

我国高阶煤层气疏导式高效开发理论基础

朱庆忠

引用本文:

朱庆忠. 我国高阶煤层气疏导式高效开发理论基础[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 82–91.

ZHU Qingzhong. Theoretical basis of dredging and efficient development of highrank coalbed methane in China: A case study of the Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 82–91.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.12.0845>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

四川筠连地区高阶煤层气井解堵技术及应用

De-blocking technology and application of high-rank CBM well in Junlian region in Sichuan Province
煤田地质与勘探. 2021, 49(5): 132–138 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.014>

高阶煤层气井产量递减规律及影响因素

Production decline law and influencing factors of high-rank coal CBM wells
煤田地质与勘探. 2020, 48(3): 59–64,74 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.009>

高阶煤岩毛管压力曲线新数学模型及关键参数

New mathematical model and key parameters of capillary pressure curves of high-rank coal samples
煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 77–82 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.010>

CO₂地质埋藏深度对高阶煤孔隙结构的影响

Influences of burial depth on pore structure of high-rank coal during the CO₂ storage process
煤田地质与勘探. 2018, 46(5): 32–36 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.05.005>

高阶煤层气直井低产原因分析及增产措施

Reasons of low yield and stimulation measures for vertical CBM wells in high-rank coal
煤田地质与勘探. 2019, 47(5): 104–110 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.014>

基于煤层气高效开发的煤粉凝聚沉降机制研究进展

Progress of coal fines agglomeration and settlement mechanism based on high efficiency coalbed methane drainage
煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 1–12 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.001>



移动阅读

朱庆忠. 我国高阶煤煤层气疏导式高效开发理论基础——以沁水盆地为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 82–91. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.12.0845

ZHU Qingzhong. Theoretical basis of dredging and efficient development of high-rank coalbed methane in China: A case study of the Qinshui Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 82–91. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.12.0845

我国高阶煤煤层气疏导式高效开发理论基础

——以沁水盆地为例

朱庆忠

(中国石油华北油田分公司, 河北任丘 062552)

摘要: 我国高阶煤煤层气资源储量丰富, 目前产量已占到我国煤层气总产量的 90% 以上, 高阶煤煤层气资源的高效开发利用对于保障国家能源战略安全、助力实现“碳达峰、碳中和”战略目标具有重要的现实意义。我国煤层气产业总体呈现出勘探开发程度低、主体技术适应性低、投资回报率低、发展规模小的“三低一小”的不足, 煤层气的规模化高效开发面临着巨大挑战。通过深度解剖勘探开发中出现的问题, 认为制约煤层气产业高效开发的核心问题均源于对煤储层特征, 特别是原始气水赋存、运移、产出规律认识不清, 未形成与之相匹配的开发理论和配套工程技术。针对这一问题, 开展煤层气水赋存-产出规律研究, 将室内试验与现场实践相结合, 形成煤层气疏导式高效开发理论及配套工程技术。结果表明: (1) 我国煤层气储层成藏过程复杂、气藏类型多样、非均质性强的客观条件与顶层设计支撑不足、主体技术工艺适应性不明确的主观因素是影响煤层气高效开发的重要原因; (2) 煤层孔隙-裂隙复杂双重孔隙结构及固有的气水赋存和产出运移规律决定了必须以“疏通”和“引导”为主导思想, 以实现储层与井筒的充分沟通和流体的高效率产出; (3) 以沁水盆地高阶煤为例, 运用疏导式开发理论形成的配套开发技术, 实现高效规模建产, 显著提升煤层气开发效果。

关键词: 高阶煤; 气水赋存; 疏导式开发理论; 开发方式优化; 排采控制方法

中图分类号: TE132; P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)03-0082-10

Theoretical basis of dredging and efficient development of high-rank coalbed methane in China: A case study of the Qinshui Basin

ZHU Qingzhong

(PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China)

Abstract: China is rich in high-rank coalbed methane(CBM) resources, which accounts for more than 90% of the total production of CBM in China. The efficient development and utilization of high-rank coal and coalbed methane(CBM) resources is of great practical significance for ensuring national energy strategic security and helping to achieve the strategic goals of “carbon peak and carbon neutrality”. The coalbed methane industry in China is generally characterized by low exploration and development degree, poor adaptability of main technology, low rate of return on investment and small development scale. The large-scale and efficient development of coalbed methane is faced with great challenges. Through in-depth analysis of the problems in exploration and development, it is concluded that the core problems restricting the efficient development of coalbed methane industry are all due to the unclear understanding of the characteristics of coal reservoir, especially the occurrence, migration and production of original gas and water, and the lack of matching development theory and supporting engineering technology. Aiming at these problems, the study on the regu-

收稿日期: 2021-12-18; 修回日期: 2022-02-28

基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX05064)

作者: 朱庆忠, 1966 年生, 男, 河北景县人, 博士, 教授级高级工程师, 从事煤层气、石油、天然气地质研究与管理工作。

E-mail: cyy_zqz@petrochina.com.cn

larity of occurrence and production of CBM water was carried out, and the theory of efficient development of CBM and supporting engineering technology were formed by combining laboratory test with field practice. The results show that: (1) The main factors affecting the efficient development of coalbed methane in China are complicated reservoir forming process, diverse gas reservoir types, strong objective conditions of heterogeneity, insufficient support of top design, and unclear adaptability of main technology; (2) The complex double pore structure of pore-fissure in coal seam and the inherent regularity of gas and water occurrence, production and migration determine that “dredging” and “guiding” must be taken as the leading ideas to realize the full communication between reservoir and wellbore and the efficient production of fluid; (3) Taking high-rank coal in Qinshui Basin as an example, the supporting development technology based on the dredging development theory can effectively realize efficient large-scale construction and production, and significantly improve the development effect of coalbed methane.

Keywords: high-rank coal; water gas occurrence; dredging development theory; optimization of development mode; drainage control method

我国高阶煤煤层气资源丰富,资源总量达 30.05 万亿 m^3 , 可采储量 12.5 万亿 m^3 , 目前高阶煤煤层气产量已占到我国煤层气总产量的 90% 以上^[1]。高阶煤煤层气资源的高效开发利用对于保障国家能源战略安全,降低碳排放、实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要的现实意义。中国煤层气产业的商业化起步于沁水盆地高阶煤煤层气的勘探开发,早期开发技术主要借鉴国外低阶煤煤层气开发技术,虽然在开发初期取得了部分成果,但随后的规模化推广却严重受阻,低产区成片出现,开发效益受到空前挑战,从而影响了国家煤层气战略规划指标的实现。目前煤层气产业与技术总体呈现出勘探开发程度低、主体技术适应性低、投资回报率低、发展规模小的“三低一小”的不足。客观方面,我国煤层气资源具有成煤条件多样、成煤时期多、煤变质作用叠加、构造变动多样等一系列特点,成藏条件复杂、气藏类型多样,含煤地层和不同煤层(甚至是同一煤层)纵、横向非均质性强,赋存条件的复杂性和开发难度显著高于美国、加拿大等国外优质煤层气储层。主观方面,一是煤层气地质基础理论研究尚未有大的突破,不同时代、不同地区煤层气地质条件差异性研究不足;二是开发理论的顶层设计支撑不足,主体适用技术工艺不明确,开发方案执行率低,导致后期需进行低效井治理、剩余资源提速动用等,造成维护成本高。

中国石油华北油田分公司(以下简称华北油田)以问题为导向、以目标为引领,认真审视勘探开发中出现的问题,认为制约煤层气开发的核心问题主要有四个方面:一是煤层气开发定位不完善;二是没有认识到工程技术的适应性;三是没有认识到储量的可开采性;四是排采过度谨慎但并不科学。认真剖析四个核心问题均源于对煤层气储层原始气水赋存、产出规律认识不清,未形成与煤层气储层特征相匹配的高效开发理论。笔者以煤层气赋存、运移和产出规律为基础,充分考虑制约煤层气高效开发的核心问题,结合煤储层

导流能力在开发过程中动态变化规律,系统阐述煤层气疏导式开发理论及配套开发技术实践效果,以期为我国煤层气产业的高效发展起到积极的推进作用。

1 煤层气水赋存运移产出规律再认识

传统煤层气赋存运移理论认为,煤层气主要以物理吸附方式赋存于煤储层基质孔隙中,在一定地层压力和温度条件下处于吸附动态平衡状态;煤层气地面开发通过抽排煤储层及其上覆和下伏岩层中的地下水,降低煤层流体压力,打破吸附动态平衡,使吸附态煤层气大规模游离化,在压力或浓度梯度下发生运移并产出。然而,沁水盆地高阶煤煤层气大量勘探和开发实践表明,传统的煤层气赋存和运移产出规律并无法适用于所有煤层,笔者综合前期大量基础理论与矿场实践验证,进一步细化阐述了原位条件下煤层气和水的赋存状态及多相流体的运移产出规律。

1.1 煤岩润湿性特征

煤壁面润湿性是影响气水分布和流体运移产出的重要因素^[2-3]。煤岩化学组成极为复杂,既包含亲水性较强的含氧官能团和无机质,又包含大量疏水性较强的有机质。传统观点认为煤岩润湿性取决于官能团与无机质的相对含量。中、低阶煤含氧官能团比例高、有机质比例相对较低,因此大多表现为弱水湿或者水湿特征^[4-5];而高阶煤在热演化过程中含氧官能团几乎消失,有机质发生缩聚反应生成油链,因此通常表现为中性或者疏水特征^[6]。

为进一步明确沁水盆地高阶煤润湿性特征,笔者采用分子模拟^[7]和悬滴实验^[8]开展了高压条件下的煤-甲烷-水三相接触角分析。分子模拟采用的煤分子结构单元核心是缩合芳香环,主要构成元素为碳(C)、氢(H)、氧(O),同时含有少量氮(N)、硫(S)。结合沁水盆地郑庄区块煤样元素分析结果,构建了符合实际高阶煤煤分子模型,分子式为 $\text{C}_{135}\text{H}_{95}\text{NO}_9\text{S}$ 。模拟结果表明(图 1),对于沁水盆地高阶煤而言,其壁面整体呈现

出疏水特性,且疏水性随着体系压力增大而增大。与分子模拟相似,悬滴法高压接触角实验测试结果也表

明,沁水盆地高阶煤的水相接触角随着气水体系压力增大而增大,但润湿性并非一定疏水。

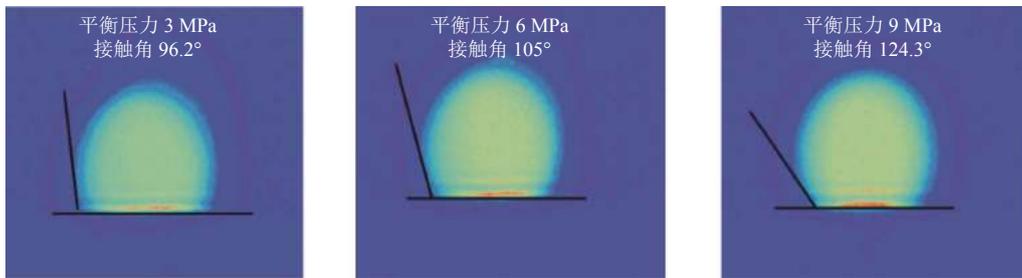


图 1 基于分子动力学的高阶煤-甲烷-水接触角模拟结果

Fig.1 High-rank coal-methane-water contact angle and simulation results based on molecular dynamics

以山西寺河煤矿 3 号煤为例(图 2),当气水体系平衡压力较小时,煤样呈现出亲水性,随着体系压力增大,水相接触角逐渐增大,当体系压力大于 7 MPa 时,水相接触角大于 90°,即煤样润湿性由亲水转变为疏水。分析认为,分子模拟和悬滴实验结果差异原因主要在于实验煤样孔隙和裂隙充填有高岭石等强亲水无机矿物,导致煤样在低压条件下呈现出亲水性。尽管分子模拟和实验测试结果存在一定的差异,但二者结果均表明沁水盆地高阶煤的润湿性受压力影响显著,因此,受润湿性影响,不同原始地层压力条件下的煤层气水赋存和运移产出特征必然存在一定差异。

与物理模拟实验相结合的手段,进一步探究不同煤层地质条件下煤层气和水的赋存状态和规律。

1.2.1 煤层中气水空间分布特征

如前文所述,煤储层的化学组成、孔隙结构和润湿性特征极为复杂,如何阐明原位条件下煤层中的气水空间分布特征一直是学术界和工业界的难题。鉴于此,提出了基于核磁共振与示踪剂相结合的实验手段,以阐明水相与气相在不同类型孔隙中的空间分布特征。

核磁共振技术(NMR)在煤储层的物性测试中具有两个独特优势,一是核磁共振技术具有快速、无损等特点,二是煤储层孔隙结构在核磁共振 T2 图谱上表现特征不同,且核磁共振测试得到的 T2 值与孔隙半径具有正比关系,因此可以通过饱和不同流体(气、水)条件下的 T2 图谱反映不同孔径中气水的分布^[9]。基于 NMR 技术,分别得到饱和水、饱和气煤样的核磁共振弛豫时间 T2 图谱(图 3)。

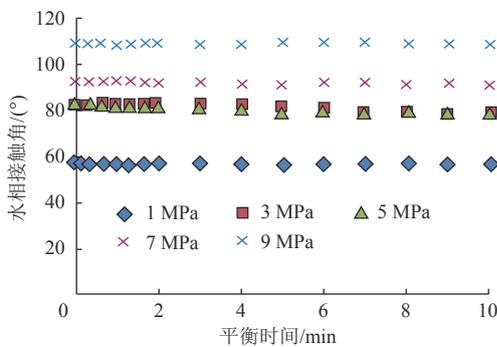


图 2 沁水盆地寺河矿 3 号煤-甲烷-水接触角悬滴法测试结果

Fig.2 Test results of coal-methane-water contact angle suspension drop method of No.3 coal in Sihe Mine, Qinshui Basin

1.2 煤层气水赋存特征

沁水盆地高阶煤大量生气期为印支期的深成热演化期及燕山期的岩浆侵入期。由于燕山期大量生气和构造演化叠加作用,导致地层抬升,地层压力降低,煤层中呈现出水驱气的逸散模式。其后,喜马拉雅期的构造运动及活跃的水动力场条件导致煤储层发生水洗作用,煤层气的逸散模式主要为地层水的侵入携带模式。受复杂的构造运动、煤岩多尺度孔隙结构及孔隙壁面理化性质的共同影响,煤储层中气水的赋存状态必然呈现出多样性。鉴于此,综合采用分子尺度模拟

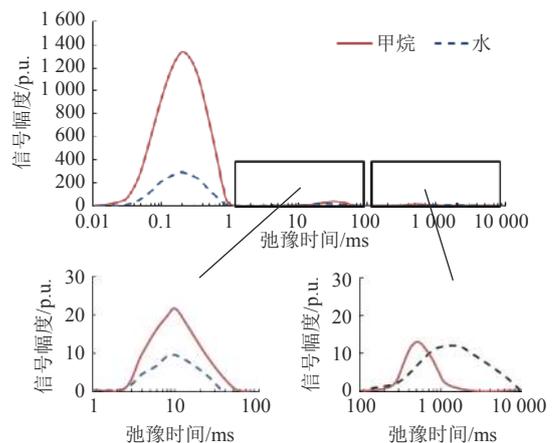
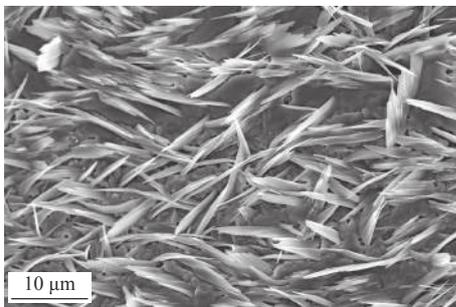


图 3 寺河矿煤样饱和和气水核磁共振 T2 图谱
Fig.3 Saturated gas-water NMR T2 atlas of coal samples in Sihe Mine

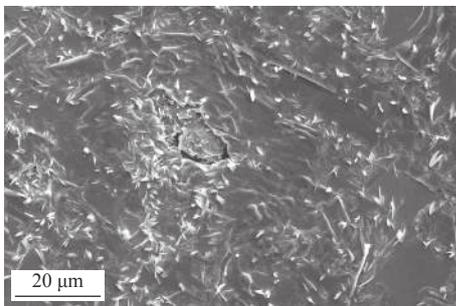
由图 3 可以看出,测试样品 T2 谱为三峰结构,谱峰由左到右分别分布在 0.01~1 ms、10~100 ms 及 100~10 000 ms 三个区间。根据已有研究^[10-11],三峰结构所处的弛豫时间区间换算为孔径分布后分别对应在

1~100 nm、100 nm~10 μm 和 10 μm 以上 3 个孔径区间。根据测试样品 T2 图谱的信号幅度形态可以看出, 甲烷主要富集于 1~100 nm 的孔隙中, 少量赋存于 100 nm~10 μm 孔裂隙中, 10 μm 以上的裂隙中赋存量极少。水相在 1 nm~10 μm 孔裂隙中的赋存量明显低于甲烷, 但在 10 μm 以上的孔隙中赋存量明显高于甲烷。

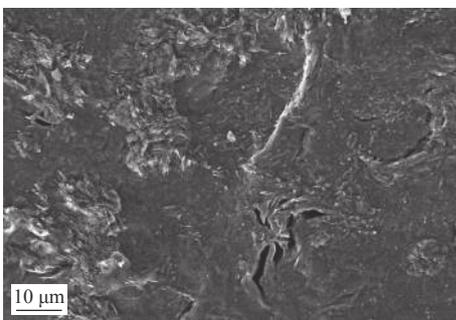
为进一步探究水在不同孔隙中的分布状况, 提出了基于示踪剂法的水相分布实验方法。该方法的主要原理是利用碳酸钠在水中的溶解度随温度降低而降低的特性, 将高温、高压过饱和碳酸钠溶液注入煤层孔隙中, 在体系温度逐渐降低的过程中, 碳酸钠晶体会析出并滞留在孔隙内部, 通过 SEM 扫描图像可直接观测到碳酸钠晶体在不同类型、不同尺度孔隙中的分布状况(图 4)。



(a) 无机矿物孔隙



(b) 无机矿物充填的有机质孔隙



(c) 有机质孔隙

图 4 饱和碳酸钠溶液后煤样 SEM 扫描图像

Fig.4 SEM images of coal samples saturated with sodium carbonate solution

沁水盆地寺河矿 3 号煤样的实验结果表明, 碳酸钠晶体大量富集于由高岭石等亲水性极强的无机矿物

组成的孔隙中, 受扫描电镜观测精度的限制, 目前可以观测到的最小无机矿物孔隙约为 240 nm。笔者推断, 由于无机矿物的强亲水性, 孔隙尺寸越小, 毛管力越大, 水相渗吸作用越强, 因此水相实际可以进入的无机质孔隙应远小于 SEM 扫描图像观测的范围, 这也与核磁共振实验(图 3)显示的部分水相可赋存于 1~100 nm 孔隙中的结果相吻合。对于疏水性较强的有机质孔隙, 目前实验可观测到的水相能够进入的孔隙直径下限约为 720 nm, 但受实验时注入压力、样品选择及观测精度的限制, 该下限值有待进一步检验。由此可见, 基质孔隙中气水分布受孔隙壁面润湿性和孔隙尺度共同影响, 气相主要富集于有机质疏水孔隙中, 水相主要赋存于无机矿物组成的孔隙或充填有无机矿物的有机质孔隙中。

1.2.2 吸附气量与自由气量定量分析

为进一步量化分析煤岩微孔中气体赋存特征, 笔者构建了不同孔隙半径的煤岩壁面狭缝模型(图 5a), 煤岩壁面分子构型与前述润湿性特征研究采用的构型相同, 采用分子动力学模拟方法^[12-13]开展了不同压力下甲烷在煤孔隙中赋存特征分析。分子模拟结果表明, 甲烷在干燥煤样中的赋存状态包括自由态、吸附态和吸收态 3 种(图 5b), 其中, 自由态甲烷主要富集于距孔隙壁面约 0.8 nm 以外的孔隙空间中, 吸附态甲烷富集于煤岩壁面 0.8 nm 以内的作用范围内, 吸收态是由于煤分子的强作用力被“吸收”至煤分子间隙中的不可动甲烷。根据不同赋存状态的储集空间位置, 分类统计各种状态的甲烷分子数量, 统计结果表明吸附态和自由态是主要的赋存状态, 约占甲烷分子总量的 98.5% 以上, 而吸收态占总含气量的比例小于 1.5%。此外, 模拟结果还表明, 与壁面光滑的碳纳米管中的多层吸附不同, 甲烷在煤岩分子孔隙壁面的吸附呈现出单层吸附特征, 其主要原因是煤岩壁面粗糙度较高, 导致壁面分子对甲烷的作用距离有限。

进一步模拟不同体系压力、不同孔径条件下的吸附平衡过程, 结果表明孔径越大, 自由态甲烷占含气量的比例越高; 对于小于 5 nm 的孔隙, 游离气占比受压力影响显著, 游离气占比低于 50%; 对于大于 5 nm 的孔隙, 游离气占比受压力影响相对较小, 但自由气占总含气量的比例超过 60%(图 6)。

1.3 煤层气水运移产出规律

传统煤层气排采理论重点强调煤层气开发产出所经历的“解吸-扩散-渗流”过程^[14], 但针对气水两相运移产出的两个关键点尚不清楚, 一是对于存在气水界面的微孔中的受限自由气开始启动运移产出^[15]的界限不清, 二是不同流速条件下复杂裂隙网络中气水

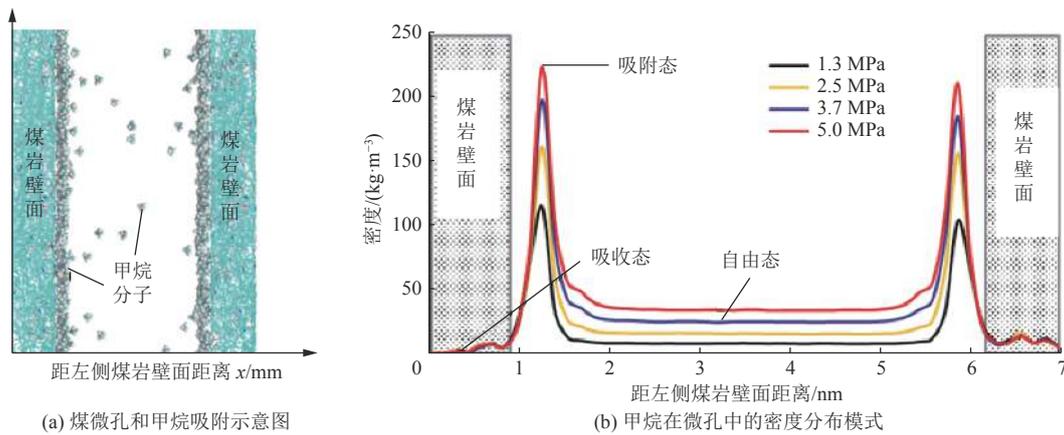


图 5 甲烷分子在煤基质上的赋存状态分子动力学模拟
 Fig.5 Molecular dynamics simulation of methane molecule occurrence on coal matrix

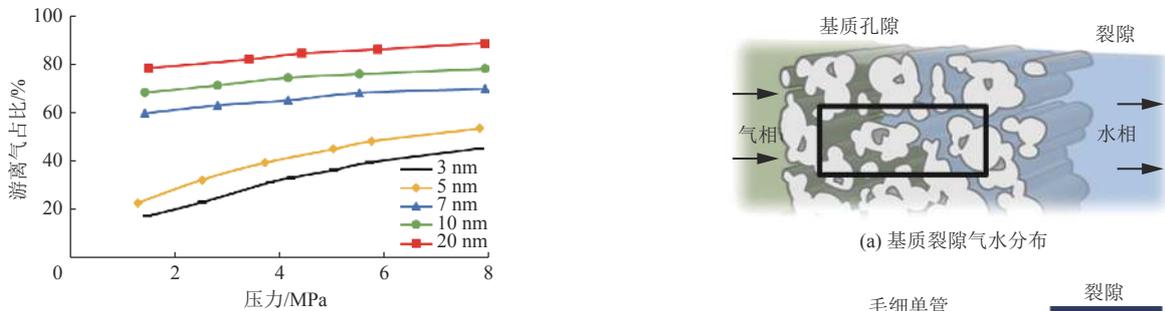


图 6 不同压力、不同孔径条件下游离气占比

Fig.6 Free gas fraction under different pressures and pore sizes

两相流动时“水锁”效应^[16]不清。为此,笔者采用基于流体体积函数(Volume of Fluid, VOF)的微观流动模拟方法^[17]开展了煤岩孔隙中气水两相流动模拟,以阐明微孔中气相启动和复杂裂隙网络中气水相互作用规律。

1.3.1 微孔中气相启动规律

考虑气水共存的基质单个微孔隙,将其等效为一端气相被另一端水相封存单根毛细管(图 7),通过逐步降低水相端压力的方式模拟实际排采过程中储层降压过程,观测气液相界面形态并计算相界面移动速度,当相界面破裂消失、或移动速度大于零时认为气相可以运移产出。

由图 8 可以看出,当微管内气水两相间压差小于毛细管力时,在毛细管力作用下,气相被“锁”在孔喉内无

法启动,气水界面稳定(图 8a);当气水两相压差逐渐增加至略高于毛管力后,气水界面在外加压差作用下逐渐变形并缓慢移动,当运移微小距离后即停止运移,气水界面在新的位置处重新达到平衡(图 8b);当两端压差显著高于毛管力后,气水界面启动运移并逐渐坍塌,水相附着在壁面形成水膜或液滴,气相成为连续相自微管中产出(图 8c)。由此可见,对于受毛管力封锁的气相而言,其启动运移产出所需要最小压差需显著高于毛管力。

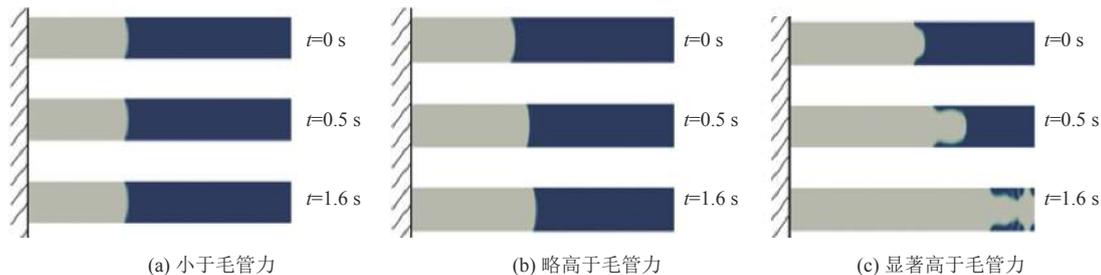


图 8 不同压差条件下气水界面移动过程模拟

Fig.8 Simulation of gas-water interface movement process under different pressures

考虑不同孔径和接触角组合条件,进一步开展了大量 VOF 数值模拟(图 9)。

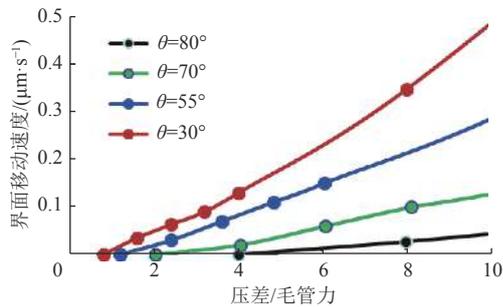


图 9 不同接触角条件下界面移动速度模拟结果
Fig.9 Simulation results of interface movement velocity at different contact angles

通过分析界面移动速度,确定了气相启动所需的最小压差(定义为临界压差)。通过多元非线性回归,构建了临界压差(Δp)与孔径(r)和界面张力(σ)的经验关系式:

$$\Delta p = 1.388\sigma/r^{0.995} \quad (1)$$

图 10 给出了气水界面张力为 72×10^{-3} N/m 条件下不同孔隙半径对应的临界压差。由图中可以看出,孔隙半径越小,临界压差越大。孔隙半径为 100、50 和 20 nm 对应的临界压差分别为 1.4、2.6 和 6.8 MPa。

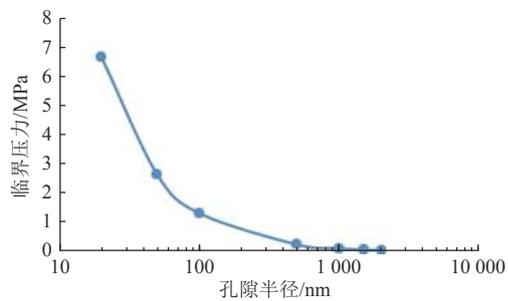


图 10 临界压差与孔隙半径关系
Fig.10 Relationship between critical pressure difference and pore radius

郑庄区块矿场统计数据表明,煤层气井排采见气压力明显低于临界解吸压力。例如,区块北部处于沁水盆地向斜核部,评价井平均临界解吸压力约为 12.6 MPa,而平均排采见气压力为 4.5 MPa,见气压力低于解吸压力约 8.1 MPa;区块西部,构造抬升端平均临界解吸压力约为 5.7 MPa,而平均排采见气压力仅为 2.5 MPa,见气压力低于解吸压力约 3.2 MPa。由此可见,郑庄区块实际排采见气压力低于临界解吸压力,说明气体解吸后需要进一步克服一定的压差方可启动运移产出,且区块向斜核部受应力挤压作用孔径更小,所需的启动压差更大。以上矿场数据与本文计算的临界压差数据较为吻合,验证了所提出的气相启动运移模式及临界压差经验公式的准确性。

1.3.2 复杂裂隙网络中水锁规律

当基质中的甲烷启动运移至裂隙网络中后,将进一步与水形成气液两相流。煤层气井产气过程中造成气相渗流能力持续降低的主要原因为两相流动过程中的水锁效应^[16],因此,通过探究裂隙网络中的水锁规律,制定合理的排采工作制度来降低水锁效应、提高气相产出效率。考虑不同润湿性特征和不同流动速度开展气水两相流动模拟,结果表明:

(1) 水驱气过程,疏水性裂隙(图 11a)水锁效应显著高于亲水性裂隙(图 11b),其主要原因在于:亲水条件下毛管力对于水相流动是驱动力,水相可在毛管力作用下发生渗吸效应进入更小孔裂隙并将其中的气体驱替出来;而疏水条件下,毛管力是水相流动的阻力,水越易沿阻力较小的大裂隙窜流,导致较小尺度裂隙中的气体难以运移产出,加剧水锁效应。而对气驱水过程,亲水性裂隙水锁效应更严重(图 12)。因此,排采过程应考虑水锁效应,尽可能降低裂隙含水饱和度,防止反向渗吸,影响采收率。

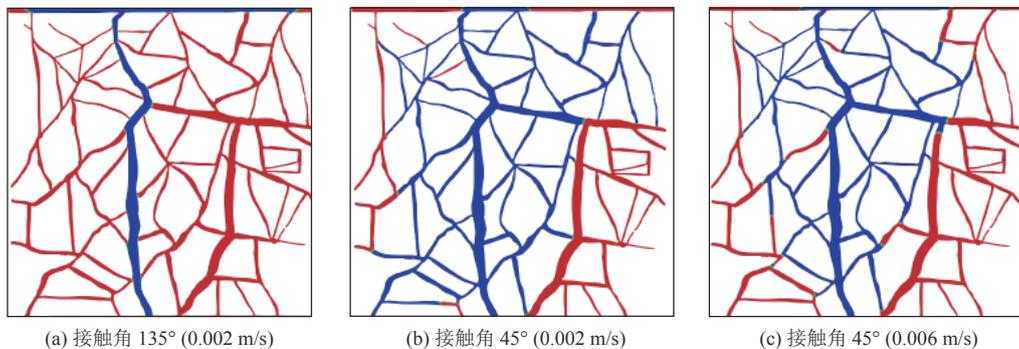


图 11 不同润湿性和流速条件下水驱气过程对比
Fig.11 Comparison of water-displacing-gas process at different wettability and flow rate

(2) 流动速度越大,水锁程度越大(图 11b、图 11c),其主要原因在于流速越大,驱替压差远大于毛管力,水

相可以更快地沿着大裂隙形成主流通道,从而锁住非主流通道内的更多气体。

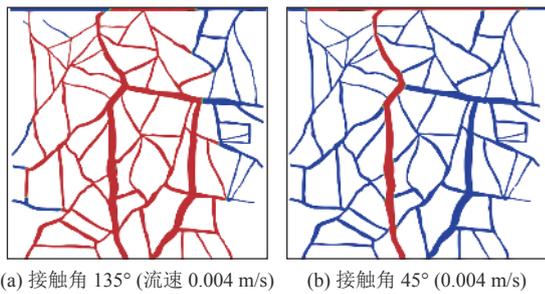


图 12 不同润湿性条件下气驱水过程对比
Fig.12 Comparison of gas-drive-water process at different wettability

华北油田曾在 2006 年采取了快速降低井底压力加速煤层气解吸的“敞开式”放气排采方法,结果导致单井产气量在快速达到高峰后出现大幅度递减。其原因极有可能是生产压差和流速过大导致的强烈水锁大幅降低了气相流动能力。由此可见,在实际煤层气井排采过程中,需根据具体煤层的水锁特征制定差异化的排采工作制度。对于亲水能力强、水锁程度相对较弱的储层,可适当放大生产压差,采取“快排”策略;而针对弱亲水或疏水性煤层,则应考虑适当控制生产压差(或两相流速),从而降低水锁效应对气体流动能力的影响。

2 疏导式高效开发理论

2.1 理论内涵

与常规砂岩储层相比,煤储层的孔隙-裂隙双重孔隙系统结构更为复杂,且煤层气的赋存和运移受吸附、扩散、渗流等多机理共同控制。大量煤层气开发工程实践总结显示,制约煤层气解吸产出的因素众多,传统

的“排水-降压-解吸-产出”理论尚不足以支撑煤层气大规模高效开发。鉴于此,充分考虑煤层和气水赋存流动的固有特征,提出了疏导式开发理论,从“疏”和“导”两个方面去诠释煤层气开发所遵循的基本规律,进而为煤层气地面开发提供科学指导。

“疏”主要是指充分利用煤储层中原始孔-裂隙系统,并以此为基础尽可能疏通煤储层内流体运移通道,改善流体运移条件,扩大压降波及范围,使更多煤层气资源与煤层气井建立有效联系。而“导”主要是指充分利用煤储层中有限且不高的储层流体压力,科学控制不同生产阶段煤储层压力释放,减少流体运移能量损失,主动引导煤层微孔中富集的自由态和吸附态煤层气以最高效率方式产出,进而实现煤层气井产量和煤层气开发效率的双提升。

2.2 基本原则

2.2.1 疏通流动通道

按受压裂改造影响程度不同,可将流体运移通道网络划分为 3 类,即压裂裂隙通道网络(压裂裂缝)、受压裂改造影响的天然裂隙通道网络(外生裂隙)、未受压裂改造影响天然裂隙通道网络(内生裂隙)(图 13)。不同类别裂隙彼此连接,相互贯通,构建形成煤储层中流体运移通道网络。其各自空间尺度和发育特征,影响煤储层内流体的运移,对改造工程及生产作业要求都不尽相同。因此,在煤层气开发过程中需科学协调不同裂隙通道网络对煤层气开发影响的差异,解决各类裂隙对改造工程及生产作业要求不一致的矛盾,以提高煤层气井单井产量、实现煤层气高效开发。

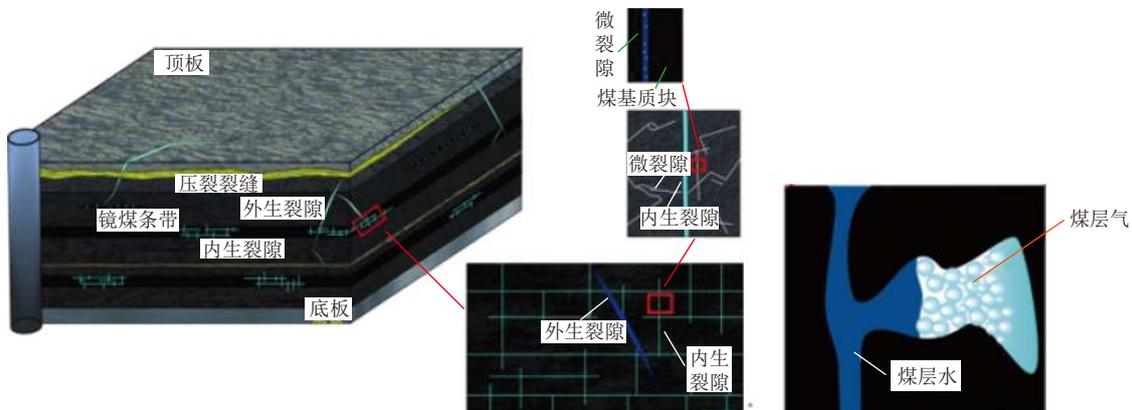


图 13 煤储层中三级裂隙系统网络
Fig.13 Tertiary fracture system network in coal reservoir

1) 压裂裂缝通道

由于压裂裂缝内铺设支撑剂,其导流能力和稳定性都远强于其他两类裂隙网络,流体在其内部主要受压力梯度作用发生渗流运移。因此,人工压裂裂缝

网络起到串联煤储层中离散分布的各类天然裂隙、缩短流体运移路径、降低流体运移沿途能量损耗的重要作用。通常情况下,压裂改造作业规模越大,压裂裂缝通道网络越发育,其疏通效果越好。

2) 受压裂影响的天然裂隙通道

因受压裂改造影响的天然裂隙通道延展长度和开度较原始状态有明显增加。受压裂改造影响天然裂隙通道网络可扩大压降波及范围,使更多煤层气资源与煤层气井建立有效联系。但因其内部缺少支撑,此类裂隙极易受到内外部条件变化影响,发生错动和闭合,进而丧失导流能力。但压裂改造用液的侵入,会使受压裂改造影响天然裂隙通道网络内的流体压力显著抬升,增大排水降压作业强度。在受压裂改造影响天然裂隙通道网络外围,部分区域压裂液侵入程度低甚至不发生侵入,在压裂改造过程中这一部分天然裂隙整体处于受压状态,导流能力不仅不会得到改善,反而可能形成“屏障”阻碍吸附煤层气与煤层气井建立有效联系。因此,针对此类裂隙,需综合评判煤层润湿性及原位气水赋存特征,在保障有效沟通次级裂隙的前提下,尽可能降低“屏障”阻碍作用对流体疏导出出的影响。

3) 天然裂隙通道

未受压裂改造影响天然裂隙通道网络主要由宏观天然裂隙和显微天然裂隙组成。它们直接或者间接与煤层气吸附赋存空间相连,是煤层气解吸后运移进入流体运移通道网络的第一环。天然裂隙通道延展长度、开度及相互连通性远不如受压裂改造影响天然裂隙。同时,因其内部缺少支撑,通道稳定性差,对内外条件变化更敏感。此外,内部天然存在的细微煤粉颗粒,受流体流速变化影响会发生运移或者沉淀,既可以疏通也能够堵塞通道。在排水-降压-产气过程中,储层流压的下降,地应力的释放和流体的流动对煤储层中未受压裂改造影响天然裂隙通道网络导流能力具有正、负两种影响。针对此类裂隙,需主动引导流体流动产出,合理控制储层流压和地应力变化,改善流体运移条件,使煤储层朝有利于煤层气开发方向发展。

2.2.2 引导流体运移产出

除煤储层流体运移通道外,通道内流体组成、分布以及运移方式同样是影响煤层气产出的关键因素。如文 1.2 节所述,原位状态下煤储层中同时赋存有吸附态和游离态的煤层气,但随着煤储层含水饱和度的增大,一是使得煤储层内的结合水增加,导致流体流动变困难;二是受外力和毛细管力作用,液相侵入程度会进一步加深;三是在液相排出之后,早先被液相所占据吸附位,会重新吸附甲烷,延缓甲烷运移和产出。因此,在煤层气开发过程中,外来液相的进入会使煤储层内部高概率出现大面积“水锁”^[18-19],导致煤储层中流体压力无法充分下降,最终在煤层气资源与煤层气井之间难以建立有效联系。因此,限制外来液相进入煤储

层孔隙裂隙,对其内部流体运移条件的改善和压降波及范围的扩大有积极意义。

煤基质中煤层气在压差或浓度差作用下,会由高压/高浓度区向低压/低浓度区发生运移。笔者前期研究表明,煤层气在煤基质内发生运移的方式主要有3种,即滑脱运移,表面扩散及达西渗流^[20-21]。煤层气在煤基质中发生运移时,3种运移方式都会同时发生,但实际以哪一种运移方式为主,则受驱动压力控制(图 14)。在煤层气产出时,驱动运移压力越高,运移过程中达西渗流方式的渗透率贡献占比越高,越有利于煤层气高效开发。此外,根据文 1.3 节可知,高压差条件下复杂裂隙网络中更易发生“水锁”,导致非主流通道内大量气体无法有效产出。因此,实际排采控制需以煤储层实际流体压力为基础,科学控制不同生产阶段煤储层压力,以确保煤层气在不同生产阶段都能够以最高效率方式运移。

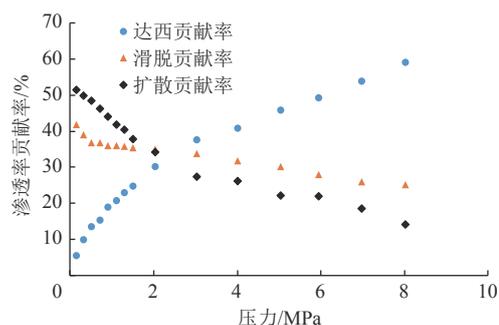


图 14 典型煤样中煤层气运移与驱动压力关系

Fig. 14 Relationship between coalbed methane migration and driving pressure in typical coal samples

3 疏导式高效开发理论应用

以疏导式高效开发理论为基础,提出了疏导式储层压裂改造技术和疏导式量化排采控制技术,并应用于沁水盆地高阶煤煤层气开发。

(1) 疏导式储层压裂改造技术通过水平井眼串接储层裂缝,以最大限度沟通各级割理裂隙,建立多级联动缝网,引导高压液体和煤粉快速排出,有效提高单井产气量。该技术包括优质储层段集中射孔压裂技术、低前置液-快速返排压裂技术等储层改造工艺。其中,优质层段集中射孔压裂,具有变排量、组合加砂、造长缝、提高导流能力等特点,克服了传统改造技术的笼统性,有效提高了压裂裂缝长度,从而实现多级裂缝网络的有效沟通;低前置液-快速返排压裂技术将前置液由 40% 降低为 20%,同时将压裂后的闷井改为快速返排,以减少外来液体进入、快速排出高压液体和煤粉为目的,有效疏通了渗流通道。疏导式储层压裂改造

技术累计试验及推广可控水平井分段压裂改造 91 口井,加砂设计符合率 95% 以上,压裂实现大规模(千方液万方砂)多段(15 段以上)体积改造,压裂施工费用大幅降低(较 2016 年价格降低 57%)。该技术在不同区块的应用均取得较高的单井日产气量,其中,樊庄和安泽区块水平井单井日产气达到 7 000~8 000 m³,郑庄和长治区块水平井单井日产气量达 5 000~6 000 m³。

(2) 以储层压力管控为核心,逐步精简排采方案,利用气体弹性能疏通三级缝网渗流通道,针对不同气水两相渗流状况形成了 2 种疏导式排采管控模式。其中,针对气相渗流能力强、水相渗流能力弱、气锁严重的储层,采用见套压前变速排采、见气后降低冲程冲次以控制套压小幅多频提产的控制模式,其主要目标在于尽可能诱导水相产出以实现储层有效降压;针对水相渗流能力强、气锁效应弱的储层,采用见套压前快速排采、见气后提高冲程冲次以控制液面的排采管控模式,以实现水相快速产出、储层快速降压的目的。针对马必东和郑庄区块 2021 年 3 月以来新投产井,采用疏导式排采管控模式后整体排采管控效率明显提高,相较早期非疏导式管控方法,排水期单位压降排水效率提高 92%,单位压降产气效率提高 43%,平均达产周期缩短为 140 d,达产流压提高 0.15 MPa,稳产期日流压损耗由 7.5 kPa/d 下降至 5.4 kPa/d,稳产期明显延长。其中,马必东新区水平井应用该管控方法后单井产量达到 10 200 m³/d,提升近 1 倍,达产时间缩短 20%;郑庄实验区直井应用该管控方法后平均产量超过 2 500 m³/d,产量提升近 1 倍,达产时间缩短 1/3 以上(图 15)。

4 结论

a. 我国高阶煤煤层气地质基础理论研究尚未有大的突破,开发理论顶层设计支撑不足,主体适用技术工艺不明确,导致煤层气高效动用效果不佳。

b. 以煤层气赋存、运移和产出规律为基础,充分考虑制约煤层气高效开发的核心问题,提出高阶煤煤层气疏导式高效开发理论,即通过尽可能地疏通煤储层内流体运移通道以改善流体运移条件,并充分利用煤储层中有限且不高的储层流体压力引导流体以最高效率方式产出。基于疏导式开发理论,针对沁水盆地南部高阶煤煤层气开发了配套的压裂改造和排采技术,实现煤层气井产量和煤层气开发效率的双提升。

c. 尽管疏导式高效开发理论技术效果已初见成效,但尚需进一步加大研究攻关力度,以期构建形成系统的理论体系和完善的配套技术,为我国高阶煤煤层气高效开发提供理论和技术支撑。

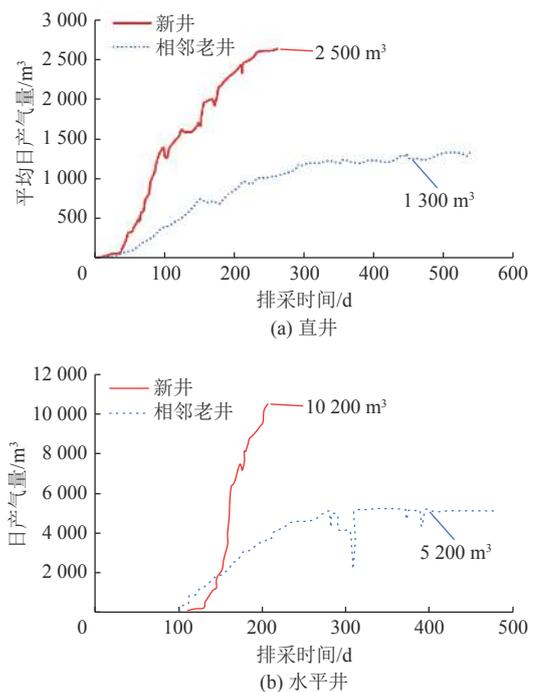


图 15 马必东和郑庄区块疏导式排采技术应用效果
Fig.15 Application effect of diversion drainage technology in Mabidong and Zhengzhuang Blocks

参考文献(References)

- [1] 朱庆忠, 杨延辉, 左银卿, 等. 对于高煤阶煤层气资源科学开发的思考[J]. 天然气工业, 2020, 40(1): 55-60.
ZHU Qingzhong, YANG Yanhui, ZUO Yinqing, et al. On the scientific exploitation of high-rank CBM resources[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(1): 55-60.
- [2] 陈跃, 马卓远, 马东民, 等. 不同宏观煤岩组分润湿性差异及对甲烷吸附解吸的影响[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 47-55.
CHEN Yue, MA Zhuoyuan, MA Dongmin, et al. Effects of wettability differences of different macroscopic composition of coal on methane adsorption and desorption[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(11): 47-55.
- [3] 李沛, 马东民, 张辉, 等. 高、低阶煤润湿性对甲烷吸附/解吸的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5): 80-85.
LI Pei, MA Dongmin, ZHANG Hui, et al. Influence of high and low rank coal wettability and methane adsorption/desorption characteristics[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(5): 80-85.
- [4] 村田逞途. 煤的润湿性研究及其应用[M]. 朱春笙, 龚祯祥译. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [5] 孙晓晓, 姚艳斌, 陈基瑜, 等. 基于低场核磁共振的煤润湿性分析[J]. 现代地质, 2015, 29(1): 190-197.
SUN Xiaoxiao, YAO Yanbin, CHEN Jiyu, et al. Determination of coal wettability by using low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Geoscience*, 2015, 29(1): 190-197.
- [6] 董平, 单忠健, 李哲. 超细煤粉表面润湿性的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 346-349.
DONG Ping, SHAN Zhongjian, LI Zhe. Study on the surface wet characteristic of ultrafine coal powder[J]. *Journal of China Coal*

- Society*, 2004, 29(3): 346–349.
- [7] 王诗萌. 润湿性岩石表面气体吸附行为的分子模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
WANG Shimeng. Molecular dynamics investigation on the adsorption behaviors of gases on wetting rock surface[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.
- [8] 刘谦, 郭玉森, 赖永明, 等. 煤的吸附特性与表面能关系的实验研究[J]. 煤矿安全, 2015, 46(9): 20–22.
LIU Qian, GUO Yusen, LAI Yongming, et al. Experimental research on relationship between adsorption characteristics and surface energy of coal[J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(9): 20–22.
- [9] 谢松彬, 姚艳斌, 陈基瑜, 等. 煤储层微小孔隙结构的低场核磁共振研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(增刊1): 170–176.
XIE Songbin, YAO Yanbin, CHEN Jiyu, et al. Research of micro-pore structure in coal reservoir using low-field NMR[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(Sup.1): 170–176.
- [10] YAO Yanbin, LIU Dameng, CHE Yao, et al. Petrophysical characterization of coals by low-field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. *Fuel*, 2010, 89(7): 1371–1380.
- [11] ZHENG Sijian, YAO Yanbin, ELSWORTH D, et al. A novel pore size classification method of coals: Investigation based on NMR relaxation[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 81: 103466.
- [12] 李树刚, 白杨, 林海飞, 等. CH_4 , CO_2 和 N_2 多组分气体在煤分子中吸附热力学特性的分子模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2476–2483.
LI Shugang, BAI Yang, LIN Haifei, et al. Molecular simulation of adsorption thermodynamics of multicomponent gas in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(9): 2476–2483.
- [13] LONG Hang, LIN Haifei, YAN Min, et al. Molecular simulation of the competitive adsorption characteristics of CH_4 , CO_2 , N_2 , and multicomponent gases in coal[J]. *Powder Technology*, 2021, 385: 348–356.
- [14] 刘冰, 张松航, 唐书恒, 等. 无越流补给含水层对煤层气排采影响的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 43–53.
LIU Bing, ZHANG Songhang, TANG Shuheng, et al. Numerical simulation of the influence of no-flow recharge aquifer on CBM drainage[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 43–53.
- [15] 孟艳军, 汤达祯, 许浩, 等. 煤层气解吸阶段划分方法及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 612–617.
MENG Yanjun, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Division of coal-bed methane desorption stages and its significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 612–617.
- [16] 胡友林, 乌效鸣. 煤层气储层水锁损害机理及防水锁剂的研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1107–1111.
HU Youlin, WU Xiaoming. Research on coalbed methane reservoir water blocking damage mechanism and anti-water blocking[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1107–1111.
- [17] SHANG Xiaopeng, ZHANG Xuan, NGUYEN T, et al. Direct numerical simulation of evaporating droplets based on a sharp-interface algebraic VOF approach[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 184: 122282.
- [18] 宋帅, 周劲辉, 范德元, 等. 高阶煤压裂液伤害机理研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(5): 161–163.
SONG Shuai, ZHOU Jinhui, FAN Deyuan, et al. Study on damage mechanism of fracturing fluid in high rank coal[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(5): 161–163.
- [19] 白建平, 武杰. 压裂液对煤储层伤害实验及应用: 以沁水盆地西山区块为例[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 77–80.
BAI Jianping, WU Jie. Experiment and application of fracturing fluid damage to coal reservoir: A case of Xishan block in Qinshui Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016, 44(4): 77–80.
- [20] MENG Ya, LI Zhiping, LAI Fengpeng. Influence of effective stress on gas slippage effect of different rank coals[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119207.
- [21] YANG Yun, LIU Shimin. Estimation and modeling of pressure-dependent gas diffusion coefficient for coal: A fractal theory-based approach[J]. *Fuel*, 2019, 253: 588–606.

(责任编辑 范章群)