

DOI: 10.11779/CJGE20220866

# 泥水盾构开挖面泥膜渗透特性与压力传递机制

徐涛<sup>1</sup>, 史庆锋<sup>1</sup>, 章定文<sup>\*1</sup>, 徐敬民<sup>1</sup>, 刘义怀<sup>2</sup>

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 南京东大岩土工程勘察设计院有限公司, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 泥膜可以将泥浆压力传递到开挖面土体骨架上, 转化为土体有效应力, 因此泥膜的渗透特性是保持泥水盾构开挖面稳定的关键因素。采用泥浆渗透试验, 研究了开挖面水力梯度、地层土体粒径和泥浆渣土含量等对泥膜形成的影响规律。试验结果显示, 水力梯度越小, 越不利于泥膜形成。细砂地层有利于泥膜形成, 但泥膜和渗透带很薄, 易被破坏; 中砂和粗砂地层虽不利于泥膜形成, 较厚的渗透带却有利于开挖面稳定。泥膜的渗透系数比渗透带的渗透系数低 100 倍以上, 渗透带的渗透系数介于  $10^{-7} \sim 10^{-5}$  m/s, 而泥膜的渗透系数的小于  $10^{-8}$  m/s; 泥膜或渗透带的渗透系数越小, 地层超静孔压的影响范围越小, 孔压下降得越快。当泥浆中掺有渣土时, 泥浆的渗透速度高于未掺渣土的泥浆; 渗透带的渗透系数随泥浆密度增大而增大, 且地层超静孔压下降速率随泥浆密度增大而减小。

**关键词:** 泥水盾构; 泥膜; 泥浆渗透带; 水力梯度; 土体粒径; 压力传递

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)09-1878-10

**作者简介:** 徐涛(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程与盾构隧道方面研究工作。E-mail: taoxu@seu.edu.cn。

## Permeability characteristics of filter cake and pressure transfer on face during slurry shield tunnelling

XU Tao<sup>1</sup>, SHI Qingfeng<sup>1</sup>, ZHANG Dingwen<sup>1</sup>, XU Jingmin<sup>1</sup>, LIU Yihuai<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Nanjing SEU Geotechnical Engineering Investigation and Design Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The slurry pressure can be transferred to the soil skeleton of the tunnel face through the filter cake and becomes the effective stress, which therefore is important for the tunnel face during slurry shield tunnelling. From the laboratory infiltration tests, three key factors affecting the formation of filter cake are discussed: the hydraulic gradient on the tunnel face, the sand content of slurry and the soil particle size. A lower hydraulic gradient leads to longer time of filter cake formation. A filter cake is more easily formed for the fine sand than the medium and coarse sand, but the filter cake is easily damaged. Although a filter cake is harder to be formed for the medium and coarse sand, the slurry-infiltrated zone is thicker and thus is more significant for the stability of the tunnel face. The permeability coefficient of the filter cake is more than 100 times lower than that of the slurry-infiltrated soil. The permeability coefficient of the filter cake is less than  $10^{-8}$  m/s, while that of the slurry-infiltrated soil is between  $10^{-7} \sim 10^{-5}$  m/s. A lower permeability coefficient of the filter cake or slurry-infiltrated zone leads to a smaller distribution zone and a higher decrease rate of the excess pore pressure. When the slurry is mixed with sand, the slurry infiltration rate is higher than that of the clean slurry. The permeability coefficient of the slurry-infiltrated zone increases with the increasing slurry density, and the decrease rate of the excess pore pressure decreases with the increasing slurry density.

**Key words:** slurry shield; filter cake; slurry-infiltrated zone; hydraulic gradient; soil particle size; pressure transfer

## 0 引言

泥水盾构具有良好的压力控制模式和施工安全性, 适用于大直径隧道开挖等特点, 因此被广泛地应用于城市地铁隧道建设。为防止施工过程中开挖面失稳破坏, 泥水盾构采用加压泥浆对开挖面进行支护, 以平衡开挖面上的土水压力。泥浆在压力作用下向地层渗透, 泥浆中的膨润土颗粒堵塞土体孔隙, 进而在开挖面上形成微透水的泥膜, 泥浆压力通过泥膜传递

到开挖面土骨架上, 转化为开挖面土体有效应力。如果开挖面上无法形成难透水的泥膜, 导致泥浆压力转化为地层孔压, 开挖面有效支护压力降低, 极易诱发开挖面失稳破坏<sup>[1]</sup>。因此, 泥膜的形成对泥水盾构开

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (3221002217A1); 国家自然科学基金青年项目 (52108364)

**收稿日期:** 2022-07-12

**\*通信作者** (E-mail: zhang@seu.edu.cn)

挖面稳定至关重要。

盾构施工现场很难直接观测到泥膜的形成过程, 通常的研究手段是室内泥浆渗透试验。通过分析试验得到的泥浆滤失量、地层孔压、土体渗透系数变化等结果, 不仅可以判断泥膜形成与否, 也可以推测泥浆渗透类型、泥膜形成快慢等<sup>[2-7]</sup>。试验结果表明, 泥浆浓度和土体粒径、孔隙大小是影响泥膜形成的重要因素。高浓度泥浆、小粒径土体有利于泥膜形成, 土体孔隙越大形成泥膜所需的泥浆颗粒粒径也越大。当盾构在高渗透地层掘进时, 在泥浆中掺入适量颗粒材料(如粉细砂、蛭石等)可以降低泥浆滤失量, 提高泥浆成膜效率<sup>[8-10]</sup>。此外, 高分子聚合物等化学添加剂也可以改善泥浆成膜性能。

除泥浆性质、土体性质外, 盾构机刀盘切削作用也会影响泥膜的形成。陈仁朋等<sup>[1]</sup>指出, 泥水盾构掘进时, 刀盘的不断切削使得开挖面上短时间内很难形成难透水的泥膜; 只有当盾构停止掘进时, 开挖面上才会形成难透水的泥膜。魏代伟等<sup>[3]</sup>也认为开挖面上泥膜的形成是一个动态过程, 泥膜的形成时间必须小于泥膜从破坏到再破坏的时间。金大龙等<sup>[11]</sup>提出, 在盾构掘进阶段, 泥膜呈多辐扇形, 并且可分为泥膜渐变区和无泥膜区, 刀盘转速越高, 泥膜的厚度和泥膜面积越小。Zizka 等<sup>[12-13]</sup>则分析了泥浆渗透带厚度大于和小于刀具贯入土体深度两种情况下泥浆压力的传递模式, 并讨论了刀具布置对开挖面不同位置压力变化的影响。

如上所述, 现有研究较为全面地分析了泥浆性质、土体性质、盾构机刀盘切削作用等对泥水盾构泥膜形成的影响, 为现场施工提供了丰富的试验数据与理论支持。由于盾构施工过程的复杂性, 仍有一些影响泥膜形成的因素有待研究, 如开挖面水力梯度。在盾构掘进阶段, 当泥膜被刀盘破坏时, 低渗透性的泥浆渗透带仍然可以发挥重要作用, 然而渗透带的形成规律和渗透特性变化的相关研究有限。刀盘切削地层时, 会将渣土带入泥水舱, 泥水舱中的泥浆为膨润土泥浆和渣土的混合泥浆, 混入渣土的泥浆密度最大可达到 1460 kg/m<sup>3</sup><sup>[14]</sup>。和 Fritz 等、宋洋等研究的工况不同, 此时泥浆中的渣土颗粒与地层土体颗粒相同, 不能起到填充地层土体孔隙的作用, 渣土颗粒影响泥膜形成的机制尚不清楚。本文将基于泥浆渗透试验结果和理论分析, 对这些问题进行讨论。

# 1 试验材料与装置

## 1.1 试验材料

泥浆渗透试验所用材料为钠基膨润土和中国标准

砂, 膨润土的矿物组成如表 1 所列, 膨润土和标准砂的颗粒级配曲线如图 1 所示。按照《土工试验规范》, 将标准砂筛分为细砂(FS)、中砂(MS)和粗砂(CS) 3 个组别备用, 各组砂样的物理参数见表 2。采用 Hamilton HDM200 型高速搅拌机以转速 12000 rpm 将膨润土与水混合搅拌 20 min 得到新鲜泥浆, 然后将泥浆静置 24 h。使用前, 再次用相同的搅拌机以 12000 rpm 的转速搅拌 5 min。试验采用 40, 50, 60, 70 g/L 4 种浓度泥浆, 即在 1 L 水中分别加入 40, 50, 60, 70 g 膨润土。不同浓度泥浆的流变性质由 Faan Rehometer 型流变仪测定, 转速分别为 3, 6, 30, 60, 200, 300, 600 rpm, 对应剪切速率为 5.1, 10.2, 170.2, 340.5, 510.7, 1021.4 s<sup>-1</sup>。假设泥浆为非牛顿流体, 由不同转速下泥浆的剪切应力计算得到 40, 50, 60, 70 g/L 泥浆的屈服强度分别为 1.6, 1.9, 4.1, 9.4 Pa。使砂颗粒悬浮于泥浆中的最小泥浆屈服强度  $\tau_f$  可由下式估算<sup>[15]</sup>:

$$\tau_f = 0.7 \frac{2}{3\pi} d_s (\gamma_s - \gamma_b) \quad (1)$$

式中:  $d_s$  为砂颗粒平均粒径 (m);  $\gamma_s$  为砂的重度 (N/m<sup>3</sup>);  $\gamma_b$  为泥浆的重度 (N/m<sup>3</sup>)。

对于细砂颗粒, 使其悬浮的最小泥浆屈服强度为 0.5 Pa。40 g/L 和 50 g/L 泥浆的滤失量过大, 70 g/L 泥浆的粘度过大, 不易搅拌均匀。为研究渣土含量对泥膜形成的影响, 针对泥水舱中存在渣土的实际情况, 根据现场泥浆密度范围, 向浓度 60 g/L 泥浆中掺入不同质量细砂, 制备密度为 1050, 1100, 1300, 1500 kg/m<sup>3</sup> 的掺砂泥浆, 对应的膨润土: 细砂质量比分别为 60:22, 60:110, 60:530 和 60:1090。

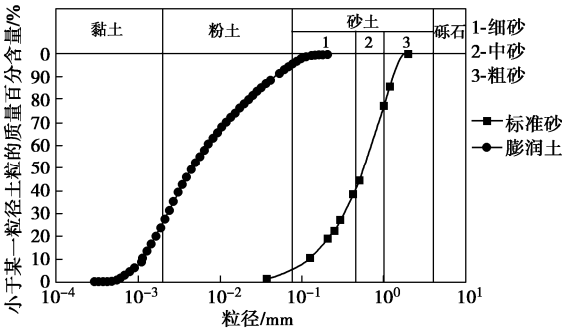


图 1 膨润土和标准砂的颗粒级配

Fig. 1 Grain-size distribution curves of bentonite and China standard sand

## 1.2 试验装置

试验装置采用 Xu 等使用的渗透装置<sup>[6]</sup>, 并加以简单改进。如图 2 所示, 试验装置由渗透柱、气源、监测系统 3 部分组成。为方便试验结束后取样, 渗透柱

分为由法兰连接的上、下两部分，制样时土样表面与下半部分上端平齐。在试验装置底部安装有直径为 10 mm 的细管，有无细管情况下地层的水力梯度分别为 15 和 1<sup>[6]</sup>。试验中，采用精度为 0.1 g 的安衡 CHS-D 型电子秤监测滤水量，并采用 LabViewer 编程的程序自动记录，同时采用量程为 0~1 MPa、精度 0.25% 的 VJ Tech VJT0250 型孔压计监测泥浆压力和地层孔压变化，电子秤和孔压计每秒同步记录一次数据。

表 1 膨润土矿物组成

Table 1 Mineral contents of bentonite	
矿物成分	含量/%
Al <sub>2.9</sub> Fe <sub>0.04</sub> H <sub>2</sub> K <sub>0.86</sub> Mg <sub>0.06</sub> Na <sub>0.1</sub> O <sub>12</sub> Si <sub>3</sub>	22
Na <sub>0.499</sub> Ca <sub>0.491</sub> (Al <sub>1.488</sub> Si <sub>2.506</sub> O <sub>8</sub> )	19
Na <sub>9.9</sub> K <sub>3.46</sub> Ca <sub>3.52</sub> Al <sub>15.9</sub> Si <sub>56.1</sub> O <sub>144</sub> (H <sub>2</sub> O) <sub>44.68</sub>	15
Al <sub>3</sub> CaH <sub>10</sub> KO <sub>17</sub> Si <sub>3</sub>	14
SiO <sub>2</sub>	11
Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH)	10
Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	9

表 2 土体基本物理性质

Table 2 Physical properties of three types of sand				
土体类型	粒径/mm	相对密度/%	孔隙比	渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )
细砂	< 0.5	90	0.67	0.0017
中砂	0.5~1	90	0.69	0.0276
粗砂	1~2	90	0.69	0.0570

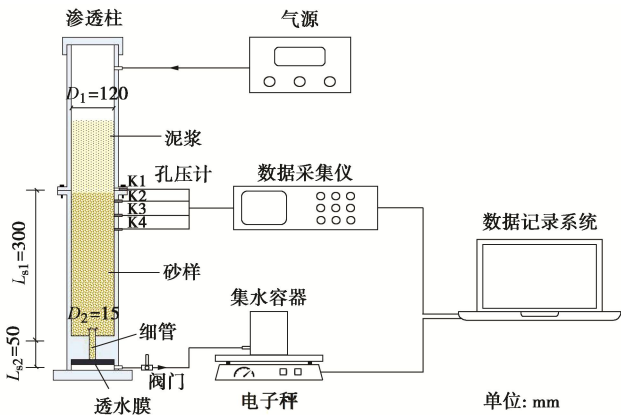


图 2 渗透试验装置示意图

Fig. 2 Scheme of set-up for infiltration tests

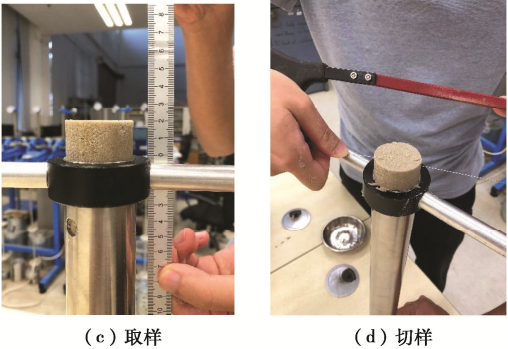


图 3 取样装置和过程

Fig. 3 Procedure for sampling slurry-infiltrated sand

试验开始前所有阀门关闭，打开气源阀门，待气压稳定后打开底部排水阀门，试验即开始。1 h 后或者砂样表面无剩余泥浆时，依次关闭底部排水阀门和气源阀门，试验结束。试验结束后，采用图 3 所示装置和步骤取表层以下 10 cm 厚的砂样，切成厚度 2 cm 的 5 等份，分别称重记录；然后将所有砂样置于温度 105℃ 的烘箱 24 h，烘干后分别称重记录。

2 试验结果分析

2.1 泥浆渗透速度

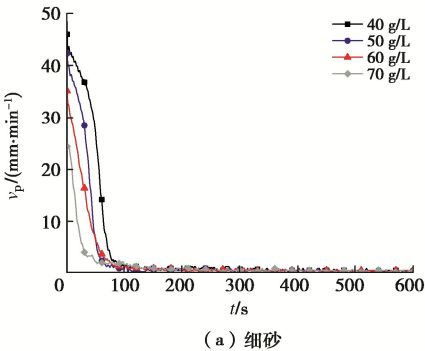
基于试验滤水量数据，根据下式可以计算得到泥浆渗透速度  $v_p$  (m/s)：

$$v_p = \frac{Q}{n \cdot A} \quad (2)$$

式中： $Q$  为滤水率 (m<sup>3</sup>/s)； $n$  为土体孔隙率； $A$  为土样横截面积 (m<sup>2</sup>)。

图 4 为泥浆渗透速度变化曲线图，由图 4 可知，泥浆渗透速度随浓度增大而降低，随土体颗粒粒径增大而增大。

图 5 为水力梯度  $i=1$  和  $i=15$  条件下细砂地层浓度 60 g/L 泥浆渗透速度随时间的变化曲线，曲线拐点为泥膜开始形成时间点。从图 5 中可以看出，水力梯度为 1 和 15 条件下，泥浆的平均渗透速度分别为 18，55 mm/min，泥膜形成的时间分别为 100，12 s。说明水力梯度越大，越有利于泥膜形成。



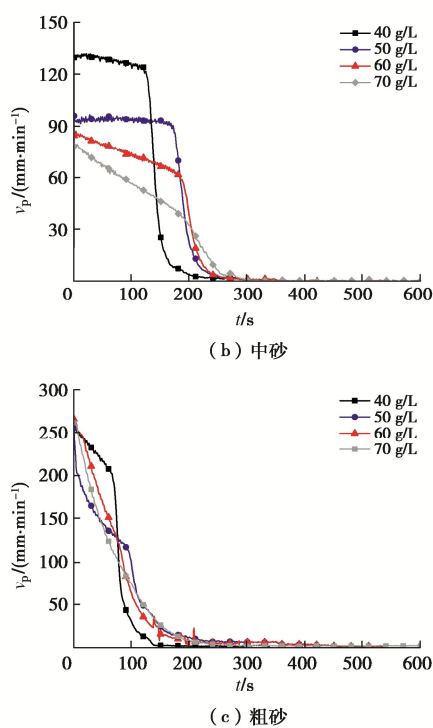


图 4 泥浆渗透速度曲线

Fig. 4 Infiltration velocity curves for different types of sand and slurries with different bentonite concentrations

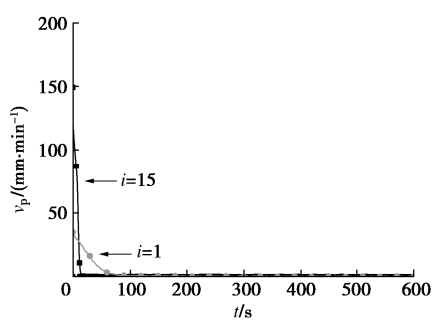


图 5 水力梯度为 1 和 15 时的泥浆渗透速度曲线

Fig.5 Infiltration velocity curves at hydraulic gradients of 1 and 15

如图 6 所示, 对于掺有细砂的泥浆, 泥浆的渗透速度大于未掺细砂的泥浆, 泥浆的渗透速度随泥浆密度增大而增大。根据泥浆渗透速度判断, 没有泥膜形成, 且渣土含量过高不利于泥膜形成。在泥浆渗透的过程中, 渣土颗粒首先在开挖面堆积, 同时膨润土颗粒在渣土颗粒周围被吸附, 这样渗透进入土体的泥浆浓度自然降低, 堵塞土体孔隙的膨润土颗粒不足。当泥浆中的渣土含量足够时, 膨润土颗粒被持续吸附。在现场, 刀盘与开挖面的间隙厚度一定, 且刀盘会一直切削堆积在开挖面的渣土, 因此这种情况不可能发生。

试验中, 泥膜形成情况和泥浆渗透带厚度统计见表 3, 4。对于细砂, 除浓度 40 g/L 泥浆外, 浓度 50, 60, 70 g/L 均在细砂地层表面形成泥膜。对于中砂,

除浓度 70 g/L 泥浆外, 均未在砂层表面形成泥膜, 浓度 40, 50 g/L 的泥浆则未能在砂层表面形成泥膜。对于粗砂, 所有浓度泥浆均都未在砂层表面形成泥膜。这说明泥膜的形成不仅和泥浆浓度有关, 也和土体粒径有关。细砂中的渗透带厚度不超过 5 cm, 中砂中的渗透带厚度为 17~32 cm, 粗砂中的渗透带厚度均超过 30 cm。如果试验中的泥浆充足且地层足够厚, 中砂、粗砂中的渗透带厚度应该还会增长。在细砂地层, 刀盘刀具贯入开挖面土体的深度可能超过渗透带厚度, 刀具切削之处会将渗透带完全破坏; 而在中砂和粗砂地层, 由于渗透带厚度较大, 刀具贯入土体深度可能小于渗透带厚度, 渗透带部分被破坏后仍有一定富余厚度。

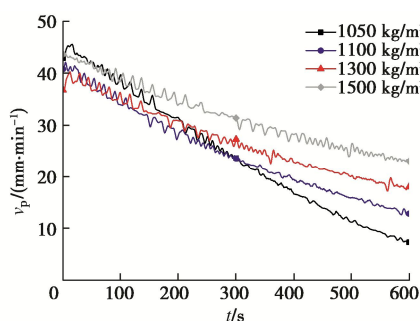


图 6 不同密度掺砂泥浆的渗透曲线

Fig. 6 Infiltration velocity curves for water-bentonite-sand slurries with different densities

表 3 各组试验泥浆渗透带厚度

Table 3 Thicknesses of slurry-infiltrated soil for various tests

泥浆浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	土体类型		
	细砂	中砂	粗砂
40	×	×	×
50	○	×	×
60	○	×	×
70	○	○	×

注: ○表示有泥膜形成, ×表示无泥膜形成。

表 4 各组试验泥浆渗透带厚度

Table 4 Final infiltration distances for various tests 单位: cm

泥浆浓度/ (g·L <sup>-1</sup> )	土体类型		
	细砂	中砂	粗砂
40	5	32	35
50	3.5	30	35
60	2.5	23	35
70	1.5	17	33

2.2 泥浆渗透带物理性质

图 7 为砂样表面以下深度 10 cm 范围内间隔 2 cm 砂样烘干后的实物图, 对于细砂, 只有表层 2 cm 的浅层砂样呈土块状, 其余砂样均呈散粒状; 对于中砂和粗砂, 不论是表层 2 cm 的浅层砂样, 还是 2 cm 以下的深层砂样, 都呈土块状。从图 7 可以看出, 泥浆在



细砂表面形成的泥膜和在内部形成的渗透带的厚度都很薄, 泥浆在中砂、粗砂表面虽然没有形成泥膜, 但形成的渗透带厚度更厚。图 8 为烘干后的表层 2 cm 细砂砂样 SEM 扫描结果图, 可以看到, 砂颗粒表面有一层膨润土薄膜覆盖, 砂颗粒间也有膨润土薄膜粘结。

假设砂土与膨润土的相对质量密度  $G_s = 2.65$ , 已知土样的含水率  $w$ , 根据下式可以计算得到土样的孔隙比  $e$ :

$$e = \frac{wG_s}{S_r} \quad (3)$$

式中:  $w$  为含水率 (%);  $G_s$  为土体相对质量密度;  $S_r$  为土样饱和度 (%)。



(a)



(b)



(c)

图 7 干燥后试样形态

Fig. 7 Samples of slurry-infiltrated sand after infiltration tests with bentonite slurry of 60 g/L

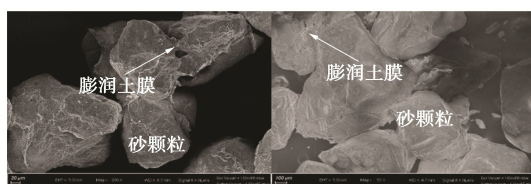


图 8 泥浆渗透带 SEM 电镜扫描结果, 细砂-泥浆浓度 60 g/L  
Fig. 8 SEM image of dry slurry-infiltrated sand, FS-60 g/L

各组砂样在浓度 60 g/L 泥浆渗透后沿深度的孔隙比变化如图 9 所示, 对于细砂, 表层 0~2 cm 土样的孔隙比为 0.56, 较原始土样孔隙比 0.67 小, 2~10 cm 土样的孔隙比则与原始孔隙比接近。对于中砂和粗砂地层, 无论是表层 0~2 cm, 还是更深的 2~10 cm, 土样的孔隙比都在 0.57 左右, 明显小于原始孔隙比 0.69。泥浆渗透前后砂样孔隙比的对比结果说明, 对于粒径较小的细砂, 泥浆颗粒大多集中在砂样表层, 而对于粒径较大的中砂和粗砂, 表层和深层的泥浆颗粒皆有分布, 中砂、粗砂内部形成的渗透带厚度比细砂厚。

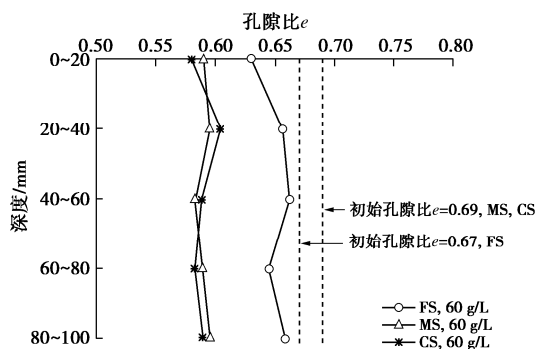


图 9 浓度 60 g/L 泥浆渗透土体孔隙比沿深度变化

Fig. 9 Void ratios along depth for slurry infiltration of 60 g/L into different types of sand

## 2.3 砂土中泥浆渗透系数

根据达西定律, 可以计算得到土体中泥浆的渗透系数  $k_b$ :

$$k_b = \frac{\Delta L_s Q}{(\Delta p / \gamma_w) A} \quad (4)$$

式中:  $\Delta L_s$  为相邻传感器距离 (m);  $Q$  为滤水率 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\Delta p$  为相邻传感器压力差 (kPa);  $\gamma_w$  为水的重度 ( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $A$  为土样横截面积 ( $\text{m}^2$ )。

图 10~12 为细砂、中砂和粗砂中不同浓度泥浆的渗透系数变化曲线, 对于细砂 (图 10), 浓度 40 g/L 泥浆渗透系数在骤降后趋于稳定, 稳定后的渗透系数为  $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , 泥浆浓度 50~70 g/L 泥浆在砂样表面形成泥膜, 表层渗透系数  $k_{1-2}$  小于  $10^{-8} \text{ m/s}$ , 更深的土层渗透系数  $k_{2-3}$  和  $k_{3-4}$  数值接近, 均介于  $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ , 比  $k_{1-2}$  大 100 倍以上。

对于中砂 (图 11), 浓度 40~60 g/L 泥浆均未在砂样表面形成泥膜, 表层渗透系数  $k_{1-2}$  未降至  $10^{-8} \text{ m/s}$  以下, 除浓度 60 g/L 泥浆外,  $k_{2-3}$  和  $k_{3-4}$  均比  $k_{1-2}$  大 10 倍左右。浓度 70 g/L 泥浆在砂样表面形成泥膜, 渗透系数降至  $10^{-8} \text{ m/s}$  以下。对于粗砂 (图 12), 表层渗透系数  $k_{1-2}$  均大于  $10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $k_{2-3}$  和  $k_{3-4}$  接近  $k_{1-2}$ 。可以

看出, 泥浆渗透系数随泥浆浓度增大而减小, 随土体颗粒粒径增大而增大。当没有泥膜形成时, 泥浆的滤失量较大, 试验中的泥浆量有限, 故泥浆渗透持续时间较短。

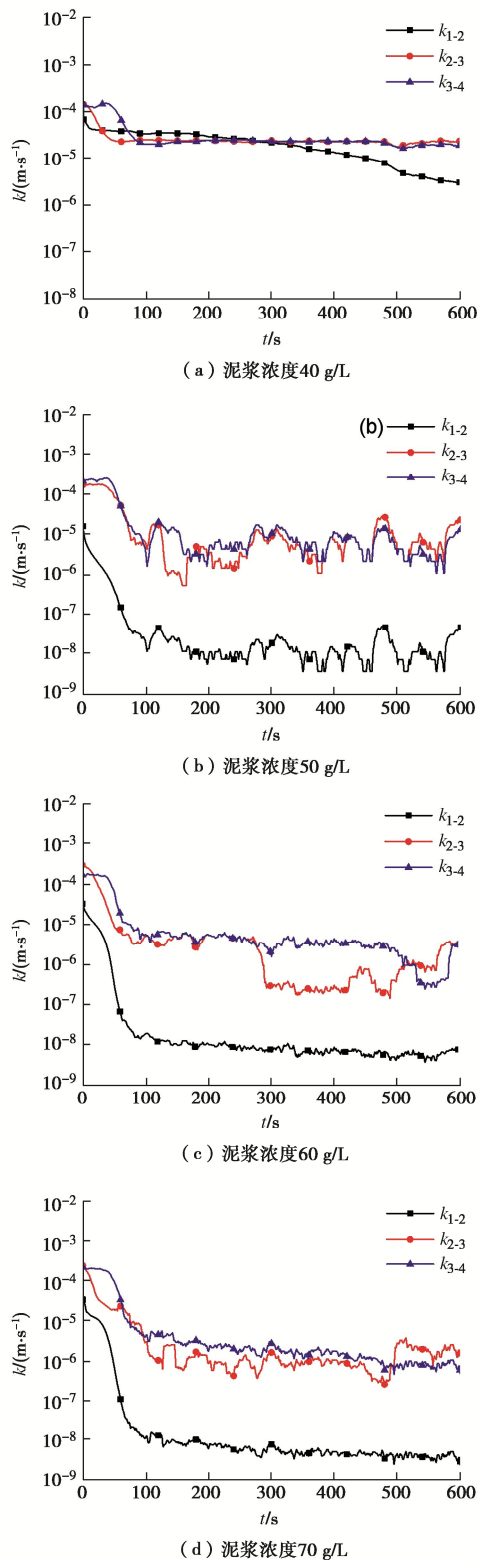


图 10 细砂中的泥浆渗透系数变化

Fig. 10 Change of permeability of fine sand for slurries with different bentonite concentrations

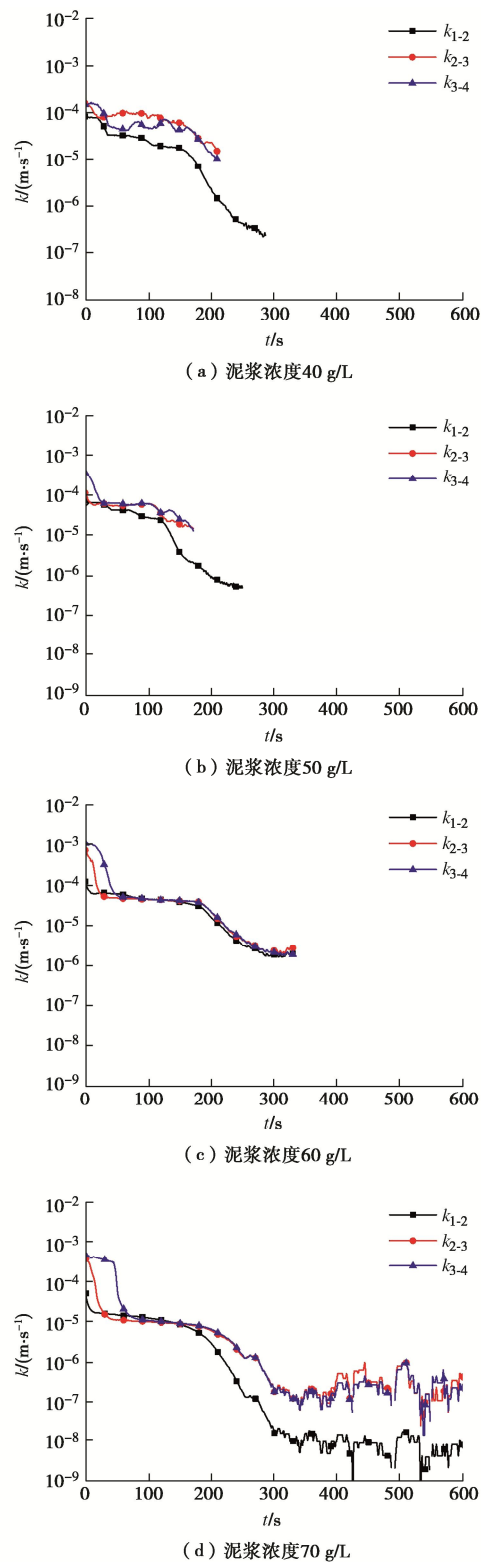


图 11 中砂中的泥浆渗透系数变化

Fig. 11 Change of permeability of medium sand for slurries with different bentonite concentrations

对于掺入渣土的泥浆, 泥浆渗透系数曲线如图 13 所示。泥浆的渗透系数随泥浆的密度增大而减小, 当泥浆密度为  $1050 \text{ kg/m}^3$  时, 表层泥浆渗透系  $k_{1-2}$  为  $10^{-5} \text{ m/s}$ , 大于深层渗透系数  $k_{2-3}$  和  $k_{3-4}$ , 说明表面没有泥

膜形成,而渗透带渗透系数  $k_{2-3}$  小于  $10^{-8}$  m/s。对于密度  $1100 \sim 1500$  kg/m<sup>3</sup> 泥浆,渗透带渗透系数各有差异,但都大于  $10^{-8}$  m/s。

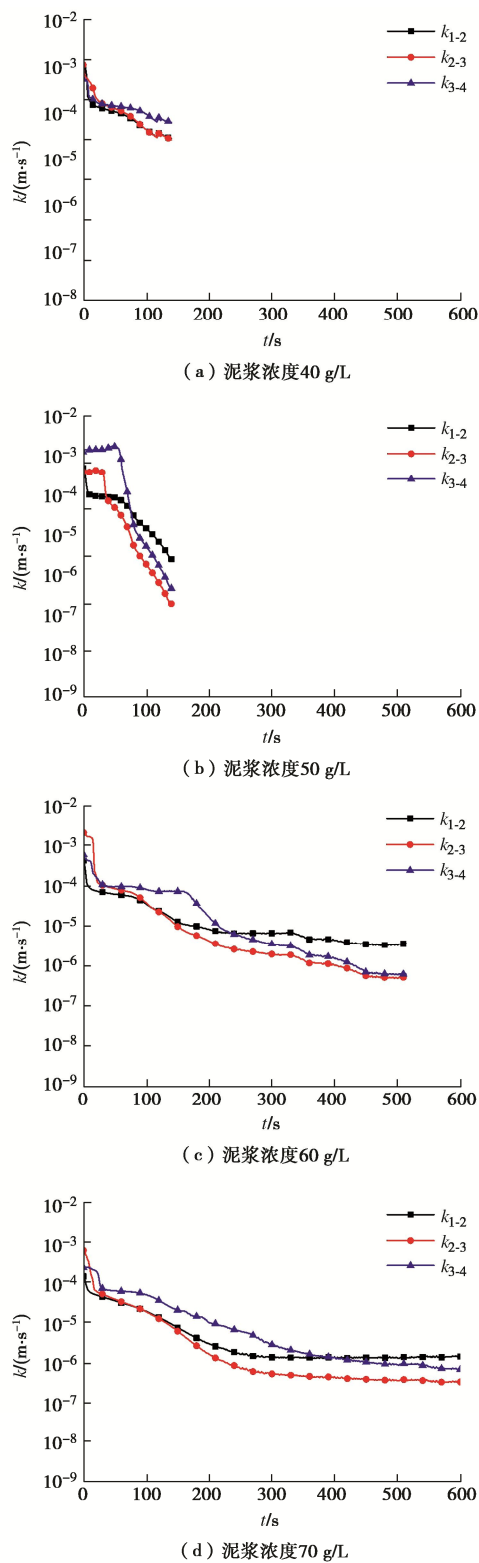


图 12 粗砂中的泥浆渗透系数变化

Fig. 12 Change of permeability of coarse sand for slurries with different bentonite concentrations

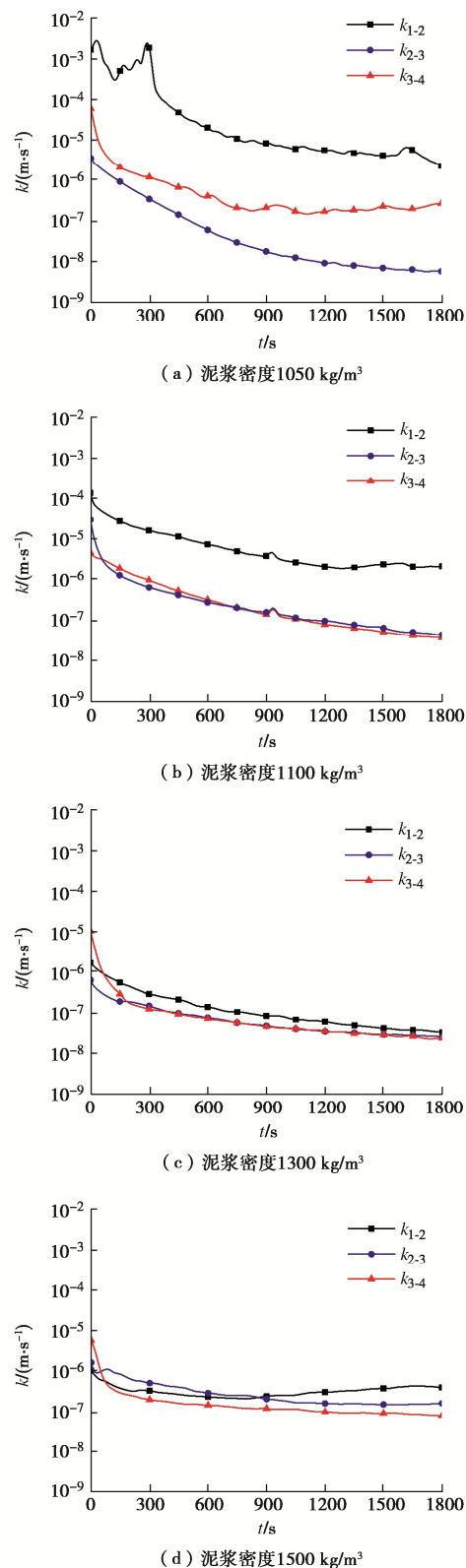


图 13 泥浆密度对细砂中的泥浆渗透系数影响

Fig. 13 Influences of slurry density on change of permeability of fine sand for slurry

## 2.4 地层孔压变化

泥浆的渗透模式分为 3 种: ①只有泥膜形成; ②既有泥膜形成, 又有渗透带形成; ③只有渗透带形成。泥浆的渗透模式决定了泥水盾构泥浆压力的传递模

式: 当有泥膜形成时, 泥浆压力通过泥膜转化为开挖面土体有效应力; 当没有泥膜形成时, 泥浆渗透带产生渗透压, 也即转化为开挖面土体有效应力。如图 14 所示, 泥浆压力在数值上等于地层静水压、地层超静孔压、有效泥浆压力(土体有效应力)之和。闵凡路等<sup>[2]</sup>指出, 地层孔压在泥膜段迅速降低, 并沿掘进方向逐渐趋于稳定; 当没有泥膜形成时, 地层孔压沿泥浆渗透带缓慢降低, 地层中的超静孔压值变大, 抵抗地层土压力的有效泥浆压力随之降低。

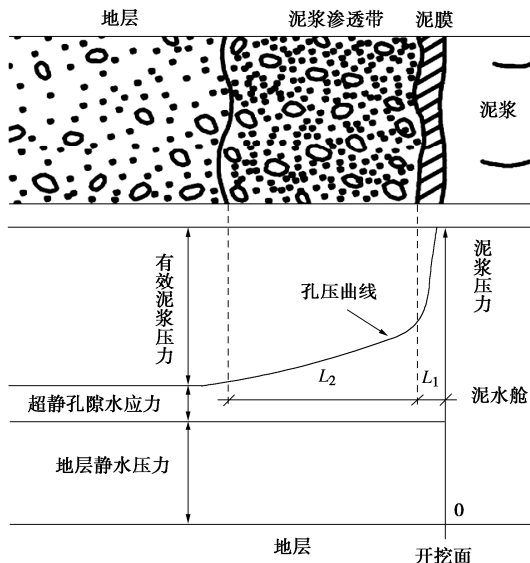


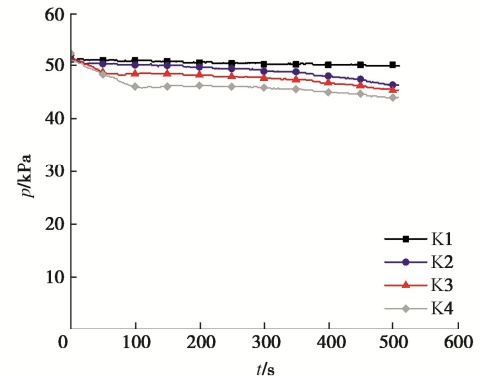
图 14 泥浆渗透成膜时开挖面附近压力分布示意图<sup>[2]</sup>

Fig. 14 Pressure distribution surrounding tunnel face during filter cake formation<sup>[2]</sup>

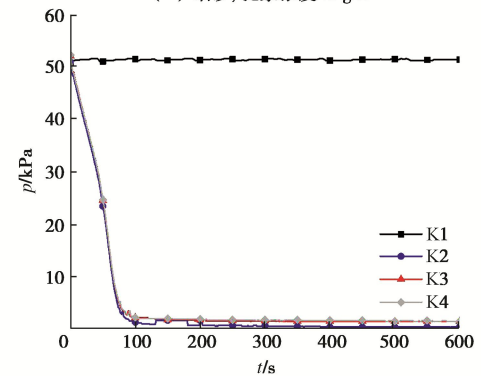
图 15 (a) 为饱和细砂地层 40 g/L 浓度泥浆渗透过程中不同深度地层孔压变化曲线, K1 位置压力(即泥浆压力值)保持 50 kPa, 3 min 后 K2~K4 位置的孔压值从 50 kPa 分别降至 48, 47, 45 kPa, 并趋于稳定, 说明渗透带开始发挥作用, 但效果有限。对于 50 g/L 浓度泥浆渗透过程(图 15 (b)), K2~K4 位置孔压在 60 s 内骤降至 0, 并趋于稳定, 此时泥膜开始形成。对于浓度更高的 60, 70 g/L, 结果相同, 不再赘述。浓度 60 g/L 泥浆在中砂中的渗透情况和浓度 40 g/L 泥浆在细砂中的渗透情况类似。对于浓度 70 g/L 泥浆在中砂中的渗透试验, 10 min 后 K2~K4 读数降为 0, 说明泥膜开始形成。和中砂结果类似, 对于粗砂, 40 和 50 g/L 浓度泥浆渗透时, K2~K4 位置孔压值为 50 kPa, 渗透带未发挥作用。对于 70 g/L 浓度泥浆, 10 min 后, K2~K4 位置孔压分别下降至 43, 39, 35 kPa, 渗透带发挥了一定作用。

当泥浆中混有渣土时, 地层孔压变化如图 16 所示。对于密度 1050 kg/m<sup>3</sup> 的泥浆, K3, K4 最终下降至 0 kPa。随着泥浆密度增大, 即渣土含量增大, K3, K4 的下降幅度减小。

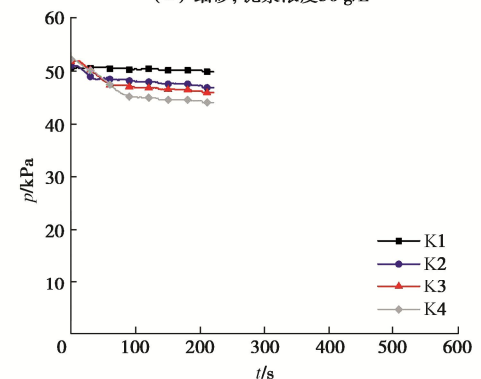
综合渗透系数和地层孔压结果分析, 可以看出, 地层超静孔压的影响范围和下降速率取决于泥膜和渗透带的泥浆渗透系数。泥膜或渗透带的渗透系数越小, 地层超静孔压的影响范围越小, 渗透带内孔压下降得越快; 就本文的工况而言, 当泥膜或渗透带的渗透系数低于  $10^{-8}$  m/s 时, 超静孔压的影响范围在 20 cm 以内。



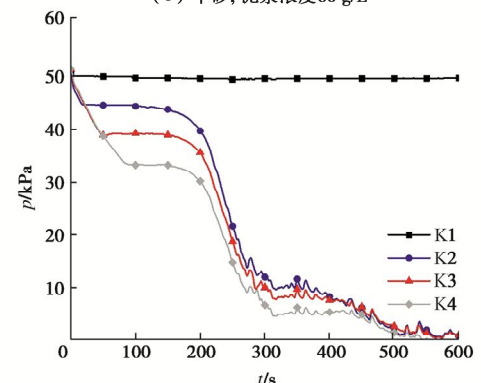
(a) 细砂, 泥浆浓度 40 g/L



(b) 细砂, 泥浆浓度 50 g/L



(c) 中砂, 泥浆浓度 60 g/L



(d) 中砂, 泥浆浓度 70 g/L



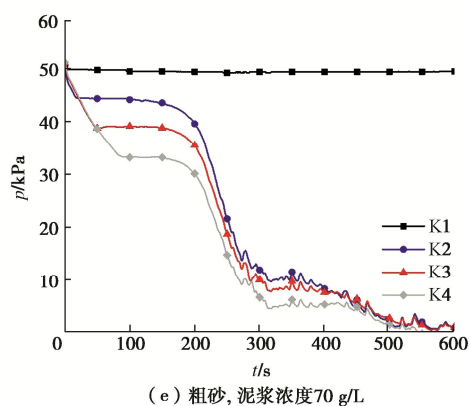


图 15 未掺渣土条件下泥浆压力 and 不同位置孔压变化

Fig. 15 Change of slurry pressure and pore pressure along depth for slurry without sand

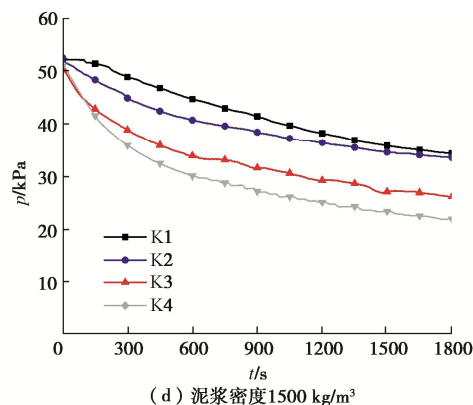
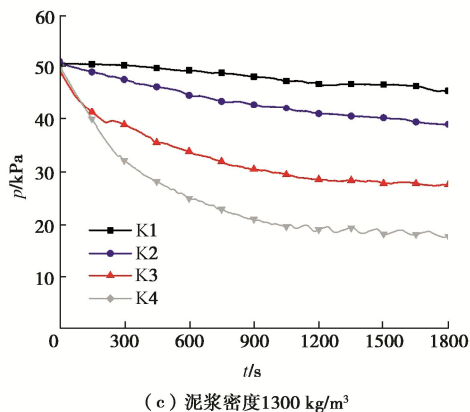
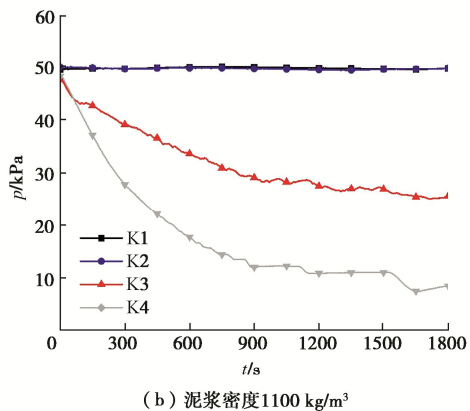
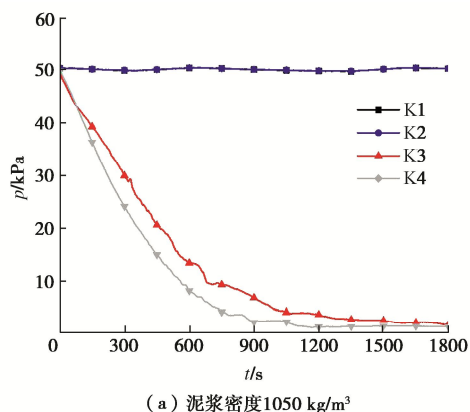


图 16 掺砂泥浆渗透过程中泥浆压力 and 不同位置孔压变化

Fig. 16 Change of slurry pressure and pore pressure along depth for slurry with sand

### 3 结 论

采用泥浆渗透试验分析了泥浆渗透过程中泥浆渗透速度和地层孔压的变化规律, 讨论了水力梯度、土体颗粒粒径、泥浆渣土含量对泥膜形成的影响, 探究了泥浆渗透带的物理力学特性以及泥浆压力传递机制, 得到以下 5 点结论。

(1) 水力梯度越小, 越不利于泥膜形成。

(2) 对于不同粒径的砂土地层, 渗透带的厚度不同。对于细砂地层, 泥浆渗透带厚度约为 1.5~5 cm, 远小于刀盘刀具的贯入深度 20 cm; 对于中砂和粗砂, 泥浆渗透带厚度可以达到 30 cm 以上。尽管细砂地层有利于泥膜形成, 却易被破坏; 中砂和粗砂地层虽不利于泥膜形成, 较厚的渗透带则更有利于开挖面稳定。

(3) 泥膜的渗透系数比渗透带的渗透系数低 100 倍以上, 泥膜的渗透系数的小于  $10^{-8}$  m/s, 而渗透带的渗透系数介于  $10^{-7} \sim 10^{-5}$  m/s。

(4) 当泥膜或渗透带的渗透系数较小时 ( $k < 10^{-8}$  m/s), 有利于控制地层超静孔压的影响范围, 且渗透带内孔压下降速率较快。

(5) 当泥浆中掺有渣土时, 泥浆的渗透速度高于未掺渣土的泥浆; 渗透带的渗透系数随泥浆密度增大而增大, 且地层超静孔压下降速率随泥浆密度增大而减小。

### 参考文献:

- [1] 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. (CHEN Renpeng, YIN Xinsheng, LI Yuchao, et al. Permeability of filter cake and its influence on face stability of slurry shield-driven tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2102-2108. (in

- Chinese))
- [2] 闵凡路, 朱 伟, 魏代伟, 等. 泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(4): 722-727. (MIN Fanlu, ZHU Wei, WEI Daiwei, et al. Change of pore water pressure in soil as filter cakes formed on excavation face in slurry shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(4): 722-727. (in Chinese))
- [3] 魏代伟, 朱 伟, 闵凡路. 砂土地层泥水盾构泥膜形成时间及泥浆压力转化率的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(2): 423-428. (WEI Daiwei, ZHU Wei, MIN Fanlu. Experimental study of forming time of filter cake and conversion rate of slurry pressure in slurry shield in sand stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(2): 423-428. (in Chinese))
- [4] 闵凡路, 吕焕杰, 宋帮红, 等. 砂地层孔径分析及其对泥浆在地层中渗透性的影响 [J]. 中国公路学报, 2020, **33**(3): 144-151. (MIN Fanlu, LYU Huanjie, SONG Banghong, et al. Pore size analysis and its influence on slurry infiltration in sandy layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(3): 144-151. (in Chinese))
- [5] TALMON A M, MASTBERGEN D R, HUISMAN M. Invasion of pressurized clay suspensions into granular soil[J]. Journal of Porous Media, 2013, **16**(4): 351-365.
- [6] XU T, BEZUIJEN A. Pressure infiltration characteristics of bentonite slurry[J]. Géotechnique, 2019a, **69**(4): 364-368.
- [7] XU T, BEZUIJEN A. Bentonite slurry infiltration into sand: filter cake formation under various conditions[J]. Géotechnique, 2019b, **69**(12): 1095-1106.
- [8] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2007, **40**(1): 81-95.
- [9] 刘 成, 陆 杨, 吕伟华, 等. 砂性地层中盾构泥浆粗粒材料对成膜效果的影响[J]. 中国公路学报, 2018, **31**(9): 104-111. (LIU Cheng, LU Yang, LYU Weihua, et al. Effects of coarse-particle materials in slurry on filter-cake formation effectiveness in sandy strata[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, **31**(9): 104-111. (in Chinese))
- [10] 宋 洋, 李 昂, 王韦颐, 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 mud proportioning optimization of slurry balance shield in mudstone and gravel composite stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(12): 4054-4062, 4072. (in Chinese))
- [11] 金大龙, 袁大军, 毛家骅. 盾构静-动态泥浆渗滤成膜及支护效率控制方法[J]. 中国公路学报, 2022, **35**(12): 154-167. (JIN Dalong, YUAN Dajun, MAO Jiahua. A novel approach for filter cake formation during static-dynamic shield tunneling and its support efficiency control method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, **35**(12): 154-167. (in Chinese))
- [12] ZIZKA Z, SCHOESSER B, THEWES M. Investigations on the transient support pressure transfer at the tunnel face during slurry shield drive part 1: case A – Tool cutting depth exceeds shallow slurry penetration depth [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021a, **118**: 104168.
- [13] ZIZKA Z, SCHOESSER B, THEWES M. Investigations on the transient support pressure transfer at the tunnel face during slurry shield drive Part 2: case B–Deep slurry penetration exceeds tool cutting depth[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021b, **118**: 104169.
- [14] COB (Centre for Underground Construction). Second Heinenoord Tunnel Evaluation Report, COB report K100-06 [R]. Gouda, the Netherlands: COB, 2000.
- [15] Leutert. Datasheet for Ball Harp[R]. Adendorf: Friedrich Leutert GmbH & Co KG, 2016.