

# 盾构施工盾尾密封系统浅谈

赵斌

中铁十四局集团大盾构工程有限公司

**摘要：**在盾构机长距离、小曲线掘进条件下，如何保证盾尾密封系统的可靠性是施工重难点问题。本文研究了盾尾密封系统的工作原理，并在此基础上从工程地质、密封油脂性能及用量和掘进参数这三个方面分析了造成盾尾密封失效的原因。最后以某隧道盾尾刷更换为实例进行了盾尾刷更换与保护的研究。

**关键词：**盾尾密封系统；密封失效因素；盾尾刷更换；盾尾刷保护

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.20.020

## 一、引言

近几年盾构隧道的发展趋势主要以纵深性为主，如何保证盾构机长距离掘进是当前我们面临的首要课题。本文通过对国内外盾构施工案例的分析总结发现，盾构机的盾尾密封系统是其整机系统中最为薄弱的环节<sup>[1]-[5]</sup>。若盾尾密封系统出现问题则会出现不可预估的风险。基于上述原因本文从盾尾密封系统的原理设计、失效因素及更换进行了分析，通过分析研究给出了盾尾密封系统长距离使用的指导性建议。

## 二、盾构盾尾密封系统

### (一) 盾尾密封系统工作原理

盾尾密封系统具有防止地下水沿盾尾间隙进入盾构机内部的特性。盾尾密封系统是保证盾构施工的重要手段，也是保证施工人员的安全防线。盾尾密封系统包含盾尾刷、止浆板、钢板刷、盾尾密封油脂及油脂泵等。盾尾刷、止浆板、钢板刷这三种结构一般通过螺栓或者焊接的方式安装于盾壳内部，直接与管片及外部环境接触。油脂泵安装于盾构机内部主要用于将盾尾密封油脂泵送至管片与盾尾刷及盾壳形成的油脂腔中，从而形成盾尾密封结构防止砂浆及地下水的涌入。盾尾密封系统的工作原理，如下图1所示。

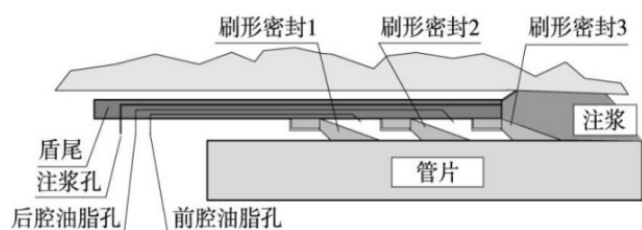


图1 盾尾密封系统工作原理

### (二) 盾尾密封系统设计

盾尾密封系统的设计理念应本着全寿命周期可控的原则进行设计<sup>[6]-[8]</sup>。盾尾密封系统应包含硬件系统及软件系统，软件系统通过阈值的设定完成系统的反馈形成闭环控制，保证盾尾密封系统的可控性。

硬件系统是盾尾密封的主要保障，因此盾尾密封系

统设计一硬件系统为主。首先明确密封系统应用的水文条件、工程地质、掘进距离、隧道最大转弯半径、最大水土压力以及隧道结构等因素；其次，盾尾密封硬件系统结构的设计取决于隧道结构中的相关要求、盾尾预选取的形式、成型管片与盾尾的标准间隙、油脂腔梯度压力设计等参数。盾尾承压能力与密封道数呈正相关，但盾尾长度则会相应加长。盾尾密封硬件系统设计时应综合考虑密封道数和盾尾长度的配比。

## 三、盾尾密封失效的影响因素

### (一) 工程地质

以某项目的盾构区间为例，盾构掘进地层主要为粗砂、粉质黏土、细砂。区间地层的高渗透性，是影响盾尾密封的主要因素。如何保证密封腔充满油脂是盾尾密封系统的首要问题，合理配置排布盾尾密封腔及密封点可有效解决此问题。

盾尾密封点的排布对盾尾油脂流向起决定性作用，密封油脂的流向分为环向和纵向。环向流动指密封油脂沿密封腔圆环型腔体流动，密封油脂注入时应首先保证环型腔体的饱满；纵向流动指密封油脂沿尾刷向后端腔体流动，当密封油脂向后端腔体流动时尾刷将产生纵向压缩量，当尾刷长期处于纵向压缩时，盾尾环型密封腔内的压力将不能满足施工所需的压力，形成通道诱发盾尾密封失效。通过分析得出油脂注入点的排布应在保证减少盾尾密封中空的条件下，较多的安排盾尾密封油脂注入孔；若因设计不具备设置较多的油脂孔时，应首选用泵送性及延展性较好的盾尾油脂进行填充。

### (二) 密封油脂性能及注入量

通过对油脂流动性及注入孔排布的分析可以发现，密封油脂的性能及注入量同样决定着密封系统的有效性。

盾尾油脂由基础油、填充材料、增强纤维、增稠剂、增黏剂等其他添加剂组成。密封油脂各项含量的配比应稳定在一定范围内才能保证密封油脂具有良好的抗水压性和泵送性<sup>[9]</sup>。

盾尾油脂注入量的选取遵循，既能保证压力满足水土压力、油脂注入量又不超限的原则。油脂注入分为自动及手动两种模式。自动注入方式分为等待时间：达到预选冲程数量后的等待时间；压力监控：压力超过了设定的数值，则中断进程并继续至下一个注射位置；行程控制：根据预选的掘进距离，所有阀进行一次完整的循环；最大时间/阀：每个阀的预选冲程数都必须在此时间（闸阀调节器）内完成。

手动注入油脂的方式为手动开启注入油脂的方式，注入原则为不低于切口压力2bar。油脂注入压力的选择应呈梯度分布，即最外侧压力腔应高于注浆压力2bar，

其余压力腔差应在1.5~2bar。

自动油脂用量理论计算公式为

$$[\Pi * (R/2 + H)^2 - \Pi * (R/2)^2] * M * \rho \quad (3-1)$$

式3-1中R为管片外径、H为理论厚度、M为管环宽、 $\rho$ 为油脂密度，通过计算分析得出当管环直径为6~8m时，油脂残留厚度为1~1.3mm；管环直径为8~10m时，油脂残留厚度为1.3~1.5mm；管环直径为10m时，油脂残留厚度为1.5~2mm。

### (三) 掘进参数

盾构机的掘进速度、注浆压力、掘进姿态、盾尾间隙均是影响盾尾密封的主要影响因素。

掘进速度需要与自动注入设定值相匹配。为了更加详尽地表示盾尾油脂用量与掘进速度的关系，本文调取了某项目掘进1000环至1800环的掘进速度与油脂用量。为提高数据的准确性和可计算性，对盾构机掘进速度及油脂用量进行数据预处理，预处理的数据通过多项式拟合进行分析。

建立多项式数学模型：对于因变量y和自变量x的m ( $m > n$ ) 次独立的观测，均有  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, 3 \dots m$ 。因此建立如下数学模型进行拟合：

$$\begin{cases} y = p_1 x_i^n + p_2 x_i^{n-1} + \dots + p_n x_i + p_{n+1} + \varepsilon_i \\ \varepsilon_i \sim N(0, \delta^2), i = 1, 2, 3 \dots m \end{cases} \quad (3-2)$$

其中， $p_i$ 为未知参数， $\varepsilon_i$ 为随机误差。

多项式数学模型求解：将随机误差转化为

$$\varepsilon_i = \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (3-3)$$

对式2-3的  $\varepsilon_i$  求n+1次偏导，令其等于零

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial p_i} = 0 \quad (3-4)$$

建立偏导方程组进行拟合系数求解，并将拟合系数带入数学模型中进行求解，求解后的拟合曲线如下图2所示。

通过拟合数据可知，盾尾密封油脂用量与掘进速度呈负相关；掘进速度为28mm/min时，盾尾密封油脂用量为最佳状态。

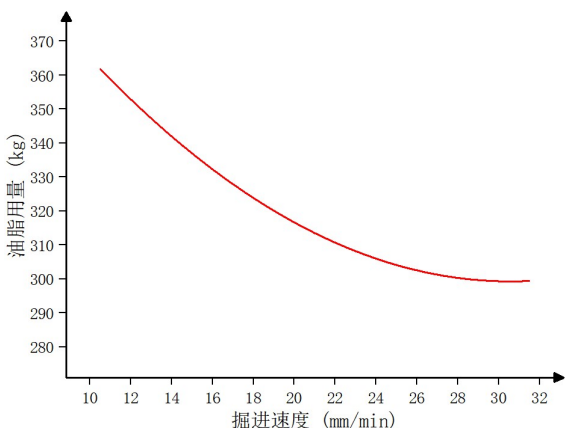


图2 掘进速度与油脂用量拟合图

盾尾注浆压力在一定程度上直接影响盾尾密封，换言之盾尾密封的可靠性和注浆压力呈负相关。通过分析可知油脂腔压力应高于水土压力和注浆压力2bar，否则将出现盾尾击穿的风险。

掘进姿态和盾尾间隙应保持连续性和均匀性，当盾构机姿态向隧道某一轴向侧发生偏离时，发生偏向侧的盾尾间隙增大，进而盾尾刷与管片之间形成通道造成盾尾密封失效；若不及时调整盾尾间隙将导致间隙较小侧盾尾刷与管片的磨损加剧同样造成盾尾密封失效。

通过针对不同材料盾尾刷进行疲劳试验得出，当加压力次数达到150000时，90%的盾尾刷已不具备原有的力学性能。所以在掘进过程中掘进姿态和盾尾间隙应保持良好的连续性和均匀性。

管片的拼装质量和预制质量同样影响盾尾密封的效果。管片如果存在厚度超差、外弧面高差超限、边角浮浆、表面毛糙等缺陷会造成密封油脂消耗异常、盾尾密封性能降低的危害。管片拼装和推进过程中的磕碰造成管片部分破损，拼装过程中外层止水条受力不均被挤出或者在盾尾间隙不好的情况下撑靴直接压到外层止水条导致其脱落，破损的混凝土碎片或止水条上述异物如果未清理干净进入盾尾，会损坏盾尾刷致其密封失效。

### 四、盾尾刷更换与保护

盾尾刷损坏一般发生在掘进过程中。尾刷与管片的强干涉，造成尾刷弹性失效或钢丝刷磨损，这种不可逆地损坏是造成尾刷失效的主要原因。掘进过程中更换盾尾刷一般采用冷冻固结法和注浆法。冷冻固结法施工流程为首先，拼装特制钢管片同步注入特制凝固浆和特制防水油脂；其次掘进至预定的冷冻加固区域，安装混凝土特殊管片；最后在盾尾经过预定冷冻区域后，连通管片中预埋管，并安装冷冻设备进行冷冻。注浆法是在原有管片二次注浆基础上进行注浆加固，一般为保证地层有良好地注浆效果会拼装特殊管片加强注浆效果，注浆加固的可操作性较高、性价比高。

#### (一) 盾尾刷更换

以某项目为例，该工程地层自上而下依次为素填土、淤泥或淤泥质土、黏土或有机质土、粉、细砂、中砂、粗砂层。更换流程如下：

1. 止水处理：首先中盾开孔注聚氨酯，为保证聚氨酯注入扩散效果将盾构机原有10个注浆口增设至14个，聚氨酯注入要求为主剂/促进剂=100/6~8、注入量15~20kg/孔、压力不超5bar；其次通过注浆泵经由盾尾管片二次注浆孔向管片背后注入聚氨酯；最后通过管片二次注浆孔向其背后注入双液浆形成跨距为10环的止水环箍，技术参数为双液浆水泥浆液水灰比1:1、水泥浆与水玻璃比例为1:1、凝固25~30s、注浆压力0.6~0.8MPa。

2. 掌子面稳定维护：停机后通过置换100s以上泥浆进行掌子面维护，且要求切口处放出浆液达到90s以上，并对液位及盾构姿态进行观察记录。

3. 拆除管片及尾刷检修：确认止水加固效果满足施工条件后，首先拆除K、B1块管片，管片拆除时利用小

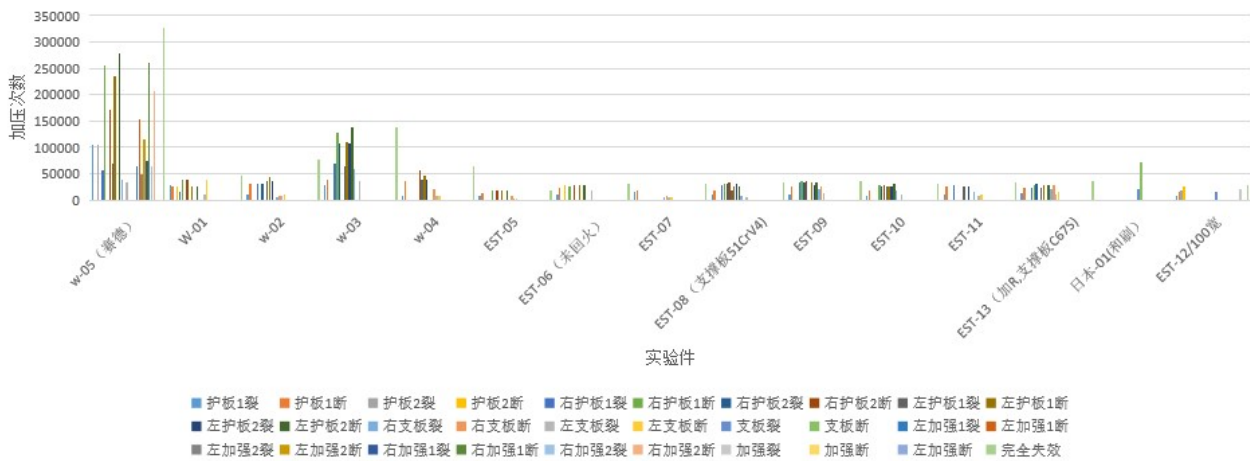


图3 盾尾刷疲劳试验图

型钢楔子将K块挤出2~3cm缝隙，再利用管片拼装机进行拆除，拆除后安装止水工装检修该位置盾尾刷，以此类推顺时针依次完成其他块管片拆除、油脂清理、尾刷检查检修及管片安装工作；最后安装K块管片安装，完成前三道盾尾刷检修作业。

**(二) 盾尾刷保护措施**

1. 管片预制及拼装质量：进场管片厚度误差应控制在-1至+3mm内、管片外弧面平整度误差小于5mm，且外弧面光滑无杂物；止水条应粘贴牢固无脱落；盾尾干净、无杂物及污水；管片拼装质量满足设计要求；推进过程中及时复紧管片螺栓。

2. 砂浆质量及注入量：砂浆需根据塌落度、稠度指标要求、凝结时间等实验数据确定配合比。施工过程中必须遵循注浆与掘进同步进行的原则，注浆量与注浆压力必须满足控制地面沉降又不击穿盾尾刷的要求。

3. 盾尾油脂：掘进过程中严禁使用手动模式进行油脂注入，并根据掘进速度匹配各点位油脂注入量。定期检查盾尾油脂气动阀开闭情况，盾尾油脂压力传感器是否正常。

4. 盾尾间隙：盾尾间隙测量频率为50cm/次；若间隙不稳定，及时调整各推进油缸压力及盾尾间隙；管片点位选取原则为保间隙、稳行程差。

5. 掘进姿态控制：盾构机姿态控制应采用勤纠缓纠的方式，保证盾构掘进姿态在设计轴线±50范围内；合理分配推进油缸压力，防止管片因受力不均匀而产生错台；定期检查推进油缸、阀组等设备。

**五、结论**

通过对盾构机密封系统的研究得出，盾尾密封结构的设计应以硬件系统设计为主，当水土压力<3bar时，密封腔为3道、水土压力不低于3bar且小于6bar时，密封腔为4道、水土压力不低于6bar且小于10bar时，密封

腔为5道；合理设置油脂注入孔可有效防控工程地质的影响，按需选用油脂和严控注入量可提高盾尾密封性；盾构施工掘进中合理控制同步注浆参数、掘进参数、盾尾油脂可延长盾尾刷的使用寿命。

**参考文献**

[1]戴方栋, 孙松建. 穿越砂层时盾尾刷损害的应急处理措施研究[J]. 中外建筑, 2019 (07): 225-227.  
 [2]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 (01): 155-162.  
 [3]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 (03): 77-80.  
 [4]Yu C, Zhou A, Chen J, et al. Analysis of a tunnel failure caused by leakage of the shield tail seal system[J]. Underground Space, 2019.  
 [5]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.  
 [6]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 (09): 63-67.  
 [7]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 (S1): 490-496.  
 [8]钟小春, 莫暖娇, 余明学, 竺维彬, 朱能文, 游智. 盾尾刷环形密封系统单元试验及水密性机制研究[J/OL]. 岩土工程学报: 1-9 [2023-02-12].  
 [9]李向前. 盾尾密封油脂力学性能及测试方法研究[D]. 中国地质大学 (北京), 2020.

作者简介：赵斌，男，1983.07，江苏南京，汉，本科，大盾构掘进管理中心副主任，研究方向：盾构掘进、选型等。