

DOI: 10.11779/CJGE201911017

# 温度和 pH 对多孔介质中悬浮颗粒渗透迁移的影响

薛传成, 王艳\*, 刘干斌, 陈航, 李轲轲

(宁波大学岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 基于悬浮颗粒迁移的经典模型, 在颗粒沉积动力学方程中考虑释放效应, 求解了瞬时注入情况下悬浮颗粒的一维迁移问题的解析解, 同时对两种不同悬浮颗粒(硅微粉和聚苯乙烯微球)进行室内土柱试验, 得到不同 pH (4, 7, 10)、不同温度  $T$  (20°C, 30°C, 40°C) 和不同流速 (0.042, 0.127, 0.212 cm/s) 下的迁移曲线。利用解析解对试验数据进行拟合并确定迁移参数, 讨论了温度、流速对迁移参数的影响。研究表明: 温度、pH、颗粒种类是影响多孔介质中悬浮颗粒迁移的重要因素, 当 pH=7,  $T \leq 30^\circ\text{C}$  时, 悬浮颗粒排斥力起主导作用, 当  $T > 30^\circ\text{C}$  时, 布朗运动占主导作用; 同时, 随着流速的增大, 水动力效应增大, 温度对浓度峰值的影响不明显; 随着 pH 的增大, 聚苯乙烯微球在不同温度时的迁移曲线规律与硅微粉不同。

**关键词:** 温度; 多孔介质; 悬浮颗粒; 渗透迁移; pH

中图分类号: TU411.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)11-2112-08

作者简介: 薛传成(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 污染物渗透迁移。E-mail: 785335477@qq.com。

## Effects of temperature and pH on permeation and migration of suspended particles in porous media

XUE Chuan-cheng, WANG Yan, LIU Gan-bin, CHEN Hang, LI Ke-ke

(Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Based on the classical model for migration of suspended particles, the release effect is considered in the Kinetic equation for deposition of particles, and the analytical solution to the one-dimensional migration problem of suspended particles in case of instantaneous injection is obtained. The soil column experiments are carried out considering two different suspended particles (i.e., silicon powder and polystyrene microspheres), different pH (i.e., 4, 7 and 10), different temperatures (i.e., 20, 30 and 40°C) and different flow rates (i.e., 0.042, 0.127 and 0.212 cm/s) to obtain a series of migration curves. The analytical solution is used to fit the experimental data, and the migration parameters are then determined. The effects of temperature and velocity of flows on the migration parameters are discussed, and the temperature, pH and particle type are found to be the important factors affecting the migration of suspended particles in porous media. At pH=7 and  $T \leq 30^\circ\text{C}$ , the repulsive force of suspended particles plays a leading role, while the Brownian motion dominates at  $T > 30^\circ\text{C}$ . At the same time, the hydrodynamic effect increases with the increase of the flow rate, and the temperature has little effect on the peak concentration. With the increase of pH, the migration curve of polystyrene microspheres is different from that of silicon powder at different temperatures.

**Key words:** temperature; porous medium; suspended particle; permeation and migration; pH

## 0 引言

由于水力结构的内部侵蚀和渗透率降低(油井因悬浮颗粒沉积造成的堵塞)或含水层的人工补给引起的事故引起了越来越多的关注。此外, 彻底了解地下系统中固体颗粒的运输对于保护地下水资源免受微生物和固体颗粒污染物污染至关重要。研究悬浮颗粒在多孔介质中的迁移特性是近年来环境岩土工程领域的热点课题, 在地下水回灌、核废料处理、石油开采、注浆加固等方面具有重要的研究意义<sup>[1-6]</sup>。

在自然界中, 在多孔介质中的颗粒粒径分布广泛,

从 nm 到 mm 级, 一般情况下, 把颗粒分为悬浮颗粒和胶体两大类, 粒径大于 10  $\mu\text{m}$  的称为悬浮颗粒, 粒径小于 10  $\mu\text{m}$  的称为胶体, 也有以 1  $\mu\text{m}$  为分界粒径<sup>[1]</sup>, 这里将大于 1  $\mu\text{m}$  的颗粒定义为悬浮颗粒。温度对悬浮颗粒在多孔介质中的迁移过程具有重要影响, Bai 等<sup>[7]</sup>研究了温度对不同粒径悬浮颗粒迁移的影响, 结果表

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678311, 51308310); 浙江省自然科学基金项目(LY19E080011); 宁波市社发重大项目(2017C510002)  
收稿日期: 2018-12-12

\*通讯作者 (E-mail: wangyan@nbu.edu.cn)

明温度升高降低悬浮颗粒的渗流速度并增大浓度峰值对应的孔隙体积, 悬浮颗粒的纵向弥散度随温度升高略有下降, 然后几乎保持不变; García-García 等<sup>[8-9]</sup>用蒙脱石颗粒胶体研究了温度对其团聚动力学的影响: 在  $\text{pH} \leq 4$  时, 无论离子强度如何, 胶体团聚的速率常数随着温度的升高而增加; 在  $\text{pH} \geq 10$  时, 团聚速率常数随温度升高而降低作为总体趋势; 当  $\text{pH}$  在 4~10 时, 团聚速率常数随着温度的升高而明显降低, 除非在最高离子强度下, 其随着温度的升高而增加。Wang 等<sup>[10]</sup>做了批次吸附和砂柱试验, 研究了温度 (6, 24℃) 和离子强度对氧化石墨烯 (GO) 在饱和多孔介质中的保留和转移的影响, 试验结果表明: 温度对多孔介质中的 GO 保留具有显著影响, 特别是在相对高的离子强度下, 随着温度降低, 从流出物中回收更多的 GO。除温度效应外, 其他因素包括离子强度、粒度、砂表面性质也强烈影响 GO 在多孔介质中的保留和转移。Sleep 等<sup>[11]</sup>在 22℃~25℃、50℃和 92℃下进行柱试验, 以研究温度对甲苯、全氯乙烯和萘对粉质砾石含水层材料的吸附的影响。结果表明随着温度从 22℃~25℃增加到 90℃, 甲苯、全氯乙烯和萘的吸附系数分别降低了 35%, 40%和 60%。

综上所述, 现有研究大多只考虑了温度或者 pH 单独对悬浮颗粒迁移的影响, 而同时考虑颗粒种类、温度、pH 耦合作用的研究十分有必要。为此, 本文首先运用拉普拉斯 (Laplace) 变换和拉普拉斯 (Laplace) 数值逆变换求解在瞬时注入情况下悬浮颗粒的一维迁移控制方程; 再选取两种不同悬浮颗粒, 开展了不同 pH、温度和流速下的渗透迁移室内试验; 探究温度、pH 对不同悬浮颗粒迁移过程的影响, 最后用理论解来拟合试验数据曲线, 得到拟合参数并分析温度对参数的影响。

### 1 悬浮颗粒迁移问题控制方程求解

悬浮颗粒迁移的经典模型包括悬浮颗粒质量平衡方程和悬浮颗粒沉积动力方程, 它们已经在地下环境保护等领域的研究当中得到了广泛应用。然而, 在进一步研究的过程中发现, 理论结果与试验结果不能很好地吻合<sup>[12-13]</sup>, 这说明经典模型具有一定的局限性, 有必要对经典模型进行修正。在悬浮颗粒沉积动力方程中考虑悬浮颗粒沉积再释放过程, 可以更好地描述悬浮颗粒在多孔介质中的迁移过程, 示意图如图 1 所示。

考虑悬浮颗粒在多孔介质中沉积再释放效应的质量平衡方程和沉积动力方程分别如下<sup>[7, 14]</sup>:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} - u \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} - \frac{r_s}{n} \frac{\partial s(x,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{r_s}{n} \frac{\partial s(x,t)}{\partial t} = k_d C(x,t) - k_r \frac{r_s}{n} s(x,t) \quad (2)$$

控制方程的初始边界条件:

$$C(x,0) = 0 \quad 0 \leq x < +\infty, \quad (3)$$

$$C(0,t) = w(t) \quad 0 < t < +\infty, \quad (4)$$

$$\frac{\partial C(\infty,t)}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

$$s(x,0) = 0. \quad (6)$$

式中  $C$  为流体中悬浮颗粒的浓度 (mg/mL);  $s$  为每单位体积的多孔介质中悬浮颗粒的沉积量, 无量纲;  $t$  为迁移过程的时间 (s);  $r_s$  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 (cm/s);  $D$  为弥散系数 (cm<sup>2</sup>/s);  $x$  为悬浮颗粒迁移位移 (cm);  $k_d$  为沉积系数 (1/s), 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 (1/s)。

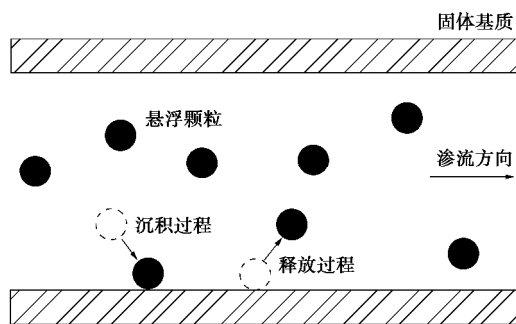


图 1 悬浮颗粒迁移过程示意图

Fig. 1 Sketch of migration process of suspended particles

式 (1), (2) 对  $t$  进行拉普拉斯变换, 并结合式 (3), (6) 得

$$s\bar{C} = D \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - k_d \bar{C} + k_r \frac{r_s}{n} \bar{s}, \quad (7)$$

$$\frac{r_s}{n} s \cdot \bar{s} = k_d \bar{C} - k_r \frac{r_s}{n} \bar{s}, \quad (8)$$

式中,  $\bar{C} = \int_0^\infty C \cdot e^{-st} dt$ ,  $\bar{s} = \int_0^\infty s \cdot e^{-st} dt$ 。

对式 (7), (8) 进行整理化简, 得

$$D \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} - u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - s \left( 1 + \frac{k_d}{s+k_r} \right) \bar{C} = 0, \quad (9)$$

对式 (4) 进行拉普拉斯变换,

$$\bar{C}(0,s) = \bar{w}(s), \quad 0 < s < +\infty, \quad (10)$$

结合 (9), (10) 得

$$\bar{C} = \bar{w} \exp \left\{ \frac{x}{2D} \left[ u - \sqrt{u^2 + 4Ds \left( 1 + \frac{k_d}{s+k_r} \right)} \right] \right\}. \quad (11)$$

利用拉普拉斯变换定义

$$C(x,t) = \frac{1}{2\pi i} \int_G e^{st} \bar{C}(x,t) ds, \quad (12)$$

得到

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty e^{-x^2 - m^2/x^2} dx = e^{-2m}, \quad (13)$$

式中,  $G$  为指定复平面  $s$  中的给定路径。

则公式 (11) 可由式 (13) 表达成如下:

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{w} \cdot e^a \cdot \int_0^\infty \exp\left\{-x^2 - a^2 \left[1 + b^2 s \left(1 + \frac{k_d}{s + k_r}\right)\right] / 4x^2\right\} dx, \quad (14)$$

式中,  $a = \frac{ux}{2D}$ ,  $b^2 = \frac{4D}{u^2}$ 。

将式 (14) 代入到式 (12) 中, 得

$$\frac{C}{C_0} = \frac{2e^a}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^\infty \exp\left(-x^2 - \frac{a^2}{4x^2}\right) \cdot \frac{1}{2\pi i} \cdot \int_G \exp\left[st - a^2 b^2 s \left(1 + \frac{k_d}{s + k_r}\right) / 4x^2\right] w ds dx. \quad (15)$$

当悬浮颗粒以瞬时形式注入到多孔介质中, 边界条件及拉普拉斯变换结果分别如下:

$$C(0, t) = \frac{M}{Q} d(t), \quad (16)$$

$$C(0, s) = \frac{M}{Q}, \quad (17)$$

式中,  $M$  为注入颗粒质量,  $Q$  为流量。

将式 (17) 代入到式 (15) 中, 得到

$$\frac{Q}{M} \bar{C} = \frac{2e^a}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^\infty \exp\left(-x^2 - \frac{a^2}{4x^2}\right) \cdot F, \quad (18)$$

式中,  $F = \exp\left[-k_r t - \frac{a^2 b^2}{4x^2} (k_d - k_r)\right] \cdot R$ ,  $R = \frac{1}{2\pi i}$

$$\int_G \exp\left[j \left(t - \frac{a^2 b^2}{4x^2}\right) + \frac{a^2 b^2 k_d k_r}{4x^2 j}\right] dj, \quad a^2 = \frac{a^2 b^2 k_d k_r}{4x^2},$$

$b^2 = \frac{a^2 b^2}{4}$ ,  $j = s + k_r$ ,  $x$ ,  $j$  均为虚拟变量。

$$\text{令 } f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_G \exp\left[jt + \frac{a^2}{j}\right] dj, \quad (19)$$

$$\text{即 } f(t) = L^{-1} \exp\left(\frac{a^2}{j}\right), \quad (20)$$

由拉普拉斯变换延迟性质

$$F(t-b)u(t-b) = L^{-1} e^{-bs} F(s) \quad (b > 0), \quad (21)$$

$$\text{可知 } R = f\left(t - \frac{b^2}{x^2}\right) u\left(t - \frac{b^2}{x^2}\right), \quad (22)$$

其中,  $u\left(t - \frac{b^2}{x^2}\right)$  为单位阶跃函数, 进一步可得

$$R = \begin{cases} 0 & \left(t < \frac{b^2}{x^2}\right) \\ f\left(t - \frac{b^2}{x^2}\right) & \left(t > \frac{b^2}{x^2}\right) \end{cases}, \quad (23)$$

要使  $R$  有意义, 须  $t > \frac{b^2}{x^2}$ , 即  $x > x / 2\sqrt{Dt}$ 。

根据拉普拉斯变换求导性质:

$$L^{-1} j G(j) = g'(t) + L[g(0)] \quad (24)$$

令  $g(t) = I_0(2\sqrt{a^2 t})$ , 则  $g(0) = 1$ , 且  $g(t)$  的拉普拉斯变换为  $G(j) = \frac{1}{j} \exp\left(\frac{a^2}{j}\right)$ , 所以

$$f(t) = L^{-1} j \left[\frac{1}{j} \exp\left(\frac{a^2}{j}\right)\right] = \sqrt{\frac{a^2}{t}} \cdot I_1(2a\sqrt{t}) + d(t), \quad (25)$$

式中,  $I_0$ ,  $I_1$  为修正的贝塞尔函数。

将式 (25) 代入到式 (23) 中, 得

$$R = f(I) = \sqrt{\frac{a^2}{I}} \cdot I_1(2a\sqrt{I}) + d(I), \quad (26)$$

式中,  $I = t - b^2 / x^2$ 。

将式 (26) 代入到式 (18) 中, 即可得瞬时注入时悬浮颗粒在多孔介质中浓度, 即

$$\frac{C}{C_0} = \frac{2Me^a}{Q\sqrt{\pi}} \int_{x/2\sqrt{Dt}}^\infty h_1(t) \cdot Rd\xi, \quad (27)$$

式中,  $h_1(t) = \exp\left(-x^2 - \frac{a^2}{4x^2}\right) \cdot \exp\left[-k_r t - \frac{a^2 b^2}{4x^2} (k_d - k_r)\right]$ 。

含有沉积—释放系数的方程 (27) 可用来描述两种悬浮颗粒在多孔介质中的迁移曲线, 通过试验结果确定方程 (27) 中未知的 4 个迁移参数: 弥散系数  $D$ 、沉积系数  $k_d$ 、释放系数  $k_r$  和悬浮颗粒平均渗流速度  $u$ , 并分析温度对迁移参数的影响。

## 2 试验方法

针对本试验的研究内容, 选用的悬浮颗粒必须具有良好的温度耐受性和化学稳定性, 所以选用硅微粉和聚苯乙烯微球作为注入颗粒。硅微粉的平均粒径为  $4 \mu\text{m}$ , 密度为  $2.26 \text{ g/cm}^3$ , 聚苯乙烯微球平均粒径同样为  $4 \mu\text{m}$ , 密度为  $1.05 \text{ g/cm}^3$ , 聚苯乙烯微球的密度和硅微粉相差较大, 以便研究悬浮颗粒种类对悬浮颗粒在多孔介质中迁移过程的影响。对两种不同悬浮颗粒进行室内土柱试验, 得到不同 pH (4, 7, 10)、不同温度  $T$  (20, 30,  $40^\circ\text{C}$ ) 和不同流速  $v$  (0.042, 0.127, 0.212 cm/s) 下的迁移曲线。

试验选取透明的熔融石英为多孔介质。参考之前的试验研究<sup>[15-16]</sup>, 本试验将熔融石英酸洗, 除去熔融石英表面上铁、铝等氧化物和有机物, 避免其对试验产生干扰。本试验选用的熔融石英粒径分布介于  $0.6 \sim 2.36 \text{ mm}$ , 中位粒径为  $1.55 \text{ mm}$ , 其中粒径为  $0.6 \sim 1.18 \text{ mm}$  的熔融石英占约 29%, 粒径为  $1.18 \sim 2.36 \text{ mm}$  的熔融石英占 71%。不均匀系数  $C_u = 2.1$ , 曲率系数  $C_c = 1.1$ , 密度为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 熔融石英试样的平均孔

隙率  $n=46.4\%$ 。由此可知, 熔融石英的粒径比较均匀, 可以保证粒径为  $4\ \mu\text{m}$  的悬浮颗粒在熔融石英中不会产生严重的堵塞。同时, 在每次试验之前, 将熔融石英用超纯水冲洗至无杂质, 然后置于烘箱中在  $105^\circ\text{C}$  下烘干 24 h。

试验装置如图 2 所示, 由有机玻璃制成的圆柱长度为 200 mm, 直径为 50 mm, 长径比为 4, 可以看作是一维渗透。每次试验前, 将蓄水箱、蠕动泵、土柱放入恒温箱中, 并把恒温箱设置成试验温度 ( $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ ), 静置 24 h, 使试验环境温度稳定。在蓄水箱中加入 HCl 和 NaOH 来调节 pH (4, 7, 10), 蠕动泵抽出蓄水箱中的超纯水到土柱中, 并用流量计测量流量。

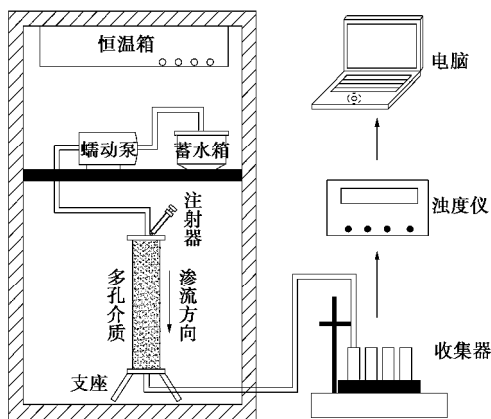


图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental apparatus for penetration tests

采用注射器将 20 mL 浓度为  $0.5\ \text{mg/mL}$  的悬浮颗粒溶液注入到土柱中, 注射器注入时间为 2 s, 可近似成瞬时注入, 溶液体积与多孔介质孔隙体积相比很小, 故忽略注入过程对试验的影响。流出液每 20 mL 收集一次, 并用浊度仪测量流出液浊度再转换成浓度。结合雷诺数定义<sup>[1]</sup>, 试验的最大流速  $v$  为  $0.212\ \text{cm/s}$ ,  $T$  的范围为  $5^\circ\text{C} \sim 58.3^\circ\text{C}$ , 取  $L=0.01\ \text{m}$ ,  $\rho=1000\ \text{kg/m}^3$ , 可以求得  $0.000479\ \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) < \mu_w < 0.00152\ \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , 于是得到  $14 < Re < 44$ , 雷诺数均小于 2320, 所以本次试验均为层流。参考之前试验<sup>[7, 17]</sup>, 温度对硅微粉和聚苯乙烯微球的浊度几乎无影响, 所以本试验将流出液收集后随即进行浊度测量, 以减少试验误差。浓度与浊度关系的拟合公式为  $y = ax^2 + bx + c$ <sup>[7]</sup>, 不同 pH 下拟合系数列于表 1。

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 温度对悬浮颗粒迁移的影响

选用两种不同的悬浮颗粒 (硅微粉和聚苯乙烯微球) 在 3 种不同的速度 ( $v=0.042, 0.127, 0.212\ \text{cm/s}$ )、

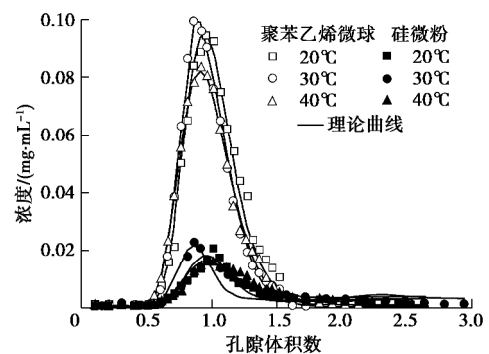
表 1 浊度与浓度之间拟合公式的系数值

Table 1 Values of coefficients in relationship between turbidity and concentration

颗粒种类	pH	$a$	$b$	$c$	$R^2$
硅微粉	4	$-3.66 \times 10^{-6}$	$1.47 \times 10^{-3}$	$-1.36 \times 10^{-4}$	0.998
	7	$-1.52 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-3}$	$6.99 \times 10^{-4}$	0.999
	10	$-1.76 \times 10^{-6}$	$1.36 \times 10^{-3}$	$-2.32 \times 10^{-3}$	0.998
聚苯乙烯微球	4	$-8.68 \times 10^{-7}$	$6.49 \times 10^{-4}$	$-1.17 \times 10^{-3}$	0.999
	7	$-7.72 \times 10^{-7}$	$6.31 \times 10^{-4}$	$-6.81 \times 10^{-4}$	0.999
	10	$-5.29 \times 10^{-7}$	$5.71 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-3}$	0.999

3 种不同的温度 ( $T=20, 30, 40^\circ\text{C}$ )、3 种不同的 pH (4, 7, 10) 下, 进行渗流穿透试验。孔隙体积数定义为流过土柱的累计水量与土柱孔隙体积之比, 采用孔隙体积数代替时间作为横坐标, 来表征悬浮颗粒的穿透过程, 可以避免由于不同的多孔介质孔隙体积以及流速差异造成的试验结果可比性差的缺陷<sup>[2, 7, 14]</sup>。

图 3 显示了在  $\text{pH}=7$  时, 两种悬浮颗粒在不同流速下的迁移曲线。图 4 为不同流速下浓度峰值与温度的关系。聚苯乙烯微球密度与超纯水密度相近, 所以重力作用对聚苯乙烯微球在多孔介质中的沉积影响较小, 温度及流速对聚苯乙烯微球在多孔介质中的迁移具有较大影响。从能量的观点来看<sup>[8-9]</sup>, 温度升高对悬浮颗粒具有稳定效果, 同时温度升高会增强悬浮颗粒的布朗运动, 降低悬浮颗粒的稳定性。在图 4 中, 当  $v=0.042\ \text{cm/s}$ , 温度由  $20^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}$  变化时, 聚苯乙烯微球浓度峰值从  $0.094\ \text{mg/mL}$  升至  $0.099\ \text{mg/mL}$ , 再降至  $0.083\ \text{mg/mL}$ 。可见, 聚苯乙烯微球在多孔介质迁移过程中, 随着温度的升高, 微球之间排斥力的增强与温度引起的碰撞频率增大相互抵消, 前期 ( $20^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C}$ ) 微球之间增强的排斥力起到的主要的影响, 所以观察到浓度峰值增大, 随着温度的再升高 ( $30^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}$ ), 内能增加, 这导致悬浮颗粒间碰撞的频率更高, 并具有悬浮颗粒聚集所需的能量, 因此沉降动力学过程更快, 导致布朗运动起到主导作用, 浓度峰值降低。



(a)  $\text{pH}=7, v=0.042\ \text{cm/s}$

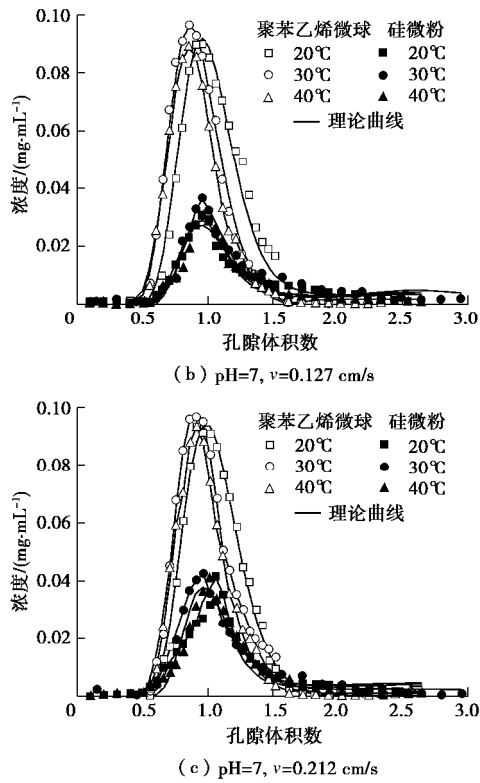


图3 不同流速下温度对悬浮颗粒迁移曲线的影响

Fig. 3 Effects of temperature on migration curves of suspension particles at different flow rates

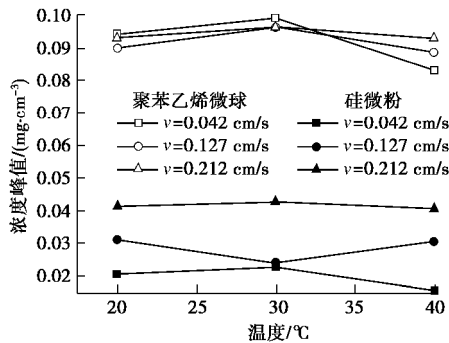


图4 不同流速下浓度峰值与温度的关系

Fig. 4 Relationship between peak concentration and temperature at different flow rates

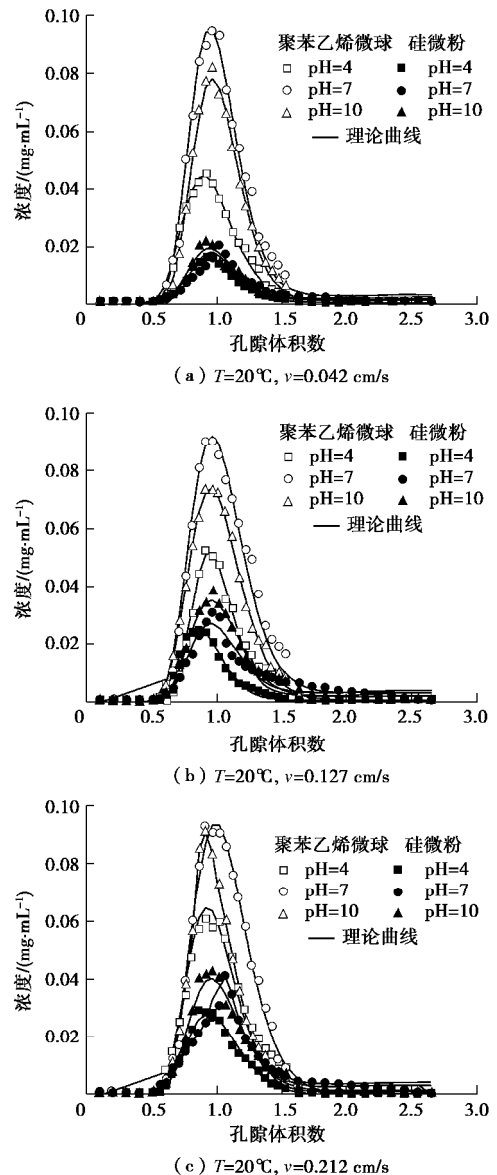
硅微粉密度比聚苯乙烯微球大很多，所以在迁移过程中受到重力的作用发生沉积，所以浓度峰值相比聚苯乙烯微球小很多。在  $v=0.042\text{ cm/s}$ ，温度由  $20^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}$  变化时，硅微粉浓度峰值从  $0.0206\text{ mg/mL}$  升至  $0.0227\text{ mg/mL}$ ，再降至  $0.0157\text{ mg/mL}$ 。流速由  $0.042\text{ cm/s}$  增加到  $0.212\text{ cm/s}$  时，不同温度下聚苯乙烯微球的最大浓度峰值差由  $0.0132\text{ mg/mL}$  降至  $0.0035\text{ mg/mL}$ ，硅微粉的最大浓度峰值差由  $0.0049\text{ mg/mL}$  降至  $0.0018\text{ mg/mL}$ ，这是因为在较高的流速下，作用在悬浮颗粒上的水动力起主导作用<sup>[14, 18]</sup>，所

以在高流速下，温度对浓度峰值的变化影响不大。

图3中，在不同的渗流速度下，温度由  $20^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}$  变化时，两种悬浮颗粒浓度峰值对应的孔隙体积数大致相同，且孔隙体积数小于1，表示两种悬浮颗粒平均速度均高于平均渗流速度，表明两种悬浮颗粒产生了加速效应。

### 3.2 不同温度下 pH 对悬浮颗粒迁移的影响

图5为不同温度下 pH 对悬浮颗粒迁移曲线的影响图。从图5(a)~(f)可以看出，流速一定时，相同温度下，随着 pH 的增大，硅微粉迁移曲线的浓度峰值增大，这是因为随着 pH 的增大，悬浮颗粒电位增大，因为硅微粉与熔融石英带有相同的电荷，所以硅微粉与多孔介质之间斥力增大，有利于硅微粉的释放，浓度峰值也随之增大，并且流速越大，pH 对硅微粉迁移的影响越大，迁移曲线规律越明显。



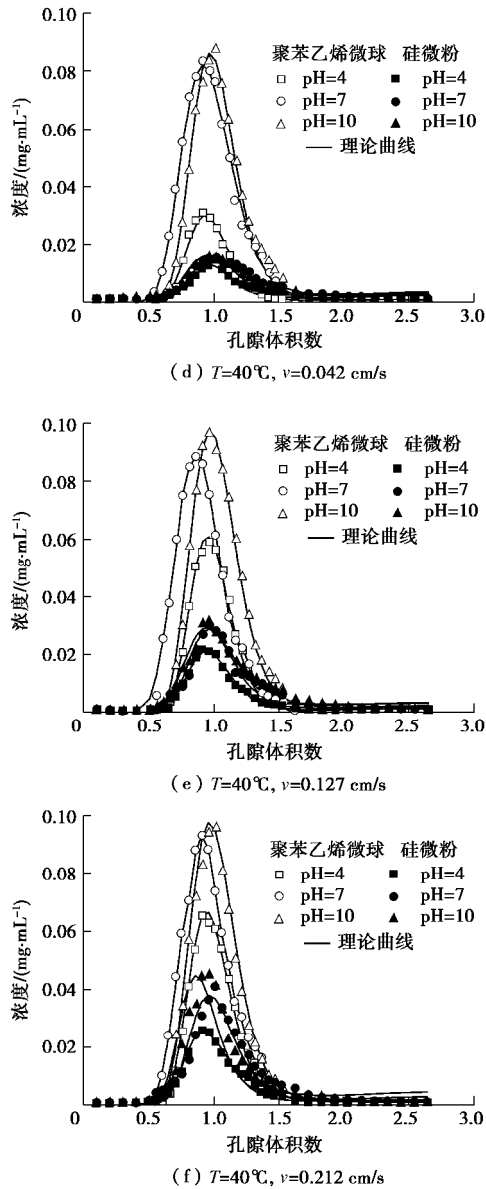


图 5 不同温度下 pH 对悬浮颗粒迁移曲线的影响

Fig. 5 Effects of pH on migration curves of suspension particles at different temperatures

当温度较高时 ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ), 聚苯乙烯微球的迁移曲线规律与硅微粉相同, 但是当  $T=20^{\circ}\text{C}$  时, pH 从 4 增大至 7, 浓度峰值增加, pH 从 7 减小至 10, 浓度峰值减少, 并且 pH=10 时的浓度峰值大于 pH=4 时的情况, 整个规律不随流速的改变而变化。例如, 当  $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $v=0.212\text{ cm/s}$  时, pH 从 4→7→10, 浓度峰值从  $0.059\rightarrow 0.09\rightarrow 0.074\text{ mg/mL}$ , 这与之前试验现象吻合<sup>[16]</sup>, 可以解释为 pH 的变化会影响悬浮颗粒表面的电荷量: 酸性条件下使悬浮颗粒表面正电荷量增加, 更易于向固相基质移动; 碱性条件下使带有相同电荷相互排斥的悬浮颗粒更容易团聚发生沉积, 所以在中性条件下更利于悬浮颗粒的迁移。同时, 温度的升高影响悬浮颗粒表面电荷的方向<sup>[8]</sup>, 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, 使浓度峰值增加。

### 4 参数拟合

基于方程 (27) 得到的理论解, 使用 Matlab 软件来分析悬浮颗粒的迁移曲线, 对沉积系数  $k_d$ 、释放系数  $k_r$ 、弥散系数  $D$  和悬浮颗粒平均渗流速度  $u$  进行参数拟合, 结果如图 3, 5 所示, 相关系数  $R^2$  均大于 0.95。可以看出, 考虑沉积—释放的理论解可以较好地描述悬浮颗粒的迁移。

为了考察温度和速度对沉积系数  $k_d$ 、释放系数  $k_r$ 、弥散系数  $D$  和悬浮颗粒平均渗流速度  $u$  的关系, 选用 pH=7 情况下硅微粉与聚苯乙烯微球在 3 种不同流速、3 种不同温度的试验数据, 利用式 (27) 得到 4 个迁移参数与流速、温度之间的关系, 结果如图 6~9 所示。

如图 6 所示, 随着温度的升高, 硅微粉沉积系数先降低, 然后上升, 聚苯乙烯微球沉积系数缓慢增加。这与试验结果吻合, 在  $T=30^{\circ}\text{C}$  时, 硅微粉浓度峰值达到最大, 对应的沉积系数最小。与硅微粉不同, 聚苯乙烯微球的密度很小, 在温度作用下布朗运动强烈, 所以导致更多的聚苯乙烯微球堵塞在孔隙中, 沉积系数增大。随着流速的增大, 水动力影响增大, 使重力效应减弱, 沉积效应减弱, 沉积系数减小。图 7 所示的释放系数与温度的关系曲线跟沉积系数与温度的规律相反, 这是由沉积—释放过程的性质决定的。

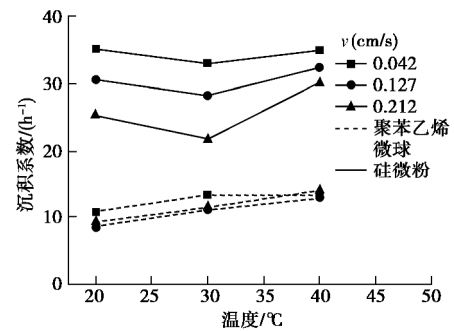


图 6 沉积系数与温度的关系

Fig. 6 Relationship between deposition coefficient and temperature

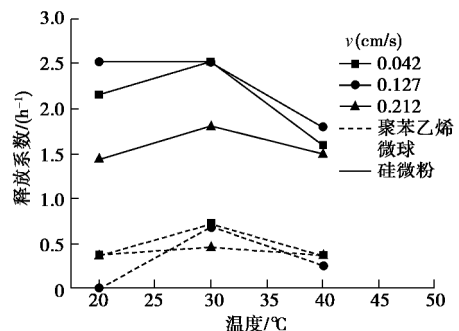


图 7 释放系数与温度的关系

Fig. 7 Relationship between release coefficient and temperature

由图8可知,悬浮颗粒的平均渗流速度随着温度的升高先缓慢增加再减小,在 $T=40^{\circ}\text{C}$ 时,渗流速度值最小,这是因为温度升高,增强了悬浮颗粒的布朗运动,使悬浮颗粒与固体基质碰撞的频率增大,表现为浓度峰值对应的孔隙体积数增大,悬浮颗粒平均渗流速度减小。由于两种悬浮颗粒的密度不同,所以密度较大的硅微粉在重力作用下对应的渗流速度较大,但是在穿透曲线中表现不明显。弥散系数与孔隙水平平均渗流速度 $u_0$ 的关系可由下式表示<sup>[7, 19]</sup>:

$$D = au_0^l + \frac{D_{AB}}{\tau_0} \quad (28)$$

式中  $a$  为弥散度;  $l$  为幂指数;  $D_{AB}$  为分子弥散系数;  $\tau_0$  为多孔介质的弯曲度; 孔隙水平平均渗流速度  $u_0 = u/n$ ,  $n$  为孔隙率。

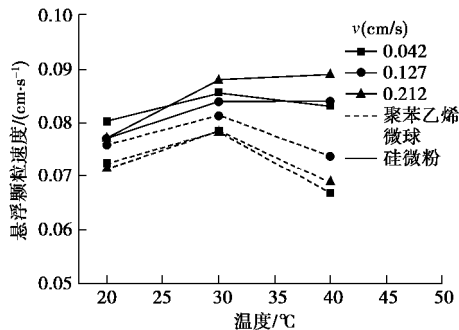


图8 悬浮颗粒速度与温度的关系

Fig. 8 Relationship between velocity of suspended particles and temperature

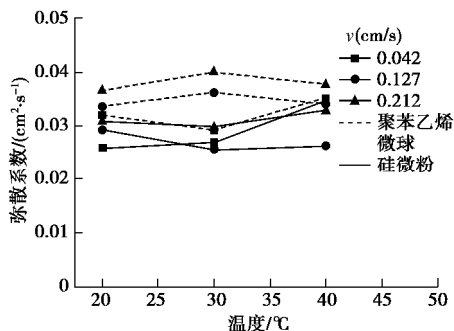


图9 弥散系数与温度的关系

Fig. 9 Relationship between diffusion coefficient and temperature

由 Bai 等<sup>[7]</sup>研究可知,弥散系数  $D$  主要取决于悬浮颗粒的平均渗流速度,在图9中,随着流速的增大,弥散系数增大。因为硅微粉密度比聚苯乙烯微球大,试验是纵向一维渗流,所以悬浮颗粒受到重力作用影响较大,受水动力和温度影响较小,结果表现为硅微粉的弥散系数比聚苯乙烯微球小。

## 5 结 论

在已有的变粒径建模方法基础上,针对不同粒径区宏观弹性不一致和界面区大小颗粒互相渗入这两个

问题进行优化,通过离散元模拟验证了该方法的有效性。主要得出以下结论:

(1) 当  $\text{pH}=7$ ,  $T \leq 30^{\circ}\text{C}$  时,悬浮颗粒排斥力起主导作用,当  $T > 30^{\circ}\text{C}$  时,布朗运动占主导作用。同时,随着流速的增大,水动力效应增大,温度对浓度峰值的影响不大。由于重力作用,硅微粉浓度峰值比聚苯乙烯微球小很多。

(2) 当温度、流速一定时,随着  $\text{pH}$  的增大,硅微粉迁移曲线的浓度峰值增大。当温度变化时,聚苯乙烯微球的迁移曲线规律与硅微粉不同,说明  $\text{pH}$  与温度对聚苯乙烯微球表面电荷量和电荷方向具有重要影响。

(3) 随着温度的增加,硅微粉沉积系数先降低,然后上升,聚苯乙烯微球沉积系数缓慢增加,释放系数与温度的关系跟沉积系数与温度的关系相反。悬浮颗粒的平均渗流速度随着温度的增加先缓慢增加再减小,说明温度的增加增强了悬浮颗粒的布朗运动,使悬浮颗粒平均渗流速度减小。

## 参考文献:

- [1] 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. (BAI Bing, ZHANG Peng-yuan, SONG Xiao-ming, et al. Transport processes of suspended particles in saturated porous media by column seepage tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1786 - 1793. (in Chinese))
- [2] 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. (LIU Quan-sheng, CUI Xian-ze, ZHANG Cheng-yuan, et al. Effects of particle size on characteristics of transportation and deposition of suspended particles in porous media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1777 - 1783. (in Chinese))
- [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(4): 163 - 180.
- [4] GODINEZ I G, DARNAULT C J G. Aggregation and transport of nano-TiO<sub>2</sub> in saturated porous media: Effects of pH, surfactants and flow velocity[J]. Water Research, 2011, 45(2): 839 - 851.
- [5] JIRKA Šimůnek, HE C, PANG L, 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 & Interface Science*, 2017, **246**: 75 - 104.
- [7] BAI B, LONG F, RAO D, et al. The effect of temperature on the seepage transport of suspended particles in a porous medium[J]. *Hydrological Processes*, 2016, **31**(2): 382 - 393.
- [8] 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.
- [9] GARCÍA-García S, JONSSON M, WOLD S. Temperature effect on the stability of bentonite colloids in water[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2006, **298**(2): 694 - 705.
- [10] WANG M, GAO B, TANG D, 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] SLEEP B E, MCCLURE P D. The effect of temperature on adsorption of organic compounds to soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, **38**(1): 46 - 52.
- [12] SHAPIRO A A, BEDRIKOVETSKY P G. A stochastic theory for deep bed filtration accounting for dispersion and size distributions[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2010, **389**(13): 2473 - 2494.
- [13] TUFENKJI N, REDMAN J A, ELIMELECH M. Interpreting deposition patterns of microbial particles in laboratory-scale column experiments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(3): 616 - 623.
- [14] 张鹏远, 白冰, 蒋思晨. 孔隙结构和水动力对饱和多孔介质中颗粒迁移和沉积特性的耦合影响[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(5): 1307 - 1316. (ZHANG Peng-yuan, BAI Bing, JIANG Si-chen. Coupled effects of hydrodynamic forces and pore structure on suspended particle transport and deposition in a saturated porous medium[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(5): 1307 - 1316. (in Chinese))
- [15] KASEL D, BRADFORD S A, ŠIMŮNEK J, et al. Transport and retention of multi-walled carbon nanotubes in saturated porous media: Effects of input concentration and grain size[J]. *Water Research*, 2013, **47**(2): 933 - 944.
- [16] 刘庆玲, 徐绍辉, 刘建立. 离子强度和 pH 对高岭石胶体运移影响的实验研究[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(3): 425 - 429. (LIU Qing-ling, XU Shao-hui, LIU Jian-li. Effects of ionic-strength and pH on Kaolinite transport in saturated porous media[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(3): 425 - 429. (in Chinese))
- [17] 王以华, 张艳萍, 刘静, 等. 单分散聚苯乙烯微球浓度的快速检测方法[J]. *中国粉体技术*, 2014, **20**(5): 19 - 23. (WANG Yi-hua, ZHANG Yan-ping, LIU Jing, et al. Rapid method for determining concentrations of monodisperse polystyrene microspheres[J]. *China Powder Science and Technology*, 2014, **20**(5): 19 - 23. (in Chinese))
- [18] 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[J]. *Comptes Rendus Géoscience*, 2013, **345**(9/10): 392 - 400.
- [19] 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.