

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.06.007

【理论研究】

低渗透性污染场地高压旋喷修复药剂 迁移特性数值模拟分析

王蓉^{1,2}, 翟新乐^{3*}, 吕玺琳⁴

(1. 上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海 200093; 2. 上海环境岩土工程技术研究中心, 上海 200093;
3. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 四川 成都 611756; 4. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 近年来, 高压旋喷注药修复技术在低渗透性污染场地中得到广泛应用, 药剂注入后在孔周土体中的迁移规律值得深入探讨。考虑分子扩散、机械弥散、对流、颗粒迁移等条件, 对高压旋喷注药孔周围地层的药剂时空分布进行有限元数值模拟。模拟结果表明: 高压旋喷产生的高速流动溶液引起土体内部细小颗粒迁移, 导致渗透系数增大并影响药剂弥散和对流; 随着注药压力升高, 土体渗透系数增大, 药剂迁移位置更远, 场地修复区域面积扩大; 在高注药压力条件下, 渗透系数变化较小, 修复面积无明显变化。因此, 提高注药压力有助于扩大低渗透性场地的修复面积, 但过高压力将使功效降低。研究成果可为低渗透性场地的高压旋喷注药修复设计提供理论支撑。

关键词: 污染场地; 低渗透性; 高压旋喷; 颗粒迁移; 对流-扩散; 数值模拟

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0580-09

Numerical simulation of migration characteristics of high-pressure rotary jet remediation agents in low-permeability polluted sites

WANG Rong^{1,2}, ZHAI Xinle^{3*}, LÜ Xilin⁴

(1. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Geo-Environment, Shanghai 200093, China;

3. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;

4. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: High-pressure rotary jet technology is increasingly applied in the in-situ remediation of low-permeability contaminated site recently. The migration patterns of remediation agents in the soil surrounding the borehole after injection worth further investigation. In this study, the spatio-temporal distributions of agents around the borehole were simulated using finite element method considering the coupled effects among molecular diffusion, mechanical dispersion, convection and fines migration. The results show that high-speed flow fluid leads to fines migration in soil and higher permeability, which affects the convection-diffusion of agents. With the increasing of agent-injection pressure, the permeability grows significantly, resulting in bigger remediation area. Under high injection pressure conditions, the change in permeability coefficient is relatively small, and the remediation area does not significantly increase. Therefore, increasing injection pressure can help expand the remediation area in low-permeability sites, but excessive pressure may reduce the overall efficiency. The findings provide theoretical basis for the design of high-pressure rotary jet remediation in low-permeability sites.

Key words: contaminated site; low-permeability; high-pressure rotary jet; fines migration; convection-diffusion; numerical simulation

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42202317); 上海市科委科技支撑计划项目(13231202300)。

作者简介: 王蓉(1981—), 女, 山西运城人, 博士, 高级工程师, 主要从事环境岩土的研究工作。E-mail: wangrong@sgidi.com。

*通信作者: 翟新乐(1991—), 男, 河南新乡人, 博士, 主要从事地质工程的研究。E-mail: xinlezhai@swjtu.edu.cn。

0 引言

由于以往存在生活垃圾、农药和工业废弃物等未经处理直接排放的问题,在水流、风等自然因素影响下渗透到土壤内部,造成全球超过54%的人口因土壤污染面临身体健康风险^[1]。随着国家对环保问题越来越重视,需对这些污染场地进行修复。目前污染场地修复主要可分为3种类型,即原位修复、异位修复及自然衰减技术^[2]。相对于其他2种方式,原位修复技术具有对周边环境扰动小、修复时间短、施工流程简单及成本低等优势,故在污染场地治理中被大量采用^[3]。在原位修复中,常用的注药方法有直压式注射、注射井和高压旋喷注射等。直压式注射方法通过注浆泵将药剂分层注入到污染土层中^[4];注射井方法则利用注入动力设备将药剂通过注入井注射到污染土层中^[5];高压旋喷注射技术是将高压旋喷桩工艺中的泥浆置换成修复化学药剂,并利用钻机将带有喷嘴的注浆管钻至污染土层,进而通过高压将药剂喷射到周围土层^[6]。

目前,一些退役工业用地存在大量低渗透性的黏性污染土层,污染物包括石油烃、三氯乙烯和氯代烃等。如上海徐汇区某工业仓库场地计划开发为商业服务用地,但场地土层内氯代烃类有机物严重超标^[7];又如南京燕子矶传统老工业区存在大面积、深层位、重污染场地,在开发为宜居新城前需进行严格的污染治理^[8]。对于低渗透性场地,高压旋喷注射由于可将药剂喷射到更远的位置而得到了广泛应用^[9]。如上海某金属制品厂仓储场地含有高浓度的三氯乙烯污染物,且渗透系数较低,采用高压旋喷工艺的修复效率明显高于其他工艺^[10]。

为了给高压旋喷修复设计提供理论依据,有必要对高压旋喷修复中的药剂迁移特性进行分析。当前的有关研究已取得较大进展,如武亚军等^[11]利用透明土材料开展了污染土修复药剂迁移的室内试验,获取了不同注药压力下的泥饼内部药剂的浓度分布;张文杰等^[12]采用荧光素钠和氯离子作为示踪剂,开展了不同旋喷参数下的现场和室内高压旋喷试验;陈贺等^[13]结合注入-提取技术,建立了低渗污染场地中考虑水力压裂的修复药剂强化输运模型。这些有关土层中修复药剂迁移的研究考虑了对流、分子扩散、机械弥散等作用,同时探讨了施工参数对修复效果的影响,但有关高压旋喷对孔周土体渗透系数的影响还有必要进一步研究,从而提高

对药剂浓度分布预测的准确度。在高速喷射药剂影响下,注药孔周围低渗透土体的细小颗粒随药剂流动发生迁移,导致渗流通道扩大和渗透系数升高,从而增大修复面积。当前的分析采用胶体稳定理论描述细小颗粒的迁移现象^[14-15],如ZHAI等^[16]基于胶体稳定理论提出了简化颗粒迁移模型。

针对低渗透性污染场地高压旋喷注药修复药剂的迁移问题,采用多孔弹性力学模型和胶体稳定理论,建立考虑细小颗粒迁移诱发渗透系数变化的流-固耦合模型,结合考虑分子扩散、机械弥散和对流影响的药剂对流-弥散模型,开发高压旋喷修复中土体内部药剂迁移和力学响应的有限元数值模拟程序。通过对现场试验的模拟验证了程序的准确性,并对不同注药压力下药剂的迁移规律进行了模拟,分析低渗透性场地中注药压力对修复效率的影响规律。

1 污染场地修复药剂迁移数学模型

建立描述高压旋喷注药修复过程中注药孔周围低渗地层渗透特性变化和药剂迁移的数学模型,如图1所示。注药孔轴线垂直于水平地面,低渗地层物理力学特性在水平方向相同,其中应力和变形符合线弹性规律。地层渗透性常由渗流通道大小、迂曲程度和固体颗粒的物理化学性质等因素决定。这里忽略高压旋喷注药对地层组分物理化学性质的影响,并忽略地层内渗流通道的迂曲变化,因而地层渗透系数的变化由渗流通道的大小决定。在高速喷射药剂作用下,影响渗流通道大小的主要因素是内部细小颗粒含量的变化,故影响地层渗透系数变化的主要因素是可移动的细小颗粒含量。药剂流动方式为沿注药孔半径方向径向流动,药剂成分在孔隙水中的迁移方式主要有分子扩散、机械弥散和对流。

基于上述条件,低渗透性污染场地地层可简化为平面二维模型。地层在高压注药中的位移 \mathbf{u} 和孔隙水压力 p 的关系为:

$$\frac{1}{2}[(D_{11} - D_{12})u_{i,ij} + (D_{11} + D_{12})u_{j,ji}] - \alpha p_{,i} = 0 \quad (1)$$

式中: D_{ij} 为弹性模量矩阵; u_i 为在 i 方向的位移分量; α 为Biot系数。下标中的“,”代表在特定方向(i 或 j)的偏导数, i 和 j 代表二维平面的 x 和 y 方向,即 $u_{i,ij}$ 为位移分量 u_i 在 j 方向的二阶偏导, $u_{j,ji}$ 为位移分量 u_j 在 i 和 j 方向的二阶偏导, $p_{,i}$ 为孔隙水压力 p 在 i 方向的一阶偏导。

式(1)中的弹性模量矩阵为:

$$D_{ij} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： E 和 ν 分别为水平方向的弹性模量和泊松比。
根据 KANFAR 等^[17]的研究，忽略药剂密度和

温度变化时，低渗地层中孔压与地层位移的关系为：

$$\alpha \dot{u}_{i,i} + \frac{1}{M} \dot{p} - \frac{k}{\mu} p_{,ii} = 0 \quad (3)$$

式中： M 为 Biot 系数； k 为渗透系数； μ 为孔隙液体的动力黏滞系数； $u_{i,i}$ 代表位移分量 u_i 在 i 方向的一阶偏导， $\dot{u}_{i,i}$ 代表变量 $u_{i,i}$ 随时间的变化率； $p_{,ii}$ 代表孔压 p 在 i 方向的二阶偏导； \dot{p} 代表孔压 p 随时间的变化率。

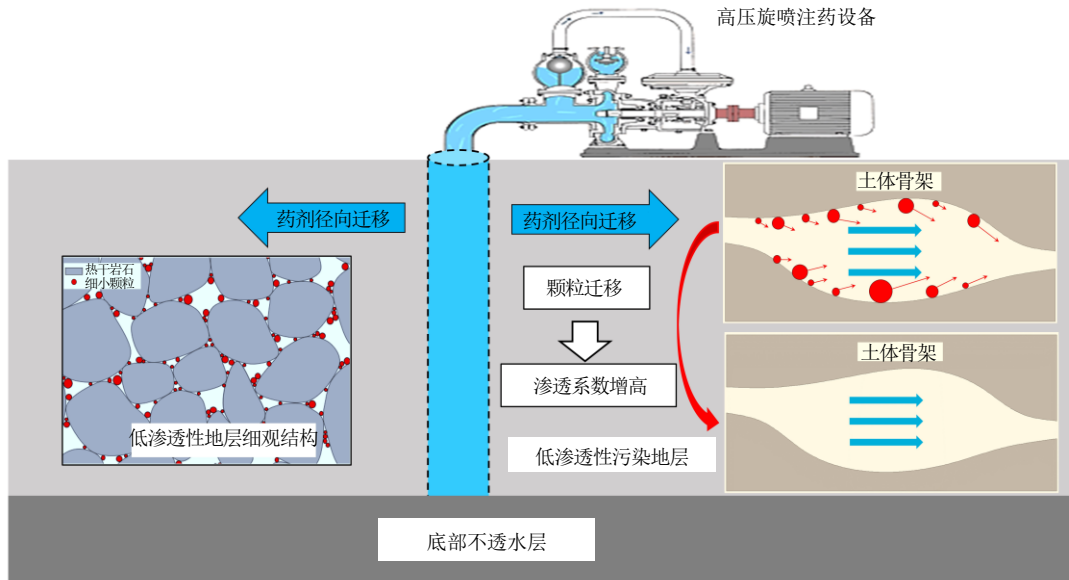


图1 分析模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the analysis model

由于土层的渗透性能由内部连通孔隙通道的尺寸决定，土的连通孔隙内部常含大量细小颗粒，这些颗粒会减小孔隙尺寸或堵塞渗流通道从而影响液体流动。在高压旋喷注浆过程中，高速流动的液体将裹挟孔隙内部的细小颗粒发生迁移，扩大孔隙通道尺寸，使渗透系数增大，最终使得修复液体流向更远位置。图2为低渗土体孔隙内细颗粒状态，由图2可知，孔隙内部细小颗粒按状态可分为附着颗粒、悬浮颗粒和俘获颗粒。附着颗粒是指附着在介质骨架表面的细小颗粒，平衡状态由颗粒与介质骨架之间的静电力和孔隙液体流动产生的拖曳力决定。当孔隙液体流速加快时，增大的拖曳力使附着颗粒的移动力矩变大，从而脱离原始位置发生迁移。当附着颗粒含量减少时，孔隙通道尺寸变大并使渗透系数增大。俘获颗粒是指卡在小于自身尺寸的孔隙通道而无法移动的颗粒，此时孔隙液体的流动无法改变其状态，且俘获颗粒会阻挡孔隙通道，造成渗透系数减小。目前的研究通常采用胶体稳定理论来描述孔隙液体流动下的细小颗粒迁移状态，这里也采用该理论研究颗粒迁移影响。

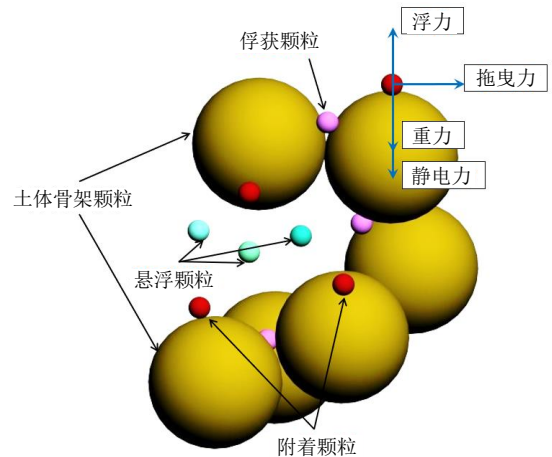


图2 低渗土体孔隙内细颗粒状态

Fig. 2 States of fine particles in the pores of low-permeability soil

根据 BEDRIKOVETSKY 等^[18]关于多孔介质渗透系数变化的研究，地层渗透系数 k 与介质孔隙内部的附着颗粒和俘获颗粒含量相关。由于附着颗粒通过改变液体流动通道大小来改变渗透系数，而俘获颗粒则通过堵塞孔隙通道降低渗透性能，故附着颗粒和俘获颗粒对渗透系数的影响通过不同的损伤系数体现，具体为：

$$k = \frac{k_{ini}}{1 + \beta_a s_a + \beta_t s_t} \quad (4)$$

式中: k_{ini} 为不含附着颗粒和俘获颗粒时的介质渗透系数; s_a 和 s_t 分别为介质孔隙内部的附着颗粒和俘获颗粒含量; β_a 和 β_t 分别为由附着颗粒和俘获颗粒引起的渗透特性损伤系数, 反映颗粒迁移效应对介质渗流特性的影响, 可通过颗粒迁移-沉积试验确定。参考 CUI 等^[19] 的研究, 首先在低流速下测试土样渗透系数, 然后逐级增大渗流水速, 观测并记录水压和流出水中的颗粒含量, 进而得到渗透系数和颗粒含量变化, 最后利用试验和式 (4) 确定损伤系数值。

在旋喷注药前, 土体内部的初始附着颗粒含量为 s_{a0} , 初始俘获颗粒含量假设为 0, 故初始渗透系数 k_0 的表达式可简化为:

$$k_0 = \frac{k_{ini}}{1 + \beta_a s_{a0}} \quad (5)$$

基于胶体稳定理论, 细小颗粒迁移与颗粒含量、孔隙液体流速和颗粒运移状态相关。在孔隙液体流动过程中, 脱离附着状态的细小颗粒运移速度常小于液体渗流速度^[20]。根据 ZHAI 等^[21] 基于胶体稳定理论的研究, 颗粒迁移局部连续方程为:

$$\phi \dot{s}_c + \lambda_s \alpha_{fp} |q_{fi}| s_c - \alpha_{fp} (s_c q_{fi})_i = -\dot{s}_a \quad (6)$$

式中: 等号左边为悬浮颗粒含量变化、迁移速度和梯度变化, 等号右边为由液体流动引起的附着颗粒含量变化; ϕ 为介质孔隙比, 这里忽略孔隙比 ϕ 在注药过程中的变化; s_c 为悬浮颗粒含量; \dot{s}_c 为悬浮颗粒含量随时间的变化率; λ_s 为土体过滤系数; α_{fp} 为颗粒迁移速度与孔隙液体速度的比值; q_{fi} 为孔隙液体流量张量 q_f 在 i 方向的分量, 可由达西定律得到; \dot{s}_a 代表介质孔隙内部的附着颗粒含量随时间的变化率。这里采用胶体稳定理论^[16] 描述附着颗粒含量与渗流速度的关系, 相关参数通过颗粒迁移-沉积试验确定。

在考虑分子扩散、机械弥散、降解和对流作用下, 修复溶液在污染土体内部的迁移方程为:

$$\phi \dot{c}_d = \phi \nabla \cdot (D_d \nabla c_d) - \nabla \cdot (c_d q_f) - \phi \lambda_d c_d - \rho_b \dot{c}_s \quad (7)$$

式中: c_d 为药剂溶解相的浓度; \dot{c}_d 为药剂溶解相浓度随时间的变化率; \dot{c}_s 为药剂吸附相浓度随时间的变化率; D_d 为弥散系数张量; λ_d 为药剂溶解相的一阶降解速率; ρ_b 为土体密度; $\nabla \cdot$ 代表散度。弥散系

数张量 D_d 与孔隙液体流量张量 q_f 的关系为:

$$D_d = \begin{bmatrix} D_m + \alpha_L \frac{q_{fx}^2}{|q_f|} & 0 \\ 0 & D_m + \alpha_L \frac{q_{fy}^2}{|q_f|} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: D_m 为分子扩散系数; α_L 为药剂弥散度。通过式 (7) 和式 (8) 发现, 药剂对流扩散、弥散系数及机械弥散均与渗流水速有关。达西定律表明, 渗透系数变化直接影响渗流水速大小, 因而将对药剂迁移造成影响。

采用一级可逆动力反应模型来描述药剂吸附状态, 药剂吸附相浓度变化为:

$$\rho_b \dot{c}_s = \beta_s \left(c_d - \frac{c_s}{k_d} \right) \quad (9)$$

式中: β_s 为药剂溶解相与吸附相之间的一级交换速率系数; k_d 为药剂吸附相分配系数; c_s 为药剂吸附相的浓度。

在高压旋喷数值模拟中, 喷口处药剂流量 q_{jet} 与喷嘴半径、注药压力和重度关系为^[5]:

$$q_{jet} = 0.921 \ 5\pi r_{nz}^2 \sqrt{\frac{2g(p_{jet} - p_b)}{\gamma}} \quad (10)$$

式中: r_{nz} 为喷嘴的半径; g 为重力加速度; p_{jet} 和 p_b 分别为注药压力和注药孔内部压力; γ 为药剂重度, 这里取 $1 \times 10^4 \text{ N/m}^3$ 。

在低渗透性地层力学响应的有限元模拟中, 注入孔内部采用恒定流量方式注入修复药剂。基于体积相等原则, 注药孔流入污染土体内部的等效流量 q_{inj} 与喷嘴处的喷射流量 q_{jet} 关系为:

$$q_{inj} = \frac{q_{jet}}{2\pi r_b H} \quad (11)$$

式中: r_b 为注入孔半径; H 为修复地层总高度。

这里采用的注药时间 t_{inj} 由污染土层治理高度和注药杆的提升速度决定, 计算公式为:

$$t_{inj} = \frac{H_{jet}}{v_{inj}} \times n_{jet} \quad (12)$$

式中: H_{jet} 为旋喷高度; v_{inj} 为喷嘴提升速度; n_{jet} 为喷射总次数。

上述模型中, 药剂密度假设为恒定, 忽略颗粒间的相互碰撞, 且本构方程未考虑塑性变形。因此, 模型和分析方法的适用条件为: 高压旋喷注药中污染土体处于弹性范围; 污染土体中的孔隙水流服从

达西定律；污染物对地层渗流和力学特性的影响可忽略；修复药剂可溶于水；地层内部温度相同，从而可忽略化学反应产生的热量对温度的影响；地层孔隙中的可移动细小颗粒含量较少，在迁移过程中可忽略颗粒间的碰撞影响；渗透系数变化由可迁移的细小颗粒含量决定；孔隙溶液密度不随修复药剂浓度变化，保持恒定。

2 药剂迁移规律数值模拟分析

基于有限元模拟程序，建立药剂迁移有限元分析模型，如图3所示，模型中部为圆形注药孔，外部为矩形边界。为保证计算结果的准确性，位移采用8节点四边形单元，孔压、颗粒含量和溶液浓度均采用4节点四边形单元模拟。计算网格在环向为40个单元，径向为21个单元，总单元数为672，节点数为2080。为提高数值计算结果的准确性，径向方向节点采用比例为1.4的等比分布，保证在注药孔周围布置更密的网格单元来获取孔周土体的精确响应。有限元数值模型边界条件如表1所示，注药孔周土体由于注药压力的作用会发生向外扩张，故采用自由位移边界。模型外部边界远远大于注药影响范围，位移可忽略不计，故在模型外部使用位置固定的位移边界。在高压旋喷注药过程中，注药孔内部压力 p_0 远小于注药压力 p_{jet} ，导致药剂喷射流量几乎不随时间不变，故注药孔内部边界采用恒定流量，同时模型外部采用Neumann边界。注入孔直径为150 mm，与钻杆直径相同。模型外部边界与孔中心距离（50 m）远大于修复药剂流动区域，进而避免数值模拟中的边界效应，时间步长采用10 s。

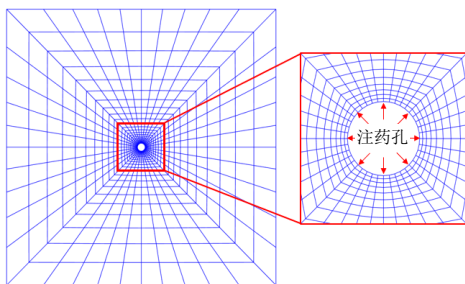


图3 药剂迁移有限元分析模型

Fig. 3 Finite element model of water-soluble agent migration

表1 有限元数值模型边界条件

Table 1 Boundary conditions of finite element model

类型	注药孔壁	外部边界
位移边界	自由位移	固定
水力学边界	恒定流量	Neumann

为验证计算模型的合理性和准确性，对张文杰等^[12]在广东省汕头市某垃圾填埋场开展的现场高压旋喷试验进行模拟。该试验场地10 m勘察深度内为砂土层（0~3 m）和垃圾填埋层（3~10 m），旋喷开始深度为地表以下3 m，在距离地表0.5 m处结束旋喷，注药压力为25 MPa。提升速度分为25 cm/min和40 cm/min，旋转速度为22 r/min，喷头直径为1.6 mm，旋喷次数有1次和2次。修复过程中采用浓度为0.2 mg/L的荧光素钠溶液作为示踪剂，旋喷后采用PE双覆膜覆盖，防止雨水入渗。5 d后在距离孔中心1 m范围内每隔10 cm取深度为1.5 m的土样并进行荧光素钠质量浓度测定，获取孔周荧光素钠浓度空间分布。模型计算参数如表2所示，土层的体积模量 K 和剪切模量 G 与该砂土孔隙比 ϕ 相关，利用下式计算得到^[22]：

$$\begin{cases} G = G_0 p_{at} \frac{(2.973 - \phi)^2}{1 + \phi} \sqrt{\frac{\bar{p}}{p_{at}}} \\ K = p_{at} \frac{1 + \phi}{\kappa} \sqrt{\frac{\bar{p}}{p_{at}}} \\ \kappa = 0.0064 \left(\frac{1 + \phi}{2.973 - \phi} \right)^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中： G_0 为初始剪切模量参数，这里取200； $\bar{p} = tr(\sigma)/3$ ，为平均压应力，其中 $tr(\sigma)$ 为土层应力张量 σ 的迹； p_{at} 为标准大气压力。与颗粒迁移相关的参数通过ZHAI等^[21]的研究结果确定，渗透和药剂迁移参数通过室内试验^[12]得到。

表2 模型计算参数

Table 2 Parameter values in finite element model

模型参数	取值
初始渗透系数 k_0	1.44×10^{-4} m/s
弹性模量 E	1.45×10^8 Pa
泊松比 ν	0.052
Biot系数 α	0.99
Biot模量 M	4.5×10^9 Pa
孔隙比 ϕ	0.414
附着颗粒含量 s_a	3×10^{-4}
渗透特性损伤系数 β_a	1 000
渗透特性损伤系数 β_t	0
土体过滤系数 λ_s	20 m^{-1}
颗粒迁移速度比 α_{fp}	0.1
注药孔处药剂浓度 c_d	0.2 mg/L

续表

模型参数	取值
分子扩散系数 D_m	$1.09 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
溶解相的一阶降解速率 λ_d	$7.0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$
溶解相与吸附相的 一级交换速率系数 β_s	0 s^{-1}
药剂弥散度 α_L	0.3 m
吸附相分配系数 k_d	$1.48 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$
土体密度 ρ_b	$1570 \text{ kg}/\text{m}^3$
注药时间 t_{inj}	6.25 min、10 min、20 min

对 3 种不同工况下的高压旋喷试验结果进行模拟: (1) 提升速度为 40 cm/min 和旋喷 1 次; (2) 提升速度为 25 cm/min 和旋喷 1 次; (3) 提升速度为 25 cm/min 和旋喷 2 次。计算所采用的参数如表 2 所示。根据式 (12) 可计算得到上述 3 种工况下的注药时间分别为 6.25 min、10 min 和 20 min, 模拟结果与现场试验数据对比如图 4 所示。注药孔周围地层在高速喷射溶液作用下形成混合区, 该区域药剂浓度衰减较慢。在远离注药孔的地层形成扩散区, 该区域药剂浓度随距离增加快速衰减。模拟结果与现场数据吻合较好, 说明该模型能准确预测不同高压旋喷注药时间下土体内部药剂的迁移分布规律。为进一步分析混合区和扩散区的形成原因, 对旋喷 10 min 后地层的渗透系数进行模拟, 结果如图 5 所示。结果表明孔周土体 (约 3 倍孔径) 渗透系数明显升高, 达到初始值的 1.3 倍。在高压旋喷注药过程中, 孔周土体孔隙内的细小颗粒在高速喷射药剂作用下产生远大于附着力矩的拖曳力矩, 使得颗粒脱离初始位置并迁移至更远位置。上述过程导致孔周土体孔隙体积扩大, 渗透系数升高, 使得更多药剂能流向远距离土体内部并扩大修复面积, 即图 4 中的混合区。而在距离注药孔较远区域, 药剂流动速度明显降低, 造成作用于附着颗粒的拖曳力较小, 大部分附着颗粒仍保持原有状态, 渗透系数无明显变化, 即图 4 中的扩散区。上述结果表明, 高压旋喷注射修复通过高速喷射药剂造成细小颗粒迁移, 扩大渗流通道, 提高渗透系数, 使得药剂流向更远区域, 因而高压旋喷注药工艺能显著提高低渗透性污染土层的渗透性能, 扩大修复面积。

参考张文杰等^[12]的研究, 将渗透系数明显扩大的区域称为混合区, 在混合区以外的渗透系数无明显变化的区域称为扩散区, 如图 5 所示。在混合区,

渗透系数增大使药剂溶液对流迁移速度大幅度升高, 并远大于分子扩散和机械弥散速率。较高的对流速度使药剂在混合区快速迁移, 减缓了药剂浓度的衰减幅度。因此, 混合区的药剂浓度随距离增大的降低速率较小。而在扩散区, 渗透系数相对于初始状态无明显升高, 同时孔隙溶液流动较慢, 导致对流迁移速度相对于分子扩散和机械弥散速度较小。由于分子扩散速度通常较小, 故在扩散区, 药剂迁移的主要方式为机械弥散, 药剂浓度随距离增加快速衰减。图 4 表明, 本文模型能较好地预测药剂浓度在混合区和扩散区不同的衰减模式, 这是由于该模型考虑了高压旋喷注药过程导致的地层渗透系数增大效应。

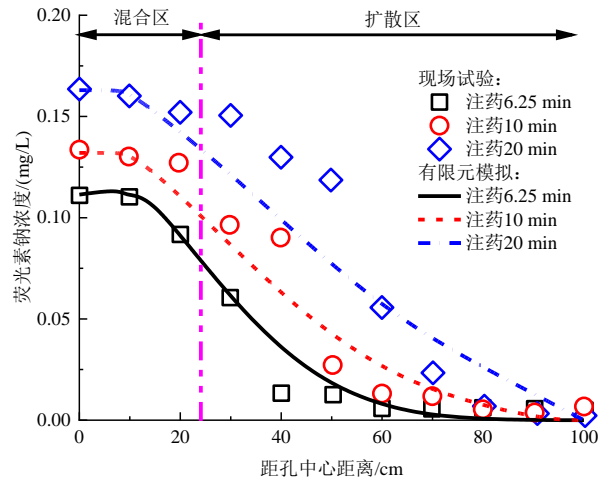


图 4 模拟结果与现场试验数据对比

Fig. 4 Comparison of filed test data and FEM results

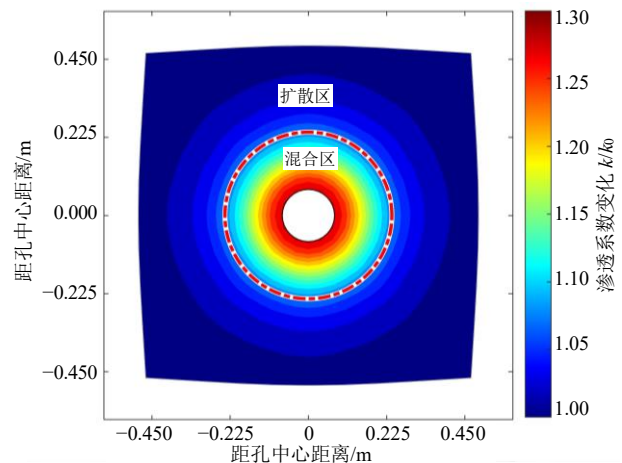


图 5 注入孔周围地层土体渗透系数变化

Fig. 5 Permeability variations around injection borehole

由于上述高压旋喷试验未进行颗粒迁移-沉积试验, 不能直接得到颗粒含量与损伤系数, 且污染场地局部的力学、渗流和化学特性存在不确定性, 导致模拟结果可能与现场情况存在差异。为提高数

值模拟结果的准确性,应在污染场地更多点位取样并开展颗粒迁移-沉积、渗流、力学和化学试验,从而获得更精准的模型参数,进而降低分析结果的不确定性。

3 高注药压力对修复效果的影响分析

为进一步分析高注药压力对高压旋喷修复效果的影响,基于本文模型对不同注药压力(5 MPa、10 MPa、15 MPa、20 MPa、25 MPa和30 MPa)下地层的渗透系数和药剂浓度变化进行模拟。参考陈贺等^[13]的研究,修复药剂为浓度20 g/L的高锰酸钾溶液, β_s 为 $2.672 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$,其他参数采用表2的数值,对10 min的高压注药和注药后5 d内药剂在地层内部的迁移过程进行数值模拟。

不同注药压力下注药结束5 d后的孔周药剂浓度分布如图6所示。随着注药压力升高,孔周土体内部药物浓度也随之增大,并且药剂迁移最远距离也增大。上述现象产生的原因是,较高的注药压力下喷嘴处的药剂流量增大,使孔周地层孔隙流速升高,产生更大的拖曳力,从而导致更多细小颗粒发生迁移和渗流通道进一步扩大,药剂能够迁移到更远的距离。为进一步验证上述结论,对高压旋喷注药过程中孔周地层土体渗透系数的变化进行模拟,结果如图7所示。结果表明,随着注药压力的升高,孔周土体渗透系数的提升幅度增大,同时提升范围也扩大。这是由于孔周溶液的渗流速度随着注药压力的升高而增大,造成迁移颗粒比例持续增大而导致的,因而提高注药压力有助于提高地层中的药剂浓度和迁移距离。

对比图6和图7的结果可知,在高注药压力($\geq 25 \text{ MPa}$)条件下,药剂浓度随注药压力升高(从25 MPa升高到30 MPa)的变化并不明显。这是因为在高注药压力($\geq 25 \text{ MPa}$)条件下,地层孔隙内大部分附着颗粒均随药剂溶液流动而迁移,渗透系数趋近于最大值。此时继续提高注药压力将不会使得渗透系数明显增大,只是增强了药剂迁移中的机械弥散效应。因此,在高注药压力条件下,药剂浓度和迁移距离并不会明显增大。

从图7可知,当注药压力较小($\leq 25 \text{ MPa}$)时,孔周渗透系数随注药压力升高而明显增大,这是由于此阶段附着颗粒随溶液流动而快速迁移。对于高注药压力($\geq 25 \text{ MPa}$),由注药压力提升而引起的附着颗粒迁移量较少,继续提高注药压力无法明显改变渗透系数和药剂浓度分布。考虑到提高注药压力

会使修复成本增加,因此建议注药压力宜设定为20~25 MPa,这与宋刚练等^[5]的建议相符。

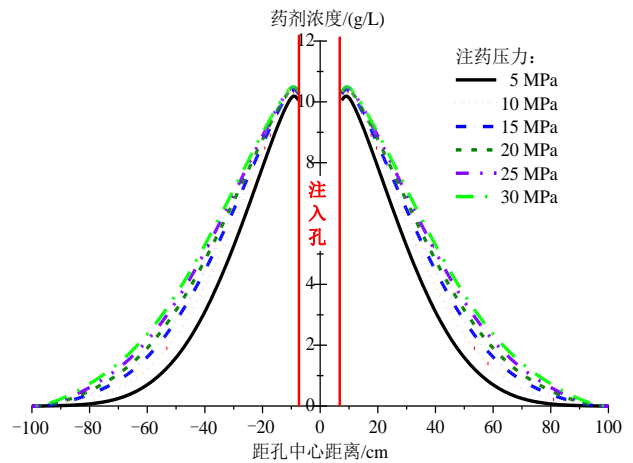


图6 孔周药剂浓度分布

Fig. 6 Distribution of drug concentration around borehole

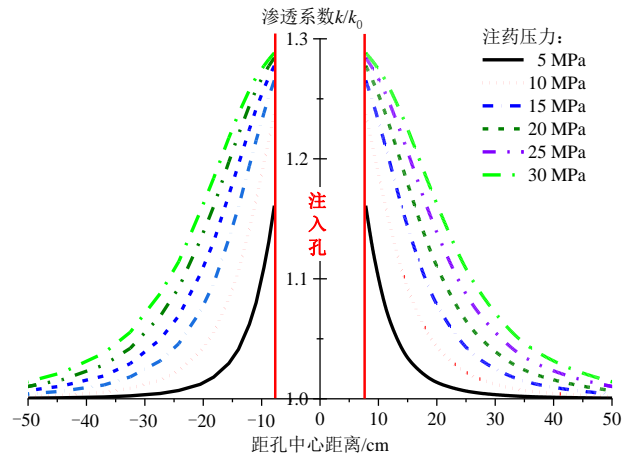


图7 孔周渗透系数分布

Fig. 7 Distribution of permeability coefficient around borehole

4 结论

基于胶体稳定性理论,建立了考虑渗透系数变化的污染土层药剂迁移数值分析模型。通过对现场高压旋喷注药修复模拟验证了该模型的准确性,并分析了不同注药压力下注入孔周围土层渗透系数和药剂浓度的变化规律,得出主要结论如下:

(1) 通过高压注药下的土层响应模拟表明,孔周土体在药剂的高速喷射作用下形成混合区和扩散区。混合区增高的渗透系数使对流作用增强,导致药剂浓度随距离增加衰减缓慢。扩散区渗透系数无明显变化,药剂主要靠弥散作用迁移,低渗透性使药剂浓度快速降低。

(2) 对不同注药压力下污染土层修复时的药剂迁移模拟表明,高注药压力能明显提高土层的渗

透系数,扩大修复面积。当注药压力为 30 MPa 时,距离孔中心 50 cm 范围内地层土体的渗透系数明显升高,最大值为初始值的 1.3 倍,使得修复药剂迁移至更远距离处。当注药压力高于 25 MPa 时,渗透系数和药剂迁移距离增大幅度较小,功效变低。因此,在高压旋喷注药修复中,应根据低渗透土层的性质调整注药压力。

参考文献

- [1] 骆永明,滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1137-1142.
LUO Yongming, TENG Ying. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1137-1142.
- [2] 李同燕,胡伟武,李文奇,等. 地下水污染修复技术研究进展[C]//2014 中国环境科学学会学术年会论文集(第五章). 2014: 4104-4110.
LI Tongyan, HU Weiwu, LI Wenqi, et al. Progress in groundwater remediation technologies[C]//Proceedings of the 2014 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences (Chapter 5). 2014: 4104-4110.
- [3] 姚德俊,岳昌盛,吕建国,等. 我国工业场地污染地下水修复技术研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(12): 45-49.
YAO Dejun, YUE Changsheng, LV Jianguo, et al. Research progress in remediation technology for contaminated groundwater in industrial sites in China[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(12): 45-49.
- [4] 郑瑾,张利宾,艾绍磊,等. 污染场地原位修复注入设备的研制和应用[J]. 中国设备工程, 2022(18): 11-13.
ZHENG Jin, ZHANG Libin, AI Shaolei, et al. Development and application of insufflation apparatus of field remediation in contaminated site[J]. China Plant Engineering, 2022(18): 11-13.
- [5] 宋刚练,牌卫卫,江建斌,等. 应用于污染场地原位修复的旋喷工艺研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(7): 85-89.
SONG Ganglian, PAI Weiwei, JIANG Jianbin, et al. Research on rotary jet grouting technology applied in situ remediation of contaminated site[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(7): 85-89.
- [6] 郇盼,张有祥,刘宏运,等. 潜孔冲击高压旋喷桩技术(DJP工法)及其在复杂地层中的应用[J]. 地基处理, 2020, 2(1): 71-77.
HUAN Pan, ZHANG Youxiang, LIU Hongyun, et al. Down-the-hole percussion high pressure jet grouting pile technique (DJP technique) and its application in complex layers[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(1): 71-77.
- [7] 宛召. 高压旋喷工艺在上海某污染场地修复中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
WAN Zhao. Study on the application of high pressure jet grouting technology in the remediation of a contaminated site in Shanghai[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [8] 高骏. 岩土施工技术在污染场地治理中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3): 75-79.
GAO Jun. Study on application of geotechnical construction technology in contaminated site management[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(3): 75-79.
- [9] 潘华林,钱和平,蔡泽恩,等. 高压旋喷桩加固高灵敏软土地基现场试验研究[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 71-75.
PAN Hualin, QIAN Heping, CAI Zeen, et al. Field test of high pressure jet grouting pile for strengthening highly sensitive soft soil foundation[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 71-75.
- [10] 章长松,崔航. 低渗透地层中高压旋喷和直压注射工艺修复三氯乙烯污染土壤对比分析——以上海某污染地块为例[J]. 上海国土资源, 2023, 44(4): 154-160.
ZHANG Changsong, CUI Hang. Comparative analysis of high pressure rotary spray and direct pressure injection technologies for remediation of trichloroethylene contaminated soil in low permeability formations: a case study of a polluted site in Shanghai[J]. Shanghai Land & Resources, 2023, 44(4): 154-160.
- [11] 武亚军,韩亚东,唐欣,等. 污染土壤高压旋喷修复药剂迁移影响因素的透明土试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 1305-1311.
WU Yajun, HAN Yadong, TANG Xin, et al. Transparent soil test on factors affecting transport of high-pressure jet remediation agents in contaminated soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(9): 1305-1311.
- [12] 张文杰,贾志伟,秘永宝. 高压旋喷修复中水溶性药剂径向迁移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(5): 1017-1023.
ZHANG Wenjie, JIA Zhiwei, MI Yongbao. Radial

- migration of water-soluble agents in high-pressure rotary jetting remediation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(5): 1017-1023.
- [13] 陈贺, 冯世进, 郑奇腾, 等. 低渗污染场地水力压裂强化修复药剂输运机制[J]. *环境工程学报*, 2024, 18(4): 937-945.
- CHEN He, FENG Shijin, ZHENG Qiteng, et al. Mechanisms of amendment transport in low-permeability contaminated sites enhanced by hydraulic fracturing[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2024, 18(4): 937-945.
- [14] WANG Y M, YU M H, BO Z K, et al. Effect of temperature on mineral reactions and fines migration during low-salinity water injection into Berea sandstone[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 202: 108482.
- [15] 周永潮, 许恒磊, 陈佳代, 等. 渗流作用下多孔介质内颗粒迁移与堵塞规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(2): 255-263.
- ZHOU Yongchao, XU Henglei, CHEN Jiadai, et al. Particle migration and clogging in porous media with seepage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(2): 255-263.
- [16] ZHAI X L, ATEFI-MONFARED K. Novel modeling of non-isothermal flow-induced fine particle migration in porous media based on the Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek theory[J]. *Transport in Porous Media*, 2024, 151: 1983-2015.
- [17] KANFAR M F, CHEN Z, RAHMAN S S. Effect of material anisotropy on time-dependent wellbore stability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 78: 36-45.
- [18] BEDRIKOVETSKY P, CARUSO N. Analytical model for fines migration during water injection[J]. *Transport in Porous Media*, 2014, 101(2): 161-189.
- [19] CUI X Z, LIU Q S, ZHANG C Y. Detachment characteristics of deposited particles in porous medium: experimentation and modeling[J]. *Transport in Porous Media*, 2017, 119(3): 633-647.
- [20] YOU Z, BADALYAN A, YANG Y, et al. Fines migration in geothermal reservoirs: laboratory and mathematical modelling[J]. *Geothermics*, 2019, 77: 344-367.
- [21] ZHAI X L, ATEFI-MONFARED K. Injection-induced poroelastic response of porous media containing fine particles, incorporating particle mobilization, transport, and straining[J]. *Transport in Porous Media*, 2021, 137(3): 629-650.
- [22] LI X S, DAFALIAS Y F, WANG Z L. State-dependant dilatancy in critical-state constitutive modelling of sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1999, 36(4): 599-611.