

我国煤矿瓦斯抽采与利用发展历程、技术进展及展望

李国富 李超 张碧川 徐云 王争 周显俊

引用本文:

李国富, 李超, 张碧川, 等. 我国煤矿瓦斯抽采与利用发展历程、技术进展及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 77–91.
LI Guofu, LI Chao, ZHANG Bichuan, et al. Gas drainage and utilization in coal mines in China: History, technological advances, and prospects[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(1): 77–91.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.11.0712>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国煤矿保护层开采卸压瓦斯抽采现状及发展趋势

Current situation and development trend of pressure-relief gas extraction in the protective layer mining in coal mines in China
煤田地质与勘探. 2023, 51(6): 50–61 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.11.0894>

煤矿隐伏小断层的瓦斯抽采钻孔探测方法

The concealed small faults detection based on gas drainage boreholes along and cross the coal seam
煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 69–77 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.009>

废弃井“一井多用”瓦斯抽采关键技术及应用

One surface borehole with multi-usage gas drainage key technology for abandoned well and its application
煤田地质与勘探. 2023, 51(3): 1–9 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0513>

废弃煤矿采空区瓦斯抽采可行性评价模型构建及应用

Construction and application of feasibility evaluation model for gas extraction in goafs of abandoned coal mines
煤田地质与勘探. 2022, 50(7): 107–117 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.11.0686>

煤矿井下大盘区瓦斯抽采定向钻进技术与装备

Directional drilling technology and equipment for gas drainage in large panel of underground coal mines
煤田地质与勘探. 2022, 50(4): 147–152 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.06.0348>

定向长钻孔瓦斯抽采负压变化规律及监测控制技术研究进展

Research progress on variation pattern and monitoring control technology of negative pressure for gas drainage in directional long borehole
煤田地质与勘探. 2024, 52(11): 171–182 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.05.0284>



移动阅读

李国富, 李超, 张碧川, 等. 我国煤矿瓦斯抽采与利用发展历程、技术进展及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 77–91. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.11.0712

LI Guofu, LI Chao, ZHANG Bichuan, et al. Gas drainage and utilization in coal mines in China: History, technological advances, and prospects[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 77–91. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.11.0712

我国煤矿瓦斯抽采与利用发展历程、技术进展及展望

李国富^{1,2}, 李 超^{1,3}, 张碧川^{1,4}, 徐 云^{1,2}, 王 争^{1,2}, 周显俊^{1,2}

(1. 煤与煤层气共采全国重点实验室, 山西 太原 030032; 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. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 太原理工大学, 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:【目的和方法】为加快推进煤矿瓦斯抽采与利用技术的研发与应用, 通过系统梳理我国煤矿瓦斯抽放向瓦斯抽采转变的发展历程, 总结归纳我国典型煤矿瓦斯精准高效抽采技术, 全面介绍煤矿瓦斯安全集输与全浓度利用技术最新应用情况, 以期为加速发展煤矿瓦斯抽采与利用技术、实现甲烷减排、助力碳达峰碳中和(“双碳”)目标提供借鉴。**【进展】**20 世纪 30—50 年代是我国煤矿瓦斯抽放的起步阶段, 主要在辽宁抚顺、山西阳泉、重庆天府等矿区采用井下钻孔法抽放本煤层瓦斯和上邻近层瓦斯保障采掘安全; 60—70 年代, 黑龙江鸡西、贵州水城等矿区采取边掘边抽措施防治瓦斯超限与事故, 取得了良好效果, 开发了邻近层瓦斯抽放技术, 针对低透气性煤层试验了煤层水力割缝、控制预裂爆破、水射流扩孔等方法; 自 20 世纪 80 年代开始, 随着工作面瓦斯涌出量大幅度增加, 有针对性地应用本煤层瓦斯预抽、邻近层瓦斯抽放和采空区瓦斯抽放等多种方法对卸压瓦斯进行了有效抽放, 但瓦斯利用进展缓慢。进入 21 世纪后, 对煤矿瓦斯的认识已由单一灾害属性向灾害与资源共生属性转变, 逐步实现了变瓦斯抽放为瓦斯抽采, 结合不同矿区瓦斯地质条件差异性形成了以山西晋城“四区联动”井上下联合抽采模式、安徽两淮碎软低渗煤层保护层开采模式以及重庆松藻水力强化增透模式为典型代表的瓦斯抽采模式, 研发形成了水封阻火泄爆、干式阻火器、细水雾和自动喷粉抑爆等安全输送技术与装置, 迄今已获得广泛应用。在瓦斯利用方面, 研发应用了瓦斯发电、直流氧化、多孔介质燃烧、蓄热氧化、乏风瓦斯掺混氧化等技术, 为煤矿瓦斯“全浓度”利用提供了技术支撑。但煤矿瓦斯抽采仍然面临普适性差、成本高等难题, 利用技术主要面临经济性差的挑战。**【展望】**煤矿瓦斯抽采与利用技术的发展将聚焦至发展 10 a 规划区域瓦斯超前预抽采技术体系、扩展煤与瓦斯共采模式、源头优化瓦斯利用各环节、提升瓦斯抽采管网智能化水平、产-学-研-政联合攻关助力瓦斯利用项目落地等方面, 实现煤矿瓦斯的全浓度利用, 助力煤炭行业“双碳”目标的实现。

关键词: “双碳”目标; 瓦斯抽放; 瓦斯抽采; 瓦斯利用; 煤与瓦斯共采

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)01-0077-15

Gas drainage and utilization in coal mines in China: History, technological advances, and prospects

LI Guofu^{1,2}, LI Chao^{1,3}, ZHANG Bichuan^{1,4}, XU Yun^{1,2}, WANG Zheng^{1,2}, ZHOU Xianjun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal and Coalbed Methane Co-Mining, Taiyuan 030032, China; 2. Yi'an Blue Flame Coal and Coalbed Methane Co-Mining Technology Co., Ltd., Jincheng 048012, China; 3. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Key Laboratory of In-Situ Property Improving, Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective and Methods] To promote the research and application of gas drainage and utilization technolo-

收稿日期: 2024-11-18; 接收日期: 2025-01-15

基金项目: 山西省留学回国人员科技活动择优项目(20240059); 山西省科技重大专项项目(20201102001); 山西省揭榜招标项目(20201101001)

第一作者: 李国富, 1965 年生, 男, 山西晋城人, 博士(后), 正高级工程师。E-mail: 13834068216@163.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

gies for coal mines, this study systematically summarizes the history of China's coal mines transitioning from gas pumping to gas drainage, the accurate and effective gas drainage technologies for typical coal mining areas in China, and the latest applications of technologies related to safe gas gathering and transportation, as well as the utilization of gas with a full range of concentrations. This study aims to provide a reference for accelerating the advancement in gas drainage and utilization technologies for coal mines, achieving methane emission reduction, and helping attain the goals of carbon neutrality and peak carbon dioxide emissions. [Advancement] The period from the 1930s to the 1950s represents the initial stage of gas pumping in coal mines in China. During this period, underground drilling was employed for gas pumping in target coal seams and their upper adjacent strata to ensure mining safety in the Fushun mining area in Liaoning Province, the Yangquan mining area in Shanxi Province, and the Tianfu mining area in Chongqing City. From the 1960s to the 1970s, gas pumping while mining was used for the prevention and control of gas overrun and accidents in the Jixi and Shuicheng mining areas in Heilongjiang and Guizhou provinces, respectively, achieving encouraging results. During this period, gas pumping technology for adjacent strata was developed, and methods including hydraulic slotting, controlled pre-splitting blasting, and water jet reaming were tested for coal seams with low air permeability. From the 1980s to the end of the 20th century, with a substantial increase in the gas outflow from the mining face, pressure-relief gas was effectively drained using various methods including gas pre-drainage in target coal seams, as well as gas pumping in adjacent strata and goaves. However, this period witnessed slow advancement in gas utilization. Since the beginning of the 21st century, the understanding of gas in coal mines has transitioned from simple disasters to disasters associated with resources, gradually achieving the transformation from gas pumping to gas drainage. In combination with the differences in geological conditions of gas in varying mining areas, three typical gas drainage modes have been formed: the surface-underground combined gas drainage mode through “four-zone linkage” in the Jincheng mining area in Shanxi Province (the new Jincheng mode), the protective layer mining mode for broken-soft and low-permeability coal seams in the Huainan-Huaibei area in Anhui Province (the Huainan-Huaibei mode), and the hydraulically enhanced permeability mode of the Songzao mining area in Chongqing City (the Songzao mode). Concurrently this period has seen the development and extensive applications of many safe transportation technologies and devices, including water sealing of fire barriers and explosion venting devices, dry flame arresters, and explosion suppression devices through water mist/automatic powder spraying. In terms of gas utilization, many technologies have been researched and applied, involving gas power generation, direct current (DC) oxidation, combustion in porous media, regenerative oxidation, and oxidation by mixing ventilation air methane with low-concentration gas. These technologies provide technical support for the utilization of gas with a full range of concentrations from coal mines. Nevertheless, gas drainage technologies for coal mines are confronted with challenges including poor applicability and high costs, and related gas drainage technologies suffer from low economic feasibility. [Prospects] Gas drainage and utilization technologies for coal mines will focus on the development of the advanced gas pre-drainage technology system for ten-year planning areas, the expansion of the simultaneous extraction of coal and gas mode, the optimization of gas utilization processes from the source, the improvement in the intelligent level of gas drainage pipeline networks, and the implementation of gas utilization projects via government-industry-university-institute collaborations. This will help achieve both the utilization of gas with a full range of concentrations from coal mines and the goals of carbon neutrality and peak carbon dioxide emissions in the coal industry.

Keywords: carbon neutrality and peak carbon dioxide emissions; gas pumping; gas drainage; gas utilization; simultaneous extraction of coal and gas

煤炭是我国的兜底保障能源,而与煤伴生的瓦斯既是重要资源,也是煤矿生产中的重大危险源^[1-2]。瓦斯抽采(抽放)是防治煤矿瓦斯事故的基本方法,同时也为瓦斯利用提供了物质保障^[3-5]。早期,煤矿瓦斯多以灾害形式体现且缺乏高效利用的方法,导致煤矿瓦斯多以抽放直接排向大气为主,不进行直接利用,导致了温室效应的加剧^[6-7]。直至 21 世纪初,随着煤矿瓦斯资源化属性理念的转变与瓦斯集输利用技术的提升,使得煤矿瓦斯由原来以保障采掘安全的“抽放”变为兼顾安全与利用的“抽采”成为了可能。

瓦斯抽采(抽放)技术的发展历程是一个由被动到主动的过程,最初瓦斯抽放是基于不同位置的抽排需要,

根据煤炭生产而采取的配套工艺技术。但由于我国煤层渗透率低、差异性大,通过传统瓦斯抽采方式瓦斯含量不能快速降低,需要长时间进行超前规划和抽采^[8]。根据抽采时间与位置的不同可采用地面钻井与井下钻孔相互配合进行高效抽采^[9-10]。但随着浅部煤炭资源日益枯竭,煤炭开发向深部转移已成为新常态,导致瓦斯抽采的难度也相应增加^[11]。因此,为了缓解煤矿抽—掘—采衔接紧张的局面,相应的增渗技术也得到了长足的发展,其基本原理是基于多物理场的方法,利用多元多相介质对煤体的裂隙或者基质进行多场改性,促进瓦斯高效抽采^[12-13]。增渗介质、增渗工艺参数与同类型煤体解吸扩散特征匹配程度决定了瓦斯抽采的强化效

果,因此,不同类型的增渗技术为我国煤矿瓦斯的差异强化增渗促抽提供了多样化选择^[14-15]。在此基础上,基于我国典型煤田地质条件、瓦斯抽采方式的时空布置特征与相应的配套增渗技术,形成了瓦斯高效抽采的先进典型适配模式。

在瓦斯利用方面,根据瓦斯浓度可将瓦斯分为 3 类,即高浓度瓦斯、低浓度瓦斯与乏风瓦斯^[16-17]。高浓度瓦斯可以作为化工、燃料等的清洁能源,低浓度瓦斯则需要通过多种方式提高浓度(以下简称提浓)再进行利用。一般瓦斯浓度(甲烷体积分数,下同)在 30% 以上可以直接管输利用,16%~30% 可变压吸附提浓后管输利用、9%~16% 井口发电、6%~9% 井口直燃、1%~6% 蓄热氧化与掺混梯级利用,1% 以下的乏风瓦斯需要掺混后再利用^[18-19]。但受抽采获得的瓦斯浓度与效率的制约,进行瓦斯利用的瓦斯浓度与抽采量波动大,导致瓦斯利用系统不稳定等问题^[20-21]。为了发展煤矿瓦斯高效抽采与利用新质生产力,助力“双碳”目标,笔者系统论述近些年来,特别是近 20 a 来我国煤矿瓦斯抽采与利用发展历程、工作进展及取得的成果,分析总结我国煤矿瓦斯抽采与利用中存在的问题,提出未来研究工作的重点方向。

1 我国煤矿瓦斯抽采发展历程

1.1 煤矿瓦斯抽放起步阶段(20 世纪 30—50 年代)

明末宋应星所著的《天工开物》(1637 年)一书,记载了利用竹管引排煤中瓦斯的方法,这是最早关于煤矿人工排放煤中瓦斯的文献记载^[22]。1938 年,辽宁抚顺矿务局龙凤煤矿首次利用瓦斯抽放泵开展采空区瓦斯抽放,开启了我国利用机械设备抽放瓦斯的历程;1952 年,龙凤煤矿建立正规抽放泵站,标志着我国煤矿进入工业规模连续抽放瓦斯阶段^[22]。20 世纪 50 年代初期,在辽宁抚顺高透气性特厚煤层中首次采用井下钻孔预抽本煤层瓦斯;1957 年,山西阳泉矿务局四矿采用穿层钻孔抽放上邻近层卸压瓦斯获得成功,开创了我国邻近层抽放瓦斯的先例^[23-24]。此时,我国主要有辽宁抚顺、北票,山西阳泉,重庆天府等矿区的 6 座煤矿抽放瓦斯,年抽放量仅 6 000 万 m³。

1.2 煤矿瓦斯抽放发展阶段(20 世纪 60—70 年代)

从 20 世纪 60 年代开始,本煤层瓦斯采前预抽被广泛应用于单一煤层开采的高瓦斯或有煤与瓦斯突出风险的矿区,该方法适用于煤层透气性较好且预抽时间充足的情形^[25-26]。为了解决本煤层预抽时间短、瓦斯抽放率低等问题,在瓦斯预抽基础上发展了边采边抽,此方法在黑龙江鸡西、贵州水城等矿区得到很好的应用^[27-28],在煤巷掘进时采取边掘边抽措施防治瓦斯超限与事故^[29-30]。此外,在提高瓦斯抽放量方面,抚顺矿务

局开展了钻场内不同钻孔数量、钻孔角度、钻孔深度和抽放负压的试验,结果表明增加钻孔数量,加大孔径、孔深和提高抽放负压均能提高预抽瓦斯效果^[31-32]。

阳泉矿务局在生产实践中证明开采层邻近层及围岩为工作面瓦斯的主要来源之一,70 年代初该局的邻近层瓦斯抽放由 1 对矿井增至 10 对矿井。邻近层在抽放方法上可分为钻孔抽放和巷道抽放,钻孔抽放又可分为井下抽放和地面抽放。依据不同层位,邻近层抽放又可分为上邻近层和下邻近层抽放^[24,33],随着邻近层抽放法成为全国主要煤矿区抽放瓦斯的主要措施,被广泛应用于缓斜、倾斜和急倾斜煤层中,据统计当时使用此方法的抽放矿井达到全国抽放矿井总数的 70%。

煤层开采后改变了地层的原始应力分布,煤层透气性大大增加,卸压后的煤层和顶底板瓦斯大量向采空区涌入,造成回风巷瓦斯超限^[24,33]。随着采煤工作面瓦斯来源认识的不断深化,采空区瓦斯抽放成为防治瓦斯向工作面涌出的有效措施。其抽放方法主要有冒落拱钻孔、低位顶板走向或斜交钻孔、采空区埋管、工作面上隅角插管和开切眼引巷埋管或插管抽放等。

地面钻孔抽放煤层瓦斯始于 20 世纪 70 年代。原抚顺煤炭研究所在湖南红卫煤矿、山西阳泉煤矿和抚顺北龙凤矿进行大量试验,采用地面钻孔结合水力压裂技术预抽煤层瓦斯,试验结果表明只有少数钻孔能取得较好的抽放效果^[34]。70 年代中后期,辽宁铁法大隆矿及大明二矿、内蒙古包头武当沟矿进行了地面钻孔抽放邻近层瓦斯试验,结果表明采用此法抽采瓦斯需要准确确定钻孔终孔位置、解决钻孔堵孔等问题^[35]。

此外,针对低透气性煤层试验了多种强化抽放瓦斯的方法,如煤层水力割缝、控制预裂爆破、水射流扩孔、水力压裂及压气压裂等方法,水力割缝能使煤层透气性系数增加 1~2 个数量级,割缝区的瓦斯抽放量可增加 1~2 倍,控制预裂爆破可使煤层透气性系数增加 3~5 倍,瓦斯抽放量增加 0.50~0.87 倍。此阶段瓦斯抽采矿井由 20 座增加到 83 座,瓦斯抽采量由 1.6 亿 m³ 增至 2.48 亿 m³,但瓦斯利用进展缓慢^[36]。

1.3 煤矿瓦斯抽放成熟阶段(20 世纪 80 年代后)

自 20 世纪 80 年代开始,随着综采、机采和综放采煤技术的发展和运用,采区巷道布置方式有了新的改变,采掘推进速度加快、开采强度增大,使工作面绝对瓦斯涌出量大幅度增加。为解决工作面瓦斯涌出多源、瓦斯涌出量大的问题,根据工作面的特定瓦斯地质条件,实施对应瓦斯抽放措施,有针对性地应用本煤层瓦斯预抽、邻近层瓦斯抽放和采空区瓦斯抽放等多种方法,如河南平顶山煤业集团一矿、十矿,安徽淮南矿业集团谢一矿等^[37-38],实现了对卸压瓦斯的有效控制^[24]。

1.4 煤矿瓦斯抽放向瓦斯抽采的转变

瓦斯抽放是指采用专用设备把煤层、岩层和采空区中的瓦斯抽出或排出至大气中不加以利用,而瓦斯抽采则指将瓦斯抽出后对其加以利用。二者的根本区别在于对于瓦斯能否进行资源化利用。在瓦斯抽放中,是将瓦斯视为一种灾害,以保障煤炭的安全生产为主要目的。而瓦斯抽采则是将其视为一种资源,能够对其加以利用,其实质是对瓦斯的单一灾害属性向灾害与资源共生属性认识的转变。

21 世纪初,瓦斯的清洁资源属性已被广泛接受,学术界中瓦斯抽放这一名词也逐渐被瓦斯抽采逐步代替。而在标准层面,从 1996—2006 年颁布的《管道瓦斯抽放综合参数测定技术条件》《采空区瓦斯抽放监控技术规范》等规范仍以瓦斯抽放为主。瓦斯抽采这一名词在 2006 年颁布的《煤矿瓦斯抽采基本指标》首次出现,自 2006 年至今的瓦斯相关的标准中,例如《煤矿瓦斯抽采工程设计规范》等均以瓦斯抽采为唯一专有名词。

2020 年 9 月 22 日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布,中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和目标。而我

国的资源禀赋是“缺油、少气、相对富煤”,煤炭成为“兜底”能源是唯一的选择。为支撑“双碳”目标实现,煤矿瓦斯由抽放向抽采的转变是实现煤炭行业助力“双碳”目标的必然要求。此外,甲烷的温室效应是二氧化碳的 20 余倍,对煤矿瓦斯的高效抽采并进行安全集输与利用,有助于减缓温室效应并补充国家对于清洁能源的需求。因此,煤矿瓦斯的清洁高效抽采与利用是实现“双碳”目标的重要路径。

2 我国典型煤矿瓦斯精准高效抽采技术

2.1 精准抽采典型先进适用模式

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”的持续攻关,煤矿区瓦斯开发利用取得了一系列重大成果,从初期的井下瓦斯抽放逐步发展到井上下联合高效抽采、煤炭与煤层气(瓦斯)协调开发。结合不同矿区瓦斯地质条件差异性形成了以山西晋城“四区联动”模式、安徽两淮模式以及松藻模式为典型代表的瓦斯抽采模式(表 1)。3 种典型煤矿区瓦斯与煤炭协调开发模式配套的技术体系如图 1 所示。

表 1 煤矿瓦斯精准高效抽采模式
Table 1 Accurate and efficient gas drainage modes for coal mines

名称	模式特点	适用条件	典型区域
晋城“四区联动”模式	全矿区、全层位、全时段,规划区、准备区、生产区、采空区“四区联动”,井上下联合	高瓦斯、单一厚煤层	晋城寺河、成庄等
两淮模式	保护层卸压抽采	深部高瓦斯煤层群	淮南、淮北矿区
松藻模式	单一煤层/煤层群井下抽采	地质构造复杂、煤体碎软、储层压力低、储层渗透率低、含气饱和度低、储层含气量高	重庆松藻矿区

2.1.1 晋城“四区联动”模式

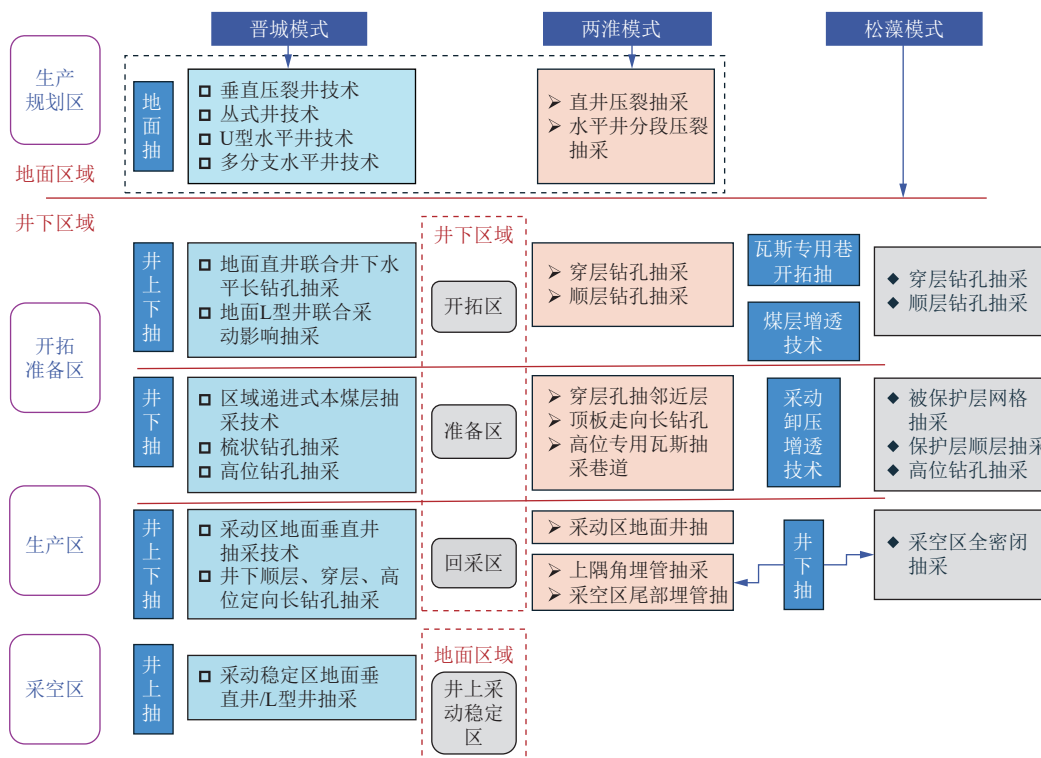
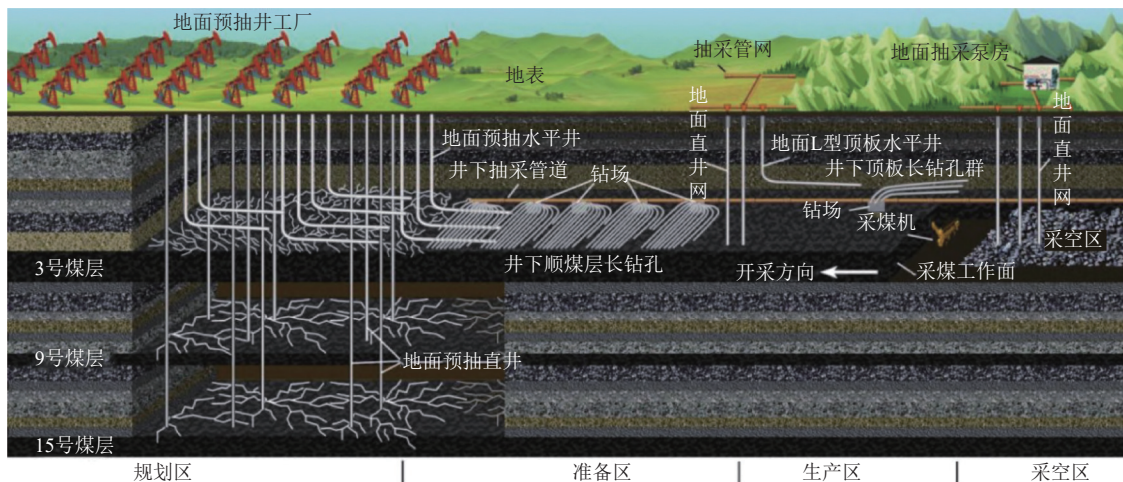
晋城矿区为典型高瓦斯无烟煤矿区。李国富等^[40]在“十一五”至“十二五”研发的瓦斯“三区联动”立体抽采模式基础上,依托“十三五”国家科技重大专项持续攻关,并紧密结合山西晋城、阳泉、西山、潞安等重点煤矿区生产实际,创新研发了全矿区、全层位、全时段的煤矿区瓦斯“四区(规划区、准备区、生产区、采空区)联动”井上下联合抽采模式(新晋城模式)和系列技术体系(图 2)。

煤矿区“四区联动”井上下联合抽采的核心内涵: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,统筹规划煤炭与瓦斯 2 种资源,先抽气后采煤,保障矿井建设与生产的有序衔接(图 3)。

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,瓦斯地面抽采主要以分段压裂水平井为主导超前大规模开发模式与技术。准备区是煤炭生产矿井近期(一般为 3~5 a)内即将进行回采的区域,主要是通过井下定向长钻孔与地面井压裂影响区沟通然后通过井下抽采系统加速抽采达标,实现煤矿瓦斯井上下联合快速抽采。生产区是指煤炭生产矿井的现有生产区域,基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,实现了生产区井下抽采精准达标,针对生产区上隅角瓦斯积聚问题,采用地面 L 型井进行生产区瓦斯地面抽采。采空区是指煤炭开采后煤矿地下留下的空间,通过地面安全钻采技术对运移到裂隙带的瓦斯进行抽采,形成煤矿采空区地面钻采技术。

2.1.2 两淮碎软低渗煤层群保护层开采煤与瓦斯共采模式

淮南矿区为典型碎软低渗煤层群,袁亮^[42]提出必

图1 典型煤矿区瓦斯与煤炭协调开发模式配套技术体系^[39]Fig.1 Technical systems for coordinated production modes of gas and coals in typical coal mining areas^[39]图2 “四区联动”井上下联合抽采模式(新晋城模式)^[40]Fig.2 Surface-underground combined gas drainage mode through “four-zone linkage” (the new Jincheng mode)^[40]

须首先在煤层群中选择保护层卸压开采来增加煤层透气性,实现卸压开采煤矿瓦斯。“十一五”至“十三五”期间,两淮矿区先后突破了碎软、低透气性、中厚、中深部、多组煤层群开采条件下瓦斯立体高效抽采技术^[42](图4)及高地应力低透气性条件下地面水平井分段压裂施工工艺等多项井上下立体抽采技术体系^[43]。

两淮模式核心内涵:利用首采煤层的远程采动卸压和顶板卸压煤岩层下沉变形破裂,使透气性成千倍增加^[44]。在首采层开采过程中,在顶板破裂弯曲下沉带,首创“卸压煤层底板岩巷和网格式上向穿层钻孔瓦斯抽采方法”,将顶板弯曲下沉带卸压煤层和底板鼓起卸

压膨胀带内的解吸瓦斯,通过顺层张裂隙汇集到网格式抽采钻孔,进行及时有效抽采(图5)。

2.1.3 西南松藻水力强化增透模式

松藻矿区位于四川盆地与贵州高原过渡带,属中低山切割剥蚀、侵蚀地形地貌特征,多为高山低谷,交通条件极为不便,不利于地面抽采钻井施工;同时矿区地处构造复合部位,地应力叠加集中,煤层埋藏深、原始透气性低,不具备地面钻井抽采瓦斯的储层条件^[45]。采用单一煤层/煤层群瓦斯井下抽采技术,将瓦斯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(图6),取得了单一煤矿井下抽采模式良好抽采效果。

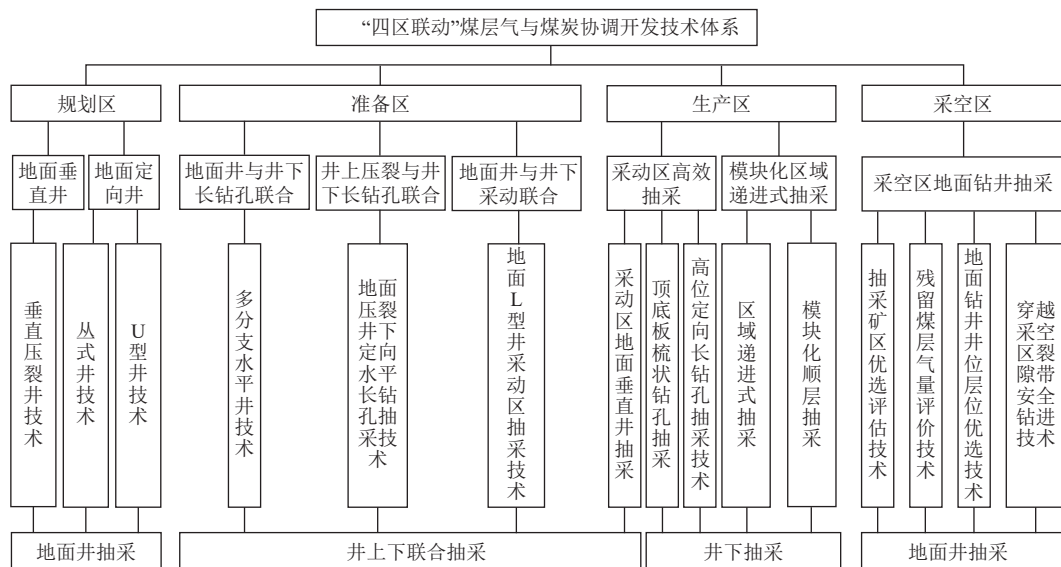


图 3 “四区联动”井上下联合抽采模式(新晋城模式)技术体系^[41]

Fig.3 Technical system for the surface-underground combined gas drainage mode through “four-zone linkage” (the new Jincheng mode)^[41]

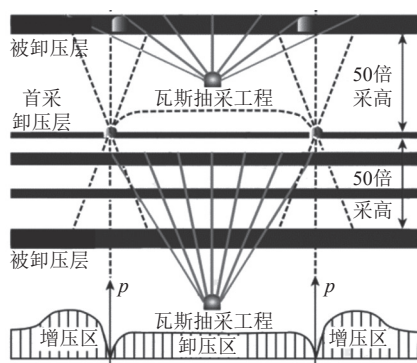


图 4 卸压开采抽采瓦斯^[42]

Fig.4 Gas drainage through coal seam pressure relief^[42]

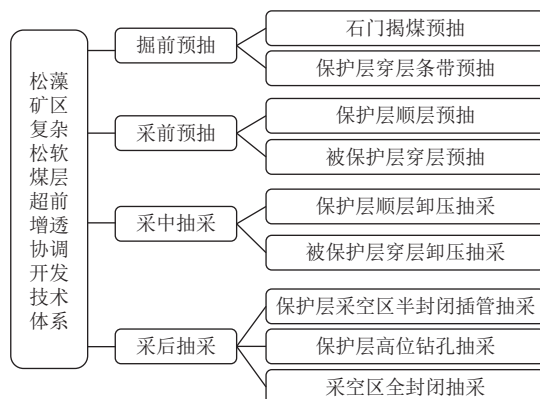


图 6 松藻模式技术体系^[41]

Fig.6 Technical system for the Songzao mode^[41]

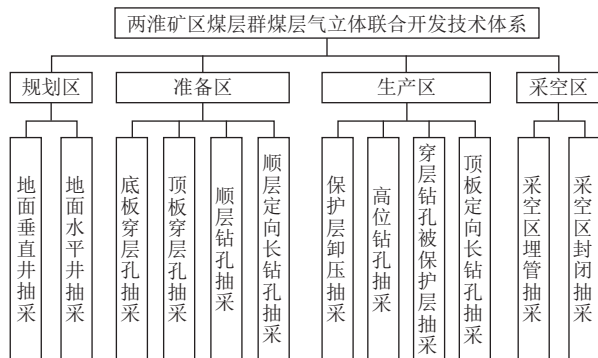


图 5 两淮模式技术体系^[41]

Fig.5 Technical system for the Huainan-HuaiBei mode^[41]

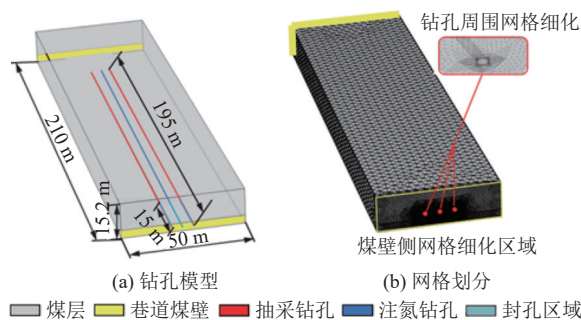


图 7 顺层钻孔

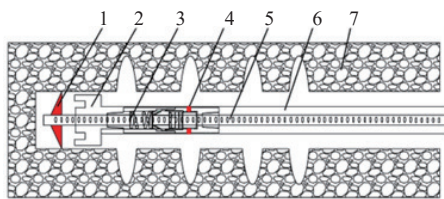
Fig.7 Bedding-parallel drilling

2.2 未卸压煤(岩)层抽采

2.2.1 顺层钻孔抽采技术

顺层钻孔抽采技术在矿井瓦斯治理方面应用效果显著,是降低煤层瓦斯含量的有效方法之一,对矿井瓦斯灾害防治具有重要意义。顺层钻孔抽采技术是指沿着煤层的层面进行钻孔,主要抽采本煤层瓦斯,工程施工相对容易(图 7)。

但顺层钻孔瓦斯抽采率影响因素较多,如抽采时间、抽采半径、钻孔直径、钻孔间距和钻孔长度等参数^[46]。实际生产中塌孔现象频繁发生,对此,许彦鹏等^[47]提出了一种冲-钻-护一体化技术,能够一次性完成钻孔钻进、水力冲孔造穴和不提钻全孔下放护孔筛管的施工技术,通过一种芯体部分可穿过筛管的造穴装备制成钻冲护一体化装置(图 8)。



1—孔底固定装置; 2—钻头; 3—钻冲护一体化装置; 4—喷头;
5—筛管; 6—钻杆; 7—煤体

图8 钻-冲-护一体化技术

Fig.8 Integrated drilling-flushing-protection technology

2.2.2 底抽巷+穿层钻孔抽采技术

回采工作面底板位置布置底抽巷是消除瓦斯突出危险性的有效举措之一^[48]。底抽巷在掘进过程中能改变上覆煤层的初始应力状态,产生的局部卸压有利于煤层中瓦斯解吸,通过在底抽巷布置穿层钻孔抽采机巷、风巷及工作面等区域的瓦斯(图9)。

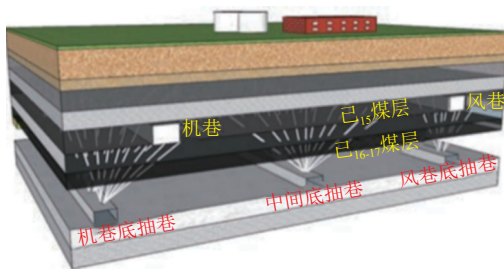


图9 底抽巷穿层钻孔瓦斯抽采^[49]

Fig.9 Gas drainage via crossing boreholes in bottom drainage roadways^[49]

2.3 采动卸压煤(岩)层抽采

为有效解决煤炭回采过程中瓦斯超限等生产安全难题,采用高位钻孔、顺层钻孔、底抽巷穿层钻孔和采空区抽采煤矿瓦斯等传统方法进行瓦斯治理,这些方法具有技术成熟、效果明显等优点,目前我国绝大部分煤矿均采用上述方法作为瓦斯治理的基本措施,下面按照钻孔所在的空间位置对相应瓦斯抽采技术进行系统介绍。

2.3.1 高位钻孔(高抽巷)抽采技术

顶板高位钻孔抽采技术是煤矿采空区和上隅角瓦斯治理的有效技术手段^[50]。通过在回风巷布置钻场,在工作面回采之前,以大倾角上仰开孔钻进至煤层顶板,由于高位钻孔深度大,且主要孔段均在采动“O”形圈裂隙带延伸,钻孔可长期稳定存在,以工作面回采时采动压力形成的顶板裂隙作为通道,能够有效抽采工作面煤壁、邻近煤层等区域的解吸瓦斯,实现工作面采空区及上隅角区域瓦斯高效抽采(图10)。

目前国内顶板高位钻孔大多仍以主孔长度小于300 m或直径在153 mm以下的定向钻孔为主,有效抽采孔段短、效果较差。近年来随着煤矿井下定向钻进技术与装备的发展和完善,李平等^[51]研发并应用了直

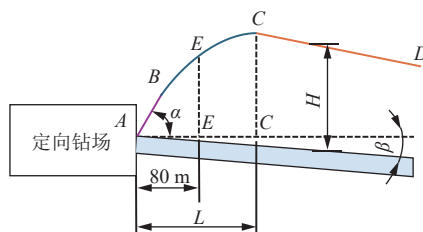


图10 高位定向钻孔

Fig.10 High-level directional drilling

径超过153 mm、长度超过500 m的顶板定向大直径长钻孔的施工工艺(图11),逐步成为采空区和上隅角瓦斯治理的重要手段。

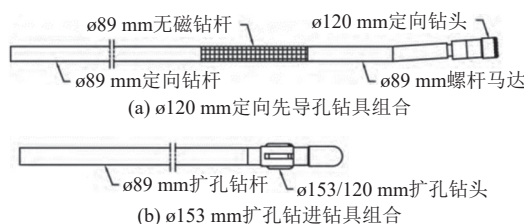


图11 顶板定向大直径长钻孔钻具组合^[51]

Fig.11 Drilling tool combinations for directional, large-diameter, long-distance drilling in the roof^[51]

2.3.2 采空区抽采技术

采空区瓦斯抽采可有效解决回采工作面上隅角瓦斯超限问题,地面钻井技术与之配合抽采采空区瓦斯,可提升煤矿安全生产效率和安全保障水平^[52]。王争等^[53]提出了通过地面施工井身轨迹为直线-曲线形式的单孔底定向孔的L型井身结构(图12),能够最大限度开发区域性密闭采空区瓦斯资源。

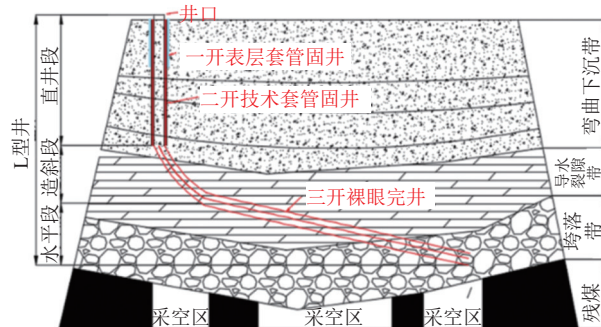


图12 采空区地面L型井身结构

Fig.12 Surface L-shaped well structure in the goaf

2.4 瓦斯强化抽采技术

基于卸压增透、驱替等原理,井下瓦斯强化抽采技术主要有水力强化措施(如水力冲孔、压裂、割缝等)、保护层开采、深孔爆破、气体驱替(ECBM)等方法^[54-55]。以上方法具有较好增产效果,但都存在一个共同问题:即瓦斯解吸速度较慢,当抽采负压未合理调整超过瓦斯解吸速度时,便会出现瓦斯浓度大幅度下降的状况。升温强化及微生物强化瓦斯抽采技术是近些年来新的研究方向,对井下瓦斯强化抽采有一定现实意义。

2.4.1 水力强化瓦斯抽采技术

水力强化瓦斯抽采技术,主要包括水力冲孔、割缝、压裂等^[56]。水力冲孔利用高压水射流冲刷钻孔内壁,增加抽采钻孔的半径及煤体揭露面积^[57]。水力割缝技术利用水高压射流对钻孔内的煤体进行切割,形成新的缝槽,实现降低煤层应力、增加煤层透气性的目的^[58]。水力压裂技术通过向储层中挤入高压压裂液产生裂缝并向远端扩张,实现煤层增透的目的^[59]。但目前水力强化瓦斯抽采技术存在一定的不足。其中,水力冲孔压力通常为 5~20 MPa,适用坚固性系数较小的软煤,但形成的孔洞不可控,容易造成垮孔、堵孔等现象;水力割缝压力一般为 30~60 MPa,适用于中等坚硬煤层,但割缝深度一般不超过 1 m,且施工过程中频繁退钻严重影响施工效率;水力压裂压力可达到 50~80 MPa,适用于坚固性系数较大的坚硬煤层,但压裂后裂缝有不同程度的闭合,导致瓦斯抽采难以持续。

2.4.2 CO₂ 强化瓦斯抽采技术

相比水力压裂带来的储层伤害问题,CO₂ 相变致裂技术是以气相介质为主,基本避免了储层伤害的难题。该技术具有起裂压力低、形成裂缝复杂、无储层伤害等诸多优势^[49,60],CO₂ 还可驱替 CH₄ 提高瓦斯产量。但存在裂缝宽度窄,流动摩阻高,携砂能力差等问题^[61-62]。因此,CO₂ 相变致裂技术适用于坚固性系数高、抗破损能力强的原生结构煤,对糜棱煤等构造煤改造效果较差。为此,丛日超等^[63]提出了一种利用特定聚能工具实现 CO₂ 聚能冲击+油套同注的工艺方法(图 13),可实现多次、持续可控冲击压裂,作业后再采用水基携砂液支撑裂隙,从而对煤储层进行精准高效压裂改造,具有很好的示范效果。

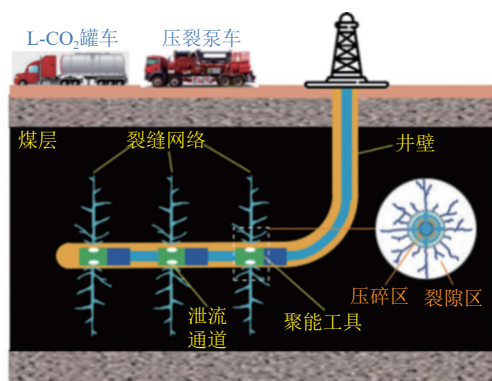


图 13 超临界 CO₂ 聚能压裂^[63]

Fig.13 Supercritical CO₂ fracturing^[63]

2.4.3 升温强化瓦斯抽采技术

升温强化瓦斯抽采技术是提高瓦斯采收率的有效方法之一^[64]。但目前国内外对升温强化瓦斯抽采技术的研究大多停留在实验室和数值模拟研究阶段,冯增朝团队^[65]进行了大量的理论研究、实验室试验及现场应

用(图 14),建立了瓦斯原位注热开发的水-气-热-固耦合模型,得出注高温水不仅可以提高甲烷解吸速度,还可以解除水锁效应,现场试验形成了间接注热和交替注热方法,均具有良好的应用效果。

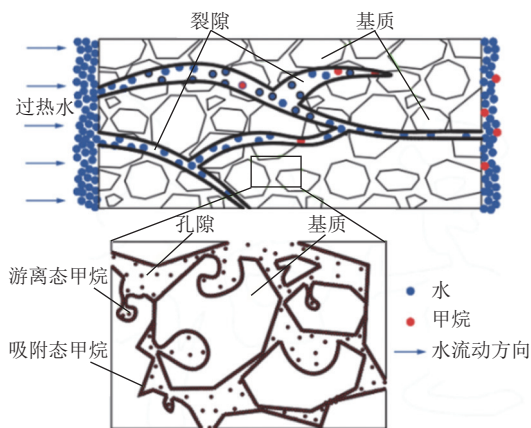


图 14 注热强化瓦斯抽采^[66]

Fig.14 Heat injection enhanced gas drainage^[66]

2.4.4 可控冲击波强化瓦斯抽采技术

对于一些增透难度极大导致瓦斯难以抽采的碎软煤层,如糜棱煤、破碎煤等,采用保护层卸压瓦斯抽采等增透技术成本较高,在采用水力、CO₂ 等强化瓦斯抽采技术效果不好的情况下,采用可控冲击波强化瓦斯抽采技术具有广阔的应用空间。为此,张永民等^[67]研发一种可控冲击波增透煤层装备和作业工艺流程(图 15),在贵州某矿顺层穿层钻孔进行了对照试验,根据煤岩力学性质特点确定最佳冲击参数,在单次冲击能量不变前提下合理设计增透段长度和冲击密度,增透后单孔抽采量较对照组平均提高 3.37 倍。

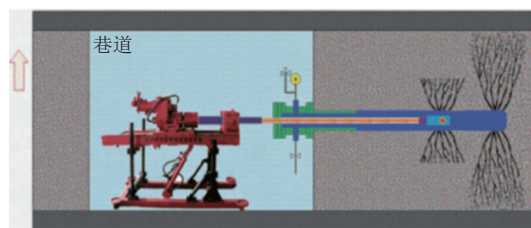


图 15 可控冲击波作业^[67]

Fig.15 Controlled shock-wave fracturing^[67]

3 煤矿瓦斯安全集输与全浓度利用技术

煤矿瓦斯的主要成分是甲烷,是仅次于二氧化碳的全球第二大温室气体,同时也是可供利用的清洁能源。在我国甲烷排放的来源构成中,煤矿瓦斯排名第一,约占总排放量的 40%^[67]。开展煤矿瓦斯全浓度利用,大幅度提高煤矿瓦斯利用率,是煤炭行业实现“双碳”目标的必然选择。

我国目前已形成以高浓度瓦斯为主、低浓度及乏

风瓦斯为辅的瓦斯梯级利用模式。低浓度瓦斯安全输送、瓦斯发电、变压吸附提浓、乏风瓦斯蓄热氧化等技术已规模化商业化利用。低浓度瓦斯直流氧化、多孔介质燃烧、膜分离提浓、催化氧化等新兴技术也日趋成熟。

3.1 安全集输技术与提浓技术

3.1.1 煤矿瓦斯浓度区间划分

煤矿瓦斯浓度通常指甲烷的体积分数。常温常压下, 甲烷在空气中的爆炸极限为 5%~16%, 是影响煤矿瓦斯安全利用的主要因素。从安全利用角度出发, 业内通常以 30% 和 1% 为界, 将煤矿瓦斯大体划分为: 高浓度瓦斯($\varphi(\text{CH}_4) \geq 30\%$)、低浓度瓦斯($1\% \leq \varphi(\text{CH}_4) < 30\%$)、乏风瓦斯($\varphi(\text{CH}_4) < 1\%$)。从利用技术途径的适用性出发, 又可进一步细分为: 超高浓度瓦斯($\varphi(\text{CH}_4) \geq 90\%$)、中高浓度瓦斯($30\% \leq \varphi(\text{CH}_4) < 90\%$)、中低浓度瓦斯($8\% \leq \varphi(\text{CH}_4) < 30\%$)、超低浓度瓦斯($1\% \leq \varphi(\text{CH}_4) < 8\%$)、乏风瓦斯($\varphi(\text{CH}_4) < 1\%$)(图 16)。

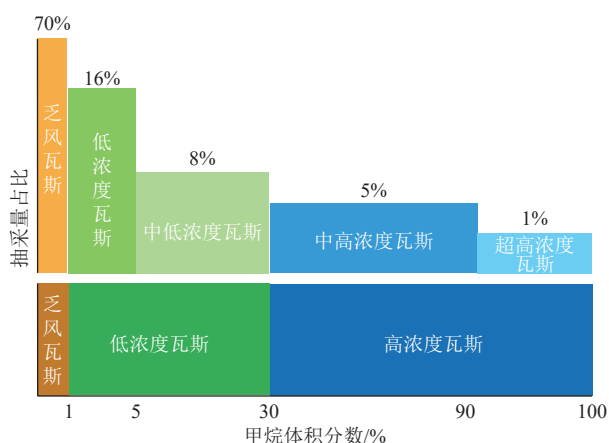


图 16 我国煤矿瓦斯排放构成估算

Fig.16 Estimated composition of gas drained from coal mines in China

近年来, 我国煤矿瓦斯抽采量基本稳定, 利用率逐年提升。2023 年我国煤矿瓦斯抽采利用率约 47.3%, 其中, 低浓度瓦斯($1\% \leq \varphi(\text{CH}_4) < 30\%$) 和乏风瓦斯($\varphi(\text{CH}_4) < 1\%$) 占比高、排放量大、利用率低, 这是造成我国煤矿瓦斯利用率整体偏低的主要原因。

3.1.2 瓦斯安全集输技术

安全输送是开展低浓度瓦斯利用的前提条件, 中国

煤科重庆研究院、胜动集团等单位牵头研发形成了相应技术、装备与标准体系。目前已在煤矿瓦斯抽采利用领域广泛应用。关键技术包括: 水封阻火泄爆装置、干式阻火器、细水雾抑爆装置、自动喷粉抑爆装置、自动监测监控系统等(图 17)。

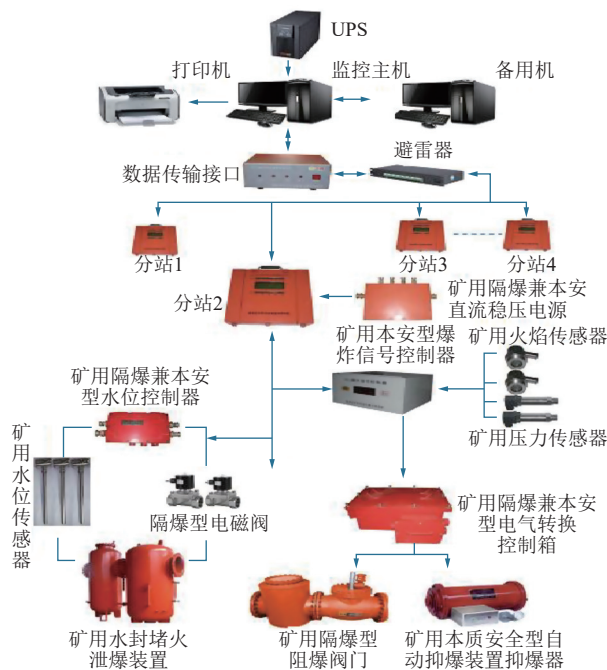


图 17 低浓度瓦斯安全输送系统

Fig.17 Safe transportation system for low-concentration gas

3.1.3 瓦斯提浓技术

由于煤矿抽采获得的瓦斯浓度各不相同, 需要进一步提纯才能加以利用, 因此, 瓦斯提浓技术显得尤为重要。提浓技术是将低浓度瓦斯通过分离、富集、净化处理等步骤, 使其浓度达到所需水平, 便于利用和储存。主要包括: 吸附分离、深冷液化、膜分离、水合物分离、溶液吸收等方法。当前, 实现工程应用的主要有变压吸附、深冷液化等。各类瓦斯提浓技术的优缺点与相应的发展现状见表 2。

3.2 煤矿瓦斯梯级利用技术

3.2.1 瓦斯发电技术

瓦斯发电主要包括往复内燃机发电、蒸汽轮机发电、燃气轮机发电等。应用最广泛的为往复内燃

表 2 各类提纯技术路线对比
Table 2 Comparison of various purification technologies

技术方法	不同技术的优缺点和进展			
	压力要求	优点	缺点	进展
吸附分离	高压	安全性高、使用寿命长、操作灵活性高、能耗低	一次操作的浓缩性能有限	商业应用
低温液化分离	高压	良好的浓缩性能、生产的液化天然气有利于储存和运输	能耗高、工艺流程复杂、爆炸风险高	中试阶段
膜分离	高压	操作灵活性高、能耗低	CH_4/N_2 选择性低、膜寿命短	实验阶段
水合物分离	高压	富集性能好、生产的固化天然气(SNG)有利于储存和运输	能耗高、水合物形成率低、爆炸风险高	实验阶段

机驱动交流发电机发电,分为高浓度瓦斯发电($\varphi(\text{CH}_4) \geq 30\%$)和低浓度瓦斯发电($8\% \leq \varphi(\text{CH}_4) < 30\%$)。采用柴油引燃技术,可将发电浓度进一步降低至 6%。关键技术包括:阻火防爆、电控混合、低压进气、热电冷三联供、低氮燃烧等。

晋能控股集团建成了全国最大的瓦斯发电集群(图 18),下属的金驹煤电化公司总装机容量 335.9 MW,2024 年瓦斯发电量超过 18 亿 kW·h,连续 16 a 保持全国第一。

3.2.2 直流氧化技术

直流氧化技术由安徽理工大学与北京君发公司联合研发,可将 5%~8% 浓度的瓦斯直接氧化制热,制取高温烟气,实现热电联供。其核心技术为“热能岛”,包



图 18 全球最大的寺河矿 120 MW 瓦斯发电厂

Fig.18 The world's largest 120 MW gas power plant in the Sihe Coal Mine

括:预处理器、点火器、辅助燃烧器、主燃烧器、迷宫式燃烧室、热能载移装置和自动化控制系统等(图 19)。

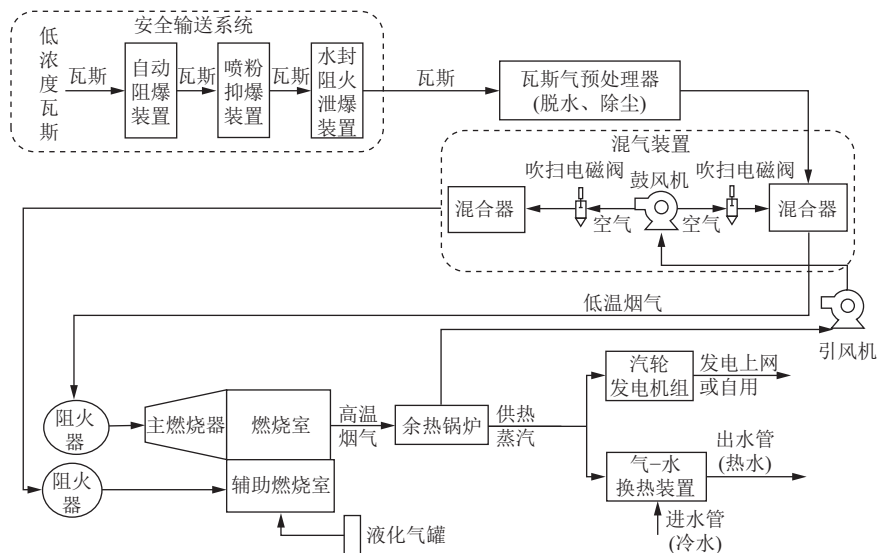


图 19 直流氧化装置工艺流程

Fig.19 Process of the direct current oxidation unit

其技术特点包括:先使用液化气点火,将炉膛温度加热至 800 ℃;正常运行温度在 900 ℃ 以上,瓦斯氧化率达到 99.9%;实现了低氮燃烧,烟气标准状态下 $\text{NO}_x \leq 30 \text{ mg/m}^3$;系统排烟温度 80 ℃,综合热效率 $\geq 90\%$;解决了点火困难、爆炸、熄火等技术难题。

3.2.3 多孔介质燃烧技术

多孔介质燃烧技术采用多孔介质作为燃烧器,采用并存的对流、导热、辐射 3 种换热方式,使燃烧区域保持平稳的温度梯度,实现过焰燃烧,将浓度 4% 以上的低浓度瓦斯稳定燃烧制热(图 20)。常见的多孔介质包括纤维网格、多孔陶瓷、颗粒球体、直孔网格等。多孔介质燃烧可实现低浓度瓦斯的直接燃烧,不需外加热源;可实现低贫燃极限稳定燃烧;温度场分布均匀,提高燃烧效率;主要生成热力型 NO_x , 污染物排放较低。

3.2.4 蓄热氧化技术

在蓄热氧化技术中通常将乏风瓦斯或乏风瓦斯与

低浓度瓦斯掺混后的混合气体,通入陶瓷蓄热体充填的氧化炉内,利用炉内高温使甲烷发生无焰氧化,放出的热量一部分被蓄积在陶瓷多孔材料中,维持氧化炉温度场,多余部分则可通过换热器制备热水、蒸汽、热风等。乏风瓦斯($\varphi(\text{CH}_4) < 1\%$)与低浓度瓦斯掺混后,其浓度一般达到 0.3%~1.2% 后销毁或利用。蓄热氧化利用系统

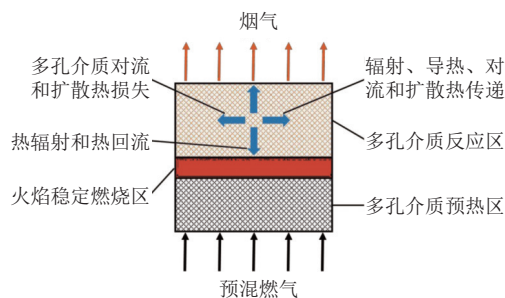


图 20 多孔介质燃烧原理

Fig.20 Principle of combustion in porous media

如图 21 所示。蓄热氧化按照原理分为蓄热式热氧化(RTO)和蓄热式催化氧化(RCO),蓄热氧化装置分为:

双床式、多床式、旋转式等。

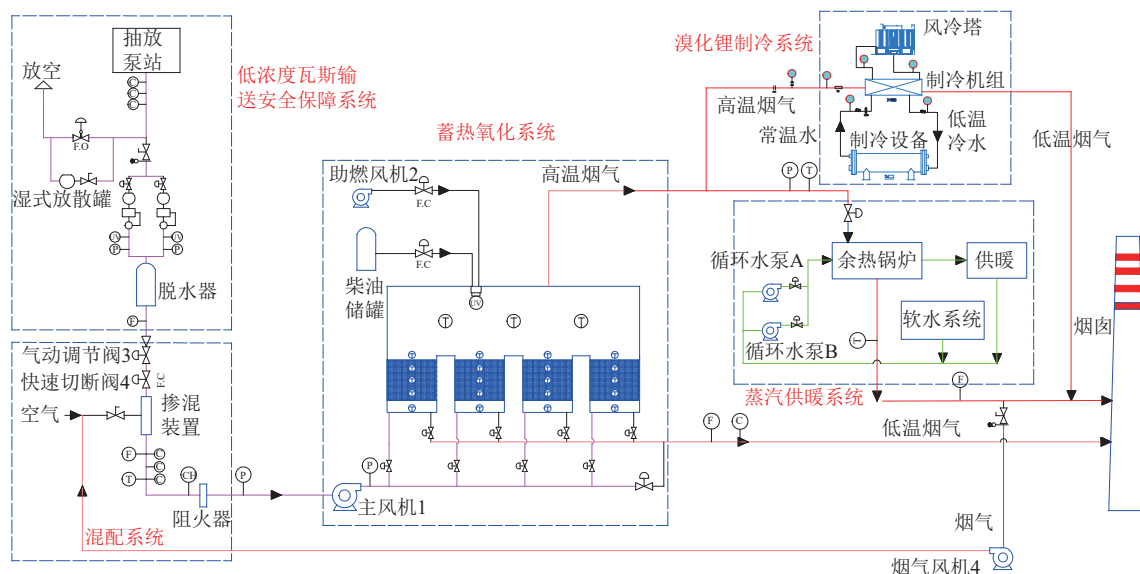


图 21 低浓度瓦斯蓄热氧化利用系统

Fig.21 System for low-concentration gas utilization through regenerative oxidation

3.2.5 其他技术路线

近年来,瓦斯利用领域的新兴技术发展迅速,还包括:低浓度瓦斯脉动燃烧技术、乏风瓦斯化学链催化氧化技术、瓦斯与其他燃料掺烧技术、低浓度瓦斯多孔介质催化燃烧技术等。

4 瓦斯抽采与利用面临的挑战

4.1 瓦斯抽采技术面临的挑战

1) 深部煤与瓦斯共采时空矛盾突出

随着矿井深部开采已经成为新常态,瓦斯压力、瓦斯含量、地应力也相应增大。一方面,深部高瓦斯煤层逐渐转化为突出煤层,且与冲击地压等灾害相互耦合,造成深部煤矿安全威胁增加;另一方面深部煤层的瓦斯压力、瓦斯含量也相应增加,瓦斯抽采的难度增大,抽采时间增加,煤与瓦斯共采时空矛盾愈加凸显。

2) 煤与瓦斯共采装备与技术尚未完全突破

传统的瓦斯抽采技术存在钻孔(巷道)工程量大、成本高、抽采时间较长等问题,近些年来国内部分矿区虽然实施了预抽井、采动井等多种类型的地面钻井对规划区、采动区和采空区的瓦斯进行了抽采,但各地面井受控因素不同,导致部分地面井抽采效果不理想。煤与瓦斯共采过程强化增渗技术包括低渗碎软煤层改性增透技术等诸多关键技术问题尚未得到有效突破,无法满足深部煤层高效抽采和瓦斯治理的需要。

3) 煤与瓦斯共采理论相对滞后

煤与瓦斯共采理论是集成了煤矿瓦斯抽采各个时

期所涉及的技术,以时间和空间为变量,针对特定地质环境,确定各个时期“矿井—采区—采煤工作面”不同层级共采时空范围,从而进行协调优化与开发,明确煤与瓦斯共采决策确定特定时空节点每个技术的实施方案,然后从所有技术方案中优选得出最佳的开发方案。因此,瓦斯抽采技术的发展要先于煤与瓦斯共采理论的发展。

4.2 煤矿瓦斯利用技术面临的挑战

煤矿瓦斯利用项目的推进实施,不仅是单纯的技术问题,还需要综合考虑并应对经济、政策、合规等诸多因素的挑战。不同矿区、不同矿井在瓦斯资源禀赋、抽采情况、利用需求、政策环境、合规管控等方面存在差异,但总体来说,也存在一些共性问题。

1) 瓦斯排放结构不利于开展利用

从总量构成上,我国当前难以利用的超低浓度瓦斯和乏风瓦斯占比过高,煤矿回风井、瓦斯抽采泵站等主要瓦斯排放源分布较为分散,瓦斯流量和抽采浓度等因素波动较大,导致规模化集中利用难度较高。

2) 利用项目经济性较差

以蓄热氧化为代表的超低浓度和乏风瓦斯($\rho(\text{CH}_4) < 8\%$)利用项目,当前还存在初期投资较高、经济效益较差、适用场景受限、推广应用缓慢等问题。

2024年7月,生态环境部就煤矿低浓度瓦斯和乏风瓦斯减排项目方法学公开征求意见,支持采用无焰氧化技术用于甲烷销毁或发电项目的开展,核算后的自愿减排量将纳入全国碳市场开展交易,相关利用项目建设

有望进一步加速。

3) 技术体系尚不完善

当前可供选择的成熟利用技术较少, 各类新兴技术多处于实验室阶段或产业化初期, 与我国当前日趋紧迫的甲烷减排形势不相匹配。

4) 项目实际推进面临诸多掣肘

在瓦斯利用项目的实际推进过程中, 新建项目往往面临土地征用难度较大、审批环节周期较长、融资渠道不畅等诸多掣肘, 瓦斯利用项目推进环节多、难度大、进展慢。

5 结语及展望

随着煤矿瓦斯赋存运移规律研究的深入及抽采技术装备的多年发展, 观念上已由单纯的瓦斯灾害属性向灾害与资源并重转变, 且基于“双碳”目标, 煤矿瓦斯已由最初的单纯抽放发展为抽采利用。瓦斯抽采方式与增渗措施已经取得了长足的进步, 能够基本满足目前我国的瓦斯抽采需要, 但由于我国煤田地质条件复杂, 深部开采已成为新常态, 三大典型抽采模式还不能够覆盖我国的煤矿瓦斯抽采需求, 仍需根据不同地质条件与相应的瓦斯抽采技术匹配整合, 形成新的典型适用模式, 从而提升瓦斯抽采的整体效率。此外, 要根据不同来源瓦斯中的气体组分、浓度、流量有较大波动的特性, 制定相应的利用方式, 才能实现煤矿瓦斯的“分源”高效利用。

今后, 煤矿瓦斯抽采与利用技术的进一步发展预计会聚焦到以下几个方面。

1) 大面积推广应用 10 a 规划区域瓦斯地面超前预抽采技术体系

在不影响煤炭按时有序生产的前提下, 在煤矿采掘 10 a 后将波及的更大区域内进行瓦斯的地面超前抽采成为缓解煤与瓦斯共采时空矛盾的主要方向。据此, 要对传统煤层钻孔瓦斯抽采技术“钻不深、抽不出、检不了”等瓦斯灾害防控基础问题进行突破, 研究 10 a 规划区域超前地面预抽采、大区域地面及井下联合瓦斯抽采等煤与瓦斯共采技术, 实现源头上的煤与瓦斯高效协同共采。

2) 进一步扩展延伸煤与瓦斯共采模式

目前我国已经形成的晋城、淮南、松藻三大煤与瓦斯共采模式均是基于典型的地质环境, 而我国的地质环境复杂, 需要进一步结合地质条件构建细分适用模式, 以便煤与瓦斯共采理论与技术能够推广应用至全国各个矿区。

3) 源头优化瓦斯抽采利用的各个环节

必须从抽采源头入手, 优选最佳抽采工艺, 优化钻

孔封孔工艺、合理控制抽采负压、加强输送环节监测, 源头上提升瓦斯抽采浓度, 并通过提高地面瓦斯抽采率和井下瓦斯抽采率, 尽可能减少风排瓦斯总量, 从源头上优化煤矿瓦斯抽采利用各个环节。

4) 提升瓦斯抽采集输管网智能化水平

矿井抽采系统是一个比较复杂的管网, 如何对整个瓦斯抽采过程进行控制是瓦斯抽采智能化发展的另一目标。即对抽采全过程的装备进行统一配置, 将瓦斯抽采相关的运行交给系统进行控制, 充分调用矿井的整体抽采能力与相应的装备配置。因此, 对瓦斯抽采全过程实施智能化改造, 是瓦斯抽采智能化发展的重要方向。

5) 产-学-研-政联合攻关助力瓦斯利用项目落地

加大科研投入, 组织关键技术攻关, 支持和鼓励各类研究机构和市场主体开展技术研究和成果转化, 推动成熟技术发展迭代和新兴技术孵化应用。进一步出台土地占用等优惠政策, 优化审批流程, 鼓励各类产业资本和专业化公司参与项目建设。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825-1845.
YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825-1845.
- [2] WANG Guofa, XU Yongxiang, REN Huaiwei. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(2): 161-169.
- [3] 程远平, 付建华, 俞启香. 中国煤矿瓦斯抽采技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 127-139.
CHENG Yuanping, FU Jianhua, YU Qixiang. Development of gas extraction technology in coal mines of China[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(2): 127-139.
- [4] 王刚, 杨曙光, 张寿平, 等. 新疆煤矿区瓦斯抽采利用技术现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 154-161.
WANG Gang, YANG Shuguang, ZHANG Shouping, et al. Status and prospect of coal mine gas drainage and utilization technology in Xinjiang Coal Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 154-161.
- [5] ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, WANG Xinxin, et al. Recent developments in coal mine methane extraction and utilization in China: A review[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 31: 437-458.
- [6] 安英莉, 卞正富, 戴文婷, 等. 煤炭开采形成的碳源/碳汇分析: 以

- 徐州贾汪矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 415–422.
- AN Yingli, BIAN Zhengfu, DAI Wenting, et al. Analysis on the gas carbon source and carbon sink in coal mining: A case study of Jiawang, Xuzhou[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2017, 46(2): 415–422.
- [7] WANG Kai, DU Feng. Coal–gas compound dynamic disasters in China: A review[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 133: 1–17.
- [8] 秦伟, 许家林, 彭小亚. 本煤层超前卸压瓦斯抽采的固–气耦合试验[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 900–905.
- QIN Wei, XU Jialin, PENG Xiaoya. Experimental study of coupling between solid and gas during drainage by advance pressure relief in mining–coal seam[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(6): 900–905.
- [9] 张永将, 邹全乐, 杨慧明, 等. 突出煤层群井上下联合抽采防突模式与关键技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48(10): 3713–3730.
- ZHANG Yongjiang, ZOU Quanle, YANG Huiming, et al. Joint ground and underground gas extraction mode and its key technology for outburst coal seam group[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(10): 3713–3730.
- [10] GUO Hua, TODHUNTER C, QU Qingdong, et al. Longwall horizontal gas drainage through goaf pressure control[J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 150/151: 276–286.
- [11] CHEN Xianzhan, SHENG Xue, LIANG Yuan. Coal seam drainage enhancement using borehole presplitting basting technology: A case study in Huainan[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(5): 771–775.
- [12] 苏现波, 宋金星, 郭红玉, 等. 煤矿瓦斯抽采增产机制及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 1–30.
- SU Xianbo, SONG Jinxing, GUO Hongyu, et al. Increasing production mechanism and key technology of gas extraction in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 1–30.
- [13] LIU Yubing, ZHANG Zuxun, DENG Bozhi, et al. Liquid carbon dioxide fracturing application and its effect on gas drainage in low permeability coal seams of underground coal mine[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(3): 6534–6546.
- [14] 赵伟, 王凯, 周爱桃, 等. 扩散主控型煤层定义、特征及瓦斯促抽路径分析[J/OL]. 煤炭学报, 2024: 1–14 [2025-01-17]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.WK24.0320>.
- ZHAO Wei, WANG Kai, ZHOU Aitao, et al. Definition, characteristics and analysis of gas extraction improvement method in diffusion–dominated coal seams[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2024: 1–14 [2025-01-17]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.WK24.0320>.
- [15] ZHANG Liang, GE Zhaolong, LU Yiyu, et al. Tree–type boreholes in coal mines for enhancing permeability and methane drainage: Theory and an industrial–scale field trial[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(5): 3197–3213.
- [16] 龙伍见. 我国煤矿低浓度瓦斯利用技术研究现状及前景展望[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(4): 74–77.
- LONG Wujian. Research status and prospects of low concentration gas utilization technology in coal mines in China[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2010, 37(4): 74–77.
- [17] YI Minghao, WANG Liang, LIU Qingquan, et al. Characteristics of seepage and diffusion in gas drainage and its application for enhancing the gas utilization rate[J]. *Transport in Porous Media*, 2021, 137(2): 417–431.
- [18] 姚成林. 煤层气梯级利用技术探讨[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(4): 94–97.
- YAO Chenglin. Discussion on cascade utilization technology for coal–bed methane[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2016, 43(4): 94–97.
- [19] WU Min, WU Zhuo, SHI Zhenglu. Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering utilization of hydrogen and oxygen energy[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2024, 158: 109923.
- [20] 李国富, 李超, 霍春秀, 等. 山西重点煤矿区瓦斯梯级利用关键技术工程示范[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 42–50.
- LI Guofu, LI Chao, HUO Chunxiu, et al. Key technology and engineering demonstration for cascade utilization of gas in key coal mining areas of Shanxi Province, China[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2022, 50(9): 42–50.
- [21] JEFFRY L, ONG Meiyin, NOMANBHAY S, et al. Greenhouse gases utilization: A review[J]. *Fuel*, 2021, 301: 121017.
- [22] 王耀锋. 中国煤矿瓦斯抽采技术装备现状与展望[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 67–77.
- WANG Yaofeng. Current situation and prospect of gas extraction technology and equipment for coal mines in China[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 67–77.
- [23] 刘泽功. 煤矿抽放瓦斯技术现状及展望[J]. 中国煤炭, 2000, 26(8): 12–14.
- LIU Zegong. The current status and prospects of coal mine gas extraction technology[J]. *China Coal*, 2000, 26(8): 12–14.
- [24] 瓦斯通风防火安全研究所. 煤矿瓦斯抽放技术发展的50年[J]. 煤矿安全, 2003, 34(增刊1): 5–9.
- [25] 孙炳兴. 高瓦斯矿井采煤工作面采前瓦斯抽采达标评判执行问题探讨[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(4): 109–112.
- SUN Bingxing. Discussion on evaluation and implementation of pre–mining gas drainage standard in working face of gassy mine[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2021, 48(4): 109–112.
- [26] XUE Sheng, ZHENG Chunshan, KIZIL M, et al. Coal permeability models for enhancing performance of clean gas drainage: A review[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 199: 108283.
- [27] 水城矿务局老鹰山煤矿. 被解放层边采边抽放瓦斯在我矿的应用[J]. 煤矿安全, 1977(6): 35–41.
- [28] 鸡西矿务局滴道煤矿瓦斯研究院. 滴道煤矿的瓦斯抽放[J]. 煤矿安全, 1976(1): 18–24.
- [29] 徐超, 辛海会, 刘辉辉. 我国煤矿瓦斯抽放技术现状及展望[J]. 煤矿现代化, 2010(1): 3–4.
- XU Chao, XIN Haihui, LIU Huihui. The status and prospect of gas suction technology in China coal mine[J]. *Coal Mine Modernization*, 2010(1): 3–4.
- [30] ZHANG Junxiang, LI Bo, LIU Yanwei, et al. Dynamic multifield coupling model of gas drainage and a new remedy method for

- borehole leakage[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(10): 4699–4715.
- [31] 抚顺矿务局. 提高本层煤瓦斯抽放率缩短抽放时间的作法[J]. 煤矿安全, 1979(1): 25–33.
- [32] 抚顺矿务局, 辽宁省煤炭研究所. 提高本煤层瓦斯抽放效果的研究[J]. 煤矿安全, 1974(6): 13–30.
- [33] WANG Kai, DONG Huzi, GUO Yangyang, et al. Gas drainage performance evaluation in coal under non-uniform stress with different moisture content: Analysis, simulation and field verification[J]. *Fuel*, 2021, 305: 121489.
- [34] 周世宁. 水力压裂煤层抽放瓦斯的理论分析[J]. 煤矿安全, 1980(5): 11–15.
ZHOU Shining. Theoretical analysis of hydraulic fracturing coal seam gas drainage[J]. *Safety in Coal Mines*, 1980(5): 11–15.
- [35] 屠锡根, 吴继周, 胡光龙. 地面钻孔抽放瓦斯[J]. 煤矿安全, 1979(6): 1–4.
- [36] 翟云生. 我国煤矿瓦斯抽放与利用的现状和展望[J]. 煤矿安全, 1986(9): 19–22.
ZHAI Yunsheng. The current situation and prospects of gas drainage and utilization in coal mines in China[J]. *Safety in Coal Mines*, 1986(9): 19–22.
- [37] 何勇. 本煤层瓦斯抽放技术[J]. 煤矿安全, 1997(6): 19–21.
HE Yong. Gas drainage technology for this coal seam[J]. *Safety in Coal Mines*, 1997(6): 19–21.
- [38] 张铁岗. 高瓦斯综采工作面的瓦斯综合治理[J]. *中国煤炭*, 1999, 25(3): 17–19.
ZHANG Tiegang. Comprehensive gas prevention and control in fully mechanized coal face with high gas in-flow rate[J]. *China Coal*, 1999, 25(3): 17–19.
- [39] 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 coalbed methane and coal in coal mine area in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(5): 1221–1229.
- [40] 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 Sui'an, 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.
- [41] 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.
- [42] 袁亮. 卸压开采采瓦斯理论及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.
- [43] WEI Qiang, HU Baolin, LI Xianqing, et al. Implications of geological conditions on gas content and geochemistry of deep coalbed methane reservoirs from the Panji Deep Area in the Huainan Coalfield, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 85(1): 103712.
- [44] SHANG Zheng, WANG Haifeng, CHENG Yuanping, et al. Optimal selection of coal seam pressure-relief gas extraction technologies: A typical case of the Panyi Coal Mine, Huainan Coalfield, China[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2022, 44(1): 1105–1125.
- [45] LU Yiyu, ZHANG Hedong, ZHOU Zhe, et al. Current status and effective suggestions for efficient exploitation of coalbed methane in China: A review[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(11): 9102–9123.
- [46] ZHANG Chaolin, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Experimental study of drainage radius considering borehole interaction based on 3D monitoring of gas pressure in coal[J]. *Fuel*, 2019, 239: 955–963.
- [47] 许彦鹏, 杨万里, 栗海滔, 等. 钻冲护一体化水力卸压筛管护孔瓦斯高效抽采技术研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 7–12.
XU Yanpeng, YANG Wanli, LI Haitao, et al. Research on high-efficiency gas drainage technology of drilling, hydraulic punching, hole protection integration hydraulic pressure relief screen pipe protection hole[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2022, 41(4): 7–12.
- [48] BLACK D J. Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(6): 815–824.
- [49] 郭明功, 李延河, 宋大钊, 等. 深部极近距离煤层群开采底抽巷层位布置研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(3): 155–165.
GUO Minggong, LI Yanhe, SONG Dazhao, et al. Layout study of bottom drainage roadway in deep mining of very close adjacent coal seam group[J]. *Safety in Coal Mines*, 2024, 55(3): 155–165.
- [50] ZHANG Bichuan, LIANG Yunpei, SUN Haitao, et al. Evolution of mining-induced fractured zone height above a mined panel in longwall coal mining[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(6): 476.
- [51] 李平, 童碧, 许超. 顶板复杂地层高位定向钻孔成孔工艺研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(4): 197–201.
LI Ping, TONG Bi, XU Chao. Study on hole-forming technology of high-level directional borehole in complicated roof strata[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2018, 46(4): 197–201.
- [52] SANG Shuxun, XU Hongjie, FANG Liangcai, et al. Stress relief coalbed methane drainage by surface vertical wells in China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 82(3–4): 196–203.
- [53] 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 and Exploration*, 2021, 49(4): 86–95.
- [54] LI Zhenbao, WEI Gaoming, LIANG Rui, et al. LCO₂-ECBM technology for preventing coal and gas outburst: Integrated effect of permeability improvement and gas displacement[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119219.
- [55] ZHENG Chunshan, LI He, KIZIL M, et al. Performance enhance-

- ment of horizontal underground-to-inseam gas drainage boreholes with double-phase-grouting sealing method for coal mining safety and clean gas resource[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 76: 103179.
- [56] ZOU Quanle, LIU Han, JIANG Zebiao, et al. Gas flow laws in coal subjected to hydraulic slotting and a prediction model for its permeability-enhancing effect[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021, 5: 1–15.
- [57] ZHANG Rong, CHENG Yuanping, YUAN Liang, et al. Enhancement of gas drainage efficiency in a special thick coal seam through hydraulic flushing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 124: 104085.
- [58] ZOU Quanle, LIN Baiquan, LIU Ting, et al. Variation of methane adsorption property of coal after the treatment of hydraulic slotting and methane pre-drainage: A case study[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 20: 396–406.
- [59] VENGOSH A, JACKSON R B, WARNER N, et al. A critical review of the risks to water resources from unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8334–8348.
- [60] 杜艺, 桑树勋, 王文峰. 超临界 CO₂ 注入煤岩地球化学效应研究评述[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(3): 10–18.
- DU Yi, SANG Shuxun, WANG Wenfeng. Study and review on geochemical effect of coal and rock injected with super-critical CO₂[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(3): 10–18.
- [61] 王海柱, 李根生, 郑永, 等. 超临界 CO₂ 压裂技术现状与展望[J]. *石油学报*, 2020, 41(1): 116–126.
- WANG Haizhu, LI Gensheng, ZHENG Yong, et al. Research status and prospects of supercritical CO₂ fracturing technology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 116–126.
- [62] REN Ting, WANG Gongda, CHENG Yuanping, et al. Model development and simulation study of the feasibility of enhancing gas drainage efficiency through nitrogen injection[J]. *Fuel*, 2017, 194: 406–422.
- [63] 丛日超, 王海柱, 李根生, 等. 超临界 CO₂ 聚能压裂开发煤层气可行性研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(8): 3162–3171.
- CONG Richao, WANG Haizhu, LI Gensheng, et al. Feasibility on exploitation of coalbed methane by SC-CO₂ shock fracturing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(8): 3162–3171.
- [64] HU Linjie, FENG Zengchao, ZHOU Dong, et al. Mechanisms and field application of in-situ heat injection-enhanced gas drainage[J]. *Energy*, 2023, 284: 128729.
- [65] 石建行, 冯增朝, 周动, 等. 基于不同热解方式下烟煤裂隙结构演化的对比[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(9): 3460–3470.
- SHI Jianhang, FENG Zengchao, ZHOU Dong, et al. Comparative study on the evolution of fracture structure of bituminous coal based on different pyrolysis methods[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(9): 3460–3470.
- [66] 胡林杰, 冯增朝, 周动, 等. 煤层气原位注热开采的数值模拟研究及工程实践[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4473–4486.
- HU Linjie, FENG Zengchao, ZHOU Dong, et al. Numerical simulation study and engineering practice of in-situ heat injection mining of coalbed methane[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4473–4486.
- [67] 张永民, 蒙祖智, 秦勇, 等. 松软煤层可控冲击波增透瓦斯抽采创新实践: 以贵州水城矿区中井煤矿为例[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2388–2400.
- ZHANG Yongmin, MENG Zuzhi, QIN Yong, et al. Innovative engineering practice of soft coal seam permeability enhancement by controllable shock wave for mine gas extraction: A case of Zhongjing Mine, Shuicheng, Guizhou Province, China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2388–2400.

(责任编辑 范章群)