

DOI: 10.7672/sgjs2025020148

新型盾构分散剂评价装置及泥饼分解特性研究^{*}

谢志恒¹, 宋向荣², 宋相帅², 何 熊³

(1. 中交城市投资控股有限公司, 广东 广州 511458; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 3. 中交(广州)建设有限公司, 广东 广州 511466)

[摘要] 盾构在黏性地层中掘进时,易发生堵塞,在刀盘和刀具上形成泥饼,常采用分散剂分解泥饼。为分析泥饼分解特性,以广州地区泥质粉砂岩为研究对象,研制泥饼压制装置和分解仪,通过泥饼分解试验分析分散剂和膨润土对泥饼分解的影响规律。研究表明:泥饼在水中分解分为初始阶段、快速分解阶段、稳定阶段。在初始阶段泥饼先吸水再分解,分解质量总体变化较小;在快速分解阶段,泥饼分解质量快速增大;在稳定阶段,泥饼分解质量基本不再增加。采用分散剂溶液浸泡泥饼能显著提高泥饼分解速率,分散剂浓度越高,分解速率越高,且在泥饼分解初始阶段泥饼质量不会增加。泥饼在膨润土溶液中分解时,泥饼分解质量先逐渐减小然后趋于稳定,且泥饼分解质量为负值,即泥饼质量增加,这表明膨润土的存在能显著抑制泥饼分解。

[关键词] 盾构;泥饼;试验;分散剂;膨润土;分解

[中图分类号] U455.43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0148-06

New Shield Dispersing Agent Evaluation Device and Mud Cake Decomposition Characteristics

XIE Zhiheng¹, SONG Xiangrong², SONG Xiangshuai², HE Xiong³

(1. CCCC Urban Investment Holding Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China;

2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

3. CCCC (Guangzhou) Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511466, China)

Abstract: When shield tunneling in viscous formations, blockage is prone to occur, resulting in the formation of mud cakes on the cutterhead and cutting tools. Dispersing agents are often used to decompose the mud cakes. To analyze the decomposition characteristics of mud cakes, taking the muddy siltstone in the Guangzhou area as the research object, a mud cake pressing device and a mud cake decomposition instrument are developed, and the influence of dispersing agent and bentonite on the decomposition of mud cakes through mud cake decomposition experiments is analyzed. Research shows that the decomposition of mud cake in water can be divided into initial stage, rapid decomposition stage, and stable stage. In the initial stage, the mud cake absorbs water first and then decomposes, the overall change in the quality of mud cake decomposition is relatively small. During the rapid decomposition stage, the quality of mud cake decomposition increases rapidly. In the stable stage, the quality of mud cake decomposition basically does not increase. Soaking the mud cake in a dispersing agent solution can significantly improve the decomposition rate of the mud cake. The higher the concentration of dispersing agent, the higher the decomposition rate of the mud cake, and the mud cake quality will not increase in the initial stage of mud cake decomposition. When the mud cake decomposes in a bentonite solution, the decomposition mass of the mud cake gradually decreases and then tends to stabilize, and the decomposition mass of the mud cake is negative, that is, the mud cake mass increases, which indicates that the presence of bentonite can significantly inhibit the decomposition of the mud cake.

^{*} 湖北省重点研发计划项目(2023DJC007);中交集团青创项目(RP2022014214)

[作者简介] 谢志恒,高级工程师,E-mail: 2532175916@qq.com

[通信作者] 宋相帅,工程师,E-mail: songxiangshuai@163.com

[收稿日期] 2024-03-05

Keywords: shields; mud cake; tests; dispersing agents; bentonite; decomposition

0 引言

盾构法作为地下工程施工常用方法,相对于矿山法,具有安全性好、施工效率高和对周围环境影响小等优点,现已成为隧道建设中常使用的工法之一。当盾构在黏性地层中掘进时,渣土易黏附在刀盘、刀具上,在盾构推力作用下黏附的渣土在刀盘和刀具上形成泥饼^[1-3],导致盾构总推力增加、推进速度降低、刀盘刀具不均匀磨损等,大大降低了盾构掘进效率。

目前,在盾构泥饼预防方面,国内外学者开展了相关研究。对于土压平衡盾构,渣土状态是影响盾构泥饼产生的重要因素,可通过渣土改良方法改变渣土状态,以减小渣土对盾构机的黏附,从而预防泥饼产生。黏性渣土状态可采用黏稠指数表征。Maidl^[4]指出当改良后的渣土稠度指数 I_c 达0.40~0.75时,渣土黏附性相对较小,此状态的渣土能有效传递土仓压力,并预防泥饼产生。Oliveira等^[5-6]采用类似搅拌装置评价黏性渣土黏附性,指出理想黏性渣土黏稠指数为0.4~0.5,与Hollman等^[7]依托现场经验得到的结果相符。泥水平衡盾构主要通过刀盘冲刷方式预防泥饼的产生。王助锋等^[8]以南昌地铁1号线泥水盾构工程为背景,从刀盘开口率设计、刀具布置及刀高设置优化等方面进行刀盘刀具配置的针对性设计,并结合地质特点对原泥水盾构冲刷系统进行改造与优化分析。王志华等^[9]提出在盾构刀盘、刀具表面涂抹1层石墨或镍复合抗黏涂层,以减小渣土黏附,预防泥饼产生,但由于刀盘涂层极易被磨损,预防效果有限。

在泥饼处治方面,当泥饼在盾构刀盘上形成后,掘进速度会快速下降,现场一般采用分散剂浸泡^[10-11]。在化学试剂浸泡下,泥饼发生分解,泥饼分解与土壤崩解机制类似,国内外学者对于土壤的崩解机制开展相关研究。杜昌严等^[12]依托济南济泺路穿黄隧道工程,对比了在纯水和分散剂作用下的泥饼崩解规律,探究了不同分散剂和分散剂质量分数对粉质黏土的崩解效果影响。刘丹露等^[13]、黎桢君等^[14]采用自制崩解测量仪对不同初始干密度、含水率及颗粒级配条件下的土壤进行浸水崩解试验,并从非饱和和有效应力角度分析其崩解演化机制,为治理水土灾害提供理论依据。Liu等^[15]采用自行研制的装置对不同深度(3.5~17.5m)采集的天然花岗岩残积土(GRS)进行室内崩解试验,考察土壤结构的影响,认为风化程度引起的颗粒组成变

化并不能控制土体崩解,而胶结作用起关键作用。潘贤斌^[16]采用圆盘造粒机对粉状改良剂进行造粒研究,制备具有一定强度的粒状土壤改良剂,实现粒状土壤遇水快速发生崩解。

尽管学者提出系列泥饼预防措施,但受施工条件限制,盾构在黏性地层中掘进仍会产生泥饼,需采用分散剂浸泡泥饼。目前研究主要集中在土壤分解机制,而对于分散剂作用下盾构泥饼分解特性缺乏合适的测量评价仪器、方法。此外,泥水盾构中环流泥浆也会影响泥饼分解效率,目前鲜有关于泥浆对泥饼分解特性的影响研究。

针对盾构泥饼处治问题,本研究设计制作盾构泥饼压制装置和分解仪,利用此设备获取盾构泥饼分解曲线,进一步分析盾构泥饼分解规律,探究分散剂、膨润土作用对泥饼分解特性的影响,为盾构泥饼处治提供科学依据。

1 试验装置设计

泥饼压制装置原理和实物分别如图1,2所示,该装置主要由活塞、模具和加载仪组成。在模具中加入渣土样,采用加载仪对上部活塞施加压力后,活塞将压缩土样并向下运动,直至活塞上部与模具边缘接触,此时再增大压力活塞也不再向下运动,下部土样体积也不再变化。由于模具体积恒定,通过改变加入渣土样的含水率和质量,即可获得不同密实度泥饼。此外,设计多种不同直径渣土样压制模具,本试验选择渣土样直径、高度均为6cm。



图1 泥饼压制装置原理

Fig.1 Principle of mud cake pressing device

泥饼分解仪原理和实物分别如图3,4所示,该装置由支架、压力传感器、数据采集仪、液体容器、吊笼等组成。将压制的渣土样放入吊笼中,然后淹没在分解液体中,分解的土样落入容器,使其质量增大。采用压力传感器和数据采集仪测量记录不时刻液体容器质量,即可获得分解土样质量随时



图 2 泥饼压制装置

Fig. 2 Mud cake pressing device

间变化规律,进一步可分析压缩土样在不同溶液中的分解规律。液体容器直径为 30cm、高度为 20cm,吊笼直径为 10cm、高度为 15cm。

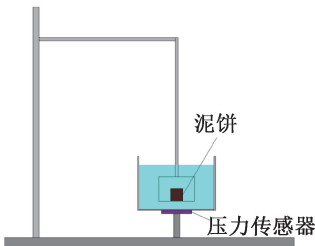


图 3 泥饼分解仪原理

Fig. 3 Principle of mud cake decomposer

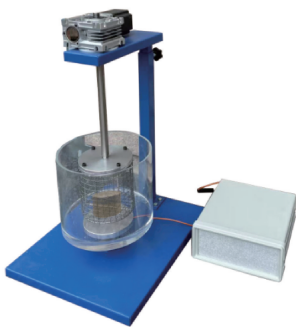


图 4 泥饼分解仪

Fig. 4 Mud cake decomposer

2 试验方案

2.1 试验背景

广州地铁某区间泥水平衡盾构在强风化泥质粉砂岩地层中掘进时,刀盘发生了结泥饼现象,如



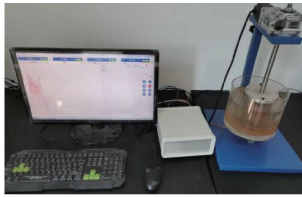
a 试验土样养护



b 泥饼压制



c 泥饼压制成型



d 泥饼分解试验实时检测

图 7 泥饼分解试验过程

Fig. 7 Process of mud cake decomposition test

图 5 所示。对取出的泥饼进行测试,得到其含水率为 17%~22%,密度为 2.28g/cm³。



图 5 刀盘结泥饼现象

Fig. 5 Mud cake phenomenon on the disc cutter

2.2 试验材料

为探究分散剂、膨润土对成型泥饼的分解效果,选用项目地层中强风化泥质粉砂岩作为试验材料,压制的泥饼含水率设定为 20%,密度为 2.28g/cm³。试验渣土样颗粒级配曲线如图 6 所示。

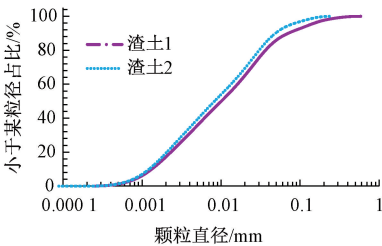


图 6 土样颗粒级配分布

Fig. 6 Particle size distribution of soil samples

泥水盾构施工过程中泥浆黏度为 34~38Pa·s。为探究盾构泥浆对泥饼分解规律的影响,试验采用的泥浆黏度为 30~40Pa·s。泥浆分散剂化学成分如表 1 所示,分散剂体积浓度分别为 0,2%,4%,6%。

表 1 分散剂化学成分

Table 1 Chemical composition of the dispersing agent		
序号	成分名称	质量百分比/%
1	月桂醇聚氧乙烯醚硫酸钠	4~5
2	聚氧乙烯十二烷基醚	0.5~0.7
3	月桂基二甲胺氧化物	0.2~0.4
4	氯化钠	4~5
5	水	89~91

2.3 试验步骤

泥饼制备及分解试验各阶段如图 7 所示,试验

操作步骤如下。

1)将土在烘箱中以 105℃ 烘干≥24h,然后采用橡胶锤将干燥聚团的土样锤散。称取一定量干燥土样,根据试验要求喷洒一定质量的水,并将土样搅拌均匀后放置于容器中,利用保鲜膜密封放置≥24h,充分润湿土样。

2)根据试验工况称取一定量润湿后的土样,然后将土样均匀分为 3 份,将第 1 份土样倒入压制模具中,放入压实器,采用液压顶压装置压制土样,控制压制高度,然后将试样表面刮毛,放入第 2 份土样,重复以上操作,直至泥饼压制完成。

3)泥饼压制完成后,取出泥饼压制装置,并取出泥饼压制装置活塞,将模具倒置在脱模底座上,再将压实器对准模具孔,用力推动压实器推出泥饼,即获得一定压实度的泥饼试样。

4)在液体容器中加入约 3/4 的水,放置于承台,然后将支架调整至最高点后固定,将泥饼放置于吊笼中,缓慢降低支架高度直至泥饼完全浸泡在液体中。

5)将压力传感器读数清零后立刻开始计时,读取并记录压力传感器读数,数据记录频率为 10s/次。

6)当泥饼分解完毕或压力传感器读数不再变化时,停止记录并存储试验数据,绘制压力传感器读数随时间变化图。

3 试验结果

3.1 泥饼分解曲线

泥饼在水中的分解质量随时间变化曲线如图 8 所示。泥饼分解分为初始阶段、快速分解阶段、稳定阶段。在初始阶段,即试验开始后约 8min 内,容器中的水较清澈(见图 9a),表明泥饼基本还没开始分解,泥饼分解质量为负值,即泥饼质量增加,主要是因为泥饼刚放入水中时吸收水分,且吸收水分质量大于泥饼分解质量,导致泥饼质量增加,随后泥饼吸收水分速率降低,泥饼分解速率提高,泥饼分解质量逐渐变为正值。在泥饼快速分解阶段,即试

验开始后约 12min,泥饼开始快速分解,泥饼分解质量快速增大,容器中的水逐渐浑浊(见图 9b)。在稳定阶段,即试验开始后 70min 后,泥饼分解质量基本不再增加,此时泥饼已完全分解。

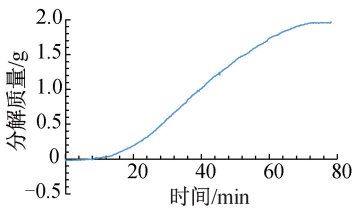


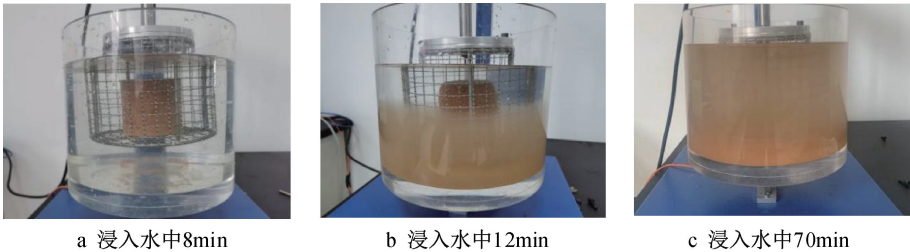
图 8 泥饼在水中的分解质量随时间变化曲线
Fig. 8 Curve of decomposition mass of mud cakes in water changing with time

3.2 分散剂对泥饼分解规律的影响

不同分散剂浓度作用下泥饼分解曲线如图 10 所示。分散剂溶液中泥饼分解曲线与在水中变化趋势基本相同,泥饼分解可分为初始阶段、快速分解阶段、稳定阶段。当分散剂溶液浓度分别为 0, 2%, 4%, 6% 时,完全分解泥饼所需时间分别为 78. 19, 75. 42, 65. 83, 50. 14min。相比于水,浓度为 6% 的分散剂溶液分解泥饼效率提高了 35. 87%,充分表明采用分散剂溶液浸泡泥饼能显著提高泥饼分解速率。需注意的是,加入分散剂后分解质量不再出现负值,即在初始阶段泥饼质量不会增加,这主要是由于分散剂能提高泥饼分解速率,在泥饼刚放入分散剂溶液中时,泥饼分解速率高于吸水速率,导致泥饼质量不会增大。

3.3 膨润土对泥饼分解规律的影响

不同黏度膨润土溶液中泥饼分解曲线如图 11 所示。与在水、分散剂溶液中泥饼分解不同,随着分解时间增加,泥饼分解质量先逐渐减小后趋于稳定,且泥饼分解质量为负值,代表泥饼质量增加,表明膨润土的存在能显著抑制泥饼分解。泥饼在膨润土溶液中分解主要分为初始阶段和稳定阶段,在初始阶段,泥饼吸收泥浆中的水分,导致泥饼质量缓慢增大;在稳定阶段,泥饼表面达到饱和,且被膨



a 浸入水中8min b 浸入水中12min c 浸入水中70min

图 9 泥饼试样在不同阶段分解情况

Fig. 9 Decomposition of mud cakes at different stages

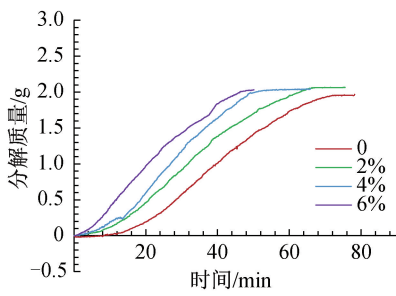


图 10 不同分散剂浓度作用下泥饼分解曲线
Fig. 10 Decomposition curves of mud cakes under different dispersing agent concentrations

润土包裹(见图 12),不再吸收泥浆中的水分,泥饼质量也基本不再变化。随着泥浆黏度由 30Pa·s 增大至 40Pa·s,泥饼吸收的水分减少,即泥饼质量增加量减小。

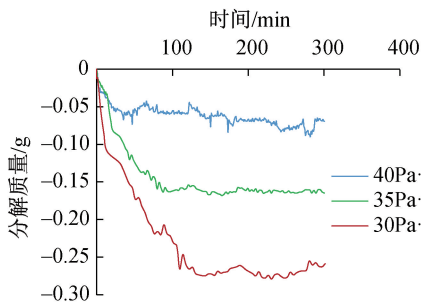


图 11 不同黏度膨润土溶液中泥饼分解曲线
Fig. 11 Decomposition curves of mud cakes in bentonite solutions with different viscosities



图 12 泥饼被膨润土包裹示意
Fig. 12 Mud cake wrapped in bentonite

4 结语

为研究盾构泥饼分解特性,设计研制了盾构泥饼压制装置和分解仪,分析盾构泥饼分解规律及分散剂、膨润土对泥饼分解的影响规律,得出结论如下。

1) 泥饼在水中分解分为初始阶段、快速分解阶段、稳定阶段,在初始阶段泥饼先吸水再分解,泥饼

分解质量先为负值然后增加为正值,总体变化较小;在快速分解阶段泥饼分解速率较高,泥饼分解质量快速增大;在稳定阶段泥饼分解质量基本不再增加,此时泥饼已完全分解。

2) 采用分散剂溶液浸泡泥饼能显著提高泥饼分解速率,且分散剂浓度越高,泥饼分解速率越高,且加入分散剂后分解质量不再出现负值,即在泥饼分解初始阶段泥饼质量不会增加。

3) 泥饼在膨润土溶液中分解时,随着分解时间增加,泥饼分解质量先逐渐减小然后趋于稳定,且泥饼分解质量为负值,即泥饼质量增加,这表明膨润土的存在显著抑制了泥饼分解。

参考文献:

[1] 常勇,任国平,高始军,等. 高黏性地层大直径泥水盾构刀盘结泥饼问题的处置[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 596-601,595.
CHANG Y, REN G P, GAO S J, et al. Disposal of the problem of mud cake formation in large-diameter slurry shield tunneling cutters in high viscosity strata[J]. Industrial construction, 2023, 53(S2): 596-601,595.
[2] 何纯豪,钟小春,竺维彬,等. 掘进机黏性渣土结泥饼机制及聚合物改良研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(10): 1746-1754.
HE C H, ZHONG X C, ZHU W B, et al. Research on the mechanism of cohesive slag cake formation and polymer improvement in tunneling machines[J]. Tunnel construction, 2022, 42(10): 1746-1754.
[3] 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 mud cake blockage in cutterhead of cohesive strata panel earth pressure balance shield tunneling [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42(9): 1651-1658.
[4] MAIDL B, HERRENKNECHT M, MAIDL U, et al. Mechanised shield tunnelling [M]. 2nd edition. Berlin: Ernst and Sohn, 2012.
[5] OLIVEIRA G G D ,THEWES M I D P ,DIEDERICH S M I D P , et al. EPB tunnelling through clay - sand mixed soils: proposed methodology for clogging evaluation [J]. Geomechanics and tunnelling, 2018, 11 (4): 375-387.
[6] OLIVEIRA D. EPB excavation and conditioning of cohesive mixed soils: clogging and flow evaluation [D]. Kingston: Queen's University, 2018.
[7] HOLLMAN F S, THEWES M. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2013, 37:96-106.
[8] 王助锋,冯欢欢. 泥质粉砂岩地层泥水盾构防止刀盘结泥饼针对性改进[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(6): 217-222.
WANG Z F, FENG H H. Targeted improvement of mud water

shield tunneling in muddy siltstone formations to prevent knife disc mud cake formation [J]. Modern tunnelling technology, 2017, 54(6) : 217-222.

[9] 王志华, 赵兴科. 石墨/镍复合涂层在泥水盾构机刀盘泥饼防治中的应用[J]. 隧道与轨道交通, 2018(4) : 38-41,59. WANG Z H, ZHAO X K. Application of graphite/nickel composite coating in the prevention and control of mud cake on the cutterhead of slurry shield tunneling machine[J]. Tunnel and rail transit, 2018(4) : 38-41,59.

[10] 刘泓志, 李辉, 赵亮, 等. 泥水盾构掘进砂卵石夹黏土地层泥饼处置技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S1) : 442-448. LIU H Z, LI H, ZHAO L, et al. Research on mud cake disposal technology for sand and pebble intercalated soil layer in mud water shield tunneling[J]. Tunnel construction, 2022, 42(S1) : 442-448.

[11] 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. Research on the mechanism and disposal measures of shield tunneling knife cladding mud cake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[12] 杜昌言, 朱汉标, 王树英, 等. 泥水盾构泥饼分散崩解试验与应用研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (5) : 847-853. DU C Y, ZHU H B, WANG S Y, et al. Experimental and applied research on the dispersion and disintegration of mud cake in slurry shield tunneling [J]. Tunnel construction, 2022, 42 (5) : 847-853.

[13] 刘丹露, 赵媛, 丁树文, 等. 花岗岩剖面土壤崩解特性与初始含水率的关系 [J]. 中国水土保持科学, 2016, 14 (2) : 17-22. LIU D L, ZHAO Y, DING S W, et al. Relationship between soil disintegration characteristics and initial moisture content in granite profiles [J]. Science of soil and water conservation, 2016, 14 (2) : 17-22.

[14] 黎桢君, 许冲, 李贤, 等. 非饱和砂质黏性紫色土崩解特性及 MICP 加固试验 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (22) : 127-135. LI A J, XU C, LI X, et al. Collapse characteristics of unsaturated sandy cohesive purple soil and MICP reinforcement test [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2021, 37(22) : 127-135.

[15] LIU X Y, ZHANG X W, KONG L W, et al. Disintegration of granite residual soils with varying degrees of weathering [J]. Engineering geology, 2022, 305:106723.

[16] 潘贤斌. 粒状土壤改良剂制备及其崩解性能研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018. PAN X B. Preparation and disintegration performance of granular soil improvers [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.