

砂 - 粘复合地层中泥浆渗透成膜特性的 试验研究

袁铭璐¹, 范杰², 黄昕¹, 张子新^{1*}

¹同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

²上海隧道工程有限公司, 上海

收稿日期: 2026年2月9日; 录用日期: 2026年3月5日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

随着大直径泥水盾构在复杂地质环境中的广泛应用, 软硬交互砂粘复合地层中泥浆成膜稳定性已成为维持开挖面支护效果的关键技术难题。该类地层的显著非均质性导致泥浆渗透行为与均质地层存在本质差异。为深入揭示复合地层中泥浆渗透的宏 - 细观作用机制, 本研究自主研发了高压泥浆渗透柱试验系统, 开展了系列砂 - 粘复合地层泥膜形成试验, 并引入参数化修正模型对非均质渗流场进行定量表征。研究结果表明: (1) 砂与粘性介质渗透性的显著差异引起渗流场出现明显“偏流”现象, 实测复合渗透系数普遍高于理想并联模型的理论预测值, 且该偏差随粘土含量增加而加剧; 通过引入偏流放大系数, 可有效修正有效过流面积的评估偏差; (2) 渗透性演化规律差异显著: 纯砂地层表现为由初期颗粒重排主导的“瞬时陡降 - 快速平衡”模式, 而复合地层则呈现“缓滞衰减 - 持续致密”模式, 其渗透性在观测期内受深层堵塞机制驱动保持准稳态下降趋势; (3) 泥膜具有时效增强特性: 复合地层内部的非均质结构增强了泥膜的抗破坏能力, 其局部击穿时间较单一砂层显著延后, 表现出更优的时效稳定性。

关键词

盾构隧道, 复合地层, 泥浆渗透, 偏流效应, 泥膜

Experimental Study on the Permeation and Membrane-Formation Characteristics of Slurry in Sandy-Clay Composite Strata

Minglu Yuan¹, Jie Fan², Xin Huang¹, Zixin Zhang^{1*}

¹Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

²Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: February 9, 2026; accepted: March 5, 2026; published: March 13, 2026

*通讯作者。

文章引用: 袁铭璐, 范杰, 黄昕, 张子新. 砂-粘复合地层中泥浆渗透成膜特性的试验研究[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(3): 330-344. DOI: 10.12677/ag.2026.163031

Abstract

With the widespread application of large-diameter slurry shields in complex geological environments, the stability of slurry membrane formation in soft-hard interbedded sandy-clay composite strata has become a critical technical challenge for maintaining excavation face support. The pronounced heterogeneity of such strata leads to fundamental differences in slurry penetration behavior compared to homogeneous ground. To deeply investigate the macro-micro mechanisms of slurry penetration in composite strata, this study independently developed a high-pressure slurry penetration column test system, conducted a series of slurry membrane formation tests in sandy-clay composite strata, and introduced a parameterized correction model to quantitatively characterize the heterogeneous seepage field. The findings indicate that: (1) The significant difference in permeability between sandy and clayey media leads to a noticeable “flow deviation” phenomenon in the seepage field. The measured composite permeability coefficient is generally higher than that predicted by the ideal parallel model, and this deviation increases with clay content. By introducing a flow deviation amplification factor, the evaluation bias of the effective flow area can be effectively corrected. (2) There are distinct differences in permeability evolution patterns: pure sandy strata exhibit an “instantaneous sharp decline-rapid equilibrium” mode dominated by initial particle rearrangement, while composite strata show a “gradual attenuation-persistent densification” mode, with permeability maintaining a quasi-steady decline driven by a deep clogging mechanism during the observation period. (3) The slurry membrane exhibits time-dependent strengthening characteristics: the heterogeneous internal structure of composite strata enhances the anti-damage capacity of the slurry membrane, resulting in a significantly delayed local breakthrough time compared to single sandy layers, demonstrating superior temporal stability.

Keywords

Shield Tunnel, Composite Strata, Slurry Penetration, Flow Deviation Effect, Slurry Membrane

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市地下空间开发的纵深推进,大直径盾构隧道因其卓越的地层适应性与精细的变形控制能力,已成为跨江越海及复杂敏感环境下隧道工程的主流方案[1][2]。随着开挖直径的增大,施工不可避免地穿越由高渗透砂砾层与低渗透粘性土层交替叠加而成的复合地层[3],这种地层在空间上呈现出极强的物理力学性质不均匀性。

在泥水平衡盾构掘进中,开挖面的稳定性高度依赖于泥浆在土体孔隙中入渗并演化形成的致密泥膜[4]。该工法的核心机制在于:通过向开挖面施加具有特定流变特性的高压泥浆,诱导泥浆固相颗粒在土体孔隙中发生截留与沉积,进而演化为具有极低渗透系数的致密泥膜,泥膜作为压力传递的物理介质,能够将压力转化为对土体的有效支护应力,从而维持开挖面的力学平衡状态[5]-[7]。针对这一过程,已有学者利用高压渗透柱试验渗透速率衰减、泥膜结构演化及渗透系数降低的基本规律[8][9],使用离散元有限元的数值仿真[10][11],深入阐述了颗粒在孔隙结构中的迁移与堆积机制,并定量探讨了浆液级配、流变参数与地层孔隙特征的匹配关系。在此基础上,通过建立泥浆入渗的经验或半经验预测模型,实现对渗透速率、成膜时间及渗透系数演化规律的科学表征。

目前的理论模型往往简化了地层的非均质性，难以准确描述泥浆在多层耦合界面处的运移规律。因此，开展复合地层泥浆渗透实验具有重要的科学价值和工程意义。本实验旨在模拟实际施工中的泥水压力环境，探究不同泥浆配比在多类典型复合地层组合中的渗透演变过程。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料

本试验所用膨润土泥浆由钠基膨润土和羧甲基纤维素钠配制而成。通过控制钠基膨润土的质量分数制备不同浓度的浆液，羧甲基纤维素钠掺量为 0.8%，用于调节泥浆粘度。采用 100 mL 量筒、Mastersizer 3000 激光粒度仪、0.01 g 精度电子天平测得泥浆的密度和颗粒级配。泥浆浓度配置及相关参数表 1 所示。

Table 1. Concentration and basic properties of slurry suspension used in the tests

表 1. 试验用泥浆浓度及基本参数

泥浆编号	浓度	密度(g/cm ³)	d ₅₀ (μm)	d ₉₀ (μm)
SL8	8%	1.045		
SL12	12%	1.076	6.350	48.53
SL16	16%	1.090		

注：d₅₀ 和 d₉₀ 表示小于某粒径的土粒含量为 50%、90% 时对应的颗粒粒径。

预试验发现，在细砂(粒径<0.315 mm)含量较高的条件下，4%浓度泥浆即可形成较为致密的泥膜。为排除细砂影响并突出粘土含量对成膜质量的作用，试验中对砂样进行筛分，去除粒径小于 0.315 mm 的细砂部分。采用筛分得到的 0.315~2 mm 的标准砂(福建砂)和粘土作为地层制备材料。试验所用材料如图 1 所示，用于渗透实验的材料砂土、粘土和钠基膨润土颗粒级配如图 2 所示。

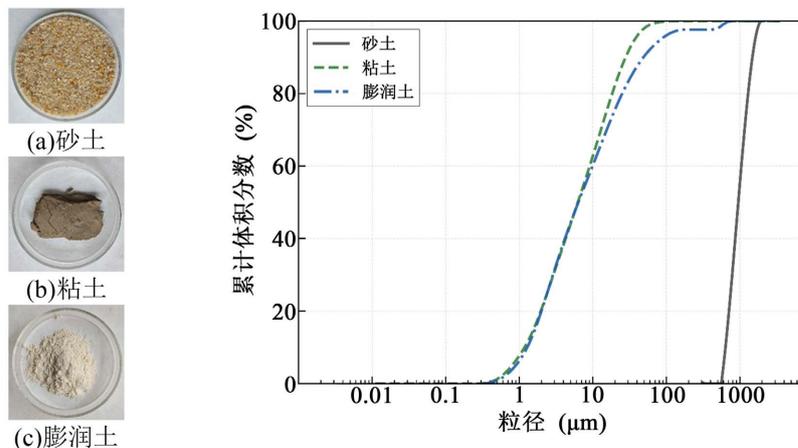


Figure 1. Materials and particle size distribution used in the test

图 1. 试验所用材料和粒径分布

2.2. 试验设备

为了保证试验结果有效，同时便于观察泥浆渗透行为，设计了如图所示的泥浆渗透装置。该装置由压力加载模块、渗透柱和数据采集模块三个部分组成，其中渗透柱两侧共分布有三个孔隙水压力计，

从下到上分别标记为 K1、K2、K3。实验装置如图 2 所示。

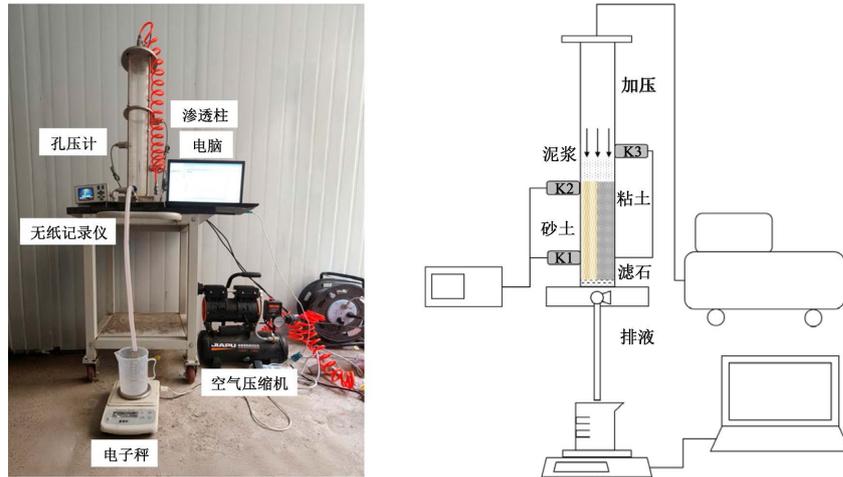


Figure 2. Schematic diagram of the slurry penetration apparatus
图 2. 泥浆渗透装置示意图

2.3. 试验条件

本研究采用分区填筑构建砂 - 粘土复合地层模型，以模拟实际工程中常见的层状交互地质条件。

试验共设计三种砂 - 粘土层厚度比(1:2、1:1、2:1)，其剖面结构示意图如图 3 所示。为系统揭示复合地层中泥浆的渗透特性与成膜机制，同步制备纯砂地层作为对照样本。

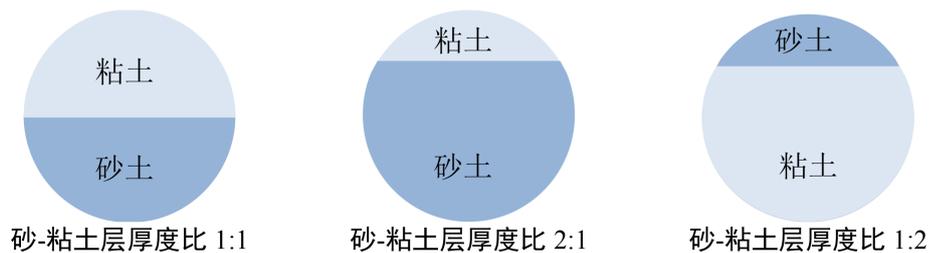


Figure 3. Schematic diagram of the stratum composition
图 3. 地层组成示意图

在泥水平衡盾构隧道施工中，开挖面的稳定性主要通过合理设定泥水支护压力来控制，其取值通常需大于相应地层条件下的静水压力，以防止开挖面发生被动失稳破坏。既有工程案例研究表明，实际支护压力与静水压力之间的差异最大可达 0.15 MPa [12]，因此，在测得地层渗透系数后分别注入浓度为 8%、12%、16% 的 400 ml 的定量泥浆，控制初始泥浆压力分别为 50 kPa，100 kPa，150 kPa 泥浆渗透试验，数据采集模块对孔压计读数和滤失量以 1 Hz 的频率进行记录。

2.4. 试验流程

2.4.1. 恒水头渗透试验

在进行试验前，通过测量福建砂和粘土的比重，最终测得五组 0.315~2 mm 福建砂的比重为 2.54，粘土的比重为 2.59。

在装样时测量装样的地层总质量 m_s ，根据已知装样总体积 V 和密度 ρ_s ，可计算得到砂土孔隙率：

$$n = 1 - \frac{m_s}{V\rho_s} \quad (1)$$

基于达西定律, 采用定水头试验法测定地层渗透系数。试验开始前向直径 8 cm 的渗透柱内装入高度 25 cm 的土样, 根据达西定律采用定水头方法由公式(2)先测量地层的渗透系数 k :

$$k = \frac{Q}{Ai} = \frac{QH}{A\left(\frac{\Delta\sigma}{\rho g} + H\right)} \quad (2)$$

式中, Q 为渗流量, H 为 K1~K4 两监测点的距离, A 为渗透柱截面面积, $\Delta\sigma$ 为 K1~K4 两监测点间孔压计读数差值, ρ 为液体密度, g 为重力加速度。

测得 0.315~2 mm 粒径福建砂的平均孔隙率为 0.36, 渗透系数波动范围在 $1.8\sim 2.4 \times 10^{-3}$ m/s。

2.4.2. 泥浆渗透试验

复合地层泥浆渗透试验按材料准备、地层制备及加压渗透三个阶段依次进行。试验前, 将膨润土泥浆充分搅拌后静置 24 小时, 确保其完全水化; 使用前再次搅拌均匀以消除沉淀影响。为模拟层状交互地质条件, 采用分区填筑法构建砂-粘土复合地层: 首先在模型箱内安装可拆卸隔板划分砂、粘土区域; 随后分层填筑粘土并均匀压实, 移除隔板后以相同方法填筑砂土, 确保各层界面平整且高程一致。填筑过程遵循“分层填筑、均匀压实”原则, 以减小密实度差异与层间界面扰动。试样填筑完成后整平表面, 以保证加载边界条件的均匀性与可重复性。采用滴瓶装置自下而上缓慢注水使地层完全饱和, 期间严格控制流速以防止管涌破坏。待地层饱和稳定后, 采用常水头法依据达西定律测定清水环境下的初始渗透系数。随后将 400 mL 定量泥浆注入渗透柱上方, 并施加初始压力。待压力稳定且数据采集设备以 1 Hz 频率正常运行后, 开启底部阀门开始渗透试验; 当泥浆不再入渗且电子秤读数恒定时, 视为渗透过程结束。

3. 复合地层泥浆渗透试验参数

3.1. 复合地层渗透系数

对于由砂层与粘土层构成的层状非均质多孔介质, 在渗流分析中常可将其理想化为并联渗流模型。假设两种介质在进口与出口边界处具有相同的水头差 Δh , 且沿流向的渗流路径长度 L 相等, 则通过该复合体系的总流量 Q 等于各分层流量之和:

$$Q = Q_s + Q_c \quad (3)$$

其中, 砂土与粘土层中的渗流量分别满足达西定律:

$$Q_s = \frac{k_s A_s}{L} \Delta h, \quad Q_c = \frac{k_c A_c}{L} \Delta h \quad (4)$$

式中, k_s 与 k_c 分别为砂土层与粘土层的渗透系数, A_s 与 A_c 为各自对应的过流截面积, L 为渗流路径长度, Δh 为进出口水头差。

将复合介质视为在同一水力坡降下的并联渗流体系时, 等效渗透系数可由各分区渗透能力的加权平均得到[13]。由此可得复合地层的等效渗透系数 k_{eq} :

$$k_{eq} = \frac{k_s A_s + k_c A_c}{A_s + A_c} \quad (5)$$

大量工程与环境领域研究都报告天然粘土的饱和渗透系数 k_c 通常处于 $10^{-10}\sim 10^{-9}$ m/s 量级[14], 粘土极低渗($k_c \approx 0$)的情况下:

$$k_{eq} = \frac{k_s A_s + k_c A_c}{A_s + A_c} \quad (6)$$

其中 $f_s = A_s/A$ 为砂土层的几何面积比。

两相流量分配比可进一步表示为：

$$\frac{Q_s}{Q_c} = \frac{k_s A_s}{k_c A_c} \quad (7)$$

由于砂与粘土的渗透系数通常相差 5~8 个数量级，即使砂层占比面积 f_s 较小，绝大部分水流将集中于砂层运输。这一现象符合多孔介质中水流优先选择低阻路径的原则，即系统趋于以最小流动阻力分配流量。在砂-粘复合地层的非均质多孔介质中，即使系统整体水头差(Δh)较大，由于砂相具有更高的水力传导系数，入流水分将优先选择沿砂侧运移，从而在入口区域形成显著的水平方向水头梯度。该梯度驱使流线向砂侧汇聚，造成粘土相在近入口区段内有效驱动水头严重不足，其宏观表现为粘土侧在初始阶段几乎不产生明显的达西流入渗。此类现象在砂-粘互层体系中具有典型性，根源在于两相介质渗透性差异悬殊所导致的水力响应时间尺度分离：粘土相渗透时间尺度长，即使在恒定水头差驱动下，其渗流过程仍表现出显著的时间滞后性；而砂相则具备瞬时导流能力。因此，系统在水力驱动的早期阶段乃至向稳态过渡的过程中，砂相主导了绝大部分水流通量，粘土相的渗流发展极为缓慢。

试验测出的初始地层渗透系数如表 2 所示：

Table 2. Initial permeability coefficient of the formation

表 2. 初始地层渗透系数

地层条件	砂层的几何面积比 f_s	并联条件理论预测渗透系数 (m/s)	实测渗透系数 k_{meas} (m/s)	实测相对偏差
纯砂	1.00	-	1.95×10^{-3}	-
砂粘 2:1	0.708	1.381×10^{-3}	1.48×10^{-3}	7.17%
砂粘 1:1	0.500	0.975×10^{-3}	1.30×10^{-3}	33.33%
砂粘 1:2	0.292	0.569×10^{-3}	1.10×10^{-3}	93.32%

由表可见，复合渗透系数实测值整体高于理想并联预测值，且随着粘土面积占比增大，偏差显著放大，表明渗流并未按几何并联均匀分配，而是更倾向于经由砂层侧形成主导通道。

在渗透性强对比的异质多孔介质中，流体与溶质常表现为沿少数高效路径集中迁移的偏流现象。该类现象被认为在异质、饱和与非饱和多孔介质中普遍存在，并且非均质越强，流动路径越集中[15]。当 k_s 与 k_c 相差多个数量级时，即便几何面积上粘土占比增加，实际渗流仍可能优先沿砂侧形成主导通道，导致“有效参与面积”偏离几何面积，从而使 k_{meas} 显著高于 $k_s f_s$ ，并表现出随 f_s 降低而偏差放大的趋势。

引入无量纲砂层有效参与比例：

$$f_{se} = \frac{k_{meas}}{k_s} \quad (8)$$

若渗流严格按几何并联分配，则应有 $f_{se} \approx f_s$ ，为表征偏离程度，定义偏流放大系数：

$$\alpha = \frac{f_{se}}{f_s} = \frac{k_{meas}}{k_s f_s} \quad (9)$$

计算得到的砂层有效参与比例和偏离程度如表 3 所示。

Table 3. Effective participation ratio and degree of deviation of the sand layer
表 3. 砂层有效参与比例和偏离程度

地层条件	砂层的几何面积比 f_s	有效砂参与比例 f_{se}	偏流放大系数 α
纯砂	1.00	1.000	1.000
砂粘 2:1	0.708	0.759	1.072
砂粘 1:1	0.500	0.667	1.333
砂粘 1:2	0.292	0.564	1.932

在经典并联渗流模型中，核心前提是各分支在入口与出口处承受相同的水力梯度，且渗流过程可近似为沿柱体轴向的一维平行流。在有限尺度的土柱实验中，端部进出水构造及界面水力阻抗的差异[16]。

为严格排除侧壁效应(即局部优先流)对渗流结果的干扰，本研究在试验设计与数据处理阶段采取了“物理防渗”与“数据筛查”相结合的双重控制措施。通过内壁均匀涂抹凡士林密封层以消除刚性侧壁与土体界面的微间隙，并辅以分层压实工艺降低装填不均导致的优势通道形成概率。同时，建立了严格的数据筛查机制：若粘土层侧壁或内部存在缺陷引发的优势渗流，其宏观水力响应将表现为渗透流速异常激增及对应孔压瞬时耗散，基于此特征，本研究已精准识别并剔除非有效试验组。

基于上述严密的边界控制与数据筛选，本文所探讨的“偏流现象”可确认为非实验装置侧壁渗流所致。实测复合渗透系数相较理想并联模型仍呈现显著的放大偏差，其物理本质可明确归结为介质渗透性极度不匹配所驱动的流线弯曲与流量重分配，即渗流场二维化效应。鉴于砂相与粘土相渗透系数相差多个数量级，水流优先向阻抗极低的砂相路径汇聚，界面附近诱发的横向水头梯度迫使流线剧烈偏折。本文引入的“偏流放大系数”，正是对这种因流线弯曲导致有效过流面积动态缩减的真实宏观物理表征。

偏流放大系数 α 随粘土占比升高呈显著增大趋势，表明渗透性对比度的增强会放大边界条件引起的流量重分配效应。其机理可概括为正反馈机制：非均质性越强，流量越倾向于经由高渗砂相形成主导通道；而通道化流动进一步削弱粘土相的有效水力参与，使并联模型“各分支同梯度、均匀分流”的基本假设在该实验体系中逐步失效。由此，实测复合渗透系数更可能反映砂相主导通道控制下的表观等效渗流能力，揭示了极端非均质条件下传统并联模型的适用性边界。

3.2. 泥膜两侧压力差

泥膜两侧压力差是评价泥膜气密性及结构稳定性的核心指标，图 6 中直观展示了三种典型的压力响应模式：致密泥膜形成模式(图左)表现为压力差迅速攀升并长期稳定在 110 kPa 左右，标志着具备优异气密性的优质泥膜已形成；泥膜击穿破坏模式(图中)呈现出“缓慢衰减 - 急剧下降”的两阶段特征，揭示了弱结构泥膜在持续压力梯度下由孔压消散发展至结构失稳的演化过程；而快速渗透失效模式(图右)则显示压力差在 25 秒内迅速线性衰减至零，表明泥浆颗粒未能形成有效阻滞，导致整体快速流失。压力差曲线的演化形态能够清晰地反映泥膜从有效封闭地层到完全失效的力学行为差异。

3.3. 滤失量

滤失量作为泥浆在“土体 - 泥膜”界面过滤过程的宏观表征，可直接反映泥膜的致密性与气密性。当泥膜连续致密形成时，其等效孔隙通道压缩导致渗流阻力增大，滤失速率逐渐下降，累计滤失量呈现“增长减缓 - 趋于平台”的演化形态。一旦泥膜内部出现贯通孔道或因气压作用发生局部破坏，空气突破将引发排水量突增，滤失曲线重新进入快速增长阶段，该拐点可视为泥膜失稳的直接信号[17]。实验研究表明，滤失量随时间呈现清晰的阶段性拐点：拐点对应气密保持阶段，累计排水趋于稳定；而空气

击穿后排水陡增，标志着泥膜气密性丧失。泥膜完全封闭空气时，累计滤失量稳定于某一平台，其数值越小，表明泥膜致密性越高、封堵性能越优。

3.4. 泥膜等效渗透系数

在相同试验条件下，不同地层类型的滤失量与泥膜两侧压差随时间的变化过程存在明显差异。等效渗透系数是反映地层-泥膜体系整体渗透能力的重要指标。Min 等[18]研究指出，泥浆渗透量趋于稳定的过程通常伴随着泥膜结构的逐渐致密。随着渗透过程的推进，泥浆中细颗粒逐渐在孔隙喉道处沉积并形成堵塞结构，等效渗透系数随之迅速下降，当等效渗透系数下降至稳定值并在一定时间内保持基本不变时，可认为泥膜已基本形成。Xu 等[5]在此基础上提出了等效渗透系数的概念，并对达西定律进行了扩展，用以计算特定浆液条件下泥膜的渗透系数，从而实现对泥膜闭气性能的定量分析。

$$k_b = \frac{\Delta L_s Q}{\Delta \phi' A} \quad (10)$$

式中， ΔL_s 为砂柱厚度； Q 为滤失量； $\Delta \phi'$ 为泥膜生成区间的水头差； A 为截面面积。

在等效渗透系数的计算中加入砂层的偏流影响，得到

$$k_b = \frac{\Delta L_s Q \alpha}{\Delta \phi' A} \quad (11)$$

3.5. 佩克莱特系数

在泥浆渗透研究中，佩克莱特系数 Pe 常用于刻画泥浆在孔隙介质中的对流运输与排水-固结(渗透-沉积/压密)过程之间的相对主导性，从而识别“冒浆阶段”向“成膜阶段”的转变。按照 Talmon 等[19]提出的表述，泥浆渗透可分为冒浆阶段与成膜阶段，二者分别对应泥浆的近似“不排水”与“排水-固结”行为，其转变可用 Pe 表征：

$$Pe = \frac{v_p D_H}{c_v} \quad (12)$$

式中， Pe 为佩克莱特数； v_p 为孔隙流体速度； c_v 为 Terzaghi 固结系数； D_H 为水力孔径； $D_H = 2d_{10}$ 。

已有研究表明，当 $Pe > 10$ 时，对流运输占主导，泥浆表现为不排水特征；当 $Pe < 10$ 时，排水与固结作用增强并逐渐主导过程[19]。因而，试验过程中 Pe 随时间降低，可用以指示渗透机制由冒浆阶段向泥膜/泥膜形成阶段的过渡。

依据 Punmia 的颗粒堆积理论及土力学经验公式[20]，地层的等效孔隙直径 D_H 与有效粒径 d_{10} 之间存在显著的正相关关系。考虑到天然地层的非均匀性及堆积状态，该比例系数通常介于 0.2 (致密堆积)~0.4 (疏松堆积)之间。在泥浆渗透风险评估中，通常采用 0.2 作为保守估算的临界孔径值，以判断泥浆颗粒能否有效形成泥膜。因此，采用 $D_H = 2d_{10}$ 作为计算 Pe 的依据，相关物理参数如表 4 所示。

Table 4. Physical parameters of the slurry

表 4. 泥浆相关物理参数

泥浆浓度	粘度 μ (mPa·s)	太沙基固结系数 c_v * (m ² /s)
8%	5.46	1.45×10^{-8}
12%	9.83	1.26×10^{-8}
16%	17.24	6.02×10^{-9}

* c_v 值通过对 Talmon 等的实验数据进行拟合确定。

4. 结果分析

4.1. 泥浆渗透试验现象

泥浆渗透实验形成泥膜形态如图 4 所示，图 4(a)中，泥膜表面连续、均匀致密，平整度高且无明显孔洞，表明泥浆细颗粒在渗流作用下有效沉积并封堵地层孔隙；图 4(b)中，泥膜整体连续但局部出现渗透孔洞，反映渗流场的空间非均匀性，泥膜致密性与稳定性有所下降；图 4(c)中，泥膜表面存在大量孔洞及破坏区，完整性丧失，表明泥膜已发生失稳并形成贯通通道，导致泥浆快速渗流。

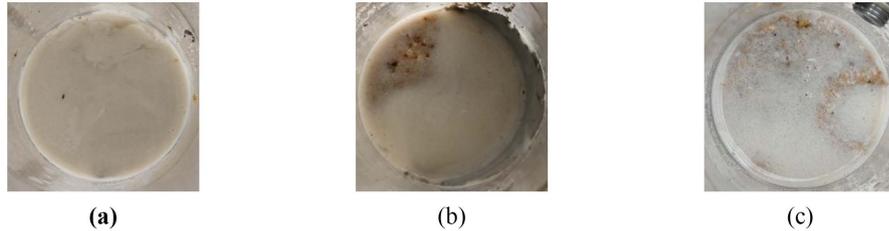


Figure 4. Surface morphologies of various filter cakes Surface appearance of different filter cakes
图 4. 各类泥膜俯视图

4.2. 泥膜分类

试验成膜观测结果如表 5 所示，其中“√”表示形成清晰连续泥膜，“○”表示初期成膜但内部出现孔洞并引发后续渗透，“×”表示几乎未成膜。在 16% 泥浆浓度下，纯砂地层(粒径 0.315~2 mm)未能形成稳定泥膜；而复合地层中，随着粘土比例增加，泥膜逐渐趋于致密。

Table 5. Filter cake formation in the slurry penetration test
表 5. 泥浆渗透试验成膜情况

地层条件	渗透压力(kPa)	泥浆浓度		
		8%	12%	16%
纯砂	50	×	×	√
	100	×	×	○
	150	×	×	×
砂粘 2:1	50	×	○	√
	100	×	×	○
	150	×	×	×
砂粘 1:1	50	×	×	√
	100	×	×	√
	150	×	○	○
砂粘 1:2	50	×	√	√
	100	×	√	√
	150	×	√	√

根据图 5 泥膜两侧压力差和滤失量随时间的变化曲线特征, 将泥膜分为 I 类泥膜, II 类泥膜, III 类泥膜三种典型类型。

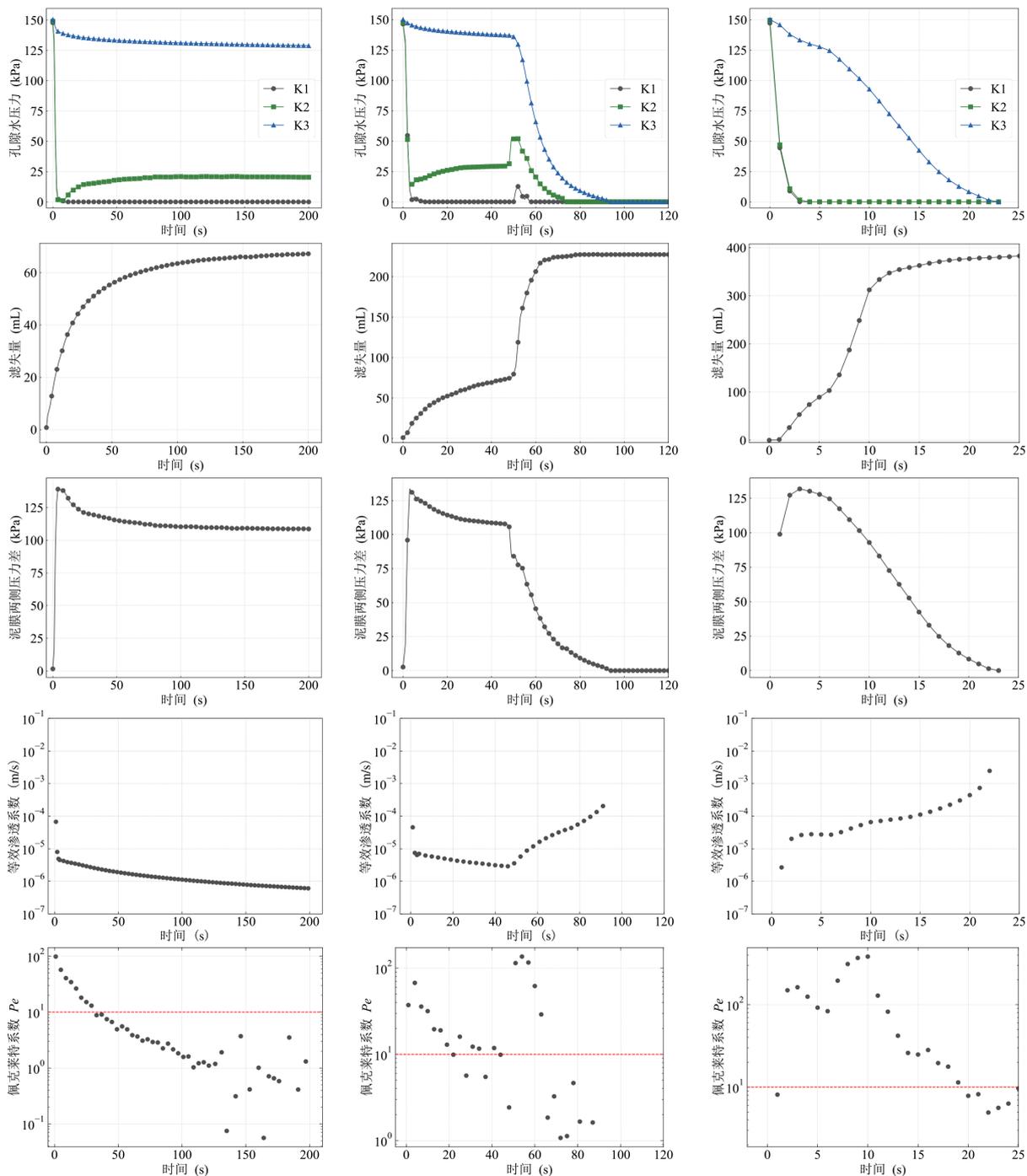


Figure 5. Schematic diagram of the stratum composition

图 5. 泥浆渗透试验参数的变化

I 类泥膜以泥浆质量分数 16%、砂 - 粘土配比 1:2 的工况为代表。试验初期, 等效渗透系数快速衰减, 表明泥浆颗粒在孔隙中沉积堵塞; 随泥膜形成, 滤失量与压差趋于稳定, 总滤失量较低, 最终试样表面

形成连续致密泥膜。该类泥膜结构完整、致密性高，具备良好压差保持能力，等效渗透系数逐渐降至稳定，表征有效的表面封堵。初期呈现短暂“瞬时喷涌”，佩克莱特系数 Pe 在 30 s 内由 >10 骤降至临界值以下，反映系统从对流主导向扩散主导的迅速转变，证实泥浆颗粒与孔隙粒径匹配良好，通过高效架桥阻断深部运移。

II 类泥膜以泥浆质量分数 16%、砂 - 粘土配比 1:1 的工况为代表。试验初期，压差呈平缓下降趋势，等效渗透系数逐步减小，表明泥浆在孔隙中形成了初期阻滞结构。然而，在持续渗透压力作用下，泥膜发生局部击穿，导致滤失量突增、压差骤降、等效渗透系数大幅回升。试验结束后，泥膜表面残留少量孔洞，反映出该类泥膜初期虽具备一定压差保持能力，但难以抵御持续压力而发生失效。其等效渗透系数呈先降后升的演化特征，表明未能建立稳定的表面封堵结构。50 s 时 Pe 剧烈反弹并再次超过临界值 10，说明初期封堵强度不足，颗粒发生深部迁移导致过流通道重开，地层面临突发失稳风险。

III 类泥膜以泥浆质量分数 16% 的纯砂工况为代表。在整个试验周期内，等效渗透系数始终处于高位波动，渗透速率极快；泥膜两侧压差迅速衰减至零，滤失量接近初始加入量(约 400 mL)，表明泥浆流动几乎未受阻滞。试验结束后，试样表面未见连续泥膜，仅存在贯通孔洞或少量颗粒局部聚集，结构疏松、完整性差，几乎不具备压差保持能力。 Pe 始终维持在 $10^1 \sim 10^2$ 的高位区间震荡，表明渗流始终受对流主导。泥浆以近似自由流的形式穿透砂层，开挖面无法建立有效支护压力。

根据图 7 所示的不同泥膜成膜过程，各滤失量曲线在渗透初期均呈现快速增长，随后因成膜行为为差异而显著分化：I 类泥膜滤失量缓慢增长并逐渐趋于稳定平台，整体滤失量显著低于其他工况，表明形成了连续致密的封堵结构，渗流进入由泥膜控制的稳定阶段；II 类泥膜滤失量呈阶段性变化——初期增长减缓，反映泥膜生成并对渗流产生抑制；随后曲线陡增，对应泥膜在持续渗透压力下发生局部击穿，导致滤失加速累积；III 类泥膜：滤失量在极短时间内迅速攀升至高位，曲线陡峭且无明显平台，表明泥浆直接贯通地层孔隙，未形成有效阻隔结构。

值得注意的是，与单一砂土地层相比，复合地层在形成 II 类泥膜后其有效稳定维持时间显著延长。图 6 中复合地层对应的蓝色曲线在较长时间内保持相对稳定，泥膜击穿时间明显滞后于砂土地层(灰色曲线)，表明复合地层条件下 II 类泥膜具有更强的时效稳定性和抗破坏能力。

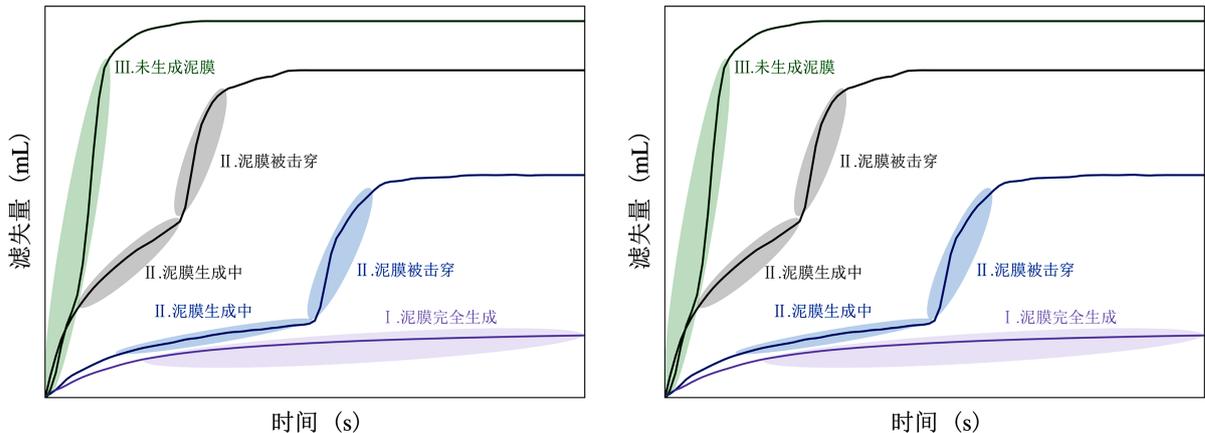


Figure 6. Main formation stages of various filter cakes

图 6. 各类泥膜生成的主要阶段

4.3. 地层条件对泥膜形成的影响

由表 4 结果可知，泥膜的形成是多因素耦合作用的结果。泥膜的形成受地层条件、泥浆浓度及渗透

压力的共同控制。泥浆浓度升高可增加颗粒供给量，增强颗粒架桥与沉积作用，从而促进泥膜形成。渗透压力为泥浆颗粒输运提供动力，但其作用具有一定限度，适中的压力有利于泥膜稳定生成，而过低或过高压力均可能抑制成膜。

如图 7 所示，含粘土比例较高的复合地层中，泥浆在砂土孔隙中逐渐沉积，形成致密滤饼，渗透柱表面可观察到均匀的泥膜覆盖，滤失量增长缓慢且压力差逐渐增大，表明泥浆渗透受阻，渗流通道基本被封堵。此类型反映了泥浆滤饼的良好成膜能力。孔洞型渗透柱当地层中粘土含量适中或分布不均时，泥浆滤饼形成不连续，砂层孔隙中存在渗透薄弱环节，渗透液沿孔洞集中流动。渗透柱表面呈现不规则泥膜覆盖，局部滤失量明显高于其他区域，压力差曲线波动较大。直接渗透型渗透柱在砂土主导的单一地层中，泥浆几乎不形成有效滤饼，渗透液能够直接穿透整个渗透柱。滤失量快速上升，压力差基本平稳，渗透阻力较低，泥浆渗透行为以直接流动为主。

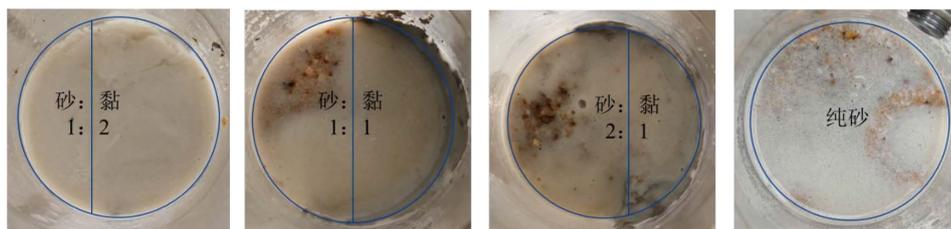


Figure 7. Slurry membrane formation characteristics in composite strata
图 7. 复合地层泥膜生成特征

如图 7 所示，复合地层对应的蓝色曲线在较长时间内保持相对稳定状态，砂土地层对应灰色曲线，复合地层泥膜击穿时间显著滞后于砂土地层，表明复合地层条件下 II 类泥膜具有更强的时效稳定性和抗破坏能力。

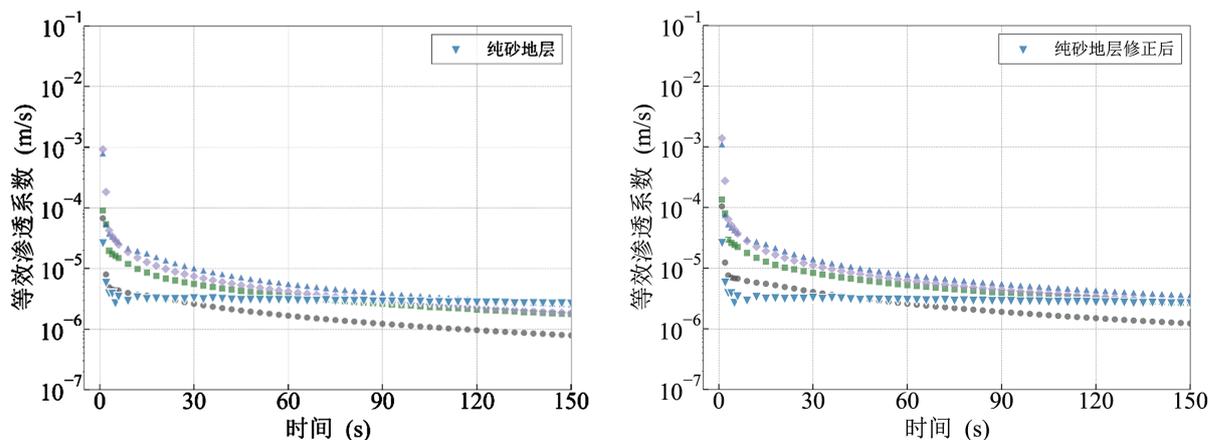


Figure 8. Equivalent permeability coefficient of the filter cake
图 8. 成膜的等效渗透系数

泥浆成膜的等效渗透系数如图 8 所示，其中蓝色代表纯砂地层，其余为复合地层。纯砂地层的等效渗透系数在实验初期呈现出瞬时陡降特征，并迅速收敛至相对稳定的数量级。这表明单一组分砂土孔隙结构较为稳定，其渗透性的降低主要受初期颗粒重排及宏观压差建立的影响。相比之下，砂粘复合地层的渗透系数下降过程更为缓滞且持久。在初始陡降期后，曲线并未立即进入水平稳定阶段，而是表现出长期的准稳态缓慢衰减趋势。

同时图 8 通过引入几何过流面积比例与修正系数的参量化处理, 计算结果更真实地纠正了非均匀结构带来的系统误差, 成膜后的等效渗透系数趋于 10^{-6} m/s 量级, 与徐涛等[21]报道的优质泥膜渗透性指标相符。

地层条件作为泥浆渗透与成膜过程的内因, 对等效渗透系数的演化模式起到了决定性的控制作用。其影响主要体现在以下几个维度。

1) 孔隙结构对成膜门槛的控制作用地层的几何物理特性决定了泥膜形成的难易程度。粘土含量高且孔隙尺度小的地层, 能够有效地促使泥浆中的细颗粒在孔隙入口处发生滞留与堆积, 从而显著提高成膜效率。相比之下, 纯砂地层由于孔隙连通性极强且粒径单一, 颗粒在渗透初期难以形成有效的架桥结构, 导致其成膜困难。

2) 渗透演化模式的非对称性响应地层组成的差异导致了截然不同的渗透响应模式。纯砂地层快速平衡: 纯砂地层的等效渗透系数在实验初期呈现出瞬时陡降特征, 并迅速收敛至相对稳定的数量级。泥浆在通畅的砂土孔隙中快速发生颗粒沉积, 短时间内形成的初步外泥膜使主通流路径受限, 体系水力阻力随之趋于平衡。复合地层缓滞衰减: 与单一地层相比, 砂粘复合地层的渗透系数下降过程更为缓滞且持久。在跨越初始剧变期后, 曲线并未进入水平稳态, 而是保持长期的准稳态缓慢衰减趋势。

3) 深层堵塞与动态致密化机制复合地层特有的渗透表现归因于其内部的深层堵塞机制与颗粒重排效应。在持续压差驱动下, 微细粘粒在砂骨架孔隙中发生动态迁移, 导致有效过流断面随时间持续收缩。这种屏蔽层的结构并非瞬时完成, 而是在持续滤失过程中, 通过颗粒堆积结构的不断重排与压缩实现动态优化。

4) 物理化学效应对时效稳定性的强化复合地层中的粘土成分通过物理化学作用进一步削弱了地层的渗透性。粘土颗粒与水接触后的水化膨胀, 以及颗粒表面的电性吸附作用, 均显著增加了微尺度通道内的流动阻力, 使体系的抗渗封堵性能随时间累积增强。实验数据表明, 复合地层形成的 II 类泥膜在时效稳定性与抗击穿能力上显著优于纯砂地层, 其泥膜击穿时间明显滞后。

4.4. 偏流效应对大直径盾构开挖面稳定性的工程启示

1) 偏流效应在开挖面稳定性中的致灾机制: 在大直径泥水盾构穿越软硬交互的复合地层时, 砂相与粘土相的渗透系数通常存在显著差异。这种极端的渗透性非均质性导致开挖面不可避免地产生显著的“偏流效应”。在此效应驱动下, 高压泥浆优先沿高渗的砂层通道大量侵入, 导致该区域滤失量激增; 而相邻的粘性地层区域则因水力驱动势能减小, 难以建立起促使固相颗粒有效沉积的水力梯度。宏观上, 这表现为复合地层表面形成的泥膜厚度与致密程度存在极大的空间非均匀性, 特别是在砂-粘交界面处, 极易演变为应力集中与渗流突破的薄弱节点。在持续水力梯度作用下, 该界面极易诱发局部击穿(呈现出典型的 II 类泥膜破坏特征), 进而引发开挖面局部乃至整体的失稳破坏。

2) 基于抗偏流机制的支护参数与流变性调控策略: 针对存在严重偏流效应的地层, 单纯提高泥水室设定压力并非可靠的应对方案。由于高渗通道具有优先导流性, 持续增大的支护压力会优先向砂层释放。此举不仅无益于粘土侧的泥膜发育, 反而易突破砂层的临界抗渗阈值诱发管涌。

试验结果证实, 采用高浓度(如 16%)的泥浆体系, 能够加速固相颗粒在砂层大尺度孔隙中的截留与堆积, 进而促发“深层堵塞”机制。砂相主导通道一旦被有效封堵, 其局部等效渗透系数将发生骤降, 进而强制复合介质内部渗流场趋于均匀化。流场的重分配将有效驱动成膜压差向粘土层表面转移, 最终保障整个开挖面上连续、致密泥膜的生成。利用“缓滞衰减”特性优化保压时序: 基于本文揭示的复合地层泥浆渗透“缓滞衰减-持续致密”演化规律, 工程应用中应充分认识到泥膜结构发育的时滞性。在盾构切入复合地层初期或停机阶段, 应适度延长稳定支护压力的保持时间。这一操作可为细微颗粒在孔隙

深层的动态运移、重排及骨架压密提供充足的时间窗口，避免因盲目快速掘进或频繁波动泥水压力而破坏尚处于成膜期的脆弱泥膜。

5. 结论

针对大直径泥水盾构穿越软硬交互砂-粘复合地层时面临的开挖面护壁难题，本文通过自主研发的高压泥浆渗透柱试验系统及理论分析，深入揭示了复合地层泥膜形成的宏微观机制与演化规律。主要结论如下：

1) 揭示了复合地层泥浆渗透的偏流效应及其定量修正方法。砂与粘性介质悬殊的渗透性差异是导致渗流场发生偏流现象的根本原因。实测表明，复合地层渗透系数普遍高于理想并联模型的理论预测值，且该正偏差随粘土含量的增加呈非线性加剧。通过引入偏流放大系数，建立的参数化修正模型有效量化了非均质结构导致的有效过流面积偏差，解决了传统理论模型在复合地层中适用性差的问题。

2) 阐明了复合地层“缓滞衰减-持续致密”的渗透演化模式明确了地层结构对渗透性演化的控制作用：纯砂地层表现为颗粒重排主导的“瞬时陡降-快速平衡”模式；而复合地层则呈现独特的“缓滞衰减-持续致密”模式。该模式表明，在深层堵塞机制驱动下，复合地层的孔隙通道在观测期内保持准稳态的持续闭合趋势，而非迅速达到平衡，这为泥膜致密化提供了更长的时间窗口。

3) 证实了非均质结构对泥膜时效稳定性的增强机制试验表明，复合地层内部复杂的非均质结构优化了渗流路径与应力分布，显著增强了泥膜抵抗局部破坏的能力。与单一砂层相比，复合地层泥膜的局部击穿时间显著延后，表现出优异的时效增强特性，证明了适量的粘性组分有助于提升泥膜在长期高压作用下的支护可靠性。

4) 工程实践中，建议依据泥膜“缓滞衰减”特性，在开挖初期强化保压措施以补偿抗渗不足，并利用地层自稳能力优化后期泥浆配比，从而实现开挖面支护安全性与经济性的平衡。

参考文献

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998(1): 112-113.
- [2] 朱伟, 钱勇进, 闵凡路, 等. 中国泥水盾构使用现状及若干问题[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 724-735.
- [3] Zhang, D., Chen, S., Wang, R., Zhang, D. and Li, B. (2021) Behaviour of a Large-Diameter Shield Tunnel through Multi-Layered Strata. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **116**, Article 104062. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104062>
- [4] 陈仁朋, 尹鑫晟, 李育超, 等. 泥水盾构泥膜渗透性及其对开挖面稳定性影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2102-2108.
- [5] Xu, T. and Bezuijen, A. (2019) Experimental Study on the Mechanisms of Bentonite Slurry Penetration in Front of a Slurry TBM. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **93**, Article 103052. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103052>
- [6] Anagnostou, G. and Kovári, K. (1994) The Face Stability of Slurry-Shield-Driven Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **9**, 165-174. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0886-7798(94)90028-0)
- [7] 毛家骅, 袁大军, 杨将晓, 等. 砂土地层泥水盾构开挖面孔隙变化特征理论研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2283-2292.
- [8] Jin, D., Shen, Z., Song, X., Yuan, D., Mao, J. and Yang, H. (2023) Numerical Analysis of Slurry Penetration and Filter Cake Formation in Front of Tunnel Face. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **140**, Article 105303. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105303>
- [9] Qin, S., Xu, T., Zhou, W. and Bezuijen, A. (2023) Infiltration Behaviour and Microstructure of Filter Cake from Sand-Modified Bentonite Slurry. *Transportation Geotechnics*, **40**, Article 100963. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100963>
- [10] Zhang, Z. and Yin, T. (2018) A Coupled CFD-DEM Simulation of Slurry Infiltration and Filter Cake Formation during Slurry Shield Tunneling. *Infrastructures*, **3**, Article 15. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3020015>

-
- [11] Lin, Y., Fang, Y. and He, C. (2022) Numerical Study on Clogging Mechanism of Slurry Infiltration in Porous Media Based on Coupled CFD-DEM Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **128**, Article 104622. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104622>
- [12] 刘学彦, 王复明, 袁大军, 等. 泥水盾构支护压力设定范围及其影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 908-917.
- [13] Woessner, W. and Poeter, E. (2020) Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow. The Groundwater Project. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-2-0>
- [14] Hamdi, N. and Srasra, E. (2013) Hydraulic Conductivity Study of Compacted Clay Soils Used as Landfill Liners for an Acidic Waste. *Waste Management*, **33**, 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.012>
- [15] Zehe, E., Loritz, R., Edery, Y. and Berkowitz, B. (2021) Preferential Pathways for Fluid and Solutes in Heterogeneous Groundwater Systems: Self-Organization, Entropy, Work. *Hydrology and Earth System Sciences*, **25**, 5337-5353. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5337-2021>
- [16] Lewis, J. and Sjöström, J. (2010) Optimizing the Experimental Design of Soil Columns in Saturated and Unsaturated Transport Experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, **115**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2010.04.001>
- [17] Yang, Y., Jin, D., Zhu, L., Yuan, D., Xu, C., Li, Y., et al. (2025) Development of Polymer-Modified Slurry for Chamber Opening under Pressure in Slurry Shield Tunneling. *Engineering Structure and Civil Engineering*, **19**, 2105-2116. <https://doi.org/10.1007/s11709-025-1260-x>
- [18] Min, F., Zhu, W. and Han, X. (2013) Filter Cake Formation for Slurry Shield Tunneling in Highly Permeable Sand. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **38**, 423-430. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.024>
- [19] Talmon, A.M., Mastbergen, D.R. and Huisman, M. (2013) Invasion of Pressurized Clay Suspensions into Granular Soil. *Journal of Porous Media*, **16**, 351-365. <https://doi.org/10.1615/jpormedia.v16.i4.70>
- [20] Punmia, B.C. and Jain, A.K. (2005) Soil Mechanics and Foundations. Firewall Media.
- [21] 徐涛, 史庆锋, 章定文, 等. 泥水盾构开挖面泥膜渗透特性与压力传递机制[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1878-1887.