小洞径水利盾构隧洞内衬施工技术重难点分析

胡明杰
广州新珠工程监理有限公司　广东　广州　510610

摘　要：针对内径小于4m小洞径水利盾构隧洞内衬施工空间狭小、作业条件受限的工程特点，本文结合现场施工工况，分析内衬施工工况特点，围绕钢筋安装、模板支设、混凝土浇筑养护等主体工序，梳理通风排水、测量精度、受限空间安全管控方面的技术难点，剖析开裂、渗漏、空鼓等常见病害的形成原因与检测制约条件，提出工艺优化与病害处置对策。研究可为同类小洞径水利盾构隧洞内衬施工的质量控制、风险防控提供工程参考。

关键词：小洞径；水利盾构隧洞；内衬施工；施工重难点；质量控制；病害治理

引言：小洞径盾构隧洞广泛应用于引水、输水水利工程，内衬是保障隧洞防渗耐久与结构受力的关键部分。受隧洞断面尺寸约束，洞内设备作业、人员操作空间有限，施工工序交叉多，质量与安全管控难度较大。现阶段大直径隧洞施工技术较为成熟，但针对小洞径条件下内衬施工重难点的系统梳理相对偏少。结合工程实际开展重难点剖析，明确施工管控要点，对减少内衬质量缺陷，保障水利隧洞长期运行可靠性具有现实意义。

1 小洞径水利盾构隧洞内衬施工技术特点与工况难点

小洞径水利盾构隧道一般指内径小于4m的引水、输水及泄水隧洞，相较于市政大直径盾构隧道，其断面紧凑、线形及防渗标准严苛，长期承受水压力、渗流侵蚀与干湿交替作用，对衬砌整体性、密实度和耐久性要求极高。隧洞内部作业空间狭小、设备操作受限，且通风、采光条件差，施工环境封闭潮湿、积水积尘问题突出，现场施工干扰大。洞内衬砌施工涵盖基面清理找平、尺寸复核、钢筋加工安装、模板拼装加固、混凝土分层浇筑振捣、保温保湿养护及缺陷修复等多道核心工序，工序衔接紧密、交叉作业多，对施工统筹与工序管控水平要求较高。受狭窄断面限制，大型机械化设备无法进场，施工多依靠人工配合小型机具完成，钢筋绑扎、模板调校、混凝土振捣等关键工序操作空间不足，易出现结构偏位、振捣漏缺、保护层厚度不达标等质量问题[1]。

2 小洞径隧洞内衬主体施工关键技术重难点

2.1 狭小空间钢筋加工与安装施工控制要点

小洞径隧洞空间受限，内衬钢筋全部采用现场人工安装施工，钢筋安装位置、间距、保护层厚度及规格尺寸严格按照下图1-隧洞内衬横断面钢筋图执行。

为确保钢筋保护层厚度符合设计要求，每仓钢筋绑扎前，由测量人员精准放样定位；绑扎完成后立即开展测量复核，杜绝钢筋外露问题，钢筋安装偏差严格控制在表1规定范围内。

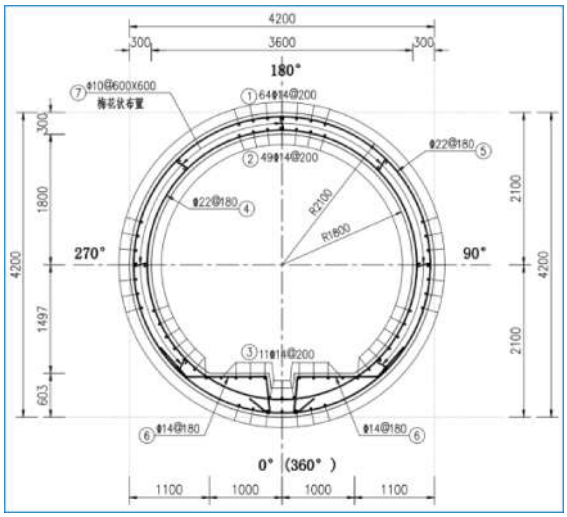


图1 隧洞内衬横断面钢筋图

表1 钢筋安装偏差控制表

序号	偏差名称	允许偏差
1	钢筋长度方向的偏差	1/2倍净保护层厚
2	双排钢筋，其排与排间距的局部偏差	0.1倍排距
3	保护层厚度的局部偏差	1/4倍净保护层厚度

钢筋统一在钢构加工中心集中加工，成品分类堆放并悬挂标识牌。钢筋连接严格遵循规范要求：环向受力钢筋禁止绑扎搭接，直径 ≥ 25mm钢筋必须采用机械连接；焊接施工需提前试焊，合格后方可作业，单面焊长度10d、双面焊长度5d；直螺纹机械连接要求钢筋丝头在套筒中央顶紧，单侧外露螺纹不超过2p。

纵向钢筋不过缝布置，接头设置在受力较小区域，同一钢筋接头不超过1个，接头末端至弯起点距离 ≥ 10d；机械连接与焊接接头区段长度为35d且不小于300mm，受压区接头面积百分率不大于50%，接头需错开

布置。结合针梁台车结构特点，先通过钢筋台车绑扎上部钢筋，下部100°范围钢筋采用人工补绑，适配狭小空间施工条件。

2.2 内衬模板安装、支撑与密封施工难点

小洞径隧洞内衬大多采用移动式钢模台车施工，台车外形尺寸必须匹配隧洞净空，模板加工及安装质量直接决定内衬成型效果。（1）模板调模作业只能在模板与管片的狭窄间隙内开展，观测视线受阻，轴线、圆度控制难度高，易发生模板错台、整体偏移。（2）混凝土浇筑产生侧向压力，狭小断面下支撑布置数量有限，支撑顶紧力不足会出现跑模变形；顶力过大又会挤压盾构管片，造成管片局部破损。（3）模板拼接缝、台车端头堵头为漏浆高发位置，密封胶条压紧状态难以检查，易错位挤压变形，浇筑时浆液外溢，使内衬表面产生蜂窝、麻面。施工要做好台车进场验收，就位后复核轴线与圆度参数，仔细检查接缝密封情况，控制支撑顶紧力，防范跑模、漏浆问题。

2.3 受限空间混凝土浇筑、振捣及养护技术难点

隧洞内部封闭，混凝土输送、入仓、振捣均在狭小空间内实施。（1）输送管路弯折多，布置空间紧张，堵管风险较高；入仓落差管控不当易造成骨料离析。浇筑必须分层对称开展，单侧浇筑过快产生侧向推力，会推动模板发生位移。（2）振捣作业空间受限，振捣棒难以抵达衬砌边角位置，漏振现象多发；振捣棒贴近模板又易扰动模板位置，振捣时长把控不当，形成蜂窝、孔洞缺陷。（3）洞内通风不畅，拱顶部位洒水养护难以全覆盖，干缩裂缝风险增加；洞内温度变化产生温度应力，进一步加剧内衬开裂。施工中优化混凝土配合比，选用适配振捣器具，管控振捣点位及时长，采用土工布覆盖搭配喷雾养护，实现全断面养护，降低裂缝产生概率[2]。

3 施工配套工艺与安全质量管控重难点

3.1 洞内通风、排水、照明配套施工布设难点

小洞径隧洞断面紧凑，管线、设备、人员相互挤占空间，通风、排水、照明系统布设难度高于常规大断面隧洞。（1）风筒受台车通行干扰不能贴壁敷设，管路弯折、接头漏风，作业面风量达不到要求；浇筑、切割产生的粉尘与有害气体排出缓慢，恶化作业视线与作业环境。（2）底板布设轨道与台车行走机构，排水沟断面受限，管片渗水夹杂废渣容易淤积，清理不及时造成底板积水，浸泡钢筋基面，削弱混凝土结合性能。（3）照明灯具受台车移动制约，局部形成光照死角，钢筋安装、模板调校等精细作业照度不足，移动补光又容易被设备遮挡。现场结合台车运行轨迹规划管线，定期疏通排水沟，固定照明与移动照明相互配合，保障洞内基础作业条件。

3.2 狭小隧洞施工精度与成型质量管控要点

小洞径水利盾构隧洞对内衬轴线、壁厚、圆度控制要求严格，但洞内观测条件差，过程质量管控存在诸多制约。（1）台车、各类管线遮挡测量视线，放样点位选取受限，容易造成内衬轴线偏移、壁厚超标或不足，无法满足结构受力要求。（2）钢筋、模板、混凝土工序连续交叉作业，隐蔽工序预留检查时间短，保护层、模板支撑等隐患难以及时排查，混凝土浇筑成型后缺陷整改难度大幅提高。（3）大型检测设备无法进洞，只能依靠小型工具抽检，拱顶等高位置检测操作不便，空鼓、密实度不足等缺陷容易遗留。施工要避开机具遮挡开展测量作业，强化隐蔽工程旁站检查，加大拱顶、侧墙抽检频次，减少隐蔽质量隐患。

3.3 现场施工安全风险识别与防控措施

小洞径隧洞为典型受限空间作业场景，具有封闭性强、作业空间狭小、风险隐蔽性高、应急逃生条件差等特点，整体施工安全隐患突出。施工采用LEC作业条件危险性分析法开展全阶段风险评估，通过公式$D=L\times E\times C$量化风险等级，其中D为危险性大小值，L为事故发生可能性，E为人员危险环境暴露频率，C为危险后果严重程度。

洞内拱顶衬砌施工需搭设临时移动式脚手架，受隧洞小径断面限制，脚手架搭设间距、立杆高度受限，无法采用常规搭设标准，整体稳定性与承载力管控难度大。施工需通过承载力公式验算架体稳定性：$N\leqslant R_d=\gamma_R(R_\kappa/\gamma_S)$，式中$N$为脚手架立杆轴向力设计值，$R_d$为立杆承载力设计值，$\gamma_R$为抗力分项系数，$R_\kappa$为立杆承载力标准值，$\gamma_S$为荷载分项系数。洞内潮湿环境易导致架体锈蚀、防滑失效，且架体紧邻台车，易发生碰撞失稳。现场采用微型模块化脚手架，严控立杆纵距、横距，设置横向斜撑加固，搭设完成后经承载力验算及验收方可使用，同时定期排查架体锈蚀、松动问题，规避坍塌、坠落风险。

现场主要安全风险包含三类：（1）有限空间安全风险，通风不良易积聚有害气体，造成人员中毒窒息，洞内潮湿环境易引发设备漏电，触电风险较高；（2）机械碰撞风险，狭小洞内台车通行间隙小、物料堆放挤占通道，加之内洞视线受限，易发生磕碰、挤压事故；（3）高处坠物风险，混凝土浇筑、模板拆除阶段，拱顶松动构件、杂物易掉落伤人。针对以上风险，施工现场严格落实作业前气体检测、电气接地防护、规范物料堆放，划定台车通行禁区、设置拆装作业警戒区，辅以安全技

术交底和常态化巡查，全方位规避安全事故[3]。

4 内衬施工常见病害及防控优化对策

4.1 内衬开裂、渗漏、空鼓等典型病害成因分析

小洞径水利盾构隧洞内衬成型后，开裂、渗漏、空鼓为高发典型病害，受隧洞结构、施工工艺、封闭作业环境多重叠加影响，直接降低隧洞防渗性能与长期服役耐久性。内衬裂缝主要分为干缩裂缝与温度裂缝。隧洞内部通风条件差，内衬混凝土拆模后养护作业难以全覆盖，拱顶区域养护不到位，混凝土表层失水不均，极易产生干缩裂缝；同时狭小封闭空间散热缓慢，混凝土浇筑水化热集中积聚，衬砌内外形成较大温差，诱发温度裂缝。盾构管片局部存在形变，会约束混凝土硬化收缩，进一步加剧裂缝延展风险。隧洞渗漏多发生在施工缝与环向接缝处，钢筋安装偏位、保护层厚度不达标、混凝土振捣不密实，易形成内部渗水通道；加之基面清理不彻底，残留积水、浮渣导致新旧混凝土粘结失效，运营阶段在内水压力持续作用下，缝隙不断扩张，渗漏问题持续加重。空鼓病害集中于拱顶部位，受小断面空间限制，混凝土入仓排气条件差，拱顶气体难以完全排出；浇筑速率把控不当、局部浆液填充不充分，结合基面杂物、积水清理不到位，会造成混凝土与管片内壁粘结脱离，最终形成空鼓缺陷。

4.2 小洞径隧道病害检测与排查技术难点

相较于大断面隧洞，小洞径盾构隧洞作业空间狭窄，大型检测设备无法进场，病害排查存在诸多技术瓶颈。外观检测层面，作业人员活动范围有限，拱顶、侧墙上部观测视角受限，细微隐蔽裂缝难以识别，漏检率较高；洞内光照分布不均、局部照度不足，进一步提升了裂缝、渗水痕迹的识别难度，人工徒步排查效率与精准度均偏低。内部质量检测层面，超声波、回弹等小型检测工具操作空间受限，大型扫描设备无法完成全断面检测，仅能局部点位抽检，拱顶空鼓、内部密实度不足等缺陷易形成检测盲区，无法全面掌握衬砌内部质量状况。同时检测作业与洞内台车转运、工序施工交叉干扰严重，检测点位易被机具、管线遮挡，且洞内潮湿渗水环境会干扰检测数据精度，难以精准判定病害范围、深度，极大增加了后续病害修复的施工难度。

4.3 针对性病害治理与施工工艺优化措施

结合小洞径隧洞施工特点，本次病害防控遵循事前优化为主、事后修复为辅的原则，从施工源头管控质量，降低结构病害发生率，整体施工流程详见下图2。

针对内衬裂缝，通过优化混凝土配合比、严控分层对称浇筑、加强喷雾保湿养护，有效降低水化热与温度应力；既有细微裂缝采用低压注浆处置，宽裂缝开槽后注浆封堵，抑制裂缝扩张。针对渗漏病害，施工中做好基面清理、施工缝凿毛及界面处理，精准控制钢筋保护层厚度，杜绝渗水通道；成型渗漏点位采用化学注浆封堵，并复核防渗效果。针对拱顶空鼓，优化混凝土入仓及浇筑速率，强化拱顶振捣排气、彻底清理基面浮渣，保障浇筑密实；已出现的空鼓区域采用钻孔注浆填充修复。所有治理作业适配狭小空间工况，采用小型机具施工，减少对后续工序的干扰，保障隧洞内衬结构服役质量[4]。

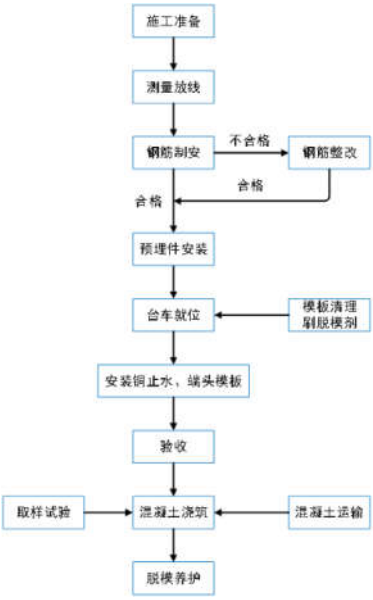


图2 隧洞内衬施工工艺流程图

结束语：本文对小洞径水利盾构隧洞内衬施工工况、主体工序、配套管控及病害问题开展分析，总结狭小空间条件下钢筋、模板、混凝土施工以及现场安全质量的突出难点，明确开裂、渗漏、空鼓病害的防控及修复措施。小洞径隧洞内衬受空间条件制约，质量隐患隐蔽，施工应以过程控制为主，强化各工序细节管控。受制于现场条件，部分工艺仍有待进一步优化，后续可结合更多工程实例继续完善施工管控手段。

参考文献

[1]赵村,刘亚.小洞径隧洞敞开式TBM分体始发重难点分析与处理[J].中文科技期刊数据库（全文版）工程技术,2026,(3):027-030.

[2]肖昌明.敞开式TBM在长距离、小洞径隧洞中穿越断层破碎带施工的关键技术[J].建筑机械,2025,(8):167-171.

[3]万正元,汪力,李巍.盾构技术在水利工程隧洞施工中的应用实践[J].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2026,(4):051-054.

[4]杨发宝,刘英.小洞径水工隧洞施工中错车洞的应用[J].四川水力发电,2024,43(5):87-89.