

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.034



开放科学(资源服务)标识码OSID:



含水率和泡沫注入比对土压平衡盾构高黏度泥岩力学特性的影响

冯林¹, 邹坤秘¹, 唐维湘¹, 包建新^{1,2}, 何齐海¹, 仇文岗², 杨阳², 孙伟鑫², 杨文钰²
(1. 中铁二局集团有限公司, 成都 610031; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:排渣困难和刀盘结泥饼等问题给土压平衡盾构掘进带来了诸多挑战, 尤其对于高黏度泥岩地层, 需要进行渣土改良。依托成渝中线(四川段)蜀安隧道盾构工程, 对泥岩开展了泡沫性能评价、十字板剪切、界面剪切和室内盾构掘进模型试验, 探究泡沫剂的最优浓度区间、含水率和泡沫注入比对法向界面力、纵向界面力及刀盘结合饼的影响机制。结果表明: 发泡剂最佳体积分数在3%左右, 对应的发泡倍率为29.1、半衰期为8.71 min; 在此基础上, 随着含水率和泡沫质量比增加, 泥岩的十字板抗剪强度、直剪抗剪强度、黏聚力、内摩擦角、千斤顶平均压力和单位千斤顶压力作用下的扭矩均会不同程度地下降, 盾构刀盘渣土黏附量变化不显著, 但泥岩稠度降低, 刀盘结泥饼有所改善; 整体上平均掘进速度增加, 千斤顶的平均压力增大, 刀盘扭矩增大; 泡沫剂对盾构掘进的改良效果优于含水率。

关键词:盾构掘进; 高黏度泥岩; 模型试验; 泡沫剂; 含水率

中图分类号: U455.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Effects of moisture content and foam injection ratio on mechanical properties of high viscosity mudstone with soil pressure equilibrium shield

FENG Lin¹, ZOU Kunmi¹, TANG Weixiang¹, BAO Jianxin^{1,2}, HE Qihai¹,
ZHANG Wengang², YANG Yang², SUN Weixin², YANG Wenyu²

(1. China Railway No. 2 Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The problems of difficult spoil discharge and cutterhead mudding pose many challenges to the advancement of earth pressure balance (EPB) shield tunneling, especially for high-viscosity shale strata, where spoil improvement is necessary. Relying on the shield tunneling project of Shuan Tunnel (Sichuan section) of Chengdu-Chongqing Central Line, foam performance evaluation, vane shear test, interface shear test, and indoor shield tunneling model tests were carried out on shale to explore the optimal concentration range of

收稿日期: 2024-12-18

基金项目: 国家资助博士后研究人员计划(GZC20242129)

作者简介: 冯林(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事盾构隧道施工与运营安全研究, E-mail: 310245203@qq.com。

杨阳(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn。

Received: 2024-12-18

Foundation items: National Postdoctoral Research Program (No. GZC20242129)

Author brief: FENG Lin (1984-), senior engineer, main research interests: shield tunnel construction and operation safety, E-mail: 310245203@qq.com.

YANG Yang (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn.

foaming agent, and the effects of water content and foam injection ratio on the normal interface force, longitudinal interface force, and cutterhead mudding were investigated. The results show that: (1) The optimal volume fraction of the foaming agent is around 3%, with the corresponding foam expansion ratio and half-life being 29.1 and 8.71 min, respectively. (2) Based on the above optimal volume fraction, with the increase of water content and foam mass ratio, the vane shear strength, direct shear strength, cohesion, internal friction angle of shale, the average pressure of jacks, and the torque under the action of unit jack pressure all decrease to varying degrees. The adhesion amount of spoil on the shield cutterhead does not change significantly, but the consistency of shale decreases, and the cutterhead mudding is improved. (3) Overall, the average advancement speed increases. The greater the average pressure of the jacks, the greater the cutterhead torque. The improvement effect of the foaming agent on shield tunneling is better than that of water content.

Keywords: shield tunneling; high viscosity mudstone; model test; foam agent; moisture content

土压平衡盾构隧道施工技术因其安全性、高效率和对城市交通和环境影响较小,已成为城市地下空间开发的重要手段^[1]。然而,在盾构隧道施工过程中,高黏度泥岩地层因其特殊的工程性质,如高黏聚力、低渗透系数等,给施工带来了诸多挑战^[2-4]。特别是在排渣困难和结泥饼问题上,这些问题不仅会降低盾构机的掘进速度,增加施工成本,还可能导致盾构机卡机等严重事故,对施工安全构成威胁^[5-7]。

为了保证开挖面的稳定性,保持土压平衡,需要使用添加剂改善掘进作业期间的隧道土体,满足刀盘切割、支撑和运输性能要求,改良后土体应具有低内聚力、高流动性、低渗透性和良好的黏度等特征^[8-10]。用于土压平衡盾构隧道的改良剂有泡沫、水、聚合物、膨润土、抗黏土剂和分散剂等,其中,泡沫剂是大直径土压平衡盾构工程中最典型和最适用的添加剂。坍塌度测试方便且适用于流动特性分析,但合理的坍塌度区间尚处于模糊状态。Jancsecz等^[11]通过分析土耳其现场盾构的推力和扭矩等参数,认为合理坍塌度范围为20~25 cm。Peila等^[12]对非黏性地层测试统计分析,得出合理坍塌度值在150~200 mm间。王磊磊等^[13]发现泡沫浓度6%、注入比60%和泥浆浓度16%、注入比8%时,坍塌度在100~200 mm,搅拌扭矩和波动幅度小。对于改良渣土的其他特性,朱碧堂等^[14]发现渗透系数随泡沫剂的增加呈指数型下降。Houlsby等^[15]发现泡沫注入可以有效提高混合物的气相水平,使之在高压下具有较好的压缩性。

已有研究大多是针对低黏性土,而泥岩具有高黏度,常规的坍塌度、搅拌试验、渗透性和压缩性测试无法有效评估土壤堵塞和泥浆结块等现象,需要更直观的室内试验指标来反映土壤的改良效果,黏土的附着力是个不容忽视的问题。Feinendegen等^[16]通过开发锥形拉拔测试设备研究了粘附力的变

化。Zumsteg等^[17]开发了加压盘式剪切装置,通过盘的剪切扭矩计算残留物与金属界面之间的黏附强度。并且在为特定地层和地下水条件选择合适的改良方案之前,有必要了解土体添加剂对地层的适应性^[18]。

成渝中线(四川段)蜀安隧道复杂环境的高黏度泥岩地层超大直径土压平衡盾构施工中,开挖面增大导致渣土改良效果不理想、出土不畅和掘进受阻等问题,表明高黏度泥岩地层与盾构施工之间的相互作用复杂,包括高黏度泥岩的理化特性与改良效果的关系、渣土改良剂的适用性与优化、盾构施工参数与地层稳定性的耦合关系等科学问题。基于此,选用现场工程同种类泡沫剂,进行泡沫性能评价,确定最佳泡沫浓度范围,并开展十字板剪切试验和界面剪切试验探究含水率和泡沫注入比对泥岩法向界面力和纵向界面力的影响。在完成单元试验的基础上,通过室内盾构掘进模型试验模拟实际盾构施工中刀盘结泥饼的情况(使用与现场盾构机刀盘相同形式的模型刀盘),重点分析刀盘扭矩、千斤顶压力和掘进速度等关键参数的变化规律及其相互关系。

1 试验材料与方法

1.1 泥岩物理参数

试验土样采用从盾构施工现场搬运的泥岩,土体呈红褐色。根据《土工试验方法标准》^[19]对土体进行基本物理参数的测定,结果如表1所示。其中,最大干密度和最优含水率通过轻型击实试验测定,击实曲线如图1所示。

1.2 泡沫制备和性能评价

泡沫制备使用卓越牌发泡机,泡沫剂型号为分散型巴斯夫,与施工现场一致。发泡剂用量筒按一定体积分数和水混合均匀,将吸料管滤网一端放入装有稀释好液体的量筒中,并将出泡管另一端固

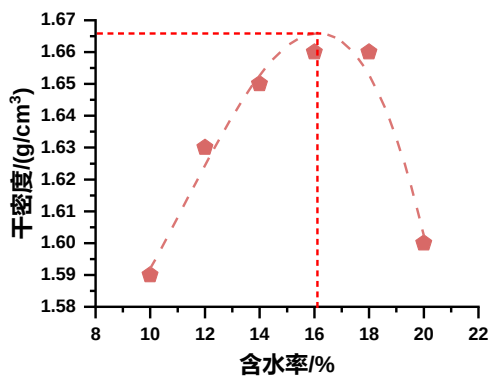


图1 泥岩击实曲线

Fig. 1 Compaction curve of mudstone

表1 盾构泥岩基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of shield mudstone					
液限/%	塑限/%	塑性 指数	最优含 水率/%	最大干密度/ (g/cm ³)	比重
32.4	14.8	17.6	16.2	1.665	2.38

定,制好的泡沫用容器保存,尽快使用。

发泡倍率(FER)指的是泡沫剂膨胀的程度,即生成的泡沫体积与原发泡液体体积之间的比例。这一参数主要受泡沫剂溶液的浓度和施加的压力影响。根据EFNARC标准^[20]的规定,发泡倍率应在5~30倍之间。泡沫的半衰期(HT)是评估泡沫稳定性的一个关键指标,它指的是泡沫质量减少至初始值一半所需的时间,一般要求HT超过5 min,且半衰期越长,越有助于确保泡沫与渣土的混合更加彻底和均匀^[1]。图2和图3为泡沫剂浓度和发泡倍率、质量半衰期的关系,可以发现,泡沫剂体积分数在3%以下时,随着体积分数增大,发泡倍率和质量半衰期显著提高,发泡倍率提升到29.1,质量半衰期提升到8.71 min。在体积分数3%以后,增长速率显著降低,仅微小幅度提升。因此,试验采用体积分数为3%的泡沫剂浓度。

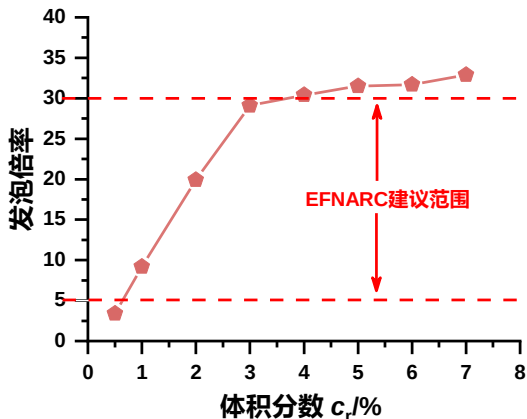


图2 泡沫剂浓度和发泡倍率关系

Fig. 2 Relation between foam concentration and foaming ratio

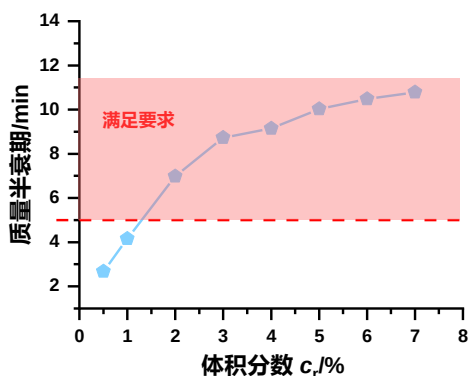


图3 泡沫浓度和质量半衰期关系

Fig. 3 Relationship between foam concentration and mass half-life

1.3 试验设备和方法

1.3.1 试样制备

在进行单元试验时,先将土体中的大块砾石去除,以免对强度测试造成干扰。根据所需含水率和泡沫注入比向泥岩中添加水和泡沫剂,试验的泡沫注入比为泡沫质量和土体的质量比值。随后将泥岩、水和泡沫剂混合,用搅拌器将其混合均匀如图4所示。并在使用前用盖子将桶盖住,防止水分的蒸发,影响试验结果。



图4 改良泥岩制备过程

Fig. 4 Preparation process of improved mudstone

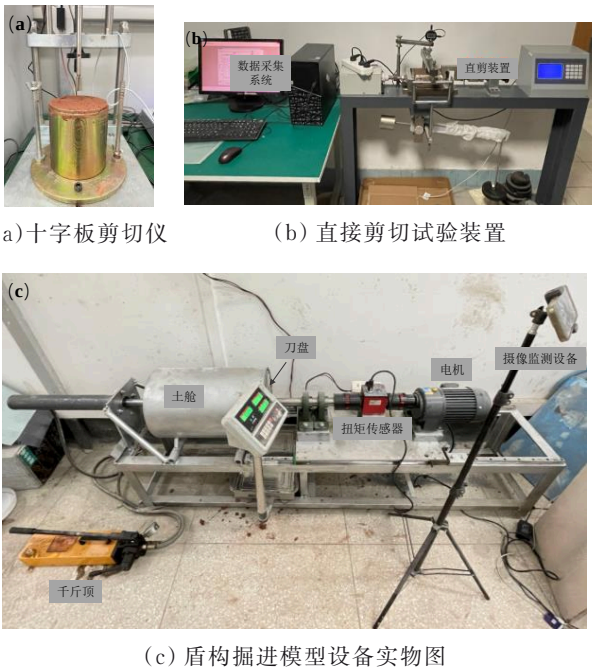
1.3.2 力学特性试验

十字板剪切试验采用TKA自主研发的全自动十字板剪切试验仪TKA-AS-1,十字板的规格为12.7 mm(直径)×25.4 mm(高度),扭矩传感器参数为0~40 N·m、精度为满量程的±0.1%。根据规程设定剪切速率为0.1(°)/s,剪切时间为15 min。分别配制含水率为10%、15%、20%和25%的土样,以及20%含水率下,泡沫注入比0%、1.5%、3%和4.5%的土样,每种工况的土样各3份,以进行重复试验。

直接剪切试验采用泰克奥界面剪切仪TKA-DDS-10A。根据规程^[19]设定剪切速率0.6 mm/min,试样尺寸为60 mm×60 mm×20 mm,剪切距离为60 mm。分别配制15%、20%和25%含水率的土样,以及20%含水率下泡沫注入比(FIR)0%、1.5%和3%的土样,试验的泡沫注入比为添加泡沫

质量和土体干重的比值。

室内盾构掘进模型试验采用自制的模拟地层开挖装置^[21]。使用一个两侧开口金属空心圆柱模拟开挖地层和提供土压,左侧用液压千斤顶向前推进和施加压力,右侧为现场施工等比例缩小刀盘,可以沿着圆柱轴线水平移动,试验时固定在右侧开口处。电机控制刀盘旋转,并用动态扭矩传感器实时记录。图5为3种试验的装置图,所有力学测试土样的干密度控制为 1.492 g/cm^3 。



(c) 盾构掘进模型设备实物图

图5 力学特性试验仪器

Fig. 5 Mechanical characteristics test instruments

2 试验结果分析

2.1 十字板剪切试验

图6(a)为不同含水率土样十字板抗剪强度 C_u 随十字剪切板转动角度(回转角)的变化曲线。图例中,如20%F1.5代表含水率20%的试样、FIR=1.5%的工况。由图6(a)可以看出,十字板剪切试验的过程可以分为3个阶段,迅速增长阶段:在剪切初期,随回转角增大,抗剪强度迅速增大,在回转角3.5°时,抗剪强度就达到峰值抗剪强度的75%以上;缓慢增长阶段:随着剪切的进行,抗剪强度的增长速率减小,缓慢增加,直至达到最大值(峰值抗剪强度);减弱阶段:随回转角的持续增大,抗剪强度逐渐减小,整体呈下降趋势(15%F0曲线有一定波动,可能是由于土体不均匀,有砾石存在),峰值抗剪强度均是出现在回转角15°~25°之间。

由图6(a)可以发现,随着土体含水率的提高,曲线整体向下移动,土体的抗剪强度显著下降,说

明水分会严重削弱土体的抗剪强度,含水率的越大,包围土颗粒的水膜加厚,颗粒间阻力减小,颗粒容易移动,且减弱阶段的曲线逐渐平缓。

图6(b)为20%含水率下,不同泡沫注入比FIR土样的十字板强度 C_u 随十字板转角的变化曲线。由图6(b)可以发现,曲线的整体趋势和未加泡沫剂的土样相近,随着FIR的增加,曲线逐渐下移,抗剪强度下降,且峰值偏应力对应的的回转角逐渐增大,缓慢增长阶段的时间加长,减弱阶段抗剪强度的减小速率逐渐变小,曲线更加平缓。

为了进一步分析含水率和泡沫注入比FIR对土体十字板剪切试验的影响,对不同工况的峰值抗剪强度和残余抗剪强度(回转角90°对应的抗剪强度)进行统计。

图6(c)为不同含水率土样的峰值抗剪强度和残余抗剪强度。由图6(c)可以发现,随着含水率的增长,峰值强度和残余强度均逐渐降低,且减弱幅度逐渐变小,相同含水率的土样峰值强度与残余强度的差值也随含水率的增长而减小。

图6(d)为20%含水率土样的峰值抗剪强度和残余抗剪强度随泡沫注入比FIR的变化情况。由图6(d)可以发现,峰值强度随FIR的增加逐渐降低,且降低幅度逐渐减小。残余强度随FIR的增加先增大后减小,相较于FIR=0, FIR=1.5%时有些许提升,随后逐渐降低,这可能是由于在低泡沫注入比时,泡沫能够有效改善土体的流动性和孔隙结构,同时不会过度削弱土体的骨架强度,更容易发生变形而不易破坏。土样峰值强度与残余强度的差值变化趋势和含水率相同,随FIR增大逐渐减小。

2.2 直接剪切试验

图7(a)~(c)为在未添加泡沫剂的情况下,含水率分别为15%、20%和25%时,剪应力与剪切位移之间的关系曲线,图例中,如15%/100 kPa代表100 kPa垂直压力下的15%含水率工况。图7(a)~(c)表明,除了15%含水率且垂直应力为300 kPa的试样外,其他工况下的剪应力均随着剪切位移的增加而持续增长,显示出剪切硬化的特性。在剪切初期,剪应力迅速上升,随后随着剪切位移的增加,剪应力的增长速度逐渐减慢,剪切强度趋于稳定,曲线趋于平缓。而15%/300 kPa的试样在剪切位移约为3.5 mm时达到峰值后,剪应力缓慢下降。含水率的增加导致试样的硬化程度逐渐增强。这种现象可以通过基质吸力的变化来解释,随着含水率的增加,土体中的基质吸力逐渐降低,结构力也随之减小,在外力作用下土体的破坏强度下降不如高基质吸力时明显,因此在剪切过程中硬化更为显

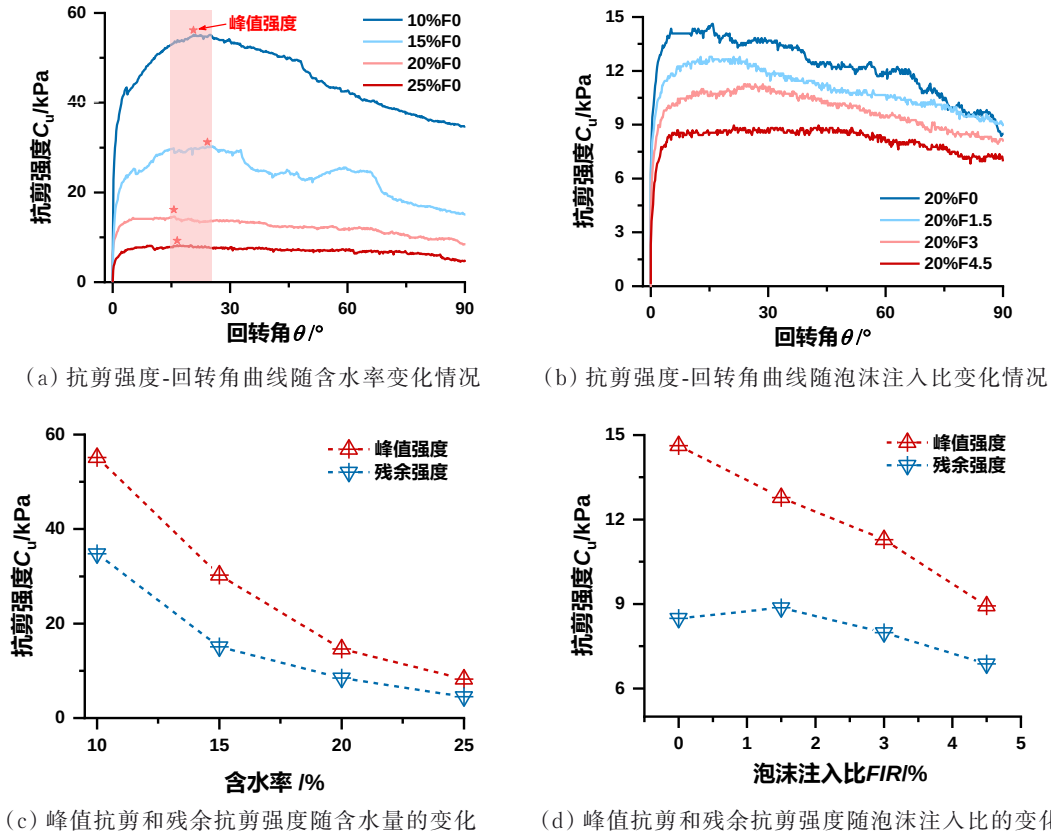


图6 十字板剪切强度和各参数的关系

Fig. 6 The relationship between shear strength and parameters of cross plate

著。此外,在同一含水率下,试样的剪应力随着垂直压力的增加而显著增强。

图7(d)~(f)为未添加泡沫剂的情况下,含水率分别为15%、20%和25%时,垂直位移与剪切位移之间的关系曲线。所有试样的垂直位移随着剪切位移的增加而持续减小,表现出剪缩特性。在剪切初期,位移变化迅速,随着剪切的持续,变化速率逐渐减慢,曲线趋于平缓。垂直应力越大,垂直位移越小,剪缩程度越强。通过对比不同含水率的曲线,可以发现随着含水率的增加,在同一垂直应力下,土样的垂直位移越小,剪缩程度越强,这与剪应力的变化规律相吻合。

为了进一步分析含水率对泥岩试样直接剪切的影响,绘制了100kPa、200kPa和300kPa围压下,未加泡沫剂试样的抗剪强度与含水率关系曲线,如图8所示。抗剪强度的取值依据为^[19]:如果在6mm的范围内,剪切位移呈现峰值强度,那么在这个水平的纵向压力下,抗剪强度就是这个峰值强度;否则,本级垂直压力下的抗剪切强度选用4mm剪切位移时所对应的剪应力。

随着含水率的提高,泥岩的硬度降低,其抗剪强度也随之递减,且这种递减的趋势逐渐变得平缓。这一现象可以通过基质吸力理论来解释。基

质吸力受含水率的影响显著,当土壤处于非饱和状态时,由于基质吸力的作用,土壤的稳定性结构得到加强,从而提高了土壤的强度。然而,随着土壤饱和度的提高,基质吸力逐渐减弱,导致土壤结构力下降,在外部力的作用下,土壤强度也随之降低。这是泥岩抗剪强度随含水率增加而降低的关键原因之一。此外,随着围压的增加,抗剪强度曲线逐渐上移,表明在相同含水率条件下,试样的抗剪强度得到了增强。围压从100 kPa到200 kPa比200 kPa到300 kPa的提升幅度更显著。

图9为15%、20%和25%含水率下,未添加泡沫剂的试样的垂直应力与抗剪强度关系曲线。从图9可以观察到,在相同含水率条件下,试样的抗剪强度随着垂直应力的增加而近似线性增长。具体来说,当垂直应力从100 kPa增加到300 kPa时,试样的抗剪强度可以提高1.5~2.0倍。这种增长的主要机理在于,在高竖向压力作用下,土体中的孔隙水在剪切过程中向上剪切盒土样表面渗透,导致上下剪切盒接触面的非饱和泥岩含水率降低,孔隙体积减小,剪切面土体颗粒间的接触变得更加密实,土颗粒之间的有效应力增加,从而提高了抗剪强度。同时,随着含水率的增加,抗剪强度的增长曲线逐渐下移,且下移的幅度逐渐减小。

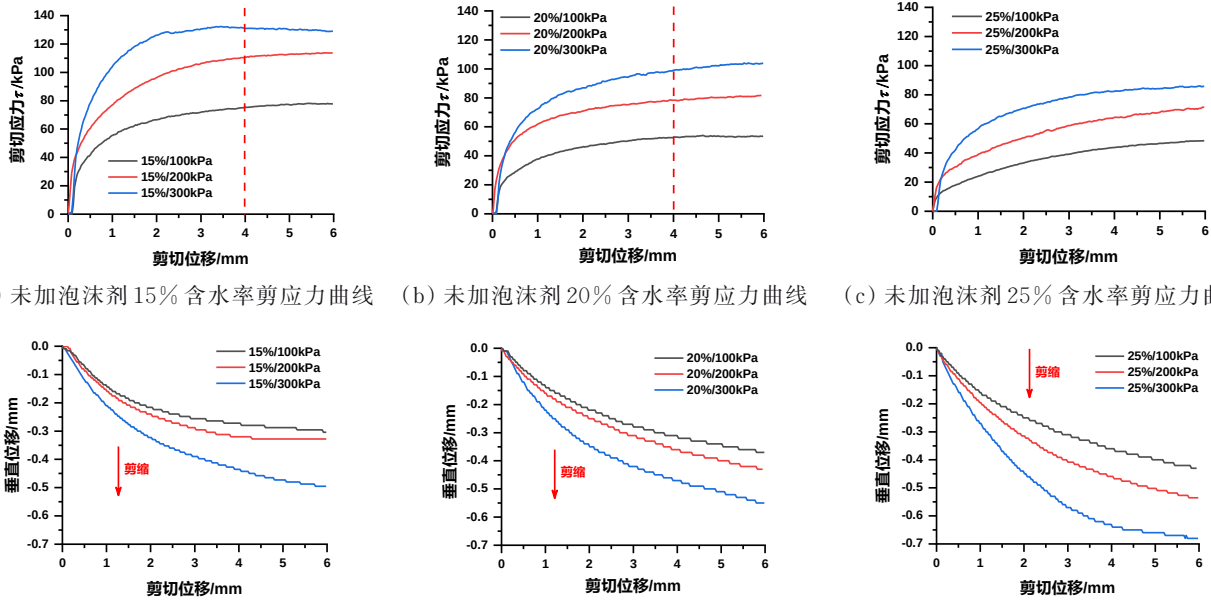


图 7 未加泡沫剂土样剪应力和垂直位移随剪切位移变化曲线

Fig. 7 Shear stress and vertical displacement of soil sample without foam agent change with shear displacement

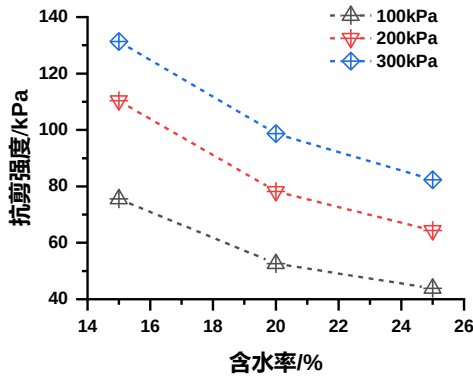


图 8 未加泡沫剂试样的抗剪强度和含水率关系

Fig. 8 Relation between shear strength and moisture content of samples without foaming agent

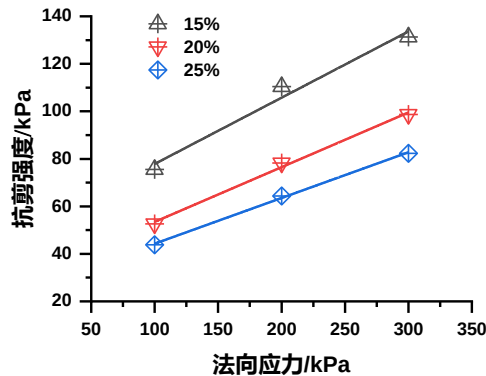


图 9 未加泡沫剂试样的抗剪强度和法向应力关系

Fig. 9 Relation between shear strength and normal stress of samples without foaming agent

依据库伦定律,通过图 9 中的数据计算得出未加泡沫剂试样的黏聚力和内摩擦角,分别如图 10 和图 11 所示。从图中可以看出,随着含水率的增加,

试样的黏聚力和内摩擦角都有所减小,黏聚力的减小幅度逐渐降低,而内摩擦角则近似线性变化。这是因为含水率的增加导致土颗粒外围的结合水膜增厚,对土颗粒间的摩擦起到润滑作用,降低了颗粒间的摩擦系数,减弱了颗粒间的机械咬合作用,从而削弱了颗粒间的胶结力,导致泥岩的黏聚力和内摩擦角随着含水率的增加而减小。

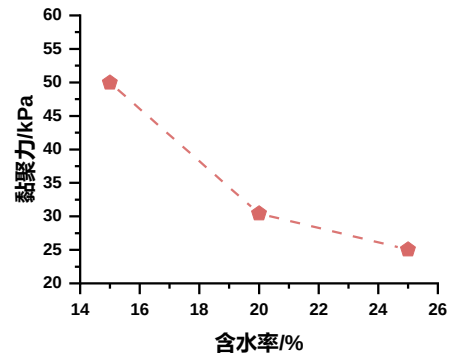


图 10 未加泡沫剂试样的黏聚力和含水率关系

Fig. 10 Relation between cohesion and moisture content of samples without foaming agent

图 12 和图 13 为含水率 20% 下,泡沫注入比为 1.5% 和 3% 试样的剪切应力-剪切位移关系曲线。可以发现,曲线的大致规律和未加入泡沫剂的相近。随着泡沫注入比的增大,相同垂直应力下的剪应力越小。

图 14 为添加了泡沫剂试样的抗剪强度随法向应力的关系。从图 14 可以发现,与未加泡沫剂试样相同,随着垂直应力的提高,试样的抗剪强度近似

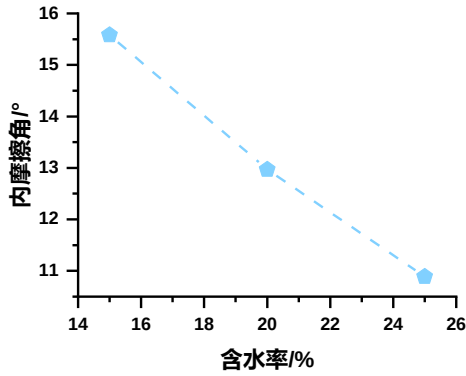


图 11 未加泡沫剂试样的内摩擦角和含水率关系

Fig. 11 Relation between internal friction Angle and moisture content of samples without foaming agent

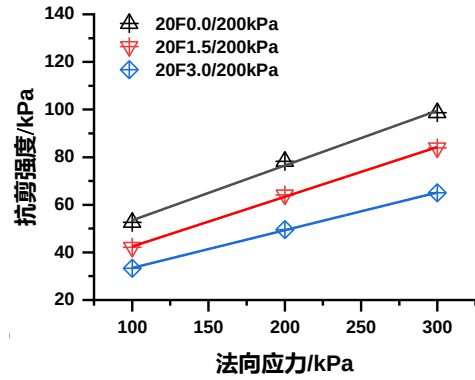


图 14 添加泡沫剂试样的抗剪强度和法向应力关系

Fig. 14 Relation between shear strength and normal stress of the sample with foam agent added

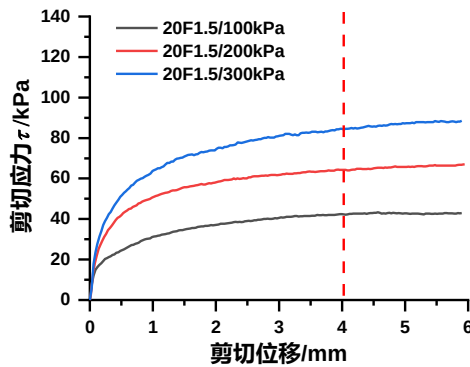


图 12 泡沫注入比 1.5% 的剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig. 12 Shear stress-shear displacement curves with foam injection ratio of 1.5%

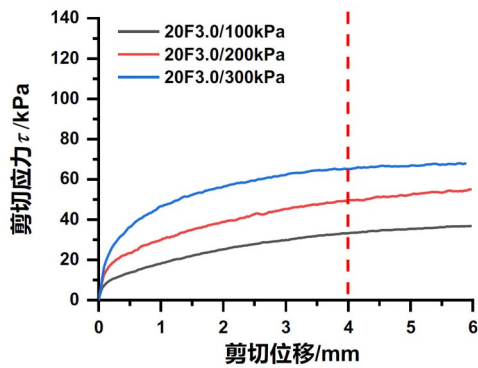


图 13 泡沫注入比 3.0% 的剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig. 13 Shear stress-shear displacement curves with foam injection ratio of 3.0%

线性提高,因为泥岩的内部孔隙被压缩,气相减少,内聚力提高。在相同垂直应力下,随着泡沫注入比的提高,曲线逐步下移,抗剪强度逐渐减小。这是由于泡沫进入试样内部,土体气相组成增加,颗粒的骨架作用被削弱,起到了润滑作用。

图 15 和图 16 分别为黏聚力和摩擦角与泡沫注入比的关系。可以发现,在含水率 20% 时,加入泡沫,泡沫进入土体,润滑泥岩颗粒,降低颗粒表面的粗糙度,增大颗粒间的距离,削弱颗粒间的约束作

用,从而会降低泥岩的黏聚力和内摩擦角,随着泡沫注入比的增加,黏聚力和内摩擦角进一步减小。当泡沫注入比为 3% 时,相较于未加泡沫剂的土样,泥岩的黏聚力从 30.437 kPa 降低至 17.606 kPa,内摩擦角从 12.97° 降低至 9.01°。

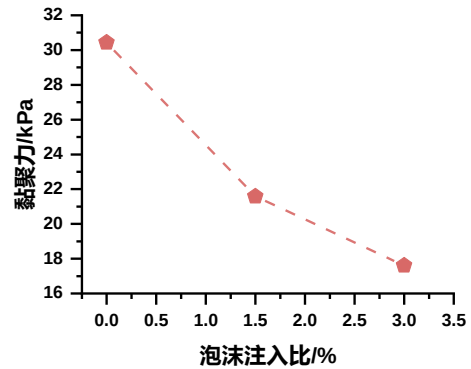


图 15 试样黏聚力和泡沫注入比的关系

Fig. 15 Relation between cohesion and foam injection ratio of samples

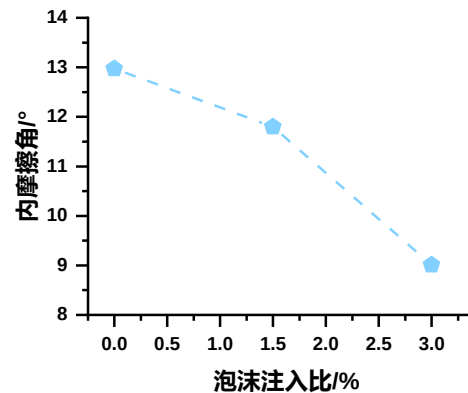


图 16 试样内摩擦角和泡沫注入比的关系

Fig. 16 Relation between the internal friction Angle of the sample and the foam injection ratio

2.3 盾构掘进模型试验

在模型试验中,液压千斤顶作为核心动力源,其压力输出的稳定性直接影响试验结果的可靠性。

理论上应实现恒压加载,但试验数据显示,受土体可压缩性、孔隙水压力消散及机械摩擦等因素影响,实际压力值呈现周期性波动特征。并且通过试验结果可以发现,液压压力与刀盘驱动扭矩具有显著同步性,表明推力系统与切削系统存在较强耦合关系。

试验中观察到土体介质对液压压力传递存在显著时滞效应,为减弱时滞对数据分析的影响,试验采用滑动平均算法对数据进行预处理。该方法通过取输出实时数据前后的一定区间数据进行平均计算,并将计算值作为分析值,同时向后进行递推计算,扭矩的实时数据处理也采用此方法。对比不同时间间隔处理后数据的规律,发现采用 60 s 的效果最优,故采用 60 s 的时间间隔。经处理后,压力-扭矩曲线的线性度显著提升,能较准确反映盾构掘进过程中两者的动态耦合规律。

图 17 为 20% 和 25% 含水率,以及 20% 含水率下泡沫注入比 1.5% 和 3% 试样在掘进过程中的实时扭矩、移动平均处理后的千斤顶压力与掘进时间的关系。可以发现,随着含水率增大和泡沫剂加入,曲线的扭矩波动幅度减小,这可能是由于土体的稠度降低。20%F0、20%F1.5 和 20%F3 工况的扭矩和千斤顶压力随掘进时间的增加,大致呈逐渐

上升、到达峰值后逐渐下降的趋势。而 25%F0 工况的扭矩和千斤顶压力随掘进时间的增加,大致呈上升、平稳、下降的趋势。随着含水率的增加和添入泡沫剂,刀盘扭矩整体呈下降趋势。并且随着泡沫注入比的增大,刀盘扭矩进一步下降。

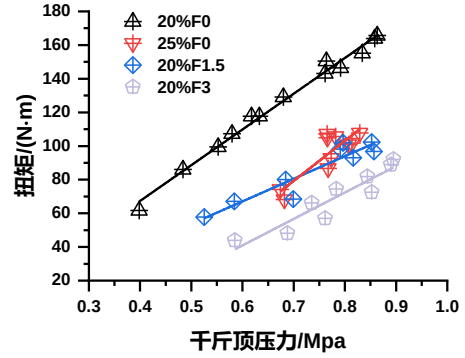
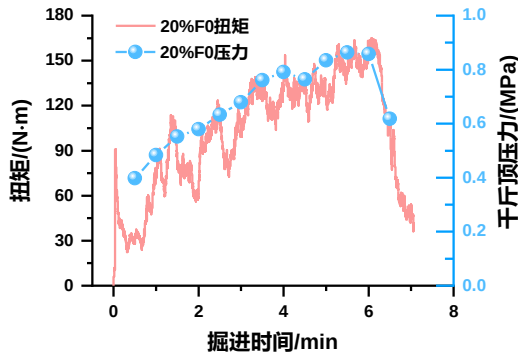


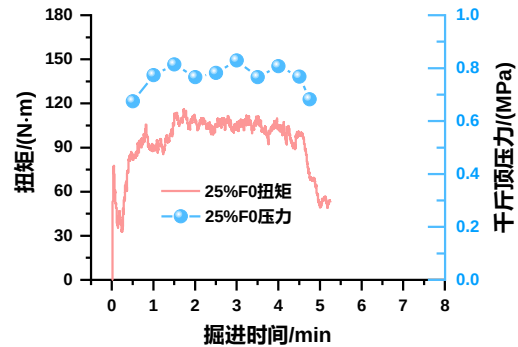
图 17 刀盘扭矩-千斤顶压力关系

Fig. 17 cutter torque-jack pressure relationship

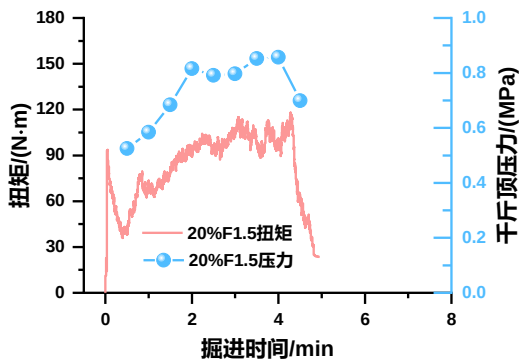
对刀盘扭矩进行移动平均法处理,并绘制与千斤顶压力的关系曲线,如图 18 所示。由图 18 可以发现,各工况的扭矩和千斤顶压力有较好的相关性,整体上,刀盘扭矩随千斤顶压力的增大而增加,随着含水率增大和加入泡沫剂,数据点逐渐向下移动,大致可以用直线进行拟合。25%F0 拟合直线的斜率要高于 20%F0,其主要因素是 25%F0 工况的



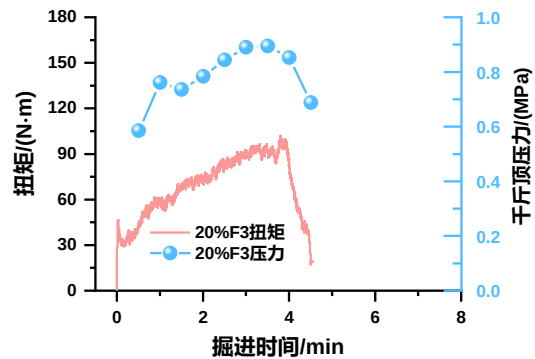
(a) 20%F0 工况刀盘扭矩和千斤顶压力-掘进时间的关系



(b) 25%F0 工况刀盘扭矩和千斤顶压力-掘进时间的关系



(c) 20%F1.5 工况刀盘扭矩和千斤顶压力-掘进时间的关系



(d) 25%F3 工况刀盘扭矩和千斤顶压力-掘进时间的关系

图 18 刀盘扭矩和千斤顶压力随掘进时间的变化曲线

Fig. 18 Change curve of cutter torque and jack pressure with driving time

掘进速率更快,千斤顶压力更大,使土体更加密实,导致刀盘扭矩的增速加快。而泡沫剂处理后的试样虽然掘进速度和25%F0相近,但平均千斤顶的压力更小,直线的斜率也更小,这一定程度上可以说明泡沫剂对盾构掘进的改良要优于含水率。

表2为各工况经过移动平均处理后的刀盘扭矩、千斤顶压力、平均掘进速度和单位千斤顶压力作用下的扭矩。由表2可以发现,平均掘进速度和千斤顶平均压力有较大的相关性,整体上平均掘进

速度越大,千斤顶平均压力越大。随着含水率的增加和泡沫剂的加入,刀盘平均扭矩和千斤顶平均压力均有所一定程度减小。为了更好地评价对泥岩盾构掘进的改良效果,引入单位千斤顶压力作用下的扭矩,定义为平均扭矩和平均压力的比值。含水率的提高和添加泡沫剂均可以降低单位压力扭矩,泡沫注入比3%工况的单位压力扭矩仅为未加泡沫剂工况的47%,效果显著。

表 2 各工况盾构刀盘扭矩、千斤顶压力和掘进速度统计

Table 2 Statistics of cutter head torque, jack pressure and driving speed under different working conditions

工况	扭矩范围/(N·m)	平均扭矩/(N·m)	压力范围/MPa	平均压力/MPa	平均掘进速度/(m/min)	单位压力扭矩/(10 ⁻⁶ ·m ³)
20%F0	61.7~165.7	126.45	0.39~0.86	0.68	1.5	184.88
25%F0	68.1~107.1	94.99	0.67~0.83	0.76	2	123.5
20%F1.5	57.7~102.3	85.08	0.52~0.85	0.73	2.1	115.44
20%F3	43.8~92.1	69.46	0.58~0.89	0.78	2.3	87.78

图19为各工况掘进后土样黏附在刀盘上的实物图。从刀盘结泥饼形态上看,构造密集处最容易黏附泥岩,且随着含水率的增加和泡沫剂的加入,刀盘上渣土黏附量变化并不明显,但并不是结泥饼程度相同。刀盘结泥饼是受黏附性和稠度两个因素同时影响的,土体的稠度有所下降,因此虽然大量泥土黏附在刀盘上,但结泥饼情况并不严重。

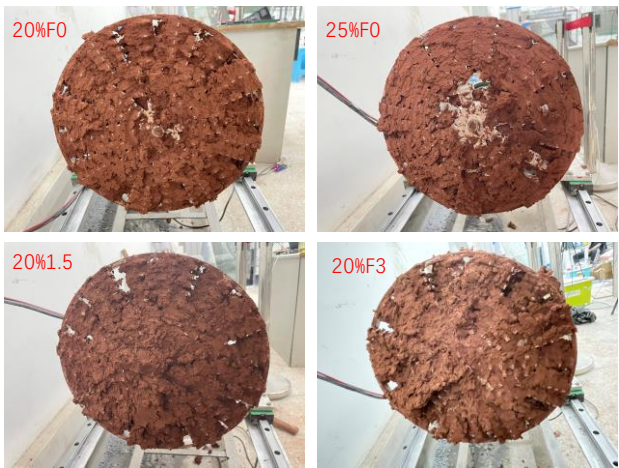


图 19 进结束后刀盘黏附情况

Fig. 19 Cutter head adhesion after driving

3 结论

1)试验用泡沫剂浓度3%最佳,体积分数在3%以下时,随着体积分数增大,发泡倍率和质量半衰期显著提高,发泡倍率提升到29.1、质量半衰期提升到8.71 min。在体积分数3%以后,增长速率显著降低,仅微小幅度提升。

2)随着含水率和泡沫注入比增加,土体的十字板抗剪强度、直剪抗剪强度、黏聚力和内摩擦角均

会不同程度地下降。当泡沫注入比为3%时,相较于未加泡沫剂的土样,泥岩的黏聚力从30.437 kPa降低至17.606 kPa,内摩擦角从12.97°降低至9.01°。

3)千斤顶压力对刀盘扭矩贡献很大,整体上,刀盘扭矩随千斤顶压力的增大而增大。掘进速度和千斤顶压力有较大的相关性,整体上平均掘进速度越大,千斤顶平均压力越大。随着含水率的增加和泡沫剂的加入,刀盘平均扭矩、千斤顶平均压力和单位千斤顶压力作用下的扭矩均有一定程度减小。泡沫剂对盾构掘进的改良效果要优于含水率,泡沫注入比3%工况的单位压力扭矩仅为未加泡沫剂工况的47%,效果显著。

参考文献

[1] 王树英,刘朋飞,胡钦鑫,等.盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述[J].中国公路学报,2020,33(5):8-34.
WANG S Y, LIU P F, HU Q X, et al. State-of-the-art on theories and technologies of soil conditioning for shield tunneling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(5): 8-34. (in Chinese)

[2] WAN Z E, LI S C, YUAN C, et al. Soil conditioning for EPB shield tunneling in silty clay and weathered mudstone [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(9): 06021020.

[3] ZHUO B, FANG Y, WANG Y B. Soil conditioning and screw conveying characteristics laboratory tests for EPB tunnelling in medium-weathered mudstone stratum [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 156: 106257.

[4] 吴柯,张晓平,刘浩,等.粉质黏土地层超大直径泥水

- 盾构隧道地表变形与施工参数相关关系研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1555-1566.
- WU K, ZHANG X P, LIU H, et al. Correlation between surface deformation and construction parameters in silty clay ground tunneling with super large diameter slurry shield tbn [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1555-1566. (in Chinese)
- [5] 唐少辉, 张晓平, 刘浩, 等. 复杂地层水下盾构隧道工程难点及关键技术研究与发展[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1477-1487.
- TANG S H, ZHANG X P, LIU H, et al. Engineering difficulties and key technologies for underwater shield tunnel in complex ground [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1477-1487. (in Chinese)
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40. (in Chinese)
- [7] 方勇, 王凯, 陶力铭, 等. 黏性地层面板式土压平衡盾构刀盘泥饼堵塞试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1651-1658.
- FANG Y, WANG K, TAO L M, et al. Experimental study on clogging of cutterhead for panel earth-pressure-balance shield tunneling in cohesive strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1651-1658. (in Chinese)
- [8] LI S C, WAN Z E, ZHAO S S, et al. Soil conditioning tests on sandy soil for earth pressure balance shield tunneling and field applications [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 120: 104271.
- [9] JIANG X, ZHU H H, YAN Z G, et al. A state-of-art review on development and progress of backfill grouting materials for shield tunneling [J]. Developments in the Built Environment, 2023, 16: 100250.
- [10] 汪国锋. 北京地铁十号线土压平衡盾构土体改良技术应用研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4): 77-82.
- WANG G F. Soil improvement technologies and implementation for EPB shield in Beijing subway line 10 [J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(4): 77-82. (in Chinese)
- [11] JANCSECZ S, KRAUSE R, LANGMAACK L. Advantages of soil conditioning in shield tunneling. Experiences of LRTS Izmir [C]//Challenges for the 21st Century Proceedings of the World Tunnel Congress '99, Oslo, June 1999, 1999: 865-75.
- [12] PEILA D. Soil conditioning for EPB shield tunnelling [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, 18(3): 831-836.
- [13] 王磊磊, 殷丽君, 龚秋明, 等. 石家庄砂土地层土压平衡盾构渣土改良试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3): 182-189.
- WANG L L, YIN L J, GONG Q M, et al. Experimental study on the soil conditioning in EPB shield tunnelling in the Shijiazhuang sandy soil stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(3): 182-189. (in Chinese)
- [14] 朱碧堂, 余金, 王凌, 等. 富水砾砂-泥质粉砂岩复合地层渣土改良试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 29-37.
- ZHU B T, YU J, WANG L, et al. Experimental study on soil conditioning with water bearing gravelly sand-argillaceous siltstone composite stratum [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 29-37. (in Chinese)
- [15] HOULSBY G T, PSOMAS S. Soil conditioning for pipejacking and tunnelling: Properties of sand/foam mixtures [C]//Underground Construction, London, 2001: 128-138.
- [16] FEINENDEGEN M, ZIEGLER M, SPAGNOLI G, et al. A new laboratory test to evaluate the problem of clogging in mechanical tunnel driving with EPB-shields [C]//ISRM International Symposium-EUROCK 2010, Lausanne, Switzerland. 2010.
- [17] ZUMSTEG R, PUZRIN A M. Stickiness and adhesion of conditioned clay pastes [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31: 86-96.
- [18] BUDACH C, THEWES M. Erweiterte einsatzbereiche von EPB-schilden [J]. geotechnik, 2013, 36(2): 96-103.
- [19] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [20] EFNARC. Specification and guidelines for the use of specialist products for soft ground tunneling [M]. Farnham, UK: European Federation of National Associations Representing for Concrete, 2005: 15-16.
- [21] 邓如勇. 盾构刀盘结泥饼的机理及处置措施研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- DENG R Y. Study on the mechanism and disposal measures of clay clogging in TBM cutter-head [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)