



山西省煤成气勘查开发现状及探索

龚杰立 李国富 李德慧 刘亮亮 王争 徐云 王旭超

引用本文:

龚杰立, 李国富, 李德慧, 等. 山西省煤成气勘查开发现状及探索[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 39–47.

GONG Jieli, LI Guofu, LI Dehui, et al. Present situation and prospects of coal-derived gas exploration and development in Shanxi Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 39–47.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.09.0514>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山西省煤系伴生三稀矿产资源研究现状及找矿前景

Status and prospect of research for three type coal-associated rare earth resources in coal measures in Shanxi Province

煤田地质与勘探. 2018, 46(4): 1–7 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.04.001>

窑街矿区浅层煤系气储层特征及勘探开发关键技术

Characteristics of shallow coal measure gas reservoir and key technologies of exploration and development in Yaojie mining area

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 58–66,73 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.006>

淮南煤田太原组煤系非常规油气勘探开发技术

The exploration and development of unconventional oil and gas in the Taiyuan Formation from Huainan coalfield

煤田地质与勘探. 2017, 45(4): 13–18 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.003>

山西省废弃矿井煤层气地面钻井开发关键问题与对策

Key problems and countermeasures of CBM development through surface boreholes in abandoned coal mines of Shanxi Province

煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 86–95 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.011>

煤层气开发中煤粉问题的研究现状及研究思路

Research status and thoughts for coal fines during CBM development

煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 116–124 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.016>

煤矿井下钻探装备技术现状及展望

Present situation and prospect of drilling equipment technology in coal mine

煤田地质与勘探. 2019, 47(1): 1–5,14 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.01.001>



移动阅读

龚杰立, 李国富, 李德慧, 等. 山西省煤成气勘查开发现状及探索[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(2): 39-47. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.09.0514

GONG Jieli, LI Guofu, LI Dehui, et al. Present situation and prospects of coal-derived gas exploration and development in Shanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(2): 39-47. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.09.0514

山西省煤成气勘查开发现状及探索

龚杰立^{1,2}, 李国富^{1,3}, 李德慧^{1,3}, 刘亮亮^{1,3}, 王争^{1,3}, 徐云^{1,3}, 王旭超⁴

- (1. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西晋城 048012; 2. 山西省矿产资源调查监测中心, 山西太原 030024; 3. 易安蓝焰煤与煤层气共采技术有限责任公司, 山西太原 030031; 4. 中国石油工程建设有限公司, 北京 100120)

摘要: 煤成气包括煤层气、页岩气和致密砂岩气。煤层气开发对保障煤矿安全生产、增加清洁能源供应, 改善地区能源消费结构, 促进碧水蓝天建设具有现实意义, 更符合国家发展绿色能源, 实现碳中和、碳达峰的战略要求。页岩气和致密砂岩气对于改善我国能源结构, 实现“双碳”目标意义重大。通过对山西省煤成气资源勘查开发现状、体制机制改革、煤层气开发主体技术创新、产业升级方面的有益探索及成功经验进行综合分析总结, 认为: 煤层气矿权体制机制改革是促进产业健康发展的重要手段; 技术创新是煤成气开发实现商业化、产业化的关键; “三气并举”有助于加速产能建设, 激发企业勘探开发积极性; 煤矿区“四区”联动井上下联合抽采技术体系是煤矿企业安全生产高效发展的可靠模式; 合作共赢是煤炭和煤成气产业协同发展的必由之路, “先采气、后采煤、采煤采气一体化”是践行“双碳”目标实现的可靠路径; 提升煤层气产品附加值, 有助于煤层气产业实现升级。

关键词: 煤成气; 勘查开发; 体制机制改革; “三气共采”; “四区”联动

中图分类号: TD712⁺.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)02-0039-09

Present situation and prospects of coal-derived gas exploration and development in Shanxi Province

GONG Jieli^{1,2}, LI Guofu^{1,3}, LI Dehui^{1,3}, LIU Liangliang^{1,3}, WANG Zheng^{1,3}, XU Yun^{1,3}, WANG Xuchao⁴

- (1. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048012, China; 2. Shanxi Mineral Resources Survey and Monitoring Center, Taiyuan 030024, China; 3. Yi'an Lanyan Coal and Coalbed Methane Co-Mining Technology Co. Ltd., Taiyuan 030031, China; 4. China Petroleum Engineering and Construction Corporation, Beijing 100120, China)

Abstract: Coal-derived gas includes coalbed methane(CBM), shale gas and tight sandstone gas. CBM development is of practical significance to ensure coal mine safety, increase clean energy supply, improve regional energy consumption structure, and promote the clear water and blue sky program, which is more in line with the national strategic requirements of developing green energy, achieving carbon neutrality and peaking carbon dioxide emissions. Shale gas and tight sandstone gas are of great significance to improve China's energy structure and achieve the goal of carbon neutrality and peaking carbon dioxide emissions. Based on the comprehensive analysis of the beneficial exploration and successful experience in the present situation of exploration and development of coal-formed gas resources, the reform of system and mechanism, the technological innovation of the main body of CBM exploitation, and industrial upgrading, it is concluded that the reform of the system and mechanism of CBM mining rights is an important means to promote the healthy development of the industry. Technological innovation is the key to commercialization and industrialization of coal-derived gas development. The simultaneous development of the three gases will help speed up the construction of production capacity and stimulate the enthusiasm of enterprises for exploration and development. The technical system of “four zones” combined wells is a reliable model for safe production and efficient development of coal mining enter-

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2021-11-08

基金项目: 山西省煤层气联合研究基金项目(2016012010, 2016012003); 中国工程院院地合作项目(2020SX4)

第一作者: 龚杰立, 1980年生, 男, 山西稷山人, 硕士, 高级工程师, 从事地质矿产勘查研究工作. E-mail: gongjieli168@163.com

通信作者: 李国富, 1965年生, 男, 山西晋城人, 博士(后), 正高级工程师, 从事煤层气勘探开发利用及煤与煤层气共采研究工作. E-mail: 13834068216@163.com

prises. Win-win cooperation is the only way for the coordinated development of coal and coal-derived gas industries.

“Integration of coal mining and gas production with gas production first, coal mining later” is a reliable way to realize the goal of carbon neutrality and peaking carbon dioxide emissions. Enhancing the added value of CBM products is helpful to upgrade the CBM industry.

Keywords: coal-derived gas; exploration and development; reform of system and mechanism; “three gas co-exploitation”; “four zones” linkage

我国富煤、贫油、少气的能源结构,不利于社会发展、环境保护及国民经济持续健康发展^[1]。2010年我国天然气对外依存度不足10%,近年来伴随国民经济飞速发展,2020年我国天然气对外依存度已达到43%^[2]。

山西省在2019年被确定为能源革命综合改革试点地区,与煤炭伴生的煤成气资源成为山西省进行能源革命的重要抓手之一。煤成气包括煤层气、页岩气和致密砂岩气,“三气并举”有助于实现全省转型发展战略目标。自2017年国家通过《矿业权出让制度改革方案》,将煤层气探矿权和采矿权下放至煤层气资源禀赋较好的山西、新疆、贵州等6个省区开展试点以来^[3],山西在煤层气开发利用方面取得较大发展。为积极响应国家增储上产七年行动计划,目前全国煤层气勘探开发正如火如荼进行,但均面临或经历着山西在煤层气勘探开发方面的发展问题,突出体现在:煤层气和煤炭两种资源重叠导致的矛盾;资源条件复杂且成功经验的技术移植性差;企业效益不佳,利润低,投资步伐缓慢;地面治理效果不及预期等;以上种种因素导致我国煤层气(瓦斯)经多年发展仍未达预期^[4-6]。众多学者针对我国煤层气产量多年未达预期的问题开展了深入研究。介丁非等^[7]针对我国煤层气勘探开发从政策、技术、资源、地质、增产等多个方面进行了研究;张遂安等^[8]结合中国煤层气增产技术发展现状,提出了裂缝非线性动态扩展机理、地应力场反演与重定向理论、压裂液的流变调控和微地震数据噪声甄别等6项亟需攻关的科学问题,展望了中国煤层气增产技术的发展趋势。孙钦平等^[9]分析了国内外煤层气产业发展成功经验与失败教训,从影响我国煤层气产量增长方面探讨当前产业存在的若干问题,分析未来中国煤层气持续发展的重要领域和方向,提出我国煤层气产业发展5项对策建议。2020年,山西省打响煤成气增储上产三年行动大会战,国家非常规天然气基地建设全面提速,在此新形势下,笔者通过对山西省煤成气勘查开发现状、勘查开采管理制度改革、煤成气地面开发与煤矿瓦斯治理方面的有益探索及取得的成功经验进行分析,为全国煤成气开发利用提供经验借鉴。

1 山西省煤成气勘查开发现状

1.1 煤成气资源勘查

山西是煤炭资源大省,煤炭中蕴藏丰富的煤层气,

其中,沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘为国内各大煤层气开发企业的长期主要勘探开发区^[6]。根据2021年9月18日自然资源部发布的《全国石油天然气资源勘查开采通报(2020年度)》,2020年全国煤层气新增探明地质储量673.13亿 m^3 ,同比增长950.5%,新增探明储量来自沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘。至2020年底,全国历年累计探明煤层气地质储量7259亿 m^3 ,探明技术可采储量3633亿 m^3 ,其中山西省探明煤层气地质储量6465亿 m^3 ,占比超全国的89%,探明技术可采储量3232亿 m^3 ,占比为全国的近89%。

山西省在深部煤成气勘查方面实现多点突破,其中2017年榆社-武乡区块煤层气、页岩气综合勘查项目,初步预测煤层气、页岩气资源总量约5000亿 m^3 ,属于超大型气田^[10]。鄂尔多斯盆地东缘历年累计探明天然气地质储量2772亿 m^3 ,其中临兴气田1796.75亿 m^3 。鄂尔多斯盆地东缘历年累计探明煤层气、致密砂岩气地质储量5314亿 m^3 ,延川南区块历年累计探明煤层气地质储量208亿 m^3 。保德区块历年累计探明煤层气地质储量615亿 m^3 。

山西大力发展煤成气的同时也将煤炭采空区煤层气开发作为增储上产的重要补充,2017年山西省探明具开发价值的煤炭采空区面积约2052 km^2 ,预测残余采空区煤层气资源量约726亿 m^3 ,其中西山、阳泉、武夏、潞安、晋城、霍东和离柳7个矿区内的煤炭采空区煤层气含量较高,采空区面积达870 km^2 ,预测煤层气资源量约303亿 m^3 ^[11-12]。

1.2 地面煤成气开发

1.2.1 煤层气

据自然资源部发布的《全国石油天然气资源勘查开采通报(2020年度)》统计,2020年全国地面开发煤层气产量为57.67亿 m^3 ,同比增长5.6%,产量主要来自沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘,当前全国的煤层气开发仍主要集中于山西省,山西煤层气产业的建设和发展对中国整个煤层气产业具有举足轻重的地位。

1.2.2 致密砂岩气

致密气与煤层气、页岩气均属非常规天然气,前期在临兴区块施工的L-4井在太2段钻遇厚度达11.3m的气层,射孔后在未压裂情况下测试日产气量达119520 m^3 ,太2段显示出较大的勘探开发潜力^[13]。中联煤层气公司在规模化开发中实行甜点区一体化滚动建设,获取

的日产气无阻流量平均 5.8 万 m^3 , 建成的 2 个一体化区年生产能力达 3 亿 m^3 ^[14]。当前临兴区块已累计钻井 526 口, 建设场站 11 座, 铺设管线 483 km, 临兴区块运行 229 口井, 实现年产量近 7.3 亿 m^3 , 2020 年临兴区块实现天然气日产量超 500 万 m^3 , 投产后累计供应天然气 18.36 亿 m^3 , 2021 年最新生产数据显示, 该区块某一单井日产气无阻流量近百万 m^3 。中石油煤层气公司在鄂尔多斯盆地东缘山西境内建设开发的煤系气整装气田超千亿 m^3 , 年产能超 10 亿 m^3 ^[15]。

1.2.3 采空区煤层气抽采

开展废弃矿井地面煤层气抽采, 对提高废弃矿井煤层气资源利用率, 助力增储上产具有现实意义。山西省在废弃矿井采空区地面抽采方面已建成覆盖晋城、西山、阳泉和晋中左权 4 个矿区的废弃矿井地面煤层气抽采井累计 100 余口, 累计利用约 1.3 亿 m^3 ^[16]。目前正在运行的废弃矿井地面煤层气抽采井共 70 余口, 日产气量达 16.9 万 m^3 , 真正实现了采空区煤层气抽采项目从空白到规模化发展。

2 山西省煤成气开发利用探索

2.1 煤层气勘查开发面临的现实问题

前期山西省在煤层气勘查开发方面取得了较大成效, 但随着深部煤成气勘查开发成为重点发展方向, 煤成气勘查开发政策、深部煤成气开发关键技术等问题亟待解决, 以提高煤层气开发主体的勘探开发积极性, 实现山西省非常规天然气基地建设目标。

2.1.1 政策滞后性

首先是煤层气勘探开发主体在办理煤层气资源勘查开采行政许可的过程相对滞后, 办证所需要件多、手续办理复杂繁琐, 以煤层气开发项目建设为例, 项目建设过程中需办理各项手续批复文件、证书等 73 项。其次是现行煤层气扶持优惠政策出台较早, 无法适应山西省进行深部煤成气勘查开发的发展现状, 对煤层气开发主体激励性偏低, 煤层气开采成本与供气价格倒挂, 使企业勘查开发的投资积极性变弱。

2.1.2 技术适应性

深部煤成气资源赋存条件复杂, 对深部煤成气勘查开发的技术要求更高, 但当前地面勘探开发关键技术无法实现成功复制, 地面排采关键技术尚未实现整体性突破; 开发区低成本高效建产工程技术有待进一步研究; 煤层气和致密气老区长效稳产工程技术亟需解决; 地质工程一体化认识和低成本钻井、压裂、采气等实现效益开发的工艺技术体系有待进一步研究, 技术适应性严重影响了行业利润水平和竞争能力^[17-18]。

2.2 勘查开发体制机制改革

山西省通过煤层气管理体制改革, 以畅通煤层气

勘探开发管理体制机制, 解决煤层气管理权不匹配、“圈而不探”“占而不采”的顽疾, 激发山西省煤层气勘探开发活力^[5]。

2017 年 8 月, 山西省发布全国首个省级煤层气勘查开发专项规划《山西省煤层气资源勘查开发规划(2016—2020 年)》, 对煤层气作为独立矿种进行规划, 其中涵盖煤层气、煤炭矿业权、煤炭采空区、含煤地层等含气区域, 适度兼顾与煤系天然气(致密砂岩气)、页岩气等气体矿产的统筹开发, 是全国油气类规划的重要实践创新和探索^[19]。

2020 年 4 月山西省颁发《山西省煤成气开采项目审批流程(试行)》, 以解决煤成气项目审批职能部门和管理层级多、审批周期长的问题, 推行全省市/县“一枚印章管审批”, 在市/县即可实现大多数审批事项的办理。

2020 年 5 月山西省开始施行《山西省煤层气勘查开采管理办法》, 规定了煤层气探矿权的延续及最低工作量, 通过规范煤层气资源的勘查开采以促进山西省煤层气产业高质量发展, 开展煤成气综合开发^[9]。《山西省煤层气勘查开采管理办法》鼓励更多企业投资参与煤层气勘查开采; 鼓励企业加快勘查; 简化矿业权审批登记, 取消“试采报批”, 减少采矿登记要件; 鼓励零散气利用, 减少直排和空烧; 推进煤层气项目进入政务服务一体化平台审批, 大幅压缩报批耗时; 鼓励“三气”综合评价和利用, 实现多气同采共输, 以降低基础建设成本; 大幅提高“最低勘查投入标准”和“勘查开采透明度”; 对低于最低勘查投入规定要求的探矿权, 不予办理延续登记; 以提高矿权流转率, 促使矿权人加大投入^[20]。

为实现增储目标, 促进山西省煤层气勘探开发, 山西省依照《关于委托山西省国土资源厅在山西省行政区域内实施部分煤层气勘查开采审批登记的决定》和《关于委托山西省等 6 个省级国土资源主管部门实施原由国土资源部实施的部分矿产资源勘查开采审批登记的决定》文件精神, 在 2017 年至 2019 年 3 年内通过竞价招标的方式挂牌竞争出让多个煤层气探矿权(表 1), 同时为解决资源利用率不高的问题, 山西省推行了煤层气矿业权退出机制。

2.3 技术创新破解开发“瓶颈”, 助力增储上产

煤层气开发实现商业化、产业化技术创新是关键, 2020 年度山西省科技重大专项指南提出, 将通过 5 个重点方向的科技攻关来突破山西省非常规天然气开发理论和技术的瓶颈, 最终形成一批具有国际领先的非常规天然气探采用技术。

山西省《煤成气增储上产专项资金管理暂行办法的通知》中强化了煤成气增储上产专项资金的管理, 支

表 1 2017—2019 年山西省煤层气矿区出让情况
Table 1 Transfer of CBM mining areas in Shanxi Province from 2017 to 2019

序号	2017年山西省煤层气探矿权出让		2019年2月挂牌出让区块		2019年5月山西省煤层气探矿权中标		2019年12月挂牌出让区块
	区块名称	中标单位	区块名称	中标单位	区块名称	中标单位	区块名称
1	柳林石西区块	山西蓝焰煤层气集团有限责任公司	榆社-武乡区块	山西昔阳丰汇煤业有限公司	洪洞西区块		左权西区块
2	介休区块	山西美锦能源股份有限公司	武乡东区块	山西平遥煤化(集团)有限责任公司	洪洞区块		景尚东区块
3	平遥南区块	山西省平遥煤化(集团)有限责任公司			临汾区块		永乐南区块
4	和顺横岭区块	山西蓝焰控股股份有限公司			临汾西区块		洪洞西区块
5	和顺西区块	山西蓝焰煤层气集团有限责任公司			临汾南区块		洪洞区块
6	榆社东区块	山西省国新能源发展集团有限公司			浮山区块	山西聚源煤化有限公司	临汾区块
7	武乡南区块	山西蓝焰煤层气集团有限责任公司			古县南区块	山西安鑫煤业有限公司	临汾西区块
8	古县永乐北区块	山西乾通新能源开发集团有限公司			和顺马坊东区块	山西蓝焰煤层气集团有限责任公司	临汾南区块
9	古县永乐区块	山西安鑫煤业有限公司			昔阳沾尚区块	山西平遥峰岩煤焦集团有限公司	
10	安泽南区块	山西尚道实业有限公司			和顺横岭东区块	山西省平遥煤化(集团)有限责任公司	

持加快建设煤成气产业化技术和示范应用攻关项目、创新平台建设项目等,其中煤成气专项资金只针对新增的储量和产量补贴,提高了企业对煤成气增储上产的积极性。

单井产量低、资源动用率低、产能转化率低是制约煤层气基地产业化建设开发的主要因素^[21]。为实现煤层气商业化运作,煤层气开发主体在各区块内进行了积极探索。

延川南地处鄂尔多斯盆地东缘南段河东煤田南部,区内探明面积积达 251 km²,探明地质储量为 208 亿 m³,平均井深超 1 300 m,中石化临汾煤层气公司基于延川南深部煤储层大埋深、高煤阶、低孔隙度、低渗透率,储层压力系数低的地质特点,建立了深部高阶煤煤层气勘探开发地质理论、深部煤层气分区评价技术、深部煤层气开发的排采制度、深部煤层气低成本工程技术系列,通过科技攻关探索构建了以提高资源动用率为核心的地质工程一体化增效技术体系,试验的 21 口井中 19 口井实现单井日增产 400 m³。经多年精细化管控,延川南地区单井平均日产气量超 1 300 m³,区块日产气量超 100 万 m³,实现了延川南区块深部煤层气的商业化开发^[22-28]。

中石油煤层气公司紧抓山西省煤成气增储上产发展机遇,探索形成了埋深 800 m 以浅的煤层气勘探开发技术。具体包括:煤层气地质选区评价技术系列,煤层气高效建产区优选的地震采集和处理技术,储层保护与井壁稳定一体化的煤层气水平井钻完井技术,针对“低强度、高滤失、易伤害、裂缝复杂”煤层的压裂

增产技术,以井底流压为核心的煤层气智能排采技术,煤层气“三低”集输工艺等。推进老区产能挖潜,保德区块在年生产能力 5.5 亿 m³ 基础上实施“蜜点”挖潜,新井滚动扩边年产能增加 0.8 亿 m³,其作为我国首个大型中低阶煤煤层气田,历年累计探明地质储量 615 亿 m³^[29-33]。

中石油煤层气公司在鄂尔多斯盆地东缘确立大吉、石楼西、三交北为煤成气上产主战场,通过建立地质工程一体化平台,整体效率提升 30%。致密气动储采用水平井分段压裂技术,针对储层物性特征,优化压裂工艺,形成了适应不同砂岩储层的改造工艺和改造方法。排采阶段依据致密气低压、低产、小水量的生产特征,形成“以泡排为主、柱塞气举和速度管为辅”的排水采气工艺体系。中石油煤层气公司所属的三交区块年产气达 1.02 亿 m³、三交北区块年产气达 1.5 亿 m³、石楼西区块年产气达 8.2 亿 m³,大宁-吉县(临汾)区块年产气达 6.4 亿 m³。

中石油华北油田煤层气公司坚持技术创新驱动产业发展,坚定“一定、二探、三落实”的勘探评价技术路线,深入研究中深部煤层气富集高产规律,对控产要素综合预测进行创新,煤层气勘探评价实现了由“广撒网式”向“探寻高效优质储量”转移,持续提升储量品位,沁水盆地煤层气储量动用程度由“十二五”的 10% 提升至“十三五”的 43%,新增探明储量超 700 亿 m³,累计提交煤层气探明地质储量 2 386 亿 m³。

中石油华北油田煤层气公司开展的高阶煤煤层气成藏及控产机理研究,形成了成藏地质、勘探评价、

“四要素”控产、“疏导式”排采控制等理论,创新了集“勘探、钻井、压裂、排采、集输”于一体的煤层气配套工程技术体系,为煤层气开发、稳产、高产提供了技术支撑。郑庄老区开展低效区开发先导试验,对水平井施行交互式压裂,坚持疏导式排采管控,单井平均日产气量达到 $8\ 500\ \text{m}^3$,周边部分垂直井单井日增产 $550\ \text{m}^3$,盘活郑庄老区低效区煤层气储量 $70\ \text{亿}\ \text{m}^3$,建立起国内煤层气低效区资源盘活示范区^[34-35]。2021年6月,华北油田山西煤层气分公司日产气量突破 $400\ \text{万}\ \text{m}^3$,日产气量较年初增加超 $50\ \text{万}\ \text{m}^3$ 。

中联煤层气公司沁水盆地南部区块通过降压提产、储层改造、煤粉解堵和新技术应用等措施,保证了潘庄老区的稳产高产,薄煤层开发取得突破,单井平均日产气量 $6\ 149\ \text{m}^3$,呈现出巨大的开发潜力,为增储上产目标的实现提供了保证,储量方面,截至2020年底,已形成晋南、晋中、晋西陕东3个主要储量区^[14]。

2.4 “三气共采”激发勘探开发积极性

煤岩系中蕴含丰富的煤层气、致密砂岩气、页岩气,通过技术创新实现“三气共采”,可提高单井经济效益,激发企业勘探开发积极性,促进煤成气产业的发展。

在国家增储上产“七年行动计划”及山西省煤成气增储上产三年行动的合力推动下。各煤层气开发主体积极进行科技攻关,加大“三气共采”投资开发力度。

中联煤层气公司通过技术攻关,形成了储层评价、动态压裂等技术创新体系,通过小井眼钻井技术,大幅降低钻井周期。临兴区块采用煤系气勘探开发一体化模式进行建设,实现“当年钻井测试+当年建管道+当年投产销售”,极大提升了勘探开发的工程进度,降低了成本回收周期^[36]。

2016年,沁水盆地榆社-武乡区块进行了深部煤系三气分压合采试验,后期单井日产气量达到 $1\ 000\ \text{m}^3$,

实现了“三气共采”,稳产期近一年,取得了较好效果。2018年该区块内的榆社东区块被山西省列为“三气”共探共采重大科技项目基地^[37]。近年来临兴气田探索了煤层气、致密砂岩气合采技术,“十三五”国家科技重大专项中该区块煤系气合采的部分试验井在“煤层+砂岩层”合采效果较为稳定,预计示范区约60%的气井可实现“煤层+砂岩层”合采,对不适宜合层开采的地层,探索了先致密砂岩气后深部煤层气的同井接替合采方案,实现了煤成气的经济高效开发。在鄂尔多斯盆地东缘中联煤层气公司临兴区块通过“煤层气+致密气”“煤层气+页岩气”合采试验,多个试验井在“煤层+砂岩层”段压裂试气后实现高产,单井日产气量最高超过 $4\ 000\ \text{m}^3$ ^[4]。虽然“三气共采”的勘探开发在局部取得突破,但“三气共采”实现大规模开发仍需加大地质研究和技术创新的实践探索。

2.5 煤与煤层气共采“四区”联动井上下联合抽采模式

瓦斯是煤矿灾害主要来源之一,煤矿企业从自身安全生产出发,探索出了一套煤与煤层气共采理念,坚持以用促抽、以抽保安,为煤矿井下生产提供了强有力的安全保障,同时在国际上借助CDM项目出售碳排放指标赚取外汇的案例,改变了外界对煤矿瓦斯价值的理念^[38]。

科技创新推动技术发展进步,山西省煤矿瓦斯治理已从局部抽采,探索出了全矿区、全层位、全时段煤与煤层气共采“四区”(规划区、准备区、生产区、采空区)(图1)联动井上下联合抽采模式及技术体系。煤与煤层气共采“四区”联动井上下联合抽采模式解决了煤与煤层气共采的时空协调关系及煤矿采掘的时空接替问题,实现了安全高效、科学有序地开采煤炭与煤层气资源。煤与煤层气共采“四区”联动抽采技术体系坚持规划区地面超前预抽、煤矿准备区井上下联合抽采、生产区精准卸压抽采、煤炭采空区地面钻采。

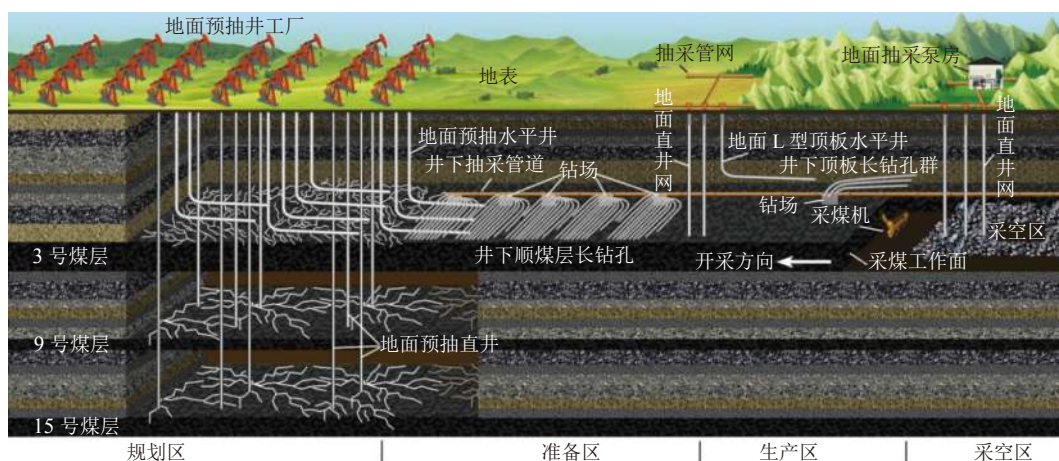


图1 煤与煤层气共采“四区”联动井上下联合抽采模式

Fig.1 Coal and CBM co-mining “four zones” combined with well up and down pumping mode

煤矿采前地面预抽井技术在晋城寺河矿实现煤层瓦斯含气量平均每年降低 1.36~2.4 m³/t, 东五盘区采煤速度提高 1 倍以上, 煤炭资源采出率提高 10% 以上, 在晋城成庄矿实现煤层瓦斯含气量最高每年降低 1 m³/t, 建成了山西省煤与瓦斯共采绿色开采示范矿井, 标志着山西省煤与瓦斯共采技术取得重大突破^[39-41]。通过煤矿采前地面预抽, 原晋煤集团瓦斯超限由 2006 年的 300 多次, 降至 2018 年的 3 次, 瓦斯事故基本杜绝^[42]。晋煤模式在阳泉矿区、西山矿区、柳林矿区实现地面规模化推广, 原晋煤集团地面煤层气年抽采量长期保持在 14 亿 m³。

煤矿准备区井上下联合抽采属加速抽采, 通过井下定向长钻孔与地面井压裂影响区沟通, 实现井上下联合抽采, 提高了地面煤层气抽采量, 缓解了矿井生产掘进难和生产衔接紧张等局面, 实现了准备区煤炭与煤层气协调开发。

生产区卸压抽采技术是结合井下工作面回采对煤储层扰动的影响, 充分利用地面采动井组或 L 型井, 对工作面回采过程中释放的瓦斯进行及时有效地抽采, 以保障上隅角瓦斯不超限。此技术在晋城矿区、大同矿区、阳泉矿区、西山矿区均进行了推广应用, 取得良好抽采效果。晋城矿区 YCCD-02 井在回采至井位处时, 日抽采纯量最大 3.79 万 m³, 运行期间平均日抽采量 1.56 万 m³, 单井累计抽采量超 3 157.75 万 m³。阳泉矿区新景矿地面 L 型水平井平均瓦斯日抽采纯量 1.3 万 m³, 累计抽采量 410 万 m³, 杜绝了瓦斯超限问题。大同矿区塔山矿工作面回采过程中绝对瓦斯涌出量达 35 m³/min, 采用地面采动垂直井组抽采瓦斯体积分数最高可达 28.69%, 平均 3.5%; 将上隅角瓦斯体积分数控制在 0.4% 以下, 保障了工作面安全高效生产^[43-44]。采空区地面抽采技术不仅在以晋城、西山、阳泉矿区为代表的高瓦斯矿井得到应用推广(表 2), 在大同矿区为代表的低瓦斯矿井也得到了应用推广。

表 2 煤矿采空区井生产数据
Table 2 Production data of goafs in the coal mine

井号	产量/(m ³ ·d ⁻¹)	甲烷质量分数/%
JCK-X	3 576	71
XSCK-X	859	65
YQCK-X	1 299	68
JZZQCK-X	2 658	78

2.6 矿权重叠的协调与共赢

为加快非常规天然气基地建设, 山西省鼓励企业间合作或调整矿业权范围等方式妥善解决重叠区内煤层气地面开发与煤矿生产的衔接问题, 经过多方探索形成了煤层气企业与煤炭主体协作开发的“三交模

式”、煤炭反哺煤层气开发的“华潞模式”、煤与煤层气四区联动共采的“晋城模式”^[4, 45]。

以中石油煤层气公司与吕梁地方煤矿为例, 多年来煤层气地面建设缓慢的症结在于矿权重叠严重, 为解决矿权重叠导致的利益矛盾, 临县政府、中石油煤层气公司及煤矿主体共同协调 2 种资源的开发机制, 在矿权重叠区, 中石油和煤炭开采企业相互配合, 利用联合勘探、联合开发、联合利用等方式从对立走向合作, 实现共赢^[46]。

煤层气开发与页岩气、致密砂岩气开发的不同在于除具有优化能源结构、保护生态环境的作用外, 还兼具保障煤矿安全生产、减少矿井风排瓦斯的现实意义。在当前的“碳中和、碳达峰”目标指引下, 随着煤矿开采逐年向深部扩展, 矿井瓦斯对煤矿安全生产的威胁日益严重, “先采气、后采煤、采煤采气一体化”对于煤层气开发主体与煤矿企业间进一步深化合作将是双方发展的共同需求^[47]。

2.7 煤层气分质分级利用

煤层气常被用作民用或工业燃料, 但在需求和技术的驱动下, 已被用作优质的化工原料, 煤层气的利用通常分为 3 个层级, 最低端是作为清洁燃料, 其次是利用煤层气生产高品质产品, 如陶瓷、玻璃; 更高一级的是更高附加值的产品, 如当前的煤层气生产金刚石、石墨烯、氢能等^[48]。2020 年 8 月在成庄矿实施的“煤矿低体积分数瓦斯直燃制热一体化技术”项目实现了 6%~30% 的低浓度瓦斯的安全高效利用, 项目集成了兆瓦级金属纤维燃烧技术、瓦斯直燃控制系统、安全燃烧阻爆系统, 开发了低浓度瓦斯直燃制热一体化技术, 该技术处于国内领先水平^[49]。

自 2012 年始, 太原理工大学研究煤层气中提取制备纳米洋葱碳, 并对纳米洋葱碳无法量产的世界难题成功破解, 2019 年完成中试并投产转化, 年销售额破千万元。2020 年太原理工大学和华阳新材料科技集团联手成功实现了金刚石的试生产, 煤层气资源探寻出一条“论克拉卖的价值链”。从纳米洋葱碳到金刚石, 山西实现了煤层气利用的高水平发展^[48]。

3 结论

a. 山西省践行国家能源战略发展, 立足自身丰富的煤炭与煤层气资源, 深入推进勘查开发体制机制改革, 推行煤层气矿业权退出机制以提高资源利用率, 通过市场竞争出让空白煤层气勘查区块, 实现资源高效配置, 促进煤成气资源的勘探开发, 为煤成气增储上产提供了政策支撑和资源保障。

b. 煤层气老区通过技术创新破解开发瓶颈, 实现稳产增产。“三气并举”实现新建区块产能快速释放,

降低投资回收期, 激发企业勘探开发积极性, 加速非常规天然气基地建设。

c. 规划区地面超前预抽、煤矿准备区井上下联合抽采、生产区精准抽采、煤炭采空区地面钻采构建起煤与煤层气共采“四区”联动抽采技术体系, 解决了煤矿采掘的时空接替问题, 在山西省重点煤矿区取得推广应用, 初步形成了我国煤矿区煤与煤层气协调开发模式, 为实现两种资源合理开发, 在保障煤矿安全、环保、高效发展等方面奠定了基础。

d. 煤层气是与煤伴生的清洁能源, 发展煤层气地面抽采符合国家碳中和、碳达峰战略要求。“先采气、后采煤、采煤采气一体化”是践行“双碳”目标实现的可靠路径, 地面开发煤层气对提升煤矿安全生产具有现实意义, 企业间创新合作模式是加快煤层气地面开发建设, 有效解决重叠区内煤层气地面开发与煤矿生产衔接问题的重要手段, 煤炭及煤层气两大产业合作共赢是协同发展的必由之路。

e. 煤层气作为传统的洁净、优质能源和化工原料, 依托需求与技术的双重创新驱动实现煤层气利用高质量发展, 增加煤层气这一基础燃料的附加值, 变身高端产品, 实现产业升级。

参考文献(References)

- [1] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625-1636.
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy (coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [2] 门相勇, 王陆新, 王越, 等. 新时代我国油气勘探开发战略格局与2035年展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 1-8.
MEN Xiangyong, WANG Luxin, WANG Yue, et al. Strategic pattern of China's oil and gas exploration and development in the new era and prospects for 2035[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 1-8.
- [3] 刘登娟, 李璞, 李新, 等. 中国矿业权出让制度改革回顾与展望[J]. 中国矿业, 2019, 28(9): 1-5.
LIU Dengjuan, LI Pu, LI Xin, et al. Review and prospect of market-oriented reform of China's mining rights transfer system[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(9): 1-5.
- [4] 姜杉钰, 王峰. 中国煤系天然气共探合采的战略选择与发展对策[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 152-159.
JIANG Shanyu, WANG Feng. Strategic choice and development countermeasures for the commingled exploration and exploitation of coal measure natural gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 152-159.
- [5] 张遂安, 张典坤, 彭川, 等. 中国煤层气产业发展障碍及其对策[J]. 天然气工业, 2019, 39(4): 118-124.
ZHANG Sui'an, ZHANG Diankun, PENG Chuan, et al. Obstacles to the development of CBM industry and countermeasures in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 118-124.
- [6] 门相勇, 韩征, 宫厚健, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发面临的挑战与机遇[J]. 天然气工业, 2018, 38(9): 10-16.
MEN Xiangyong, HAN Zheng, GONG Houjian, et al. Challenges and opportunities of CBM exploration and development in China under new situations[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 10-16.
- [7] 介丁非, 徐向阳, 郭丁丁, 等. 我国鼓励煤层气产业发展的创新政策研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(3): 11-17.
JIE Dingfei, XU Xiangyang, GUO Dingding, et al. Research on innovation policies related to promoting the development of China's coal bed methane industry[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(3): 11-17.
- [8] 张遂安, 刘欣佳, 温庆志, 等. 煤层气增产改造技术发展现状与趋势[J]. 石油学报, 2021, 42(1): 105-118.
ZHANG Sui'an, LIU Xinjia, WEN Qingzhi, et al. Development situation and trend of stimulation and reforming technology of coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(1): 105-118.
- [9] 孙钦平, 赵群, 姜馨淳, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 65-76.
SUN Qinqing, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 65-76.
- [10] 曹磊, 郭英海. 沁水盆地东部武乡区块泥页岩孔隙结构特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 230-236.
CAO Lei, GUO Yinghai. Study on pore structure characteristics of mud shale in Wuxiang block of eastern Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 230-236.
- [11] 王争, 李国富, 周显俊, 等. 山西省废弃矿井煤层气地面钻井开发关键问题与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 86-95.
WANG Zheng, LI Guofu, ZHOU Xianjun, et al. Key problems and countermeasures of CBM development through surface boreholes in abandoned coal mines of Shanxi Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 86-95.
- [12] 山西省国土资源厅. 山西省煤炭采空区煤层气资源调查评价报告[R]. 太原: 山西省国土资源厅, 2017.
- [13] 齐宇, 梁建设, 柳迎红, 等. 煤系地层地震储层预测技术研究和应用: 以鄂尔多斯盆地临兴气田太2段为例[J]. 地质科技情报, 2018, 37(1): 252-257.
QI Yu, LIANG Jianshe, LIU Yinghong, et al. Coal measures stratigraphic reservoir seismic prediction technology applied in Tai2 segment in Linxing gas field in Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(1): 252-257.
- [14] 谢玉洪. 低油价背景下中国海油油气勘探进展与发展思考[J]. 中国海上油气, 2021, 33(1): 1-12.
XIE Yuhong. Progress and thinking of CNOOC oil and gas exploration under the background of low oil prices[J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(1): 1-12.
- [15] 温声明, 周科, 鹿倩. 中国煤层气发展战略探讨: 以中石油煤层气有限责任公司为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(5): 129-136.
WEN Shengming, ZHOU Ke, LU Qian. A discussion on CBM development strategies in China based upon a case study of PetroChina coalbed methane Co., Ltd[J]. Natural Gas Industry, 2019,

- 39(5): 129–136.
- [16] 袁亮, 杨科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 16–24.
YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 16–24.
- [17] 朱庆忠, 鲁秀芹, 杨延辉, 等. 郑庄区块高阶煤层气低效产能区耦合盘活技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2547–2555.
ZHU Qingzhong, LU Xiuqin, YANG Yanhui, et al. Coupled activation technology for low-efficiency productivity zones of high-rank coalbed methane in Zhengzhuang block, Shanxi, China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2547–2555.
- [18] 秦勇, 吴建光, 李国璋, 等. 煤系气开采模式探索及先导工程示范[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2513–2522.
QIN Yong, WU Jianguang, LI Guozhang, et al. Patterns and pilot project demonstration of coal measures gas production[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2513–2522.
- [19] 山西自然资源厅. 关于印发《山西省煤层气资源勘查开发规划(2016–2020年)》的通知[EB/OL]. (2017–11–23)[2019–03–06]. <http://www.Shanxilr.gov.cn/Article/ShowArticle.asp?ArticleID=46408.html>.
- [20] 山西省煤层气勘查开采管理办法[N]. 山西日报, 2020–03–31(007).
- [21] 朱庆忠, 杨延辉, 左银卿, 等. 中国煤层气开发存在的问题及破解思路[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 96–100.
ZHU Qingzhong, YANG Yanhui, ZUO Yinqing, et al. CBM development in China: Challenges and solutions[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 96–100.
- [22] 陈刚, 胡宗全. 鄂尔多斯盆地东南缘延川南深层煤层气富集高产模式探讨[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1572–1579.
CHEN Gang, HU Zongquan. Discussion on the model of enrichment and high yield of deep coalbed methane in Yanchuannan area at southeastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1572–1579.
- [23] 吴聿元, 陈贞龙. 延川南深部煤层气勘探开发面临的挑战和对策[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(4): 1–11.
WU Yuyuan, CHEN Zhenlong. Challenges and countermeasures for exploration and development of deep CBM of south Yanchuan[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 1–11.
- [24] 陈贞龙. 延川南深部煤层气田地质单元划分及开发对策[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 13–20.
CHEN Zhenlong. Geological unit division and development countermeasures of deep coalbed methane in southern Yanchuan block[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 13–20.
- [25] 巢海燕, 聂志宏, 王伟, 等. 临汾区块煤层气井提产阶段排采控制研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 218–224.
CHAO Haiyan, NIE Zhihong, WANG Wei, et al. Study on gas drainage control of CBM well in stage of increasing production in Linfen area[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 218–224.
- [26] MOU Pengwei, PAN Jienan, WANG Kai, et al. Influences of hydraulic fracturing on micro fractures of high-rank coal under different in-situ stress conditions[J]. Fuel, 2021, 287: 119566.
- [27] WANG Kai, PAN Jienan, WANG Enying, et al. Potential impact of CO₂ injection into coal matrix in molecular terms[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 401: 126071.
- [28] WANG Xianglong, PAN Jienan, WANG Kai, et al. Characterizing the shape, size, and distribution heterogeneity of pore-fractures in high rank coal based on X-ray CT image analysis and mercury intrusion porosimetry[J]. Fuel, 2020, 282: 118754.
- [29] 王坤, 张国生, 李志欣, 等. 山西省煤层气勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国煤层气, 2020, 17(6): 39–43.
WANG Kun, ZHANG Guosheng, LI Zhixin, et al. Current status and trends of coalbed methane exploration and development in Shanxi Province[J]. China Coalbed Methane, 2020, 17(6): 39–43.
- [30] 张亮, 赵培华, 廖黔渝, 等. 煤层气公司科技管理实践与创新[J]. 石油科技论坛, 2018, 37(2): 9–13.
ZHANG Liang, ZHAO Peihua, LIAO Qianyu, et al. Practice and innovation of PetroChina CBM company limited's technological management[J]. Oil Forum, 2018, 37(2): 9–13.
- [31] 魏迎春, 李超, 曹代勇, 等. 煤层气开发中煤粉产出机理及管控措施[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(2): 68–73.
WEI Yingchun, LI Chao, CAO Daiyong, et al. The output mechanism and control measures of the pulverized coal in coalbed methane development[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2): 68–73.
- [32] 吴建军, 刘学鹏, 孙晓锐, 等. 煤层气井缝网改造施工参数优化及裂隙形态监测技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 176–181.
WU Jianjun, LIU Xuepeng, SUN Xiaorui, et al. Research on optimization crack monitoring technology for construction parameters of coalbed methane well seam reconstruction[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 176–181.
- [33] 王创业, 方惠军, 詹顺, 等. 连续管定向喷射孔拖动压裂技术在煤层气水平井中的应用[J]. 天然气工业, 2018, 38(增刊1): 143–147.
WANG Chuangye, FANG Huijun, ZHAN Shun, et al. Application of continuous tube directional sand blasting perforation driving fracturing technology in coalbed methane horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(Sup.1): 143–147.
- [34] 朱庆忠, 杨延辉, 左银卿, 等. 对于高煤阶煤层气资源科学开发的思考[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 55–60.
ZHU Qingzhong, YANG Yanhui, ZUO Yinqing, et al. On the scientific exploitation of high-rank CBM resources[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(1): 55–60.
- [35] 胡秋嘉, 毛崇昊, 石斌, 等. 沁水盆地南部高煤阶煤层气井“变速排采–低恒套压”管控方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1795–1803.
HU Qiujia, MAO Chonghao, SHI Bin, et al. “Variable speed drainage–low casing pressure” control method of high rank CBM wells in south Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1795–1803.
- [36] 曲艺. 瓦斯“突围”——煤层气开发利用的中联实践[N]. 中国电力报, 2021–04–10(007).
- [37] 宋儒, 苏育飞, 陈小栋. 山西省深部煤系“三气”资源勘探开发进展及研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(1): 53–58.
SONG Ru, SU Yufei, CHEN Xiaodong. Exploration and exploitation progress and study on deep coal measures “triple-gas” re-

- sources in Shanxi Province[J]. *Coal Geology of China*, 2019, 31(1): 53–58.
- [38] 杨晓峰. 坚持创新驱动引领加快转型升级步伐为推动煤炭工业平稳健康发展做出积极贡献[J]. *中国煤炭工业*, 2017(10): 25–28.
- YANG Xiaofeng. Adhere to innovation-driven leading to accelerate the pace of transformation and upgrading and make positive contribution to promote the steady and healthy development of coal industry[J]. *China Coal Industry*, 2017(10): 25–28.
- [39] 李国富, 李贵红, 刘刚. 晋城矿区典型区煤层气地面抽采效果分析[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9): 1932–1937.
- LI Guofu, LI Guihong, LIU Gang. Analysis on the ground extraction effect of coal-bed methane at typical area in Jincheng, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9): 1932–1937.
- [40] 杨建超, 李贵红, 刘钰辉, 等. 晋城地区煤层气井多层合采效果评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(6): 26–31.
- YANG Jianchao, LI Guihong, LIU Yuhui, et al. Evaluation of coalbed methane drainage effect for multi-target seams in Jincheng region[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(6): 26–31.
- [41] 龙威成, 孙四清, 李国富. 煤矿区地面煤层气抽采效果评价方法探讨: 以寺河煤矿某区块为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2016, 44(6): 55–58.
- LONG Weicheng, SUN Siqing, LI Guofu. Evaluation method of coalbed methane surface drainage effect in coal mines: Take a block of Sihe mine as an example[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(6): 55–58.
- [42] 孙茂远. 煤层气产业发展步入关键“窗口期”[N]. *中国能源报*, 2019–04–08(014).
- [43] 李国富, 付军辉, 李超, 等. 山西重点煤矿采动区煤层气地面抽采技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12): 83–89.
- LI Guofu, FU Junhui, LI Chao, et al. Surface drainage technology and application of CBM in key mining areas of Shanxi Province[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12): 83–89.
- [44] 张为, 李兵, 张永成. 低瓦斯矿井高产高效工作面瓦斯地面抽采技术[J]. *煤矿开采*, 2019, 24(1): 136–139.
- ZHANG Wei, LI Bing, ZHANG Yongcheng. Coalbed methane surface drainage technology of high output and efficiency working face of low methane coal mine[J]. *Coal Mining Technology*, 2019, 24(1): 136–139.
- [45] 黄立君. 煤层气与煤炭资源协调开发的山西经验[J]. *煤炭经济研究*, 2020, 40(9): 52–57.
- HUANG Lijun. Shanxi's experience in coordinated development of coalbed methane and coal resources[J]. *Coal Economic Research*, 2020, 40(9): 52–57.
- [46] 徐祖成, 李延祥. 中国采气采煤协调发展的“三交模式”[J]. *天然气工业*, 2010, 30(6): 106–108.
- XU Zucheng, LI Yanxiang. Harmonious development of gas and coal co-exploitation: A Sanjiao mode[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(6): 106–108.
- [47] 王若曦. 让非常规气开发更“争气”——我国大力推进非常规天然气增储上产[N]. *中国电力报*, 2021–09–11(005).
- [48] 李林霞. 煤层气“长”出宝贝来[N]. *山西日报*, 2021–01–29(004).
- [49] 史忠强. 煤矿低浓度瓦斯直燃制热一体化技术[R]. 晋城: 山西铭石煤层气利用股份有限公司, 2020.

(责任编辑 范章群)