

DOI: 10.16285/j.rsm.2023.1401

考虑温度效应的盾构刀盘黏附试验及堵塞防治

王修伟^{1,2}, 李树忱^{1,3}, 刘祥坤¹, 万泽恩³, 彭科峰^{1,2}

(1. 山东大学 岩土与地下工程研究院, 山东 济南 250014; 2. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002;
3. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 土压平衡盾构在黏性地层掘进时易产生刀盘结泥饼、堵塞等问题, 不仅会导致排渣不畅降低掘进效率, 并且频繁的开仓处理会增加工程风险, 而掘进会产生大量热量影响土体黏附性。采用自主研发的刀盘旋转黏附试验系统, 探究刀盘温度与含水率、黏土含量、黏土类型等因素联合作用下刀盘黏附效果, 并分析了泡沫剂、抗黏剂在不同掺入比下堵塞防治效果。研究表明: 温度升高会使得旋转扭矩与刀盘表面的土体黏附量降低, 但会加速黏土硬化; 土体含水率、黏土含量对于扭矩影响趋势相反, 但对黏附量影响规律相同, 随着土体含水率或黏土含量增加, 黏附量先增加后降低, 含水率在 20%、黏土含量在 30% 时黏附性最强; 膨润土比高岭土黏附性更强; 土体含水率、黏土含量与黏土类型对于黏附量的影响可以使用稠度指数进行表征, 随着稠度增加黏附量会出现先增加后降低的趋势, 稠度指数在 0.50~0.75 时土体黏附性最强, 低稠度指数土体对温度敏感性更强; 单独添加泡沫剂会降低土体黏附量, 但在注入比为 70% 时, 仍存在大量土体黏附; 使用泡沫剂+抗黏剂联合改良在注入比为 50% 时改良效果较好, 继续增加注入比对土体改良效果影响较小。研究成果对于评估黏性地层土压平衡盾构掘进堵塞风险与黏性土渣土改良方案选择具有一定的指导意义。

关 键 词: 土压平衡盾构; 刀盘堵塞; 黏性地层; 温度效应; 渣土改良

中图分类号: TU 94+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2024) 08-2299-12

Adhesion test and blockage prevention of shield tunneling cutterhead considering temperature effect

WANG Xiu-wei^{1,2}, LI Shu-chen^{1,3}, LIU Xiang-kun¹, WAN Ze-en³, PENG Ke-feng^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250014, China;

2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan, Shandong 250002, China;

3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In cohesive strata, earth pressure balance shield tunneling often encounters issues such as mud cake formation and cutting edge blockage. These problems not only hinder the efficient discharge of excavated material, leading to decreased excavation efficiency, but also increase the risk of frequent silo openings during the construction process. Furthermore, heat generated during excavation can affect soil adhesion. To explore the adhesion effects on the cutter head considering cutter head temperature, water content, clay content, clay type, and other factors, a self-developed rotary adhesion test system for the cutter head was employed. The system also examined the preventive and control effects of foam agents and anti-adhesion agents at different mixing ratios to mitigate blockage. The findings indicate that an increase in temperature reduces rotational torque and soil adhesion on the cutter head's surface, but it accelerates clay hardening. The trends of soil moisture content and clay content on torque are inverse, yet they similarly affect adhesion. As moisture content or clay content increases, adhesion initially increases and then decreases. The highest adhesion occurs at 20% moisture content and 30% clay content. Furthermore, bentonite exhibits greater adhesion compared to kaolin. The adhesion effects of soil moisture content, clay content, and clay type can be assessed using a consistency index. As consistency increases, adhesion initially increases and then decreases. The soil shows the highest adhesion when the consistency index ranges between 0.5 and 0.75, and low consistency index soil is more temperature-sensitive. While the addition of foam agents alone

收稿日期: 2023-09-18

录用日期: 2024-01-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (No. 52108373, No. 52308423); 山东省自然科学基金 (No. ZR2021ZD36, No. ZR2021QE127); 中国博士后科学基金面上资助 (No. 2022M723402)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China for Young Scholars (52108373, 52308423), the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021ZD36, ZR2021QE127) and the General Program of Postdoctoral Science Foundation of China (2022M723402).

第一作者简介: 王修伟, 男, 1997 年生, 博士研究生, 主要从事盾构隧道施工工艺的研究。E-mail: wxw_ge@163.com

通讯作者: 李树忱, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事隧道工程与盾构渣土改良方面的相关研究。E-mail: shuchenli@sdu.edu.cn

decreases soil adhesion, substantial adhesion persists at a 70% injection ratio. However, a 50% injection ratio shows better improvement with the combined use of foam agents and anti-adhesion agents. Additionally, increasing the injection ratio has minimal impact on soil improvement. These findings offer valuable guidance for evaluating blockage risks in earth pressure balance shield tunneling through cohesive strata and choosing suitable soil improvement strategies for cohesive soil remnants.

Keywords: earth pressure balance shield; cutter head clogging; viscous formation; temperature effect; muck improvement

1 引言

盾构法施工技术凭借机械化程度高、安全可靠、施工效率高等特点,已经成为城市轨道交通建设的主流工法,并应用于公路隧道、铁路隧道、水电通道、城市地下综合管廊等诸多领域,具有广泛的应用市场^[1-2]。盾构穿越黏性土含量高地层时,容易产生刀盘结泥饼、掘进效率降低、盾构姿态难以控制等工程问题^[3-5]。频繁的开仓处理也会增加施工风险,阻碍施工进度,增加施工成本^[6-7]。

盾构穿越黏性地层时,土体中的细颗粒黏性矿物易黏附刀盘。刀盘切削地层时会与砂砾石等矿物成分摩擦产生热量,在地层压力和温度作用下,黏附在刀盘和土舱中的黏土体会逐渐固结、硬化,进而产生泥饼和堵塞,形成如图 1 的工程现象^[8-9]。泥饼和堵塞产生后,会堆积在刀具周围,使刀盘负荷加重,刀具贯入度降低,盾构推力明显增大,加剧刀具磨损,引起温度进一步升高,使周围黏土进一步固化,形成恶性循环,因此探究温度效应对黏土与盾构刀盘的黏附性影响十分重要^[10-11]。



图 1 盾构刀盘结泥饼及堵塞情况^[8-9]

Fig.1 Mud cake of shield cutter and clogging^[8-9]

在盾构刀盘黏附机制方面,学者在不同角度提出了自己的见解。Zimnik 等^[12]采用改进的直剪试验研究土与钢板之间的黏附作用,指出黏土的矿物成分、黏粒含量、钢圆盘表面粗糙度、接触时间、接触压力、含水率等因素会影响界面剪切作用。Thewes 等^[13-14]提出金属与黏土黏附问题可被细分为黏土与金属表面的黏附力、黏土固有的黏聚力、黏土团块对金属桥接作用和黏土的聚合 4 种单一的

作用机制。Hollmann 等^[15]提出了评价盾构施工黏土阻塞盾构设备的分区图。杨益等^[16]在圆锥拉拔试验的基础上,按照黏附量和拉拔强度将黏性渣土划分为不同的“堵塞”风险等级。Burbaum 等^[17]提出了描述固体材料与黏土间黏附作用的物理接触模型。杨益等^[18]采用恒温黏附剪切仪探究了温度、含水率等因素对黏土-金属界面黏附力的影响规律。Oliveira 等^[19-20]通过新型装置对混合砂黏土进行了堵塞风险评估。Barzegari 等^[21]认为含水率的增加会降低土体的黏聚力,但会增加与钢表面的切向黏附力。Dai 等^[22]发现在刀盘堵塞时,温度会在短时间内急剧升高。Ji 等^[23]提出高温会加速黏性土的干燥,导致刀盘开口堵塞,并形成恶性循环,导致盾构停机。王海波等^[24]利用精准温控动三轴试验系统开展了不同温度与升温路径饱和黏土剪切试验研究,指出升温幅值增大会使土体热固结程度越大,升温分级越多,热固结也越充分。

为解决黏性地层对刀盘黏附的问题,国内外学者也开展了大量研究^[25]。Spagnoli 等^[26]证实了地层中流体介电常数对黏土黏附性能有重要影响,并通过电渗试验论证了充电降低刀盘结泥饼的可行性。Wan 等^[27]研发新型抗黏剂,并通过动态黏聚力试验对抗黏剂改良效果进行评价,分析了抗黏剂对黏土作用的原理。刘朋飞等^[28]提出了分散剂会增加黏土颗粒的负电荷量,降低了 Zeta 电位,达到降低黏附性作用。Djeran-Maigre 等^[29]通过试验表明,泡沫破碎后的液态的活性剂也可以降低渣土的黏附力。

从以上研究可以看出,当前评价土体黏附性的试验研究大多未考虑温度场的影响,并且针对于黏土地层渣土改良研究多为单一外加剂分析。实际盾构掘进会面临复杂工况,因此有必要研究在多因素影响下的刀盘黏附情况。本研究采用可控制温度的刀盘旋转黏附试验系统探究了不同刀盘温度、含水率、黏土类型及黏土含量条件下刀盘黏附效果及旋转扭矩变化规律,得到不同因素影响下土体黏附性变化规律。在此基础上,为降低刀盘堵塞风险,开展了“泡沫剂+抗黏剂”组合改良剂方案对黏性土样进行改良,通过刀盘旋转黏附试验测试改良效

果，并通过长春地铁某工程验证改良方案的有效性。

2 试验设计

2.1 试验材料

实际施工环境中土体的黏附性是由其矿物成分所决定的。为便于分析黏土颗粒对结果的影响，采用人工配置不同黏砂比的试验土体。所使用原材料主要有钠基膨润土、高岭土、石英砂，如图 2 所示，黏土配置比例如表 1 所示。在国内外学者研究中，液塑限是判断土体黏附性与预测盾构刀盘堵塞风险的重要指标。开展试验土样液塑限试验，结果如表 1 所示。

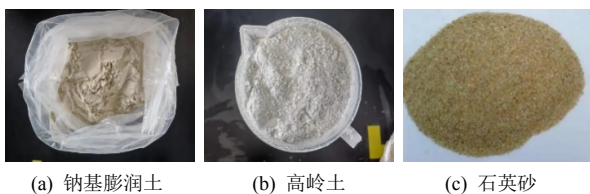


图 2 预制土样材料

Fig.2 Materials for prefabricated soil samples

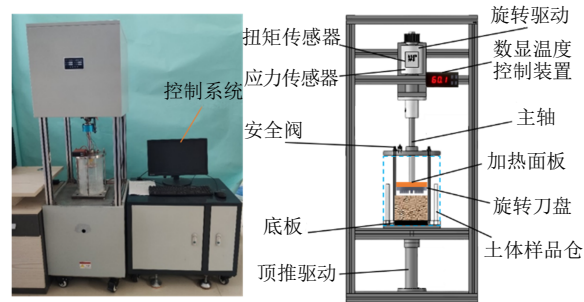
表 1 土样试样配置

Table 1 Clay sample configuration

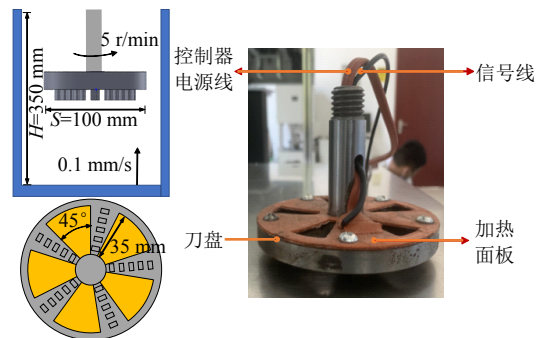
编号	黏土含量 /%	石英砂含量 /%	黏土成分 (膨润土:高岭土)	液限 /%	塑限 /%
土样1	30	70	1:1	25.79	14.54
土样2	20	80	1:1	20.42	10.09
土样3	40	60	1:1	32.67	15.68
土样4	30	70	2:1	29.97	13.50
土样5	30	70	1:2	21.99	14.15
土样6	30	70	1:0	35.59	12.10

2.2 刀盘旋转黏附试验设备

刀盘旋转黏附试验系统主要包括 4 部分：掘进系统、温度控制系统、动力系统及信息采集及控制系统，如图 3 所示。掘进系统主要包括旋转刀盘及土体样品仓，如图 3(b)所示，刀盘直径为 100 mm，厚度为 10 mm，底部分布有刀具，掘进时与主轴同步转动。温度控制系统主要包括加热面板与温度控制器，加热面板贴合于刀盘实体上部，通过温度控制器进行控制，实现模拟刀盘切削土体升温现象。动力系统主要包括上部旋转驱动与底部的顶推驱动，分别用于驱动刀盘转动与土体底板上升。信息采集及控制系统主要包括扭矩与推力传感器、中央控制系统，实现试验掘进参数的控制与检测。



(a) 整体示意图



(b) 刀盘细节图

图 3 刀盘旋转黏附试验系统

Fig.3 Cutter rotary adhesion test system

试验前将土样装入亚克力圆柱样品筒并密封，样品筒固定于底座上，通过顶推传动系统抬起，与刀盘旋转配合，模拟掘进过程地层和刀盘的相对运动。

2.3 试验步骤

黏土与盾构刀盘的黏附性受黏土种类、性质、温度等因素影响，设计试验方案如表 2 所示，刀盘旋转黏附试验具体操作步骤如下：

(1) 土样配置。确定所需黏土类型和含水率等因素，进行土样配置，将土体与水充分混合后，在常温条件下密封静置 24 h。测定土样的黏稠状态，使用稠度指数 I_c 来表示：

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_p} \quad (1)$$

式中： I_c 为稠度指数； w_L 为土样液限； w_p 为土样塑限； w 为土样实际含水率。

(2) 系统测试。对刀盘旋转黏附试验系统的各项功能进行预先测试，检测刀盘旋转、底座抬升、传感器是否处于正常范围。

(3) 预加载及预加热。土样装填完毕后，刀盘悬空与土样表面并不接触，先将轴向荷载和竖向位移数据清零，进行底座抬升，当刀盘与土样表面完全接触，停止抬升。通过温度控制系统调整刀盘温度，充分加热刀盘到设定温度。

(4) 刀盘掘进及数据采集。设置刀盘转速和底座抬升速度开始掘进, 根据实际工况设定刀盘转速 5 r/min, 底座抬升速度 0.1 mm/s, 共计抬升 20 mm, 试验过程中进行数据采集。

(5) 后处理。将底座复原, 拆下刀盘和土样仓, 进行结果采集和土样更换, 并进行下一次试验。

表 2 刀盘旋转黏附试验因素

Table 2 Factors of rotational adhesion test of cutter head

试验组号	土样编号	含水率 /%	稠度指数	刀盘温度 /℃
1	土样 1	20	0.51	40、60、80、100
2	土样 1	17	0.78	
3	土样 1	23	0.25	
4	土样 2	20	0.04	
5	土样 3	20	0.75	
6	土样 4	20	0.61	
7	土样 5	20	0.25	
8	土样 6	20	0.66	

3 刀盘旋转黏附试验结果及分析

3.1 不同温度基本试验组

刀盘与地层长时间转动摩擦会产生热量使得刀盘面板、土仓及周围环境温度升高, 因此开展不同温度条件下刀盘旋转黏附试验, 探究温度对刀盘黏附力及黏附效果的影响。

绘制试验组 1 在 40、100℃掘进过程扭矩变化曲线, 如图 4 所示。刀盘与黏土表面接触后开始旋转, 预掘进段 40℃时刀盘扭矩平均值约为 0.7 N·m, 100℃时刀盘扭矩平均值约为 0.3 N·m, 可以看出, 温度升高降低了刀盘初始切削黏土的扭矩。50 s 后土仓底板上升 (A 点), 刀盘切削土体, 扭矩急剧上升, 随着切入深度的增加, 增长速度降低, 在掘进结束后, 扭矩快速降低并趋于稳定。这可能是随着刀盘旋转掘进, 土样包裹、黏附在刀盘及刀具周围, 阻碍刀盘的掘进。在温度与压力作用下, 土体黏附刀盘情况随掘进深度增加而加剧, 导致扭矩不断提升。在快速上升期内 (A~B 点), 相比于刀盘温度 40℃时, 100℃时刀盘扭矩上升速度更快, 在 B 点时 40℃与 100℃的刀盘扭矩平均值上升至 1.5 N·m, 扭矩分别上升约 0.8、1.2 N·m。但在温度升高时, 平缓上升区的整体旋转扭矩会有所减弱, 并减少扭矩波动。

扭矩是旋转剪切土体产生阻力, 与切向黏附力成线性关系, 而温度上升会降低液体表面黏膜的黏附力。根据 Fountaine^[30]提出的水膜理论, 黏附力

主要由土壤固相颗粒对水吸引力、拉普拉斯压力、静电引力组成, 其中拉普拉斯压力对界面黏附力起决定性作用。界面黏附力在数学上描述如图 5 所示, 拉普拉斯压力 Δp 表示为流体内部压力 p_w 与大气压力 p_a 的差值, 可通过表面张力 γ 、水环弯月面半径 R_1 与水膜半径 R_2 进行计算:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

通常 $R_1 \ll R_2$ 。在土体含水率较低的情况下, 土体与固体界面间会通过水环接触, 产生的界面黏附力 F 为

$$F = \pi \gamma R_2^2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

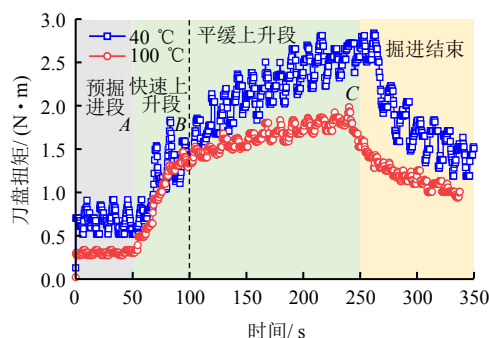


图 4 刀盘扭矩曲线

Fig.4 Curves of cutterhead torque

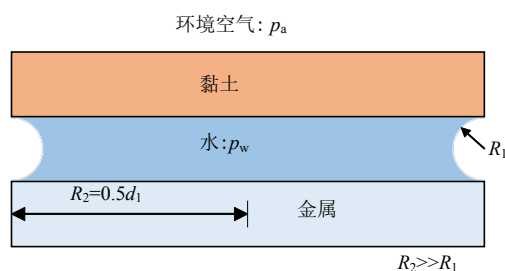


图 5 黏土和金属界面的黏附原理^[32]

Fig.5 Adhesion principle of clay and metal interface^[32]

根据任文辉等^[31]试验结果可知, 温度上升会降低液体表面张力 γ , 如图 6 所示。液体表面张力降低会使得界面黏附力降低。当土体含水率较高, 界面为连续水膜时, 也可以视作一个大的水环, 此时界面黏附力就等于水膜产生的张力。因此随着温度上升, 会导致黏附力降低, 进而使得刀盘的旋转扭矩降低。

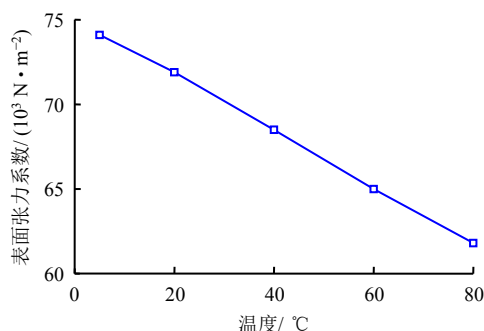
图 6 纯净水的表面张力系数与温度的关系^[31]Fig.6 Relationship between surface tension coefficient and temperature of purified water^[31]

图 7 为试验组 1 结束后刀盘表面形貌，试验结束后刀盘表面有明显的土体黏附现象。图 8 为不同温度条件刀盘土体黏附量，可以看到随着温度的增加，黏附在刀盘表面的土体减少，这可能是高温加速了黏土的固结，固结后的土体与周边黏土黏结性较弱，因此缓慢上升期 100 °C 工况下扭矩上升较少，但 40 °C 工况扭矩上升速度仍保持较高水平，说明土体继续黏附于黏接在刀盘上的土体上。这也可以从图 7 看出，40 °C 工况下刀盘开口处全部堵塞，而且在刀盘上方有凸起土体黏结，而在 100 °C 刀盘表面仅有黏土固结在刀具缝隙处与开口处，未见凸起的松散土体。虽然温度升高会降低刀盘上总黏附量，但在高温时黏土硬化更快，并且刀具之间已经黏接土体，无法对地层进行有效切割，因此在切割 20% 含水率的土样 1 时，各温度下都会黏结刀盘，需要对土体进行改良。

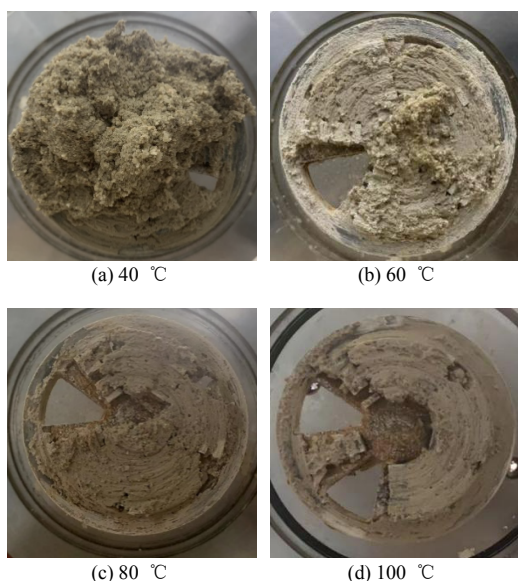


图 7 不同温度刀盘黏附情况

Fig.7 Adhesion of cutterhead at different temperatures

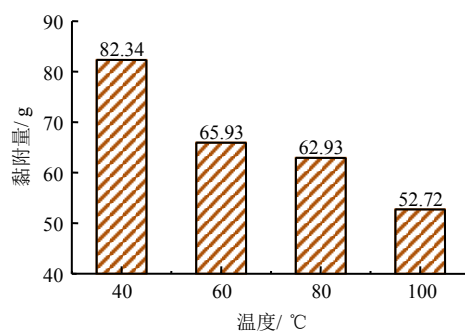


图 8 不同温度条件下刀盘土体黏附量

Fig.8 Adhesion amount of cutterhead clay under different temperature conditions

3.2 不同含水率试验组

对比试验组 1、2、3，分析土样 1 在 17%、20% 和 23% 含水率下，刀盘土体黏附含量与最大旋转扭矩随温度的变化，如图 9 所示。图 10 为不同含水率下刀盘黏附情况。

由图 9(a) 可知，在相同温度条件下，随着含水率提高，刀盘旋转扭矩也逐渐减小。随着温度升高，刀盘切削不同含水率土样的扭矩呈现逐渐减小的趋势。温度对于不同含水率土样影响有较大差异，在最高含水率 ($w=23\%$) 时扭矩几乎不产生变化，而 17%、20% 含水率试验组扭矩变化较为显著，这说明在不排水条件试验环境中，黏土样中含水率较高时，温度对扭矩的影响甚微。

由图 9(b) 可以看出，随着土体含水率增大，刀盘黏附量呈现出先增大后减小的趋势，在含水率 20% 时黏附量最高。由水膜理论可知，低含水率时，随着水分增加黏土颗粒水膜面积增加，则水膜的半径 R_2 也随之增加，根据式 (2) 可知土体与刀盘之间的黏附力增大。当含水率继续升高时，水膜的面积不再增大但厚度增加，导致水环弯月面半径 R_1 增加，使得界面黏附力减弱。因此土体黏附性最强的时候出现在中间含水率试验组，含水率过小或含水率较大都会降低黏性土的黏附性。切割不同含水率的土样刀盘黏附量都随着温度增加而出现减少。含水率 $w=23\%$ 时，试验刀盘温度由 40 °C 提升到 100 °C 时，刀盘表面土体黏附量减少了 56%。而当含水率 $w=17\%$ 时，黏附量仅减少了 33.78%。因此相对于低含水率 ($w=17\%$) 试验组，高含水率试验组 ($w=23\%$) 受温度影响更强。对试验组数据点进行线性拟合，低含水率情况下，拟合直线斜率绝对值较小，仅为 0.356，随着含水率增加，拟合直线绝对值逐渐增大，这也表明随着含水率增大，土体黏附效果受温度影响逐渐增大。

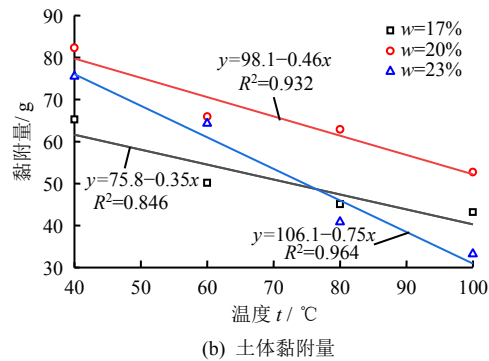
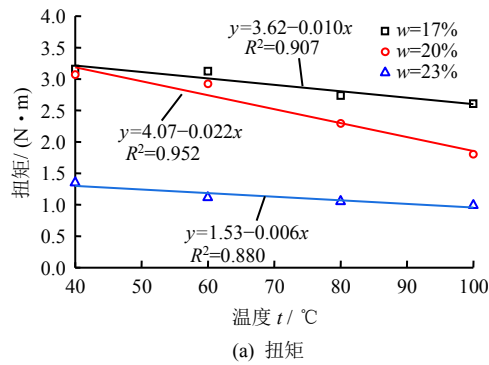


图9 不同含水率试验组随温度变化曲线
Fig.9 Curves of different water content test groups with temperature

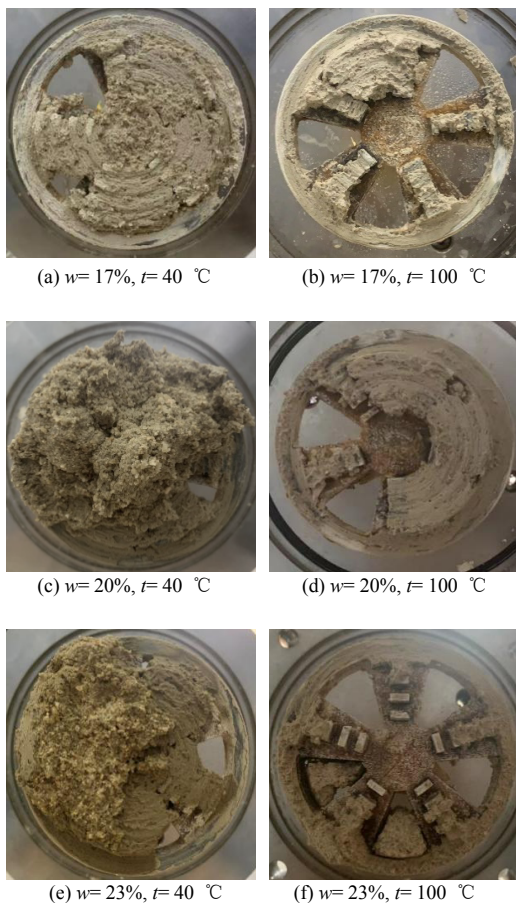


图10 不同含水率试验组刀盘黏附情况
Fig.10 Adhesion of cutterhead of different water content test groups

综合上述发现,随着含水率的增大扭矩会持续降低,但最大黏附效果却出现在中间含水率试验组,根据本研究试验结果与已有研究结果可以看出^[15],旋转扭矩的大小与最终刀盘黏附堵塞效果并不完全对应。

3.3 不同黏土含量试验组

对相同黏土类型不同黏土含量土样进行了刀盘旋转黏附试验,通过试验组 1、4、5 结果,得到黏附量与最大旋转扭矩随温度的变化,如图 11 所示。

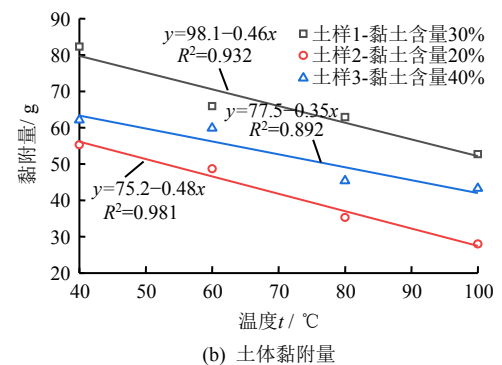
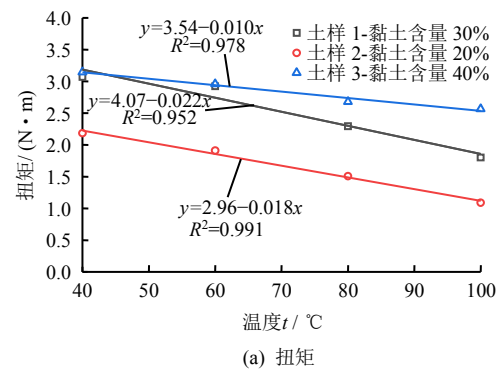


图11 不同黏土含量试验组
Fig.11 Test groups with different clay contents

由图 11(a)可以看出,相同温度下,随着土样中黏土成分含量增加,会明显增大刀盘旋转扭矩。这可能是由于预制土样中黏土组分含量增大,砂性土组分含量减少,而砂性土的特点是摩擦角较大但黏聚力可以忽略不计。因此黏土含量增大时,对应着整体预制土样的黏聚力有所提升,切削土样受到阻力更大,导致扭矩增加。随着温度升高,切削含黏土成分比例不同的土样的扭矩都呈现逐渐减小的趋势,这也与 3.1 节规律相符。

图 11(b)可以看出,随着温度升高,切割不同黏土含量土体的刀盘黏附量是逐渐减小的。在相同含水率情况下黏附效果最强的试验组为土样 1,黏土含量为 30%,增加或减少黏土含量会降低黏土与刀盘黏附性。分析其原因可能是土体中黏土颗粒

比例增加, 会在黏土颗粒之间形成更多结合水, 降低了黏土与金属间的水膜面积, 使得土样黏附性降低, 导致土样 2 的黏附量小于土样 1; 当土体中黏土颗粒含量降低时, 相应的结合水含量也减少, 使得水膜面积增加, 但超过一定程度后会增大水膜厚度, 使得土样黏附性降低, 因此土样 3 的黏附量小于土样 1。

3.4 不同黏土成分试验组

对不同黏土类型土样进行了刀盘旋转黏附试验, 通过试验组 1、6、7、8 的结果, 得到黏附量与最大扭矩随温度变化规律, 如图 12 所示。

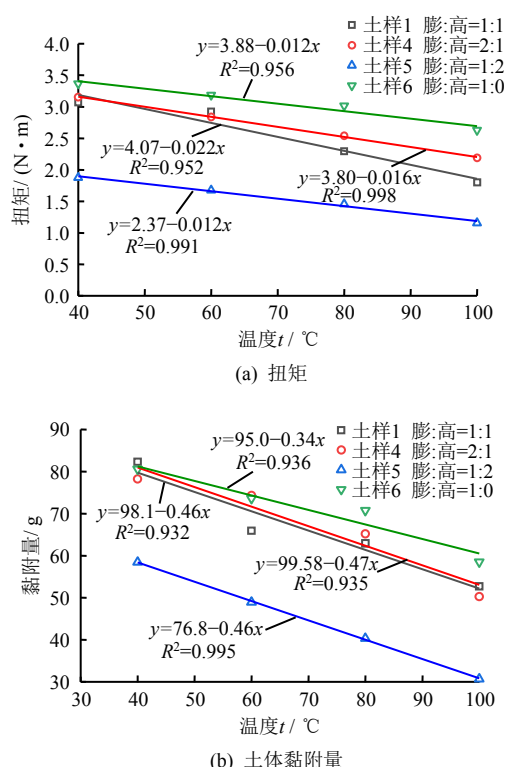


图 12 不同黏土类型试验组

Fig.12 Different clay types test groups

由试验结果图 12(a)可以看出, 不同黏土成分试验组整体规律大致相同, 随着温度升高, 扭矩减小。在相同含水率情况下, 随着黏土样中膨润土含量的增大, 扭矩会略有增大。这是因为膨润土成分中绝大多数是蒙脱土, 相对于高岭土来说, 蒙脱土具有更强的吸水性, 因此膨润土含量高的土样具有较高的塑性指数, 也就是说在相同含水率的情况下, 膨润土含量高的土样稠度指数相对更高。随着土样稠度指数增大, 扭矩也逐渐增大, 与不同含水率试验组规律相同。

由图 12(b)可以看出, 在相同含水率的情况下随着黏土中膨润土含量的逐渐增加, 整体刀盘黏附

量有着逐渐增加的趋势。在上述试验组范围内, 随着黏土样稠度指数的增大, 黏性土黏附效果逐渐增强。随着温度升高, 切割不同黏土类型土体的刀盘黏附量是逐渐减小的。刀盘温度由 40 °C 升高到 100 °C, 土样 6 (完全膨润土) 土体黏附量减少了 27.39%, 而土样 5 (膨:高=1:2) 土体黏附量减少了 47.51%, 相对来说膨润土含量增加, 会减弱土样黏附性所受温度的影响。

3.5 多因素协同影响

综合上述试验数据, 发现含水率、黏土含量与黏土类型都会对黏附性产生影响, 而土体的黏稠状态也受到含水率、黏土含量与黏土类型影响, 稠度指数与黏附性具有较好的相关性。因此综合各试验组数据分析土体稠度指数与黏附性的关联性, 绘制 40 °C 与 100 °C 温度条件下稠度指数 I_c 与黏附量 G 变化曲线, 如图 13 所示, 对稠度指数与黏附量关系进行拟合:

$$G_{40} = -280.93I_c^3 + 198.88I_c^2 + 26.35I_c + 53.91 \quad (4)$$

$$G_{100} = -456.08I_c^3 + 487.93I_c^2 - 88.9I_c + 30.78 \quad (5)$$

由图 13 可以看出, 刀盘温度在 40 °C 与 100 °C 时, 稠度指数与黏附量之间符合三次函数关系, 曲线拟合相关系数较高。图 13 中最右侧两点分别为土样 2 与土样 5, 两种土样的含水率、黏土含量各不相同, 但稠度指数相近, 最终也表现出了相近的黏附性, 这也说明了稠度指数可以综合表征含水率、黏土含量等因素对于土体黏附性的影响。在 0~1 范围内, 随着稠度指数增大, 黏附量呈现出先增大后减小的趋势, 稠度指数 0.5~0.75 区间黏附量最高, 也代表着土体黏附性较强, 属于高黏附风险区间, 当稠度指数大于 0.75 时, 黏附量出现降低, 属于中等黏附风险区间, 这也与 Hollmann 等^[15]提出的土体黏附风险区间分布基本吻合。随着温度升高, 土体黏附性整体呈现下降的趋势, 并且温度会影响土样黏附性最强时稠度指数的位置, 40 °C 时黏附量最高出现在 $I_c = 0.54$ 处, 100 °C 时黏附量最高出现在 $I_c = 0.6$ 处, 这是因为随着温度升高, 高含水率黏土受到温度影响较大, 黏附力降低明显。所以温度升高时, 最高黏附量位置会向高稠度指数位置移动。

进一步分析稠度指数与黏附性的关系, 基于上述试验结果对稠度指数 I_c 、温度 t 与黏附量 G 进行三维拟合得

$$G = -477.27I_c^3 + 0.94tI_c^2 - 0.5tI_c + 406.17I_c^2 - 0.5t - 35.25I_c + 78.84 \quad (6)$$

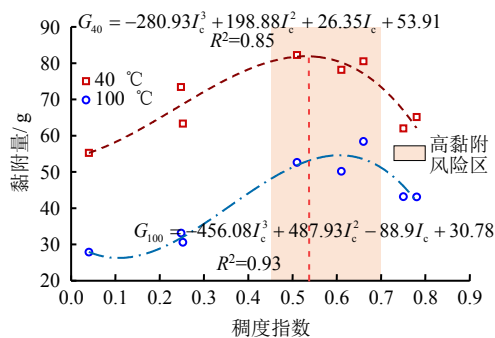


图 13 稠度指数与刀盘黏附量关系

Fig.13 Relationship between the consistency index and clay adhesion to the cutter

将试验组数据进行三维散点图绘制,如图 14 所示。可以看到随着稠度指数增加,黏附效果呈现出先增大后减小的趋势,稠度指数在 0.6 左右时土样有着最高的黏附性,随着刀盘界面温度升高整体的黏附效果又在逐渐减弱。实际施工中倾向于通过刀盘黏附量来表征黏附效果,因此可以根据公式(6),对含黏土地层盾构掘进时黏附风险进行初步评估,为可能出现的泥饼、堵塞等工程问题提供预警。

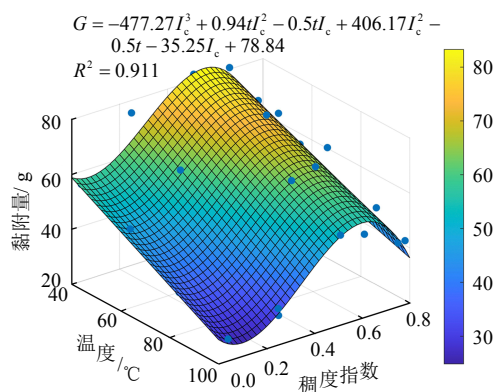


图 14 温度和稠度指数共同影响下刀盘黏附量

Fig.14 Adhesion of cutterhead under the combined influence of temperature and consistency index

4 刀盘堵塞防治讨论

4.1 黏土改良室内试验

为确保盾构机能够顺利地排出渣土,需保证渣土有良好的流塑性。而通过第 3 章的试验分析可以看到在土体黏附性较高时,切削试验结束时刀盘表面都会黏附大量土体,这会严重影响隧道施工效率。实际施工时因为刀盘形式与地层条件无法改变,使用外加剂进行渣土改良是保障盾构施工的较优选择。

为改善土体黏附刀盘,目前常使用泡沫剂与抗

黏剂对土体进行改良。泡沫掺入比是影响渣土性质的重要因素,掺入比较低时对土体改良效果较差,土体仍大量黏附刀盘,而掺入比过高会导致土体流动性过大,渣土不易排出。泡沫剂与抗黏剂联合使用时,抗黏剂与泡沫剂质量比值 VR(配合比)也会影响改良效果。因此确定合适掺入比与配合比是确保盾构在黏土地层顺利掘进的关键。掺入比 FIR,配合比 VR 分别为

$$\text{FIR} = \frac{V_f}{V_s} \quad (7)$$

$$\text{VR} = \frac{V_{ac}}{V_{fc}} \quad (8)$$

式中: V_f 为形成泡沫的体积; V_s 为注入泡沫土体的体积; V_{ac} 为抗黏剂原液体积; V_{fc} 为泡沫剂原液体积。

通过前期试验测试改良剂性能,本次试验改良剂优选为山东宏禹工程科技有限公司的 TecSoil-210NF 新型高性能泡沫剂与 TecSoil-260AC 高分子抗黏剂^[27, 32]。其中 TecSoil-210NF 泡沫剂主要成分为阴离子+非离子表面活性剂,具有较高的配向密度,相比于单一阴离子或非离子表面活性剂构成的泡沫剂,其发泡性能和稳定性能更优。TecSoil-260AC 高分子抗黏剂具有较强的分散作用,对于风化泥岩、粉质黏土的降黏作用明显,且与 TecSoil-210NF 泡沫剂混合使用时还能提升泡沫性能。

在进行改良土体的刀盘旋转黏附试验前对不同浓度的改良剂进行性能测试,测试后发现改良剂浓度为 3% 时,泡沫的发泡倍率与半衰期达到较优值。进一步测试了抗黏剂与泡沫剂组合使用时的发泡性能,发现在 $\text{VR} < 0.2$ 时,抗黏剂会促进泡沫剂的作用,提高发泡倍率,当 $\text{VR} > 0.2$ 时,抗黏剂会对表面活性剂发泡产生一定抑制作用。因此选择浓度 3% 的单独泡沫剂与浓度 3%、 $\text{VR} = 0.2$ 的抗黏剂+泡沫剂两种原液进行发泡,其发泡倍率与半衰期如表 3 所示。设计改良试验组如表 4 所示,开展改良旋转刀盘黏附试验,探究改良剂掺入比对渣土改良效果影响。根据第 3 章试验可知,刀盘温度为 40 °C 时,试验结束后刀盘的黏附量最高,各因素影响规律不随温度变化而改变,因此开展改良试验时设定刀盘温度为 40 °C。

表 3 改良剂性能

Table 3 Conditioner properties

改良剂组合	发泡倍率	半衰期/min
纯泡沫剂	17.4	11.87
泡沫剂+抗黏剂	28.2	12.25

表 4 黏土改良试验因素及水平
Table 4 Test factors and levels of clay improvement

改良试验组	改良剂组合	FIR / %
1	无	0
2	泡沫剂	30
3	泡沫剂	40
4	泡沫剂	50
5	泡沫剂	60
6	泡沫剂	70
7	抗黏剂:泡沫剂=0.2	30
8	抗黏剂:泡沫剂=0.2	40
9	抗黏剂:泡沫剂=0.2	50
10	抗黏剂:泡沫剂=0.2	60
11	抗黏剂:泡沫剂=0.2	70

典型改良土刀盘旋转黏附试验结果如图 15 所示,不同试验组扭矩与黏附量变化如图 16 所示。可以看出,切削原状土体 1 时,黏附力达 $3.07 \text{ N} \cdot \text{m}$,黏附量为 82.34 g ,试验结束后刀盘上黏附了大量黏土,整个刀盘被土体所覆盖。

如图 15 所示,对比改良试验组 1、3 可以看出,使用 $\text{FIR} = 40\%$ 泡沫剂对土样进行改良时,扭矩降低至 $1.63 \text{ N} \cdot \text{m}$,相比于未改良试验组降低 46.7% ,这可能是泡沫充斥于土体内部,增加了土颗粒之间的润滑性,降低掘进时刀盘扭矩,说明经过改良后土体易于掘进,摩擦性明显减小。相比于未改良试验组,使用 $\text{FIR} = 40\%$ 泡沫剂改良时刀盘黏附量降低了 44.9% ,刀盘开口处基本没有堵塞,但刀具间隙仍有明显土体黏附,如图 15(b)所示。这可能是因为泡沫会降低土体的黏聚力与内摩擦角,并且泡沫中的表面活性剂会降低表面张力系数^[33],根据水膜理论,表面张力减小会降低土体的黏附性,因此使用泡沫剂改良会降低土体的黏附性。在 FIR 由 40% 上升至 70% 时,黏附力与黏附量以较慢速度降低,说明增加纯泡沫掺入量不能够继续降低土体黏附性^[33],这也与任文辉等^[31]得到表面活性剂浓度与表面张力变化规律相同。

通过“泡沫剂+抗黏剂”组合改良时,改良效果进一步提高。在使用 $\text{FIR} = 40\%$ 的抗黏剂+泡沫剂进行改良时扭矩降低至 $0.71 \text{ N} \cdot \text{m}$,黏附量降低至 18.36 g ,相比于未改良时黏附力与黏附量分别降低了 76.9% 与 77.7% ,这说明抗黏剂分子可以有效地分散黏土颗粒,并且使得刀盘与土体间的黏附性急剧下降。如图 15(c)所示,加入抗黏剂改良后,刀具间隙与刀盘边缘仅有轻微土体黏附,黏性土改良效果明显,刀具仍满足进一步切削土体的要求。抗黏剂作用机制如图 17 所示^[34],在土颗粒间引入泡沫后,分散后的黏土颗粒被泡沫剂中的表面

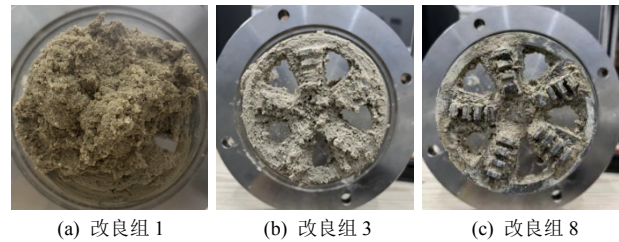


图 15 黏土改良刀盘黏附试验图

Fig.15 Clay conditioning cutter adhesion test chart

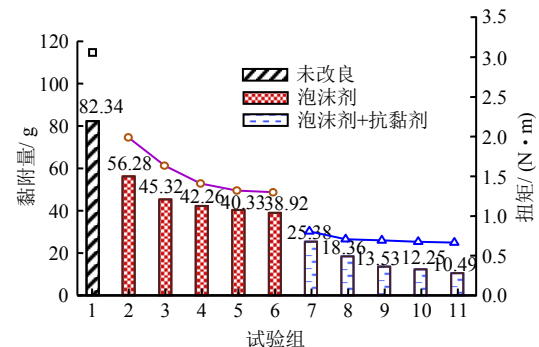


图 16 改良试验组刀盘黏附试验

Fig.16 Adhesion test of cutter head in improved test group

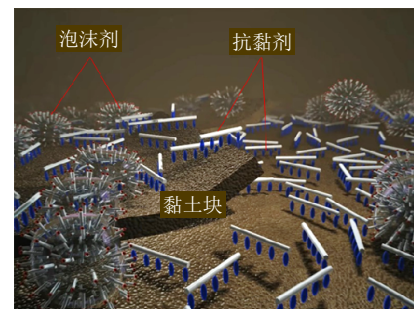


图 17 改良剂作用机制^[34]

Fig.17 Mechanism of conditioner action^[34]

活性剂包裹并形成屏障,促进黏土块与金属表面的滑动,提高了改良渣土的可压缩性、流塑性,抗黏剂向黏土块表面引入高密度负电荷改变黏土表面电荷分布,增加黏土间的排斥力,分散黏土片,从而降低渣土黏聚力,防止黏土块团聚生成泥饼。并且抗黏剂分子能够吸附在黏土块表面,对黏土块起到密封作用,阻止水进入黏土内部,使得黏土块水膜逐渐变厚,进而降低土体的黏附性。

综合改良组试验可以看出,泡沫剂与抗黏剂均对土体的黏附性有着显著的改良作用。当采用 $\text{FIR}=30\%$ 的单独泡沫剂时,黏附量降低了 31.6% ;当 FIR 增长到 50% 时,黏附量降低了 48.7% ;随着 FIR 继续增长,黏附量降低微小。同样在使用 $\text{FIR}=30\%$ 的泡沫剂+抗黏剂时,黏附量降低了 69.1% ;当 FIR 增长到 50% 时,黏附量降低了 83.5% ;随着

FIR 继续增长,黏附量降低不显著。因此使用外加剂对土样 1 进行改良时,FIR=50%可以达到较优的改良效果,当地层黏性较高时,应采用“泡沫剂+抗黏剂”联合改良。

4.2 黏土改良工程应用

长春地铁某区间施工采用土压平衡盾构(earth pressure balance, EPB),盾构的外径为 6.28 m。为保证开挖的土能顺利排出,盾构机刀盘为辐条式设计,刀盘开口率为 40%。隧道右线长 831.7 m,埋深为 11~23 m,隧道最小平面曲线半径为 250 m。盾构区间地质情况复杂,主要通过粉质黏土和风化泥岩地层,如图 18 所示。对土样进行 X 射线衍射测试,分析其矿物成分,粉质黏土中黏性组分(蒙脱石、伊利石和高岭石)占 27%~35%,风化泥岩地层中黏性组分为 36%~45%。

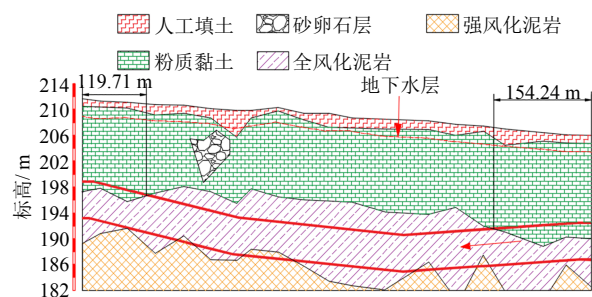


图 18 长春某地铁地质概况图

Fig.18 Geological overview map of a subway in Changchun

盾构掘进参数如图 19 所示,图中各数据点为 10 环的平均参数。隧道前 54 环仅使用泡沫剂作为渣土改良剂。在第 54 环掘进过程中,刀盘扭矩由 3 550 kN·m 急剧下降至 2 200 kN·m,刀盘温度由正常掘进时的 20~25℃上升至 52℃,初步判定刀盘前方发生结泥饼问题,经开仓检测后发现刀盘上形成图 20 的工程现象,盾构机无法继续推进且土仓压力无法保持,这也与第 3 章结论相符,高温结泥饼后会导致旋转扭矩降低。项目调整了渣土改良方案,在泡沫管道和土箱中加入抗黏剂。调整期间,管道保持稳定发泡,土仓浸入抗黏剂 24 h 后,缓慢旋转刀盘,大块土体被顺利排出,解决了刀盘堵塞与土仓压力损失的问题。从第 54 环段完成到施工结束,采用了“泡沫剂+抗黏剂”联合改良方案,54~98 环采用 FIR=70%可以顺利掘进,在 99 环后 FIR 降低至 50%,盾构机掘进参数相对稳定,明显低于初始段,在正常推进段刀头扭矩和推力分别保持在 2 500 kN·m 和 8 800 kN 左右,

扭矩比第 54 环前约低 30%,说明改良方案可以满足盾构施工要求,这也与 4.1 节改良土体规律相符,在 50%注入比下对土体可以达到一个较好的改良效果。盾构改良具体设计方案见表 5。

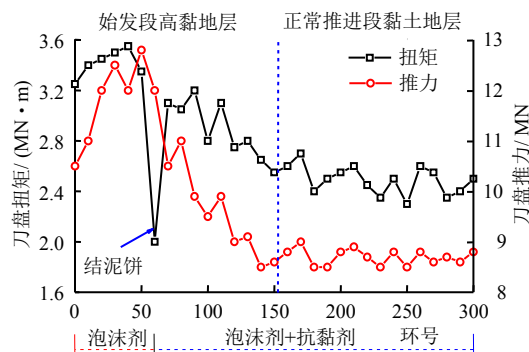


图 19 长春某地铁盾构掘进参数

Fig.19 Shield tunneling parameters for a subway project in Changchun



图 20 土仓堵塞图

Fig.20 Soil silo block diagram

表 5 EPB 盾构施工渣土改良方案

Table 5 EPB shield construction dregs improvement plan

环号	改良剂	注入比
0~47	泡沫剂	FIR=40%
48~54	泡沫剂	FIR=70%
55~98	泡沫剂+抗黏剂	FIR=70%, VR=0.3
99~300	泡沫剂+抗黏剂	FIR=50%, VR=0.2

5 结 论

本文采用自制的刀盘旋转黏附试验系统针对土压平衡盾构掘进过程中刀盘结泥饼、堵塞问题开展了试验,研究了刀盘温度与含水率、黏土类型、黏土含量因素联合作用下旋转扭矩及刀盘黏附效果变化,并分析了不同注入比的泡沫剂与抗黏剂对黏土改良效果,主要结论如下:

(1) 随着温度升高,金属与黏土之间水膜表面张力减小,会使得刀盘旋转扭矩降低,刀盘表面黏附量也逐渐减弱,但温度升高会加速黏土固结,使得土体更快黏附于刀盘表面。

(2) 含水率、黏土含量与黏土成分会影响土体

的黏稠状态与液塑限, 进而影响土体的黏附性能, 含水率 20%、黏土含量 30% 时土体的黏附性最高, 土样的总黏土成分一定时, 随着膨润土所占比例增加, 黏附性会增强。

(3) 稠度指数可以综合表征含水率、黏土含量等因素对于土体黏附性的影响, 稠度指数与土体黏附量成三次函数关系, 稠度指数在 0.5~0.75 区间时土体黏附性最高, 提出了温度及稠度指数共同影响下黏附量变化公式。

(4) 泡沫剂对黏土改良有显著效果, 但在高黏性地层掘进时仅使用泡沫剂改良仍达不到施工要求, 可以考虑用“泡沫剂+抗黏剂”联合改良, 注入比为 50%、配合比为 0.2 时改良效果较优。

参考文献

- [1] 刘博, 徐飞, 赵维刚, 等. 隧道工程结构模型试验系统研究综述与展望[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊1): 452-468.
LIU Bo, XU Fei, ZHAO Wei-gang, et al. Review and prospect of structure research of underwater shield tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.1): 452-468.
- [2] 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 Zhen-ze, WANG Meng-shu, LI Hai-bo, 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.
- [3] 杨益, 李兴高. 盾构刀盘结泥饼问题研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 1030-1038.
YANG Yi, LI Xing-gao. Review on the Issue of clogging occurred in shield tunneling[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2020, 16(Suppl.2): 1030-1038.
- [4] 赵国栋, 姚印彬. 刀盘中心体泥饼成因及其防治对策[J]. 铁道建筑技术, 2017(3): 69-72.
ZHAO Guo-dong, YAO Yin-bin. Reason and solution for mud cake developing of cutting wheel center[J]. **Railway Construction Technology**, 2017(3): 69-72.
- [5] 张亚洲, 闵凡路, 孙涛, 等. 硬塑性黏土地层泥水盾构停机引起的地表塌陷机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1141-1147.
ZHANG Ya-zhou, MIN Fan-lu, SUN Tao, et al. Analysis of causes for ground subsidence induced by slurry shield shutdown in hard plastic clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(4): 1141-1147.
- [6] ZHANG S, XU Q, HU Z M. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China[J]. **Engineering Geology**, 2016, 204: 1-13.
- [7] 钱七虎, 陈健. 大直径盾构掘进风险分析及对特大直径盾构挑战的思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 157-164.
QIAN Qi-hu, CHEN Jian. Analysis of tunneling risks of large-diameter shield and thoughts on its challenges[J]. **Tunnel Construction**, 2021, 41(2): 157-164.
- [8] 门燕青, 王永军, 周建国, 等. 济南复合地层土压平衡盾构掘进效能实测分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 110-119.
MEN Yan-qing, WANG Yong-jun, ZHOU Jian-guo, et al. Measurement and analysis on EPB shield machine tunneling efficiency in Jinan composite stratum[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(8): 110-119.
- [9] 季昌, 周顺华, 姚琦钰, 等. 土压平衡盾构土仓内黏性渣土堵塞的模拟判别与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 60-69.
JI Chang, ZHOU Shun-hua, YAO Qi-yu. Simulative discrimination and analysis of clay muck blockage in earth pressure balance shield chamber[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2022, 50(1): 60-69.
- [10] 谭超. 黏土与盾构刀盘之间黏附特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
TAN Chao. Study on adhesion between clay and shield cutter head[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [11] 袁大军, 毛家骅, 王将, 等. 软岩地层泥水盾构掘进刀盘堵塞现象研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 177-185.
YUAN Da-jun, MAO Jia-hua, WANG Jiang, et al. Study on clogging phenomenon on cutterhead of slurry shield machine tunneling under soft rock[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2022, 35(4): 177-185.
- [12] ZIMNIK A R, BAALEN L, VERHOEF P N W, et al. The adherence of clay to steel surfaces[C]//ISRM International Symposium. Melbourne: [s. n.], 2000.
- [13] THEWES M. Adhesion of clay soil during tunneling with liquid shields[D]. Ruhr Industrial Base: University of Wuppertal, 1999.
- [14] THEWES M, HOLLMANN F. Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 57(8): 122-128.
- [15] HOLLMANN F S, THEWES M. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanised tunnelling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 37(13): 96-106.

- [16] 杨益, 朱文骏, 李兴高, 等. 老黏土地层土压盾构刀盘堵塞渣土改良效果评价方法[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 43-49.
YANG Yi, ZHU Wen-jun, LI Xing-gao, et al. Evaluation method for muck conditioning of hard clay to prevent clogging in EPB tunnelling[J]. **Journal of Beijing Jiaotong University**, 2019, 43(6): 43-49.
- [17] BURBAUM U, SASS I. Physics of adhesion of soils to solid surfaces[J]. **Bulletin of Engineering Geology & the Environment**, 2017, 76(3): 1097-1105.
- [18] 杨益, 谭超, 李兴高. 考虑温度效应的盾构法黏土-金属界面黏附力试验[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(2): 120-125.
YANG Yi, TAN Chao, LI Xing-gao. Experimental on tangential adhesion of the contact surface between clay and shield cutter head considering effect of temperature[J]. **Journal of Civil Engineering and Management**, 2022, 39(2): 120-125.
- [19] OLIVEIRA D, THEWES M, DIEDERICHS M S, et al. Consistency index and its correlation with EPB excavation of mixed clay-sand soils[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2018, 37: 327-345.
- [20] OLIVEIRA D, THEWES M, DIEDERICHS M S, et al. Clogging and flow assessment of cohesive soils for EPB tunnelling: proposed laboratory tests for soil characterisation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2019, 94: 103110.
- [21] BARZEGARI G, TIRKHOONI M, KHABBAZI A. Experimental assessment of clayey layers for clogging of TBM in Tabriz subway lines, Iran[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 105: 103560.
- [22] DAI W, XIA Y M, NING B, et al. Numerical analysis of stress and temperature fields in a composite stratum based on a new method of shield construction for safety and environmental protection[J]. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2020, 17(2): 530.
- [23] JI Z, XIA Y, LAN H, et al. Cutterhead mud-caking detection method and application based on cutter wear and temperature measurement[J]. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, 2019, 13(4): JAMDSM88.
- [24] 王海波, 吕伟华, 武莊, 等. 不同温度应力路径下饱和黏土剪切特性[J]. 岩土力学, 2022, 43(3): 679-687, 707.
WANG Hai-bo, LÜ Wei-hua, WU Zhuang, et al. Shear characteristics of saturated clay under different temperature stress path[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(3): 679-687, 707.
- [25] 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 Shu-ying, LIU Peng-fei, HU Qin-xin. 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.
- [26] SPAGNOLI G, STANJEK H, FEINENDEGEN M, et al. Mineralogical, mechanical, and electrical properties of clays and their relation to clogging during mechanical tunnel driving[C]//Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability. [S. l.]: [s. n.], 2014.
- [27] WAN Z, LI S, YUAN C, et al. Soil conditioning for EPB shield tunneling in silty clay and weathered mudstone[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2021, 21(9): 273656183.
- [28] 刘朋飞, 王树英, 阳军生, 等. 渣土改良剂对黏土液塑限影响及机制分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 91-96.
LIU Peng-fei, WANG Shu-ying, YANG Jun-sheng, et al. Effect of soil conditioner on Atterberg limits of clays and its mechanism[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2018, 50(6): 91-96.
- [29] DJERAN-MAIGRE I, DUBUJET P, VOGEL T M. Variation over time of excavated soil properties treated with surfactants[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2018, 77: 67.
- [30] FOUNTAINE E R. Investigations into the mechanism of soil adhesion[J]. **European Journal of Soil Science**, 1954. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1954.tb02191.x>.
- [31] 任文辉, 林智群, 彭道林. 液体表面张力系数与温度和浓度的关系[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004(1): 77-79.
REN Wen-hui, LIN Zhi-qun, PENG Dao-lin. On the relationship between the liquid surface tension and the temperature and the concentration[J]. **Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)**, 2004(1): 77-79.
- [32] LI S, WAN Z, ZHAO 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.
- [33] LIU P, WANG S, SHI Y, et al. Tangential adhesion strength between clay and steel for various soil softnesses[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2019, 31(5): 04019048.
- [34] LANGMAACK L. Advanced technology of soil conditioning in EPB shield tunnelling[C]//Proceedings of North American Tunneling. [S. l.]: [s. n.], 2000: 525-542.