能注浆注胶防灭火系统进行升级(图 39),实现了高浓度浆液的制备及管路输送,提高了注浆效率。

## 11 “三下一上”采煤治理实践

山能东部矿井“三下一上”压覆煤炭资源巨大,严重制约煤炭发展<sup>[60-62]</sup>。为了提高矿区资源采出率,延长矿井的服务年限,实现矿区的可持续发展,自 20 世纪 80 年代开始探索“挖潜革新”征程,相继开展了采动破坏规律、矿区开采沉陷规律和防

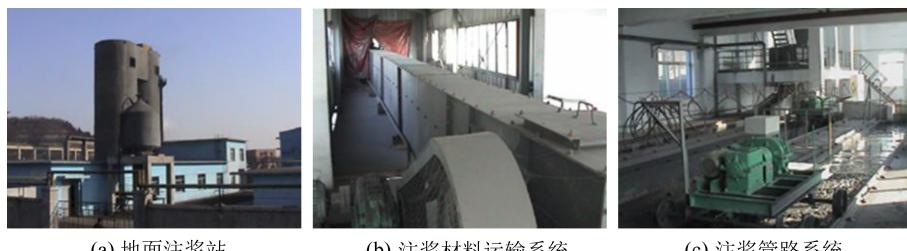


图 39 兴隆庄矿粉煤灰注浆系统

Fig.39 Fly ash grouting system of Xinglongzhuang Mine

水煤柱合理留设等方面的研究和探索<sup>[63]</sup>,针对三下压煤实际情况,开展了河流、村庄建筑物、矿区铁路、高压输电线路、输油(气)管线下压煤开采实践,形成了各种条件下压煤开采及治理成套体系,解放了大量煤炭资源,解决了矿区资源枯竭问题,保证了矿区可持续发展,为国家能源提供了保障。

### 11.1 开采沉陷规律及地表沉陷预测

为分析和总结矿区开采沉陷规律,兖州矿区自1985年开始建立开采地表移动观测站,观测站几乎涉及了兖州矿区的所有地质采矿条件,大量观测结果表明,地表移动盆地在剖面上均近似为一碗形,开切眼一侧和终采线一侧的地表下沉分布存在一定程度的差异,非对称分布特别明显;总结分析了兖州矿区不同煤层厚度及不同开采方式下,地表移动盆地边界角、移动角、最大下沉角、充分采动角的变化规律;分析了初次采动和重复采动2种情况下地表动态移动参数,包括地表移动启动距、最大下沉速度、超前影响角和最大下沉速度滞后角,这些参数与地质采矿条件关系的研究,为矿区地面建(构)筑物、铁路、井巷留设煤柱以及确定开采影响塌陷的范围提供了依据;根据开采工作面地表开采工作面地表数据,分析了矿区概率积分法<sup>[64]</sup>预测参数的变化规律(表4),得到了各种开采技术条件下下沉系数 $q$ 、主要影响角正切 $\tan \beta$ 、水平移动系数 $b$ 、拐点平移距 $S/H$ 和开采影响传播角 $\theta$ 与地质采矿条件的关系,给出了各种地质采矿条件下概率积分参数的选取方法,为矿

区“三下”采煤时地表移动变形预测提供了参数<sup>[65]</sup>。

表 4 兖州矿区概率积分参数

Table 4 Probability integral parameter of Yanzhou Mining Area

采矿类型	$q$	$b$	$\tan \beta$	$\theta/(^\circ)$	$S/H$
薄煤层 初采	0.738	0.33	1.74	90-0.34 $\alpha$	0.081
炮采 复采	0.805	0.36	1.92	90-0.58 $\alpha$	0.035
分层综采 初采	0.725	0.30	1.90	90-0.45 $\alpha$	0.075
分层综采 复采	1.060	0.29	1.59	90-2.63 $\alpha$	0.162
综放开采	0.830	0.27	2.23	90-0.56 $\alpha$	0.057

注: $\alpha$  为煤层倾角。

### 11.2 松散层含水层下煤炭资源开采实践

针对松散含水层下煤炭资源安全高效开采问题,自1983年开始,兖矿集团与科研院校合作,采用现场钻探与物探、理论分析、现场观测、室内测试与模拟试验等多种方法,开展了不同开采条件下厚煤层采动覆岩破坏规律、防水煤柱合理留设等方面探索与研究。通过不同开采工艺条件下覆岩破坏规律现场实测研究,统计了不同采煤方法裂隙带发育高度与裂采比的变化规律,分析了分层开采层数、初次开采厚度、重复开采厚度和岩柱厚度对垮落带和导水裂隙带的影响规律,研究了不同开采条件下采空区上覆岩层出现最大变形速度的位置和导水裂隙带的分布特征。根据实际观测成果,拟合回归出不同开采条件下垮落带、导水裂隙带发育高度与采厚的关系,见表5。

表 5 不同开采条件下垮落带、导水裂隙带发育高度与采厚的关系式

Table 5 Relationship between development height of collapse zone and water conducting fracture zone and mining thickness under different mining conditions

采矿类型	垮落带高度公式	导水裂隙带最大高度公式
综放开采	$3M \leq H_k \leq 5M$	$H_{li} = \frac{100M}{0.94M + 4.31} \pm 4.22$
网下综放开采	$H_k = \frac{100M}{2.13M + 15.93} \pm 2.72$	$H_{li} = \frac{100M}{2.03M + 1.55} \pm 2.55$
分层开采	$H_k = \frac{100M}{5.45M + 5.82} \pm 3.15$	$H_{li} = \frac{100M}{2.22M + 0.66} \pm 4.34$

注: $H_k$  为垮落带高度; $H_{li}$  为导水裂隙带最大高度; $M$  为累计采厚。

兖矿集团基于归纳总结的分层综采、网下综放、全煤厚综放等开采条件下覆岩垮落带和导水裂隙带发育高度经验公式,先后在兴隆庄煤矿、杨村煤矿、鲍店煤矿多个工作面进行了3煤层缩小安全煤岩柱的开采实践,逐步将初步设计留设的宽80 m防水煤柱缩小到留设防砂煤柱,又将宽80 m防砂煤柱缩小至宽21.3 m防砂煤柱,实现了在最小防砂煤柱33、21.3、23 m条件下的近松散层厚煤层工作面安全开采。1983年以来,兖矿集团累计解放松散含水层下呆滞的优质煤炭资源储量2 701万t,经济社会效益显著。

### 11.3 陕蒙地区矿井水害模式及防治关键技术

陕蒙能源基地已成为我国煤炭主要产能区,预计2020年产量超过全国50%。但该区域水害严重,矿井最大涌水量达到5 600 m<sup>3</sup>/h。兖矿集团在该区域有金鸡滩、转龙湾、石拉乌素和营盘壕4对千万吨大型矿井,水文地质条件各不相同,较好代表了陕蒙基地砂层潜水下、地表水薄基岩下、巨厚白垩系水体下开采的水害类型。陕蒙基地水害防治存在的技术难题,①陕蒙基地侏罗系煤层开采导水裂隙带高度大,裂采比普遍大于20,其异常机理尚不清楚;②砂

层潜水区开采,黄土、N2红土作为防水保护层厚度如何确定;③白垩系巨厚砂岩下特厚煤层开采离层水害机理有待深入研究;④区域矿井水害模式有待厘清,便于现场分类指导。

兖矿集团研究了陕蒙能源基地侏罗系煤层开采导水裂隙带发育的特征和规律,发现侏罗系煤层覆岩整体状结构是导致导水裂隙带高度异常的本质属性,建立了导水裂隙带高度薄板极限扰度理论预计公式,采用分布式光纤传感监测技术,监测导水裂隙带高度动态发育特征规律,建立了基于采厚、采深、工作面斜长的侏罗系煤层开采导水裂隙带发育高度预计公式;研究发现了陕蒙基地区域性特殊土层黄土、红土采动裂隙水土相互作用、蠕变渗透性变化规律,建立了松散砂层潜水下采煤防水保护层合理厚度确定方法;创建了用于覆岩离层动态发育演化分析的三角形离层域阶梯组合梁理论模型,建立了煤层开采过程中离层发育位置判别、离层水平破断距预计公式;提出陕蒙基地煤层开采4种顶板水害模式(图40),建立了不同水害模式分类防治技术体系,研究实施了新的水害预计方法和防治关键技术。

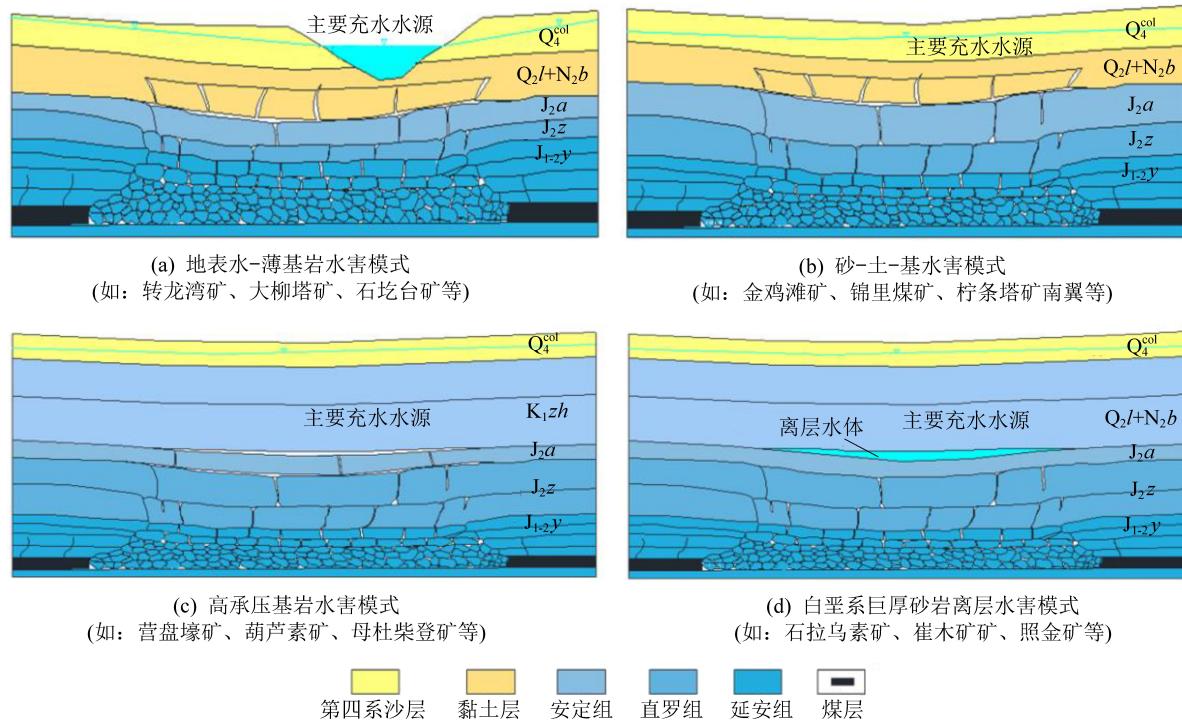


图40 鄂尔多斯煤田矿井水害模式和治理模式

Fig.40 Model and control pattern of mine water disaster in Ordos coal field

通过对陕蒙地区矿井水害模式及防治关键技术的研究,2015年以来,先后在金鸡滩、石拉乌素和转龙湾煤矿进行了推广应用,目前年均安全采出煤4 730.6万t,为企业带来了可观的经济效益。该技术成果已推广应用至陕蒙基地及西北其他矿井,包

括营盘壕煤矿、崔木煤矿、郭家河煤矿、柠条塔煤矿和红柳林煤矿等,保证了实施矿井的安全、高效生产,特别是新投产矿井,具有良好的应用前景。

### 11.4 “三下”压煤开采及治理技术实践

1) 河下采煤及治理。通过大量工程实践,在厚

煤层开采条件下的河道治理技术方面,研究了开采影响不同阶段地表(堤防)的表层、内部的变形和损害情况,揭示了厚煤层开采地表移动变形机理、裂缝扩展发育机理、堤防边坡及渗流稳定变化、河道层流及紊流演化等河道损害机理,建立了可靠的厚煤层开采地表沉陷预测模型、裂缝平面分布预测方法体系、裂缝极限发育深度计算公式、堤防边坡及渗流稳定性评价方法等,形成了完整的厚煤层开采地表(堤防)变形预测模型体系。从 20 世纪 90 年代开始,积极开展泗河、洸府河、湖东堤等河下压煤开采的试采和治理工作,截止 2020 年底,全矿区在河下已累计开采了 163 个工作面,安全采出煤炭 9 700 万 t, 累计治理河道 47.6 km(图 41)。

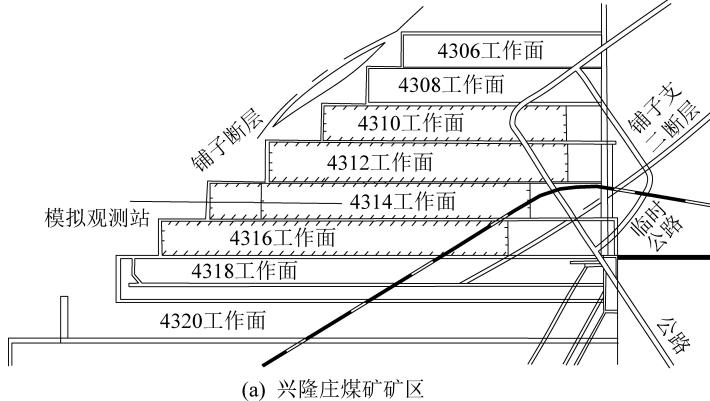


(a) 济宁三号煤矿

(b) 鲍店煤矿

图 41 济宁三号煤矿、鲍店煤矿治理后泗河堤

Fig.41 Sihe embankment after treatment of Jining No. 3



(a) 兴隆庄煤矿矿区

图 42 兴隆庄煤矿矿区铁路下采煤及治理

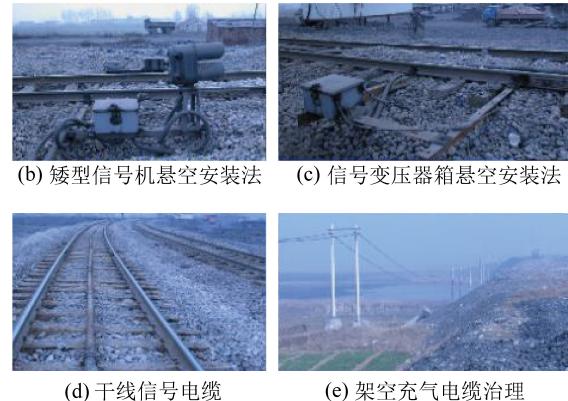
Fig.42 Coal mining and control under railway in Xinglongzhuang Coal Mine Area

地表移动变形的单因素关系,建立了建筑物裂缝与地表移动变形、建筑物长度、高度之间的综合关系式,提出了房屋裂缝角的概念,根据实测资料确定了兖州矿区房屋裂缝角为  $60.83^\circ$ ,建立了兖州矿区普通民房建筑物损害评定标准。兖矿集团兖州矿区从 1989 年开始,先后在杨村矿王因镇皮革厂(1990 年)、唐村煤矿的万村(1989—1992 年)、北宿矿落陵中学、吴官庄村(1993—1999 年)等开展了建筑群下全柱开采试验研究并取得成功,使绝大部分建筑物仅受到了不超过Ⅱ级损害的采动影响,保证了建筑

2) 铁路及站场下采煤及治理。通过开发铁路移动变形和治理管理系统,进行煤矸石特性和应用研究,采用铁路线路快速治理技术、铁路道岔变形控制和维修技术、简支梁铁路大桥采动变形控制和治理技术、铁路信号设备采动变形控制和治理技术的研究,最终形成了铁路及站场下采煤与治理成套技术,实现了矿区铁路和站场下的综放开采,保证了铁路站场的安全运行。经多年实践,兴隆庄煤矿(图 42)、南屯煤矿、鲍店煤矿、济宁三号煤矿等矿在矿区铁路下累计开采 61 个工作面,采出煤量 3 305 万 t, 同时保证了矿区铁路的安全运行。

3) 高压输电线路下采煤及治理技术。研究了采动影响下高压输电线路变形机理和控制技术,开发了高压输电线路下综放开采大变形维修治理成套技术体系和安全保障体系,并成功地在南屯煤矿、济宁三号煤矿、鲍店煤矿等实现了高压输电线路下厚煤层综放开采,保证了高压线路的安全运行和采掘工作面的正常接替,创造了巨大的经济效益(图 43)。

4) 建筑物下采煤及治理。对综放开采、薄煤层开采条件下建筑物移动变形破坏与地表移动变形破坏关系进行实测和研究,获得了建筑物移动变形和



物的安全使用。

5) 输油(气)管线下采煤及治理。东滩煤矿三采区上方地面有隶属于国家管网集团的 3 条输油(气)管线,为保障 3308 工作面安全开采,同时尽量减轻对 3 条输油气管线的影响,东滩煤矿开展了 3308 工作面在 3 条输油气管线下开采研究,进行了开采沉陷预计,对影响程度、影响时间、影响特点进行了分析和评估。通过检测、应力状态分析、开挖、GNSS 监测、制定应急预案等措施,3308 工作面进行了正常开采,同时保证了输油(气)管线安全运行。



图 43 下沉区治理高压线路

Fig.43 High voltage line treatment in Subsidence Area

## 12 深井建设技术与实践

### 12.1 大型矿井立井凿井创新与实践

兖矿集团 1975 年开发建设,1989 年 6 对矿井全部建成投产,兖州矿区是我国第 1 个以大型矿井为主体的现代化矿区。建设期间,面对兖州煤田煤层埋藏深,冲积层厚,含水含沙层多,涌水量大等不利因素<sup>[66-67]</sup>,广大煤矿建设者科学实践,勇于探索,大力开展综合建井技术研究、开发和应用,在深井冻结、地面预注浆、机械化配套作业、井壁砌筑、井下大硐室施工、井巷长距离贯通、锚喷支护、大型设备安装调试、井筒装备防腐及大型钢结构选煤设计施工等方面取得了重大突破<sup>[68]</sup>,形成一整套煤矿建设施工新技术、新工艺,把矿井建设推向“深、大、新”的发展阶段,建井施工技术至此步入世界先进行列,1992 年荣获国家科技进步特等奖。通过多年的研究与探索,兖矿集团在建井技术方面取得了丰硕的成果。

在地面预注浆方面,开发了深井地面预注浆封水技术,有效控制注浆交圈和浆液扩散;研制的新型黏土水泥浆液可注性好、析水率低、稳定性高,结石抗渗性能和抗侵蚀能力强,填补了我国注浆材料的一项空白,封水率达 90%以上,成本降低 60%,取得了良好的应用效果和经济效益,首次在富含水层矿区全部实现了打干井、用干井。

在深井冻结施工方面,研究开发了深表土层冻结凿井技术(图 44),采用异径和差异冻结方式,实现了冻结壁的有效控制,成功解决了深井施工冻结管断裂、冻结爆破、筑壁二次冻胀等技术难题。研制开发了以大绞车、大吊桶、大抓斗、多机伞钻为特征的深立井凿井机械化配套系统,实现了凿井成套装备的更新换代,为深井快速施工奠定了基础。

在井壁砌筑方面,开发了立井井筒液压滑模砌壁技术,成功地解决了低温、淋水下液压滑模技术难



图 44 矿井冻结工程配集液圈施工现场

Fig.44 Construction site of liquid collecting ring for mine freezing engineering

题,实现了井筒连续滑模筑壁,配以深孔光面控制爆破,掘、砌平行交叉作业,建井施工速度大幅度提高,连续刷新国内最高月成井纪录。首创出多绳摩擦轮提升机安装调试新技术,实现一次试动成功。矿井地面生产系统如图 45 所示。



图 45 矿井地面生产系统

Fig.45 Mine surface production system

在井筒支护方面,研制出了高精度定位模具以及树脂锚杆固定罐道梁和系列长效防腐新技术,并首创了井筒罐道梁大间距布置新结构;首次在全矿区大面积推广应用光爆锚喷支护新技术,促进国内井下巷道支护技术的划时代变革;成功开发出井下特殊硐室二次支护及井下煤仓钻机、滑模施工新技术。推导出舒勒值相关平差计算新公式,实现了井下长距离高精度贯通。

兖矿集团已有 14 个井筒发生过破坏,采用各种方法治理次数多达 30 余次,经过长期的实践和探索,开展了井壁破裂灾害防治关键问题研究,建立了井壁沉降量、井壁混凝土应变量、卸压槽压缩量、罐道缝压缩量监测系统,加强了对井壁累积变形数据的准确监测;提出采用开卸压槽法治理破裂井筒,卸压槽的开槽位置设置在冲积层和基岩交界面以上井壁受力集中部位且其对

应位置有厚度 3 m 以上的黏土层,卸压槽的压缩量和数量根据预计地层沉降量确定;建立了完备的井壁破裂风险管控机制,包括含水层水位监测、井壁变形和地层沉降监测、井壁安全评估等机制(图 46)。

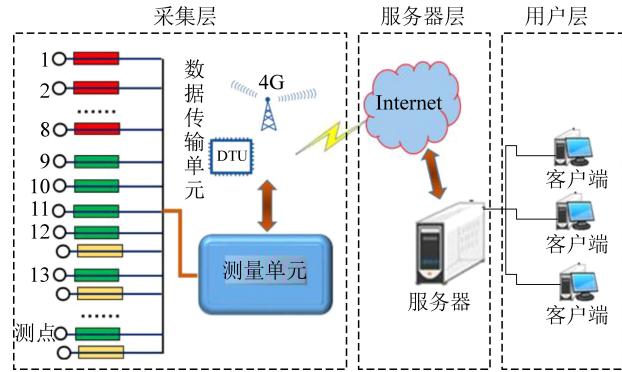


图 46 井筒应变监测系统

Fig.46 Shaft strain monitoring system

整个兗州矿区建设历时 15 a, 6 对矿井及配套工程建设累计缩短工期 20 个月, 工程质量均被国家评为优良工程, 三度荣获全国建筑工程质量最高奖——鲁班(金像)奖。重要施工技术被纳入国家有关技术规范和《建井工程手册》, 在我国大型现代化矿区建设中起到了示范作用。

## 12.2 陕蒙富水软岩大直径立井凿井实践

2005 年以来, 在晋、蒙、陕、甘、宁等西部地区, 占我国新增产能 70% 以上的在建和拟建大型或特大型煤矿的煤层埋深已达 500~1 000 m, 必须开凿大直径深井井筒以满足运输大型采矿设备及煤炭运



图 47 现场固管充填与效果检验

Fig.47 On site solid pipe filling and effect inspection

在传统冻结凿井过程中, 井筒与毗邻硐室需要分开施工, 毗邻硐室普通法开挖过程中常需要顶水作业, 支护结构淋水, 挖砌速度慢, 砌壁质量和工期均难以保证。针对井筒与毗邻硐室联合施工问题, 研究了非圆形基岩冻结壁温度场发展规律, 创造性地提出兼顾井筒及其毗邻硐室施工的“马蹄形”基岩全深冻结方案, 在国内外首例实现井筒及其毗邻硐室冻结法联合开凿, 保障了富

量 5~30 Mt/a 的要求, 其首要挑战是深井凿井技术。但在西部立井建设过程中, 先期 10 余个井筒采用“普通法+注浆法”凿井的失败教训证明, 在上述深厚复杂岩层中必须采用冻结法开凿大直径深井井筒。尽管我国深厚表土冻结法凿井技术居世界领先水平, 但将其延用于富水软岩中深大井筒凿井却遇到了诸多重大难题, 自 2005 年, 胡家河、塔然高勒等 12 个全深冻结井筒因基岩冻结孔导水淹井, 每井损失达 2 千万~5 千万元、延误工期 6~12 个月。兖矿能源集团石拉乌素、营盘壕煤矿在建井过程中亦面临着上述问题, 经过多年攻关, 在深厚富水软岩大直径立井及毗邻硐室冻结法开凿关键技术方面取得了重大的成果。

针对深大冻结井筒中出现的内壁严重开裂漏水问题, 系统研究了内壁混凝土-塑料板夹层界面、塑料板夹层自身的剪切特性和抗剪强度指标, 揭示了自生温度应力导致大厚度内层井壁开裂漏水的新机理, 掌握了钢纤维混凝土井壁的力学特性; 在石拉乌素、营盘壕煤矿 6 个井筒采用 CF70 钢纤维混凝土井壁技术, 成功防止了深大井筒内壁温度裂缝问题。

针对基岩冻结孔导水淹井问题, 研发了与多种造孔泥浆相容、抗絮凝、抗失水、长时缓凝、耐高温、结石体强度较高与抗渗性好的高性能缓凝水泥浆液配制技术, 提出冻结管下沉安全性判别方法, 形成了冻结孔缓凝水泥浆固管封水工法(图 47), 根除了冻结孔导水淹井灾害。

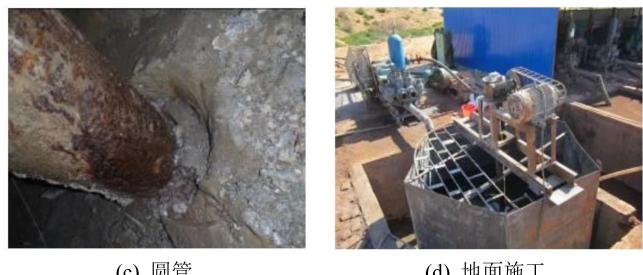


图 47 现场固管充填与效果检验

Fig.47 On site solid pipe filling and effect inspection

水软弱岩层中井筒及其毗邻硐室的安全、高效施工。

## 13 海外煤炭开发与实践

### 13.1 发展历程

兖煤澳洲公司包括兖州煤业澳大利亚有限公司(上市公司)和兖煤国际 2 部分, 资产主要分布在新南威尔士州、昆士兰州以及西澳, 现有 JORC 资源

量约 51 亿 t, 原煤产能 3 200 万 t/a。目前拥有 11 对生产运营煤矿、4 个煤矿资源勘探项目, 煤炭资源储量 79 亿 t, 煤炭总产能 8 000 万 t; 纽卡斯尔基础设施集团 27% 股权、纽卡斯尔瓦拉塔煤港 36.5% 股权、威金斯岛煤炭码头 5.6% 股权等资产。2020 年, 充

煤澳洲产出 3 830 万 t 商品煤出口国际市场, 全职雇员人数接近 4 400 人。

兖州煤业澳大利亚有限公司在澳大利亚进行 6 次重大投资合作, 累计投资近百亿澳元, 兖煤澳洲矿井分布如图 48 所示。

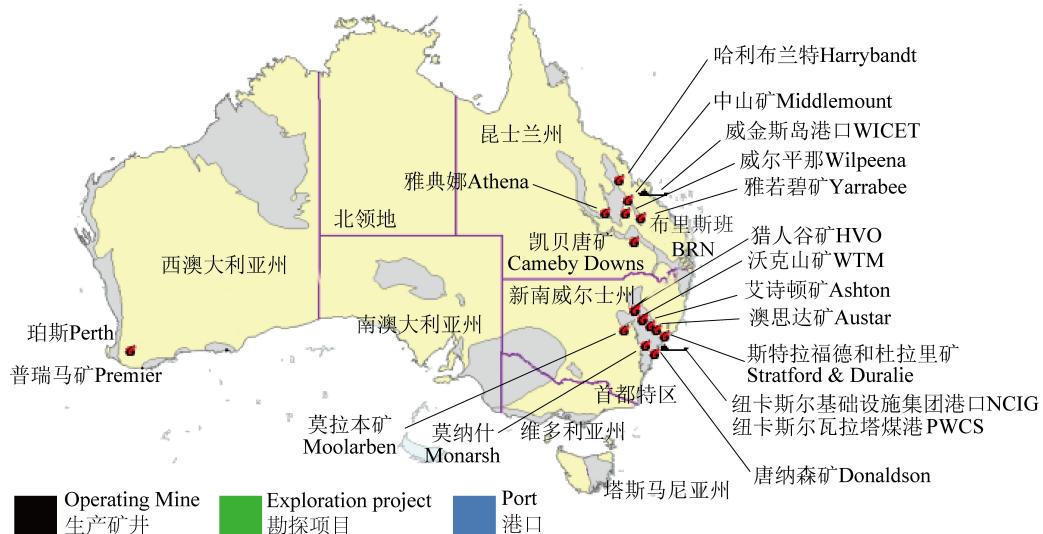


图 48 兖煤澳洲矿井分布

Fig.48 Distribution map of Yancoal Australia

2004 年 11 月 18 日, 兖煤澳洲在澳大利亚新南威尔士州悉尼市注册成立, 负责运营和管理兖矿集团在澳大利亚的资产, 公司总部设在悉尼。

2004 年 12 月 24 日, 以总价款 3 200 万澳元独家收购因工作面自燃发火而被迫关井出售的南田煤矿, 并将其更名为澳思达煤矿。通过本次收购, 兖州煤业获得了在澳大利亚运的第一座煤矿, 从此正式进入澳大利亚开始煤炭运营业务, 成为中国第一家在海外拥有煤矿的企业。

2006 年 10 月 11 日, 澳思达煤矿暨澳大利亚第一个综放工作面投产(图 48), 兖矿集团成为中国第一家成功向西方国家输出具有自主知识产权的先进煤炭成套开采技术的企业。

2009 年, 兖煤澳洲以 33.33 亿澳元价格并购菲利克斯资源公司, 菲利克斯公司旗下煤矿的探明及推定储量合计为 5.1 亿 t, 总资源量为 20.06 亿 t, 使兖矿集团拥有中国最大的海外煤炭企业。这次并购是中国企业首次对澳洲上市公司实施并购, 成为中澳资源领域合作的重大突破。

2011 年, 兖煤澳洲分别投资 2.025 亿澳元、2.968 亿澳元并购新泰克煤炭公司、普力马煤矿公司; 其中新泰克项目是兖矿集团在澳投资项目中资源储量最大的独立煤矿项目, 未来可形成 1 600 万 t 年产能; 普力马煤矿是目前西澳洲唯一一家正

常运营的煤矿。与澳大利亚 BRL 公司合作开发西澳铝土矿资源, 实现了兖矿在澳产业布局和发展空间的拓展延伸。与澳大利亚 BRL 公司铝土矿资源合作范围 2.4 万 km<sup>2</sup>, 保有储量约为国内储量的 2 倍, 兖矿拥有 70% 的股东权益。

2012 年, 以“现金+股权置换”资本运作方式, 并于同年 6 月在澳交所上市, 成为澳大利亚最大的独立煤炭上市公司, 完成兖煤澳洲与格罗斯特煤炭公司合并上市, 成为澳大利亚最大的独立煤炭上市公司。此次合并新增煤炭产能 1 200 万 t/a、资源量 19 亿 t, 规模当量快速提升, 在澳煤炭产量、资源储量和资产总额占比分别达到兖州煤业的 33.3%、36.1% 和 39.8%, 同时在铁路运力、港口配额、煤种配比销售等方面的协同效应进一步提升。

2017 年 9 月, 收购力拓持有的联合煤炭工业有限公司(简称“联合煤炭”) 100% 股权, 获得煤炭资源量 31.19 亿 t, 增加煤炭产能 3 600 万 t/a, 成为澳大利亚最大的专营煤炭生产商。

### 13.2 澳洲矿井建设经验

艾诗顿矿位于新南威尔士州猎人谷地区, 距离纽卡斯尔港口大约 90 km, 属于纽卡斯尔煤田, 周围有多个正在开采的煤矿, 处在人口居住密集、葡萄种植园发达的地区。矿井采用井工长壁和传统露天开采方式; 矿井现有井工矿生产能力年产原煤 300 万 t

左右,2015 年实际生产原煤 300.1 万 t,2016 年计划生产原煤 271.8 万 t,全年预计完成 265 万 t,1—7 月份实际完成 134 万 t。矿井建有选煤厂,分井工和露天 2 个分选模块,采用重介旋流器和螺旋分选机工艺,年原煤入洗能力 650 万 t;煤炭经分选后生产半软焦煤和动力煤,通过火车装运到 90 km 外的纽卡索港装船出口国际市场。目前,艾诗顿矿存在问题,一是井工矿多煤层开采及煤层厚度较小带来开采难度和分选采出率低(不到 50%)的问题;二是东南露天矿法庭作出了对艾诗顿矿不利的判决,同时该项目在目前市场条件下是否经济可行需要进一步分析论证。

澳思达矿井(图 49)位于新南威尔士州猎人谷地区,距离纽卡索尔港 65 km。充煤澳洲于 2004 年 12 月 24 日通过收购获得,是充煤澳洲公司在澳洲的第一座煤矿,拥有 100% 所有权。澳思达矿是目前澳洲开采深度最大,开采条件最复杂的井工开采矿井之一。矿井采用井工长壁放顶煤开采,具有年产原煤 200 万 t 的生产能力。该矿井多次易主,并因自燃发火于 2003 年关闭,充煤澳洲发挥在防治煤矿自燃发火方面的技术优势,采取多种措施,如注氮系统惰化老的采空区治理了澳思达矿井的自燃发火。通过调研澳思达矿的地质资料和煤层情况,对设备的适用性进行优化配置,推进综放技术的本土化。2006 年,澳思达煤矿暨澳大利亚第一个综放工作面投产,充矿集团成为中国第一家成功向西方国家输出具有自主知识产权的先进煤炭成套开采技术的企业。2015 年实际生产原煤 82.3 万 t,2016 年计划生产原煤 112.3 万 t,采用普通长壁面进行开采,1—7 月份实际生产原煤 26.3 万 t。



图 49 澳思达矿井智能化工作面

Fig.49 Intelligent working face in Austar Coal Mine

莫拉本矿位于新南威尔士州西部煤田,距离附近的玛吉镇约 40 km,距离纽卡斯尔港约 270 km。充煤澳洲拥有 81%、双日拥有 10%、韩国财团拥有 9%。矿井 JORC 资源量 12.6 亿 t,储量 2.956 亿 t。矿井资源量大、储量较小,其主要原因是井工开采区域只开采煤层的下部低灰煤层。2009 年 12 月 23

日充煤澳洲收购菲利克斯时一期工程 1 号露天矿、选煤厂及相关基础设施正在建设阶段(2009 年 3 月份开始建设),充煤澳洲公司接管后继续项目建设及运营并于 2010 年 5 月份开始出煤,矿井于 2010 年、2011 年、2012 年、2013 年、2014 年分别生产原煤 491 万 t、701 万 t、717 万 t、838.7 万 t、827.8 万 t,2015 年计划生产原煤 801.7 万 t,但在新的申请修改下(MOD10)实际生产原煤 900.1 万 t,2016 年计划生产原煤 1 115.6 万 t,全年预计完成 1 185 万 t,1—7 月份实际完成 704 万 t。

经过多年发展,目前充煤澳洲已建成莫拉本、澳思达煤矿智能化示范矿井,凭借优越的地质条件、引进卡特彼勒先进成套装备,应用采煤机惯性导航、滚筒防碰撞联动控制、工作面底板水平、高程控制及设备自动端面对准等技术。单班作业人员 6~7 人,达到日进尺 20 m,年产 800 万 t 水平。充煤澳洲的成功对于加快中国煤炭工业的国际化进程具重要意义。

## 14 煤间接液化技术

煤间接液化(CTL)技术是当前 C<sub>1</sub>化工的重要发展方向,通过煤液化费托合成技术可提取环境友好、高附加值的化学品,已成为当前洁净煤技术的发展热点,具有良好的经济性和市场化前景<sup>[69-71]</sup>。充矿集团下属上海充矿能源科技研发有限公司围绕煤间接液化、煤制高端化学品、CO<sub>2</sub>资源化利用等研究方向,开辟了从应用基础研究、中试放大、工程转化的全链条技术研发路径,取得了一系列重大创新性成果,是目前国内惟一掌握低温与高温费托合成技术的企业。2015 年采用该公司自主开发的低温费托合成技术建设的国内首套 100 万 t/a 低温费托合成煤间接液化工业示范装置成功运行;2018 年采用该公司自主开发的高温费托合成技术建设的国内首套 10 万 t/a 高温费托合成工业示范装置成功运行,打破了国外技术垄断。

在高、低温费托合成工艺方面,上海充矿能源科技研发有限公司研发了高低温费托合成工艺,采用浆态床反应器、铁基催化剂的低温费托合成工艺和使用铁基催化剂的高温费托合成工艺。榆林百万吨级低温费托合成煤间接液化工业示范装置采用铁基催化剂(图 50),于 2015 年在陕西榆林投产,装置年产柴油 78.08 万 t、石脑油 25.84 万 t、液化石油气 5.65 万 t,联产电力 110 MW;采用高温费托合成工艺的 10 万 t/a 高温费托合成工业示范装置于 2018 年投产并达到满负荷运行,是中国目前惟一实现工业化的高温费托合成煤间接液化工业装置,打破了



图 50 榆林百万吨级低温费托合成煤间接液化工业示范装置  
Fig.50 Millionton industrial demonstration device for indirect liquefaction of low temperature Fischer Tropsch synthetic coal in Yulin  
国外技术垄断<sup>[72-73]</sup>。

在浆态床费托合成反应器方面,上海兖矿能源科技研发有限公司开发了一种连续操作的气液固三相浆态床工业反应器,该浆态床反应器能耗低,解决了反应器堵塞或逆流问题,温度与液位控制良好,实现了反应器的平稳连续操作。2015 年该反应器技术在榆林百万吨级低温费托合成煤间接液化工业示范项目上成功应用,如图 51 所示,反应器直径为 9.8 m,产能 73 万 t/a,是目前世界上尺寸最大、技术最为先进的费托合成浆态床反应器之一。



图 51 10 万 t/a 高温费托合成工业示范装置  
Fig.51 100 000 t/a high temperature Fischer Tropsch synthesis industrial demonstration device

在固定流化床费托合成反应器方面,上海兖矿能源科技研发有限公司研发了一种新型的固定流化床高温费托合成反应器,2018 年该反应器技术成功应用于 10 万 t/a 高温费托合成工业示范装置(反应器直径 3 m)。

高效费托合成催化剂的开发是费托合成技术研究与工业化的关键,制备出价格低廉、活性高、稳定性好、且具有工业应用前景的催化剂,对费托合成技术的成功产业化具有重要意义。上海兖矿能源科技研发有限公司研发了铁基催化剂,铁基

催化剂廉价易得,WGS 活性较高,尤其适合于低 H<sub>2</sub>/CO 的煤基合成气的费托合成,该催化剂已成功应用于榆林百万吨级低温费托合成煤间接液化工业示范装置。

## 15 大规模煤气化技术研究与发展

煤气化是实现煤炭清洁转化的关键技术,是现代煤化工产业链的龙头,是实现煤炭由燃料向燃料与原料并重转变的核心技术<sup>[74-76]</sup>。大规模煤气化技术的开发为国家制造强国战略的实施、促进煤化工行业转型升级、提高资源集约循环利用水平、提升环境综合治理能力等提供关键技术支撑<sup>[77-78]</sup>,发挥了不可替代的重要作用<sup>[79-80]</sup>。

为适应现代煤化工装置大型化发展需要,兖矿集团对多喷嘴对置式水煤浆气化技术进行了长达 30 a 的研发。兖矿集团自有知识产权的多喷嘴水煤浆气化技术目前已经形成了日处理煤 1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、4 000 t 和 4.0、6.5 MPa 不同压力等级的系列炉型,已推广应用 62 家企业,合计 175 台气化炉,其中超大规模水煤浆气化技术已推广 5 家企业 36 台气化炉。多喷嘴对置式水煤浆气化技术占主流煤气化工艺市场 13.44% 的份额,居各类气化技术市场应用首位,国内单炉处理能力 2 000 t/d 以上的水煤浆气化装置市场占有率 100%,气化煤炭量也居首位,成为国际公认的三大煤气化技术之一。

在“九五”期间,水煤浆气化及煤化工国家工程研究中心(依托单位兖矿鲁南化肥厂)和华东理工大学等单位共同承担的国家重点科技攻关项目“新型(多喷嘴对置)水煤浆气化炉”,开发了新型多喷嘴气化炉等关键设备,对工艺方案、关键设备等进行优化,获得了多喷嘴煤气化技术的基础运行数据。2000 年 10 月,新型(多喷嘴对置)水煤浆气化炉中试技术通过国家石化局组织的考核,与国外同类技术相比,碳转化率提高 2~3 个百分点,有效气成分提高 1.5~2.0 个百分点,比耗及比煤耗降低。

“十五”期间,在国家“863 计划”项目“新型水煤浆气化技术”支持下,兖矿集团在中试实验基础上,开展千吨级工业示范装置研发及建设。在 2005 年,日处理 1 150 t 煤新型(多喷嘴对置)水煤浆气化炉在兖矿国泰化工有限公司建成投产,如图 52 所示,是国内首套使用 IGCC 发电系统,并形成了多喷嘴对置式烧嘴布置形式、新型预膜式工艺喷嘴、分级合成气洗涤工艺(洗涤冷却室+混合器+旋风分离器+洗涤塔)、直接换热的渣水处理工艺等。通过对

气化关键设备和气化炉运行方案的优化,2014年,气化炉连续运行周期达到了511 d,创造了煤气化装置连续稳定运行的世界记录。



图 52 日投煤 1 150 t 新型水煤浆气化炉

Fig.52 New coal water slurry gasifier with daily coal input of 1 150 tons

在国家“863计划”项目“日处理2 000 t煤新型水煤浆气化技术”支持下,兖矿集团与华东理工大学开展多喷嘴对置式水煤浆气化技术大型化研发。通过大型化理论研发及工业示范,形成了炉膛空间结构及喷嘴设计理论,研发了耐火砖分期独立支撑技术,确定了耐火砖减薄方案,提高了气化炉处理能力,实现了激冷室气泡分割器模块化,降低了制造及安装难度,进一步优化了合成气分级洗涤工艺,实现了气化炉带压联投及在线无波动切换,降低了气化系统停车风险,提高了气化运行稳定性。2009年,单炉日投煤量2 000 t级的多喷嘴对置式水煤浆气化装置在江苏灵谷化工股份公司建成投运。

兖矿集团与华东理工大学在多喷嘴煤气化技术大型化方面持续开展技术攻关,承担国家“863计划”“3000 t/d 级超大型煤气化关键技术研究及示范”。研究了超大型化气化撞击火焰特性,通过高压气化提高了整个系统的经济性;实现水洗塔塔盘结构优化“固阀+泡罩”,提高了大型化气化装置合成气洗涤效率;蒸发热水塔采用塔板结构,提高了热量回收效率,延长了设备运行周期;实现了多喷嘴煤气化技术的系列化、模块化。2014年,日处理煤3 000 t 级大型煤气化炉应用于内蒙古荣信化工180万t/a 煤制甲醇及转化烯烃项目(图 53),实现稳定运行,并实现碳转化率提高0.43%,冷煤气效率提高0.7%。

“十三五”期间,兖矿集团与华东理工大学等单位共同承担国家重点研发计划项目“大规模水煤浆气化技术研发及示范”,进行超大型化水煤浆气化装置研发。超大型化煤气化技术采用双合成气出口洗涤冷却室,实现气化炉液位平稳可控;夹套式下降管,延长下降管使用寿命,保障气化系统长周期稳定



图 53 单炉日投煤 3 000 t 的水煤浆气化工业装置

Fig.53 Coal water slurry gasification industrial unit with daily coal input of 3 000 tons per boiler

运行;优化烧嘴结构,缩短气化烧嘴室长度,解决了超大型化气化炉整体运输难题,降低设备投资。2021年,4 000 t 级多喷嘴对置式水煤浆气化装置实现稳定运行,并通过了石化联合会72 h 运行考核,水煤浆气化工业装置如图 54 所示。



图 54 单炉日投煤 4 000 t 的水煤浆气化工业装置

Fig.54 Coal water slurry gasification industrial unit with daily coal input of 4 000 tons per boiler

## 16 煤炭清洁利用

山能始终高度重视煤炭清洁高效利用科技创新与工程实践,开展了大量煤炭提质加工与清洁高效利用技术实践,在煤炭高效提质、粉煤清洁利用、煤系固废资源化等方面取得了重大进展<sup>[81-84]</sup>。

### 16.1 煤炭高效提质技术

1) 煤炭干法分选提质技术。为解决细粒末煤的干法分选问题,基于细颗粒的按密度离析原理,通过分析复合力场中颗粒受力特性与运动规律,开发了“气流-振动协同强化复合力场细颗粒分选”技术,并针对不同煤种开展了-6 mm 末煤分选试验。从分选结果可以看出,该技术对-6 mm 细粒煤具有较好的降灰效果,且具有一定的脱硫作用,突破了常规干法分选设备细粒无分选效果/分选效果不佳的限制,在细粒末煤分选领域具有较大的市场空间与应用前景。

2) 煤泥低温干燥脱水技术。山东能源通过开展

大量的煤泥性质研究与汽水传热计算实践,开发了新型煤泥低温干燥技术,该技术利用“内水外水化和汽水传质”原理,可实现煤泥快速干燥。开发的煤泥低温干燥技术产品为细小均匀的粉状,水分在5%~15%可自由调节,热能消耗小(与水分脱除量呈线性关系),干燥速率快,不存在热能过度损耗现象。目前低温干燥脱水技术已在兖矿能源南屯煤矿建立了工业化示范项目,并形成了石拉乌素煤矿选煤厂、金鸡滩选煤厂煤泥低温干燥系统的工业设计方案。

## 16.2 煤粉清洁利用技术

为解决传统无烟煤湿法成型水分要求高、产品初始强度低、燃尽率低、烧不透等问题,开发了新型湿法型煤制备技术,使用价格低廉的烟煤作为型煤原料,结合掌握的型煤制备工艺与复合添加剂技术,开展了大量系统性的粉煤清洁利用技术实践。该技术以烟煤为主要原料,掺配其他廉价能源原料,采用有黏结剂免烘干成型技术,使湿法烟煤型煤具有强度提升迅速、易燃烧、上火快、火力强等优点,图55为测得的型煤的强度指标。

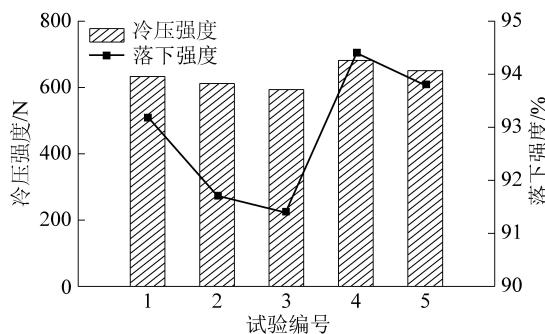


图 55 新型湿法型煤强度指标

Fig.55 Strength index of new wet briquette

通过优化原料配比及复合添加剂配方,开发的型煤高效固硫技术,通过采用“镁系氧化物+钙基2号添加剂+铁系添加剂”组合达到了较高固硫效果,在保证型煤强度不受影响的前提下,大幅降低了SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、烟尘等污染物排放,达到清洁燃烧的效果。

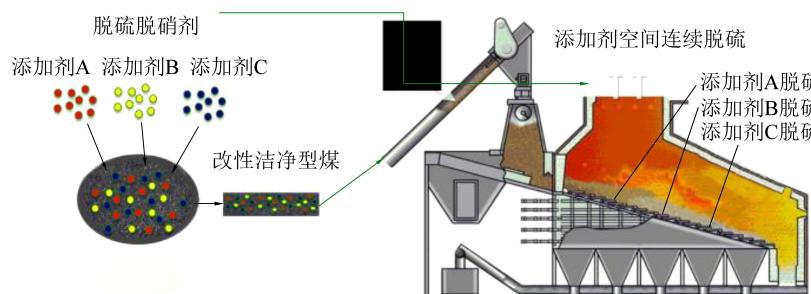


图 57 脱硫脱硝工艺

Fig.57 Desulfurization and denitration process

## 16.3 煤炭清洁燃烧技术

近年来,山能致力于煤炭清洁燃烧技术研发及实践,涵盖了民用及工业领域。以山东能源生产的型煤及所属企业的工业锅炉为研究对象,开展了大量的煤炭清洁燃烧技术试验与实践。

1)以清洁型煤为燃料,将煤炭解耦燃烧(图56)、煤炭分级燃烧及分级热解气化再燃技术应用于民用采暖炉具设计,对传统民用采暖炉具改进,是保障居民生活质量前提下降低散煤污染的重要措施,有利于推动民用燃煤领域能源低碳转型的平稳过渡。

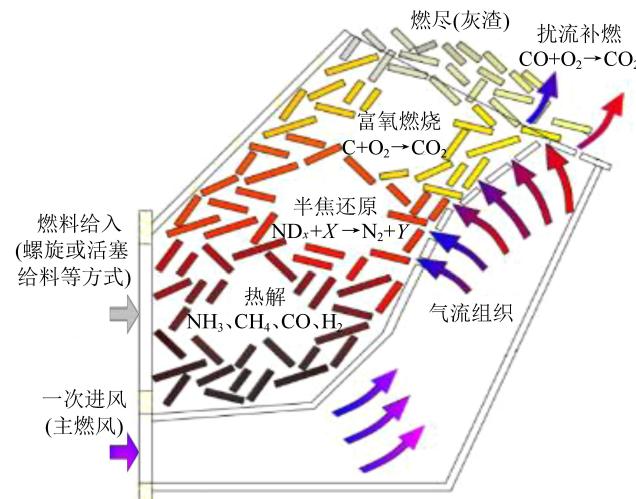


图 56 新型解耦燃烧器示意

Fig.56 Schematic diagram of new decoupling burner

2)对炉内脱硫本质、工业级煤泥团燃烧、积灰及结渣的认知和改进,有效提高了现役设备运行管理水平;细颗粒CFB悬浮燃烧及高效低氮预热清洁燃烧技术的工业应用拓展了劣质煤炭资源的清洁高效利用方式,最大限度减少对生态环境的负面影响。

3)为推广山东能源小型炉具,研发了静置式脱硫技术(图57),该技术以低成本、高活性的脱硫固体为吸收剂,搭载相应匹配形式的反应器,可作为清洁燃烧技术中的脱硫单元予以普遍应用,可有效降

低燃煤燃烧烟气净化成本，并具有良好负荷适应性，从而缓解小型民用及工业炉窑应用受限，减轻燃油、燃气的能源压力。

#### 16.4 煤系固废资源化利用

为提高煤系固废的利用率与附加值，拓宽煤系固废的利用途径，山能建立了固废资源化利用实验室，针对煤化工企业的气化渣规模化处置与资源化利用问题，开展了碳灰分离、陶粒制备与无害化胶凝材料开发实践。开发的气化细渣制备高强陶粒工艺，主要利用气化渣等煤系固废中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等成分在高温下形成钙长石、莫来石、石英、方石英等骨架及液相成分，赋予陶粒强度，如图 4 所示。由于该技术充分利用了气化细渣的残碳热量、残留水分及烧结过程中各物相组分的协同作用，无需添加造孔剂、助溶剂等外添加剂，具有原料来源广、生产成本低、工艺简单特点。

### 17 山能创新发展方向

“十四五”期间，山能将以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，坚持面向现有产业发展和未来产业布局的重大需求，以“智能化、绿色化、高端化”为目标，持续优化科技创新体制机制，建设高层次创新平台，强化领军人才和创新团队的培养引进，加大煤炭安全高效开采、重大灾害防治、清洁能源、高端化工、现代信息、高端装备与材料等关键技术攻关力度，实施一批具有前瞻性、战略性的重大科技项目，巩固提升煤炭、煤化工产业发展优势、推动产业转型升级，加快形成新兴产业发展强劲动力，为打造全球清洁能源供应商和世界一流能源企业提供坚强科技支撑。

1) 加快煤炭技术绿色智能发展。以安全、绿色、智能、高效“四型矿井”建设为目标，以智能化为手段，着力突破安全开采、绿色开采、智能开采、重大灾害治理、矿山生态保护等关键共性技术。

2) 巩固煤化工技术领先优势。加大煤制高端化学品、煤基新材料研发力度，推动煤炭由单一燃料向燃料和原料并重转变，加快推进煤化工、石油化工、盐化工技术融合发展。在煤炭高效转化方面，深化煤炭气化、煤炭液化关键技术研究，完善水煤浆气化与粉煤气化、低温费托合成、高温费托合成 4 大核心技术体系，实现煤化工产业高端化、多元化、低碳化发展。

3) 加快新能源产业技术培育。围绕新能源产业发展战略，加快风电、光伏发电应用技术研究，布局攻关氢能、储能、燃料电池和醇基燃料等领域核心

技术与装备，构建风光火氢储协同互补绿色低碳能源产业链。

4) 加大新材料技术研发力度。依托玻纤、尼龙、阻燃剂合金等业务领域的发展基础，重点针对先进新材料、新能源材料、高端装备用材进行技术攻关，打造新兴产业发展增长极。

5) 提升装备制造技术实力。加快发展煤机、化机等高端装备智能制造技术，加快产品研发、工艺优化、智能制造进程，推动装备智能化、高端化发展；重点研制 10 m 超大采高两柱式超强力掩护式液压支架。在矿山工业智能方面，开展“北斗+”特色装备迭代升级，拓展应用场景。

6) 绿色矿山建设。变被动的塌陷治理为主动的资源型开发，开展生物链治水、靶向珍珠养殖等生态修复工作，以国家级示范为目标，致力“十万亩绿水林田、十万人生态家园”建设，形成集洲、岛、河、塘为一体的“泗河之洲”治理新模式，践行习近平总书记“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念。

7) 煤炭清洁利用与高效转化。优化发展战略，集聚优势资源，积极构建蓝天产业联盟。重点推进煤炭清洁转化、燃煤工业锅炉高效燃烧等技术研发与示范，突破工业煤炭清洁燃烧核心技术。

8) 健全完善科技创新管理机制。增强系统思维，着力强化重大集团战略牵引，以更高站位抓好科技创新布局谋篇。构建更加契合集团发展战略的创新体系，充分激发集团各级创新活力和创造潜能。以企业需求为导向，以解决实际问题的成效为衡量标准，全面推广科研项目“揭榜挂帅”，引入多方揭榜的“赛马制”“里程碑”节点考核制、研发费用“包干制”。打造集团技术共享中心，集中内外部资源，围绕六大主业发展，开展前瞻、共性、关键技术研究及重大课题攻关；打造集团最新技术与最高水平科研成果发源地。

9) 优化提升产业创新平台。按照集团产业发展布局定位，加强研发平台与产业衔接，优化配置创新资源，促进开放共享，形成布局得当、结构合理、协同共享、运转高效的产业研究院平台体系。

10) 全面提高成果转化效力。创新实施“技术+资源+资本+市场+服务”一体化发展模式，强化战略合作，打造更多科技成果转移转化联合载体，加快建设一批推广应用示范工程、示范项目，推动科技成果转化为现实生产力。

### 18 结语

1) 山能承担着保障全省能源安全、优化能源布

局、优化能源结构的重要使命;面向“十四五”,继续保持巩固煤炭、煤化工在行业的技术领先地位,提升装备制造领域技术实力、达到行业领先水平,加快煤电与新能源新材料科技创新能力提升、由应用技术到自主掌握核心技术。

2)在碳达峰碳中和大背景下,拓展多元能源供应体系,统筹推进光伏、风电、氢能等新能源产业规模,但风能、光伏等新能源的不稳定性给新能源体系增加了脆弱性,在大规模低成本储能技术未获得突破的前提下,新能源难以高比例接入现有的能源体系,必须以煤电作为新能源平抑波动稳定器。

3)山东煤矿平均埋深超过660 m,且采深正以每年约40 m左右的速度增加,煤炭深部开采过程中不得不面临巷道大变形、冲击地压、高温热害、水害、煤与瓦斯突出等各类问题,尤以冲击地压问题最为严峻,在山东率先开展深部资源安全高效智能开采技术研究意义重大,对全国其他矿区深部开采具有典型示范作用。

4)煤矿重大灾害事故是长期制约煤炭安全高效生产的核心瓶颈,随着我国煤矿灾害防治领域科技装备水平的提高,极大改善了煤矿安全生产的落后面貌,但重大灾害事故仍时有发生,安全形势依然严峻。覆岩结构运动是煤矿重大灾害诱发的根本原因,开采布局是煤矿灾害预控的重要有效手段。

5)煤炭作为我国主要能源的地位和作用是难以改变的,我们对煤的注意力不要分散,还要做好煤炭这篇文章,认识到煤炭的燃料与原料双重作用。

**致谢:**本文是在《煤炭科学技术》主编王国法院士的盛邀及悉心指导与策划下,历时半年时间完成的,谨向40余年来为山能发展付出努力的同仁致以崇高的敬意。论文写作过程引用大量统计数据及网络文献,还有部分来自山能等相关部门的内部资料,对于未标明引用的文献资料及作者表示感谢;工程实例参考了合作高校的现场测试结果、研究报告和PPT,在此一并感谢。最后,衷心感谢审稿评审专家及编辑部提出的宝贵意见,使得文章更加完善,内容愈加丰富。文中不足之处敬请读者谅解及批评指正。

## 参考文献(References):

- [1] 李永明.采煤工作面集中配液及远程供液系统应用[J].煤炭科学技术,2021,49(S1):183-187.  
LI Yongming. Analysis on origin of rock burst in thin soft rock strata in Yili No. 4 Mine [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (S1):183-187.
- [2] 牛剑峰.综采放顶煤工作面自动放煤控制系统研究[J].工矿自动化,2018,44(6):27-30.  
NIU Jianfeng. Research on automatic drawing control system on fully-mechanized coal face with sublevel caving [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44 (6):27-30.
- [3] 白庆升.复杂结构特厚煤层综放面围岩采动影响机理与控制[D].徐州:中国矿业大学,2015.  
BAI Qingsheng. Mechanism and control on mining induced influences around longwall top coal caving face in extra seam with complex structures [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [4] 李伟.综放开采智能化控制系统研发与应用[J].煤炭科学技术,2021,49(10):128-135.  
LI Wei. Research and application of intelligent control system for full-mechanized caving mining [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (10):128-135.
- [5] 李伟.深部煤炭资源智能化开采技术现状与发展方向[J].煤炭科学技术,2021,49(1):139-145.  
LI Wei. Current status and development direction of intelligent mining technology for deep coal resources [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (1):139-145.
- [6] 王云龙.综采工作面采煤机记忆割煤技术的实现[J].煤炭与化工,2017,40(12):69-71.  
WANG Yunlong. Implement of memory coal slicing technology in fully mechanized working face [J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40 (12):69-71.
- [7] 庞义辉.超大采高液压支架与围岩的强度耦合关系[D].北京:煤炭科学研究院,2018.  
PANG Yihui. Hydraulic support and surrounding rock strength coupling relationship in ultra large mining height face [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [8] 鞠金峰,许家林,王庆雄.大采高采场关键层“悬臂梁”结构运动型式及对矿压的影响[J].煤炭学报,2011,36(12):2115-2120.  
JU Jinfeng, XU Jialin, WANG Qingxiong. Cantilever structure moving type of key strata and its influence on ground pressure in large mining height workface [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36 (12):2115-2120.
- [9] 苏涛.推进速度对大采高工作面关键层“悬臂梁”垮落形式的影响[J].中州煤炭,2015(5):71-73.  
SU Tao. Influence of propulsive velocity on caving form of cantilever beam in key layer of large mining height working face [J]. Zhongzhou Coal, 2015(5):71-73.
- [10] 许家林,鞠金峰.特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1547-1556.  
XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (8):1547-1556.
- [11] 刘全喜.刮板输送机智能控制系统在煤矿综采工作面中的应用[J].当代化工研究,2021,(9):63-64.  
LIU Quanxi. Application of intelligent control system of scraper

- conveyor in fully mechanized coal mining face [J]. Modern Chemical Research, 2021, (9): 63–64.
- [12] 贺海涛. 综采工作面智能化开采系统关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(S1): 8–15.
- HE Haitao. Key technology of intelligent mining system in fully-mechanized mining face [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S1): 8–15.
- [13] 高有进, 杨艺, 常亚军, 等. 综采工作面智能化关键技术现状与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 1–22.
- GAO Youjin, YANG Yi, CHANG Yajun, et al. Status and prospect of key technologies of intelligentization of fully-mechanized coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 1–22.
- [14] 王国法, 张德生. 煤炭智能化综采技术创新实践与发展展望 [J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 459–467.
- WANG Guofa; ZHANG Desheng. Innovation practice and development prospect of intelligent fully mechanized technology for coal mining [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 459–467.
- [15] 许永祥, 李申龙, 王国法, 等. 特厚坚硬煤层超大采高综放首采工作面智能化技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 186–194.
- XU Yongxiang, LI Shenlong, WANG Guofa, et al. Intelligent technology of first-mining face of longwall top-coal caving with super large cutting height in extra-thick and hard coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 186–194.
- [16] 王国法, 赵国瑞, 任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 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(1): 34–41.
- [17] 王学文, 崔涛, 谢嘉成, 等. 考虑销轴间隙的液压支架运动虚拟仿真方法 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 186–193.
- WANG Xuwen, CUI Tao, XIE Jiacheng, et al. Virtual simulation method of hydraulic support motion considering pin shaft clearance [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 186–193.
- [18] 舒凤翔. 高端液压支架液压系统及关键元件研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- SHU Fengxiang. Study on the hydraulic system and key parts of advanced hydraulic support [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.
- [19] 王安国. 高端液压支架制造工艺方案的探讨 [J]. 能源与节能, 2017(6): 134–135, 170.
- WANG Anguo. Discussion on the manufacturing process of high-end hydraulic support [J]. Energy and Energy Conservation, 2017(6): 134–135, 170.
- [20] 王国法. 高端液压支架关键技术研究与产业化进展 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 78–83.
- WANG Guofa. Research and commercialization progress of key technology for high rank hydraulic powered support [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4): 78–83.
- [21] 张佳瑶. 高端液压支架焊接制造工艺优化措施 [J]. 机械研究与应用, 2019, 32(5): 166–168, 71.
- ZHANG Jiayao. Optimization of manufacturing technology of high-end hydraulic support [J]. Mechanical Research & Application, 2019, 32(5): 166–168, 71.
- [22] 赵喜增. 高端液压支架自动化焊接工艺和装备的应用 [J]. 煤矿机械, 2013, 34(4): 139–140.
- ZHAO Xizeng. Application of automatic welding process and equipment for high-end hydraulic support [J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(4): 139–140.
- [23] 马旭东, 王跃龙, 田慕琴, 等. 液压支架健康评估与寿命预测模型研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 141–148.
- MA Xudong, WANG Yuelong, TIAN Muqin, et al. Health assessment and life prediction model of hydraulic support [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(3): 141–148.
- [24] 冯占森, 李臣阳, 赵快乐. 液压支架焊接技术研究现状 [J]. 焊接技术, 2013, 42(11): 3–6.
- FENG Zhanmiao, LI Chenyang, ZHAO Kuaile. Research status of hydraulic support welding technology [J]. Welding Technology, 2013, 42(11): 3–6.
- [25] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40 a 及展望 [J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2): 7–39.
- KANG Hongpu, XU Gang, WANG Biaomou, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 7–39.
- [26] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071–1081.
- KANG Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bolting technology for underground coal mine roadways in China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071–1081.
- [27] 单仁亮, 彭杨皓, 孔祥松, 等. 国内外煤巷支护技术研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(12): 2377–2403.
- SHAN Renliang, PENG Yanghao, KONG Xiangsong, et al. Research progress of coal roadway support technology at home and abroad [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(12): 2377–2403.
- [28] 张鹏程. 综采工作面端头及超前支护关键技术与装备研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- ZHANG Pengcheng. Research on key technology and equipments for advanced support used in the ends of fully mechanized mine face [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [29] 王琦. 深部厚顶煤巷道围岩破坏控制机理及新型支护系统对比研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- WANG Qi. Research on control mechanism of surrounding rock failure in deep roadways with thick top-coal and contrast of new support systems [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [30] 康红普. 煤矿巷道支护与加固材料的发展及展望 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 1–11.
- KANG Hongpu. Development and prospects of support and reinforcement materials for coal mine roadways [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 1–11.

- Technology, 2021, 49(4):1–11.
- [31] 李明忠,张德生,刘壮,等. 8.2 m 大采高综采工作面超前支护技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(11):32–36.  
LI Mingzhong, ZHANG Desheng, LIU Zhuang, et al. Research and application of advance supporting technology for 8.2 m large mining height fully-mechanized face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11):32–36.
- [32] 宁廷洲,卓日升,安学东,等. 预应力锚注支护对软弱破碎巷道支护机理研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2018(19):6–7.  
NING Tingzhou, ZUO Risheng, AN Xuedong, et al. Study on supporting mechanism of prestressed anchor grouting support for weak fractured roadway[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2018(19):6–7.
- [33] 李海燕,张红军,李术才,等. 新型高预应力锚索及锚注联合支护技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3):582–589.  
LI Haiyan, ZHANG Hongjun, LI Shucai, et al. Research and application on new high pre-stressed anchor cable with bolt-grouting comprehensive support technology[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3):582–589.
- [34] 王洪涛,王琦,蒋敬平,等. 深部巷道全长预应力锚注支护机理研究及应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(4):670–677, 684.  
WANG Hongtao, WANG Qi, JIANG Jingping, et al. Supporting mechanism and application of full-length prestressed bolt-grouting in the deep roadways[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(4):670–677, 684.
- [35] 何宗礼,陈高君. 煤矿深部巷道预应力协同支护技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3):35–38.  
HE Zongli, CHEN Gaojun. Study on pre-stressed coordinated support technology of deep mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3):35–38.
- [36] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2):205–213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):205–213.
- [37] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等. 我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9):1–40.  
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, et al. Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9):1–40.
- [38] 潘一山,肖永惠,李忠华,等. 冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2):222–228.  
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, et al. Study of tunnel support theory of rockburst in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):222–228.
- [39] 姜耀东,赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2188–2204.  
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the Artinvestigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2188–2204.
- [40] 何江,窦林名,蔡武,等. 薄煤层动静组合诱发冲击地压的机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11):2177–2182.  
HE Jiang, DOU Lin-ming, CAI Wu, et al. Mechanism of dynamic and static combined load inducing rock burst in thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11):2177–2182.
- [41] 梁运涛,陈成峰,田富超,等. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4):40–48.  
LIANG Yuntao, CHEN Chengfeng, TIAN Fuchao, et al. Methane gas detection technology and its application in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4):40–48.
- [42] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(08):2091–2098.  
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(08):2091–2098.
- [43] 翟明华,姜福兴,齐庆新,等. 冲击地压分类防治体系研究与应用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12):3116–3124.  
Zhai Minghua, Jiang Fuxing, Qi Qingxin, et al. Research and practice of rock burst classified control system[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12):3116–3124.
- [44] 窦林名,李振雷,张敏. 煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7):41–46.  
DOU Linming, LI Zhenlei, ZHANG Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(07):41–46.
- [45] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等. 我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6):21–25, 41.  
PAN Junfeng, MAO Debing, LAN Hang, et al. Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6):21–25, 41.
- [46] 何满潮,郭平业. 深部岩体热力学效应及温控对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12):2377–2393.  
HE Manchao, GUO Pingye. Deep rock mass thermodynamic and temperature effect and temperature control measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12):2377–2393.
- [47] 康红普,王国法,姜鹏飞,等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7):1789–1800.  
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7):1789–1800.
- [48] 何满潮,徐敏. HEMS深井降温系统研发及热害控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7):1353–1361.  
HE Manchao, XU Min. Research and development of HEMS cooling system and heat-harm control in deep mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7):1353–1361.
- [49] 贾文明,姬建虎,张明雨,等. 深部矿井高温热害防治研究与工程应用[J]. 煤炭技术, 2020, 39(3):88–91.  
JIA Wenming, JI Jianhu, ZHANG Mingyu, et al. Research and en-

- gineering application of high temperature and thermal damage prevention in deep mines [J]. Coal Technology, 2020, 39 (3) : 88-91.
- [50] 孙勇,王伟. 基于 Fluent 的掘进工作面通风热环境数值模拟[J]. 煤炭科学技术,2012,40(7):31-34.
- SUN Yong, WANG Wei. Numerical simulation on thermal environment of ventilation for mine roadway heading face based on fluent software[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40 (7) : 31-34.
- [51] 吴学慧,陈凡,王义江,等. 建井期间平巷冷风输送系统的冷损失[J]. 煤炭学报,2021,46(8):2593-2599.
- WU Xuehui, CHEN Fan, WANG Yijiang, et al. Cold loss of supply chilled air for level roadway drifting during mine construction [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46 (8) : 2593-2599.
- [52] 姬建虎,张明雨,贾文明,等. 霄云煤矿井下集中降温系统研究[J]. 煤矿安全,2019,50(12):97-101.
- JI Jianhu, ZHANG Mingyu, JIA Wenming, et al. Research on centralized cooling system in Xiaoyun Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50 (12) : 97-101.
- [53] 王连聪,梁运涛,罗海珠. 我国矿井热动力灾害理论研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术,2018,46(7):1-9.
- WANG Liancong, LIANG Yuntao, LUO Haizhu. Research progress and outlook on theory of thermodynamic disaster of coal mine in China [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46 (7) : 1-9.
- [54] 梁运涛,侯贤军,罗海珠,等. 我国煤矿火灾防治现状及发展对策[J]. 煤炭科学技术,2016,44(6):1-6,13.
- LIANG Yuntao, HOU Xianjun, LUO Haizhu, et al. Development countermeasures and current situation of coal mine fire prevention & extinguishing in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44 (6) : 1-6,13.
- [55] 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(3):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.
- [56] 刘东洋,王继仁,张勋,等. 极近距离煤层上覆采空区自燃危险区域预测及防治研究[J]. 矿业安全与环保,2019, 46(5):1-6.
- LIU Dongyang, WANG Jiren, ZHANG Xun, et al. Study on prediction and prevention of dangerous area of spontaneous combustion in overlying goaf of extremely close coal seam [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(5):1-6.
- [57] 李树刚,安朝峰,潘宏宇,等. 采空区煤自燃引发瓦斯爆炸致灾机理及防控技术[J]. 煤矿安全,2014,45(12):24-27,31.
- LI Shugang, AN Zhaofeng, PAN Hongyu, et al. Mechanism and prevention technology of gas explosion caused by coal spontaneous combustion in goaf [J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45 (12) : 24-27,31.
- [58] 安世岗. 浅埋藏近距离煤层群矿井综合防灭火技术[J]. 煤矿安全,2020,51(12):75-78.
- AN Shigang. Minecomprehensive fire prevention and extinguishing technology for shallow buried short distance coal seam group [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51 (12) : 75-78.
- [59] 齐庆杰,祁云,周新华. 供风量对采空区自燃动态影响及灭火技术[J]. 中国安全科学学报,2019,29(4):120-126.
- QI Qingjie, QI Yun, ZHOU Xinhua. Dynamic effects of air supply volume on spontaneous combustion in goafs and fire prevention and extinguishing technology [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29 (4) : 120-126.
- [60] 郭文兵,马志宝,白二虎. 我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术,2020,48(9):16-26.
- GUO Wenbing, MA Zhibao, BAI Erhu. Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and railways, and above confined water in China [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9) : 16-26.
- [61] 刘天泉.“三下一上”采煤技术的现状及展望[J]. 煤炭科学技术,1995,23(1):5-7,62.
- LIU Tianquan. Present situation and prospect of "three under one up" coal mining technology [J]. Coal Science and Technology, 1995, 23 (1) : 5-7,62.
- [62] 徐卫华.“三下一上”采煤技术的现状和发展[J]. 山西煤炭管理干部学院学报,2015,28(2):20-1,9.
- XU Weihua. Current situation and development of " three under one up" coal mining technology [J]. Journal of Shanxi Coal-Mining Administrators College, 2015, 28 (2) : 20-1,9.
- [63] 姜岳,R MISA,李鹏宇,等. 矿山开采沉陷理论发展历程综述[J]. 金属矿山,2019(10):1-7.
- JIANG Yue, R MISA, LI Pengyu, et al. Summary and development of mining subsidence theory [J]. Metal Mine, 2019 (10) : 1-7.
- [64] 沈震,徐良骥,刘哲,等. 基于 Matlab 的概率积分法开采沉陷预计参数解算[J]. 金属矿山,2015(9):170-174.
- SHEN Zhen, XU Liangji, LIU Zhe, et al. Calculating on the prediction parameters of mining subsidence with probability integral method based on Matlab [J]. Metal Mine, 2015(9):170-174.
- [65] 张兵. 开采沉陷动态预计模型构建与算法实现[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2017.
- ZHANG Bing. Establishment of dynamic prediction model and implementation of the algorithm for mining subsidence [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.
- [66] 程桦,蔡海兵. 我国深立井冻结法凿井安全现状与思考[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2013,33(2):1-6.
- CHENG Hua, CAI Haibing. Safety situation and thinking about deep shaft construction with freezing method in China [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 33 (2) : 1-6.
- [67] 肖瑞玲. 立井施工技术发展综述[J]. 煤炭科学技术,2015, 43(8):13-17,22.
- XIAO Ruiling. Review on development of mine shaft construction technology [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43 (8) : 13-17,22.
- [68] 范文博. 我国超深立井凿井提升面临的问题及建议[J]. 煤炭工程,2018,50(6):62-65,9.
- FAN Wenbo. Problems and suggestions on hoisting system of

- super deep vertical shaft sinking in China [J]. Coal Engineering, 2018, 50(6): 62–65, 9.
- [69] 李克健,吴秀章,舒歌平. 煤直接液化技术在中国的发展[J]. 洁净煤技术,2014,20(2):39–43.  
LI Kejian, WU Xiuzhang, SHU Geping. Development of direct coal liquefaction technologies in China [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(2): 39–43.
- [70] 胡发亭,王学云,毛学锋,等.煤直接液化制油技术研究现状及展望[J]. 洁净煤技术,2020,26(1):99–109.  
HU Fating, WANG Xueyun, MAO Xuefeng, et al. Research progress and prospect of direct liquefaction technology from coal to oil [J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(1): 99–109.
- [71] 王忠臣,李晓宏,何炳昊,等.煤液化制油技术研究进展[J]. 化工设计通讯,2019,45(2):18–20.  
WANG Zhongchen, LI Xiaohong, HE Binghao, et al. Research progress on coal liquefaction and oil production technology [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(2): 18–20.
- [72] 徐国锋. 煤液化技术研究现状及展望[J]. 河南化工,2019, 36(6):3–6.  
XU Guofeng. Research status and prospect of coal liquefaction technology [J]. Henan Chemical Industry, 2019, 36(6):3–6.
- [73] 郝学民,张浩勤. 煤液化技术进展及展望[J]. 煤化工, 2008(4):28–32.  
HAO Xuemin, ZHANG Haoqin. Prospect of the Coal Liquefaction Technology [J]. Coal Chemical Industry, 2008(4):28–32.
- [74] 汪寿建. 现代煤气化技术发展趋势及应用综述[J]. 化工进展,2016,35(3):653–664.  
WANG Shoujian. Development and application of modern coal gasification technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(3): 653–664.
- [75] 张 云,杨倩鹏. 煤气化技术发展现状及趋势[J]. 洁净煤技术,2019,25(S2):7–13.  
ZHANG Yun, YANG Qianpeng. Development status and trend of coal gasification technical [J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(S2):7–13.
- [76] 高聚忠. 煤气化技术的应用与发展[J]. 洁净煤技术,2013, 19(1):65–71.  
GAO Juzhong. Application and development of coal gasification technologies [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(1):65–71.
- [77] 戴厚良,何祚云. 煤气化技术发展的现状和进展[J]. 石油炼制与化工,2014,45(4):1–7.  
DAI Houliang, HE Zuoyun. Status and progress of coal
- gasification technology [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2014, 45 (4): 1–7.
- [78] 王辅臣,于广锁,龚欣,等. 大型煤气化技术的研究与发展[J]. 化工进展,2009,28(2):173–180.  
WANG Fuchen, YU Guangsuo, GONG Xin, et al. Research and development of large – scale coal gasification technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009, 28 (2): 173–180.
- [79] 吴治国. 煤气化原理及其技术发展方向[J]. 石油炼制与化工,2015,46(4):22–28.  
WU Zhiguo. Coal gasification principle its technology development direction [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2015, 46(4):22–28.
- [80] 赵锦波,王玉庆. 煤气化技术的现状及发展趋势[J]. 石油化工,2014,43(2):125–131.  
ZHAO Jinbo, WANG Yuqing. Present Situation and Development Tendency of Coal Gasification Technology [J]. Petrochemical Technology, 2014, 43(2): 125–131.
- [81] 李小炯. 我国煤炭资源清洁高效利用现状及对策建议[J]. 煤炭经济研究,2019,39(1):71–75.  
LI Xiaojong. Status and countermeasures of clean and efficient utilization of coal resources in China [J]. Coal Economic Research, 2019, 39(1): 71–75.
- [82] 陈贵锋,罗 腾. 煤炭清洁利用发展模式与科技需求[J]. 洁净煤技术,2014,20(2):99–103.  
CHEN Guifeng, LUO Teng. Development patterns and technology requirements of clean coal utilization [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20 (2): 99–103.
- [83] 陆小泉. 我国煤炭清洁开发利用现状及发展建议[J]. 煤炭工程,2016,48(3):8–10,4.  
LU Xiaoquan. Present situation and suggestion for clean coal development and utilization in China [J]. Coal Engineering, 2016, 48 (3): 8–10, 4.
- [84] 郭富强,丁建伟,刘昆仑,等. 煤炭清洁高效利用发展现状及趋势展望[J]. 煤炭加工与综合利用,2019(12):55–60.  
GUO Fuqiang, DING Jianwei, LIU Kunlun. Research on application of concrete pillar in conjunction with anchored bolt and cable support system [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2019(12):55–60.