

压裂液矿化度对支撑裂缝及裂隙内煤粉运移的影响

皇凡生^{1,2}, 桑树勋^{1,2,3}, 刘世奇^{1,2}, 陈 强⁴, 周效志³, 王 猛^{1,2,3}

(1. 中国矿业大学 江苏省煤基温室气体减排与资源化利用重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 碳中和研究院, 江苏 徐州 221008; 3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008; 4. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:在煤层气井水力压裂阶段, 支撑裂缝内煤粉沉积以及裂隙内煤粉运移, 将导致支撑裂缝和裂隙渗透率降低, 影响水力压裂改造效果以及后续的煤层气井排采效果。为有效疏通支撑裂缝并避免裂隙堵塞, 从优化压裂液矿化度的视角, 提出了水力压裂阶段支撑裂缝及裂隙内煤粉防控新方法。基于石英砂充填柱和无烟煤样, 分别开展了矿化度逐级递减条件下支撑裂缝及裂隙内煤粉运移实验, 分析了煤粉运移对矿化度变化的响应特征; 采用扩展 Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek(DLVO)理论对煤粉运移进行了模拟, 揭示了矿化度对煤粉运移的影响机制; 并在此基础上, 探究了兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉防控的最优矿化度范围。研究表明: 支撑裂缝及裂隙内煤粉运移均存在临界矿化度现象, 当矿化度低于临界矿化度时, 支撑裂缝渗透率急剧增大, 裂隙渗透率骤然降低, 并伴有大量的煤粉产出; 支撑裂缝内煤粉运移临界矿化度高于裂隙内煤粉运移临界矿化度, 支撑剂表面电负性强于裂隙, 而其疏水性弱于裂隙, 是导致支撑裂缝内煤粉运移临界矿化度偏高的主要原因; 随矿化度的逐级降低, 煤粉与通道间的双电层斥力不断增大, 当矿化度降至临界矿化度时, 双电层斥力开始大于 Lifshitz-van der Waals 引力和 Lewis 酸碱引力之和, 诱发煤粉运移; 理论模型预测的支撑裂缝及裂隙内煤粉运移临界矿化度均与实验结果一致, 证实了模型的可靠性。在水力压裂阶段, 可将压裂液矿化度设计在支撑裂缝与裂隙内煤粉运移临界矿化度之间, 从而促使支撑裂缝内煤粉产出, 并抑制裂隙内煤粉运移, 达到兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉防控的目的。

关键词:煤粉运移; 压裂液; 临界矿化度; 支撑裂缝; 裂隙

中图分类号: P618.11 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)04-1622-12

Impact of salinity of fracturing fluid on the migration of coal fines in propped fractures and cleats

HUANG Fansheng^{1,2}, SANG Shuxun^{1,2,3}, LIU Shiqi^{1,2}, CHEN Qiang⁴, ZHOU Xiaozhi³, WANG Meng^{1,2,3}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Coal-based Greenhouse Gas Control and Utilization, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: During the hydraulic fracturing of coalbed methane (CBM) well, the deposition of coal fines in propped fractures and the migration of coal fines in cleats will damage the permeabilities of propped fractures and cleats, consequently

收稿日期: 2022-07-01 修回日期: 2022-10-08 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0995

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42002182, 42030810, 41727801)

作者简介: 皇凡生 (1988—), 男, 河南商丘人, 副研究员, 硕士生导师, 博士。E-mail: fansheng.huang@cumt.edu.cn

通讯作者: 桑树勋 (1967—), 男, 河北唐山山人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: shxsang@cumt.edu.cn

引用格式: 皇凡生, 桑树勋, 刘世奇, 等. 压裂液矿化度对支撑裂缝及裂隙内煤粉运移的影响[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1622-1633.

HUANG Fansheng, SANG Shuxun, LIU Shiqi, et al. Impact of salinity of fracturing fluid on the migration of coal fines in propped fractures and cleats[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1622-1633.



移动阅读

affecting the hydraulic fracturing and the subsequent drainage of CBM well. For the purpose of dredging propped fractures and avoiding the clogging of cleats effectively, a novel method for the control of coal fines in propped fractures and cleats during hydraulic fracturing was proposed by optimizing the salinity of fracturing fluid. With the salinity decreasing stepwise, the experiments on the migration of coal fines in propped fractures and cleats were conducted on quartz sand-packed columns and anthracite coal plugs, respectively, to investigate the response characteristics of the migration of coal fines to the change of salinity. Additionally, the migration of coal fines was simulated by using the extended DLVO method, to elucidate the influence mechanisms of salinity on the migration of coal fines. On this basis, the optimal salinity range that takes into account the control of coal fines in propped fractures and cleats was explored. The results indicated that there existed a critical salt concentration (CSC) for the migration of coal fines in both propped fractures and cleats. When the salinity was lower than the CSC, the permeability of propped fractures abruptly increased while that of cleats decreased sharply, accompanied by a large amount of coal fines produced. The value of the CSC for the migration of coal fines in propped fractures was higher than that in cleats, which can be attributed to the fact that the surface electronegativity of proppants was stronger than that of cleats, while the hydrophobicity was weaker than that of cleats. With the gradual decrease of salinity, the electric double layer (EDL) repulsive force between coal fines and channel increased continuously. When the salinity decreased to the CSC, the EDL repulsion started to be greater than the sum of Lifshitz-van der Waals attraction and Lewis acid-base attraction, resulting in the migration of coal fines. Both the values of the predicted CSCs for the migration of coal fines in propped fractures and cleats were consistent with experimental data, indicating the effectiveness of the model. During hydraulic fracturing, the salinity of fracturing fluid can be designed between the CSCs for the migration of coal fines in propped fractures and cleats. In that case, the production of coal fines in propped fractures is promoted while the migration of coal fines is inhibited in cleats, so as to achieve the dual purposes of coal fines control in propped fractures and cleats.

Key words: coal fines migration; fracturing fluid; critical salt concentration; propped fracture; cleat

我国煤层气资源十分丰富,其资源量与陆上常规天然气大致相当^[1]。开发与利用煤层气,对于保障清洁能源供应,减少温室气体排放,进而促进“双碳”目标实现,具有十分重要的意义^[2]。煤岩气藏由于其特殊的地质构造及赋存特征,自然产能较低,通常需要水力压裂才能取得工业气流。然而,在水力压裂过程中,由于支撑剂的打磨以及煤层应力状态的改变,极易产生大量次生煤粉^[3-4]。煤粉在支撑裂缝内沉积滞留,将会导致支撑裂缝导流能力降低,影响水力压裂改造效果^[5-7]。另外,煤层割理/裂隙系统发育,压裂液极易大量滤失进入裂隙系统,导致裂隙系统及其内部的原生煤粉表面性能发生改变,从而对煤粉运移产生影响^[8-9]。裂隙内煤粉一旦随压裂液运移,将会堵塞裂隙通道,伤害裂隙渗透率,严重影响煤层气井产能^[10-11]。因此,为了保障煤层气井连续、稳定、高效排采,在水力压裂阶段应兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉的防控,促使支撑裂缝内煤粉产出,并抑制裂隙内煤粉运移,从而有效疏通支撑裂缝和避免裂隙堵塞。

在水力压裂阶段,压裂液流速、矿化度和 pH 是影响煤粉运移的关键工程因素。笔者旨在从优化压裂液矿化度角度,探究水力压裂阶段支撑裂缝及裂隙内煤粉防控对策。目前,国内外学者围绕矿化度对储

层微粒运移的影响(水敏)已开展了大量研究。KHILAR 和 FOGLER^[12], BLUME 等^[13], OCHI 和 VERNOUX^[14], LEVER 和 DAWA^[15]以砂岩储层为对象,揭示了储层微粒运移的临界矿化度现象,即当矿化度低于临界矿化度时,储层渗透率突然大幅降低,产出微粒急剧增多;且研究表明临界矿化度随微粒类型、孔隙介质类型、温度以及溶液化学环境(离子类型、价态和 pH)的变化而变化。田永东和武杰^[16]、于宝石等^[17]、耿昀光等^[18]、KESHAVARZ 等^[19]、WANG 等^[20]基于不同煤阶煤开展了矿化度对裂隙内煤粉运移的影响实验,结果表明裂隙渗透率均随矿化度的降低而不断减小,且水敏伤害程度随煤阶、煤物性、驱替压差及流体 pH 的变化而变化。KESHAVARZ 等^[19]还实验揭示了裂隙内煤粉运移的临界矿化度现象,即当矿化度低于临界值时,裂隙渗透率突然急剧降低。目前,关于矿化度对煤粉运移的影响研究尚存在以下问题:① 现有研究均针对的是裂隙通道,而关于支撑裂缝的研究还鲜有报道;② 矿化度对支撑裂缝及裂隙内煤粉运移的影响机制尚有待揭示。鉴于支撑裂缝及裂隙内煤粉分别与无机支撑剂和有机裂隙接触,且支撑剂与裂隙表面性能不同,笔者推测存在某一最优矿化度区间,可促使支撑裂缝内煤粉排出,而抑制裂

隙内煤粉运移。为此,笔者采用石英砂充填柱和无烟煤样,开展了不同矿化度下支撑裂缝和裂隙内煤粉运移实验,揭示了支撑裂缝及裂隙内煤粉运移临界矿化度;基于扩展 DLVO 理论,分析了矿化度对煤粉运移的影响机制,并对煤粉运移临界矿化度进行了预测;在此基础上,进一步探究了兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉防控的最优矿化度范围。

1 实验材料与方法

1.1 样品制备

实验选用沁水盆地二叠系山西组 3 号煤为研究对象。煤的工业分析、显微组分分析以及 XRD 全岩矿物分析结果见表 1、2。首先从现场获取一定尺寸

的煤块,沿垂直层理方向钻取直径为 2.5 cm、长度为 5.0~7.0 cm 的煤样若干,并采用巴西劈裂法对煤样进行人工造缝,随后用胶带对煤样进行包裹。采用研磨机将现场获取的部分煤块研磨至细微颗粒,鉴于煤层气井产出煤粉粒径范围以 $< 100 \mu\text{m}$ 为主^[21-22],通过振动筛筛析出粒径 $< 62 \mu\text{m}$ 的煤粉,其中值粒径(d_{50})为 $26.8 \mu\text{m}$ 。实验选用的支撑剂类型为标准石英砂,其粒径范围为 $0.425\sim 0.850 \text{ mm}$ (20~40 目), d_{50} 为 0.628 mm , SiO_2 质量分数 $> 99.8\%$,所选用的支撑剂类型及尺寸在现场较为常用^[23]。石英砂在使用前需用浓度 32% 的 HCl 进行酸洗,并用去离子水进行冲洗,以消除其表面杂质的影响。随后,将造缝煤样、煤粉以及支撑剂放入烘箱中 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下干燥保存。

表 1 沁水盆地 3 号煤工业分析及显微组分分析结果

Table 1 Results of proximate and petrographic analyses for No.3 coal of Qinshui Basin %

样品	工业分析			$R_{o,max}$	显微组分分析			
	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}		镜质组	惰质组	壳质组	矿物
沁水3号煤	2.48	10.25	7.39	3.20	80.56	14.09	—	5.35

表 2 沁水盆地 3 号煤 XRD 全岩矿物分析结果

Table 2 Results of mineralogical analyses with XRD tests for No.3 coal of Qinshui Basin %

样品	质量分数						
	石英	方解石	黄铁矿	铁白云石	白云石	黏土	有机质
沁水3号煤	0.06	1.11	0.14	0.07	0.76	4.64	93.22

活性水压裂液为煤层气井常用的压裂液体系,其内部盐分以 KCl 为主^[24]。实验选用一系列不同矿化度的 KCl 溶液作为背景溶液,包括 2.0%、1.5%、1.0%、0.5%、0.25%、0.10%、0.05%、0.02%、0% KCl 溶液,其对应的离子强度分别为 0.27、0.20、0.13、0.067、0.034、0.013、0.006 7、0.002 7、0 mol/L。上述 KCl 溶液均由分析纯级 KCl 和去离子水配置而成,并通过 0.1 mol/L 的 HCl 和 0.1 mol/L 的 NaOH 将溶液 pH 调节至 7.0,使用前需采用 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜对 KCl 溶液进行过滤,并作除气处理,以消除杂质和残余气的影响。

1.2 煤粉运移实验

该部分采用的实验装置如图 1 所示,主要包括岩心夹持器、充填柱、驱替泵、围压泵、馏分收集器、压力传感器、温度控制系统以及数据采集系统等。充填柱为装填有支撑剂的亚克力管,用于模拟支撑裂缝内的支撑剂充填层,亚克力管的内径、长度及厚度分别为 2.5、10.0 和 0.2 cm,且其两端分别放置有 40 目(0.425 mm)的不锈钢滤网,用于阻止支撑剂的流失,而允许煤粉通过;岩心夹持器与充填柱之间属于并联关系,分别用于开展裂隙及支撑裂缝内的煤粉运移物

理模拟实验;驱替泵用于向岩心夹持器内和充填柱内注入不同矿化度的 KCl 溶液,注入模式为恒流模式,围压泵用于为岩心夹持器提供围压;馏分收集器用于定时或定量收集产出液,并通过浊度仪分析产出液中的煤粉浓度;2 个压力传感器分别用于监测岩心夹持器或充填柱进出口端的压力,其中出口端压力设定为大气压;温度控制系统为恒温箱,实验温度设定为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

基于上述实验装置,开展矿化度逐级递减($0.27\sim 0 \text{ mol/L}$)条件下支撑裂缝及裂隙内煤粉运移实验,并通过监测不同矿化度阶段的渗透率及产出煤粉浓度变化,分别确定支撑裂缝及裂隙内煤粉运移临界矿化度。需说明的是实验过程中支撑裂缝及裂隙内流速需远小于煤粉运移的临界流速,以消除流速对临界矿化度判定的干扰。HUANG 等^[25-26]开展了不同流速条件下支撑裂缝及裂隙内煤粉运移实验,依据其设定的实验流量条件,并参考其获得的煤粉运移临界流速结果,此处将不同矿化度阶段的驱替流量均设定为 1 mL/min ,在该流量下均能满足实验流速远小于支撑裂缝及裂隙内煤粉运移临界流速的要求。具体实验步骤如下:

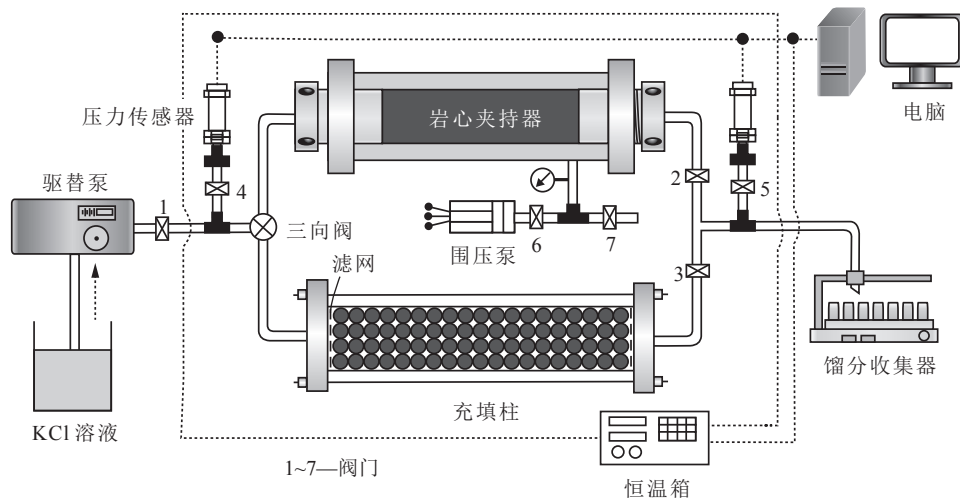


图1 煤层裂隙及支撑裂缝内煤粉运移物理模拟装置示意

Fig.1 Schematic of physical simulator for coal fines migration in coal cleats and propped fractures

(1) 将煤粉与支撑剂进行混合,其中煤粉质量分数为3%,采用湿法将混合物装填至亚克力管内,即向亚克力管内倒入5~10 mL的0.27 mol/L KCl溶液,然后缓慢倒入混合物至液面以下,重复上述步骤,直至装满亚克力管,为保证均匀充填,期间需不间断摇晃亚克力管,随后将制备好的充填柱水平静置48 h,待煤粉充分沉积后,通过称重法确定充填柱孔隙度,并将其安装于系统中。

(2) 对制备好的人工造缝煤样抽真空饱和0.27 mol/L KCl溶液48 h以上,然后将饱和水煤样安装于岩心夹持器中,开启围压泵和恒温箱,对煤样施加5 MPa的围压,并将系统温度调节至25 ℃。

(3) 开启驱替泵,按矿化度逐级递减的顺序,依次向充填柱内注入0.27、0.20、0.13、0.067、0.034、0.013、0.006 7、0.002 7、0 mol/L的KCl溶液,各阶段的驱替流量均为1 mL/min,驱替液量为10倍的孔隙体积(PV),采用馏分收集器连续收集产出液,并通过浊度仪分析产出液浊度,同时全程监测充填柱两端的压差变化,基于达西定律计算不同矿化度阶段的充填柱渗透率比 k_p/k_{p0} 。

(4) 开启驱替泵,向煤样中依次注入0.27、0.20、0.13、0.067、0.034、0.013、0.006 7、0.002 7、0 mol/L的KCl溶液,各阶段的驱替流量均为1 mL/min,驱替液量为10 PV,连续收集产出液,分析产出液的浊度,并全程监测煤样两端的压差变化,计算不同矿化度阶段的煤样渗透率比 k_f/k_{f0} 。

(5) 基于浊度与浓度间的校准曲线,将产出液浊度转化为煤粉质量浓度,绘制不同矿化度阶段充填柱和煤样的产出煤粉浓度及渗透率比随注入体积的变化关系曲线,并以产出煤粉峰值浓度或渗透率比急剧变

化为判定依据,分别确定充填柱和煤样内煤粉大规模运移时的临界矿化度 C_{cp} 和 C_{cf} 。

1.3 表面化学性能分析

1.3.1 Zeta 电位测试

采用微电泳仪(Zeta-PALS,美国Brookhaven公司)对煤岩及支撑剂表面的Zeta电位进行测定,测试温度为25 ℃,测试介质为0.27、0.20、0.13、0.067、0.034、0.013、0.006 7、0.002 7、0 mol/L KCl溶液,测试介质pH均为7.0左右。为测定煤岩及支撑剂表面的Zeta电位,需首先将样品研磨至粒径小于10 μm,然后将其倒入测试介质中超声波分散10 min左右,取1 mL的悬浮液开展电泳测试,每个样品测试次数为5~7次,测试结果取其平均值。最后,通过Smoluchowski公式将电泳转化为Zeta电位^[27]。

1.3.2 接触角测试

采用滴座法测量煤岩及支撑剂表面的接触角,测试仪器为光学接触角测量仪(DSA100,德国Kruś公司),选用的探测液体包括2种极性液体(去离子水和甲酰胺)和一种非极性液体(二碘甲烷)。为测试煤岩及支撑剂表面的接触角,需首先采用压片机将样品压制成直径15 mm、厚度5 mm的薄片,压片机施加压力为40 MPa;然后,将制备好的样品薄片放置于载物台上,用微量进样器将0.5 μL探测液体滴至薄片表面,测试其接触角。对于每种探测液体,测试5~7个不同位置处的接触角,测试结果取其平均值。

2 理论分析

2.1 表面能的计算

根据Van Oss理论,固体的表面能可分为非极性Lifshitz-van der Waals(LW)分量和极性Lewis酸碱

(AB) 分量, 其中 AB 分量又可分为电子供体分量和电子受体分量, 各分量间的关系式^[28] 为

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + \sqrt{\gamma^+ \gamma^-} \quad (1)$$

其中, γ 、 γ^{LW} 、 γ^{AB} 、 γ^- 和 γ^+ 分别为表面能的总量、LW 分量、AB 分量、电子供体分量和电子受体分量, J/m^2 。固体表面能参数可基于 3 种已知表面能参数的探测液体在其表面的接触角, 采用杨氏方程^[28] 计算得到

$$(1 + \cos \theta) \gamma_l = 2 \left(\sqrt{\gamma_s^{LW} \gamma_l^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^- \gamma_l^+} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} \right) \quad (2)$$

式中, θ 为探测液体的接触角, ($^\circ$); 脚标 l 和 s 分别代表液体和固体。

另外, 固体表面的润湿性可由 ΔG_{sls} 表示 (正值表示亲水, 负值表示疏水), 其计算公式^[28] 为

$$\Delta G_{sls} = -2 \left(\sqrt{\gamma_l^{LW}} - \sqrt{\gamma_s^{LW}} \right)^2 - 4 \left(\sqrt{\gamma_l^+ \gamma_l^-} + \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_s^-} - \sqrt{\gamma_l^+ \gamma_s^-} - \sqrt{\gamma_s^+ \gamma_l^-} \right) \quad (3)$$

2.2 扩展 DLVO 理论

矿化度扰动诱发煤粉运移可用扩展 DLVO 理论进行定量表征。根据扩展 DLVO 理论, 煤粉与通道间的总位能为双电层 (EDL) 斥力位能、LW 引力位能、AB 相互作用位能和 Born 斥力位能之和^[29], 即

$$\Phi_a(z) = \Phi_{EDL}(z) + \Phi_{LW}(z) + \Phi_{AB}(z) + \Phi_{BR}(z) \quad (4)$$

式中, Φ_a 为煤粉与通道表面间的总位能, J ; Φ_{EDL} 、 Φ_{LW} 、 Φ_{BR} 、 Φ_{AB} 分别为 EDL 斥力位能、LW 引力位能、Born 斥力位能和 AB 相互作用位能, J ; z 为煤粉与通道表面间的分离距离, m 。

假设裂隙面为平板, 煤粉及支撑剂形状为球形, 忽略表面非均质性。煤粉-裂隙体系以及煤粉-支撑剂体系均可看作颗粒-平板体系。对于颗粒-平板体系而言, Φ_{EDL} 、 Φ_{LW} 、 Φ_{AB} 和 Φ_{BR} 的表达式^[28-29] 分别为

$$\Phi_{EDL} = \pi \varepsilon_r \varepsilon_0 r \left\{ \left(\zeta_1^2 + \zeta_2^2 \right) \ln [1 - \exp(-2\kappa z)] + 2\zeta_1 \zeta_2 \ln \left[\frac{1 + \exp(-\kappa z)}{1 - \exp(-\kappa z)} \right] \right\} \quad (5)$$

$$\Phi_{LW} = -\frac{A_{132}}{6} \left[\frac{2r(z+r)}{z(z+2r)} - \ln \left(\frac{z+2r}{z} \right) \right] \quad (6)$$

$$\Phi_{AB} = 2\pi r \lambda_{AB} \Phi_{AB(z=z_0)} \exp \left(\frac{z_0 - z}{\lambda_{AB}} \right) \quad (7)$$

$$\Phi_{BR} = \frac{A_{132} \delta^6}{7560} \left[\frac{8r+z}{(2r+z)^7} + \frac{6r-z}{z^7} \right] \quad (8)$$

其中, ε_r 为水的相对介电常数, 取值为 78.5; ε_0 为真空介电常数, 取值为 $8.854 \times 10^{-12} C/(V \cdot m)$; r 为颗粒半

径, m ; ζ 为 Zeta 电位, V ; 脚标 1、2、3 分别代表颗粒、平板和水; κ 为双电层厚度倒数, m^{-1} ; A_{132} 为 Hamaker 常数, J/m^2 ; λ_{AB} 为水的衰减长度, 取值为 1.0 nm; δ 为分子碰撞半径, 取值为 0.5 nm; z_0 为最小分离距离, 取值为 0.158 nm; $\Phi_{AB(z=z_0)}$ 为 $z=z_0$ 时的 AB 相互作用能, J/m^2 。 κ 、 A_{132} 和 $\Phi_{AB(z=z_0)}$ 的计算公式^[28-29] 分别为

$$\kappa = \sqrt{\frac{2000e^2 N_A I}{\varepsilon_r \varepsilon_0 k_b T}} \quad (9)$$

$$A_{132} = 24\pi z_0^2 \left(\sqrt{\gamma_1^{LW}} - \sqrt{\gamma_3^{LW}} \right) \left(\sqrt{\gamma_2^{LW}} - \sqrt{\gamma_3^{LW}} \right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{AB(z=z_0)} = & 2 \left(\sqrt{\gamma_1^+} - \sqrt{\gamma_2^+} \right) \left(\sqrt{\gamma_1^-} - \sqrt{\gamma_2^-} \right) - \\ & 2 \left(\sqrt{\gamma_3^+} - \sqrt{\gamma_2^+} \right) \left(\sqrt{\gamma_3^-} - \sqrt{\gamma_2^-} \right) - \\ & 2 \left(\sqrt{\gamma_1^+} - \sqrt{\gamma_3^+} \right) \left(\sqrt{\gamma_1^-} - \sqrt{\gamma_3^-} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, e 为电子的电荷, 取值为 $1.60 \times 10^{-19} C$; N_A 为阿伏伽德罗常数, 取值为 $6.02 \times 10^{23} mol^{-1}$; I 为水溶液的离子强度, mol/L ; k_b 为玻尔兹曼常数, 取值为 $1.38 \times 10^{-23} J/K$; T 为绝对温度, 本文取值 298 K。

3 结果与讨论

3.1 表面性能测试结果

由于煤粉与裂隙同源, 笔者假设煤粉及裂隙的表面化学性能 (Zeta 电位和润湿性) 均与煤岩相同。实验测得的 3 种探测液体 (去离子水、甲酰胺和二碘甲烷) 在煤粉、裂隙及石英砂支撑剂表面的接触角见表 3。将 3 种探测液体的接触角及其表面能分量分别代入式 (2), 通过求解三元一次方程组可得煤粉、裂隙与支撑剂的表面能分量, 见表 3。煤粉、裂隙及支撑剂表面能的 LW 分量 γ^{LW} 与电子供体分量 γ^- 均比电子受体分量 γ^+ 大 2 个数量级, 表明煤粉、裂隙及支撑剂表面均具有明显的非极性特征和电子供体特征^[28]。将煤粉、裂隙、支撑剂以及去离子水的表面能参数代入式 (3), 可进一步得到煤粉、裂隙以及支撑剂的 ΔG_{sls} (表 3)。煤粉与裂隙的 ΔG_{sls} 均为 $-30.36 J/m^2$, 表现出疏水性, 而支撑剂的 ΔG_{sls} 为 $18.97 J/m^2$, 表现出亲水性, 该分析结果与去离子水的接触角表征结果基本一致。煤粉、裂隙与支撑剂表面的 Zeta 电位随溶液矿化度的变化关系曲线如图 2 所示。煤粉、裂隙以及支撑剂表面均具有明显的电负性, 其 Zeta 电位绝对值均随矿化度的增大而不断减小, 且表现出明显的阶段性特征, 即在低矿化度范围内 Zeta 电位绝对值的变化速率要远大于高矿化度范围内的变化速率。

表 3 煤粉、裂隙和支撑剂的接触角、表面能参数及 ΔG_{sls}

Table 3 Contact angles, surface energy parameters, and ΔG_{sls} of fines, cleats and proppants

介质	接触角/(°)			表面能分量/($\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$)			$\Delta G_{sls}/(\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2})$
	去离子水	甲酰胺	二碘甲烷	γ^{LW}	γ^+	γ^-	
煤粉	64.23	42.18	37.01	41.08	0.63	13.12	-30.36
裂隙	64.23	42.18	37.01	41.08	0.63	13.12	-30.36
支撑剂	35.04	29.61	35.98	41.57	0.43	42.11	18.97

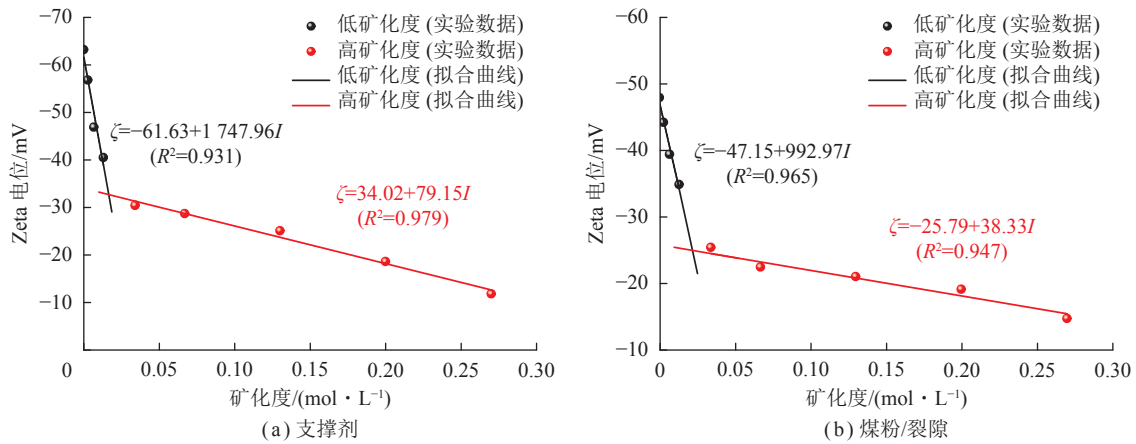


图 2 表面 Zeta 电位随溶液矿化度变化关系曲线

Fig.2 Curves of surface Zeta potential changing with salinity of solution

对图 2 中低矿化度区以及高矿化度区的 Zeta 电位数据进行线性拟合, 得到的拟合关系式如下所示, 其拟合曲线的相关系数 R^2 均大于 0.93。

支撑剂:

$$\begin{cases} \zeta = -61.63 + 1747.96I, & 0 \leq I \leq 0.017 \text{ mol/L} \\ \zeta = -34.02 + 79.15I, & 0.017 \text{ mol/L} < I \leq 0.27 \text{ mol/L} \end{cases} \quad (12)$$

煤粉/裂隙:

$$\begin{cases} \zeta = -47.15 + 992.97I, & 0 \leq I \leq 0.022 \text{ mol/L} \\ \zeta = -25.79 + 38.33I, & 0.022 \text{ mol/L} < I \leq 0.27 \text{ mol/L} \end{cases} \quad (13)$$

3.2 煤粉运移实验结果

不同矿化度阶段充填柱及煤样产出煤粉浓度和渗透率比 (k_p/k_{p0} 和 k_f/k_{f0}) 随注入体积的变化关系如图 3 所示。在各矿化度阶段, 充填柱及煤样的产出煤粉浓度均在 2.5~3.0 PV 内增加至峰值, 随后逐渐降低, 并在 4~5 PV 处达到平衡, 且伴随煤粉的产出, 充填柱及煤样渗透率均不断变化, 并最终达到平衡。不同矿化度阶段充填柱和煤样的产出煤粉峰值质量浓度及平衡渗透率如图 4 所示。充填柱和煤样的渗透率对矿化度的响应特征截然不同, 随矿化度的逐级降低, 充填柱渗透率不断增加, 而煤样渗透率却不断降低, 其原因为实验用的煤粉粒径 $d_c=26.8 \mu\text{m}$, 而支撑剂粒

径 $d_p=0.628 \text{ mm}$, 其粒径比 $d_c/d_p = 0.043$, 远小于颗粒堵塞的临界粒径比 0.154, 故煤粉在充填柱内不易形成堵塞, 充填柱渗透率随煤粉的运移产出不断增大, 而煤样中的煤粉与裂隙尺寸接近, 煤粉一旦运移, 极易诱发裂隙堵塞, 导致渗透率的降低^[30]。除煤粉运移因素外, 矿化度降低导致黏土矿物(蒙脱石、伊利石等)水化膨胀, 也是诱发煤样渗透率降低的原因之一, 但鉴于无烟煤中膨胀性黏土矿物含量低, 水化膨胀伤害通常较弱^[10,16-17]。上述的产出煤粉质量浓度和渗透率演化特征表明, 随矿化度的逐级降低, 充填柱及煤样内煤粉在各矿化度阶段均有不同程度的运移。

对于充填柱而言, 当矿化度由 0.27 mol/L 逐级降至 0.13 mol/L 时, 产出煤粉峰值质量浓度和渗透率均小幅增加, 表明在该矿化度范围内仅有少量煤粉运移, 而当矿化度由 0.13 mol/L 降至 0.067 mol/L 时, 产出煤粉峰值质量浓度由 3.44 g/L 急剧增加至 22.75 g/L, 渗透率比由 1.13 增加至 1.64, 其峰值质量浓度和渗透率增幅分别为 561.3% 和 45.1%, 表明在该矿化度阶段煤粉发生大规模运移(图 4(a))。对于煤样而言, 当矿化度由 0.27 mol/L 逐级降至 0.034 mol/L 时, 产出煤粉峰值质量浓度和渗透率也均小幅变化, 而当矿化度由 0.034 mol/L 降至 0.013 mol/L 时, 产出煤粉峰值质量浓度由 0.42 mg/L 骤然增加至 2.65 mg/L, 其增幅为 530.9%, 而渗透率比由 0.84 降至 0.43, 其降幅为

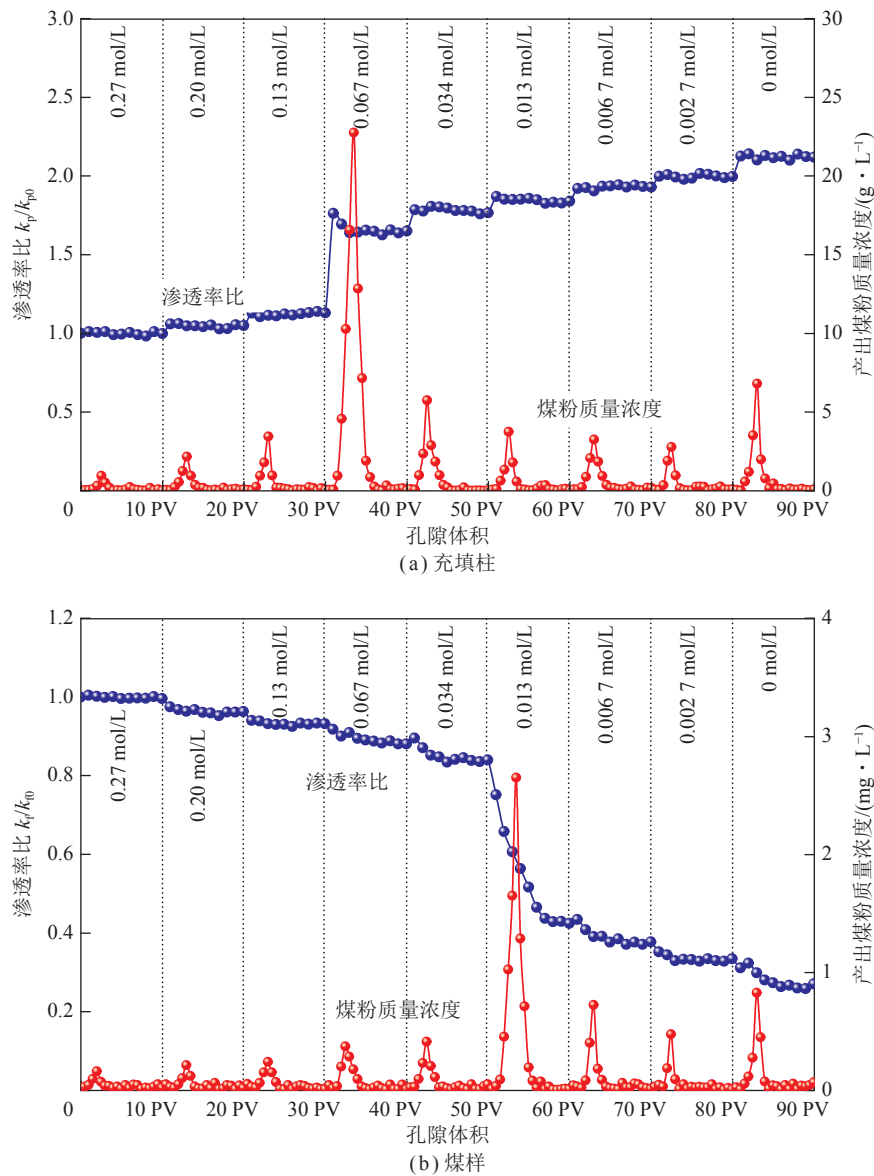


图 3 不同矿化度阶段产出煤粉质量浓度及渗透率比变化曲线

Fig.3 Curves of effluent concentration and permeability ratio at various salinity stages

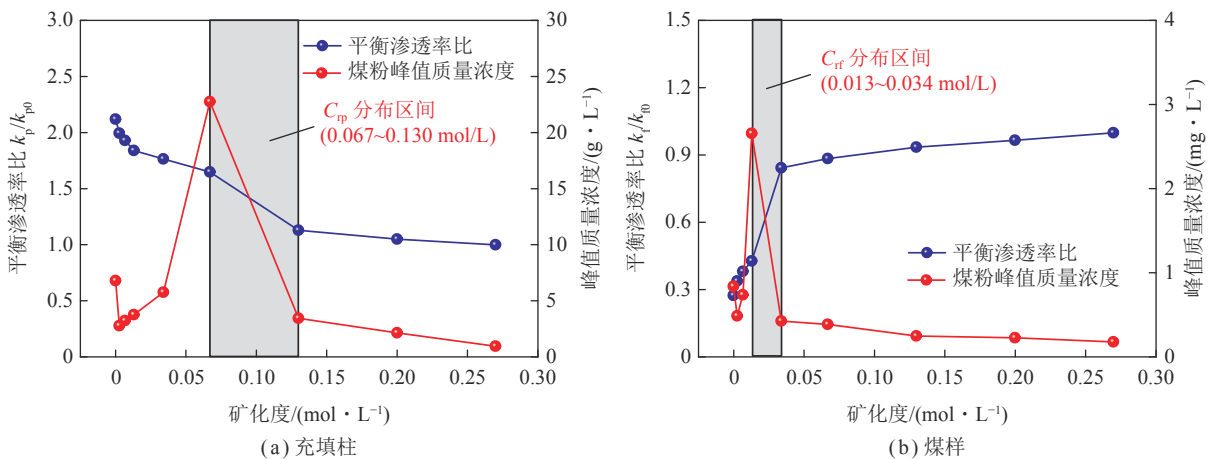


图 4 不同矿化度阶段的产出煤粉峰值质量浓度和平衡渗透率比

Fig.4 Peak concentration and equilibrium permeability ratio at various salinity stages

48.8%(图 4(b))。结果表明, 尽管在各矿化度阶段充填柱及煤样内均有不同程度的煤粉运移, 但存在一个临界矿化度使得煤粉发生大规模运移, 导致渗透率急剧变化, 产出煤粉骤然增多; 充填柱和煤样内煤粉运移临界矿化度分别介于 0.067~0.130 mol/L 和 0.013~0.034 mol/L。对比可知, 充填柱内煤粉运移的临界矿化度高于裂隙内煤粉运移的临界矿化度。支撑剂与裂隙间的表面 Zeta 电位及润湿性差异是导致临界矿化度不同的主要原因。由于支撑剂表面电负性强于裂隙, 而其疏水性弱于裂隙, 使得煤粉-支撑剂间的斥力作用大于煤粉-裂隙体系, 而引力作用小于煤粉-裂隙体系, 故充填柱内煤粉运移临界矿化度要高于裂隙内煤粉。

煤粉包括有机质颗粒、无机矿物颗粒以及有机质-无机矿物复合颗粒, 由于不同类型煤粉的表面化学性能不同, 其运移临界矿化度也将有所差异^[10,13]。此外, 煤粉形状极不规则, 且煤粉与通道表面还具有物理非均质性(粗糙不平)和化学非均质性(Zeta 电位和润湿性分布不均), 即使相同类型的煤粉, 其运移临界矿化度也将有所不同^[26]。因此, 在各矿化度阶段, 充填柱

及煤样内均观测到了不同程度的煤粉运移。需说明的是此处的煤粉运移临界矿化度值是在 KCl 溶液、中性 pH 以及 25 °C 温度条件下测得的。若溶液离子类型、价态、pH 以及温度条件发生变化, 充填柱及煤样内煤粉运移临界矿化度也将随之改变^[12,31]。

3.3 扩展 DLVO 分析结果

该部分采用扩展 DLVO 理论对支撑裂缝及裂隙内煤粉运移进行模拟, 并对煤粉运移临界矿化度进行预测。将支撑剂、裂隙和煤粉的表面能分量及 Zeta 电位数据代入式 (4)~(11), 计算可得不同矿化度下 (0.200~0.013 mol/L) 煤粉-支撑剂与煤粉-裂隙体系的总位能剖面, 如图 5 所示。其中, 选取的煤粉粒径为 26.8 μm, 不同矿化度下支撑剂、裂隙和煤粉的 Zeta 电位由式 (12)~(13) 计算得到。不同矿化度下煤粉-支撑剂和煤粉-裂隙体系的双电层厚度 κ^{-1} 及其位能剖面特征参数 (第 1 最低位能穴 $\Phi_{a,min1}$ 、第 2 最低位能穴 $\Phi_{a,min2}$ 和斥力势垒 $\Phi_{a,barrier}$) 见表 4, 其中 κ^{-1} 由式 (9) 计算得到, $\Phi_{a,min1}$ 、 $\Phi_{a,min2}$ 和 $\Phi_{a,barrier}$ 由图 5 提取得到。

由图 5(a) 可知, 当矿化度为 0.20 和 0.13 mol/L

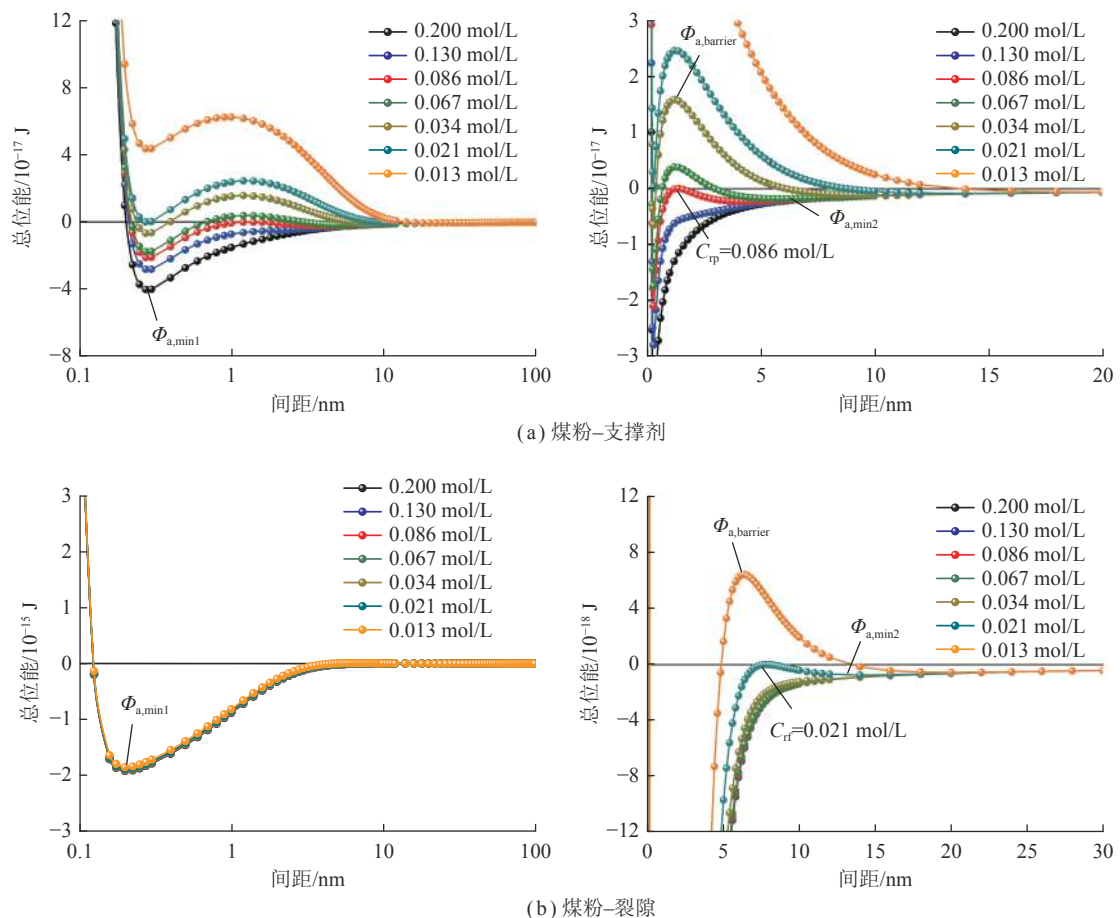


图 5 不同矿化度下煤粉与通道间的相互作用位能剖面

Fig.5 Curves of fines-channel interaction energy at various salinities

表 4 煤粉-支撑剂体系和煤粉-裂隙体系的双电层厚度及其位能剖面特征参数

Table 4 Parameters of EDL thickness and interaction energy for fines-proppant and fines-creat systems

矿化度/ (mol · L ⁻¹)	煤粉-支撑剂体系				煤粉-裂隙体系			
	κ^{-1}/nm	$\Phi_{a,\text{min1}}/10^{-18} \text{ J}$	$\Phi_{a,\text{min2}}/10^{-18} \text{ J}$	$\Phi_{a,\text{barrier}}/10^{-18} \text{ J}$	κ^{-1}/nm	$\Phi_{a,\text{min1}}/10^{-18} \text{ J}$	$\Phi_{a,\text{min2}}/10^{-18} \text{ J}$	$\Phi_{a,\text{barrier}}/10^{-18} \text{ J}$
0.200	0.68	-39.83	—	—	0.68	-1 926.94	—	—
0.130	0.84	-27.89	—	—	0.84	-1 920.64	—	—
0.086	1.03	-20.92	-2.29	0.04	1.03	-1 915.10	—	—
0.067	1.18	-17.44	-1.77	3.90	1.18	-1 913.39	—	—
0.034	1.65	-6.58	-1.07	15.91	1.65	-1 906.51	—	—
0.021	2.10	0.06	-0.80	24.65	2.10	-1 890.83	-0.75	0.002
0.013	2.67	43.62	-0.55	62.27	2.67	-1 857.32	-0.55	6.410

时,煤粉-支撑剂体系的位能剖面上仅存在第 1 最低位能穴 $\Phi_{a,\text{min1}}$ ($z = 0.3 \text{ nm}$ 附近),而无第 2 最低位能穴 $\Phi_{a,\text{min2}}$,表明在该矿化度范围内煤粉-支撑剂间的 EDL 斥力作用小于 LW+AB 引力作用,煤粉在支撑剂上的黏附为有利化学黏附,煤粉难以运移。随矿化度的降低,煤粉-支撑剂体系的双电层厚度 κ^{-1} 不断增大,EDL 斥力不断增强(表 4);当矿化度降至 0.086 mol/L 时,煤粉-支撑剂间的位能剖面上出现斥力势垒 $\Phi_{a,\text{barrier}}$ ($z = 2 \text{ nm}$ 附近)和第 2 最低位能穴 $\Phi_{a,\text{min2}}$ ($z = 5 \text{ nm}$ 附近),表明 EDL 斥力作用开始大于 LW+AB 引力作用,且随矿化度的降低, $\Phi_{a,\text{min2}}$ 和 $\Phi_{a,\text{barrier}}$ 均不断增大(表 4)。由此可知,支撑裂缝内煤粉运移的临界矿化度 C_{cp} 约为 0.086 mol/L,当矿化度小于 0.086 mol/L 时,煤粉在支撑剂上的黏附由有利化学黏附转变为不利化学黏附,煤粉极易发生运移。由图 5(b)可知,当矿化度为 0.2、0.13、0.086、0.067 和 0.034 mol/L 时,煤粉-裂隙体系的位能剖面上仅存在第 1 最低位能穴 $\Phi_{a,\text{min1}}$ ($z = 0.2 \text{ nm}$ 附近),而无第 2 最低位能穴 $\Phi_{a,\text{min2}}$,表明在该矿化度范围内煤粉在裂隙面上的黏附为有

利化学黏附。当矿化度降至 0.021 mol/L 时,煤粉-裂隙间的位能剖面上开始出现斥力势垒 $\Phi_{a,\text{barrier}}$ ($z = 7 \text{ nm}$ 附近)以及第 2 最低位能穴 $\Phi_{a,\text{min2}}$ ($z = 20 \text{ nm}$ 附近),即煤粉在裂隙面的黏附由有利化学黏附转变为不利化学黏附。结果表明,裂隙内煤粉运移临界矿化度 C_{cf} 约为 0.021 mol/L,该临界矿化度为支撑裂缝内煤粉运移临界矿化度 C_{cp} 的 0.24 倍。理论预测的支撑裂缝及裂隙内煤粉运移临界矿化度 C_{cp} 和 C_{cf} 分别为 0.086 和 0.021 mol/L,而实验测量值分别介于 0.067~0.130 和 0.013~0.034 mol/L,理论值均位于实验结果范围内,从而证实了模型可靠性。

上述分析表明,矿化度降低导致 EDL 斥力增大是诱发煤粉运移的根本原因,当矿化度降至临界矿化度时,EDL 斥力作用开始克服 LW+AB 引力作用,并在煤粉与通道间形成斥力势垒,从而促使煤粉的运移。下面通过分析煤粉-支撑剂以及煤粉-裂隙间的受力情况,揭示支撑裂缝与裂隙内煤粉运移临界矿化度明显不同的内在机制。由图 6 可知,煤粉-支撑剂间的 LW+AB 引力小于煤粉-裂隙体系,主要是因为支撑剂

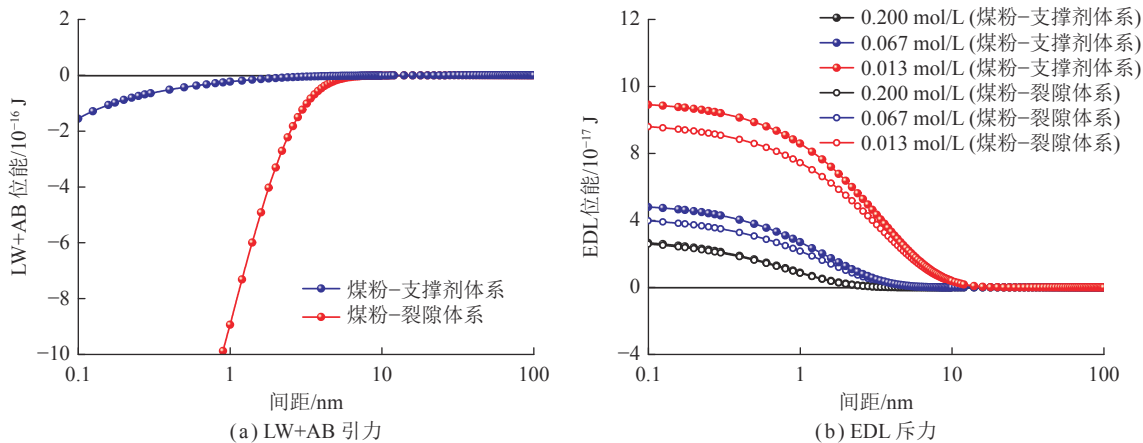


图 6 煤粉-支撑剂体系与煤粉-裂隙体系间的受力对比

Fig.6 Comparison of forces between fines-proppant and fines-creat systems

的疏水性弱于裂隙, 导致其表面能的电子供体分量 γ^- 大于裂隙; 在不同矿化度下, 煤粉-支撑剂间的 EDL 斥力均大于煤粉-裂隙体系, 其原因为支撑剂表面的电负性在不同矿化度下均强于裂隙。因此, 当煤粉-支撑剂间的 EDL 斥力开始克服 LW+AB 引力时, 所需的临界矿化度要高于煤粉-裂隙体系。需说明的是扩展 DLVO 理论是在假设颗粒形状为球形以及颗粒/通道表面光滑、均质的基础上建立起来的。而实际煤粉形状不规则, 且煤粉与通道表面具有较强的物理非均质性和化学非均质性, 这些因素对受力分析及临界矿化度的预测均会造成影响^[32-34]。为提高模型的精确性, 未来尚需考虑形状因素以及表面非均质性的影响。

4 水力压裂阶段煤粉防控对策

煤粉的赋存空间包括支撑裂缝(支撑剂充填层)和裂隙系统(图7)。鉴于支撑裂缝及裂隙渗透率对煤粉运移响应特征的不同, 支撑裂缝及裂隙内的煤粉防控对策存在显著差异。目前, 防控煤粉的技术思路主要为促进支撑裂缝内煤粉产出, 而抑制裂隙内煤粉运移, 从而疏通支撑裂缝, 并避免裂隙堵塞^[25,35]。常用的

支撑裂缝内煤粉防控措施包括优化排采速率^[4,25]、增大支撑剂粒径^[36]和添加煤粉分散剂^[37-38]。增大排采速率可提高煤粉受到的水动力作用, 从而减少煤粉在支撑剂表面的黏附, 但流速过大不但会诱发支撑剂回流, 而且还会使得裂隙内煤粉运移、堵塞, 降低裂隙渗透率, 进而抑制气体解吸-扩散过程。由于支撑裂缝与裂隙通道类型、尺寸的差异性以及空间配置的复杂性(图7), 难以准确获得兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉防控的最优排采速率。增大支撑剂粒径不但可以减少煤粉对孔隙空间的堵塞, 而且可以降低支撑裂缝的有效过滤面积以减少煤粉的黏附滞留, 但该方法仅能在一定程度上缓解煤粉滞留问题, 还需结合排采速率的优化配置才能起到良好的效果。添加煤粉分散剂为目前使用最多的水力压裂阶段煤粉防控方法, 该方法通过改变煤粉表面润湿性以及 Zeta 电位, 来抑制煤粉聚沉和黏附, 从而促进煤粉的产出。然而, 随着压裂液的大量滤失, 煤粉分散剂会侵入裂隙系统, 在裂隙表面吸附滞留, 堵塞裂隙通道, 并诱发煤岩基质膨胀, 同时还将与裂隙内煤粉作用, 促使煤粉的分散、运移和堵塞, 从而导致裂隙渗透率降低^[8,39]。

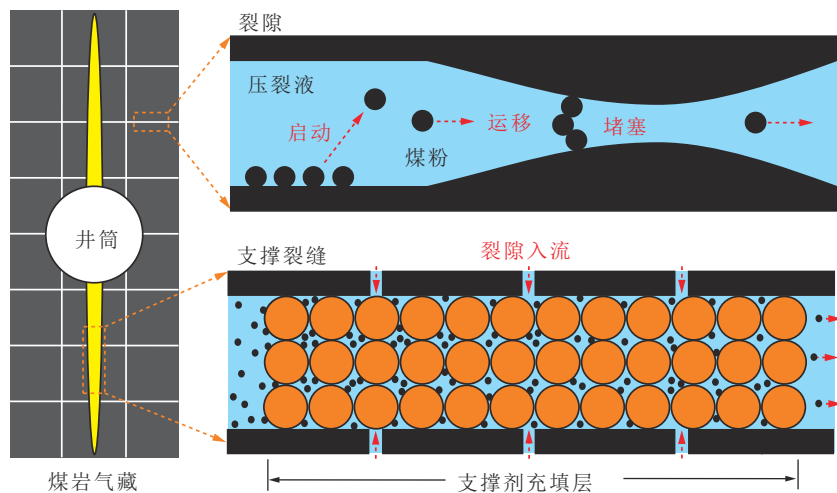


图7 煤岩气藏水力压裂阶段支撑裂缝及裂隙内煤粉运移示意

Fig.7 Schematic of fines release in propped fractures and cleats during hydraulic fracturing in CBM reservoirs

鉴于上述方法存在的不足, 笔者从优化压裂液矿化度视角, 提出一种水力压裂阶段兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉防控的新方法。活性水压裂液是煤层气井最为常用的压裂液体系, 其中常加入 2%(0.27 mol/L) 的 KCl, 来避免煤岩黏土膨胀及微粒运移^[40]。然而, 对于煤岩尤其是无烟煤而言, 其膨胀性黏土矿物(伊利石、蒙脱石等)含量极少, 黏土膨胀伤害较弱^[10,17]。众多研究已表明黏土膨胀伤害远小于微粒运移造成的伤害, 且黏土膨胀的临界矿化度要高于微粒运移的临界矿化度^[12-13,41]。因此, 在防控煤粉的前提下, 煤层

气井压裂过程中可考虑降低压裂液的 KCl 加量。由图5(a)可知, 在 0.27 mol/L KCl 溶液条件下, 煤粉与石英砂支撑剂间的黏附属于有利化学黏附, 煤粉极易在支撑裂缝内沉积滞留, 不利于煤粉排出。本文得到的支撑裂缝内煤粉运移临界矿化度为 0.086 mol/L, 通过将压裂液矿化度调节至 0.086 mol/L 以下, 可使得支撑裂缝内煤粉的黏附条件由有利条件转变为不利条件, 从而促使煤粉的排出。对于裂隙而言, 本文得到的煤粉运移临界矿化度为 0.021 mol/L, 明显小于支撑裂缝内煤粉运移的临界矿化度(图5(b))。因此,

可将压裂液矿化度设计在 0.021~0.086 mol/L, 使得支撑裂缝和裂隙内煤粉分别处于不利黏附条件和有利黏附条件, 从而促使支撑裂缝内煤粉产出, 并抑制裂隙内煤粉运移, 达到兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉防控的目的。此外, 在该最优矿化度范围内, 压裂液还具有如下优势: ① 无需添加煤粉分散剂, 即可实现支撑裂缝内煤粉的顺利排出, 从而降低压裂成本和环境风险; ② 支撑裂缝内煤粉产出几乎不受流速控制, 使得煤粉防控更具灵活性。

5 结 论

(1) 支撑裂缝及裂隙内煤粉运移均存在临界矿化度现象, 实验测得的临界矿化度分别介于 0.067~0.130 和 0.013~0.034 mol/L, 当矿化度高于临界矿化度时, 支撑裂缝及裂隙渗透率均小幅变化, 产出煤粉较少, 而当矿化度低于临界矿化度时, 支撑裂缝及裂隙渗透率分别大幅增高和降低, 且产出煤粉急剧增多。

(2) 理论预测的支撑裂缝及裂隙内煤粉运移临界矿化度分别为 0.086 和 0.021 mol/L, 2 者均介于实验结果内, 证实了模型可靠性, 为提高模型精确性, 未来还需考虑煤粉形状及煤粉/通道表面非均质性的影响。

(3) 矿化度降低导致煤粉-通道间的双电层斥力增大是诱发煤粉运移的根本原因, 当矿化度降低至临界矿化度时, 双电层斥力开始克服 Lifshitz-van der Waals 引力和 Lewis 酸碱引力, 导致煤粉发生运移。

(4) 支撑裂缝内煤粉运移临界矿化度高于裂隙内煤粉运移临界矿化度, 支撑剂表面的电负性强于裂隙, 而其疏水性弱于裂隙, 是导致支撑裂缝内煤粉运移临界矿化度偏高的主要原因。

(5) 在水力压裂阶段, 可将压裂液矿化度设计在支撑裂缝及裂隙内煤粉运移临界矿化度之间, 从而促使支撑裂缝内煤粉排出, 并抑制裂隙内煤粉运移, 达到兼顾支撑裂缝及裂隙内煤粉防控的双重目的, 在该矿化度范围内, 无需加入煤粉分散剂, 即可实现支撑裂缝内煤粉的顺利产出, 且不受流速的制约。

参考文献(References):

- [1] 戴金星, 倪云燕, 廖凤蓉, 等. 煤气在产气大国中的重大作用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 417-432.
DAI Jinxing, NI Yunyan, LIAO Fengrong, et al. The significance of coal-derived gas in major gas producing countries[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 417-432.
- [2] 桑树勋, 袁亮, 刘世奇, 等. 碳中和地质技术及其煤炭低碳化应用前瞻[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1430-1451.
SANG Shuxun, YUAN Liang, LIU Shiqi, et al. Geological technology for carbon neutrality and its application prospect for low carbon coal exploitation and utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1430-1451.
- [3] 陈振宏, 王一兵, 孙平. 煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 229-232.
CHEN Zhenhong, WANG Yibing, SUN Ping. Destructive influences and effectively treatment of coal powder to high rank coalbed methane production[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 229-232.
- [4] ZOU Y, ZHANG S, ZHANG J. Experimental method to simulate coal fines migration and coal fines aggregation prevention in the hydraulic fracture[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, 101(1): 17-34.
- [5] 胡胜勇, 郝勇鑫, 陈云波, 等. 煤粉运移与沉积对支撑裂缝渗透率动态影响规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(4): 1288-1296.
HU Shengyong, HAO Yongxin, CHEN Yunbo, et al. Dynamic influence law of coal powder migration and deposition on propped fracture permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4): 1288-1296.
- [6] 张双斌, 苏现波, 郭红玉, 等. 煤层气井排采过程中压裂裂缝导流能力的伤害与控制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 124-128.
ZHANG Shuangbin, SU Xianbo, GUO Hongyu, et al. Controlling the damage of conductivity of hydraulic fractures during the process of drainage in coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 124-128.
- [7] FAN M, CHEN C. Numerical simulation of the migration and deposition of fine particles in a proppant-supported fracture[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 194: 107484.
- [8] KANG Y, HUANG F, YOU L, et al. Impact of fracturing fluid on multi-scale mass transport in coalbed methane reservoirs[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 154: 123-135.
- [9] 丛连铸, 汪永利, 梁利, 等. 水基压裂液对煤层储气层伤害的室内研究[J]. 油田化学, 2002(4): 334-336.
CONG Lianzhu, WANG Yongli, LIANG Li, et al. A laboratory study on damage to gas-bearing coalbed by aqueous fracturing fluid[J]. *Oilfield Chemistry*, 2002(4): 334-336.
- [10] GUO Z, HUSSAIN F, CINAR Y. Permeability variation associated with fines production from anthracite coal during water injection[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 147: 46-57.
- [11] HAN W, WANG Y, LI Y, et al. Coal fines migration, deposition, and output simulation during drainage stage in coalbed methane production[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35: 4901-4913.
- [12] KHILAR K C, FOGLER H S. The existence of a critical salt concentration for particle release[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1984, 101(1): 214-224.
- [13] BLUME T, WEISBROD N, SELKER J S. On the critical salt concentrations for particle detachment in homogeneous sand and heterogeneous Hanford sediments [J]. *Geoderma*, 2005, 124(1-2): 121-132.
- [14] OCHI J, VERNOUX J F. Permeability decrease in sandstone reservoirs by fluid injection: Hydrodynamic and chemical effects [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 208(3-4): 237-248.
- [15] LEVER A, DAWE R A. Water-sensitivity and migration of fines in the hopeman sandstone[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1984, 7(1): 97-107.
- [16] 田永东, 武杰. 沁水盆地南部高煤阶煤储层敏感性[J]. 煤炭学报,

- 2014, 39(9): 1835–1839.
- TIAN Yongdong, WU Jie. Sensitivity of high-rank coal-bed methane reservoir in the Southern Qinshui Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(9): 1835–1839.
- [17] 于宝石, 郑瑞, 计玉冰, 等. 筠连地区煤储层敏感性及其配伍性分析[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(9): 193–199.
- YU Baoshi, ZHENG Rui, JI Yubing, et al. Analysis of coal reservoir sensitivity and compatibility in Junlian Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(9): 193–199.
- [18] 耿昀光, 汤达祯, 许浩, 等. 安泽区块煤储层孔裂隙特征及水敏效应损害机理[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(5): 175–180.
- GENG Yunguang, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Pore cracking features of coal reservoir in Anze Block and water sensitive effect failure mechanism[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(5): 175–180.
- [19] KESHAVARZ A, YANG Y, BADALYAN A, et al. Laboratory-based mathematical modelling of graded proppant injection in CBM reservoirs[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 136: 1–16.
- [20] WANG B, QIN Y, SHEN J, et al. Experimental study on water sensitivity and salt sensitivity of lignite reservoir under different pH[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 172: 1202–1214.
- [21] 魏迎春, 曹代勇, 袁远, 等. 韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(8): 1424–1429.
- WEI Yingchun, CAO Daiyong, YUAN Yuan, et al. Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(8): 1424–1429.
- [22] ZHAO X, LIU S, SANG S, et al. Characteristics and generation mechanisms of coal fines in coalbed methane wells in the southern QINSHUI Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 34: 849–863.
- [23] 刘岩, 苏雪峰, 张遂安. 煤粉对支撑裂缝导流能力的影响特征及其防控[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 687–693.
- LIU Yan, SU Xuefeng, ZHANG Suian. Influencing characteristics and control of coal powder to proppant fracture conductivity[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(3): 687–693.
- [24] 管保山, 刘玉婷, 刘萍, 等. 煤层气压裂液研究现状与发展[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(5): 11–17, 22.
- GUAN Baoshan, LIU Yuting, LIU Ping, et al. Present situation and development of coalbed methane fracturing fluid[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(5): 11–17, 22.
- [25] HUANG F, DONG C, YOU Z, et al. Detachment of coal fines deposited in proppant packs induced by single-phase water flow: Theoretical and experimental analyses[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 239: 103728.
- [26] HUANG F, KANG Y, YOU Z, et al. Critical conditions for massive fines detachment induced by single-phase flow in coalbed methane reservoirs: Modeling and experiments[J]. *Energy & Fuels*, 2017, 31(7): 6782–6793.
- [27] SZE A, ERICKSON D, REN L, et al. Zeta-potential measurement using the Smoluchowski equation and the slope of the current–time relationship in electroosmotic flow[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 261(2): 402–410.
- [28] VAN OSS CJ, CHAUDHURY M K, GOOD R J. Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems. *Chemical Reviews*, 1988, 88: 927–941.
- [29] BERGENDAHL J, GRASSO D. Prediction of colloid detachment in a model porous media: Thermodynamics[J]. *AIChE Journal*, 1999, 127: 475–484.
- [30] HERZIG J P, LECLERC D M, GOFF P L. Flow of suspensions through porous media — Application to deep filtration[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1970, 62: 8–35.
- [31] YANG Y, YUAN W, HOU J, et al. Review on physical and chemical factors affecting fines migration in porous media [J]. *Water Research*, 2022: 118172.
- [32] DAS S K, SCHECHTER R S, SHARMA M M. The role of surface roughness and contact deformation on the hydrodynamic detachment of particle from surfaces[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1994, 164: 63–77.
- [33] BRADFORD S A, TORKZABAN S, SHAPIRO A. A theoretical analysis of colloid attachment and straining in chemically heterogeneous porous media[J]. *Langmuir*, 2013, 29: 6944–6952.
- [34] SEYMOUR M B, CHEN G, SU C, et al. Transport and retention of colloids in porous media: Does shape really matter?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47: 8391–8398.
- [35] 魏迎春, 张劲, 曹代勇, 等. 煤层气开发中煤粉问题的研究现状及研究思路[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(6): 116–124.
- WEI Yingchun, ZHANG Jin, CAO Daiyong, et al. Research status and thoughts for coal fines during CBM development[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(6): 116–124.
- [36] HUANG F, DONG C, SHANG X, et al. Effects of proppant wettability and size on transport and retention of coal fines in saturated proppant packs: experimental and theoretical studies[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(15): 11976–11991.
- [37] 张劲, 赵军, 林鑫, 等. 用于煤层气改造的分散剂优选实验研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 598–602.
- ZHANG Jin, ZHAO Jun, LIN Xin, et al. Experimental study for screening of dispersion agents used in CBM stimulation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 598–602.
- [38] AWAN FUR, KESHAVARZ A, AKHONDZADEH H, et al. Stable dispersion of coal fines during hydraulic fracturing flowback in coal seam gas reservoirs — An experimental study[J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34: 5566–5577.
- [39] 高波, 康毅力, 史斌, 等. 压裂液对煤岩气藏渗流性能的影响[J]. *天然气工业*, 2015, 35(9): 64–69.
- GAO Bo, KANG Yili, SHI Bin, et al. Effect of fracturing fluid on the seepage properties of coalbed gas reservoirs[J]. *Nature Gas Industry*, 2015, 35(9): 64–69.
- [40] 丛连铸, 梁利, 卢拥军, 等. 氯化钾在煤层气井压裂中的作用[J]. *煤田地质与勘探*, 2001, 29(2): 24–27.
- CONG Lianzhu, LIANG Li, LU Yongjun, et al. The action of chlorinated potassium in CBM well fracturing operation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(2): 24–27.
- [41] ZHOU J, ZHENG X, FLURY M, et al. Permeability changes during remediation of an aquifer affected by sea-water intrusion: A laboratory column study[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376: 557–566.