

“国家科技重大专项煤矿区煤层气开发成果”专题



移动扫码阅读

孙海涛, 舒龙勇, 姜在炳, 等. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 1-13.

SUN Haitao, SHU Longyong, JIANG Zaibing, *et al.* Progress and trend of key technologies of CBM development and utilization in China coal mine areas[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 1-13.

煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势

孙海涛¹, 舒龙勇², 姜在炳³, 胡 健⁴

(1. 中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037; 2. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;

3. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710054; 4. 煤炭科学研究总院有限公司, 北京 100013)

摘要:煤层气与煤炭协调开发的关键在于协调煤炭开采与煤层气开发的时空关系。“十一五”至“十三五”期间, 依托国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目的总体实施, 煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制取得巨大进展。煤矿区煤层气开发由最初为保障煤矿安全生产的“瓦斯抽排”“煤层气抽采”“地面开发和井下抽采相结合”等形成“煤矿区煤层气与煤炭协调开发”的技术开发新机制。通过界定煤层气与煤炭协调开发范围、建立煤层气与煤炭协调开发评价方法、形成煤层气与煤协调开发优化决策平台, 提出基于“协调开发、提质增效、技术支撑、平台决策、集成示范”的煤矿区煤层气与煤炭协调开发理念, 依托煤层气与煤炭协调开发技术体系等成套技术系列, 形成山西矿区煤层气“四区联动”全域协调开发模式、两淮矿区煤层群煤层气立体联合开发模式、松藻矿区复杂松软煤层超前增透协调开发模式、新疆矿区大倾角多煤组“三位一体”协调开发模式, 进而带动全国煤矿区煤层气开发实践。煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制、模式与应用引领了我国煤矿区煤层气行业科技创新, 显著提升煤矿区煤层气开发利用水平。随着国家能源战略的调整, “双碳”战略的实施和生态文明建设等新形势新要求, 煤矿区煤层气发展面临新需求新挑战, 指出需重点推进煤矿区煤层气地质精细探查、井下煤层气高效开发、废弃矿井煤层气抽采、煤系气协同共采等技术研发, 构建煤矿区煤层气与煤炭清洁高效开发的新技术体系。

关键词:煤层气; 煤矿区; 煤层气与煤炭协调开发; 开发利用

中图分类号: TD712.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2022)12-0001-13

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

SUN Haitao¹, SHU Longyong², JIANG Zaibing³, HU Jian⁴

(1. Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Chongqing 400037, China; 2. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 4. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China)

Abstract: The key to coordinated development of coal mine methane and coal is to coordinate the spatio-temporal relationship between coal mining and coal mine methane development. During the “11th Five-Year Plan” and “13th Five-Year Plan” period, relying on the overall implementation of the national major science and technology project “Development of large oil and gas fields and coal mine methane”, the coordinated development mechanism of coal mine methane and coal in coal mining areas has made great progress. The development mechanism of coal mine methane in coal mine area is formed by “gas drainage”, “coal mine methane extraction”, “combination of ground development and underground extraction” and so on to ensure the safety of coal mine production. By defining the scope of coordinated development of coal mine methane and coal, establishing the evaluation method of coordinated development of coal mine methane and coal, forming the optimization decision-making platform of coordinated development of coal mine methane and coal, the concept of coordin-

收稿日期: 2022-09-25 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.mcq2022-1641

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045, 2016ZX05067, 2016ZX05068)

作者简介: 孙海涛(1979—), 男, 河北保定人, 研究员, 博士生导师, 博士。Tel: 023-65239278, E-mail: dreamsht@163.com

ated development of coal mine methane and coal in coal mine area based on “coordinated development, quality and efficiency improvement, technical support, platform decision-making, integrated demonstration” was put forward. Relying on the coordinated development technology system of coal mine methane and coal, as well as a complete set of technologies such as efficient extraction and effective utilization of coal mine methane in coal mining areas, Formation of coal-bed methane mining area in shanxi area “four linkage” global coordination development mode, huabei mining area coal seam group of coal mine methane (CBM) three-dimensional joint development pattern, the complex soft Songzao mining area coal seam ahead of anti-reflection coordinated development pattern, Xinjiang mining area coal group “trinity” of large dip Angle coordinate development mode, leading to the coal mining area of coal bed methane development practice. The coordinated development mechanism, model and application of coal mine methane and coal in coal mine area have led the scientific and technological innovation of coal mine methane industry in coal mine area, and significantly improved the level of coal mine methane development and utilization in coal mine area. With the adjustment of national energy strategy, the implementation of the strategy of “double carbon” and the new requirements of the new situation, such as construction of ecological civilization coal mining area of coal bed methane development faces new challenges, new demand on promoting fine coal mining area of coal mine methane geological exploration and underground coal bed methane efficient development, abandoned mine coal mine methane extraction, such as coal gas together, a total of mining technology research and development, To construct a new technology body for clean and efficient development of coal mine methane and coal in coal mine area

Key words: coal bed methane; coal mine areas; coordinated development of coal mining and coal bed methane development; development and utilization

0 引言

煤层气是重要的清洁能源。我国煤层气地质资源量达 36.8 万亿 m^3 , 其中煤矿区煤层气 (又称“煤矿瓦斯”) 资源量超过 16 万亿 m^3 , 占我国煤层气总资源量的 43.5%^[1-3]。2020 年我国煤炭产量 39 亿 t, 其中, 95% 以上煤炭产量来自井工开采, 煤矿区煤层气井下抽采量达 128 亿 m^3 , 井下煤层气抽采仍是我国煤矿区煤层气抽采的主要方式。煤矿瓦斯是危害煤矿安全生产的首要灾害, 井下抽采受矿井建设、井下掘进和采煤工程的影响, 煤矿区煤层气与煤炭生产长期存在相互制约、相互干扰、互不协调的问题^[4]。煤层气与煤炭协调开发的关键在于协调煤炭开采与煤层气开发的时空关系, 依靠科技进步和关键技术突破, 实现煤矿煤层气与煤炭协调开发, 煤炭和煤层气两种能源资源共采, 对提高煤矿区煤层气资源化开发利用水平、减少温室气体排放和防治煤矿瓦斯灾害具有重要意义。

我国煤矿区煤层气开发可追溯到 20 世纪 50 年代的煤矿井下瓦斯抽采, 60 年代开始进行较为科学的煤矿瓦斯地质研究工作, 成为防治煤矿瓦斯灾害事故的根本措施。70 年代末, 原煤炭工业部煤炭科学研究院抚顺煤研所曾在抚顺、阳泉、焦作等高瓦斯矿区以解决煤矿瓦斯突出为主要目的施工了 20 余口地面瓦斯抽排试验井^[5]。90 年代, 随着美国地面开发煤层气的成功技术的传入, 煤层气地面开发逐步进入了产业化勘探开发阶段。煤矿区煤层气开发由最初为保障煤矿安全生产的“瓦斯抽排”“煤层气抽采”“地面开发和井下抽采相结合”逐渐发展到

“煤与瓦斯共采”“采煤采气一体化”并形成“煤矿区煤层气与煤炭协调开发”的技术开发理念^[6-12]。

依托“十一五”至“十三五”国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目 (课题) 和示范工程的总体实施, 煤矿区煤层气项目组取得了一系列重大成果。本文系统阐述煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制、模式与应用, 全面呈现基于“协调开发、提质增效、技术支撑、平台决策、集成示范”的煤矿区煤层气与煤炭协调开发理念下构建的煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制。笔者系统介绍煤层气与煤炭协调开发模式优化决策系统和评价方法, 凝练总结了山西矿区煤层气“四区联动”全域协调开发模式、两淮矿区煤层群煤层气立体联合开发模式、松藻矿区复杂松软煤层超前增透协调开发模式、新疆矿区大倾角多煤组“三位一体”协调开发模式, 为全国煤矿区煤与煤层气的协调开发及模式应用提供理论指导和技术支撑。在全国煤矿区得到良好推广应用, 有效带动全国煤层气产业发展。在新的历史起点上, 笔者系统分析煤矿区煤层气与煤炭协调开发面临的新形势和发展的新要求, 提出煤矿区煤层气与煤炭协调开发发展的新趋势和科技创新的重点发展方向。

1 我国煤矿区煤层气开发的地质条件

1.1 煤矿区煤层赋存特征

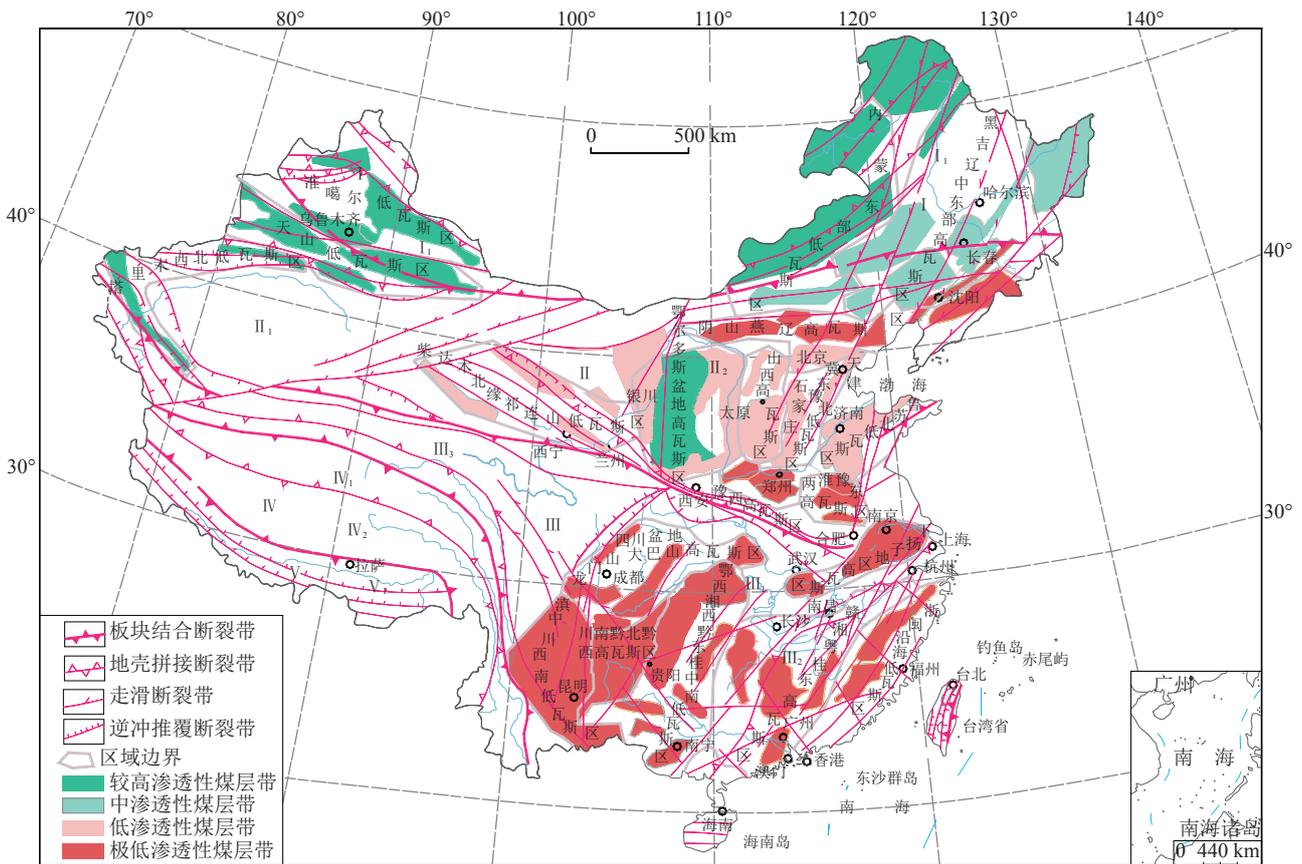
与北美地区稳定地台背景下发育的富煤盆地不同, 我国煤层发育盆地的大部分地区具有多期成煤期次、构造发育强烈、地质条件复杂等特点, 煤层气

地质与储层条件复杂多样,煤矿区煤层气抽采与利用难度重重^[13]。美国含煤盆地煤层渗透率普遍较高,Black Warrior盆地煤层绝对渗透率多在 $10^{-15} \sim 25 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,San Juan盆地煤层绝对渗透率多在 $5 \times 10^{-15} \sim 15 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

煤层气资源分布受控于含煤地层分布。我国含煤岩系主要分2个阶段,第1阶段为低等植物成煤时期,腐泥煤时代,前中泥盆世;第2阶段为高等植物成煤时期,腐植煤时代,主要在晚古生代后石炭二叠纪、晚三叠世—早白垩世、第三纪,其中大陆含煤盆地主要的成煤期为石炭纪、二叠纪、早、中侏罗世。石炭二叠纪是大陆盆地的重要成煤期,主要包括在华北赋煤区、华南赋煤区,煤层气资源量分别占了全国总量的58.1%,8.6%;早、中侏罗世成煤期主要包括在西北赋煤区,煤层气资源量占全国总量的31.7%;晚侏罗—早白垩世成煤期主要在东北赋煤区,约占全

国煤层气总量的1.6%^[14-15]。

我国煤层气资源量90%分布在地质构造复杂、较复杂、低渗碎软煤层等地区。我国煤层渗透率测值的主要分布范围为 $0.1 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$,渗透率 $\leq 10^{-15} \text{ m}^2$ 的占比71.2%,其中 $\leq 0.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 的占比32.6%,如图1所示。全国大多数煤层气储层具有低压、高应力、低渗特征。煤层储层压力梯度低于静水压力梯度。从全国范围看,受构造煤发育和地应力较大的双重影响,华南赋煤区、华北东部地区煤储层的渗透率普遍低,大多数储层渗透率不超过 10^{-15} m^2 。煤储层压力低、临储比低,会导致煤层气排采难度大、产气时间长、产气量低。华北赋煤区也仅沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘等区具有地质构造相对简单、煤层厚度较大与含气量较高等综合优势。大多数地区煤层气处于低饱和状态,华北、西北赋煤区的煤层含气饱和度普遍低于50%。



I—西伯利亚板块; I₁—准噶尔—兴安活动带(包括准噶尔、锡林浩特、嫩江、佳木斯等地块); II—塔里木—华北板块; II₁—塔里木板块; II₂—华北板块; III—华南板块; III₁—扬子地块; III₂—南华活动带; III₃—松潘—甘孜活动带; IV—藏滇板块; IV₁—羌中—唐古拉—保山地块; IV₂—冈底斯—腾冲活动带; V—印度板块; V₁—喜马拉雅逆冲板片

图1 中国煤储层渗透性区域分布^[14]

Fig.1 Regional distribution map of coal reservoir permeability in China^[14]

1.2 煤矿区煤层气开发的地质条件分类

基于全国煤炭基地煤矿区的开采地质条件、煤

储层特征,提出了煤矿区煤层气开发地质—储层类型分类依据,划分出了简单地质中硬较高渗煤层、较复

杂地质碎软低渗煤层、复杂地质碎软低渗煤层等3种典型类型。简单地质中硬较高渗煤层地质-储层类型以晋城、阳泉、潞安、彬长等为代表,地质构造简单、地势平缓、煤质较硬、含气量高、渗透率较高;较复杂地质碎软低渗煤层地质-储层类型以两淮、焦作、峰峰、韩城等为代表,地质构造复杂、地势平缓、煤质松软、含气量高、渗透率低;复杂地质碎软低渗煤层地质-储层类型以云贵川煤矿区以及湖南、江西等地,地质构造复杂、地形起伏较大、薄煤层群发育、煤质松软突出、含气量高、煤储层压力高、渗透率低、

地应力大。

基于煤层厚度、资源量、含气量等将煤矿区煤层气富集区划分为煤层气资源有利区和不利区;在有利区内,依据构造煤发育程度、厚度、含气量、煤层气资源及资源丰度等,划分为适合地面抽采区、适合井上下联合抽采区、适合井下抽采区,见表1。所划分的不同级别抽采区块尚未考虑地质构造的复杂性及影响程度、抽采技术的适应性及针对性、地形与交通条件的匹配性及满足程度、煤矿建设生产情况等实际情况具体确定所适合的抽采区。

表1 我国赋煤区煤层气抽采区块分级标准

Table 1 Classification standard of CBM extraction block in China's coal-bearing region

赋煤区	适合地面抽采区	适合井上下联合抽采区	适合井下抽采区
华北	构造煤厚度<1 m 煤层气资源量>400×10 ⁸ m ³ 含气量>8 m ³ /t	构造煤厚度>1 m 含气量>8 m ³ /t 煤层气资源量<400×10 ⁸ m ³ 资源丰度<0.5×10 ⁸ m ³ /km ²	构造煤全层发育 煤层气资源量>100×10 ⁸ m ³ 或构造煤厚度>1 m 含气量>3 m ³ /t 煤层气资源量<400×10 ⁸ m ³
东北	构造煤厚度<1 m 含气量>8 m ³ /t 煤层气资源量>100×10 ⁸ m ³ 资源丰度>0.5×10 ⁸ m ³ /km ²	构造煤厚度>1 m 含气量>8 m ³ /t 煤层气资源量>100×10 ⁸ m ³ 资源丰度>0.5×10 ⁸ m ³ /km ²	构造煤厚度>1 m 煤层气资源量>100×10 ⁸ m ³ 含气量>3 m ³ /t 资源丰度<0.5×10 ⁸ m ³ /km ²
西北	构造煤不发育 含气量>4 m ³ /t 资源丰度>10 ⁸ m ³ /km ² 煤层气资源量>300×10 ⁸ m ³	含气量>4 m ³ /t 资源丰度<10 ⁸ m ³ /km ² 煤层气资源量>300×10 ⁸ m ³	含气量>3 m ³ /t 资源丰度<10 ⁸ m ³ /km ² 煤层气资源量>300×10 ⁸ m ³
华南	构造煤厚度<1 m 煤层气资源量>400×10 ⁸ m ³ 资源丰度>1.0×10 ⁸ m ³ /km ² 含气量>10 m ³ /t	构造煤厚度>1 m 含气量>10 m ³ /t 煤层气资源量>100×10 ⁸ m ³ 资源丰度>0.5×10 ⁸ m ³ /km ²	构造煤全层发育 煤层气资源量>100×10 ⁸ m ³ 或构造煤厚度>1 m 含气量>5 m ³ /t 煤层气资源量<300×10 ⁸ m ³

2 煤层气与煤炭协调开发机制

煤层气与煤炭协调开发的关键在于协调煤炭开采与煤层气开发的时空关系,煤层气与煤炭2种资源同源共生的特点决定了煤炭开采与煤层气开发密切相关且相互影响,合理进行煤炭采掘部署和煤层气开发规划以协调煤炭开采与煤层气开发的时空关系,才能实现煤层气与煤炭协调开发。

2.1 煤层气与煤炭协调开发范围界定

实现煤层气与煤炭两种同源共生资源安全高效协调开发,需全矿区、全层位、全时段协调煤层气与煤炭开发的生产部署,进而提出煤矿规划区、准备区、生产区和采空区“四区”联动的概念,如图2所示。规划区是指从回采煤层开始地面井建设到井下采气工程开始建设之间的时间段,属于超前预抽阶段。准备区是指从井下采气工程开始建设开始至采煤工

作面开始回采之间的时间段,属于精准抽采阶段。生产区是指从采煤工作面开始回采到采煤工作面回采结束之间的时间段,属于高效抽采阶段。采空区是指采煤工作面回采结束之后进行的采气时间段,属于安全绿色抽采阶段。煤层气与煤炭协调开发的关键在于协调煤炭开采与煤层气开发的时空关系,规划区、准备区、生产区和采空区“四区”随着煤矿采掘的推进而呈动态演变,规划区预抽5~10 a后转化为准备区,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。

2.2 煤层气与煤炭协调开发评价方法

煤层气与煤炭协调开发中煤层气抽采占据核心地位,煤层气高效开采程度制约煤层气与煤炭协调开发效果^[16-23]。采用BP神经网络算法构建各时区的各种煤层气开采技术的煤层气开发量预测模型^[24],

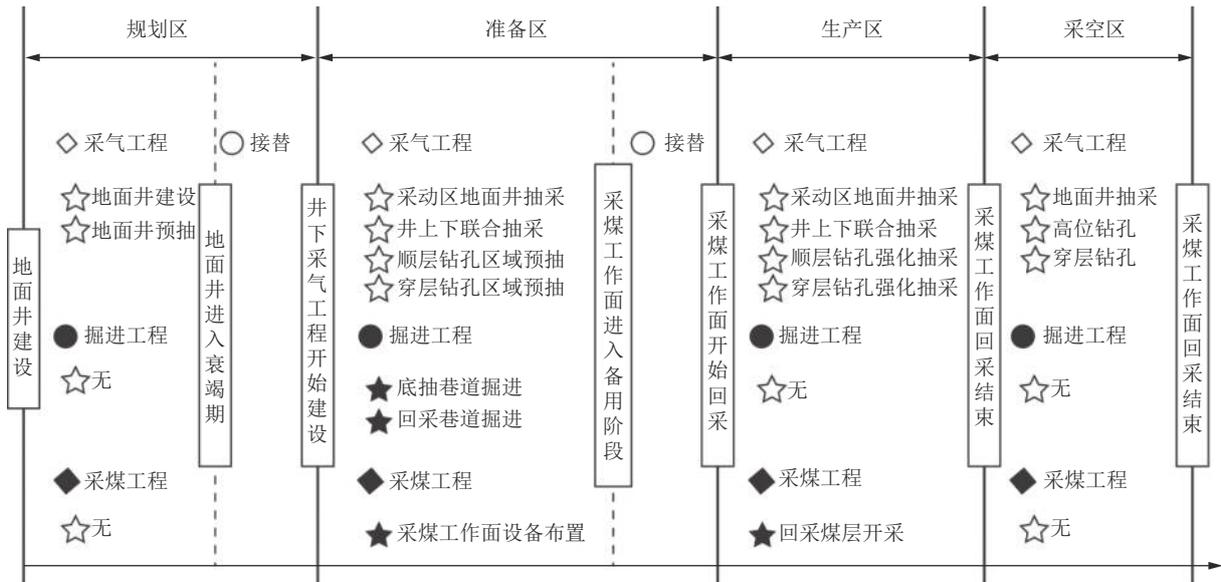


图2 煤层气与煤炭协调开发四区界定及联动机制

Fig.2 Definition and linkage mechanism of coordinated development of coal mine methane and coal

通过构建和运用煤层气与煤炭协调开发技术适应性与煤层气开发利用的大数据平台^[25-26],建立煤矿区煤层气开发利用全生命周期综合评价方法和模型,进一步形成矿井“抽建掘采”系统布局与评价的成套技术,为煤矿区煤层气开发利用设计与“抽建掘采”时空接续优化提供支持。结合煤与煤层气协调开发动态模拟与辅助设计技术^[27-28],形成煤与煤层气协调开发模式的优化决策系统,为煤矿区煤与煤层气协调开发过程中的技术优选与评价决策奠定重要基础。

从现有的煤层气开采技术体系和生产区煤炭开采技术体系中选择规划区煤层气抽采技术、准备区煤层气抽采技术、生产区煤层气抽采技术和采煤方法以及采空区资源评价技术,以资源量守恒模型为本构方程,结合各区时长控制机制、煤层气逸散量计算模型、各区采用煤层气开采技术所对应的煤层气开采量 BP 神经网络预测模型,构建煤与煤层气协调开发的全生命周期资源量守恒模型,将抽采达标临界指标作为方程求解约束条件,时长为基本待求解变量,形成了煤与煤层气开发全生命周期资源量守恒模型流程。

2.3 煤层气与煤炭协调开发优化决策

采煤工作面煤层气与煤协调开发优化决策是实现全矿区煤与煤层气协调开发的基础。采煤工作面煤层气与煤协调开发的本质是对采煤工作面区域进行煤层气高效开采,确保煤炭安全高效开采,实现采煤工作面煤炭资源与煤层气资源共同安全高效开采。基于规划区、准备区、生产区、采空区时长和采气量等变量构建煤层气与煤炭协调开发效果评价指标体

系,能够实现对采煤工作面煤层气与煤炭协调开发效果的真实客观评价,实现了采煤工作面煤与煤层气协调开发效果评价与协调开发模式优化决策的统一结合。

3 煤层气与煤炭协调开发模式

煤层气与煤炭协调开发技术体系、煤矿区煤层气高效抽采等成套技术系列,为山西晋城、两淮、松藻、新疆等矿区的示范工程和试验基地提供技术和装备支撑,进而带动全国煤矿区煤层气与煤炭协调开发。

3.1 山西矿区煤层气“四区联动”全域协调开发模式

山西是我国重要的优质无烟煤生产基地,主要含煤地层为石炭系上统太原组(C_3t)和二叠系下统山西组(P_1s),山西煤层气资源赋存条件具有储层压力低、渗透率低、饱和度低的特点以及地质构造复杂、地形地貌条件差的特殊性,属于单一低渗碎软高瓦斯煤层。

3.1.1 “四区联动”全域协调开发模式

山西重点煤矿区创建以“煤矿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”为核心的全矿区、全层位、全时段的煤矿区煤层气“四区联动”(即:规划区、准备区、生产区、采空区)井上下联合抽采模式,形成地面超前预抽、井上下联合抽采、井下精准抽采、采空区地面钻采等关键技术工艺^[29-34]。

规划区具体包括地面井建设、地面井抽采、接替等待3个阶段,规划区的地面井建设与调试阶段时长主要取决于客观钻井技术、井网布置密度等工程

施工因素影响,对于开采高效煤层气目标而言,应当缩短该阶段时长。从规划区转换为准备区主要取决于井下采掘抽生产规划。准备区具体包括采气工程建设、回采煤层瓦斯区域预抽达标、回采巷道掘进、采煤设备布置、接替等待5个阶段。准备区时期开始进行掘进工程,采掘工程与采气工程同时进行,开拓准备区时长划分较为复杂,井下采气工程钻孔施工阶段随地面采动井采气工程、掘进煤巷条带式煤层瓦斯预抽工程,回采煤层区域预抽达标阶段主要是采气工程。

从开拓区转换为生产区主要取决于井下采掘抽生产规划。生产区具体包括采煤工作面回采、采煤工作面封闭两个时间阶段。生产区回采工作面采煤阶段内所包含采气工程有回采煤层开采区域瓦斯预抽工程、井上下联合预抽未开采煤层区域瓦斯工程、采空区瓦斯抽采工程、地面采动井预抽未开采煤层区域煤层气工程,利用回采煤层开采卸压作用进行煤层气高效抽采。采空区时长取决于采空区内瓦斯体积分数,采空区主要用于查明剩余煤层气资源赋存状况,建立废弃矿井采空区煤层气资源量评价方法。

根据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,实现煤层气与煤炭2种资源安全高效协调开发。规划区、准备区、生产区和采空区“四区”随着煤矿采掘的推进而呈动态演变,规划区预抽5~10 a后转化为准备区,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。

3.1.2 “四区联动”全域协调开发技术体系

生产规划区煤层气地面预抽是晋城矿区煤层气开发的主要方式,煤层气井型由垂直井发展到丛式井、L型/U型水平井、多分支水平井等多种井型,形成了以群式布井、规模施工,统一管理为特点的井工厂优化设计方法和快优钻井技术。井上下联合抽采技术主要应用于开拓准备区的煤层气开发,是煤矿井上下整体煤层气开发模式的重要组成部分,主要包括地面压裂井下定向长钻孔抽采技术和地面“L”型井与采动影响联合抽采技术。煤层气井下抽采关键技术主要应用于煤炭生产区的煤层气开发,是煤与煤层气开采相互影响的重要阶段,也是煤层气强化抽采阶段,主要包括顶底板梳状长钻孔抽采技术、高位定向长钻孔抽采技术以及模块化区域递进式抽采技术^[35-38]。煤炭采空区煤层气抽采技术通过研究采空区煤层气富集规律、煤层气资源评价及井位优化研究,形成了适应煤矿采空区地面抽采工艺和技术体系,如图3所示。

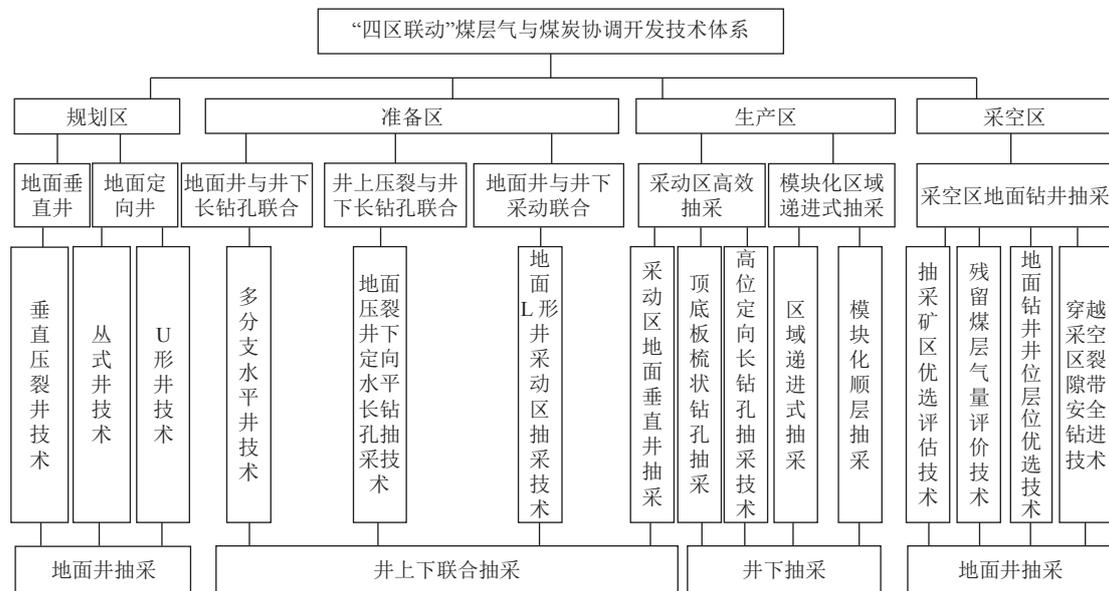


图3 山西矿区“四区联动”煤层气与煤炭协调开发技术体系

Fig.3 “Four regions linkage” coordinated development technology system of coal mine methane and coal in Shanxi Mining Area

3.1.3 重大专项示范工程的示范与成效

山西重点煤矿区寺河、成庄等矿区基本破解了高瓦斯矿井安全高效开采难题,实现了高瓦斯煤层,低瓦斯开采,2020年底建成了成庄矿建成了山西省

绿色开采试点煤矿中惟一的一座煤与煤层气共采试点矿井。通过煤层气与煤炭协调开发进一步推进,晋城矿区在煤层气开发利用技术领域得到了进一步发展,以穿采空区井、U型分段压裂水平井、井上下

联合抽采等多项工程技术取得良好的应用效果,保证了企业煤层气和煤炭协调开发,也带动了煤层气、煤炭产业的安全效益、环保效益和企业社会影响力进一步扩大。“四区联动”井上下联合抽采模式已推广应用至山西阳泉、西山、潞安、大同等矿区,正在向河南平顶山、甘肃窑街、贵州新田等矿区进行推广应用。

3.2 两淮矿区煤层群煤层气立体联合开发模式

两淮矿区为我国深部高瓦斯煤层群矿区的典型代表,存在煤层松软、渗透率低特性,不利于直接抽采。根据煤矿区煤层气开发地质-储层类型分类依据,两淮矿区煤层气地质-储层条件属于典型的较复杂地质碎软低渗煤层。两淮煤炭基地的淮南、淮北矿区均位于华北聚煤区的南部,石炭-二叠纪含煤地层的沉积类型属南华北型,主要含煤地层为二叠纪的山西组、下石盒子组和上石盒子组,明显区别于北华北型(其主要含煤地层为石炭纪的太原组和二叠纪的山西组)。淮南矿区以低、中煤阶为主,煤层气含量较高。淮北矿区的煤阶比较多样,从气煤到无烟煤均有分布,煤层气含量较高,整个矿区煤层气含量变化在 $4 \sim 15 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

3.2.1 淮南矿区煤层群条件井上下立体抽采模式

淮南矿区的含煤沉积属海陆交互相,煤层层位及厚度均比较稳定,可作为煤层气开发目标的煤层(单层厚度大于 1 m 、发育稳定和较稳定的煤层)包括 13_{-1} 、8、1等10个煤层,总计厚度 24 m 。淮南矿区以低、中煤阶为主,煤层气含量较高,生产矿井均为高瓦斯矿井。

淮南矿区经过长期摸索,形成了 $-700 \sim -800 \text{ m}$ 埋深煤层群煤层气立体高效抽采模式。

煤气安全共采现场测定和试验研究表明,不论原始渗透系数怎样低的煤层,受采动的影响煤层卸压后,其渗透系数会急剧增加,煤层内气体渗流速度大增,抽采钻孔的煤层气量也随之增大。两淮矿区含煤地层处在深厚表土层($300 \sim 500 \text{ m}$)高地应力覆岩层下,原始煤层透气性极低,原始煤层瓦斯抽采效率低,两淮矿区低透气性煤层井上下立体抽采卸压瓦斯模式是地面钻井卸压瓦斯抽采技术^[39-40]。通过首采层的开采,对邻近煤层形成膨胀卸压作用,大幅提高邻近煤层的透气性,大量卸压煤层气向某一特定区域富集。通过采动区地面钻井、煤层气抽采专用巷道、顶板走向长钻孔以及穿层钻孔等技术方法,对富集区煤层气进行有针对性的抽采,不仅高效抽采低透气性煤层的煤层气资源,同时消除邻近层的

煤层气含量和压力,保障煤炭资源的安全高效回采。对于未采动区煤层,通过地面钻井水力压裂、井下穿层和顺层钻孔水力压裂、深孔预裂爆破、 CO_2 预裂增透等技术方法,大幅提高煤层的透气性,将难抽采的煤层转变为可抽采甚至易抽采煤层,实现煤层气资源的有效开发。

煤层群条件下保护层卸压井上下立体煤层气开发,将煤层气开发融合到煤炭开采的全过程,将2种资源的协调开发在时间上分为3个阶段,即煤炭的采前、采中和采后“三阶段”;空间上分为4个区域,即规划区、准备区、生产区和采空区“四区域”。随着煤炭采掘活动的推进,“三阶段”和“四区域”在时空上进行不断的演变和转换,形成复杂矿区煤层群煤层气立体联合开发模式。

3.2.2 淮北矿区煤层群条件井上下立体抽采模式

淮北矿区的含煤沉积同样属海陆交互相,可作为煤层气开发目标的煤层包括 $3_2, 7_1, 10$ 等6个煤层,总计厚度 9.84 m 。另外,淮北矿区的岩浆活动比较强烈,对煤层发生侵蚀和熔蚀作用等,破坏较大。淮北矿区的煤阶比较多样,从气煤到无烟煤均有分布,但以中煤阶为主。煤层气含量在区域展布方面变化大,总体呈现出东高西低、南高北低的特征。生产矿井均为高瓦斯矿井。淮北矿区多属低压储层,淮北矿区煤层渗透率变化在 $0.02 \times 10^{-15} \sim 20.00 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

淮北矿区坚持井上下立体抽采、应抽尽抽、抽采平衡、效果达标,做到不掘突出头,不采突出面。卸压瓦斯预抽方式:开采保护层+地面钻井+高位穿层拦截钻孔+顺层钻孔+高位钻孔+采空区埋管联合抽采方式^[41]。

3.2.3 两淮矿区煤层气与煤炭协调开发技术体系

两淮矿区的协调开发模式以煤炭开采为主线,将煤层气开发融合至煤炭开采的全过程,将两种资源的协调开发在时间上分为3个阶段,即煤炭的采前、采中和采后“三阶段”;空间上,分为规划区、准备区、生产区和采空区“四区域”,随着煤炭采掘活动的推进,“三阶段”和“四区域”在时空上进行不断的演变和转换。

两淮矿区以煤层群条件下的煤层气与煤炭协调开发方式实现煤层气与煤炭2种资源协同共采,通过系统协调时间接续和空间协调的生产模式,提出了煤层群条件下的煤层气抽采技术体系,主要包括地面煤层气抽采技术和井下煤层气抽采技术。地面抽采钻井又分为压裂地面井和非压裂地面井抽采技术;井下煤层气抽采技术又可分为保护层(首采层)

煤层气抽采技术、被保护层(邻近层)抽采技术和采空区抽采技术,如图4所示。

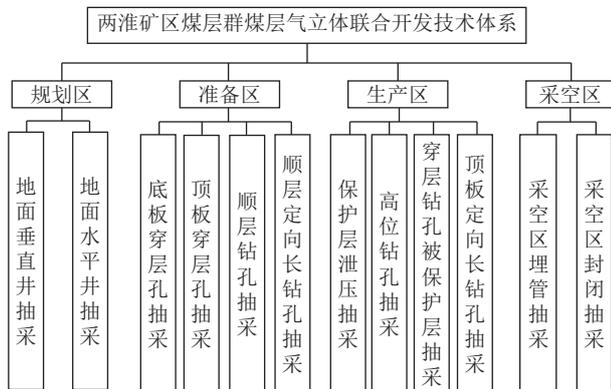


图4 两淮矿区煤层气与煤炭协调开发技术体系

Fig.4 Coordinated development technology system of coal mine methane and coal in Liangnan and Huaibei Mining Area

3.2.4 重大专项示范工程的示范与成效

“十一五”期间,两淮矿区开展中阶煤、松软煤层群采煤采气一体化抽采,未采区、采动区,采空区煤层气抽采,采动区地面倾斜钻井、水平型钻井煤层气抽采,高瓦斯、特大型矿井安全高效煤层气抽采、井下松软煤层钻进技术与煤层气强化抽采5项示范任务,初步形成了符合两淮矿区松软、低透气性、中厚、多组煤层群开采条件下煤层气立体抽采技术;“十二五”期间,两淮开展中煤阶、松软煤层群采煤采气一体化抽采技术,未采区、采动区煤层气抽采技术,松软煤层钻进技术与煤层气强化抽采技术,高瓦斯特大型矿井煤层气高效抽采与就地利用系统,形成两淮矿区700~800m埋深煤层群煤层气立体高效抽采模式;“十三五”期间,两淮示范区开展了地面水平井分段压裂煤层气抽采技术、地面采动区井卸压煤层气抽采技术、井下松软煤层煤层气强化抽采技术、煤层气抽采巷道盾构及以孔代巷施工技术、低浓度煤层气利用技术应用示范。形成煤矿用盾构机施工专用煤层气抽采巷道成套技术、高压低透气性条件下地面水平井分段压裂施工工艺、“以孔代巷”煤层气抽采钻孔施工工艺、采动区L型井抽采煤层气施工工艺、松软煤层水力化增透施工工艺等新工艺及装备,实现了深部碎软低渗煤层群地面煤层气抽采技术突破。

通过两淮矿区煤层群开采条件下煤层气抽采示范工程的实施,煤层气抽采量、抽采率和利用率均显著提高2020年煤层气年抽采量稳定在 $5.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤层气年利用量达到 $2.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。矿区新增发电机组46台,合计装机功率38450kW,浓度在10%~30%

的煤层气利用率提高到40.1%。在示范工程的有力保障下,两淮矿区煤炭产量稳步提升。

3.3 松藻矿区复杂松软煤层超前增透协调开发模式

松藻矿区具有地质构造复杂、煤体松软、储层压力低、储层渗透率低、含气饱和度低和储层含气量高的特点,是我国南方矿区,特别是西南地区、湖南省、江西省等煤矿区的典型代表。松藻矿区地质构造复杂,煤层赋存条件差,开采难度大,煤层原始瓦斯含量高,煤层松软,渗透率低,煤层瓦斯压力大,煤层气资源丰富。松藻矿区属于近距离松软低渗突出煤层群开发条件,主要面临着煤层突出危险严重、煤层预抽效果差、邻近层卸压煤层气涌出量大等难题^[42-46]。

3.3.1 开拓区、准备区、采空区煤层气超前抽采

开拓区是指煤层增透之前所掘进的巷道。为煤层增透和煤层气抽采提供超前空间和时间条件,将开拓区的底板巷道开拓工序与准备区的煤层增透抽采钻孔、煤层增透和煤层气抽采施工工序分开,底板主要巷道超前于瓦斯抽采巷道开拓掘进,确保专用瓦斯抽采巷道的施工。

准备区是布置出满足安全开采条件的工作面。通过实施石门揭煤水力压裂、煤层气预抽钻孔的施工、煤层气预抽,在底板瓦斯抽采巷向保护层掘进条带区域打压裂钻孔并进行水力压裂,以及施工穿层钻孔进行掘进条带预抽。

被保护层瓦斯预抽区域达到安全标准后,进行被保护层的回采,以此形成一个保护层开采和被保护层的循环开采。为保证保护层安全开采,需进行采空区煤层气抽采,保护层采空区抽采方式采用采空区密闭插管抽采和回风巷高位钻孔抽采方式。

3.3.2 超前增透协调开发技术体系

根据保护层开采的石门揭煤→煤巷掘进→工作面回采→形成采空区时间顺序,将煤层气抽采划分为掘前预抽、采前预抽、采中抽采、采后抽采4个阶段。在煤层群赋存条件下,掘前预抽中的石门揭煤预抽技术不仅限于抽采石门揭开保护层区域的煤层气,也抽采石门揭开其他煤层区域的煤层气;掘前预抽中的保护层穿层条带预抽、采前预抽、采中抽采中的保护层顺层卸压抽采技术主要抽采保护层煤层气;采中抽采中的被保护层穿层卸压抽采技术主要抽采被保护层煤层气;采后抽采技术主要抽采保护层采空区及被保护层采空区煤层气^[47-51],如图5所示。

3.3.3 重大专项示范工程的示范与成效

通过技术攻关,以松软突出煤层水力压裂增透为主的综合抽采技术在松藻矿区得到成功应用,推

动了高突矿井煤层气抽采技术的大幅跨越，与传统技术相比，煤层气抽采量提高 3~5 倍，石门揭煤时间缩短 5 个月以上，突出保护煤层掘进单进提高 55%~90%，保护层回采单产提高 57%，为我国煤矿井下松软突出煤层的安全高效开采提供了成功的系列化水力压裂增透抽采煤层气的典范。

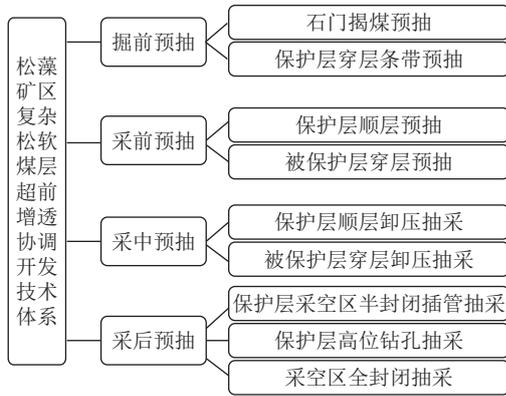


图 5 松藻矿区复杂松软煤层超前增透协调开发技术体系

Fig.5 Advanced anti-reflection coordinated development technology system of complex soft coal seam in Songzaoyuan Mining Area

重大专项实施期间，松藻矿区累计生产原煤 5 429 万 t，抽采煤层气 24.97 亿 m³、利用煤层气达 17.54 亿 m³，煤层气年抽采量由 1.96 亿 m³ 增加至 2.47 亿 m³、增加 0.51 亿 m³，矿井瓦斯抽采率由 55.89% 增加至 67.33%、增加 20.47%。随着项目实施的推进，大量的新装备、新技术和新工艺的引进和推广应用，矿区煤层气抽采技术不断完善，煤与瓦斯突出事故得到有效遏制，2010—2015 年消除了煤与瓦斯突出等瓦斯事故，确保了矿区的良性发展。

3.4 新疆矿区大倾角多煤组“三位一体”协调开发模式

3.4.1 新疆矿区煤层气开发地质条件

新疆矿区乌东煤矿北采区主采八道湾向斜北翼煤层，北采区含煤地层为中侏罗统的西山窑组，目前主要开采煤层为 45 号煤层和 43 号煤层，平均煤层倾角 45°，采用水平分层走向长壁综采放顶煤开采，各区段高度 25 m。乌东煤矿工作面瓦斯涌出主要来源是开采本分层和下部煤体瓦斯涌出，其涌出量占到整个涌出量的 95% 以上。

3.4.2 大倾角多煤组“三位一体”协调开发技术体系

乌东煤矿瓦斯抽采应该是以煤层瓦斯预抽及卸压瓦斯拦截抽采和采空区瓦斯抽采措施为核心的立体化瓦斯抽采成套技术体系^[52]。大倾角采动地面井 3 种模式的提出及失稳机制的揭示，宜采用大倾角多

煤组“避、抗、让、疏、护”采动区地面井抽采成套技术、大倾角碎软低渗井下区域化成套抽采工艺与技术，有效降低了生产投入和“采—掘—抽”接替时间，形成煤矿区大倾角煤层气开发利用三位一体技术模式，提出“三孔四区五量”煤与煤层气协调开发模式，实现煤矿区煤层气协调开采的定量分析与评价。先导试验中大倾角采动区地面井工作面平均抽采率 53.13%，倾角 (30°~50°) 煤层下向顺层长钻孔单孔深度达到 216 m，形成符合新疆主要高瓦斯矿区特点的煤层气抽采、利用关键技术和典型模式^[52]，如图 6 所示。

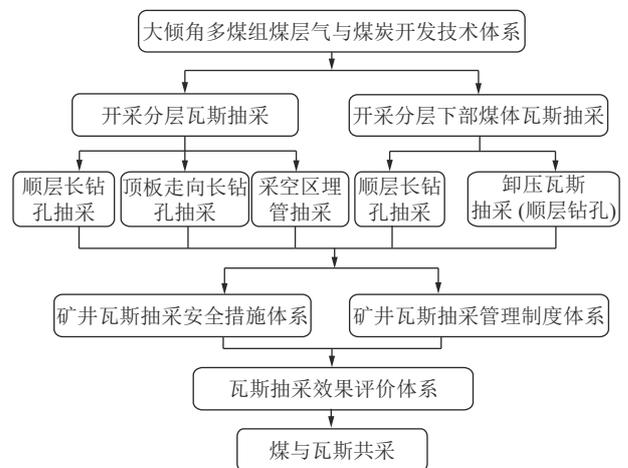


图 6 新疆矿区大倾角多煤组煤层气与煤炭协调开发技术体系

Fig.6 Coordinated development technology system of coal mine methane and coal in large dip coal group in Xinjiang Mining Area

3.4.3 现场先导试验的示范与成效

乌东煤矿下属一九三〇煤矿 24312 工作面的先导试验的卸压涌出瓦斯抽采比例为 37.51%~75.92%，平均比例为 51.41%。煤炭开采效率为 72.4%，瓦斯抽采效率为 84.6%。煤炭开采量为 25.3 万 t，最优预抽采瓦斯量为 175 万 m³、采中抽采瓦斯量为 28.7 万 m³、采后抽采瓦斯量为 6.1 万 m³，为一九三〇煤矿在现有技术条件下实现煤层气与煤炭高级耦合协调开发提供优化方向。

通过山西、两淮、松藻、新疆矿区示范工程和现场试验的成功实施，带动项目成果在全国煤矿区得到良好推广应用，有效推动了全国煤层气产业建设。在全国高瓦斯矿井大量关闭、煤矿数量大幅减少(由 2008 年的 1.8 万处降到 2020 年的 4 700 处)的背景下，煤矿井下煤层气抽采量由 2008 年的 53×10⁸ m³ 大幅增长并稳定在 2020 年的 130×10⁸ m³ 左右，利用

量由2008年的 $16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 大幅增长至2020年的 $57 \times 10^8 \text{ m}^3$,利用率稳步提升。

通过国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目的总体实施,在“协调开发、提质增效、技术支撑、平台决策、集成示范”总体思路的指导下,煤矿区煤层气项目组开展研究攻关,构建了煤层气与煤炭协调开发决策布局优化方法与技术体系,健全完善了我国煤矿区煤层气行业具有特色优势、先进实用的协调开发模式,引领了我国煤矿区煤层气行业科技创新^[53-59],显著提升煤矿区煤层气开发利用水平。

4 煤层气与煤炭协调开发发展方向

当前全球气候变化和温室气体减排相关的技术创新和实践正成为世界各国共同发展的重要能源技术方向。我国正在进行能源战略调整,随着国家生态文明建设和双碳目标的深入推进,以甲烷为主的煤矿区煤层气资源将成为重要的开发利用对象,实现煤矿区煤层气资源的高效开发利用,煤层气与煤炭协调开发具有广阔的发展前景。

我国能源生产和利用方式向“安全、绿色、清洁、高效”方向发展,清洁能源需求大增,天然气消费需求和产量需求大增^[60],是煤层气产业发展的重大机遇但同时煤矿区煤层气发展面临新需求新挑战^[61-63]。煤炭去产能政策导致关闭矿井大幅增加,导致煤矿区煤层气开发源头减少;煤炭产能逐渐战略性向西部转移,煤矿区煤层气抽采需面对集约化、低煤层瓦斯、高回采瓦斯矿井的技术挑战^[64];煤矿的智能化无人化发展为煤层气智能化开发技术提出挑战。

针对我国煤矿区煤层气开发中出现的新形势新变化,亟需积极突破关键技术瓶颈,重点攻克关键技术,开展工程技术验证,实现技术集成创新,构建我国煤矿区煤层气清洁高效可持续开发新的技术体系。重点推进煤矿区煤层气地质精细探查、井下煤层气高效开发、废弃矿井煤层气抽采、煤系气协同共采等技术创新与进步。要攻克的技术难题包括:地面排采单井有效控制范围小,井下中硬以上煤层的大盘区抽采和碎软煤层的区域递进式抽采钻孔能力、增渗能力弱,井下煤层气抽采系统内浓度波动控制难,废弃矿井及煤矿区煤系气开发缺乏适用的技术体系支撑。面向晋陕蒙新等我国煤矿区主战场,研发地面、井下及井上下联合煤层气区域化快速高效开发关键技术及装备,构建煤矿区煤层气与煤炭清洁高效开发的新技术体系。

5 结 论

1) 我国煤层气资源量大多分布在地质构造复杂、较复杂、低渗碎软煤层等地区,大多数煤层气储层具有低压、高应力、低渗特征,煤矿区煤层气与煤炭协调开发要基于煤矿区煤层气地质条件的分类合理实施。

2) 煤层气与煤炭协调开发的关键在于协调煤炭开采与煤层气开发的时空关系,提出煤矿规划区、准备区、生产区和采空区“四区”联动煤矿区煤层气协调开发的重要概念,形成煤层气与煤炭协调开发评价方法,实现了采煤工作面煤与煤层气协调开发效果评价与协调开发模式优化决策指标体系。

3) 基于采煤与采气开采顺序,总结提出煤矿区煤层气井上下联合抽采技术、采动区煤层气抽采技术、煤矿井下煤层气抽采技术、煤矿区碎软煤层低透气性煤层增渗技术的煤层气与煤炭协调开发技术体系。

4) 凝练总结山西矿区煤层气“四区联动”全域协调开发模式、两淮矿区煤层群煤层气立体联合开发模式、松藻矿区复杂松软煤层超前增透协调开发模式、新疆矿区大倾角多煤组“三位一体”协调开发模式,为全国煤矿区得到良好推广应用、带动全国煤层气产业建设提供可供借鉴的示范。

5) 指出煤矿区煤层气发展面临新需求新挑战,重点推进煤矿区煤层气地质精细探查、井下煤层气高效开发、废弃矿井煤层气抽采、煤系气协同共采等技术研发,构建煤矿区煤层气与煤炭清洁高效开发的新技术体系。

致谢: 本文研究成果主要形成于“十三五”国家科技重大专项“煤矿区煤层气抽采利用关键技术与装备”项目及下属课题“煤与煤层气协调开发模式及技术的优化集成应用”,也包括“山西重点煤矿区煤层气与煤炭协调开发示范工程”“两淮矿区煤层群开采条件下煤层气抽采示范工程”“重庆松藻矿区复杂地质条件下煤层气开发示范工程”“新疆大倾角多煤组煤矿区煤层气开发利用技术”等课题、示范工程的研究内容和重要成果。参与研究工作的单位包括中国煤炭科工集团有限公司及下属单位、晋能控股集团、淮河能源(集团)股份有限公司、淮北矿业(集团)有限责任公司、煤与煤层气共采国家重点实验室、重庆大学等10余家企业、高等院校和科研院所。他们对此进行了大量的研究工作,为本文的撰写提供了坚实的基础资料,限于文章篇幅,不能一一列出,在此一并表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] 矿区煤层气开发项目组. 煤层气与煤炭协调开发理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 1-63.
Coal mine gas development project group. Theory and technology of coordinated development of coalbed methane and coal resources[M]. Beijing: Science Press, 2021: 1-63.
- [2] 程爱国, 孙杰. 全国煤炭资源潜力评价[J]. 中国科技成果, 2019(2): 15-16.
CHENG Aiguo, SUN Jie. National coal resource potential evaluation[J]. China's Scientific and Technological Achievements, 2019(2): 15-16.
- [3] 国土资源部油气资源战略研究中心. 全国煤层气资源评价[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2009: 1-229.
Strategic research center of oil and gas resources, ministry of land and resources. Coal mine methane resources of China[M]. Beijing: China University of Mining & Technology Press, 2009: 1-229.
- [4] 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 coal bed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258-267.
- [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 prospects of coal mine methane development and utilization technology of coal mine area in China[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 1-4.
- [6] 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, *et al.* Coordinated development mode and evaluation method of coal mine methane and coal in coal mine area in China[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1221-1229.
- [7] 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 coal mine methane and coal coordination mining mode[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(3): 1-4.
- [8] 申宝宏, 刘见中, 张泓. 我国煤矿瓦斯治理的技术对策[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 673-679.
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, ZHANG Hong. The technical measures of gas control in China coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 673-679.
- [9] 袁亮, 薛俊华, 张农, 等. 煤层气抽采和煤与瓦斯共采关键技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 6-11.
YUAN Liang, XUE Junhua, ZHANG Nong, *et al.* Development orientation and status of key technology for mine underground coal bed methane drainage as well as coal and gas simultaneous mining[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 6-11.
- [10] 申宝宏, 刘见中, 赵路正. 煤矿区煤层气产业化发展现状与前景[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 6-10.
SHEN Baohong, LIU Jianzhong, ZHAO Luzheng. Present status and outlook of coal bed methane industrial development in coal mine area[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 6-10.
- [11] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 我国煤与瓦斯共采: 理论、技术与工程[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1391-1397.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, *et al.* Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391-1397.
- [12] 张遂安. 采煤采气一体化理论与实践[J]. 中国煤层气, 2006, 3(4): 13-16.
ZHANG Suian. Theory and practice of integrated coal mining and gas extraction[J]. China coal mine Methane, 2006, 3(4): 13-16.
- [13] 贾承造. 煤层气资源储量评估方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 1-155.
JIA Chengzao. CBM resource reserve assessment method[M]. Beijing, Petroleum Industry Press, 2007: 1-155.
- [14] 张子敏, 吴吟. 中国煤矿瓦斯地质规律与编图[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014: 1-220.
- [15] 张子敏, 吴吟, 2013. 中国煤矿瓦斯赋存构造逐级控制规律与分区划分[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 237-245.
ZHANG Zimin, WU Yin. Tectonic-level-control rule and area-dividing of coalmine gas occurrence in China[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 237-245.
- [16] 舒龙勇, 樊少武, 张浪, 等. 我国煤矿井下规模化抽采煤层气技术模式初探[J]. 煤矿安全, 2016, 47(12): 149-153.
SHU Longyong, FAN Shaowu, ZHANG Lang, *et al.* Technical mode of underground large-scale extracting coal mine methane in coal mines of China[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(12): 149-153.
- [17] 季文博. 煤炭与煤层气协调开发问题研究[J]. 煤炭经济研究, 2015, 35(8): 62-65.
JI Wenbo. Comments on problems and target of coal bed methane coordinative development[J]. Coal Economic Research, 2015, 35(8): 62-65.
- [18] 李勇, 王延斌, 倪小明, 等. 煤层气低效井成因判识及治理体系构建研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 185-193.
LI Yong, WANG Yanbin, NI Xiaoming, *et al.* Study on identification and control system construction of low efficiency coalbed methane wells[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 185-193.
- [19] 晋香兰. 煤矿区煤与煤层气协调开发模式的探讨—以晋城矿区为例[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(9): 16-19.
JIN Xianglan. A discussion on coal and cbm coordinated exploitation mode in coalmine areas- a case study in Jincheng mining area[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(9): 16-19.
- [20] 张新民, 郑玉柱. 煤层气与煤炭资源协调开发浅析[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(3): 19-26.
ZHANG Xinmin, ZHENG Yuzhu. Analysis on coordinated development of CBM and coal resources[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(3): 19-26.
- [21] 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.
- [22] 蔺景德, 方惠军, 王建飞, 等. 基于生产数据重整的煤层气开发动态分析[J]. 天然气工业, 2018, 38(S1): 80-85.
LIN Jingde, FANG Huijun, WANG Jianfei, *et al.* Dynamic ana-

- lysis of coal mine methane development based on production data reconstruction[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(S1): 80–85.
- [23] 王亮. 基于大数据分析的可视化技术[J]. *电子技术*, 2020, 49(9): 74–75.
WANG Liang. Study on visualization technology based on big data analysis[J]. *Electronic Technology*, 2020, 49(9): 74–75.
- [24] 王强. BP神经网络模型在数据分析中的应用[J]. *电子技术与软件工程*, 2020(12): 189–190.
WANG Qiang. Application of BP neural network model in data analysis[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2020(12): 189–190.
- [25] 薛丹. 基于大数据分析的煤层气井排采参数关系研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019: 1–55.
XUE Dan. Research on the relationship of coal-bed methane well drainage parameters based on big data analysis. [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2019: 1–55.
- [26] 陈茜. 基于Hadoop的煤矿区煤层气开发利用大数据平台设计[J]. *煤炭经济研究*, 2018, 38(10): 71–75.
CHEN Qian. Design of big data platform for coal mine methane development and utilization based on Hadoop[J]. *Coal Economic Research*, 2018, 38(10): 71–75.
- [27] 徐华龙. 典型矿区煤层气与煤炭协调开发动态模拟研究[J]. *工矿自动化*, 2018, 38(10): 71–75.
XU Hualong. Research on dynamic simulation of coordinated development of coal mine methane and coal in typical mining areas[J]. *Industry and Mine Automation*, 2018, 38(10): 71–75.
- [28] 李首滨, 李森, 张守祥, 等. 综采工作面智能感知与智能控制关键技术与应用[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(4): 28–39.
LI Shoubin, LI Sen, ZHANG Shouxiang, *et al.* Key technology and application of intelligent perception and intelligent control in fully mechanized mining face[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 28–39.
- [29] 李泉新, 王鲜, 许超, 等. 瓦斯抽采顺煤层超长距定向孔钻进关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12): 168–174.
LI Quanxin, WANG Xian, XU Chao, *et al.* Key technology of drilling with ultra-long-distance directional hole for gas drainage along coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12): 168–174.
- [30] 李泉新, 石智军, 史海岐. 煤矿井下定向钻进工艺技术的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2014, 42(2): 85–88, 92.
LI Quanxin, SHI Zhijun, SHI Haiqi. The Application of directional drilling technology in coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014, 42(2): 85–88, 92.
- [31] 方俊, 石智军, 李泉新, 等. 新型煤矿井下定向钻进用有线随钻测量装置[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(8): 1–5.
FANG Jun, SHI Zhijun, LI Quanxin, *et al.* Novel cable measurement while drilling device used for directional drilling in coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(8): 1–5.
- [32] 石智军, 李泉新, 姚克. 煤矿井下水平定向钻进技术与装备的新进展[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2015, 42(1): 12–16.
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Latest developments of horizontal directional drilling technology and the equipments for underground coal mine[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(1): 12–16.
- [33] 张幼振, 张宁, 刘璞, 等. 典型含煤地层锚固孔钻进动力特性与地层信息识别研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 177–185.
ZHANG Youzhen, ZHANG Ning, LIUPu, *et al.* Study on drilling dynamic characteristics and stratum information identification of anchor hole intypical coal-bearing stratum[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 177–185.
- [34] 杜子健, 刘子龙. 煤矿井下顺煤层千米枝状长钻孔抽采瓦斯技术[J]. *矿业安全与环保*, 2007, 34(1): 27–30.
DU Zijian, LIU Zilong. Gas Drainage from Underground Mine with, 1600m Branched Long Holes along Seam[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2007, 34(1): 27–30.
- [35] 龚杰立, 李国富, 李德慧, 等. 山西省煤成气期查开发现状及探索[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.
- [36] 山西晋城矿区采气采煤一体化煤层气开发示范工程[R]. 晋城: 山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司, 2011.
- [37] 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, JIAO Haibin, LIU Xing, *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.
- [38] 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.
- [39] 袁亮. 卸压开采抽采瓦斯理论与煤与瓦斯共采技术体系[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 1–8.
YUAN Liang. Theory of pressure-relieved gas extraction and technique system of integrated coal production and gas extraction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1): 1–8.
- [40] 袁亮. 瓦斯治理理念和煤与瓦斯共采技术[J]. *中国煤炭*, 2010, 36(6): 5–12.
YUAN Liang. Concept of gas control and simultaneous extraction of coal and gas[J]. *China Coal*, 2010, 36(6): 5–12.
- [41] 吴建国, 李伟. 淮北矿区煤层气抽采利用技术探讨[J]. *中国煤层气*, 2005, 2(5): 16–19.
WU Jianguo, LI Wei. Discussion on technology for drainage and utilization of CBM in Huibei Mining Area[J]. *China coal mine Methane*, 2005, 2(5): 16–19.
- [42] 宋岩, 柳少波, 琚宜文, 等. 含气量和渗透率耦合作用对高丰度煤层气富集区的控制[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 417–426.
SONG Yan, LIU Shaobo, JU Yiwen, *et al.* Coupling between gas content and permeability controlling enrichment zones of high abundance coal bed methane[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 417–426.
- [43] 胡千庭, 孙海涛. 煤矿采动区地面井逐级优化设计方法[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9): 1907–1913.
HU Qianting, SUN Haitao. Graded optimization design method on surface gas drainage borehole[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9): 1907–1913.
- [44] 滑俊杰, 张跃兵, 王向军. 顺层定向长钻孔预抽区段煤层瓦斯防突技术研究与应用[J]. *煤*, 2014, 23(7): 18–20.

- HUA Junjie, ZHANG Yuebing, WANG Xiangjun. Coal seam gas outburst prevention technology research and application of bedding directional drilling drainage long section[J]. *Coal*, 2014, 23(7): 18–20.
- [45] 张培河, 张明山. 煤层气不同开发方式的应用现状及适应条件分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2010, 38(2): 10–12.
ZHANG Peihe, ZHANG Mingshan. Analysis of application status and adapting conditions for different methods of CBM development[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2010, 38(2): 10–12.
- [46] 张群, 冯三利, 杨锡禄. 试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(3): 30–35.
ZHANG Qun, FENG Sanli, YANG Xilu. Basic reservoir characteristics and development strategy of coal mine methane resource in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(3): 30–35.
- [47] 李树刚, 林海飞, 赵鹏翔, 等. 采动裂隙椭圆带动态演化及煤与甲烷共采[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1455–1462.
LI Shugang, LIN Haifei, ZHAO Pengxiang, et al. Dynamic evolution of mining fissure elliptic paraboloid zone and extraction coal and gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1455–1462.
- [48] 杨科, 谢广祥. 采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(10): 1092–1096.
YANG Ke, XIE Guangxiang. Caving thickness effects on distribution and evolution characteristics of mining induced fracture[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(10): 1092–1096.
- [49] 孟召平. 煤层气开发地质学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1–50.
MENG Zhaoping. Geological theory and method of coalbed methane development. [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1–50.
- [50] 文光才, 孙海涛, 李日富, 等. 煤矿采动稳定区煤层气资源评估方法及其应用[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 160–167.
WEN Guangcai, SUN Haitao, LI Rifu, et al. Assessment method and application of coal mine methane resources in coal mining stability area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 160–167.
- [51] 李日富. 采动影响稳定区煤层气储层及资源量评估技术的研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 1–66.
LI Rifu. Study and application of CBM reservoir and resource assessment technology in stable areas affected by mining[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 1–66.
- [52] 孙东玲, 曹偈, 苗法田, 等. 突出煤-瓦斯在巷道内的运移规律[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(10): 2773–2779.
SUN Dongling, CAO Jie, MIAO Fatian, et al. Migration law of outburst coal and gas in roadway[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(10): 2773–2779.
- [53] 李泉新, 许超, 刘建林, 等. 煤矿井下全域化瓦斯抽采定向钻进关键技术与工程实践[J/OL]. *煤炭学报*: 1–9[2022-06-16]. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1412.
LI Quanxin, XU Chao, LIU Jianlin, et al. Key technology and practice of directional drilling for gas drainage in different formations and mining times underground in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 1–9[2022-06-16]. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1412.
- [54] 李泉新, 刘飞, 方俊, 等. 我国煤矿井下智能化钻探技术装备发展与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 265–272.
LI Quanxin, LIU Fei, FANG Jun, et al. Development and prospect of intelligent drilling technology and equipment for underground coal mines in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6): 265–272.
- [55] 李全贵, 翟成, 林柏泉, 等. 定向水力压裂技术研究与应用[J]. *西安科技大学学报*, 2011, 31(6): 735–739.
LI Quanguai, ZHAI Cheng, LIN Baiquan, et al. Research and application of directional hydraulic fracturing technology[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2011, 31(6): 735–739.
- [56] 俞海玲. 高压气体预裂爆轰作用致裂煤岩机理及应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019: 1–10.
YU Hailing. Study on the mechanism and application of high pressure gas precracking and detonation to crack coal and rock. [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019: 1–10.
- [57] 高鑫浩, 王明玉. 水力压裂-深孔预裂爆破复合增透技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 318–324.
GAO Xinhao, WANG Mingyu. Study on hydraulic fracturing-deep hole pre-splitting blasting composite permeability enhancement technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 318–324.
- [58] 康向涛. 煤层水力压裂裂缝扩展规律及瓦斯抽采钻孔优化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 1–53.
KANG Xiangtao. Study on fracture propagation law and gas extraction drilling optimization in hydraulic fracturing of coal seam. [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 1–53.
- [59] 倪小明, 王延斌, 接铭训, 等. 不同构造部位地应力对压裂裂缝形态的控制[J]. *煤炭学报*, 2008, 33(5): 505–508.
NI Xiaoming, WANG Yanbin, JIE Mingxun, et al. Stress's influence on different tectonic positions on fracturing interstitial morphology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(5): 505–508.
- [60] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 中国天然气发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2021.
- [61] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 1–14.
XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coal mine methane development in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 1–14.
- [62] 秦勇. 煤系气聚集系统与开发地质研究战略思考[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(8): 2387–2399.
QIN Yong. Strategic thinking on research of coal measure gas accumulation system and development geology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(8): 2387–2399.
- [63] 秦勇, 申建, 史锐. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 371–387.
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 371–387.
- [64] 贺天才, 王保玉, 田永东. 晋城矿区煤与煤层气共采研究进展及急需研究的基本问题[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(9): 1779–1785.
HE Tiancai, WANG Baoyu, TIAN Yongdong. Development and issues with coal and coal-bed methane simultaneous exploitation in Jincheng mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9): 1779–1785.