

多孔介质中悬浮颗粒渗透迁移特性的试验研究

阮方毅, 薛传成, 王 艳*, 刘千斌

(宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 通过室内土柱试验, 研究硅微粉和聚苯乙烯微球两种不同的悬浮颗粒的迁移特性, 考虑 pH、温度和渗流速度对悬浮颗粒迁移的影响, 结合理论解对试验数据进行拟合, 并确定迁移参数, 进而讨论 pH 对迁移参数的影响. 结果表明: pH 是影响多孔介质中悬浮颗粒迁移的重要因素, 当温度为 5℃ 时, 两种悬浮颗粒质量浓度峰值随着 pH 值的增大而提高; 当温度增大至 30℃ 和 58.3℃ 时, 悬浮颗粒的迁移特性发生了变化, 温度升高导致颗粒表面电荷发生改变, 随着 pH 值的增大质量浓度峰值呈现先增后减的趋势; 当温度和渗流速度一定时, 两种悬浮颗粒的相对速度随着 pH 值的增大而略微增大, 在流速较高时表现尤为显著, 表明悬浮颗粒在多孔介质中存在加速效应; 随着孔隙水流速的增大, 水动力影响增强, 悬浮颗粒受 pH 的影响相对减弱, 不同 pH 时质量浓度峰值变化减小; 两种悬浮颗粒的弥散度都表现为随着 pH 值的增大而降低, 且硅微粉的弥散度整体比聚苯乙烯微球大.

关键词: 多孔介质; 悬浮颗粒; 渗透迁移; 穿透曲线; 参数分析

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 03-0001-09

悬浮颗粒在多孔介质中受到物理、化学和生物过程的影响, 其迁移过程包含颗粒、流体、多孔介质之间的相互作用, 非常复杂. 了解悬浮颗粒的运输对污染物在孔隙介质中迁移至关重要^[1-3]. 污染物可能会附着在悬浮颗粒表面随着水流一起移动, 从而加速污染物的扩散. 研究多孔介质中悬浮颗粒的迁移特性对土壤和地下水的污染治理, 以及核废料的处置等具有重要意义^[4-6].

悬浮颗粒在多孔介质中的迁移受悬浮颗粒尺寸、形状和特性等因素的影响较大^[6-8], 同时也受 pH 和温度的影响. 在自然环境中, 土体中 pH 会随着降雨变化而发生变化, 随着季节的改变土体温度也随之改变^[2,9-14]. 一些学者做了关于 pH 对悬浮颗粒在多孔介质中迁移的影响研究. 如 Hamamoto 等^[2]使用玻璃珠进行一维土柱试验, 研究 pH 对纳米级气泡在多孔介质中运输行为的影响, 结果表明: pH 值较高时纳米级气泡更加稳定, pH 值较低

的水中, 捕获较大纳米级气泡增强. Chen 等^[11]进行了磺胺甲恶唑(SMZ)和环丙沙星(CIP)两种抗生素在饱和多孔介质中的转运试验, 结果表明: SMZ 的迁移率比 CIP 高很多, pH 值的改变对饱和柱中 SMZ 迁移没有影响; 然而, 当 pH 值增至 9.5 时, 约 93% 的 CIP 从砂柱中洗脱. Gao 等^[12]分析了孔隙水 pH 值和孔隙水流量瞬变对非饱和砂柱内胶体大小黏土颗粒沉积和迁移的影响, 发现伊利石在稳定流条件下的沉积速率基本与 pH 值无关, 而随着 pH 值从 7.4 降至 4.6, 高岭石的沉积速率几乎翻倍. Roy 等^[13]通过砂柱试验, 研究了不同 pH 值和离子强度条件下, 胶体对两种强吸附性溶质迁移的影响, 发现当溶质吸附在胶体颗粒上迁移时, 胶体的沉积效率对溶质的迁移影响显著, 胶体沉积效率与 pH 和溶质的质量浓度相关. Bradford 等^[14]提出了一个连续模型来描述瞬态物理化学条件下地下胶体的释放, 结合试验结果数据发现溶液离子强

收稿日期: 2021-03-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51678311); 浙江省自然科学基金(LY19E080011).

第一作者: 阮方毅(1996-), 男, 浙江绍兴人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 环境岩土工程. E-mail: 2195689516@qq.com

*通信作者: 王艳(1985-), 女, 湖北随州人, 博士/副教授, 主要研究方向: 环境岩土工程. E-mail: wangyan@nbu.edu.cn

度减小和 pH 值增大会促进大肠杆菌的释放, 类似于减少次级最小纳米级化学异质性的预期趋势. 现有研究大多仅考虑 pH 值单独对悬浮颗粒迁移的影响, 鲜有同时考虑其他因素, 诸如颗粒类型、温度等作用.

本文针对硅微粉和聚苯乙烯微球两种不同悬浮颗粒, 通过室内渗透迁移试验, 研究悬浮颗粒在 pH 值、温度、渗流速度等变化时的迁移特性, 并用理论解来拟合试验数据曲线, 得到拟合参数, 进而分析 pH 对迁移参数的影响.

1 试验仪器和方法

1.1 试验装置及材料

试验装置如图 1 所示, 有机玻璃制成的圆柱土柱长 200 mm, 直径 50 mm, 长径比 4, 可以看作是一维渗透. 选用保定融柏恒流泵制造有限公司生产的兰格精密蠕动泵(BT100-2J), 将储水箱中的超纯水以恒定流速输入到圆柱试样中, 该蠕动泵(单管)的流量范围为 $0.002\sim 380\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. 采用上海一恒科学仪器有限公司生产的生化培养箱(LRH-150)提供试验所需的恒定温度, 该培养箱控温范围为 $0\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. 在圆柱试样的进出水口处均设置孔径为 0.4 mm 的不锈钢筛网, 防止多孔介质流出试样. 为保证超纯水 pH 值的准确性, 试验前选用瑞士 Mettler toledo FE28 实验室酸度计测定超纯水的 pH 值, 该酸度计测量范围为 $2\sim 16$, 精度为 ± 0.01 . 收集流出液, 采用上海悦丰仪器仪表有限公司生产的数显浊度仪(SGZ-2)测量其浊度, 再将浊度转换成质量浓度, 进而分析悬浮颗粒质量浓度的变化规律.

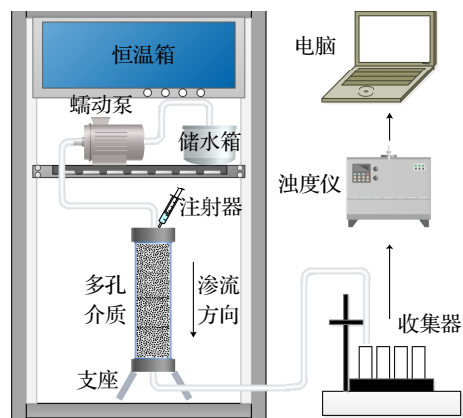


图 1 试验装置

试验选用硅微粉和聚苯乙烯微球为注入颗粒. 硅微粉的平均粒径为 $4\text{ }\mu\text{m}$, 密度为 $2.26\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. 聚苯乙烯微球平均粒径同样为 $4\text{ }\mu\text{m}$, 密度为 $1.05\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. 选取透明的 1 级熔融石英为多孔介质, 密度为 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 二氧化硅的含量高于 99.96%.

试验前将熔融石英酸洗, 除去表面铁、铝等氧化物和有机物^[15-17]. 熔融石英粒径分布在 $0.60\sim 2.36\text{ mm}$ 之间, 中位粒径 1.55 mm , 其中粒径为 $0.60\sim 1.18\text{ mm}$ 约占 29%, 粒径为 $1.18\sim 2.36\text{ mm}$ 约占 71%. 不均匀系数(C_u)为 2.1, 曲率系数(C_c)为 1.1, 熔融石英试样的平均孔隙率(n)为 46.4%. 由此可知, 熔融石英的粒径较为均匀, 足以保证粒径 $4\text{ }\mu\text{m}$ 悬浮颗粒在熔融石英中不会产生堵塞.

1.2 试验方法

每次试验开始前, 用高纯去离子水冲洗熔融石英至无杂质, 然后置于烘箱中, 在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干. 采用湿装法填充圆柱土样, 均分 10 层进行填装, 每次填装时保证水面高于多孔介质顶面 $1\sim 2\text{ cm}$, 保证试样为饱和多孔介质. 同时, 每次进行相同的捣实次数, 使饱和试样均匀.

试验在恒温箱中进行. 把恒温箱调节到试验所需温度(5.0 、 30.0 、 $58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)后静置 24 h , 以确保实验环境温度稳定. 在蓄水箱中加入适量 HCl 或 NaOH 来调节 pH 值至 4、7、10, 采用蠕动泵将储水箱中的超纯水泵入土柱中, 蠕动泵流量用流量计测量, 然后转换成孔隙水渗流速度分别为 0.042 、 0.127 、 $0.212\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

采用注射器将 20 mL 质量浓度为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的悬浮颗粒溶液注入土柱中, 注入过程用时 2 s , 可近似为瞬时注入. 由于悬浮颗粒溶液体积相比多孔介质孔隙体积小很多, 故可忽略注入过程对试验的影响. 在试验过程中, 间隔一定时间收集一次流出液, 用浊度仪测量浊度, 然后转换成质量浓度, 收集流出液时试验继续进行.

本试验采用已知质量浓度的两种悬浮颗粒, 试验时室内平均温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, pH 值分别为 4、7、10, 在超纯水中不断进行稀释, 每稀释一次就测量一次浊度, 最终通过计算得到质量浓度与浊度的关系(图 2 和图 3), 其拟合公式为:

$$C = ax^2 + bx + c, \quad (1)$$

式中: C 为悬浮颗粒的质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$; x 为浊度,

NTU.

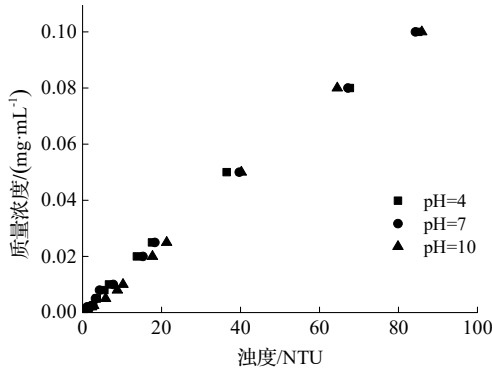


图2 硅微粉质量浓度与浊度关系

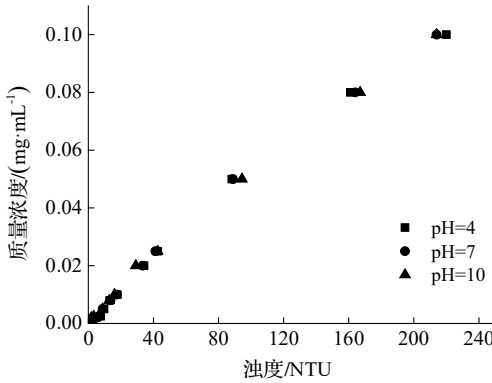


图3 聚苯乙烯微球质量浓度与浊度关系

拟合结果同文献[18]一致, 相关系数 $R^2 > 0.998$, 表明用一元二次函数可以很好地描述质量浓度与浊度的相关性. 本试验采用的两种悬浮颗粒受 pH 的影响较小, 关系曲线没有明显的差异, 对应的拟合系数变化也很小. 结合雷诺数定义^[19]:

$$Re = \frac{\rho u_1 L}{\mu_w}, \quad (2)$$

式中: L 为特征长度; ρ 为流体密度; u_1 为流体速度; μ_w 为水的黏性系数, 其表达式为:

$$\mu_w = \frac{0.01779}{1 + 0.03368T + 0.000221T^2}, \quad (3)$$

式中: T 为温度.

试验的最大流速 u 为 $0.00212 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, T 的范围为 $5.0 \sim 58.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 取 L 为 0.01 m , ρ 为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 可求得水的黏性系数为 $0.00048 \sim 0.00152 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$, 于是得到雷诺数在 $14 \sim 44$ 之间, 小于 2320 , 所以本次试验均为层流.

1.3 理论模型

悬浮颗粒在多孔介质中迁移可以用对流弥散

方程描述^[7,18,20]:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - u \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - \frac{\rho_s}{n} \frac{\partial \sigma(x,t)}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\frac{\rho_s}{n} \frac{\partial \sigma(x,t)}{\partial t} = k_d C(x,t) - k_r \frac{\rho_s}{n} \sigma(x,t), \quad (5)$$

控制方程的初始边界条件为:

$$C(x,0) = 0, 0 \leq x < +\infty, \quad (6)$$

$$C(0,t) = \begin{cases} C_0, 0 < t < t_0, \\ 0, t > t_0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial C(\infty,t)}{\partial x} = 0, \quad (8)$$

$$\sigma(x,0) = 0, \quad (9)$$

式中: C 为流体中悬浮颗粒的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; σ 为每单位体积多孔介质中悬浮颗粒的沉积量; t 为迁移过程所用时间, s ; ρ_s 为多孔介质干体积密度; n 为孔隙率; u 为孔隙间平均悬浮颗粒渗流速度, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; D 为弥散系数, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; x 为悬浮颗粒迁移位移, cm ; k_d 为沉积系数, 取 1 s^{-1} , 其值的大小与多孔介质单个收集体的效率有关; k_r 为释放系数, 取 1 s^{-1} .

结合控制方程与初始边界条件, 参考文献[18, 20], 推导出对流弥散方程(4)和(5)的解析解为:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{2e^a}{\sqrt{\pi}} \int_{x/2\sqrt{Dt}}^{\infty} h_4(t) g(\lambda) d\xi, \quad (10)$$

式中:

$$h_4(t) = \exp\left(-\xi^2 - \frac{a^2}{4\xi^2}\right).$$

$$\exp\left(-k_r t - \frac{a^2 b^2}{4\xi^2} (k_d - k_r)\right),$$

$$g(\lambda) = I_0(2\alpha\sqrt{t}) + k_r e^{k_r t} \int_0^t e^{-k_r \tau} I_0(2\alpha\sqrt{\tau}) d\tau,$$

$$a = ux / (2D), \quad b^2 = 4D / u^2, \quad \beta^2 = a^2 b^2 / 4,$$

$$\alpha^2 = a^2 b^2 k_d k_r / (4\xi^2), \quad \lambda = t - \beta^2 / \xi^2,$$

式中: ξ 和 τ 为求解时所设的虚拟变量; I_0 是第一类零阶修正 Bessel 函数.

2 pH 值对悬浮颗粒在多孔介质中迁移的影响

图4为 $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 pH 值对悬浮颗粒迁移曲线的影响. 从图4可以看出, 在温度为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$, 孔隙水渗流速度一定时, 悬浮颗粒穿透曲线的质量浓度峰

值均随着pH值的变大而增加. 悬浮颗粒电位随pH值的增大而变大, 而两种悬浮颗粒与熔融石英带有相同的电荷, 所以pH值增大时悬浮颗粒与多孔介质之间斥力增大, 从而有利于悬浮颗粒的释放, 因此对应的质量浓度峰值也随之增大. 结合图4(a)~(c)可以发现, 孔隙水渗流速度越大, pH值对悬浮颗粒迁移影响越大, 迁移曲线规律越明显. 聚苯乙烯微球的迁移规律与硅微粉相同, 例如当 u 为 $0.127 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, pH分别为4、7、10时, 硅微粉质量浓度峰值分别为 0.0213 、 0.0253 、 $0.0385 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, 聚苯乙烯微球质量浓度峰值分别为 0.0501 、 0.0742 、 $0.0883 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$.

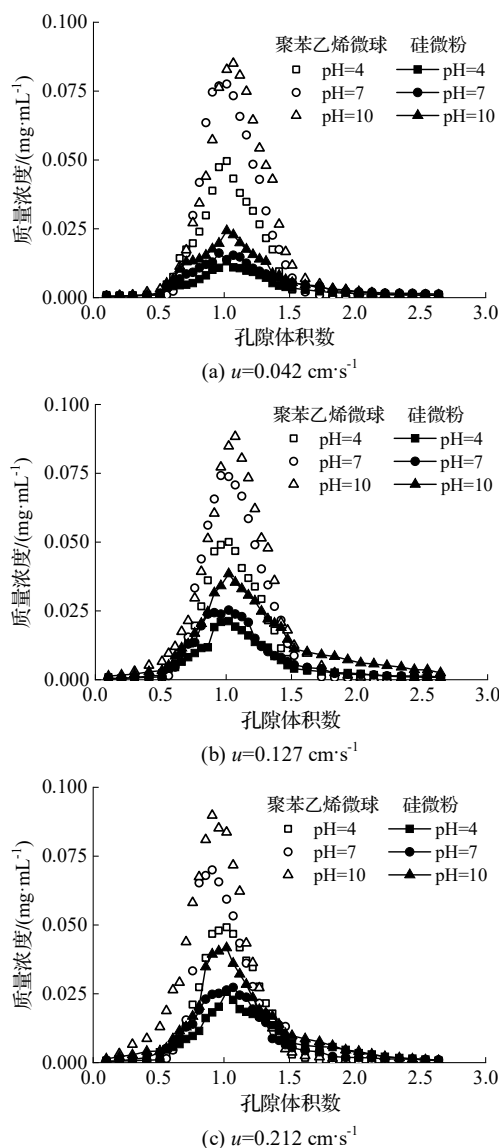
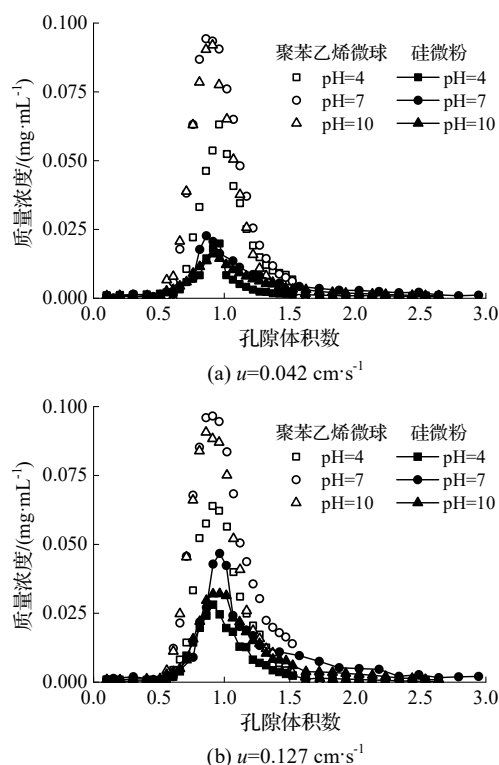
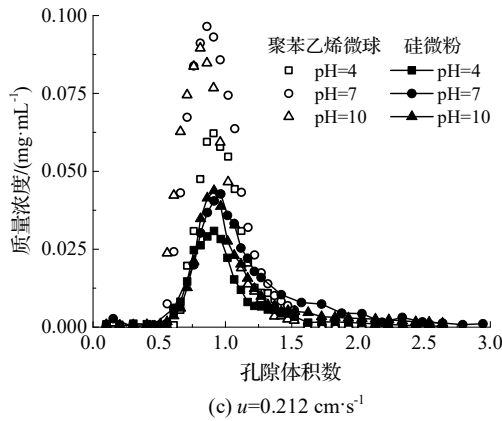


图4 $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同pH和渗流速度下悬浮颗粒的穿透曲线
当 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 硅微粉和聚苯乙烯微球的迁移

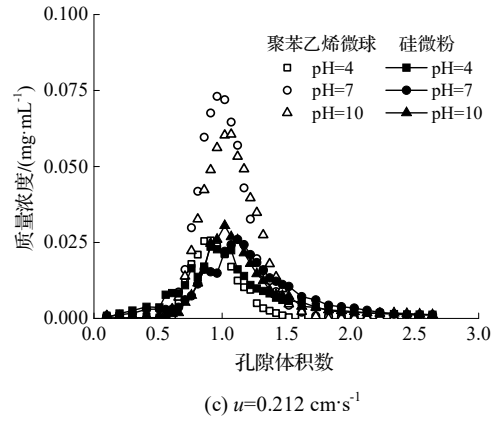
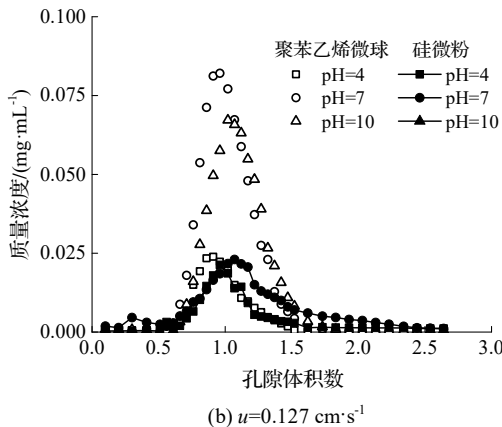
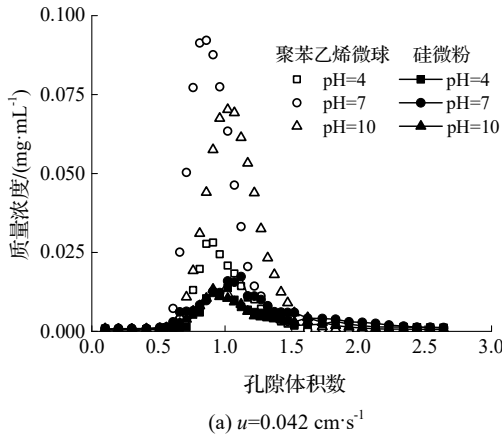
规律如图5所示. 对比 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 发现, pH值从4升至7, 质量浓度峰值增加, pH值从7升至10, 质量浓度峰值略微减小. 孔隙水渗流速度的变化对悬浮颗粒迁移规律无明显影响. 例如, 当 $v=0.042 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, pH值分别为4、7、10时, 聚苯乙烯微球质量浓度峰值分别为 0.0632 、 0.0943 、 $0.0920 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$. 在pH值较小的酸性条件时, 悬浮颗粒表面正电荷量增加, 更易向固相基质移动; 在pH值较大的碱性条件下, 带有相同电荷相互排斥的悬浮颗粒更易团聚发生沉积, 所以中性条件下更利于悬浮颗粒的迁移. 同时, 温度升高影响悬浮颗粒表面电荷方向^[21], 在碱性环境下, 温度升高导致悬浮颗粒之间相互作用能增加, 质量浓度峰值增加.

图5中悬浮颗粒质量浓度峰值对应的孔隙体积数均小于1. 与图4相比可以发现, 温度升高使悬浮颗粒质量浓度到达峰值的时间提前, 说明两种悬浮颗粒的渗流速度均大于平均孔隙水渗流速度, 表现出悬浮颗粒在多孔介质中的加速效应. 例如图5(a)中pH为4、7和10时, 聚苯乙烯微球质量浓度峰值对应的孔隙体积数分别为0.96、0.86和0.91, 硅微粉质量浓度峰值对应的孔隙体积数分别为0.96、0.91和0.91, 均小于1.00.



图5 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同 pH 和渗流速度下悬浮颗粒的穿透曲线

当 $T=58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 发现硅微粉的穿透曲线质量浓度值跳动较大, 如图6所示. 图6可以解释为在较高温度时, 硅微粉布朗运动较大, 同时硅微粉的尺寸不同, 所以 $T=58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的穿透曲线比 $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的质量浓度值跳动大. 随着 pH 值的增加, 聚苯乙烯微球的质量浓度峰值变化十分明显, 当 pH 为 4、7、10 时, 质量浓度峰值先增加再减小, 并且在 pH 为 10 时对应的质量浓度峰值大于 pH 为 4 时. 例如当 $u=0.042\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, pH 为 4、7、10 时

图6 $T=58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同 pH 和渗流速度下悬浮颗粒的穿透曲线

对应的质量浓度峰值为 0.028 、 0.092 、 $0.070\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, 在 $T=58.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 聚苯乙烯微球受 pH 值的影响更大. 说明随着试验温度的升高, 聚苯乙烯微球表面电荷发生改变. 随着孔隙水渗流流速的增加, 水动力影响增强, 悬浮颗粒受 pH 值的影响相对减弱, 所以在不同 pH 值下其质量浓度峰值变化减小.

3 理论曲线拟合

稳态流速下悬浮颗粒在多孔介质中的迁移试验可以用一维经典对流弥散修正方程来描述, 结合短时注入情况, 应用式(10)的解析解来进行理论拟合, 解析解中参数可以通过试验得到, $C_0=0.5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$, $t_0=2\text{ s}$.

因为在修正模型中考虑了悬浮颗粒的沉积再释放过程, 但是根据以往的试验研究发现, 释放系数仅为沉积系数的几百分之一至几十分之一, 释放系数在试验过程中的影响相当有限. 同时, 本试验中多孔介质的渗透性大, 孔隙水渗流速度较大, 使悬浮颗粒沉积再释放的情况减小, 释放系数的影响可以忽略不计. 因此, 在悬浮颗粒穿透曲线拟合中, 令释放系数 $k_r=0.000\text{ s}^{-1}$, 取 $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u=0.042\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时悬浮颗粒迁移的试验数据拟合结果如图7所示.

由图7可以看到, 理论曲线拟合良好, 相关系数 R^2 均在 0.9 以上, 而且聚苯乙烯微球的拟合效果更好, 相关系数在 0.97 以上. 这是因为聚苯乙烯微球均为球形并且尺寸一致, 表现出更好的规律性. 根据解析解得到在不同 pH 值下的拟合参数 D 、 k_d 、 v 和 R^2 数据见表1和表2.

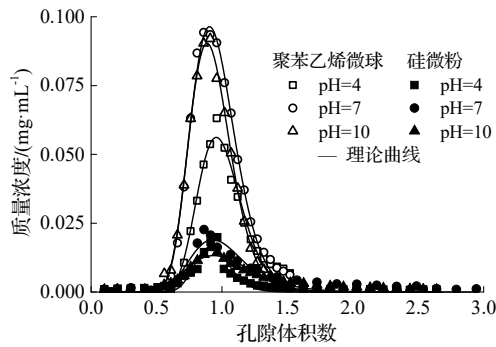


图7 悬浮颗粒穿透曲线拟合结果

表1 硅微粉拟合参数的确定

$T/$ $^{\circ}\text{C}$	$u/$ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	pH	$v/$ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	v/u	$D/$ $(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$k_d/$ s^{-1}	R^2
5	0.042	4	0.061	1.452	0.066	0.0060	0.926
	0.042	7	0.061	1.452	0.083	0.0048	0.959
	0.042	10	0.067	1.595	0.069	0.0042	0.952
	0.127	4	0.207	1.630	0.154	0.0149	0.950
	0.127	7	0.219	1.724	0.163	0.0131	0.977
	0.127	10	0.201	1.583	0.197	0.0065	0.948
	0.212	4	0.317	1.495	0.329	0.0182	0.943
	0.212	7	0.360	1.698	0.265	0.0198	0.977
	0.212	10	0.370	1.756	0.244	0.0142	0.943
30	0.042	4	0.086	2.042	0.019	0.0099	0.954
	0.042	7	0.078	1.857	0.040	0.0067	0.907
	0.042	10	0.091	1.695	0.057	0.0069	0.927
	0.127	4	0.245	1.929	0.097	0.0190	0.978
	0.127	7	0.247	1.945	0.059	0.0150	0.966
	0.127	10	0.232	1.827	0.117	0.0136	0.955
	0.212	4	0.430	2.033	0.168	0.0305	0.967
	0.212	7	0.399	1.882	0.201	0.0195	0.956
	0.212	10	0.426	2.009	0.144	0.0242	0.950
58.3	0.042	4	0.070	1.667	0.041	0.0075	0.958
	0.042	7	0.062	1.476	0.065	0.0051	0.907
	0.042	10	0.070	1.667	0.050	0.0077	0.906
	0.127	4	0.237	1.866	0.076	0.0224	0.944
	0.127	7	0.197	1.551	0.158	0.0129	0.916
	0.127	10	0.227	1.878	0.106	0.0185	0.946
	0.212	4	0.352	1.660	0.352	0.0232	0.910
	0.212	7	0.319	1.505	0.247	0.0184	0.944
	0.212	10	0.366	1.726	0.155	0.0235	0.971

表2 聚苯乙烯微球拟合参数的确定

$T/$ $^{\circ}\text{C}$	$u/$ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	pH	$v/$ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	v/u	$D/$ $(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$k_d/$ s^{-1}	R^2
5	0.042	4	0.076	1.810	0.038	0.0027	0.970
	0.042	7	0.079	1.878	0.032	0.0009	0.997
	0.042	10	0.075	1.782	0.031	0.0004	0.988
	0.127	4	0.230	1.808	0.107	0.0075	0.992
	0.127	7	0.233	1.838	0.104	0.0027	0.998
	0.127	10	0.228	1.793	0.102	0.0010	0.979
	0.212	4	0.385	1.815	0.176	0.0126	0.992
	0.212	7	0.417	1.968	0.166	0.0093	0.968
	0.212	10	0.427	2.015	0.213	0.0025	0.975
30	0.042	4	0.083	1.968	0.025	0.0033	0.980
	0.042	7	0.088	2.097	0.031	0.0009	0.994
	0.042	10	0.090	2.147	0.028	0.0016	0.997
	0.127	4	0.256	2.019	0.081	0.0086	0.988
	0.127	7	0.260	2.044	0.115	0.0010	0.986
	0.127	10	0.269	2.120	0.094	0.0036	0.994
	0.212	4	0.430	2.028	0.126	0.0156	0.989
	0.212	7	0.456	2.151	0.205	0.0024	0.996
	0.212	10	0.491	2.316	0.218	0.0071	0.994
58.3	0.042	4	0.083	1.965	0.027	0.0064	0.975
	0.042	7	0.092	2.198	0.029	0.0015	0.995
	0.042	10	0.078	1.857	0.026	0.0017	0.999
	0.127	4	0.249	1.959	0.091	0.0207	0.986
	0.127	7	0.248	1.950	0.085	0.0038	0.997
	0.127	10	0.228	1.794	0.079	0.0051	0.998
	0.212	4	0.419	1.978	0.158	0.0327	0.992
	0.212	7	0.109	1.929	0.133	0.0091	0.997
	0.212	10	0.384	1.812	0.158	0.0093	0.996

定义相对速度 v/u 为悬浮颗粒渗流速度与平均孔隙水渗流速度之比。从表1和表2可知, 随着孔隙水渗流速度的增加, 两种悬浮颗粒的渗流速度都增加, 这与文献[22-23]的研究结果一致, 但是相对速度规律不明显。当温度和孔隙水渗流速度一定时, 两种悬浮颗粒的相对速度随着 pH 值的增加而略微增加, 在较高流速下表现尤其明显, 这也是因为悬浮颗粒表面电荷受 pH 值影响较大, 当 pH 为 4 时, 水溶液中增加的正电荷会中和悬浮颗粒表面的负电荷, 使原来悬浮颗粒与多孔介质表面的

排斥力减弱, 促使悬浮颗粒沉积, 从而影响悬浮颗粒的流速, 导致相对速度减小. 两种悬浮颗粒的相对速度均大于 1, 说明悬浮颗粒在多孔介质中存在加速效应^[24-25].

通过表2与表3, 可以求得弥散系数与孔隙水渗流速度的关系, 其表达式为:

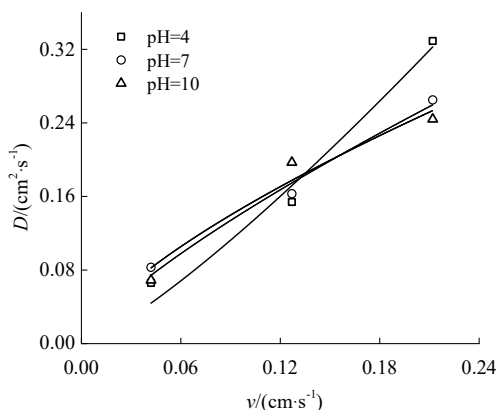
$$D = \alpha_m u^k, \quad (11)$$

式中: α_m 为弥散度; k 为幂指数.

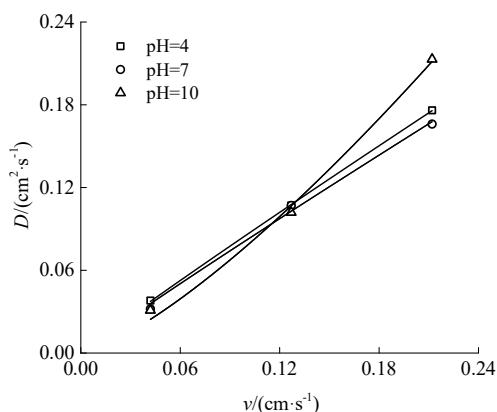
当 $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u=0.042\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 通过式(11)可以得到弥散系数与渗流速度关系的拟合关系(图8).

表3 弥散系数拟合参数的确定

颗粒种类	pH	α_m	k	R^2
硅微粉	4	2.17	1.23	0.98
	7	0.86	0.77	0.97
	10	0.25	0.18	0.95
聚苯乙烯微球	4	0.77	0.96	0.99
	7	0.74	0.95	0.99
	10	0.67	0.93	0.99



(a) 硅微粉



(b) 聚苯乙烯微球

图8 悬浮颗粒弥散系数与渗流速度的拟合结果

从图8可以看到, 两种悬浮颗粒的弥散系数都随着孔隙水渗流速度的增大而增大, 并且理论拟合较好, 相关系数均大于0.95. 随着pH值的增大, k 值减小, 关于 k 的取值, 文献[17,26]将其取为1, 即假设弥散系数与弥散度为线性关系. 但是在本试验中, k 值随着pH值的变化较大, 例如表3中当pH值为4、7、10时, 硅微粉的 k 值分别为1.23、0.77、0.18, 线性关系不能准确地描述弥散系数与弥散度的关系. 当pH值为4、7、10时, 聚苯乙烯微球的 k 值分别为0.96、0.95、0.93, 略微减小, 其原因为聚苯乙烯微球的尺寸较为均匀. 两种悬浮颗粒的弥散度都随着pH值的增加而降低, 并且硅微粉的弥散度整体比聚苯乙烯微球大, 导致这一结果的原因是硅微粉虽然平均粒径为4 μm , 但是尺寸分布较大, 引起了较大的悬浮颗粒弥散, 随着pH值的增大, 悬浮颗粒表面电荷发生改变, 使得悬浮颗粒在多孔介质中渗流更加稳定, 对应的流出液质量浓度峰值增加, 这与试验结果一致.

随着pH值的降低, 沉积系数增大, 许多学者得到了类似的结论^[8,11], 这是因为随着pH值降低, 悬浮颗粒表面的Zeta电位减小, 使得悬浮颗粒与多孔介质之间的能量势垒减小, 导致悬浮颗粒产生更多的不可逆沉积, 因此沉积系数增大.

4 结论

本文在不同温度、pH 值、孔隙水渗流速度下对两种悬浮颗粒进行了一维土柱试验, 结合短时注入情况下的理论解, 分析了 pH 值对迁移参数的影响. 得到以下结论:

(1)当温度小于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, pH 值越大, 悬浮颗粒穿透曲线的质量浓度峰值越大; 当温度超过 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在 pH 值较大的碱性条件下, 悬浮颗粒质量浓度峰值减小, 在中性条件(pH 值为 7)时质量浓度峰值最大. 随着孔隙水渗流速度的增大, 水动力影响增强, 悬浮颗粒受 pH 值的影响相对减弱, 所以在不同 pH 值时的质量浓度峰值变化减小.

(2)当温度和渗流速度一定时, 两种悬浮颗粒的相对速度随着 pH 值的增加而略微增加, 在较高孔隙水渗流速度时表现尤为明显, 表明悬浮颗粒在多孔介质中存在加速效应.

(3)聚苯乙烯微球由于尺寸较为均匀, 弥散系

数与弥散度呈线性关系,但线性不能准确地描述硅微粉弥散系数与弥散度之间的关系.两种悬浮颗粒的弥散度都随 pH 值的增大而降低,并且硅微粉的弥散度整体比聚苯乙烯微球大.

参考文献:

- [1] 刘泉声,崔先泽,张程远,等.粒径对多孔介质中悬浮颗粒迁移—沉积特性的影响[J].岩土工程学报,2014,36(10):1777-1783.
- [2] Hamamoto S, Takemura T, Suzuki K, et al. Effects of pH on nano-bubble stability and transport in saturated porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2018, 208: 61-67.
- [3] Seetha N, Mohan Kumar M S, Hassanizadeh S M, et al. Virus-sized colloid transport in a single pore: Model development and sensitivity analysis[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2014, 164:163-180.
- [4] Godinez I G, Darnault C J G. Aggregation and transport of nano-TiO₂ in saturated porous media: Effects of pH, surfactants and flow velocity[J]. Water Research, 2011, 45(2):839-851.
- [5] Šimůnek Jirka, He C M, Pang L P, et al. Colloid-facilitated solute transport in variably saturated porous media[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(3):1035-1047.
- [6] Babakhani P, Bridge J, Doong R A, et al. Continuum-based models and concepts for the transport of nanoparticles in saturated porous media: A state-of-the-science review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017, 246:75-104.
- [7] Bai B, Long F, Rao D Y, et al. The effect of temperature on the seepage transport of suspended particles in a porous medium[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(2): 382-393.
- [8] Jiang Y J, Yu L, Sun H M, et al. Transport of natural soil nanoparticles in saturated porous media: Effects of pH and ionic strength[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2017, 29(1):186-196.
- [9] García-García S, Jonsson M, Wold S. Temperature effect on the stability of bentonite colloids in water[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 298(2):694-705.
- [10] Wang M, Gao B, Tang D S, et al. Effects of temperature on graphene oxide deposition and transport in saturated porous media[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 331:28-35.
- [11] Chen H, Gao B, Li H, et al. Effects of pH and ionic strength on sulfamethoxazole and ciprofloxacin transport in saturated porous media[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2011, 126(1/2):29-36.
- [12] Gao B, Saiers J E, Ryan J N. Deposition and mobilization of clay colloids in unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 2004, 40(8):W08602.
- [13] Roy S B, Dzombak D A. Chemical factors influencing colloid-facilitated transport of contaminants in porous media[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(3):656-664.
- [14] Bradford S A, Torkzaban S, Leij F, et al. Equilibrium and kinetic models for colloid release under transient solution chemistry conditions[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2015, 181:141-152.
- [15] Kanti S T, Khilar K C. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2006, 119(2/3):71-96.
- [16] Bai B, Wang J Q, Zhai Z Q, et al. The penetration processes of red mud filtrate in a porous medium by seepage[J]. Transport in Porous Media, 2017, 117(2): 207-227.
- [17] Bennacer L, Ahfir N D, Bouanani A, et al. Suspended particles transport and deposition in saturated granular porous medium: Particle size effects[J]. Transport in Porous Media, 2013, 100(3):377-392.
- [18] 薛传成,王艳,刘干斌,等.温度和 pH 对多孔介质中悬浮颗粒渗透迁移的影响[J].岩土工程学报,2019,41(11):2112-2119.
- [19] 白冰,张鹏远,宋晓明,等.渗透作用下多孔介质中悬浮颗粒的迁移过程研究[J].岩土工程学报,2015,37(10):1786-1793.
- [20] 薛传成,王艳,刘干斌,等.饱和多孔介质中悬浮颗粒一维迁移修正模型及解析解[J].宁波大学学报(理工版),2019,32(1):62-67.
- [21] García-García S, Wold S, Jonsson M. Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at different pH and ionic strength[J]. Applied Clay Science, 2009, 43(1):21-26.
- [22] Benamar A, Wang H Q, Ahfir N D, et al. Flow velocity effects on the transport and the deposition rate of suspended particles in a saturated porous medium[J]. Comptes Rendus Geosciences, 2005, 337(5):497-504.
- [23] Bradford S A, Torkzaban S, Leij F, et al. Modeling the coupled effects of pore space geometry and velocity on colloid transport and retention[J]. Water Resources Research, 2009, 45(2):W02414.
- [24] Reimus P W, Zavarin M, Wang Y F. Colloid-facilitated

- radionuclide transport: Current state of knowledge from a nuclear waste repository risk assessment perspective[R]. Los Alamos: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2017.
- [25] Dittrich T M, Reimus P W. Colloid-facilitated transport of ^{137}Cs in fracture-fill material experiments and modeling [R]. Los Alamos: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2015.
- [26] Chen X X, Bai B. Experimental investigation and modeling of particulate transportation and deposition in vertical and horizontal flows[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23(2):365-375.

Experimental study on permeation and transport behavior of suspended particles in porous media

RUAN Fangyi, XUE Chuancheng, WANG Yan^{*}, LIU Ganbin

(School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Soil column experiments were carried out considering two different suspended particles (i.e., silicon powder and polystyrene microspheres), and different pHs, temperatures and flow rates were considered to obtain a series of migration curves. The analytical solution was used to fit the experimental data and the migration parameters were then determined. The effect of pH on migration parameters was discussed. Studies have shown that pH is an important factor affecting the transport of suspended particles in porous media. When the temperature is 5 °C, the peak concentrations of the two suspended particles increase with the increasing of pH. When the temperature increases over 30 °C, the breakthrough curves of suspended particles change. The surface charges of suspended particles have changed with increasing temperature, and as the pH increases, the concentration peak first increases and then decreases. When the temperature and percolation velocity are constant, the relative velocity of the two suspended particles increases slightly with increasing pH, especially at higher flow rates, indicating the acceleration effect of suspended particles in porous media. As the permeation velocity becomes greater, the effect of hydrodynamic force also gets more obvious, and the effect of pH on migration of suspended particles becomes smaller, with peak concentration being of little change at the same time. The dispersion of both suspended particles decreases with increasing pH, and the dispersion of silicon micro powder is larger than that of polystyrene microspheres.

Key words: porous media; suspended particles; permeation and transport; breakthrough curve; parameter analysis

(责任编辑 史小丽)