

盾尾密封系统防水失效影响因素试验研究

蒋沛峰

(中铁十七局集团第四工程有限公司, 401121, 重庆)

摘要 [目的] 盾尾密封失效是盾构施工过程中的高风险因素, 盾尾密封性能严重影响施工安全和施工进度。目前相关研究尚未阐明盾尾密封系统防水机理, 因此需对盾尾密封系统防水失效影响因素进行针对性研究。[方法] 以盾尾密封系统为研究对象, 自主设计盾尾密封系统防水失效试验测试方法及试验装置, 对盾尾密封系统防水失效特性及其重要影响因素进行研究。[结果及结论] 盾尾密封系统防水失效时, 渗流通道附近的油脂会发生乳化现象; 盾尾间隙、盾尾刷刷丝长度等参数对盾尾密封防水失效的影响显著, 为保证 0.6 MPa 的正向设计防水压力, 当选用盾尾刷刷丝长度分别为 175、200、275、300 mm 时, 建议盾尾间隙的上限值分别不大于 30.0、34.3、37.6、48.8 mm; 当设计盾尾间隙分别为 30、40、50 mm 及以上时, 建议选用的盾尾刷刷丝长度分别不小于 175、275、300 mm。

关键词 城市轨道交通; 盾构机; 盾尾防水; 密封油脂; 盾尾刷; 盾尾间隙

中图分类号 U455.3⁺9

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.04.045

Experimental Study on Factors Affecting Waterproof Failure of Shield Tail Sealing System

JIANG Peifeng
(China Railway No. 17 Bureau Group No. 4 Engineering Co., Ltd., 401121, Chongqing, China)

Abstract [Objective] Shield tail seal failure is a high risk factor in shield construction process, and shield tail sealing performance seriously affects construction safety and construction schedule. At present, the waterproof mechanism of the shield tail seal system has not yet been clarified in relevant researches, so it is necessary to conduct targeted research on the factors affecting the failure of the shield tail seal system. [Method] Taking the shield tail sealing system as the research object, the test method and equipment for its waterproof failure test are independently designed. Waterproof failure characteristics of the shield tail sealing system and its important influencing factors are studied. [Result & Conclusion] When the waterproof function of shield tail sealing system fails, the grease near the seepage channel will emulsify; shield tail clearance, shield tail brush wire length and other parameters all

have a significant impact on the waterproof failure of shield tail seal. To ensure the positive design waterproof pressure of 0.6 MPa, when the shield tail brush wire length is selected to be 175, 200, 275, and 300 mm, respectively, it is recommended that the upper limits of the shield tail clearance should not be greater than 30.0, 34.3, 37.6, and 48.8 mm, respectively; when the design shield tail clearance is 30, 40, 50 mm and above, it is recommended that the selected shield tail brush wire length is not less than 175, 275, 300 mm, respectively.

Key words urban rail transit; shield machine; shield tail waterproof; sealing grease; shield tail brush; shield tail clearance

近年来,越来越多的跨江跨海隧道采用盾构法施工,面对更深水域、更高水压的施工环境,对盾尾密封系统的密封防水性能提出了更高的要求^[1-2]。为了防止外部泥浆、地下水等杂物通过盾尾间隙进入盾构机内部,通常设置由盾尾油脂和盾尾刷两部分构成的盾尾密封系统^[3]。由于盾构施工的环境条件越来越苛刻,导致盾尾防水失效事故时有发生,造成了严重后果,因此亟需厘清盾尾密封系统在不同工作环境的防水失效机制。

大量研究表明,盾尾油脂的性能是影响密封系统防水效果的关键因素。文献[4]分析了中国、日本、法国的3种不同盾尾油脂的性能检测结果,认为盾尾油脂质量对盾尾密封系统防水效果有着重要影响。文献[5]分析了多种油脂的泵送性、稠度及耐水压密封性,发现油脂黏度和耐压性能与防水效果密切相关。文献[6]设计了油脂耐水压动态检测试验装置。文献[7]设计了盾尾密封系统长方形单元体试验装置,对盾尾油脂的逃逸压力、逃逸速度、泄漏判据等进行了研究。文献[8]的研究则聚焦于高压环境下油脂的防水性能,设计了动态检测装置以模拟盾构的实际施工环境,评估了油脂在不同条件下的密封效果。文献[9]基于 Fluent 软件构建了三维盾尾模型,分析了盾尾油脂腔压力分布规律。综上,盾尾油脂、盾尾刷及盾尾间隙量等因素

对盾尾密封系统的防水密封性能的影响显著,但当前研究对盾尾密封系统在不同盾尾间隙下的防水失效机理尚未厘清,并缺乏有效的试验测试方法。

对于盾构密封系统密封刷的结构和材料特性等其他方面的影响,现已有许多学者采用模型试验及数值模拟的方法进行研究。文献[10]设计了模型试验并结合计算流体力学模拟,分析了密封刷道数和油脂黏度等因素对防水性能的影响。文献[11]开发了多孔介质分析方法,将刷式密封简化为多孔介质,进而分析刷式密封系统的流动特性,文献[12]对多孔介质模型进行了改进。文献[13]基于 Fluent 软件进行二维数值模拟,分析了流动过程。文献[14]研究发现盾构机掘进过程中会发生设计轴线偏离,这会导致盾尾间隙量动态变化。

综上所述,虽然已有大量研究关注盾尾密封系统的油脂配方、密封刷结构及其流体特性,但对高水压环境下油脂参数、盾尾间隙动态变化等因素的综合影响仍需进一步探究。基于此,本文设计了一套盾尾密封系统防水性能测试装置,深入分析油脂参数、盾尾间隙和刷丝长度等对防水性能的影响,为盾尾密封系统的优化提供数据支撑和设计参考。

1 试验装置

为了便于研究高水压的击穿过程,在油脂和盾尾刷消耗量较少的情况下开展盾尾密封系统防水性能试验研究,本试验将实际工程中盾尾密封系统简化为一块盾尾刷宽度(200 mm)的单元体区域,并将其作为研究对象。盾尾密封系统防水性能试验装置(见图 1)主要由盾尾模拟装置和配套仪器构成,配套仪器包括盾尾油脂加注设备、模拟水压设备、姿态调节设备和数据监测设备,该试验装置可以模拟并检测盾尾密封系统的实际工程状况。

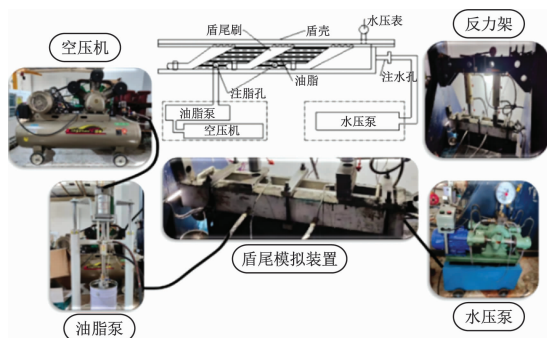


图 1 盾尾密封系统模型试验装置

Fig. 1 Shield tail sealing system model test equipment

盾尾密封系统模拟装置是整套装置的关键组件,由上盖板和凹箱构成,两组件通过密封防水垫和橡胶圈紧密结合形成一套密封试验箱。通过在密封试验箱内安装盾尾刷及注入填充油脂形成完善的盾尾密封防水系统,抵抗外界高压水体。试验装置长为 1 200 mm,宽为 200 mm,高为 130 mm,钢板厚度为 15 mm,满足 1.0 MPa 压力下不发生明显变形的要求。在盾尾密封防水模拟装置底板、侧板和上盖板上布置多处螺栓孔,底部安装不同间距和数量的盾尾刷,侧边和顶部的螺栓孔用于安装油脂泵管和油压传感器,如图 2 所示。密封防水措施为:在上盖板和底槽的间隙布置一圈橡胶密封垫;对装置接缝处加注刚性密封胶,密封胶凝固后再封一层混凝土;在底槽两侧钢板上加装钢丝条,以减少缝隙。击穿判别条件为:观察到装置尾部出现油脂和水的流出即视为装置被击穿。

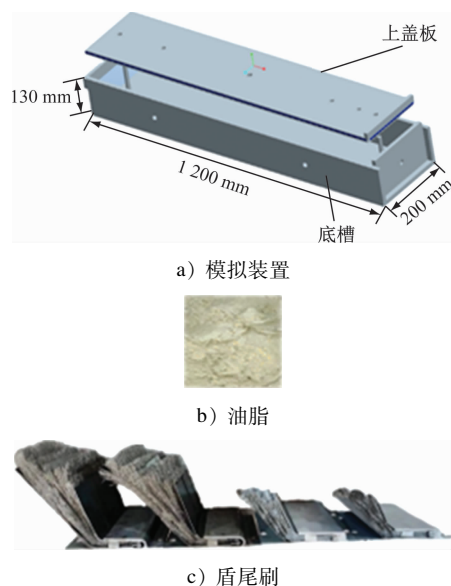


图 2 盾尾密封装置及主要成分

Fig. 2 Main components of shield tail sealing device

2 盾尾失效测试方法及油脂材料

盾尾密封系统正向防水失效试验具体过程为:安装盾尾刷,连接仪器;油脂腔加压至 50 kPa,然后保压;提升水压至 50 kPa,观察泄漏情况;以 10 kPa 为单位交替提升油压和水压,至油脂腔充满;然后以 50 kPa 为单位提升水压,直至防水失效;记录压力传感器数据;关闭空压力,拆卸仪器,清理油脂;改变工况,重复试验。正向防水失效效果如图 3 所示。

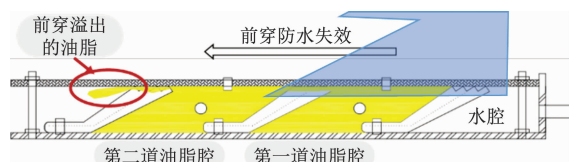


图3 正向防水失效示意图

Fig.3 Schematic diagram of waterproof failure in forward direction

本文将分析4种油脂与盾尾密封系统防水性能之间的关系,其主要参数如表1所示。

表1 不同油脂性能参数

Tab.1 Performance parameters of different greases

油脂种类	屈服剪切应力/Pa	泵送性/(g/min)	锥入度/mm	耐水压密封性/s	正向防水失效压力/MPa
A	1 326.112	13.54	20.0	23.5	0.70
B	904.176	34.81	23.5	10.3	0.55
C	1 201.248	35.57	25.3	6.7	0.50
D	607.941	82.24	27.8	2.0	0.40

在实际试验过程中发现,在逐级加压到临界高压后,水和部分油脂中的某些成分形成的乳化油脂从后端被挤压出来,伴有微量水滴流出。同时,在油脂渗流通道的乳化油脂被逐渐排出后,开始形成小股水流。在水压侵入油脂腔的过程中,高压水和部分油脂相互冲击接触,两者混合改变了油脂内部的结构和稠度,形成水流渗漏通道,如图4所示。

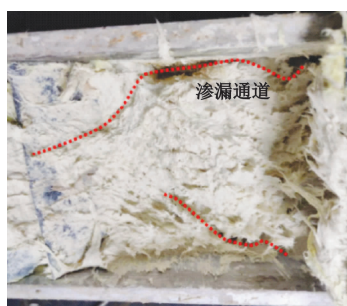


图4 油脂渗漏通道

Fig.4 Grease leakage channel

3 盾尾密封系统正向防水失效影响因素分析

采取单一变量原则,对油脂参数、盾尾刷刷丝长度和盾尾间隙量3个重要因素开展试验研究,分析不同工况下盾尾密封系统的防水失效压力,探究高压水流侵入并击穿盾尾密封防水系统的机理。试验方案如表2所示。

表2 盾尾密封系统防水性能试验方案

Tab.2 Test scheme for waterproof performance of shield tail sealing system

分析项目	变量水平	试验组数	其他变量取值
油脂种类	A、B、C、D	4组	盾尾刷刷丝长度 275 mm,盾尾间隙 30 mm
盾尾间隙	30、40、50、60、70 mm	10组	A类油脂,盾尾刷刷丝长度 175、200 mm
刷丝长度	175、200、275、300 mm	20组	A类油脂,盾尾间隙 30、40、50、60、70 mm

3.1 油脂性能参数对正向防水失效的影响

不同盾尾油脂的工程防水效果差异较大,本组试验中,控制盾尾间隙为30 mm、盾尾刷刷丝长度为275 mm,测试分析4种油脂与盾尾密封系统防水性能之间的关系。

如果油脂黏度和稠度相对较低,会更易与水发生混合,形成乳化油脂后被排出。在乳化油脂被挤出边界之后,相比于A类油脂,B类和C类油脂被击穿时水滴的滴落速度较快,在几秒之后就形成了稳定的渗流。D类油脂的基础油组分较多,纤维量较少,骨架不够紧密,容易被水破坏结构,形成乳化油脂,这可能是导致D类油脂防水性能较差的原因。从表1可知,4种油脂由A类到D类的正向防水失效压力与耐水压密封性的变化趋势基本一致。油脂的耐水压密封性能越好,密封试验的正向防水失效压力就越大。

3.2 盾尾间隙对正向防水失效的影响

盾尾间隙是影响盾尾密封系统防水性能的重要因素,但其对防水性能的影响效果尚未阐明。通过对A类油脂在不同盾尾间隙(30、40、50、60、70 mm)和不同刷丝长度(175、200、275、300 mm)下的盾尾防水性能进行测试试验,研究不同盾尾间隙下盾尾刷刷丝长度对盾尾密封系统防水性能的影响规律。正向防水失效压力试验结果如表3所示。

正向防水失效试验结果显示,盾尾间隙和防水压力呈现线性关系,随着盾尾间隙的增大,盾尾密封系统的防水能力逐渐降低,耐水压力值呈现线性减小的趋势。进一步分析可知,当盾尾间隙变小时,盾尾刷钢丝被压缩得更为紧密,钢丝之间的空隙减小,盾尾刷对油脂和水的阻碍作用更强,系统的防水能力更强。

盾构隧道工程设计防水压力一般不低于0.6 MPa,为保证防水能力满足要求,当盾尾刷刷丝长度

表 3 正向防水失效压力试验结果

Tab. 3 Pressure test results of waterproof failure in forward direction

刷丝长度/mm	不同盾尾间隙下的正向防水失效压力/MPa				
	30 mm	40 mm	50 mm	60 mm	70 mm
175	0.62	0.51	0.38	0.34	0.26
200	0.66	0.56	0.38	0.34	0.26
275	0.70	0.61	0.38	0.34	0.28
300	0.80	0.70	0.54	0.48	0.42

确定时,施工过程中的盾尾间隙量具有上限值。因此,盾构施工过程中应严格控制盾构机姿态变化,保证盾尾间隙量不超过上限值。由表 4 中的拟合公式可得不同规格盾尾刷的盾尾间隙上限值。

表 4 盾尾间隙的上限值

Tab. 4 Upper limit values of shield tail clearance

盾尾刷刷丝长度/mm	正向防水失效压力拟合公式	盾尾间隙上限值/mm
175	$P = 0.867 - 0.008\ 9d$	30.0
200	$P = 0.95 - 0.010\ 2d$	34.3
275	$P = 1.017 - 0.011\ 1d$	37.6
300	$P = 1.078 - 0.009\ 8d$	48.8

注: P 为防水压力,单位 MPa; d 为盾尾间隙,单位 mm。

3.3 盾尾刷刷丝长度对正向防水失效的影响

盾尾间隙上限值的影响研究表明,盾尾刷刷丝长度对盾尾密封系统的防水能力有一定影响。由表 3 可知,在盾尾间隙一定的情况下,盾尾密封系统的正向防水失效压力随着刷丝长度的增大,呈现先缓慢增大后快速增大的变化规律,大致分为两阶段:在刷丝长度为 175 mm 和 275 mm 情况下,在相同盾尾间隙下,其防水压力缓慢增大;在刷丝长度为 275 mm 和 300 mm 情况下,长刷丝的正向防水失效压力突增,说明 300 mm 刷丝长度盾尾刷能够显著提升盾尾密封系统的防水能力。当盾构隧道工程面临高水压环境时,建议 40 mm 以上盾尾间隙的盾构机选用刷丝长度为 300 mm 及以上的盾尾刷,可以有效提升系统防水能力。

当盾构机设计盾尾间隙量确定时,选用的盾尾刷刷丝长度不能太小,否则有发生防水失效的风险,因此盾尾刷刷丝长度有下限值。以 0.6 MPa 的设计防水压力为基准线,提出的盾尾刷刷丝长度建议值如表 5 所示。

本文研究范围仅局限于盾尾刷长度为 175 mm 到 300 mm 的范围。当盾尾间隙大于 48.8 mm 时,

表 5 盾尾刷刷丝长度建议值

Tab. 5 Recommended length values of shield tail brush wires

序号	设计盾尾间隙/mm	盾尾刷刷丝长度建议值/mm
1	[30.0, 34.3]	175
2	(34.3, 37.6]	200
3	(37.6, 48.8]	275
4	>48.8	>300

所应使用的盾尾刷长度大于 300 mm,涉及范围超出了本文的研究范围,有待进一步研究。

综上所述,实际工程中要保证盾尾密封系统的防水密封要求,需要从油脂、盾尾刷的选型以及施工过程中盾尾间隙量的控制三方面入手,并综合考虑实际工况的设计防水压力和盾构机设计盾尾间隙两个设计因素,以及严格把控盾尾姿态调控这一变量。

4 结语

本文基于自主设计的盾尾密封系统试验装置,提出了盾尾密封系统防水失效试验测试方法,分析了盾尾油脂、盾尾刷刷丝长度、盾尾间隙等因素对盾尾密封系统防水失效的影响规律。主要结论如下:

1) 自主设计的盾尾密封系统防水性能试验装置,可以测试不同油脂、不同盾尾刷在不同盾尾间隙下的防水性能。

2) 不同油脂的防水性能差异较大,4 种油脂的正向防水失效压力分别为 0.70、0.56、0.53、0.41 MPa。油脂正向防水失效压力与耐水压密封性指标相关,耐水压密封性指标越大,油脂的正向防水失效压力就越大,防水性能越好。

3) 盾尾间隙与正向防水失效压力线性相关,盾尾间隙越小,正向防水失效压力越大,防水性能越好。为保证 0.6 MPa 的正向设计防水压力,当盾尾刷刷丝长度分别为 175、200、275、300 mm 时,建议盾尾间隙上限值分别不大于 30.0、34.3、37.6、48.8 mm。

4) 盾尾刷刷丝长度对盾尾密封系统防水性能有一定影响。175 mm 和 275 mm 刷丝长度的正向防水失效压力变化不大,而刷丝长度为 300 mm 的正向防水失效压力明显增大。为满足 0.6 MPa 的设计防水压力,须保证刷丝长度的下限值,即当设计盾尾间隙分别为 30、40、50 mm 及以上时,建议盾

尾刷刷丝长度分别不小于175、275、300 mm。

参考文献

- [1] QIAN Q, LIN P. Safety risk management of underground engineering in China: progress, challenges and strategies[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(4): 423.
 - [2] XIE H, ZHANG Y, CHEN Y, et al. A case study of development and utilization of urban underground space in Shenzhen and the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 107: 103651.
 - [3] WANG S, FU J, ZHANG C, et al. Shield tunnel engineering: from theory to practice[M]. Amsterdam: Elsevier, 2021: 77.
 - [4] 朱祖熹. 盾构法隧道的盾尾防水密封与盾尾密封油脂[J]. 中国建筑防水, 2009(7): 2.
ZHU Zuxi. Waterproofing and sealing of shield tail and sealing grease[J]. China Building Waterproofing, 2009(7): 2.
 - [5] 郭世情. 盾尾密封油脂防水密封性能评价指标的相关性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(4): 181.
GUO Shiqing. Correlation analysis of evaluation indicators for shield tail sealing grease waterproof performance[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(4): 181.
 - [6] SHEN X, YUAN D, CAO L, et al. Experimental investigation of the dynamic sealing of shield tail grease under high water pressure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2022, 121: 104343.
 - [7] 钟小春, 黄思远, 竺维彬, 等. 基于压缩和油脂逃逸试验的盾尾刷密封性分析[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 125.
ZHONG Xiaochun, HUANG Siyuan, ZHU Weibin, et al. Analysis of sealing performance of shield tail brush based on compression and grease escape test[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(1): 125.
 - [8] 高振峰. 高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.
 - [9] 李光, 王宁. 基于多相流数值模拟的盾尾密封系统密封性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊1): 490.
LI Guang, WANG Ning. Study on sealing performance of shield tail sealing system based on numerical simulation of multiphase flow[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 490.
 - [10] 刘建国, 朱君, 鞠丽艳, 等. 盾尾密封系统防水失效特性试验与模拟分析[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(2): 39.
LIU Jianguo, ZHU Jun, JU Liyan, et al. Test and simulation analysis of waterproof failure characteristics of shield tail sealing system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(2): 39.
 - [11] DOGU Y. Investigation of brush seal flow characteristics using bulk porous medium approach[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(1): 136.
 - [12] NABIZADEH A, ABBASI M, SIAVASHI J, et al. Fluid flow modeling through pressure-dependent porous media: an analytical solution and a computational fluid dynamics approach[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2022, 18: 100776.
 - [13] 饶竹红. 盾尾密封油脂防水性能分析[D]. 上海: 同济大学, 2018.
RAO Zhuhong. Waterproof performance analysis of shield tail sealing grease[D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
 - [14] SHEN X, YUAN D, JIN D. Influence of shield attitude change on shield-soil interaction[J]. Applied Sciences, 2008.
- 收稿日期:2024-06-07 修回日期:2024-08-20 出版日期:2025-04-10
Received:2024-06-07 Revised:2024-08-20 Published:2025-04-10
• 通信作者:蒋沛峰,工程师,252652836@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- (上接第248页)
- [15] 孙海东. 盾构隧道管片衬砌结构刚度有效率模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
SUN Haidong. Study on model test for effective rigidity ratio of shield-driven tunnel segments lining[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
 - [16] 魏立新, 杨春山, 黄海滨, 等. 盾构隧道纵向刚度及影响因素模型试验研究[J]. 公路, 2020, 65(1): 335.
WEI Lixin, YANG Chunshan, HUANG Haibin, et al. Model test study on longitudinal stiffness of shield tunnel and its influencing factors[J]. Highway, 2020, 65(1): 335.
 - [17] 王谭, 莫海鸿, 陈俊生, 等. 错缝拼装及土层刚度对盾构隧道横向刚度有效率的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(9): 136.
WANG Tan, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. The impact of staggered joint and soil stiffness on transverse effective rigidity ratio of shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(9): 136.
- 收稿日期:2024-01-15 修回日期:2024-06-01 出版日期:2025-04-10
Received:2024-01-15 Revised:2024-06-01 Published:2025-04-10
• 第一作者:陈立,高级工程师,281183149@qq.com
通信作者:李博,教授,39185453@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license