

# 富水复杂环境下城市轨道交通盾构隧道防水措施研究

王少鹏

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

**摘要:** 现阶段,随着科学技术的不断发展进步,在城市交通建设中所使用的大量机械设备有效提升了施工质量和效率。在轨道交通设计中,应用盾构机能够缩减施工周期,减少人力成本,实现企业经济效益的提升。而在轨道盾构隧道施工中因地质松散、水位高、水系连通紧密,将对盾构隧道施工安全性以及运营防水性能产生影响。基于此,本文以城市轨道交通盾构隧道防水设计与施工为主要研究对象,依托某市轨道交通盾构隧道施工实际案例阐述分析盾构防水设计要点、施工技术标准、施工重点和防水技术应用,为类似工程提供参考借鉴。

**关键词:** 富水地层; 城市轨道交通; 盾构隧道; 隧道防水

## 引言

城市的快速发展,需要完善的道路交通运输体系为城市居民提供出行服务。当前轨道盾构隧道逐渐向高压、大直径方向发展。在轨道交通盾构隧道施工中,除了需要做好施工质量管控外,还需要充分考虑施工环节以及轨道实际投入运营后的渗漏问题。因此,需要针对交通盾构隧道防水问题进行深入研究,从大量既有案例中吸取经验,促使盾构隧道防水施工进一步提升发展。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

某市轨道交通1号线中华西路站~安谷路站区间起于中华西路站,线路从中华西路站出站后,沿现状彩虹二路地下敷设,下穿渭河后在转入世纪大道与安谷路路口进入安谷路站。区间盾构隧道设计为两分离盾构法隧道单洞,区间计里程:FYDK12+830.819~FYDK14+885.199、FZDK12+830.819~FZDK14+885.199,区间隧道左、右线长分别为2027.495m和2054.380m。区间两隧道线间距13m~18m,线路水平最小曲线半径为400m,最大纵坡25%,区间隧道洞顶覆土11.08m~30.29m。

### 1.2 地质情况

中华西路—安谷路区间自北向南依次通过渭河二级阶地、河槽及漫滩、一级阶地,渭河一、二级阶地区地形平坦,地势开阔,人口密集,高楼林立,一级阶地地面高程在385~390m之间,二级阶地地面高程在393~400m之间;河漫滩经人工改造,地面高程在384~386m。根据钻探揭露,沿线地层自上而下依次为:第四系全新统:1-1人工填土,2-1-1冲积黄土状土、2-2粉质黏土、2-4细砂、2-5中砂、2-6粗砂、2-8圆砾,上更新统:3-1新黄土,3-2残积古土壤层,3-4冲积粉质黏土、3-6细砂、3-7中砂、3-8粗砂、3-9砾砂等。区间隧道洞身

范围内地层主要为:富水粉细砂层及圆砾层、新黄土、粉质黏土等,地下水位均位于隧道以上。

### 1.3 盾构机主要性能参数

本区间采用两台中铁装备CTE6250泥水平衡盾构机进行施工,主要性能参数如下:开挖直径最大值为6.28m,总重量约550t,总长110m,配置功率为1700KW,掘进扭矩最大值为7.569kN·m,推进力最大值为40720kN,刀盘转速最大值为3.2r/min,掘进速度最大值为80mm/min。刀盘开口率为50%,刀盘安装中心鱼尾刀1把、中心撕裂刀2把、焊接撕裂刀40把、可更换撕裂刀19把、保径刀12把、超挖刀1把。刀盘上装有刀具磨损探测装置一组。

## 2 盾构隧道防水设计

### 2.1 防水技术标准

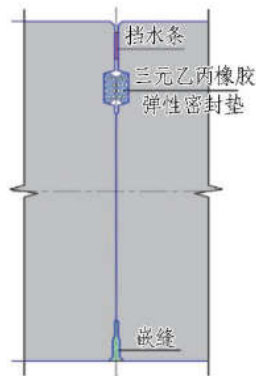
盾构隧道设计中所选用防水标准通常为二级,主要原因为外水压较低,不做二次衬砌、外防水层设计。近些年,随着隧道水压不断增加,防水问题日益凸显,防水设计和规范间存在不协调,在高水压情况下,需要进一步研究防水标准、防水等级以及防水设计方案。现阶段,需要适当调整不同防水等级渗漏水量值,将部分“可选”“宜选”措施改为“必选”,确保隧道施工达到防水等级渗漏水量标准要求。若水压出现超高情况,选择全面封堵方案将增加项目造价成本,因此,可以结合项目实际情况,探索新方案,例如:以导为主、以堵为辅的理念。加强二次衬砌、外防水层、接缝处填充密封剂技术的应用,提升隧道防水效果。在高水压环境下,提升混凝土结构抗渗性能,做好接缝处理,保证施工质量<sup>[4]</sup>。

### 2.2 接缝防水体系

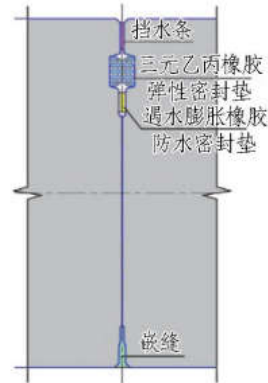
当前,我国隧道防水体系主要包括四种。第一,外侧设置单道橡胶密封垫(图一)。第二,外侧设置单道

橡胶密封垫，并在密封垫邻近位置设置遇水膨胀密封垫（图二）。第三，外侧设置单道橡胶密封垫，内侧设置遇水膨胀橡胶密封垫（图三）。第四，内外设置两道橡胶密封垫（图四）。图三，图四防水体系属于双道防水，而图二是否属于双道防水，业内仍存在争议。从理论上分析，在橡胶密封垫紧邻位置设置遇水膨胀防水条能够起到辅助防水效果，而管片防水槽退台设计初衷为防止混凝土接触面发生开裂情况，并非为安装防水条所预留的空间。同时，该设计无法适应张开量和运营期变化，因此不可视为双道防水设计。图三、图四双道防水

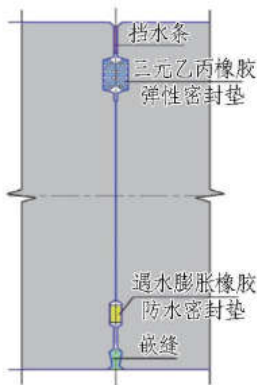
具有管片拼装平稳闭合、均匀受力优势，将内外密封垫视为压缩弹簧，当管片闭合，优先与密封垫接触，相比于单道防水，进行管片拼装更加平稳。当发生接缝处渗漏情况，可向密封垫间腔体填充止水材料，在内水压隧道中可以灵活应用<sup>[8]</sup>。防止外侧密封垫受隧道污水、气相侵蚀而产生影响。双道防水设计同样存在缺点：外侧出现渗漏情况，环纵缝外围包裹大量水份，无法确定判断渗漏点。同时增加密封垫腔体渗透压力，进而导致螺栓出现渗漏情况。增加管片压缩力，无法确保紧固连接。



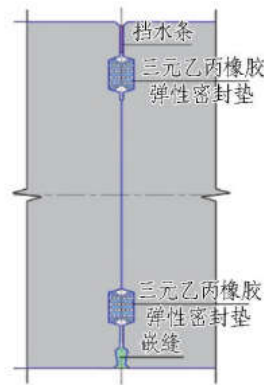
图一：外侧设置单道橡胶密封垫



图二：外侧设置单道橡胶密封垫+邻近位置设置遇水膨胀密封垫



图三：外侧设置单道橡胶密封垫+内侧设置遇水膨胀橡胶密封垫



图四：内外设置两道橡胶密封垫

### 2.3 管片防水构造设计

现阶段，盾构隧道所应用挡砂条包括遇水膨胀和海绵两种类型，遇水膨胀挡砂条设计形式为L形，其设计在管片拼装好一侧，防止挡砂条出现下一管片拼装好前出现遇水膨胀情况。其次，设置遇水膨胀防水条，当前防水条多为框形设计，管片拼装施工时，千斤顶一侧遇水膨胀防水条外露<sup>[9]</sup>。盾构推进时，隧道拱底易出现积水情况，继而导致防水条出现预先膨胀情况，难以确保施工质量。因此，需要根据挡砂条L形结构工程经验，把遇水

膨胀止水条设计成L形。

### 2.4 接缝设计与施工误差控制

接缝处防水效果主要受密封垫压密效果影响。接缝处张开量、错台量将对压密程度、压密形态产生直接影响。因此，在隧道防水方案设计环节，需要充分考虑隧道施工以及正式投入运营后接缝处张开量和错台量最大值，考虑密封垫长期受应力作用产生松弛程度和潜在劣化影响，确保隧道防水性能。通常情况下，隧道防水性能以理论水压2倍-3倍值进行设计，避免设计方案不合理

对地铁隧道后期使用产生影响,提升建筑物使用年限<sup>[5]</sup>。

通常,施工方案设计时应当根据管片制造误差、拼装质量控制以及运营变形等因素充分考虑张开量和错台量设计值。但是,当前,在多数盾构隧道防水设计中多根据历史经验进行接缝设计,并未形成统一标准规范,造成设计取值存在差异。考虑到隧道外界影响因素多种多样,需要设计单位、施工单位,对隧道项目周围实际情况充分考虑,结合既有案例设计张开量和错台量数值<sup>[6]</sup>。施工单位严格按照设计方案进行施工,做好质量检查,保证管片接缝施工质量,避免出现过大管片拼装错台。另外,对于张开量和错台量的设计应当结合密封垫防水性能,量测部位应当以接缝外侧或密封垫处为准。但在实际施工时,当管片拼装作业结束后,无法准确测量管片外侧、密封垫处张开量和错台量。根据隧道施工标准和验收规范,只能测量管片内侧。考虑到受管片拼装、外荷载作用影响,实际数值存在较大差异,因此,在施工时需要着重解决该问题<sup>[7]</sup>。

### 3 泥水盾构不同阶段参数控制与防水施工要点

3.1 第一阶段掘进。第一阶段掘进为刀盘开始切削掌子面至盾尾进入洞门结束。泥水平衡盾构施工前,配制一定比重、黏度、足够量的泥浆供盾构循环使用。始发洞口构建泥水平衡,对于洞口的设置,应当确保具备良好的止水条件,避免井内涌进大量泥水,确保泥水仓中水压达到平衡和稳定。在第一阶段掘进时,因洞口所能够承受的压力比较低,为确保泥水正常输送,需严格控制泥水仓输出压力,不得高于盾构中部水压。另外,该项目工程加压建仓工作主要包括以下步骤:首先,保证洞口帘布完全和切口环搭接牢固,并确保刀盘和土体间隙保持在5厘米以上。其次,将盾构机推入密封钢环内。再次,加压建仓开展过程中,使用油脂泵将油脂注入到密封钢环内,保证防水效果。最后,建仓作业开展前,需要应急泵运输安装在施工现场。

3.2 始发段盾构掘进参数按照“小推力、中转速、小贯入度”原则,泥水仓顶部压力按照“从小到大逐步增加,确保掌子面稳定,洞门密封系统不出现喷涌”为原则设置,掘进过程中根据洞门密封的渗漏情况、仓内液位的波动情况、地面沉降等参数进行调整,确保掌子面的稳定。该项目工程盾构掘进压力设定以满足出渣和不漏浆为主,压力设定范围取0.6bar~0.9bar。推力、速度控制。盾构机始发掘进时,推进速度控制在10~25mm/min,油缸总推力不大于1000t。循环泥浆控制及渣土处理。因始发段处于中砂层,且地下水位较高,故始发段泥浆比重控制在1.10~1.15g/cm<sup>3</sup>,粘度19s~22s,进出泥

浆循环流量需与掘进速度相匹配。

掘进过程中,注意控制盾构机姿态,防止出现“栽头”现象,造成管片出现过大错台出现渗漏风险。

3.3 第二阶段掘进参数。第二阶段为盾构刀盘出加固体至盾尾完全出加固体进入正常掘进状态。对于压力设定。第二阶段掘进盾构穿越地层为中砂层,自稳性较差,为确保掌子面的稳定性,气仓压力的设定为1.0~1.2bar,并根据实际掘进情况、仓内液位的波动情况、地面沉降监测报告等对压力进行适当的调整,对推力、速度进行控制。第二阶段盾构掘进需要的反力主要是通过反力架提供,为避免推力过大造成反力架的位移,故推力应根据盾构掘进进度逐步增加,最大推力控制在1400t以内。根据类似施工经验,第二阶段盾构掘进时刀盘转速控制在1.0~1.2rpm/min,掘进速度控制在15~30mm/min,同时根据掘进过程中出渣情况、循环泥浆流量、同步注浆等因素进行调整,确保盾构掘进速度和其他参数相匹配。因始发段处于中砂层,故始发段泥浆比重控制在1.15~1.20g/cm<sup>3</sup>,粘度20s~23s,进出泥浆循环流量需与掘进速度相匹配。

掘进过程中要尽早进行洞门封环注浆,及时稳固管片,并做好管片左、右两侧拉紧装置,防止后期拆除管片时卸力,造成止水条松动,出现渗漏水情况。

3.4 第三阶段掘进参数。对于压力的设定。第三阶段掘进盾构穿越地层为中、细砂层,为确保掌子面的稳定性,气仓压力的设定为1.2~1.3bar,具体情况根据线路纵坡每变化1m进行主动调整一次,设定原则为地层静止土压力增加0.2~0.3bar。并根据实际掘进情况、仓内液位的波动情况、地面沉降监测报告等对压力进行适当的调整,对于推力、速度进行控制。第三阶段,此时反力架仍承担盾构掘进的大部分反力,为防止反力架失稳最大推力控制在1600t以内。第三阶段盾构掘进时刀盘转速控制在1.1~1.3rpm/min,掘进速度控制在25~45mm/min,同时根据掘进过程中出渣情况、循环泥浆流量、同步注浆等因素进行调整,确保盾构掘进速度和其他参数相匹配。泥浆比重控制在1.10~1.20g/cm<sup>3</sup>,粘度18s~25s以上,进出泥浆循环流量需与掘进速度相匹配。

3.5 掘进过程中加强施工管理,需做好管片进场验收、止水条粘贴牢固、防止管片拼装错台控制,盾构姿态缓慢纠偏、预防管片磕碰等,防止出现渗漏等问题。

## 4 轨道交通盾构隧道防水施工技术

### 4.1 防水材料安装施工

首先,对防水材料和质量的把控。当前,在隧道防水施工中,常用密封材料主要为多孔型橡胶密封垫和遇

水膨胀密封垫<sup>[1]</sup>。在施工前，需要严格把控密封垫材料质量，确保防水施工质量。当前，部分生产厂商在原料内添加再生胶，以次充好，若选用不良密封垫，将导致施工期间或者隧道运营期间出现密封垫断裂、破碎情况。部分厂家生产工艺不良，调配不佳，难以有效控制成品硬度，若冬季施工选用该品质密封垫，将对管片拼装产生影响。另外，在交通隧道防水施工时常见问题主要表现为：粘贴密封垫时出现缺口、鼓起、偏移等情况；未对槽口进行彻底地清理，未及时对孔眼进行修补；在雨天进行粘贴，防雨措施不到位；吊运安全管控不到位，对材料造成损坏。对于上述问题，在隧道防水设计环节，不仅需要考虑方案可行性，还需要全面分析施工便利性，强化施工人员质量意识，促使其严格按照标准要求施工。在对封顶块进行拼装时，出现角部渗漏、堆积问题将对交通盾构隧道防水施工质量产生极大的影响。主要原因为：当插入封顶块时，封顶块上密封垫将和邻近密封垫出现严重挤压，将角部推出变形。同时，密封垫角部为孔洞实心，难以压缩闭合，造成封顶块位置T字缝出现张开量。角部存在气囊效应，导致管片无法闭合。因密封垫严重堆积，造成角部存在集中应力，进而导致混凝土出现破碎渗水情况<sup>[2]</sup>。针对该问题，需要从材料、工艺以及设计方面入手。在产品方面，可选择直条胶条，以45°方向进行斜接，确保角部位置密封垫槽间、孔间完全、部分相通，降低角部应力，有效提升角部防水性能。在施工方面，则可选择涂刷减磨剂，降低摩擦力作用效果。在设计方面。角部可设计粘贴橡胶薄片。但对于该设计方案的应用需要根据实际情况。若选择使用橡胶薄片，将对遇水膨胀密封垫作用性能产生影响，影响混凝土包间覆盖，无法有效挤密填平角部缝隙。若在管片四角粘贴薄片，将造成拼装作业结束后纵缝、横缝存在两层薄片，将对防水性能产生影响。因此，在实际的设计环节中，应当结合实际情况，科学设计，例如：采取对角粘贴方式，保证纵缝、横缝仅存在一层薄片<sup>[3]</sup>。

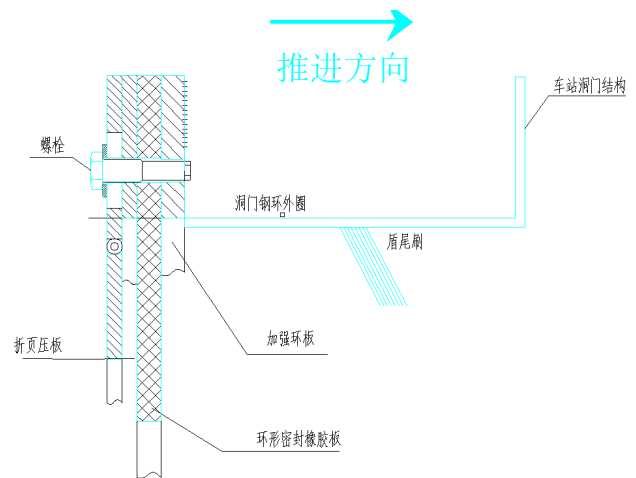
#### 4.2 端头降水施工

端头降水可有效防止盾构始发段出现涌水涌砂现象，造成管片错台变形渗漏、地面塌陷等风险，泥水盾构端头降水主要目的为：第一，减小盾构井附近土体内地下水因素所产生的影响，便于盾构隧道掘进施工。第二，通过降低土体中含水量，能够有效提升基坑中土体的强度，从而对坑底隆起、围护结构加以有效保护，避免基坑地表出现过度沉降情况。第三，保证盾构始发前，降水深度应在盾构隧道底1m以下，保证洞门凿除时

安全施工。对于降水井的设置。在始发端周围设置6~8口降水井，位于隧道端头20m范围，均匀设置，深度不小于隧道底部10m，始发前进行降水试验，确保降水后控制水位在隧道底板1米以下。值得注意的是，降水井施工应在端头加固完成28天以后进行，避免降水井施工对端头加固质量造成影响；盾构始发前，完成降水试验并合格；洞门凿除及始发阶段，应配备应急电源，确保水泵正常运行，控制水位在设计控制水位以下。

#### 4.3 延伸洞门钢环安装

泥水盾构安装延伸洞门钢环，可为始发阶段泥水仓压力建立提供条件，从而稳定地层掌子面，防止掘进过程中出现超挖塌陷、隧道管片变形、严重错台或渗漏等严重问题。传统的预埋洞门环板+橡胶帘布的洞门密封装置无法保证洞门密封性，盾构应在脱出加固体前需将压力设置为正常地层压力，理论压力约为1.0~1.2bar，此时盾尾后止水环长度过短，通过延长钢环增加止水距离。通过综合比选，本工程采用了预埋钢环外加延伸止水钢环，延长钢环内安装两道洞门刷作为始发洞门的密封装置，预埋钢环与延伸止水钢环采用焊接方式连接。



图五：延长钢环设计断面图

中安区间始发洞门需要先破除，在洞门破除完后在预埋洞门环外加装一个洞门加强环，使加强环紧贴洞门，加强环中心线与隧道中心线重合，防止盾构机在掘进过程中损坏加强环中的钢丝刷，使加强环的密封效果不佳，从而起不到防止涌水涌砂的作用。始发前，首先在安装好的洞门加强环内焊接钢丝刷，盾尾刷需焊接紧固。安装好后派人进行手涂盾尾油脂，手涂盾尾油脂可以保证空腔内盾尾油脂的密实性和饱和度。钢丝刷外增加一圈止水帘幕，起到防水作用。止水帘幕后加装一圈折页压板，起到防止止水帘幕后翻的作用。始发时，由于地层地下水位较高，刀盘在破洞门的时候对土地的扰

动,从而有大量地下水涌出,大量的水土流失造成洞门坍塌。所以当刀盘开始切除土体时,洞门加强环起到一定密封的效果,钢丝刷和填充密实的盾尾油脂可将地下水阻挡在地层内,防止水土流失<sup>[10]</sup>。掘进过程中同时向洞门加强环上的预留注入口中注入盾尾油脂,使盾体和加强环之间保持密实。

#### 4.3.1 加强环安装

区间盾构始发掘进前,将加工好的洞门加强环安装在洞门外侧,安装前将待安装部位上的杂物清理干净,使洞门加强环一侧与墙面之间紧密贴合,安装底座时确保洞门加强环与底座严密契合,保证其安装牢固可靠。底座和加强环之间焊接牢固,底部安置在平整的钢筋混凝土底板上,同时与洞门侧墙埋件焊接固定。中间的折页压板安装时要精确,防止盾构机进洞时损坏到洞门加强环。安装完成后再次进行复测,使洞门加强环的圆心与隧道中心线重合,调整好轨道与洞门加强环底部的距离,在轨道与洞门加强环之间焊接连接钢轨,作用是可使盾构机顺利进入洞门加强环内。在加强环上均布预留四根油脂注入孔,孔口预留对丝球阀,用以后续油脂补充加注密封。在折页压板和洞门加强环中间加入止水帘幕,止水帘幕的作用是可以起到第二层止水效果。

4.3.2 安装精度控制:加强环安放到位后,必须经过测量人员测量校正,保证加强环定位的精确性。

4.3.3 导轨安装:在加强环安装完成后,为防止始发盾构机栽头,需要从始发基座与洞门做导轨,导轨距离掌子面距离不大于1.2m。

4.3.4 始发掘进施工:洞门环宽度800mm、加强环宽度800mm,刀盘宽度800mm,则盾构始发后,刀盘贴上掌子面时已通过加强环结构,加强环密封装置即可生效,在刀盘切削掌子面过程中,即可开始建立泥水仓压力,维持掌子面稳定。同时开始启动外接盾尾密封油脂补注系统,维持加强环内油脂密封压力稳定在22bar以上。

4.3.5 在盾构掘进施工中24h观测洞门环位移和变形情况,如果发现异常,立即停止掘进,对洞门钢环进行加固封堵处理,必要时用洞门植筋方式进行加固;盾构掘进时加强对掘进参数的管控,如果掘进参数出现异常波动且波动比较频繁,停止掘进查明原因,处理完成后方可恢复掘进。

#### 4.4 管片拼装

应按管片拼装技术要求确定的顺序进行拼装。一般先拼装底部管片,然后自下而上左右交叉安装,最后拼装楔形块。拼装中每环管片应均布摆匀并严格控制环面高差。管片拼装前,先在每块管片螺栓孔位置做好标

记,以便于管片的定位。管片拼装时,应先将待拼管片区域内的千斤顶油缸回缩,满足管片就位的空间要求。在进行管片初步就位过程中,应平稳控制管片拼装机的动作,避免待拼管片与相邻管片发生摩擦、碰撞,而造成管片或弹性密封垫和挡水条的损坏<sup>[11]</sup>。管片初步就位后,通过塞尺与靠尺对相邻管片相邻环面高差进行量测,根据量测数值对管片进行微调,当相邻管片环面高差达到要求后,及时靠拢千斤顶,防止管片移位。千斤顶顶紧后进行管片连接螺栓的安装。前一块管片拼装结束后,重复上一步骤,继续进行其它管片的拼装。管片拼装作业需要严格按照标准要求开展。为确保施工质量和效率,需要做好前期技术交底工作,使全体施工人员充分掌握管片拼装作业流程和作业标准,提升施工进度。提前将管片运输至施工现场。若本环管片拼装作业结束前,未将管片运输至拼装区,需要将管片车行驶至拼装区,便于后续施工作业有序开展。同时,在施工过程中,需要准确安装管片,特别是对于第一片管片安装位置的施工,需要严格把控,避免对后续管片拼装施工产生影响。检查管片拼装平整度和拼装环椭圆度。各管片拼装作业结束后,应当第一时间使用千斤顶进行固定,避免盾构机移动时导致管片发生位移。衬砌拼装作业完毕后,应当及时将环向、纵向螺栓拧紧。值得注意的是,在拧紧螺栓时需要密封圈穿入情况进行检查,不可存在遗漏情况。当衬砌脱出盾构机尾部时,需要对环向、纵向螺栓进行二次拧紧。开展下一环拼装施工前,需要对相邻管片拼装施工质量进行检查,对于未拧紧的螺栓进行复紧处理。第五,在管片拼装的过程中如果需要调整管片之间的位置,不能在管片轴向受力时进行调整,以防止损坏防水橡胶弹性密封垫<sup>[12]</sup>。

另外,为确保防水施工质量,需要严格控制管片拼装允许偏差,高程和平面 $\pm 50\text{mm}$ ;环缝张开 $< 2\text{mm}$ 、纵缝张开 $2\text{mm}$ ;每环相邻管片平整度 $4\text{mm}$ ;纵向相邻环面平整度 $5\text{mm}$ ,衬砌环直径椭圆度 $5\%$ ;管片混凝土最大允许裂度为 $0.2\text{mm}$ ,管片拼装完成后应按要求填写盾构管片拼装记录,做好相关记录。

#### 4.5 同步注浆

首先,对于注浆压力的控制。为保证管片与地层间隙有效充填,注浆作业不会对管片拼装结构造成损坏,应当结合施工现场实际情况和既有案例经验做好注浆压力计算工作。该项目工程最终确定注浆压力范围: $0.2 \sim 0.3\text{MPa}$ 。并结合经验公式和施工经验,确定注浆量为理论体积 $1.5\text{倍} \sim 1.8\text{倍}$ 。注浆量的计算公式:

$$Q = V \times a$$

式中V表示计算空隙量。刀盘开挖的外径是6.28m,管片的外径是6.0m,所以环形空隙的理论体积为 $V = (6.28 \times 6.28 - 6.0 \times 6.0) / 4 \times 3.14 \times 1.5 = 4.05 \text{m}^3$ 。a表示注浆率。注浆率一般是从几方面考虑,包括注浆压力产生的压密系数、地质情况的土质系数、施工消耗系数、超挖系数等,根据设计资料及施工经验,本区间a-注浆率可取1.5~2。所以根据计算公式得

$$Q = 4.05 \times (1.5 \sim 2) = 6.08 \sim 8.1 \text{m}^3$$

即注浆量为6.08~8.1m<sup>3</sup>/环,同时根据注浆压力进行适当调整。

其次,控制注浆速度。同步注浆速度应与掘进速度相匹配,按盾构完成一环1.5m掘进的时间内完成当环注浆量来确定其平均注浆速度。拟定注浆指标如表1所示:

表1: 同步注浆配合比

水泥 (kg)	粉煤灰 (kg)	膨润土 (kg)	砂 (kg)	水 (kg)	外加剂
80~200	240~380	50~60	600~780	460~600	根据试验加入

同步注浆施工作业需要对浆液力学性能充分分析,要求胶凝时间不得少于6h,以6h~8h为最佳。结合施工现场地层条件、盾构机掘进速度,经过试验和变更配比方案,对胶凝时间进行调整。强透水地层需要进一步开展试验操作,调整配比或选择添加其他添加剂,缩减胶凝时间。以注浆压力、注浆量相关指标确定注浆标准,以注浆量至设计值90%为最佳。

#### 4.6 二次注浆

施工时根据地表沉降监测反馈信息,结合洞内采用其他物探手段探测管片衬砌背后有无空洞的方法,综合判断是否需要二次注浆。二次注浆一般在管片拖出盾尾5~7环后进行二次注浆。二次注浆采用水泥~水玻璃双液浆作为注浆材料,浆液配比为1:1<sup>[13]</sup>,通过二次补强注浆能对同步注浆起到进一步补充和加强作用,同时也对管片周围的地层起到充填和加固作用。

二次补强注浆采用自备的KBY-50/70双液注浆泵或盾构机自带柱塞泵。二次注浆压力一般为0.3~0.5Mpa。补强注浆一般情况下则以压力控制,达到设计注浆压力则结束注浆,视注浆效果可再次进行注浆。

#### 结束语

综上所述,本文以某轨道交通盾构隧道在近邻渭河,富水复杂环境下防水设计与施工为案例展开分析研究,在实际的防水方案设计中需要结合现场实际情况,合理设计防水体系,严格把控接缝张开量和错台量,确保密封垫作用得以充分发挥。过程中及时开展同步注浆

和二次注浆时,并控制好注浆压力、注浆速度,确保注浆作业质量,保证盾构隧道防水施工良好效果。另外,要重视洞门钢环密封安装和端头降水处理工作,严格按照标准规程开展管片拼装作业,开展精细化管理,保证施工安全、质量,从而进一步提升企业经济效益和社会效益。

#### 参考文献

- [1]包小华,袁槐岑,陈湘生,等.水下盾构隧道建造与运维技术研究现状与展望[J].现代隧道技术,2024,61(01):16-35.
- [2]李继丁.地铁盾构隧道渗漏水病害的成因与措施探讨[J].安徽建筑,2022,29(12):153-154.
- [3]关则廉,吴政,高利平.盾构隧道管片接缝密封垫防水性能及受施工荷载影响研究[J].运输经理世界,2022,(36):68-70.
- [4]张亚洲,姚占虎,魏驰,等.盾构隧道防水技术主要问题探讨及展望[J].隧道建设(中英文),2022,42(11):1832-1843.
- [5]崔光耀,蒋梦新,宁茂权,等.矩形盾构隧道管片弹性密封垫防水性能截面型式优选研究[J].高速铁路技术,2022,13(05):14-19.
- [6]崔庆龙,杨林松,曹鸿,等.不同构型盾构隧道管片密封垫防水性能分析[J].施工技术(中英文),2024,53(03):28-34+48.
- [7]雷震宇,陆明,周雨龙,等.高水压盾构隧道新型管片接缝密封性试验研究[J].中国建筑防水,2023,(04):46-50.
- [8]张稳军,刘望.富水砂层超大直径盾构隧道接缝密封垫防水性能研究[C]//中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府.2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(桥梁工程与隧道工程篇).天津大学建筑工程学院,2022:7.
- [9]代显奇,王军,李占先,等.盾构隧道渗漏水病害成因与防治现状[J].人民长江,2022,53(11):186-192.
- [10]刘超.盾构管片接缝防水性能试验及影响因素分析——以杭州某地铁盾构隧道工程为例[J].工程技术研究,2022,7(07):16-19+42.
- [11]李明.高水压工况下轨道交通盾构区间管片接缝密封垫设计与优化[J].隧道与轨道交通,2021,(S2):66-70.
- [12]刘洋.盾构管片接缝防水研究[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2023,25(06):14-18.
- [13]鲁志鹏,马天宇,谢宏明,等.大直径越江盾构隧道管片新型接缝双道密封垫防水性能研究[J].铁道标准设计,2022,66(08):109-116.