



煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式与技术体系

李国富 张遂安 季长江 李军军 王朝帅

引用本文:

李国富, 张遂安, 季长江, 等. 煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式与技术体系[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 14–25.

LI Guofu, ZHANG Suian, JI Changjiang. Mechanism and technical system of ground and underground combined drainage of CBM in “four region linkage” in coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 14–25.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-1076>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势

Progress and trend of key technologies of CBM development and utilization in China coal mine areas

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 1–13 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq2022-1641>

新疆大倾角多煤组煤矿区煤层气开发利用进展与前景

Progress and prospects of coalbed methane development and utilization in coal mining areas with large dip angle and multiple coal groups in Xinjiang

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 162–172 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq2022-1325>

晋城寺河井区煤矿采空区煤层气地面抽采关键技术研究

Study on key technology for surface extraction of coalbed methane in coal mine goaf from Sihe Wells Area, Jincheng

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 240–247 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.020>

晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展

Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobbs of Jincheng Mining Area

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 204–211 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6f9a3691-b7fb-4cfa-889f-363b9fadbf0c>

倾斜碎软煤层群煤层气协调开发关键技术

Key technologies for coordinated development of coalbed methane in inclined soft coal seam groups: a case study of Aiweigou Mining Area

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 211–220 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0005>

淮南矿区松软低透煤层煤层气开发利用技术与思考

Thinking and utilization technology of coalbed methane in soft and low permeability coal seams in Huainan Mining Area

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 26–35 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-38>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李国富,张遂安,季长江,等. 煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式与技术体系[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 14-25.

LI Guofu, ZHANG Suian, JI Changjiang, *et al.* Mechanism and technical system of ground and underground combined drainage of CBM in “four region linkage” in coal mining area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 14-25.

煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式与技术体系

李国富^{1,2}, 张遂安³, 季长江^{1,2,4}, 李军军^{1,2}, 王朝帅^{1,2}

(1. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 山西 晋城 048012; 2. 易安蓝焰煤与煤层气共采技术有限责任公司, 山西 晋城 048012; 3. 中国石油大学(北京), 北京 102249; 4. 河南理工大学, 河南 焦作 454000)

摘要:为了更好地实现高瓦斯矿区煤炭与煤层气 2 种资源的安全高效协调开发, 在“十一五”“十二五”研发的煤层气“三区联动”立体抽采模式基础上, 依托“十三五”国家科技重大专项持续攻关, 并紧密结合山西重点煤矿区生产实际, 创新研发了全矿区、全层位、全时段的煤矿区煤层气“四区(规划区、准备区、生产区、采空区)联动”井上下联合抽采模式(新晋城模式)和系列技术体系, 在山西重点煤矿区得到广泛应用并取得了良好效果。煤矿规划区煤层气地面抽采技术早期主要采用垂直井、定向井、水平井等技术, 现已发展至以分段压裂水平井为主导的井工厂化集约开发模式与技术。经十五年的地面超前预抽, 晋能控股寺河矿东五盘区 3 号煤层平均降幅超过 55%, 该盘区的 5310、5311 工作面已顺利完成安全高效采煤, 实现了高瓦斯煤层的低瓦斯开采。准备区煤层气井上下联合抽采技术充分利用了压裂影响区渗透率大幅提升和井下开放空间抽采生产压差增大的优势, 构建了立体抽采网络, 提高了煤层气抽采效率, 有效缓解了矿井抽掘采接替紧张, 促进了高产高效。基于生产区采动活动剧烈和井下工程全开放特点, 运用定向钻机精准完成区域递进式顺层钻孔、穿层钻孔、高位定向长钻孔等, 精准均衡抽采生产区煤层气, 有效解决了常规钻孔轨迹不可控、易形成抽采盲区、抽采效果差等难题, 实现了生产区井下抽采精准达标, 确保万无一失。针对煤炭采空区煤层气资源赋存规律不清、资源量评估困难、安全钻采技术缺乏等难题, 创建了采空区煤层气资源量计算方法, 研发了煤矿采空区地面钻采系列技术, 已在晋城、西山、阳泉等山西重点煤矿区完成了 129 口井的示范推广, 累计抽采利用煤层气 1.28 亿 m³, 相当于减排二氧化碳 192 万 t。“四区联动”井上下联合抽采模式和系列技术体系在山西重点煤矿区的成功, 有效实现了煤层气“减少温室气体排放、保障煤矿安全生产、补充绿色气体能源”三重功效, 为我国煤层气产量由 2006 年的 25.8 亿 m³ 提升到 2020 年的 191.7 亿 m³ 提供了有力的支撑, 同时也为山西重点煤矿区煤炭采深逐年加深、矿井生产条件日趋复杂、生产矿井数量持续减少、煤炭总产量稳步增长提供了有效的保障。

关键词:煤矿区; 煤层气; 四区联动; 规划区; 准备区; 生产区; 采空区

中图分类号: P618 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2022)12-0014-12

Mechanism and technical system of ground and underground combined drainage of CBM in “four region linkage” in coal mining area

LI Guofu^{1,2}, ZHANG Suian³, JI Changjiang^{1,2,4}, LI Junjun^{1,2}, WANG Chaoshuai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining, Jincheng 048012, China; 2. Yi'an-Lanyan Coal and CBM Co-mining Technology CO., Ltd., Jincheng 048012, China; 3. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 4. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

收稿日期: 2022-07-07 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.mcq22-1076

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045, 2016ZX05067); 山西省科技重大专项资助项目(20191102001)

作者简介: 李国富(1965—), 男, 山西晋城人, 教授级高级工程师, 博士。E-mail: 13834068216@163.com

Abstract: In order to better realize the safe and efficient coordinated development of coal and CBM resources in high gassy mining areas, the four regions (planning region, preparation region, production region and coal mined-out region) linkage ground-underground combined drainage mode (new Jincheng mode) and a series of technical systems of CBM in the whole mining area, all stratum layer and all time were innovatively developed. Relying on the “Thirteen Five - Year Plan” national major science and technology projects to continue to tackle key problems, closely combining with the actual production of key coal mining areas in Shanxi Province. This new mode upgraded from the “three regions linkage” three-dimensional extraction mode of CBM developed during the “Eleventh Five-Year” and the “Twelfth Five-Year” Plan and it had been widely used in key coal mining areas of Shanxi Province and achieved good results. The ground pre-drainage technology of CBM in the planning area mainly used vertical wells, directional wells, horizontal wells and other technologies in the early stage. But now it had developed into a well factory intensive development mode and technology dominated by multi-fractured horizontal well. After 15 years of ground pre-drainage, the average reduction of No.3 coal seam in East Fifth Panel of Sihe Mine of Jinneng Holding Group had reached 55%. The No.5310 and No.5311 working faces in this panel had successfully completed safe and efficient coal mining, realizing low gas mining in high gas content coal seam. The ground-underground combined drainage technology of CBM in the preparation region made full use of the advantages of the greatly increased permeability in the fracturing affected area and the increased production pressure difference of underground open space drainage. Which formed a three-dimensional drainage network, improved the drainage efficiency, effectively alleviated the tension in the replacement of mining, and promoted high production and efficiency. Based on the characteristics of intense mining activities in the production area and full opening of underground projects, directional drilling rigs were used to accurately complete regional progressive seam drilling, through hole drilling, and high directional long borehole, and accurately and evenly extract the CBM in the production region. This effectively solved the problems of uncontrollable conventional drilling trajectory, easy to form blind areas for drainage, and poor drainage effect, and realized the accurate standard of underground drainage in the production region, ensuring no risk. In view of the problems such as unclear occurrence law of CBM resources in the coal mined-out region, difficulty in resource assessment, and lack of safe drilling and mining technology, the calculation method of CBM resources in the coal mined-out region was created. And a series of technologies for ground drilling and mining in coal mined-out region were developed. 129 wells had been demonstrated and promoted in Shanxi key coal mine areas such as Jincheng, Xishan, Yangquan, etc., 128 million cubic meters of CBM had been pumped and utilized, and 1.92 million tons of carbon dioxide had been reduced. The success of the ‘four region linkage’ ground-underground combined drainage mode and a series of technical systems in key coal mining areas of Shanxi had effectively achieved the triple effect of CBM “reducing greenhouse gas emissions, ensuring coal mine safety production, and supplementing green gas energy”. Which provided strong support for China’s CBM production to increase from 2.58 billion cubic meters in 2006 to 19.17 billion cubic meters in 2020. At the same time, it also provided an effective guarantee for the deepening of coal mining depth year by year in key coal mining areas of Shanxi Province, the increasingly complex mine production conditions, the continuous reduction of the number of production mines, and the steady growth of the total coal output.

Key words: coal mining area; coalbed methane; four region linkage; planning region; preparation region; production region; coal mined-out region

0 引 言

煤炭在我国一次能源消费中占主体地位, 未来很长一段时间, 煤炭在我国能源结构中的“压舱石、稳定器”的地位不会发生根本改变。截至 2019 年, 我国共有煤矿 5 695 处, 其中煤与瓦斯突出矿井达 757 处, 高瓦斯矿井 1 024 处^[1]。瓦斯仍是我国煤矿安全生产的头号威胁, 煤层气开发具有“减少温室气体排放、保障煤矿安全生产、补充绿色气体能源”三重功效, 煤矿区煤层气开发是我国煤层气开发的主战场, 其中开展煤矿区煤层气和煤炭协调开发理论与技术研究刻不容缓, 特别是在高瓦斯矿井规划区进行地面煤层气超前预抽, 可在煤矿生产前降低煤层瓦斯含量, 减小井下瓦斯抽采压力, 提高抽采效率,

保障矿井安全生产。“十一五”国家科技重大专项实施期间, 开始探索解决采煤采气一体化^[2], 以及地面煤层气开发、井下煤层气抽采与煤矿生产相结合^[3]等问题。“十二五”期间, 进行了煤矿区煤层气与煤炭协调开发模式初探^[4-6], 首次基于瓦斯抽采、煤炭开采时空接替关系, 总结凝练了适合高瓦斯矿区特点的“三区(煤炭生产规划区、准备区、生产区)联动”立体抽采模式^[7]。此后, 对煤矿区煤层气“三区联动”立体抽采理论与模式进行了深化与完善^[8-10]。在“十三五”国家科技重大专项的持续攻关下, 丰富了煤矿区煤层气“三区联动”抽采技术体系理论基础和内涵^[11-13], 在充分总结现阶段煤矿区煤层气“三区联动”立体抽采模式基础上, 结合煤矿高效生产中出现的难点, 深入探究煤层气和煤炭协调开发问题, 对煤

矿区煤与煤层气协调开发模式进行了优化和细分,创新发展了全矿区、全层位、全时段的煤矿区煤层气“四区(规划区、准备区、生产区、采空区)联动”井上下联合抽采机制和开发模式(新晋城模式),创新研发相配套的系列技术体系,并在山西重点煤矿区得到了广泛推广与应用。

应用该模式及系列技术,在全国煤炭采深逐年加深、矿井生产条件日趋复杂、生产矿井数量持续减少、煤炭总产量稳步增长的条件下,煤与瓦斯突出事故发生次数由“十一五”初2006年的39次,死亡239人^[14],降低到“十三五”末2020年的7起,死亡30人^[15]。以该套技术为支撑,《防治煤与瓦斯突出细则》(2019版)明确规定将地面采前预抽治理瓦斯作为主要技术措施,按照“一矿一策、一面一策”的要求,实现“先抽后建、先抽后掘、先抽后采、预抽达标”;按突出矿井设计的矿井建设工程开工前,应当对首采区内评估有突出危险且瓦斯含量 $\geq 12 \text{ m}^3/\text{t}$ 的煤层进行地面预抽井预抽瓦斯,预抽率应达到30%以上^[16-17]。我国煤层气产量由2006年的25.8亿 m^3 (其中地面煤层气抽采量1亿 m^3 ,井下煤层气抽采量24.8亿 m^3)提升到了2020年的191.7亿 m^3 (其中地面煤层气抽采量63.7亿 m^3 ,井下煤层气抽采量128亿 m^3)。

在充分融合煤炭与石油行业的最新理论与工艺技术发展的基础上,煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式与技术体系开创性地从全部矿区范围内、全体可采煤层、全矿井生命周期以及煤炭与煤层气2种资源禀赋特征等方面全面综合研究,为进一步提升煤矿区煤与煤层气协调开发水平,保障矿井安全生产,提高煤层气资源抽采效率,实现节能减

排等方面进行了较为深入的研发与示范。

1 煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采模式理论基础

1.1 “四区联动”井上下联合抽采模式内涵

煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采的核心内涵是:按照矿井采掘现状和衔接规划,将矿井划分成煤炭生产规划区(简称“规划区”)、煤炭开拓准备区(简称“准备区”)、煤炭生产区(简称“生产区”)和煤炭采空区(简称“采空区”)4个区域,并针对不同区域的特点,选择相应的煤层气(瓦斯)抽采方式,将地面预抽与井下抽采相结合,实现各区之间的有序递进,统筹规划煤炭与煤层气2种资源,先抽气后采煤,保障矿井建设与生产的有序衔接。

“井上下联合”则分别体现在空间与时间2方面,空间上表现为地面抽采与井下抽采多种技术相结合;时间上则表现为规划区、准备区、生产区、采空区在煤层气抽采的时序上层层递进,与煤矿开采衔接紧密关联。

根据采矿权范围内煤层气及煤炭资源禀赋特点,结合煤层气抽采技术与煤炭开采工艺,对全矿区所有可采煤层气进行采前抽、采中抽、采后抽等全层位、全时段精准科学抽采。形成全矿区、全层位、全时段整体抽采模式,实现煤层气与煤炭2种资源安全高效协调开发。煤矿区煤层气四区联动井上下联合抽采是以“规划区地面预抽全域快降、准备区联合抽采高产高效、生产区井下抽采精准达标、采空区地面钻采消患减排”为技术架构,实现了安全高效、科学有序地开采煤炭和煤层气两种资源,达到了“减少温室气体排放、保障煤矿安全生产、补充绿色气体能源”三重功效,如图1所示。

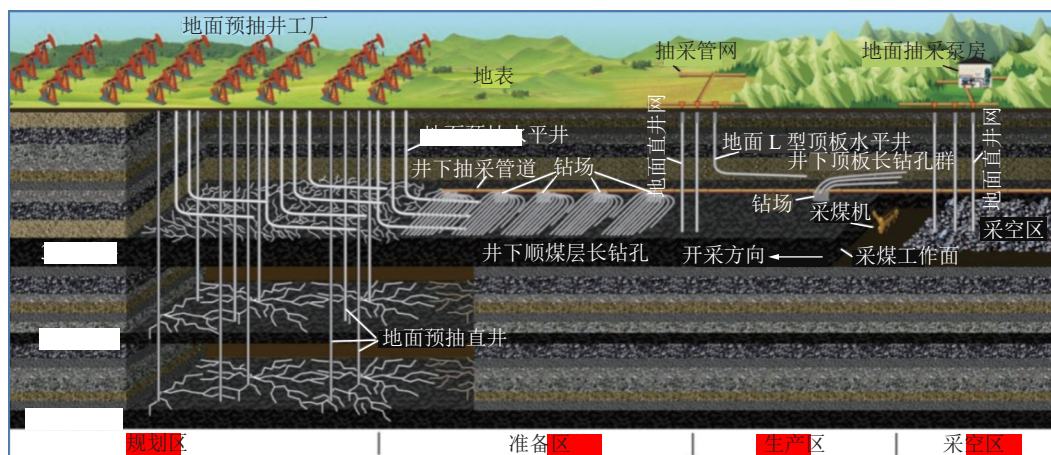


图1 “四区联动”井上下联合抽采模式(新晋城模式)示意

Fig.1 Up-down mine combined gas drainage mode of “four region linkage” (new Jincheng Mode)

1.2 “四区”转换临界指标

根据国家关于煤矿安全生产的有关规定,煤矿安全掘进和安全回采要求煤层瓦斯含量和瓦斯压力必须低于安全允许阈值。经数模、物模以及生产实践验证,创立了整套安全采掘允许阈值(C_s 、 P_s 、 C_j 、 P_j)预测模型,如图2所示,其中安全生产瓦斯含量允许阈值(C_s)预抽模型如下:

$$C_s = C_{ic}(1 - R) + \beta \epsilon \frac{M_c S_h V_h}{nP} \quad (1)$$

$$\eta_L = (C_{ic} - C_s) / C_{ic} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_s 为安全生产容许瓦斯含量, m^3/t ; C_{ic} 为煤层原始瓦斯含量, m^3/t ; R 为解吸率; β 为煤炭采出率, ϵ 为影响因子; M_c 为回风流中甲烷最高允许浓度, %; S_h 为回风巷断面面积, m^2 ; V_h 为回风巷允许风速, m/s ; n 为工作面前方影响距离与推进速度的比值; P 为单位时间煤炭产量, t/s ; η_L 为最低预抽采率, % (采煤与掘进工作面均适用)。

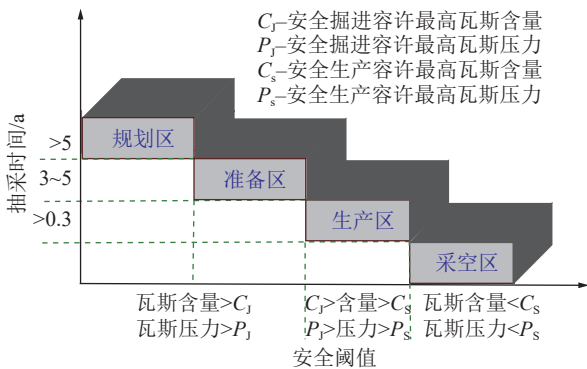


图2 煤与煤层气共采“四区”转换条件

Fig.2 Four region conversion conditions of coal and CBM co-mining

若将煤层瓦斯含量由原始含气量降为安全容许值($8 m^3/t$), 各区的抽采时间阈值为

$$(Q_0 - C_p)M = \int_0^{T_1} q_1 + \int_0^{T_2} q_2 + \int_0^{T_3} q_3 + \int_0^{T_4} q_4 \quad (3)$$

式中: Q_0 为原始瓦斯含量, m^3/t ; C_p 为煤炭生产时煤层气含量阈值, m^3/t ; M 为煤炭资源, t ; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4

分别为生产规划区、开拓准备区、煤炭生产区和煤炭采空区的煤层气抽采时间, \min ; q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 分别为生产规划区、开拓准备区、煤炭生产区和煤炭采空区的煤层气抽采量, m^3 。

1.3 “四区联动”井上下联合抽采技术体系

依据煤矿开采安全允许阈值预测模型和煤与煤层气共采“四区”时空划分特点,建立了两者间的对应关系。在此基础上,采用安全掘进容许最高瓦斯含量(C_j)、安全掘进容许最高瓦斯压力(P_j)、安全生产容许最高瓦斯含量(C_s)和安全生产容许最高瓦斯压力(P_s)等参数,划分了“四区”的安全界限,并结合煤层气(瓦斯)抽采技术特点,形成了针对“四区”的煤层气抽采技术体系,见表1。

煤矿区煤层气“四区联动”抽采技术体系,明确了矿井“四区”瓦斯抽采的科学布局和时空接替关系,各区适用的抽采方式,使煤与煤层气协调开发更加科学、紧凑和实用,解决了一直困扰高瓦斯矿井的抽、建、掘、采衔接紧张问题,为矿井生产和瓦斯抽采的协调提供了技术支撑。

1.4 “四区”动态演化过程

规划区、准备区、生产区和采空区“四区”的划分不是一成不变的,每个区的范围、功能和作用均会随着煤矿生产采掘作业的推进而动态演变。一般而言,规划区预抽5~10 a后将转化为准备区,准备区抽采3~5 a后转化为生产区,生产区随后又转化为采空区,如图3所示。

2 煤矿区煤层气“四区联动”井上下联合抽采技术体系及应用

2.1 规划区地面预抽技术体系

规划区是指煤炭资源在5~10 a甚至更长时间以后才进行矿井建设或采掘作业的区域,为煤层气预抽预留充分时间。

煤矿规划区煤层气地面抽采技术早期主要采用垂直井、定向井、水平井等技术,当前发展到以分段

表1 煤矿区煤层气“四区联动”抽采技术体系

Table 1 Four region linkage gas drainage technical system of CBM in coal mining area

抽采区域	规划区	生产矿井或在建矿井		
		准备区	生产区	采空区
抽采条件	原始煤层瓦斯含量高于 $16 m^3/t$ 时,至少提前8~10 a超前预抽	提前3~5 a实施,先抽后采	半开放条件下气相渗流瓦斯含量低于 $8 m^3/t$,瓦斯压力低于 $0.74 MPa$	卸压开放条件下气相渗流顶底板及其覆岩被破坏后的采空区
抽采顺序	超前预抽	煤与煤层气共采先抽后采	煤与煤层气共采边抽边采	采后抽采
抽采模式	地面抽采	井上下联合抽采、采动区抽采	井下精准抽采和采动区抽采	采空区抽采

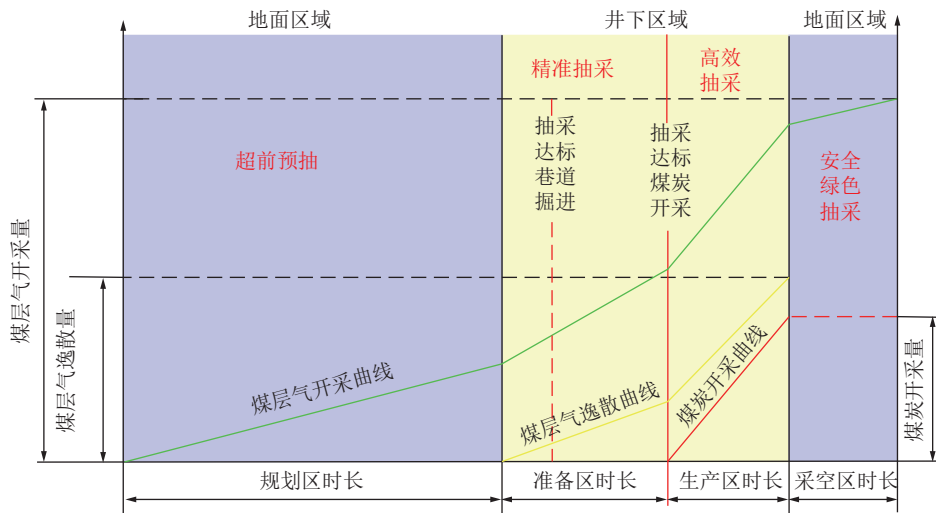


图3 “四区”动态演化过程示意

Fig.3 Dynamic evolution process of four region linkage

压裂水平井为主导的井工厂化集约开发模式与技术。该技术主要针对地面直井存在受地形影响大、作业模式分散、井网密度大、工程量多、施工周期长、管网集输难度高、开采效率低、土地占用量大等严重制约煤层气开发效率的问题,在优选煤层气富集靶区的基础上,创立了煤矿区煤层气井工厂化集约开发模式,如图4所示。煤层气井工厂化开发通常由4组以上水平井构成,将钻井由分散式转向集中式布置,研发了煤层气评价、钻井、压裂、排采和集输等一体化开发技术。通过扩大水平井辐射范围,增加了抽采面积,降低了钻井成本,实现了群式布井、规模施工,统一协调的煤矿规划区大规模超前地面预抽。

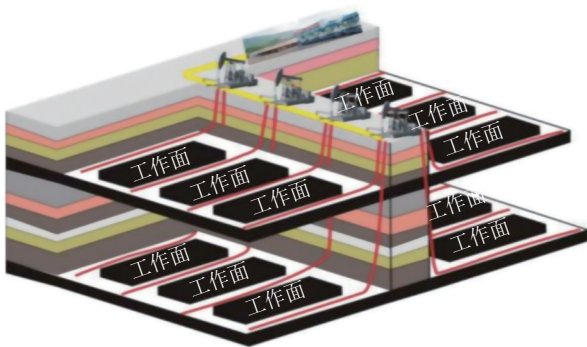


图4 煤层气井工厂化作业井场布局示意

Fig.4 Sketch of well site layout for CBM well factory platform

在规划区煤层气富集靶区评价的基础上,建立了煤矿区煤层气水平井产能预测模型。

$$Q = \int_0^T q_{sg} dt = \int_0^T \frac{CK_a k_{rg} h (\bar{P} - P_{wf})}{K_r \mu_g B_g \left[\ln \left(0.472 \frac{r_e}{r_w} + S \right) \right]} dt \quad (4)$$

式中: Q 为累计产气量, m^3 ; t 为给定时间段; q_{sg} 为气

体流量, m^3 ; C 为多煤层开采影响系数; K_a 为绝对渗透率, $10\sim 15 m^2$; K_{rg} 为气体的相对渗透率, $10\sim 15 m^2$; h 为煤层厚度, m ; \bar{P} 为抽采区域的平均压力, MPa ; P_{wf} 为井底流压, MPa ; K_r 为取决于单位制的系数; μ_g 为气体粘度, $MP \cdot as$; B_g 为气体地层体积系数; r_e 为抽采半径, m ; r_w 为井筒半径, m ; S 为表皮因子。

与直井分散开发相比,以井工厂化开发的5口水平井为例,每个平台节约了80%的土地占用、道路工程、供电工程、管道工程等,极大降低了生产成本。同时集中化作业模式缩短了施工作业时间,提高了生产效率。

基于煤矿区煤层气井工厂化开发模式与技术,试验了多个井工厂平台。其中,SHH02井工厂平台共施工了5口水平井,井型均为L型单分支分段压裂水平井,分别试验了滑套压裂、水力喷射压裂、泵送桥塞分段压裂三种方式。整个平台日产量约50000 m^3 ,生产数据如图5所示。

晋能控股集团寺河矿作为典型的高瓦斯突出矿井,经二十多年的规划区地面预抽,实现了规划区煤层气含量的全域快降,矿井瓦斯超限次数由最高年份的28次,降低到近些年的0次,提高了生产效率,节约了生产成本。在寺河矿东五盘区,地面预抽效果更为明显。寺河矿东五盘区共有141口煤层气地面预抽井。编号PZ01-PZ07的潘庄7口试验井组施工时间较早,生产时间从1994年12月一直持续至今。在2004—2005年又陆续施工了编号“SH-”的134口井,自2006年2月起排采至今。

2015年施工了5口抽采效果检验井,测试结果表明,东五盘区剩余煤层含气量为9.09~18.65 m^3/t ,平均12.09 m^3/t ,总体上3号煤层含气量降幅达53%,

抽采前后含气量对比如图6、图7所示。

经15a的地面预抽，东五盘区3号煤层平均降幅超过55%，规划区煤层气地面抽采效果非常明显。目前，该盘区的5310、5311工作面已顺利完成安全高效采煤，实现了高瓦斯煤层的低瓦斯开采。

在碎软低渗煤层发育区，地面煤层气预抽技术也由最初的垂直井技术发展成水平井分段压裂技术，取得了显著的抽采效果。晋能控股集团赵庄矿3号煤层，作为典型的碎软低渗煤层，地面垂直井预抽效果差，采用水平井分段压裂技术也获得了良好的抽采效果。其中，2012ZX-SP-02井自2013年12月开始排采，垂直井最大套压0.71 MPa，平均套压0.15 MPa，最大产水量90 m³/d，平均产水量15 m³/d，最高产气量6410 m³/d，平均日产气量2618 m³/d，目前日产气量589 m³/d，井底流压0.03 MPa。截至2022年3月，该井累计抽采煤层气量649.12万m³，测算煤层含气量降幅达65%，生产数据如图8所示。

2017ZX-U-01井是赵庄矿区第1口顶板水平井，井眼轨迹控制在煤层顶板上2m左右，下套管后定向打孔分段压裂，于2019年1月开始排采，水平井组最大日产气量11156 m³/d，稳定产气量4000~5000 m³/d，目前日产气量1730 m³/d。截至2022年3月，累计产水量23792 m³，井组累计产气量461.24万m³，测算煤层含气量降幅达42%，详细生产数据如图9所示。

2.2 准备区井上下联合抽采技术体系

准备区是煤炭生产矿井近期(一般为3~5a)内即将进行回采的区域。准备区煤层气井上下联合抽采技术主要是通过井下定向长钻孔与地面井压裂影响区沟通，利用压裂影响区渗透率得到大幅提升和井下开放空间使得抽采生产压差增大的优势，构成立体抽采网络，提高煤层气抽采效率，实现井上下联合快速抽采，如图10所示。

该技术已在晋能控股成庄矿、寺河矿、赵庄矿等

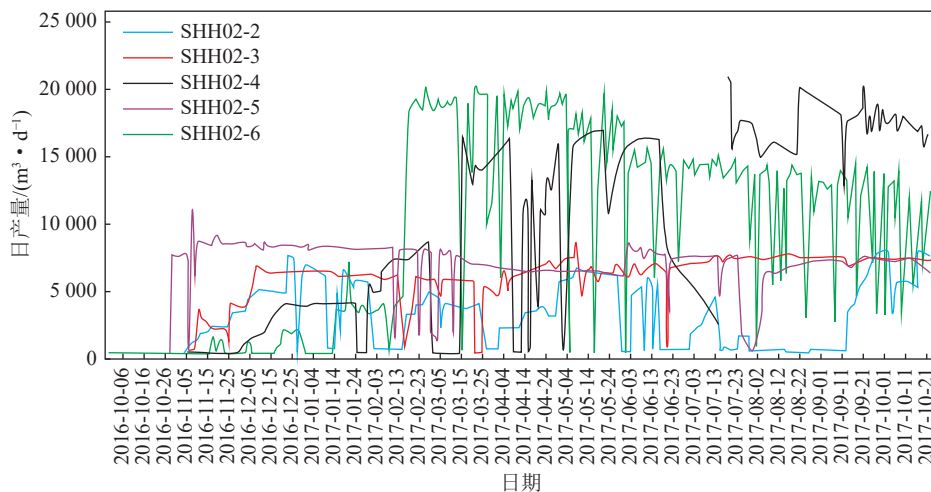


图5 SHH02井工厂平台生产数据

Fig.5 Production data of SHH02 well factory platform

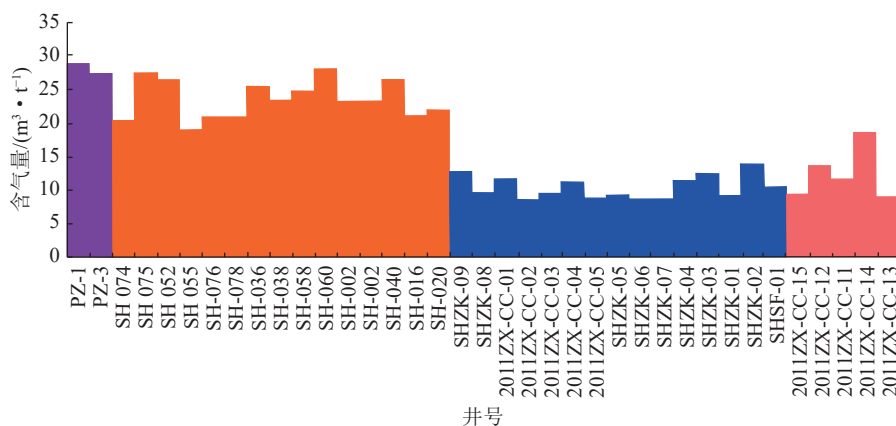


图6 煤层气地面抽采前后含气量对比

Fig.6 Comparison of gas content before and after CBM surface drainage

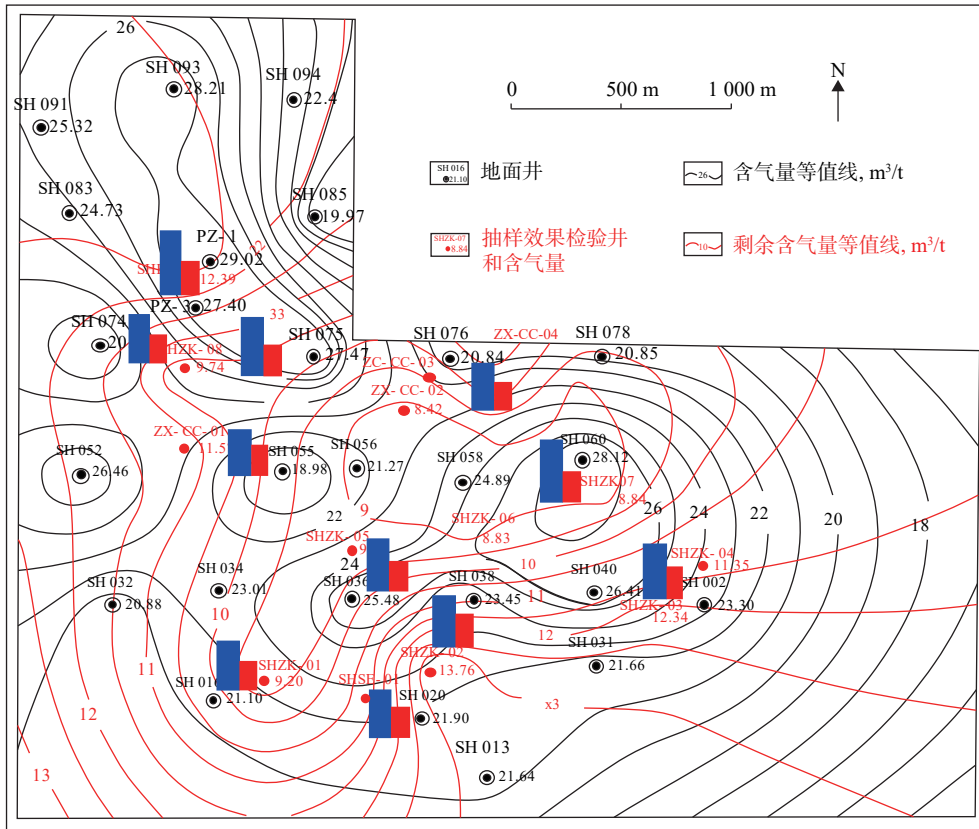


图7 煤层原始含气量与剩余量对比

Fig.7 Comparison of original gas content and residual gas content in coal

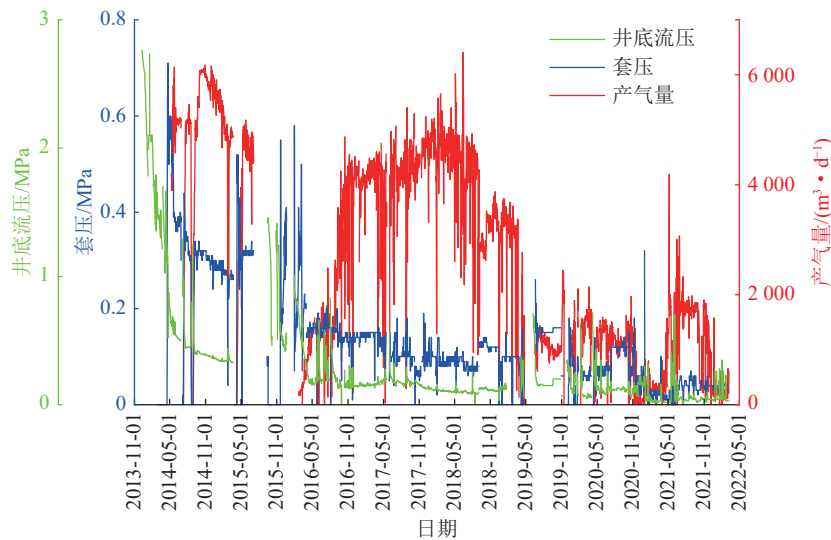


图8 2012ZX-SP-02 井生产数据

Fig.8 Production data of 2012ZX-SP-02 well

得到应用,单孔抽采量提高了5倍以上,掘进工作面预抽达标时间缩短了57%,有效缓解了抽掘采接替紧张,解放了生产力,促进了矿井的高产高效。

在赵庄矿一盘区的地面井压裂影响区内,井下钻孔在抽采期间,百米钻孔瓦斯流量相比压裂区外提高了10.5%,瓦斯体积分数平均提高4.1%;在掘进

期间,巷道绝对瓦斯涌出量比压裂区外降低了13.8%,如图11所示^[18]。

在成庄矿四盘区,采用井下顺煤层长钻孔和煤层顶板长钻孔,抽采地面井压裂影响区内煤层的瓦斯。压裂影响区内百米钻孔瓦斯流量是压裂区外的1.33~17.50倍,压裂区内瓦斯浓度是压裂区外的

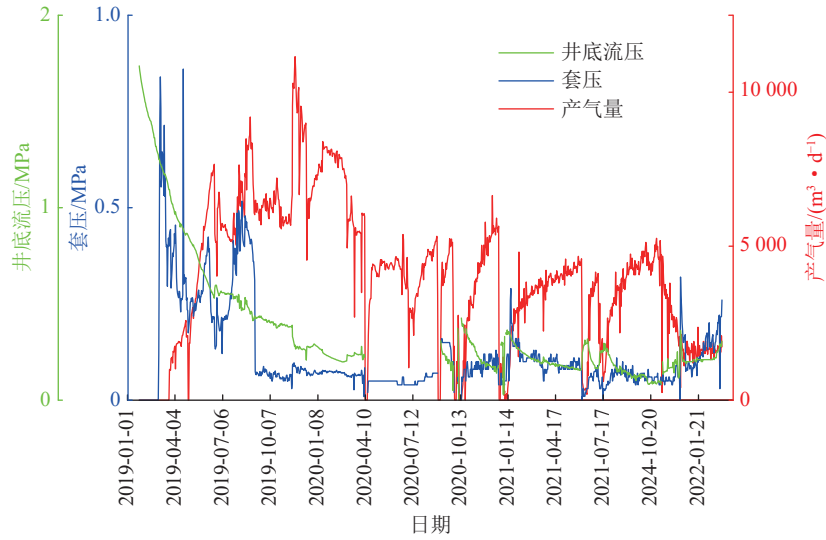


图 9 2017ZX-U-01 井生产数据

Fig.9 Production data of 2017ZX-U-01 well

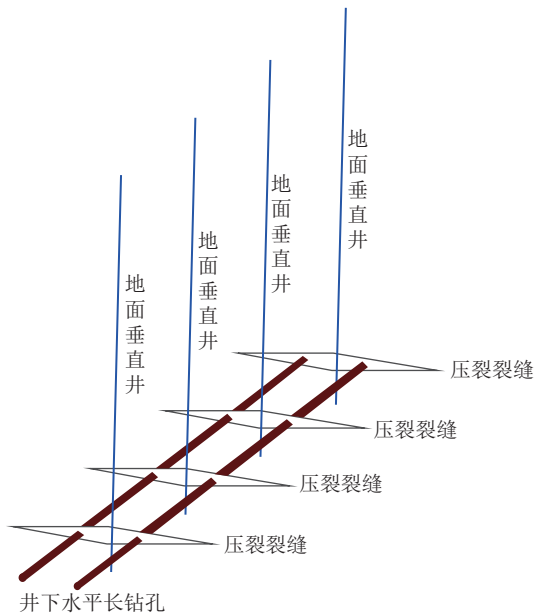


图 10 准备区地面压裂井下长钻孔联合抽采技术

Fig.10 Long borehole extraction technology for ground fracturing in preparation area

1.19 ~ 1.71 倍, 平均提高了 35%, 见表 2^[19]。

寺河矿西三集中回风巷地面井压裂影响区井下钻孔完成后开始抽采, 最高抽采量 8.8 m³/min, 平均抽采量 5.21 m³/min, 最高抽采体积分数为 92%, 平均抽采体积分数为 72.5%, 累积抽采时间达 9 个月, 累积抽采瓦斯折纯量为 204.81 万 m³, 如图 12 所示。

山西汾西矿区针对井下碎软煤层无法完成千米级长钻孔钻进, 地面多分支水平井排水降压周期长等问题, 采用地面多分支水平钻井与井下钻孔对接联合抽采煤层瓦斯技术, 实现了碎软煤层千米长钻孔井下高效抽采。在沙曲矿 24307 工作面 3+4 号煤

层进行了地面多分支水平井与井下瓦斯抽采钻孔对接抽采试验。累计瓦斯抽采量达到 1 267 万 m³, 平均瓦斯抽采体积分数为 91.5%, 如图 13 所示。

2.3 生产区精准抽采技术体系

生产区是指煤炭生产矿井的现有生产区域。基

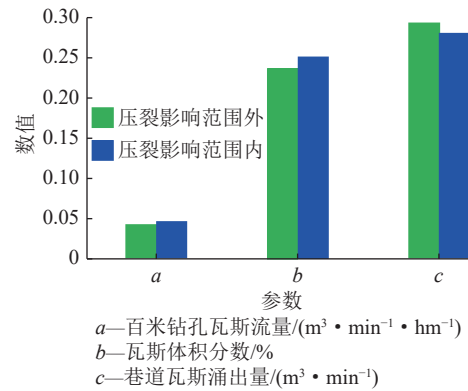


图 11 煤层压裂影响区内外煤层气抽采效果对比

Fig.11 Comparison of CBM extraction effect in and outside fracturing influence area

表 2 压裂影响区内外抽采效果对比

Table 2 Comparison of fracturing in and out of affected area

井号	百米钻孔流量/ (m ³ ·min ⁻¹ ·hm ⁻¹)		瓦斯体积分数/%		提高幅度/%
	压裂区内	压裂区外	压裂区内	压裂区外	
CZYC-07	0.015	0.009 0	72	56	28.6
CZYC-08	0.036	0.027 0	83	68	22.1
CZYC-09	0.220	0.012 6	89	75	18.7
CZYC-10	0.026	0.012 0	77	45	71.1
CZYC-11	0.021	—	82	—	—

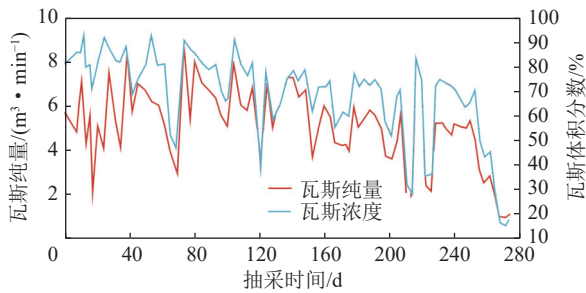


图12 压裂区井下千米钻孔瓦斯抽采数据

Fig.12 Gas extraction data of underground kilometer drilling in fracturing area

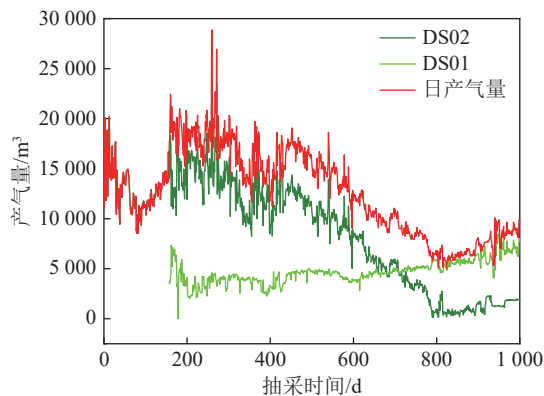


图13 24307工作面多分支水平井抽采数据

Fig.13 Drainage datas of multi-branch horizontal well in No. 24307 working face

于采动活动剧烈和井下工程全开放特点,运用定向钻机精准完成区域递进式顺层钻孔、穿层钻孔、高位定向长钻孔等,精准均衡抽采工作面煤层气,有效解决了常规钻孔轨迹不可控、易形成抽采盲区、抽采效果差等难题,实现了生产区井下抽采精准达标,确保万无一失。同时,针对生产区上隅角瓦斯积聚问题,采用地面“L”型井进行生产区煤层气地面抽采。

2.3.1 井下区域递进式定向长钻孔精准均衡抽采技术

对于地面预抽存在的降量(瓦斯含量)减压(瓦斯压力)不均衡的难题,研发煤矿井下大功率定向钻机,采用井下定向长钻孔技术融合瓦斯含量定点取样测试和构造探测等技术建立起融合剩余瓦斯、地层、构造等信息的井下区域递进式定向长钻孔精准均衡抽采技术,与地面预抽井协同配合,对目的煤层进行全区域精准覆盖,递进抽采,整体均匀降低目的煤层瓦斯含量,提高抽采效率,实现煤层气抽采无盲区,如图14所示。

该技术在赵庄、长平、寺河、成庄等示范矿井累计施工定向钻孔220万m,单个钻孔长度达到400m,成孔率达到70%,取得了良好的煤层气抽采效果。

晋能控股赵庄矿、长平矿施工的井下顶板长钻

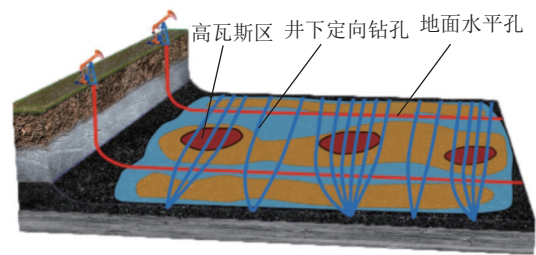


图14 井下区域递进式定向长钻孔精准均衡抽采

Fig.14 Progressive directional long borehole precise balanced extraction in underground coal mine

孔群平均抽采量2.7万 m^3/d ,采动区瓦斯抽采率达70.8%,保障了工作面产量2.8万 t/d 。此外,井下区域递进式井下定向长钻孔精准均衡抽采技术在山西焦煤集团也得到了很好的推广应用。

2.3.2 采动区地面“L”型井抽采技术

高瓦斯矿井生产区,受采动卸压影响,本煤层和邻近层涌出的大量瓦斯运移到回采工作面和巷道中,特别容易在巷道的上隅角积聚,给矿井通风带来巨大挑战。在顶板裂隙带完成地面大直径“L”型水平钻孔,进行地面负压抽采,达到代替高抽巷的目的,实现高效解决高产工作面上隅角瓦斯超限问题,如图15所示。

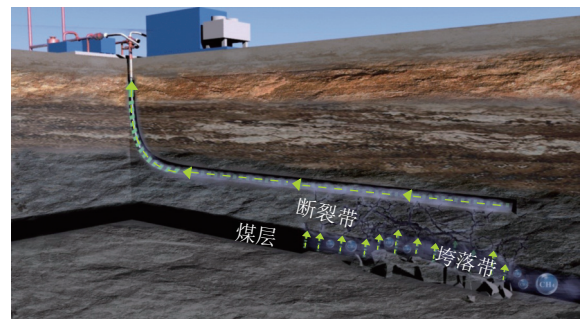


图15 “L”型水平井抽采技术

Fig.15 L-type horizontal well extraction technology

寺河矿3313工作面“L”型井水平段大于800m,垂直井孔径达377mm,已试验的“L”型井在工作面正常生产下平均日抽采纯量达1.15万 m^3/d ,最高达3.2万 m^3 ,甲烷浓度最高达96%(图16),为回采工作面高效生产提供了安全保障。

2.3.3 井下顶板高位定向钻孔群“以孔代巷”技术

井下顶板高位定向钻孔群进行瓦斯抽采时,利用巷道内钻场,在工作面回采之前,以大倾角上仰开孔钻进至煤层顶板。然后,利用随钻测量定向钻进技术进行造斜钻进先导孔,通过对实钻钻孔轨迹的实时准确测量和精确控制,使钻孔进入工作面回采后的采空区“O”形圈裂隙带内,并沿其延伸。先导

孔完成后，下入扩孔钻具组合增大钻孔直径，提高与裂隙带接触面积。由于施工钻孔长，且主要孔段均在“O”形圈裂隙带内延伸，钻孔可长期稳定存在。钻孔以工作面回采时采动卸压形成的顶板裂隙为通道，抽采工作面释放的瓦斯，从而实现了工作面采动区和采空区瓦斯高效抽采，原理如图 17 所示。

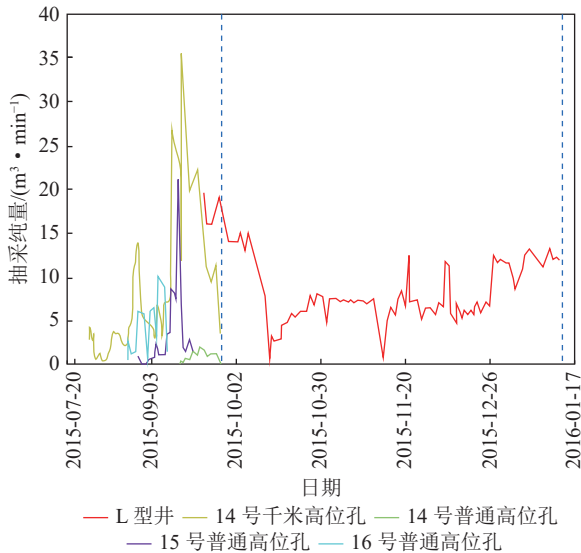


图 16 SH14-L-01 井生产数据
Fig.16 Production data of SH14-L-01 well

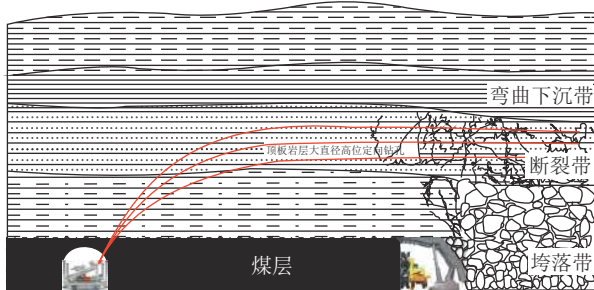


图 17 顶板高位定向钻孔瓦斯抽采示意
Fig.17 High level directional drilling gas extraction schematic diagram of roof

井下顶板高位定向钻孔群“以孔代巷”技术在寺河矿和成庄矿进行了示范，完成工程进尺 34 241 m，平均孔深达到 418 m，提高了抽采孔钻进效率的同时，也增加了井下瓦斯的抽采效果。

2.4 采空区地面钻采技术体系

我国绝大多数煤矿为井工矿井，采空区是指井工矿将煤炭开采后留下的空间。我国煤矿经过长期开采，采空区数量巨大，开采后的残留煤炭、邻近不可采煤层、顶底板含气煤系岩层中仍残存有大量的煤层气资源均向采空区积聚^[20-22]。针对煤炭采空区煤层气资源赋存规律不清、资源量评估困难、采空

区裂隙发育层位难选、钻井液漏失、安全抽采技术缺乏等技术难题，形成了两项关键成果。

1) 采空区煤层气资源评估方法。依据不同的采煤方法和地质条件形成的采空区煤层气来源和赋存特点，结合残煤量、采空区形态、裂隙发育、积水等影响因素，创立了采空区煤层气资源量计算方法。

通过建立采空区岩体孔隙体积和含水饱和度模型，运用体积法和容积法计算残留吸附气、残留游离气和邻近层资源量，求和计算采空区煤层气资源总量：

$$G = G_x + G_y + G_1 \quad (5)$$

式中： G_x 为残存吸附气资源量， m^3 ； G_y 为游离气资源量， m^3 ； G_1 为邻近层资源量， m^3 。

2) 煤矿采空区地面钻采技术。针对采空区地层松散、裂隙发育的特点，将抽采井井身结构由二开优化为三开，二开固井封闭裂隙带上部含水层，三开下入割缝套管护壁(图 18)。在采空影响的裂隙发育区，采用压缩氮气钻井工艺，用氮气取代泥浆或空气作为循环介质，可避免堵塞产气裂隙、有效抑制甲烷爆炸、保证钻井安全性。

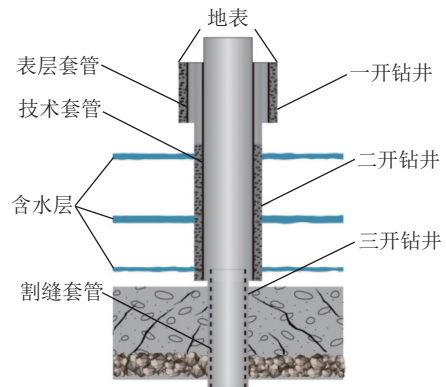


图 18 采空区煤层气井井身结构示意图
Fig.18 Sketch of CBM well in coal mined-out area



图 19 煤矿采空区分布式提纯系统
Fig.19 Distributed purification system for coal mined-out area

废弃矿井采空区地面钻采技术已在晋城、西山、阳泉等山西重点煤矿区完成了129口井的示范推广,累计抽采利用煤层气1.28亿 m^3 ,相当于二氧化碳减排192万t,有效消除了煤矿井下采空区瓦斯积聚造成的安全隐患,增加了清洁能源,为我国废弃矿井采空区煤层气开发提供了示范(图19、图20)。



图20 低浓度煤层气直燃制热系统

Fig.20 Direct combustion heating system for low concentration CBM

3 结 论

1) 全矿区、全层位、全时段煤矿区煤层气“四区(规划区、准备区、生产区、采空区)联动”井上下联合抽采模式(新晋城模式)创新研发了系列技术体系并在山西重点煤矿区得到了示范应用和推广,实现了安全高效、科学有序地开采煤层气和煤炭两种资源,实现了煤层气开发利用的三重功效,将为我国碳达峰、碳中和提供重要技术支撑。

2) 煤矿规划区煤层气地面抽采技术已由垂直井、定向井、水平井等技术,发展到以分段压裂水平井为主导的井工厂化集约开发模式与技术。经十五年的地面预抽,晋能控股寺河矿东五盘区3号煤层平均降幅超55%,该盘区的5310、5311工作面已顺利完成安全高效采煤,实现了高瓦斯煤层的低瓦斯开采。

3) 准备区煤层气井上下联合抽采技术充分利用了压裂影响区渗透率得到大幅提升和井下开放空间抽采生产压差增大的优势,构成了立体抽采网络,提高了煤层气抽采效率,有效缓解了矿井抽掘采接替紧张,促进了高产高效。

4) 基于生产区采动活动剧烈和井下工程全开放特点,运用定向钻机精准完成区域递进式顺层钻孔、穿层钻孔、高位定向长钻孔等,精准均衡抽采工作面煤层气,有效解决了常规钻孔轨迹不可控,易形成抽

采盲区,抽采效果差等难题,实现了生产区井下抽采精准达标,确保万无一失。

5) 针对煤炭采空区煤层气资源赋存规律不清、资源量评估困难、采空区裂隙发育层位难选、钻井液漏失、安全抽采技术缺乏等技术难题,创立了采空区煤层气资源量计算方法,研发了煤矿采空区地面钻采系列技术,已在晋城、西山、阳泉等山西重点煤矿区完成了129口井的示范推广,累计抽采利用煤层气1.28亿 m^3 ,相当于减排二氧化碳192万t。

参考文献(References):

- [1] 新华社. 国家煤矿安监局联手中国航天科技集团推进煤矿智能装备和机器人发展 [EB/OL]. [2022-07-05] http://www.gov.cn/xinwen/2019-08/14/content_5421261.htm.
- [2] 张遂安. 采煤采气一体化理论与实践 [J]. 中国煤层气, 2006, 3(4): 14-16.
ZHANG Suian, Theory and practice of integrated coal mining and gas extraction [J]. China Coalbed Methane, 2006, 3(4): 14-16.
- [3] 陈志胜. 煤矿区煤层气综合开发与利用存在问题探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(7): 5-8.
CHEN Zhisheng. Discussion on problems existing in comprehensive development and utilization of Coal Bed Methane in coal mining area [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(7): 5-8.
- [4] 雷毅, 申宝宏, 刘见中. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发模式初探 [J]. 煤矿开采, 2012, 17(3): 1-4.
Lei Yi, Shen Baohong, Liu Jianzhong. Initial discussion of coalbed methane and coal coordination mining mode [J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(3): 1-4.
- [5] 申宝宏, 刘见中, 雷毅. 我国煤矿区煤层气开发利用技术现状及展望 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 1-4.
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, LEI Yi. Present status and prospect of coalbed methane development and utilization technology of coal mine area in China [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 1-4.
- [6] 张学超. 煤与煤层气协调开发煤层气井下抽采安全性评价 [J]. 煤矿安全, 2015, 46(12): 174-178.
ZHANG Xuechao. Evaluation of underground gas extraction safety based on coordinative development of coal and coalbed methane [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(12): 174-178.
- [7] 武华太. 煤矿区瓦斯三区联动立体抽采技术的研究和实践 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1312-1316.
WU Huatai. Study and practice on technology of three-zones linkage 3D coalbed methane drainage in coal mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1312-1316.
- [8] 李国富, 何辉, 刘刚, 等. 煤矿区煤层气三区联动立体抽采理论与模式 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(10): 7-11.
LI Guofu, HE Hui, LIU Gang, et al. Three region linkage three-dimensional gas drainage theory and mode of coal bed methane in coal mining area [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10): 7-11.
- [9] 李国富, 李波, 焦海滨, 等. 晋城矿区煤层气三区联动立体抽采

- 模式[J]. *中国煤层气*, 2014, 11(1): 3-7.
- LI Guofu, LI Bo, JIAO Haibin, *et al.* Three-region integrated CBM stereo-extraction in Jincheng mining area[J]. *China Coalbed Methane*, 2014, 11(1): 3-7.
- [10] 孙景来. 煤与煤层气协调开发机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(10): 62-65.
- SUN Jinglai. Study on coordinative development mechanism of coal and coalbed methane[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(10): 62-65.
- [11] 范喜生, 张浪, 汪东. 煤与煤层气协调开采的含义及关键问题定量分析[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(2): 123-127.
- FAN Xisheng, ZHANG Lang, WANG Dong. Implication of the coordinative mining of coal and coal-bed methane and a quantitative analysis of the key problems involved[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(2): 123-127.
- [12] 刘见中, 沈春明, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发模式与评价方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1221-1229.
- LIU Jianzhong, SHEN Chunming, LEI Yi. Coordinated development mode and evaluation method of coalbed methane and coal in coal mine area in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1221-1229.
- [13] 刘彦青, 赵灿, 李国富, 等. 晋城矿区煤与煤层气协调开发模式优化决策方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2575-2589.
- LIU Yanqing, ZHAO Can, LI Guofu, *et al.* Optimized decision method of coordinated development mode of coal and coalbed methane in Jincheng mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2575-2589.
- [14] 李希建, 徐明智. 近年我国煤与瓦斯突出事故统计分析及其防治措施[J]. *矿山机械*, 2010, 38(10): 13-16.
- LI Xijian, XU Mingzhi. Statistics and analysis of domestic coal and gas outburst accidents in recent years and prevention measures[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2010, 38(10): 13-16.
- [15] 国家矿山安监局[OL]. https://www.chinacoal-safety.gov.cn/xw/mkaqjcxw/202101/t20210108_376767.shtml.
- [16] 国家矿山安全监察局. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.
- [17] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 258-267.
- LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, *et al.* Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 258-267.
- [18] 王保玉, 白建平, 郝春生, 等. 煤层气地面井压裂-井下长钻孔抽采技术效果分析[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(2): 100-103.
- WANG Baoyu, BAI Jianping, HAO Chunsheng, *et al.* Effect analysis on fracturing of coalbed methane surface well and long distance bore-hole gas drainage technology in underground mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(2): 100-103.
- [19] 陈召英, 郝海金, 郝春生, 等. 煤层气井地面压裂和井下长钻孔联合抽采技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(8): 142-146.
- CHEN Zhaoying, HAO Haijin, HAO Chunsheng, *et al.* Study on combined extraction technology of underground long borehole and CBM ground-well fracturing[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 142-146.
- [20] 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.
- [21] 孟召平, 李国富, 田永东, 等. 晋城矿区废弃矿井采空区煤层气地面抽采研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 204-211.
- MENG Zhaoping, LI Guofu, TIAN Yongdong, *et al.* Research progress on surface drainage of coalbed methane in abandoned mine gobbs of Jincheng mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 204-211.
- [22] 孟召平, 李国富, 杨宇, 等. 晋城寺河井区煤矿采空区煤层气地面抽采关键技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 240-247.
- MENG Zhaoping, LI Guofu, YANG Yu, *et al.* Study on key technology for surface extraction of coalbed methane in coal mine goaf from Sihe Wells Area, Jincheng[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 240-247.