

# 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术研究进展、关键科学问题与展望

杨科, 张寨男, 华心祝, 刘文杰, 吕鑫, 池小楼, 王长城, 李彩青

(安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术是指导深部高瓦斯松软低渗煤层瓦斯高效抽采的关键手段。据此提出煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程全生命周期开发思路, 包括前期科学规划、中期工程施工和后期安全管理3个阶段。梳理了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采全生命周期开发研究进展, 构建了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采关键科学问题的总体研究框架, 并概述了其未来发展方向。结果表明: 煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展受地质因素、施工参数和物性参数等影响变得极其复杂, 综合评价裂缝扩展多因素影响下的主次关系, 揭示多因素影响下的煤层顶板压裂裂缝扩展机理是亟待解决的问题。探寻应力、水、温度与煤体因素耦合对煤层瓦斯吸附、解吸与运移的促进与抑制作用的临界关系, 建立多因素临界指标下的煤层瓦斯吸附与解吸最优模型, 是实现煤层瓦斯高效排采的关键。目前, 煤层顶板压裂遗留水在污染水源、抑制瓦斯排采和危险性聚集方面的研究不足, 且缺乏“中国化”的管理经验和技术支撑。以煤层顶板压裂工程全生命周期开发思路为导向, 分析了其高耗水性、压裂液选择及潜在污染、支撑剂合理选择、空气污染和地震风险等人文环境问题, 提出了与之相对应的政策法规制定思路。实现复杂环境中多裂缝竞争扩展实时精准监测, 揭示多因素影响下煤层顶板分段压裂与跨界面裂缝扩展机理, 构建煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展有效影响半径评价模型, 探究三向应力与煤体结构双重异性条件下水气运移规律, 实现煤层顶板水平井压裂水气聚合潜在危险区超前探测, 建立煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果的精细化评价模型是目前亟待解决的关键科学问题。最后对煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术的精准化、协调化、智能化、综合化和示范化发展方向进行了展望。

**关键词:** 顶板水平井; 全生命周期; 卸压效果; 水气运移; 潜在危险区; 排采效果

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)02-0944-21

## Research progress, key scientific issues, and prospects of segmented fracturing and pressure relief gas drainage technology for coal seam roof horizontal wells

YANG Ke, ZHANG Zhinan, HUA Xinzhu, LIU Wenjie, LYU Xin, CHI Xiaolou, WANG Changcheng, LI Caiqing

(National Key Laboratory of Deep Coal Safety Mining and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

收稿日期: 2024-03-29 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.DM24.0334

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U21A20110, 52174161); 国家重点研发计划资助项目(2023YFC2907502)

作者简介: 杨科(1979—), 男, 四川叙永人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: yks2003@163.com

通讯作者: 张寨男(1995—), 男, 安徽阜阳人, 博士研究生。E-mail: 2392614146@qq.com

引用格式: 杨科, 张寨男, 华心祝, 等. 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术研究进展、关键科学问题与展望[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 944-964.

YANG Ke, ZHANG Zhinan, HUA Xinzhu, et al. Research progress, key scientific issues, and prospects of segmented fracturing and pressure relief gas drainage technology for coal seam roof horizontal wells[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 944-964.



移动阅读

**Abstract:** The segmented fracturing and pressure relief gas drainage technology in the horizontal well of the coal seam roof is a key means to guide the efficient gas extraction in deep, high gas, soft and low permeability coal seams. Based on this, a full lifecycle development concept for the segmented fracturing, pressure relief, and gas drainage engineering of the coal seam roof horizontal well is proposed, including three stages: early scientific planning, mid-term engineering construction, and later safety management. This paper summarizes the research progress on the full life cycle development of segmented fracturing and pressure relief gas drainage in coal seam roof horizontal wells, constructs an overall research framework for key scientific issues related to segmented fracturing and pressure relief gas drainage in coal seam roof horizontal wells, and looks forward to its future development direction. The results show that the expansion of segmented fracturing cracks in the horizontal well of the coal seam roof is extremely complex due to geological factors, construction parameters, and physical properties. It is urgent to comprehensively evaluate the primary and secondary relationships under the influence of multiple factors in crack expansion, and reveal the mechanism of coal seam roof fracturing crack expansion under the influence of multiple factors. Exploring the critical relationship between the coupling of stress, water, temperature, and coal factors on the promotion and inhibition of coalbed methane adsorption, desorption, and migration, and establishing an optimal model for coalbed methane adsorption and desorption under multiple critical indicators, is the key to achieving efficient coalbed methane extraction. At present, there is insufficient research on the residual water from coal seam roof fracturing in terms of polluting water sources, inhibiting gas drainage, and dangerous accumulation, and there is a lack of management experience and technical support in a “Chinese style” approach. Guided by the development concept of the entire life cycle of coal seam roof fracturing engineering, this paper analyzes its high water consumption, fracturing fluid selection and potential pollution, reasonable selection of proppants, air pollution and seismic risks, and puts forward corresponding policy and regulatory formulation ideas. Realizing real-time and accurate monitoring of multi-crack competition expansion in complex environments, revealing the mechanism of segmented fracturing and cross-interface crack expansion of coal seam roof under the influence of multiple factors, constructing an effective radius evaluation model for segmented fracturing crack expansion of coal seam roof horizontal wells, exploring the water and gas migration law under the dual anisotropy conditions of three-dimensional stress and coal body structure, achieving advanced detection of potential danger areas for water and gas aggregation during fracturing of coal seam roof horizontal wells, and establishing a refined evaluation model for the effect of segmented fracturing, pressure relief, and gas drainage in coal seam roof horizontal wells is currently a key scientific problem that urgently needs to be solved. Finally, the development direction of precision, coordination, intelligence, comprehensiveness, and demonstration of segmented fracturing and pressure relief gas drainage technology for coal seam roof horizontal wells was outlined.

**Key words:** horizontal well in roof strata; whole life cycle; pressure relief effect; water and gas transport; potential danger zone; gas drainage effect

## 0 引言

在“碳达峰、碳中和”背景下,煤层气作为替代煤炭资源的重要清洁能源之一,具有极大的开发利用前景。煤层气资源安全、绿色和高效开发是未来清洁能源发展的重要方向,有利于保障我国煤层气产量稳步增长<sup>[1-2]</sup>。同时我国煤层气资源丰富,2 000 m 以内的煤层气地质资源量 30.05 万亿 m<sup>3</sup>,可采资源量 12.50 万亿 m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>。大量煤层气资源若不加以抽采利用,直接排放到大气中,将会对环境产生严重污染。因此,大力开展煤层气资源开发利用对于保障国家能源安全至关重要。

两淮矿区煤层具有松软、高瓦斯压力、高瓦斯含

量和低渗透性等典型特征<sup>[4]</sup>,是我国深部高瓦斯煤层群开采的典型代表。但考虑到高瓦斯矿井煤层瓦斯抽采安全性和工程现场技术条件限制等原因不可直接进行抽采。自 2011 年以来,在两淮矿区进行松软低渗透煤层瓦斯地面开发技术难题探索,利用地面抽采技术将井下瓦斯压力降至 3 MPa 以下,再结合井下抽采技术进行主要的瓦斯开发,旨在形成以井下抽采为主、地面抽采为辅的开发模式<sup>[5-7]</sup>。随着压裂工程技术的发展升级、逐步形成以地面直井、L 型和 U 型井为代表的井型结构,同时形成了煤层水平井压裂技术<sup>[8]</sup>和松软煤层顶板水平井分段压裂预抽技术。

煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术一种适用于松软低渗透煤层的间接压裂技术。采用煤层

顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术开发煤层气虽取得了一定的效果,但工程施工成功与否易受矿井工程地质特征,钻井、压裂和排采施工等因素综合影响,主要存在压裂裂缝扩展不充分和排采效果不理想等问题<sup>[9-11]</sup>。尤其在松软低渗煤层中存在成本高、时间长,抽采效果差,有时还会出现低产甚至难以抽采的情况,导致煤层瓦斯抽采效果难以达标<sup>[12-13]</sup>。纵观整个煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程周期,前期工程施工类型选择的准确性、施工方案的合理性、政策法规与风险评估的完善性、后期井筒稳定性、排采工程施工效果、遗留水去向、煤层与顶板稳定性等准确监测都决定着工程施工的成败。

综上所述,笔者提出了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程全生命周期的开发理念。从煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展影响因素、煤层瓦斯吸附、解吸与运移影响因素、煤层顶板水平井分段压裂潜在危险区分析、人文环境影响与政策法规5个角度,总结梳理了其研究进展。提出了煤层顶板水平井分段压裂卸压有效范围精准确定、三向应力与煤体结构双重异性条件下水气运移规律、煤层顶板水平井压裂水气聚合潜在危险区超前探测和煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果的精细化评价模型4个关键科学问题。探讨了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术的精准化、协调化、智能化、综合化和

示范化发展方向。以期为煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术基础理论及工程施工提供发展方向,助力煤层瓦斯安全、绿色与高效开发。

## 1 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程全生命周期开发思路

煤层顶板水平井分段压裂工程全生命周期开发是指在前期科学评价现场工程地质特征与施工方案可行性等因素的基础上,从地面合理位置施工“L”型或“U”型钻井用以压裂煤层上方一定区域范围内的顶板,产生裂缝,并延伸至煤层,在煤层形成卸压区域,进行瓦斯排采,最终实现对井下遗留水去向与煤、岩层稳定性等问题的科学评价,确保后期井下煤炭资源的安全回采。其主要包括前期科学规划、中期工程施工(钻井、压裂与排采阶段)和后期安全管理(安全回采和环境治理)3个阶段。煤层顶板水平井分段压裂工程全生命周期开发思路如图1所示。该技术基本原理是在顶板岩层中布设水平井,采用定向射孔和分段压裂模式,诱导水力裂缝在顶板岩层中起裂,水力裂缝一方面会在顶板岩层内沿横向快速扩展,形成长的压裂缝,另一方面还会沿纵向穿层进入煤层,水力裂缝在横向快速扩展和纵向穿层扩展的综合作用下,会如“剪刀”一般撕裂煤层,最终形成贯通顶板岩层和煤层的复杂缝网,为煤层气产出创造高导流通道<sup>[14-18]</sup>。

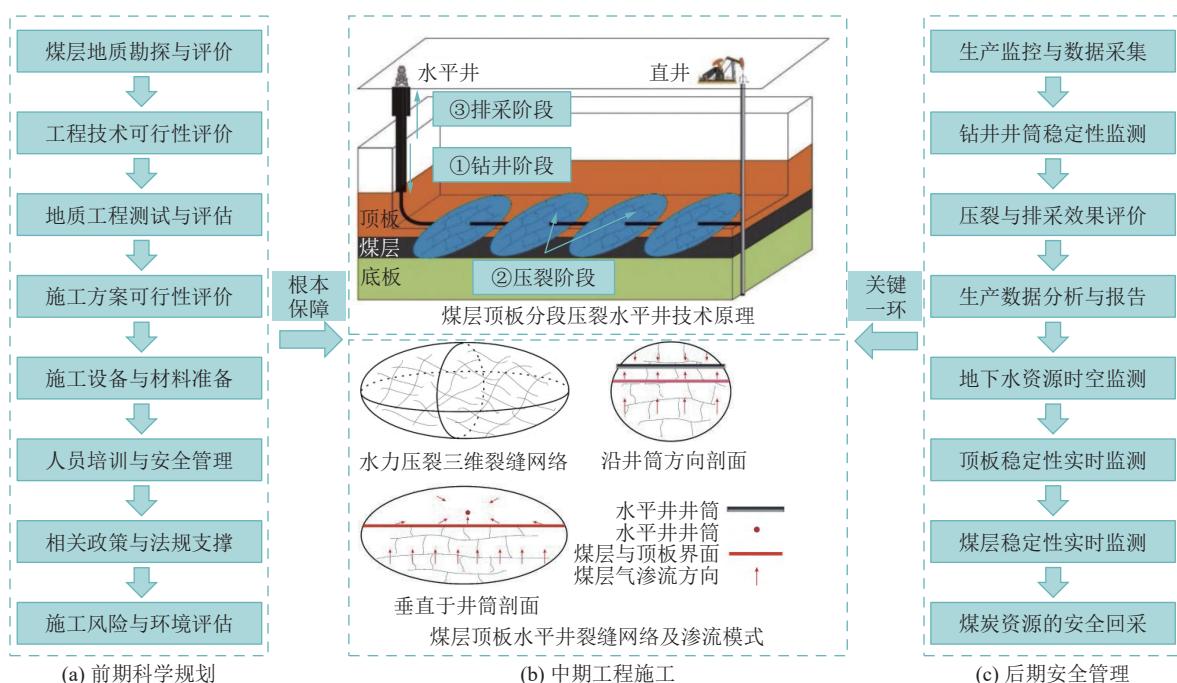


图1 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程全生命周期开发思路(改自文献[11])

Fig.1 Development ideas for the full life cycle of segmented fracturing, pressure relief, and gas drainage engineering in the horizontal well of coal seam roof (Modified from Reference [11])

前期科学规划是整个工程开发的基础,为中期压裂工程施工的顺利进行提供根本保障。首先,煤储层地质勘探与评价(包括煤层厚度、倾向、断层结构和顶底板特征等地质参数,以及煤层储量和产能评估)决定煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程能否开展。其次,地质工程测试与评估(包括煤层及顶、底板岩性测试、地应力分析和地层稳定性评价等)为后续井筒稳定和压裂施工提供依据,决定工程施工方案是否可行。再次,施工设备与材料准备、人员培训与安全管理确保后续具体工程施工的安全有序进行。然后,在政策与法规的要求下,可为中期工程施工和后期安全管理工作顺利开展保驾护航。最后,开展必要的施工风险与环境评估可确保后续的施工安全与风险安全防范。中期工程施工是整个压裂工程的核心内容,主要包括钻井、压裂和排采3个阶段,相关内容研究进展与关键科学问题将在后续章节进行详细阐述,此处不再赘述。

后期安全管理是确保压裂工程全生命周期安全、绿色运行的关键一环,三者缺一不可。首先,确保瓦斯地面排采工程的正常开展及排采数据完整采集。其次,确保钻井井筒稳定性,保障瓦斯排采正常进行。再次,基于整体压裂工程的施工存在的问题,对此次压裂工程的压裂与排采效果进行评价,分析工程施工各个阶段成功、不足之处,乃至失败的原因,为完善压裂工程提供经验与指导。然后,通过整个开发周期内全部生产数据的汇总分析,进行项目施工报告的编撰,建立该矿井该工程条件下的原始资料数据库。最后,对地下水资源流向和最终的聚集区进行时空监测、对顶板与煤层破碎状态进行监测,对其稳定性进行综合评价,确保后期煤炭资源的安全回采。综上所述,树立完善的煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程全生命周期发展理念是助力煤层瓦斯安全、绿色、高效开发的关键前提。

## 2 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采全生命周期开发研究进展

煤层顶板水平井分段压裂技术发展历史周期较短,是由最初的地面抽采钻井逐步发展而来的。最早于2003年,由OLSEN等<sup>[19]</sup>提出顶板水平井间接压裂模式,近年来,主要在淮南矿区和韩城矿区得到进一步的应用,如图2所示<sup>[9]</sup>。整体来看,煤层顶板水平井分段压裂技术的工程应用发展较快,适应性较好,典型的顶板压裂案例较多,其中最具代表性的是2013年9月,淮北芦岭煤矿松软低渗煤层顶板LG01水平井分段压裂高效开发煤层气示范工程项目,单井最高

日产气量10 754.8 m<sup>3</sup>,抽采4.5年累计产气量700×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,创造了国内松软低渗煤层水平井单井产气量新记录<sup>[5,20-21]</sup>。2019年3月,山西潞安矿区余吾煤矿松软煤层顶板U型水平井产气量高且长期保持稳定,自2020年5月至今,日气产量一直稳定在6 000~9 000 m<sup>3</sup>,截至2022年11月30日,累计气产量746×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,成为国内煤层气井排采和高产稳产的楷模<sup>[9]</sup>。但由于其应用时间较短,且工程施工效果受地质条件影响较大,使得矿井时常存在压裂效果差,甚至难以排采的情况,因此,未来还存在较多亟待解决的问题。

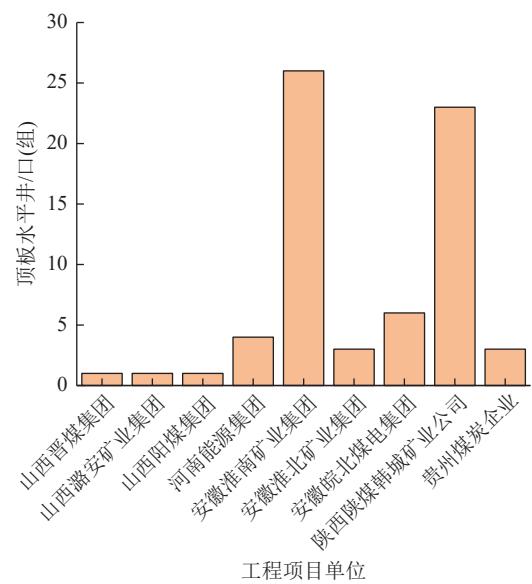


图2 煤层顶板水平井施工数量统计(改自文献[9])

Fig.2 Statistics of construction quantity of horizontal wells on coal seam roof(Modified from reference [9])

### 2.1 煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展影响因素

深部松软低渗高瓦斯煤层孔、裂隙结构复杂,易导致水力裂缝扩展复杂,难以有效探明,直接影响煤层瓦斯流动特性,也难以精准确定卸压有效范围,间接影响煤层瓦斯抽采效果。煤层顶板水力裂缝的起裂、扩展,跨界面延伸至煤层过程中,裂缝扩展特征与煤、岩体及其界面的物理力学参数有关。裂缝跨界面扩展至煤层时,还需额外考虑煤体天然裂缝特征的影响。同时,压裂施工参数(地应力差、注液参数、射孔参数等)与瓦斯排采参数(压裂泵注排量等)对裂缝扩展影响也不容忽视。压裂液黏度、支撑剂材料强度等特征与煤、岩物理力学特征的差异也对裂隙形成起关键作用。煤层顶板水力裂缝扩展规律影响因素如图3所示。

#### 2.1.1 压裂液

在水力压裂过程中,压裂液主要以其注液参数和黏度特征来影响水力裂缝的起裂、扩展、偏转与闭合等规律<sup>[22]</sup>。贺飞飞等<sup>[23]</sup>建立基于微元法的定向射孔

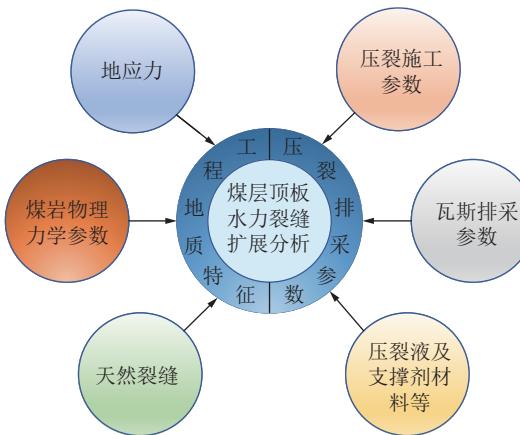


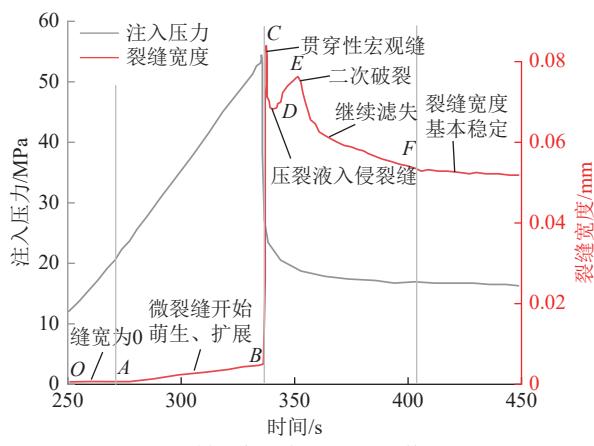
图 3 煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展影响因素

Fig.3 Factors affecting the expansion of segmented fracturing cracks in horizontal wells of coal seam roof

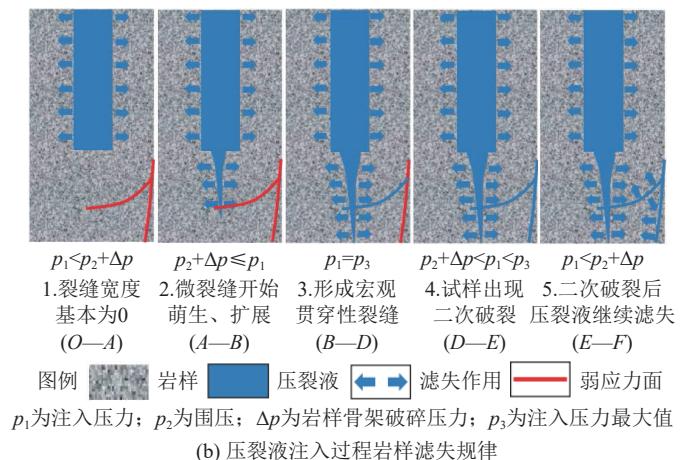
转向压裂裂缝动态扩展模型 (MEM 模型), 并进行室内试验、模拟与现场验证。GUO 等<sup>[24]</sup>基于流体流动和固体弹性变形的耦合理论, 建立了考虑压裂液注入速率和黏度影响的理论模型, 通过比较井筒内的水压穿透和偏转的临界接缝压力来判断裂缝的传播行为。WIŚNIOWSKI 等<sup>[25]</sup>建立了一种新的描述压裂液流动与其阻力之间相互依赖关系的流变模型 (Vom Berg

模型), 使得水力参数的优化能够使成本最小化, 钻井工程安全最大化。MA 等<sup>[26]</sup>提出了一种基于各向同性和运动硬化 (IKH) 本构模型的新型结构动力学模型, 该模型结合流变系数和结构损伤率指数, 阐明了水基钻井液的触变特性和结构演化特征。

除理论分析外, 在试验与模拟方面也开展了相关研究。随着压裂液黏度增大, 压裂后横切主裂缝扩展明显向复杂多裂缝形态过渡<sup>[27-28]</sup>、剪切破坏裂纹占比降低<sup>[29]</sup>、裂缝由分布均匀且沿层理扩展向分布混乱且沿垂直层理方向扩展过渡<sup>[30]</sup>。周彤等<sup>[31]</sup>提出了根据储层实际物性来调控压裂液黏度的思路, 认为不同黏度压裂液的滤失程度不同, 且储层物性不同, 导致裂缝起裂机理和动态闭合规律不同, 在低黏压裂液的中滤失程度体系易开启弱层理面, 出现二次破裂, 缝宽曲线呈双峰型, 如图 4 所示。而在煤层顶板压裂过程中, 同一压裂液黏度在不同顶板与煤层物性差异, 以及界面特征差异下均会产生不同的压裂特征。因此, 深入研究并揭示压裂液黏度对不同顶板-煤层物性特征以及界面参数特征的影响机制, 从而精准选择和实时调控压裂液黏度大小, 是助力煤层顶板精细化压裂和瓦斯高效排采的关键。



(a) 页岩岩样水力裂缝动态闭合规律(部分)

图 4 岩样破裂过程示意<sup>[31]</sup>Fig.4 Schematic diagram of rock sample fracture process<sup>[31]</sup>

### 2.1.2 支撑剂

支撑剂具有控制裂缝形态, 稳固导流通道, 增加储层渗透率等作用, 在裂缝中铺置形态不同, 主要受射孔孔眼间干扰、压裂液排量、压裂液黏度和施工砂比的影响<sup>[32]</sup>。陈志强等<sup>[33]</sup>针对多级、多尺度复杂裂缝系统, 提出液量分配模型与支撑剂转向运输条件, 对支撑剂在复杂裂缝内的运输行为进行预测, 并进行数值验证。但在实际工程施工中, 支撑剂是与压裂液混合作用的, 如何建立流-固耦合动力学模型及其运输规律是关键。王雪飞<sup>[34]</sup>建立基于欧拉公式与拉格朗

日方程的柔性纤维悬砂压裂液多相耦合动力学模型。王明<sup>[35]</sup>针对颗粒碰撞问题, 推导了颗粒运动轨迹方程, 构建了颗粒碰撞力求解方程、速度收敛准则、颗粒碰撞模型, 解决了颗粒计算时间步长选取受到颗粒碰撞时限的问题, 提高了颗粒碰撞计算求解效率和精度。吴鹏飞等<sup>[36]</sup>基于细观断裂损伤理论, 推导了可考虑孔隙内饱和流体压力作用的细观裂纹尖端应力强度因子模型, 进而建立了饱和岩石应力-应变本构模型, 并进行验证。

除了支撑剂自身性质外, 煤、岩物理力学性质也

影响压裂效果。邓守春等<sup>[37]</sup>认为在复杂的井下应力环境中,支撑剂可能会发生破碎、嵌入、分解及迁移等行为,影响压裂效果。在松软低渗煤储层中,煤体与顶板岩体物性参数差异较大,导致支撑剂在不同介质中的形态变化差异大。在煤层较软,压裂顶板为坚硬岩层时,支撑剂材料的选择不当可能导致其在坚硬岩层中发生破碎,却在软煤层中出现嵌入的情况,大幅降低了支撑剂的支撑效果,导致造缝效果变差,甚至出现闭合的情况。针对上述问题有2个解决思路:在压裂施工前,对顶板与煤层物性特征进行准确测定的基础上,①研究获得与顶板、煤层物性参数各自相匹配的支撑剂强度范围,两者存在交集时,选择同时满足煤、岩强度范围的支撑剂,保证支撑剂无论是在岩层还是在煤层都能发挥其支撑裂缝的能力。但如何精确获得顶板和煤层各自相对应范围的支撑剂材料是关键点,也是难点,可能与注液压力和煤粉因素等都有关系,在开展实验室物理和模拟试验时也都要考虑。②若无法同时找到与顶板和煤层相匹配的支撑剂强度时,可选择裂缝在顶板扩展和在煤层扩展的不同阶段,各自选择其最优的支撑剂类型。但如何准确判别在裂缝跨界面进入煤层的时刻,支撑剂恰好替换为与之相匹配的类型是关键点,可以考虑从压裂裂缝的空间大小和裂缝扩展速率等角度着手,建立裂缝跨界面与支撑剂替换时间相适应的评价模型。

### 2.1.3 顶板-煤层物性参数及其界面特征

煤层顶板水平井分段压裂裂缝由岩体起裂、扩展至顶板-煤界面处后,存在3种裂缝扩展模式,即水力裂缝在界面止裂、沿界面扩展和跨界面扩展<sup>[38]</sup>。同时建立了多因素耦合作用下(煤岩界面摩擦强度、应力状态、水力压裂裂缝与界面入射角度)的裂缝跨界面扩展预测模型,并进行了验证。李浩哲等<sup>[39]</sup>认为煤层与顶板间的弹性模量和抗拉强度差异是裂缝从顶板穿层进入煤层的有利因素,现场压裂及瓦斯排采施工时,压裂位置和液体排量等也对裂缝扩展存在影响。姜玉龙等<sup>[40]</sup>认为水力裂缝跨界面扩展存在应力阈值,且煤岩界面强度越大,应力阈值越小。若煤岩界面存在倾角的差异,还需考虑水力射孔方向与煤岩界面角度的位置关系<sup>[41]</sup>。

### 2.1.4 压裂施工与瓦斯排采参数

煤层顶板水平井分段压裂工程需要考虑的压裂施工与瓦斯排采参数较多,这些促使水力裂缝扩展形成裂缝缝网,最终决定压裂结果的好坏。郭天魁等<sup>[42]</sup>基于平面三维多裂缝模型,在考虑液体滤失诱发的孔弹性效应的基础上,建立了水平井压裂裂缝扩展数学模型,并进行数值模拟验证。大量学者从不同压裂方

式<sup>[43]</sup>、已压裂缝内流体压力<sup>[44]</sup>、水平井射孔簇间距<sup>[45-46]</sup>、压裂排量<sup>[47-48]</sup>、水平井段固井质量<sup>[49]</sup>、多簇裂缝缝长、缝宽、缝高与缝间距<sup>[50-51]</sup>与进液量<sup>[52]</sup>对煤储层裂缝扩展形态进行研究,获得了水力分段压裂裂缝扩展规律。以上主要是在实验室进行的小尺度物理模拟与数值模拟试验,但对于现场的精细化施工参数的确定还存在距离,开展大尺度的真三轴水力压裂模拟试验和现场压裂工程试验较少。

### 2.1.5 天然裂缝

在煤层水力压裂过程,天然裂缝和水力裂缝之间可能存在穿越、捕获、扩张3种相互作用模式<sup>[53]</sup>。而煤层顶板水平井分段压裂过程中,天然裂缝在顶板岩体和煤层中均有存在,考虑的因素会变复杂,一般存在2种情况:①在跨界面之前,顶板岩层中的天然裂缝影响水力裂缝的扩展,与煤层压裂模式的思路较为一致。②在跨界面过程中,受煤层天然裂缝的影响,水力裂缝可能会存在不同以往的裂缝扩展模式。蒋长宝等<sup>[54]</sup>研究了水力压裂煤体在天然裂缝作用下的起裂和扩展规律,揭示了水力压裂煤的裂缝扩展机制,但并未涉及水力裂缝跨界面扩展转向问题及其与天然裂缝的耦合分析对裂缝扩展的影响。ZHU等<sup>[55]</sup>利用孔隙压力粘聚单元建立了间接压裂的数值模型,模拟水力裂缝与自然裂缝的相互作用,结合现场实际工程压裂试验,确定了间接压裂水平井位的范围。CORDERO等<sup>[56]</sup>基于水体机械粘性界面元件和渐进式损伤模型,建立了水力裂缝传播及其与摩擦自然裂缝相互作用的水力学模型,揭示了自然裂缝活化和后续水力裂缝传播过程的机制。

### 2.1.6 地应力

一般而言,储层越致密,裂隙越难扩展,对于煤层顶板水平井分段压裂裂缝起裂及其跨界面扩展机制的影响因素较多。仅从地应力角度来看,主要从“顶板-煤岩”垂向应力差、“覆岩-顶板-煤岩”垂向应力高低、垂向应力与水平最大应力差和最小水平主应力差等因素进行了相关研究分析。当垂向地应力差较大,水力裂缝扩展方向可有效控制为垂直煤岩界面方向,并增加裂缝垂向扩展程度<sup>[50]</sup>。郭天魁等<sup>[57]</sup>基于平面三维多裂缝扩展模型,同时考虑层间垂向断裂韧性及滤失非均质性,建立了煤层顶板水平井分段多簇压裂裂缝扩展的“覆岩-顶板-煤层”数学模型,分析了4种层间地应力差异下,“低-高-低”地应力组合条件下的煤层顶板压裂效果最优。姜在炳等<sup>[58]</sup>研究发现水平井布井方位与最小水平主应力方向夹角越大,裂缝扩展的转向半径和转向距离越大,越不利于裂缝延伸和支撑剂输送。最小主应力差的不同对模型的裂

缝起裂及扩展并无差异<sup>[59]</sup>。地应力作为煤层顶板水力裂缝跨界面扩展至煤层的主控因素,决定水力裂缝能否进入煤层,同时合理的地应力差可以确保裂缝的起裂和扩展平稳,便于控制裂缝的均匀性。

### 2.1.7 层 理

煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采过程中,水力裂缝会优先在顶板层理结构处扩展,合理的射孔角度和层理角度是促使裂缝均匀和高效扩展的关键。李倩等<sup>[46]</sup>针对煤层气储层水力裂缝扩展理论模型进行了总结分析,认为煤层顶板射孔方向与层理角度以

及层理成熟度是未来研究的方向。庞涛等<sup>[60]</sup>从煤层顶板水平井分段压裂现场施工角度进行分析,总结了压裂射孔孔眼位置全部位于煤层中、全部位于顶板岩层中和部分位于顶板部分位于煤层3种情况,同时根据顶板是否存在层理结构,提出了5种顶板压裂地质模型,如图5所示。因此,探明煤层顶板压裂层位和煤层的层理发育情况,结合现场施工特征和地应力特征,选择合适的射孔角度,继而控制压裂裂缝形态,保证压裂工程的顺利实施和钻孔良好的抽采效果。

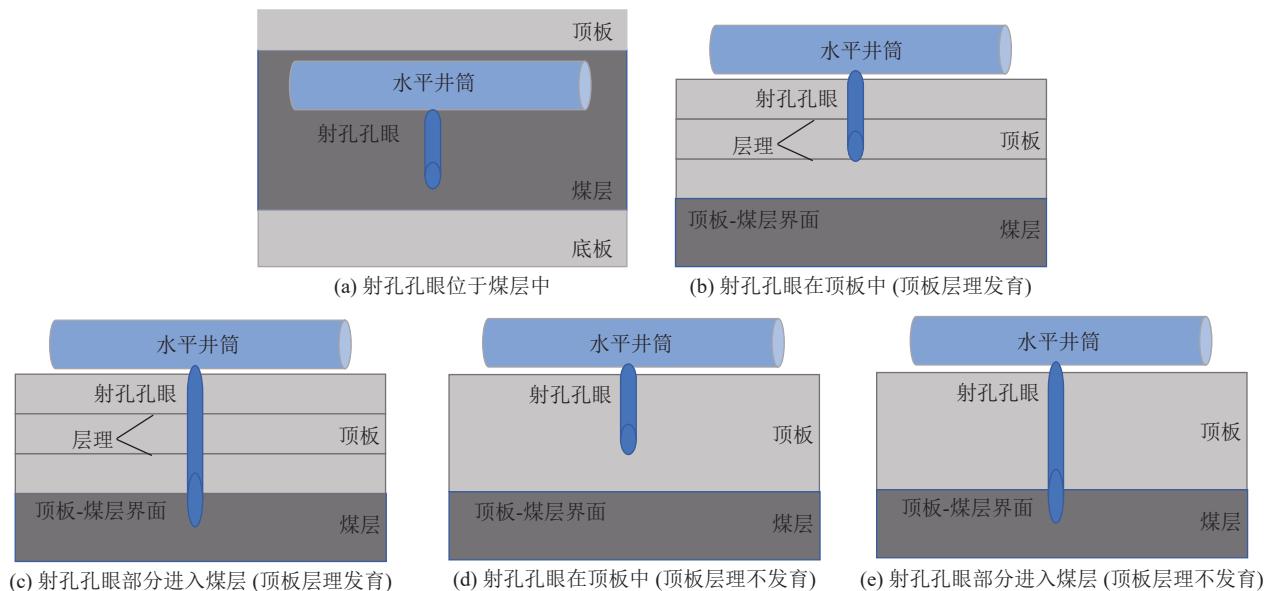


图 5 煤层顶板压裂地质模型<sup>[60]</sup>

Fig.5 Geological model of coal seam roof fracturing<sup>[60]</sup>

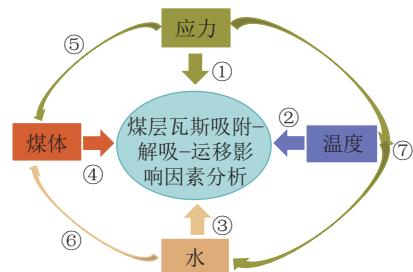
## 2.2 煤层瓦斯吸附-解吸-运移影响因素分析

现场压裂与瓦斯抽采阶段均会在煤层与煤壁之间形成压力差和浓度差,使得煤层内的吸附瓦斯和游离瓦斯会同时分别以菲克扩散和达西渗流的形式向煤壁运移,这是导致煤层瓦斯吸附、解吸与运移的根本原因。除此之外,煤体结构与宏观煤岩类型、水和温度等对煤层瓦斯吸附、解吸与运移的影响也不可忽视。各因素之间相互影响关系如图6所示。

### 2.2.1 煤体结构与宏观煤岩类型

煤体结构和宏观煤岩类型对瓦斯吸附、解吸与运移的影响对应标号④。基于软煤与硬煤多孔结构差异,从煤体微孔隙结构角度分析了不同软硬煤的瓦斯吸附控制机理<sup>[61]</sup>,构建了煤颗粒瞬态解吸扩散本构模型,从理论上推导了新模型的无穷级数的一般解,揭示了大孔隙、中孔隙和微孔扩散的竞争机制<sup>[62]</sup>。基于气体吸附、汞孔隙率测定和气体解吸试验,运用热力学、扩散机理和解吸力学等理论对气体的解吸特性

进行估算<sup>[63]</sup>。随着煤体破碎程度增大,碎裂煤对甲烷的吸附、解吸与运移能力均优于原生结构煤<sup>[64-67]</sup>,煤中半封闭孔含量降低,开放孔含量增高,孔隙连通性增强,提高了煤的吸附、解吸与运移能力。碎裂煤在吸附甲烷过程中表面自由能的改变量大于原生结构煤,导致碎裂煤对甲烷的吸附能力更强<sup>[68]</sup>。在工程施工之前,确定煤体结构与宏观煤岩类型,可以针对性



①-⑦分别代表各因素之间的相互影响

图 6 应力-水-煤体-温度对瓦斯吸附-解吸-运移的影响关系

Fig.6 Influence of stress-water-coal-temperature on gas adsorption-desorption-transport

的优化现场水力压裂方案,助力煤层瓦斯抽采。

### 2.2.2 水

目前,水对煤层瓦斯吸附、解吸与运移的相关研究主要从煤储层水分赋存状态<sup>[69-70]</sup>、煤-水界面微观作用<sup>[71-74]</sup>和水分对甲烷吸附、解吸与运移作用机制<sup>[75-79]</sup>3个方面体现。水对瓦斯吸附、解吸与运移的作用机制对应标号⑥和③。标号⑥代表水对煤体结构的润滑、侵蚀等影响,降低其力学性能,同时裂缝中的水会产生孔隙水压力,间接影响瓦斯的解吸与运移。标号③代表水直接对瓦斯吸附、解吸与运移的影响,如水置气和水锁效应等。张小雨等<sup>[80]</sup>基于煤岩各向异性的结构特征及立方定律,构建考虑含水率、气体压力和应力多因素影响的各向异性渗透率模型,较好地反映气、水吸附与应力协同作用下瓦斯渗流特性。SHI等<sup>[81]</sup>利用设计的煤层注水模拟试验装置,对不同吸附平衡压力下的煤样进行动态注水试验,分析动态注水条件下瓦斯解吸规律,以及水置换、水渗吸和水锁作用对瓦斯解吸的影响。XIAO等<sup>[82]</sup>考虑非平衡状态下湿煤内部的气体流动和气体扩散,构建了考虑水气吸附、应力依赖性、水膜厚度和气体流动状态的表观渗透率模型,揭示了非平衡状态下湿煤中的瓦斯流动规律。GAO等<sup>[83]</sup>为研究水注入对煤中瓦斯的解吸机理,建立烟煤的Wiser分子结构模型,采用巨正则蒙特卡罗方法在分子尺度上研究了不同水注入量下煤层瓦斯的解吸行为。

综上所述,水分对煤层瓦斯吸附与解吸的微观作用机制研究主要存在抑制与促进瓦斯解吸2种截然不同的观点<sup>[84]</sup>。①认为水吸附于煤体表面置换出瓦斯气体,存在复杂的固-液-气耦合过程,从而促进瓦斯解吸。②认为水的存在会抑制煤层瓦斯解吸,称为煤层水锁效应。其表现在水吸附于煤体表面、水滞留在煤体孔隙内部和水从大孔向小孔运移的附加应力差3个方面对瓦斯解吸的抑制<sup>[85]</sup>。这也是目前较为认可的,且作用更显著的观点。但笔者认为含水量大小、水的相态(气态、液态与固态)和位置(自由水、结合水和束缚水)对瓦斯吸附与解吸的促进和抑制作用关系集于一体,且复杂不清,在井下环境中,2种情况在不同的时空条件下存在不一。但如何判别2者谁占据主导地位仍旧难以明晰,同时如何确定最优状态下的瓦斯解吸量还不明确。

从工程角度来看,水力压裂通过外力诱使煤层破碎卸压,增大煤层渗透率,促进瓦斯解吸-运移进入裂隙内部,利于煤层瓦斯负压排采。在工程排采瓦斯阶段,孔隙水压力的降低是导致瓦斯解吸的主要影响因素,水的排出,导致孔隙压力降低,瓦斯大量逸出,便

于抽采。复杂的井下环境使得煤层瓦斯吸附、解吸与运移共存,必然存在煤层瓦斯抽采效果的最优状态。当煤层瓦斯解吸的促进效果优于抑制效果时,煤层瓦斯解吸;反之瓦斯吸附。基于瓦斯解吸速率变化,给出水对此种条件下的煤层瓦斯抽采的促进和抑制的临界量化指标是关键,继而优化水力压裂工程施工技术。

### 2.2.3 应力

应力对瓦斯吸附、解吸与运移的影响对应标号①、⑤和⑦,具体包含地应力、瓦斯压力、孔隙水压力和注液压力等。应力与水之间,产生孔隙水压力(⑦)、与煤体之间产生注液压力(⑤),两者共同影响瓦斯压力。随着煤体初始应力升高,吸附平衡时煤体内瓦斯压力及吸附量越大,瓦斯平衡解吸量随之增大<sup>[86]</sup>。在高应力作用下,煤体内储层压力较高,当充入瓦斯压力较低时,气体压力不足以抵抗煤体内部储层压力,瓦斯气体难以进入煤体内部,导致气体吸附量降低<sup>[87]</sup>。瓦斯压力升高过程中,气体压力逐渐克服储层压力进入煤体内部形成吸附态瓦斯,瓦斯吸附量逐渐增大;当瓦斯吸附压力相同时,随煤体应力增大,瓦斯吸附量呈减小趋势<sup>[88]</sup>。随着有效应力增大,煤体瓦斯累计解吸量、解吸时间及解吸率均呈幂函数减小趋势,煤体解吸应变呈线性减小趋势;煤体渗透率及渗透率变化率随有效应力增大均呈正指数型增长趋势<sup>[89]</sup>。吸附与解吸过程中煤系页岩微观吸附态瓦斯含量与平均有效应力关系分别符合D-R和Weibull函数模型,而吸附与解吸过程微观游离态瓦斯含量与平均有效应力均符合线性函数模型。微观吸附态瓦斯迟滞系数随平均有效应力降低以对数函数规律快速减小,平均有效应力降低对微观游离态瓦斯迟滞系数影响不大<sup>[90]</sup>。秦玉金等<sup>[91]</sup>建立考虑扩散系数受压力(浓度)和温度影响的变扩散系数扩散模型,采用柱煤测试结果对恒温和变温条件下粒煤解吸特性进行了预测,预测结果显示模型无论是在恒温还是变温条件下都能很好反映煤基质中瓦斯扩散过程。

### 2.2.4 温度

在深部煤层气、页岩气等资源开发领域,应力或解吸诱导的煤基块收缩效应与热力或吸附导致的煤基块膨胀效应并存,这都会对煤层的孔隙性、吸附性等造成深刻影响<sup>[92-94]</sup>。考虑温度对瓦斯吸附-解吸-扩散-渗流特征的影响,深化了对深部煤层渗透性及其控制机理的认识,在未来必然成为关键热点研究方向之一。随温度升高,瓦斯吸附量、渗透率及过程中煤体变形量逐渐降低,而瓦斯解吸率升高,温度效应对全过程煤体变形具有显著影响<sup>[95]</sup>,对应标号②。将温度场与瓦斯渗流场和煤体变形场综合来分析,建立

应力场-渗流场-温度场耦合模型,揭示煤与瓦斯的热流固机制<sup>[96]</sup>。但煤层顶板水平井分段压裂工程除了瓦斯渗流场,还包含水的渗流,进一步增多场耦合的复杂程度,未来还需深入开展研究。

### 2.3 煤层顶板水平井分段压裂潜在危险区分析

#### 2.3.1 瓦斯危险性聚集易形成抽采盲区

顶板与煤层结构的非均质性和各向异性易导致水力裂缝扩展呈非线性特征,难以精准预测,同时水力裂缝会为瓦斯的扩散提供通道,易导致瓦斯的危险性聚集,易形成瓦斯抽采盲区<sup>[97]</sup>。梁庆华等<sup>[98]</sup>基于矿井无线电波透视理论,对煤层瓦斯富集区瓦斯压力的无线电波曲线变化特征进行正演模拟,为准确划分煤与瓦斯突出危险区提供工程依据。基于遗传算法的支持向量机(SVM)网络<sup>[99-100]</sup>,综合瓦斯含量、构造煤分布及煤层顶板岩性3方面特征,建立了一套瓦斯突出危险区域综合预测方法,为判断瓦斯突出危险区提供了理论基础。薛生等<sup>[101]</sup>总结了机器学习方法在煤与瓦斯突出预测方面的研究进展,对瓦斯积聚所形成的盲区进行精准预测,可以确保井下煤炭资源的安全回采。

#### 2.3.2 遗留水流动方向不明形成潜在突水区

遗留水是指在压裂时注入到井下的液体资源,经排采回收后,仍遗留在井下的混合水资源,主要包括压裂液、各种添加剂与支撑剂等。对于页岩油气等资源开发,返排量较少,排采结束后仍有大部分压裂水留存在井下<sup>[102-103]</sup>。在煤层气地面井开发过程中,将“U”型与“L”型井的压裂水返排率相比较发现,“U”型井压裂所使用的压裂水较“L”型井更易返排回地面,但无论何种井型,压裂液也无法完全返排回地面。煤层气排采阶段是水资源返排地面和瓦斯抽采的过程,两者呈正相关关系,尽可能的提高排水量是提高瓦斯抽采的关键前提。煤层顶板压裂遗留水流动的潜在问题如图7所示。

1) 遗留水对地下水的潜在影响。浅层钻孔流体泄漏,诱发浅部含水层水污染,导致附近居民、工厂等用水匮乏<sup>[104]</sup>。深部钻孔流体沿压裂裂隙运移,易造成含水层破裂,连通压裂流体与含水层,压裂流体内包含压裂液等有害物质,不易降解,长期以来会造成水资源大范围污染,不利于环境保护,违背可持续发展战略<sup>[105]</sup>。

2) 遗留水阻碍瓦斯抽采。水力裂缝扩展路径为压裂工程遗留水资源的运移提供通道,裂缝扩展路径的非均质性会造成遗留水运移路径的不确定性,易造成水资源聚集,导致储层压力升高,使得瓦斯不易从煤层中解吸出来<sup>[106]</sup>,导致瓦斯抽采效果大打折扣,与地面井建立的初衷相违背。



图7 煤层顶板压裂遗留水流动潜在问题分析

Fig.7 Analysis of potential issues with residual water flow from coal seam roof fracturing

3) 遗留水运移的潜在危险区不明。裂缝充分扩展后,遗留水最终流向难以有效预测。一方面可能导致邻近含水层破裂,诱发大量水运移,若不及时探明流体动向,极易形成潜在危险区,诱发矿井水害。另一方面对后续煤炭资源的回采产生额外的阻碍。表现在2个方面:①在实际工程压裂施工时,煤层顶板水力压裂技术的压裂射孔点精准识别度不够,同时煤层起伏难以精准获取,难免导致压裂点处于煤层内部,使得遗留水充斥工作面煤层中,导致后续煤炭资源回采变得困难。②长期遗留水环境下,导致煤层强度、模量等参数弱化,使得后续煤炭资源开采困难。

综上所述,现阶段煤层顶板压裂遗留水问题缺乏“中国化”的管理经验和技术,遗留水对环境影响的科学理解有限,预测和控制潜在环境影响的政策法规不够完善。目前仅有《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)、《灌溉水质标准》(GB5084—2005)、《污水综合排放标准》(GB8978—1996)等,在顶层设计方面,煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程没有得到政府和科研人员的足够重视,缺乏相关法规制定和对环境影响的预防。在环境保护方面,对地面井压裂瓦斯抽采技术的研究仍滞后于国家发展需求。

### 2.4 人文环境影响

以压裂过程中存在的负面问题为依据,分别从“高耗水”性、压裂液潜在污染性、支撑剂的合理选择、空气污染及地震风险等角度分析其对人文环境的影响,如图8所示。

#### 2.4.1 “高耗水”性可能诱导用水压力

现场施工过程中,压裂阶段用水量约占钻完井阶段用水量的80%以上,与常规资源相比,用水量要高<sup>[104]</sup>。工程施工钻井长度及压裂段数均会影响用水量<sup>[107]</sup>。在干旱区,短期内进行“高耗水”性的压裂工程施工,可能会存在供水压力。因此,在压裂施工前

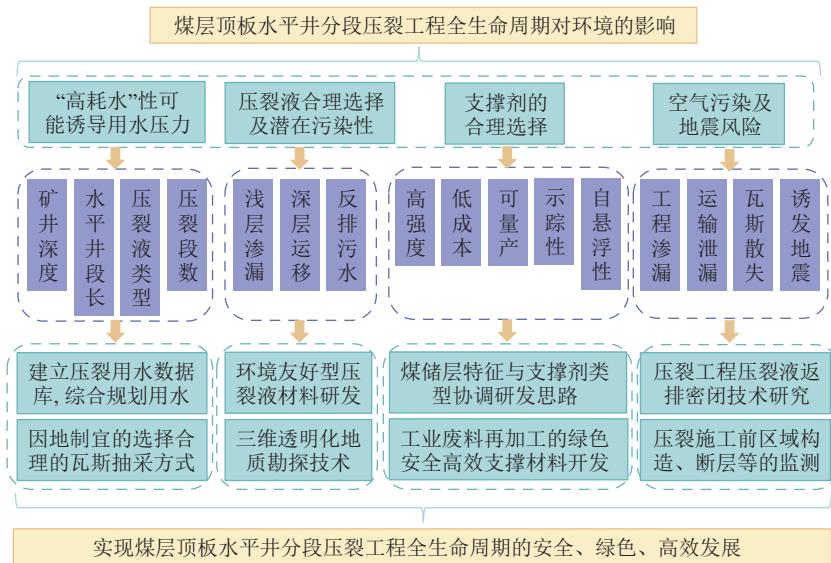


图8 煤层顶板压裂工程施工对人文环境的影响

Fig.8 Impact of coal seam roof fracturing construction on the human environment

期,需对施工地区进行调研工作,以避免用水压力的出现,同时记录相关压裂工程的用水数据,以期综合评估压裂工程对水资源的影响。同时要注重水资源的循环利用与无水压裂技术的发展。

#### 2.4.2 压裂液合理选择及其潜在污染性

压裂液的目的是将地面设备形成的高压传递到地层中,使地层破裂形成裂缝并沿裂缝输送支撑剂。地面返排液处理不当会污染地表水,损害附近居民生命健康安全。遗留水可能造成地下水源污染。因此,压裂液还必须满足清洁、低成本、制作简单等特点<sup>[108-109]</sup>。煤层气井压裂液选择应满足3大原则,即①与储层相匹配;②与环境相友好;③低成本与可量产。综上,在研发环境友好型压裂液材料的基础上,创新压裂工程全生命周期的三维透明化地质勘探技术,可实现对压裂液潜在污染区的监测与预防。

#### 2.4.3 支撑剂的合理选择

支撑剂的作用是将压裂裂缝加以支撑,以增大煤层气的流动能力,提升抽采效率。与压裂液的选择类似,支撑剂在满足其基本功能的同时,还必须满足清洁、低成本、高性能等特点<sup>[110]</sup>。支撑剂材料的选择对于低渗煤层来说至关重要,将工业废料二次循环利用,既符合国家可持续发展方向,又满足“双碳”战略需求<sup>[111]</sup>。

#### 2.4.4 空气污染及地震风险

工程施工过程中,需要先将煤层气抽采到地面,再运至加工厂,整个过程中,机器排放、运输泄漏等必然存在一定的空气污染。在压裂液反排时,煤层气的散失比例较高,会对环境产生一定的影响<sup>[104]</sup>。煤层顶板水力压裂释放能量较小,一般不会诱发具有破坏性的地震,但在存在断层时,会增大地震的能级,因此,

在压裂施工之前,进行煤矿压裂区域透明化地质勘探必不可少,可以有效避开断层,从而减少地震活动,确保压裂排采的安全高效进行。

#### 2.5 政策法规

国家政策法规可以对工程全生命周期开发进行宏观调控,工程全生命周期开发思路可以为国家政策法规的制定提供导向建议,两者相辅相成,缺一不可。环境保护与经济发展要综合考虑,抛弃哪一种都不符合人与自然和谐共处的政策方针。借鉴我国的环境保护政策体系,即“预防为主,防治结合”,“谁污染,谁治理”,“强化环境管理”这3项政策<sup>[112]</sup>。从勘探和开发技术、采矿权的重叠、管理、财政支持政策、投资环境、法规和市场条件角度,对煤层瓦斯抽采提供政策支撑,资金支持和技术创新,确保地面井压裂卸压瓦斯抽采工程技术的高效开发<sup>[113-114]</sup>。

煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程的政策导向建议应全面概括工程全生命周期的各个阶段,如图9所示。主要包括施工前技术方案的可行性论证、透明化地质勘探与煤岩物理力学参数测定等;施工阶段的钻井施工方案设计、压裂施工方案设计和排采施工方案设计等;施工后的井筒稳定性管理、水源位置及污染监测和顶板与煤层稳定性监测等,形成导向性的政策法规,为煤层顶板水力压裂技术的安全高效运行提供指导性的方向。

### 3 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采关键科学问题

#### 3.1 总体研究框架

在综合分析煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯

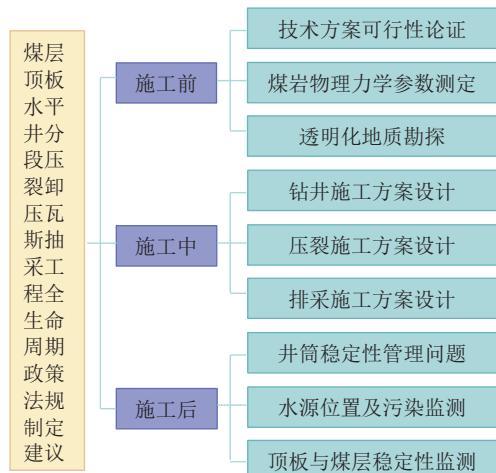


图 9 煤层顶板压裂工程施工政策导向建议

Fig.9 Policy guidance suggestions for the construction of coal seam roof fracturing engineering

排采技术研究现状的基础上,从压裂卸压范围、水气运移机制、水气聚合盲区与瓦斯排采效果评价4个方面,提出了煤层顶板水平井分段压裂卸压有效范围精准确定、三向应力与煤体结构双重异性条件下水气运移规律、煤层顶板水平井分段压裂水气聚合潜在危险

区超前探测和煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果的精细化评价4个关键科学问题。通过分析4个方面的关键科学问题,形成了10个分解问题,并提出了各问题存在的主要难点和21个重点研究方向,接着简单分析了各方向之间的支撑关系,最终构建了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采关键科学问题的总体研究框架,如图10所示。

### 3.2 煤层顶板水平井分段压裂卸压有效范围精准确定

#### 3.2.1 复杂环境中多裂缝竞争扩展实时精准监测

煤层顶板水平井分段压裂工程现场多采用地面微地震向量扫描技术进行煤层裂缝监测,该技术对于准确识别天然裂缝发育情况效果较好<sup>[115]</sup>。但存在以下3个难点:①对于松软煤层,天然裂缝在三维空间上数量繁多,微地震监测数据值可能存在相互影响,导致数据准确性降低,难以精细准确反演构建三维天然裂缝形态。②在压裂过程中,分段且同时压裂施工噪声对微地震监测影响大,导致微地震监测数据幅值低,同时震源来源复杂且微地震监测数据频谱难以有效反演,难以实时精准反演定位裂缝的扩展规律<sup>[116]</sup>。③微地震技术在井下监测裂缝形态较为准确,但在地

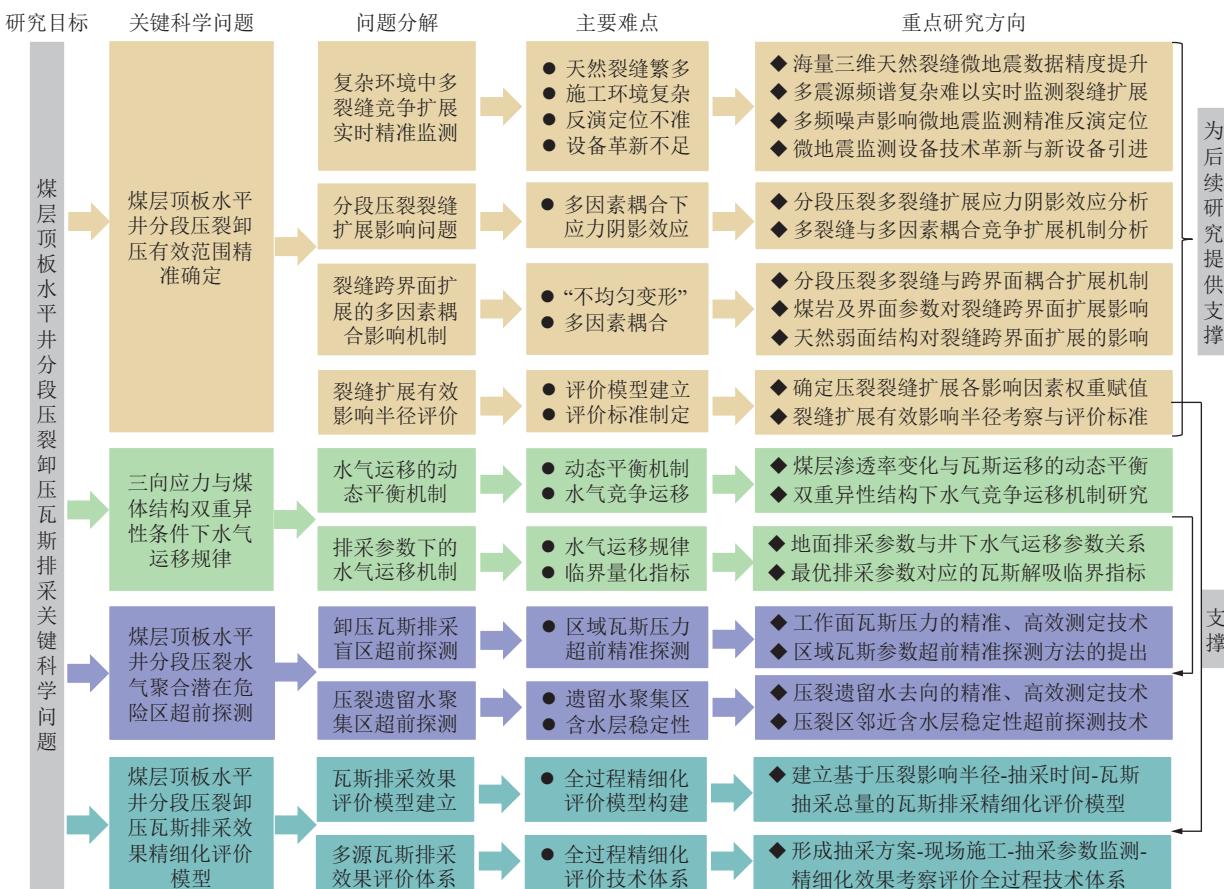


图 10 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采关键科学问题的总体研究框架

Fig.10 Overall research framework for key scientific issues related to segmented fracturing, pressure relief, and gas drainage in horizontal wells on coal seam roofs

面监测效果较差,难以精准监测<sup>[13]</sup>。在单向突破微地震技术装备的基础上,创新性地提高数据采集与处理方法,同时多方向和多领域引进高精度设备,实现复杂环境中多裂缝竞争扩展实时精准监测。

### 3.2.2 分段压裂多裂缝多因素耦合竞争扩展机制

煤层顶板水平井分段压裂多裂缝起裂位置在同一层位,多裂缝相互竞争扩展形成裂缝缝网,存在典型的应力阴影效应<sup>[117-119]</sup>。若水力裂缝扩展的应力阴影效应叠加显著,说明裂缝间相互干扰作用强烈,可能会导致裂缝扩展受阻,使得裂缝扩展呈非均匀性,难以满足现场压裂裂缝缝网的要求。这也说明压裂方案的设计不合理,其未能在精细化的勘测地质特征之上给出合理的施工方案。可见深入开展分段压裂多裂缝射孔间距、角度和长度等因素影响下的多裂缝扩展应力阴影效应研究至关重要。

但井下工程地质环境本就复杂,分段压裂多裂缝的扩展除了考虑必要的顶板-煤层地应力差异、压裂液和支撑剂材料等因素外,天然裂缝与层理等因素的影响也不可忽视,尤其对于松软煤层,这使得符合原位井下环境的水力裂缝扩展规律难以精细判定。因此,开展相关多裂缝与多因素耦合竞争扩展机制的研究,对于进一步在井上复现井下环境获得更为准确的且更符合原位环境的多裂缝与多因素耦合竞争扩展机制意义重大,亟待深入分析。

### 3.2.3 水力裂缝跨界面扩展的多因素耦合影响机制

顶板-煤体组合结构各组分的物性差异会导致水力裂缝在跨煤岩界面时存在不均匀变形,在不同顶板-煤体及其界面因素影响下(抗压强度、弹性模量、泊松比差异、界面强度、粗糙度等),探究不均匀变形的具体量化指标规律,是揭示水力裂缝跨界面扩展机制的关键难点。

水力裂缝跨煤岩界面扩展存在能否跨过和如何跨过的问题。关于这部分问题开展的相关研究,其背景设定较为简单,而井下环境是复杂多相多场的耦合环境,是无法依据实验条件的简化而简化的。水力裂缝跨界面扩展不仅仅是射孔位置和方向的问题,还受地应力、层理、煤岩物性、界面强度和天然裂缝等因素的共同影响,多因素耦合影响下的物理和数值模拟实验研究还严重缺乏。水力裂缝跨界面时,在煤体中,普遍存在天然裂缝和层理等天然弱面结构,这些天然弱面的大小和方向对跨界面的影响规律也是需要考虑的问题。

### 3.2.4 煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展有效影响半径评价模型

在现阶段,煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展有

效影响半径无法完全基于微地震等裂缝监测设备进行井上监测获得。工程现场一般需要在井下施工一定量的考察钻孔进行多因素综合评价验证,包括不同考察钻孔取心煤样含水率大小、水质检验与含砂情况化验,以及考察孔瓦斯抽采体积分数和流量等参数的监测,继而形成多因素综合评价模型。但多因素评价模型如何进行各因素的重要性及权重赋值,如何确定各因素影响的准确性重要程度问题是亟待考虑的问题。除此之外,施工现场压裂裂缝的扩展实际上是属于压裂裂缝在三维空间中的扩展问题,通过在井下施工效果考察钻孔,设置不同垂高的终孔位置与距压裂孔不同水平距离的考察钻孔,是实现压裂裂缝在三维空间扩展区域监测与效果评价的关键。

综上所述,目前还未形成煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展有效影响半径的考察与评价标准,致使现场施工的相关方案设计还不够准确和统一,可能导致无效考察的情况,这是未来亟待解决的难题。除此之外,尽快提升微地震监测技术的准确性,是实现压裂裂缝在三维空间区域卸压影响范围地面监测的关键点,也可避免通过繁多的施工考察孔进行验证,是未来亟待深入研究的方向。

## 3.3 三向应力与煤体结构双重异性条件下水气运移规律

在煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采过程中,煤层及其顶板均处于三向应力状态,其渗透率处于动态变化阶段且各不相同。在分析三向应力与煤体结构双重异性条件下煤层瓦斯吸附解吸作用机制的基础上,探寻多因素影响下煤体瓦斯吸附解吸的动态平衡关系,揭示煤层渗透率与瓦斯运移的动态平衡机制。探究三向应力与煤体结构双重异性条件下的水-瓦斯相互竞争运移规律,对于揭示瓦斯排采过程中井下水与瓦斯运移机理至关重要。

在实际工程现场,三向应力与煤体结构双重异性条件下水气运移规律还受到地面瓦斯排采参数的影响,是一个动态平衡的过程。要想真正揭示三向应力与煤体结构双重异性条件下煤层水气运移规律,需先厘清地面排采参数与井下水气运移参数之间的关系,寻找最优的排采参数下的煤层水气运移规律。同时基于现场实际最优条件下的排采数值,探究三向应力与煤体结构双重异性条件下瓦斯解吸临界量化指标,继而揭示多因素耦合影响下煤层水气运移规律。

## 3.4 煤层顶板水平井分段压裂水气聚合潜在危险区超前探测

### 3.4.1 煤层顶板压裂卸压瓦斯排采盲区超前探测

水力裂缝扩展的复杂性与地面区域多井筒瓦斯

排采过程均会影响区域瓦斯的流动性和聚集性,导致特定煤层瓦斯压力受邻近煤层瓦斯压力的影响而变化复杂,难以实时精准监测区域瓦斯压力的变化,无法保证井下瓦斯抽采安全。按《细则》规定,当煤层瓦斯压力大于3 MPa时,无法进行井下抽采。但某一工作面煤层瓦斯压力降至3 MPa以下并不足以保证邻近工作面乃至整个采区瓦斯抽采的安全性。但如何实时、准确且高效判定井下大范围区域瓦斯压力降至3 MPa以下是一个复杂且亟待解决的问题。因此,探明多因素耦合条件下的水力裂缝扩展特征,同时考虑区域范围内的地面井井筒瓦斯排采参数对井下应力环境的影响规律,实时、精准且高效测定井下特定区域瓦斯压力降至3 MPa以下,对于确保煤矿全生命周期的瓦斯安全抽采至关重要。

### 3.4.2 煤层顶板压裂遗留水聚集特征超前探测

“十三五”以来,国家政策导向体现要重视地下水环境保护<sup>[120]</sup>。压裂遗留水的去向不明可能导致水资源聚集,轻则影响工作面正常生产,严重可能形成水害。因此,揭示煤层顶板压裂裂缝多因素耦合影响扩展机制,精准监测压裂遗留水的去向,形成压裂遗留水去向的精准、高效测定技术势在必行。煤层顶板压裂可能会引起裂缝扩展连通地下含水层,导致煤层气产水与地下水混合,对井下含水层结构造成污染。因此,在施工地面井筒之前,需深入调研井下水文地质环境,同时在压裂结束后的煤炭资源回采之前,对压

裂区邻近含水层的稳定性进行超前探测,对于保障压裂工程的全生命周期安全至关重要。

### 3.5 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果的精细化评价模型

目前,煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果的评价主要通过直接测定煤层残余瓦斯压力或残余瓦斯含量等参数来进行检验。此方法虽然思路清晰,但何时施工考察钻孔却难以确定,仅凭经验进行施工误差大,效果不佳;同时现场多次施工考察钻孔不仅耗时耗力耗财,还会对煤体造成多次的破坏,加剧瓦斯参数的测定误差,增加后续的井下施工风险。因此,通过优化瓦斯排采施工方案,建立考虑压裂有效影响半径、设计瓦斯抽采时间与抽采量的煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果的精细化评价模型,如图11所示。现场监测相关瓦斯参数变化规律,选取合适参数进行取样分析,将现场施工与井下状态完美结合,精准构建了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采方案→现场技术实施→抽采参数监测→精准效果考察评价的全过程技术体系,现场监测数据反馈确定效果,考察施工关键时间节点,具有直接、可预见性,可助力现场瓦斯排采效果的精细化考察。

## 4 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术发展方向

煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程实

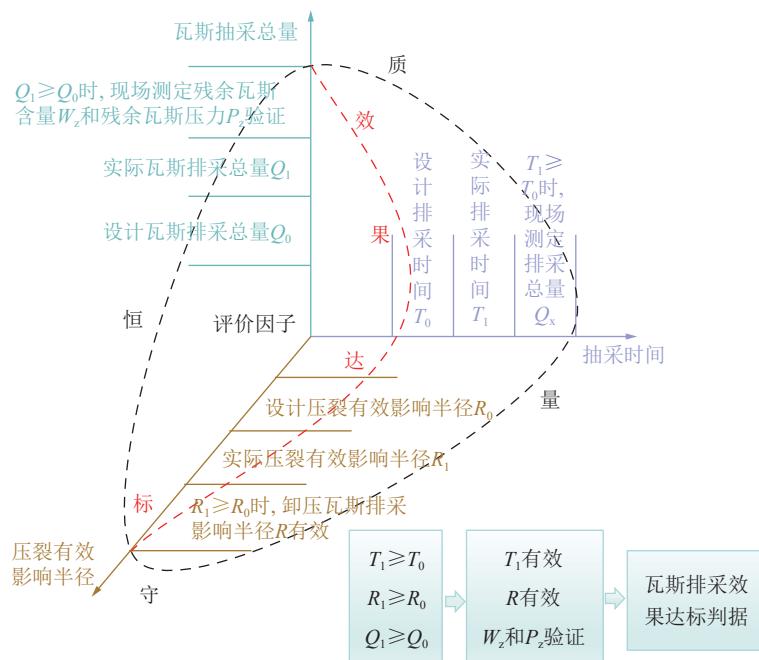


图 11 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果精细化评价模型示意

Fig.11 Schematic diagram of the refined evaluation model for the effect of segmented fracturing and pressure relief gas drainage in the horizontal well of the coal seam roof

际包含压裂水运移、煤岩体损伤破裂与瓦斯运移等多相多场耦合过程。理想的瓦斯排采效果应建立在明确水力压裂多裂隙竞争扩展机理、理清应力-煤-瓦斯-水-温度耦合微观作用机制、实现压裂水去向的透明化监测、确保压裂工程全生命周期环境保护和完善压裂工程全生命周期的政策法规基础上,最终才能实现煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程实施的合理可行、透明安全、环境友好和高效抽采。据此提出了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术的精准化、协调化、智能化、综合化和示范化发展方向。

1) 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术精准优化分析。深入且综合对比分析以往的工程案例,从精细化的地质模型特征入手,详细对比钻井及固井工程、压裂工程和排采工程参数的异同点,再基于构建数据统计算法模型,精准判识各参数对瓦斯抽采效率影响的重要性程度,形成不同工程地质条件下瓦斯高效开发精细化模型,从而提升煤层顶板水平井分段压裂瓦斯抽采工程的可靠性和高效性。除此之外,对于不适宜地面抽采的矿井,可考虑其他无水压裂技术,如气体置换法<sup>[121]</sup>和高能物理激光技术<sup>[122]</sup>等。总之,“因地制宜,精准施策”才是煤矿瓦斯精准抽采的必由之路。

2) 井上排采瓦斯效率与井下压力动态协调开发技术思路。在地面排水抽采瓦斯的过程中,井下瓦斯压力与孔隙水压力等动态变化,井下压力差是影响煤层瓦斯吸附/解吸的关键因素,也是影响煤层瓦斯抽采效率的根本原因。除此之外,环境温度与压裂孔闭合变化等均会影响瓦斯抽采的高效性。因此,探寻井上瓦斯抽采效率的动态最优值与井下煤层动态压力差值、环境温度与压裂孔闭合等因素是确保煤层瓦斯高效抽采的关键。

3) 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术智能化开发思路。煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采智能化开发的实现依赖于其全生命周期各个阶段的智能化决策与施工。首先,科学规划地面压裂技术可行性的智能化评价与工程地质条件的精细化建模。其次,开发“L”与“U”型压裂井的智能掘进与固井技术,进行分段压裂裂缝扩展的智能三维立体监测与优化,实现瓦斯排采全过程的数据可视化智能监测,确保井下数据实时传输,井上措施实时调控。然后,在安全管理方面,智能化监测遗留水与瓦斯的聚集情况,实现煤层及顶底板稳定性智能评估,确保煤炭资源安全回采。最终实现煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采的智能化施工,助力煤层气资源商业

化开发。

4) 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术与煤炭地下气化技术综合开发思路。煤炭地下气化技术是煤炭资源回收的一种新思路,可以有效避免煤层顶板水平井分段压裂带来的各种负面影响和回采安全问题,同时大大提升地面井瓦斯排采的使用周期,保障资源的最大化利用,同时还可以避免传统煤炭资源回采带来的巨额投入,保证煤矿生产效益,实现煤与煤层气资源的高效共采。

5) 煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术工程示范平台构建。煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术相关的基础研究落后于工程示范会导致工程效率低下,甚至失败。开展压裂技术相关基础研究是建立工程示范平台的关键。需首先进行煤层顶板水平井分段压裂技术的详细适用范围及可行性客观分析,为松软低渗煤层瓦斯抽采提供清晰具体的发展方向;其次厘清工程钻井、压裂和排采阶段的宏观-微观作用机理,助力各工程阶段施工参数的精细优化;最后从煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程全生命周期的角度,依托政策法规,建立安全风险与环境污染的预防与治理的责任划分。亟待构建煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术工程示范平台,为类似工程背景下的施工提供思路。

## 5 结 论

1) 提出了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采工程全生命周期发展理念,包括前期科学规划、中期工程施工和后期安全管理3个阶段。前期科学规划为中期压裂工程施工能顺利开展提供保障,中期工程施工是整个压裂工程的核心,后期安全管理是确保压裂工程全生命周期安全、绿色运行的关键一环,三者缺一不可。

2) 煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展受地质因素、施工参数和物性参数等影响变得极其复杂,综合评价裂缝扩展多因素影响下的主次关系,揭示多因素影响下的煤层顶板压裂裂缝扩展机理是亟待解决的问题。探寻应力、水、煤体与温度等因素耦合对煤层瓦斯吸附、解吸与运移的促进与抑制作用的临界关系,建立多因素临界指标下的煤层瓦斯吸附、解吸与运移的最优模型,是实现煤层瓦斯高效排采的关键。

3) 目前,煤层顶板压裂遗留水在污染水源、抑制瓦斯排采和危险性聚集方面的研究不足,且缺乏“中国化”的管理经验和技术支撑。以煤层顶板压裂工程全生命周期开发思路为导向,分析了其高耗水性、压裂液选择及潜在污染、支撑剂绿色高效发展、空气污

染和地震风险等人文环境问题,提出了与之相对应的政策法规制定思路。

4)从压裂卸压范围、水气运移机制、水气聚合盲区与瓦斯排采效果评价角度,提出了4个关键科学问题,并提出了各问题存在的主要难点和重点研究方向,形成了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采关键科学问题的总体研究框架。即实现复杂环境中多裂缝竞争扩展实时精准监测,揭示多因素影响下煤层顶板分段压裂与跨界面裂缝扩展机理,构建煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展有效影响半径评价模型,探究三向应力与煤体结构双重异性条件下水气运移规律,实现煤层顶板水平井压裂水气聚合潜在危险区超前探测,建立煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采效果的精细化评价模型。

5)提出了煤层顶板水平井分段压裂卸压瓦斯排采技术的精准化、协调化、智能化、综合化和示范化发展方向。

### 参考文献(References):

- [1] 袁亮.煤炭工业碳中和发展战略构想[J].*中国工程科学*,2023,25(5): 103–110.  
YUAN Liang. Strategic conception of carbon neutralization in coal industry[J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(5): 103–110.
- [2] 门相勇,娄钰,王一兵,等.中国煤层气产业“十三五”以来发展成效与建议[J].*天然气工业*,2022,42(6): 173–178.  
MEN Xiangyong, LOU Yu, WANG Yibing, et al. Development achievements of China's CBM industry since the 13<sup>th</sup> Five-Year Plan and suggestions[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 173–178.
- [3] 张道勇,朱杰,赵先良,等.全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J].*煤炭学报*,2018,43(6): 1598–1604.  
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1598–1604.
- [4] 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.
- [5] 张群,葛春贵,李伟,等.碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂煤层气高效抽采模式[J].*煤炭学报*,2018,43(1): 150–159.  
ZHANG Qun, GE Chungui, LI Wei, et al. A new model and application of coalbed methane high efficiency production from broken soft and low permeable coal seam by roof strata-in horizontal well and staged hydraulic fracture[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 150–159.
- [6] 张群.关于我国煤矿区煤层气开发的战略性思考[J].*中国煤层气*,2007,4(4): 3–5, 15.  
ZHANG Qun. Strategic thinking on coal mine methane development in China[J]. *China Coalbed Methane*, 2007, 4(4): 3–5, 15.
- [7] 孔祥喜,唐永志,李平,等.淮南矿区松软低透煤层煤层气开发利用技术与思考[J].*煤炭科学技术*,2022,50(12): 26–35.  
KONG Xiangxi, TANG Yongzhi, LI Ping, et al. Thingking and utilization technology of coalbed methane in soft and low permeability coal seams in Huainan Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 26–35.
- [8] 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.
- [9] 张群,降文萍,姜在炳,等.我国煤矿区煤层气地面开发现状及技术研究进展[J].*煤田地质与勘探*,2023,51(1): 139–158.  
ZHANG Qun, JIANG Wenping, JIANG Zaibing, et al. Present situation and technical research progress of coalbed methane surface development in coal mining areas of China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 139–158.
- [10] 尹清奎,焦中华.焦作某煤层气井田低产原因分析[J].*中国煤层气*,2012,9(3): 16–19.  
YIN Qingkui, JIAO Zhonghua. Analysis of reasons for low yield of certain CBM well in Jiaozuo[J]. *China Coalbed Methane*, 2012, 9(3): 16–19.
- [11] 姜在炳,杨建超,李勇,等.基于三维地质建模技术的煤层气抽采效果评价-以晋城寺河煤矿为例[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(2): 55–64.  
JIANG Zaibing, YANG Jianchao, LI Yong, et al. Evaluation of coalbed methane extraction effect based on 3D geological modeling technology: An example of Sihe Mine in Jincheng City[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 55–64.
- [12] 张芬娜,张皓,綦耀光,等.共采技术现状与在煤系气共采中的适应性分析[J].*煤炭学报*,2017,42(S1): 203–208.  
ZHANG Fenna, ZHANG Hao, QI Yaoguang, et al. Adaptability analysis and co-exploration technology status summary in coal-bearing gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S1): 203–208.
- [13] CIOPOLLA C L, MACK M G, MAXWELL S C. Reducing exploration and appraisal risk in low permeability reservoirs using microseismic fracture mapping - part 2[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 2010.
- [14] 桑树勋,皇凡生,单衍胜,等.碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J].*煤炭科学技术*,2024,52(1): 196–210.  
SANG Shuxun, HUANG Fansheng, SHAN Yansheng, et al. Technical progress of strengthening broken soft and low permeability coal reservoir and surface development of coalbed methane[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 196–210.
- [15] 庞涛,姜在炳,李浩哲,等.碎软煤层顶板水平井空间位置对压裂裂缝扩展的影响[J].*煤炭学报*,2022,47(S1): 196–203.  
PANG Tao, JIANG Zaibing, LI Haozhe, et al. Influence of the spatial position of horizontal well in roof strata of crushed soft coal seam on the propagation of fracturing fractures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(S1): 196–203.

- Coal Society, 2022, 47(S1): 196–203.
- [16] 李浩, 梁卫国, 李国富, 等. 碎软煤层韧性破坏-渗流耦合本构关系及其间接压裂工程验证[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 924–936.  
LI Hao, LIANG Weiguo, LI Guofu, et al. Ductile failure-seepage coupling constitutive equations of broken soft coal and its verification in indirect fracturing engineering[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 924–936.
- [17] LI H, LIANG W G, JIANG Y L, et al. Numerical study on the field-scale criterion of hydraulic fracture crossing the interface between roof and broken low-permeability coal[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(9): 4543–4567.
- [18] LI H, LIANG W G, WANG J M, et al. Research on main controlling factors and its influencing laws on hydraulic fracture network in the fractured soft and low-permeability coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 95: 104147.
- [19] OLSEN T N, BRATTON T R, TANNER K V, et al. Application of indirect fracturing for efficient stimulation of coalbed methane [C]//Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers. 2007: 433–442.
- [20] 巫修平. 碎软低渗煤层顶板水平井分段压裂裂缝扩展规律及机制研究[D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2017.  
WU Xiuping. Research on control mechanism of fracture propagation of multi-stage hydraulic fracturing horizontal well in roof of broken soft and low permeable coal seam[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2017.
- [21] 姜在炳, 李浩哲, 方良才, 等. 紧邻松软煤层顶板水平井分段穿层压裂裂缝延伸机理[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 922–931.  
JIANG Zaibing, LI Haozhe, FANG Liangcai, et al. Fracture propagation mechanism of staged through-layer fracturing for horizontal well in roof adjacent to broken-soft coal seams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 922–931.
- [22] 范铁刚, 张广清. 注液速率及压裂液黏度对煤层水力裂缝形态的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 117–123.  
FAN Tiegang, ZHANG Guangqing. Influence of injection rate and fracturing fluid viscosity on hydraulic fracture geometry in coal[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(4): 117–123.
- [23] 贺飞飞, 张润旭, 康天合, 等. 基于微元法的低渗透储层定向射孔转向压裂裂缝动态扩展模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 782–792.  
HE Feifei, ZHANG Runxu, KANG Tianhe, et al. Dynamic propagation model for oriented perforation steering fracturing cracks in low permeability reservoirs based on microelement method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 782–792.
- [24] GUO Y F, ZHANG R X, ZHANG X H, et al. Criterion for hydraulic fracture propagation behavior at the interface of a coal measure composite reservoir[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 1988302.
- [25] WIŚNIOWSKI R, ORŁOWICZ G. Theory of the vom berg rheological model and its use in cloud-native application[J]. *Energies*, 2022, 15(12): 4481.
- [26] MA L Z, YIN D S, REN J T, et al. A novel thixotropic structural dynamics model of water-based drilling fluids[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2024, 234: 212585.
- [27] 程正华, 艾池, 张军, 等. 胶结型天然裂缝对水力压裂裂缝延伸规律的影响[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(4): 433–439.  
CHENG Zhenghua, AI Chi, ZHANG Jun, et al. Influences of cemented natural fractures on propagation of hydraulic fractures[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(4): 433–439.
- [28] 张景臣, 石善志, 郭晓东, 等. 致密砾岩水力裂缝扩展大型矿场实验[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2024, 41(2): 173–182.  
ZHANG Jingchen, SHI Shanzhi, GUO Xiaodong, et al. Large-scale mine experiments on hydraulic fracture extension in dense conglomerates[J]. *Journal of Shenzhen University(Science and Engineering)*, 2024, 41(2): 173–182.
- [29] 楼烨, 张广清. 压裂液黏度对循环水力压裂影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 109–118.  
LOU Ye, ZHANG Guangqing. Experimental study on the influence of fracturing fluid viscosity on circulating hydraulic fracturing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 109–118.
- [30] 白岳松, 胡耀青, 李杰. 压裂液黏度和注液速率对含层理页岩水力裂缝扩展行为的影响规律研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(12): 18–24.  
BAI Yuesong, HU Yaoqing, LI Jie. Study on the influence law of fracturing fluid viscosity and liquid injection rate on propagation behavior of hydraulic fractures in laminated shale[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(12): 18–24.
- [31] 周彤, 王海波, 李凤霞, 等. 压裂液滤失对裂缝萌生及动态闭合过程的影响机理[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 91–101.  
ZHOU Tong, WANG Haibo, LI Fengxia, et al. Influence mechanism of fracturing fluid filtration on fracture initiation and dynamic closure process[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 91–101.
- [32] 张潇, 刘欣佳, 田永东, 等. 水力压裂支撑剂铺置形态影响因素研究[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(6): 113–120.  
ZHANG Xiao, LIU Xinjia, TIAN Yongdong, et al. Study on factors influencing the displacement pattern of hydraulic fracturing proppant[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(6): 113–120.
- [33] 陈志强, 李凤霞, 潘林华, 等. 复杂裂缝支撑剂转向规律研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(18): 7881–7889.  
CHEN Zhiqiang, LI Fengxia, PAN Linhua, et al. Liquid distribution model and proppant turning law of complex fractures[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(18): 7881–7889.
- [34] 王雪飞. 柔性纤维悬砂压裂液多相耦合动力学模型及输运规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.  
WANG Xuefei. Study on multi-phase coupling dynamic model and transport law of fracturing fluid in flexible fiber suspended sand[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2023.
- [35] 王明. 携砂压裂液颗粒群碰撞破碎及管道耦合振动的数值分析方法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.  
WANG Ming. Research on numerical analysis method of collision and fragmentation of sand-carrying fracturing fluid particle group and coupling vibration of pipeline[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.
- [36] 吴飞鹏, 范贤章, 徐尔斯, 等. 压裂液高压渗滤对砂岩基质损伤演化的细观力学分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3238–3248.

- WU Feipeng, FAN Xianzhang, XU Ersi, et al. Micromechanical analysis of damage evolution of sandstone matrix by high pressure infiltration of fracturing fluid[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3238–3248.
- [37] 邓守春, 左鸿, 李海波, 等. 地应力作用下水力裂缝中支撑剂导流能力的数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S2): 434–440.
- DENG Shouchun, ZUO Hong, LI Haibo, et al. Numerical investigation of flow conductivity of propping agent in hydraulic fracture under *in situ* stresses[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S2): 434–440.
- [38] 姜玉龙. 煤系地层水力压裂裂缝扩展规律及界面影响机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- JIANG Yulong. Hydraulic fracture propagation behaviors and interface impact mechanism in coal measure strata. [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [39] 李浩哲, 姜在炳, 舒建生, 等. 水力裂缝在煤岩界面处穿层扩展规律的数值模拟[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(2): 106–113.
- LI Haozhe, JIANG Zaibing, SHU Jiansheng, et al. Numerical simulation of layer-crossing propagation behavior of hydraulic fractures at coal-rock interface[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(2): 106–113.
- [40] 姜玉龙, 梁卫国, 李治刚, 等. 煤岩组合体跨界面压裂及声发射响应特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(5): 875–887.
- JIANG Yulong, LIANG Weiguo, LI Zhigang, et al. Experimental study on fracturing across coal-rock interfaces and the acoustic emission response characteristics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(5): 875–887.
- [41] 梁运培, 李其罡, 黄旭超, 等. 基于颗粒流的倾斜厚煤层坚硬顶板运动失稳规律及水力弱化参数研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(S1): 3428–3438.
- LIANG Yunpei, LI Qigang, HUANG Xuchao, et al. Study on movement instability law and hydraulic weakening parameters of hard roof in inclined thick coal seam based on particle flow[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(S1): 3428–3438.
- [42] 郭天魁, 王云鹏, 陈铭, 等. 基于孔弹性效应的水平井多簇压裂诱导应力及裂缝扩展分析[J]. *天然气工业*, 2023, 43(10): 64–72.
- GUO Tiankui, WANG Yunpeng, CHEN Ming, et al. Analysis of stress induced by multi-cluster fracturing in horizontal wells and fracture propagation condiering poroelastic effect[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(10): 64–72.
- [43] 张皓宇, 陈军斌, 王涛, 等. “井工厂”不同压裂模式下裂缝扩展规律数值模拟研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(9): 3561–3574.
- ZHANG Haoyu, CHEN Junbin, WANG Tao, et al. Numerical simulation of fracture propagation in different fracturing modes of “well factory” [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(9): 3561–3574.
- [44] 曾青冬, 姚军. 水平井多裂缝同步扩展数值模拟[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1571–1579.
- ZENG Qingdong, YAO Jun. Numerical simulation of multiple fractures simultaneous propagation in horizontal wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1571–1579.
- [45] 朱海燕, 黄楚淏, 唐煊赫. 裂缝性页岩储层水力压裂多簇裂缝扩展的 FEM-DFN 数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S1): 3496–3507.
- ZHU Haiyan, HUANG Chuhao, TANG Xuanhe. Numerical simulation of multi-cluster fractures propagation in naturally fractured shale reservoir based on finite element method-discrete fracture network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S1): 3496–3507.
- [46] 王永亮, 刘娜娜, 王昊. 水力压裂分段射孔簇多裂缝空间偏转模拟研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(9): 160–169.
- WANG Yongliang, LIU Nana, WANG Hao. Simulation investigation on spatial deflection of multiples fractures of multistage perforation clusters in hydraulic fracturing[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(9): 160–169.
- [47] 夏彬伟, 刘浪, 彭子烨, 等. 致密砂岩水平井多裂缝扩展及转向规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(8): 1549–1555.
- XIA Binwei, LIU Lang, PENG Ziyue, et al. Multi-fracture propagation and deflection laws of horizontal wells in tight sandstone[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(8): 1549–1555.
- [48] 胡千庭, 刘继川, 李全贵, 等. 煤层顶板分段水力压裂应力及裂缝演化试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(6): 1084–1095, 1202.
- HU Qianting, LIU Jichuan, LI Quangui, et al. Study on stress and fracture evolution of sectional hydraulic fracturing of coal seam roof[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(6): 1084–1095, 1202.
- [49] 刘乃震, 张兆鹏, 邹雨时, 等. 致密砂岩水平井多段压裂裂缝扩展规律[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 1059–1068.
- LIU Naizhen, ZHANG Zhaopeng, ZOU Yushi, et al. Propagation law of hydraulic fractures during multi-staged horizontal well fracturing in a tight reservoir[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 1059–1068.
- [50] 赵欢, 李玮, 强小军, 等. 致密砂岩储层多裂缝扩展形态及影响因素[J]. *东北石油大学学报*, 2020, 44(5): 76–81, 122.
- ZHAO Huan, LI Wei, QIANG Xiaojun, et al. Fracture morphology and the influence factors of multi-fracture propagation in tight sand reservoir[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(5): 76–81, 122.
- [51] 陈铭, 胥云, 翁定为. 水平井多段压裂多裂缝扩展形态计算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(S2): 3906–3914.
- CHEN Ming, XU Yun, WENG Dingwei. Calculation method of multi-fracture propagation morphology in multi-stage fracturing of horizontal wells[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S2): 3906–3914.
- [52] 周彤, 张士诚, 陈铭, 等. 水平井多簇压裂裂缝的竞争扩展与控制[J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(4): 469–478.
- ZHOU Tong, ZHANG Shicheng, CHEN Ming, et al. Competitive propagation of multi-fractures and their control on multi-clustered fracturing of horizontal wells[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2019, 49(4): 469–478.
- [53] 李倩, 李童, 蔡益栋, 等. 煤层气储层水力裂缝扩展特征与控因研究进展[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(12): 4443–4460.

- LI Qian, LI Tong, CAI Yidong, et al. Research progress on hydraulic fracture characteristics and controlling factors of coalbed methane reservoirs[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(12): 4443–4460.
- [54] 蒋长宝, 杨毅毫, 刘辉辉, 等. 天然裂缝对水力压裂煤的起裂及扩展试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(5): 92–101.
- JIANG Changbao, YANG Yihao, LIU Huihui, et al. Study on the influence of natural fractures on the initiation and propagation of hydraulic fracturing coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(5): 92–101.
- [55] ZHU D J, LI W D, NIU D, et al. Propagation law of hydraulic fracture across the coal–rock interface under the co-effect of natural fractures and tectonic stress[J]. *Processes*, 2023, 11(7): 1951.
- [56] RUEDA CORDERO J A, MEJIA SANCHEZ E C, ROEHL D, et al. Hydro-mechanical modeling of hydraulic fracture propagation and its interactions with frictional natural fractures[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111: 290–300.
- [57] 郭天魁, 王云鹏, 陈铭, 等. 煤层顶板水平井穿层压裂适应性数值模拟[J]. *天然气工业*, 2021, 41(11): 74–85.
- GUO Tiankui, WANG Yunpeng, CHEN Ming, et al. Numerical simulation of adaptability of horizontal well layer-penetrating fracturing in the roof of coal seam[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(11): 74–85.
- [58] 姜在炳, 李浩哲, 许耀波, 等. 煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 183–192.
- JIANG Zaibing, LI Haozhe, XU Yaobo, et al. Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 183–192.
- [59] 李勇, 陈涛, 马啸天, 等. 煤层顶板间接压裂裂缝扩展机制及影响因素[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(2): 171–182.
- LI Yong, CHEN Tao, MA Xiaotian, et al. Extension mechanism and influencing factors of indirect fracturing fractures on coal seam roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 171–182.
- [60] 庞涛, 姜在炳, 惠江涛, 等. 煤系水平井定向向射孔压裂裂缝扩展机制[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52(4): 68–75.
- PANG Tao, JIANG Zaibing, HUI Jiangtao, et al. Fracture Extension in Coal Seam with Horizontal Wells and Directional Perforation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(4): 68–75.
- [61] 柳先锋, 宋大钊, 何学秋, 等. 微结构对软硬煤瓦斯吸附特性的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 155–161.
- LIU Xianfeng, SONG Dazhao, HE Xueqiu, et al. Effect of micro-structures on methane adsorption characteristics of soft and hard coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 155–161.
- [62] LIU Y W, WANG D D, HAO F C, et al. Constitutive model for methane desorption and diffusion based on pore structure differences between soft and hard coal[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(6): 937–944.
- [63] LU S Q, CHENG Y P, QIN L M, et al. Gas desorption characteristics of the high-rank intact coal and fractured coal[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2015, 25(5): 819–825.
- [64] CHENG Y P, JIANG H N, ZHANG X L, et al. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2017, 4(2): 129–146.
- [65] WANG Z, HUANG G L, LIU X F, et al. Investigation on the gas emission law of water-containing coal across the rank range[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(15): 17289–17296.
- [66] LIU H H, FARID I I, SANG S X, et al. Synthetical study on the difference and reason for the pore structure of the No. 3 coal reservoir from the southern Qinshui Basin, China, using mercury intrusion porosimetry, low-temperature N<sub>2</sub> adsorption, low field nuclear magnetic resonance, and nuclear magnetic resonance cryoporometry[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 1876–1887.
- [67] 李祥春, 李忠备, 张良, 等. 不同煤阶煤样孔隙结构表征及其对瓦斯解吸扩散的影响[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S1): 142–156.
- LI Xiangchun, LI Zhongbei, ZHANG Liang, et al. Pore structure characterization of various rank coals and its effect on gas desorption and diffusion[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S1): 142–156.
- [68] 赵方钰, 邓泽, 王海超, 等. 煤体结构与宏观煤岩类型对煤体吸附/解吸瓦斯的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(12): 170–184.
- ZHAO Fangyu, DENG Ze, WANG Haichao, et al. Influence of coal structure and macrolithotype of coal on coal adsorption and desorption of gas[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 170–184.
- [69] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤吸附水的微观机理[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(4): 379–383.
- NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Micro-mechanism of coal adsorbing water[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(4): 379–383.
- [70] KNIGHT A W, KALUGIN N G, COKER E, et al. Water properties under nano-scale confinement[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 8246.
- [71] 陈跃, 马东民, 夏玉成, 等. 低阶煤不同宏观煤岩组分润湿性及影响因素研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 97–104.
- CHEN Yue, MA Dongmin, XIA Yucheng, et al. Study on wettability and influencing factors of different macroscopic components in low rank coal[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 97–104.
- [72] 王宗旭, 李紫欣, 白璐, 等. 固/液界面纳米气泡形成及稳定性研究进展[J]. *化工学报*, 2021, 72(7): 3466–3477.
- WANG Zongxu, LI Zixin, BAI Lu, et al. Formation and stability of nanobubble at solid/liquid interface[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(7): 3466–3477.
- [73] 李大勇, 王伟杰, 赵学增. 固液界面纳米气泡研究[J]. *化学进展*, 2012, 24(8): 1447–1455.
- LI Dayong, WANG Weijie, ZHAO Xuezeng. Nanobubbles on the immersed substrates[J]. *Progress in Chemistry*, 2012, 24(8): 1447–1455.
- [74] 文金浩, 薛娇, 张磊, 等. 基于 XRD 分析长焰煤润湿性与其灰分的关系[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(11): 83–86, 121.
- WEN Jinhao, XUE Jiao, ZHANG Lei, et al. Analysis on relationship between wettability and ash of long flame coal based on X-

- ray Diffraction Experiment[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(11): 83–86, 121.
- [75] 魏迎春, 项歆璇, 王安民, 等. 不同矿化度水对煤储层吸附性能的影响[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2833–2839.
- WEI Yingchun, XIAO Xinxuan, WANG Anmin, et al. Influence of water with different salinity on the adsorption performance of coal reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2833–2839.
- [76] 司磊磊. 水侵煤体瓦斯运移机理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- SI Leilei. Mechanism of gas transport in water-intrusion coal seam and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [77] ZHANG Z G, CAO S G, LI Y, et al. Effect of moisture content on methane adsorption-and desorption-induced deformation of tectonically deformed coal[J]. *Adsorption Science & Technology*, 2018, 36(9–10): 1648–1668.
- [78] 吴家浩, 王兆丰, 苏伟伟, 等. 自吸水分对煤中瓦斯解吸的综合影响[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(1): 35–40.
- WU Jiahao, WANG Zhaofeng, SU Weiwei, et al. Comprehensive influence of self-adsorbed water on gas desorption in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(1): 35–40.
- [79] 郑超, 马东民, 陈跃, 等. 水分对煤层气吸附/解吸微观作用研究进展[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 256–268.
- ZHENG Chao, MA Dongmin, CHEN Yue, et al. Research progress micro effect of water on coalbed methane adsorption/desorption[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 256–268.
- [80] 张小雨, 李波波, 李建华, 等. 考虑气、水吸附及应力的各向异性渗透率模型研究[J/OL]. *煤炭科学技术*: 1–11[2024–05–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240307.1728.003>.
- ZHANG Xiaoyu, LI Bobo, LI Jianhua, et al. Anisotropic permeability model study considering gas and water adsorption and stress[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1–11[2024–05–15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240307.1728.003>.
- [81] SHI T W, WANG A W, DAI L P, et al. Experimental study on the gas desorption law in coal affected by dynamic water injection[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 22407.
- SHI T W, WANG A W, DAI L P, et al. Experimental study on the gas desorption law in coal affected by dynamic water injection[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 22407.
- [82] XIAO Z Y, WANG G, WANG C S, et al. Permeability evolution and gas flow in wet coal under non-equilibrium state: Considering both water swelling and process-based gas swelling[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(5): 585–599.
- XIAO Z Y, WANG G, WANG C S, et al. Permeability evolution and gas flow in wet coal under non-equilibrium state: Considering both water swelling and process-based gas swelling[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 33(5): 585–599.
- [83] GAO D M, SONG Z H. Study on gas adsorption and desorption characteristics on water injection coal[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2023, 27(3): 101645.
- GAO D M, SONG Z H. Study on gas adsorption and desorption characteristics on water injection coal[J]. *Journal of Saudi Chemical Society*, 2023, 27(3): 101645.
- [84] 秦玉金, 苏伟伟, 田富超, 等. 煤层注水微观效应研究现状及发展方向[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(3): 428–444.
- QIN Yujin, SU Weiwei, TIAN Fuchao, et al. Research status and development direction of microcosmic effect under coal seam water injection[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(3): 428–444.
- [85] 廖锐全, 徐永高, 胡雪滨. 水锁效应对低渗透储层的损害及抑制和解除方法[J]. *天然气工业*, 2002, 22(6): 87–89.
- QIN Yujin, SU Weiwei, TIAN Fuchao, et al. Research status and development direction of microcosmic effect under coal seam water injection[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(3): 428–444.
- [86] LIAO Ruiquan, XU Yonggao, HU Xuebin. Damage to low-permeability reservoir by water locking effect and its inhibiting and removing methods[J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(6): 87–89.
- LONG Hang, LIN Haifei, MA Dongmin, et al. Modeling of dynamic permeability evolution in  $\text{CH}_4$ -containing coal based on elastic-plastic deformation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(9): 3859–3871.
- [87] 季鹏飞, 林海飞, 孔祥国, 等. 三轴应力下煤体对  $\text{CH}_4/\text{N}_2$  的吸附–解吸–扩散–渗流规律及变形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(10): 2496–2514.
- JI Pengfei, LIN Haifei, KONG Xiangguo, et al. Study on the law of  $\text{CH}_4/\text{N}_2$ -adsorption-desorption-diffusion-seepage and the coal deformation characteristics under triaxial stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(10): 2496–2514.
- [88] WANG K, FU Q C, ZHANG X, et al. Experimental investigation on strain changes during  $\text{CO}_2$  adsorption of raw coal sample: Temperature and effective stress[J]. *Energies*, 2021, 14(3): 717.
- WANG K, FU Q C, ZHANG X, et al. Experimental investigation on strain changes during  $\text{CO}_2$  adsorption of raw coal sample: Temperature and effective stress[J]. *Energies*, 2021, 14(3): 717.
- [89] 李树刚, 秦澳立, 龙航, 等. 有效应力对煤体瓦斯解吸–渗流与变形特征影响的实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(6): 59–65.
- LI Shugang, QIN Aoli, LONG Hang, et al. Experimental study on influence of effective stress on characteristics of coal gas desorption-seepage and deformation[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(6): 59–65.
- [90] 田虎楠, 唐巨鹏, 潘一山, 等. 平均有效应力对煤系页岩瓦斯微观吸附–解吸特性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(7): 1803–1815.
- TIAN Hunan, TANG Jupeng, PAN Yishan, et al. Experimental study on the effect of average effective stress on micro adsorption and desorption characteristics of coal shale gas[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(7): 1803–1815.
- [91] 秦玉金, 安丰华, 苏伟伟, 等. 基于 Fick 定律的柱状煤瓦斯扩散系数变化规律及模型构建[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(8): 140–149.
- QIN Yujin, AN Fenghua, SU Weiwei, et al. Direct determination of the diffusion coefficient variation of coal based on Fick's law and model establishment[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(8): 140–149.
- [92] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1791–1811.
- QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1791–1811.
- [93] 秦勇, 申建. 论深部煤层气基本地质问题[J]. *石油学报*, 2016, 37(1): 125–136.
- QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1): 125–136.
- [94] YE Q S, LI C W, YANG T, et al. Relationship between desorption amount and temperature variation in the process of coal gas desorption[J]. *Fuel*, 2023, 332: 126146.
- YE Q S, LI C W, YANG T, et al. Relationship between desorption amount and temperature variation in the process of coal gas desorption[J]. *Fuel*, 2023, 332: 126146.
- [95] 林海飞, 陈晨, 龙航, 等. 温度对瓦斯流动及全过程煤体变形的影响[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(1): 1–10.

- 响研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 59–67.
- LIN Haifei, CHEN Chen, LONG Hang, et al. Study on effect of temperature on gas flow and coal deformation in whole process[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 59–67.
- [96] 郝建峰, 梁冰, 孙维吉, 等. 煤与瓦斯的热流固耦合关系研究现状及展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 1051–1060, 1070.
- HAO Jianfeng, LIANG Bing, SUN Weiji, et al. State-of-the-art review and prospect of thermo-hydro-mechanical coupling relation between coal and gas[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 1051–1060, 1070.
- [97] 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.
- [98] 梁庆华, 吴燕清, 李云波, 等. 无线电波探测瓦斯富集区理论与方法[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 148–154.
- LIANG Qinghua, WU Yanqing, LI Yunbo, et al. Theory and method of coal seam gas enrichment area based on radio wave perspective detection[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 148–154.
- [99] 李冬, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 煤层瓦斯突出危险区综合预测方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 466–472.
- LI Dong, PENG Suping, DU Wenfeng, et al. Comprehensive prediction method of coal seam gas outburst danger zone[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 466–472.
- [100] 张克, 汪云甲, 陈同俊, 等. 基于正演模拟和 SVM 的瓦斯突出危险区预测[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 453–458.
- ZHANG Ke, WANG Yunjia, CHEN Tongjun, et al. The prediction of gas outburst risk area based on forward modeling and SVM[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 453–458.
- [101] 薛生, 郑晓亮, 袁亮, 等. 基于机器学习的煤与瓦斯突出预测研究进展及展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 664–694.
- XUE Sheng, ZHENG Xiaoliang, YUAN Liang, et al. Coal and gas outburst prediction based on machine learning: A review[J]. Journal of Coal Science, 2024, 49(2): 664–694.
- [102] 于友, 李江涛. 页岩油层水力压裂注入水返排量计算的数学模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 156–160.
- YU You, LI Jiangtao. Mathematical model of the flowback volume of the injected water for shale-oil hydraulic fracturing[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(5): 156–160.
- [103] 杨金秀, 王民, 卢双舫, 等. 浅析水力压裂对水资源的污染及对人类健康的影响[C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第16届学术年会文集. 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 2017: 2.
- [104] 张东晓, 杨婷云. 美国页岩气水力压裂开发对环境的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 801–807.
- ZHANG Dongxiao, YANG Tingyun. Environmental impacts of hydraulic fracturing in shale gas development in the United States[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 801–807.
- [105] 许家林, 鞠金峰, 轩大洋, 等. 煤矿全生命周期绿色开采研究展望[J]. 绿色矿山, 2023(1): 79–90.
- XU Jialin, JU Jinfeng, XUAN Dayang, et al. Prospects for green mining research of coal mine life cycle[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 79–90.
- [106] 蒋长宝, 尹光志, 许江, 等. 煤层原始含水率对煤与瓦斯突出危险程度的影响[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(1): 91–95.
- JIANG Changbao, YIN Guangzhi, XU Jiang, et al. The effect of original moisture content in coal beds on coal and gas outburst risk level[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(1): 91–95.
- [107] CLARK C E, HORNER R M, HARTO C B. Life cycle water consumption for shale gas and conventional natural gas[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(20): 11829–11836.
- [108] 陈海汇, 范洪富, 郭建平, 等. 煤层气井水力压裂液分析与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(5): 33–40.
- CHEN Haihui, FAN Hongfu, GUO Jianping, et al. Analysis and prospect on hydraulic fracturing fluid used in coalbed methane well[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(5): 33–40.
- [109] 毛峥, 李亭, 刘德华, 等. 纳米材料在水力压裂中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(9): 2681–2688.
- MAO Zheng, LI Ting, LIU Dehua, et al. Research progress on the application of nanomaterials in hydraulic fracturing[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(9): 2681–2688.
- [110] 杜红莉, 张薇, 马峰, 等. 水力压裂支撑剂的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2625–2630.
- DU Hongli, ZHANG Wei, MA Feng, et al. Research progress of hydraulic fracturing proppants[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(8): 2625–2630.
- [111] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 1–24.
- KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 1–24.
- [112] 王金南, 董战峰, 蒋洪强, 等. 中国环境保护战略政策 70 年历史变迁与改革方向[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1636–1644.
- WANG Jinnan, DONG Zhanfeng, JIANG Hongqiang, et al. Historical evolution and reform of China's environmental strategy and policy during the past seventy years(1949–2019)[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1636–1644.
- [113] 韩亚琴, 毛俊莉, 司芻, 等. 我国油气探采合一制度改革与实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(6): 8–14.
- HAN Yaqin, MAO Junli, SI Xiang, et al. Reform and practice of integrated oil and gas exploration and production system in China[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(6): 8–14.
- [114] 李丹, 苏现波. 煤与煤层气资源开发全过程阶段划分及其开发效果评价[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 137–147.
- LI Dan, SU Xianbo. Stage division and development effect evaluation of whole process of coal and coalbed methane resources development[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 137–147.
- [115] 刘子雄. 基于微地震向量扫描的煤层气井天然裂缝监测[J]. 煤田

- 地质与勘探, 2020, 48(5): 204–210.
- LIU Zixiong. Microseismic vector scanning-based natural fracture monitoring of the coalbed methane wells[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(5): 204–210.
- [116] 刘曰武, 高大鹏, 李奇, 等. 页岩气开采中的若干力学前沿问题[J]. 力学进展, 2019, 49: 201901.
- LIU Yuewu, GAO Dapeng, LI Qi, et al. Mechanical frontiers in shale-gas development[J]. *Advances in Mechanics*, 2019, 49: 201901.
- [117] 于永军, 朱万成, 李连崇, 等. 水力压裂裂缝相互干扰应力阴影效应理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2926–2939.
- YU Yongjun, ZHU Wancheng, LI Lianchong, et al. Analysis on stress shadow of mutual interference of fractures in hydraulic fracturing engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 2926–2939.
- [118] 蒲春生, 郑恒, 杨兆平, 等. 水平井分段体积压裂复杂裂缝形成机制研究现状与发展趋势[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1734–1743.
- PU Chunsheng, ZHENG Heng, YANG Zhaoping, et al. Research status and development trend of the formation mechanism of complex fractures by staged volume fracturing in horizontal wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1734–1743.
- [119] 李明, 陈昭, 梁力. 基于PHF-LSM模型节理对应力阴影效应的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(11): 1612–1620.
- LI Ming, CHEN Zhao, LIANG Li. Influence of joints on stress shadow effect based on PHF-LSM model[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2023, 44(11): 1612–1620.
- [120] 席北斗, 李娟, 汪洋, 等. 京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 1–9.
- XI Beidou, LI Juan, WANG Yang, et al. Strengthening the innovation capability of groundwater science and technology to support the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei Region: Status quo, problems and goals[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(1): 1–9.
- [121] 林海飞, 季鹏飞, 孔祥国, 等. 我国低渗煤层井下注气驱替增流抽采瓦斯技术进展及前景展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 730–749.
- LIN Haifei, JI Pengfei, KONG Xiangguo, et al. Progress and prospect of gas extraction technology by underground gas injection displacement for increasing flow in low-permeability coal seam in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 730–749.
- [122] 杨玲芝, 文国军, 王玉丹, 等. 激光钻井技术在煤层气定向钻进中的应用探讨[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 127–131.
- YANG Lingzhi, WEN Guojun, WANG Yudan, et al. Application discussion on laser borehole drilling technology to directional drilling for coalbed methane[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(11): 127–131.