

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.005



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



生物质纤维对饱和砂土地层泥水盾构泥浆成膜性能的增强机制

徐涛^{1,2}, 史金权³, 丁智^{1,4}, 史庆锋⁵

(1. 浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 杭州 310015; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 3. 香港科技大学 土木与环境工程系, 香港 999077; 4. 浙大城市学院 工程学院, 杭州 310015; 5. 东南大学 交通学院, 南京 211189)

摘要:探究生物质秸秆纤维对饱和砂土地层泥浆成膜性能的增强机制,旨在利用绿色可再生材料解决高渗透地层泥水盾构泥浆成膜困难的问题。采用流变试验和 Zeta 电位试验明确生物质纤维增强泥浆的工程适应性;利用渗透柱入渗试验分析生物质纤维掺量对泥浆入渗和泥膜形成的影响机理,试验中地层水力梯度与现场盾构隧道开挖面水力梯度接近。最后,利用泥浆入渗模型预测生物质纤维增强泥浆的入渗距离。研究表明:生物质纤维增强泥浆的黏度低、密度小、稳定性好,利于管道泵送,具有很好的工程适用性;生物质纤维大幅提高了泥浆的成膜性能,有效减少了膨润土的用量,且能消纳农田秸秆,具有较大的工程应用价值和经济效益;在饱和粗砂地层中,对于 40 kg/m³浓度的钠基膨润土泥浆,62.5 kg/m³生物质纤维掺量可以实现 100% 泥浆压力传递,对于 50、60 kg/m³浓度的钠基膨润土泥浆,50 kg/m³生物质纤维掺量即可满足要求;泥浆入渗模型可以很好地预测生物质纤维增强条件下泥浆的入渗过程。

关键词:泥水盾构;饱和砂土;生物质纤维泥浆;泥膜;压力传递

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-08

Enhancement mechanism of biomass fbire on filter cake formation for slurry shield tunnelling in sandy ground

XU Tao^{1,2}, SHI Jinquan³, DING Zhi^{1,4}, SHI Qingfeng⁵

(1. Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance for Urban Shield Tunnel of Zhejiang Province, Hangzhou 310015, P. R. China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, P. R. China; 4. School of Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, P. R. China; 5. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China)

收稿日期:2024-10-14

基金项目:国家自然科学基金(52022001);浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室开放基金(ZUCC-UST-22-08)

作者简介:徐涛(1989-),男,博士,教授,主要从事隧道与地下工程研究,E-mail:taoxu-hit@hotmail.com。

丁智(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:dingz@zucc.edu.cn。

Received: 2024-10-14

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52022001); Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance for Urban Shield Tunnel of Zhejiang Province Open Fund (No. ZUCC-UST-22-08)

Author brief: XU Tao (1989-), PhD, professor, main research interest: tunnel and underground construction, E-mail: taoxu-hit@hotmail.com.

DING Zhi (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: dingz@zucc.edu.cn.

Abstract: The enhancement mechanism of biomass straw fiber on the filter cake formation for bentonite slurry during slurry shield tunnelling in saturated sandy soil was introduced, to solve the problem that the filter cake is hard to be formed in the highly permeable soil. The infiltration process of slurry in saturated sandy soil was investigated using column infiltration test. The filtration loss, filter cake formation and effective pressure transfer were analysed. The effects of biomass fiber content on filter cake formation and effective pressure transfer were discussed. The results show that: (1) the viscosity of biomass fibre enhanced slurry is low, the stability of suspended particles is high and the density of biomass fibre enhanced slurry is low; (2) the ability to form a filter cake of the biomass fibre enhanced slurry is greatly improved, which can reduce the use of bentonite; (3) for 40 kg/m³ bentonite slurry, 62.5 kg/m³ biomass content can achieve 100% slurry pressure to effective support pressure, while for 50 kg/m³ and 60 kg/m³ bentonite slurries, 50 kg/m³ biomass content meets the requirement; (4) the infiltration model well predicts the infiltration process of biomass fiber enhanced slurry.

Keywords: slurry shield; saturated sand; biomass fibre enhanced slurry; filter cake; pressure transfer

泥浆成膜质量直接影响泥水盾构隧道开挖面稳定,因此泥浆入渗规律、泥膜形成机理和泥膜性质是泥水盾构隧道领域的研究重点^[1-4]。Talmon等^[5]将泥浆渗透过程分为泥浆滤失与泥膜形成两个阶段,并以 Peclet 数(Pe)判断泥膜是否形成。Min等^[6]、闵凡路等^[7-8]系统地研究了不同性质泥浆在各种土质中的渗透规律,发现泥浆浓度和土体颗粒级配是影响泥膜形成的主要因素。试验研究表明,地层土体颗粒级配和孔径也是决定泥膜是否形成的关键因素^[9]。而当泥浆中混有渣土时,渣土含量越高,泥浆滤失量越大,越难形成泥膜^[10]。试验结果还显示,当泥浆压力一定时,提高压力梯度可以加快泥膜形成,但不影响泥膜是否形成^[10]。

泥膜形成与否,不仅与泥浆和地层土体性质有关,盾构施工参数也是重要的影响因素。在盾构掘进阶段,刀盘不停转动,泥膜被刀具持续移除;在盾构停机阶段,刀盘停止转动,开挖面上泥膜形成^[11]。另外,当刀具移除速率快于泥膜形成速率时,泥膜也无法形成,在实际施工中需要调整泥浆性质,使泥膜形成速率大于刀具移除速率,保证泥膜形成^[12]。也有学者认为开挖面上没有完整的泥膜形成,刀具附近的泥膜薄,远离刀具的泥膜厚^[13]。而泥浆入渗距离若大于刀具贯入深度,也有利于泥膜形成^[14-15]。

在高渗透地层泥水盾构隧道施工过程中,单纯由钠基膨润土和水搅拌制备的泥浆对开挖面的支护效果差,很难形成泥膜,泥浆压力转化为开挖面有效支护压力的效率低,不能满足开挖面稳定的要求^[16-18]。为提高泥浆支护效果,往往需要在泥浆中加入外掺剂以提高其成膜性能^[1-2, 19-20]。在实际工程中,多采用增稠剂 CMC(羧甲基纤维素钠)或 PAM(聚丙烯酰胺)等作为泥浆外加剂,有时还需加入钠化剂(纯碱、氢氧化钠)等^[21]。这种改良方法被广泛

应用,但是产生的废弃泥浆中残余有大量化学外加剂,无害化处理成本高^[18]。

学者们对泥浆天然外加剂进行了研究,刘成等^[20]和宋洋等^[21]通过试验研究发现,在泥浆中适量掺入颗粒材料也可以有效降低滤失量、缩短泥膜形成时间,改善泥浆成膜质量。另有学者选取琼胶、瓜尔胶和预胶化淀粉等天然增稠剂代替传统高分子材料,探究了新型泥浆在砂性地层中的成膜效果^[22-25]。研究结果表明,琼胶、瓜尔胶和预胶化淀粉具有较好的增稠、降滤失效果,胶体率更易提升至 100%,与传统增稠剂 CMC 相比,瓜尔胶增稠效果更强。琼胶、瓜尔胶和预胶化淀粉能使泥浆从未成膜转变为形成渗透带型泥膜、促进泥浆在地层中成膜,降低泥膜渗透系数,进而降低泥浆在地层中的滤失量。

综上所述,天然外加剂,如瓜尔胶、马铃薯淀粉等,可以提高钠基膨润土泥浆的成膜性能。但这些改良方法的成本比高分子聚合物改良方法高,严重制约其在现场的推广应用。为了克服现有泥水盾构隧道开挖面支护技术中存在的不足,笔者介绍一种利用生物质秸秆纤维增强传统泥浆性能的方法,基于黏度、Zeta 电位值、滤失量和压力传递效率等性能指标测试,对生物质秸秆纤维增强泥浆的性能进行评估,验证其在工程中的适用性。

1 泥浆渗透试验

1.1 试验材料

泥浆渗透试验所用材料为钠基膨润土和粗砂(由标准砂中筛得),试验选用的生物质纤维提取自江苏连云港地区的小麦秸秆,膨润土的矿物组成如表 1 所列,膨润土、标准砂和生物质纤维的颗粒级配曲线如图 1 所示。生物质纤维和膨润土的颗粒级配

需由光学粒度仪测得,标准砂的颗粒级配由标准筛测得。生物质纤维的级配分布介于标准砂与膨润土的级配分布之间。粗砂砂样的物理参数为:粒径 1~2 mm,相对密度 $\geq 90\%$,孔隙比 0.69,饱和渗透系数 0.057 m/s。泥浆由纳基膨润土和水高速搅拌制得,静置 24 h 后重新搅拌 5 min,即得到试验所需泥浆基液。两次搅拌均采用 Hamilton HDM200 型高速搅拌机,搅拌转速均为 12 000 r/min。泥浆浓度为 50~70 kg/m³。泥浆流变性质由 Faan Rehometer 型流变仪测定,转子的剪切速率为 5.1、10.2、170.2、340.5、510.7、1 021.4 s⁻¹。表 2 所列为不同转速下测得的泥浆剪切应力。假设泥浆为非牛顿流体,根据图 2 中的公式与定义,可以得到泥浆的各项流变参数,见表 3。

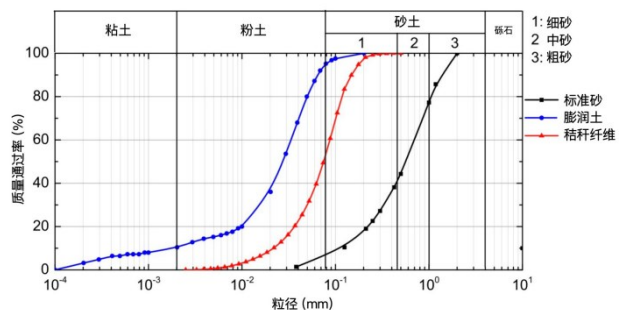
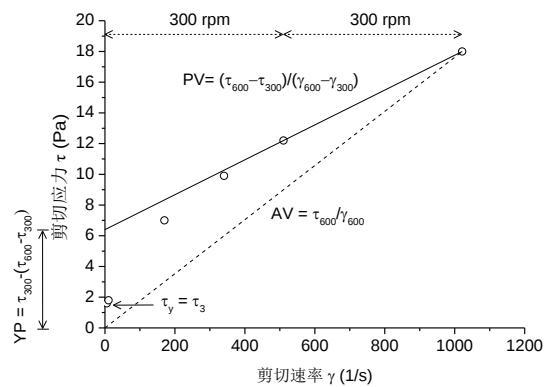


图 1 膨润土、标准砂和生物质纤维的颗粒级配
Fig.1 Particle size distributions of bentonite and China standard sand



注:AV 为表观黏度,PV 为塑性黏度,YP 为屈服点, τ_y 为屈服强度。

图 2 泥浆流变参数计算方法

Fig. 2 Interpretation of data from a rheometer test

表 1 膨润土矿物组成

Table 1 Mineral contents of the bentonite

矿物成分	含量/%
$\text{Al}_{2.9}\text{Fe}_{0.04}\text{H}_2\text{K}_{0.86}\text{Mg}_{0.06}\text{Na}_{0.1}\text{O}_{12}\text{Si}_3$	22
$\text{Na}_{0.499}\text{Ca}_{0.491}(\text{Al}_{1.488}\text{Si}_{2.506}\text{O}_8)$	19
$\text{Na}_{0.9}\text{K}_{3.46}\text{Ca}_{3.52}\text{Al}_{15.9}\text{Si}_{56.1}\text{O}_{144}(\text{H}_2\text{O})_{44.68}$	15
$\text{Al}_3\text{CaH}_{10}\text{KO}_{17}\text{Si}_3$	14
SiO_2	11
$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})$	10
$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	9

表 2 不同浓度泥浆在不同转速下的剪切应力

Table 2 Data of shear stresses from the rheometer for various concentrations of bentonite

质量浓度/ (kg/m ³)	剪切应力/Pa					
	3 r/min	6 r/min	100 r/min	200 r/min	300 r/min	600 r/min
50	1.8	1.9	8.8	12.0	14.6	21.9
60	4.0	4.1	9.1	12.9	15.8	23.3
70	9.4	9.6	21.4	28.1	33.5	46.4

表 3 不同质量浓度泥浆的黏度参数

Table 3 Rheological properties of slurries with different bentonite concentrations

质量浓度/ (kg/m ³)	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	屈服点/ Pa	屈服强度/ Pa
40	21.4	7.2	7.3	1.8
50	22.8	7.4	8.3	4.1
60	45.4	12.7	20.6	9.4

为研究生物质纤维掺量对泥浆成膜的影响,需要向泥浆中掺入不同质量生物质纤维,试验中的单位掺量为 37.5~87.5 kg/m³。为使秸秆纤维均匀地悬浮在泥浆之中,泥浆还需具有一定的剪切强度。在 Xu 等的研究中,给出了最小剪切强度的计算公式^[10]

$$\tau = 0.7 \frac{2}{3\pi} d_{\text{particle}} (\gamma_{\text{particle}} - \gamma_{\text{suspension}}) \quad (1)$$

式中: d_{particle} 为秸秆纤维平均粒径,m; γ_{particle} 为秸秆纤维重度,kN/m³; $\gamma_{\text{suspension}}$ 为泥浆重度,kN/m³。

式(1)用于计算泥浆的必要屈服强度,以保证泥浆中的悬浮渣土不会沉淀。屈服强度取决于渣土的重度和粒径以及泥浆的重度。对于平均直径为 150 μm 的秸秆纤维,所需的最小剪切强度为 1.16 Pa。从表 3 可知,40 kg/m³ 的泥浆符合要求。

1.2 试验装置

如图 3 所示,试验装置参考文献[10],由渗透柱、自动稳压气源、数据采集仪、集水器、电子秤、孔压计和监测系统组成。在试验装置底部安装有直径为 10 mm 的细管,使地层的水力梯度降至为 15,以符合盾构隧道现场的实际情况^[26]。

利用电子秤实时记录试验排水量,假设试验排水量即为泥浆滤失量。泥浆压力和地层孔隙水压力由安装在管壁上的孔压计监测得到。试验中,电子秤和孔压计同频记录数据。

1.3 生物质泥浆性质

图 4 为马氏漏斗黏度计测得的泥浆黏度值,从图 4 可以看出,对于常用泥浆质量浓度 40~60 kg/m³,生物质秸秆纤维只小幅增加了泥浆的黏度,增加幅度不超过 20%。

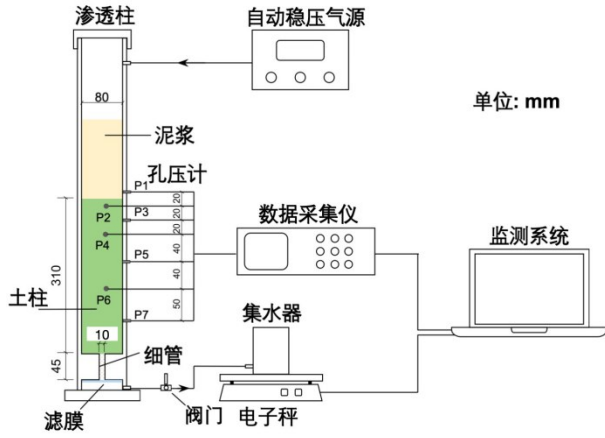


图3 渗透试验装置示意图

Fig.3 Scheme of the set-up for infiltration tests

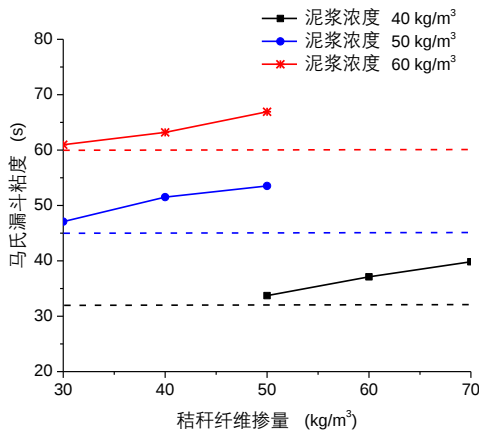


图4 不同秸秆纤维掺量泥浆的黏度变化范围

Fig. 4 Viscosity value ranges of slurries with different biomass fibre contents

图5为Zeta电位仪测得的泥浆Zeta电位值。Zeta电位反映泥浆中颗粒的稳定性, -40 mV至+40 mV表示泥浆中的颗粒不稳定^[27]。从图5可以看出, 对于常用泥浆质量浓度40~60 kg/m³, 生物质秸秆纤维降低了泥浆颗粒的稳定性, 但是总体上远高于稳定临界值。

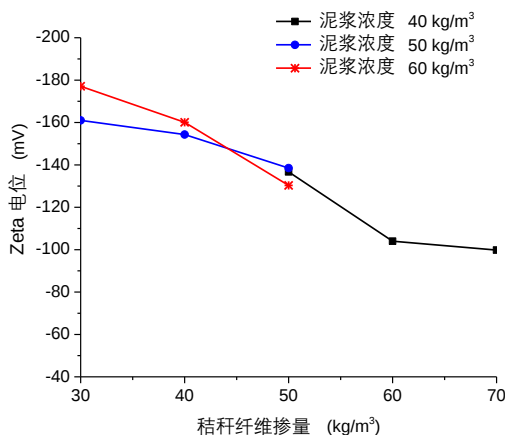


图5 不同农田秸秆纤维掺量泥浆的Zeta电位变化范围

Fig. 5 Zeta potential value ranges of slurries with different biomass fibre contents

2 结果分析

2.1 泥浆滤失量

图6(a)为基液质量浓度40 kg/m³时增强泥浆的滤失量曲线, 滤失量越小代表泥浆的成膜性能越好, 可以看到, 生物质纤维含量增大可以明显增强泥浆的成膜性能。试验中的泥浆总量一定(高度约15 cm), 泥浆滤失速率大时, 泥浆完全入渗到砂土中, 入渗时长可能小于1 800 s。图6(b)为基液质量浓度50 kg/m³时增强泥浆的滤失量曲线, 相比基液质量浓度40 kg/m³, 形成泥膜所需生物质纤维掺量明显减小。图6(c)为基液质量浓度60 kg/m³时泥浆的滤失量曲线, 所需生物质纤维掺量继续减小, 50 kg/m³即可满足要求。

2.2 泥浆入渗距离预测

当新鲜泥浆作用在盾构隧道开挖面上时, 泥浆的渗透方程为^[10]

$$t = \frac{nL}{\Delta\phi} \left[\left(\frac{L_s - L}{k_s} + \frac{L}{k_b} \right) \ln \left(1 - \frac{x}{L} \right) + x \left(\frac{1}{k_b} - \frac{1}{k_s} \right) \right] \quad (2)$$

当泥浆中有大量固体颗粒存在时, 泥浆的滤失量较大, 没有明显的泥膜形成, 泥浆的渗透方程为^[1]

$$x = \frac{L_s k_b}{k_s} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{k_s^2}{k_b n L_s} t} - 1 \right) \quad (3)$$

式中: t 为渗透时间, s; n 为土体孔隙率; L 为泥浆的最大渗透距离, m; $\Delta\phi$ 为泥浆和静水压的水头差, m; L_s 为地层等效厚度, m; k_s 为土体中水的渗透系数, kN/m³; k_b 为土体中泥浆的渗透系数, kN/m³; x 为任意时间泥浆的渗透距离, m。

根据文献[26]可知, L_s 为增加细管后的砂土层等效厚度, 可由式(4)计算得到。

$$L_s = L_1 + L_2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + L_2 \frac{D_1^2}{4D_2} - \frac{D_1}{4} \quad (4)$$

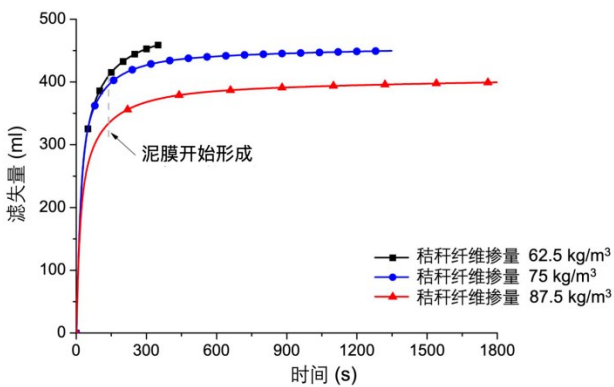
式中: L_1 为粗管中砂土的厚度, m; L_2 为细管中砂土的厚度, m; D_1 为粗管直径, m; D_2 为细管直径, m。

基于滤失量和压力变化数据, 泥浆在土体中的渗透系数 k_b 由式(5)计算得到。

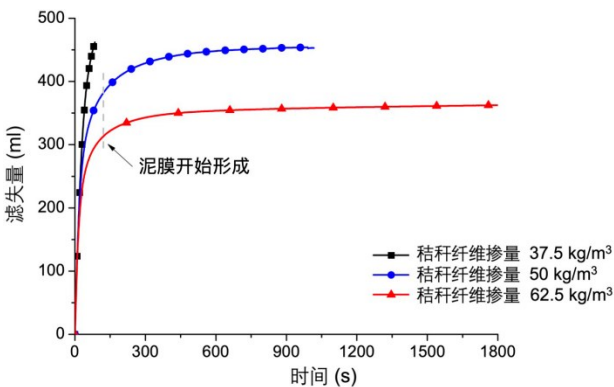
$$k_b = \frac{\Delta L_s Q}{(\Delta p' / \gamma_b) A} \quad (5)$$

式中: ΔL_s 为土体厚度, m; Q 为滤失量, m³/s; $\Delta p'$ 为孔压差值, kPa; γ_b 为泥浆重度, kN/m³; A 为土体截面, m²。

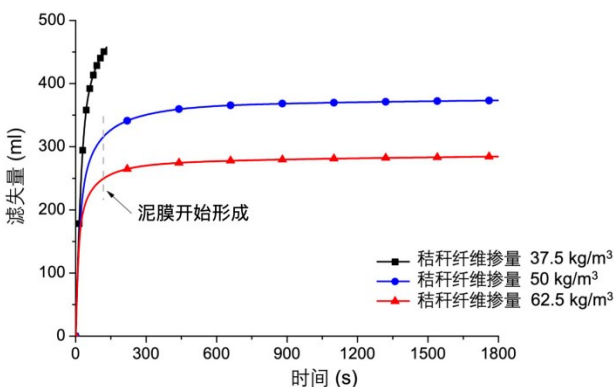
对于生物质纤维掺量37.5 kg/m³的泥浆, 其渗透曲线无明显转折点出现, 符合式(2)的情况, 而生物质纤维掺量为50 kg/m³和67.5 kg/m³的泥浆, 有



(a) 泥浆浓度 40 kg/m³



(b) 泥浆浓度 50 kg/m³



(c) 泥浆浓度 60 kg/m³

图 6 泥浆在粗砂地层中的滤失量曲线

Fig. 6 Filtration loss curves for slurry infiltration into the coarse sand

泥膜形成,符合式(3)的情况。图 7 为泥浆渗透试验结果和公式计算结果的对比,输入参数如表 4 所列。可以看到,式(2)、式(3)能很好地预测生物质纤维泥浆的入渗过程,说明入渗理论的适用性取决于泥膜的形成状态。

2.3 压力传递

泥浆压力在数值上等于开挖面有效支护压力与地层土体超孔隙水压力之和。在泥浆压力合适的情况下,泥浆压力传递效率越高,作用在开挖面的有效支护压力越大,开挖面越稳定。当泥浆压力过大时且传递效率很高,开挖面则可能发生挤出

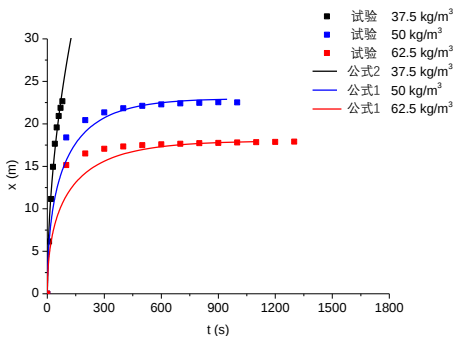


图 7 试验与计算渗透距离对比

Fig. 7 Comparison of infiltration distances from experiment and calculation

表 4 公式输入参数

Table 4 Inputs for equations (2) and (3)

纤维掺量/ (kg/m ³)	<i>n</i>	<i>L</i> /m	$\Delta\phi$ /m	<i>L_s</i> /m	<i>k_s</i> /m	<i>k₀</i> /m
37.5	0.4		5	3.7	0.057	4×10^{-5}
50	0.4	0.23	5	3.7	0.057	2×10^{-5}
62.5	0.4	0.18	5	3.7	0.057	1×10^{-5}

破坏。

图 8(a)为饱和粗砂地层 40 kg/m³质量浓度泥浆渗透过程中不同深度地层孔压变化曲线,P1 位置压力传递超过 60%,说明此处已有泥膜形成,但是渗透系数较大。40 s 后 P7 位置传递效率已达到 100%,至 150 s,P2~P7 位置的传递效率全部达到 100%。如图 8(b)和(c)所示,对于质量浓度 40 kg/m³泥浆,随着纤维掺量从 62.5 kg/m³增加到 87.5 kg/m³,有效压力的传递效率未有明显提高。

图 9 和图 10 为饱和粗砂地层 50 和 60 kg/m³浓度泥浆渗透过程中不同深度地层孔压变化曲线。可以看到,随着纤维掺量从 37.5 kg/m³增加到 50 kg/m³,有效压力的传递效率明显提高;纤维掺量超过从 50 kg/m³时,P2~P7 位置的传递效率已全部达到 100%。

图 11 为 300 s 时不同泥浆浓度和生物质纤维掺量的 P1 处泥浆压力传递效率对比结果。可以明显看到,生物质纤维掺量对于泥膜的形成有着重要影响。对于 40 kg/m³泥浆,生物质纤维掺量从 62.5 kg/m³增加到 87.5 kg/m³,泥浆压力传递效率提高了 46%。对于 50 kg/m³和 60 kg/m³泥浆,生物质纤维掺量从 50 kg/m³增加到 62.5 kg/m³,泥浆压力传递效率分别提高了 129% 和 71%。对于低浓度泥浆 (40 kg/m³),生物质纤维掺量到达一定值后 (75 kg/m³),泥浆成膜效果与高浓度泥浆 (60 kg/m³) 的成膜效果接近,说明生物质纤维可以替代部分膨润土。

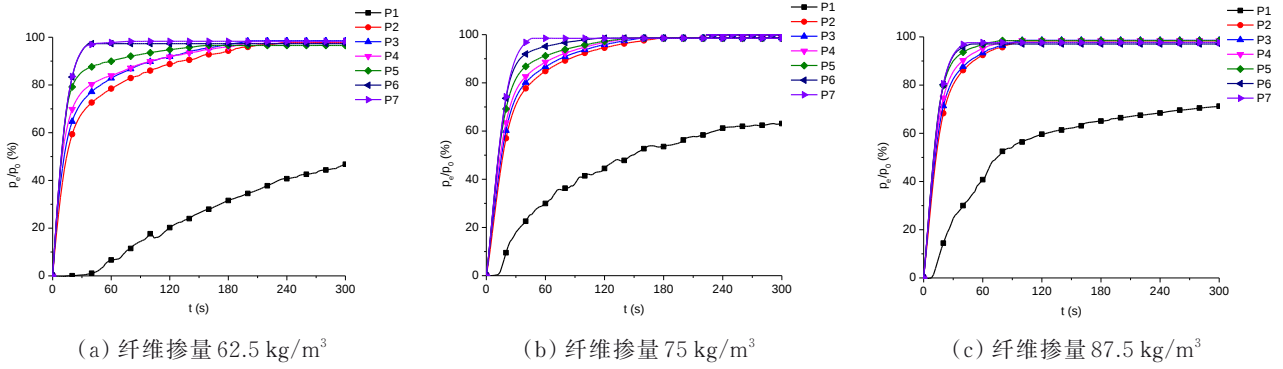
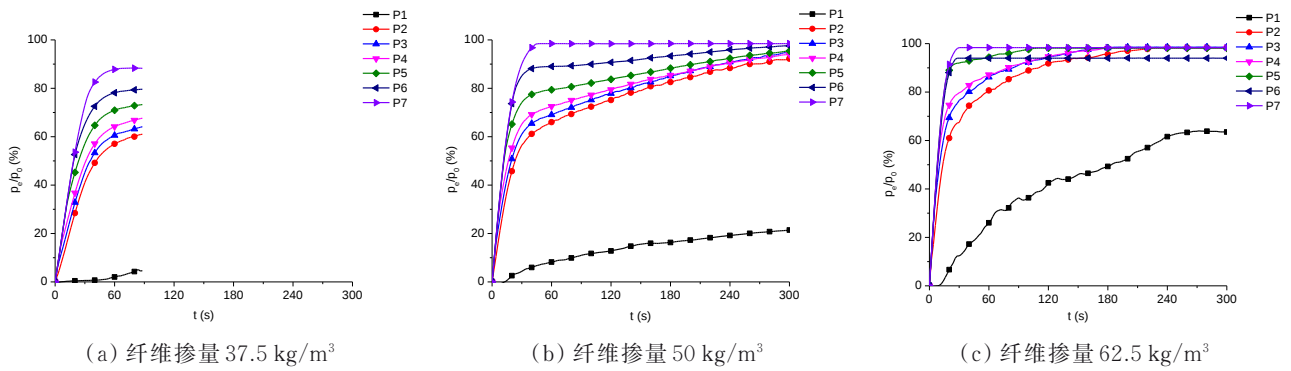
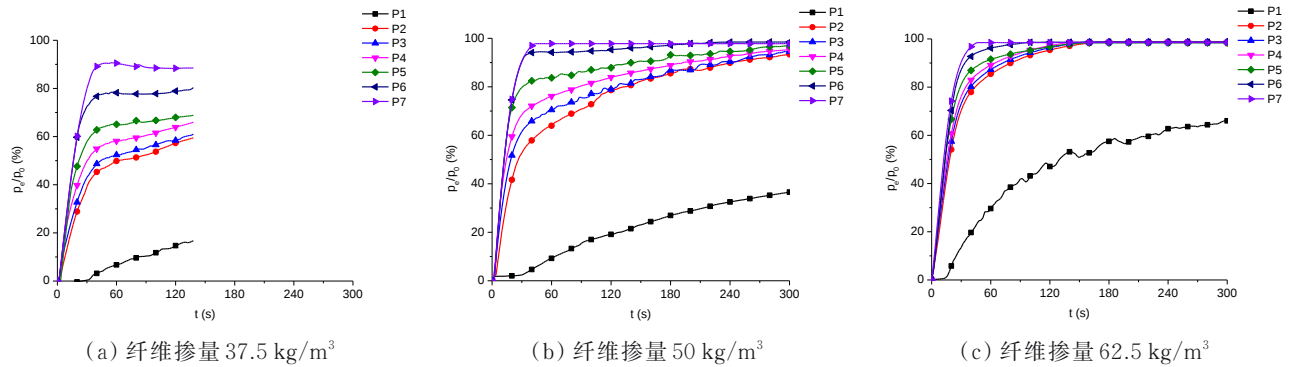
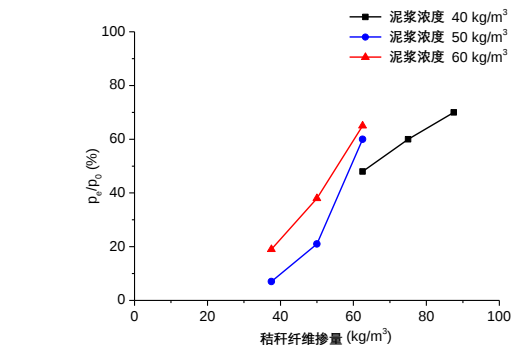
图8 基液 40 kg/m^3 泥浆压力传递效率Fig. 8 Pressure transfer rate for 40 kg/m^3 slurries with different biomass fibre contents图9 基液 50 kg/m^3 泥浆压力传递效率Fig. 9 Pressure transfer rate for 50 kg/m^3 slurries with different biomass fibre contents图10 基液 60 kg/m^3 护壁泥浆压力传递效率Fig. 10 Pressure transfer rate for 60 kg/m^3 slurries with different biomass fibre contents

图11 泥浆压力传递效率

Fig. 11 Pressure transfer ratio for slurries with different bentonite concentrations and biomass fibre contents

3 结论

试验中采用的泥浆质量浓度 $40 \sim 60 \text{ kg/m}^3$ 均为现场泥水盾构施工常用泥浆浓度, 泥浆密度不超过 $1\,038 \text{ kg/m}^3$; 加入秸秆纤维后, 泥浆密度不超过 $1\,088 \text{ kg/m}^3$ 。泥浆密度增加不大, 且泥浆黏度仅增加 20% , 施工现场管道泵送泥浆所需能耗增加较小。此外, 秸秆纤维未对泥浆颗粒的稳定性产生较大影响, 泥浆的流变性保持稳定, 保证了盾构掘进时泥浆颗粒不会沉淀, 造成管道堵塞。

生物质纤维根本性地改变了泥浆的成膜效果,

对于低质量浓度泥浆(40 kg/m^3)尤为明显。未加入秸秆纤维时,泥浆在饱和粗砂地层中无法形成泥膜;加入秸秆纤维后,泥浆快速形成泥膜。解决了在高渗透地层泥浆成膜困难的问题。

总体而言,生物质纤维增强泥浆具有良好工程适应性。

参考文献

- [1] XU T, ZHOU W-H, BEZUIJEN A, et al. Effects of sand and slurry characteristics on pressure infiltration of bentonite slurry into sand [J]. *Géotechnique*, 2024, 74 (9): 935-946.
- [2] 曹利强, 张顶立, 房倩, 等. 泥水盾构泥浆在砂土地层中的渗透特性及对地层强度的影响[J]. *北京交通大学学报*, 2016, 40(6): 7-13, 31.
- CAO L Q, ZHANG D L, FANG Q, et al. Seepage characteristics of slurry and its influence on ground strength of slurry shield in sand [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2016, 40(6): 7-13, 31. (in Chinese)
- [3] 莫振泽, 王梦恕, 李海波, 等. 粉砂地层中浓泥土压盾构泥膜效应引起的孔压变化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2257-2263.
- MO Z Z, WANG M S, LI H B, et al. Laboratory investigation on pore water pressure variation caused by filter cake effect during slurry-EPB shield tunneling in silty sand layer [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40 (6): 2257-2263. (in Chinese)
- [4] 张宁, 朱伟, 闵凡路, 等. 泥水盾构带压开舱时泥膜的微观孔隙及渗透性研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39 (3): 495-500.
- ZHANG N, ZHU W, MIN F L, et al. Microscopic pores of filter membranes and permeability during chamber opening under high pressure in slurry shield [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (3): 495-500. (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] 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.
- [7] 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): 2801-2806.
- MIN F L, WEI D W, JIANG T, et al. Experimental study of law of slurry infiltration in strata [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(10): 2801-2806. (in Chinese)
- [8] 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 F L, LYU H J, SONG B H, et al. Pore size analysis and its influence on slurry infiltration in sandy layers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(3): 144-151. (in Chinese)
- [9] 加瑞, 朱伟, 闵凡路. 泥浆颗粒级配和地层孔径对泥水盾构泥膜形成的影响[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(8): 100-108.
- JIA R, ZHU W, MIN F L. Effect of particle size distribution of slurry and pore size of stratum on formation of filter cake in slurry shield [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(8): 100-108. (in Chinese)
- [10] XU T, BEZUIJEN A. Bentonite slurry infiltration into sand: Filter cake formation under various conditions [J]. *Géotechnique*, 2019, 69(12): 1095-1106.
- [11] 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 R P, YIN X S, LI Y C, 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)
- [12] 魏代伟, 朱伟, 闵凡路. 砂土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 D W, ZHU W, MIN F L. 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)
- [13] 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 D L, YUAN D J, MAO J H. 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)
- [14] ZIZKA Z, SCHOESSER B, THEWES M. Investigations on 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*, 2021, 118: 104168.
- [15] 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*, 2021, 118: 104169.
- [16] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. *西南交通大学学报*, 2015, 50(1): 97-109.
- HE C, FENG K, FANG Y. Review and prospects on

- constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109. (in Chinese)
- [17] 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.
- LIU X Y, WANG F M, YUAN D J, et al. Range of support pressures for slurry shield and analysis of its influence factors [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 908-917. (in Chinese)
- [18] 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.
- ZHU W, QIAN Y J, MIN F L, et al. The current status and some problems of slurry shield in China [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 724-735. (in Chinese)
- [19] 雷华阳, 施福硕, 刘旭, 等. 砂性地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 H Y, SHI F S, LIU X, 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)
- [20] 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 C, LU Y, LYU W H, 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)
- [21] 宋洋, 李昂, 王伟颐, 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 Y, LI A, WANG W Y, 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)
- [22] 王森. 泥水盾构绿色泥浆配制及其对开挖面土体性质影响研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- WANG S. Study on preparation of environment-friendly slurry and its influence on ground strength during slurry shield tunneling in sand [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [23] 王廷. 强渗透地层泥水盾构绿色泥浆配制及其适应性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- WANG T. A study on preparation of environment friendly slurry and its adaptation during slurry shield tunnelling in high permeability stratum [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [24] 张子新, 胡欣雨, 黄昕. 一类特殊的泥水盾构掘进绿色泥浆实验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(11): 1574-1578.
- ZHANG Z X, HU X Y, HUANG X. Experimental study on environment friendly slurry for slurry shield tunnelling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(11): 1574-1578. (in Chinese)
- [25] AMANULLAH M, YU L. Environment friendly fluid loss additives to protect the marine environment from the detrimental effect of mud additives [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, 48(3/4): 199-208.
- [26] XU T, BEZUIJEN A. Pressure infiltration characteristics of bentonite slurry [J]. Géotechnique, 2019, 69(4): 364-368.
- [27] FREITAS C, MÜLLER R H. Effect of light and temperature on zeta potential and physical stability in solid lipid nanoparticle (SLN™) dispersions [J]. International Journal of Pharmaceutics, 1998, 168(2): 221-229.

(编辑 XXX)