

# 煤层注水渗流与润湿机制研究进展

王刚<sup>1,2</sup>, 陈雪畅<sup>2</sup>, 程卫民<sup>2</sup>, 刘震<sup>2</sup>, 孙路路<sup>2</sup>, 徐浩<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**近年来,随着煤炭开采不断向深部发展,矿井所面临的冲击地压、煤与瓦斯突出等灾害日益严重。煤层注水在治理煤与瓦斯突出、防冲泄压等方面具有显著优势,成为广泛应用的矿井防灾手段。为系统总结煤层注水渗流与润湿机制相关研究,本文梳理了国内外煤层注水发展脉络,从孔裂隙结构、渗流过程、渗流机理及润湿机制等方面综合分析相关成果。在孔裂隙结构研究方面,借助先进的微观测技术已成功建立起了多种孔裂隙结构的定量表征模型,并准确描述其几何参数特征,有助于针对不同煤层特性制定更具针对性的注水方案。在渗流过程研究方面,构建了考虑多因素的渗流理论模型,并通过先进测量技术获取渗流数据,揭示注水参数影响规律,同时,数值模拟技术实现了渗流场的可视化。煤体润湿机制研究方面,揭示了润湿微观原理,明确了不同煤质润湿特性差异,并筛选有效润湿剂提高注水效果。现阶段的研究还存在局限性,如孔裂隙结构研究与宏观工程结合欠缺,渗流数值模型需进一步考虑流体对煤体结构的影响进行优化等。本研究为优化煤层注水效果提供了理论基础,对保障煤矿安全、推动灾害治理技术发展及能源安全稳定有借鉴意义。

**关键词:**深部开采;煤层注水;孔裂隙结构;注水渗流;润湿机制

**中图分类号:**TD712

**文献标志码:**A

## Research progress on seepage and wetting mechanism of water injection

WANG Gang<sup>1,2</sup>, CHEN Xuechang<sup>2</sup>, CHENG Weimin<sup>2</sup>, LIU Zhen<sup>2</sup>, SUN Lulu<sup>2</sup>, XU Hao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** With the continuous development of coal mining towards deeper areas, mines have been facing increasingly severe disasters such as rockburst and coal and gas outbursts in recent years. Coal seam water injection, with significant advantages in coal and gas outburst control, anti-impact and unloading pressure, has become a widely-used disaster prevention method in mines. To systematically summarize the research on coal seam water injection seepage and wetting mechanism, this paper sorts out the development trend of coal seam water injection at home and abroad, and comprehensively analyzes the relevant achievements from the aspects of pore and fracture structure, seepage and mechanism, and wetting mechanism. In the study of pore and fracture structures, by using advanced microscopic observation techniques, quantitative characterization models for various pore and fracture structures are successively established and their geometric parameter characteristics are accurately described, which helps to develop more targeted water injection plans for different coal seam characteristics. In the study of seepage process, a seepage theoretical model considering multiple factors is constructed, and seepage data is obtained through advanced measurement techniques to reveal the influence of water injection parameters. In addition, numerical

**收稿日期:**2024-07-17

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52174194)

**作者简介:**王刚(1984—),男,山东临沂人,教授,博士生导师,主要从事煤岩微观孔裂隙结构渗流理论及防灾工程研究。

E-mail: gang.wang@sdust.edu.cn

simulation technology achieves the visualization of the seepage field. In the study of coal wetting mechanism, the micro principle of wetting is revealed, the differences in wetting characteristics of different coal qualities are clarified, and effective wetting agents are screened to improve the water injection effect. However, there are still limitations in the current research, such as the lack of integration between pore and fracture structure studies and macroscopic engineering, and the need to further consider the influence of fluids on coal structure in optimizing seepage numerical models. This study provides a theoretical basis for optimizing the effectiveness of coal seam water injection and is of reference significance for ensuring coal mine safety, promoting the development of disaster management technology, and ensuring energy security and stability.

**Key words:** deep mining; coal seam water injection; pore and fracture structure; water injection seepage; wetting mechanism

煤中的孔隙和裂隙构成了流体渗流的空间,其大小、形状、分布以及连通性直接影响煤炭的渗透性以及注水效率<sup>[1]</sup>。孔裂隙结构形态复杂,由微观孔隙、介观孔隙和裂隙等组成,煤体内部孔隙结构及其渗透性成为矿山灾害防治研究领域中的热点。同时,微观孔隙结构中会发生界面润湿行为,不同的润湿性质将影响水在煤体内部的渗透和分布,进而影响注水效果。因此,探明煤体孔裂隙结构特点及其内部的润湿行为对优化煤体注水效果具有重要价值。

本研究系统总结了国内外煤层注水的发展脉络,深入剖析了煤层注水的渗流空间(孔裂隙结构)及其渗流过程,从两相渗流模型构建、试验探测与数值模拟等方面阐释了注水渗流机理,探讨了煤层注水的润湿机制及其影响因素,并指出当前研究在瓦斯吸附解吸特性、煤体自发渗吸探究及流-固耦合作用研究等方面存在的不足,展望了未来研究方向,为进一步探索煤层注水微观机理、推动现场应用提供理论借鉴。

### 1 煤层注水发展历程

煤层注水防治矿井灾害技术的产生与发展具有较长的历史,如图 1 所示。国外煤层注水防灾技术起步较早,德国最早于 1890 年在萨尔煤田进行了煤层注水试验,效果明显。此后煤层注水技术逐渐为世界各国所重视<sup>[2]</sup>。随着科技水平的发展,煤矿机械化程度逐年提高导致工作面粉尘污染加重,严重威胁井下生产安全与作业人员身体健康。20 世纪 40—50 年代,苏联采用煤层动压注水,增加了煤层含水率,大幅度减少了

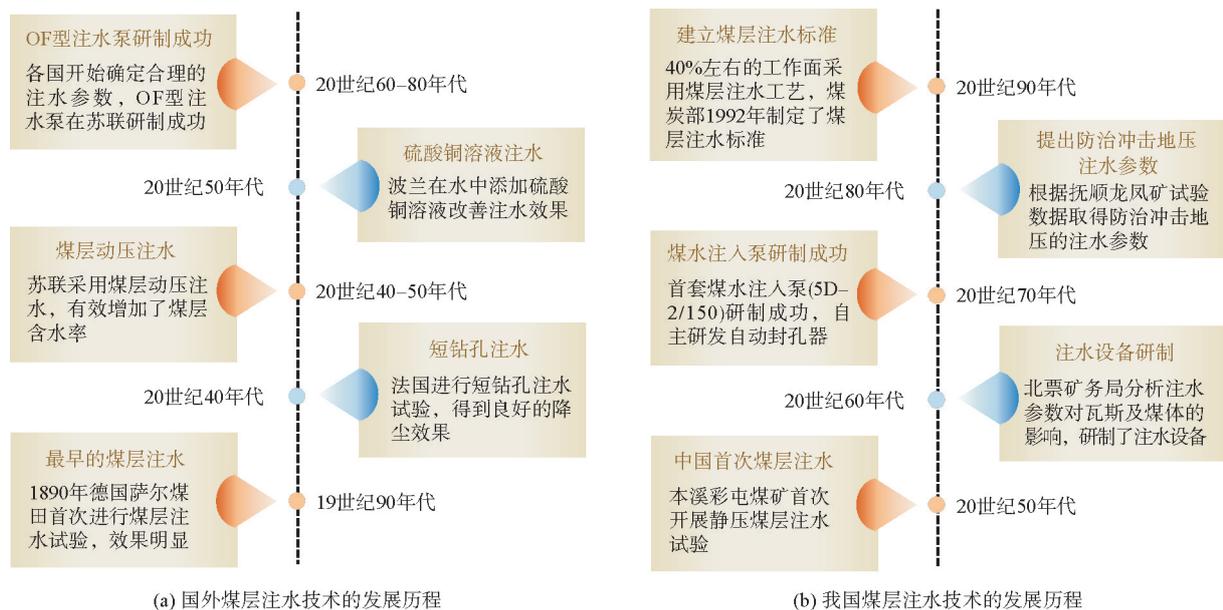


图 1 国内外煤层注水技术的发展历程

Fig. 1 Development history of coal seam water injection technology at home and abroad

工作面粉尘浓度,有效降低了尘肺病发病率<sup>[3]</sup>。20世纪40年代初,法国开展了短钻孔注水试验,取得了良好的降尘效果<sup>[4]</sup>。1943年,德国在鲁尔煤田开展了煤层注水试验,取得了理想的降尘效果,之后5年鲁尔煤田的矿井均采用了煤层注水技术<sup>[5]</sup>。波兰从20世纪50年代开始采用煤层注水技术,同时在水中添加硫酸铜溶液改善注水效果。1960年至1980年间,苏联等国家通过现场试验对煤层注水工艺参数及注水设备开展了研究,取得了较为合理的煤层注水参数。此后,OF型注水泵由乌克兰研制成功,该泵可依据煤层实际条件自动调节注水量以达到最佳煤层注水效果<sup>[6]</sup>。

我国煤层注水技术直到解放后才逐步发展起来。新中国成立后我国开始尝试机械化煤层开采,煤层注水技术试验逐渐开展。20世纪50年代中期,中国首次开展的煤层注水试验是在本溪彩屯煤矿采用静压注水进行的。20世纪60年代中期,北票矿务局等对煤层注水防治煤与瓦斯突出问题进行了探讨,分析了注水参数对瓦斯及煤体的影响,并研制了注水设备。20世纪70年代中期,国内首套煤水注入泵(5D-2/150型)研制成功,并相继开发了5BD型、5BG型等注水泵,同时自主研发了2YY-501型煤层注水自动封孔器,开发了水泥砂浆和合成材料封孔等技术,在注水设备和试验仪器的研发上取得了重大进步。20世纪80年代初期,煤炭工业得到快速发展,原煤炭工业部重视各种技术的引入和开发,在抚顺龙凤矿等矿山进行了井下注水试验,获得了煤层注水防治冲击地压的注水参数,随后又在开滦、大同和晋城煤矿进行了大量的试验研究<sup>[7]</sup>。90年代后,国内约40%的工作面采用了煤层注水工艺<sup>[8]</sup>。原煤炭工业于1992年制定了煤层注水标准,为煤矿井下冲击地压、粉尘和煤与瓦斯突出的防治工作指明了方向。

在注水效果提升方面,众多学者通过添加湿润剂<sup>[9]</sup>、黏尘棒<sup>[10]</sup>、表面活性剂以及对水进行磁化处理<sup>[11]</sup>等多种手段开展研究,为改善煤层对水的吸收能力提供了多种途径。在注水工艺与参数优化上,研制了控制系统<sup>[12]</sup>,提出混合式注水技术<sup>[13]</sup>、高压脉动水锤技术<sup>[14]</sup>、分段式封孔注水技术<sup>[15]</sup>等,实现了注水参数精准控制,解决了低渗煤层、难注水煤体及综采工作面煤与瓦斯突出等问题,同时对不同注水参数及其之间的关系进行研究,为工艺选择提供理论依据。针对松软、低渗透的特殊煤层有了有效的注水方式<sup>[16]</sup>,针对深井复合灾害提出一体化防治技术,还研制了注水监测系统,对水力化技术防治矿井灾害现状进行总结,并指明未来研究方向。

矿井煤层注水工艺在防治粉尘、煤与瓦斯突出以及冲击地压等方面效果显著,是煤矿主要防灾技术之一。同时,根据不同的煤层结构特点,国内外有关专家和技术人员提出并研发了适用于各种现场条件的注水工艺、注水设备。然而,这些研究也存在一定局限性,部分研究成果如磁性水尚处于初步阶段,大规模应用还需深入考虑稳定性、长期影响和成本效益等,一些新技术如基于纳米流体的强化注水技术<sup>[17]</sup>、精准控制煤层注水技术<sup>[18]</sup>、大功率压裂泵注水技术<sup>[19]</sup>等也需更多试验验证,且随着煤层地质条件愈发复杂,在复杂条件下技术集成面临挑战,如何更好整合多种技术、适应复杂情况仍是待解决难题。

从根本上说,解决这些难题的关键在于厘清水在煤体渗流通道内的输运机制。孔裂隙构成了水的渗流空间,煤层注水实际上是水在孔裂隙内的运移过程,应深入研究煤的孔裂隙,关注孔裂隙结构特征及其内部水的渗流、润湿机制。因此,下面将综述孔裂隙结构及其内部水的渗流过程、渗流机理、润湿机制三个方面的研究进展。

## 2 煤层注水渗流空间及渗流过程研究

煤层注水的核心是水在煤层内部的渗流行为,而渗流空间及渗流过程则是决定这一行为的关键要素。孔裂隙为水的传输提供了空间,其结构特征直接影响水的流动路径与分布状态;渗流过程则是水在煤层中迁移的动态表现,涵盖了从注入点到整个煤层的扩散过程。本节将围绕煤层注水渗流空间——孔裂隙结构以及煤层注水渗流过程展开详细论述。

### 2.1 煤层注水渗流空间——孔裂隙结构

孔隙-裂隙(图2)是煤体具有的重要物理结构。孔隙是煤中植物残体在成煤过程中经历了多次生物、物理化学作用形成的。裂隙在成因、尺度和连通性等方面均与孔隙有较大差异,但本质上属于孔隙,早期研究常将二者统称为孔隙。国内外学者主要依据孔隙对煤层气的吸附作用、孔径大小、孔隙形态和孔隙结构特

征、测试范围等方面对孔隙尺度进行划分,但目前学术界尚无统一标准,常用的分类标准见表 1。

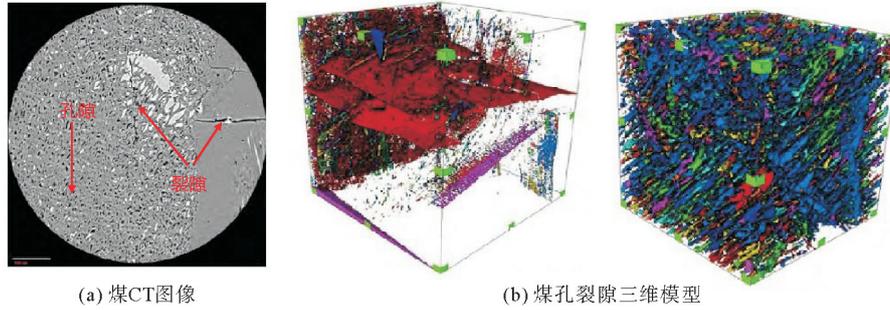


图 2 煤体孔隙裂隙结构<sup>[20]</sup>

Fig. 2 Coal pore and fracture structure

表 1 煤孔隙分类表<sup>[21]</sup>

Table 1 Classification of coal pores

学者/机构(年份)	孔隙分类	孔径/nm	孔隙特征	划分依据
Ходот(1961)	微孔	<10	吸附	孔径与气体分子的作用
	过渡孔	10~100	毛细管凝结、物理吸附及扩散	
	中孔	100~1 000	层流和紊流	
	大孔	>1 000		
Dubinin(1966)	微孔	<2	气体赋存状态	
	过渡孔	2~20		
	大孔	>20		
IUPAC(1966)	微孔	<2	气体赋存状态	
	中孔(介孔)	2~50		
Gan 等(1972)	微孔	0.4~1.2	孔容和测试方法	
	过渡孔	1.2~30		
	粗孔	30~2 960		
抚顺煤研所(1985)	微孔	<8	测试范围	
	过渡孔	8~100		
	大孔	>100		
吴俊等(1991)	微孔	<5	气体容积型扩散孔隙	孔径与气体分析的作用
	过渡孔	5~50		
	中孔	5~500	气体分子型扩散孔隙	
杨思敬等(1991)	微孔	<15	孔径结构自然分布特征	
	过渡孔	15~50		
	中孔	50~400		
傅雪海等(2005)	微孔	<8	表面扩散	分形特征
	扩散孔	8~20	混合扩散	
	小孔	20~65	Kundsen 扩散	
	中孔	65~325	稳定层流	
	渗流孔	325~1 000	剧烈层流	
邹明俊等(2013)	大孔	>1 000	紊流	压汞试验和分析特征
	微小孔	<75.6	依赖于孔隙比表面积发育;吸附孔	
	过渡孔	75.6~512.8	介于大孔和微小孔之间	
	大孔	>512.8	取决于孔隙的孔容;渗流孔	

从孔裂隙结构角度研究水在煤体内的渗流情况可以科学指导宏观煤层注水过程。孔裂隙结构作为水渗的主要通道成为提高煤层注水效果的研究重点,目前已有较多学者针对不同特点孔裂隙对渗流的影响规律开展研究。Li 等<sup>[22]</sup>利用盒计数法量化了微裂隙网络平面的复杂性,探究了不同形态的裂隙对渗透率的影响,并指出长度为 498.26  $\mu\text{m}$  的裂隙属于煤体的优势渗流通道。Liu 等<sup>[23]</sup>建立了一个分形渗透率模型(图 3),采用孔隙尺寸分形维数、喉道弯曲分形维数和最大孔径表征煤体微观结构,发现最大孔径对渗透率起决定作用。Ye 等<sup>[24]</sup>采用分形模型将气体的流动方程、煤的变形方程和渗流的热传导方程耦合起来,量化了煤体微观结构参数对其导热性、渗透性和瓦斯流动演化的影响。Ni 等<sup>[25]</sup>通过零法和 Matlab 软件计算不同尺度裂隙的渗透率,认为不同尺度裂隙对煤层渗透率的贡献由大到小依次为:毫米裂隙、微裂隙和渗流裂隙。Hou 等<sup>[26]</sup>利用脉冲气体压裂法增大低渗透煤的孔径尺寸,最终提高了煤的渗透率。

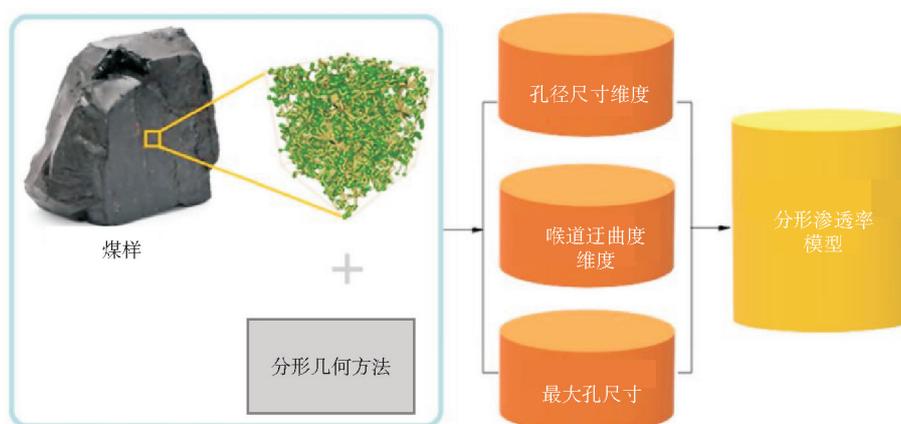


图 3 分形渗透率模型<sup>[23]</sup>

Fig. 3 Fractal permeability model

基于孔隙率、孔径、迂曲度、分形维数等孔裂隙结构参数特点建立的渗透率模型,可以从微观层面很好地预测煤层注水的难易程度。Wang 等<sup>[27]</sup>将煤的硬度系数、有效孔隙度、迂曲度分形维数和体积分形维数作为煤层注水的主控因素,并引入 Morris 筛选法计算各主控因素的灵敏度,将煤层分为不可注水煤层、难注水煤层、相对易注水煤层和易注水煤层四类。李波波等<sup>[28]</sup>建立的煤岩体渗透率模型充分考虑了孔裂隙的分形维数,并通过试验验证了模型的准确性。此外,诸多学者通过建立不同形状的孔裂隙探究了形状对渗流的影响,Singh 等<sup>[29]</sup>总结出有效渗透率实际上是不同形状裂隙各自渗透率的统计总和。

然而,上述研究主要是从微细观煤结构层面分析煤体渗透率的主要影响因素,与实际工程尺度上的煤层注水研究仍存在一定差异。在实际工程中,煤层的非均质性、地质构造以及开采扰动等宏观因素对注水效果同样具有重要影响,但目前的研究在将微细观结构参数与宏观煤层注水效果建立有效联系方面尚显不足。例如,在复杂地质构造区域,如何准确利用微细观结构参数预测煤层注水的宏观效果,以及如何根据宏观注水需求调整微细观结构参数等问题,仍有待进一步探索。

综上所述,当前关于煤层孔裂隙结构的研究在揭示微观渗流机制、提供渗透率预测方法等方面成果显著,对指导煤层注水实践具有重要意义,但在与宏观工程实际结合方面存在欠缺。未来需要加强微观与宏观的联系研究,通过更多现场试验与多尺度模拟,建立更完善的理论体系,以推动煤层注水技术在复杂地质条件下的有效应用。

## 2.2 煤层注水渗流过程

煤层注水过程实质上是水由近而远地向周边煤层扩展的“水驱瓦斯”过程,气液两相间存在混合相过渡区,即气液两相流动区域。如图 4 所示,注水尚未到达的区域,煤裂隙几乎全部被瓦斯气体占据,称为气渗流区。混合相过渡区不断由钻孔附近向四周煤体扩散的过程就是煤层注水渗流过程。国内外学者基于渗流力学理论,建立了诸多描述煤层注水的数学模型,这些模型在煤体单重、双重多孔介质特性方面,以及瓦斯在水

中溶解性等方面具有不同的假设。

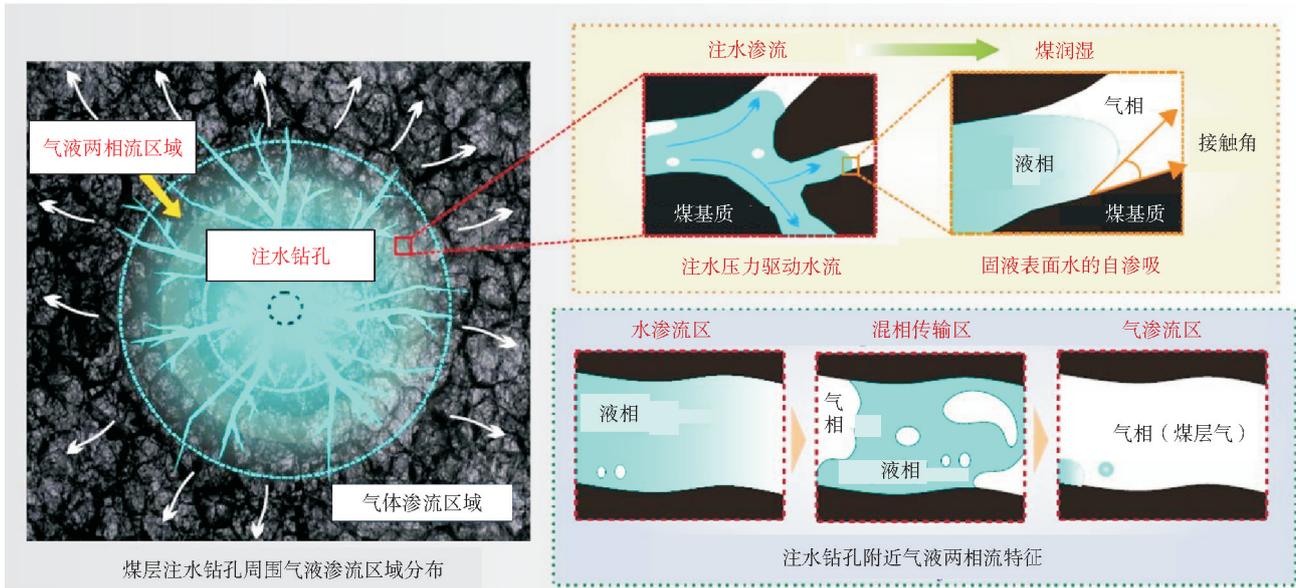


图 4 煤层注水钻孔周边的渗流以及气液两相流动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of seepage and gas-liquid two-phase flow around the coal seam water injection borehole

煤层注水过程中,首先是水在压力作用下,沿煤岩裂隙流动,即前面介绍的“注水驱气”渗流过程,该阶段主导了注水区域的范围,继而是水在毛细管力等物理作用下进行的自运动,即润湿过程。程卫民等<sup>[30]</sup>、聂百胜等<sup>[31]</sup>采用界面化学理论分析了煤体表面润湿过程,对比了甲烷和水与煤表面相互作用的差异,并探讨了煤体能够自行润湿的条件。

对比来看,煤层注水过程中的裂隙水渗流和煤体表面润湿,是伴随注水过程发生的两类水体运动,但却有各自的特征和作用机理。裂隙水渗流主要受压力驱动,其过程决定了注水的范围和速度,是实现“水驱瓦斯”的关键环节。而煤体表面润湿则与煤体的物理化学性质密切相关,影响着水在煤体内部的微观分布和长期稳定性。例如,在一些低渗煤层中,虽然注水压力能够使水在裂隙中流动,但如果煤体表面润湿性差,水无法充分进入煤体孔隙,导致注水效果不佳。因此,在分析煤层注水技术原理或评价注水效果时,应当从注水渗流和煤体润湿两阶段分别入手。既要考虑如何优化注水压力、流量等参数以提高裂隙水渗流效率,又要关注煤体表面润湿性的改善方法,如添加表面活性剂等,以增强水在煤体中的渗透和留存能力。只有全面理解和把握这两个阶段的特征和相互关系,才能制定出更加科学合理的煤层注水方案,实现更好的注水效果,有效防治矿井灾害,保障煤矿安全生产。

### 3 煤层孔裂隙注水渗流机理研究

多孔介质中的渗流研究始于达西(达西定律),随着渗流理论的发展,涉及的渗流问题也日趋复杂。研究最初是在假定介质不变形的条件下,均匀单一介质中的单相不可压缩和微可压缩流体渗流,实现了用拉普拉斯方程、傅里叶方程和二阶的非线性抛物线型方程等数学物理方程对不同渗流形式问题的描述,并给出了求解方法,得到了相应的解析解或相似解<sup>[32]</sup>。

#### 3.1 煤层注水两相渗流模型研究

对煤中水驱瓦斯的作用机制,众多学者进行了大量研究。赵阳升等<sup>[33]</sup>最早指出注水驱替瓦斯的作用,这种驱气作用只能驱逐一部分孔裂隙中的游离瓦斯气体,忽视了可吸附的瓦斯气体。注水前,气体以吸附态存在于煤体表面,而游离态气体则聚集于孔隙之中(图 5)。当水注入到煤体中时,因游离态瓦斯所承受的水压大于瓦斯压力,所以游离态瓦斯向煤层四周孔裂隙区域扩散,导致局部煤层瓦斯含量下降,如

图 5(d) 所示。

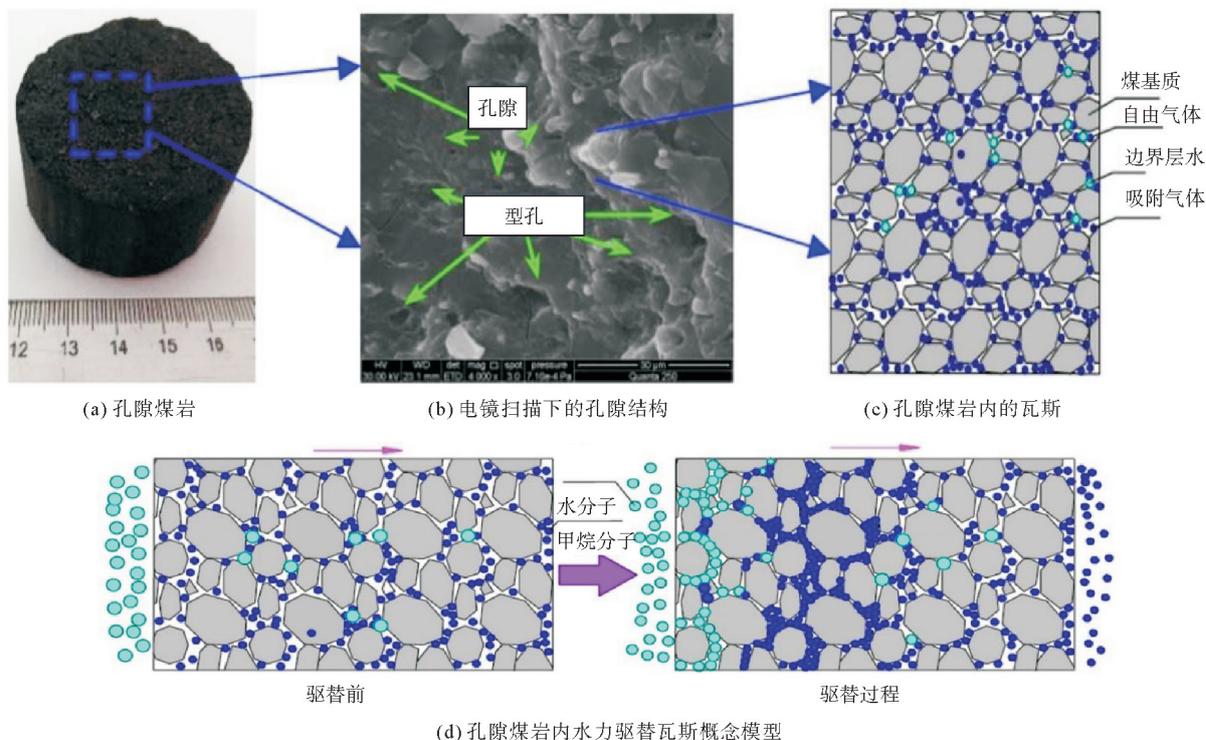


图 5 孔隙煤岩内水力驱替瓦斯概念模型<sup>[34]</sup>

Fig. 5 Conceptual model of hydraulic displacement of gas in porous coal rock

最初,研究注水驱气是将煤岩看作一个不能变形的多孔介质,忽视了其对气体的吸附、解吸的影响。同时把水及气体看作不可压缩的两相流,形成以注水孔为中心的多个圆环,圆环从注入孔向外扩展,形成从注水孔开始向周围流动的平面径向流。在煤层厚度较小的情况下,水、气两相流动是一种平面平行流动,张晓梅等<sup>[35]</sup>将水和气体的可压缩特性结合起来,建立了能够同时反映气液两相可压缩特性的气液两相平面平行流与平面径向流模型,探究了煤层中水饱和度随时间、空间位置分布变化的规律。

由于煤体包含裂隙-孔隙双重构造,仅将其作为单一的孔隙介质显然不能满足研究需要,因此需要开展更贴近真实双重介质条件下的水-气驱替机制研究。双重介质中的水驱气机制研究表明:吸附状态的气体从煤基质孔隙中释放,由于气体浓度差异进入裂隙,在裂隙中形成水-气两相流动。在注水过程中,气液界面处,会形成毛细管力,为渗吸提供驱动力。水分沿基质块体的表层吸入煤体孔隙,将气体驱入裂隙。基于渗吸作用,将双重介质中的水驱气过程划分为三个阶段:发生、旺吸、平息。在双重介质条件下的水驱气过程中,气液两相流动过程中的流速、水相饱和度以及气体相饱和度都会时刻发生变化<sup>[36]</sup>。马衍坤等<sup>[37]</sup>研究了水气两相渗流对煤岩的影响,认为注水对煤岩的影响体现在水、气两相流体对煤岩的物理化学作用。

总体而言,水驱气的过程体现了气体分子与水分子之间的竞争吸附规律。目前的研究成果指出了竞争吸附的作用现象,阐释了水驱气的作用规律,但是还没有形成成熟的理论模型,没有反映出液体置换气体的动态过程。因此,深入挖掘气、水分子之间的竞争吸附影响因素,完善竞争吸附模型将是未来的研究重点。

### 3.2 煤层注水两相渗流试验与模拟研究

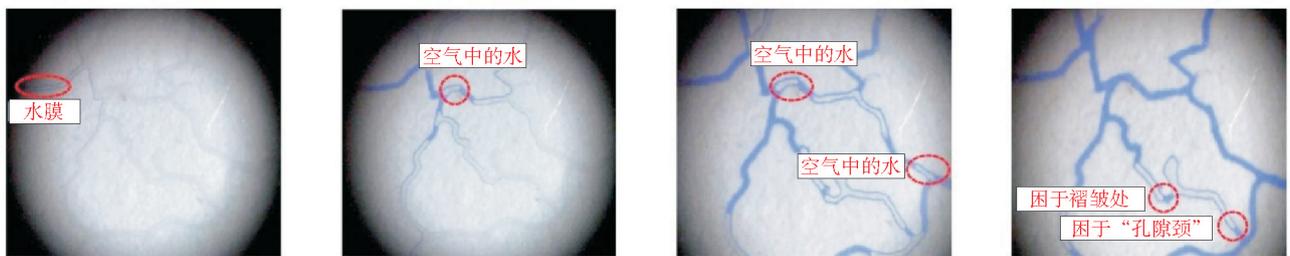
#### 3.2.1 煤层气-液两相渗流可视化试验技术

煤裂隙注水可视化试验是通过物理、计算机等技术手段,使人可以用眼睛观察到液体在裂隙中的运移特性,为理解和探索流动过程中的气液运移规律提供一种有效的途径。目前可视化试验技术主要有基于物理模型和核磁共振成像两种途径。

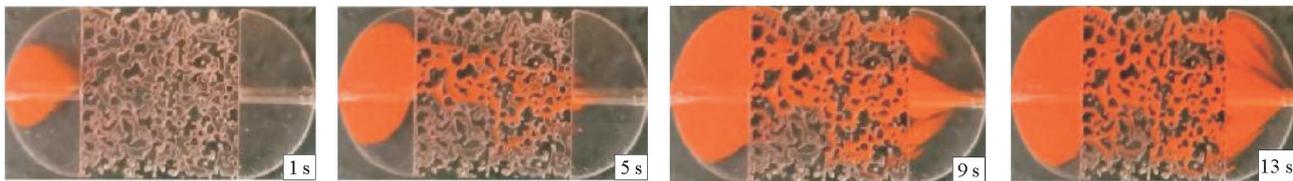
1) 基于物理模型的两相渗流试验

在煤层注水两相渗流试验研究中,基于物理模型的试验是一种重要的研究手段。其核心概念是通过构建与实际煤层孔隙或裂隙相似的物理模型,模拟煤层注水过程中气液两相的渗流情况,从而直观地观察和研究渗流规律。这种试验方法能够在一定程度上模拟煤层内部的渗流环境,为理解煤层注水机理提供直接的试验依据。目前已有的物理模型主要包括玻璃刻蚀裂隙物理模型和 3D 打印芯片模型等,这些模型在研究中发挥着重要作用,且随着技术发展不断改进。

如图 6(a)所示,玻璃刻蚀裂隙物理模型是利用激光刻蚀在玻璃表面制作出裂隙,从而观测裂隙中水驱气运移过程,开展气液两相渗流特性研究。该模型的优势是能够对裂隙内气液的运移过程进行可视化,不足之处在于无法真正反映煤层孔隙的真实环境,因此其研究得到的渗流特征不能直接进行现场应用。随着激光刻蚀技术的发展,玻璃刻蚀裂隙物理模型也由简单裂隙向裂隙-孔隙复杂物理模型转变,试验结果更加符合真实情况。



(a) 玻璃刻蚀芯片模型气液运移<sup>[38]</sup>



(b) 3D打印芯片模型气液运移<sup>[39]</sup>

图 6 芯片模型气液运移情况

Fig. 6 Gas liquid migration of chip model

钱自卫等<sup>[39]</sup>采用高精度光固型 3D 打印机,制备了透明微细孔隙试验模型,实现了对孔隙渗流过程的可视化观测及注水压力的高密度实时监测,从微观角度研究了多孔介质渗流规律(图 6(b))。王刚等<sup>[40]</sup>为研究煤体孔隙微观尺度下液体的初始渗流特性,以微流控技术为基础,制作替代煤体孔隙的等效毛管束模型,开展了不同孔隙尺寸、不同流体的渗流模型试验,分析了渗流流量、渗流压力、孔径尺度、润湿性等多个参量对渗流特性的影响。

基于物理模型的试验具有一定合理性,可直观展现气液运移过程,为理解渗流特性提供视觉依据,且能从微观层面研究渗流规律,但也存在不足,如玻璃刻蚀裂隙物理模型无法真实反映煤层孔隙表面粗糙度、化学特性等特征,致使研究结果难以直接应用于现场。因此,应进一步优化模型,使其更接近真实煤层环境,以及结合更多实际因素开展多因素综合研究,从而为优化煤层注水工艺提供更坚实的理论支撑。

2) 基于核磁共振成像的两相渗流研究

核磁共振成像技术能够实时反映煤岩内部的孔隙度、渗透率、流体饱和度等特征,对开展两相驱替机理、气体分布规律以及提高渗流效果等研究具有重要意义。郑磊等<sup>[4]</sup>采用多孔介质的渗流模型理论,结合核磁共振试验得到了煤体孔隙率变化规律,建立了逾裂增渗水压-孔隙率关系模型,以不同孔隙水压对 90 m 长度钻孔注水发现,在固定注水压力和注水时间条件下,随着与钻孔轴心距离的增加,煤层内平均水压和平均渗流速度衰减越来越慢,湿润范围越来越小;在固定注水时间、位置 and 不同注水压力条件下,随着注水压力升

高,湿润效果明显提高。在不同注水时间和固定注水压力及位置条件下,注水前期由于煤层内部新生裂隙数目增多,可供流体运移的通道增加,流体扩散能力增强;注水后期因煤层新生孔隙数目增长变慢、煤层含水量增多,渗透压力、渗流速度和密度变化趋于平缓。周宏伟等<sup>[41]</sup>利用核磁共振成像对深井煤体注水过程中裂隙结构演化进行了研究,实现了注水煤样孔隙结构和渗流通道演化的可视化。

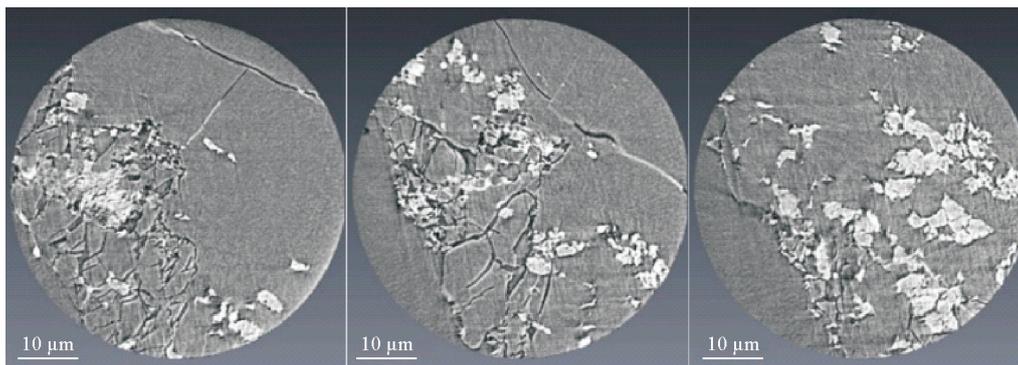
事实上,基于核磁共振的水驱气试验与工程中注水驱替瓦斯的过程还存在较大差异,比如注水压力较高时会打破系统初始平衡状态,减少系统的自由体积,对液气置换效应的定量分析产生干扰。因此,有必要进一步完善水驱气效应测试系统,提高试验精度,增强试验条件与工程实际的契合度,同时深入探究在不同煤层条件下,如何准确利用核磁共振成像技术获取更可靠的渗流参数,实现对煤层注水过程更精准地定量研究,从而更好地指导工程实践。

### 3.2.2 两相渗流数值模拟技术

气液两相渗流的相关试验研究成本较高,而且存在一些难以克服的问题:①基于物理模型的两相渗流试验,模型较难真实还原孔裂隙表面粗糙度、润湿性等特征;②基于核磁共振的两相渗流试验,由于煤的非均质性较强,同一块煤无法实现多变量对比试验。因此,部分学者通过建立气液两相运移的数理模型,借助 Comsol、Fluent 等数值模拟软件对气液两相运移机理进行了研究,为现场应用提供了理论依据。

Wang 等<sup>[1]</sup>提出一种多尺度、可视化的煤体结构及渗流效果研究方法,通过计算机断层扫描(computed tomography, CT)技术得到煤体三维模型,再将其导入数值模拟软件进行渗流模拟,分析了 4 种煤样微观气液两相渗流特征。Jing 等<sup>[42]</sup>利用 CT 对阜新雷家矿区的煤样进行扫描,基于 Avizo 平台建立孔裂隙网络模型并对渗流通道中的流体流动进行了模拟,结果显示流体在孔裂隙中流动时,速度范围可以分为低速区、中速区和高速区,流体渗流受孔隙连通性、孔喉尺寸和孔喉结构分布等因素影响。其中,孔隙尺寸和连通性直接影响煤层的渗透率。Zhang 等<sup>[43]</sup>将建立的孔裂隙模型导入 ANSYS 有限元软件进行 4 MPa 压力下的注水渗流模拟,发现沿水渗路径渗透压力逐渐减小。Li 等<sup>[44]</sup>通过原位 CT 结合数值模拟研究了岩石中的气水两相流,发现孔裂隙结构的非均质性对流体运移路径有显著影响,气体在大尺度孔裂隙中运移较快,在微孔裂隙中运移较慢,而在低毛管数条件下,水可以通过小尺度孔裂隙而不进入大尺度孔裂隙。Shi 等<sup>[45]</sup>利用纳米 CT 技术对低挥发性烟煤进行表征,并利用 Avizo 和 Comsol 模拟了微裂隙网络中水的渗流特征,结果表明微裂隙网络对渗流有较强的控制作用,其渗透率具有很强的各向异性,水平方向(X 轴和 Y 轴)的渗透率高于垂直方向(Z 轴)的渗透率(图 7)。

渗流过程属于流体-渗流空间相互耦合作用的过程,孔裂隙限制了流体运移的空间,而流体也会对孔裂隙结构产生扩张作用。未来的研究应致力于改进数值模拟模型,充分考虑流体对煤结构的影响,实现对流体-渗流空间耦合作用的准确模拟,从而更全面地揭示煤层注水两相渗流的内在机理,为优化煤层注水工艺参数提供更有效的依据。同时,还需加强对不同煤层地质条件下数值模拟结果准确性的验证,提高模拟技术在实际工程中的适用性和可靠性,推动煤层注水技术发展。



(a) CT图像

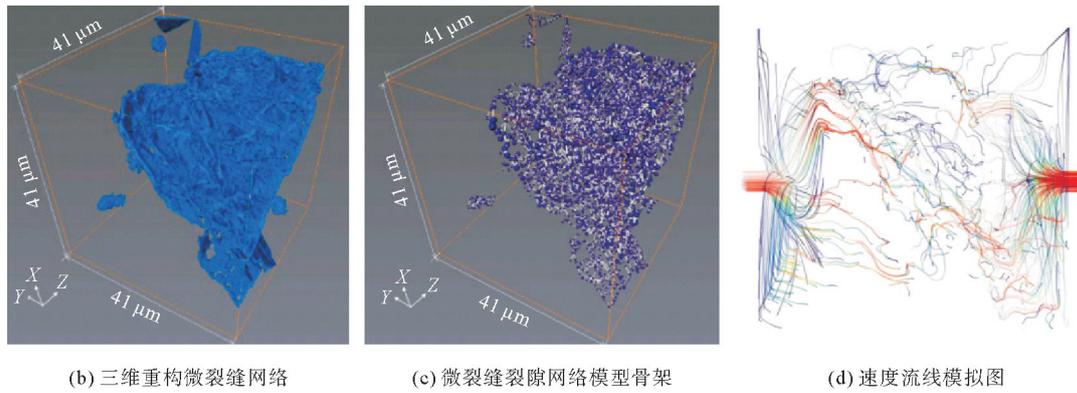


图 7 三维重构微裂缝网络及数值模拟图<sup>[45]</sup>

Fig. 7 3D reconstruction of microfracture network and numerical simulation diagram

### 4 煤层注水润湿机制研究

煤层注水过程中,润湿机制起着至关重要的作用,直接影响水在煤体中的分布,进而关系到煤层注水防治灾害的成效。润湿机制主要涉及界面润湿微观过程以及孔隙渗吸机理等方面。深入探究这些内容有助于全面理解煤层注水过程中流体与煤体的相互作用,从而为优化煤层注水工艺提供理论依据。

#### 4.1 界面润湿微观过程及其影响因素

煤体的界面润湿过程是煤体表面一种流体被另一种不相容的流体替代的过程,是受到压力、毛细力以及扩散作用而进行的、非饱和的复杂渗透,主要分为三个阶段:沾湿、浸湿、铺展<sup>[46]</sup>,如图 8 所示。沾湿阶段是液体与煤体从不接触到开始接触,受液体分子与煤体表面分子间的吸引力及液体内聚力共同作用,接触角  $\theta$  开始形成,其大小反映液体在煤体表面的铺展趋势。浸湿阶段是煤体浸入液体的过程,是固气界面被固液界面代替,而液体表面在此过程中并无变化。铺展阶段,液体在煤体表面显著铺展,固液界面大量替代固气界面,形成连续液膜,气液界面扩展。煤体微观形貌等影响铺展过程和最终面积,此过程对煤层注水效果影响关键。

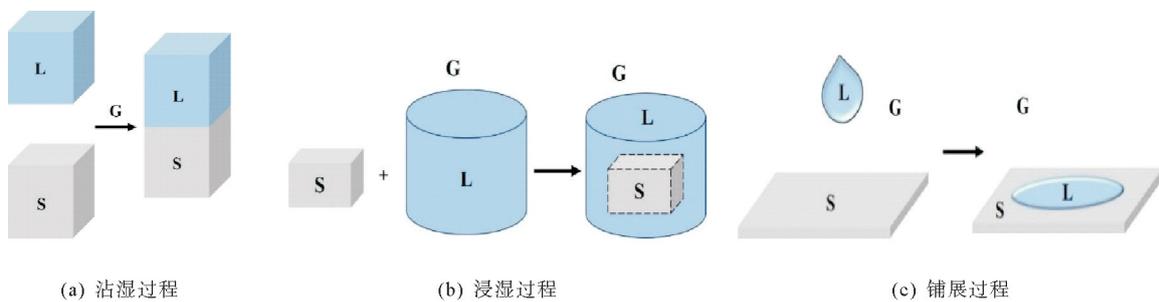


图 8 煤体润湿过程<sup>[46]</sup>

Fig. 8 Coal wetting process

煤体界面的润湿效果可由接触角  $\theta$  判断: $\theta < 90^\circ$  时,水分极易在煤体表面铺展,即煤体易润湿; $\theta \geq 90^\circ$  时,水分很难在煤体表面均匀地铺展,即煤体不易润湿。煤体界面润湿的影响因素主要包括表面形貌和温压条件两个方面。煤体表面由不同几何特征的曲面构成,不同的表面特征会改变固液接触状态,进而影响润湿性能。诸多研究发现,固液界面润湿性能与表面构造、凹凸度、粗糙度等相关<sup>[47-49]</sup>,如张静娴等<sup>[50]</sup>采用三维参数系统直观表征,Yu 等<sup>[51]</sup>指出液体与固体表面接触的曲面面积影响煤体润湿性。润湿性受温度影响显著,受压力影响不明显,但温度影响规律尚不统一。部分研究认为温度升高时煤岩润湿性趋向亲水性<sup>[52]</sup>,也

有研究持相反观点<sup>[53]</sup>,还有研究表明不同岩性(如砂岩、碳酸盐岩)随温度变化润湿性转变不同,甚至同一岩性(如 Berea 砂岩)在不同温度区间润湿性也有不同转变<sup>[54]</sup>。近年来研究发现煤岩润湿性与温度关系受盐水成分、矿化度等影响<sup>[55]</sup>。

总体而言,在润湿过程中,温度是影响煤体润湿性的主要因素,而压强对润湿性的影响较小。受试验仪器所限,前期研究在温压环境调控及测试精度方面存在缺陷,并且大部分研究仅针对少数单个试样开展试验,缺乏相应的理论研究。因此,需要采用更加科学的手段对其进行试验研究,以揭示煤层在温压条件下的润湿演化机制。

## 4.2 孔隙渗吸机理

渗吸即自发渗吸,也叫自吸,是指在没有加压的情况下,液体受到毛细力的作用自发进入煤裂隙中并驱替出另一种流体的过程。在注水开采领域,利用水分自动吸入煤体裂隙通道,可有效提高渗流效果<sup>[56]</sup>,毛细吸力产生于湿基质和干基质界面处的多孔介质壁上。这些力来源于液体介质中分子相互吸引的内聚力以及液体分子与固体介质中分子的黏附力。当黏附力大于相互吸引力时,就会发生渗吸现象。尽管可能有其他因素的参与,但是渗吸是诱使多孔材料自发吸收可润湿液体的主要原因。

### 4.2.1 渗吸理论模型

目前,学界通过建立数学模型来解释自发渗吸现象主要基于两类方法:一类是基于 Lucas-Washburn 方程(简称 LW 方程),该方程是研究毛细现象的经典方程。对于多孔介质的渗吸过程,又派生出许多新的版本,较常见的是多孔介质被假设为一组相同半径的毛细管束模型;另一类是基于达西定律或其扩展模型考察多孔介质渗吸过程的方法。现有的较为经典的自发渗吸理论模型有 Lucas-Washburn(LW)模型、太沙基模型、Handy 模型。

#### 1) LW 模型<sup>[57]</sup>

直径为  $\lambda$  的毛细管接触到液体时,发生自发渗吸,流动服从哈根-泊肃叶定律:

$$\frac{dh_f}{dt} = \frac{\lambda^2}{32\mu_w h_f} \left( \frac{4\sigma \cos\theta}{\lambda} - \rho g h_0 \right) \quad (1)$$

式中: $h_f$  为自发吸水的液柱长度,m; $h_0$  为液柱的平衡位置,m; $t$  为时间,s; $\mu_w$  为液体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $\lambda$  为毛细管直径,m; $\sigma$  为表面张力, $\text{N/m}$ ; $\theta$  为接触角, $(^\circ)$ ; $\rho$  为液体密度, $\text{g/cm}^3$ ; $g$  为重力系数, $\text{N/g}$ 。

假设毛细管横截面为均匀的圆形,式(2)描述了毛细管内的液柱高度随时间的变化关系,初始阶段上升快,而后减慢直至达到平衡位置  $h_0$ ,

$$h_0 = \frac{4\sigma \cos\theta}{\lambda \rho g} \quad (2)$$

#### 2) 太沙基模型<sup>[58]</sup>

太沙基基于达西定律和自吸水力梯度,推导出自吸模型:

$$t = - \frac{J h_f \mu_w}{K_w \rho g} \left( \ln \frac{h_f}{h_f - h_0} \right) \quad (3)$$

式中: $J$  为水力梯度,无量纲; $K_w$  为渗透率,mD。

#### 3) Handy 模型<sup>[59]</sup>

Handy 建立了气体饱和岩心自吸模型:

$$N_{wt}^2 = \frac{2A^2 P_c K_w \phi S_{wf} t}{\mu_w} \quad (4)$$

式中: $N_{wt}$  为自吸体积, $\text{cm}^3$ ; $A$  为介质横截面积, $\text{cm}^2$ ; $P_c$  为毛细管力, $\text{N/m}$ ; $\phi$  为孔隙度, $\%$ ; $S_{wf}$  为湿润相饱和度,无量纲。

综合来看,LW 模型在描述简单毛细管系统中的渗吸过程时较为直观,能清晰反映毛细管直径、液体性质、接触角等相关因素影响,适用于理想的、简单的毛细管体系,但忽略了孔隙的不规则性和连通性差异。太沙基模型引入达西定律,考虑渗透率,更接近实际多孔介质渗吸情况,但仍然对多孔介质的结构做了较为简

化的假设,没有充分考虑孔隙结构的复杂性、孔隙内表面性质以及流体与固体之间的微观相互作用等因素,适用于孔隙结构相对均匀、简单的多孔介质渗吸过程的初步分析。Handy模型考虑了孔隙度、毛细管力以及湿润相饱和度等多个与多孔介质和流体相关的重要参数,对于研究多孔介质中液体的吸入量与介质特性之间的关系提供了一种有效的方法,尤其在研究气体饱和岩心等特定体系的渗吸机理时具有针对性。但该模型仅局限于重力远小于毛细管力的情况,且没有全面考虑多孔介质复杂的孔隙结构和微观特性。

针对岩心的自发渗吸,Qin等<sup>[60]</sup>通过试验考察毛细管力计算公式,发现计算结果高于试验值。Feldmann等<sup>[61]</sup>研究表明,盐水盐度增加会减弱碳酸盐自发渗吸效果。Zhao等<sup>[62]</sup>模拟了不同流体性质液体的渗吸动力学。这些研究从不同角度探索了渗吸过程,但多聚焦于特定条件或材料,缺乏对煤体这一复杂多孔介质的深入研究。

#### 4.2.2 水分测量方法

注水时的渗吸过程对于渗流效果影响较大,而水分测量是研究渗吸水分分布规律的关键环节,其方法主要分为直接法和间接法两大类。

直接法主要包括烘干法和质量法,这两种方法均为传统且经典的水分检测手段,其原理都是通过对比干燥和含水被测对象的质量差,从而达到检测含水量和含水率的目的。直接法的主要特点是测量范围宽,并且对测试手段的要求较低,然而其缺点也较为明显,从采样到烘干、测量的整个过程均需要大量时间,极难实现快速检测。间接法是通过测量被测物体在不同含水量条件下表征出的物理或化学特性差异来检测含水量或含水率<sup>[63]</sup>,主要有电阻法、电容法、微波法、射线法和核磁共振法等。

电阻法依据煤的电阻率与含水率的内在联系,通过测量煤体电阻值从而推算含水率,具有操作简便、成本低的优势,但测量精度易受煤的种类、结构、温度等多种因素干扰,且煤体内部水分分布不均时,测量结果常出现较大偏差。电容法根据不同含水率介质的介电常数不同,将被测物体放置在电容极板的两极之间,通过测量介质的介电常数得出介质的含水率,但在煤体自发渗吸研究中,因需在介质内部布置大量电极片,会阻隔水分传输。射线法的原理是通过射线粒子,包括 $\gamma$ 射线、X射线、中子成像等,照射被测介质,根据不同含水率介质导致射线粒子能量损失,检测反射或透射粒子数量或能量间接检测含水率分布,虽测试速度快、精度高,但设备有放射源,存在安全隐患且价格昂贵难维护。微波法借助不同含水率的煤对微波的吸收、反射、透射特性差异来测量含水率,具有测量快、非接触、对煤体结构破坏小等优势,但设备购置成本高,且煤体含水量大时可能出现测量饱和,影响精度,限制了其在高水分煤体测量中的应用。

核磁共振对介质中水分的检测原理是,水分子中原子核在受到外加磁场和电场作用时运动状态会发生改变,当撤除电场后原子核又会恢复原始的运动状态,这一恢复过程称为弛豫过程,弛豫过程持续的时间称为弛豫时间。不同赋存条件下水中原子核的弛豫时间不尽相同,通过检测不同弛豫时间的原子核数量即可获得介质中不同赋存状态的含水量。关于核磁共振测试含水量的研究,姚艳斌等<sup>[64]</sup>使用核磁共振技术,从理论和技术两个角度讨论了核磁共振弛豫时间,建立了基于低场核磁共振“多态甲烷”和“多态水”的检测理论与方法;孙晓晓等<sup>[65]</sup>使用低场核磁共振技术,识别煤粉中不同状态的水分,通过 $T_2$ 弛豫谱的不同来判断不同煤种的润湿性;Zheng等<sup>[66]</sup>利用核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)和高分辨率X射线CT技术对压裂液的自发渗吸过程和液体分布进行了监测,试验结果表明在渗吸的初始阶段,压裂液的自发渗吸主要发生在大孔隙中,且压裂液的表面张力较低,导致其渗吸速度低于水,但同时提高了其润湿性,从而促进了整个渗吸过程;杨赫等<sup>[67]</sup>采用核磁共振试验,对煤体注水过程中有效渗流通道变化特征进行了测试,并对其通道结构分形特征进行了研究。

综上所述,对于自发渗吸过程的研究,目前也取得了较为丰硕的研究成果,研究对象既包括单纯的毛细管,也包括具有毛细吸水效应的多孔介质,其中对于多孔介质的研究包括页岩、砂岩、土壤等天然多孔介质。虽然这些研究已经相对比较成熟,但对于具有复杂孔隙-裂隙系统的煤体而言,与前述研究对象存在较大差异:与土壤、混凝土、岩石等多孔介质相比,煤体具有丰富的孔裂隙系统,材料的成材机制、致密程度、孔隙结构及孔隙复杂程度都有很大差异;煤体作为具有孔隙-裂隙的双孔隙结构多孔介质,水分在煤体中的渗吸过程既包括渗流过程,也包括吸附过程。因此,对煤体自发渗吸过程的研究不同于其他多孔介质,而目前针对

煤体自发渗吸过程的研究相对较少,有待开展进一步研究。

## 5 结论与展望

煤层注水作为防治矿井灾害的重要手段,诸多学者从不同角度对煤层注水渗流及润湿机理进行了相关研究,但仍存在诸多不足,主要总结为以下内容。

1) 在孔裂隙结构及渗流过程方面,已从多维度对孔裂隙结构进行了剖析,包括依据多种标准划分孔隙尺度、建立基于结构参数的渗透率模型以及探究孔裂隙结构对渗流的影响规律等,同时明确了注水渗流过程包含压力驱动的裂隙水渗流和物理化学作用主导的煤体表面润湿两个关键阶段及其各自特征。然而,当前研究主要聚焦于微细观结构层面的渗流分析,与实际工程尺度的注水应用缺乏有效衔接,未能充分建立起微细观结构参数与宏观注水效果之间的精准关联,尤其在复杂地质构造条件下,这种联系的缺失更为明显,限制了其对煤层注水宏观效果的准确预测与调控。

2) 关于煤层孔裂隙注水渗流机理,注水两相渗流模型研究从简单假设逐步发展为考虑煤体复杂特性,但目前的模型仍未成熟,未能全面刻画液体置换气体的动态过程。在试验与模拟研究中,尽管可视化试验技术(如物理模型和核磁共振成像试验)和数值模拟技术不断演进,但各类技术均存在局限性。物理模型难以精准还原煤层孔隙真实环境,核磁共振成像试验与工程实际情况存在偏差,数值模拟模型则需进一步优化以考虑流体对煤体结构的影响,从而提升模拟结果在不同煤层地质条件下的准确性与适用性。

3) 在煤层注水润湿机制方面,对界面润湿微观过程及其影响因素有了一定认识,如明确了润湿的三个阶段及主要影响因素为温度,但研究受试验条件制约,在温压环境调控和测试精度上存在不足,理论研究深度不够。对于孔隙渗吸机理,虽已建立多种理论模型且有多种水分测量方法,但针对煤体这一复杂多孔介质的自发渗吸研究相对匮乏,考虑到煤体独特的孔隙-裂隙结构及其渗吸过程中渗流与吸附并存的特性,现有研究成果难以满足深入理解煤体渗吸过程的需求。

总体而言,未来研究需在多个关键方向上取得突破。首先,应致力于构建微观与宏观一体化的研究框架,通过大量现场试验获取详实数据,并借助多尺度模拟技术,深度融合微细观结构与宏观工程应用,建立更具普适性和准确性的理论体系,以应对复杂地质条件下煤层注水的挑战。其次,在渗流机理研究中,需进一步深入探索气、水竞争吸附机制,完善水驱气模型,同时改进可视化试验技术(如优化物理模型和提高核磁共振成像试验精度)以及数值模拟技术(如充分考虑流体-煤体结构耦合作用),为渗流过程研究提供更可靠的技术支持。最后,针对煤层注水润湿机制,应借助先进的试验设备和创新的研究方法,提升温压调控和测试精度,构建完善的理论模型,尤其要加强对煤体自发渗吸过程的专项研究,充分考虑其复杂孔隙-裂隙结构中的渗流与吸附特性,为优化煤层注水工艺提供坚实的理论依据,从而推动煤层注水技术在煤矿安全生产与灾害治理领域发挥更有效的作用,提升煤炭资源开采的安全、高效与可持续性。

### 参考文献:

- [1] WANG G, HAN D Y, QIN X J, et al. A comprehensive method for studying pore structure and seepage characteristics of coal mass based on 3D CT reconstruction and NMR[J/OL]. Fuel, 2020, 281. DOI:10.1016/j.fuel.2020.118735.
- [2] 金龙哲. 德国煤层注水防尘发展动向[J]. 煤炭工程师, 1994(5):46-48.  
JIN Longzhe. Development trends of coal seam water injection dust prevention in Germany[J]. Coal Engineer, 1994(5):46-48.
- [3] 王龙飞. 综采工作面煤层注水渗流模型及防突机理研究与应用[D]. 北京:北京科技大学, 2021:4-5.  
WANG Longfei. Study and application of deep-hole coal seam water injection seepage model and outburst prevention mechanism[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021:4-5.
- [4] 郑磊. 难注水煤层水力逾裂增渗润湿抑尘机理与工程应用[D]. 重庆:重庆大学, 2022:4-5.  
ZHENG Lei. Mechanism and engineering application of hydraulic infiltration enhancement for coal dust suppression in low porosity coal seam[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022:4-5.
- [5] 徐靖. 煤体润湿性表征方法及注水参数优化研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2023:7-8.

- XU Jing. Study on coal wettability characterization method and optimization of water injection parameters[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023:7-8.
- [6] 张馨新. 微生物表面活性剂强化煤层注水润湿特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023:2-3.  
ZHANG Xinxin. Study on wetting characteristics of microbial surfactant enhanced coal seam water injection[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023:2-3.
- [7] 胡景义, 徐曾和, 赵本钧. 龙凤矿冲击地压防治的试验研究[J]. 阜新矿业学院学报, 1985(增1):29-38.  
HU Jingyi, XU Zenghe, ZHAO Benjun. The full scale test and the research of preventing coal burst in Longfeng coal mining [J]. Journal of Fuxin Mining Institute, 1985(S1):29-38.
- [8] 李德文. 粉尘防治技术的最新进展[J]. 矿业安全与环保, 2000(1):14-16.  
LI Dewen. Latest development of dust prevention and control techniques[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2000(1):14-16.
- [9] MA Y L, SUN J, DING J, et al. Synthesis and characterization of a penetrating and pre-wetting agent for coal seam water injection[J]. Powder Technology, 2021, 380:368-376.
- [10] 郭敬中, 金龙哲, 杨朝霞, 等. 应用渗透棒提高煤层注水效果分析及试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(5):54-59.  
GUO Jingzhong, JIN Longzhe, YANG Zhaoxia, et al. Analysis and experimental study on improving water injection effect of coal seam with permeable rod[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(5):54-59.
- [11] CAO Y, XIAO Y, WANG Z P, et al. Recent progress and perspectives on coal dust sources, transport, hazards, and controls in underground mines[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 187:159-194.
- [12] 彦鹏, 王成, 代振华, 等. 磁-电耦合喷雾降尘效果研究[J]. 煤矿安全, 2024, 55(11):92-100.  
YAN Peng, WANG Cheng, DAI Zhenhua, et al. Research on the effect of magnetic-electric coupling spraying dust reduction[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(11):92-100.
- [13] 王雪宁. 特厚煤层综放工作面动静压混合式注水预裂渗透降尘技术研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2022(24):49-51.  
WANG Xuening. Research on dynamic and static pressure mixed water injection pre-splitting infiltration dust removal technology in fully mechanized caving face of extra-thick coal seam[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2022(24):49-51.
- [14] 祝飞. 基于动力学的高压脉动水锤装置特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016:6-7.  
ZHU Fei. Characteristic research of high pressure pulse water hammer device based on dynamics[D]. Xuzhou: China University of Mining Science and Technology, 2016:6-7.
- [15] 张健, 徐明, 刘涛, 等. 分段封孔注水提高煤层注水效果的应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(2):79-83.  
ZHANG Jian, XU Ming, LIU Tao, et al. Application study on seam water infusion effect improvement by sectional infusion and borehole sealing[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(2):79-83.
- [16] 吴金刚, 李守振, 郭军杰. 高位钻场煤层注水防尘技术[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(5):708-711.  
WU Jingang, LI Shouzheng, GUO Junjie. Dust control technology of coal seam water injection at upper-level drilling site [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(5):708-711.
- [17] ZOU Q, ZHANG T, MA T, et al. Effect of water-based SiO<sub>2</sub> nanofluid on surface wettability of raw coal[J/OL]. Energy, 2022, 254. DOI:10.1016/j.energy.2022.124228.
- [18] 杨赫, 刘震, 程卫民, 等. 一种煤层分步注水精准控制系统及注水方法:CN201910465931.1[P]. 2021-03-30.
- [19] 李文博. 碎软煤层井下顶板长钻孔分段水力压裂瓦斯抽采技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2023:32-33.  
LI Wenbo. Study on gas drainage technology of long borehole staged hydraulic fracturing in underground roof of broken and soft coal seam[D]. Beijing: Chinese Institute of Coal Science, 2023:32-33.
- [20] 王刚, 陈昊, 陈雪畅, 等. 基于CT三维重构煤体变开度裂隙渗流特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(1):59-67.  
WANG Gang, CHEN Hao, CHEN Xuechang, et al. Study on seepage characteristics of coal fissures with variable apertures based on CT 3D reconstruction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(1):59-67.
- [21] 刘世奇, 王鹤, 王冉, 等. 煤层孔隙与裂隙特征研究进展[J]. 沉积学报, 2021, 39(1):212-230.  
LIU Shiqi, WANG He, WANG Ran, et al. Research advances on characteristics of pores and fractures in coal seams[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1):212-230.
- [22] LI Q, LIU D M, CAI Y D, et al. Effects of natural micro-fracture morphology, temperature and pressure on fluid flow in coals through fractal theory combined with lattice Boltzmann method[J/OL]. Fuel, 2021, 286. DOI:10.1016/j.fuel.2020.

- 119468.
- [23] LIU G N, LIU J S, LIU L, et al. A fractal approach to fully-couple coal deformation and gas flow[J]. *Fuel*, 2019, 240: 219-236.
- [24] YE D Y, LIU G N, GAO F, et al. A fractal model of thermal-hydrological-mechanical interaction on coal seam[J/OL]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 168. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107048.
- [25] NI X M, CHEN W X, LI Z Y, et al. Reconstruction of different scales of pore-fractures network of coal reservoir and its permeability prediction with Monte Carlo method[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(4): 693-699.
- [26] HOU P, GAO F, JU Y, et al. Changes in pore structure and permeability of low permeability coal under pulse gas fracturing[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 1017-1026.
- [27] WANG G, FENG J, HUANG Q M, et al. Theoretical and experimental evaluation of water injection difficulty based on coal structure characteristics[J/OL]. *Fuel*, 2022, 326. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124932.
- [28] 李波波, 王斌, 杨康, 等. 煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模型研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 226-231.  
LI Bobo, WANG Bin, YANG Kang, et al. Study on fractal characteristics of coal pore fissure structure and permeability model[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 226-231.
- [29] SINGH H, JAVADPOUR F, ETTEHADTAVAKKOL A, et al. Nonempirical apparent permeability of shale[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2014, 17(3): 414-424.
- [30] 程卫民, 薛娇, 周刚, 等. 烟煤煤尘润湿性与无机矿物含量的关系研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(3): 462-468.  
CHENG Weimin, XUE Jiao, ZHOU Gang, et al. Research on the relationship between bituminous coal dust wettability and inorganic mineral content[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(3): 462-468.
- [31] 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(4): 17-21.  
NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Micro-mechanism of coal adsorbing water[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004(4): 17-21.
- [32] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2020.
- [33] 赵阳升, 杨栋, 冯增朝, 等. 多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008(7): 1321-1328.  
ZHAO Yangsheng, YANG Dong, FENG Zengchao, et al. Multi-field coupling theory of porous media and its applications to resources and energy engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(7): 1321-1328.
- [34] 卢卫永. 含瓦斯煤层水力致裂的驱赶瓦斯规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018: 52-53.  
LU Weiyong. Rules of methane driven by hydraulic fracturing in the gassy coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018: 52-53.
- [35] 张晓梅, 宋维源. 煤岩双重介质注水驱气渗流的理论研究[J]. *煤炭学报*, 2006(2): 187-190.  
ZHANG Xiaomei, SONG Weiyuan. The theoretical study on water's driving gas displacement as for double medium of coal petrography[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006(2): 187-190.
- [36] 张永吉, 李占德, 秦伟瀚, 等. 煤层注水技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [37] 马衍坤, 王恩元, 徐文全, 等. 注水过程渗流对煤体的影响分析[J]. *煤矿安全*, 2009, 40(8): 74-77.  
MA Yankun, WANG Enyuan, XU Wenquan, et al. Analysis of the impact of seepage on coal body during water injection process[J]. *Safety in Coal Mines*, 2009, 40(8): 74-77.
- [38] 王璐, 杨胜来, 刘义成, et al. 缝洞型碳酸盐岩储层气水两相微观渗流机理可视化实验研究[J]. *石油科学通报*, 2017, 2(3): 364-376.  
WANG Lu, YANG Shenglai, LIU Yicheng, et al. Visual experimental investigation of gas-water two phase micro seepage mechanisms in fracture-cavity carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(3): 364-376.
- [39] 钱自卫, 黄震, 袁世冲. 基于3D打印透明微细孔隙模型的多孔介质渗流规律[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(8): 2901-2907.  
QIAN Ziwei, HUANG Zhen, YUAN Shichong. Pore seepage law based on 3D printed micro-pore model[J]. *Journal of Coal Industry*, 2020, 45(8): 2901-2907.
- [40] 王刚, 李艳青, 刘世民, 等. 微观等效毛管束下液体初始渗流特性的可视化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 147-153.  
WANG Gang, LI Yanqing, LIU Shimin, et al. Visualized experimental study on initial seepage characteristics under micro-

- equivalent tube bundles[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 147-153.
- [41] 周宏伟, 刘泽霖, 孙晓彤, 等. 深部煤体注水过程中渗流通道演化特征[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 867-875.  
ZHOU Hongwei, LIU Zelin, SUN Xiaotong, et al. Evolution characteristics of seepage channels during water infusion in deep coal samples[J]. *Journal of Coal Industry*, 2021, 46(3): 867-875.
- [42] JING D J, MENG X X, GE S C, et al. Reconstruction and seepage simulation of a coal pore-fracture network based on CT technology[J/OL]. *Plos One*, 2021, 16(6). DOI: 10.1371/journal.pone.0252277.
- [43] ZHANG W, ZHOU G, ZHANG G, et al. Study on 3D spatial characterization analysis and water injection seepage numerical simulation of coal micro-pore/fracture[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*: 1-15.
- [44] LI Y, YANG Y, DONG M, et al. Effect of pore structure and capillary number on gas-water flow patterns in carbonate rocks[J]. *SPE Journal*, 2022, 27(4): 1895-1904.
- [45] SHI X, PAN J, PANG L, et al. 3D microfracture network and seepage characteristics of low-volatility bituminous coal based on nano-CT[J/OL]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 83. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103556.
- [46] 王青松, 金龙哲, 孙金华. 煤层注水过程分析和煤体润湿机理研究[J]. *安全与环境学报*, 2004(1): 70-73.  
WANG Qingsong, JIN Longzhe, SUN Jinhua. A research on coal seam water infusion course and coal body wetness mechanism[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004(1): 70-73.
- [47] 张坤尹, 严敏, 李树刚, 等. 煤体表面粗糙度对非阳离子表面活性剂润湿性影响的实验研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(11): 8-15.  
ZHANG Kunyin, YAN Min, LI Shugang, et al. Experimental study on the influence of coal surface roughness on wettability of non-cationic surfactants[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(11): 8-15.
- [48] 张雷, 郭建英, 栗蓁, 等. 孔隙结构对低阶煤润湿性影响的分子模拟[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(6): 1117-1127.  
ZHANG Lei, GUO Jianying, LI Bao, et al. Molecular simulation investigation on the effect of pore structure on the wettability of low-rank coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(6): 1117-1127.
- [49] 孟然, 陈昔辉, 张岩, 等. 低阶煤微表面形貌特征对其润湿性影响的试验研究[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2024(3): 45-48.  
MENG Ran, CHEN Xihui, ZHANG Yan, et al. Experimental study on the influence of micro-morphology of low rank coal on its wettability[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2024(3): 45-48.
- [50] 张静娴, 姚朝晖, 郝鹏飞, 等. 复合超疏水表面制备及其上液滴运动特性研究[J]. *应用数学和力学*, 2014, 35(3): 322-330.  
ZHANG Jingxian, YAO Chaohui, HAO Pengfei, et al. Study of preparation and dynamic hydrophobicity of superhydrophobic surfaces with micro-nano textures[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, 35(3): 322-330.
- [51] YU Y, WU Q, WANG X W, et al. Wetting behavior between droplets and dust[J/OL]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(2). DOI: 10.1088/0256-307X/29/2/026802.
- [52] 高宇, 胡祖祥. 温度对表面活性剂溶液润湿性影响规律研究[J]. *节能*, 2024, 43(5): 52-54.  
GAO Yu, HU Zuxiang. Study on the influence of temperature on wettability of surfactant solution[J]. *Energy Conservation*, 2024, 43(5): 52-54.
- [53] RAO D N. Wettability effects in thermal recovery operations[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1999, 2(5): 420-430.
- [54] ESCROCHI M, NABIPOUR M, AYATOLLAHI S, et al. Wettability alteration at elevated temperatures: The consequences of asphaltene precipitation[C/OL]// *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, 2008. DOI: 10.2118/112428-MS.
- [55] ALOTAIBI M B B, NASRALLA R A A, NASR-EL-DIN H A A. Wettability studies using low-salinity water in sandstone reservoirs[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2011, 14(6): 713-725.
- [56] 孙永鑫, 王兆丰, 尉瑞, 等. 覆压及水分对含瓦斯煤体渗吸特性的影响研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2022, 18(1): 114-119.  
SUN Yongxin, WANG Zhaofeng, WEI Rui, et al. Study on influence of overburden pressure and moisture on imbibition characteristics of coal containing gas[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 18(1): 114-119.
- [57] 朱云轩, 李治平. 彭水地区龙马溪组页岩渗吸规律及渗吸动态分布[J]. *计算物理*, 2021, 38(5): 555-564.  
ZHU Yunxuan, LI Zhiping. Imbibition behavior and fluid dynamic distribution of Longmaxi formation shale in Pengshui

- area[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2021, 38(5): 555-564.
- [58] 董家昕. 不含瓦斯重塑煤自发渗吸特征及水分时空分布规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022: 3-4.  
DONG Jiixin. Study on spontaneous imbibition characteristics and temporal-spatial distribution law of moisture in degassed-remodeled coal[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2022: 3-4.
- [59] HANDY L L. Determination of effective capillary pressures for porous media from imbibition data[J]. Transactions of the AIME, 1960, 219(1): 75-80.
- [60] QIN C Z, VAN BRUMMELEN H. A dynamic pore-network model for spontaneous imbibition in porous media[J/OL]. Advances in Water Resources, 2019, 133. DOI: 10.1016/j.advwatres. 2019. 103420.
- [61] FELDMANN F, STROBEL G J, MASALMEH S K, et al. An experimental and numerical study of low salinity effects on the oil recovery of carbonate rocks combining spontaneous imbibition, centrifuge method and coreflooding experiments[J/OL]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 190. DOI: 10.1016/j.petrol. 2020. 107045.
- [62] ZHAO J L, QIN F F, FISCHER R, et al. Spontaneous imbibition in a square tube with corner films: Theoretical model and numerical simulation[J/OL]. Water Resources Research, 2021, 57(2). DOI: 10.1029/2020WR029190.
- [63] ZHANG L Y, YU X R, CHEN Z X, et al. Capillary dynamics of confined water in nanopores: The impact of precursor films[J/OL]. Chemical Engineering Journal, 2021, 409. DOI: 10.1016/j.cej. 2020. 128113.
- [64] 姚艳斌, 刘大猛. 基于核磁共振弛豫谱的煤储层岩石物理与流体表征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 14-22.  
YAO Yanbin, LIU Dameng. Petrophysics and fluid properties characterizations of coalbed methane reservoir by using NMR relaxation time analysis[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 14-22.
- [65] 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]. Modern Geology, 2015, 29(1): 190-197.
- [66] ZHENG H, LIAO R Q, CHENG N, et al. Microscopic mechanism of fracturing fluid imbibition in stimulated tight oil reservoir[J/OL]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 202. DOI: 10.1016/j.petrol. 2021. 108533.
- [67] 杨赫, 程卫民, 刘震, 等. 注水煤体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1279-1286.  
YANG He, CHENG Weimin, LIU Zhen, et al. Fractal characteristics of effective seepage channel structure of water infusion coal based on NMR experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1279-1286.

(责任编辑: 齐敏华)