



## 不同类型孔缝约束下煤粉运移与沉降可视化分析

王博洋 崔云飞 王千 丁延 李耿 潘武杰

### 引用本文:

王博洋, 崔云飞, 王千, 等. 不同类型孔缝约束下煤粉运移与沉降可视化分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 294–311.  
WANG Boyang, CUI Yunfei, WANG Qian. Visualization analysis of coal fine migration and settlement under different types of pore–fracture[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 294–311.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023–1290>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 砂型3D打印材料对类软岩力学特性影响规律及机理

Influence and mechanism of printing materials on the mechanical properties of sand powder 3D printed weak rock-like materials  
煤炭科学技术. 2023, 51(11): 84–94 <https://doi.org/10.12438/cst.2022–2060>

#### 支撑裂缝煤粉动态运移沉积可视化模拟试验研究

Experimental study on visualization simulation of coal powder dynamic migration and deposition in propped fractures  
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 151–158 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/92d4543c–5bf0–428b–a97f–c70a3436440c>

#### 缝囊钻完井流体在煤系三气合采中对储层伤害的研究

Study on damage of follicle drilling with fuzzy–ball fluid in coal measures three gas combined production  
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 194–200 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.027>

#### 筠连地区煤储层敏感性及其配伍性分析

Analysis of coal reservoir sensitivity and compatibility in Junlian Area  
煤炭科学技术. 2021, 49(9): 193–199 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6d3ed9e4–aaa8–4def–8b45–15bf5ab56e7c>

#### 鸡西盆地煤储层吸附孔特征及分形表征研究

Study on characterization and fractal features of adsorption pores of coal reservoirs in Jixi Basin  
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 218–226 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/12bd15b1–a300–42f5–8962–c3496c199311>

#### 煤层气井排采中不同应力机制下含断裂煤储层稳定性分析

Stability analysis of fractured coal reservoirs under different stress mechanisms in coalbed methane well drainage  
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 169–175 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2aafefa1–ac13–4e2b–8e54–9a4f5342eb2a>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王博洋, 崔云飞, 王 千, 等. 不同类型孔缝约束下煤粉运移与沉降可视化分析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 294–311.

WANG Boyang, CUI Yunfei, WANG Qian, *et al.* Visualization analysis of coal fine migration and settlement under different types of pore-fracture[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 294–311.

## 不同类型孔缝约束下煤粉运移与沉降可视化分析

王博洋<sup>1</sup>, 崔云飞<sup>1</sup>, 王 千<sup>2</sup>, 丁 延<sup>1</sup>, 李 耿<sup>3</sup>, 潘武杰<sup>2</sup>

(1. 东北石油大学 非常规油气研究院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 3. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘 要:** 以煤粉为主的固相颗粒产出问题贯穿整个煤层气开发过程, 产生的储层伤害是导致产能衰减与生产成本增高的重要诱因之一。当前差异流体作用与不同类型孔缝约束下煤粉悬浮、运移、沉降规律及机制尚不明确, 制约了煤层气连续稳定排采和高效开发。基于此, 以煤粉产出已显著影响气井产能的保德区块为研究对象, 借助 3D 打印技术加工不同孔缝类型及其组合的毫米尺度模型样品, 依托自主研发的评价煤粉运移、沉降的试验装置, 揭示不同类型孔缝及其组合约束下差异流体作用对煤粉运移的影响机制。结果表明: 在相同流体作用条件下, 煤粉运移由易到难依次为平行板状孔缝、圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝; 对于孔缝组合而言, 圆柱形孔缝(入口端)+细颈瓶孔缝+平行板状孔缝(出口段)的组合比圆柱形孔缝(入口端)+平行板状孔缝+细颈瓶孔缝(出口段)的组合有更好的抵抗煤粉沉降导致储层物性变差的能力。孔径越大, 煤粉利于运移产出而不利沉降;  $\text{NaHCO}_3$  溶液矿化度越高, 水解产生的阴离子  $\text{OH}^-$  使煤粉颗粒表面负电荷增加, 能够缓解煤粉聚集效果, 有利于煤粉产出。流体的力学作用与化学作用共同决定煤粉运移诱导煤储层伤害程度。

**关键词:** 煤粉; 3D 打印; 流体作用; 储层伤害; 孔缝类型

中图分类号: TE258

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)S2-0294-18

### Visualization analysis of coal fine migration and settlement under different types of pore-fracture

WANG Boyang<sup>1</sup>, CUI Yunfei<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>2</sup>, DING Yan<sup>1</sup>, LI Geng<sup>3</sup>, PAN Wujie<sup>2</sup>

(1. Institute of Unconventional Oil and Gas, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** The production of solid particles mainly composed of "coal fine" runs through the entire process of coalbed methane development, and the resulting reservoir damage is one of the important factors leading to production capacity decline and increased production costs. At present, the laws and mechanisms of coal fine suspension, migration, and settlement under differential fluid action and different types of pore-fracture constraints are not yet clear, which restricts the continuous and stable discharge and efficient development of coalbed methane. Based on this, this paper took the Baode block, where coal fine production has significantly affected well productivity, as the research object. The millimeter sized model samples of different pore types and their combinations was established using 3D printing technology. With the help of independently developed experimental devices for evaluating coal fine transport and settlement, the mechanism of the influence of differential fluid action on coal fine transport under different types of pores and their combination constraints was revealed. The results indicated that under the same fluid action conditions, the order of coal fine migration from easy to difficult is parallel plate shaped pore-fracture, cylindrical pore-fracture, and thin neck bottle pore-fracture. The combination of cylindrical pore-fracture (inlet end), thin necked bottle pore-fracture, and parallel plate shaped pore-fracture (outlet section) has a better ability to resist the deterioration of reservoir properties caused by coal fine deposition than the combination of cylindrical pore-fracture (inlet end), parallel plate shaped

收稿日期: 2023-09-08 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.12438/cst.2023-1290

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42472196, 42002186)

作者简介: 王博洋(1992—), 男, 黑龙江大庆人, 副教授, 博士生导师. E-mail: Boyangwang@nepu.edu.cn

pore-fracture, and thin necked bottle pore-fracture (outlet section). The larger the pore size, the more favorable the coal fine is for transportation and production, but not for sedimentation. The higher the mineralization degree of  $\text{NaHCO}_3$  solution, the anion  $\text{OH}^-$  generated by hydrolysis increases the negative charge on the surface of coal fine particles, which can alleviate the aggregation effect and facilitate coal fine production. The mechanical and chemical effects of fluid together determine the damage degree of coal reservoir induced by coal fine migration.

**Key words:** coal fine; 3D Printing; fluid effect; reservoir damage; pore-fracture type

## 0 引言

我国煤层气资源潜力巨大(总储量为  $30.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ), 是我国天然气增储上产的重要领域之一, 其合理开发利用对于优化能源结构、减少碳排放具有重要意义。然而以煤粉为主的固相颗粒产出问题贯穿整个煤层气开发过程, 产生的储层伤害是导致产能衰减与生产成本增高重要诱因之一<sup>[1-3]</sup>。例如, 鄂尔多斯盆地西南部彬长矿区大佛寺井田低阶煤储层煤粉产出现象占 24 口直井的 83.3%, 部分井的井筒发生煤粉淤积<sup>[4]</sup>; 鄂尔多斯盆地保德区块全区出现煤粉影响的排采井共计 492 口, 占全区 51%, 影响日产气量约  $5.7 \text{ 万 m}^3$ 。

目前煤粉研究已在以下几个方面取得诸多成果, 包括: ① 煤粉产出影响因素及生成机理<sup>[5-8]</sup>; ② 不同地质与工程条件下煤粉产出特征差异<sup>[9-11]</sup>; ③ 煤粉颗粒运移规律及其对气井产能影响<sup>[12-17]</sup>; ④ 煤粉产出诱导储层伤害机理等<sup>[18-19]</sup>; 然而在煤粉运移及沉降可视化表征方面仍十分薄弱。众多学者采用巴西劈裂法对样品进行人工造缝并充填支撑剂、微观模型(用 AB 胶将玻璃片密封, 充填不同粒径石英砂与煤粉)、石英砂颗粒支撑煤砖等方式, 剖析煤粉运移的影响机制及其对储层物性的影响<sup>[20-25]</sup>, 但仍有以下方面需要进一步深入研究, 其一考虑煤粉运移的模型大多以平行板状裂缝为主, 不同类型孔缝及其组合对煤粉运移的影响鲜有关注; 其二煤粉运移过程中煤储层为“黑匣子”, 其在孔裂隙中的悬浮、沉降规律仍未可知。此外, 无论是原生煤粉, 亦或是次生煤粉, 在未受到足够的外力作用下是不具备移动条件的, 而流体作用往往是提供煤粉运移力主要贡献者之一。流体作用既有导致煤粉启动与运移的力学作用, 亦有影响煤粉分散与团聚状态的化学作用。不同流体作用与储层物性特征共同影响煤粉悬浮与运移状态, 亟需进一步揭示。

基于此, 本文以鄂尔多斯盆地保德区块中~低阶煤为研究对象, 基于 3D 打印技术加工不同孔缝类型及其组合的模型样品, 依托自主研发的评价煤粉运移、沉降的试验装置, 设置不同流体条件(流体矿

化度与流速)进行驱替, 对不同驱替阶段模型样品进行拍照(分析煤粉在不同驱替条件下的运移与沉降情况), 并记录产出液煤粉浓度与憋压压力, 进而揭示不同类型孔缝及其组合约束下差异流体作用对煤粉运移的影响机制, 研究结果有望为煤层气开发工程设计的优化、解决固相微粒产出问题提供实际依据, 为全国煤层气大规模高效开发提供有益启示。

## 1 研究区地质背景

保德区块位于鄂尔多斯盆地东缘的北部区域, 主体构造较为简单, 总体上表现为向 NW 倾斜的大型单斜构造, 断层和褶皱不发育。研究区地下水主要来自大气降水和奥陶系石灰岩的侧向补给, 径流一般由东向西<sup>[26-27]</sup>。区内含煤地层主要为山西组和太原组, 依次为以河流相、三角洲相为主的含煤沉积、套海陆交互相含煤沉积。煤层气主力开发煤层为是山西组 4+5 号煤层(平均厚度 6.45 m)与太原组 8+9 号煤层(平均厚度 9.16 m)<sup>[28]</sup>。主力煤层埋深为 300 ~ 1 200 m, 煤岩镜质体反射率在 0.71% ~ 1.22%, 属于低~中变质程度烟煤, 煤层含气量为 0 ~  $12.0 \text{ m}^3/\text{t}$ , 渗透率为 0.2 ~ 10 mD, 压力系数为 0.65 ~ 1.10 MPa, 属于欠压~常压储集层。本次以太原组 8+9 号煤层为主要研究对象(图 1)。

## 2 模型建立与方法

### 2.1 3D 打印模型建立

根据吸附与脱附曲线形态可对孔隙类型进行划分: I 类孔, 为开放性透气孔, 可产生吸附回线, 包括四边开放的平行板孔和两端开放圆筒形孔; II 类孔, 为一端封闭不透气孔, 不产生吸附回线, 包括一端封闭的圆筒形孔、平行板状孔、楔形孔及锥形孔; III 类孔, 为细颈瓶孔(又称墨水瓶孔), 解吸分支有一个急剧下降的拐点。文中重点考虑两端开放圆筒形孔(代表 I 类孔)、一端封闭的平行板状孔(代表 II 类孔)以及细颈瓶孔(代表 III 类孔)。考虑现场产出煤粉的粒度及 3D 打印技术的精度, 将不同类型孔隙进行放大, 形成不同类型毫米级孔缝。

考虑单类型孔缝组合模型与多类型孔缝组合模

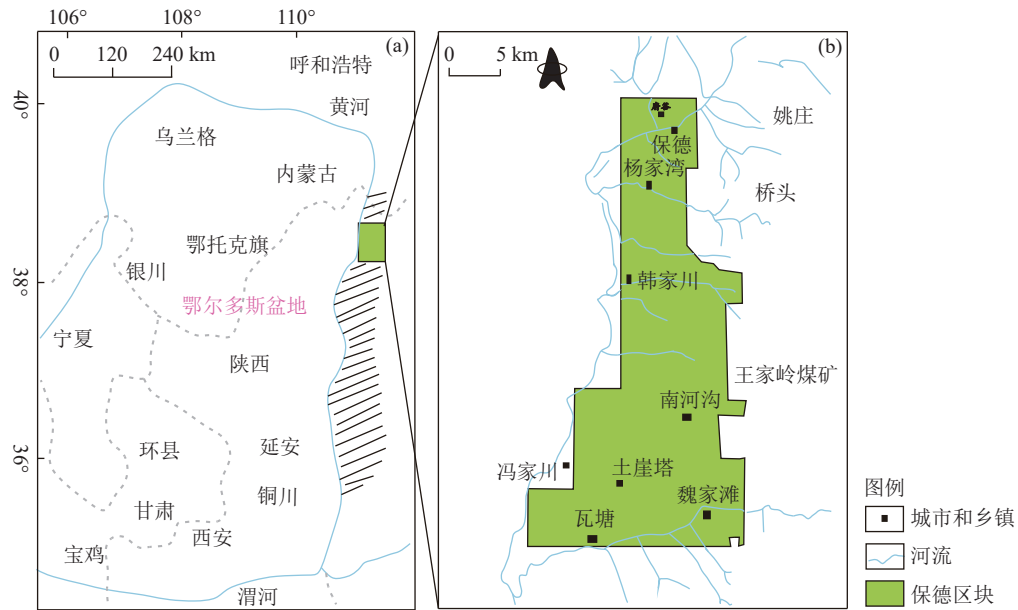


图1 研究区所在位置(据文献 [29] 修改)

Fig.1 Location of the study area

型, 详细如下:

单类型孔缝组合模型包括 1-1、1-2 与 1-3 模型, 1-1 样品主要由不同长度的两端开放圆筒形孔缝组成, 1-2 样品主要由尺度相同的细颈瓶孔缝组成, 1-3 样品由尺度相同的一端封闭的平行板状孔缝组成。

单类型孔缝组合模型特点在于入口端与出口段剖面孔隙组成一致, 整体构成一个直径 2.5 cm×长度 4.5 cm 的圆柱体(图 2)。

多类型孔缝组合模型主要考虑上述 3 种类型孔缝的组合特征, 由于不同类型孔缝连接以两端开放

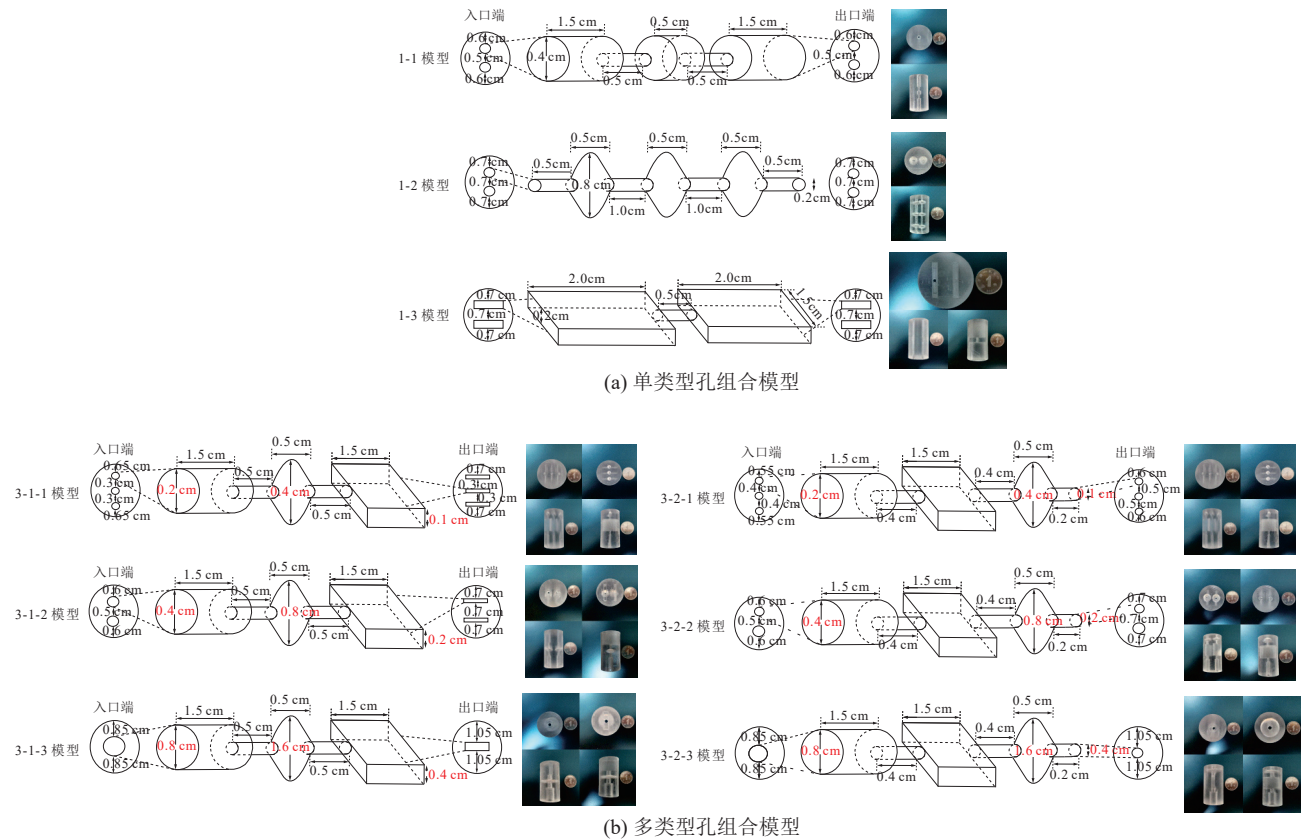


图2 3D 打印不同类型孔缝组合模型图

Fig.2 Different types of pore- fracture combination model by 3D printing



圆筒形孔缝为主,故仅考虑两端开放圆筒形孔缝-细颈瓶孔缝-一端封闭的平行板状孔缝(3-1-1—3-1-3 模型)、两端开放圆筒形孔缝-一端封闭的平行板状孔缝-细颈瓶孔缝两大种组合模式(3-2-1—3-2-3 模型)。与此同时,为便于分析不同应力导致的孔缝减小,每一组都设置不同孔隙尺寸模型。与单类型孔组合模型相同,整体同样构成一个直径 2.5 cm×长度 4.5 cm 的圆柱体。

3D 打印材料为透明光敏树脂,采用立体光固化(SLA)3D 打印机技术完成。在不同类型的孔缝及其组合内铺设石英砂,石英砂的粒度按照与孔径尺寸相匹配的方式铺设(粒度:40~80 目(0.069~

0.178 mm)),以铺满整个孔隙为标准。

## 2.2 煤粉驱替试验

本次采用可视化观测煤粉运移与沉降的试验装置进行驱替试验(图 3),单次试验条件即采用同一矿化度条件下进行不同流速的驱替试验,随后变化不同矿化度重复上述过程(表 1),试验流体为  $\text{NaHCO}_3$  溶液,矿化度分别设置 0、5 000、10 000 与 20 000 mg/L,流速为 2、4、6、8 与 10 mL/min。驱替煤粉溶液质量浓度为 1 g/L,固体颗粒由 80~120 目(0.125~0.200 mm)、120~200 目(0.075~0.125 mm)、>200 目(<0.075 mm)粒径的煤粉等体积混合而成,通过搅拌机搅拌均匀形成煤粉悬浮液,进而进行驱替。

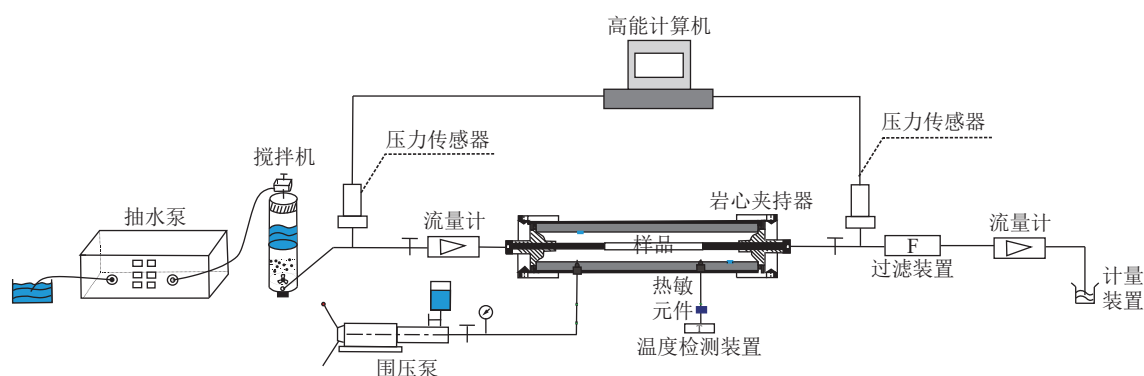


图 3 可视化观测煤粉运移与沉降的试验装置

Fig.3 Experimental device for visualizing the evaluation of coal fine transport and settlement

表 1 试验基本参数

Table 1 Basic experimental parameters

温度/℃	煤粉质量浓度/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	矿化度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	流速/( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	煤粉粒径/mm
26	1	0	2	
		5 000	4	0.125~0.200
		10 000	6	0.075~0.125
		20 000	8	<0.075
			10	

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同流体作用下单类型孔缝组合模型响应特征

#### 3.1.1 1-1 模型

1-1 模型尺寸和实物,及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况,如图 4 所示。

当矿化度为 0 mg/L,流速为 2 mL/min 时,产出液清澈,基本无悬浮煤粉;煤粉沉积从 1 号圆柱形孔缝分布至 3 号圆柱形孔缝中部。当流速增至 4 mL/min 时,产出液些许浑浊,可见有细小的煤粉悬浮;煤粉运移至 3 号圆柱形孔缝 3/4 处,颜色相比

于流速为 2 mL/min 时颜色更深。当流速增至 6 mL/min 时,产出液浑浊,所有圆柱孔内均可见充填石英砂减少,但残留石英砂部分仍可见大量煤粉沉积。当流速增加至 8 mL/min 时,圆柱孔内的石英基本消失,因速率过大,导致管道堵塞,无法进入悬浮液,也无产出液流出,石英砂被冲走。流速 10 mL/min 与 8 mL/min 现象一致(图 4b)。当矿化度为 5 000 mg/L,流速为 2 mL/min 时,产出液清澈,有细小的煤粉悬浮;1 号圆柱孔缝内石英砂减少,整体圆柱孔缝内均有极少煤粉沉积,以点的形式分散分布于石英砂充填的孔隙中。当流速增至 4 mL/min 时,产出液轻微浑浊;1 号圆柱孔缝内石英砂缺失 60%,3 号圆柱孔缝内石英砂缺失 25%,2 号圆柱孔缝内石英砂基本无缺失,1 号圆柱孔缝内沉积的煤粉较多,2 号及 3 号圆柱孔内缝沉积的煤粉相对较少。当流速增至 6 mL/min 时,产出液相对浑浊,可见些许悬浮-沉降煤粉;1 号圆柱孔内石英砂缺失 70%,3 号圆柱孔内石英砂缺失 50%,整体深浅依次为 1~2>3。当流速增至 8 mL/min 时,产出液十分浑浊,可见大量的悬浮、沉降煤粉;1 号圆柱孔内石英

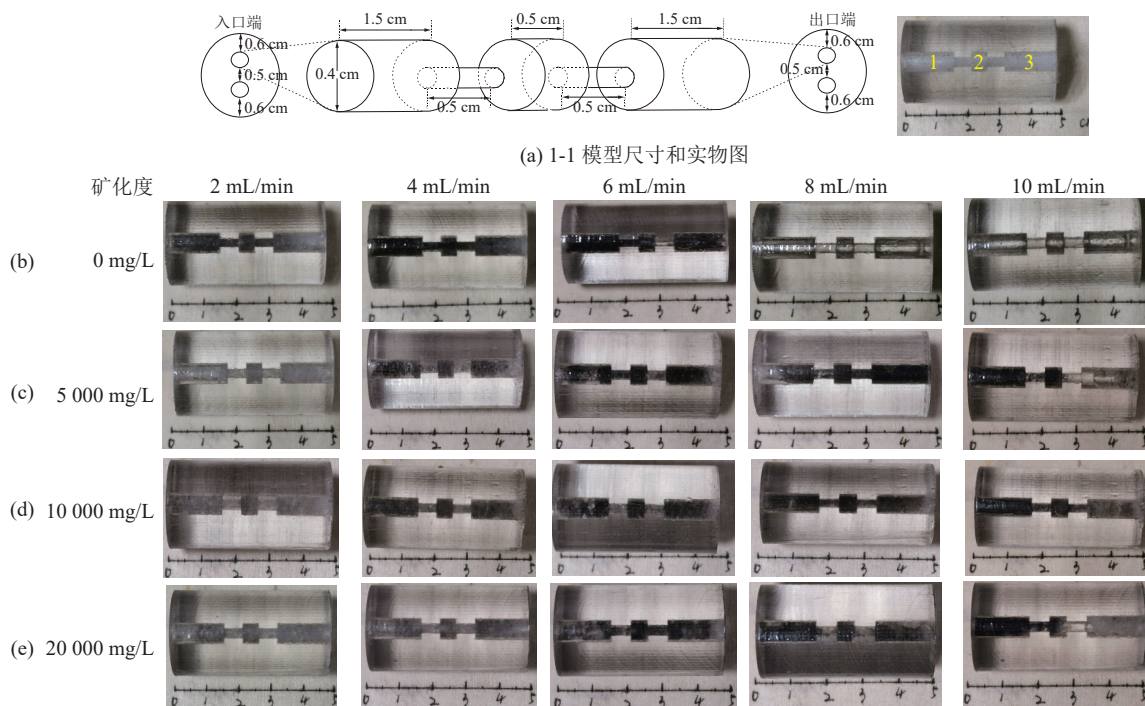


图4 1-1模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.4 Physical image of the model 1-1 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

砂缺失 70%, 3 号圆柱孔缝内石英砂缺失 60%, 整体深浅依次为 1 号>2 号>3 号。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液轻微浑浊; 模型入口形成滤饼, 3 号圆柱孔缝内基本无石英砂, 2 号圆柱孔缝内可见大量煤粉沉积(图 4c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 未见煤粉产出, 可见少量煤粉沉积于 1 号、2 号圆柱孔缝内。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见少量悬浮—沉降煤粉; 不同圆柱孔缝内均有煤粉沉积, 整体深浅依次为 1 号>2 号>3 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液相对浑浊, 可见部分悬浮—沉降煤粉; 1 号圆柱孔缝内石英砂缺失 20%, 整体深浅依次为 2 号>1 号≈3 号。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液十分浑浊, 可见大量的悬浮—沉降煤粉; 1 号与 3 号圆柱孔缝内的石英砂继续减少, 煤粉多沉积于 1 号圆柱孔内的出口至 3 号圆柱孔缝的入口, 整体深浅依次为 2 号>1 号≈3 号。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见部分沉降煤粉; 相比于上一流速, 1 号圆柱孔缝内颜色加深, 2 号与 3 号圆柱孔缝内颜色变浅(图 4d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 未见煤粉产出; 1 号圆柱孔内石英砂减少 35%, 3 号圆柱孔缝内石英砂减少 5%, 不同圆柱孔缝内可见少量煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见少量悬浮煤粉; 1 号圆柱孔缝

内石英砂减少 40%, 不同圆柱孔内可见少量煤粉沉积。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液相对浑浊; 1 号圆柱孔缝内石英砂减少 70%, 3 号圆柱孔缝内石英砂减少 50%, 整体深浅依次为 2 号>3 号>1 号。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊, 各圆柱孔缝内沉积煤粉增多。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液可见大量黑色煤粉颗粒; 1 号圆柱孔缝内沉降大量煤粉, 3 号圆柱孔缝内煤粉被冲刷殆尽(图 4e)。

### 3.1.2 1-2 模型

1-2 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 5 所示。

当矿化度为 0 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 轻微泛黄, 有细小的煤粉悬浮和沉降于瓶底, 量少; 煤粉主要沿下部通道运移, 4、5 号细颈瓶孔缝内颜色较深, 整体深浅依次为 5 号≈4 号>1 号≈2 号>3 号>6 号。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见悬浮—沉降的煤粉颗粒呈浅灰色; 所有细颈瓶孔缝内颜色都加深, 其中 3 号和 6 号变化明显, 整体深浅依次为 5 号≈4 号>1 号≈2 号>6 号>3 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 悬浮—沉降的煤粉量较大; 4、5 与 6 号细颈瓶孔缝内颜色较深, 1、2、3 号细颈瓶孔缝内颜色逐渐变浅, 整体深浅依次为 4 号≈5 号>6 号>1 号>2 号>3 号。当流速继续增至 8 mL/min 时, 产出液清澈, 基本无煤粉; 煤粉悬浮液堵塞在入口处, 形成滤饼, 1、2、4、5 细颈瓶



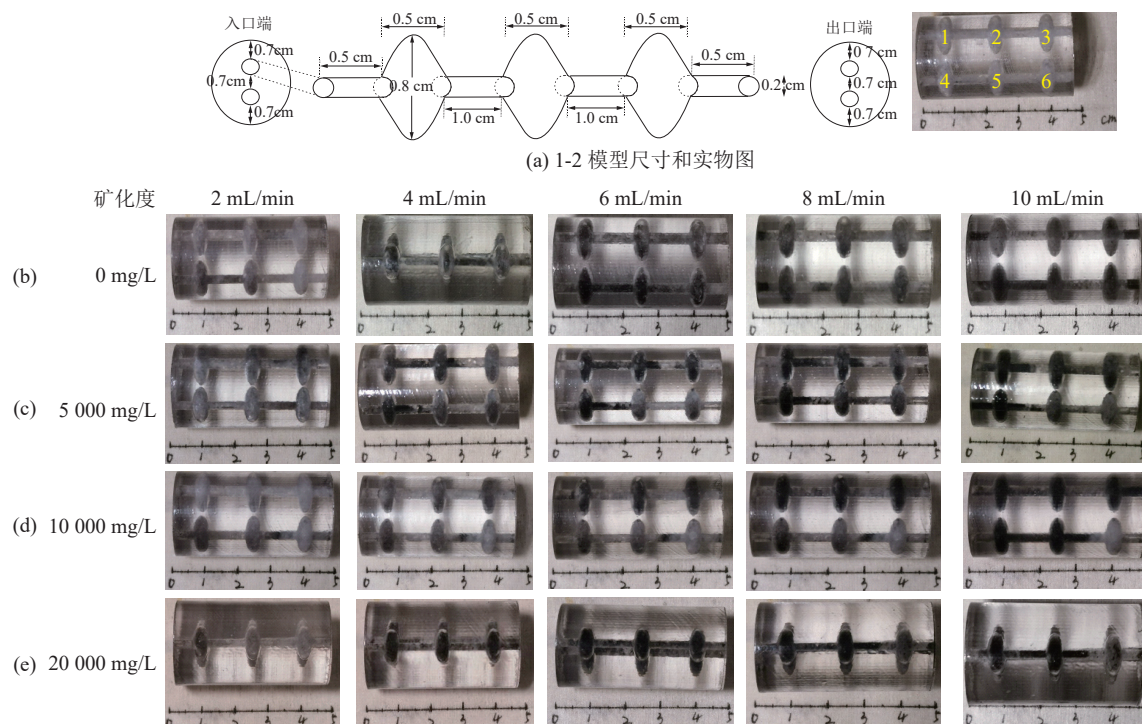


图 5 1-2 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.5 Physical image of the model 1-2 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

孔缝内可见煤粉沉积于底部。流速 10 mL/min 与 8 mL/min 现象一致, 此时憋压压力增至 7.8 MPa (图 5b)。

当矿化度为 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 有细小的煤粉悬浮; 4 号底部可见明显的煤粉沉积, 其余颜色较浅, 整体深浅依次为 4 号>5 号>1 号>6 号>2 号>3 号。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 有细小煤粉悬浮; 煤粉在 4 号细颈瓶孔缝内继续堆积, 整体深浅依次为 4 号>6 号>5 号>1 号>2 号>3 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 悬浮—沉降的煤粉量较大; 1、2、3 号细颈瓶孔内底部均沉积煤粉, 颜色相近, 4 号细颈瓶孔内颜色最深, 整体深浅依次为 4 号>1 号≈2 号>3 号>5 号≈6 号。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊, 进水量大于出水量; 4 号最黑, 5 与 6 有所加深, 整体深浅依次为 4 号>1 号≈2 号>3 号>5 号≈6 号。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液清澈, 瓶底可见煤粉沉降量少, 煤粉颗粒较大, 基本无悬浮煤粉; 煤粉悬浮液堵塞在 1 号与 4 号细颈瓶孔缝入口处, 1 号较 4 号颜色浅, 整体深浅依次为 4 号>1 号>2 号>3 号>5 号>6 号(图 5c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 有细小的煤粉悬浮; 4 号、5 号底部可见明显的煤粉沉积, 其余颜色较浅。当流速增至

4 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 有细小煤粉悬浮; 各个细颈瓶孔缝内均有颜色加深, 整体深浅依次为 4 号>5 号>3 号>2 号>1 号>6 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 悬浮—沉降的煤粉量较大; 除 6 号以外, 各个细颈瓶孔缝内均有颜色加深, 煤粉主要沿上方通道流动。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊, 悬浮—沉降的煤粉量继续增大; 1、2、3 号细颈瓶孔内颜色继续加深。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液清澈, 5 号与 6 号连接处、3 号出口处均形成堵塞(图 5d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 有细小的煤粉悬浮; 4 号底部可见明显的煤粉沉积, 其余颜色较浅, 整体深浅依次为 4 号>1 号≈2 号≈3 号>5 号>6 号。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液轻微泛灰, 可见煤粉沉降于瓶底; 4、5、6 号细颈瓶孔缝内煤粉沉积增多, 整体深浅依次为 4 号≈5 号≈6 号>2 号>3 号>1 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 悬浮—沉降的煤粉量较大; 各个细颈瓶孔缝内均有颜色加深, 其中 4、5、6 相比于 1、2、3 号细颈瓶孔缝颜色更深。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液清澈, 憋压压力增至 7.3 MPa; 各个细颈瓶孔缝内均沉积大量煤粉。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液清澈, 憋压压力迅速增加至 10 MPa(图 5e)。

### 3.1.3 1-3 模型

1-3 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 6 所示。

当矿化度为 0 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见细小煤粉颗粒悬浮; 上部平行板状孔缝内煤粉沉积较少, 1 号浅灰(很浅), 2 号入口端前半浅灰, 向出口渐浅至白色, 下部平行板状孔内有些许煤粉沉积, 其中 3 号有明显的煤粉沉降, 分布较均匀, 4 号也有明显煤粉沉降, 分布不规则, 向出口分布渐少。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见部分悬浮—沉降煤粉; 不同平行板状孔缝内颜

色加深, 其中 1 号呈灰色(颜色分布较均匀), 2 号颜色由入口向出口端渐淡, 3 号整体偏黑(颜色分布较均匀), 4 号颜色呈黑色向出口端渐淡, 整体深浅依次为 3 号>4 号>1 号>2 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液十分浑浊, 可见大量悬浮—沉降煤粉; 不同平行板状孔缝内颜色继续加深, 整体仍以下部通道颜色更深为主。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液更为浑浊, 沉降煤粉增多, 整体深浅依次为 3 号>4 号>1 号>2 号。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液仍十分浑浊, 不同平行板状孔缝内颜色继续加深, 整体深浅依次为 3 号>4 号>1 号>2 号(图 6b)。

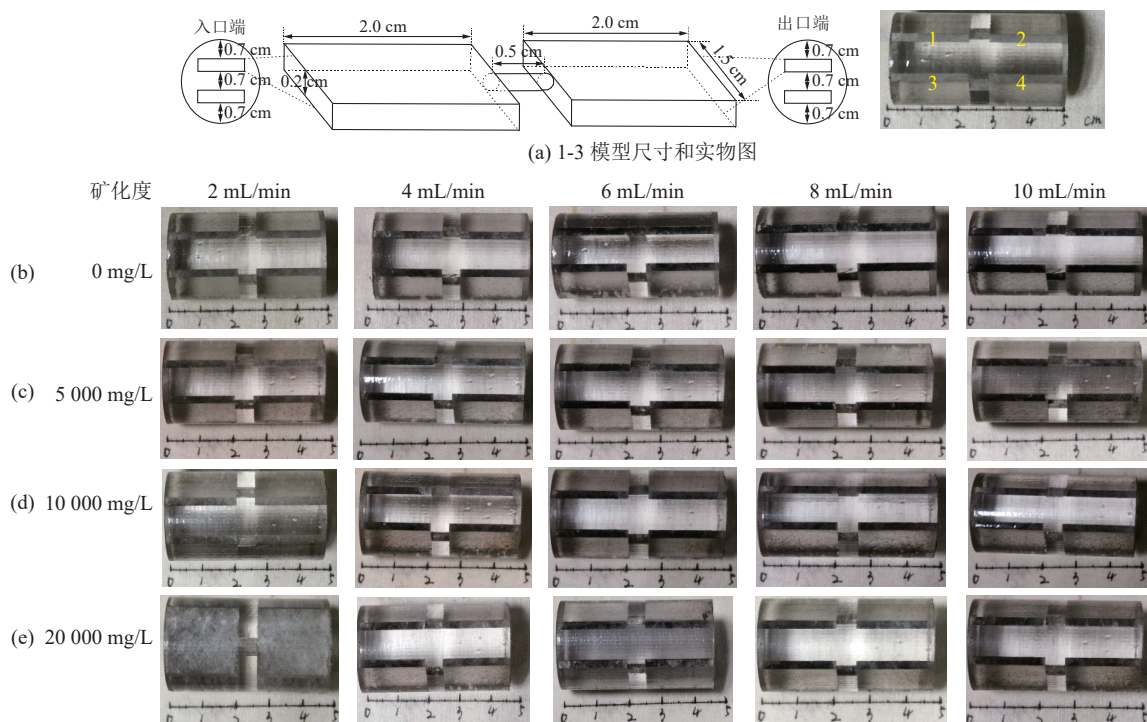


图 6 1-3 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.6 Physical image of the model 1-3 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

当矿化度为 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈; 可见少许煤粉沉积于 3 号平行板状孔缝内。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见少量悬浮煤粉; 不同平行板状孔缝内颜色加深, 整体深浅依次为 3 号>4 号>1 号>2 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见明显悬浮—沉降煤粉; 不同平行板状孔缝内颜色继续加深, 整体仍以下部通道颜色更深为主。当流速继续增大至 8 mL/min 与 10 mL/min, 产出液浑浊程度随流速增大而增大, 可见大量悬浮—沉降煤粉(图 6c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 未见煤粉产出; 可见极少量煤粉沉积于 3 号平行板状孔缝内。当流速增至 4 mL/min 时, 产

出液可见少量细小悬浮煤粉; 不同平行板状孔缝内颜色加深, 整体深浅依次为 3 号>4 号>1 号>2 号。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见部分悬浮煤粉; 整体仍以下部通道颜色更深为主, 整体深浅依次仍为 3 号>4 号>1 号>2 号。当流速继续增大至 8 mL/min 与 10 mL/min, 产出液浑浊, 不同平行板状孔内颜色变浅, 煤粉在不同平行板状孔缝内沉积减少(图 6d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 未见煤粉产出; 可见少许煤粉沉积于 3 号平行板状孔缝内。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液可见少量细小悬浮煤粉; 不同平行板状孔缝内颜色加深, 整体深浅依次为 3 号>4 号>1 号>2 号。当流



速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见明显悬浮—沉降煤粉; 不同平行板状孔缝内颜色加深, 整体深浅仍依次为 3 号>4 号>1 号>2 号。流速为 8 mL/min 与上述现象一致, 颜色继续加深。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液清澈, 仅有少量细小悬浮煤粉,

煤粉在不同平行板状孔缝内沉积减少(图 6e)。

### 3.2 不同流体作用下多类型孔缝组合模型响应特征

#### 3.2.1 3-1-1 模型

3-1-1 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 7 所示。

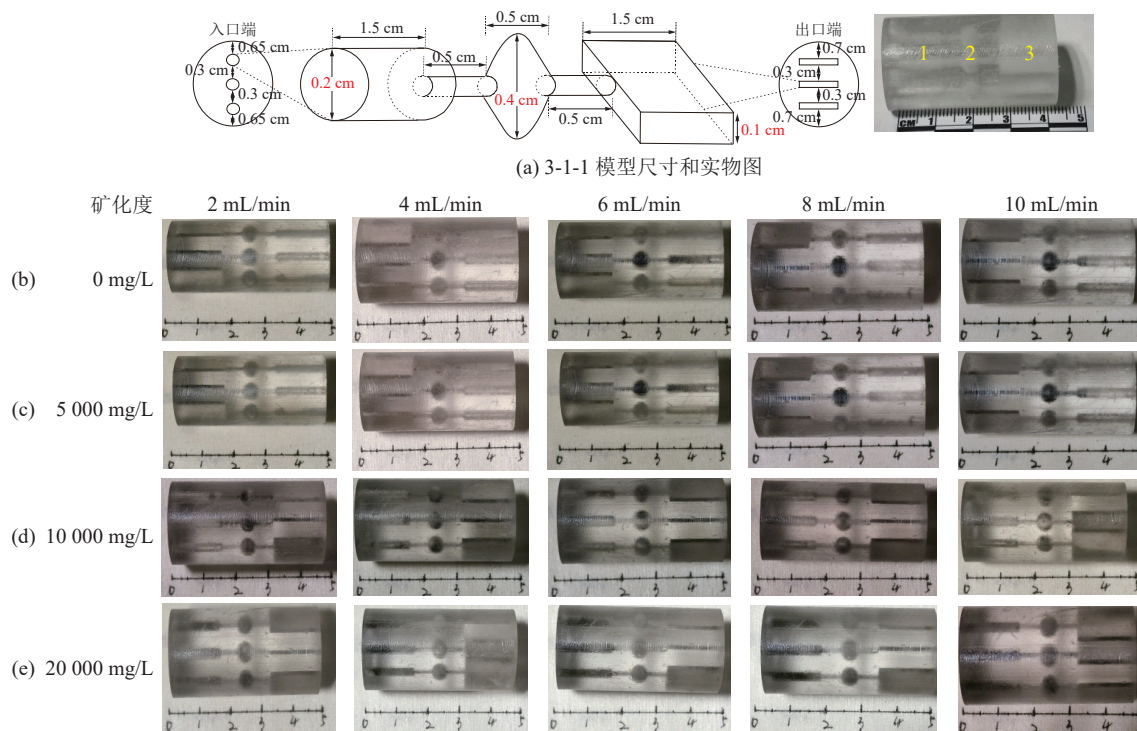


图 7 3-1-1 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.7 physical image of the model 3-1-1 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

当矿化度为 0 mg/L 与 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 出水端均基本无水滴出, 无煤粉进入模型, 憋压压力迅速增大(图 7b, c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 未见煤粉颗粒; 圆柱形孔缝内石英砂减少, 细颈瓶孔缝内煤粉沉积显著, 平行板状孔缝内可见煤粉沉积, 整体而言, 中间孔隙组合煤粉沉积量大于两侧。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 细颈瓶孔缝与平行板状孔缝内可见煤粉沉积, 但后者颜色变浅, 圆柱形孔内基本无石英砂。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 可见少量石英砂沉降底部, 憋压压力增大至 11 MPa。当流速增至 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 有少量清澈产出液, 憋压压力分别增大至 10.8 MPa 与 9.6 MPa(图 7d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈; 圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝内可见煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 在圆柱形孔缝内与孔隙连接处可见煤粉沉积。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝内煤粉沉

积增多, 憋压压力增大至 5.8 MPa。当流速增至 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝内煤粉沉积增多, 憋压压力分别增大至 7.8 MPa 与 6.3 MPa(图 7e)。

#### 3.2.2 3-1-2 模型

3-1-2 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 8 所示。

当矿化度为 0 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈; 煤粉均沉积于圆柱形孔缝内。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝内煤粉沉积数量增多, 平行板状孔缝内可见煤粉沉积。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见少量细小悬浮煤粉, 当流速增至 10 mL/min 时, 产出液轻微浑浊, 可见少量煤粉沉降于瓶底, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多(图 8b)。

当矿化度为 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈; 煤粉沉积于圆柱形孔缝内, 总体较上一矿

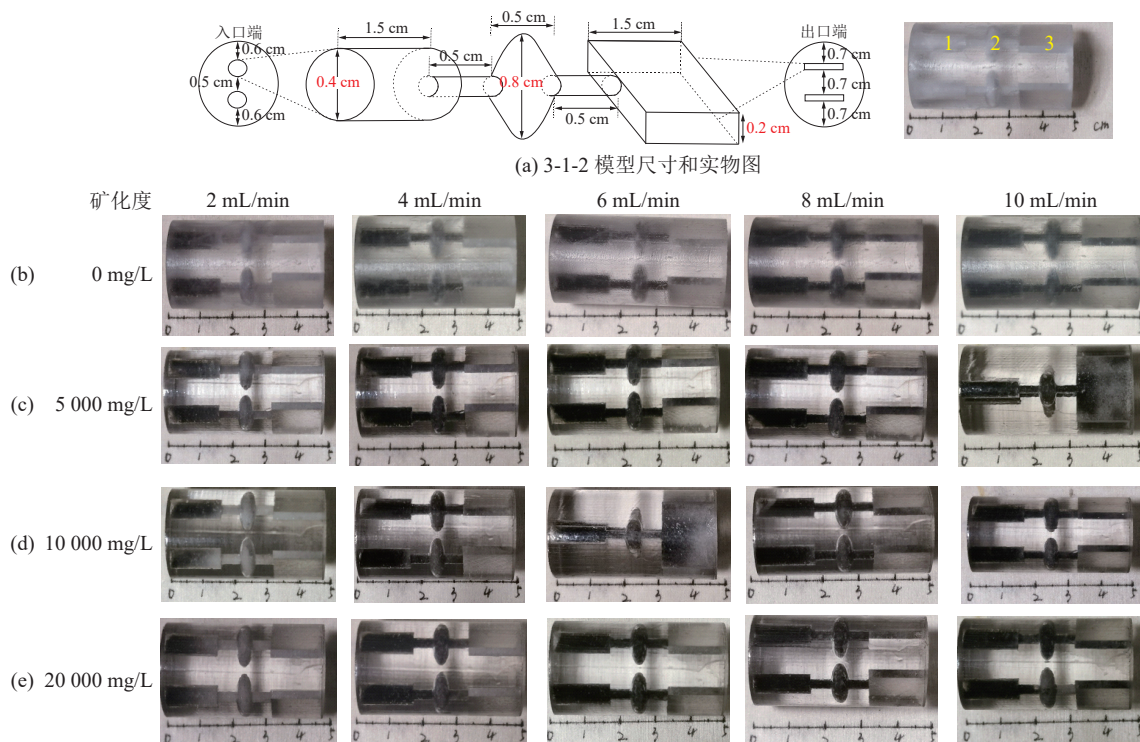


图 8 3-1-2 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.8 physical image of the model 3-1-2 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

化度颜色变深。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝被煤粉充满。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多。当流速增至 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 产出液清澈, 流速越大沉积煤粉数量越多(图 8c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈; 煤粉沉积于圆柱形孔缝内。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝内煤粉沉积数量增多, 平行板状孔缝内可见煤粉。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液中可见细小悬浮煤粉。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多, 其中平行板状孔缝内石英砂数量减少(图 8d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 煤粉沉积于圆柱形孔缝内。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝内煤粉沉积数量增多。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液些许浑浊, 可见细小悬浮煤粉, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多。当流速增至 10 mL/min 时, 产

出液浑浊, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量进一步增多(图 8e)。

### 3.2.3 3-1-3 模型

3-1-3 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 9 所示。

当矿化度为 0 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈; 仅在圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝底部有少量煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见悬浮煤粉; 不同类型孔缝内沉积煤粉数量增多。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 整体深浅依次为圆柱形孔缝>细颈瓶孔缝>平行板状孔缝。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊, 不同类型孔缝沉积煤粉数量增多。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液浑浊, 模型内形成贯穿通道, 石英砂堆积处仍有煤粉沉积(图 9b)。

当矿化度为 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 可见少许细小悬浮煤粉; 煤粉沉积于圆柱形孔内; 当流速增至 4 mL/min 时, 产出液些许浑浊; 圆柱形孔缝内石英砂减少, 煤粉总体沉积于不同孔缝底部, 平行板状孔缝内形成贯穿通道。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊; 不同类型孔缝内沉积煤粉数量增多, 石英砂数量减少。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊, 圆柱形孔缝内石英砂所剩无几, 不同类型孔缝内沉积煤粉数量继续增多。当



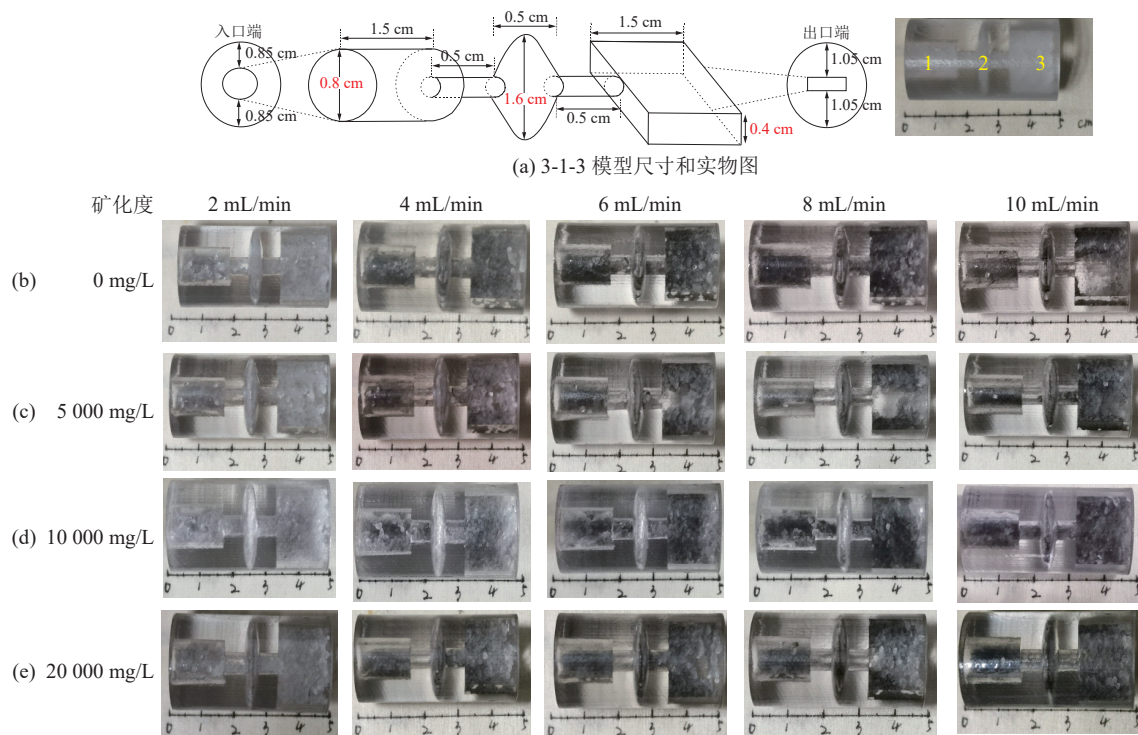


图9 3-1-3 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.9 Physical image of the model 3-1-3 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

流速增至 10 mL/min 时, 产出液更为浑浊, 不同孔缝之间形成贯穿通道(图 9c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝底部可见少许煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见悬浮煤粉; 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多, 圆柱形孔缝内石英砂数量减少。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊; 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内石英砂数量减少。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊, 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液更为浑浊, 不同孔缝之间形成贯穿通道(图 9d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 未见明显的煤粉颗粒沉积于孔缝。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液些许浑浊, 可见细小的悬浮煤粉; 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多, 圆柱形孔缝内石英砂数量减少。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见煤粉沉降于瓶底; 整体深浅依次为圆柱形孔缝>细颈瓶孔缝>平行板状孔缝。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊, 模型内部形成贯穿通道, 有石英砂部分沉降较多煤粉。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液最为浑浊, 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多(图 9e)。

### 3.2.4 3-2-1 模型

3-2-1 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 10 所示。

当矿化度为 0 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈; 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内可见沉降煤粉, 顶部孔缝组合未见煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液些许浑浊; 顶部圆柱形孔缝内可见煤粉沉积, 中部及下部圆柱形孔缝及平行板状孔缝内煤粉沉积数量增多。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多, 憋压压力增大至 4.6 MPa。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液浑浊; 所有孔缝组合内基本均被煤粉沉积充填, 憋压压力增大至 10.3 MPa。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液最为浑浊, 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多, 憋压压力增大至 12.1 MPa(图 10b)。

当矿化度为 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 中部及下部圆柱形孔缝及平行板状孔缝内可见沉积煤粉。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 中部及下部圆柱形孔缝及平行板状孔缝内沉积煤粉增多, 憋压压力增大至 4.7 MPa。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝底部煤粉沉积数量增多, 憋压压力增大至 10 MPa。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝内石英砂数量减少, 平行板状孔缝内沉积煤粉增多, 憋压压力增大



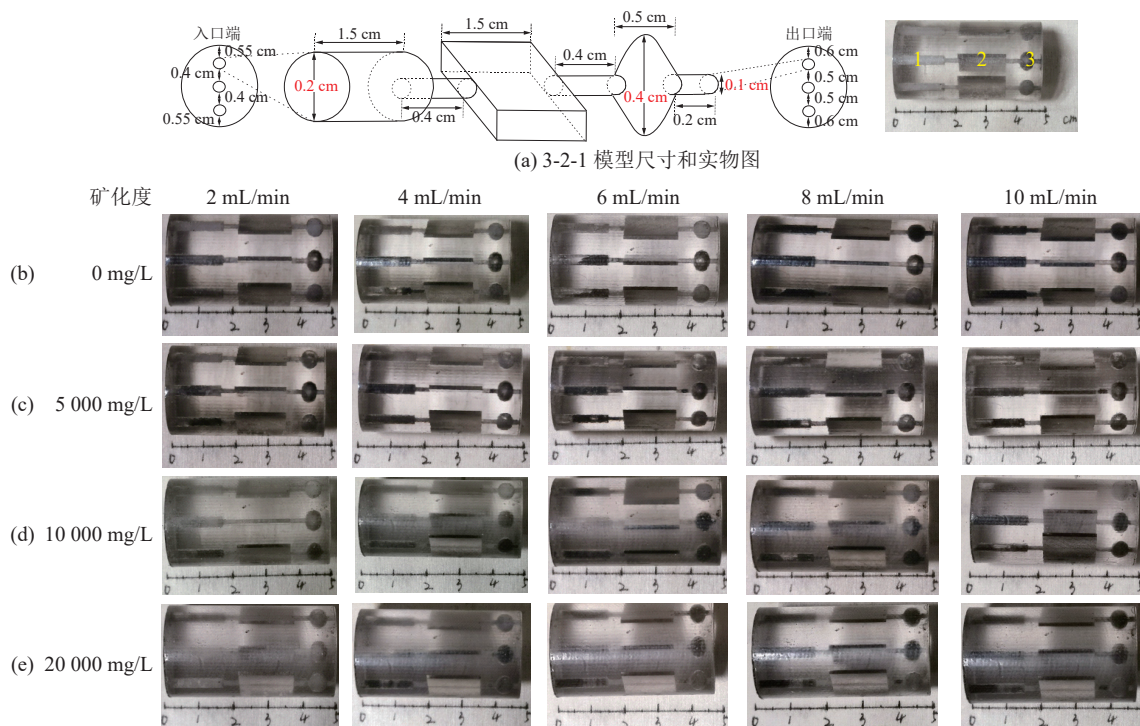


图 10 3-2-1 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.10 Physical image of the model 3-2-1 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

至 10 MPa。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液清澈, 憋压压力增大至 11 MPa(图 10c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 底部孔缝组合可见煤粉沉积, 但数量较少。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 煤粉沉积充填满整个底部孔缝组合, 其次为中部孔缝组合, 上部可见少量煤粉, 憋压压力增大至 3.1 MPa。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 顶部圆柱形孔缝内可见煤粉沉积, 细颈瓶孔缝与平行板状孔缝内未见煤粉沉积; 中部通道石英砂减少, 可见少量煤粉沉积; 底部孔缝组合被煤粉全部充填, 憋压压力增大至 7.5 MPa。当流速增至 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 产出液清澈, 不同孔缝组合内煤粉沉积数量增多, 憋压压力均分别增大至 10 MPa(图 10d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 顶部孔缝组合可见少量煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 顶部孔缝组合内煤粉沉积数量增多; 底部孔缝组合内煤粉数量增大幅度大; 中部孔缝组合内全部充填煤粉, 圆柱形孔缝内石英砂减少, 憋压压力增大至 2.6 MPa。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 不同孔缝组合内煤粉沉积数量增多, 憋压压力增大至 3.8 MPa。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液清澈, 不同孔缝组合内煤粉沉积数量增多, 憋压压力增大至 5.7 MPa。当流速

增至 10 mL/min 时, 产出液些许浑浊, 可见细小悬浮煤粉颗粒, 除底部细颈瓶孔缝外, 其余孔缝组合内沉积较多煤粉, 憋压压力增大至 7.6 MPa(图 10e)。

### 3.2.5 3-2-2 模型

3-2-2 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 11 所示。

当矿化度为 0 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝内可见少量煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液浑浊, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内可见煤粉沉积。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内沉积煤粉继续增多, 其中底部比上部煤粉沉积数量多。当流速增至 8 mL/min 时, 可见悬浮—沉降煤粉, 不同孔缝组合内煤粉沉积数量增多。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液浑浊, 圆柱形孔缝内石英砂减少, 不同孔缝组合内煤粉沉积数量增多, 憋压压力增大至 20 MPa(图 11b)。

当矿化度为 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝内可见大量煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 平行板状孔缝内可见煤粉沉积, 圆柱形孔缝内石英砂减少。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液清澈, 平行板状孔缝内煤粉沉积增多, 煤粉沉积堵满圆柱形孔。当流速增至 8 mL/min 时, 可见少量悬浮煤粉, 不同类型孔缝内均

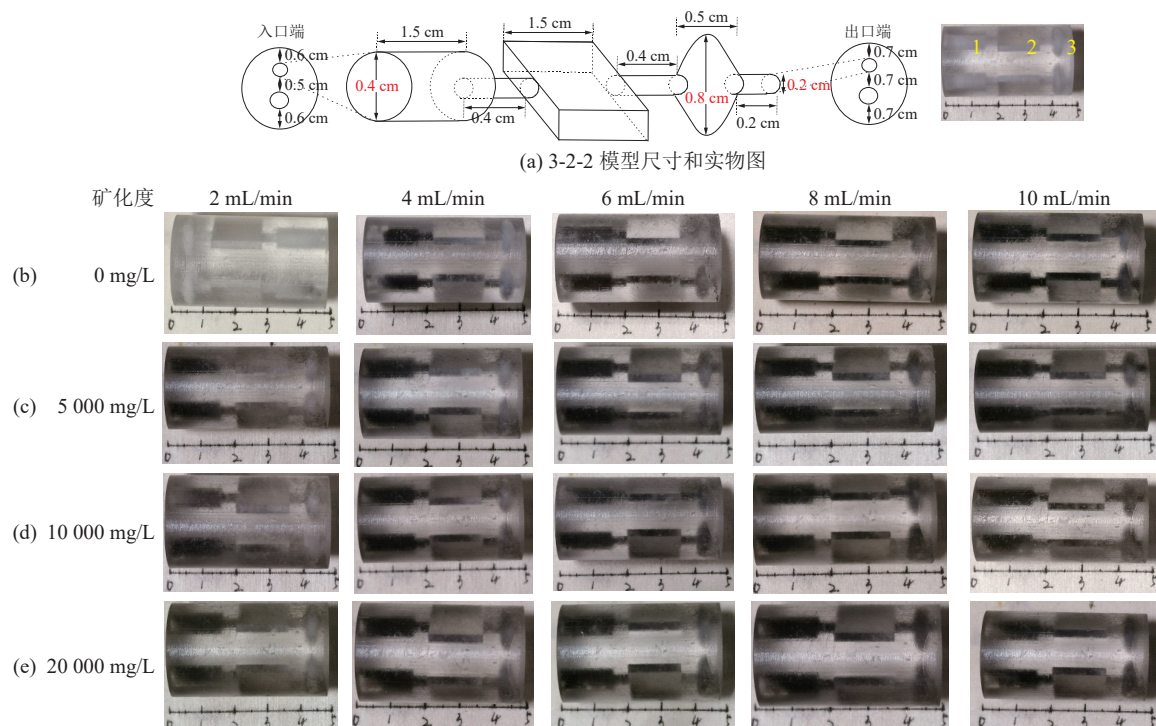


图 11 3-2-2 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.11 Physical image of the model 3-2-2 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

可见煤粉沉积, 憋压压力增大至 3.3 MPa。当流速增至 10 mL/min 时, 可见少量煤粉沉积于瓶底, 不同孔缝组合内煤粉沉积数量增多(图 11c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内可见煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 不同类型孔缝内均可见煤粉沉积, 其中顶部孔缝组合比底部孔缝组合煤粉沉积速度快。当流速增至 6 mL/min 时, 可见少许煤粉颗粒沉降于瓶底, 不同类型孔缝内均可见煤粉沉积, 底部孔缝组合煤粉沉积速度比顶部快, 此时憋压压力增大至 2.2 MPa。当流速增至 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 可见少许煤粉颗粒沉降于瓶底, 不同孔隙缝内煤粉沉积数量增多, 其中下部孔缝组合基本全部被煤粉充填, 憋压压力分别增大至 2.3 MPa 与 3.1 MPa(图 11d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝内可见煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内可见煤粉沉积, 其中顶部孔缝组合煤粉运移速度快, 沉积量少。当流速增至 6 mL/min 时, 可见少许煤粉颗粒沉降于瓶底, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内煤粉沉积数量增大。当流速增至 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 可见少许煤粉颗粒沉降于瓶底, 不同孔缝组合内煤粉沉积数量增多(图 11e)。

### 3.2.6 3-2-3 模型

3-2-2 模型尺寸和实物, 及其在不同流体作用下煤粉运移与沉降情况, 如图 12 所示。

当矿化度为 0 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 不同孔隙内均可见少量煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液浑浊, 圆柱形孔缝内石英砂减少, 底部孔缝组合内煤粉沉积数量高于顶部。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内石英砂减少, 模型内存在驱替连通通道。当流速增至 8 mL/min 时, 产出液继续浑浊, 模型中间形成连通通道。当流速增至 10 mL/min 时, 产出液更为浑浊, 不同类型孔缝内石英砂数量减少, 煤粉沉积量相对减少(图 12b)。

当矿化度为 5 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液清澈, 圆柱形孔缝与平行板状孔缝内可见煤粉沉积。当流速增至 4 mL/min 时, 可见少量细小悬浮煤粉, 不同类型孔缝内均可见煤粉沉积。当流速增至 6 mL/min 时, 产出液浑浊, 不同类型孔缝内煤粉沉积数量增多, 底部煤粉沉积比顶部多。当流速增至 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 产出液浑浊, 不同类型孔缝内石英砂数量减少, 模型中间形成连通通道(图 12c)。

当矿化度为 10 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 不同孔隙内均可见煤粉沉积, 整体深浅依次圆柱形



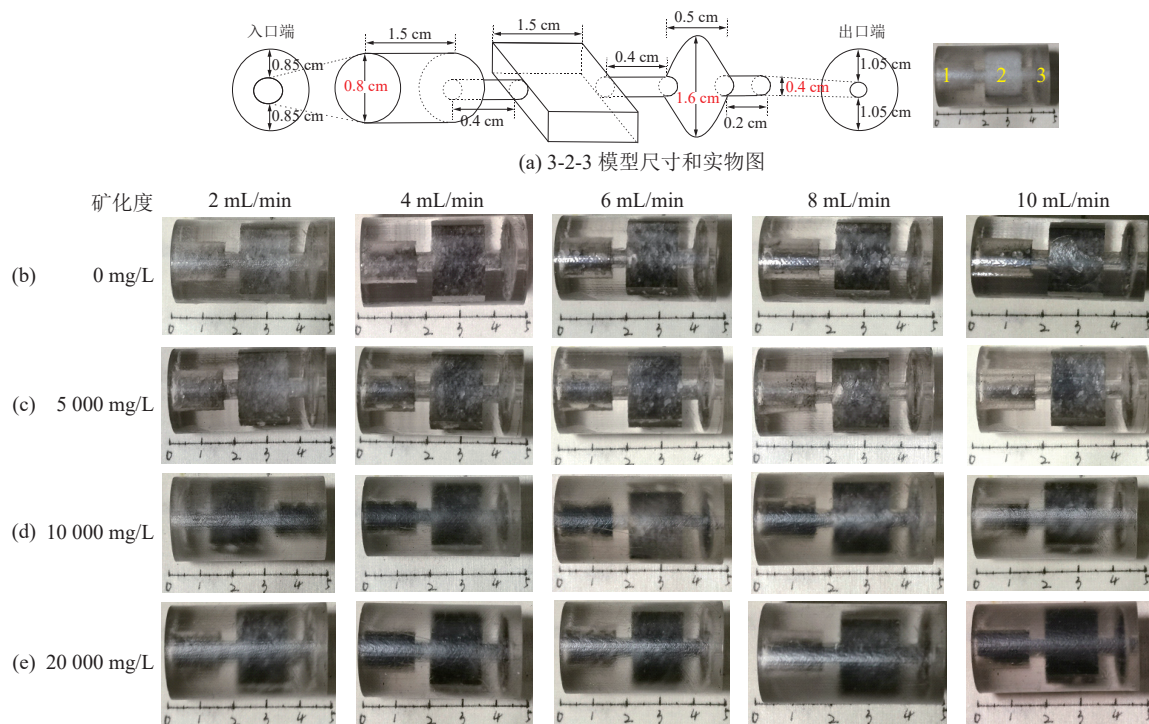


图 12 3-2-3 模型实物图及其在不同流体作用下煤粉运移及沉降特征

Fig.12 Physical image of the model 3-2-3 and its characteristics of coal fine transport and sedimentation under different fluid interactions

孔缝>平行板状孔缝>细颈瓶孔缝。当流速增至 4 mL/min 时, 产出液浑浊, 可见大量煤粉沉降于瓶底, 不同类型孔缝内煤粉沉积量增大。当流速增至 6、8 与 10 mL/min 时, 产出液浑浊, 流速增大导致不同类型孔缝内石英砂数量减少, 煤粉沉积数量增多(图 12d)。

当矿化度为 20 000 mg/L, 流速为 2 mL/min 时, 产出液浑浊, 不同孔缝内均可见煤粉沉积, 整体深浅依次圆柱形孔缝>平行板状孔缝>细颈瓶孔缝。当流速增至 4 mL/min 时, 不同孔缝内煤粉沉积数量增多。当流速增至 6、8 与 10 mL/min 时, 产出液浑浊, 流速增大导致不同类型孔缝内石英砂数量减少, 煤粉沉积数量增多(图 12e)。

### 3.3 不同形状孔缝及其组合约束下差异流体作用对煤粉运移的影响机制

产出液煤粉质量浓度可间接反映煤粉的运移规模, 其值越高代表煤粉的运移规模越大; 憋压压力可间接反映煤粉沉降导致的模型导流能力变化情况, 其值越大代表模型导流能力下降程度越大。

#### 3.3.1 孔缝类型影响作用

对于两端开放的圆柱形孔缝而言, 当矿化度小于 20 000 mg/mL 时, 伴随矿化度增大, 产出煤粉相对浓度(产出煤粉与注入煤粉质量浓度的比值)与流速之间呈抛物线关系, 存在最高值点, 最高值点对应

的流速逐渐增大。憋压压力仅在矿化度为 0 mg/mL、流速大于 8 mL/min 存在。由于本次所用驱替流体为  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3$  在水中由于具有弱酸根, 因此既发生电离, 又发生水解反应, 伴随矿化度增大, 水解产生的阴离子  $\text{OH}^-$  使煤粉颗粒表面负电荷增加, 增强煤粉间排斥力, 煤粉易于分散而不利于团聚<sup>[30]</sup>。故在高矿化度阶段(20 000 mg/mL), 流速增大产出煤粉质量浓度越大, 且未产生憋压, 即不存在煤粉沉降导致的模型导流能力下降。在低矿化度阶段(<20 000 mg/mL), 矿化度越低煤粉团聚效应越显著, 因此转折点对应的临界流速越小, 具体而言, 当矿化度为 0 mg/mL 时, 转折点对应流速为 6 mL/min, 此时大量煤粉堆积导致模型导流能力下降, 当流速继续增大, 产生憋压压力同样验证了模型导流能力的降低。当矿化度为 5 000 mg/mL 和 10 000 mg/mL 时, 对应临界流速为 8 mL/min, 但模型导流能力并未降低, 体现在憋压压力近似为 0 MPa, 模型入口处形成滤饼, 故导致产出煤粉相对浓度降低(图 13a, b)。

对于细颈瓶孔缝而言, 不同矿化度下产出煤粉相对浓度与流速均呈先增大后减小趋势, 且在流速为 8 mL/min 与 10 mL/min 时, 均存在憋压现象。上述情况表明, 相比于圆柱形孔缝, 细颈瓶孔缝在相同的条件下更容易发生煤粉堆积导致的储层伤害现象。矿化度越高, 临界流速对应的产出煤粉相对浓度越



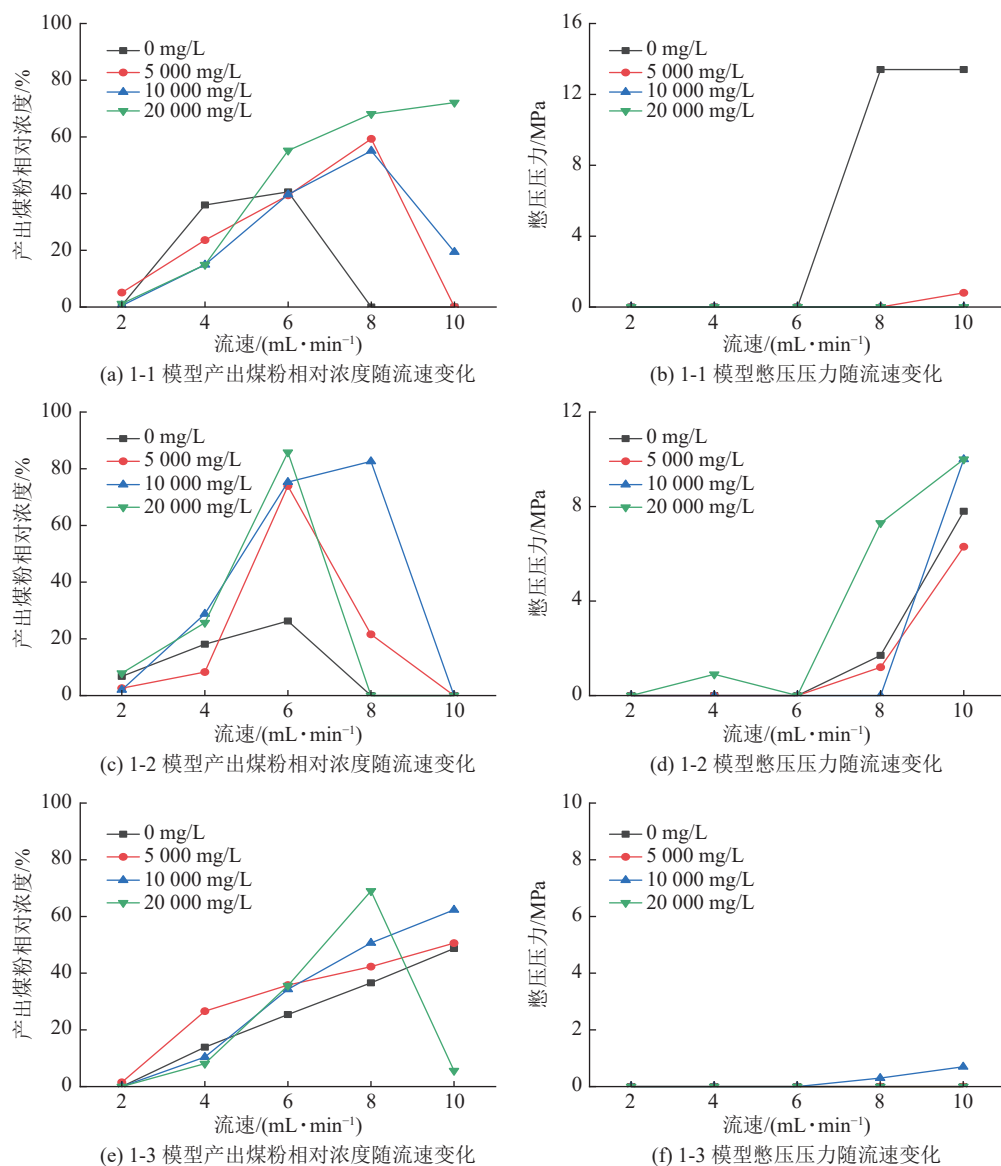


图 13 差异流体作用下不同单孔模型产出煤粉浓度、憋压压力随流速变化

Fig.13 Variation of coal fine concentration and holding pressure with flow velocity under the action of differential fluid in different single pore models

大,与圆柱形孔缝规律相同(图 13c, d)。

对于平行板状孔缝而言,不同矿化度下憋压压力均趋近于 0 MPa,表明在本次流体条件下,并未有煤粉沉降导致的导流能力下降。当矿化度小于 20 000 mg/mL 时,伴随矿化度增大,产出煤粉相对浓度随流速的增大而增大,表明煤粉悬浮运移规模越大。当矿化度增加至 20 000 mg/mL 时,大量煤粉运移在入口端形成滤饼,导致在流速为 10 mL/min,产出煤粉相对浓度降低(图 13e, f)。

总体而言,就煤粉运移规模与煤粉沉降导致的导流能力下降从优到差依次为平行板状孔缝、两端开放的圆柱形孔缝与细颈瓶孔缝。

### 3.3.2 孔缝组合方式及孔缝大小影响作用

当采用圆柱形孔缝(入口端)+细颈瓶孔缝+平行

板状孔缝(出口段)组合时,按照孔径从小到大依次为 3-1-1 模型(3 组孔隙组合)、3-1-2 模型(2 组孔隙组合)与 3-1-3 模型(1 组孔隙组合)。

对于 3-1-1 模型而言,几乎在任何矿化度与试验设计流速条件下,均在出口段未见产出煤粉,憋压压力随流速增大而逐渐增大,暗示煤粉沉降导致的模型导流能力快速下降<sup>[31]</sup>。特别是在低矿化度阶段(<5 000 mg/L),在较低的流速下憋压压力迅速上升进而停止试验,同样印证了低矿化度下煤粉团聚导致煤粉颗粒堆积到入口段,煤粉难以进入模型而导致憋压压力迅速增大。当矿化度升高后,煤粉分散性增强,悬浮煤粉随流速增大而运移量增多,煤粉在模型中的沉降量增大,模型导流能力下降,憋压压力增大。

相比于 3-1-1 模型, 3-1-2 模型孔隙组合没变, 但增大了相应的孔缝直径。试验结果表明增大后的孔缝组合在任何流速与矿化度下未见憋压。仅在高矿化度(20 000 mg/L)、高流速条件下可在出口段见产出煤粉。上述现象表明虽然煤粉沉降于模型孔缝间形成泥饼过滤流体, 使得产出煤粉浓度近似为 0, 但此时煤粉沉降在相应流速作用下并未导致模型导流

能力下降, 与石英砂被携带出有关。

当继续增大孔缝直径, 对于 3-1-3 模型而言, 同样表现为在任何流速与矿化度下未见憋压。伴随流速增大, 产出煤粉相对浓度随之增大, 且矿化度越高, 产出煤粉浓度越大。上述现象表明, 孔径越大越不利于煤粉沉降, 流速越大煤粉运移数量越多, 模型导流能力相比于上述模型是最好的(图 14)。

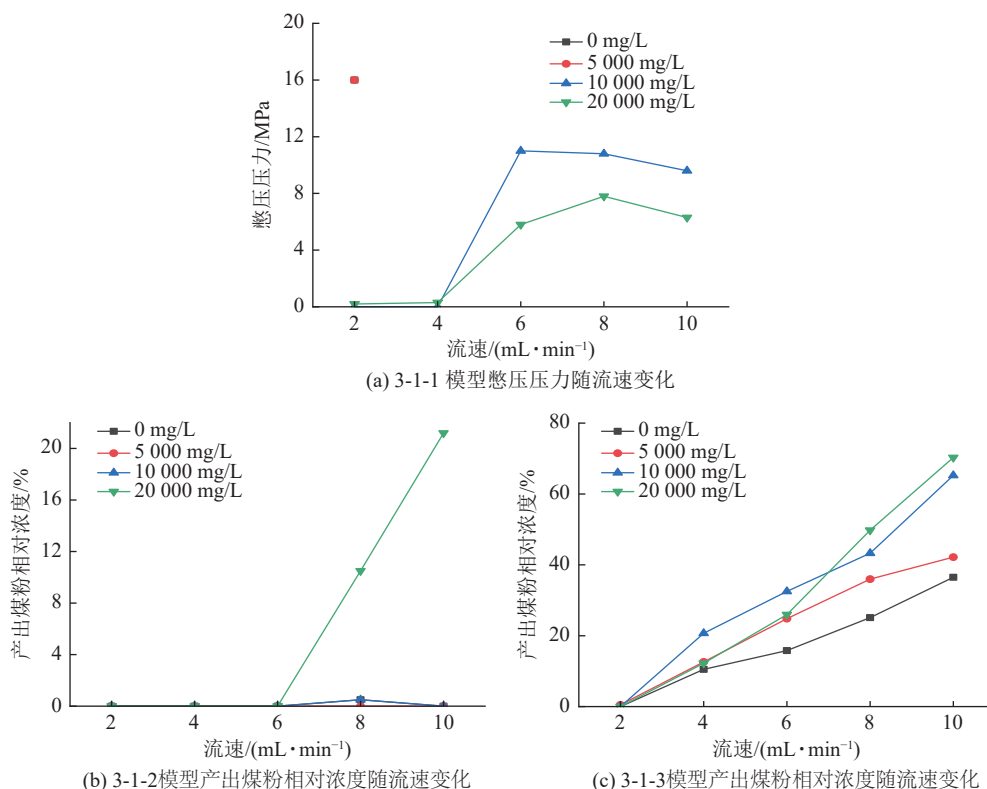


图 14 差异流体作用下各模型产出煤粉浓度、憋压压力随流速变化

Fig. 14 Variation of coal fine concentration and holding pressure with flow velocity under the action of differential fluid in the models

当采用圆柱形孔缝(入口端)+平行板状孔缝+细颈瓶孔缝(出口段)组合时, 按照孔径从小到大依次为 3-2-1 模型(3 组孔隙组合)、3-2-2 模型(2 组孔隙组合)与 3-2-3 模型(1 组孔隙组合)。

对于 3-2-1 模型而言, 在矿化度为 0 mg/L 时, 产出煤粉浓度与憋压压力随流速增大而增大, 表明大量煤粉运移导致模型导流能力急剧下降。当矿化度逐渐增大, 煤粉相对较为分散, 且矿化度越大, 煤粉越为分散, 导致在高矿化度下, 煤粉沉降作用下模型导流能力下降速度慢(图 15a, b)。

相比于 3-2-1 模型, 当孔径增大后的 3-2-2 模型, 不同矿化度下的产出煤粉浓度增大, 憋压压力相对减弱, 暗示孔径增大后更利于煤粉的运移, 煤粉沉降导致的模型导流能力下降程度降低(图 15c, d)。

当孔径继续增大后, 在任何流体条件下, 憋压压

力均近似为 0, 产出煤粉浓度随流速与矿化度增大而增大, 表明孔径越大越不利于煤粉沉沉降, 流速越大煤粉运移数量越多, 这与上述模型所得结论一致(图 15e)。

## 4 结 论

1) 借助 3D 打印技术加工了不同孔缝类型及其组合的毫米尺度模型样品, 依托可视化观测煤粉运移与沉降的试验装置, 揭示了不同类型孔缝及其组合约束下差异流体作用(流体压力、矿化度)对煤粉运移的影响机制

2) 对于圆柱形孔缝而言, 当矿化度为 20 000 mg/L 时, 流速与产出煤粉浓度呈正相关关系; 对于细颈瓶孔缝而言, 不同矿化度下产出煤粉浓度与流速均呈先增大后减小趋势, 煤粉运移易在此类孔缝内形成

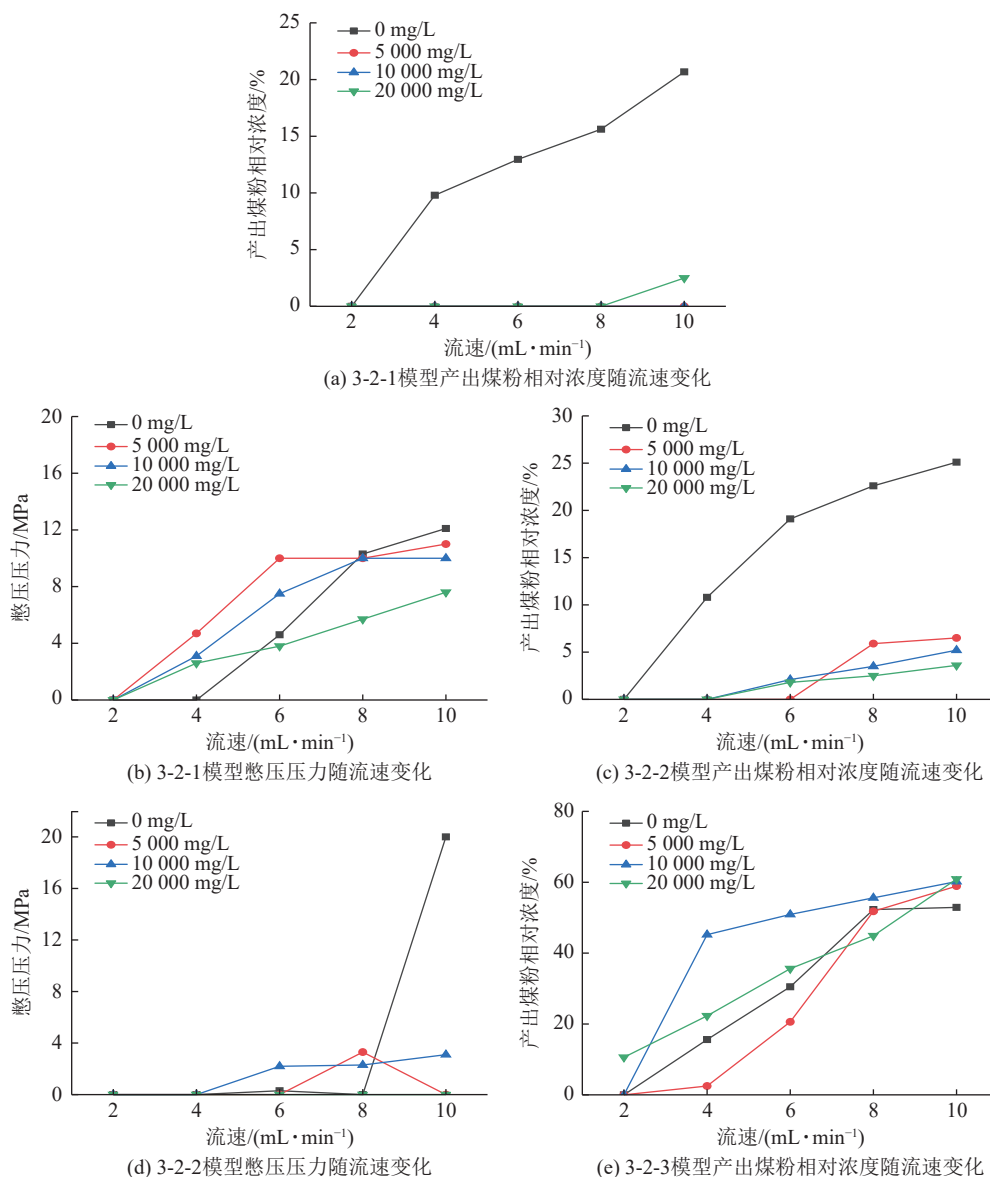


图 15 差异流体作用下各模型产出煤粉浓度、憋压压力随流速变化

Fig.15 Variation of coal fine concentration and holding pressure with flow velocity under the action of differential fluid in the models

堆积进而导致储层伤害;对于平行板状孔缝而言,煤粉运移规模与流速呈正相关关系,与前两类孔隙相比,在相同流体作用下不易发生储层伤害。

3)无论任何孔缝组合条件下,当孔径足够大,煤粉利于运移产出而不利沉降,模型导流能力随流速增大而增大,主要与高流速下可携带部分石英砂产出有关。对于不同孔缝组合而言,圆柱形孔缝(入口端)+细颈瓶孔缝+平行板状孔缝(出口段)的组合比圆柱形孔缝(入口端)+平行板状孔缝+细颈瓶孔缝(出口段)的组合有更好的抵抗煤粉沉降导致储层物性变差的能力,主要体现在相同流体作用条件下,憋压压力相对较低。

4)当前研究虽然能模拟典型孔缝组合条件下煤粉运移与沉降情况,但实际煤储层孔隙结构非均质

性较强,特别是在纳米尺度,未来伴随3D打印技术精度的提高,有望突破这一局限。

#### 参考文献(References):

- [1] ZOU Y S, ZHANG S C, 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.
- [2] GUO Z H, 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.
- [3] YANG S Y, RUSSELL T, BADALYAN A, et al. Characterisation of fines migration system using laboratory pressure measurements[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 65: 108-124.
- [4] 高占胜, 杨波, 刘己胜. 大佛寺井田煤层气储层伤害及其原因分



- 析[J]. 资源与产业, 2018, 20(4): 47-51.
- GAO Zhansheng, YANG Bo, LIU Jisheng. CBM reservoir damage and reasons of Dafosi well field[J]. Resources Industries, 2018, 20(4): 47-51.
- [5] MAGILL D, RAMURTHY M, JORDAN R, et al. Controlling coal-fines production in massively cavitated open hole coalbed-methane wells[C]. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Queensland, Australia, 2010. SPE 134031.
- [6] MASSAROTTO P, IYER R S, ELMA M, et al. An experimental study on characterizing coal bed methane (CBM) fines production and migration of mineral matter in coal beds[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(2): 766-773.
- [7] GUO Z H, PHUNG N H V, HUSSAIN F. A laboratory study of the effect of creep and fines migration on coal permeability during single-phase flow[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 200: 61-76.
- [8] AWAN F U R, KESHAVERZ A, AKHONDZADEH H, et al. Optimizing the dispersion of coal fines using sodium dodecyl benzene sulfonate[C]. Asia Pacific Unconventional Resources Technology Conference, Brisbane, Australia, 2019. URTEC-198250-MS.
- [9] 姚征, 曹代勇, 魏迎春, 等. 煤层气开发中煤粉防治措施综合分析研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 124-128, 162.
- YAO Zheng, CAO Daiyong, WEI Yingchun, et al. Comprehensive analysis of prevention and control measures for coal fines in coalbed methane production[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 124-128, 162.
- [10] TAO S, GAO L J, PAN Z J. Swelling of clay minerals and its effect on coal permeability and gas production: A case study of southern Qinshui Basin, China[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(2): 515-528.
- [11] 慕甜, 马东民, 陈跃, 等. 煤层气井多相流条件下不同粒径煤粉启动-运移规律[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 188-196.
- MU Tian, MA Dongmin, CHEN Yue, et al. Start-migration law of coal powder with different particle multi-phase flow conditions in coalbed methane wells[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 188-196.
- [12] ZEINJAHROMI A, VAZ A, BEDRIKOVETSKY P. Productivity impairment of gas wells due to fines migration[C]. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Louisiana, USA, 2012. SPE 151774.
- [13] YANG Y, YOU Z, SIQUEIRA F D, et al. Modelling of slow fines migration and formation damage during rate alteration[C]. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, 2016. SPE-182320-MS.
- [14] 王铭伟. 考虑煤粉影响的煤层气开发实验与数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016: 52-79.
- WANG Mingwei. Development experiment and numerical simulation of coal bed methane considering the effect of coal powder[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016. 52-79.
- [15] PREMPEH K, CHEQUER L, BADALYAN A, et al. Effects of kaolinite on fines migration and formation damage[C]. SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, Louisiana, USA, 2020. SPE-199293-MS.
- [16] 皇凡生, 董长银, 康毅力, 等. 移动气泡诱发裂隙内煤粉启动机制与防控措施[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 100-107.
- HUANG Fansheng, DONG Changyin, KANG Yili, et al. Mechanisms and control measures of incipient motion of coal fines induced by moving gas bubbles in coalbed fractures[J]. Journal of China University of Petroleum Edition of Natural Science, 2021, 45(4): 100-107.
- [17] 张惜图, 胡胜勇, 武玺, 等. 煤粉侵入对支撑裂缝渗透率的动态影响规律[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2338-2346.
- ZHANG Xitu, HU Shengyong, WU Xi, et al. Dynamic influence of coal fine intrusion on propped fracture permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2338-2346.
- [18] BAI T H, CHEN Z W, AMINOSSADATI S M, et al. Experimental investigation on the impact of coal fines generation and migration on coal permeability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 159: 257-266.
- [19] HUANG F S, KANG Y L, YOU Z J, 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.
- [20] 张双斌, 苏现波, 林晓英. 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, LIN Xiaoying. 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.
- [21] 刘春花, 刘新福, 周超. 煤层气井排采过程中煤粉运移规律研究[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(5): 23-26.
- LIU Chunhua, LIU Xinfu, ZHOU Chao. Migration patterns of coal powder in coal reservoirs during the well drainage[J]. Coal Geology Exploration, 2015, 43(5): 23-26.
- [22] 赵帅. 微气泡对支撑裂缝中煤粉运移堵塞规律影响实验研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021: 29-42.
- ZHAO Shuai. Experimental study on the influence of pore structure on seepage characteristics in tight sandstone reservoir[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021: 29-42.
- [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] 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.
- [25] 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.
- [26] LIU Y F, LI S, TANG D Z, et al. Mechanical behavior of low-rank bituminous coal under compression: An experimental and numerical study[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 66: 77–85.
- [27] CHEN H, TIAN W G, CHEN Z H, et al. Genesis of coalbed methane and its storage and seepage space in Baode block, eastern Ordos basin[J]. *Energies*, 2022, 15(1): 81.
- [28] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 115–130.
- XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 115–130.
- [29] ZHANG W, HE Y X, ZHANG Q F, et al. Study on the effect of salinity and water content on CBM adsorption/desorption characteristics of coal reservoir in Baode block[J]. *Geofluids*, 2022, 2022: 1–9.
- [30] 刘子亮, 魏迎春, 张琦, 等. 水化学性质对支撑裂缝中煤粉运移影响的物理模拟实验[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(9): 3483–3493
- LIU Ziliang, WEI Yingchun, ZHANG Qi, et al. Physical simulation experiment of the effect of hydrochemical properties on the migration of coal fines in propped fractures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(9): 3483–3493
- [31] 李小刚, 陈浩, 熊俊雅, 等. 支撑裂缝煤粉动态运移沉积可视化模拟试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(8): 151–158.
- LI Xiaogang, CHEN Hao, XIONG Junya, et al. Experimental study on visualization simulation of coal powder dynamic migration and deposition in propped fractures[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(8): 151–158.