

DOI: 10.11779/CJGE20230904

泥水盾构抗海水劣化泥浆流变性能及成膜机制分析

丁万涛^{1,2}, 郭文静¹, 曹凯¹, 李振宇³

(1. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250002; 2. 山东大学岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250061; 3. 哈尔滨地铁集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 近海或越海泥水盾构隧道建设中, 泥浆接触海水后性质劣化难以形成泥膜, 极易引起开挖面失稳。提出一种使用亚麻籽胶作为外加剂的抗海水劣化泥浆, 基于自主研发的变截面渗透柱研究了亚麻籽胶含量和海水侵入度对累积滤水量及超静孔隙水压力(超静孔压)的影响; 获取了泥浆累积粒径分布曲线及流变性质, 分析了抗海水劣化泥浆的渗透成膜机制。结果表明, 亚麻籽胶能够提高降滤失效果、加快超静孔压消散, 促进泥膜形成。随海水侵入度增大, 滤水量先减小后增加, 泥浆 d_{85} 先变大后减小, 流变性质则逐渐变差。侵入度 $\leq 30\%$ 时泥浆能够抵抗海水劣化, 颗粒堵塞作用是致密泥膜形成的关键; 侵入度较高(50%, 70%)时泥膜渗透性变差, 颗粒堵塞及流变阻塞耦合作用可能是抑制泥浆持续向地层渗透的原因; 侵入度为100%时泥浆性质严重劣化, 无法形成泥膜。研究成果可为海水环境下泥水盾构施工抗海水劣化泥浆的研发提供可行思路。

关键词: 海底泥水盾构; 抗海水劣化泥浆; 渗透柱试验; 颗粒堵塞; 流变阻塞

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)12-2484-08

作者简介: 丁万涛(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事盾构隧道稳定性等方面的研究工作。E-mail: dingwantao@sdu.edu.cn。

Rheological properties and film-forming mechanism of anti-seawater deterioration slurry for slurry shield

DING Wantao^{1,2}, GUO Wenjing¹, CAO Kai¹, LI Zhenyu³

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China; 2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Harbin Metro Group Corporation Limited, Harbin 150080, China)

Abstract: During the construction of offshore and seabed slurry shield tunnels, the properties of slurry contacting with seawater are seriously deteriorated, leading to the failure of filter cake formation and the instability of excavation face. In this study, an anti-seawater deterioration slurry using flaxseed gum as an admixture is proposed. Based on the self-developed variable cross-section infiltration column, the effects of the flaxseed gum content and seawater intrusion degree on the cumulative water filtration and excess pore water pressure are studied, respectively. The cumulative particle size distribution and rheological properties of slurry under different seawater concentrations are obtained. The mechanism of infiltration and filter cake formation of anti-seawater deterioration slurry is analyzed. The results show that the flaxseed gum can improve the effects of fluid loss reduction, accelerate the dissipation of the excess pore pressure, and promote the formation of mud film. With the increase of the seawater intrusion, the fluid loss decreases first and then increases, the d_{85} of slurry increases first and then decreases, and the rheological properties are gradually deteriorated. When the intrusion degree is less than 30%, the slurry can resist the seawater deterioration, and the particle clogging is the key to the formation of dense filter cake. After the intrusion degree reacheds 50%, the filter cake permeability becomes worse. The coupling effects of the particle clogging and rheological blocking may be the reason for inhibiting the continuous penetration of the slurry into the formation. When the intrusion degree is 100%, the slurry properties are deteriorated seriously, and the filter cake cannot be formed. The research can provide feasible ideas for the research and development on seawater-resistant slurry during the construction of slurry shields under seawater environment.

Key words: seabed slurry shield; anti-seawater deterioration slurry; infiltration column test; particle clogging; rheological blocking

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278403); 山东省自然科学基金项目(ZR2021ME135)

收稿日期: 2023-09-15

0 引 言

近年来, 沿海地区经济发展水平不断提高, 近海地铁及跨海隧道建设与日俱增, 泥水盾构法因具有安全高效、地质适应性强等优点, 已被广泛应用于隧道施工中^[1]。泥水盾构施工的关键是性能良好的加压泥浆向地层渗透, 形成的泥膜可以将泥浆压力转化为土骨架有效应力, 从而平衡地层水土压力, 保证开挖面稳定性^[2]。一般来说, 泥浆主要由膨润土、水和外加剂组成^[3], 流变性质和渗透性能是衡量膨润土泥浆成膜能力的重要指标。

泥水盾构在海水环境下施工面临着巨大挑战, Mazzieri 等^[4]、孙金鑫等^[5]指出, 海水中大量离子会挤压膨润土颗粒双电层, 膨润土膨胀受到抑制导致其黏度降低。Wang 等^[6]发现膨润土泥浆与海水混合后流变性质严重劣化, 泥浆屈服应力和表观黏度显著减小。在海底隧道入海段及沿海地区地铁隧道施工中, 地层常为高渗透性砂层, 海水侵入会加大成膜难度。一些学者通过实验室渗透柱试验研究了海水侵入时膨润土泥浆在砂土中的入渗行为。Min 等^[7]开展了一系列砂柱试验, 发现泥浆中海水含量增加会提高滤失量和泥膜渗透性, Zeta 电位是导致发生这种变化的根本原因。Qin 等^[8]研究了含盐泥浆在细砂层和中砂层的渗透行为并得到了相似的结论。为应对海水侵入, 黄小龙^[9]、杨振兴等^[10]通过向海水泥浆体系中不断加入外加剂来改善泥浆性质和控制失水量, 这种方法显然不能从根本上解决海水对泥浆及泥膜渗透性的劣化问题。

另一方面, 关于泥浆渗透成膜机制的研究主要聚焦于颗粒堵塞作用, 泥浆粒径与地层孔径之间的关系是分析渗透行为及成膜机理的主要依据^[11]。Min 等^[12]使用不同泥浆和地层开展了一系列渗透试验, 观察到 3 种类型的泥膜: 泥皮型(I 型)、泥皮+渗透带型(II 型)和渗透带型(III 型), 提出可由地层平均孔径与泥浆 d_{85} 粒径之比判断泥膜形成类型。倪红娟等^[13]通过数值模拟发现泥浆与地层有效粒径之比对泥膜形成有重要影响。徐涛等^[14]提出泥膜形成及渗透带厚度与砂土地层粒径大小有关。然而, 泥浆是一种复杂的固液两相流体, 其流动时与地层间的相互作用不可忽视, 流变性质是反映泥浆渗透行为的重要指标^[6], 但目前的研究较少涉及流变阻塞效应在渗透成膜过程中的影响。

针对海水入侵造成的泥浆性质劣化及泥膜渗透性高等问题, 本文提出一种采用亚麻籽胶作为外加剂的抗海水劣化泥浆, 研究了不同亚麻籽胶含量和海水侵入度下泥浆渗透行为及成膜特征, 基于颗粒堵塞作用和流变阻塞效应分析了泥浆的渗透成膜机制。研究结

果可为海水环境下泥水盾构泥浆材料选择及渗透成膜机理分析提供重要参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料与泥浆制备

本试验泥浆由钠基膨润土、亚麻籽胶及不同比例淡水组成。所用钠基膨润土产自中国河北省, 膨胀指数为 16 mL/g。亚麻籽胶产自中国河南省, 是一种新型多功能植物胶, 具有较强的膨润性、增黏性。海水来自中国黄海, pH 值为 7.7~8.3, 密度为 1.03 g/cm³, 含盐量约为 3.5%, 海水中的离子主要包括 Cl⁻(18980 mg/L)、Na⁺(10506 mg/L)、Mg²⁺(1272 mg/L)、Ca²⁺(400 mg/L)和 K⁺(280 mg/L)。

以钠基膨润土: 水(淡水+海水) = 14: 86 制备基浆^[6], 根据有无海水侵入分为两组, 分别研究亚麻籽胶作为盾构泥浆外加剂的可行性及泥浆的抗海水劣化能力, 各组泥浆成分见表 1。制浆时, 向泥浆桶中边搅拌边加入一定比例的淡水混合物、钠基膨润土及亚麻籽胶, 然后采用搅拌机以 1200 r/min 搅拌 20 min 并静置 24 h 使其充分膨化, 泥浆在使用前需再次搅拌 5 min 使其均匀。

表 1 各组泥浆成分				
Table 1 Slurry composition of each group 单位: %				
钠基膨润土	组别	编号	亚麻籽胶	海水/水
14	无海水侵入	F0	0	0
		F1	0.1	
		F15 (S0)	0.15	
	海水侵入	S1	0.15	10
		S2		20
		S3		30
		S5		50
		S7		70
		S10		100

1.2 试验装置与方法

流变测试基于美国博勒飞流变仪、温度控制装置及 Rheo 3000 analysis software 开展, 测量程序包括预剪切(剪切率 1000 s⁻¹, 1 min)和剪切下降(剪切率由 1000 s⁻¹ 匀速降至 0 s⁻¹, 3 min)两个阶段, 设置预剪切目的是使泥浆处于稳定均匀的流动状态, 减少泥浆颗粒因重力沉降对流变结果产生的影响^[6], 试验温度环境为恒温 20℃。泥浆粒径分布曲线采用英国 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度仪获取, 漏斗黏度采用马氏漏斗黏度计测得。为了模拟实际工程中泥浆三维渗透成膜过程, 自主设计了如图 1 所示的亚克力变截面渗透柱, 它由上部泥浆仓(高度 30 cm、直径 10 cm)和下部地层仓(高度 30 cm、直径 15 cm)组成。渗透柱顶部分别设置压力表、进浆口及进气口;



图1 变截面渗透试验系统

Fig.1 Variable cross-section penetration test devices

柱底部铺设一层厚度为 1.5 cm 的透水石并开设滤水口，质量采集器收集沿滤水管排出的滤水，沿渗透柱侧壁安装了 7 个孔压计，超静孔压和累积滤水量数据同步采集并可通过监测软件实时显示。试验时，首先采用分层击实法制备地层（物理参数见表 2），地层准备好后使用水将其饱和，然后将配制好的泥浆由进浆口注入上部泥浆仓，气压通过空压机和稳压装置以 50 kPa 恒压施加，试验在渗透柱底部阀门打开后开始。

表 2 试验地层物理参数

Table 2 Physical parameters of test strata

物理参数	地层材料	粒径范围	孔隙率	干密度	渗透系数	地层平均孔径
取值	砂	0.63~1.25 mm	0.40	1.59 g/cm ³	4.8×10 ⁻⁴ m/s	51 μm

注：砂经 105℃烘干 24 h 后使用，渗透系数由常水头试验测得。

泥浆能够快速形成致密泥膜，阻止后续泥浆的继续渗入，试验进行至 600 s 时仅收集到 90 g 清澈滤水，渗透距离约 1~3 cm，渗透类型为 I 型。

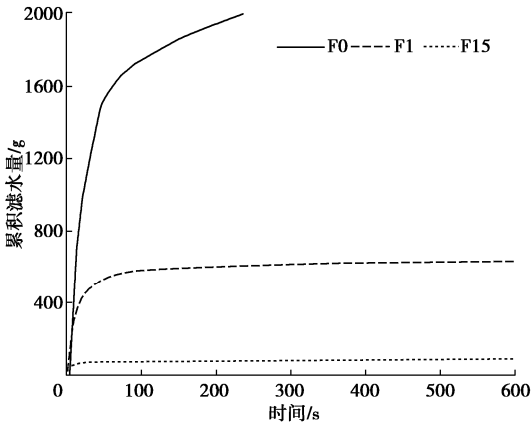


图2 累积滤水量变化曲线

Fig. 2 Change curves of cumulative water filtration

2 试验结果与讨论

2.1 无海水侵入时渗透试验结果

图 2 展示了无海水侵入时累积滤水量随时间的变化规律。亚麻籽胶含量为 0% 时，试验初期 F0 泥浆快速渗入地层导致滤水量大幅增加，泥浆持续渗透并贯穿地层沿滤水管逸出，试验至 235 s 时累积滤水量高达 1995 g，滤水因掺有大量泥浆而呈现浑浊(图 3(a))，渗透类型为 III 型。

当亚麻籽胶含量逐渐增加，累积滤水量曲线出现了明显的两个阶段：初期泥浆喷射阶段和泥膜持续形成阶段。亚麻籽胶的加入使 F1 泥浆能够形成微透水泥膜，因此渗透速率显著降低，滤水量呈现出先迅速后缓慢增加、最后趋于稳定的变化规律，试验至 600 s 时，F1 泥浆在地层中的渗透距离约 10.5 cm，渗透类型为 II 型。

当亚麻籽胶含量为 0.15% 时，初期泥浆喷射阶段更短，泥膜持续形成阶段累积滤水量显著减少，F15

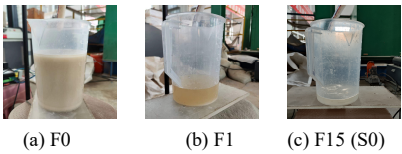


图3 试验过程中收集的滤水

Fig. 3 Water filtration collected during tests

超静孔压是分析泥浆渗透成膜过程中支护力传递机理的重要指标，图 4 描述了超静孔压随时间的变化规律。由图 4 (a) 可知，当亚麻籽胶含量为 0% 时，试验开始后地层不同深处超静孔压快速下降，随后出现小幅增长并保持不变，同一时刻超静孔压沿地层深度增加逐渐减小。由于 F0 泥浆持续向地层中渗透且渗透距离贯穿整个地层，试验过程中未形成泥膜，泥浆压力无法有效转移到土骨架上，因此渗透稳定时最小孔压 (P7) 仍较高，为 18.12 kPa。在这种情况下，较大的渗透力使开挖面无法得到有效支护，极易失稳坍塌。

图 4 (b) 表明 F1 组试验开始后超静孔压迅速下降然后稳定在较低值, 0.1% 亚麻籽胶的存在使微透水膜能够较快形成, 泥浆压力通过这层泥膜能够转化为土骨架有效应力, 超静孔压基本消散。当亚麻籽胶含量增加到 0.15% 时, 从图 4 (c) 可看出, 仅需 3 s 超静孔压便消散完毕, 泥浆压力转化率提高, 说明在短时间内便形成了渗透性低且密封性良好的泥膜, 有利于维持开挖面稳定性。

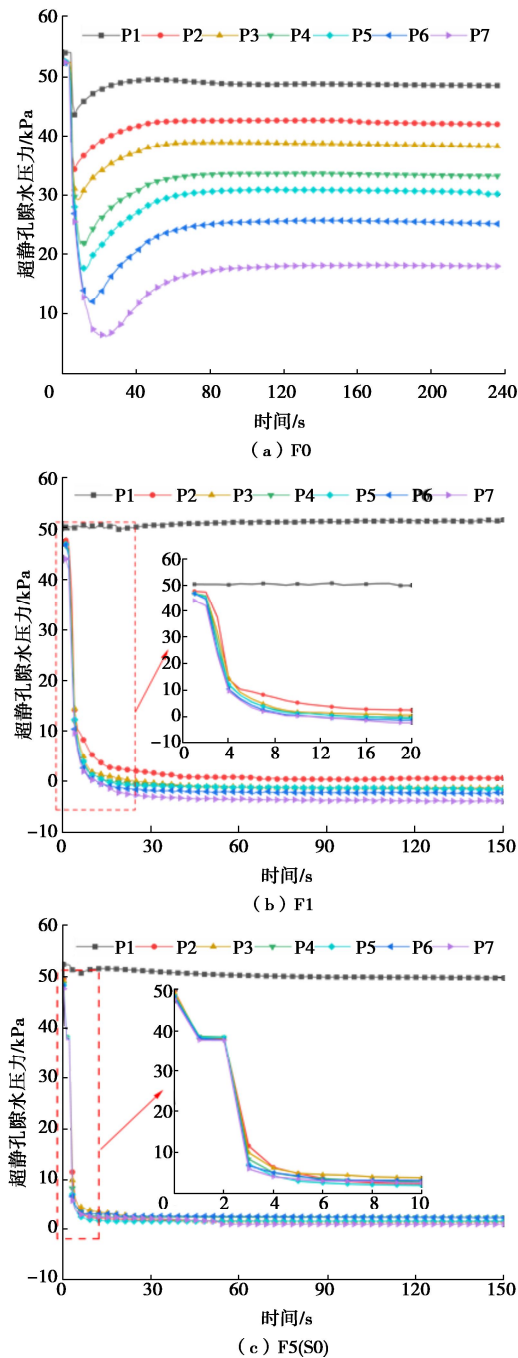


图 4 超静孔压随时间变化曲线

Fig. 4 Change of excess pore water pressure with time

2.2 海水侵入时渗透试验结果

由 2.1 节可知, 亚麻籽胶含量为 0.15% 时泥浆能

够在地层中快速渗透形成致密泥膜, 因此本节基于 F15(S0) 泥浆分析海水侵入度对渗透成膜规律的影响。

从图 5, 6 可以看出, 海水侵入度为 10% 时, 试验全程没有水滤出。海水侵入度为 20% 时, 试验前期滤水量为 0, 200 s 后开始缓慢有水滤出, 600 s 时仅收集到 50 g 滤水。这说明试验开始后, S1, S2 两组迅速形成了 I 型泥膜, 阻止了泥浆继续入渗, 相比于 S1 组致密泥膜, 持续气压下 S2 组泥膜在试验后期渗透性略有变大。与 S0 泥浆相比, 10%, 20% 海水的存在提高了 S1, S2 泥浆的降滤失及成膜能力, 泥浆能够抵抗海水劣化, 维持开挖面稳定性。海水侵入度为 30% 时, 试验开始后泥浆在压力作用下向地层缓慢入渗, 滤水量逐渐增加, 累积滤水量曲线斜率逐渐减小随后保持不变, 试验进行至 600 s 时收集到 157 g 滤水, 略高于无海水侵入组, S3 泥浆仍具有一定的抗海水劣化能力并形成了低渗透性的 I 型泥膜。

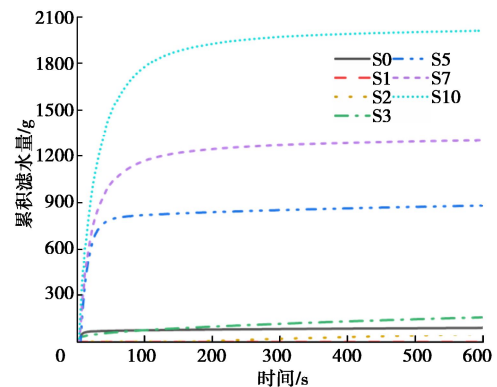


图 5 累积滤水量变化曲线

Fig. 5 Change curves of cumulative water filtration

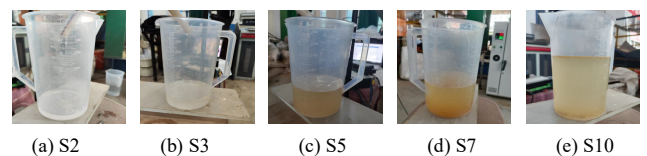


图 6 试验过程中收集的滤水

Fig. 6 Water filtration collected during tests

当海水侵入度增加到 50% 后, 海水侵入度越大, 初期泥浆喷射阶段累积滤水量越大, 进入泥膜持续形成阶段所用时间也越长, 混合大量海水的泥浆降滤失效果明显变差, S5, S7 最终渗透距离分别为 9, 19 cm, 渗透类型为 II 型。当海水侵入度为 100% 时, 由于 S10 初期泥浆喷射阶段过长, 大量泥浆向地层渗透取代了孔隙水, 后续泥浆渗透速率减缓, 因而累积滤水量曲线出现了平台阶段。试验结束时 S10 渗透距离已贯穿整个地层, 滤水中掺有少量泥浆, 渗透类型为 III 型。

不同海水侵入度时地层中超静孔压变化曲线如图 7 所示。从图 7 (a) ~ (c) 可以看出, S1, S2, S3

组超静孔压均可在 6 s 内迅速消散, 泥浆在少量海水侵入时仍能快速形成致密泥膜, 泥浆压力得以转化为土骨架有效应力。在海水侵入度较低时, 泥浆具有较强的抗海水劣化能力。

图 7 (d) 表明试验开始后地层不同位置处超静孔压迅速减小, 除 P2, P3 出现一段平台外其余均降至 0 值左右。这是因为 S5 泥浆入渗首先在浅部地层形成了渗透系数较低的渗透带, 保证了深部地层 P4~P7 超静孔压消散, 随着地表泥膜逐渐形成, P2, P3 也逐渐消散, 因此, 海水侵入度为 50% 时, 泥浆压力转化效率降低。当海水侵入度为 70% 时 (图 7 (e)), 由于泥浆渗透距离变长、泥膜渗透性变差, 超静孔压仅能

在深部地层完成消散, 而浅部地层最终保持在 5~15 kPa, 泥浆压力转化效率进一步降低。

当海水侵入度增加到 100%, 如图 7 (f) 所示, 150 s 时 P1, P2 超静孔压高于 25 kPa, 泥浆压力转化效率显著下降, 泥膜没有形成导致大部分泥浆压力以渗透力形式作用在地层, 不利于维持开挖面稳定。此外, 20 s 时 P5 开始大于 P4, 超静孔压变化不再符合沿地层深度增加逐渐降低这一规律, 这是因为 S10 泥浆在三维地层空间中并非均匀向周围渗透而是更偏向于 P4 侧, 使得 P5 侧上方地层渗透系数相对较高、泥浆压力转化效率较差, 因此 P5 逐渐高于 P4。

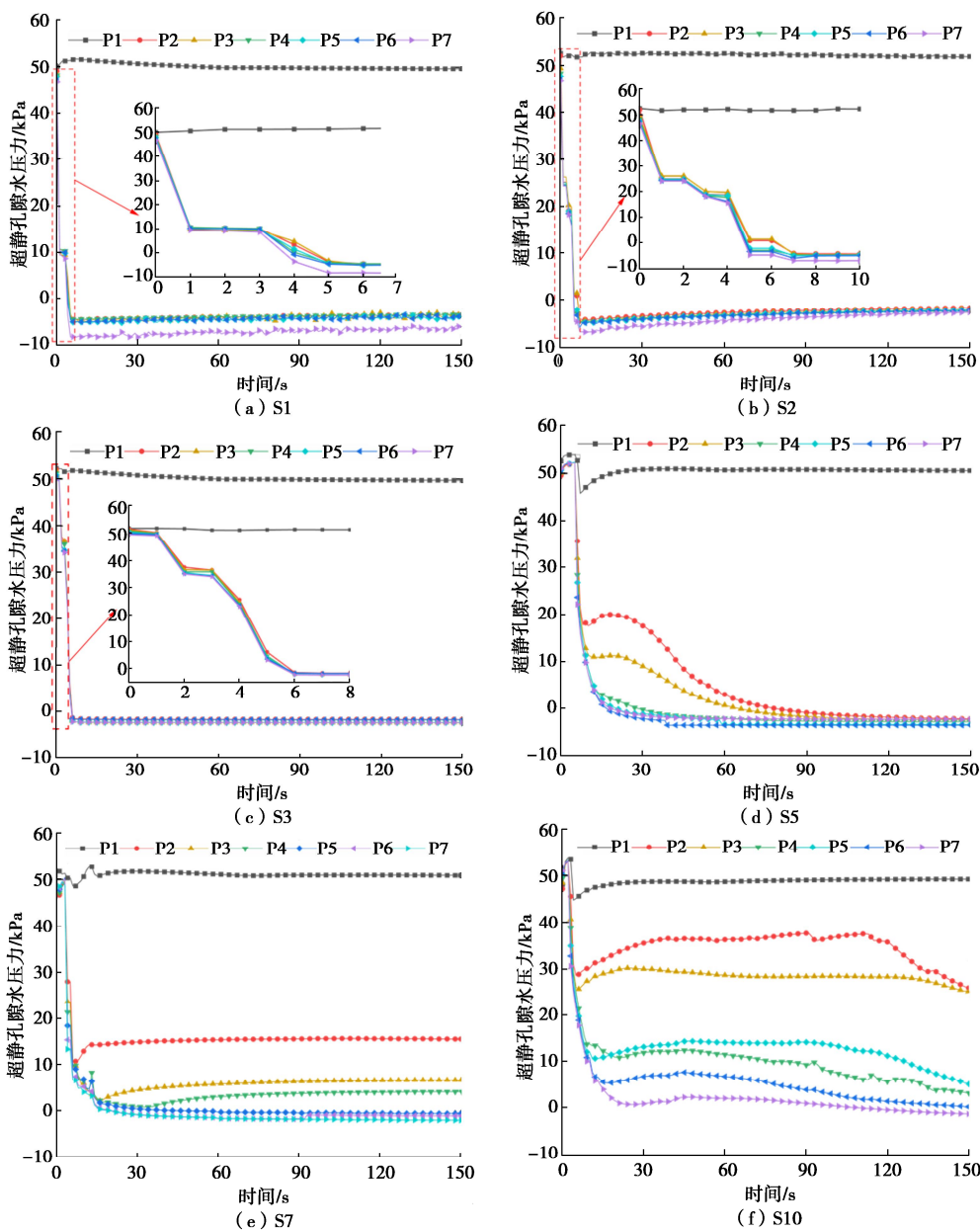


图 7 超静孔压随时间变化曲线

Fig. 7 Change of excess pore water pressure with time

3 抗海水劣化泥浆成膜机制分析

3.1 累计粒径分布曲线

泥浆粒径与地层孔径之间的关系、泥浆流变性质对开挖面泥膜形成有重要影响。图 8、9 分别描述了海水侵入度对泥浆累积粒径分布曲线和流变性质的影响规律。由图 8 可知, 随海水侵入度增加泥浆粒径累积级配曲线呈先向右移、后向左移的趋势, 泥浆粒径先略有增大然后显著减小, 说明海水对泥浆颗粒团聚现象的作用为先促进后抑制, [20%, 30%]是泥浆颗粒团聚现象由强转弱海水浓度区间。图 8 中还列出了各泥浆的 d_{85} 粒径值, 该值代表泥浆中 85% 颗粒所小于的粒径, 能够表征泥浆中大部分颗粒可以通过的地层孔径的大小, d_{85} 值由大到小的排序为 $S1>S2>S0>S3>S5>S7>S10$ 。

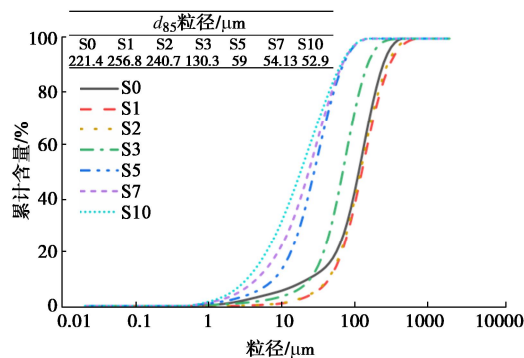


图 8 海水侵入度对累计粒径分布曲线的影响

Fig. 8 Effects of seawater intrusion on distribution curve of cumulative particle size

3.2 流变性质

从图 9 可以看出, 流变曲线随海水侵入度增大趋向横坐标轴移动, 泥浆的剪切应力及表观黏度逐渐降低。

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力 (Pa); γ 为剪切速率 (s^{-1}); τ_0 , k , n 分别为屈服应力 (Pa)、稠度系数和流变指数。

采用如式 (1) 所示的 Herschel-Bulkley 模型对图 9 (a) 中的数据进行拟合, 得到的流变方程结果表明泥浆屈服应力、稠度系数与海水侵入度呈负相关, 而流变指数则表现出正相关。表观黏度和屈服应力减小意味着流变性质受到劣化, 海水侵入使泥浆在地层流动所需克服的阻力变小, 易于渗透滤失。此外, 随海水侵入度增加流变曲线彼此之间愈发接近, 海水劣化作用逐渐减弱。

为了更直观反映泥浆黏度的大小, 表 3 列出了不同海水侵入度下泥浆的漏斗黏度。由表 3 可以看出, 海水侵入度较小时漏斗黏度随侵入度增加下降幅度大, 侵入度较高时下降幅度变小, 变化规律与表观黏

度较为一致。

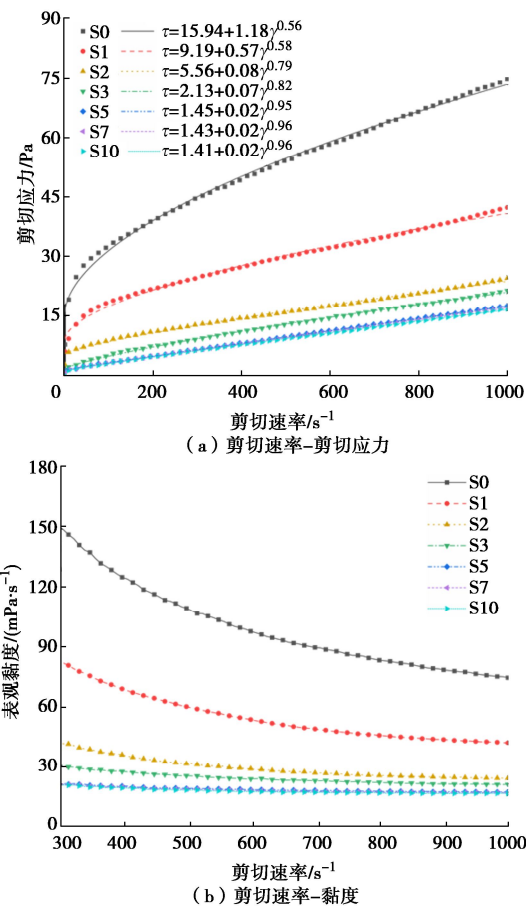


图 9 海水侵入度对流变性质的影响

Fig. 9 Effects of seawater intrusion on rheological properties

表 3 泥浆漏斗黏度

Table 3 Funnel viscosities of slurry

组号	海水侵入度/%	漏斗黏度/s
S0	0	38.1
S1	10	30.8
S2	20	25.4
S3	30	22.8
S5	50	16.1
S7	70	14.5
S10	100	13.9

3.3 成膜机制分析

为了更直观地分析抗海水劣化泥浆的成膜机制, 表 4 列出了各组泥浆性质及渗透试验结果。

海水侵入度较小时, 尽管 S1、S2 及 S3 泥浆流变性质受到大幅劣化, 但 d_{85} 粒径远大于地层平均孔径, 因此泥浆颗粒能够迅速堵塞地表孔隙并逐渐淤积形成泥膜, 有效阻止泥浆向地层渗透, 此时颗粒堵塞在泥膜形成过程中起主导作用 (图 10 (a))。相比于 Min 等^[7]、Qin 等^[8]的海水侵入砂柱试验结果, S1、S2 泥浆降滤失能力显著高于 S0, 形成了渗透性更低的泥膜。有研究指出海底地层地下水中海水含量约为 20%^[15], 在这种情况下, 含亚麻籽胶泥浆能够有效抵抗海水劣化,

表 4 泥浆性质与渗透试验结果之间的关系

Table 4 Relationship between slurry properties and infiltration test results

组号	海水浓度/%	渗透类型	累积滤水量/g	$d_{85}/\mu\text{m}$	流变方程	表观黏度/(mPa·s)	漏斗黏度/s
S0	0	I	90	221.40	$\tau=15.94+1.18\gamma^{0.56}$	74.9	38.1
S1	10	I	0	256.80	$\tau=9.19+0.57\gamma^{0.58}$	42.5	30.8
S2	20	I	50	240.70	$\tau=5.56+0.08\gamma^{0.79}$	24.6	25.4
S3	30	I	157	130.30	$\tau=2.13+0.07\gamma^{0.82}$	21.5	22.8
S5	50	II	881	59.00	$\tau=1.45+0.02\gamma^{0.95}$	17.6	16.1
S7	70	II	1300	54.13	$\tau=1.43+0.02\gamma^{0.96}$	17.2	14.5
S10	100	III	2010	52.90	$\tau=1.41+0.02\gamma^{0.96}$	16.8	13.9

注：表观黏度取剪切速率为 1000 s⁻¹时的表观黏度。

保证致密泥膜快速形成及开挖面稳定性。

海水侵入度为 50%，70%时，泥浆颗粒粒径减小并接近地层平均孔径，仅有部分较大颗粒可以堵塞地表孔隙，颗粒堵塞作用减弱，泥浆中的小颗粒则在压力作用下向地层深处运移，此时在孔隙中的流动可以视为管道流（图 10（b））。泥浆在管道中的流动可分为流核区与速梯区：管道中心为流核区，该区域泥浆所受剪切应力小于屈服应力，因而不存在剪切作用，泥浆速度保持恒定不变；流核区与管壁之间为速梯区，该区域由速度梯度产生的剪切应力大于泥浆的屈服应力，泥浆发生剪切变形产生能量消耗、压降减小^[16-17]。已有研究表明能量损耗与流变参数和管径大小有关^[18]。当海水侵入度为 50%，70%时，泥浆表观黏度、屈服应力及稠度系数明显减小，其在地层孔隙流动时能量消耗低于 S3，因此 S5，S7 泥浆相比 S3 具有更远的渗透距离。另一方面，泥浆作为具有黏度的流体，其与管道壁之间存在摩擦使得能量损耗增加，导致小颗粒流动速度减缓进而发生沉积；同时，泥浆渗透过程中小颗粒沉积会使地层孔径减小，能量消耗和压降增加，流变阻塞效应使得小颗粒进一步沉积、停滞，泥浆渗透受到抑制并停止。因此，在颗粒堵塞和流变阻塞耦合作用下，S5，S7 泥浆的渗透类型为泥皮+渗透带型。

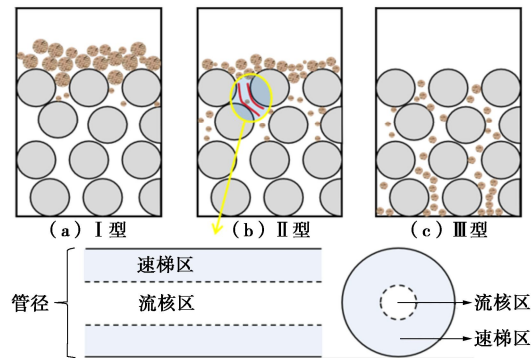


图 10 渗透成膜机理

对于 S10 泥浆，在 100%海水劣化下，泥浆颗粒因粒径几乎等于地层平均孔径而难以堵塞地层孔隙，较小的流变阻塞效应也不足以抑制其向深处运移，泥

浆持续渗透并贯穿地层逸出，无法形成泥膜（图 10（c））。

4 结 论

为解决海水侵入导致泥浆劣化、难以成膜问题，研究了不同亚麻籽胶含量及海水侵入度下泥浆渗透成膜规律，结合泥浆粒径分布和流变性质，分析了抗海水劣化泥浆的成膜机制，得到以下 4 点结论。

（1）无海水侵入时，滤水量随亚麻籽胶含量增加显著减少，超静孔压消散加快，渗透类型由渗透带型逐渐转变为泥皮型。海水侵入度≤30%时累积滤水量较少，泥浆能够抵抗海水劣化并形成低渗透性泥膜；侵入度达到 50%后，泥浆降滤失效果变差，超静孔压消散减缓，渗透类型为泥皮+渗透带型；侵入度为 100%时，滤水量大幅增加，渗透距离贯穿整个地层。

（2）泥浆 d_{85} 随海水侵入度增大先增大后减小；海水侵入度增大降低了泥浆的表观黏度和屈服应力，流变性质劣化，泥浆易于渗透流失。

（3）侵入度≤30%时，颗粒堵塞作用是致密泥膜形成的关键。侵入度较高（50%，70%）时泥膜渗透性变差，颗粒堵塞及流变阻塞耦合作用可能是抑制泥浆持续向地层渗透的原因。

（4）本研究基于泥浆渗透柱试验宏观现象，对抗海水劣化泥浆成膜机制进行了分析；为更深入地从微观角度揭示亚麻籽胶泥浆与海水之间的化学反应原理，未来将进一步开展 zeta 电位分析及微观扫描测试。

参考文献：

[1] 钟小春, 莫暖娇, 余明学, 等. 盾尾刷环形密封系统单元试验及水密性机制研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 354-361. (ZHONG Xiaochun, MO Nuanjiao, YU Mingxue, et al. Unit tests on shield tail brush annular sealing system and its watertightness mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 354-361. (in Chinese))

[2] 段丽敏, 王 建, 侯丽平, 等. 考虑刀盘推力的泥水盾构隧

- 道开挖面平衡机理研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(7): 1556-1562. (DUAN Limin, WANG Jian, Hou Liping, et al. Research and application for balance mechanism of excavation surface of slurry shield tunnel considering cutterhead thrust[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(7): 1556-1562.. (in Chinese))
- [3] 雷华阳, 施福硕, 刘旭, 等. 砂性土层中植物胶改性泥浆性质及渗透成膜试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(2): 394-401. (LEI Huayang, SHI Fushuo, LIU Xu, et al. Experimental study on properties of vegetable gum-modified mud and filter cake forming in sandy stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(2): 394-401. (in Chinese))
- [4] MAZZIERI F, DI EMIDIO G, PASQUALINI E. Effect of wet-and-dry ageing in seawater on the swelling properties and hydraulic conductivity of two amended bentonites[J]. Applied Clay Science, 2016, **142**: 40-51.
- [5] 孙金鑫, 钟小春, 付伟, 等. 不同阳离子对泥水盾构泥浆稳定性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(8): 1525-1531. (SUN Jinxin, ZHONG Xiaochun, FU Wei, et al. Experimental study on effects of different cations on stability of slurry within slurry shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(8): 1525-1531. (in Chinese))
- [6] WANG Z R, DING W T, ZHU Z J, et al. Experimental study on rheological behaviors of Na-bentonite slurries under seawater intrusion[J]. Construction and Building Materials, 2022, **357**: 129369.
- [7] MIN F L, DU J R, ZHANG N, et al. Experimental study on property change of slurry and filter cake of slurry shield under seawater intrusion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **88**: 290-299.
- [8] QIN S, ZHOU W H, XU T. Effects of seawater on the infiltration behavior of bentonite slurry into sand[J]. Construction and Building Materials, 2023, **371**: 130759.
- [9] 黄小龙. 海底隧道泥水盾构绿色抗盐泥浆配制及其适应性研究[D]. 天津: 天津大学, 2018. (HUANG Xiaolong. Study on Preparation and Stratum Adaptation of Green Anti-salt Slurry for Submarine Tunnel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese))
- [10] 杨振兴, 陈健, 孙振川, 等. 泥水平衡盾构用海水泥浆的改性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 501-508. (YANG Zhenxing, CHEN Jian, SUN Zhenchuan, et al. Experimental study on improved seawater slurry for slurry shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 501-508. (in Chinese))
- [11] 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): 3460-3467. (WU Di, ZHOU Shunhua, WEN Xin. Experimental study on film-forming performance of slurry shield in sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3460-3467. (in Chinese))
- [12] MIN F L, ZHU W, HAN X R. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **38**: 423-430.
- [13] 倪红娟, 徐颖, 李岩. 泥水盾构施工中泥膜形成规律数值模拟[J]. 人民黄河, 2013, **35**(3): 135-137. (NI Hongjuan, XU Ying, LI Yan. Numerical simulation of filter-cake formation law in slurry shield tunnelling[J]. Yellow River, 2013, **35**(3): 135-137. (in Chinese))
- [14] 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. (XU Tao, SHI Qingfeng, ZHANG Dingwen, et al. Permeability characteristics of filter cake and pressure transfer on face during slurry shield tunnelling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(9): 1878-1887. (in Chinese))
- [15] CUI W, LIU D, SONG H F, et al. Experimental study of salt-resisting slurry for undersea shield tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **98**: 103322.
- [16] KELESSIDIS V C, MAGLIONE R, TSAMANTAKI C, et al. Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, **53**(3/4): 203-224.
- [17] JING Z F, WANG S Z, ZHAI Z D. Effects of slip and rheological parameters on the flow and heat transfer of a Herschel-Bulkley fluid[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2017, **27**(4): 981-999.
- [18] WANG Z R, GUO W J, DING W T, et al. Hydrodynamic properties of bentonite slurries with Herschel-Bulkley-Papanastasiou rheology: Insights from optimized finite volume method modeling[J]. Powder Technology, 2023, **419**: 118375.