



基于二维孔隙网络模型的悬浮颗粒微观尺度滞留规律及渗流场特征

王世玺 崔连可 俞晓鸾 宋智勇 王中楠

Nanomicron heterogeneous topic: Pore size suspended particle retention law and seepage field characteristics

WANG Shixi, CUI Lianke, YU Xiaoluan, SONG Zhiyong, WANG Zhongnan

引用本文:

王世玺, 崔连可, 俞晓鸾, 宋智勇, 王中楠. 基于二维孔隙网络模型的悬浮颗粒微观尺度滞留规律及渗流场特征[J]. [北科大: 工程科学学报](#), 2025, 47(3): 411–418. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.05.003

WANG Shixi, CUI Lianke, YU Xiaoluan, SONG Zhiyong, WANG Zhongnan. Nanomicron heterogeneous topic: Pore size suspended particle retention law and seepage field characteristics[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(3): 411–418. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.05.003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.07.05.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[多孔介质细观流动理论研究进展](#)

Review on mesoscopic flow theory in porous media

工程科学学报. 2022, 44(5): 951 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.11.30.005>

[基于文本挖掘的矿山安全隐患大数据分析可视化](#)

Big data analysis and visualization of potential hazardous risks of the mine based on text mining

工程科学学报. 2022, 44(3): 328 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.10.23.004>

[微波热解法制备氧化铈过程的可视化研究](#)

Visualization study on preparation of CeO₂ by pyrolysis method via microwave heating

工程科学学报. 2023, 45(7): 1238 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.04.20.004>

[三轴应力下颗粒流失对断层破碎带凝灰岩渗流特征的影响](#)

Influence of particle loss on the seepage characteristics of tuff in the fault fracture zone under triaxial stress

工程科学学报. 2022, 44(7): 1134 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.11.22.001>

[矿石颗粒级配对堆浸体系三维孔隙结构的影响](#)

Effects of ore size distribution on the pore structure characteristics of packed ore beds

工程科学学报. 2020, 42(8): 972 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.01.17.002>

[基于形态学开运算的浸矿体系孔隙结构及其演化特征](#)

Pore structure and its evolution characterization in leaching systems via morphological open operation

工程科学学报. 2024, 46(2): 199 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.12.01.001>

基于二维孔隙网络模型的悬浮颗粒微观尺度滞留规律及渗流场特征

王世玺¹⁾, 崔连可²⁾, 俞晓鸾¹⁾, 宋智勇^{1)✉}, 王中楠¹⁾

1) 北京科技大学资源与安全工程学院, 北京 100083 2) 中国石化河南油田分公司石油工程技术研究院, 南阳 473000

✉通信作者, E-mail: songzhy232@163.com

摘要 油气田开发是典型的多相渗流过程, 在长期并持续的开发过程中, 注水、气驱、化学驱及压裂等技术都会导致携带来的矿物颗粒及储层内原有喉道的砂体颗粒逐渐松散并脱落, 造成储层孔隙中的迁移及堵塞, 继而影响储层的动用及最终采收率。因此, 研究悬浮颗粒在多孔介质中迁移与滞留过程及流场特征有重要意义。然而, 现有针对悬浮颗粒在多孔介质中迁移与滞留的研究主要关注颗粒的迁移和滞留对渗透率的损害, 没有体现颗粒运移的过程, 也不能反应孔隙网络中颗粒堵塞和流场变化的关系。为探究悬浮颗粒在多孔介质内的流场特征, 本研究利用微观可视化模型及微观粒子图像测速技术(Micro-Particle image velocimetry, 简称为 Mirco-PIV)分析了在二维孔隙网络中悬浮颗粒的滞留特征及相互关系, 并揭示了流场的变化规律。实验结果表明, 初期主通道流速更高, 但由于主通道颗粒滞留量($6.5 \mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$)比边界区更多($2.4 \mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$), 颗粒注入导致主通道流速降低, 扰乱原有流场导致“斑”状流场出现, 也使主通道($110 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 $41 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)在中期流速低于边界区($67 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 $45 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。这也表明高流速区更有效的输运了颗粒。滞留的分布特征观察到主要滞留在了边壁附近, 较高浓度条件下还会在主通道内产生聚集现象, 这些都导致了孔隙的有效封堵。本文首次提供了颗粒和流场互动过程, 给出二维孔隙条件下可视化的直接的证据。此外, 本文还得出颗粒分布特征, 并总结出滞留靠近边壁、流动有效半径变窄及主通道高浓度的聚集问题, 是导致封堵的核心机理, 为进一步颗粒滞留理论的完善提供参考。

关键词 多孔介质; 颗粒滞留; 时空分布; 流场; 可视化

分类号 TE31

Nanomicron heterogeneous topic: Pore size suspended particle retention law and seepage field characteristics

WANG Shixi¹⁾, CUI Lianke²⁾, YU Xiaoluan¹⁾, SONG Zhiyong^{1)✉}, WANG Zhongnan¹⁾

1) School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Sinopec Henan Oilfield Company, Petroleum Engineering Technology Research Institute, Nanyang 473000, China

✉Corresponding author, E-mail: songzhy232@163.com

ABSTRACT The development of oil and gas fields involves a typical multiphase percolation process. Over time, techniques such as injection, gas flooding, chemical flooding, and fracturing can cause mineral and sand particles in the original reservoir throat to gradually loosen and fall off. This particle loosening can adversely affect reservoir exploitation and reduce recovery efficiency. Therefore, studying the migration and flow field of suspended particles within porous media is considerable. However, current studies mainly address how particle migration and retention affect permeability and often overlook the dynamics of particle migration and their impact on flow fields within pore networks. The microscopic visualization model and microparticle image velocimetry (Mirco-PIV) technology were used to

收稿日期: 2024-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42102163)

analyze particle retention and flow field changes in the main channel and boundary region of the two-dimensional porous glass model, and the laws were summarized. Results show that while initial flow velocity is higher in the main channel, particle retention in the main channel is more pronounced than that in the boundary region. Continuous particle injection reduces the flow velocity in the main channel, disturbing the original flow field and creating a “spot” flow field. Eventually, the main channel experiences a lower flow rate in the medium term than the boundary region, indicating that particles are transported more efficiently in high-flow zones. Retention mainly occurs near side walls, with high concentrations, leading to aggregation in the main channel, effectively plugging pores. Previous studies did not account for retention, aggregation, and interweaving. To our knowledge, this paper provides new insights into the interaction between particles and flow fields, offering direct visual evidence for two-dimensional conditions. As particles are injected, high flow rates transport a larger number of particles, increasing the possibility of retention and subsequently decreasing flow rates. This illustrates the interaction mechanism between particles and flow fields over time and space. Regarding flow velocity, the trends in the main channel and boundary region are inconsistent. As particles are continuously injected, the trunk road of the main channel changes, whereas the boundary region remains unaffected. In addition, particle distribution characteristics show that the core mechanism of blockage involves retention near the side wall, a reduction in the effective flow radius, and high concentration areas in the main channel. Current theories do not adequately address these issues and should be revised accordingly. The study used a combination of microscopy and micro-PIV to explore the retention and flow field of suspended particles in porous media, uncovering critical variations in these processes.

KEY WORDS porous media; particle retention; spatiotemporal distribution; flow field; visualization

油气田开发是典型的多相渗流过程,在长期并持续的开发过程中,注水、气驱、化学驱及压裂等开发技术会导致地层矿物剥离颗粒,和新注入的颗粒一同在储层孔隙中多孔介质内迁移并堵塞孔隙^[1]。颗粒运移、滞留和结块导致沉积会逐渐发生地层损害^[2-3]。颗粒沉积也会扰乱流场,导致沉淀进一步沉积。为了减轻储层伤害,对颗粒的迁移与滞留过程及流场变化规律进行研究十分重要。

目前,针对地层内注入悬浮颗粒运移的研究进行了大量物理实验和数学模拟。物理实验中,利用岩心实验研究了流速^[4]、粒径^[5]对多孔介质中悬浮颗粒运移和沉积的影响,研究了悬浮颗粒在不同尺寸的多孔介质中的迁移沉积特性,颗粒的滞留随着多孔介质的孔隙尺寸的减小而降低^[6]。但是岩心实验不能将迁移与滞留的具体过程可视化。微观实验从动力角度讨论了迁移和沉积的影响因素,给出了影响沉积速率的临界流速^[7]。但是,现有研究主要集中在一维条件下,关注的重点为颗粒悬浮液的迁移和滞留对渗透率的损害,现有研究不能反应高维度孔隙网络中颗粒堵塞和流速、流场变化的关系。数学模拟中,现有研究基于网络模型研究了外源和内源颗粒的迁移和滞留对多孔介质渗透率的损害^[8],也指出了二维孔隙网络速度均值随时间的降低规律^[9],然而,数学模拟关于滞留迁移的效果是否准确无法验证,没有实验依据支持。目前的研究也不能同时给出孔隙网络、孔隙内、时间等维度的关键信息。

针对以上问题,本研究采用模拟真实孔隙结

构的二维微观可视化模型与 Micro-PIV 相结合,在颗粒长期注入 100PV(表示注入孔隙体积倍数为 100,记为 100PV,后文相关表达形式均如此)情况下选择主通道和边界区的两点观察颗粒滞留与流场变化的研究。研究悬浮颗粒在多孔介质内滞留与流场特征及其相互关系,并解释其机理。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

研究中的颗粒为粒径中值 d_{50} 为 3.2 μm 的高岭土(密度 $\rho=2.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),实验模拟地层水($\text{NaCl } 2500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2 300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgCl}_2 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

微观模型是由刻蚀玻璃与玻璃盖板键合、烧结而成的封闭孔隙空间^[10],内部孔隙网络与天然砂岩岩心的横截面图像完全相同,可以有效地模拟真实的岩心情况。微观模型的对角处设有进、出口孔,流体通过孔网流动。模型外部尺寸和孔隙深度分别为 20 mm×40 mm 和 30 μm ,喉道孔径范围为 20 ~ 100 μm ,根据波及范围的不同,将玻璃模型分为主通道和边界区两部分(图 1 红线所示)。主通道,边界区分别选择观察点,主通道的观察点坐标为距离入口 3 mm×3 mm 的位置,边界区的观察点坐标为距离入口 2.5 mm×24 mm 的位置(如图 1 所示)。

1.2 悬浮颗粒微观运移实验

实验装置包括微观模型、微量注射泵、显微镜和图像记录系统,见图 2。

实验步骤:首先,在真空条件下在微观模型内

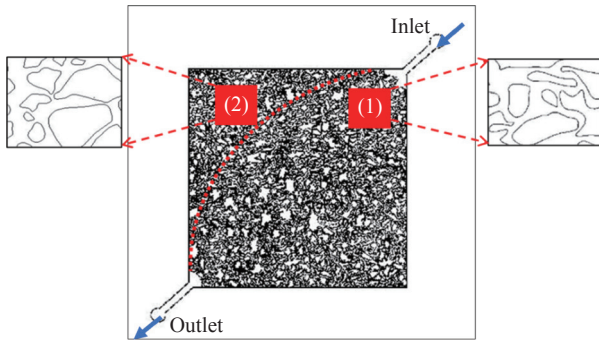


图1 玻璃模型及观察点位置示意图。(1) 主通道; (2) 边界区

Fig.1 Glass model and schematic diagram of the observation point: (1) main channel; (2) boundary region

注入 2PV 的人工地层水, 微量注射泵排除气泡后, 连接好注入高岭土浊液 (质量浓度 $500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 的鲁尔注射器; 之后, 向微观模型中以 $5 \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 注射速率注入至 100PV 为止, 鲁尔注射器全程使用旋风振动仪振动以免颗粒沉积; 接下来分别在 20PV、50PV、100PV 时用显微镜下观察微观模型标注的两点高岭土颗粒的迁移情况拍照记录, 观察不同时间、不同位置点位的颗粒物滞留情况。

注入结束后, 使用 Matlab 编写的图像分析程序, 先首先将显微镜下拍到的原图二值化处理, 再读取文件夹中所有“二值化.jpg”文件并计算黑色像素点占比。根据实验顺序前后二值化图片中像素点的数量变化计算观察点单位时间颗粒滞留面积的变化。

高岭土颗粒滞留质量计算公式为:

$$M = Ah^*\rho \quad (1)$$

式中: M 为颗粒滞留质量, mg ; A 为颗粒滞留面积, μm^2 ; h^* 是滞留颗粒平均高度, $h^*=5 \mu\text{m}$, ρ 为密度, $\rho=2.6 \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

1.3 悬浮颗粒微观流场实验

可视化流场实验装置除了流动及观察装置外, 还包括一套 Micro-PIV 系统, Micro-PIV 系统包

括 200 mJ 双脉冲 VL Nd:YAG 激光器 (峰值发射波长为 532 nm, 脉冲频率为 15 Hz), 12 位 CCD 相机和显微镜 (蔡司, 德国) 以及荧光粒子 (粒径 $1 \mu\text{m}$, Thermo Scientific, 美国)。

PIV 速度计算是由多次摄像以记录流场中粒子的位置, 结合计算机分析不同时刻图像变化, 进而测量速度场的变化^[11]。本实验利用 PIV 技术, 观察并记录标记的目标点位, 根据记录时间前后的液相的速度场变化、颗粒堆积变化分析影响速度场的因素。

流场中每个时间步长的平均速度的计算公式为:

$$V_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{N} \quad (2)$$

式中: V_{avg} 为平均速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; N 为测量视图中速度矢量的个数; V_i 是每个测量点的实时速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

关于实验的流体介质 (水和油) 的选择。首先, 由于新制备的模型是玻璃材质, 孔隙壁面自然表现为强亲水性, 如果模型饱和油后内部的孔隙表面含有含碳的亲油基团, 会使得颗粒更容易被滞留, 影响颗粒的迁移滞留过程; 其次, 水的黏度相对较低, 粒子在水中运动时受到的黏性阻力相对较小, 油的黏度更大, 影响颗粒的流动。此外, 水与荧光粒子有较好的相容性, 不容易聚集。本实验使用人工地层水作为模拟介质。

实验步骤: 首先, 在真空条件下利用微量注射泵向微观模型内注入 2PV 人工地层水, 并排除气泡; 之后, 连接鲁尔注射器并向微观模型中以 $5 \mu\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 速率注入 100PV 含有荧光粒子的高岭土溶液, 鲁尔注射器全程使用旋风振动仪振动以免颗粒沉积; 在显微镜下观察高岭土溶液在模型入口的滞留情况, 同时在 20PV、50PV、100PV 时对同一点位的模型位置拍照记录流场 (拍照间隔

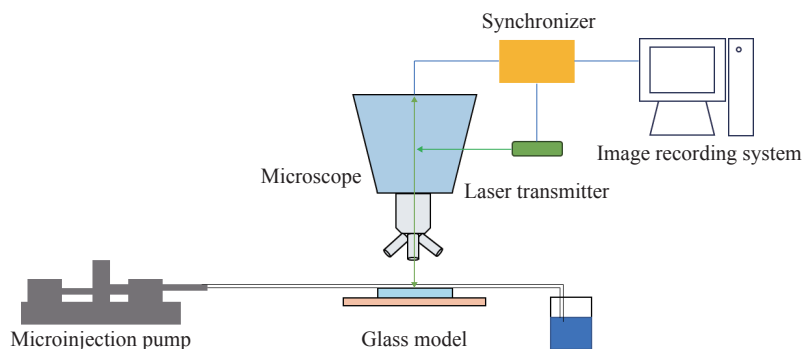


图2 悬浮颗粒微观可视化运移及可视化流场实验的实验装置

Fig.2 Experimental equipment for the microscopic visualization of suspended particles and the flow field

100 μs); 最后利用软件 DaVis 10.0.5 对所选取的位置在一段时间的流场进行后处理.

2 实验结果

2.1 微观过程悬浮颗粒运移分布特征

在高岭土悬浮颗粒浊液流体注入的不同时刻 (0PV、20PV、50PV、100PV) 观察主通道 (图 3) 和边界区 (图 4) 颗粒滞留情况, 计算颗粒滞留量及积累速率.

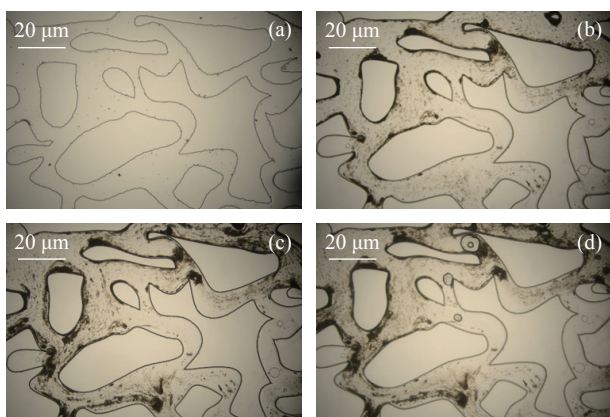


图 3 主通道颗粒滞留情况. (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV
Fig.3 Particle retention in the main channel: (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV

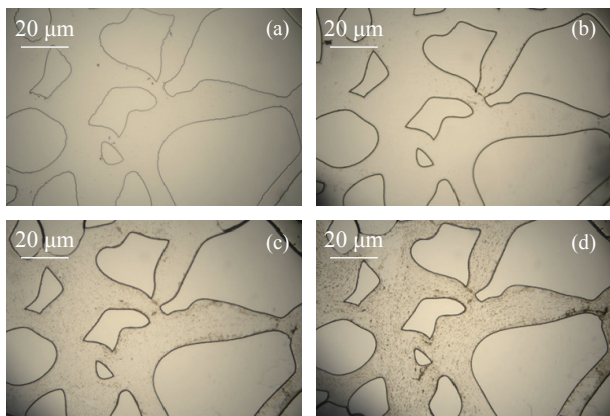


图 4 边界区颗粒滞留情况. (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV
Fig.4 Particle retention in the boundary region: (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV

边界区 0 ~ 100PV 期间, 颗粒的总量占孔隙体积由 0 增长至 11%, 50PV 时滞留现象才明显出现, 晚于主通道, 100PV 发生堵塞, 颗粒聚集情况不明显, 颗粒沉积在低流速区部分区域.

如图 5 所示, 主通道的滞留颗粒量全程高于边界区, 50PV 前主通道滞留颗粒多, 增长速度快, 50PV 和 100PV 滞留增长少, 说明该通路已经近似于堵塞状态. 边界区的滞留颗粒全程匀速增长, 边界区的 100PV 滞留颗粒质量和主通道 20PV 近似,

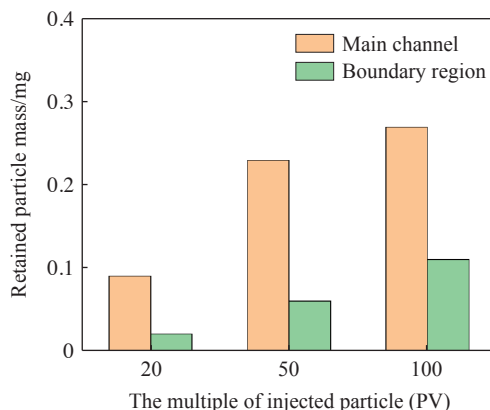


图 5 主通道和边界区观察点的滞留颗粒量

Fig.5 Retained particles at the observation points in the main channel and boundary region

20PV、50PV、100PV 时, 主通道的颗粒滞留量分别是边界区的 4.2、3.8、2.7 倍.

2.2 微观过程悬浮颗粒运移分布特征

基于 Micro-PIV, 随着的流体不断注入, 分别在不同时刻 (0PV、20PV、50PV、100PV) 时观察主通道和边界区, 研究颗粒滞留后不同点位流场的特征及时空变化特征.

如图 6 所示, 对于主通道, 0PV 时, 速度分布在微观模型中有明显的干路且流速方向明显. 在注入颗粒后 20PV ~ 50PV 时, 孔隙内出现“斑”状局部高速区 (20PV 高速区 $92 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 低速区 $34 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 流速分布不再均匀, 流速逐渐降低 (50PV 时 $22 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). 在注入 100PV 后, 由于主通道内流场速度降低 71%, 流速降低明显, 仅在局部区域存在高速颗粒流动.

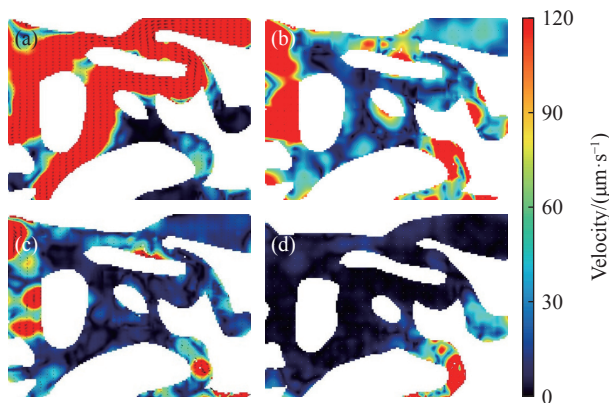


图 6 主通道流场的速度分布. (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV
Fig.6 Velocity distribution of the main channel flow field: (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV

对于边界区, 未注入颗粒时也已经形成明显的干路 (图 7). 注意到, 主通道的干路和边界区的干路的随注入的速度下降趋势不同, 主通道的干

路的速度变化大,干路发生改变. 20PV~50PV时,干路流速分布不再均匀但干路未发生改变. 平均流速降低(50PV时 $29 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),注入100PV后,流场速度降幅更加明显. 注意到干路在0PV~20PV速度提升,20PV~50PV虽然滞留颗粒增加但是流速改变小,但因100PV堵塞滞留愈发严重导致流速下降速度降低61%.

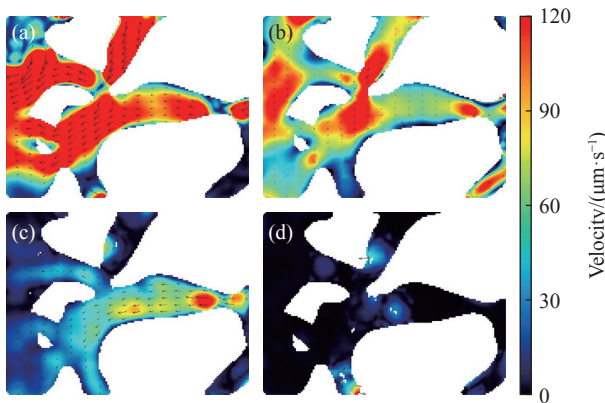


图7 边界区流场的速度分布. (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV
Fig.7 Velocity distribution of the flow field in the boundary region: (a) 0PV; (b) 20PV; (c) 50PV; (d) 100PV

流体注入初期,主通道的平均流速($110 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)高于边界区($67 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),随着注入,流速都在持续下降,但20PV~50PV时主通道速度下降更快($41 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),甚至低于边界区($45 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). 100PV时,流速均已大幅下降,此时主通道、边界区速度分别较0PV时降低了71%和61%(如图8所示).

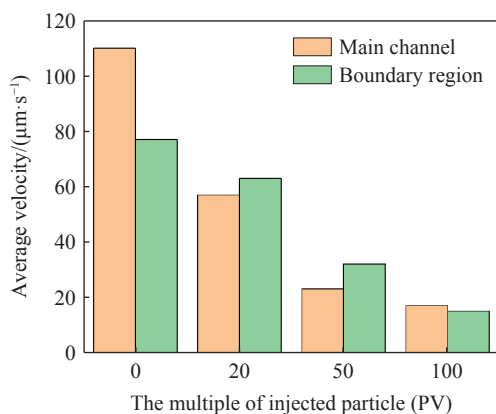


图8 主通道和边界区整体流速对比

Fig.8 Overall flow rate comparison between the main channel and boundary region

为了分析观察区域的点流速随时间的演变关系,在主通道和边界区选择分别位于主通道干路的A区域和边界区干路的B区域分别选择干路上的三点进行速度测量(如图9所示),A区域和B

区域的面积均为 $10 \mu\text{m}\times 10 \mu\text{m}$. 在此我们定义 V/V_0 作为反应速度下降程度的比值,其中 V 为瞬时流速, V_0 为0PV时的最高流速,当 $V/V_0=30\%$ 时,则视为渗流场在颗粒的作用下渗流速度从高流速降低为低流速.

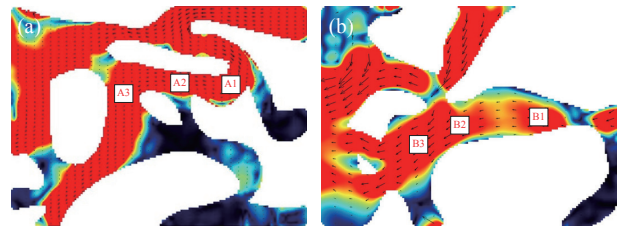


图9 点速度测量位置. (a) 主通道; (b) 边界区

Fig.9 Measurement positions of point velocity: (a) main channel; (b) boundary region

对于主通道, $V/V_0=30\%$ 时, A区域的颗粒密度为 $7.1 \mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$; 对于边界区, $V/V_0=30\%$ 时, B区域的颗粒密度为 $2.2 \mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$. 由拟合曲线可注意到, A区域和B区域拟合效果不同(如图10所示).

图10内各点拟合数据如表1所示.

如表1所示, B1~B3三点的速度拟合结果中,斜率、截距相近. 表明这三点速度和滞留演变规律相近,观察图4也能注意到,边界区为发生聚集现象,边界区的颗粒滞留更加均匀,而A1~A3三点的速度拟合结果中,仅截距相近,斜率差别大, A2、A3的残差平方和最小. 这说明在主通道中,由于A1部分发生了聚集现象,造成局部区域堵塞,颗粒滞留不均匀. 下游A2、A3的流量和颗粒滞留量所受A1堵塞的影响大,因此同一孔隙内的上下游斜率差距明显.

3 讨论

3.1 悬浮颗粒滞留的微观时空分布特征

本研究利用二维多孔介质模型观察注入流体悬浮颗粒的微观滞留规律,发现了孔隙网络和孔隙两种尺度的空间分布规律及时间演变规律.

从孔隙网络来看,主通道的单位面积滞留量($6.5 \mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$)高于边界区($2.4 \mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$). 但对于油气开发领域微米级孔隙和矿物颗粒,现有颗粒运移物理研究关注的重点是渗透率变化及滞留量,没有报道颗粒在孔隙网络中的空间分布. 不过,类似的纳米级二维分布研究中注意到纳米颗粒在纳米级二维多孔介质中颗粒会先主通道内流动并滞留,之后颗粒才在边界区有滞留现象^[12]. 这是因为对于在不考虑布朗运动的情况下,较大尺寸的纳米颗粒进入边界区的孔隙难度增大,但

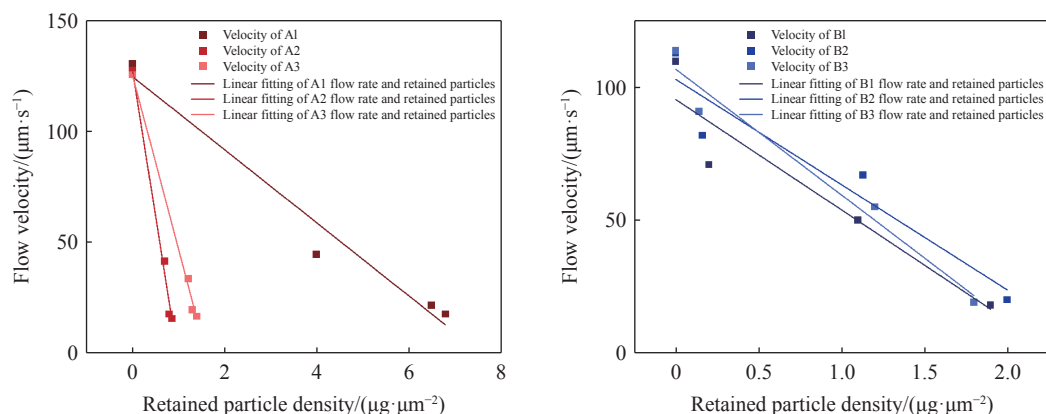


图 10 主通道和边界区的速度拟合效果

Fig.10 Point velocity fitting effect of the main channel and boundary region

表 1 A 点和 B 点的线性拟合数据

Table 1 Linear fitting data for points A and B

Point	Intercept	Slope
A1	125.2	-16
A2	128.6	-131
A3	126.1	-78
B1	95	-41
B2	103	-39
B3	107	-47

一旦进入主通道内颗粒更难离开,从而滞留可能性增加,微米级的颗粒滞留情况与其类似,但不同的是纳米颗粒的颗粒滞留和流体的流速和黏度关系紧密,在更加黏稠的液体中,纳米颗粒的滞留规律变化更加剧烈。

从孔隙尺度来看,本研究还发现主通道和边界区之间除了滞留量还在滞留特征有区别.边界区颗粒仍大致均匀分散,而主通道中滞留的颗粒则呈现在孔隙壁面附近的颗粒聚集现象.这种颗粒聚集现象上在微米级孔隙网络中没有其他物模数模中的直接证据,而在毫米级数值单管的模拟研究中流动半径(多孔介质的有效流动半径约为 1 mm)的物理模拟研究中,颗粒半径 25 μm 的分布也出现了明显聚集特征,由于驱动力为重力,在重力的作用下形成“新月形颗粒簇”,聚集区域和空间位置无关.由于本实验的重力不是主要驱动力,聚集也发生在二维模型内,聚集区域和空间有关^[13].至于靠壁面滞留的现象,微米级的二维数值模拟也发现了颗粒靠壁滞留的现象^[14],而物理模拟没能给出直观的靠近孔隙边缘滞留分布证据.但是现有的研究也注意到,颗粒除了直接接触的影响外,没有接触的粒子也可以通过堵塞附近的流体

流动通道来影响粒子的运动^[15],本研究支持这一结论。

从时间变化过程来看,已有的数学和物理模拟研究时间尺度上只体现了开始结束的对比^[16-17],没有就时间演变过程展开讨论.本研究首次提供了高浓度颗粒注入随时间尺度演变的研究,本研究将主通道和边界区随时间演变分开观察,注意到主通道和边界区的颗粒滞留规律不同(图 5):尽管从滞留量来看,主通道滞留颗粒量全程高于边界区,不过从滞留速度来看,颗粒滞留量增长速度快速提高的时段,主通道滞留速度仅在前半段 0PV ~ 50PV(每 50PV 有 1.4 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$)快于边界区(每 50PV 有 0.4 $\mu\text{g}\cdot\mu\text{m}^{-2}$),后半段速度相近。

3.2 悬浮颗粒滞留导致的微观流场特征

在观察颗粒滞留的同时以外,本研究利用 Micro-PIV 研究了二维流场变化规律,发现了孔隙网络、孔隙尺度的空间分布规律及时间尺度上演变规律。

随着颗粒注入,流速持续降低,100PV 时主通道和边界区速度较早期(20PV 前)分别显著降低了 71% 和 61%.但是速度下降过程是不均匀的.比如,颗粒注入早期(20PV 前)主通道流速(110 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)高于边界区(67 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),但主通道的高速流动路径持续发生改变,并出现“斑”状局部高速区,即速度场空间非均匀分布;中期(20PV ~ 50PV),主通道速度进一步下降(41 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),甚至低于边界区(45 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),孔隙内的速度剖面变窄,“斑”状局部高速区减少;后期(50PV ~ 100PV),速度持续下降,边界区(13 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)流速再次低于主通道(17 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).可见,该过程中存在速度场空间和时间非均匀分布特征。

针对颗粒滞留后的流场分析,现在只有数学

模拟研究只涉及到二维孔隙网络总体速度均值随时间的降低规律及不同浓度下孔隙有效流动半径缩减规律^[18], 不能反映出速度变化引起的孔隙网络整体流场的时空分布, 各点的变化过程也不能清楚展示. 本研究能在孔隙和孔隙网络两个尺度上的系统研究对把握颗粒流场的动态特征能提供丰富的数据支持. 一般情况下, 边界区相对多孔介质网络的中心最远, 波及效果应最差, 边界区的流速也应是最少的^[19]. 主通道因颗粒堵塞可以扩大波及范围, 将流量分流到边界区, 这种流速的变化过程实际上反映出整个流场形成了更大的波及体积, 可改善流动均一性.

3.3 悬浮颗粒滞留与渗流场互动机制

现有的研究认为, 随着颗粒的滞留, 渗流速度会越来越小^[20]. 本文基于对滞留和流场的动态变化的定量分析发现, 颗粒滞留和流场变化是互为原因的, 流场输运颗粒会导致颗粒沉积, 同时颗粒的沉积会堵塞流场.

从互动过程可以看出, 早期(20PV 前)主通道较高的流速将颗粒主要输运至主通道(主通道滞留 0.23 μg , 边界区小于 0.1 μg). 而较高的滞留量导致主通道在中期(20PV ~ 50PV)流速低于边界区. 于是, 在接下来的时段内(50PV 前)边界区的高流速导致了该区域内颗粒滞留速度大幅提升, 进而导致了之后的流速进一步下降(从 45 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降到 13 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). 上述过程直接反映了颗粒滞留与流场间的互为因果的关系. 但是已有的研究只能在一维条件下反映颗粒滞留导致流速降低的单方向作用, 不能反映二维流场下颗粒滞留改变主流方向并再次改变滞留区域的完整的互动关系^[21].

此外, 颗粒的聚集也是值得关注的现象, 它可以导致孔隙内流场的非均匀分布(“斑”状分布), 同时聚集也是原有理论没有考虑到的关键问题. 比如, 根据现有颗粒堵塞理论, Van Oort 等^[22]认为当流速小于 330 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 颗粒粒径小于孔喉直径的 1/14 时, 颗粒质量浓度即使大于 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 微小颗粒也会最终随水流流出多孔介质段而不会形成堵塞. 但因为本实验中颗粒产生了聚集现象, 主通道的流速为 110 $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 就形成了堵塞. 除浓度较高因素外, 这是因为微小颗粒在入口段的吸附筛滤作用明显. 现有文献认为多孔介质中的颗粒滞留主要体现为吸附和筛滤两种机理^[23]. 当颗粒粒径与孔喉相比较小时, 颗粒滞留受筛滤作用的影响很小, 而受吸附作用的影响很大^[24]. 对于主通道, 由于此时的颗粒浓度最高, 一旦颗粒发生滞留现象,

这会引入该颗粒周边流速下降, 颗粒间的吸附、筛滤的作用就会很明显^[25]. 惯性和沉积的基本力学特征的原因导致原有的水动力不足以带走所有的悬浮颗粒^[26], 这会造成有效堵塞形成聚集, 导致迁移能力下降. 因此颗粒间的聚集应该被考虑, 以补充现有堵塞理论.

可见, 可视化实验就孔隙网络、孔隙内、时间等维度的关键信息提供了新的认识: 本研究首次在二维复杂多孔介质实验内观察到颗粒滞留与流场互动过程及聚集现象, 提供了直接证据, 对未来多孔介质堵塞的研究有深远影响.

4 结论

(1) 本文利用二维微观模型与 Micro-PIV 系统研究了悬浮颗粒在多孔介质内滞留及流场特征及其相互关系, 揭示了多孔介质主通道及边界区滞留聚集及流场变化的规律. 随着颗粒注入, 高流速会携带更多颗粒、提高滞留可能性, 这会导致流速下降, 因此形成颗粒和流场时空上的互动关系机制. 对于流速而言, 主通道和边界区的干路速度下降趋势也不一致, 随着颗粒不断注入, 主通道的干路会发生改变而边界区不变.

(2) 此外, 在微米级孔隙网络中首次观察到了颗粒聚集现象. 颗粒聚集现象显著提高了其堵塞效率, 但这也造成局部区域堵塞, 颗粒滞留不均匀, 使得同一干路上颗粒的滞留、聚集的规律不同. 这是封堵理论需要考虑修正和进一步研究的关键问题.

参 考 文 献

- [1] Feia S, Dupla J C, Ghabezloo S, et al. Experimental investigation of particle suspension injection and permeability impairment in porous media. *Geomech Energy Environ*, 2015, 3: 24
- [2] Fandrich R, Gu Y, Burrows D, et al. Modern SEM-based mineral liberation analysis. *Int J Miner Process*, 2007, 84(1-4): 310
- [3] Zhao Q S. Research of water quality in typical low permeability oilfield produced water treatment. *Appl Mech Mater*, 2014, 556-562: 867
- [4] Benamar A, Wang H, Ahfir N D, et al. Flow velocity effects on the transport and the deposition rate of suspended particles in a saturated porous medium. *Comptes Rendus Géoscience*, 2005, 337(5): 497
- [5] Bennacer L, Ahfir N D, Bouanani A, et al. Suspended particles transport and deposition in saturated granular porous medium: Particle size effects. *Transp Porous Medium*, 2013, 100(3): 377
- [6] Ikni T, Benamar A, Kadri M, et al. Particle transport within water-saturated porous media: Effect of pore size on retention kinetics

- and size selection. *Comptes Rendus Géoscience*, 2013, 345(9-10): 392
- [7] Ahfir N D, Wang H Q, Benamar A, et al. Transport and deposition of suspended particles in saturated porous media: Hydrodynamic effect. *Hydrogeol J*, 2007, 15(4): 659
- [8] Feng Q H, Li S, Han X D, et al. Network simulation for formation impairment due to suspended particles in injected water. *J Petrol Sci Eng*, 2015, 133: 384
- [9] Elrahmani A, Al-Raoush R I, Abugazia H, et al. Pore-scale simulation of fine particles migration in porous media using coupled CFD-DEM. *Powder Technol*, 2022, 398: 117130
- [10] Zhu W Y, Ma Q P, Song Z Y, et al. The effect of injection pressure on the microscopic migration characteristics by CO₂ flooding in heavy oil reservoirs. *Energy Sources Part A Recovery Util Environ Eff*, 2022, 44(1): 1459
- [11] Xue J Y, *Experimental Study of Vortex Ring Instability Caused by Oscillating Disc* [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
(薛景瑜. 振荡圆盘产生涡环失稳的实验研究[学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017)
- [12] Phenrat T, Cihan A, Kim H J, et al. Transport and deposition of polymer-modified Fe₀ nanoparticles in 2-D heterogeneous porous media: Effects of particle concentration, Fe₀ content, and coatings. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(23): 9086
- [13] Yoon J S, Germaine J T, Culligan P J. Visualization of particle behavior within a porous medium: Mechanisms for particle filtration and retardation during downward transport. *Water Resour Res*, 2006, 42(6): e2004wr003660
- [14] Frey J M, Schmitz P, Dufreche J, et al. Particle deposition in porous media: Analysis of hydrodynamic and weak inertial effects. *Transp Porous Medium*, 1999, 37(1): 25
- [15] Su J W, Chai G L, Wang L, et al. Pore-scale direct numerical simulation of particle transport in porous media. *Chem Eng Sci*, 2019, 199: 613
- [16] Wei J M. Study on migration law of particle type plugging agent in porous media. *Drill Product Technol*, 2008(1): 121
(魏娟明. 颗粒型堵剂在多孔介质中的运移规律研究. *钻采工艺*, 2008(1): 121)
- [17] Yang Y L, Siqueira F D, Vaz A S L, et al. Slow migration of detached fine particles over rock surface in porous media. *J Nat Gas Sci Eng*, 2016, 34: 1159
- [18] Haffner E A, Mirbod P. Velocity measurements of dilute particulate suspension over and through a porous medium model. *Phys Fluids*, 2020, 32(8): 083608
- [19] Li H. *Study on Seepage Mechanism and Numerical Simulation of Microbe-Microsphere Composite Dispersion System* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023
(李华. 微生物-微球复合分散体系渗流机理及数值模拟研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2023)
- [20] Zhou K, Hou J, Sun Q C, et al. A study on particle suspension flow and permeability impairment in porous media using LBM-DEM-IMB simulation method. *Transp Porous Medium*, 2018, 124(3): 681
- [21] Elrahmani A, Al-Raoush R I, Seers T D. Clogging and permeability reduction dynamics in porous media: A numerical simulation study. *Powder Technol*, 2023, 427: 118736
- [22] Van Oort E, van Velzen J F G, Leerlooijer K. Impairment by suspended solids invasion: Testing and prediction. *SPE Prod Facil*, 1993, 8(3): 178
- [23] Zhang X W, Sun G C, Ren G S, et al. A review of the migration and deposition of microparticles in porous media under flow. *Water Resour Hydropower Eng*, 2023, 54(8): 115
(张喜伟, 孙刚臣, 任国帅, 等. 渗流作用下微小颗粒在多孔介质中迁移与沉积规律研究综述. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(8): 115)
- [24] Yao C J, Lei G L, Cathles L M, et al. Pore-scale investigation of micron-size polyacrylamide elastic microspheres (MPeMs) transport and retention in saturated porous media. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(9): 5329
- [25] Bai B, Chen J, Zhang B X, et al. Migration trajectories and blocking effect of the fine particles in porous media based on particle flow simulation. *AIP Advances*, 2024, 14(4): 045036
- [26] Wang Q M, Hu Q H, Zhao C, et al. Sample size effects on petrophysical characterization and fluid-to-pore accessibility of natural rocks. *Nanomaterials*, 2023, 13(10): 1651