

DOI: 10.11779/CJGE20211464

盾尾刷环形密封系统单元试验及水密性机制研究

钟小春¹, 莫暖娇², 余明学^{*1}, 竺维彬², 朱能文³, 游智¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510220; 3. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 盾构法已经成为了城市地铁隧道建设的主流施工法, 由于盾尾刷密封效果不佳导致的漏水、漏浆等重大安全责任事故屡屡发生。通过建立盾尾刷-油脂腔密封系统密封单元试验装置, 探讨油脂稠度、油脂压力、盾尾间隙对其水密性能的影响。试验结果表明: ①根据油脂锥入度不同, 盾尾密封渗漏出现两种模式: 锥入度低时渗漏物为外界泥水, 锥入度高时渗漏物为外界泥水与油脂混合物。为提高盾尾密封性能, 油脂锥入应控制 180~200(1/10 mm)范围内。②盾尾渗漏临界压力可由油脂压力、贴合力确定, 略微小于油脂压力, 因此工程中设定油脂压力比盾尾空隙中泥水或注浆液压力大 0.5 MPa 是合理的。③盾尾渗漏临界压力受油脂压力影响更大些, 但盾尾刷贴合力则影响油脂逃逸和油脂压力的稳定, 因此盾构掘进过程中加强盾尾刷和密封系统的管理以避免砂浆侵入导致盾尾刷失去弹性引起的密封失效。研究成果可为盾尾密封系统的设计和施工管理提供参考。

关键词: 盾尾刷; 油脂; 单元试验; 水密性; 渗漏临界压力

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)02-0354-08

作者简介: 钟小春(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事盾构技术研究与教学工作。E-mail: 58206947@qq.com。

Unit tests on shield tail brush annular sealing system and its watertightness mechanism

ZHONG Xiaochun¹, MO Nuanjiao², YU Mingxue¹, ZHU Weibin², ZHU Nengwen³, YOU Zhi¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510220, China; 3. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: The shield tunnelling method has become the mainstream construction one for urban subway tunnels. Due to the poor sealing effects of shield tail brushes, many severe safety accidents such as water and slurry leakage occur frequently. The influences of grease consistency, grease pressure and shield tail clearance on the watertightness performance are discussed by setting up the sealing unit test devices for the shield tail brush-grease chamber. The test results show that: (1) According to the different grease cone penetrations, there are two modes of shield tail sealing leakage. One is that the leakage material is the external slurry at low cone penetration, and the other is that the leakage material is the external slurry and grease mixture at high cone penetration. In order to improve the shield tail sealing performance, the grease cone penetration should be controlled within the range of 180~200 (1/10 mm). (2) The critical leakage pressure of the shield tail can be determined by the grease pressure and adhesion force, which is slightly smaller than the grease pressure. Therefore, it is reasonable to set the grease pressure 0.5 MPa higher than the slurry pressure in shield tail clearance during shield tunneling. (3) The critical leakage pressure of the shield tail is more affected by the grease pressure, but the adhesion force of the shield tail brush affects the grease escape and grease pressure stability. Hence, the management of the shield tail brush and sealing system during shield tunnelling should be strengthened to avoid the tail sealing failure, which is caused by the loss of elasticity of the shield tail brush due to mortar intrusion. The research results may provide reference for the design and construction management of the shield tail sealing system.

Key words: shield tail brush; grease; unit test; watertightness; critical leakage pressure

0 引言

盾构机由于具备安全、快捷、适应性广特点而被广泛使用^[1-5], 盾构法已经成为了中国城市隧道建设的

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178387)

收稿日期: 2021-12-09

*通信作者 (E-mail: 309819821@qq.com)

主流施工方法。

于盾尾内部进行管片拼装, 在管片环外壁与盾尾盾壳之间存在一道环形空隙, 该空隙由3~4道环形密封刷和盾尾拼装管片环组成2~3个环形密封腔, 通过向密封油脂腔中注入盾尾油脂密封, 能有效防止水、泥浆等流进盾构内部^[6]。目前盾尾渗漏引发的工程事故^[7]时有发生。在成都轨道交通17号线TJ09标盾构区间中, 由于未及时调整油脂泵注脂速率, 盾尾刷内的油脂量和注入油脂的压力不够, 导致密封效果减弱, 形成大面积的漏浆现象, 带来了很大的安全隐患^[8]。在佛山轨道交通2号线一期工程(湖涌站—绿岛湖站)区间粉细砂地层土压平衡盾构停机拼装管片时, 盾体后部俯仰角开始增大盾尾出现下沉, 与此同时盾尾内刚拼装好的第1块管片(A2块)右侧(约盾尾6点钟位置)附近突发向上冒浆, 经过紧急抛填砂袋等抢险措施仍未奏效, 最终导致盾尾若干管片环突然失稳坍塌涌出的大量泥砂流推动盾构机台车向后滑冲700余m, 部分逃生人员被击倒或掩埋^[9-11]。可见, 盾尾密封出现问题对盾构隧道掘进安全的危害极大, 是盾构掘进安全控制的关键之一。

目前, 由于盾尾密封系统引起的重大安全责任事故频发, 已经引起工程界和学术界广泛关注。夏清华等^[12]基于呼和浩特市城市轨道交通2号线探讨了盾构机盾尾密封结构的保护措施, 提出了施工时油脂的选用和盾尾间隙的控制, 但并没有给出具体的指标。李光等^[13]基于多相流数值模拟, 分析出盾尾油脂腔压力分布规律和水侵入的流动规律, 但并没有探讨盾构姿态、盾尾密封关键参数(油脂稠度、盾尾间距)对密封性能的影响。高振峰^[14]依据油脂耐水压特性建立盾尾密封二维数值模型, 得到单点的渗透过程, 并不能反映整个盾尾环形密封整个环形腔空间维度的渗漏状况。廖少明等^[15]基于地下渗流基本方程, 采用有限差分法对江底隧道盾构施工过程中产生的周边渗透力进行了分析, 得出盾尾密封如果有透水, 则盾构就处于水头产生较大变化的范围内容易出现快速的泥砂流事故。饶竹红等^[16]基于流体动力学分析软件, 分析了油脂在水密性装置中的流动特性, 但并没有深入研究油脂在尾刷腔内的充填流动规律。钟波等^[17]通过建立环形盾尾刷的三维有限元模型, 对盾尾刷在不同间隙的不同压力下的工作性能进行了有限元分析, 并没有结合盾尾油脂对盾尾环形密封系统的整体密封性能进行客观评价。钭婧^[18]基于计算流体力学方法研究了正常状态与泄露状态下盾尾密封油脂腔的压力分布与力学特性, 并对盾尾密封系统进行优化。

从以上分析可以看出, 目前的研究主要基于工程实践或者多相流初步数值模拟探讨了盾尾密封系统的

密封性能, 但还没有研制盾尾刷-油脂腔单元体试验设备来开展盾尾密封系统的水密性机制方面的研究工作。本文建立了盾尾刷-油脂腔密封系统渗漏单元体试验, 开展了不同油脂稠度、油脂压力、盾尾间隙下的盾尾刷-油脂腔密封性能试验, 揭示了盾尾刷-油脂腔渗漏影响因素及水密性机制, 给出了盾尾密封渗漏压力的计算公式。

1 盾尾刷-油脂腔密封系统单元试验

整个盾尾密封系统结构尺寸较大, 且室内试验场地条件、材料消耗、可操作性所限, 进行大比例尺的模型试验代价较大, 且不可控因素多。工程中3~4道盾尾油脂腔有助于增加盾尾密封安全富余, 但在地下水或盾尾浆液作用下的密封机制与单道盾尾油脂腔是一样的。为此, 可对盾尾刷-油脂腔密封系统模型试验进行如下简化: 两道盾尾刷所形成的一个油脂腔构成盾尾密封系统的一个单元体, 每道盾尾刷由2块盾尾刷并排拼装而成, 模拟盾尾刷在外部地下水或盾尾浆液作用下渗漏情况。

1.1 模型试验装置

大量工程实践证明, 盾尾刷-油脂腔密封系统是关系到盾构掘进安全的关键因素之一。设计并研制了可以模拟盾尾刷-油脂腔密封及油脂泵送和高压水泵送的试验装置, 如图1所示。该装置由密封油脂注入系统、盾尾刷密封系统和注水系统构成, 通过注入一定压力的油脂, 并不断加大水压力可测试盾尾密封系统密封效果。

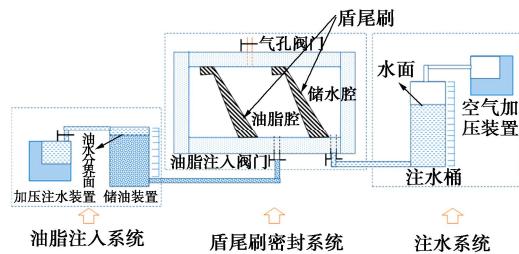


图1 盾尾密封系统渗漏试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of leakage test devices for shield tail sealing system

盾尾刷密封系统的结构由顶板、底板、侧板和前板组成一个封闭的长方体结构。设计多组不同高度的侧板, 通过换装不同高度的侧板来模拟不同盾尾间隙的工况。装置各部分组件之间设计有凹槽便于各部件定位与密封安装, 盾尾刷-油脂腔密封系统的试验装置如图2所示。

根据盾尾密封油脂泵送性的研究^[19], 试验自主设计的油脂注入系统由4DSY型电动试压泵机、油脂桶

(带刻度)、注油管、储水桶、注水管及压力表几大部分构成, 试验中通过试压泵向油脂桶里注入一定压力的水将油脂通过注油管压进油脂腔, 并保持一定的油脂压力, 油脂腔油脂注入系统装置如图 3 所示。通过油脂桶内油水分界面随时间下降的速率来评价油脂逃逸量和逃逸速率。这种注入油脂的方式简化了实际工程中的泵送方式, 便于室内试验操作。但需要注意的是油脂注入泵提供的压力同油脂腔内的油脂压力存在一定的差值, 即油脂在注油脂桶及管道内因黏滞阻力导致的沿程损耗压力。通过观察集水柱内水面的下降速率来判定水经过盾尾刷-油脂腔密封系统的渗漏速率。

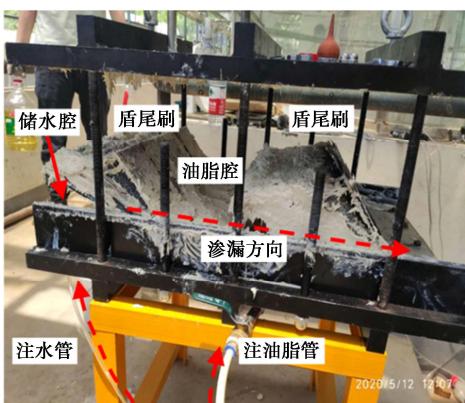


图 2 盾尾刷-油脂腔密封单元试验装置

Fig. 2 Sealing unit test devices for shield tail brush-grease chamber

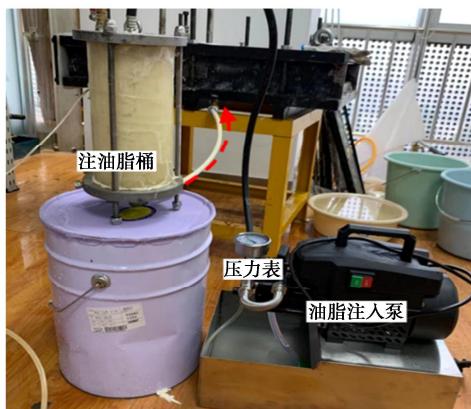


图 3 密封油脂注入系统

Fig. 3 Injection system of sealing grease

1.2 试验步骤

在盾尾刷密封系统、油脂注入系统和注水系统调试完毕后, 按照以下工作流程开展盾尾刷-油脂腔-油脂密封系统渗漏试验。

(1) 在盾尾刷内的钢丝层及盾尾刷侧面上涂上手涂保护油脂, 然后将 4 块盾尾刷按照 2×2 排列方式通过螺母固定在设备底板上, 形成两道平行的盾尾刷。

(2) 将橡胶密封条放入侧板凹槽内并通过硅胶将其固定, 然后安装侧板, 确保接触面的密封完好。

(3) 在盾尾刷和侧板安装好之后, 往两道盾尾刷之间的油脂腔装填密封油脂腔填充油脂, 装填时要注意油脂充填要均匀压实。随后借助于螺杆的定位, 将顶板对位安装好, 形成封闭的油脂腔。

(4) 安装储水腔侧的前板, 端板和侧板、上盖底板之间通过硅胶垫密封, 确保注水后水不从板与板的搭接缝隙处发生渗漏。

(5) 在油脂注入系统的储油桶(注脂油桶)中装填油脂腔密封油脂, 并将表面压平同时上部预留少部分空间以供注水进入。随后启动试压泵, 当油脂从气孔里冒出来时表面油脂腔内油脂已填满。封闭气孔, 继续注入油脂保持一定的压力。

(6) 注入油脂的同时, 调试注水系统并向储水腔内注水, 与注入油脂类似, 当气孔出水后表明储水腔内水已满, 封闭气孔, 继续注水加压, 调节至试验所需要的压力。

(7) 通过试压泵和稳压计分别调节不同油脂压力和水压的工况, 观察并记录储油桶中油水分界面的下降速率和集水桶内液面的下降速率。同时注意观察盾尾刷-油脂腔-油脂模拟系统的渗漏情况。

(8) 当水压加载超过某一压力值时, 盾尾刷-油脂腔-油脂模拟系统发生大量渗漏, 水已击穿此工况下的密封系统, 停止试验, 打开油脂腔, 观察油脂内部渗漏通道分布情况。然后再将油脂重新回填压实, 进行下一组试验。

在试验准备、装置组装时为满足试验中注入 1 MPa 水压的要求, 因此装置的板与板搭接处的密封闭水是一个棘手难题。本试验使用了硅胶垫片、密封胶、手涂油脂, 取得了理想效果。在仪器的注水侧的前板和箱身接触处加了一层密封硅胶垫片, 并涂上一周密封胶, 如图 4, 在盾尾刷和箱体侧板接触处采用先涂一层手涂油脂, 再加一层密封硅胶垫片压紧的办法。

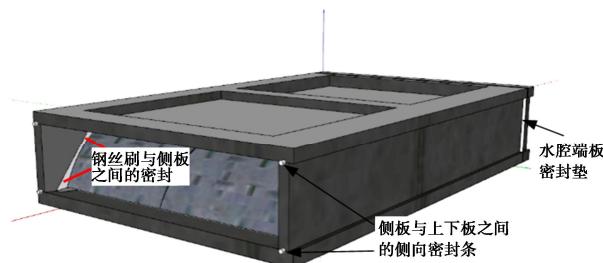


图 4 盾尾刷单元体试验密封方式

Fig. 4 Sealing methods for shield tail brush unit tests

每组试验完成后, 要打开油脂腔并检测压实油脂, 特别注意将试验过程中在油脂内部形成的渗水通道进

行填充压实, 避免对下组试验的结果产生影响。

2 水密性试验结果及分析

2.1 油脂稠度对密封性的影响

在保持盾尾间隙 95 mm 和油脂腔中压力保持 0.5 MPa 下, 试验了 3 种不同稠度油脂^[20], 加载不同的水压情况下, 统计水量渗漏速率和观察渗漏情况。油脂按润滑脂稠度等级分类标准^[21], 分别为#4、#4、#3, 如表 1 所示。

表 1 3 种盾尾油脂的性质

Table 1 Properties of three kinds of shield tail grease

油脂类型	油脂锥入度(0.1 mm)	油脂稠度等级
油脂 A	175.2	#4
油脂 B	203.5	#4
油脂 C	220.0	#3

试验发现, 锥入度较低的油脂, 流动性较差, 在油脂腔内形成的油脂压力可能存在一定程度不均, 无法完全密实地封堵盾尾刷与油脂腔内的微细缝隙, 易形成水流的渗漏通道, 进入盾尾的水较为清澈, 如图 5 (a) 所示。锥入度较高的油脂, 流动性相对较好, 在油脂腔内能形成均匀稳定的油脂压力, 不易形成稳定的水通道, 渗漏时渗漏进入盾尾内部为水和油脂的混合物, 呈混沌状态, 如图 5 (b) 所示。



(a) 清水渗漏



(b) 油脂和水混合渗漏

图 5 盾尾密封击穿类型

Fig. 5 Breakdown types of shield tail sealing

若进一步调低油脂的稠度, 根据油脂 C 渗漏试验中油脂逃逸速率的统计^[22], 油脂逃逸速率会过大, 油脂消耗量偏大, 对于保持油脂腔内的油脂压力也是不利的。3 组试验中 3 种不同油脂对盾尾刷油脂腔密封系统渗漏试验结果见图 6。

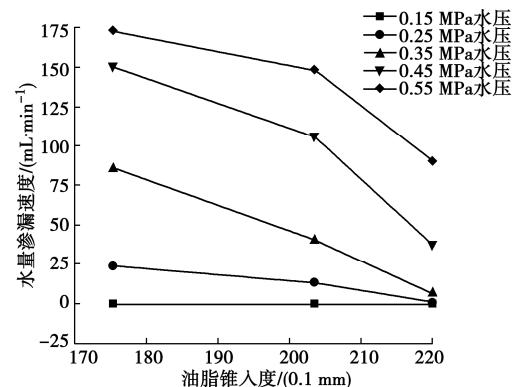


图 6 不同锥入度油脂对水的渗漏速率的影响

Fig. 6 Influences of different greases on water leakage rate

2.2 油脂压力对密封性的影响

在油脂腔内注满 C 油脂, 在油脂腔内不同油脂压力下的工况下, 加载不同水压时的渗漏速率见图 7。

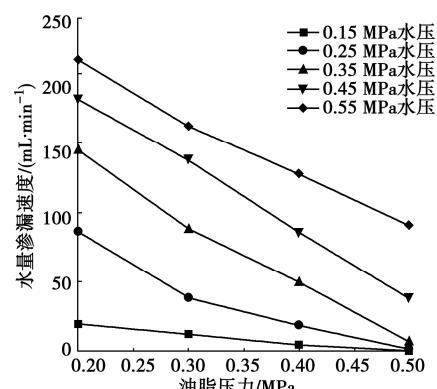


图 7 不同油脂压力状态下的渗漏速率

Fig. 7 Water leakage rates under different grease pressures

试验中可以发现, 在同一水压下, 油脂压力越大, 水量渗漏速率越小。在控制一定的油脂压力状态下, 水压从 0 开始缓慢提高的过程中, 水的渗漏速率一开始增长缓慢, 随着水压力进一步增大, 渗漏速率也逐渐增大, 如图 8 所示。

实际工程中, 地铁盾构直径 6.28 m 盾尾环周长相当于 50 个本单元体试验装置宽度, 假定水量渗透速率在 2500 mL/min 以下, 认为密封系统良好。则本试验将水的渗漏速率恰好达到 50 mL/min 时的水压作为致使密封系统失效的临界水压, 以 σ_{cr} 表示。

不同油脂压力下, 致使盾尾刷油脂腔密封失效的临界水压值见表 2。

可以看出, 当油脂压力保持一定值时, 渗漏临界

压力要略小于该值,考虑到实际工程中盾尾间隙不断变化、盾尾刷弹性损失等复杂因素,油脂注入压力应大于地层水砂和注浆的压力,保证一定的安全富余系数。这也是工程实际中盾尾油脂的压力一般等于盾尾空隙中壁后注浆压力或泥水压力加0.5 MPa原因。

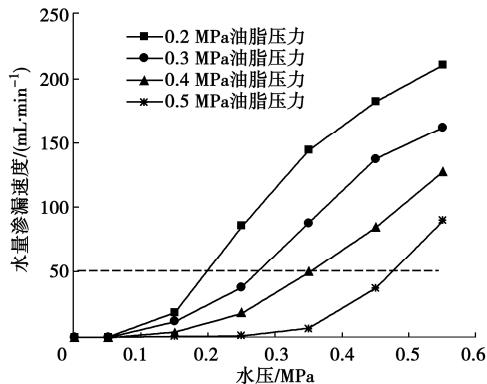


图8 不同水压状态下水的渗漏速率

Fig. 8 Water leakage rates under different water pressures

表2 不同油脂压力下渗漏临界水压 (油脂C)

Table 2 Critical leakage pressures under different grease pressures (Grease C)

序号	油脂压力/MPa	临界水压/MPa
1	0.2	0.18
2	0.3	0.27
3	0.4	0.35
4	0.5	0.47

2.3 盾尾间隙对密封性的影响

工程实践中,由于盾构机姿态、管片拼装误差、注浆等影响,盾尾间隙在盾构推进过程中是处于变化状态的。本试验中上下板之间的净距,相当于实际工程中盾尾外径与管片之间的距离,设置了3种盾尾间隙的工况:95, 75, 55 mm。分别在每一种工况中注入不同压力的油脂和水。不同油脂压力工况下,水量渗漏临界压力随盾尾间隙变化情况见图9。盾尾间隙越小,盾尾刷保护板与上板(管片)贴合的越紧,水的临界渗透压力越大,盾尾刷-油脂腔密封系统的抗渗能力越强;盾尾间隙变大时,水的临界渗透压力会有一定程度的减小,抗渗能力降低。

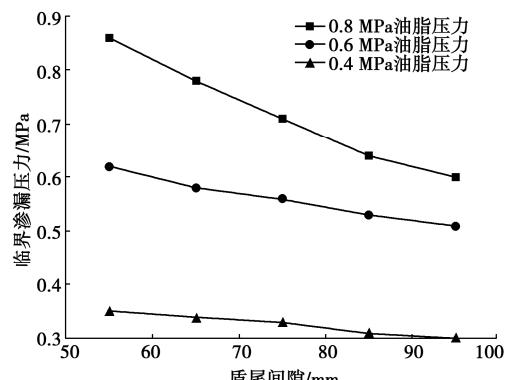


图9 不同盾尾间隙下的临界渗漏压力

Fig. 9 Critical leakage forces under different shield tail clearances

3 盾尾刷-油脂腔密封系统渗漏机制探讨

3.1 渗漏模式

试验中发生的渗漏模式主要是两种:一是只有水的渗漏,此时水流比较清澈,另一种是水和油脂的混合物同时流出的现象,此时水呈现比较浑浊的现象。

3.2 渗漏力学分析

忽略盾尾刷在压缩过程中前后钢板曲率变化的差异,建立盾尾刷-油脂腔密封系统的受力简化计算模型,如图10所示。在盾尾密封系统工作时,盾尾刷受到来自盾壳和管片环之间的挤压力 $F_{\text{贴合}}$,以及来自地下水和盾尾空隙同步注浆的外部压力 $\sigma_{\text{水}}$ 和油脂腔内油脂压力 $\sigma_{\text{油脂}}$ 三者共同作用下处于一种稳定平衡状态,达到良好的密封性。

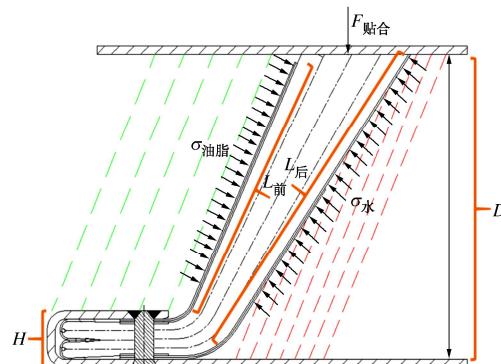


图10 盾尾密封受力计算模型

Fig. 10 Force model for performance of shield tail sealing

根据图10计算模型,考虑到保护板和管片贴合处油脂逃逸等因素的影响,引入折减系数 K ,得出油脂压力、外部压力及盾尾刷贴合力三者之间的力学关系为

$$\sigma_{\text{水}} L_{\text{后}} \cos \varphi_2 = K \cdot (\sigma_{\text{油脂}} L_{\text{前}} \cos \varphi_1 + F_{\text{贴合}} / B) \quad (1)$$

根据几何关系,进一步简化该计算公式为

$$\sigma_{\text{水}} \cdot \sqrt{L_{\text{后}}^2 - D^2} = K \cdot (\sigma_{\text{油脂}} \cdot \sqrt{L_{\text{前}}^2 - D^2} + F_{\text{贴合}} / B) \quad (2)$$

式中: $\sigma_{\text{油脂}}$, $\sigma_{\text{水}}$ 分别为油脂压力、泥水及注浆压力(kPa); $L_{\text{前}}$, $L_{\text{后}}$ 分别为前板长度、后板长度(m); φ_1 , φ_2 分别为前板角度、后板角度(°); B 为盾尾刷钢板宽度(m); D 为盾尾间隙(m); K 为折减系数。

根据不同盾尾间隙对应的 $F_{\text{贴合}}$ 值和盾尾刷-油脂腔-油脂密封系统模型试验结果中不同 $\sigma_{\text{油脂}}$ 对应的临界渗漏压力,得出油脂C发生渗漏时的临界状态对应的 K_{cr} ,随盾尾间隙变化的取值范围如图11所示。可以看出,折减系数 K_{cr} 随盾尾间隙增大而减小,表明盾尾间隙越大,盾尾刷和管片之间的贴合力越小,油

脂腔内的油脂更容易发生逃逸, 在外部水压力的渗透下油脂腔内部形成渗水通道, 逐渐击穿盾尾密封系统。依据本试验所用盾尾刷尺寸的计算结果, 油脂 C 对应的 K_{cr} 取值范围为 0.66~0.87。

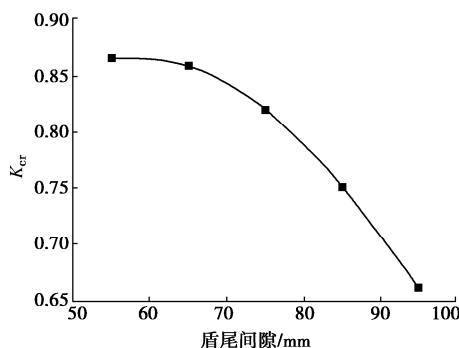


图 11 K_{cr} 值随盾尾间隙变化规律

Fig. 11 Variation of K_{cr} value with shield tail clearance

随着油脂稠度增大, 油脂逃逸可能性降低, 在相同贴合力作用下, 增大了油脂抵抗外部水压的击穿能力。从图 12 中可以看出, 不同盾尾间隙下的 K_{cr} 随着油脂锥入度的变化曲线接近平行曲线, 油脂锥入度 (1/10) 从 220 mm 减少到 175 mm 时, 油脂腔击穿压力折减系数 K_{cr} 增加了 6%~7%。这说明在满足油脂泵送要求的前提下, 适度减少油脂的锥入度有助于提高油脂腔被外界水、砂浆击穿的能力。

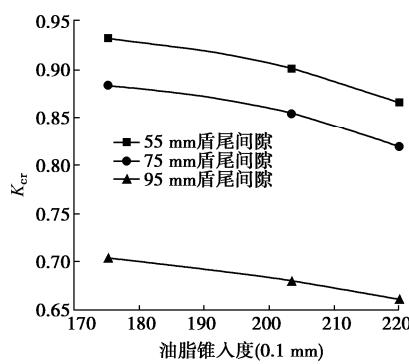


图 12 K_{cr} 值随油脂锥入度变化规律

Fig. 12 Variation of K_{cr} value with greace cone penetration

3.3 相关性分析

泥水和注浆压力 $\sigma_{\text{水}}$ 、油脂压力 $\sigma_{\text{油脂}}$ 和盾尾刷贴合力 $F_{\text{贴合}}$ 都有关, 为了更清晰油脂压力和贴合力各自的贡献情况, 将式 (1), (2) 进一步简化, 可得

$$\sigma_{\text{水}} = K_1 \sigma_{\text{油脂}} + K_2 F_{\text{贴合}}, \quad (3)$$

$$K_1 = K_{cr} \sqrt{L_{\text{前}}^2 - (D - H)^2} / \sqrt{L_{\text{后}}^2 - (D - H)^2}, \quad (4)$$

$$K_2 = K_{cr} \left(B \sqrt{L_{\text{后}}^2 - (D - H)^2} \right)^{-1}. \quad (5)$$

式中: K_1 为油脂压力影响系数; K_2 为盾尾刷贴合力影响系数。

可以看出, 系数 K_1 , K_2 的取值与盾尾刷的钢板尺

寸、盾尾间隙及折减系数 K_{cr} 有关, 由式 (3) ~ (5) 可以计算出 K_1 , K_2 。通常盾尾间隙变化范围为 55~105 mm, K_1 取值与盾尾间隙 D 的关系如图 13 所示, K_2 与盾尾间隙 D 的关系如图 14 所示。从图 14 中可以看出, K_1 取值范围为 0.6~0.7 mm⁻², K_2 取值范围为 0.025~0.028 mm⁻², 从中可以看出, 油脂压力影响系数 K_1 对盾尾密封临界渗漏压力影响更大。

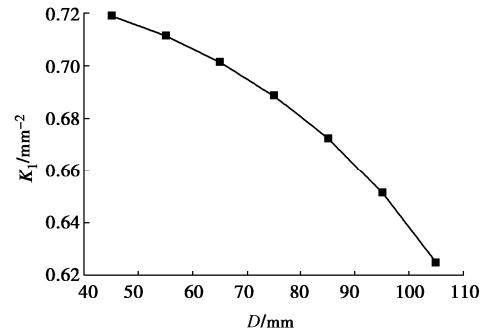


图 13 K_1 取值与盾尾间隙 D 的关系

Fig. 13 Relationship between K_1 and shield tail clearance D

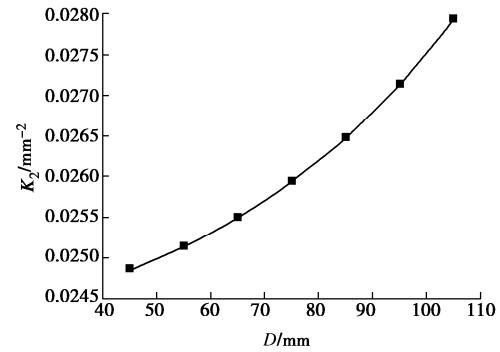


图 14 K_2 取值与盾尾间隙 D 的关系

Fig. 14 Relationship between K_2 and shield tail clearance D

最终得到盾尾刷-油脂腔-油脂密封系统的临界渗漏压力同盾尾间隙和油脂压力的关系如图 15 所示。从图 15 中进一步证实了盾尾密封临界渗漏压力受油脂压力的影响更大。

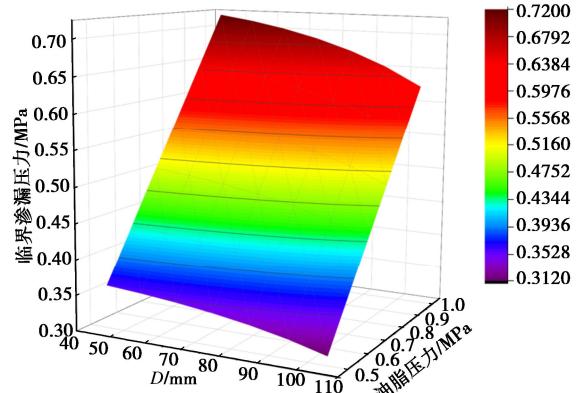


图 15 临界渗漏压力与盾尾间隙、油脂压力关系 (油脂 C)

Fig. 15 Relationship among critical leakage pressure, shield tail clearance and grease pressure (Grease C)

从以上的分析可以看出, 似乎盾尾临界渗漏压力

主要受油脂压力的影响,与盾尾刷的贴合力关系不大。其实不然,油脂腔中的油脂压力维持依赖于盾尾刷贴合力才能防止其发生逃逸和保持油脂压力的稳定。对于弹性性能良好的盾尾刷,盾尾间隙在较小范围的波动时盾尾临界渗漏压力能够较好地保持稳定。

根据现场盾尾刷失效情况来看,盾尾刷非正常磨损导致盾尾密封失效情形居多。从图 16 中可以看出,盾尾空隙中的管片壁后注浆液进入盾尾刷导致盾尾刷硬化失去弹性是盾尾刷失效主要影响因素。因此,实际工程中应从盾尾刷保护和油脂泵送两方面维护盾尾密封系统确保处于正常工作状态。



图 16 砂浆侵入盾尾刷引起密封失效

Fig. 16 Sealing failure caused by mortar intrusion into shield tail brush

4 结 论

在盾构施工过程中,盾尾被盾尾空隙中泥水和砂浆击穿严重影响整个盾构掘进安全。本文通过自主设计研制的模拟盾尾密封系统的试验装置,开展了一系列盾尾刷-油脂腔-密封系统渗漏模型试验,分析了不同油脂稠度、不同油脂压力、不同盾尾间隙等影响因素下的盾尾渗漏速率变化规律,结合工程实践提出了试验中临界渗漏压力的判断标准,并结合盾尾刷弹塑性性能的研究结果,分析了盾尾密封渗漏的发生条件和发展过程,得出了以下 5 点结论。

(1) 建立了由 2 道盾尾刷与上下盖板和左右侧板形成的油脂腔,并在其中注入油脂组成了盾尾密封系统单元试验装置,开展了盾尾渗漏压力的影响因素试验。试验中应注意各部件之间的密封防水,否则影响试验成果精度。

(2) 盾尾密封渗漏类型主要分为两种:当油脂锥入度适当,油脂难以被外部压力挤出,表现为外部水或砂浆击穿盾尾密封系统,渗漏进盾尾的为清水;当油脂锥入度较大时,外部水或砂浆击穿盾尾密封系统,将和油脂腔中的油脂一起漏出,渗漏进盾尾的为水、泥砂和油脂混合物。

(3) 推导了盾尾密封临界渗漏压力计算公式,其值由油脂压力、贴合力和折减系数 K_{cr} 确定。折减系数主要受盾尾间隙和油脂锥入度的影响,盾尾间隙 55 mm 时 K_{cr} 为 0.89~0.93, 盾尾间隙 75 mm 时 K_{cr}

为 0.82~0.87, 盾尾间隙 95 mm 时 K_{cr} 为 0.66~0.71。

(4) 盾尾密封系统水密性主要是由盾尾油脂压力决定的,其所能承受水压力略微小于或接近油脂压力,而油脂压力的维持则主要由盾尾刷的贴合力和弹性性能维持。盾尾刷贴合力和弹性性能影响最大的因素为砂浆侵入盾尾刷后硬化导致的,因此应该加强油脂泵送管理,确保油脂压力大于外界盾尾空隙注浆压力。

(5) 通常情况下,油脂设定压力大于盾尾空隙中的泥水压力、注浆压力 0.5 MPa,需要考虑盾尾空隙注浆压力和盾尾间隙在盾构掘进过程中都存在一定程度的波动,需要一定的盾尾密封防渗富余量以确保盾尾密封系统水密性。

由于本文建立的是盾尾密封系统的单元试验,无法考虑真实工程中砂浆侵入、姿态变化、盾尾刷磨损等因素对水密性的影响。为了更好地指导盾尾密封设计,在以后的研究中将对盾尾密封系统进行水-油脂两相流下的水密性数值模拟分析探讨水是如何击穿 3, 4 道油脂腔盾尾密封系统的。

参考文献:

- [1] 杨 梅. 盾构机盾尾刷设计及更换技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(9): 63-67. (YANG Mei. Research on design and replacement technology of shield tail brush of shield machine[J]. Railway Construction Technology, 2021(9): 63-67. (in Chinese))
- [2] 朱 伟, 陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望(第 3 讲): 盾构隧道应用前景及发展方向[J]. 岩土工程界, 2002(1): 18-20, 52. (ZHU Wei, CHEN Renjun. Present situation and prospect of shield tunnel construction technology (Lecture 3)-Application prospect and development direction of shield tunnel[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 2002(1): 18-20, 52. (in Chinese))
- [3] 白 云, 丁忠诚, 刘千伟. 隧道掘进机施工技术[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (BAI Yun, DING Zhicheng, LIU Qianwei. Tunnel Boring Machine Construction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [4] WU B, DENG Z, HUANG W. Risk assessment of water penetration for shield tunnel construction in coastal area[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(4): 042116.
- [5] 黄宏伟, 朱 琳, 谢雄耀. 上海地铁 11 号线关键节点工可阶段工程风险评估[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1103-1107. (HUANG Hongwei, ZHU Lin, XIE Xiongyao. Risk assessment on engineering feasibility of key events in Shanghai

- metro line No. 11[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(7): 1103-1107. (in Chinese))
- [6] 李艳春. 盾构法隧道施工中盾尾刷的优化与保护[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2015, **24**(3): 33-34. (LI Yanchun. Shield tunneling optimization and protection shield tail brush[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2015, **24**(3): 33-34. (in Chinese))
- [7] 郑刚, 崔涛, 程雪松, 等. 某地铁区间盾构法施工隧道事故实例与分析[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 2): 132-135. (ZHENG Gang, CUI Tao, CHENG Xuesong, et al. Introduction and analysis of an accident in a shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S2): 132-135. (in Chinese))
- [8] 程鹏飞, 李嘉骏. 成都富水砂卵地层中盾尾漏水漏浆的控制及处理措施[J]. 居业, 2020, **12**(2): 103-104. (CHENG Pengfei, LI Jiajun. Control and treatment measures of water leakage and slurry leakage at shield tail in Chengdu water-rich sand-egg stratum[J]. Create Living, 2020, **12**(2): 103-104. (in Chinese))
- [9] 胡家亮, 杨彩香, 王颖. 广东佛山地铁二号线岩土工程勘察分析[J]. 矿产勘查, 2019, **10**(12): 3016-3022. (HU Jialiang, YANG Caixiang, WANG Ying. Investigation and analysis on geotechnical engineering of Foshan Metro Line 2, Guangdong[J]. Mineral Exploration, 2019, **10**(12): 3016-3022. (in Chinese))
- [10] YU C, ZHOU A N, CHEN J, et al. Analysis of a tunnel failure caused by leakage of the shield tail seal system[J]. Underground Space, 2020, **5**(2): 105-114.
- [11] 任广艳. 透水涌砂冒险堵漏 隧道坍塌撤人不及: 广东省佛山市轨道交通 2 号线“2.7”透水坍塌重大事故分析[J]. 吉林劳动保护, 2019(8): 40-42. (REN Guangyan. Water-permeable sand flooding risks plugging tunnel collapse, and people can't escape—analysis of “2.7” water-permeable collapse of Foshan Rail Transit Line 2 in Guangdong Province[J]. Jilin Labour Protection, 2019(8): 40-42. (in Chinese))
- [12] 夏清华. 盾构施工盾尾密封渗漏风险源分析及应对策略[J]. 中外建筑, 2019(1): 200-201. (XIA Qinghua. Risk source analysis and countermeasures for leakage of shield seal of shield construction[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2019(1): 200-201. (in Chinese))
- [13] LI G, WANG N. Sealing performance of shield tail sealing system based on multiphase flow numerical simulation[J]. Tunnel Construction, 2021, **41**(S1): 490-496.
- [14] 高振峰. 高水压下盾尾密封油脂耐水压密封性评价及影响因素研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (GAO Zhenfeng. Evaluation of Water-Tightness of Shield Tail Grease under High Water Pressure and Its Influencing Factors Analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [15] 廖少明, 余炎, 程致高. 盾尾密封对盾构周边渗流场及正面稳定的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, **36**(2): 172-177, 192. (LIAO Shaoming, YU Yan, CHENG Zhigao. Effect of shield sealing on stability of workface and seepage field around shield[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, **36**(2): 172-177, 192. (in Chinese))
- [16] 饶竹红, 刘建国. 盾尾密封油脂水密性测试设备数值模拟分析[J]. 隧道与轨道交通, 2017(S1): 37-43. (RAO Zhuhong, LIU Jianguo. Numerical simulation analysis of water tightness test equipment for tail seal grease[J]. Tunnels and Rail Transit, 2017(S1): 37-43. (in Chinese))
- [17] 钟波, 张光辉, 魏林春. 盾构盾尾金属刷有限元分析[J]. 建材世界, 2018, **39**(3): 79-81. (ZHONG Bo, ZHANG Guanghui, WEI Linchun. Finite element analysis of shield tail metal brush[J]. The World of Building Materials, 2018, **39**(3): 79-81. (in Chinese))
- [18] 钱婧. 盾构机盾尾密封系统压力分布特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021. (TOU Jing. Study on Pressure Distribution Characteristics of Shield Tail Sealing System of Shield Machine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese))
- [19] 王德乾, 宋世雄, 程晋国, 等. 盾尾密封油脂泵送性测试仪器、测试方法与评价标准研究[J]. 隧道建设, 2017, **37**(3): 303-306. (WANG Deqian, SONG Shixiong, CHENG Jinguo, et al. Study of test devices, methods and evaluation criteria for pumpability of shield tail sealing grease[J]. Tunnel Construction, 2017, **37**(3): 303-306. (in Chinese))
- [20] ZHANG J, WANG Y W, WANG J M, et al. Primary research on preparation and properties of shield tail sealing grease[C]// Proceedings of the 2017 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017). Zhuhai, 2017.
- [21] 润滑脂和石油脂锥入度测定法: GB/T 269—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991. (Lubricating Grease and Petrolatum—Determination of Cone Penetration: GB/T 269—1991[S]. Beijing: Standards Press of China, 1991. (in Chinese))
- [22] 孙金鑫. 盾尾刷密封系统油脂逃逸研究[D]. 南京: 河海大学, 2020. (SUN Jinxin. Study on Grease Escape of Shield Tail Brush Sealing System[D]. Nanjing: Hohai University, 2020. (in Chinese))