

# 临海富水砂层盾尾刷更换聚氨酯环试验研究

罗利平<sup>1</sup>, 赵健<sup>2</sup>, 孙恒<sup>3</sup>, 黄新森<sup>3</sup>

(1. 中交二航局成都建设工程有限公司, 四川 成都 610218; 2. 中交(南京)建设有限公司, 江苏 南京 211899;  
3. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要:**在盾构施工中,注浆法更换盾尾刷需要形成封闭且稳定的止水环,包括聚氨酯环和浆液环。本文结合临海富水砂层盾构施工实例,采集原位地下水对聚氨酯初凝时间、发泡倍率、固体强度等进行室内试验,结果表明:亲水型聚氨酯与地下水反应迅速,形成的固结体密实均匀,发泡率不高,且强度较低,疏水型聚氨酯呈相反状态;现场实际注入可考虑二者同时使用,先注入亲水型聚氨酯,后注入疏水型聚氨酯,并按照5:1的用量进行控制。现场应用证明,形成的包裹体稳定且质量较佳。

**关键词:**盾尾刷更换;富水砂层;聚氨酯环;亲水型聚氨酯;疏水型聚氨酯

**中图分类号:**U455.43 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)01-0154-07

## Experimental study on polyurethane ring in the replacement of shield tail brush in water-rich sand strata at the coast

LUO Liping<sup>1</sup>, ZHAO Jian<sup>2</sup>, SUN Heng<sup>3</sup>, HUANG Xinmiao<sup>3</sup>

(1. CCCCSHEC Chengdu Urban Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610218, China;  
2. CCCC Nanjing Construction Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211899, China;  
3. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan Hubei 430040, China)

**Abstract:** In shield tunneling, the method of replacing the shield tail brushes with grouting needs to form a closed and stable water stop ring, including a polyurethane ring and a slurry ring. This paper combines the example of shield tunneling construction in a water-rich sand strata at the coast, collects the in-situ groundwater to conduct indoor test about the polyurethane including the initial setting time, foaming rate, solid strength, etc. The results show that hydrophilic polyurethane reacts rapidly with groundwater, forming a compact and uniform consolidated body with low foaming rate and low strength, while the hydrophobic polyurethane is in the opposite state. Both can be considered to use on site actual injection at the same time, first injecting hydrophilic polyurethane, then injecting hydrophobic polyurethane with the dosage of 5:1. The on-site application proves that the formed inclusions are stable and of good quality.

**Key words:** replacement of shield tail brush; water-rich sand strata; polyurethane ring; hydrophilic polyurethane; hydrophobic polyurethane

## 0 引言

盾尾刷是盾构机与管片之间的密封装置,正常工作时其内部充满油脂,可有效防止地下水、同步砂浆等涌入盾构机内,是盾构机掘进过程中的“生

命线”<sup>[1]</sup>。但由于掘进距离过长、油脂孔布置不合理、油脂品质过低、日常管控不到位等原因,易导致盾尾密封失效而出现漏浆、涌水涌砂等事故<sup>[2-3]</sup>。为保证后续施工安全,此时往往需要停机进行盾尾刷

收稿日期:2023-06-03; 修回日期:2023-06-18 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.01.021

第一作者:罗利平,男,汉族,1986年生,工程师,土木工程专业,长期从事盾构施工技术及管理工作,四川省成都市天府新区汉州路969号中交国际中心31楼,260316631@qq.com。

引用格式:罗利平,赵健,孙恒,等.临海富水砂层盾尾刷更换聚氨酯环试验研究[J].钻探工程,2024,51(1):154-160.

LUO Liping, ZHAO Jian, SUN Heng, et al. Experimental study on polyurethane ring in the replacement of shield tail brush in water-rich sand strata at the coast[J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):154-160.

更换。

目前常用的盾尾刷更换方法包括注浆法和冷冻法两类<sup>[4]</sup>。冷冻法顾名思义是将隧道周围一定范围内的土体冻结形成均匀的冻结帷幕,达到隔水目的。其优点是地层适应性强,冻结体形成后止水效果好,风险程度低。缺点是专业性强,需要专业设备和队伍施工,所耗费成本高,工期较长。这类工法在南京纬三路过江通道<sup>[5]</sup>、庆春路过江隧道<sup>[6]</sup>等工程中均有成功应用。注浆法则是通过管片壁后注浆的方式形成稳定的止水环箍,达到隔水目的。其缺点是地层适应性低,不确定因素较多,主要适用于地下水不发育的粘性土层或岩层。优点在于其操作简单,不需要专业设备和队伍,耗费成本低,工期较短,因此其工程应用广泛,在高压渗透性地层中<sup>[1-3]</sup>也有过少数成功案例。注浆法更换盾尾刷能否形成封闭且稳定的止水环是成败关键。止水环包括聚氨酯环和浆液环,目前关于管片壁后注浆的相关研究较多<sup>[1-17]</sup>,但却鲜有关于聚氨酯环所用材料性能及壁后注酯的系统性研究。

为了弥补现有研究不足,以福州地铁滨海快线第3标段大数据站—滨海新城站区间(简称大一滨区间)注浆法更换盾尾刷实例为研究对象,在正式施工前采集原位地下水进行了一系列聚氨酯室内试验,并对现场注入参数提供相应理论支撑,帮助项目成功在临海富水砂层中完成盾尾刷更换。相关试验结论可为后续工程提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 地层概况

大一滨区间穿越地层主要为<2-4-5>(含泥)粉细砂、<2-4-2>粉质粘土,以及少量的<2-2-1>粉细砂和<2-4-4>(泥质)粉细砂。停机点覆土厚度为14 m,地层为上部<2-2-1>粉细砂、中部<2-4-4>(泥质)粉细砂、下部<2-4-5>(含泥)粉细砂,中部理论水土压为0.24 MPa,地层渗透系数为12 m/d,属于全断面强透水层,具体见图1。

### 1.2 地下水

区间隧道主要受孔隙性潜水的影响,其补给主要靠大气降水,地表水以及地下水层间补给,以径流、补充地下水及蒸发方式排泄。区间隧道距离海边较近,海水入侵造成地下水盐化现象明显,海水的含盐量约2.42%,地下水的含盐量约1.91%,淡水的

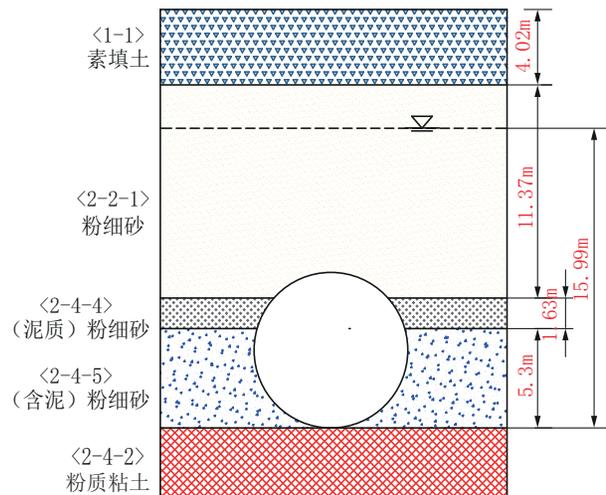


图1 地质断面图

Fig.1 Geological section

含盐量约0.08%,地下水的含盐量约是淡水的24倍。

### 1.3 止水环方案

止水环施作的思路为:盾构机掘进至预定位置后停机。首先对中盾径向孔和脱出盾尾第一环管片预留孔进行聚氨酯注入,防止二次注浆包裹盾体、侵入盾尾,形成第一道“防线”;然后对脱出盾尾后4环管片进行二次注浆,具体见图2。

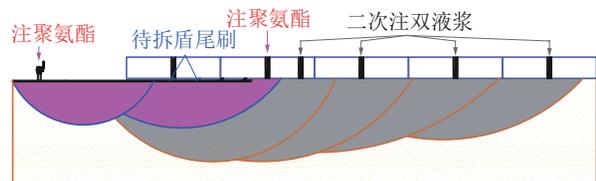


图2 止水环示意

Fig.2 Diagram of water stop ring

## 2 聚氨酯试验

### 2.1 材料基本性能

现场所使用的聚氨酯灌浆材料包括两类,亲水型聚氨酯(编号A-607)和疏水型聚氨酯(编号A-608)。两类材料静置状态下的外观见图3。亲水型呈淡黄色,疏水型呈深褐色。

(1)材料密度:利用波美比重计测量两类材料密度,测得亲水型聚氨酯为 $1.09 \text{ g/cm}^3$ ,疏水型聚氨酯为 $1.21 \text{ g/cm}^3$ ,两者密度相差约11%。

(2)材料粘度:利用旋转粘度计测量两类材料粘度,测得亲水型聚氨酯为 $337 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,疏水型聚

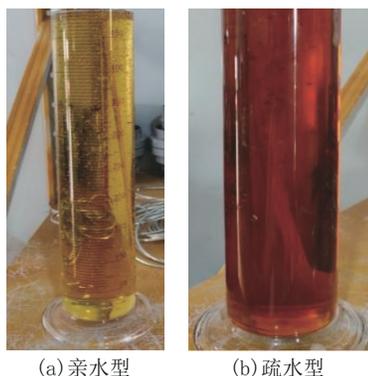


图3 聚氨酯外观对比

Fig.3 Comparison of polyurethane appearance

酯为 861 mPa·s, 疏水型原液的粘度约是亲水型原液的 2.5 倍。表明疏水型原液内摩擦力大于亲水型原液内摩擦力, 在聚氨酯进行注入泵送时, 粘度越大则在相同泵送压力下难度越大。

## 2.2 初凝时间

用天平各称取两种原液 ( $20 \pm 0.1$ ) g 于 500 mL 烧杯中, 加入 100 mL 原位地下水, 记录该时间为  $t_1$ , 并迅速搅拌均匀 (约 10 s) 后静止, 得到乳浊液。之后用玻璃棒不断观察乳浊液变化。当玻璃棒离开液面出现拉丝现象时, 视该试样已凝胶化, 记录该时间为  $t_2$ 。试样的初凝时间即为  $t = t_2 - t_1$ 。

在相同条件下, 亲水型聚氨酯出现拉丝现象时, 时间为 21 s, 完全成为凝胶体的时间为 35 s, 具体见图 4。



图4 亲水型聚氨酯凝固

Fig.4 Solidification of hydrophilic polyurethane

疏水型聚氨酯未出现拉丝现象, 且在 527 s 时固结, 但固结强度偏小, 存在空洞、气泡、残留水等; 在经过 840 s 时固结体整体强度达到较大范围, 手指按压较为困难。具体见图 5。



图5 疏水型聚氨酯凝固

Fig.5 Solidification of hydrophobic polyurethane

通过上述实验可以得出如下结论:

(1) 亲水型聚氨酯遇水搅拌后凝胶时间较短, 且烧杯内无残余水残留, 水与聚氨酯反应完全, 反应完全后的固结体整体密实度较高, 质地均匀。

(2) 疏水型聚氨酯在遇水搅拌后聚氨酯颗粒液逐渐向上反应生成类似于钟乳石样的柱状固体, 且反应过程中出现发热、气体等现象。在疏水型聚氨酯灌浆材料反应完全后聚氨酯固结体内出现较多的空洞、气泡等, 且部分空洞内还残留未完全反应的水。

(3) 疏水型聚氨酯的凝固时间约是亲水型聚氨酯的 15 倍。

## 2.3 发泡倍率及固结体强度

### 2.3.1 发泡率

针对于亲水型聚氨酯, 在标准试验条件下, 用天平称取试样 ( $50 \pm 0.1$ ) g 于带刻度的 500 mL 干燥容器中, 计算试样体积数  $V_1$ 。加入 100 mL 水, 并迅速搅拌均匀 (约 10 s)。待发泡结束后, 再加水至 500 mL 刻度, 记录第二次加水的体积数  $V_2$ 。则试样的遇水自由发泡率  $S = (500 - V_1 - V_2) \times 100 / V_1$ 。本次实验中第二次加水体积  $V_2 = 270$  mL, 则可得亲水型聚氨酯灌浆材料的发泡率约为 402%。

针对于疏水型聚氨酯, 在标准试验条件下, 用天平称取试样 ( $25 \pm 0.1$ ) g 于带刻度的 1000 mL 干燥容器中, 计算试样体积数  $V_1$ 。搅拌均匀 (约 30 s), 再加入 (1~2) mL 水, 并迅速搅拌均匀至乳白色时停止搅拌 (约 10 s)。待停止发泡后, 再加水至 1000 mL 刻度, 记录第二次加水的体积数  $V_2$ 。则试样的遇水自由发泡率  $S = (1000 - V_1 - V_2) \times 100 / V_1$ 。本次实验中第二次加水体积  $V_2 = 550$  mL, 则可得疏水型聚氨

酯灌浆材料的发泡率为 2078%。

由上述可知, 疏水型聚氨酯遇水发泡率明显高于亲水型聚氨酯, 两者相差约 5 倍左右。

将亲水型聚氨酯和疏水型聚氨酯按照 5:1 的用量配比进行试验, 为保证亲水型聚氨酯与疏水型聚氨酯反应完全, 可将水的用量适当加大。试验过程为先在烧杯中注入 200 mL 水, 然后注入 50 mL 亲水型聚氨酯, 充分搅拌后再注入 10 mL 的疏水型聚氨酯。充分反应后, 分别记录 10 min、24 h 后的状态, 见图 6。从图 6 可以看出, 两者混合后形成的固结体均匀, 无空洞, 未出现明显的分散颗粒等分离体, 水体整体保持清澈状态, 水体表面无浮渣等分离物。

### 2.3.2 固结体强度

通过对上诉反应后的两种聚氨酯固结体进行强

度测试, 切取同样大小的圆饼状固结体, 具体见图 7。亲水型聚氨酯固结体手指按压易碎, 整体呈现果冻状凝胶体, 无强度; 疏水型聚氨酯固结体手指按压困难, 整体呈现泡沫状硬胶体状态, 强度较高。



(a) 亲水型聚氨酯 (b) 疏水型聚氨酯

图 7 聚氨酯固结体强度判断

Fig.7 Strength judgment of polyurethane consolidated body



(a) 10min状态 (b) 24h状态

图 6 混合后的固结体状态

Fig.6 Consolidated state after mixing

### 2.4 含盐量影响

为了模拟聚氨酯注入到地层后的反应情况, 将两类聚氨酯分别与含砂地下水、含砂淡水、地下水调配的膨润土浆液和淡水调配的膨润土浆液进行对比试验。具体试验参数及反应状态见表 1 和表 2。

通过分析表 1 和表 2 中的试验结果, 可以得到如下结论:

- (1) 聚氨酯与水反应的开始时间以及各阶段成型状态与水的类型无明显关联;
- (2) 地层中含砂量的多少直接影响疏水型聚氨酯 10 min 的强度, 但最终成型强度不受影响;

表 1 聚氨酯与含砂淡水及地下水反应试验

Table 1 Reaction test of polyurethane with sand-bearing fresh water and sand-bearing groundwater

序号	聚氨酯	含量/g	水类型	砂含量/g	开始反应时间/s	10 min 成型状态	24 h 成型状态
1	A607	90		100	21	果冻状, 弹性, 发泡不明显	与 10 min 成型状态无区别
2	A608	90		100	69	硬塑状, 强度高, 发泡明显	体积增大明显, 强度高, 底部无水
3	A607	90	淡水	75	21	果冻状, 弹性, 发泡不明显	与 10 min 成型状态无区别
4	A608	90	300 g	75	60	硬塑状, 强度较高, 发泡明显	体积增大明显, 强度高, 底部少量水
5	A607	90		60	19	果冻状, 弹性, 发泡不明显	与 10 min 成型状态无区别
6	A608	90		60	50	硬塑状, 强度一般, 发泡明显	体积增大明显, 强度高, 底部较多水
7	A607	90		100	20	果冻状, 弹性, 发泡不明显	与 10 min 成型状态无区别
8	A608	90		100	68	硬塑状, 强度高, 发泡明显	体积增大明显, 强度高, 底部无水
9	A607	90	地下水	75	19	果冻状, 弹性, 发泡不明显	与 10 min 成型状态无区别
10	A608	90	300 g	75	61	硬塑状, 强度较高, 发泡明显	体积增大明显, 强度高, 底部少量水
11	A607	90		60	20	果冻状, 弹性, 发泡不明显	与 10 min 成型状态无区别
12	A608	90		60	52	硬塑状, 强度一般, 发泡明显	体积增大明显, 强度高, 底部较多水

表2 聚氨酯与不同配比浆液反应试验

Table 2 Reaction test of polyurethane with different proportions of slurry

序号	聚氨酯	含量/g	膨润土浆液	掺料含量/g	开始反应时间/s	10 min成型状态	24 h成型状态
1	A607	90		300	44	果冻状,弹性,发泡不明显	与10 min成型状态无区别
2	A608	90		300	144	硬塑状,强度高,发泡明显	体积增大明显,强度高,底部有余水
3	A607	30	淡水制(膨水	300	40	果冻状,弹性,发泡不明显	与10 min成型状态无区别
4	A608	30	比1:18)	300	130	强度一般,发泡较明显	体积增大不明显,强度高,底部有余水
5	A607	30		100	35	果冻状,弹性,发泡不明显	与10 min成型状态无区别
6	A608	30		100	90	强度一般,发泡较明显	体积增大不明显,强度高,底部无余水
7	A607	90		300	45	果冻状,弹性,发泡不明显	与10 min成型状态无区别
8	A608	90		300	142	硬塑状,强度高,发泡明显	体积增大明显,强度高,底部有余水
9	A607	30	地下水制(膨	300	42	果冻状,弹性,发泡不明显	与10 min成型状态无区别
10	A608	30	水比1:18)	300	128	强度一般,发泡较明显	体积增大不明显,强度高,底部有余水
11	A607	30		100	38	果冻状,弹性,发泡不明显	与10 min成型状态无区别
12	A608	30		100	91	强度一般,发泡较明显	体积增大不明显,强度高,底部无余水

(3)亲水型聚氨酯的开始反应时间受水量影响较小,疏水型聚氨酯的开始反应时间受水量影响较大,水含量越多,开始反应时间越长;

(4)无论是泥浆环境还是含砂地层环境中,亲水型聚氨酯的膨胀和发泡效果受外界影响较小,疏水型聚氨酯的发泡效果和底部有无余水受外界影响较大,但24 h成型状态的强度不受影响;

(5)将膨润土环境与与含砂地层环境进行纵向对比,可以看出在相同含量下,含砂地层环境的开始反应时间明显缩短,说明粒径偏大的砂粒相比于膨润土粉粒,有助于缩短聚氨酯的反应时间。

### 3 工程应用

#### 3.1 注入理念

按照上述试验结果,对于现场实际聚氨酯注入建议为:

(1)亲水型聚氨酯与水反应形成的固结体整体密实度较高,质地均匀,但强度不高,容易被地下水冲散;疏水型聚氨酯与水反应形成的固结体存在空洞,气泡及残留水等,但整体强度较高,在地下水冲刷下不易破坏,因此实际注入可考虑两者同时使用,以形成强度较高且稳定的外壳。

(2)亲水型聚氨酯与水的反应时间较短,开始反应时间受水量影响较小;疏水型聚氨酯与水的反应时间较长,开始反应时间受水量影响较大。考虑到全断面富水砂层中地下水含量较大,可先注入亲

水型聚氨酯与地下水反应,吸收大部分地下水后,再注入疏水型聚氨酯,将剩余地下水完全反应。

(3)考虑疏水型聚氨酯遇水发泡率高于亲水型聚氨酯约5倍,现场实际注入时,单孔可按照亲水型:疏水型=5:1的用量进行控制。

#### 3.2 施工工艺

(1)止水环施工总体流程:先施工聚氨酯环,再施工浆液环,最后进行止水效果检测,达标后即可进行盾尾刷更换。

(2)聚氨酯环施工流程:先对中盾12个径向孔注入聚氨酯,注入点位由下至上依次注入;单孔按照先注亲水型聚氨酯10~15桶,后注疏水性聚氨酯2~3桶进行用量控制。中盾注入完毕后,随即对脱出盾尾第一环管片19个预留孔注入聚氨酯,注入顺序和注入方式与中盾类似。

(3)浆液环施工流程:待聚氨酯环施工完毕后,随即对脱出盾尾后4环管片开孔进行二次注浆。注入点位由下至上、由后至前依次注入,单环成环后再进行下一环注入。浆液类型为水泥-水玻璃双液浆,其中水灰比0.8:1,水泥浆与水玻璃体积比1:1,初凝时间控制在45~60 s。

(4)止水效果检测:待聚氨酯环和浆液环均施工完毕后,用电钻由下至上打穿脱出盾尾第一环管片19个预留孔进行止水效果检测,当所有孔位检测均无水渗漏后,说明止水效果良好,可以进行盾尾刷更换,若打开孔位有明显渗漏水,则重新补做止水环。

### 3.3 检测结果分析

按照聚氨酯注入理念,大一滨区间对中盾12个径向孔和脱出盾尾第一环管片19个预留孔共计31个孔位进行了聚氨酯注入。聚氨酯环施工完毕后,随机选取了8个孔位进行取芯检查,深度为打穿至地层20 cm,观察20 cm范围内各部分占比,具体如图8所示。

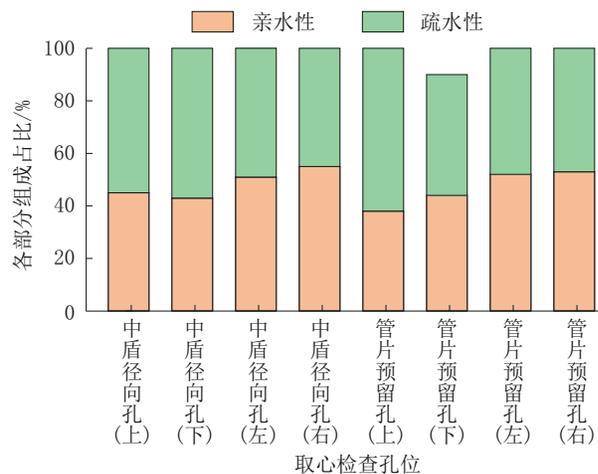


图8 取芯检查结果

Fig.8 Core inspection results

从图8可知,所形成的聚氨酯环约50%为亲水型聚氨酯固结体,主要赋存于环内侧,并夹杂少量砂;约1/2为疏水型聚氨酯固结体,主要赋存于环外侧,夹砂现象明显。取芯检查期间孔内无渗漏水现象,表明所形成的聚氨酯环包裹体外径超过20 cm,包裹范围较大,且质量较稳定,可满足现场要求。

### 4 结论与建议

(1)在全断面富水砂层中采用注浆法更换盾尾刷,需要根据盾尾刷更换点的地层特性、地下水情况、现场物资材料等开展室内试验,可为后续止水环施工提供技术保障。

(2)亲水型聚氨酯与地下水反应迅速且完全,形成的固结体整体密实且均匀,但发泡率不高,且强度较低,在地下水流动过快的情况下存在被冲散的可能性;疏水型聚氨酯与地下水反应时间较长且不完全,形成的固结体有较多的空洞、气泡以及残留水,但发泡率较高,且强度较高,在地下水冲刷下不易破坏,疏水型聚氨酯遇水发泡率高于亲水型聚氨酯约5倍。

(3)地下水的含盐量对于聚氨酯的反应时间及成型状态影响可忽略不计,亲水型聚氨酯受地层变量影响较小,疏水性型聚氨酯受地层变量影响较大。

(4)在实际注入过程中,根据两种聚氨酯的特性,可考虑两者同时使用,单孔可先注亲水型聚氨酯,后注疏水型聚氨酯,并按照亲水型:疏水型=5:1的用量控制。

### 参考文献(References):

- [1] 施瑾伟,杨钊,杨擎,等.注浆止水技术在高水压强渗透地层盾尾刷更换施工中的应用[J].现代隧道技术,2015,52(4):190-194.  
SHI Jinwei, YANG Zhao, YANG Qing, et al. Application of grouting and water-blocking techniques to the replacement of shield tail seal brushes in a permeable strata with high water pressure[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015,52(4):190-194.
- [2] 李家洋,鞠义成.浅覆土高水压强透水地层注浆法更换盾尾刷技术[J].隧道建设,2015(S2):108-114.  
LI Jiayang, JU Yicheng. Method of replacing shield tail brushes under high water pressure and shallow highly-permeable cover: Case study on Weisanlu Yangtze River crossing tunnel in Nanjing [J]. Tunnel Construction, 2015,(S2):108-114.
- [3] 赵峰峰.富水粉砂地层盾构机尾刷更换技术[J].公路交通技术,2018,34(S1):171-176.  
ZHAO Fengfeng. The replacement technology of tail brush in water-rich silty sand strata [J]. Technology of Highway and Transport, 2018,34(S1):171-176.
- [4] 袁立斌,蔡超君,张飞雷.冷冻钢管片法更换盾尾刷技术的应用与研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(11):264-267.  
YUAN Libin, CAI Chaojun, ZHANG Feilei. Application and research of replacing shield tail brush by freezing steel pipe slice method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2020, 16(11):264-267.
- [5] 姚梦威,杨平,张英明,等.南京纬三路过江通道液氮冻结盾尾刷更换技术及温度实测研究[J].现代隧道技术,2018,55(3):186-192.  
YAO Mengwei, YANG Ping, ZHANG Yingming, et al. Temperature measurements and tail brush replacement using frozen liquid nitrogen for the Nanjing Weisanlu Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018,55(3):186-192.
- [6] 陈驰,杨平.高水压大直径过江隧道盾尾渗漏防治研究[J].林业工程学报,2021,6(1):155-162.  
CHEN Chi, YANG Ping. Study on the prevention and control for shield tail leakage of large-diameter river-crossing tunnel at high hydraulic pressure [J]. Journal of Forestry Engineering, 2021,6(1):155-162.

- [7] 张迪. 水底大型泥水盾构盾尾密封失效的应对技术[J]. 铁道建筑技术, 2011(5): 1-6.  
ZHANG Di. Countermeasures for failure of tail sealing of large underwater slurry shield[J]. Railway Construction Technology, 2011(5): 1-6.
- [8] 郑杰. 盾构掘进过程中盾尾刷更换技术及保护措施[J]. 建筑施工, 2018, 40(1): 106-108.  
ZHENG Jie. Shield tail brush replacement technology and protective measures during shield tunneling[J]. Building Construction, 2018, 40(1): 106-108.
- [9] 杜建华, 彭彦彬, 杜立峰, 等. 盾构掘进施工中盾构机盾尾密封更换关键技术研究[J]. 铁道建筑, 2007(3): 47-48.  
DU Jianhua, PENG Yanbin, DU Lifeng, et al. Research on key technology of shield tail seal replacement in shield tunneling[J]. Railway Engineering, 2007(3): 47-48.
- [10] 魏林春. 盾尾钢丝刷受力性能模拟试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 206-211.  
WEI Linchun. Experimental study on mechanical behavior of wire brushes on shield tail[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 206-211.
- [11] 邵高波. 富水砂卵石地层盾尾刷更换技术[J]. 铁道建筑技术, 2015(7): 6-10.  
SHAO Gaobo. Replacement technology of shield tail brush in water rich sandy pebble stratum [J]. Railway Construction Technology, 2015(7): 6-10.
- [12] 陶云超. 海瑞克盾构机盾尾刷更换技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2018(3): 77-80.  
TAO Yunchao. Research on replacement technology of shield tail brush of herrick shield machine [J]. Railway Construction Technology, 2018(3): 77-80.
- [13] 王永贵. 冷冻法更换盾尾刷技术[J]. 建筑机械化, 2019, 40(6): 64-66.  
WANG Yonggui. Technology of replacing shield tail brush by freezing method[J]. Construction Mechanization, 2019, 40(6): 64-66.
- [14] 赵新合, 陈馈. 钱塘江底承压水层盾尾刷改造及更换技术[J]. 建筑机械化, 2010, 31(8): 66-68, 77.  
ZHAO Xinhe, CHEN Kui. Modification and replacement technology of shield tail brush in Qiantang River bottom confined water layer[J]. Construction Mechanization, 2010, 31(8): 66-68, 77.
- [15] 李勇成, 张志鹏. 强透水地层下更换盾尾密封刷技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(4): 80-81.  
LI Yongcheng, ZHANG Zhipeng. Technology of replacing shield tail sealing brush under strong water permeable ground [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(4): 80-81.
- [16] 孙恒, 黄新淼, 马超, 等. 泥水盾构泥浆泵选型关键参数规律性研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(4): 144-151.  
SUN Heng, HUANG Xinmiao, MA Chao, et al. Regularity of the key parameters for slurry shield mud pump selection[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(4): 144-151.
- [17] 温良涛. 软弱富水砂层地质条件下土压平衡盾构接收施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(6): 88-93.  
WEN Liangtao. Receiving process for earth pressure balanced shield in soft water rich sand formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(6): 88-93.

(编辑 王文)