

低阶煤体瓦斯减阻增渗与强化驱替试验研究

陈 勇^{1,2,3,4}, 王鹏飞^{1,2}, 刘荣华¹, 王 俏¹, 刘开新¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 3. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037; 4. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘 要:为实现低阶煤体瓦斯的减阻增渗与强化驱替, 基于煤体多孔介质本真属性下瓦斯吸附与驱替机理, 首先利用水介质、表面活性剂 CTAB、微纳米气泡的共存特性获得了液气耦合介质, 以环管流量、旋转黏度表征了液气耦合介质的优化性能与提质增效特征; 之后结合渗流瞬时流量、气测渗透率量化了液气耦合介质对低阶煤体瓦斯的减阻增渗与强化驱替效应。结果表明: 质量分数 0.05% 的表面活性剂 CTAB 可有效降低液相表面张力 50.41%, 微纳米气泡可平均降低液相表面张力 5.50 mN/m; 基于表面活性剂 CTAB 与微纳米气泡的表面活性, 液气耦合介质环管流量相对蒸馏水介质、含表面活性剂介质分别增大 1.44、1.27 倍; 转速为 100、200、300、600 r/min 时, 液气耦合介质旋转黏度相对蒸馏水介质分别降低 60.00%、71.43%、50.00%、45.45%, 相对含表面活性剂介质分别降低 42.86%、60.00%、37.50%、25.00%。煤体分别在蒸馏水介质、含表面活性剂水介质、液气耦合介质平衡作用下甲烷渗流驱替时, 随着介质环管流量的增大和旋转黏度的降低, 瞬时流量与气测渗透率呈现逐渐增大的趋势。基于液气耦合介质良好的减阻性能与流动性能, 对长焰煤分别在轴压为 3、5 MPa, 围压为 3、5 MPa 瓦斯驱替时, 瞬时流量相对蒸馏水介质分别增大 1.43、1.67 倍, 气测渗透率相对蒸馏水介质分别增大 1.44、1.68 倍, 且不同轴压、围压之间的渗流差异明显缩小。液气耦合介质进一步活化了表面性能, 在高流量、低黏度作用下实现低阶煤体瓦斯的减阻增渗与强化驱替, 尤其对煤体增渗解吸与抽采达标、高产工作面瓦斯涌出防治具有明确的工程导向。

关键词: 液气耦合; 减阻增渗; 强化驱替; 旋转黏度; 瞬时流量; 渗透率

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)05-2496-13

Experimental study on drag reduction-permeability increase and enhanced displacement of low-rank coal gas

CHEN Yong^{1,2,3,4}, WANG Pengfei^{1,2}, LIU Ronghua¹, WANG Qiao¹, LIU Kaixin¹

(1. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China; 4. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: In order to achieve drag reduction-permeability increase and enhanced displacement of low-order coal gas,

收稿日期: 2024-06-03 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0616

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52274197); 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室开放基金资助项目 (E22226); 中煤科工集团重庆研究院有限公司创新引导资助项目 (2023YBXM32)

作者简介: 陈 勇 (1987—), 男, 湖南湘乡人, 副研究员, 博士。E-mail: tanger324@163.com

通讯作者: 王鹏飞 (1984—), 男, 江西修水人, 教授, 博士。E-mail: pfwang@sina.cn

引用格式: 陈勇, 王鹏飞, 刘荣华, 等. 低阶煤体瓦斯减阻增渗与强化驱替试验研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2496-2508.

CHEN Yong, WANG Pengfei, LIU Ronghua, et al. Experimental study on drag reduction-permeability increase and enhanced displacement of low-rank coal gas[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2496-2508.



移动阅读

based on the mechanism of gas adsorption and displacement under the inherent properties of coal porous media, the liquid-gas coupling medium was firstly obtained by using the coexistence characteristics of water medium, surfactant CTAB and micro and nano bubbles. The optimization performance and quality improvement characteristics of the liquid-gas coupling medium were characterized by the flow rate of the circular pipe and the rotational viscosity. Combined with the instantaneous flow of seepage and gas permeability measurement, the effects of liquid gas coupling medium on reducing drag and increasing permeability and strengthening displacement of low-rank coal gas were quantified. The results show that the liquid phase surface tension can be reduced by 50.41% with 0.05% CTAB and the average liquid phase surface tension can be reduced by 5.50 mN/m with micro-nano bubbles. Based on the surface activity of CTAB and micro and nano bubbles, the annular flow rate of liquid-gas coupled medium increases by 1.44 times and 1.27 times respectively compared with distilled water medium and surfactant containing medium. The rotational viscosity at 100, 200, 300 and 600 r/min decreased by 60.00%, 71.43%, 50.00% and 45.45% compared with distilled water medium and 42.86%, 60.00%, 37.50% and 25.00% compared with surfactant medium respectively. In the case of methane seepage displacement in distilled water medium, water medium containing surfactant and liquid gas coupling medium, the instantaneous flow rate and gas permeability gradually increase with the increase of annular flow and the decrease of rotational viscosity. Based on the good drag reduction and flow performance of the liquid gas coupling medium, when the axial pressure is 3, 5 MPa and confining pressure is 3, 5 MPa, the instantaneous flow rate increases by 1.43 and 1.67 times and the permeability measured by gas increases by 1.44 and 1.68 times respectively compared with the distilled water medium, and the seepage difference between different axial pressure/confining pressure is significantly reduced. The coupling medium of liquid and gas further activates the surface properties, strengthens the drag reduction, permeability increase and displacement of low-grade coal gas under the action of high flow and low viscosity, and has clear engineering guidance for the coal gas increase, desorption and extraction standards, and the gas emission prevention and control of high-yield working face.

Key words: liquid-gas coupling; reduce drag and increase permeability; enhanced displacement; rotational viscosity; instantaneous flow rate; permeability

0 引 言

煤体是一种内含瓦斯且吸附性较强的多孔介质。根据前人研究成果,煤、水、瓦斯共存时,水介质进入煤体发生储层改造的同时在孔裂隙衍生渗吸效应^[1-2]。水分对甲烷解吸的作用机理很复杂,众多研究结论差异明显,甚至出现截然不同的认识。水分对甲烷解吸的促进作用主要表现为“渗流驱替”,但关键在于驱替强度与作用程度的表征。表面活性剂溶于水能够有效改变作用介质的表面张力与接触角,微纳米气泡则是一种可存储于水中、比表面积大、自身溶解增压、微结构表面减阻、自带表面电位的纳米级气泡^[3-5]。

表面活性剂在水溶液中球状胶束过渡成杆状胶束时实现表面活性剂水溶液减阻性能。根据相关研究成果,9 mg/L 聚氧化乙烯水溶液减阻率可高达 60%,水中加入微量聚丙烯酰胺可降阻 50%~80%^[6-7]。戴若丁等^[8]研究表明,流体中加入 PEO 后压差减少、流量增加、流体摩阻力减小。蔡书鹏等^[9-10]研究发现,CTAB/NaSal 水溶液中表面活性剂 CTAB 质量分数分别为 0.01%、0.02%、0.035%、0.05% 时,减阻率分别达到 56%、58%、63%、68%。魏进家等^[11]、MOHSE-

NIPOUR 等^[12]、MATRAS 等^[13]分别研究了 PEO、OTAC、CTAB 混合溶液的减阻性能,发现高分子聚合物与表面活性剂混合溶液减阻效率明显。韩方伟等^[14]研究了表面活性剂脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO₃)对褐煤表面接触的润湿性能及润湿机理。林海飞等^[15]基于多级脉冲超声波对含水煤体的振动和空化复合效应,实现煤体孔隙改造的强化和瓦斯解吸的促进。黄林岗等^[16]基于纳米尺度分子模型分析了煤层水锁效应影响规律,研究发现通过增强水分子与煤层的相互作用可有效缓解水锁效应。陈炫来等^[17]、赵璐等^[18]、MENG 等^[19]、姜丽等^[20]分别开展了表面活性剂十二烷基苯磺酸钠、十六烷基三甲基氯化铵、十二烷基二甲基氧化胺、十二烷基三甲基溴化铵对煤体的润湿性能。朱锴等^[21]、陈绍杰等^[22]、LI 等^[23]开展了表面活性剂抑制瓦斯解吸,减小工作面瓦斯涌出特性的研究。宋金星等^[24]、王恩东等^[25]、LIU 等^[26]、YOU 等^[27]研究了表面活性剂对煤体水锁效应的解除特性,研究表明表面活性剂作用下促进瓦斯解吸的特征。

微纳米气泡具有比表面积大、停留时间长、界面电位高等固有属性,同时可衍生自身增压溶解、产生自由基、强化传质效率等特殊属性^[28]。陈广鹏^[29]研究

发现 CO₂ 微气泡直径小, 比表面积大, CO₂ 微气泡纳米流体可提高采收率。NATAWIJAYA 等^[30]将 CO₂ 微气泡用于混相驱油, 微气泡稳定存在的行为特征提高了 26.38% 的采油量。周利民^[31]、张立娟等^[32]研究了界面纳米气泡特性、水中纳米气泡气体状态与稳定机理。姜羽泽^[33]研究发现微气泡注入壁面形成稳定气膜, 边界层水流速度增大, 近壁面流体黏度和密度降低达到减阻效果。FENG 等^[34]研究发现微气泡体积分数增加, 流体动力黏度显著降低, 在壁面附近聚集并形成界面气泡层达到减阻效果。SONG 等^[35]研究轴对称体上微气泡减阻特性, 发现气泡注入率增加分别表现出微气泡减阻、混合减阻和气泡层减阻。崔蓉^[36]以空气微纳米气泡为基础, 研究了微纳米气泡性能以及低阶煤对刚果红染料吸附性能和效果的影响。李成祥等^[37]研究发现微气泡在表面活性物质静止液相中上升速度与传质速率有所下降, 下降幅度随表面活性物质影响程度的增加而增大。秦尧等^[38]研究发现表面改性剂对微气泡上升速度有略微影响。解辉等^[39]研究了纳米通道表面浸润性对气泡的作用。徐贞等^[40]研究了黏性对含气泡液体中声波传播的

影响。

水介质进入煤体衍生“固液气”耦合环境, 衍生独有且复杂的影响机制^[41-42]。前期研究主要考虑水分、表面活性剂等对煤体瓦斯渗吸的影响, 暂未深入剖析煤体多孔介质本真属性下, 水介质、表面活性剂、微纳米气泡对瓦斯驱替耦合作用机制。基于此, 本文以水介质为载体, 通过融入表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵、微纳米气泡获得液气耦合介质, 并量化表征了液气耦合介质的共存特性与再生属性; 在此基础上, 对比研究了介质改性对煤体瓦斯的渗流驱的影响特性, 基于渗流瞬时流量、气测渗透率分析了液气耦合介质对低阶煤体瓦斯减阻增渗与强化驱替效应。

1 试验材料与试验方案

1.1 试验材料

笔者选取表面活性剂聚丙烯酰胺 (PAM)、聚氧化乙烯 (PEO)、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 与微纳米气泡作为水介质减阻改性研究对象。表面活性剂参数见表 1。试验煤样选自陕西省永陇矿区低变质长焰煤, 制取 $\phi 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 标准型煤试样。

表 1 试验用表面活性剂

Table 1 Parameters of several modifiers

名称	分子式	密度	相对分子质量
聚丙烯酰胺(PAM)	$(\text{C}_3\text{H}_5\text{NO})_n$	1.302 g/cm ³ (23 ℃)	$1 \times 10^4 \sim 6 \times 10^6$
聚氧化乙烯(PEO)	$\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}$	0.930 g/cm ³ (25 ℃)	$1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^7$
十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)	$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$	1.322 g/cm ³ (23 ℃)	364.46

1.2 试验方案

1.2.1 含表面活性剂介质性能表征

表面活性剂聚丙烯酰胺 (PAM)、聚氧化乙烯 (PEO)、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 可溶于水, 基于活性剂良好的活化性能, 与蒸馏水混配后可获得含表面活性剂介质。为确定含表面活性剂介质的减阻性能, 分别针对蒸馏水与上述 3 种表面活性剂在不同质量分数下的混配工作液, 采用 ZNN-D12 旋转黏度计开展 100、200、300、600 r/min 的旋转黏度测试并确定适用的活性剂, 实现含表面活性剂介质旋转黏度性能表征。

在活性剂初选的基础上, 采用 KRUSS K20 表面张力仪测定不同质量分数初选活性剂的表面张力, 实现含表面活性剂介质表面张力性能表征。

1.2.2 含微纳米气泡介质性能表征

液体中气泡直径 100 μm 以下为微米气泡, 直径 100 nm 以下为纳米气泡。微纳米气泡则是气泡发生时直径在数十微米到数百纳米之间的气泡。微纳米

气泡具有比表面积大、停留时间长、界面电位高等固有属性, 同时可衍生增压溶解、产生自由基、强化传质效率等特殊属性。基于微米、纳米级气泡良好的活化性能, 利用 ZJC-NM-200L 型微纳米气泡制备装置产生微纳米气泡并混配于蒸馏水后可获得含微纳米气泡介质。为确定含微纳米气泡介质的减阻性能, 将蒸馏水与微纳米气泡混配后采用 KRUSS K20 表面张力仪开展表面张力测试, 实现含微纳米气泡介质旋转黏度性能表征。

1.2.3 液气耦合介质减阻增效

基于含表面活性剂介质、含微纳米气泡介质的性能表征, 通过蒸馏水、表面活性剂、微纳米气泡混配获得液气耦合介质。通过环管流量、旋转黏度, 开展液气耦合介质减阻增效特性研究。

采用电机、数显流量计、数显压差计、环管、PLC 控制柜、介质搅拌桶等装置自主搭建环管流量试验平台, 分别测试蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质的环管流量。在搅拌桶内承装介质至合适刻

度,之后打开电源,调整电机转速为 25 r/min 开展测试,测试过程确保装置运行 5 min 后开始观测流量数据;试验测试 3 次后取测试平均值作为环管流量取值。

采用 ZNN-D12 旋转黏度计,开展液气耦合介质在 100、200、300、600 r/min 的旋转黏度测试。

1.2.4 渗流驱替试验测试

针对长焰煤 $\phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 标准型煤试样,采用抽真空-加压饱和一体装置实现抽真空与加压饱和;首先将煤样置于饱和室中,连通真空泵以抽气速率 4 L/s 进行抽真空 6 h;之后分别将蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质置于加液罐中,通过加压泵对煤样进行加压饱和并平衡至 1.50 MPa。待煤样完成抽真空与加压饱和后,采用煤体瓦斯渗流驱替试验装置开展不同介质平衡煤样分别在轴压为 3、5 MPa、围压为 3、5 MPa 时,甲烷气体渗流驱替瞬时流量、气测渗透率测试。试验设计见表 2。

煤体瓦斯渗流驱替试验装置是一种对煤体内部气相/液相流动性进行评价的试验仪器,通过试验测试,可确定煤体内部气体/液体流动性。通过渗流驱替试验装置调控气体入口压力,当气体以一定压力通过煤心夹持器时实现固液气耦合渗流,气体经煤心夹持器流出时通过气体流量计采集出气量。减阻环管流量装置、减阻渗流驱替装置如图 1 所示。在试验测试的基础上,根据入口与出口压力、出气量、轴压、围压等数据,确定瞬时流量并计算气体在煤心的渗透率。在瞬时流量、渗透率测试的基础上,还可根据不同轴压、不同围压作用下入口压力对煤体渗透效应进行分析。根据前人研究结果,煤体瓦斯流动符合达西定律,因此,含瓦斯煤体的渗透率可表示为^[43]

$$K = \frac{2Q_0 p_0 \mu L}{(p_1^2 - p_2^2)A} \quad (1)$$

表 2 煤体瓦斯渗流驱替测试

Table 2 Coal gas seepage displacement test

煤质	煤样类型	轴压/MPa	围压/MPa
长焰煤	蒸馏水介质	3	3
	平衡煤样	5	5
	含表面活性剂介质	3	3
	平衡煤样	5	5
	液气耦合介质	3	3
	平衡煤样	5	5

式中: K 为渗透率, 10^{-15} m^2 ; Q_0 为气体流量, cm^3/s ; p_0 为大气压力, Pa; μ 为气体动力黏性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$, 40 °C 时 $\mu=1.1502\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$; L 为煤样试件长度, cm; p_1 为煤样试件进口气体压力, Pa; p_2 为煤样试件出口气体压力, Pa; A 为煤样试件横截面积, cm^2 。

2 试验结果与分析

2.1 含表面活性剂介质性能表征

2.1.1 聚丙烯酰胺 (PAM)

采用 ZNN-D12 旋转黏度计分别对 800 万、1 200 万分子量,质量分数分别为 0.005%、0.01% 的聚丙烯酰胺 (PAM) 与蒸馏水混配溶液,在 100、200、300、600 r/min 的旋转黏度进行了测定。不同分子量、不同质量分数 PAM 与蒸馏水混配溶液和蒸馏水测定结果对比曲线如图 2 所示。

对比发现,随着分子量与质量分数的增大,聚丙烯酰胺 (PAM) 与蒸馏水混配溶液的旋转黏度总体呈现出逐渐增大的趋势。试验配比的 800 万、1 200 万分子量,0.005%、0.01% 质量分数的聚丙烯酰胺 (PAM) 与蒸馏水混配溶液在 100、200、300、600 r/min 的旋转黏度普遍大于蒸馏水。

在同等分子量的前提下,质量分数越小,混合溶

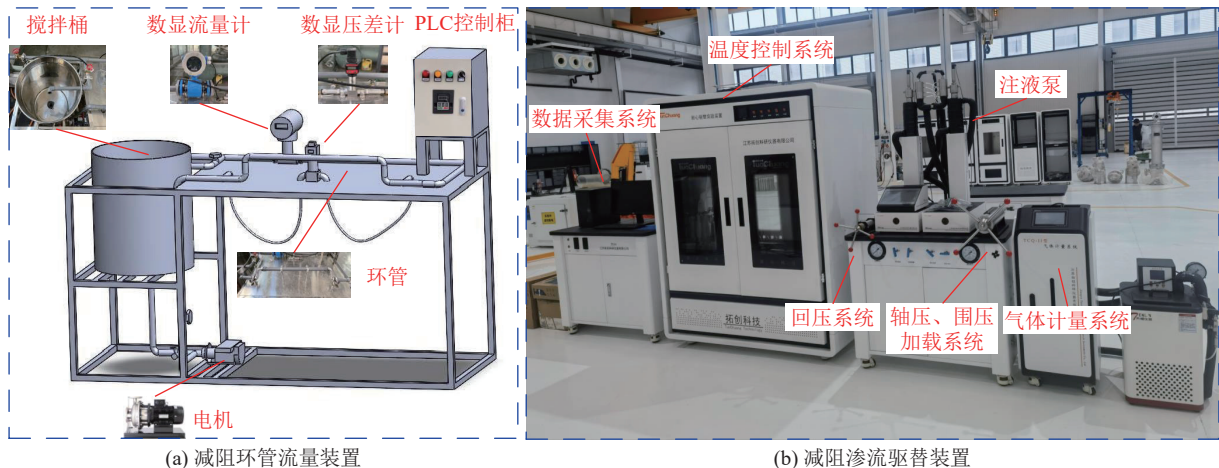


图 1 减阻环管流量与渗流驱替装置

Fig.1 Reducing resistance loop flow and percolation displacement device

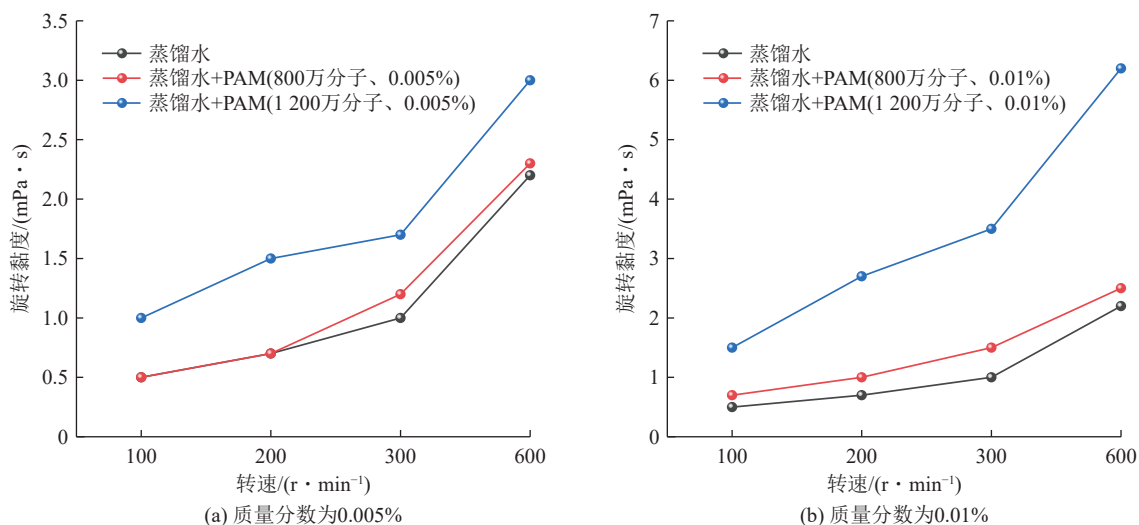


图 2 PAM 混配溶液和蒸馏水旋转黏度对比

Fig.2 Comparison of rotational viscosity of PAM mixture and distilled water

液与蒸馏水之间旋转黏度的差值越小;在同等质量分数的前提下,分子量越小,混合溶液与蒸馏水之间旋转黏度的差值越小。可以看出,聚丙烯酰胺 (PAM) 与蒸馏水混配溶液的旋转黏度与分子量、质量分数呈负相关关系。800 万、1 200 万分子量的聚丙烯酰胺 (PAM) 与蒸馏水混配溶液的旋转黏度普遍大于蒸馏水,且两者之间的差值较大。因此,聚丙烯酰胺 (PAM) 暂不选为煤体渗流驱替改性介质。

2.1.2 聚氧化乙烯 (PEO)

首先采用 ZNN-D12 旋转黏度计分别对质量分数 0.005% 的 1 万、10 万、100 万、200 万、400 万、600 万分子量聚氧化乙烯 (PEO) 与蒸馏水混配溶液,在 100、200、300、600 r/min 的旋转黏度进行了测定,不同分子量 PEO 与蒸馏水混配溶液和蒸馏水旋转黏度测定结果对比曲线如图 3 所示。

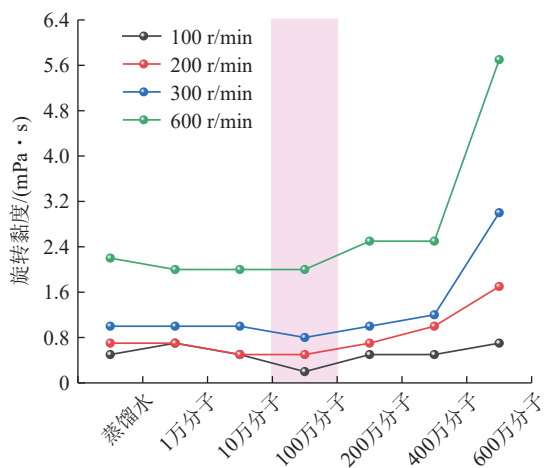


图 3 PEO 混配溶液和蒸馏水旋转黏度

Fig.3 Comparison of rotational viscosity of PEO mixture and distilled water

对比发现,随着分子量的增大,聚氧化乙烯 (PEO) 与蒸馏水混配溶液的旋转黏度总体呈现出逐渐增大的趋势。1 万分子量与 10 万分子量之间的旋转黏度出现小幅波动。当增加到 100 万分子量时,混配溶液在转速大于等于 100 r/min 后的旋转黏度小于蒸馏水;但随着转速的增大,两者之间的差值出现小幅的减小趋势。当继续增加到 200 万分子量时,两者之间的旋转黏度在转速大于 300 r/min 后才出现小幅差值,且大于蒸馏水的旋转黏度。400 万分子量与 600 万分子量混配溶液的旋转黏度,随着转速的增加,与蒸馏水旋转黏度之间的差值呈现增大的趋势。

通过不同分子量 PEO 与蒸馏水混配溶液旋转黏度测试,可以发现 100 万分子量是不同转速下旋转黏度的临界分子量,仅在该配比以下混配溶液呈现出一定的改性效果。因此,聚氧化乙烯 (PEO) 也不是煤体渗流驱替的理想改性介质。

2.1.3 十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB)

在聚丙烯酰胺 (PAM)、聚氧化乙烯 (PEO) 与蒸馏水混配溶液和蒸馏水旋转黏度测试的基础上,采用 ZNN-D12 旋转黏度计对质量分数分别为 0.005%、0.01%、0.02%、0.05% 的十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 与蒸馏水混配溶液,在 100、200、300、600 r/min 后的旋转黏度进行了测定,不同质量分数 CTAB 与蒸馏水混配溶液和蒸馏水旋转黏度测定结果对比曲线如图 4 所示。

根据不同质量分数十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 与蒸馏水混配溶液和蒸馏水旋转黏度测试的对比分析,当质量分数分别为 0.005%、0.01%、0.02%、0.05% 时,混配溶液的旋转黏度均小于蒸馏水。其中,质量分数为 0.005% 的混配溶液表现出更为优越的减

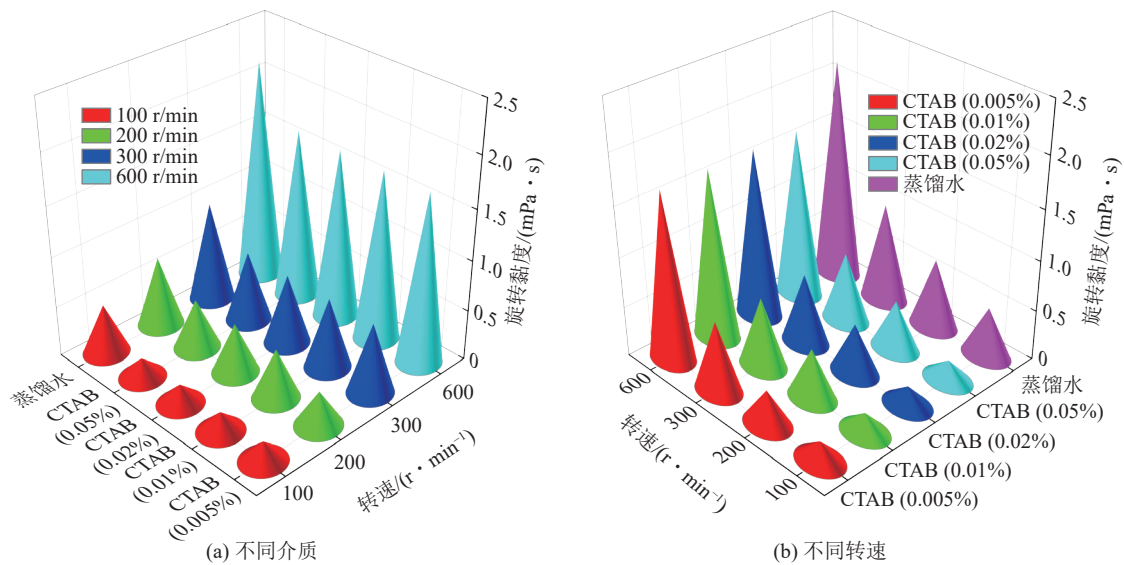


图4 CTAB 混配溶液和蒸馏水旋转黏度

Fig.4 Comparison of rotational viscosity of CTAB mixture and distilled water

阻改性特征;当质量分数为 0.01%~0.05% 时,混配溶液的旋转黏度不再发生变化;不同质量分数混配溶液的旋转黏度差异较小。因此,对于十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 与蒸馏水混配溶液合理配比质量分数可介于 0.005%~0.05%。

2.1.4 表面活性剂确定

根据不同分子量、不同质量分数的表面活性剂聚氧化乙烯 (PEO)、聚丙烯酰胺 (PAM)、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 与蒸馏水混配溶液旋转黏度对比测试与分析,十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 与蒸馏水混配溶液具有更为优化的减阻性能,基于此,选定十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB) 为含表面活性剂介质的优选方案。

2.1.5 含 CTAB 表面活性剂介质表面张力

表面活性减阻剂能够有效地降低流体表面张力,增强流体润湿性,提高流体渗透性和分散性。本文采用表面张力仪对含 CTAB 表面活性剂介质的减阻性能与表面活性在室温 25 ℃ 条件下进行了测定,表面张力变化如图 5 所示。

对比发现,含表面活性剂介质中 CTAB 质量分数分别为 0.000 05%、0.000 5%、0.005%、0.05% 时,表面张力分别为 61.90、50.80、43.60、36.10 mN/m;均小于蒸馏水表面张力 72.80 mN/m,且相对蒸馏水表面张力分别降低 14.97%、30.22%、40.11%、50.41%;其中,质量分数 0.05% 的含表面活性剂介质具有更优化的表面张力。

2.2 含微纳米气泡介质性能表征

2.2.1 含微纳米气泡介质共存特性

利用装置制备微纳米气泡并混配于蒸馏水后,由

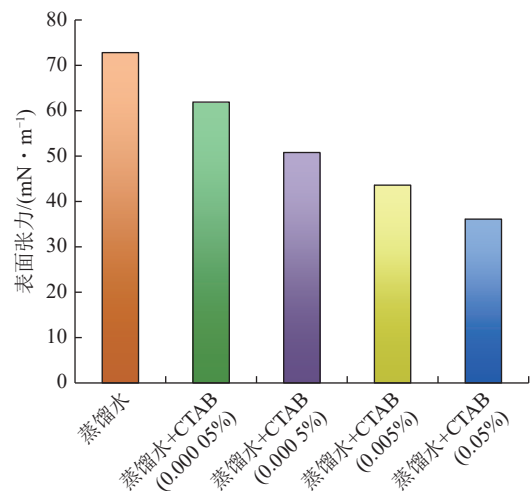


图5 含 CTAB 表面活性剂介质表面张力

Fig.5 Surface tension of media containing CTAB surfactant

于大量微纳米气泡的存在使得含微纳米气泡介质呈现乳白色;随着静置时间的推移,微米级气泡开始剧烈运动并逐渐破灭,介质缓慢变得澄清。通过微纳米气泡时效特性的对比研究,含微纳米气泡介质中微米级气泡半衰期约 2.50 min。含微纳米气泡介质中微米级气泡时效特性如图 6 所示。

对于介质中直径更小的纳米气泡,因气泡体积小则在水中做布朗运动,不上升至水面。纳米级气泡肉眼无法观察,可通过丁达尔效应来检验纳米级气泡的存在。当利用激光通过静置的含微纳米气泡介质时可出现一条清晰明显的光通路,而蒸馏水中未出现光通路。激光在通过不均匀的媒质时,气泡粒径小于入射光的波长而产生光的散射,部分光束被分散传播形成光通路^[6,28,44-45]。因此,通过含微纳米气泡介质丁达

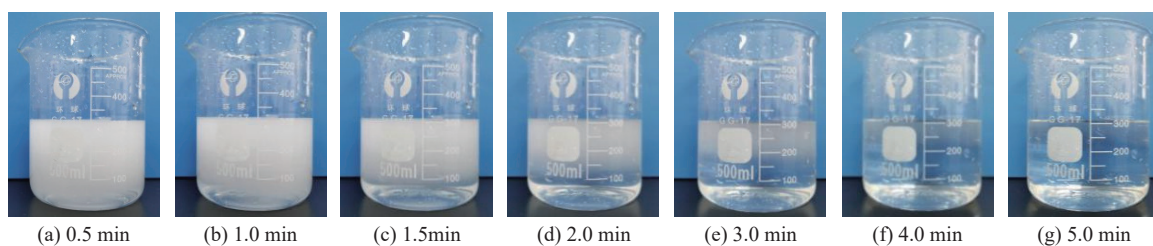


图 6 微米级气泡时效特性

Fig.6 Aging characteristics of micrometer bubbles

尔效应,可确定纳米级气泡可较长时间滞留于水中。含微纳米气泡介质中纳米级气泡时效特性如图 7 所示。

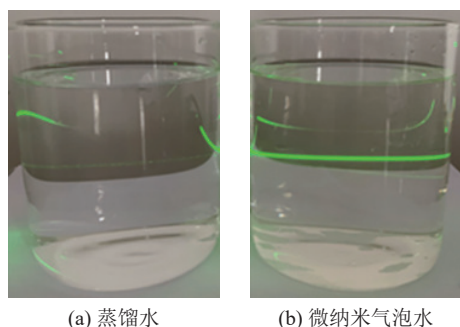


图 7 纳米级气泡时效特性

Fig.7 Aging characteristics of nanoscale bubble

2.2.2 含微纳米气泡介质再生属性

为确定含微纳米气泡介质表面性能,采用表面张力进行了测定。当微纳米气泡融入蒸馏水 15 min 后,含微纳米气泡介质表面张力由 71.80 mN/m 下降到 66.30 mN/m,平均降低 5.50 mN/m;含微纳米气泡介质更利于对煤体润湿与接触。

2.3 液气耦合减阻增效

蒸馏水与表面活性剂、微纳米气泡的单配溶液均能获得较好的性能优化。在此基础上,将蒸馏水、表面活性剂 (CTAB)、微纳米气泡介质混配获得液气耦合介质。

2.3.1 环管流量表征

为获得液气耦合介质减阻性能,采用环管流量试验平台分别对蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质进行了环管流量测试,结果见表 3。

对比发现,蒸馏水流量为 $0.62 \text{ m}^3/\text{h}$;当蒸馏水中融入表面活性剂 CTAB 时,流量增大到 $0.70 \text{ m}^3/\text{h}$ 。随着表面活性剂 CTAB、微纳米气泡的同时融入,液气耦合介质呈现出更为优化的减阻性能,液气耦合介质流量达到 $0.89 \text{ m}^3/\text{h}$;相对蒸馏水介质、含表面活性剂介质的流量分别增大 1.44、1.27 倍。

2.3.2 旋转黏度表征

根据蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质在 100、200、300、600 r/min 的旋转黏度测定

表 3 不同介质环管流量

Table 3 Loop flow of different media

工作介质与配比	流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	差值/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
蒸馏水介质	0.62	—
含表面活性剂介质	0.70	0.08
液气耦合介质	0.89	0.27

结果,如图 8a 所示。当旋转黏度计转速大于等于 100 r/min 并逐渐增大时,液气耦合介质相对蒸馏水介质、含表面活性剂介质呈现出明显的减阻性能。转速为 100、200、300、600 r/min 时,液气耦合介质旋转黏度相对蒸馏水介质分别降低 60.00%、71.43%、50.00%、45.45%,相对含表面活性剂介质分别降低 42.86%、60.00%、37.50%、25.00%。不同介质环管流量、旋转黏度如图 8b 所示。在环管流量的基础上,通过旋转黏度对液气耦合介质的优化性能进行了进一步表征,为后续煤体瓦斯减阻增参与强化驱替奠定了基础。

2.4 不同介质作用下煤体瓦斯渗流特性

针对长焰煤在轴压和围压为 3、5 MPa 时,蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质平衡作用下的甲烷驱替效应进行了研究,结果见表 4,不同介质对煤体瓦斯渗流驱替如图 9 所示。

在轴压为 3、5 MPa,围压为 3、5 MPa 时,蒸馏水介质作用下入口压力均为 1.25 MPa,瞬时流量分别为 2.35、1.96 mL/min,气测渗透率分别为 0.00781×10^{-15} 、 $0.00652 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;含表面活性剂介质作用下入口压力均为 1 MPa,瞬时流量分别为 3.14、2.95 mL/min,气测渗透率分别为 0.01044×10^{-15} 、 $0.00981 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;液气耦合介质作用下入口压力均为 1 MPa,瞬时流量分别为 3.36、3.28 mL/min,气测渗透率分别为 0.01124×10^{-15} 、 $0.01093 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

蒸馏水介质可产生对煤体瓦斯渗流驱替效应,且轴压和围压增大时,煤体瓦斯渗流瞬时流量、气测渗透率明显降低。其中,轴压和围压为 5 MPa 的瞬时流量、气测渗透率相对轴压和围压为 3 MPa 分别降低 16.60%、16.52%。

含表面活性剂介质可一定程度上强化煤体瓦斯

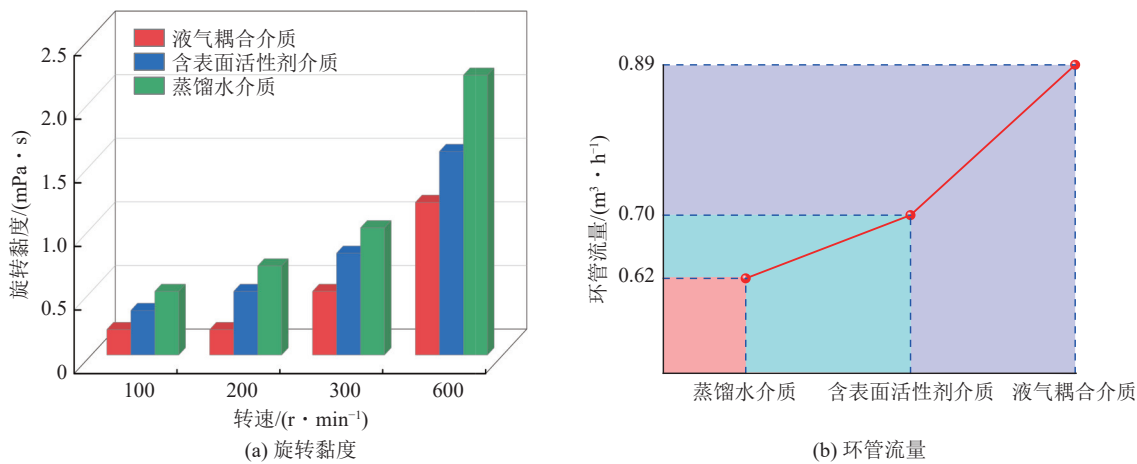


图 8 不同介质环管流量与旋转黏度
Fig.8 Annular flow and rotational viscosity of different media

表 4 不同介质对煤体瓦斯渗流驱替
Table 4 Gas displacement in coal is effected by different media

煤样类型	入口压力/ MPa	出口压力/ MPa	围压/ MPa	轴压/ MPa	瞬时流量/ (mL · min ⁻¹)	气测渗透率/ 10 ⁻¹⁵ m ²
蒸馏水介质	1.25	0.101 3	3.00	3.00	2.35	0.007 81
	1.25	0.101 3	5.00	5.00	1.96	0.006 52
含表面活性剂介质	1.00	0.101 3	3.00	3.00	3.14	0.010 44
	1.00	0.101 3	5.00	5.00	2.95	0.009 81
液气耦合介质	1.00	0.101 3	3.00	3.00	3.36	0.011 24
	1.00	0.101 3	5.00	5.00	3.28	0.010 93

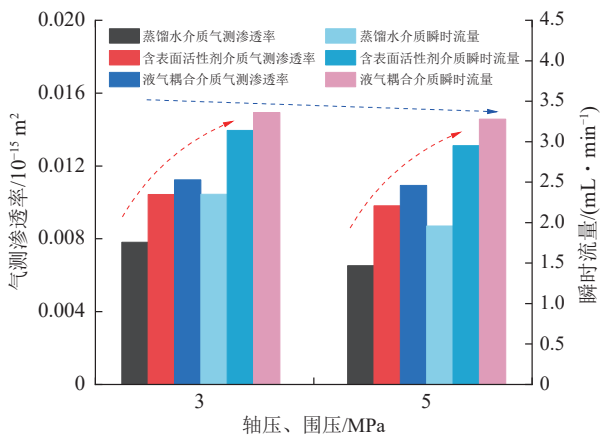


图 9 不同介质对长焰煤瓦斯渗流驱替
Fig.9 Seepage displacement of long flame coal gas by different media

渗流驱替效应,且轴压和围压增大时,煤体瓦斯渗流瞬时流量、气测渗透率之间的差异缩小。其中,轴压和围压为 5 MPa 的瞬时流量、气测渗透率相对轴压和围压为 3 MPa 分别降低 6.05%、6.03%。

液气耦合介质可对煤体瓦斯渗流驱替产生明显的减阻渗流与强化效应,且轴压和围压增大时,煤体瓦斯渗流瞬时流量、气测渗透率之间的差异明显缩小

并趋于接近。其中,轴压和围压均为 5 MPa 的瞬时流量、气测渗透率相对轴压和围压均为 3 MPa 分别降低 2.38%、2.76%。

根据不同介质作用下对煤体瓦斯渗流驱替,表明介质改性优化可进一步提高煤体瓦斯渗流驱替效应。液气耦合介质作用下对长焰煤瓦斯渗流驱替时,瞬时流量、气测渗透率均得到明显提升,且差异进一步减小并基本相近。这与蒸馏水介质、含表面活性剂介质渗流驱替形成鲜明对比,表明液气耦合介质明显提高了煤体瓦斯渗流驱替效应。

3 讨 论

3.1 介质减阻改性衍生的渗流差异

对于煤体瓦斯渗流驱替后的瞬时流量,在轴压和围压均为 3 MPa 时,长焰煤在蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质作用下分别为 2.35、3.14、3.36 mL/min;在轴压和围压均为 5 MPa 时,长焰煤在蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质作用下分别为 1.96、2.95、3.28 mL/min。

对于煤体瓦斯渗流驱替后的气测渗透率,在轴压和围压均为 3 MPa 时,长焰煤在蒸馏水介质、含表面活

性剂介质、液气耦合介质作用下分别为 0.00781×10^{-15} 、 0.01044×10^{-15} 、 $0.01124 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ；在轴压和围压均为 5 MPa 时，长焰煤在蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质作用下分别为 0.00652×10^{-15} 、 0.00981×10^{-15} 、 $0.01093 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。

对比发现，煤体瓦斯在蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质作用下渗流驱替时，瞬时流量、气测渗透率逐渐增大。不同介质作用下长焰煤渗流差异如图 10 所示。

3.2 减阻高流量特性与渗流强度匹配关系

根据 2.3 节中液气耦合介质环管流量测试结果，蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质流量分别为 0.62、0.70、0.89 m^3/h 。对于长焰煤分别在轴压为 3、5 MPa，围压为 3、5 MPa 瓦斯驱替时，蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质之间瞬时流量差值分别为 0.39、0.19、0.08 mL/min 。对于长焰煤分别在轴压为 3、5 MPa，围压为 3、5 MPa 瓦斯驱替

时，蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质之间渗透率差值分别为 0.00129×10^{-15} 、 0.00063×10^{-15} 、 $0.00031 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。气测渗透率环管流量与渗流参数匹配特性如图 11 所示。

对比发现，煤体瓦斯在蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质作用下渗流驱替时，随着介质环管流量的增大，不同轴压和围压下煤体渗流瞬时流量、气测渗透率之间的差异逐渐缩小。基于环管流量表征的介质减阻性能，反映出液气耦合介质对煤体的减阻增渗与强化驱替。

3.3 减阻低黏度特性与渗流强度匹配关系

根据 2.3 节中液气耦合介质旋转黏度测试结果，200 r/min 时蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质旋转黏度分别为 0.70、0.50、0.20 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；600 r/min 时蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质旋转黏度分别为 2.20、1.60、1.20 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。旋转黏度与渗流参数匹配特性如图 12 所示。

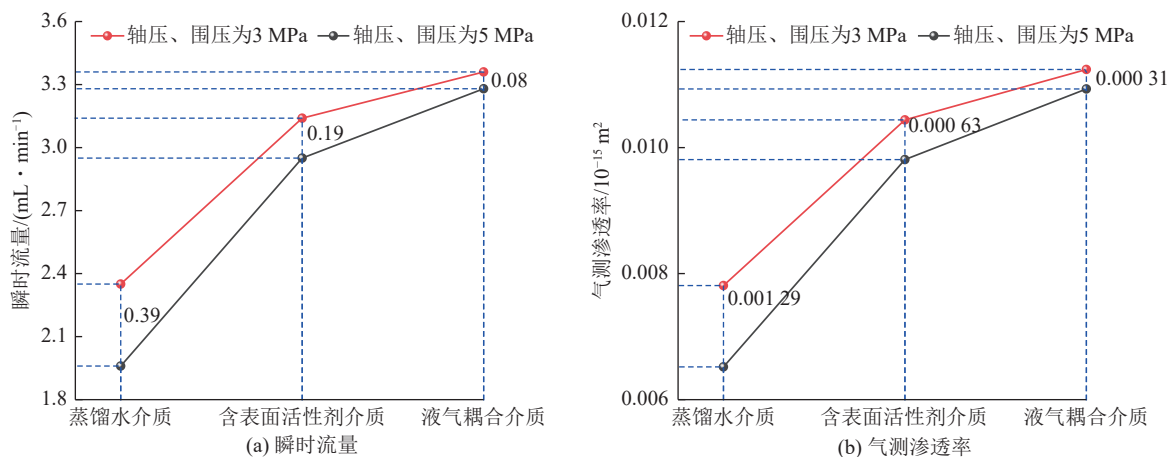


图 10 不同介质作用下长焰煤渗流差异

Fig.10 Differences of long flame coal seepage under different media

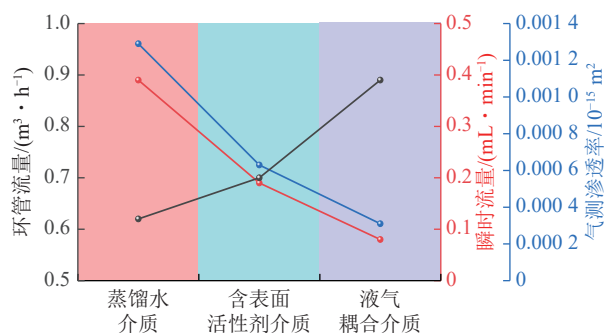


图 11 环管流量与渗流参数匹配特性

Fig.11 Matching characteristics of drag reduction flow rate and seepage parameters in annular pipes

对比发现，煤体瓦斯在蒸馏水介质、含表面活性剂介质、液气耦合介质作用下渗流驱替时，随着介质

旋转黏度的降低，不同轴压和围压下煤体渗流瞬时流量、气测渗透率之间的差异逐渐缩小。基于旋转黏度表征的介质减阻性能，反映出液气耦合介质对煤体的减阻增渗与强化驱替。

3.4 煤体瓦斯减阻增渗与强化驱替量化关系

长焰煤分别在轴压为 3、5 MPa，围压为 3、5 MPa 瓦斯驱替时，蒸馏水介质驱替入口压力均为 1.25 MPa，液气耦合介质驱替入口压力均为 1 MPa。对比发现，液气耦合介质对长焰煤分别在轴压为 3、5 MPa，围压为 3、5 MPa 瓦斯驱替时，入口压力相对蒸馏水介质降低 20%。

长焰煤分别在轴压为 3、5 MPa，围压为 3、5 MPa 瓦斯驱替时，蒸馏水介质驱替瞬时流量分别为 2.35、1.96 mL/min ，液气耦合介质驱替瞬时流量分别为 3.36、

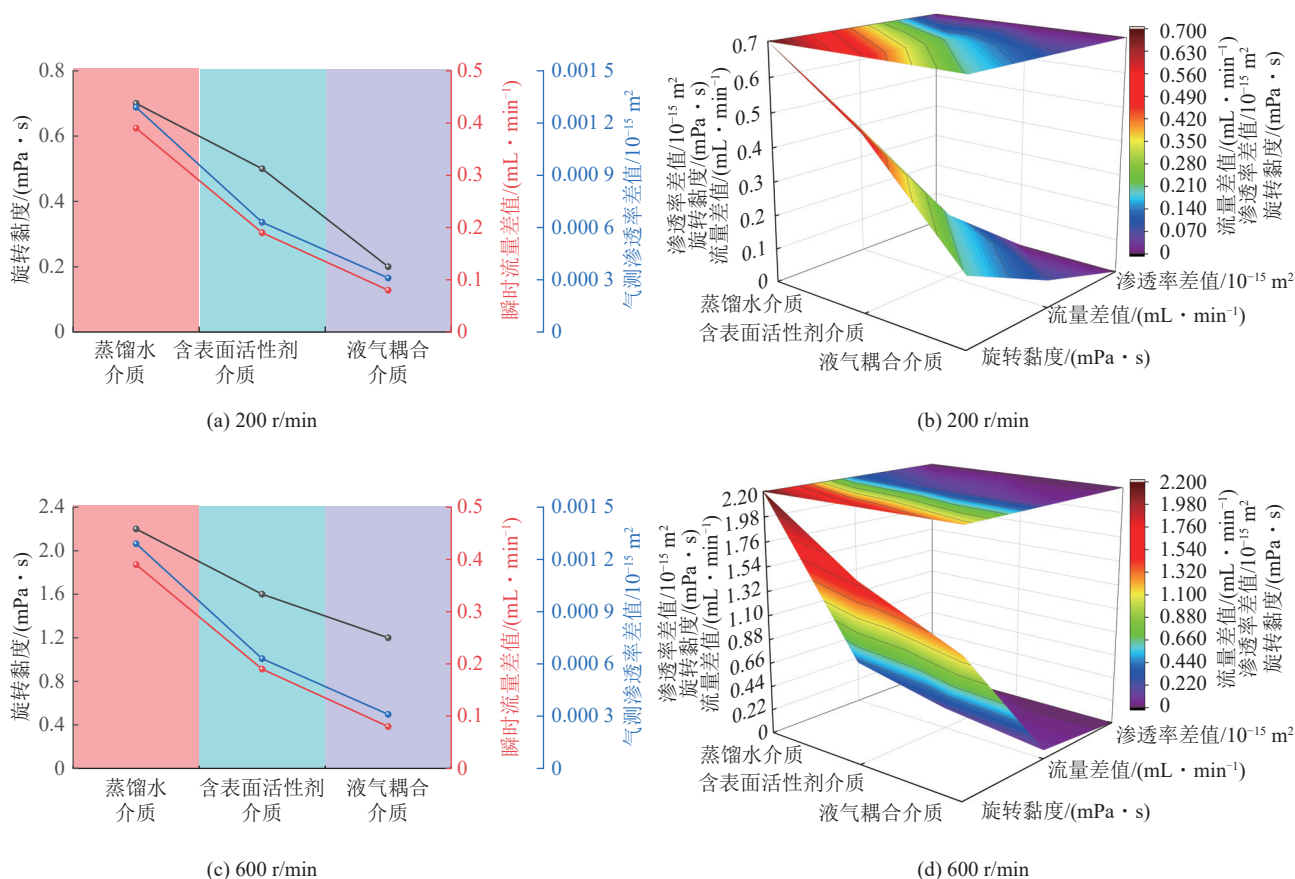


图12 旋转黏度与渗流参数匹配特性

Fig.12 Matching characteristics of rotational viscosity and percolation parameters

3.28 mL/min。对比发现,液气耦合介质对长焰煤分别在轴压 3、5 MPa,围压 3、5 MPa 瓦斯驱替时,瞬时流量相对蒸馏水介质分别增大 1.43、1.67 倍。

长焰煤分别在轴压 3、5 MPa,围压 3、5 MPa 瓦斯驱替时,蒸馏水介质气测渗透率分别为 0.00781×10^{-15} 、 0.00652×10^{-15} m²;液气耦合介质气测渗透率分别为 0.01124×10^{-15} 、 0.01093×10^{-15} m²。对比发现,液气耦合介质对长焰煤在轴压和围压为 3、5 MPa 时,气测渗透率相对蒸馏水介质分别增大 1.44、1.68 倍。液气耦合介质与蒸馏水介质渗流效果对比

如图 13 所示。

3.5 应用机理与展望

研究表明,煤体表面由于较强的残余化学键与较高的表面能,一般具有较强的吸附能力。当煤体中液气耦合介质吸附饱和后形成固液界面之间的纳米结构薄膜并衍生低表面自由能的超疏水表面,进而降低固液分子之间的黏滞力,产生边界滑移效应^[46-47]。在甲烷驱替作用下渗流强度呈现较大幅度提升,促使液气耦合介质在煤体孔隙微尺度下的减阻流动特性。同时,甲烷非极性分子结构特点使其呈现出疏水性,

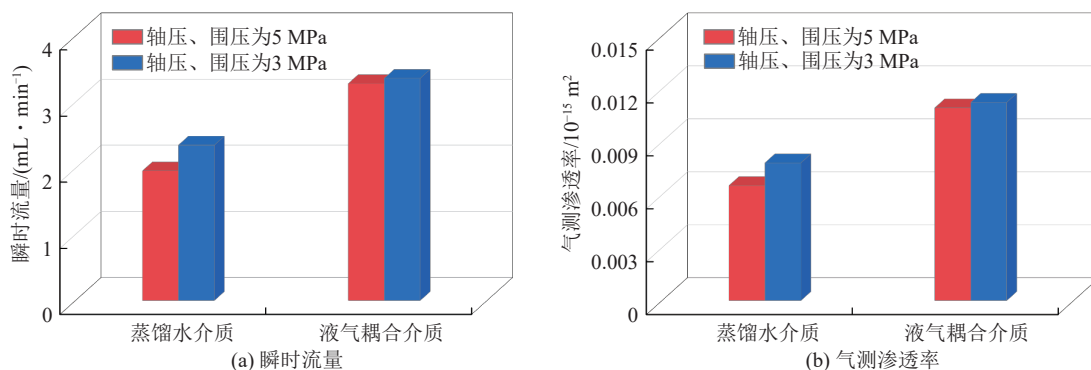


图13 水介质与液气耦合介质渗流对比

Fig.13 Instantaneous flow of water medium and liquid-gas coupling medium

当甲烷分子在煤体孔隙与固液界面纳米结构层共同作用下,呈现出较强的渗流流量与渗透率^[48]。

表面活性剂、微纳米气泡以蒸馏水为载体实现液气耦合后,兼容了表面活性剂高性能润湿煤体、减阻

流体转变等综合性能,衍生明显的提质增效。液气耦合介质在减阻高流量、低黏度特性下实现对煤体瓦斯的减阻增渗与强化驱替。煤体瓦斯减阻增渗与强化驱替如图 14 所示。

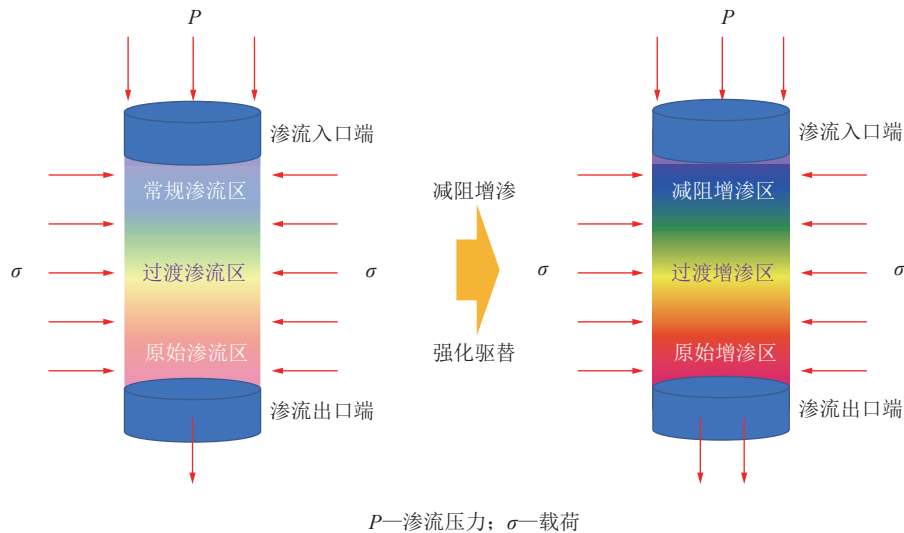


图 14 煤体瓦斯减阻增渗与强化驱替示意

Fig. 14 Schematic diagram of drag reduction, permeability increase and enhanced displacement of coal gas

液气耦合介质对煤体在轴压和围压达到 3、5 MPa 时,明显的减阻增渗与强化驱替效应,侧面反映出以水为载体融入表面活性剂、微纳米气泡后形成的液气耦合介质在 5 MPa 左右可保持作用活性。在此前提下,可将液气耦合介质注入工作面实现对煤体瓦斯减阻增渗与强化驱替工程响应。

4 结 论

1) 基于蒸馏水与表面活性剂、微纳米气泡单配溶液在旋转黏度与表面张力性能的活化特征,将蒸馏水、表面活性剂、微纳米气泡混配获得液气耦合介质,并基于环管流量、旋转黏度实现液气耦合提质增效性能表征。

2) 基于水介质对煤体瓦斯渗流驱替效应,量化了液气耦合介质对煤体瓦斯的渗流驱替强化特性。其中,在轴压为 3、5 MPa,围压为 3、5 MPa 时,液气耦合介质相对蒸馏水介质的入口压力降低 20%,瞬时流量分别增大 1.43、1.67 倍,气测渗透率分别增大 1.44、1.68 倍。

3) 随着液气耦合介质环管流量的增大、旋转黏度的降低,不同轴压和围压下煤体渗流瞬时流量、气测渗透率之间的差异逐渐缩小。基于液气耦合介质良好的减阻性能,分析了减阻高流量、低黏度特性与渗流强度匹配关系。

4) 液气耦合介质衍生明显的提质增效,通过注入

工作面煤体可实现对煤体瓦斯的减阻增渗与强化驱替,进而实现煤体瓦斯强化抽采。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 陈勇.同源抽采与混源抽采工况特性量化表征[J].采矿与安全工程学报,2020,37(4):845-851.
CHEN Yong. Quantitative characterization of working condition characteristic between homologous and mixed source extraction[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 845-851.
- [3] ASIDIN M A, SUALI E, JUSNUKIN T, et al. Review on the applications and developments of drag reducing polymer in turbulent pipe flow[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(8): 1921-1932.
- [4] 李兆军,杜浩.我国微细气泡技术发展综述[J].过程工程学报,2017,17(4):655-663.
LI Zhaojun, DU Hao. Review of the development of fine bubble technology in China[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(4): 655-663.
- [5] 张立娟,方海平,胡钧.纳米气泡的科学之谜[J].物理,2018,47(9):574-583.
ZHANG Lijuan, FANG Haiping, HU Jun. Scientific mysteries of nanobubbles[J]. Physics, 2018, 47(9): 574-583.

- [6] TEMESGEN T, BUI T T, HAN M, et al. Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2017, 246: 40–51.
- [7] ABDULBARI H A, YUNUS R M, ABDURAHMAN N H, et al. Going against the flow: A review of non-additive means of drag reduction[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, 19(1): 27–36.
- [8] 戴若丁, 于开波, 李宏, 等. 聚氧化乙烯减阻效果影响研究[J]. *辽宁化工*, 2021, 50(3): 313–316.
- DAI Ruoding, YU Kaibo, LI Hong, et al. Study on drag reduction effect of polyethylene oxide[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2021, 50(3): 313–316.
- [9] 蔡书鹏, 李大美. CTAB 表面活性剂水溶液的减阻特性[J]. *石油化工高等学校学报*, 2006, 19(4): 68–71.
- CAI Shupeng, LI Damei. Behavior of drag reduction for CTAB surfactant aqueous solution[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2006, 19(4): 68–71.
- [10] 蔡书鹏, 杨林, 唐川林. 边界层中 CTAB 表面活性剂减阻水溶液的湍流特性[J]. *力学学报*, 2008, 40(2): 250–254.
- CAI Shupeng, YANG Lin, TANG Chuanlin. Turbulent characteristics of ctab surfactant solution flows in turbulent boundary layers[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2008, 40(2): 250–254.
- [11] 魏进家, 刘飞, 刘冬洁. 减阻用表面活性剂溶液分子动力学模拟研究进展[J]. *力学学报*, 2019, 51(4): 971–990.
- WEI Jinjia, LIU Fei, LIU Dongjie. Progress in molecular dynamics simulations of surfactant solution for turbulent drag reduction[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(4): 971–990.
- [12] MOHSENIPOUR A A, PAL R. Drag reduction in turbulent pipeline flow of mixed nonionic polymer and cationic surfactant systems[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2013, 91(1): 190–201.
- [13] MATRAS Z, KOPICZAK B. Intensification of drag reduction effect by simultaneous addition of surfactant and high molecular polymer into the solvent[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, 96: 35–42.
- [14] 韩方伟, 胡福宏, 奚志林, 等. AEO₃ 润湿褐煤性能及机理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(10): 3766–3775.
- HAN Fangwei, HU Fuhong, XI Zhilin, et al. Wettability and mechanism of AEO₃ for lignite wetting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(10): 3766–3775.
- [15] 林海飞, 仇悦, 王瑞哲, 等. 多级脉冲超声波激励含水煤体瓦斯解吸特征的试验研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(3): 1403–1413.
- LIN Haifei, QIU Yue, WANG Ruizhe, et al. Experimental study on gas desorption characteristics of hydrous coal by multistage pulsed ultrasonic excitation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1403–1413.
- [16] 黄林岗, 林凌, 罗文嘉. 煤层气中甲烷扩散及水锁效应的分子动力学研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(11): 4124–4134.
- HUANG Lingang, LIN Ling, LUO Wenjia. A molecular dynamics study on coalbed methane diffusion and water-blocking effects[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4124–4134.
- [17] 陈炫来, 严国超, 阳湘琳, 等. SDS/SDBS 对无烟煤润湿性影响的分子动力学模拟[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(12): 185–193.
- CHEN Xuanlai, YAN Guochao, YANG Xianglin, et al. Molecular dynamics simulation of the effect of SDS/SDBS on the wettability of anthracite[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(12): 185–193.
- [18] 赵璐, 张蕾, 文欣, 等. 表面活性剂复配对低阶煤煤尘润湿性的影响[J]. *矿业安全与环保*, 2021, 48(1): 39–43.
- ZHAO Lu, ZHANG Lei, WEN Xin, et al. Study on effect of surfactant mixtures on wettability of low-rank coal dust[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2021, 48(1): 39–43.
- [19] MENG J Q, YIN F F, LI S C, et al. Effect of different concentrations of surfactant on the wettability of coal by molecular dynamics simulation[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(4): 577–584.
- [20] 姜丽, 袁树杰. 生物型表面活性剂在煤表面润湿吸附规律研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(8): 33–37.
- JIANG Li, YUAN Shujie. Research on wetting and adsorbing regularities of bio-surfactants on coal surface[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(8): 33–37.
- [21] 朱锴, 张标, 邱泉玉. 表面活性剂降低瓦斯涌出强度的性能指标研究[J]. *华北科技学院学报*, 2010, 7(1): 32–35.
- ZHU Kai, ZHANG Biao, QIU Quanyu. Researchers on performance of surfactant about decreasing gas emission intensity[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2010, 7(1): 32–35.
- [22] 陈绍杰, 金龙哲, 陈学习, 等. 添加表面活性剂注水对煤体解吸瓦斯的影响分析[J]. *矿业安全与环保*, 2013, 40(6): 12–14.
- CHEN Shaojie, JIN Longzhe, CHEN Xuexi, et al. Analysis on influence of water infusion by adding surfactant upon gas desorption[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2013, 40(6): 12–14.
- [23] LI X C, KANG Y L. Effect of fracturing fluid immersion on methane adsorption/desorption of coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 449–457.
- [24] 宋金星, 于世耀, 苏现波, 等. 表面活性剂压裂液的防水锁增产机理实验[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(2): 98–102.
- SONG Jinxing, YU Shiyao, SU Xianbo, et al. Experimental of water unlocking stimulation mechanism on surfactant fracturing fluid [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(2): 98–102.
- [25] 王恩东, 吴海明, 沈健, 等. 表面活性剂对煤层气解吸能力的影响[J]. *钻采工艺*, 2021, 44(1): 106–109.
- WANG Endong, WU Haiming, SHEN Jian, et al. Influence of surfactant on desorption capacity of coalbed methane[J]. *Drilling & Production Technology*, 2021, 44(1): 106–109.
- [26] LIU Z H, BAI B J, WANG Y L, et al. Experimental study of friction reducer effect on dynamic and isotherm of methane desorption on Longmaxi shale[J]. *Fuel*, 2021, 288: 119733.
- [27] YOU Q, WANG C Y, DING Q F, et al. Impact of surfactant in fracturing fluid on the adsorption–desorption processes of coalbed methane[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 26: 35–41.
- [28] 王鹏飞, 邬高高, 袁新虎, 等. 微纳米气泡强化喷雾降尘试验研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4495–4503.

- WANG Pengfei, WU Gaogao, YUAN Xinhui, et al. An enhanced spray dust suppression method by micro-nano bubbles[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4495–4503.
- [29] 陈广鹏. 混合纳米流体交替 CO₂ 微气泡驱提高采收率机理研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2019.
- CHEN Guangpeng. Experimental study on hybrid nanofluid alternating CO₂ microbubble flooding to enhance heavy oil recovery[D]. Dongying: China University of Petroleum (Huadong), 2019.
- [30] NATAWIJAYA M A, SUGAI Y, ANGGARA F. CO₂ microbubble colloidal gas aphrons for EOR application: The generation using porous filter, diameter size analysis and gas blocking impact on sweep efficiency[J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020, 10(1): 103–113.
- [31] 周利民. 水中纳米气泡的气体状态与稳定机理的探究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海应用物理研究所), 2019.
- ZHOU Limin. Investigation of the gaseous nature and stabilization mechanism of nanobubbles in water[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [32] 张立娟, 胡钧. 界面纳米气泡研究历史和展望[J]. *净水技术*, 2021, 40(2): 2–23.
- ZHANG Lijuan, HU Jun. Research history and prospect of interfacial nanobubbles[J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(2): 2–23.
- [33] 姜羽泽. 微织构表面微气泡减阻特性机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- JIANG Yuze. Study on the mechanism of drag reduction characteristics of microbubbles and micro-grooved surface[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [34] FENG Y Y, HU H, PENG G Y, et al. Microbubble effect on friction drag reduction in a turbulent boundary layer[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 211: 107583.
- [35] SONG W C, WANG C, WEI Y J, et al. The characteristics and mechanism of microbubble drag reduction on the axisymmetric body[J]. *Modern Physics Letters B*, 2018, 32(18): 1850206.
- [36] 崔蓉. 微纳米气泡改善低阶煤及其半焦对刚果红染料吸附效果的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- CUI Rong. Study on the improvement of low-rank coal and its semi-coke adsorption on Congo red dye by micro-nano bubbles[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [37] 李成祥, 崔怡洲, 石孝刚, 等. 表面活性物质影响下单个自由上升微气泡传质过程的直接数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2021, 21(8): 877–886.
- LI Chengxiang, CUI Yizhou, SHI Xiaogang, et al. Direct numerical simulation of mass transfer process of single free rising microbubbles under the influence of surface active materials[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2021, 21(8): 877–886.
- [38] 秦尧, 丁路明, 田立平, 等. 表面活性剂对溶气气浮微气泡特性影响研究[J]. *工业水处理*, 2021, 41(4): 71–77.
- QIN Yao, DING Luming, TIAN Liping, et al. Influence of surface modifier on the characteristics of microbubbles in dissolved air flotation[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(4): 71–77.
- [39] 解辉, 刘朝. 纳米通道内表面浸润性对气泡的作用[J]. *物理化学学报*, 2009, 25(12): 2537–2542.
- XIE Hui, LIU Chao. Effects of surface wettability on bubbles in nanochannels[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2009, 25(12): 2537–2542.
- [40] 徐贞, 张迪, 陈时, 等. 黏性对含气泡液体中声波传播的影响[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(4): 52–60.
- XU Zhen, ZHANG Di, CHEN Shi, et al. Effect of viscosity on propagation properties of acoustic waves in liquids with bubbles[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2018, 48(4): 2018, 48(4): 52–60.
- [41] WANG Z F, SU W W, TANG X, et al. Influence of water invasion on methane adsorption behavior in coal[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 197: 74–83.
- [42] 庄小威, 唐朝, 武海涛. 水分对煤全应力-应变过程渗流特征的影响[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(12): 25–31.
- ZHUANG Xiaowei, TANG Chao, WU Haitao. Influence of moisture on seepage characteristics of coal during total stress-strain process[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(12): 25–31.
- [43] 魏建平, 位乐, 王登科. 含水率对含瓦斯煤的渗流特性影响试验研究[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(1): 97–103.
- WEI Jianping, WEI Le, WANG Dengke. Experimental study of moisture content influences on permeability of coal containing gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(1): 97–103.
- [44] 江玖鸿. 微纳米气泡强化喷雾降尘实验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
- JIANG Jiuhong. Experimental study on micro-nano bubbles strengthening spray dust suppression[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2022.
- [45] 王玉亮. 固液界面纳米气泡与基底相互作用研究及滑移长度测量[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- WANG Yuliang. Study of nanobubble and substrate interaction and measurement of slip length at solid liquid interfaces[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [46] 梁双. 微管中聚丙烯酰胺的减阻特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LIANG Shuang. Investigations on drag reducing with polyacrylamide in microtubes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [47] 王新亮, 狄勤丰, 张任良, 等. 超疏水表面滑移理论及其减阻应用研究进展[J]. *力学进展*, 2010, 40(3): 241–249.
- WANG Xinliang, DI Qinfeng, ZHANG Renliang, et al. Progress in theories of super-hydrophobic surface slip effect and its application to drag reduction technology[J]. *Advances In Mechanics*, 2010, 40(3): 241–249.
- [48] 于广锋, 刘宏伟. 基于滑移理论的超疏水表面减阻性能分析[J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(2): 191–195.
- YU Guangfeng, LIU Hongwei. Analysis on drag reduction of super-hydrophobic surface based on slip theory[J]. *Tribology*, 2013, 33(2): 191–195.