

文章编号:1005-0523(2023)02-0039-08

盾尾密封系统防水失效特性试验与模拟分析

刘建国^{1,2},朱君^{1,2},鞠丽艳³,吴迪³

(1. 同济大学交通运输工程学院,上海 201804; 2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室,上海 201804;
3. 上海申通地铁集团有限公司技术中心,上海 201103)

摘要:盾尾密封系统的防水密封性能是影响盾构施工安全的重要因素,为分析其防水失效特性,设计了盾尾密封系统室内模型试验,并基于计算流体力学建立了对应的盾尾密封系统仿真模型。分析了在外部水压侵入过程中水油两相流体的体积分布、压力场和速度场变化,探究了盾尾结构参数、尾刷参数、油脂参数对密封性能的影响规律。结果表明:增加盾尾刷道数可有效提升防水能力;在防水失效过程中,在盾尾刷处出现流速的峰值点,流速的扩展分布与水侵入的体积分布具有一致性;盾尾刷渗透率、油脂粘度是影响初始漏水时间的敏感性因素;通过减小盾尾刷渗透率、增大油脂粘度,可有效延迟初始漏水时间,提升盾尾密封系统防水能力。

关键词:盾尾密封系统;CFD模拟;模型试验;防水失效

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

本文引用格式: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):39-46.

Test and Simulation Analysis of Waterproof Failure Characteristics of Shield Tail Sealing System

Liu Jianguo^{1,2}, Zhu Jun^{1,2}, Ju Liyan³, Wu Di³

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China;
3. Technology Center of Shanghai Shentong Metro Group, Shanghai 201103, China)

Abstract: The waterproofing of shield tail sealing system is an important factor affecting the safety of shield construction. A laboratory test of the shield tail sealing system was designed, and a corresponding simulation model was established based on the computational fluid dynamics to analyze the characteristics of waterproofing failure. The changes of volume distribution, pressure field and velocity field of two-phase fluid in the process of external hydraulic intrusion were analyzed, and the influence of shield tail structure parameters, tail brush parameters and grease parameters on seal performance was studied. The results show that: increasing the number of shield tail brushes can effectively improve the waterproofing ability; in the process of waterproof failure, the peak point of flow velocity appears at the tail brush of shield, and the expansion distribution of flow velocity is consistent with the volume distribution of water; the permeability of shield tail brush and the viscosity of grease are the sensitive factors affecting the initial leakage time; by reducing the permeability of shield tail brush and increasing the viscosity of grease, the initial leakage time can be delayed, and the waterproof ability can be effectively improved.

Key words: shield tail sealing system; CFD simulation; model test; waterproof failure

Citation format: LIU J G, ZHU J, JU L Y, 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): 39–46.

目前, 地铁隧道建设主要采用盾构法施工, 盾构法具有施工速度快、对地面活动干扰少等特点。然而在施工过程中依然会面临许多风险因素, 其中盾尾密封失效是常见的安全问题之一。大部分盾构机采用的盾尾密封系统是由密封油脂和盾尾刷组成, 如图 1 所示。将多道盾尾刷通过焊接或螺栓固定在盾尾壳体上, 并在盾尾刷之间充填盾尾密封油脂, 形成有效密封层, 从而对浆液和水土起到阻隔作用, 保证盾构机整体的平稳掘进。而当外部水压击穿盾尾密封层时, 就会发生防水失效, 其后果是灾难性的^[1-3]。

针对盾尾密封系统整体性能的研究, 国内外学者主要采用室内模型试验和数值模拟的方法, 分析其在各种工况下的性能。在室内模型试验方面, 国内进行了多次大型模型试验^[4-5], 均采用缩比尺等盾尾间隙的设计原则, 针对特定工程问题开展防水性能验证性试验; 高振峰^[6], Shen 等^[7]在耐水压检测方法基础上, 设计了耐水压动态检测试验装置; 王德乾等^[8-10]设计了一种抗水压密封测试设备, 并在朱炜健等^[11]研究中得以介绍和应用。国内外试验研究思路整体向小型化、单元化模型方向发展。在数值模拟方面, 由于盾尾刷结构与透平机械的刷式密封原理类似, 可以借鉴刷式密封的相关理论和分析方法。刷式密封结构一般可简化为多孔介质, Chang 等^[12], Wei 等^[13], Ali 等^[14]对多孔介质模型进行了改进; 一些学者也尝试对盾尾密封系统进行模拟分析, 饶竹红等^[15]利用 CFD 软件对比分析了油脂在不同水密性装置中的流动情况; 王林涛等^[16], 钊婧^[17], 李光等^[18]分别建立了仿真模型, 分析了正常与泄漏状态下油脂腔压力分布规律。上述数值分析集中于盾尾密封系统压力特性的研究, 没有从防水密封角度对防水失效过程的水力特性规律和防水能力的影响因素进行详细的分析。

以盾尾密封系统为研究对象, 在室内模型试验的基础上, 借鉴刷式密封的相关方法, 对盾尾刷和油脂进行合理简化。基于计算流体力学软件对密封系统防水失效时水和油脂两相流体相互作用进行

分析, 开展防水失效过程中水力特性规律研究, 考察结构参数、盾尾刷参数、油脂参数等条件对防水密封性能的影响规律, 为盾尾密封系统结构优化和施工控制提供支撑。

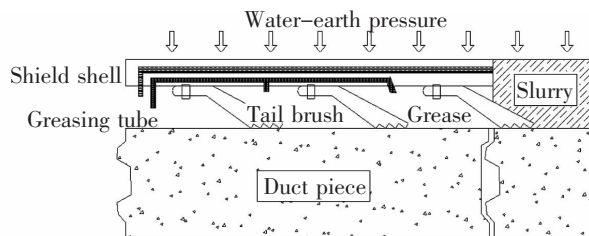


图 1 盾尾密封系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of shield tail sealing system

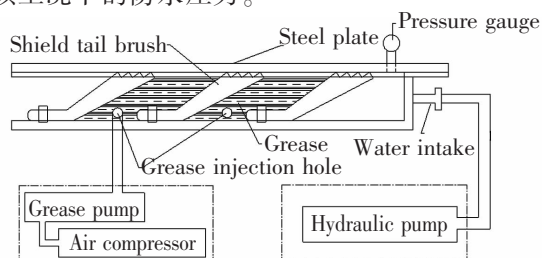
1 盾尾密封系统室内模型试验

为分析盾尾密封系统防水失效过程及影响因素, 设计了室内模型试验, 重点分析盾尾刷道数对盾尾密封系统防水能力的影响。

1.1 试验介绍

模型试验系统如图 2(a)所示, 由注脂系统、水压系统、盾尾模拟装置组成。盾尾模拟装置由箱型钢制底座与钢制盖板组成, 如图 2(b)所示。采用等盾尾间隙的原则, 装置内部密封槽深度为 50 mm, 宽度为 100 mm, 长度为 0.83 m, 模拟盾尾间隙为 50 mm 条件下的盾尾结构。

试验流程包括以下几步: ① 将多道盾尾刷安装在盾尾模拟装置中, 使钢丝刷保持受压变形状态; ② 利用注脂泵在盾尾刷间注入油脂直至充满整个密封腔体; ③ 通过进水口向密封腔体内加注水压, 模拟外部水压环境; ④ 通过左侧观察窗口和水压表, 记录试验的漏水情况和发生漏水时的水压, 即为该工况下的防水压力。



(a) Schematic diagram of test device



(b) Shield tail simulator

图2 盾尾密封系统模型试验装置

Fig.2 Model test device for shield tail sealing system

1.2 试验结果

为研究盾尾刷道数对盾尾密封系统防水能力的影响,设计了3组实验:盾尾刷道数分别取2道、3道、4道。按照上述试验流程开展实验。

图3表明,盾尾刷道数越多,防水压力越高,即防水性能越好。2道盾尾刷防水压力为0.42 MPa,3道盾尾刷防水压力为0.76 MPa,4道盾尾刷防水压力为1.25 MPa,3道盾尾刷较2道防水压力提高81%,4道盾尾刷较3道防水压力提高64%,提升幅度有所下降。而每增加1道盾尾刷,会增加盾尾结构的长度,应综合考虑防水要求和盾尾结构长度选取合适的盾尾刷道数。

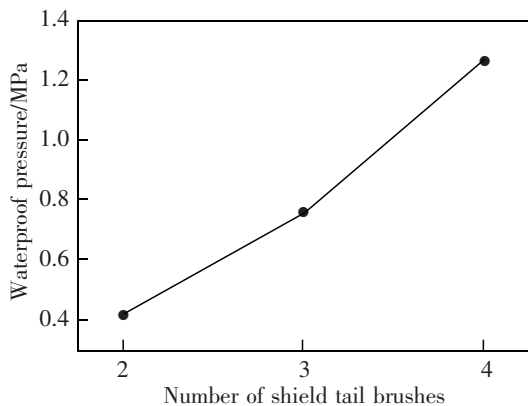


图3 不同盾尾刷道数下的防水压力

Fig.3 Waterproof pressure under different brush numbers

2 盾尾密封系统数值模型

在室内模型试验的基础上,通过数值模拟方法对盾尾密封系统的内部流动过程做进一步分析。

2.1 基本原理

对于水和油脂的流动问题,可以应用计算流体力学方法进行分析。其基本控制方程为连续性方程(1)和动量方程(2)^[9]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \tau + \mathbf{f} \quad (2)$$

式中: p 为流体压力; t 为时间; ρ 为流体密度; \mathbf{v} 为速度; τ 为剪应力; \mathbf{f} 为惯性力。

本问题不涉及能量转换。水和油脂均为不可压缩流体,密度恒定,式(1)简化为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

2.2 模型建立

按照盾尾结构和室内模型试验装置尺寸,应用CFD软件建立对应的数值模型(图4),数值模型尺寸与室内试验装置一致。数值模型由3道盾尾刷和2道密封油脂腔组成,在模型右侧设置水压入口,模拟地层中的水压,在模型左侧设置压力出口。除进出口边界外,其余壁面边界设置为无滑移边界。

盾尾刷由钢制保护板、压紧板和其间夹装的钢丝束组成,在本模型中,钢板模拟为不可渗透边界;钢丝束露出钢板部分模拟为多孔介质区域,模拟其对密封油脂和水流动的阻碍作用。室内试验的结果证实,水是从钢丝束露出钢板的部分侵入盾尾密封系统,因而可将钢板保护部分设置为不可流经区域。

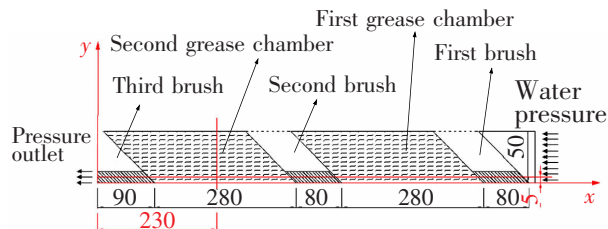


图4 数值分析模型(单位:mm)

Fig.4 Numerical analysis model (Unit:mm)

2.3 流体本构方程

为获得盾尾油脂的流体本构方程,采用毛细管粘度测试方法得到了某品牌盾尾密封油脂的流变特性曲线,在测得的剪切速率范围内,剪切应力与剪切速率呈线性正相关,且不过坐标原点,拟合得到剪切应力与剪切速率的关系式为(4),符合宾汉塑性流体特性(5)。在模拟计算中,采用此本构参数进行计算。

$$\tau = 3\,925.36 + 189\dot{\gamma}^{-1} \quad (4)$$

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (5)$$

式中: τ 为剪应力; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

2.4 网格划分及离散求解方法

借助前处理软件对流体域模型进行网格划分,为提高计算稳定性,使用结构化网格单元,经过网

格无关性验证,划分为四边形单元 32 897 个,单元节点 33 889 个。

3 击穿过程水力特性规律

根据室内模型试验结果,3道盾尾刷工况防水压力为 0.76 MPa,以 0.8 MPa 水压条件为标准算例,分析击穿过程中水力特性规律。

3.1 体积分数变化

图 5 所示为计算域内不同时刻水和油脂的流动状态,其中红色流体代表水,蓝色流体代表油脂。不同时刻水油两相体积分数的变化反映了水不断侵入盾尾密封系统的过程,包括 4 个阶段:阶段 1,加水压初始时刻,水流以入口边界条件压力充入第 1 道盾尾刷处,随后在压差作用下不断挤压油脂发生流动,水头于 19.2 s 击穿第 1 道盾尾刷;阶段 2,水头进入第 1 道油脂腔,由于油脂为均匀不可压缩流体,所以出现类似水驱油的流动形式,油脂克服壁面剪切力以及多孔介质的阻碍作用向前流动;阶段 3,水头于 67.8 s 到达第 2 道盾尾刷,在这一阶段,由于多孔介质对水的阻碍作用比对油脂的阻碍作用小得多,在较短时间内便击穿第 2 道盾尾刷,红色表示的水头很快进入第 2 道油脂腔;阶段 4,73.35 s 至 102.5 s 时间内水头在第 2 道油脂腔内的流动过程与之前相似,直到在压差作用下击穿第 3 道盾尾刷,发生渗漏,盾尾密封系统防水失效。

3.2 速度分布规律

将同时刻的速度分布图与流动状态图一一对应,如图 5 和图 6 所示。通过对比可以发现,流速的发展与水相的体积分数一致,在高水压的作用下,水的流速远远大于油脂流速,在盾尾密封系统内部逐渐形成一条明显的高速流带,即水的渗流通道。

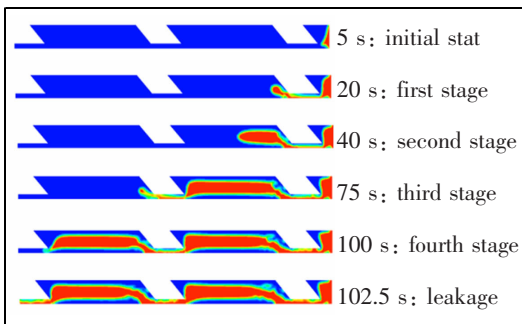


图 5 标准算例流动状态图

Fig.5 Flow condition of standard example

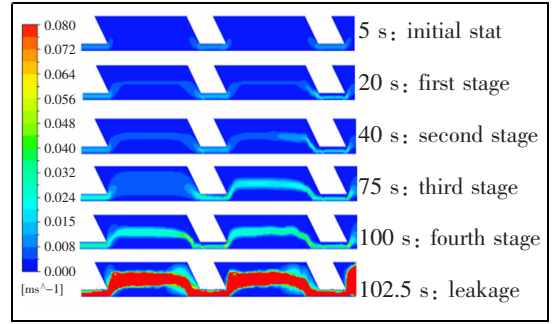


图 6 标准算例速度分布图

Fig.6 Velocity distribution of standard example

图 7 所示是计算域内距底端 5 mm 处水平线上各点的速度,可以发现,速度曲线有 3 个峰值,对应 3 道盾尾刷的位置,说明流体在通过盾尾刷时速度会增大,从流体力学角度分析,这是因为在盾尾刷处流域突然变小,在压力作用下流体做加速运动^[20]。

图 8 为在水侵入过程中出口速度的变化曲线。70 s 之前出口流速较低,在 0.01 m/s 到 0.03 m/s 之间;70 s 左右水头击穿第 2 道盾尾刷,出口速度陡升;而当水击穿第 3 道盾尾刷瞬间,出口流速迅速

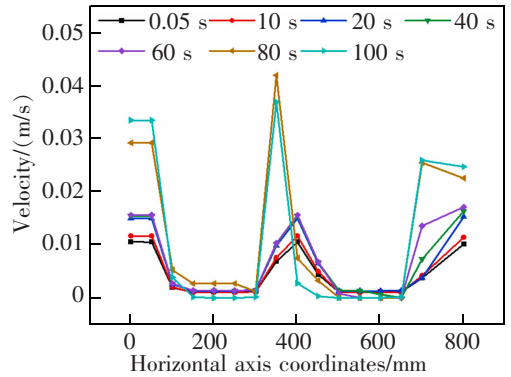


图 7 计算域内监测点的流速发展

Fig.7 Velocity development of monitoring points in computational domain

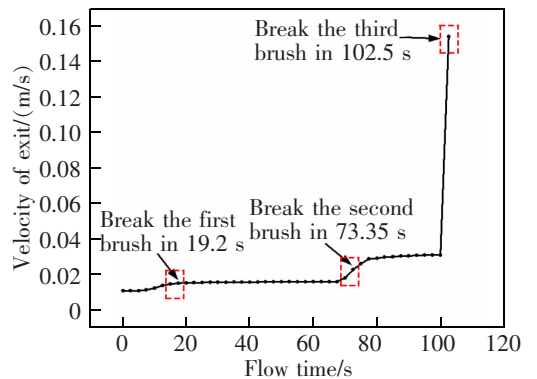


图 8 出口流速

Fig.8 Velocity at the outlet

飙升,达到 0.15 m/s,这是因为在击穿前后从出口流出的流体不同。在水击穿盾尾刷之前,出口流出的是被水压挤出的油脂,由于盾尾刷对油脂的阻碍作用大,导致流速一直保持在较低水平,而一旦水头击穿盾尾刷,盾尾刷对水的阻碍作用很小,在压力作用下,水流喷出,出口流速迅速上升,盾尾防水失效。

3.3 压力分布规律

图 9 所示是在水头侵入过程中第 2 道油脂腔内压力的变化曲线,通过与 4 个流动阶段的时间进行对比发现,油脂腔内压力的突变点与水击穿盾尾刷的时间基本一致。第 1 次压力上升对应水头击穿第 1 道盾尾刷,第 2 次压力上升对应水头击穿第 2 道盾尾刷,第 3 次压力骤降对应水头击穿第 3 道盾尾刷,发生防水失效。高压水的侵入,改变了油脂腔内部的压力平衡,造成盾尾密封系统的压力重新分布。在盾构施工时,可以利用油脂腔压力突变点与水击穿盾尾刷的时间一致的这种现象,通过监测油脂腔内压力的变化,来判断是否有高压水头的侵入,以及侵入到何种程度,进而为施工现场盾尾防水安全提供预警。

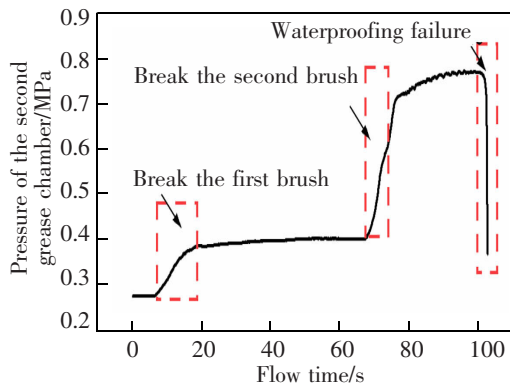


图 9 压力变化曲线

Fig.9 Variation curve of pressure

图 10 所示是计算域内距底端 5 mm 处水平线上各点的压力,从图 10 中可以发现,压降主要发生在盾尾刷多孔介质处,在油脂腔内压力几乎不变。以 10 s 时刻压力曲线为例,出入口总压降为 0.62 MPa,第 1 道盾尾刷压降为 0.21 MPa,占总压降的 32.9%;第 2 道盾尾刷处压降为 0.29 MPa,占总压降的 46.4%;而第 1 道油脂腔内压降为 0.02 MPa,仅占总压降的 0.4%。在 20 s 至 80 s 之间,压力分布发生变化,由于此时水头已击穿第 1 道盾尾刷,侵入到第 1 道油脂腔中,压降主要集中在第 2、3 道盾尾刷处。在 80 s 之后,压力分布再次发生变化,压降主

要集中在第 3 道盾尾刷处。

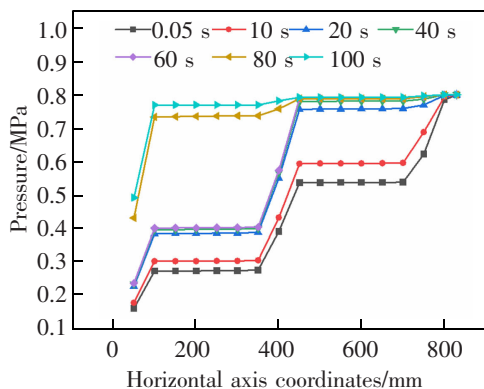


图 10 计算域内监测点的压力发展

Fig.10 Pressure development of monitoring points in computational domain

4 防水能力影响因素分析

选取典型可变因素进行分析,包括盾尾刷间距 s 、油脂密度 ρ 、油脂粘度 v 、盾尾刷渗透率 k 。采用单因素分析法,计算各因素在下列水平条件下的渗漏情况,分析各因素对盾尾密封系统防水性能的影响程度。

表 1 不同因素计算工况

Tab.1 Calculation conditions of different parameters

Parameters	Different levels				
$s/(10^2\text{mm})$	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8
$\rho/(10^3\text{ kg/m}^3)$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
$v/(10^2\text{ Pa}\cdot\text{s})$	2	4	6	8	10
$k/(10^6\text{ m}^{-2})$	0.1	0.13	0.2	0.4	1

通常以初始漏水时间来表征盾尾密封系统防水能力^[18],初始漏水时间指水击穿最后一道盾尾刷发生防水失效的时间。初始漏水时间越早,则水击穿盾尾密封的速度越快,表明盾尾密封系统的防水能力越低。

4.1 结构参数的影响

盾尾刷间距 s 指相邻两道盾尾刷螺栓孔安装位置之间的距离,是盾尾结构主要设计参数之一。图 11 所示为不同盾尾间距条件下的初始漏水时间。在选取的参数范围内,初始漏水时间随盾尾刷间距的增大而延迟,呈线性增长关系。 s 增大,相当于延长了水的渗流路径,水头渗流到最后一道盾尾

刷的时间也相应延迟。但盾尾刷间距受盾尾结构长度的限制,可优化的程度有限,同时也会造成油脂用量大幅增加,应谨慎调整。

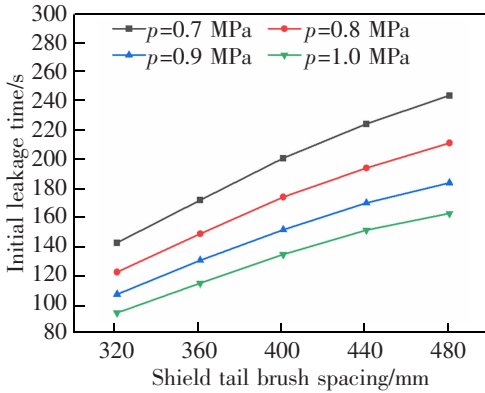
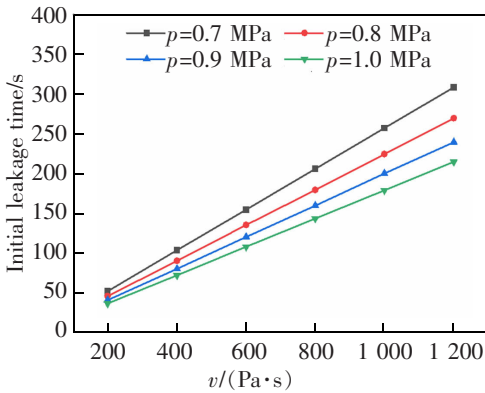


图 11 结构参数对初始漏水时间的影响

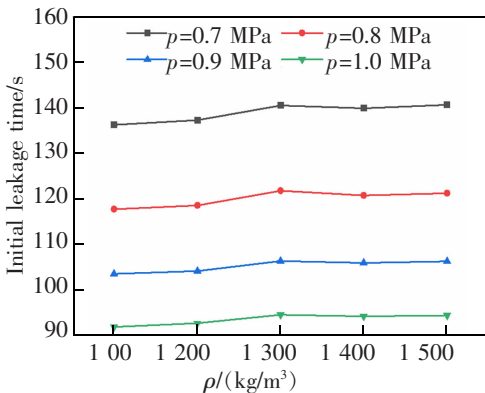
Fig.11 Effect of structural parameters on initial leakage time

4.2 油脂参数的影响

油脂粘度 v 和密度 ρ 是盾尾油脂两个重要的出厂指标,图 12 给出了初始漏水时间随油脂粘度和密度的变化情况。结果表明,在相同条件下,油脂



(a) Grease viscosity



(b) Grease density

图 12 油脂参数对初始漏水时间的影响

Fig.12 Effect of grease parameters on initial leakage time

粘度越大,初始漏水时间越晚,且基本呈线性关系,这说明粘度越大,油脂的防水性能越好。这是因为,油脂流动需要克服油脂内部剪切作用, v 越大,则需要克服的内部剪切作用越强,越不容易发生水的渗漏。而油脂密度对初始漏水时间影响较小,说明改变油脂密度,对提升油脂的防水能力影响不大。

4.3 盾尾刷参数的影响

盾尾刷渗透率 k 是粘性阻力系数的倒数。在盾构施工过程中,盾构机会产生偏离设计轴线的行为,导致盾尾间隙量在施工过程中不断发生变化^[2]。在不同盾尾间隙下,盾尾刷被不同程度的压缩,与管片紧贴,形成紧密的贴合力,阻碍流体流动。盾尾刷压缩程度不同,改变了盾尾刷的渗透率 k 。从图 13 中可以看出, k 越大,初始漏水时间越早,防水性能越差。随渗透率的增大,初始漏水时间下降的幅度逐渐平缓,说明通过减小盾尾刷渗透率,可以显著提升盾尾密封系统防水能力,与室内模型试验结果一致。

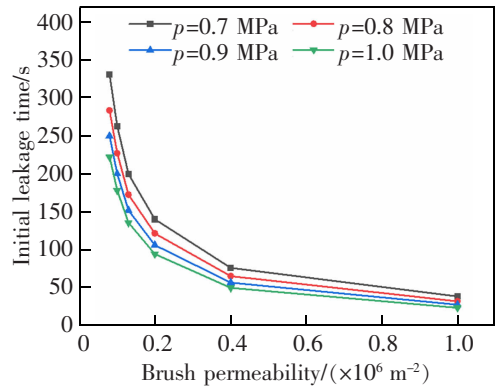


图 13 盾尾刷参数对初始漏水时间的影响

Fig.13 Effect of brush parameters on initial leakage time

4.4 敏感性分析

图 14 所示是初始漏水时间对各参数的敏感程度,可以发现,在相同变化幅度下,盾尾刷渗透率 k 、

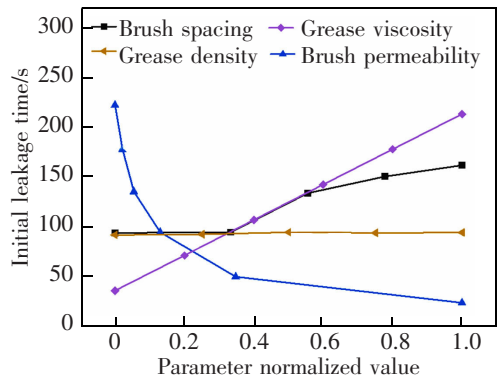


图 14 各因素对初始漏水时间的敏感程度

Fig.14 Sensitivity of various factors to initial leakage time

油脂粘度 v 为敏感性因素。 k 越小、 v 越大,盾尾密封系统的防水性能越好。而油脂密度 ρ 为非敏感性因素。可通过提高盾尾刷钢丝填充率来减小盾尾刷渗透率 k ,通过优化油脂配方来增大油脂粘度 v ,从而有效提升盾尾密封系统的防水密封性能。

5 结论

本文以盾尾密封系统的防水密封性能为研究对象,采用室内模型试验和 CFD 数值模拟的方法,对盾尾密封系统防水失效过程的水力特性和防水能力的影响因素进行了研究,得出以下结论。

1) 盾尾密封系统防水密封性能室内模型试验结果表明,增加盾尾刷道数能够有效提升防水能力。一般工程可采用3道盾尾刷,特殊工程采用4道以上盾尾刷为宜,可显著提升防水能力。

2) 在防水失效过程中,油脂腔内压力变化的时刻与水头击穿各道盾尾刷的时刻基本一致,可以通过监测油脂腔压力来判断是否有高水压侵入。压降主要集中在盾尾刷处。

3) 在未完全击穿前,在盾尾刷处出现流速峰值,流速的扩展分布与水侵入的体积分布随时间的变化过程具有一致性。

4) 盾尾刷渗透率 k 、油脂粘度 v 是初始漏水时间指标的敏感性因素, k 越小、 v 越大,越有利于防水密封。可通过提高盾尾刷钢丝填充率来减小盾尾刷渗透率、优化油脂配方来增大油脂粘度,从而提升盾尾密封系统的防水密封性能。

参考文献:

- [1] 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: 105-114.
- [2] LYU H M, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 31-44.
- [3] SHEN X, YUAN D J, CAO L Q, et al. Experimental investigation of the failure of shield grease seals under the influence of environmental factors: A case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 133: 1-20.
- [4] 夏汉庸, 庄欠伟, 徐天明, 等. 类矩形盾构盾尾密封性能试验[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(S1): 51-55.
- [5] XIA H Y, ZHUANG Q W, XU T M, et al. Sealing performance test of shield tail of quasi-rectangular shield[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(S1): 51-55.
- [6] 顾建江. 盾构机盾尾密封模拟试验[J]. *建筑科技*, 2020, 4(5): 5-8.
- [7] GU J J. Simulation test on shield device tightness[J]. *Building Technology*, 2016, 53(S1): 51-55.
- [8] 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.
- [9] GAO Z F. Evaluation of water-tightness of shield tail grease under high water pressure and its influencing factors analysis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [10] SHEN X, YUAN D J, CAO L Q, et al. Experimental investigation of the dynamic sealing of shield tail grease[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 121: 1-14.
- [11] 王德乾. 一种盾尾密封油脂的配方研究与性能表征[J]. *隧道建设*, 2013, 33(4): 277-280.
- [12] WANG D Q. Formulation research and property characterization of a kind of shield tail sealing grease[J]. *Tunnel Construction*, 2013, 33(4): 277-280.
- [13] 王德乾. 盾构用盾尾密封油脂抗水压密封研究[J]. *铁道建筑技术*, 2017(1): 7-9.
- [14] WANG D Q. Study of water-tightness under high pressure of shield tail sealing grease[J]. *Railway Construction Technology*, 2017(1): 7-9.
- [15] 王德乾, 斯芳芳, 谢宇飞, 等. 耐高水压盾构用盾尾密封油脂及其性能表征[J]. *隧道建设*, 2022, 42(8): 1386-1394.
- [16] WANG D Q, SI F F, XIE Y F, et al. Property characterization of shield tail sealing grease for high water pressure[J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(8): 1386-1394.
- [17] 朱炜健, 王德乾, 廖剑平, 等. 盾尾密封油脂的抗水压密封性能评价标准研究[J]. *隧道建设*, 2021, 41(7): 1166-1171.
- [18] ZHU W J, WANG D Q, LIAO J P, et al. Evaluation standards for water-tightness of shield tail sealing grease under conditions of high water pressure[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(7): 1166-1171.
- [19] CHANG Y, SUN B T, ZHANG L Z. Leakage performance predictions of a brush seal based on fluid-solid coupling method[J]. *Science Progress*, 2020, 103(1): 1-17.
- [20] WEI Q, ZHOU H W, YANG S. Non-Darcy flow models in porous media via Atangana-Baleanu derivative[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2020, 141: 1-8.
- [21] ALI N, MAHDI A, JAVAD S, 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: 1-11.
- [15] 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 Z H, LIU J G. Numerical simulation analysis of water tightness test equipment for shield tail seal grease[J]. Tunnel and Rail Transit, 2017(S1): 37-43.
- [16] 王林涛, 刁婧, 孙开欣, 等. 正常状态下盾尾密封油脂腔压力分布特性研究[J]. 现代机械, 2021(4): 29-37.
- WANG L T, DOU J, SUN K X, et al. Pressure distribution characteristics of shield tail sealing grease cavity under normal conditions[J]. Modern Machinery, 2021(4): 29-37.
- [17] 刁婧. 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.
- DOU J. Study on pressure distribution characteristics of shield tail sealing system of shield machine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [18] 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, 2021, 41(S1): 490-496.
- 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.
- [19] 王祺来. 基于VOF方法的起伏管段气液两相管流数值模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- WANG Q L. Study on the gas-liquid two-phase flow numerical simulation in undulating pipeline based on VOF [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.
- [20] 王德福. 富水地层土压平衡盾构盾尾密封特性数值模拟[J]. 山西建筑, 2021, 47(10): 123-126.
- WANG D F. Numerical simulation of shield tail seal characteristics of earth pressure balance shield in water-rich formation[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(10): 123-126.



第一作者: 刘建国(1975—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为岩土工程。E-mail: 635900036@qq.com。



通信作者: 朱君(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通与铁道工程。E-mail: 541963225@qq.com。

(责任编辑: 吴海燕 姜红贵)