

富水砂层盾构渣土加压渗透特性与喷涌临界条件研究

余金^{1,2}, 朱碧堂^{*1,3}, 罗如平^{1,3}

(1. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 华东交通大学, 330013, 江西, 中国; 2. 江西水利职业学院, 江西 南昌 330013; 3. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013)

摘要: 为解决富水砂层土压平衡盾构掘进过程中渣土喷涌问题, 深入研究渣土改良后的渗透特性演化规律及喷涌发生的临界条件。通过研制一套能同步模拟不同埋深下土压力与水压力的加压渗透试验装置; 系统探究了渗透压 P_w 、围压 P_s 、泡沫注入比 FIR 、改良剂种类及颗粒级配等多因素耦合作用下渣土渗透特性的演化规律。研究结果表明: 泡沫改良存在临界注入区与过度改良区, 其最优注入比 FIR 约为 5%~8%; 膨润土泥浆则在有压条件下展现出更稳定的抗渗性能。基于试验数据构建了考虑应力比 P_w/P_s 、 FIR 与渗透系数比 k/k_0 的响应曲面模型, 识别出临界应力比 $P_w/P_s=0.5$ 。进一步提出以渗透系数-水头-流量的多维喷涌临界判据, 建立基于动态临界渗透系数概念及分级预警体系。最终形成地层-改良剂-参数匹配的差异化防控策略。研究成果为富水砂层盾构工程喷涌风险的控制提供了从机理到应用的系统解决方案。

关键词: 土压平衡盾构; 富水砂层; 渣土改良; 加压渗透特性; 喷涌

中图分类号: U455 文献标识码: A

On the Pressurized Permeability Behavior of Shield Muck in Water-Rich Sandy Strata and Critical Conditions for Spewing

YU Jin^{1,2,3}, ZHU Bitang^{1,3}, LUO Ruping^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013, Jiangxi, China; 2. Department of Architectural Engineering, Jiangxi Water Resources Institute, Nanchang 330013, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, Nanchang 330013, China)

Abstract: To address the issue of muck spewing during earth pressure balance (EPB) shield tunneling in water-rich sandy strata, this paper systematically investigates the evolution of permeability characteristics of conditioned muck and the critical conditions for spewing. A novel pressurized permeation test apparatus is developed, which can simultaneously simulate the overburden soil pressure and groundwater pressure under various burial depths. Using this setup, the evolution of muck permeability under the coupled effects of multiple factors-including permeation pressure P_w , confining pressure P_s , foam injection ratio (FIR), types of conditioning agents, and particle gradation-was systematically examined. The results reveal that foam conditioning exhibits distinct “critical injection zones” and “over-conditioning zones,” with an optimal FIR of approximately 5%–8%; bentonite slurry demonstrates more stable impermeability under pressurized conditions. Based on the experimental data, a response surface model incorporating the stress ratio P_w/P_s , FIR , and the permeability coefficient ratio k/k_0 was established, and a critical stress ratio $P_w/P_s=0.5$ was identified. Furthermore, a multi-dimensional critical criterion for spewing centered on “permeability coefficient-water head-flow rate” was proposed, leading to the development of a tiered early-warning system based on the concept of a dynamic critical permeability coefficient. Finally, a differentiated prevention and control strategy that matches “stratum-conditioning agent-parameters” was formulated. The research outcomes provide a systematic solution, from mechanism to application, for controlling spewing risks in EPB shield tunneling through water-rich sandy strata.

Key words: EPB shield; water-rich sandy strata; soil conditioning; pressurized permeability; spewing

收稿日期: 2026-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52578473); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ2409204)

土压平衡盾构法因其地层适应性广、掘进效率高、无需大型泥浆处理设备及对周边环境影响相对较小等显著优点^[1-3]，已成为我国城市地铁、综合管廊等地下工程建设中的核心工法。随着城市地下空间开发向纵深和复杂地质条件区域拓展，盾构隧道不可避免需要穿越富含地下水的砂层、砂卵石层等不良地质段。在此类高渗透性、低黏聚力的富水地层中掘进时，土仓内的渣土与地下水在压力作用下极易发生混合，若渣土改良效果不佳，改良后的渣土难以形成有效的塑性流动状态和微透水屏障，便会引发严重的渣土喷涌现象^[4-5]。渣土喷涌是指高压地下水击穿渣土改良形成的阻隔，携带大量渣土从螺旋输送机或排渣口瞬间喷出的灾害性过程。

改良渣土的渗透性是评估土压平衡盾构中泡沫、膨润土泥浆等改良剂改良效果的关键指标。在泡沫改良渣土渗透性研究方面，Borio 和 Peila^[6]通过试验证实泡沫可使砂土渗透系数降低 1-2 个数量级，奠定了泡沫改良的理论基础；Budach 和 Thewes^[7]进一步建立了 EPB 盾构在不同粗粒地层中的渗透控制标准，推动了工程应用发展；Wang 等^[8]揭示了不同改良状态下泡沫改良砂土的渗透特性演化规律。在膨润土泥浆改良砂土渗透性研究方面，宋洋等^[9]通过泥浆配比优化研究，建立了复合地层中的泥皮形成机制与渗透控制方法；徐征杰等^[10]基于响应面法系统分析了膨润土浓度、注入率等关键参数的交互作用，为膨润土泥浆改良参数优化提供了理论参考；王振飞等^[11]则在砂卵石地层中验证了膨润土泥浆通过封堵大孔隙实现渗透性控制的可行性。在间断级配砂土的渗透破坏研究方面，Wang 等^[12]通过试验一系列试验证实泡沫能有效填充间断级配砂土中的不均匀孔隙结构，通过增大渗流路径的曲折度，显著降低其渗透性，并提升土体抵抗渗透破坏的能力，但在高水力梯度渗流条件下，泡沫改良间断级配土体的封堵效果尚未明晰。此外，高分子聚合物作为新型改良剂，其在快速成膜与黏结颗粒方面的优势也受到关注，但其在高水压下的长期稳定性及经济性仍有待验证。综上，现有研究虽成果丰富，但在多应力耦合、动态渗透响应及工程可预警性方面仍存在明显不足。

针对上述研究不足，本研究通过理论、试验与建模相结合的方法，系统揭示上述多因素的耦合作用机制，并建立一个基于临界渗透系数的喷涌预警与防控体系。首先，通过理论分析确定了应力比 P_w/P_s 为控制渗流状态的关键无量纲参数。进而，自主设计了一套能同步模拟不同埋深条件下土压力与水压力共同作用的加压渗透试验装置，以克服传统设备的局限性。揭示了渗透压、围压、泡沫注入比、改良剂种类及颗粒级配等因素对渣土渗透性的影响规律与交互作用机制。基于试验数据，通过引入无量纲参数并构建以泡沫注入比 FIR 和应力比 P_w/P_s 为自变量、渗透系数比 k/k_0 为因变量的三维响应曲面模型，量化了各因素的耦合规律，识别出最优与过度改良区。最终，首次提出动态临界渗透系数概念，建立以渗透系数-水头-流量为核心的多维度动态预警判据及分级体系，并形成地层-改良剂-参数相匹配的差异化防控策略。研究成果旨在为实现富水砂层盾构施工喷涌风险从经验性防控向参数化预控的转变提供理论依据与系统解决方案。

1 喷涌发生机理模型

1.1 喷涌的力学机制

喷涌现象是土仓内高压水在压力差作用下形成渗流通道，并携带渣土颗粒从排渣口喷出的力学过程。富水砂层渗透性高、粘聚力低，若渣土改良效果不佳，土仓内的渣土无法具备有效的阻水隔水能力，地下水易在土仓与螺旋输送机内形成贯通通道，最终引发喷涌。

从流体力学角度看，喷涌过程可分为三个阶段：渗流通道形成阶段、优势通道扩展阶段和喷涌发生阶段。当渗流力超过渣土结构抗力与颗粒黏结力时，渗流通道快速扩大，水流携带渣土颗粒运动，即发生喷涌。

朱伟等^[13]根据流量守恒原则，推导得出螺旋输送机出水口压力和地下水流量的等式，见式（1）

$$H_2 = H_1 - \frac{QL_1}{kA_1} - \frac{QL_2}{kA_2} \quad (1)$$

式中， H_1 为开挖面水头， H_2 排渣口水头， L_1 为盾构土仓长度， L_2 螺旋输送机长度， A_1 为盾构土仓横截面积， A_2 螺旋输送机横截面积， k 为渣土渗透系数， Q 为地下水流量。各参数具体表征如图1所示。

已有研究表明，喷涌发生与渣土渗透系数 k 、土水压力比、排渣口水力条件直接相关^[13]。对本文而言，渣土渗透系数 k 与应力比 P_w/P_s 是控制喷涌的核心参数，其余为盾构结构与施工边界条件，可视为固定参数。因此，控制喷涌的关键路径是通过改良降低渣土渗透系数，并将土仓应力比 P_w/P_s 控制在安全区间内。

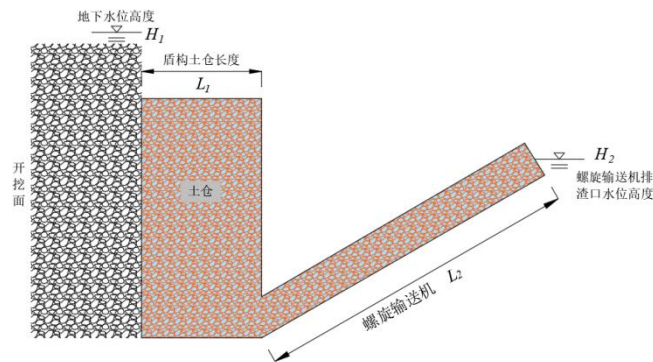


图1 盾构喷涌机理示简化模型

Fig. 1 Schematic of shield spewing mechanism

1.2 喷涌关键影响因素分析

根据多孔介质渗流理论，喷涌由渣土渗透特性、土水应力状态、改良剂效果及地层颗粒级配等因素共同决定。其中，渣土渗透系数直接控制地下水迁移能力，富水砂层原状土体渗透系数较高，通过添加泡沫剂、膨润土泥浆等改良材料，可有效填充孔隙、改变颗粒间相互作用，从而显著降低其渗透性，并改善渣土的流塑状态，形成低透水材料，如图2所示；应力比 P_w/P_s 反映渗透压与围压的相对强弱关系，决定渣土微观结构稳定性；改良剂类型与注入参数直接决定改良后渣土的孔隙结构、流塑状态与抗渗性能；地层颗粒级配则决定渣土初始渗透特性，粗颗粒含量越高，越易形成贯通性大孔隙，抗渗改良难度越大。

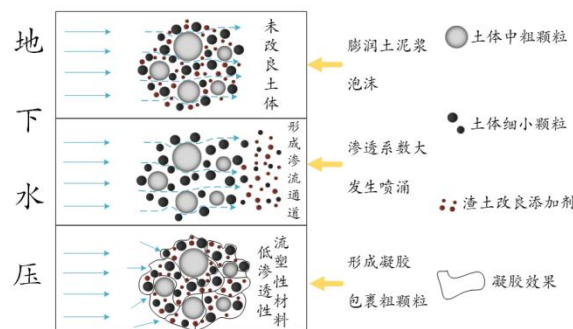


图2 土仓内渣土形成低透水性材料过程

Fig. 2 Process of low permeability muck formed of soil in chamber

2 加压渗透装置设计与试验方案

2.1 装置设计思路与构成

为模拟盾构在富水砂层中实际掘进时所受的应力状态与水力条件，本文设计了一种新型加压渗透试验装置。该装置的优点在于可同步施加围压和渗透水压力，从而模拟不同埋深条件下的土压力与水压力共同作用。本装置的围压与渗透压调节范围均为 0~800 kPa，理论上能够模拟埋深约 0~80 米对应的应力状态。

装置结构示意图如图 3 所示，装置主要由三大系统组成：渗流测试系统、围压施加系统和渗透水压施加系统。渗流测试系统包括渗透容器、调压阀、数据采集装置等，负责测量渣土的渗透特性；围压施加系统通过气压加载方式，模拟不同埋深条件下的掌子面土压力；水压施加系统则通过气压驱动水压，模拟地下水压力条件。

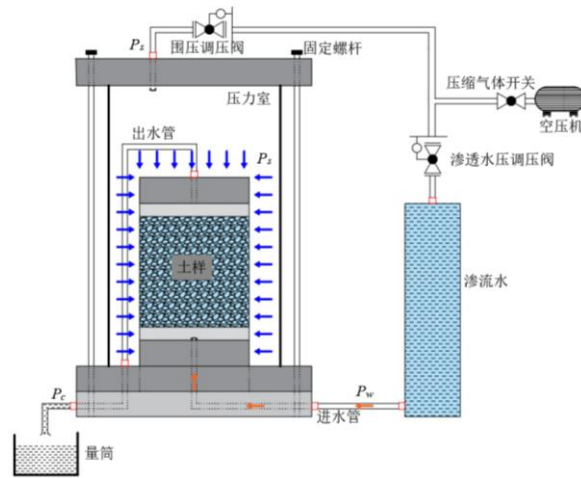


图 3 加压渗透试验装置结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the pressurized permeability testing apparatus structure

该装置在传统柔性壁渗透仪的基础上，进行了针对性改进，包括可独立控制、同步施加的围压系统与渗透水压系统。能够更真实地模拟盾构土仓内渣土所受的水土压力同步作用工况，克服了常规设备在模拟复杂应力路径方面的不足。

2.2 试验材料与方案

试验所用材料主要包括改良渣土土样、泡沫剂、膨润土泥浆。其中，改良土样取自实际盾构工程中的富水砂层，其基本物理参数为天然含水率 15.2%、天然密度 2.05 g/cm³、孔隙比 0.65；试验所用泡沫剂为阴离子型，其发泡倍率 *FER* 控制在 18±2，半衰期大于 15 分钟，以确保泡沫的稳定性。所用膨润土泥浆采用钠基膨润土配制，浆液密度为 1.05~1.15 g/cm³，并使用马氏漏斗粘度计测定其粘度在 35~45 s 之间，以满足工程改良对泥浆性能的基本要求。

试验方案设计如下：首先，对原状渣土及改良渣土进行坍落度等基本物理力学指标的测定，以掌握其基本性质；随后开展渗透特性测试，在不同围压（50~300 kPa）和渗透压（50~250 kPa）条件下系统测量改良渣土的渗透系数；在此基础上，控制泡沫剂发泡倍率 *FER* 在 15~20 倍，以保证泡沫稳定性，进一步研究泡沫注入比 *FIR*、改良剂种类和颗粒级配等因素对渣土渗透性的影响规律。

土样取自南昌地铁七里站-民园路西站区间富水砂层，其级配曲线如图 4 所示，属于典型中粗砂，具有较好的区域地层代表性。

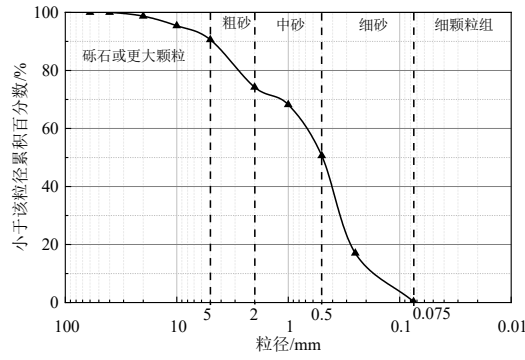


图 4 砂土颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle size distribution curve of sand

2.3 试验过程

本研究所采用的加压渗透装置实物图如图 4(a)所示，其设计参照《土工试验方法标准》^[14]相关规范。试样标准尺寸为直径 70 mm、高度 80 mm，置于专用压力室内。试样上下两端分别设置有透水石与滤纸，以确保水流均匀通过并防止细颗粒流失。渗透压力 P_w 与围压 P_s 通过高精度调压阀进行独立控制，调节范围均为 0~800 kPa，以满足不同工况的模拟需求。加压渗透试验按以下标准化步骤执行：

a) 试样制备与装样：将改良后的渣土土样分层填入特制橡皮膜中，控制每层填筑厚度以保持试样整体均匀，最终确保试样高度 $L=80$ mm。随后，使用橡皮筋将橡皮膜两端紧密固定，防止加压过程中渣土中水沿试样外壁发生渗漏；

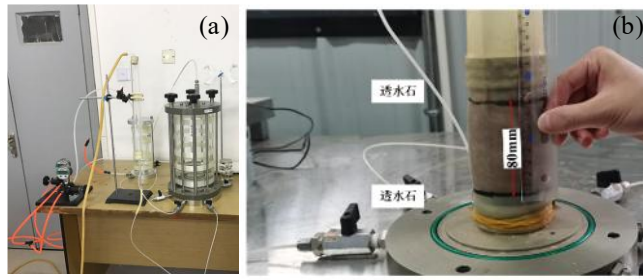
b) 装置组装与管路连接：将制备好的试样置于透明压力室中心位置，旋紧外壳螺丝以保证压力室的密封性。随后，将渗流水瓶注满，并准确连接气压管路与渗流管路，确保整个系统连接可靠；

c) 压力施加与稳定：完成全部连接后，启动空压机并开启供气阀门。遵循“先围压、后渗压”的加载原则：首先施加围压，在此过程中保持试样排水通道开放，以模拟土仓中渣土在侧向约束下的自然排水压密过程；使试样在侧向约束下初步稳定；随后缓慢施加渗透压力，促使试样内部逐步形成稳定的渗流通道；最后通过调压阀将进水压力与围压精确调整至预设试验值；

d) 渗流观测与参数获取：待出水口流量达到稳定状态后，开始计量渗出特定体积水量所对应的历时。通过对比该历时，可直接评价不同改良渣土试样的抗渗性。鉴于改良后渣土渗透系数较低 ($10^{-5} \sim 10^{-6}$ m/s)，本试验采用变水头法进行渗透系数测试；每组工况重复试验 3 次，取平均值作为最终结果，试验相对误差小于 5%。装置压力分辨率为 ± 1 kPa，流量计量精度为 0.1 mL，可满足低渗透性土体的测试精度要求。此外，可根据达西定律，利用测得的水量、时间及水头差等参数，进一步计算试样的精确渗透系数，渗透系数计算公式如式(2)所示

$$k = \frac{Q_k L}{AT \times 102 P_w} \quad (2)$$

式中： k 为渣土渗透系数； Q_k 为渗流水体积； L 为渣土试样高度； A 为渣土试样横截面积； T 渗流 Q_k 水量所需时间； P_w 为渗透水压。



(a) 加压渗透装置实物图 (b) 装样

图 5 加压渗透装置及装样过程

Fig. 5 Pressurized infiltration apparatus and sample loading process

3 改良参数对渣土渗透性的影响机理与演化规律

3.1 P_w/P_s 与 FIR 的耦合作用效应

本研究通过自主设计的加压渗透装置，系统揭示了渗透压、围压、泡沫注入比等多因素耦合作用下渣土渗透系数演化规律。试验结果表明，渣土渗透系数不仅受单一因素影响，更受多因素交互作用的控制。为深入分析这一耦合机制，本文引入两个无量纲参数：渗透系数比 k/k_0 和应力比 P_w/P_s 。其中， k/k_0 以无改良、低应力状态 ($FIR=0\%$, $P_w=0\text{ kPa}$, $P_s=100\text{ kPa}$) 下的渗透系数 k_0 为基准值，将各工况下测得渗透系数 k 进行无量纲化，此项处理旨在消除因渣土土样固有属性（如颗粒级配和矿物成分等）差异带来的绝对渗透性影响，从而突显应力状态与改良措施耦合作用的相对变化规律，更适用于揭示渗透性演化的内在机理。 P_w/P_s 定义为渗透水压与围压的比值，综合表征渗流驱动力与约束力的相对强弱关系，是决定渣土微观结构稳定性的关键指标。

基于上述参数，采用二次多项式回归，构建了以泡沫注入比 FIR 和应力比 P_w/P_s 为自变量、渗透系数比 k/k_0 为因变量的三维响应曲面模型其表达式为 $k/k_0=f(FIR, P_w/P_s)$ ，具体见式 (3)。对该模型进行方差分析与回归检验，结果表明：模型的决定系数 $R^2=0.9037$ ，调整后 $R^2=0.8555$ ，表明该模型能够解释 85.5% 以上的响应值变化，拟合优度良好。模型的 F 值为 18.76，对应的 p 值小于 0.0001，达到极显著水平，证明该模型有效。此外，各交互项 $FIR \times (P_w/P_s)$ 与二次项 $(FIR)^2$ 、 $(P_w/P_s)^2$ 的 p 值均小于 0.05，表明应力比与泡沫注入比之间存在显著的交互效应与非线性效应。

$$f = 40.40 - 8.13x - 79.20y + 6.38xy + 0.51x^2 + 62.33y^2 \quad (3)$$

式中： f 为 k/k_0 ， x 为 FIR ， y 为 P_w/P_s 。

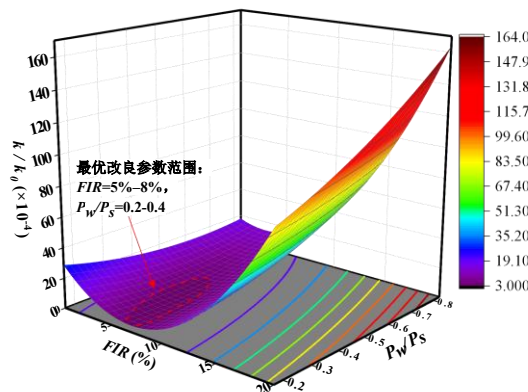


图 6 P_w/P_s 与 FIR 对 k/k_0 的响应曲面

Fig. 6 Response surface of P_w/P_s and FIR with respect to k/k_0

基于图 6 所示的响应曲面，可系统揭示应力比 P_w/P_s 与泡沫注入比 FIR 对渣土渗透系数比 (k/k_0) 的耦合作用机制，其主要规律与机理如下：

响应曲面呈现显著的非线性鞍形结构，体现了渣土渗透特性受双重机制控制的特点。在低应力比区 $P_w/P_s < 0.5$ ，围压主导的压实效应显著， k/k_0 随围压增大呈指数衰减。较高的围压使渣土颗粒骨架更为密实，连通孔隙被压缩，渗流路径更加曲折。此时，泡沫主要通过填充剩余孔隙发挥作用，与围压产生协同改良效应。

通过曲面等高线分析，识别出一个最优改良参数范围：当 $FIR=5\%-8\%$ 且 $P_w/P_s=0.2-0.4$ 时， k/k_0 可降至 $3 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4}$ 的最低区间。该参数组合下，泡沫的气泡填充效应与围压的骨架压实作用实现最佳协同，从而形成抗渗性能最优的渣土结构。

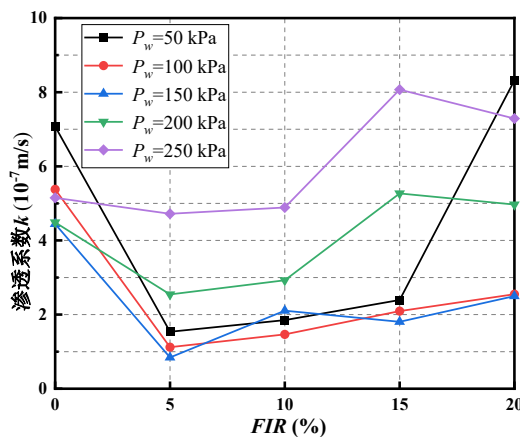
随着应力比升高 ($P_w/P_s > 0.5$)，曲面出现明显抬升，表明渗透压的影响显著增强。 k/k_0 随应力比增大而快速上升，细颗粒在水力梯度作用下发生迁移，掏空原有骨架；渗流通道沿泡沫与土颗粒的薄弱带扩展贯通；持续高压渗流也导致气泡合并逸出，泡沫的封堵效能衰退。此时，渣土渗透性进入对渗透压极为敏感的快速上升通道，趋近于抗渗临界状态。

本研究确定的 $P_w/P_s=0.5$ 这一临界应力比，对工程实践具有重要指导意义。为维持渣土在螺旋输送机内的低渗透性与抗喷涌能力，应通过调控推进速度与排土速率，使土仓压力始终控制应力比低于该临界值，确保渣土处于围压主导区。该结论将渣土渗透性的微观机制与盾构掘进的宏观参数直接关联，为喷涌防控与施工参数优化提供了理论依据。

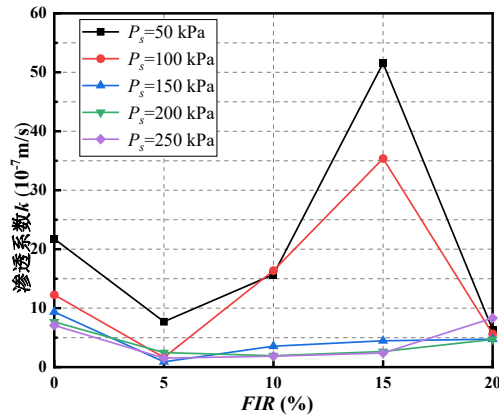
3.2 泡沫改良的临界效应与微观机理

泡沫改良对渣土渗透性的影响呈现出显著的非线性特征，如图 7 所示。试验结果表明，随着泡沫注入比的增加，其改良效果存在明显的临界注入区和饱和注入区。当 $FIR=5\%-8\%$ 时，渗透系数降低达 70% 以上，表现出显著的初次改良效应，同时，该泡沫注入比区间内渣土坍塌度为 200-250 mm，满足土压平衡盾构对渣土流塑性的施工要求；而当 $FIR > 15\%$ 后，渗透系数不降反升，且渣土易出现离析、坍塌度骤降，流塑性显著劣化，不利于盾构排渣与土压平衡控制，表明已进入过度改良状态，对渗透性产生不利影响。

为揭示上述非线性现象的内在机理，结合渗透性测试结果与多孔介质渗流理论进行了机制推断。分析认为，适量泡沫的加入主要通过气泡填充和颗粒包裹隔离双重作用有效降低渣土渗透性；而当泡沫注入过量时，大量气泡在土体中相互连接并形成连通气腔，构成优先渗流通道，从而合理解释了渗透系数在注入比超过临界值后出现回升的现象。



(a) 围压 $P_s=300$ kPa 时不同 FIR 渣土渗透性变化规律



(b) 围压 $P_w=50$ kPa 时不同 FIR 渣土渗透性变化规律

图 7 不同工况下渣土渗透性演化规律

Fig. 7 Evolution laws of permeability for muck under different working conditions

此外，研究发现，在高渗透压条件下当渗透压 $P_w > 200$ kPa 时，如图 6(a)所示，所有泡沫注入比工况下的渣土渗透系数均趋于一致，改良效果显著弱化。通过对渗流过程的实时监测可知，高水力梯度会引发渣土中细颗粒的大量迁移与流失，进而形成稳定的渗流优势通道。此类通道形成使泡沫的孔隙填充作用基本失效，也从机理层面揭示了在高水压地层中仅依靠泡沫改良难以有效控制喷涌现象。

3.3 改良剂的性能对比与协同效应

为评价不同改良剂的封堵效果，构建了改良效率指数综合评价指标，其定义为渗透系数降低率与相应注入比的比值。该指标有效量化了泡沫注入比 FIR 与膨润土泥浆注入比 BIR 的改良效率，计算公式如下

$$\eta = \frac{(k_0 - k) / k_0}{IR} \quad (4)$$

式中， η 为改良效率指数， k_0 为初始状态渣土的渗透系数， k 为改良后渣土的渗透系数， IR 为改良剂注入比。

在不同渗透压条件下（50-250 kPa），固定围压为 300 kPa，两种改良剂在不同注入比下的效率指数呈现出规律性变化，如图 8 所示。

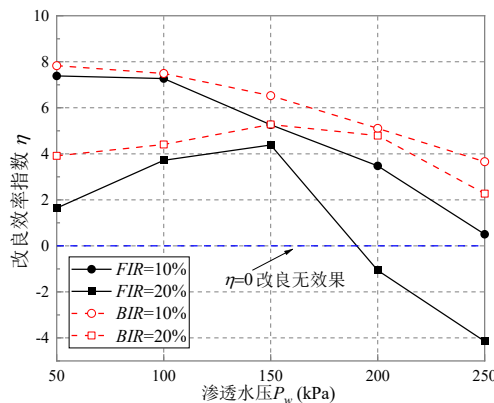


图 8 不同工况下改良效率指数演变规律

Fig. 8 Evolution patterns of the conditioning efficiency index under different working conditions

$FIR=10\%$ 与 $BIR=10\%$ 在所有渗透压条件下均保持为正效率，表明二者在适量注入时均能有效改善渣土抗渗性。膨润土泥浆的改良效率指数始终高于泡沫。尤其在渗透压升至 250 kPa 时，膨润土的效率指数(3.66)显著优于泡沫(0.51)，证明其在高渗透压下具有更优的改良稳定性与耐久性。随着渗透压升高，二者的改良

效率均呈下降趋势，但泡沫下降更为剧烈，从 7.38 降至 0.51，表明泡沫改良效果对高压更为敏感。

$FIR=20\%$ 在渗透压增至 200 kPa 后，效率指数转为负值，证实已发生严重的过度改良。过量泡沫形成连通气腔，在高渗透压下发展为优势渗流通道，导致改良效果丧失甚至起到反作用。 $BIR=20\%$ 的效率指数虽有所下降，但在所有工况下仍为正值，说明其抗过度改良能力较强，但仍低于同条件下的 $BIR=10\%$ ，存在改良效率衰减现象。

基于上述改良效率指数演化规律，泡沫改良主要依靠气泡填充机制。在低-中渗透压下，适量气泡可有效阻塞孔隙；但在高注入比与高渗透压耦合作用下，气泡结构失稳、贯通，形成优先渗流路径，导致改良效率指数急剧下降甚至为负。膨润土泥浆通过颗粒膨胀与凝胶封堵双重机制发挥作用。其形成的凝胶网络结构在高水压下仍能保持一定稳定性，因此抗渗透压能力强，效率曲线下降平缓，无负效应出现。

基于上述研究，本文提出泡沫-膨润土泥浆组合改良方法，协同发挥二者优势，利用泡沫优异的润滑性改善渣土的流塑性，降低刀盘扭矩。借助膨润土泥浆卓越的密封性与稳定性构建长效抗渗屏障，特别是在高渗透压阶段保持改良效果。该组合改良方法可兼顾渣土排渣通畅与改善渣土抗渗性，为高压地层中的渣土喷涌难题提供更为可靠与经济的解决方案。

3.4 颗粒级配的调控机制与优化设计

为探究颗粒级配与应力状态对改良渣土渗透性的耦合影响规律，选取 $FIR=10\%$ 的六种典型渣土（砾石含量分别为 0、10%、20%、30%、40%及 50%的富水砂土），在固定渗透压 50 kPa 条件下，系统研究了围压从 100-300 kPa 变化对其渗透特性的影响。

如图 9 所示，在相同级配与泡沫注入比条件下，渗透系数随围压增大而显著减小，呈现出明显的围压强化效应。由 100 kPa 增至 300 kPa 时，渣土骨架有效应力增大，颗粒间孔隙被压缩，连通渗流通道变窄、渗流路径更加曲折。围压强化效应具有明显的级配依赖性，砾石含量越高，围压对渗透系数的降低效率越低，但围压的改良作用并未完全消失。即使在砾石含量 50%的工况下，增大围压仍可使渗透系数明显下降，仅因原状土渗透系数基数更高，需施加更大围压方可将渗透系数降至较低水平。

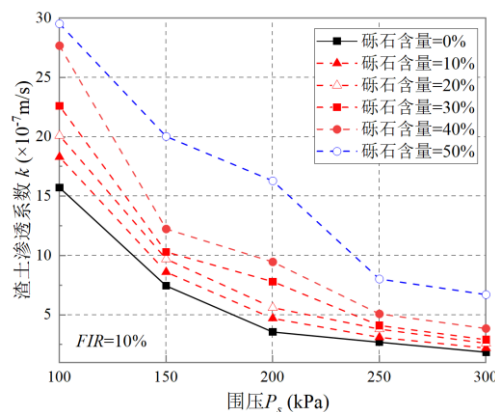


图 9 不同颗粒级配下渣土渗透系数演变规律

Fig. 9 Evolution patterns of the permeability coefficient of muck under different particle size distributions

固定应力条件下，渣土渗透系数随砾石含量增加而升高，抗渗性能显著降低。当砾石含量超过 40%时，渣土由细粒基质填充的密实结构向粗颗粒骨架主导的松散结构转变。砾石含量达 50%时，粗颗粒相互接触形成稳定骨架，细粒难以充分填充骨架间大孔隙，易形成贯通性渗流通道。此类通道受粗颗粒骨架支撑，即使施加 300 kPa 围压也难以完全闭合，导致渗透系数整体偏高；同时，高砾石含量下泡沫难以有效封堵贯通孔隙，改良效果被进一步削弱。

综上，颗粒级配与应力状态共同控制渣土渗透性，砾石含量超过 40%时，常规泡沫改良效果明显降低，宜采用泡沫-膨润土泥浆复合改良或级配调控措施。实际施工中，适当提高土仓压力可改善抗渗性能，对细粒含量较高地层的提升效果更为显著。

3.5 多因素耦合机理与“地层-应力-改良剂”协同防控框架

本节提出地层-应力-改良剂协同防控框架，如图 10 所示，阐明其内在联动机制，并为差异化工程策略的制定提供理论指导。

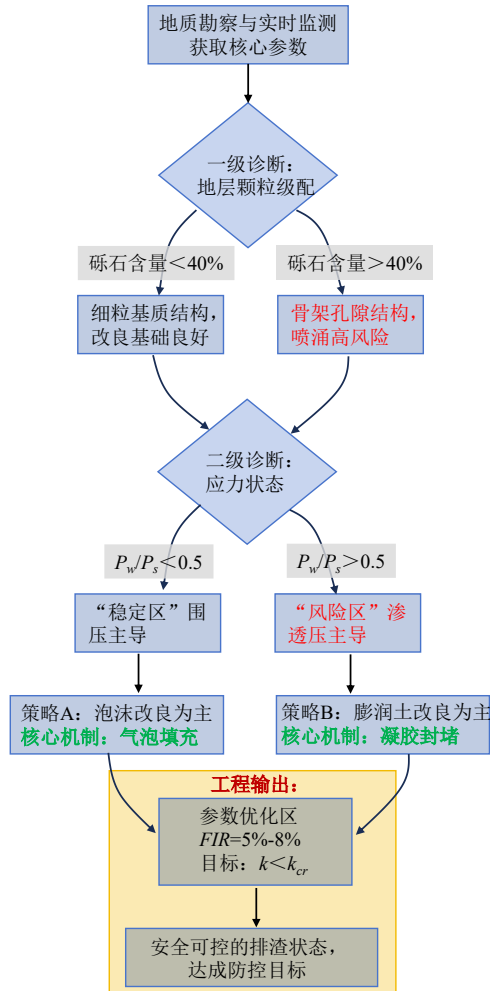


图 10 “地层-应力-改良剂”协同防控决策框架

Fig. 10 Decision-pathway diagram for the coordinated “Strata-Stress-Conditioning Agent” prevention and control framework

首先，地层颗粒级配构成了渣土渗透性的物质基础，决定了改良的难易程度与极限。如 3.4 节所述，当砾石含量低于 40%时，渣土结构以细粒基质为主导，其孔隙易于被压缩和填充；而当砾石含量超过 40%这一临界值时，渣土体系转变为由粗颗粒骨架支撑的结构，形成连通的宏观渗流通道。这种结构性大孔隙极大地削弱了围压的压实效应与泡沫的填充效果，从而抬高了渗透系数的下限，构成了喷涌的高风险条件。

其次，应力比 P_w/P_s 是在既定地层基础上，控制渗流稳定性的动态开关与临界触发器。3.1 节的响应曲面模型（图 6）清晰地表明，无论地层条件如何，应力比 P_w/P_s 都主导着渗透系数的演化路径。当 $P_w/P_s < 0.5$ 时，系统处于围压主导区，渣土结构稳定，改良剂能有效发挥作用；当 $P_w/P_s > 0.5$ ，系统标志着切换至渗透压主导区，高渗流驱动力将引发细颗粒迁移、泡沫结构失稳等一系列微观破坏，导致渗透系数急剧抬升，使渣土趋近于抗渗临界状态。

在此基础上,改良剂的选择不再是简单的材料替换,而是针对不同地层-应力组合风险的应对策略。研究发现,泡沫与膨润土泥浆在此框架下展现出清晰的效能边界与协同空间:

① 泡沫改良在低应力比 $P_w/P_s < 0.5$ -细粒主导(砾石含量 $<40\%$)的工况下表现最优。其气泡填充与颗粒包裹机制能在 $FIR=5\% \sim 8\%$ 的最优区间内,经济高效地实现渣土的流塑性与抗渗性提高。

② 膨润土泥浆作用在于应对高应力比 $P_w/P_s > 0.5$ 与骨架孔隙(砾石含量 $>40\%$)等高风险耦合工况。如 3.3 节所述,其颗粒膨胀与凝胶封堵双重机制能构建更为稳定的网状抗渗结构,抵抗高水力梯度的冲刷。

③ 复合改良则是应对极高风险工况的最优选择。本文定义极高风险工况为砾石含量 $>60\%$ 的圆砾地层、应力比 $P_w/P_s > 0.5$ 、且隧道埋深大于 15 m 的高水压富水地层。通过泡沫与膨润土泥浆的协同作用,可同时实现流塑性与密封性的渣土改良目标。

综上所述,本研究提出一个层次化的地层-应力-改良剂协同防控框架,如图 10 所示。该框架表明,喷涌防控应遵循一个清晰的逻辑链条,以地层级配识别为起点,以应力比 P_w/P_s 评估为动态风险判据,最终以改良剂的精准匹配与参数优化为执行手段。这一框架将内在机理与外部条件、静态属性与动态参数有机耦合,将渣土渗透系数 k 降至临界值 k_{cr} 以下,实现安全、高效掘进。

4 喷涌临界条件的多维度判据与工程预警体系

基于上述获得的渣土渗透特性演化规律,特别是临界应力比 $P_w/P_s=0.5$ 与最优改良参数区间 $FIR=5\% \sim 8\%$,本节重点解决如何将渣土渗透性参数转化为面向工程应用的喷涌预警指标。具体而言,前述研究表明渗透系数 k 是表征渣土抗渗性能的核心指标,而喷涌作为一种工程现象,其发生取决于水力条件(开挖面水头 H_1 、排渣口水头 H_2 、流量 Q),因此,建立 k 与 H_1 、 H_2 及 Q 之间的定量关系。

4.1 喷涌临界判据

本文喷涌等级划分依据如下,以朱伟^[13]、秦建设^[15]提出的经典喷涌阈值为基,结合南昌地铁富水砂层现场实测数据进行标定。按水头-流量双指标同步提升 1 倍的原则,划分为轻微喷涌与严重喷涌。据此确定当螺旋输送机排渣口处水压力 >10 kPa ($H_2>1\text{m}$)且渗流量 $Q>3$ cm^3/s 时,判定喷涌发生;当水压力 >20 kPa($H_2>2\text{m}$)且渗流量 $Q>4$ cm^3/s 时,判定为严重喷涌。

为实现喷涌风险的超前预测,本研究将上述宏观现象判据与渣土的渗透系数相关联。将轻微喷涌临界条件: $Q=3$ cm^3/s , $H_2=1\text{m}$ 、严重喷涌临界条件: $Q=4$ cm^3/s , $H_2=2\text{m}$ 和盾构机参数:土仓直径 $D=6.0\text{m}$,土仓长度 $L_1=1.74\text{m}$,螺旋输送机直径 $d=0.8\text{m}$,螺旋输送机长度 $L_1=11.34\text{m}$ 代入式(1)构建开挖面水头(H_1)与临界渗透系数 (k_{cr})的定量关系曲线,如图 9 所示。

分析表明,临界渗透系数 k_{cr} 随开挖面水头 H_1 的增大而呈指数衰减。这一规律揭示了随着埋深增加,作用于开挖面的孔隙水压力线性增长,而渣土骨架承受的有效应力变化相对有限。在此条件下,维持土仓压力平衡所需的抗渗能力呈非线性增强。

图 11 建立的 $k_{cr}-H_1$ 关系曲线具有重要的工程指导价值,为不同埋深工况提供了明确的渗透系数控制目标,使渣土改良从经验性试错转向目标导向的精准设计,实现了喷涌风险评估的前置化,施工前即可根据地层水文地质条件确定所需的改良参数,当现场监测数据显示渣土渗透系数接近临界曲线时,可提前启动预警并调整改良参数,从而实现从被动应对到主动防控的转变。

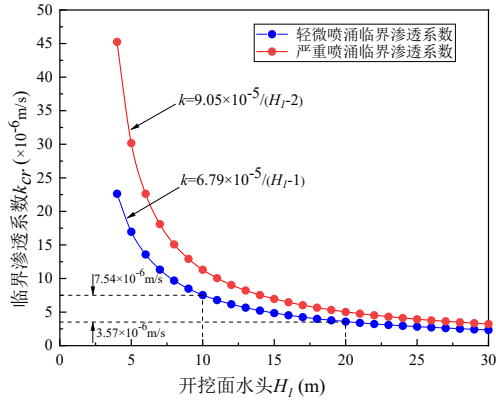


图 11 开挖面水头与临界渗透系数关系

Fig. 11 Relationship between the water head at the excavation face and the critical permeability coefficient

4.2 基于临界渗透系数的工程预警系统构建

为将临界渗透系数理论应用于工程实践，针对南昌地铁四号线七里站-民园路西站区间的高水压工况，最大开挖面水头 $H_1=15\text{ m}$ ，构建了一套基于渣土临界渗透系数的动态预警系统。首先，针对该区间最大开挖面水头为 $H_1=15\text{ m}$ 的工况，将此条件与盾构机参数代入式（1），若以排渣口水流量 Q 为依据界定喷涌发生，则可以得到排渣口水头 H_2 与渗透系数 k 的关系曲线，如图 12 所示。

该预警系统通过建立排渣口水头 H_2 与渣土渗透系数 k 的定量关系，使得基于排出渣土渗透系数的快速测试结果，可间接评估排渣口的潜在水头，从而为喷涌风险提供一种前置预警手段。具体而言，本研究通过理论模型建立了排渣口水头 H_2 与渗透系数 k 的定量关系曲线。据此，在掘进过程中，只需对排出渣土进行渗透系数快速测试，即可反演计算出排渣口的潜在水头大小，从而在喷涌这发生前，对其渣土改良方案或土仓压力进行调控。系统的预警判据为：当计算所得 $H_2 < 1\text{ m}$ 时，处于安全状态；当 $1\text{ m} \leq H_2 < 2\text{ m}$ 时，预示轻微喷涌风险；当 $H_2 \geq 2\text{ m}$ 时，则预示严重喷涌风险。

基于上述判据，进一步确定了两个关键的临界渗透系数阈值。在图 10 中， $H_2=1\text{ m}$ 的虚线与曲线 $Q=3\text{ cm}^3/\text{s}$ 的交点，定义为轻微喷涌的临界渗透系数 $k_1=4.85 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ ；而 $H_2=2\text{ m}$ 的虚线与 $Q=4\text{ cm}^3/\text{s}$ 曲线的交点，则定义为轻微喷涌的临界渗透系数 $k_2=6.96 \times 10^{-6}\text{ m/s}$ 。

基于上述关系，本系统可为现场施工提供两方面指导，一是明确特定水压条件下渣土渗透系数的控制目标值 k_{cr} ；二是通过实测 k 值判断当前所处的风险等级。这不仅实现了对喷涌风险的超前预警，更指导了优化的掘进参数与改良策略制定，为保障深埋高水压地层盾构施工的安全与高效提供了关键技术支撑。

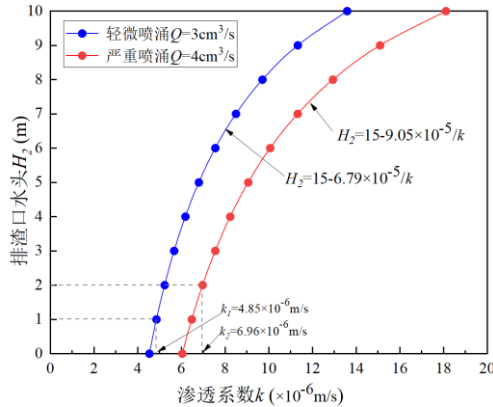


图 12 开挖面水头 $H_1=15\text{ m}$ 时排渣口水头 H_2 与渗透系数 k 关系

Fig. 12 Relationship between the water head H_2 at the muck discharge outlet and the permeability coefficient k when the excavation face water head $H_1=15\text{ m}$

若以排渣口水头 H_2 为依据界定喷涌发生，则可以得到排渣口水流量与渗透系数的关系曲线，如图 12 所示。当测得排出渣土的渗透系数，即可得到排渣口处的水流量大小，若 $3 \text{ cm}^3/\text{s} \leq Q < 4 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，发生轻微喷涌；若 $Q \geq 4 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，发生严重喷涌。此时图中曲线与虚线的交点 $k_1=4.85 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、 $k_2=6.96 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 分别为轻微喷涌的临界值和严重喷涌的临界值。

4.3 地层风险分级与应用

将该预警系统应用于工程地层评估，揭示不同地层的喷涌风险。如表 2 所示，通过对未改良渣土的测试有压条件下（围压 200 kPa，水压 150 kPa）渗透系数与轻微喷涌和严重喷涌临界渗透系数对比发现：当砾石含量在 0%~60%时，其为改良渗透系数均低于轻微喷涌临界值，喷涌风险较低。当砾石含量达到 70%（圆砾地层）时，其渗透系数为 $5.61 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ，已超过轻微喷涌临界值，但未达严重喷涌临界值。因此盾构掘进至圆砾地层时存在发生轻微喷涌的风险，需要提前预警，制定好适应的改良方案，重点注意渗透性改良。

表 1：开挖面水头 15m 条件下不同砾石含量地层喷涌判别

砾石含量	未改良渣土 $k/(\text{m/s})$	轻微喷涌临界 $k_1/(\text{m/s})$	严重喷涌临界 $k_2/(\text{m/s})$	喷涌判别
0%	3.02×10^{-7}			未喷涌
10%	4.63×10^{-7}			未喷涌
20%	5.89×10^{-7}			未喷涌
30%	7.12×10^{-7}			未喷涌
40%	8.22×10^{-7}	4.85×10^{-6}	6.96×10^{-6}	未喷涌
50%	9.66×10^{-7}			未喷涌
60%	2.25×10^{-6}			未喷涌
70%	5.61×10^{-6}			轻微喷涌

此结论能较好识别出圆砾地层为轻微喷涌高风险区，与现场实际情况高度吻合。这证明，基于临界渗透系数的预警体系不仅能实现风险的超前预测，还能为差异化改良策略提供精确指导。对于圆砾地层，必须实施强化的渣土改良措施，确保其渗透系数被有效降至 $4.85 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 以下，方能规避喷涌风险。

表 2：基于地层特性与风险等级的差异化渣土改良防控策略

风险等级	砾石含量	建议改良剂	关键控制参数	目标渗透系数
低风险	0~30%	单一泡沫	$FIR=5\% \sim 8\%$	$k < k_2$
中风险	30%~40%	单一泡沫/低浓度膨润土泥浆	$FIR=8\% \sim 10\%$ ，严格控制 $P_w/P_s < 0.5$	$k < k_1$
高风险	40%~60%	泡沫+膨润土泥浆复合改良	$FIR=5\% \sim 8\%$ ， $BIR=5\% \sim 10\%$ ， $P_w/P_s < 0.4$	$k \ll k_1$
极高风险	>60%(圆砾地层)	低浓度膨润土泥浆+泡沫辅助复合改良	$BIR > 15\%$ ， $FIR=3\% \sim 5\%$ ， $P_w/P_s < 0.4$	$k < k_1$

4.4 现场快速检测与动态调控建议

为实现上述预警体系及防控策略的现场应用，在于对改良后渣土的渗透系数进行快速评估，并建立与改良参数的实时联动调控机制。为此，提出以下具有可操作性的工程建议：

渗透系数快速评估方法，施工现场可采用便携式变水头或常水头渗透仪对排出的渣土进行快速测试，可在 10~15 min 内获得近似渗透系数。

改良参数动态调控，基于本文构建的响应曲面模型（图 6、式 3）及临界渗透系数判据（图 11、12），可针对具体工程地层与水文条件，预先编制目标渗透系数-改良剂添加量经验对应表。施工中，根据快速测得的渗透系数结果，对照预警等级（如表 2），动态调整泡沫注入比 FIR 或膨润土泥浆注入比 BIR ，确保

渣土渗透性始终控制在安全窗口 ($k < k_{cr}$) 内。

通过快速检测-实时比对-动态调整的闭环控制, 可将本研究的理论判据转化为常态化的施工管理流程, 有效解决临界渗透系数在现场应用中监测难、调控慢的瓶颈。

5 结论

基于本研究系统的试验分析与理论建模, 围绕富水砂层盾构渣土渗透特性及喷涌机理, 形成以下主要结论:

1) 研制了能同步模拟水土压力的试验装置, 揭示了应力比 P_w/P_s 这一关键耦合参数对改良渣土渗透性的控制作用。

2) 揭示改良效果的非线性规律, 泡沫改良存在明确的“临界注入区” ($FIR=5\% \sim 8\%$) 与“过度改良区” ($FIR > 15\%$)。膨润土泥浆在中等注入比 (10%) 下表现出更稳定的抗渗性能与更高改良效率。

3) 阐明渣土颗粒级配与应力的耦合机制, 砾石含量超过 40% 将形成骨架孔隙结构, 显著提升渗透性; 提高围压可增强抗渗性, 但其效果随砾石含量增加而递减。

3) 首次提出了适用于不同埋深与水压条件的“动态临界渗透系数”概念及分级预警体系, 实现了喷涌风险判据从静态阈值到动态标准的突破。

本研究系统构建了从机理分析、临界判据到构建防控体系框架, 为实现富水砂层盾构施工的精准可控提供了理论依据与实践指南。

参考文献:

- [1] Wan MSP, Standing JR, Potts DM, Burland JB. Measured short-term subsurface ground displacements from EPBM tunnelling in London Clay. *Geotechnique*, 2017, 67(09): 748-779.
- [2] Xu T, Bezuijen A, Thewes M, Pressure infiltration characteristics of foam for EPB shield tunnelling in saturated sand – part 1: “clean foam”. *Geotechnique*, 2022, 72(04): 283-294.
- [3] 王树英, 胡钦鑫, 王海波, 等. 盾构泡沫改良砂性渣土渗透性及其受流塑性和水压力影响特征研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(02): 94-102.
WANG Shuying, HU Qinxin, WANG Haibo, et al. Study on permeability of foam-conditioned sandy soil and its characteristics influenced by fluidity and water pressure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(2): 94-102.
- [4] 杨果林, 徐明煌, 刘欢, 等. 富水砂层盾构掘进平衡盾泥渣土改良试验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(07): 36-41.
YANG Guolin, XU Minghuang, LIU Huan, et al. Experimental study on soil conditioning with Hengdun mud in shield tunneling in water-rich rock stratum [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 51(7): 36-41.
- [5] 万泽恩, 李树忱, 赵世森, 等. 富水砂性地层盾构渣土改良试验与喷涌防治技术 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(03): 83-93.
WAN Zeen, LI Shuchen, ZHAO Shisen, et al. Experimental study on soil conditioning and gushing prevention technology for shield tunneling in water-rich sandy stratum [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(3): 83-93.
- [6] Borio, L. & Peila, D. Study of the permeability of foam conditioned soils with laboratory tests. *Am. J. Environ. Sci.* 2010, 6(04), 365-370.

- [7] Budach, C. & Thewes, M. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2015, 50(06), 296–304.
- [8] Wang, S., Hu, Q., Wang, H., Thewes, M., Ge, L., Yang, J. & Liu, P. Permeability characteristics of poorly graded sand conditioned with foam in different conditioning states. *J. Test. Eval.* 2021 49(05), 3620–3636.
- [9] 宋洋,李昂,王伟颀,等. 泥岩圆砾复合地层泥水平衡盾构泥浆配比优化研究与应用 [J]. 岩土力学, 2020, 41 (12): 4054-4062+4072.
SONG Yang, LI Ang, WANG Weiyi, et al. Research and application of slurry ratio optimization for slurry balance shield in mudstone-cobble composite stratum [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(12): 4054-4062+4072.
- [10] 徐征杰,郭晓阳. 基于响应面法的盾构施工膨润土改良参数优化 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (01): 194-200.
XU Zhengjie, GUO Xiaoyang. Optimization of bentonite conditioning parameters for shield construction based on response surface method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 194-200.
- [11] 王振飞,张成平,张顶立. 砂卵石地层泥水盾构泥浆配制及渗透试验研究 [J]. 铁道工程学报, 2017, 34 (01): 112-117.
WANG Zhenfei, ZHANG Chengping, ZHANG Dingli. Study on slurry preparation and permeability test for slurry shield in sandy cobble stratum [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(1): 112-117.
- [12] Shuying Wang, Bin Wang, Xiangcou Zheng. Seepage failure of foam-conditioned gap-graded soils: an experimental study. *Geotechnique*, 2025.
- [13] 朱伟, 秦建设, 魏康林. 土压平衡盾构喷涌发生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 11(05): 589-593.
ZHU Wei, QIN Jianshe, WEI Kanglin. Study on the mechanism of gushing in earth pressure balance shield [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 11(5): 589-593.
- [14] GB/T50123-2019, 土工试验方法标准[S]
GB/T50123-2019. Standard for geotechnical testing methods [S].
- [15] 秦建设,朱伟.土压式盾构施工中地下水出渗机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 26(10): 1632-1636.
QIN Jianshe, ZHU Wei. Study on the mechanism of groundwater seepage in earth pressure balance shield construction [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 26(10): 1632-1636.



第一作者: 余金(1996—), 男, 助教, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程研究工作。



通信作者: 朱碧堂(1974—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 澳大利亚工程师协会会员、江西省引进培养创新创业高层次“千人计划”领军人才, 研究方向为智能岩土、隧道工程、桩基工程和基坑工程。