

# 盾构机铰接密封装置加工工艺及可靠性检测分析

殷红辉

上海城建隧道装备有限公司 上海 200137

**【摘要】**：本文以隧道工程建设为研究背景，对盾构机铰接密封装置加工工艺和可靠性检测方法进行研究。通过对密封圈制造工艺、中间盾加工精度控制、密封腔室表面处理等重要环节的分析，采用材料性能检测、压力检测、润滑系统检测等手段来总结密封性能主要影响因素及失效案例。研究结果得出，严格控制加工精度和材料性能可以保证密封可靠。

**【关键词】**：铰接密封装置；加工工艺；可靠性检测；盾构机

DOI:10.12417/2811-0528.26.09.077

随着城市轨道交通建设的快速发展，盾构法施工在地铁隧道工程中得到广泛的使用。铰接密封装置是盾构机的重要部件之一，其主要作用是将前盾和尾盾连接起来，在盾构机进行曲线掘进时提供必要的摆动自由度，防止外部泥水和地下泥沙进入盾体内部，保证施工安全和设备正常运转。一旦密封失效会造成泥水渗漏、设备损坏、工程停工等重大损失。因此，本文就铰接密封装置的加工工艺和可靠性检测展开分析，探究材料选择、加工精度控制、检测方法和失效改进措施，为同类工程提供技术参考。

## 1 工程案例

新加坡跨岛线（Cross Island Line，简称 CRL）是新加坡政府在 2019 年底宣布兴建的第八条地铁线路，全长约 56 公里，分三期建设，是新加坡首条连接东西南北四个方向的地铁线（如图 1 所示）。目前第一阶段工程中 CR102、CR108、CR112 三个标段全部采用盾构法施工。CR102 标段盾构隧道总长 5546m，用 4 台盾构机；CR108 标段上行线和下行线隧道各长约 650m，用 1 台盾构机；CR112 标段上行线和下行线各长约 1790m，用 2 台盾构机。地质条件比较复杂，盾构设备密封性能的要求也更高。

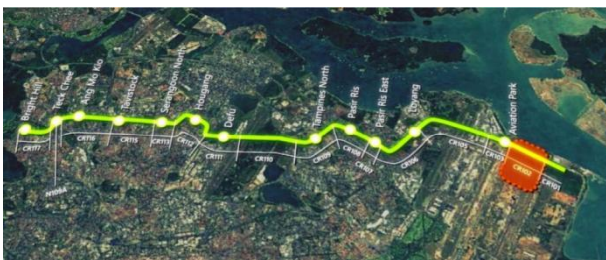


图 1 新加坡跨岛线地铁线路示意

## 2 盾构机铰接密封装置的加工工艺分析

### 2.1 密封装置主要部件材料选择与加工要求

铰接密封装置主要由齿形密封圈、紧急密封圈、中间盾 A

（滑动面）、中间盾 B（密封安装面）、铰接油缸等组成。齿形密封圈、紧急密封圈一般用高耐磨、耐油、耐老化的聚氨酯或者丁腈橡胶材料来制造，保证在高压泥水环境下长期保持弹性、密封性能。中间盾 A 为密封圈的滑动配合面，用高强度合金钢材料制成，加工时控制表面粗糙度和圆度公差，保证密封圈滑动顺畅，无偏磨。中间盾 B 用来安装密封圈，密封槽尺寸精度、表面光洁度影响密封圈安装稳定性、密封效果。加工过程中需要使用精密数控机床进行车削和磨削，表面硬化处理提高耐磨性和抗腐蚀性<sup>[1]</sup>。

### 2.2 密封圈的制造工艺

齿形密封圈、紧急密封圈的制造工艺影响到它的密封性能、使用寿命。齿形密封圈一般采用聚氨酯或者丁腈橡胶材料，用精密注塑或者模压成型工艺制造。成型时必须严格控制模具温度、压力、硫化时间，保证密封圈齿形结构的完整性、尺寸精度。齿形部位加工最重要，齿高、齿距、齿形角度均要符合设计图纸要求，才能保证和中间盾 A 滑动面良好接触。紧急密封圈是备用密封件，大多用丁腈橡胶或者高弹性橡胶制成，其制造工艺主要是控制材料的膨胀率和回弹性。产品由连续硫化而成，消除内应力，提高材料的稳定性、耐久性，每批密封圈出厂前均要进行硬度、拉伸强度和耐磨性能试验，保证满足工程使用要求。

### 2.3 中间盾 A 与中间盾 B 的加工精度控制

中间盾 A 是铰接密封圈的滑动配合面，中间盾 A 的加工精度直接影响到密封效果和使用寿命。中间盾 A 用高强度合金钢制作，结构件制作完成后，进行震动消除内应力，提高材料综合力学性能。精加工阶段用大型数控立式车床车削，严格控制内圆直径公差在 $\pm 0.25\text{mm}$ 以内，圆柱度误差不大于 $3\text{mm}$ 。滑动面表面粗糙度要小于 $Ra3.2\mu\text{m}$ ，减小密封圈的磨损。中间盾 B 用于安装密封圈，密封槽宽度、深度、槽底圆角按图纸加工，密封槽粗糙度 $Ra12.5\mu\text{m}$ 。中间盾加工完成后用激光跟踪仪进行尺寸检测，保证中间盾 A 和中间盾 B 的配合间隙符合

设计要求,防止安装后出现泄漏隐患,如图2所示。

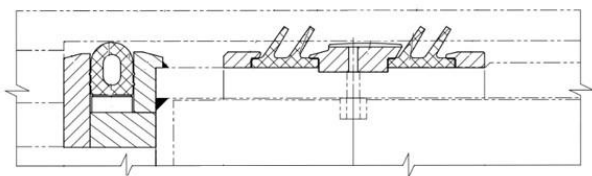


图2 铰接装置密封结构示意图

## 2.4 密封腔室的结构加工与表面处理

密封腔室是润滑油脂填充、压力密封的关键部位,结构加工和表面处理质量好坏直接影响到密封系统可靠性。密封腔室一般是由中间盾A和中间盾B装配而成的环形空间,为保证密封系统长期稳定运行,加工过程中必须严格控制两盾体的同轴度,以防止因相对转动而产生偏磨现象。滑动面(中间盾A)采用精密数控车削与磨削工艺,确保表面粗糙度达到 $Ra \leq 3.2 \mu m$ ,为密封圈提供良好的配合与运行界面;密封安装面(中间盾B)则需重点控制密封槽的宽度、深度及槽底圆角尺寸,保证密封圈的安装稳定性。润滑油脂注入孔和排气孔的加工位置要准确,孔口倒角要光滑,不能损坏密封圈。加工完毕后进行腔室压力测试,注入规定的油脂并保持压力,观察有无泄漏点,保证密封腔室整体密封性能满足设计要求<sup>[2]</sup>。

## 3 铰接密封装置的可靠性检测分析

### 3.1 密封性能的主要影响因素

铰接密封装置的密封性能受到材料性能、加工精度、装配质量、工况条件这四个因素的综合影响。材料上密封圈的硬度、耐磨性、耐老化性能以及回弹性都会影响到它与滑动面的贴合情况,如果材料硬度偏高,密封圈不能适应微小的变形,就会产生泄漏通道;如果硬度过低,就会造成过度挤压或者磨损。加工精度上,中间盾A滑动面表面粗糙度和圆度公差、中间盾B密封槽尺寸精度都会对密封效果起决定性的作用。表面粗糙度过大会加快密封圈的磨损,圆度误差过大会造成密封圈局部受压不均,产生偏磨或者间隙泄漏。

密封圈安装方向是否正确、润滑油脂是否充满、铰接油缸是否同步,都会对密封系统初始状态和长期稳定起着影响。工况条件上隧道掘进时地质变化、泥水压力变化、铰接角度变化、温度变化都会对密封性能产生影响。在曲线段掘进的时候,铰接装置要承受较大的径向力和轴向力,密封圈容易出现不均匀变形,增大泄漏风险。因此,需要从设计、制造到使用全过程严格控制各个影响因素,保证密封装置可靠运行。

### 3.2 密封圈材料性能测试

密封圈材料性能测试是保证密封圈长期可靠工作的重要前提。硬度测试一般用邵氏硬度计,按GB/T 531.1或ISO 7619-1标准进行,检测密封圈各个部位的硬度均匀性,保证密封圈既有足够的支撑力,又有良好的弹性变形能力。耐磨性能测试采用阿克隆磨损试验机或者DIN磨耗试验机,模拟密封圈和中间盾滑动面长期相对运动时的磨损情况,用磨损体积或者质量损失来评价材料的耐磨寿命。老化性能测试用热空气老化试验箱,在设定温度(一般为70°C或100°C)下连续放置若干天(72h、168h),测试老化前后材料的拉伸强度、断裂伸长率和硬度变化率,评价材料在长期高温、高压环境下性能衰减的情况,只有三项指标均符合设计要求,密封圈才能投入实际工程应用<sup>[3]</sup>。

### 3.3 密封腔室压力测试与泄漏检测

密封腔室压力测试是检验铰接密封装置装配质量和密封性能的重要方法,厂内安装完成后铰接密封圈还未建立背压支撑,为避免高压测试对密封圈造成异常挤压或损伤,测试压力应选较小值通常设定为0.1 MPa-0.3 MPa,测试时向密封腔室注入润滑油脂并保压观察压力降要控制在规定的范围内。若测试过程中出现泄漏主要从两方面排查原因。一是中间盾A与中间盾B的圆度是否超差,壳体圆度误差过大会导致密封圈局部受压不均形成间隙泄漏;二是密封圈安装过程中是否有异物侵入如金属屑砂粒等,附着在密封面或密封槽内会破坏密封副贴合效果,造成点状或线状泄漏通道。通过严格控制壳体加工精度和装配环境清洁度,可有效降低厂内测试阶段的泄漏风险,为后续现场应用提供可靠保障。

### 3.4 润滑系统功能验证

润滑系统功能验证属于保证铰接密封装置长久稳定工作的重要部分。验证内容有润滑油脂泵送能力、管路畅通性、分配器工作状态、密封腔室油脂填充效果。先启动润滑油脂泵,检查泵的工作压力和流量是否达到设计值,一般工作压力为0.3 MPa-0.8 MPa,单次供油量要满足密封腔室补充的要求。最后检查各润滑支路是否畅通,分配器是否按设定比例均匀地把油脂分配到各个密封腔室。用观察法或压力法检验油脂填充效果,即观察密封圈周围有无均匀的油脂流出来,或者监测密封腔室压力是否随供油周期稳定波动。对于配有行程传感器的铰接油缸,还要检验润滑系统和油缸动作的联动逻辑,保证铰接装置运动过程中润滑油脂能及时补充,减小密封圈和滑动面的干摩擦,延长密封装置的使用寿命。

## 4 工程应用中密封装置的失效案例分析及改进建议

在国内某个标段的盾构施工过程当中,铰接密封装置出现了泥水渗入等失效的现象,现场应急处理措施主要依靠给紧急

密封圈充气增压,同时加大润滑脂的注入量来封堵渗漏通道。要是失效情况比较严重且没办法恢复,在最极端的情况下只能采取把铰接装置临时焊死的方式来维持掘进,在工程结束之后再返厂进行维修,对施工进度和设备安全造成了比较大的影响。

经过拆解分析并且追溯制造记录,铰接密封失效的主要原因能够归纳为下面这三类,第一是密封圈长时间运行之后出现了老化磨损的情况,实际测量齿形密封圈局部磨损深度达到设计下限值以上,材料硬度偏高使得弹性补偿能力下降,造成密封比压不足;第二是铰接行程超出了限定范围使用,因为在隧道曲线段掘进时摆动幅度过大,超过了密封装置设计的适应范围,从而造成密封圈出现异常挤压和偏磨的问题;第三是铰接油缸或者液压系统出现故障,导致铰接装置动作不同步,使得密封副局部受力过大,加速了密封失效。密封滑动面加工粗糙度超过标准、润滑油脂干涸结块等问题也加剧了密封圈的磨损。

## 参考文献:

- [1] 刘修振.盾构机铰接密封渗漏的处理与研究[J].广东建材,2025,41(10):148-150.
- [2] 夏利民,丛晓勤,王迎光,等.盾构掘进机主驱动聚氨酯密封件的制造与性能[J].聚氨酯工业,2023,38(06):30-33.
- [3] 王哲,周俊,何雷,等.基于响应曲面法的盾构机单唇形铰接密封性能研究[J].机床与液压,2023,51(08):73-79.
- [4] 袁玮皓.异型断面掘进机球型铰接结构试验装置研究[J].建筑科技,2020,4(04):3-5.

针对上面提到的问题给出下面这些改进建议,一是要加强密封圈材料入厂时候的复验工作,严格把控硬度、老化性能等关键指标,以此确保密封圈拥有良好的耐磨性与弹性补偿能力;二是要优化密封腔内壁的加工工艺,保证滑动面粗糙度能够符合  $Ra \leq 3.2 \mu m$  的设计要求,从而减少密封圈出现异常磨损的情况;三是要完善铰接系统的状态监测工作,增设行程监测与油缸同步控制功能,防止铰接行程出现超限使用的状况;四是要定期检测密封的磨损情况,建立全生命周期管理档案,结合润滑系统压力监测与自动补脂装置,确保密封腔室一直处于良好的润滑状态,提前进行预警并防范失效风险。

## 5 结语

综上所述,本文根据新加坡跨岛线工程案例,对盾构机铰接密封装置加工工艺及可靠性检测方法进行了系统的分析。密封圈材料性能、中间盾加工精度、密封腔室表面处理是影响密封效果的主要因素。经由严格的材料测试、压力检测和润滑系统检验,可以明显加强密封装置的可靠性。