DOI:10.11918/202504005

钙质砂地层泥水平衡盾构隧道开挖面成膜特性的宏细观试验研究

袁昊祯[1,2],张子新[1,2],黄 昕[1,2],李 昀[3]

(1.同济大学 地下建筑与工程系,上海 200092;2.岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学),上海 200092;
3.中船第九设计研究院工程有限公司,上海 200063)

摘 要:作为浅部珊瑚礁地层的主要介质,钙质砂由造礁珊瑚等海洋生物碎屑构成,其独特的孔隙结构特征与表面形貌显著区别于传统陆源砂,这对泥水平衡盾构施工中关键的开挖面泥浆渗透成膜特性具有重要影响。为深入揭示南海钙质砂地层泥浆渗透的宏细观作用机制,本研究创新研制了适配CT扫描的微型泥浆渗透柱试验系统。通过配制不同质量分数钠基膨润土泥浆开展成膜试验,并运用CT扫描成像技术实现了砂柱细观构造与泥浆颗粒空间分布规律的可视化表征。研究结果表明:1)在孔隙特征方面,在相同级配条件和制样方法下,钙质砂较陆源砂具有更高的孔隙率和渗透性能,这与其多棱角颗粒形态和内部孔隙结构密切相关;2)在渗透系数敏感性方面,两类砂体的渗透系数均与孔隙率呈显著线性正相关,但钙质砂渗透系数对孔隙率变化的敏感性较陆源砂更高;3)在泥膜质量方面,在同类型砂样中进行泥浆渗透时,越大的粒径越不利于泥膜的生成;4)在临界渗透阈值方面,界定$1\times10^{-5}\sim1\times10^{-4}$ mm/s为等效渗透系数的临界区间,当渗透系数低于该阈值时,泥膜闭气性能显著增长;5)在细观机制方面,CT三维重构显示泥浆颗粒受分子间作用力影响呈现出不均匀的分布特征,泥浆渗透后孔隙和喉道尺寸明显降低,孔隙间的连通性量化指标显著变差,这也是导致砂柱整体渗透性能下降的主要细观机制。

关键词:钙质砂地层;泥浆渗透;计算机断层扫描;泥膜;三维重构

中图分类号:U455.43 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0001-11

Macro-microscopic experimental study on filter cake formation characteristics in calcareous sand formations during slurry pressure balance shield tunnel excavation

Yuan Haozhen[1,2], Zhang Zixin[1,2], Huang Xin[1,2], Li Yun[3]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Shanghai 200092, China; 3. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: As the primary medium in shallow coral reef formations, calcareous sand composed of marine bioclastic debris from reef-building corals exhibits unique pore structure characteristics and surface morphology that significantly differ from traditional terrigenous sand. These distinctions profoundly influence the critical mud infiltration and membrane formation characteristics at excavation faces during slurry shield tunnelling. To comprehensively reveal the macro-microscopic mechanisms of slurry infiltration in South China Sea calcareous sand strata, this study innovatively developed a CT-compatible miniature slurry infiltration column test system. Membrane formation experiments were conducted using sodium bentonite slurries of varying concentrations, with CT scanning technology employed to visualize the microscopic structure of sand columns and spatial distribution patterns of slurry particles. The research findings indicate: 1) Pore characteristic differences: Under identical gradation conditions and sample preparation methods, calcareous sand demonstrates higher porosity and permeability compared to terrigenous sand, attributed to its polygonal particle morphology and internal pore structure. 2) Permeability coefficient sensitivity: Both sand types show significant linear positive correlations between permeability coefficients and porosity, but calcareous sand exhibits higher sensitivity to porosity variations. 3) Difference in filter cake quality: When slurry infiltration is performed in the same type of sand samples, the larger the grain size, the more unfavorable it is for filter cake formation. 4) Critical permeability threshold: An equivalent permeability coefficient range of 1×10^{-5} to 1×10^{-4} mm/s is identified as the critical interval, where filter cake air-blocking performance improves markedly when permeability coefficients fall below this threshold.

收稿日期:2025-04-02;**录用日期**:2025-05-07;**网络首发日期**:2025-08-07
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250807.1339.002
基金项目:国家自然科学基金(52278407);上海市社会发展领域重大项目(21DZ1201103)
作者简介:袁昊祯(1998—),男,博士研究生;张子新(1966—),男,教授,博士生导师
通信作者:黄 昕,xhuang@tongji.edu.cn

5) Microscopic mechanism analysis: CT 3D reconstruction reveals that slurry particles display non-uniform distribution patterns influenced by intermolecular forces. Post-infiltration observations show significant reductions in pore and throat sizes, along with deteriorated quantitative indicators of pore connectivity, constituting the primary microscopic mechanism for decreased overall permeability in sand columns.

Keywords: calcareous sand strata; slurry infiltration; computed tomography scanning; filter cake; three-dimensional reconstruction

南海诸岛及其海域是中国五大海区中最大、最深的海区,也是中国珊瑚礁的主要分布地区。随着“21世纪海上丝绸之路”建设的深入推进,南海的地理位置和资源潜力使其成为国际关注的重点。特别是在能源、矿产资源和水产资源的开发上,南海的潜力巨大。与此同时,随着该区域海洋工程项目的增多,涉及水下隧道、岛屿开发等多个领域[1-2]。

泥水平衡盾构技术作为水下隧道建设的核心技术之一,因其能够有效控制地层扰动、保持开挖面稳定,已成为水下隧道建设的首选方案。该工法通过向开挖面注入高密度泥浆,使泥浆颗粒在开挖面沉积,形成低渗透性致密泥膜,有效抑制水土流失。通过利用泥浆压力与地层水土压力的动态平衡原理来实现支护,从而保持开挖面稳定[3-4]。已经有大量学者通过室内试验[5-6]、数值模拟[7-8]等手段,研究了泥水平衡盾构开挖面泥膜的生成机理,探讨了浆液质量分数、配比变化对不同孔隙条件下地层浆液封堵效果的影响,并结合渗透柱试验建立了经验或半经验模型,用以描述泥浆渗透过程,并预测泥浆渗透时间对渗透系数的影响[9-11]。但面对南海特殊的珊瑚礁地质环境,传统理论模型面临严峻挑战。

在南海地区,珊瑚礁地层中的未胶结钙质砂广泛分布于0~18 m浅表区域,其工程特性与陆源砂存在显著差异。钙质砂的颗粒形态学特征表现为:1)多棱角的不规则几何形态[12-13];2)高达30%~50%的生物内孔隙率[14-16]。由于钙质砂颗粒内孔隙的发育,其天然堆积状态下的孔隙率明显高于陆源砂[17]。而在相同孔隙率条件下,钙质砂又相较于陆源砂具有更低的渗透系数[1]。当泥浆渗入此类地层时,颗粒内孔隙引发的毛细阻滞效应与不规则形态导致的渗径曲折化将显著改变泥浆运移规律,直接影响泥膜形成质量。

基于此,本文设计了不同质量分数的定量泥浆,开展钙质砂地层的泥膜成膜试验,旨在探究钙质砂地层的泥膜成膜特性。为了更好地理解钙质砂地层中泥浆的成膜机理,传统的扫描电子显微镜(SEM)虽然能够提供微观形貌[12-16],但其二维显示的局限性使得无法全面掌握泥膜在三维空间中的形成过程。因此,本文采用无损的CT扫描技术,深入研究钙质砂地层的泥浆成膜机理,并对泥浆成膜后的孔隙网络特征进行定量分析,为日后南海地区的水下隧道建设提供理论支持和技术依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验所用膨润土泥浆采用钠基膨润土和羧甲基纤维素钠制成。通过控制钠基膨润土质量分数制备成不同质量分数的浆液,羧甲基纤维素钠添加质量分数为0.8%,用于调节泥浆黏度。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。6组泥浆的质量分数配置及相关参数如表1所示。

表1 试验用泥浆质量分数及基本参数

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

泥浆编号	质量分数/%	密度/(g·cm^{-3})	d_{50}/μm	d_{90}/μm
CS4	4	1.021	16.512	47.098
CS6	6	1.039	16.512	47.098
CS8	8	1.042	16.512	47.098
CS10	10	1.063	16.512	47.098
CS12	12	1.072	16.512	47.098
CS16	16	1.089	16.512	47.098

注:d_{50}和d_{90}分别为小于某粒径的土粒质量分数为50%、90%时对应的颗粒粒径。

参考《土力学》以及相关试验工况[18],采用0.315~<0.63 mm和0.63~1.25 mm两种不同粒径的钙质砂作为地层制备材料,同时通过对标准砂(福建砂)进行筛分得到相同级配的陆源砂进行对比分析,浆液和地层的粒径分布如图1所示。

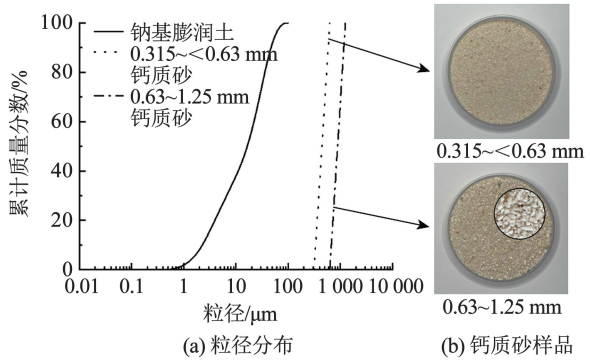


图1 浆液和钙质砂的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of slurry and calcareous sands

两个级配的钙质砂实物照片如图 1 所示，肉眼可观察到 0.63 ~ 1.25 mm 粗粒径的钙质砂颗粒程片状或枝状，棱角度较高，形状不规则。

1.2　试验设备及方法

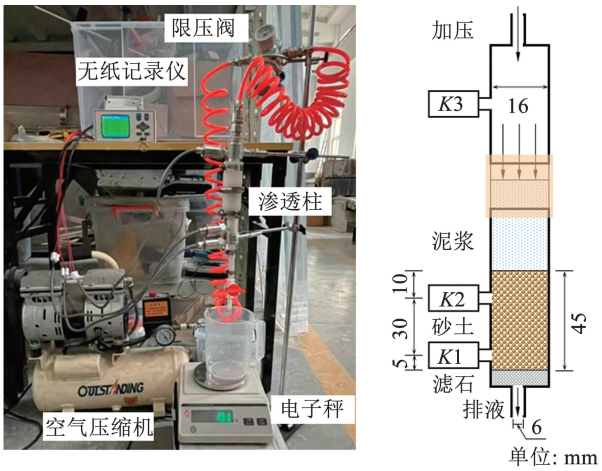
为了在保证试验结果有效的前提下控制后续 CT 扫描的精度，设计了如图 2 所示的微型泥浆渗透装置。该装置由压力加载模块、渗透柱和数据采集模块 3 个部分组成，其中渗透柱侧方分布有 3 个孔隙水压力计，从下到上分别标记为 $K1$、$K2$、$K3$。

试验开始前向直径 16 mm 的渗透柱内装入高度 45 mm 的砂样，根据达西定律采用定水头方法由式(1)先测量地层的渗透系数 k：

$$k=\frac{Q}{Ai}=\frac{QH}{A\left(\frac{\Delta\sigma}{\rho g}+H\right)} \tag{1}$$

式中：Q 为渗流量，H 为 $K1$、$K2$ 两监测点的距离，A 为砂柱截面面积，$\Delta\sigma$ 为 $K1$、$K2$ 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。

在泥水平衡盾构隧道中，泥水盾构支护压力设定范围是根据开挖面的水土压力决定的，为了在开挖过程中维持开挖面稳定，避免发生被动失稳破坏，支护压力值通常大于静水压力。根据文献中实际的项目[19]情况，在一般的工程中泥水压力差值波动最大会达到 0.15 MPa，因此本文选择 150 kPa 作为泥浆渗透的最不利情况进行试验，同时为了数据的观测和处理的合理性，在粗粒径砂中采用 50 kPa 的泥水压力。



(a) 装置实物照片　　(b) 渗透柱结构

图 2　微型泥浆渗透装置

Fig. 2　Microscopic slurry infiltration device

在测得砂柱渗透系数在设计值区间内后注入 50 mL 的定量泥浆，控制初始泥浆压力为粗粒径钙质砂 50 kPa、细粒径 150 kPa 进行微型泥浆渗透试验，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　微型泥浆渗透试验

2.1　钙质砂的渗透系数测量

在进行试验前，通过比重瓶试验测量钙质砂和陆源砂(以福建砂为例)的比重，最终测得 5 组钙质砂平均比重为 2.743，陆源砂为 2.634。

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 和钙质砂密度 ρ_s，可计算得到孔隙率：

$$n=1-\frac{m_s}{V\rho_s} \tag{2}$$

在定水头试验中发现，0.315 ~ <0.63 mm 粒径的钙质砂使用雨落法自然堆积而成的砂样已较为密实，在分层振捣、夯实后孔隙率几乎没有变化，难以获得其他堆积状态的砂样。0.315 ~ <0.63 mm 粒径钙质砂的平均孔隙率为 0.45，渗透系数的波动在 0.7 ~ 1.0 mm/s 之间。以福建砂作为陆源砂的代表测得 0.315 ~ <0.63 mm 粒径福建砂的平均孔隙率为 0.35，渗透系数波动在 0.7 ~ 0.9 mm/s 之间。

振捣、夯实的方法对 0.63 ~ 1.25 mm 粒径砂样堆积状态有较大的影响，因此通过不同的振捣、夯实次数改变砂样的孔隙率，对砂样进行定水头试验，最终获得如图 3 所示的孔隙率 n 与渗透系数 k 关系。从图 3 中明显看出钙质砂的线性拟合斜率大于福建砂线性拟合斜率，即钙质砂的渗透系数受孔隙率影响更大。

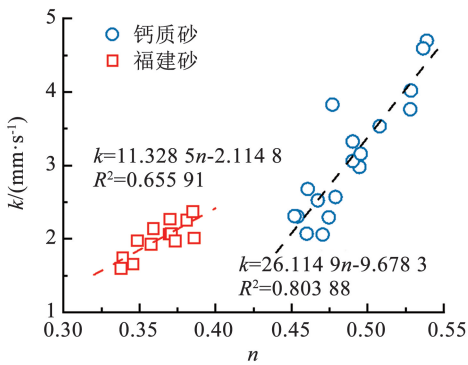


图 3　渗透系数–孔隙率关系

Fig. 3　Correlation between permeability coefficient and porosity

根据 Taylor 经验公式[20]，砂性土的渗透系数 k 和孔隙比 e 的关系可以表示为

$$k=C\frac{e^3}{1+e} \tag{3}$$

文献[21]在 Taylor 经验公式的基础上总结出渗透系数和孔隙比在半对数坐标系中表现出线性关系。基于此发现将试验数据映射到半对数坐标系中拟合出如图 4 所示的 $\ln k-e$ 的线性关系，发现这一规律也近似满足，这意味这上述线性关系和砂的类型无关。

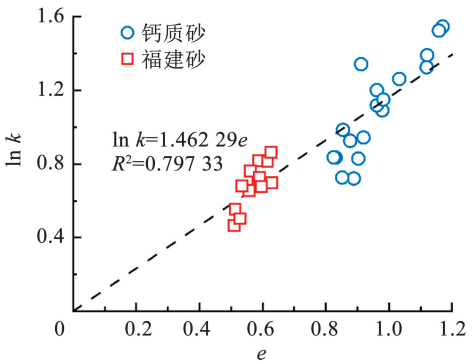


图 4　ln $k-e$ 关系

Fig. 4　ln $k-e$ relationship

最终控制 0.315 ~0.63 mm 粒径钙质砂砂柱的渗透系数为 0.9 mm/s,0.63 ~1.25 mm 粒径钙质砂砂柱的渗透系数为 2 mm/s 进行泥浆渗透试验。

泥浆渗透前先通过定水头试验测试获得固定渗透系数的地层,再进行 50 mL 浆液的定量渗透。

2.2　泥浆质量分数对渗透成膜过程的影响分析

2.2.1　泥膜生成的判别依据

试验结果表明,粒径 0.63 ~1.25 mm 的钙质砂在泥浆质量分数为远超工程质量分数的 16% 时都未形成泥膜,而粒径 0.315 ~ <0.63 mm 的钙质砂则能在泥浆质量分数接近 10% 时在表面形成致密泥膜。

Min 等[22]指出泥浆渗透量的稳定也伴随着泥膜状态的密实;Xu 等[23]提出了等效渗透系数,扩展达西定律用于计算泥膜的在当前浆液下的渗透系数,从而对泥膜的闭气能力进行分析:

$$k_b = \frac{\Delta L_s Q}{\Delta \phi' A} \tag{4}$$

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。

图 5 和图 6 描述的是 0.315 ~ <0.63 mm 粒径的钙质砂在泥浆质量分数 4% ~12% 的滤失量和等效渗透系数随时间的变化。其中滤失量理论最大值为 50 mL,但由于浆液颗粒的残存和液体表面张力的存在,最终滤失量均小于 50 mL。随着泥浆质量分数的增加,滤失速度也明显减缓。从图 5 中可以看出泥浆质量分数在 4% ~8% 之间时,浆液基本完成全部渗透,部分膨润土颗粒在渗透柱表面发生堵塞或因表面张力残存于渗透柱中,最终的滤失量接近最大值(50 mL)或未趋于稳定,膨润土质量分数条件为 10% 和 12% 的试验组最终的滤失量则趋于稳定于小于理论最大滤失量的某一数值。等效渗透系数作为评价泥膜气密性的一个指标也会随着渗透时间的增加逐渐降低,对比图 6 等效渗透系数随时间的变化可以发现,在泥膜状态稳定之前存在一个泥膜等效渗透系数的快速下降段,对应等效渗透系数约在 1×10^{-5} ~ 1×10^{-4} mm/s 之间。当渗透系数大于此范围时泥膜未形成或并不致密,在此区间之中泥浆颗粒大量聚集堵塞形成絮状物,最终絮状物的累积形成稳定的泥膜。

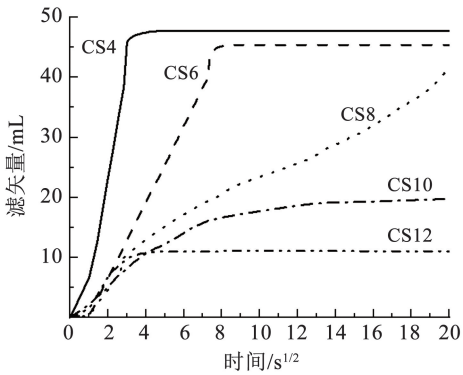


图 5　滤失量随时间变化

Fig. 5　Variation of filtration loss with time

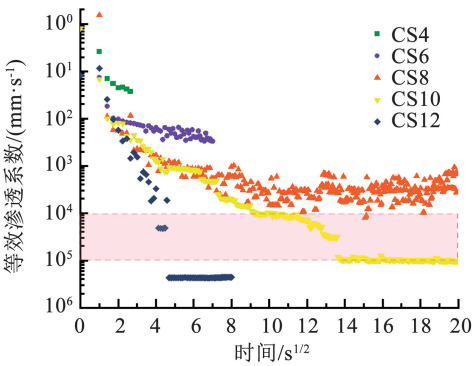
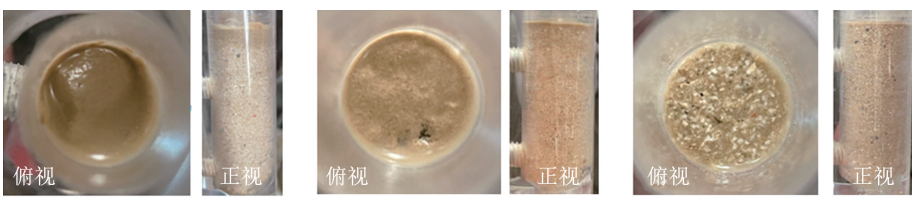


图 6　等效渗透系数随时间变化

Fig. 6　Variation of equivalent permeability coefficient with time

2.2.2　泥膜质量划分

最终可以根据试验结果将泥膜质量从高到低分为 A、B、C 三个等级。不同类型的泥膜照片和泥浆渗透力学曲线如图 7 和图 8 所示。



(a) A类泥膜　(b) B类泥膜　(c) C类泥膜

图 7　各类泥膜俯、正视示意图

Fig. 7　Top and front views of different types of filter cake

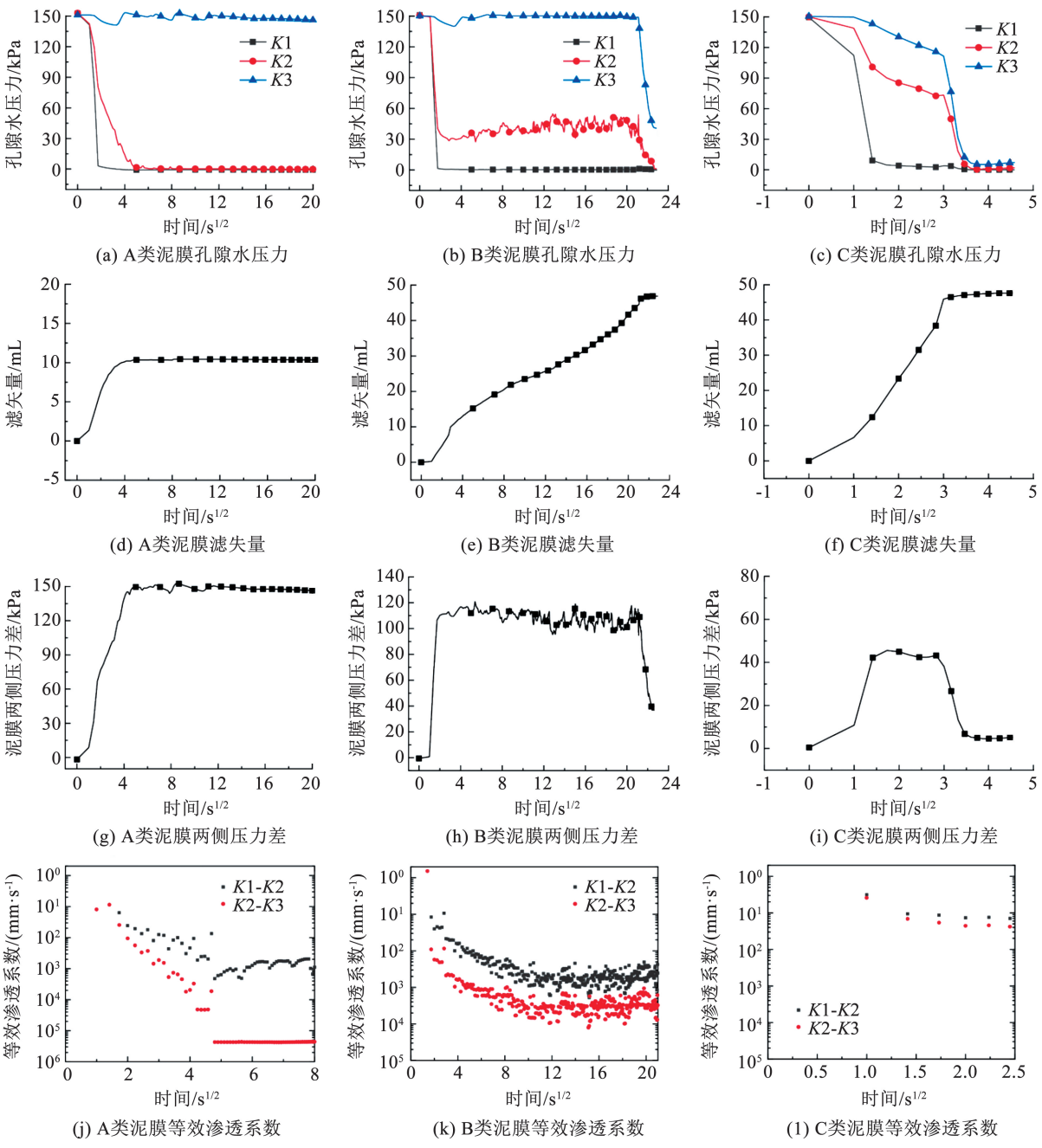


图 8　各类泥膜的泥浆渗透力学曲线

Fig. 8　Slurry infiltration characteristic curves fordifferent types of filter cake

A 类泥膜以质量分数为 12% 条件的试验为例，渗透带–砂柱等效渗透系数存在明显下降段，滤失量和泥膜两侧压力差（*K*2-*K*3 孔压计差值）在泥膜生成之后趋于稳定，最终能形成肉眼可见的致密泥膜，此类泥膜质量较好，等效渗透系数随渗透时间逐渐降低，最终趋于稳定，上部渗透系数（*K*2-*K*3 间）远大于下部渗透系数（*K*1-*K*2 间），体现了泥浆从上至下渐进封堵渗流通道的作用。

B 类泥膜以 8% 质量分数条件为例，泥膜两侧压力差波动明显，等效渗透系数逐步下降，但由于试验采用 50 mL 定量的泥浆进行渗透，最终未到到达 1×10^{-4} mm/s 的阈值。最终形成的泥膜存在少量孔洞，此类泥膜存在一定保压能力，等效渗透系数随渗透时间也逐渐降低，但相比 A 类泥膜降低速率较慢，且砂柱上部（*K*2-*K*3 间）和下部（*K*1-*K*2 间）渗透系数较为接近，表明并没有形成较好的表面封堵作用。

C 类泥膜以质量分数为 4% 条件为例，等效渗透系数基本保持不变，渗透速度极快，最终泥膜存在大量孔洞或仅在表面聚集部分泥浆颗粒，此类泥膜质量较差，砂柱渗透系数变化较小，基本不具备保压能力。

2.3　试验结果总结

综合试验表观现象和等效渗透系数数值，最终

形成泥膜类型的结果汇总如表 2 所示。当泥浆质量分数大于 10% 时,在细粒径的钙质砂砂柱中可以生成泥膜并具备良好的闭气性;而在粗粒径的钙质砂砂柱中,即使泥浆质量分数到达 16%(远超工程用浆质量分数)也很难生成泥膜(图 9)。由此可见,通过提高泥浆质量分数来提升钙质砂砂柱中泥膜的质量存在一定的局限性。但由于本文采用的是单一粒径的钙质砂,相较于天然地层存在差异,这也是导致难以成膜的可能原因。

表 2　不同泥浆质量分数的试验成膜类型结果汇总

Tab. 2　Summary of filter cake types obtained in the tests under different slurry concentrations

粒径/mm	不同泥浆质量分数的成膜类型					
	4%	6%	8%	10%	12%	16%
0.315 ~ <0.63	C	C	B	A	A	—
0.63 ~ <1.25	—	—	—	—	C	C



图 9　粗粒径钙质砂在 16% 质量分数泥浆成膜结果

Fig. 9　Filter cake formation result of coarse calcareous sand with slurry of 16% bentonite concentration

为进一步了解泥浆渗透特征,将细粒径钙质砂生成泥膜的两组试验进行 CT 扫描,从细观角度观察泥浆颗粒的空间分布,而粗粒径的钙质砂在试验中并未产生闭气泥膜,因此不对其结果进行 CT 扫描。

3　泥浆渗透柱 CT 扫描

3.1　CT 扫描介绍

CT(computed tomography)扫描,即电子计算机断层扫描,可在不破坏物体的前提下,利用 X 射线的衰减效应探测物体内部的结构信息,近年来已被广泛应用到岩土体的细微观结构分析。本文采用德国依科视朗(YXLON)公司型号为 YXLON FF85 CT 的计算机断层扫描检测系统来扫描试样,其 X 射线管扫描电压最高可达 225 kV,直径 20 mm 高度 50 mm圆柱试样的扫描精度可达 17 μm/像素。

3.2　三维重构方法介绍

CT 扫描后获得的原始图像由于其低对比度、高噪点的特点,需要进行图像处理。本文使用 Avizo 软件进行 CT 切片的图像处理和三维重构,通过阈值分割、分水岭算法和机器学习等方式先处理 CT 切片图像,根据其密度的差异,从低密度到高密度确定空气、水、泥浆、钙质砂的四相边界,再根据划分范围进行三维重构。

CT 切片的灰度值分布如图 10 的黑色实线所示,其中存在 4 个峰值与四相相对应,根据分水岭算法,通过梯度分布可将各相区分开。由于泥浆密度会随泥浆颗粒的分布差异产生变化,因此可以以泥浆灰度值峰值为界限,划分低质量分数和高质量分数泥浆用于后续分析。最终划分出的各相的灰度值见图 10。

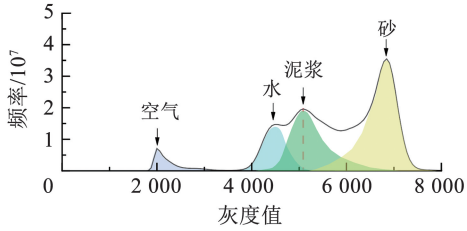


图 10　各相分割灰度范围

Fig. 10　Grayscale range for each phase segmentation

3.3　三维重构结果

本文对 0.315 ~ <0.63 mm 粒径的钙质砂在质量分数 10% 和 12% 条件下的试验组进行 CT 扫描并对结果进行分析。

图 11 和图 12 分别是质量分数为 10% 和 12% 条件下砂柱和泥浆的三维重构图。可以看出在这两个质量分数条件下,泥浆的分布主要以砂柱表面的泥饼和砂柱内部的泥浆残留为主。对比来看 10% 质量分数条件下的泥饼厚度较 12% 质量分数的更低,而砂柱内部的浆液残留分布密度则更高。

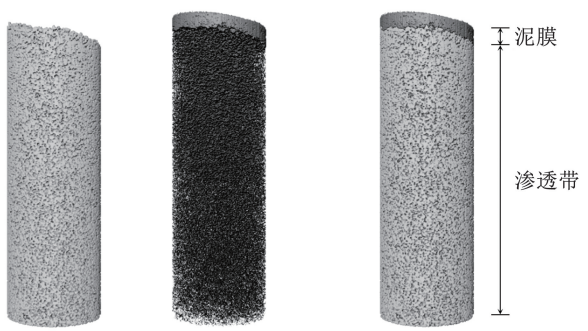


图 11　CT 重构(泥浆质量分数 10%)

Fig. 11　CT reconstruction model for the test with slurry of 10% bentonite concentration

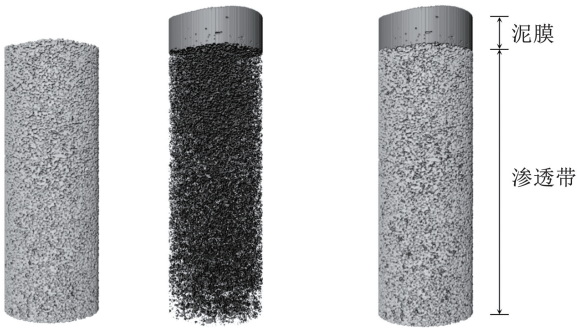


图 12　CT 重构(泥浆质量分数 12%)

Fig. 12　CT reconstruction model for the test with slurry of 12% bentonite concentration

从 Avizo 中可测量出质量分数 12% 下砂柱表面形成泥膜厚度为 4.66 mm，远大于质量分数 10% 时的 2.37 mm，由此可见泥浆质量分数的增加能明显提升泥膜的厚度。

两个泥浆质量分数条件下由 CT 图像计算得到的钙质砂砂柱在不含泥浆颗粒和含泥浆颗粒条件下的孔隙率分布如图 13 所示。质量分数 10% 和质量分数 12% 条件下的不含泥浆颗粒的钙质砂砂柱平均孔隙率分别为 44.68% 和 46.24%，在整个内的孔隙率也较为均匀，与渗透试验前测得的砂柱孔隙率约为 45% 保持一致。而在含泥浆条件的孔隙率分布由于泥膜的堆积则在 45 mm 处的砂柱表面发生突降。

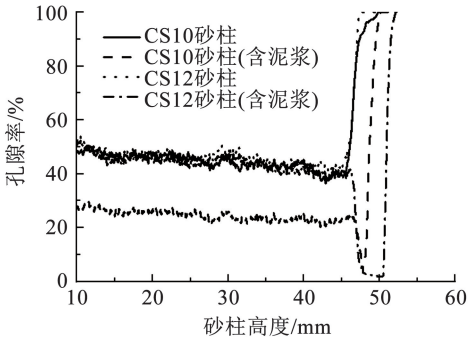


图 13　钙质砂砂柱孔隙率随高度分布

Fig. 13　Distribution of porosity with height for calcareous sandcolumn

根据泥膜体积分数随砂柱高度变化的分布(图 14)，可以发现质量分数 12% 泥浆下砂柱内(砂柱高度 <45 mm)的泥浆残存量明显低于质量分数 10% 泥浆工况，而砂柱表面以上(砂柱高度 > 45 mm)的部分则明显高于质量分数 10% 泥浆工况。结合滤失量变化可分析得出，随着泥浆质量分数的增加砂柱表面形成泥膜的致密程度明显增加，但伴随着滤失量的减少，更少的泥浆会进入砂柱内，这也导致了残存在砂柱内的泥浆量的降低。

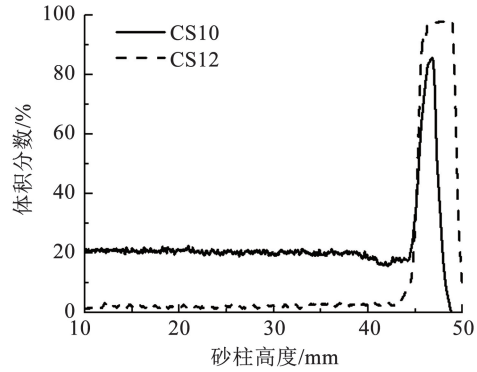


图 14　泥浆颗粒体积分数

Fig. 14　Volume fraction of slurry particles

从图 14 中也可以发现，在砂柱高度 45 mm 的钙质砂-泥膜生成边缘地带，泥浆质量分数 10% 条件下的泥膜体积分数斜率高于质量分数时的，可以推测低质量分数的泥浆所形成的泥膜以渗透带-泥饼的形式为主，而高质量分数的泥浆由于渗透量的减少泥浆颗粒主要聚集在砂柱表面，从而生成以泥饼形态为主的泥膜。

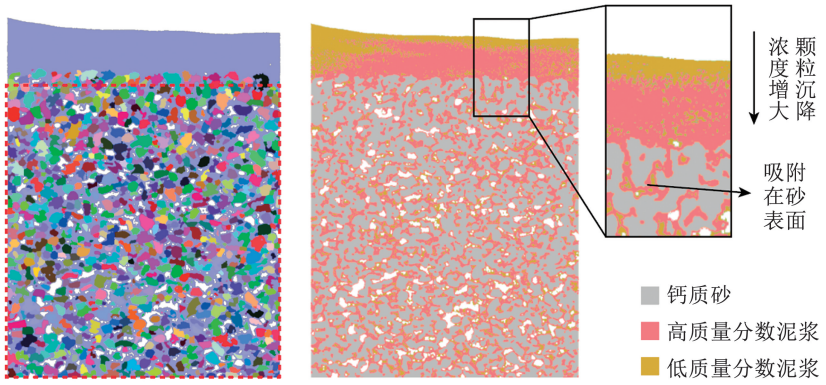
4　泥浆空间分布特征分析

4.1　孔隙网络模型

提取靠近砂柱表面 20 mm 高度的圆柱地层进行后续的分析，通过泥浆的灰度值峰值可以划分出低质量分数和高质量分数泥浆，如图 15 所示。泥浆的分布主要表现为泥膜和渗透带两种形式，其中泥膜部分位于砂柱表面，由于泥浆颗粒的沉积作用，泥膜从上至下密度逐渐增大，颗粒逐步堆积；渗透带存在于泥浆渗透过的砂柱之中，泥浆颗粒由于分子间作用力容易吸附于砂颗粒表面而非悬浮于孔隙中。

因为最终形成的泥膜是以固态形式呈现，是流动浆液中的泥浆颗粒聚集形成的絮状物，泥浆的密度在一定程度上可以用来判别泥浆颗粒的聚集程度。因此假定泥浆颗粒对渗流路径的封堵作用主要存在于高质量分数泥浆分布区域，分别将钙质砂颗粒和钙质砂颗粒与高质量分数泥浆的混合物作为基质，分析这两个状态的孔隙网络。一种基于最大球算法的孔隙网络模型可以将孔隙和喉道简化为球体和圆柱体[24]，如图 16 所示，其中球体表示孔隙，连接球体间的圆柱体表示孔喉。

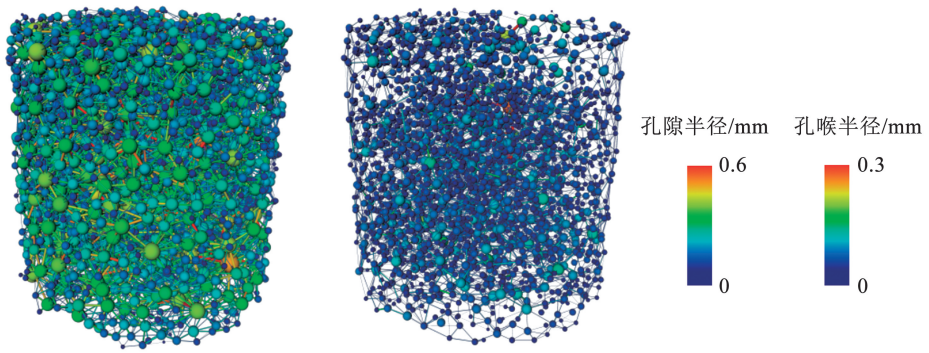
泥浆渗透后，泥浆颗粒对孔喉的封堵作用导致孔隙网络的连通性能发生变化。因此可以通过孔隙网络模型，用孔隙节点的指标量化其对于整个渗流网络的重要性，从而评估泥浆的封堵作用对渗流网络的影响。



(a) 钙质砂-泥浆两相分割　　(b) 不同质量分数泥浆划分

图 15　某代表性 CT 切片中的泥浆空间分布(泥浆质量分数 10%)

Fig. 15　Spatial distribution of slurry particles in a representative CT slice (10% concentration)



(a) 泥浆渗透前　　(b) 泥浆渗透后

图 16　孔隙网络模型

Fig. 16　Pore network model

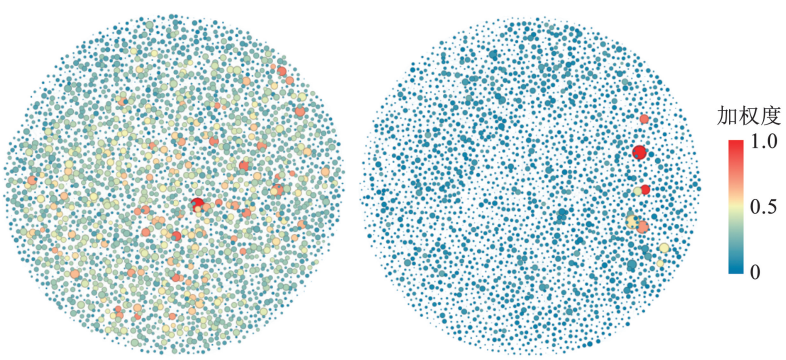
4.2　边权重

由于孔隙之间液体的流动通过喉道存在权重差异,根据 Poiseuille 流动,管道内的流阻为

$$R=\frac{8\mu L}{\pi r^4} \tag{5}$$

其中:μ 为流体黏度,L 为喉道长度,r 为喉道半径。因此,选择流阻的倒数电导率的相关参数$\frac{r^4}{L}$作为喉道的权重,其值越大说明该喉道连接的两孔隙间更易发生流动。

在将各节点的加权度(节点所有邻接边的权重之和)归一化后可制作如图 17 的二维孔隙结构连通性网络图。其中圆盘表示孔隙节点,其大小与孔隙半径正相关。根据加权度的分布范围可以看出泥浆渗透前各个节点的加权度分布更为均匀,在泥浆渗透后,浆液在喉道间的积累导致权重系数的差异性增大,造成出现个别极大值点的现象。



(a) 泥浆渗透前　　(b) 泥浆渗透后

图 17　孔隙结构连通性网络图

Fig. 17　Pore connectivity network diagram

4.2　中介中心度

节点的中介中心度(betweenness centrality)可以作为一个重要指标来反映单个节点在网格中的中介程度。在渗流网络中，一个节点的中介中心度越高说明越多的流线经过它[25]。其计算公式可以表示为

$$\mathrm{BC}(i) = \sum_{j \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}} \tag{6}$$

式中：g_{jk}是节点 j 和节点 k 之间最短路径的数量，$g_{jk}(i)$是这些路径中包含着节点 i 的数量。

根据图 18 所表现的中介中心度分布差异，可以明显看出在泥浆渗透后，整体分布向右偏移的现象，说明在浆液堵塞孔隙后，孔隙网络的复杂程度降低导致部分关键节点的重要性增加，更多的孔隙需要其作为中介节点进行连接。

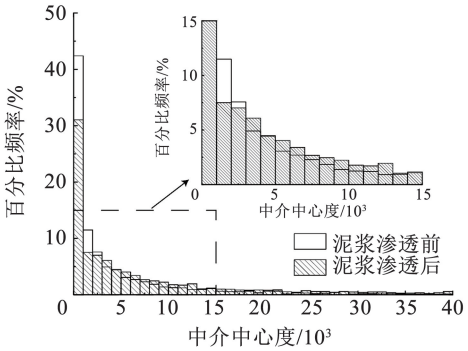


图 18　中介中心度分布

Fig. 18　Distribution of betweenness centrality

4.3　偏心率

节点的偏心率(eccentricity)表示该节点到网络中所有其他可达节点的最短路径长度的最大值[23]，可以表示为

$$E(i) = \max_{i \neq j} \{ d_{ij} \} \tag{7}$$

式中 d_{ij}为节点 i 和节点 j 的最短距离。

偏心率分布如图 19 所示。在泥浆渗透后，节点的偏心率显著增加，说明浆液的封堵作用导致了节点之间连通性降低，需要通过更多中介节点进行连接。

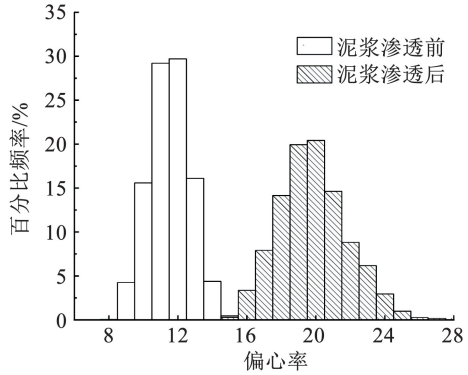


图 19　偏心率分布

Fig. 19　Eccentricity distribution

4.4　聚类系数

聚类系数(clustering coefficient)用于衡量节点邻居之间的连接紧密程度，反映网络的聚集性，其值越大说明节点邻居之间的连接更紧密[26]，可以表示为

$$C(i) = \frac{2T(i)}{k(i)(k(i)-1)} \tag{8}$$

式中：$T(i)$为节点 i 的邻居之间实际存在的边数，$k(i)$为节点 i 的邻居数量。

如图 20 所示，泥浆渗透后孔隙节点的聚类系数显著降低。为探究该现象的空间分布特征，根据地层结构将表面以下区域划分为 3 个 9 mm 等厚的立方体子区域(N1 到 N3，见图 21)。

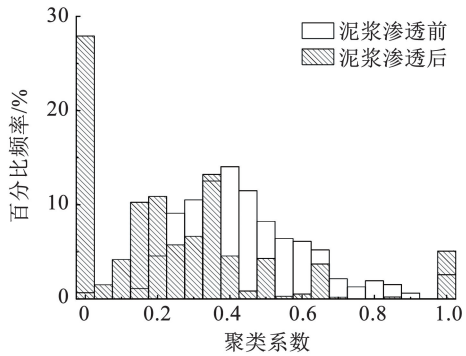


图 20　聚类系数分布

Fig. 20　Distribution of clustering coefficient

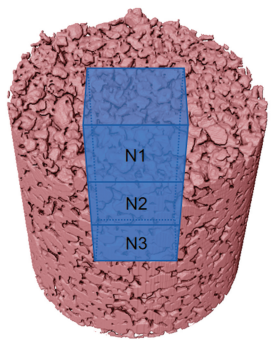


图 21　区域划分

Fig. 21　Regional division

通过图 22 的聚类系数空间分布分析发现，泥浆渗透对孔隙网络的影响呈现显著层状差异：邻近地层表面的 N1 区域孔隙节点聚类系数降幅最大，随着深度增加(N2、N3 区域)，系数递减趋势逐渐趋缓。该空间异质性表明，浆液在渗流过程中形成的堵塞效应具有深度依赖性，特别是在成膜界面附近区域，孔隙节点间的拓扑连接出现明显解聚现象，导致局部网络结构松散化。

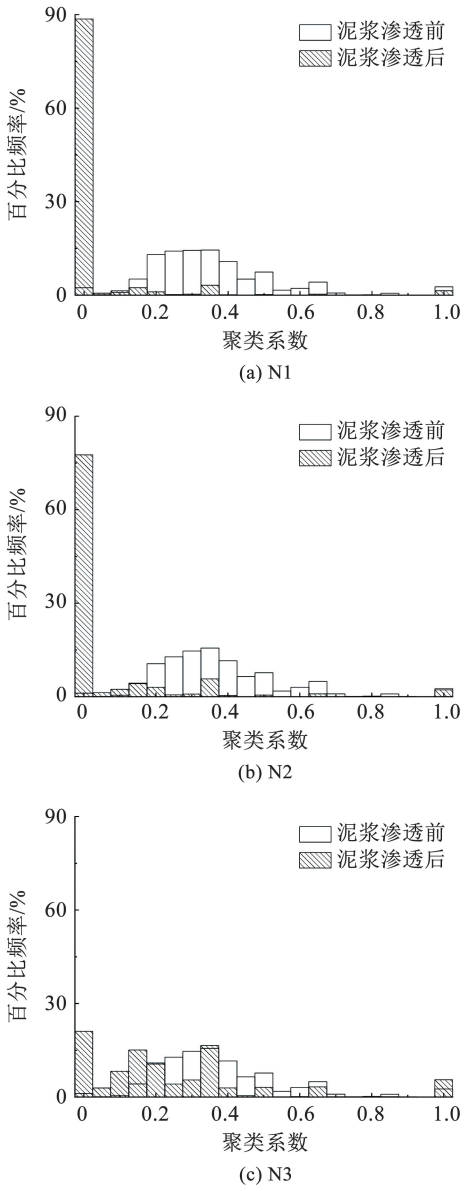


图 22 不同区域聚类系数分布

Fig. 22 Distribution of clustering coefficient in different regions

5 结 论

根据泥浆渗透柱试验结果以及 CT 扫描数据分析,可以得到以下结论:

1)钙质砂与同级配陆源砂的渗透特性对比研究表明,在天然堆积状态下,钙质砂渗透系数可达陆源砂的 2 倍。同时由于其棱角度高、形状不规则,振捣的过程中更易形成致密的咬合结构,导致钙质砂在振捣密实的过程中孔隙率变化范围较陆源砂更广。

2)通过泥膜生成区域的等效渗透系数,可以定量化地判断泥膜是否能够闭气。泥浆渗透过程中存在一个临界等效渗透系数区间,当等效渗透系数低于该区间的下限时发生等效渗透系数的骤降,在此间阶段后泥膜的闭气性能将显著增强。

3)基于 μCT 三维重构的细观分析结果表明:钙质砂的外表面形状不规则,且内部存在丰富的内孔隙,呈现复杂的网络结构;泥浆渗透后,泥浆颗粒沿渗透路径从上到下呈现明显的分布不均匀性,渗透带部分泥浆会因分子间作用力,更倾向于吸附于砂颗粒表面,而非悬浮于孔隙中。

4)孔隙网络模型可用于分析多孔介质地层的渗流特性。在浆液堵塞作用下,钙质砂地层中孔隙连通性指标表现为中介中心度增大、偏心率上升以及聚类系数下降。泥浆对孔隙和喉道的空间差异性封堵作用导致接近地层表面的总孔隙体积减少,孔隙间的连通性降低,从而导致渗透系数下降。这揭示了细观封堵效应与宏观支护压力维持之间的内在关系。

参考文献

[1]钱琨, 王新志, 陈剑文, 等. 南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6):1557
Qian Kun, Wang Xinzhi, Chen Jianwen, et al. Experimental study on permeability of calcareous sand for islands in the South China Sea [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1557. DOI:10.16285/j. rsm. 2017. 06. 003

[2]王新志. 南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D]. 武汉: 中国科学院岩土力学研究所, 2008
Wang Xinzhi. Study on engineering geological properties of coral reefs and feasibility of large project construction on Nansha Islands [D]. Wuhan: The Chinese Academy of Sciences, 2008

[3]吴迪, 周顺华, 温馨. 砂性土层泥水盾构泥浆成膜性能试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3460
Wu Di, Zhou Shunhua, Wen Xin. Laboratory test and application of filter cake formation in sand during slurry shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3460. DOI:10.13722/j. cnki. jrme. 2014. 0056

[4]刘成, 陆杨, 刘磊, 等. 加砂泥浆在砂性地层中的堵塞机制及成膜结构分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5): 245
Liu Cheng, Lu Yang, Liu Lei, et al. Analysis of clogging mechanism and filter-cake structure of slurry containing coarse-particle materials in sandy strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 245. DOI:10.13807/j. cnki. mtt. 2018. 05. 029

[5]Jin D, Shen Z, Song X, et al. Numerical analysis of slurry penetration and filter cake formation in front of tunnel face[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105303. DOI:10.1016/j. tust. 2023. 105303

[6]Qin S, Xu T, Zhou W, et al. Infiltration behaviour and microstructure of filter cake from sand-modified bentonite slurry[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 40: 100963. DOI: 10. 1016/j. trgeo. 2023. 100963

[7]Chen F, Xiong H, Yin Z, et al. Impermeable and mechanical stability of filter cake under different infiltration conditions via CFD-DEM[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(8): 4115. DOI:10.1007/s11440 - 023 - 01805 - 8

[8]Zhu Y, Sun H, Xu S, et al. Mechanics of the penetration and filtration of cement-based grout in porous media: new insights from

CFD-DEM simulations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 133: 104928. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104928

[9] Talmon A M, Mastbergen D R, Huisman M. Invasion of pressurized clay suspensions into granular soil [J]. Journal of Porous Media, 2013, 16(4): 351. DOI:10.1615/JPorMedia.v16.i4.70

[10] Xu T, Zhou W, Bezuijen A, et al. Effects of sand and slurry characteristics on pressure infiltration of bentonite slurry into sand [J]. Géotechnique, 2022, 74(9): 935. DOI:10.1680/jgeot.21.00133

[11] 闵凡路, 魏代伟, 姜腾, 等. 泥浆在地层中的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2801
Min Fanlu, Wei Daiwei, Jiang Teng, et al. Experimental study of law of slurry infiltration in strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2801. DOI:10.16285/j.rsm.2014.10.006

[12] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 491
Ren Yubin, Wang Yin, Yang Qing. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 491. DOI:10.16285/j.rsm.2016.0277

[13] Zhang X, Liu X, Xu Y, et al. Fragmentation modes of single coral particles under uniaxial compression: microstructural insights[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344: 128186. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128186

[14] 崔翔, 朱长歧, 胡明鉴, 等. 珊瑚砂渗透性的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2336
Cui Xiang, Zhu Changqi, Hu Mingjian, et al. Microscopic mechanism of permeability of coral sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2336. DOI:10.11779/CJGE202012022

[15] 朱长歧, 陈海洋, 孟庆山, 等. 钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1831
Zhu Changqi, Chen Haiyang, Meng Qingshan, et al. Microscopic characterization of intra-pore structures of calcareous sands [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1831. DOI:10.16285/j.rsm.2014.07.005

[16] 崔翔, 胡明鉴, 朱长歧, 等. 珊瑚砂三维孔隙微观特性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3632
Cui Xiang, Hu Mingjian, Zhu Changqi, et al. Study on the microscopic characteristics of three-dimensional pores in coral sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3632. DOI:10.16285/j.rsm.2020.0093

[17] Wang Shuai, Lei Xuewen, Meng Qingshan, et al. Experimental study on the influence of load on permeability coefficient of calcareous sand [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 304(5): 52066. DOI:10.1088/1755-1315/304/5/052066

[18] 殷彤. 砂性地层泥水平衡盾构隧道开挖面泥浆-土体流固耦合宏微观作用机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2021
Yin tong. Fluid-solid coupling investigation on the mechanism of slurry-soilinteration during slurry shield tunneling in sandy soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2021

[19] 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
Liu Xueyan, Wang Fuming, Yuan Dajun, et al. Range of support pressures for slurry shield and analysis of its influence factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 908. DOI: 10.11779/CJGE201905014

[20] Taylor D W. Fundamentals of soil mechanics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948

[21] 邓永锋, 刘松玉, 章定文, 等. 几种孔隙比与渗透系数关系的对比[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊1): 64
Deng Yongfeng, Liu Songyu, Zhang Dingwen, et al. Comparison among some relationships between permeability and void ratio[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S1): 64. DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2011.z1.014

[22] Min F, Zhu W, Han X. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013(38): 423. DOI:10.1016/j.tust.2013.07.024

[23] Xu T, Bezuijen A. Experimental study on the mechanisms of bentonite slurry penetration in front of a slurry TBM[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019(93): 103052. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103052

[24] Yu C, Chen W, Li J, et al. An efficient method for generating a super-sized and heterogeneous pore-throat network model of rock [J]. Applied Sciences, 2025, 15(3): 1047

[25] Wang J, Huang X, Xu J, et al. Network analysis of pore structure of coral reef limestone and its implications for seepage flow [J]. Engineering Geology, 2023, 318: 107103. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107103

[26] 徐君, 黄昕, 王君朋, 等. 礁灰岩孔隙结构表征及关键孔隙节点识别研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊1): 3355
Xu Jun, Huang Xin, Wang Junpeng, et al. Characterization of coral reef limestone's pore structure and identification of key pore nodes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3355. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2022.0571