

DOI: 10.11779/CJGE20220264

高压旋喷修复中水溶性药剂径向迁移规律研究

张文杰, 贾志伟, 秘永宝
(上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

摘要: 高压旋喷修复是近年来出现的污染土原位修复技术, 目前对于旋喷药剂的迁移规律尚不明确, 工程实践缺乏可靠的理论指导。分别以荧光素钠及氯离子为示踪剂, 开展不同旋喷参数下的现场及室内高压旋喷试验, 并结合数值模拟研究了射流作用及对流-扩散作用下的药剂径向迁移规律。现场旋喷 5 d 后的结果表明, 药剂质量浓度沿径向逐渐降低, 分布受旋喷参数影响明显, 现场最佳旋喷参数组合为注入压力 25 MPa、旋转速度 22 r/min、提升速度 25 cm/min、喷嘴直径 1.6 mm、旋喷 2 次。室内旋喷试验和数值模拟表明, 射流作用下混合区内药剂质量浓度线性减小, 喷嘴附近相对质量浓度为 0.54~0.91; 混合区半径随注入压力、喷嘴直径及旋喷次数的增加而增大, 随旋转速度的增加而减小; 药剂质量浓度及径向均匀性与旋转速度、喷嘴直径及旋喷次数呈正相关, 对流-扩散作用下的药剂迁移使混合区内质量浓度降低, 扩散区质量浓度升高, 径向分布趋向均匀; 虽然孔压消散仅需短短几分钟, 但其引起的对流在约 30 d 内对药剂迁移起主导作用, 之后扩散变为主要作用。

关键词: 高压旋喷; 室内试验; 水溶性药剂; 径向迁移; 对流-扩散

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)05-1017-07

作者简介: 张文杰(1978—), 男, 博士, 教授, 从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: zhwjly@163.com。

Radial migration of water-soluble agents in high-pressure rotary jetting remediation

ZHANG Wenjie, JIA Zhiwei, MI Yongbao

(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The high-pressure rotary jetting (HPRJ) is a new technology for the in-situ remediation of contaminated soils. However, the radial migration of water-soluble remediation agents in HPRJ is still not clear, resulting in a lack of reliable theoretical guidance in engineering practice. The laboratory and in-situ HPRJ tests as well as numerical simulations are performed using the sodium chloride and fluorescein sodium as the tracers to investigate the radial migration and distribution of agents under the effects of jet and advection-diffusion. The results of the in-situ tests after 5 d show that the agent concentration decreases along the radial direction and is significantly affected by the rotary jetting parameters. The optimum combination of the rotary jetting parameters is an injection pressure of 25 MPa, a lifting speed of 25 cm/min, a rotation speed of 22 r/min, a nozzle diameter of 1.6 mm and jetting of twice. The laboratory tests and the numerical simulations show that concentration of the agent in the mixing zone decreases linearly, with a relative concentration of 0.54 to 0.91 near the nozzle. The radius of the mixing zone increases with the increase in the nozzle diameter, injection pressure and the number of jetting times, and decreases with the increasing rotation speed. The agent concentration and radial uniformity are correlated positively with the rotation speed, nozzle diameter and the number of jetting times. The migration of the agent due to advection and diffusion reduces the agent in the mixing zone and increases the agent in the diffusion zone, and homogenizes the radial agent distribution. The advection only lasts for a few minutes, however, it dominates the agent migration in the first 30 d, and thereafter the diffusion becomes more important.

Key words: high-pressure rotary jetting; laboratory test; water-soluble agent; radial migration; advection-diffusion

0 引言

伴随着工、农业现代化进程, 中国土壤污染形势日益严峻。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示, 中国土壤污染点位超标率高达 16.1%。土中许多污染物均具有高毒性、持久性和“三致”(致突变、致

癌和致畸)等作用特点, 对生态环境和人类健康危害极大^[1], 污染地块再次开发利用前, 必须进行污染风险管控和修复。原位化学修复是常用的污染土修复技

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772300)

收稿日期: 2022-03-28

术,按照药剂施加方式,可分为直压式注射、注射井和高压旋喷注药等^[2]。其中高压旋喷技术因修复深度深、适用土层广、施工效率高等优点,具有广阔应用前景^[3-4]。已有工程实践表明^[5],该修复技术对苯、氯苯、对/邻硝基氯化苯、苯胺、多环芳烃、石油烃及六价铬的修复效果显著,相对水力压裂、注入井等注药技术,解决了注入压力不足、注射效率低、影响半径小等问题。在实际应用中,钻杆钻至预定修复深度,随后水溶性修复药剂(下文简称“药剂”)经高压泵加压后从喷嘴以高压射流形式喷出,并随钻杆螺旋上升,在污染土层中形成圆柱形注药区域。高压旋喷的修复效果与注药区域内药剂分布密切相关,只有当各处的药剂达到一定质量浓度时才能保证修复效果。因此,研究高压旋喷注药的药剂径向迁移规律,对于科学应用这一修复技术具有重要指导意义。

高压旋喷最初被用于地基加固,近年来作为注药手段被引入污染土修复领域。目前对于高压旋喷水泥桩的研究已较为成熟,高压旋喷通过高压射流的卷吸、掺混等水动力作用(下文简称“射流作用”)破坏土体初始结构,使水泥浆与土粒混合并固化为水泥土桩。成桩直径关系到工程的经济效益,已引起广泛关注,如 Modoni 等^[6]根据淹没射流及土体强度理论提出了预测桩径的侵蚀模型; Shibasaki^[7]研究发现,注入压力、旋转速度、提升速度及喷嘴直径等旋喷参数对桩径有影响,在具体应用中需要寻求最佳旋喷参数组合;王志丰等^[8]总结了已有模型,建立了桩径与旋喷参数及土性条件的关系公式。然而,旋喷药剂与水泥浆存在明显差异:①由于药剂的黏滞度远小于水泥浆,导致射流作用增强,药剂分布范围增大^[9];②由于药剂是水溶性的、且无水硬性,容易受物理驱力因素(水力梯度、质量浓度梯度等)影响而发生迁移,引起分布范围的进一步增加。由此看来,高压旋喷修复技术不能简单地套用旋喷水泥浆的理论规律,尚需对其进行针对性研究。宋刚练等^[10]、宛召^[11]以水溶性环保染料为示踪剂进行现场试验,从药剂分布范围最大化的角度对旋喷参数组合进行了设计;董万涛^[12]通过高压旋喷复合氧化剂修复石油污染场地,研究了不同旋喷参数组合下的药剂分布范围。现有试验研究一般仅根据示踪剂颜色深浅对药剂混合范围和效果进行定性描述,未量化分析药剂的质量浓度分布。另外,上述研究重点关注了射流作用,而实际上,除射流作用外,对流-扩散作用也是影响药剂迁移的重要因素。高压旋喷药剂会引起注入点周围的孔隙水压力(下文简称“孔压”)升高^[13],旋喷结束后孔压逐渐消散,药剂在水力梯度驱动下随孔隙水流动而发生对流迁移;另外,

药剂在径向质量浓度梯度作用下扩散迁移,引起药剂质量浓度变化,进而影响修复效果。然而,目前尚未有同时考虑射流作用及对流-扩散作用的高压旋喷药剂径向迁移规律研究,致使该领域理论研究滞后于生产实践。

本文以荧光素钠为示踪剂进行现场高压旋喷试验,通过开挖测得的荧光素钠质量浓度分布确定最佳现场旋喷参数;以氯离子(Cl^-)为示踪剂,通过自制试验装置进行室内高压旋喷试验,测得了孔压和 Cl^- 质量浓度随时间的变化过程,将高压旋喷影响区域分为混合区和扩散区,研究了旋喷参数对混合区半径和 Cl^- 质量浓度的影响规律;对室内旋喷试验进行数值模拟,揭示了对流和扩散对药剂迁移的作用规律。

1 试验场地及材料

现场试验地点位于广东省汕头市某垃圾填埋场内,场地 10 m 勘察深度内,自上而下分别为砂土层(0~3 m)、垃圾填埋层(3~10 m),地下水埋深 1.2 m,故本试验旋喷深度确定为 3 m。参照《土工试验方法标准:GB/T 50123—2019》,测得砂土相对质量密度为 2.68,干密度为 1.57 g/cm^3 ,孔隙率为 0.414,颗粒级配如图 1 所示。室内试验所用土样取自现场砂土层,取样深度为 2 m,土中含有一定量 Cl^- ,为消除背景 Cl^- 干扰,土样用去离子水清洗,直至 Cl^- 的出流质量浓度低于 30 mg/L ^[14],然后烘干待用。

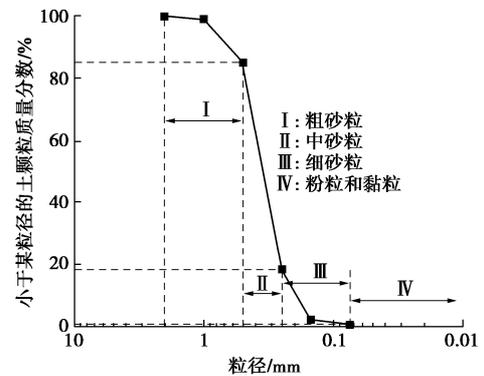


图 1 试验砂土的颗粒级配

Fig. 1 Grain-size distribution curve of tested soil

2 现场高压旋喷试验

为了获得现场常用旋喷参数下药剂的分布规律,以 0.2 mg/L 的荧光素钠溶液为示踪剂,开展不同旋喷参数下的现场高压旋喷试验。高压旋喷修复工程中常用的旋喷参数^[10-11]:注入压力 20~30 MPa,提升速度 15~40 cm/min,转速 15~25 r/min、喷嘴直径 1.5~2.5 mm,旋喷 1~2 次,故本试验设计了 5 组常用旋喷参数(表 1)。

表 1 现场试验方案

Table 1 Schemes of in-situ tests

编号	注入压力/MPa	提升速度/(cm·min ⁻¹)	旋转速度/(r·min ⁻¹)	喷嘴直径/mm	旋喷次数
F ₁	25	25		2.0	1
F ₂	25	40		1.6	1
F ₃	25	25	22	1.6	2
F ₄	25	25		1.6	1
F ₅	30	25		1.6	1

F₁~F₅的旋喷孔位一字排开, 相邻孔位间距 3 m。在有刻度的药剂桶中装荧光素钠溶液, 并通过导管与 90TJ3 型高压泵连接。操作 MGJ-50 型钻机对准孔位, 并确保钻杆垂直度偏差不超过 1.5%。先将钻杆钻至 3 m 的预定深度, 然后启动高压泵并提升、旋转钻杆, 直至钻杆提升至地表以下 0.5 m 时结束旋喷。之后用聚乙烯防水布 (PE 双覆膜, 120 g/m²) 覆盖场地进行养护, 防止雨水入渗干扰药剂质量浓度分布。5 d 后, 开挖竖向剖面 (过孔位中心), 由于砂性土层开挖过深会引起侧壁坍塌, 故开挖深度为 1.5 m。在距孔位中心 1 m 范围内沿径向每隔 10 cm 取土样。土样孔隙水中荧光素钠质量浓度 C 按如下步骤测定: 首先, 将土样烘干, 烘干前后的质量差记为 Δm ; 其次, 在干土样中加入 150 mL 去离子水, 震荡 12 h 得到悬浊液, 然后在 3500 r/min 转速下离心 30 min, 取上清液用荧光检测仪 (CHSZ-II) 测得荧光素钠质量浓度 C_{sup} , 则有

$$C = C_{sup} \frac{\rho_w V}{\Delta m} \quad (1)$$

式中: ρ_w 为试验温度下水的密度 (g/cm³); V 为加入的去离子水的体积 (mL)。

3 室内高压旋喷试验及数值模拟

3.1 室内高压旋喷试验

为研究不同旋喷参数 (注入压力、旋转速度、喷嘴直径、旋喷次数) 下的射流作用及对流-扩散作用对药剂径向质量浓度分布的影响, 以 CI 为示踪剂 (使用 0.1 mol/L 氯化钠溶液), 进行 10 组室内高压旋喷试验, 相关参数列于表 2。考虑到室内操作安全, 最大注入压力为 15 MPa。

表 2 室内试验方案

Table 2 Schemes of laboratory tests

编号	注入压力/MPa	提升速度/(cm·min ⁻¹)	旋转速度/(r·min ⁻¹)	喷嘴直径/mm	旋喷次数
L ₁	5		30	1.6	1
L ₂	5		30	1.6	2
L ₃	10		30	1.6	1
L ₄	10		30	1.6	2
L ₅	15	30	30	1.6	1
L ₆	15		15	1.6	1
L ₇	15		10	1.6	1
L ₈	15		30	1.8	1
L ₉	15		30	2.0	1
L ₁₀	15		30	2.0	2

自制室内高压旋喷模拟试验装置 (图 2), 该装置由土样桶、钻杆控制系统、高压喷射系统和孔压监测系统组成。土样桶内径 1.2 m, 高 0.6 m, 内壁设 7.5 cm 厚排水层 (土工布、土工格栅和碎石层)。钻杆直径 5 cm, 由两个 F1500RC 型变频电机驱动, 其中一个通过滚珠螺母及螺杆实现其升降, 另一个以 LADEE 型减速器控制其旋转, 提升、旋转速度可按试验需求精确调节。孔压监测系统包含一个 DH-5921 型数据采集器和两个直径 2 cm、厚 1 cm 的 Y-3000 型微型渗压计 (精度 0.05%F·S), 用于量测旋喷后孔压变化。

在旋喷前的准备阶段, 钻杆降低至起始位置 (喷嘴离桶底 10 cm), 将干砂分层 (每 5 cm) 填筑至土样桶内并压实均匀, 填筑高度 50 cm, 干密度控制在 1.57 g/cm³, 与现场一致。微型渗压计埋深 25 cm, 布置在与喷嘴距离 0, 50 cm 处。填筑完成后, 从底部进水口引入去离子水并从顶部排水口 (与砂土面齐平) 排出, 将土饱和。

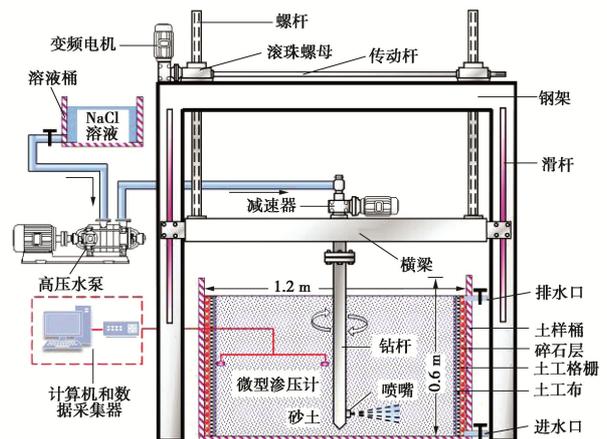


图 2 室内高压旋喷试验装置示意图

Fig. 2 Sketch diagram of laboratory test apparatus

饱和后按表 2 中参数进行旋喷, 每组旋喷时长 1 min, 期间只打开顶部排水口, 砂土始终处于饱和状态。旋喷结束后的第 0, 第 30 分钟及第 5 天, 用直径 2 cm、长 60 cm 的亚克力管在 25 cm 深度处沿径向每隔 5 cm 进行取样, 取样点位分布示于图 3。取样后, 亚克力管立即放回取样孔中, 避免对孔压消散及 CI 迁移产生干扰。土样孔隙水中 CI 质量浓度 C_1 的测定与前述荧光素钠的测定方法基本相同, 不同之处在于 CI 质量浓度采用 CI 质量浓度计 (Bante 931) 测量。

3.2 对流-扩散作用下 CI 径向迁移数值模拟

为研究 CI 在长期 (本文 90 d) 对流-扩散作用下的径向迁移分布规律, 对上述室内试验进行了数值模拟。针对埋设传感器和取样深度处的砂土截面, 建立了二维平面数值模型 (图 4), 该模型为内径 5 cm、外径 105 cm 的环形区域, 并被划分为多个宽度为 5 cm

(对应取样间距)的环形单元,以便于在区域内设置沿径向变化的初始质量浓度条件。

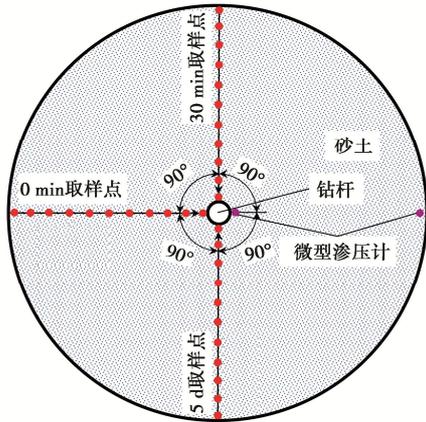


图3 取样点位分布图

Fig. 3 Distribution of sampling positions

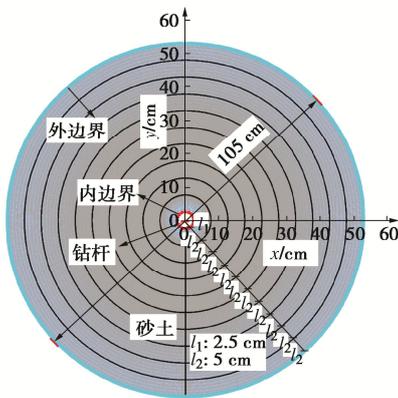


图4 二维平面数值模型

Fig. 4 2D planar numerical model

考虑模型区域内的对流-扩散作用,使用二维溶质迁移偏微分方程来描述CI在砂土中的迁移过程^[15]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} (v_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y C) \right] = R_d \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

式中: D_x, D_y 分别为沿 x, y 方向的水动力弥散系数 (m^2/s), v_x, v_y 分别为孔隙水沿 x, y 方向的流速 (m/s), t 为时间 (s), R_d 为与吸附有关的阻滞因子。对于惰性离子 Cl^- , R_d 等于 1^[16]。特定方向的水动力弥散系数 D 可以表示为^[16]

$$D = D^* + \alpha v \quad (3)$$

式中: D^* 为有效扩散系数 (m^2/s), α 为弥散度 (m)。

根据孔压消散状况,旋喷后CI迁移可分为对流、扩散两个阶段。在对流阶段,孔压沿径向逐渐消散,水力梯度驱动孔隙水流动,CI随之发生径向对流迁移。以旋喷后 0 min 时的CI质量浓度实测值作为初

始质量浓度,孔压实测值作为内、外水力边界条件,并分别采用零溶质通量边界、自由出流边界作为内、外边界的质量浓度边界条件。在扩散阶段,孔压已完全消散,CI只通过扩散迁移,以对流阶段的模拟结果(质量浓度)为初始条件,对径向扩散过程进行模拟。

CI迁移分析的模型参数:孔隙率为 0.414,通过常水头法测得渗透系数 $1.44 \times 10^{-4} m/s$,溶液池法测得有效扩散系数为 $1.09 \times 10^{-9} m^2/s$,根据文献[17]本文试验尺度下的弥散度取 0.1 m。

4 结果与分析

4.1 现场高压旋喷试验的荧光素钠质量浓度分布

现场试验得到的孔隙水中荧光素钠质量浓度如图5所示,总体上随着离喷嘴距离增大,质量浓度均逐渐减小,但不同旋喷参数下的径向质量浓度分布有明显差异:首先, $F_1 \sim F_5$ 孔位中心质量浓度在 0.11~0.164 mg/L,相对质量浓度为 0.55~0.82 (药剂罐中质量浓度为 0.2 mg/L),且 $F_3 > F_1 > F_5 > F_4 > F_2$;其次,荧光素钠分布范围不同,0.25 倍相对质量浓度对应的半径 $x_{0.25}$ 分别为 56, 32, 61, 46, 49 cm (考虑相邻旋喷两孔质量浓度叠加后,此半径处相对质量浓度 0.5,可据此确定旋喷孔间距)。对比 F_4 和 F_1 可见,喷嘴直径从 1.6 增至 2.0 mm, $x_{0.25}$ 增加了 21.7%,药剂质量浓度径向分布更均匀;对比 F_5 和 F_4 可见,旋喷压力从 25 MPa 增至 30 MPa,药剂径向分布接近,说明旋喷压力不会明显影响药剂分布,且现场 30 MPa 下返浆明显;由于提升速度增加, F_2 的旋喷时间少于 F_4 ,特定位置的砂土被射流侵蚀的时间缩短,导致 $x_{0.25}$ 降低,药剂径向分布效果变差; F_4 的旋喷次数增加至 2 次,相比 F_3 , $x_{0.25}$ 增加了 32.6%,药剂径向分布更均匀。综合分析表明, F_3 的质量浓度和作用距离最大,从而确定适用于该场地的最佳旋喷参数组合,即注入压力 25 MPa、转速 22 r/min、提升速度 25 cm/min、喷嘴直径 1.6 mm、旋喷 2 次。

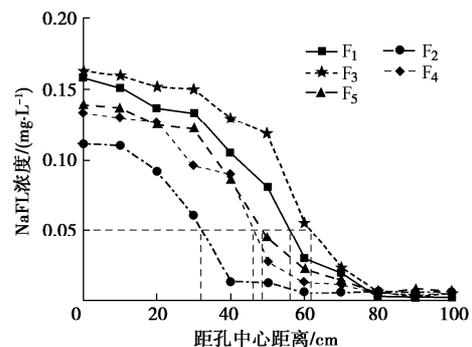


图5 旋喷后 5 d 的荧光素钠质量浓度径向分布

Fig. 5 Radial distribution of fluorescein sodium at 5 d

4.2 旋喷参数对射流作用下 CI 质量浓度分布的影响

室内试验旋喷结束时刻（此时尚未发生对流和扩散，仅有射流作用）的 CI 径向分布如图 6 所示，可见不同旋喷参数下 CI 质量浓度均先沿径向线性降低（ $R^2>0.922$ ），随后在图中虚线处骤降至 0。由此可知，射流前端侵蚀面最终只到达虚线所示位置处，虚线内为射流作用区域，本文称为混合区，此区域内在射流作用下药剂产生迁移、土颗粒位置变动，之外的区域为扩散区，即在后期对流-扩散作用下药剂向外迁移的区域。由图可得表征混合区内 CI 径向分布特性的参数：混合区半径 x_m 、喷嘴处药剂质量浓度 $C_{1,x=0}$ 及其衰减梯度 $\Delta C_1 / \Delta x$ （即图 6 中拟合直线斜率的绝对值），列入表 3。不同旋喷参数下，其变化范围分别为 15~35 cm，1918~3230 mg/L（相对质量浓度 $C'_{1,x=0}$ 为 0.54~0.91），17.14~45.88 mg/L/cm，说明旋喷参数对药剂质量浓度分布有重要影响，下面详述影响规律。

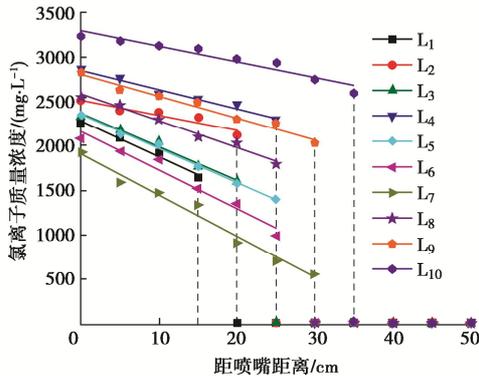


图 6 旋喷后 0 min 时的 CI 质量浓度径向分布

Fig. 6 Radial distribution of CI at 0 min after rotary jetting

表 3 CI 径向分布相关参数

Table 3 Parameters for radial distribution of CI

编号	x_m / cm	$C_{1,x=0} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$C'_{1,x=0}$	$\frac{\Delta C_1}{\Delta x} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$
L ₁	15	2249	0.63	39.80
L ₂	20	2510	0.71	17.14
L ₃	20	2324	0.65	37.31
L ₄	25	2849	0.80	21.71
L ₅	25	2346	0.66	38.17
L ₆	25	2075	0.58	42.85
L ₇	30	1918	0.54	45.88
L ₈	25	2550	0.72	30.22
L ₉	30	2822	0.79	24.49
L ₁₀	35	3230	0.91	17.40

表 3 中 L₁, L₃, L₅ 对应的 x_m 分别为 15, 20, 25 cm，说明注入压力增加后射流速度增加，从而可增大药剂分布范围。虽然注入压力增大后注入的氯化钠溶液增加，但 $C'_{1,x=0}$ 和 $\Delta C_1 / \Delta x$ 几乎没有增加，说明射流作用下药剂质量浓度径向分布与注入压力无关，这主要是因为混合区范围增大抵消了注入药剂增加的影响

(L₁, L₃, L₅ 注入的药剂质量之比约为 1 : 2 : 3，与半径 15, 20, 25 cm 对应的作用面积之比接近)。

对比表 3 中 L₅, L₆, L₇ 可见， x_m 随旋转速度增大而降低，这是因为旋转越快，喷嘴的水平切向速度越高，特定位置的砂土被侵蚀的时间就越短。同时，由于同样多的药剂被注入到更小的混合区内， $C'_{1,x=0}$ 从 0.54 增至 0.66， $\Delta C_1 / \Delta x$ 从 45.88 mg/L/cm 降至 38.17 mg/L/cm，表明旋转速度越快，药剂在混合区内的质量浓度越高且沿径向分布更加均匀。

对比 L₅, L₈, L₉ 可见，由于喷嘴直径的增加，导致射流宽度增加、射流侵蚀能力加强， x_m 增大。同时，由于注入的药剂增多， $C'_{1,x=0}$ 从 0.66 增至 0.79， $\Delta C_1 / \Delta x$ 从 38.17 mg/L/cm 降至 24.49 mg/L/cm，说明大直径喷嘴可提高药剂质量浓度及其径向均匀性。

旋喷一次 (L₁, L₃, L₉) 与旋喷两次 (L₂, L₄, L₁₀) 对比发现，随旋喷次数增至 2 次， x_m 平均增加 23%，这主要是由于首次旋喷降低了砂土的抗侵蚀能力，且注入量增加，导致射流作用到达更远的位置。此外， $C'_{1,x=0}$ 平均增加 17.4%， $\Delta C_1 / \Delta x$ 平均减少 44.6%，说明增加旋喷次数可明显提高药剂质量浓度和均匀性。

4.3 对流-扩散作用下的 CI 径向迁移

旋喷结束后测得的与喷嘴距离 0, 50 cm 处的孔压消散过程如图 7 所示，其中各组 50 cm 处的孔压均保持 2.5 kPa 不变（与埋深 25 cm 对应）；而 0 cm 处的孔压在 130~370 s 内逐渐消散至静水压力 2.5 kPa。上述结果表明，旋喷后 CI 对流迁移阶段时长极短，仅有 130~370 s；孔压消散完毕后，水头差消失，进入纯扩散阶段。将图 7 中喷嘴处和 50 cm 处的实测孔压，设定为对流-扩散数值模型中的水力边界条件，即随时间变化的孔压边界。

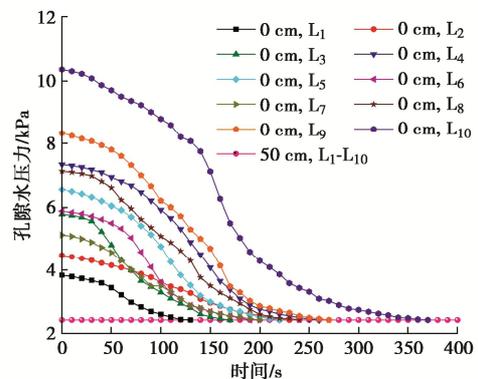


图 7 各组试验的孔压消散过程

Fig. 7 Dissipation of pore pressure during various tests

旋喷后测得的第 0, 第 30 分钟及第 5 天时的 CI 质量浓度示于图 8（图中仅显示了 L₁ 和 L₁₀ 的结果），可见混合区内 CI 质量浓度随时间逐渐降低，而扩散区

内逐渐增加, 径向分布趋于均匀, 说明混合区的 Cl^- 逐渐迁移至扩散区。现场荧光素钠质量浓度曲线形状与图 8 中 5 d 时的 Cl^- 质量浓度曲线基本一致, 而非图 6 的线性形式, 说明现场高压旋喷药剂分布受射流作用和对流-扩散的共同影响。图 8 还给出了数值模拟得到的 Cl^- 径向质量浓度分布, 其中第 5 天的模拟与实测质量浓度分布基本一致, 验证了对流-扩散数值模拟的准确性, 而对流阶段结束时 (130~370 s) 的模拟与第 30 分钟的实测结果很接近, 说明短时间内的扩散作用可以忽略。利用该模型预测了 30, 90 d 后的 Cl^- 质量浓度分布, 可见喷嘴附近质量浓度逐渐降低, 混合区内的 Cl^- 进一步迁移至扩散区, 径向分布更加均匀。

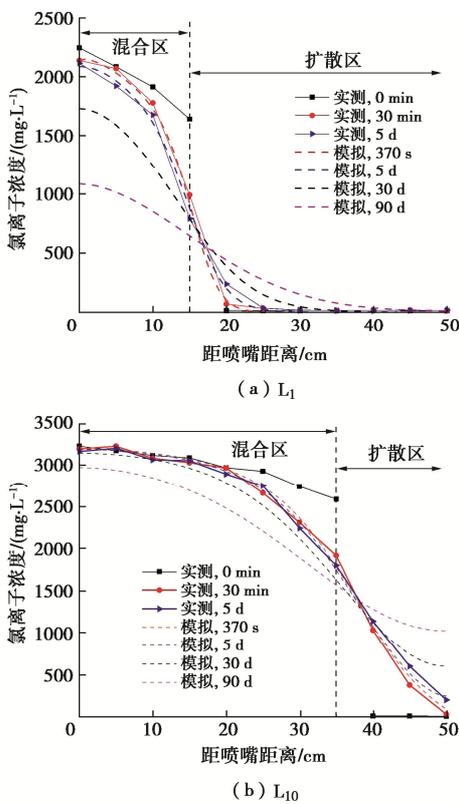


图 8 旋喷后不同时刻的 Cl^- 质量浓度实测值与模拟值

Fig. 8 Measured and simulated Cl^- concentrations at different time after rotary jetting

将孔压消散过程中 (130~370 s) 的溶质迁移归因于对流作用 (即忽略此过程中的扩散作用)、之后的归因于扩散作用, 通过对不同时刻的质量浓度曲线沿旋喷半径 (面积) 进行积分, 可进一步量化分析对流和扩散对药剂迁移的影响。如对试验 L_1 , 由混合区 0, 130 s 质量浓度曲线积分之间的差可求出因对流作用而迁移到扩散区的 Cl^- 量, 而 5, 30, 90 d 的曲线与 130 s 的曲线积分之差则对应各时刻由扩散而迁移的 Cl^- 。图 9 给出了各试验中 90 d 内对流和扩散共同作用下从混合区迁移至扩散区的 Cl^- 占旋喷注入总量的百分比

P_{AD} , 以及 5, 30, 90 d 时对流与扩散作用的比 A/D 。 P_{AD} 值表明, 90 d 内 22.59%~55.77% 的 Cl^- 从混合区迁移到扩散区, 表明高压旋喷之后的对流-扩散作用对药剂径向质量浓度分布有显著影响。 A/D 值表明, 旋喷后 5 d 时通过对流迁移的 Cl^- 是通过扩散迁移的 2.85~6.92 倍, 该比值随时间逐渐降低, 30 d 时 A/D 值约降至 1, 90 d 后降至约 0.5, 说明在初始阶段 (30 d 内) 对流在药剂迁移中起主导作用, 而之后扩散作用逐渐成为更重要的因素。

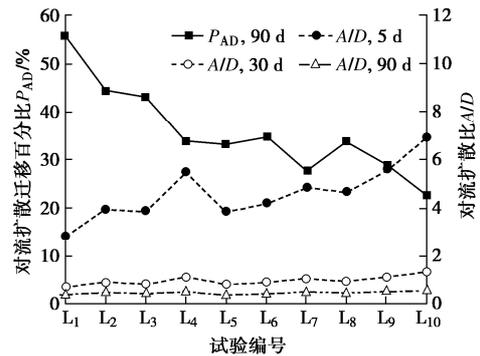


图 9 不同时刻的 Cl^- 对流扩散迁移比例及百分比

Fig. 9 Advection to diffusion ratios and percentages of Cl^- transport at different time

5 结 论

本文分别以荧光素钠和 Cl^- 为示踪剂, 进行不同旋喷参数的现场及室内高压旋喷试验, 并结合数值模拟量化研究了射流作用及对流-扩散作用下的药剂径向迁移规律, 得出 3 点结论。

(1) 现场高压旋喷试验表明, 在射流和对流-扩散共同作用下药剂质量浓度沿径向减小, 其分布受旋喷参数影响明显; 注入压力 25 MPa, 转速 22 r/min, 提升速度 25 cm/min、喷嘴直径 1.6 mm 及旋喷 2 次下的注药效果最佳, 旋喷 5 d 后药剂相对质量浓度在喷嘴附近可达 0.82, 在距离喷嘴 61 cm 处降至 0.25。

(2) 射流作用下, 药剂质量浓度在混合区沿径向呈线性减小, 喷嘴附近相对质量浓度为 0.54~0.91; 混合区半径随注入压力、喷嘴直径及旋喷次数的增加而增大, 随旋转速度的增加而减小; 药剂质量浓度及径向均匀性与旋转速度、喷嘴直径及旋喷次数正相关。

(3) 旋喷后的对流-扩散作用对药剂质量浓度径向分布有显著影响, 90 d 内因对流-扩散作用从混合区迁移到扩散区的药剂占注入总量的 22.59%~55.77%; 旋喷后的孔压消散过程仅有短短几分钟, 但孔压消散引起的药剂对流迁移在短期 (30 d 内) 的药剂迁移中占主导, 之后更长时间内扩散逐渐变为主要作用。

参考文献:

- [1] GUO X Z, ZHANG W J, YU H S, et al. Reduction, stabilization, and solidification of Cr(VI) in contaminated soils with a sustainable by-product-based binder[J]. *Chemosphere*, 2022, **307**: 135902.
- [2] 孙铁珩, 李培军, 周启星. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (SUN Tieheng, LI Peijun, ZHOU Qixing. Formation Mechanism and Remediation Technology of Soil Pollution[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))
- [3] XIA W Y, DU Y J, LI F S, et al. In-situ solidification/stabilization of heavy metals contaminated site soil using a dry jet mixing method and new hydroxyapatite based binder[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **369**: 353-361.
- [4] 夏威夷, 杜延军, 冯亚松, 等. 重金属污染场地原位固化稳定化修复试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(11): 2839-2849. (XIA Weiyi, DU Yanjun, FENG Yasong, et al. Remediation of a heavy metal contaminated site: in situ solidification and stabilization[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(11): 2839-2849. (in Chinese))
- [5] 杨乐巍, 张晓斌, 李书鹏, 等. 土壤及地下水原位注入-高压旋喷注射修复技术工程应用案例分析[J]. *环境工程*, 2018, **36**(12): 48-53, 118. (YANG Yuewei, ZHANG Xiaobin, LI Shupeng, et al. Case analysis on engineering application of soil and groundwater in situ injection-high pressure rotary jet injection remediation[J]. *Environmental Engineering*, 2018, **36**(12): 48-53, 118. (in Chinese))
- [6] MODONI G, CROCE P, MONGIOVÌ L. Theoretical modelling of jet grouting[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(5): 335-347.
- [7] SHIBAZAKI M. State of practice of jet grouting[M]// *Grouting and Ground Treatment*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2003: 198-217.
- [8] 王志丰, 沈水龙, 许焯霜. 基于圆形断面自由紊动射流理论的旋喷桩直径计算方法[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(10): 1957-1960. (WANG Zhifeng, SHEN Shuilong, XU Yeshuang. An approach to calculate diameter of jet-grouted columns based on turbulent flow theory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(10): 1957-1960. (in Chinese))
- [9] SHEN S L, WANG Z F, YANG J, et al. Generalized approach for prediction of jet grout column diameter[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(12): 2060-2069.
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 董万涛. 新型复合氧化剂在石油污染场地修复的应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021. (DONG Wantao. Research on Application of New Complex Oxidants in Petroleum Contaminated Site[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021. (in Chinese))
- [13] WANG Z F, SHEN S L, MODONI G, et al. Excess pore water pressure caused by the installation of jet grouting columns in clay[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, **125**: 103667.
- [14] ZHANG W J, YUAN S S. Characterizing preferential flow in landfilled municipal solid waste[J]. *Waste Management*. 2019, **84**: 20-28.
- [15] XIE H J, JIANG Y S, ZHANG C H, et al. An analytical model for volatile organic compound transport through a composite liner consisting of a geomembrane, a GCL, and a soil liner[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(4): 2824-2836.
- [16] SHACKELFORD C D. The ISSMGE Kerry Rowe Lecture: the role of diffusion in environmental geotechnics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, **51**(11): 1219-1242.
- [17] FETTER C W, BOVING T, KREAMER D. Contaminant Hydrogeology[M]. Long Grove: Waveland Press, 2017.