

盾构机刀盘磨损故障成因及修复方法研究

曹文儒

中铁隧道股份有限公司 河南 郑州 450007

摘要：刀盘作为盾构机核心掘进构件，长期受岩土摩擦、冲击作用，在复杂地层施工中极易出现各类磨损故障，直接影响隧道掘进效率与施工安全。本文依托地铁盾构施工实际工况，系统梳理刀具破损、盘面剥离、开口变形及不均匀偏磨四类典型故障形态，从地质条件、设备选型、施工参数及运维管理四方面剖析磨损核心成因，总结人工检测与智能监测相结合的磨损评估方法。针对不同磨损等级及特殊地层工况，分级阐述轻微、中度、重度磨损标准化修复工艺与应急修复技术，并结合实际工程案例验证工艺实用性，可为盾构刀盘病害治理与运维优化提供工程参考。

关键词：盾构机刀盘；磨损故障；表现形式；成因；检测评估；修复方法

引言：随着城市轨道交通隧道建设规模持续扩大，盾构法凭借安全高效的优势被广泛应用于各类地下工程。我国隧道施工地层条件复杂，砂卵石、软硬交错地层分布广泛，盾构刀盘在长距离掘进过程中磨损损耗问题频发，易引发掘进姿态失衡、土体喷涌、结泥饼等施工病害，严重时会造成设备停机、工期延误及施工成本增加。现阶段针对刀盘磨损的分级研判与精准修复体系仍不够完善。基于此，本文结合现场施工经验，系统研究刀盘磨损故障特征、成因及检测修复技术，旨在

优化刀盘运维与修复工艺，提升复杂地层盾构施工稳定性。

1 盾构机刀盘磨损故障主要表现形式

在盾构隧道掘进施工过程中，刀盘长期与岩土体、砂石颗粒持续接触、挤压与摩擦，受复杂地层和施工工况影响，易产生不同类型的磨损故障。为清晰梳理盾构机刀盘磨损故障的核心特征与施工影响，现将隧道掘进施工过程中常见的刀盘磨损故障主要表现形式、核心特征及引发的施工问题整理为如下表1。

表1 盾构机刀盘磨损故障主要表现形式汇总表

序号	故障类型	核心表现特征	引发的施工影响
1	刀具单体磨损、崩齿与脱落	软土地层出现刀具均匀磨耗，刀刃厚度减小、切削能力下降；含卵石、硬岩及软硬交错地层中，刀具受瞬时冲击载荷出现刀齿崩裂、刀圈开裂；固定螺栓松动、焊接强度不足时，出现刀具偏移甚至整体脱落	掌子面掘进不平衡，引发掘进阻力增大、姿态偏移等问题
2	刀盘盘面耐磨层磨损、剥离	堆焊耐磨层长期受渣土冲刷摩擦，出现表层磨薄、耐磨颗粒脱落；含大量石英砂、碎石地层中磨损速度加快，局部出现大面积磨平、凹坑缺陷；疲劳磨损叠加冲击后，耐磨层起皮、开裂、整体剥离	刀盘母材直接暴露，加速主体结构损耗
3	刀盘开口区域磨损与变形	刀盘开口持续受高速渣土冲刷磨削，开口边缘磨损最严重；长期冲刷造成开口边缘钢板变薄、轮廓变形、开口尺寸扩大	渣土进土量失控，土舱压力难以稳定，极易诱发结泥饼、喷涌等施工病害
4	刀盘整体偏磨与不均匀磨损	施工轴线偏移、地层软硬不均、刀具磨损不一致等导致刀盘受力失衡，出现单侧磨损严重的偏磨现象；造成刀盘盘面平整度下降、外径不规则磨损	大幅降低掘进稳定性，增加后续纠偏施工难度

2 盾构机刀盘磨损故障核心成因

盾构机刀盘磨损是地质条件、设备设计、施工操作及运维管理多方面因素共同作用的结果。不同诱因对应的磨损程度、故障形态存在明显差异。刀盘磨损故障的核心成因可归纳为以下四点。（1）地层地质条件复杂多变。地质环境是造成刀盘磨损的首要客观因素。砂卵石地层、硬岩地层中大量硬质颗粒与孤石，会持续对刀具

及盘面产生磨削与冲击。软硬交错地层土质不均匀，刀盘掘进受力不稳定，极易引发局部偏磨和崩齿问题。软土地层富含黏土、淤泥质土时，易在刀盘表面结泥饼，堵塞渣土开口，增大掘进摩擦阻力，加速结构磨损。（2）刀盘结构与刀具选型不合理。部分工程刀盘开口率、面板厚度设计与施工地层不匹配，适配性不足。刀具选型未结合岩土参数精准匹配，软土地层使用硬质岩

刀具、卵石地层使用普通切刀,会大幅降低切削效率。刀具排布密度不合理、保径结构配置不足,都会造成刀盘磨损速率大幅提升。(3)施工掘进参数控制不当。掘进过程中推力、转速、土舱压力参数设置不合理,会加剧刀盘损耗。推力过大易造成刀具超负荷承压,产生冲击破损;转速过高会增大刀具与地层的摩擦频率;参数频繁调整、掘进姿态偏差,会导致刀盘受力失衡,诱发不均匀磨损。(4)设备运维巡检管理不到位。施工中未按照周期开展刀盘检查,刀具松动、轻微磨损等隐患无法及时发现。耐磨层损耗后未及时补焊修复,长期作业导致母材直接接触岩土体。日常维保缺失、换刀不及时,小磨损问题持续累积,最终发展为严重的刀盘磨损失效故障^[1]。

3 刀盘磨损故障检测与评估方法

盾构机刀盘磨损状态检测与评估是排查设备隐患、制定修复方案、保障掘进施工连续的关键环节。刀盘磨损检测方式及评估体系分为以下几类:(1)人工停机检测方法。该方法为施工现场主流基础检测方式,多应用于盾构机区间检修、换刀作业阶段。工作人员进入土舱内部,通过卡尺测量刀具高度、耐磨层厚度,直观检查刀具崩损、盘面开裂、开口变形等缺陷。人工检测数据精准、可信度高,但受作业空间、地层通风及承压条件限制,存在作业风险高、检测耗时久的问题。(2)在线智能监测检测技术。现阶段智能化施工普遍采用刀盘磨损在线监测系统,依托传感器实时采集刀盘掘进扭矩、振动频率、掘进速度等参数。通过数据变化规律间接判定刀具磨损程度,无需停机即可实现全天候监测,有效规避人工检测安全风险,适配长距离、不间断掘进施工场景。(3)刀盘磨损分级评估体系。结合现场检测数据,行业通用磨损分级标准将刀盘磨损划分为轻微、中度、重度三个等级。依据刀具磨损量、耐磨层损耗比例、结构变形程度判定故障等级,以此区分维保、修补、大修等不同处置方式,为施工人员制定维修方案提供可靠依据。(4)磨损故障风险预判。结合地层参数、掘进参数与历史磨损数据,可预判刀盘后续磨损速率,提前识别偏磨、刀具失效等潜在风险,及时调整施工参数,提前规划维保作业,有效降低突发性刀盘故障引发的施工停滞问题^[2]。

4 盾构机刀盘磨损故障修复方法与工艺

4.1 轻微磨损:原位补焊与耐磨层喷涂修复工艺

刀盘轻微磨损多见于软土、均质砂层常规掘进工况,核心特征为刀具及盘面耐磨层均匀磨耗,最大磨损厚度 $\leq 4\text{mm}$,无钢板变形、焊缝开裂、刀具破损等结

构性损伤,可采用不停机原位修复工艺,大幅减少停机工期损耗。整套工艺分为表面预处理、原位多层补焊、耐磨层喷涂强化三个核心步骤。(1)表面预处理。采用高压气流配合钢丝刷清除刀盘表面泥饼、渣土,再通过角磨机精细化打磨磨损区域,彻底去除氧化皮、油污及松散杂质,确保修复基面粗糙度控制在 $20\sim 40\mu\text{m}$,基面平整度偏差 $\leq 0.5\text{mm}$,精准标记磨损边界与磨耗厚度,为焊接提供优质结合界面。(2)原位补焊修复。选用与刀盘母材Q345钢匹配的YD818耐磨焊条,采用多层多道堆焊工艺,严格控制焊接电流 $170\sim 210\text{A}$ 、焊接电压 $28\sim 32\text{V}$,层间温度不高于 60°C ,规避局部过热引发的基材微变形。逐层堆焊至耐磨层设计厚度 8mm ,完工后打磨抛光,保证盘面无凸起、无焊接气孔。(3)耐磨层喷涂强化。采用等离子热喷涂工艺,在补焊区域及全盘面喷涂Ni60合金耐磨粉末,喷涂厚度控制在 $0.6\sim 1.0\text{mm}$,形成致密防护层,可使刀盘表面耐磨性提升35%以上,有效延长轻微磨损周期^[3]。

4.2 中度磨损:刀具更换、局部板材修补修复技术

中度磨损一般发生在掘进里程 $300\sim 800\text{m}$ 的微卵石、软硬交错地层,主要表现为刀具切削刃磨耗超 6mm 、切削性能衰减,局部盘面及开口边缘钢板磨薄 $2\sim 5\text{mm}$,小面积耐磨层脱落,刀盘主体结构完好,需停机进入土舱开展局部专项修复。(1)开展废旧刀具拆除更换,逐一拆除磨耗超差、刀齿钝化的主切刀与保径刀,清理刀具基座螺纹内渣土杂质,检测基座变形情况。更换同型号原厂刀具,采用分级扭矩紧固工艺,主刀具紧固扭矩控制在 $380\text{N}\cdot\text{m}$,保径刀扭矩 $320\text{N}\cdot\text{m}$,全部加装不锈钢防松垫片,杜绝掘进振动导致的刀具松动脱落。(2)实施局部板材修补,针对刀盘开口、盘面磨损变薄区域,裁切厚度 $8\sim 10\text{mm}$ 的Q345耐磨钢板贴合母材,采用连续满焊工艺焊接,焊缝宽度控制在 $8\sim 12\text{mm}$,全程检测焊缝质量,杜绝气孔、夹渣、裂纹等缺陷,确保修补区域与原结构平顺衔接。(3)进行整体找平检测,采用三维平整度检测仪扫描刀盘,修正 $\leq 1\text{mm}$ 的局部高低差,保证刀盘外径误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,彻底解决受力不均问题,保障掘进姿态稳定^[4]。

4.3 重度磨损:刀盘解体大修与结构补强修复方案

重度磨损常见于长距离、高硬度复杂地层掘进,当刀盘出现耐磨层大面积脱落、主体钢板磨耗厚度超 8mm 、刀具基座变形、开口结构破损等问题时,局部修复无法满足施工要求,必须拆机解体进厂大修。(1)解体与精准检测,将刀盘整体拆解后转运至专业维修车间,通过超声波测厚、三维扫描、同轴度检测等设备,

全面排查盘面厚度、焊缝完整性、法兰同轴度、基座变形量,精准划分损伤等级,制定针对性大修方案。(2)结构更换与补强,对磨损超标、变形开裂的面板、开口侧板进行整体切割更换,替换板材采用原厂同规格高强度钢;对受力集中的刀具基座、盘体主梁,加装20mm厚补强筋板,提升结构刚度。所有破损焊缝采用分层对称焊接修复,有效抵消焊接应力,避免结构二次变形。(3)整体重构与调试,大修后对刀盘全域堆焊耐磨层,优化耐磨块交错排布方式,提升抗冲击性能,最后开展动平衡检测,将动平衡精度控制在G2.5级,确保刀盘高速掘进时受力均匀、转速稳定。

4.4 特殊地层刀盘磨损应急修复工艺

在砂卵石、孤石富集、软硬交替地层掘进时,刀盘易受瞬时冲击荷载,突发刀齿崩裂、局部板材破损、点状磨损等病害,需采用应急修复工艺,在保障安全的前提下快速恢复施工,压缩停工时长。(1)开展快速基面处理,彻底清理破损点位的松散渣土、碎屑,对舱内缝隙、破损缺口采用防水密封材料临时封堵,杜绝涌水涌砂风险,搭建安全作业环境。(2)实施应急加固修复,采用高韧性耐磨焊条对破损区域快速堆焊补强,更换全部失效刀具,在高磨损区域加装定制耐磨防护贴片,短时间内恢复刀盘切削与防护性能。(3)适配调整掘进参数,应急修复后下调15%掘进推力、放缓20%刀盘转速,降低刀盘负载,平稳适配复杂地层工况,待后续定期检查窗口期,再开展标准化深度修复作业。修复完成后全程监测掘进核心参数,将刀盘扭矩稳定控制在 $0.4 \sim 0.6 \text{ MN} \cdot \text{m}$,掘进速度维持在 $25 \sim 30 \text{ mm/min}$,有效规避修复部位二次受力破损。同时同步优化渣土改良配比,将膨润土注入量提升10%,降低土体摩擦阻力。现场实践表明,该应急工艺可将刀盘临时磨损修复工期缩短,大幅降低设备故障率与施工延误成本,有效保障复杂地层掘进施工效率与安全性^[5]。

5 工程案例:某城市地铁6号线盾构区间磨损分级修复工程

该区间采用 $\Phi 6280 \text{ mm}$ 土压平衡盾构机施工,掘进地层涵盖粉质黏土、中粗砂及卵石层,地层复杂多变。掘

进期间根据刀盘磨损程度,分级采用上述修复工艺,修复效果显著。掘进至210m时,刀盘出现均匀轻微磨损,盘面耐磨层平均磨耗3.5mm,无结构损伤,采用原位补焊+热喷涂工艺修复,修复后刀盘耐磨性能提升38%,后续400m掘进无新增磨损病害。掘进至650m时,受卵石层冲击影响,12把切刀磨耗超差、开口边缘钢板局部磨薄4mm,判定为中度磨损,通过更换刀具、局部贴板焊接修补,修复后刀盘平整度误差控制在1.5mm以内,掘进扭矩波动幅度降低30%。掘进至1100m时,刀盘出现局部耐磨层大面积脱落、基座轻微变形,实施局部结构补强与耐磨层重构,无需整机解体。通过分级精准修复,该项目刀盘单次维修时长平均缩短40%,刀具整体使用寿命提升42%,有效控制了施工成本与工期延误风险,为同类地层刀盘磨损修复提供了实操参考。

结束语:本文完整梳理了盾构刀盘各类磨损故障的表现形式与诱发机制,建立了基于磨损程度的分级检测评估体系,针对性形成适配不同损伤程度的标准化修复工艺,同时制定了复杂地层应急修复方案。工程实践表明,分级修复技术可有效解决不同类型刀盘磨损问题,显著缩短设备维修时长、延长刀具使用寿命。研究结果有效改善了盾构施工的设备运维水平,能够较好适配多变地层的掘进需求,对降低盾构施工故障风险、控制工程成本、保障隧道施工连续稳定推进具有实际工程应用价值。

参考文献

- [1]王显森.地铁盾构刀盘磨损检测及修复技术研究[J].建筑机械,2025(4):309-312+317.
- [2]李博.砂卵石地质条件下地铁盾构刀盘结构磨损及优化分析[J].工程机械与维修,2021(3):62-63.
- [3]李治中.地面小直径工作井快速修复盾构机刀盘技术[J].中国高新科技,2021(14):94-95.
- [4]黄俊.复合地层盾构机刀盘磨损修复实施与探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(9):105-108.
- [5]杨伦磊.盾构机刀盘再制造技术及工艺研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(1):81-83.