隧道施工中初期支护质量缺陷及处理措施

洪凯蒙

台州天宏工程管理有限公司 浙江 台州 317200

【摘　要】：隧道初期支护是维系围岩稳定、保障施工安全的核心结构，施工过程易因原材料管控不严、工序操作不规范产生喷射混凝土空鼓、钢拱架沉降、锚杆锚固不足、支护背后空洞等质量缺陷。本文依托现行隧道施工规范，系统梳理初期支护典型质量缺陷，从前期筹备、过程管控到动态监测建立全方位预防体系，按照缺陷危害程度落实分级处理措施，有效化解施工隐患，提升隧道初期支护施工质量与结构稳定性。

【关键词】：隧道工程；初期支护；质量缺陷

DOI:10.12417/2811-0722.26.08.006

引言

国内交通隧道工程建设规模持续扩张，施工面对的地质环境复杂程度不断提升，初期支护施工品质直接决定隧道工程整体运行安全与服役年限。现场施工开展阶段，作业水平、技术管理力度、天然地质环境等多重条件叠加影响下，初期支护结构容易产生各类质量病害，围岩变形、支护结构失稳等安全问题随之产生。本文结合一线隧道施工实操经验，梳理适配现场的质量防控手段与分级处置方案，为隧道初期支护现场质量管控提供实操性技术参考。

1 隧道施工中初期支护质量缺陷

隧道初期支护结构依靠喷射混凝土、钢拱架以及系统锚杆组合形成整体承载体系，见图 1

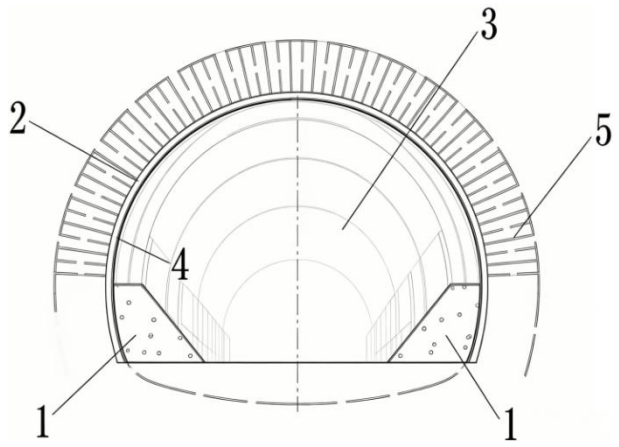

图 1 隧道初期支护横断面示意图

图注：1—仰拱基础/仰拱填充；2—喷射混凝土初期支护（含系统锚杆）；3—隧道内轮廓；4—钢拱架；5—围岩/地层

现场大部分质量问题均源自原材料管控不到位与施工工序管理漏洞。喷射混凝土作业过程中，围岩裂隙渗水会改变拌合物料的含水状态，施工风压的不稳定波动会造成混凝土表层与围岩分离形成空鼓脱层结构，人工喷射厚度把控精度不足，多处支护结构实体厚度无法匹配设计标准，结构内部形成受力薄弱区域。钢拱架架设作业期间，拱脚位置留存的虚渣未彻底清理夯实，结构成型后会在围岩自重作用下产生不均匀沉降现象，钢架节段拼接位置封堵密实度不足，结构受力传递出现中断问题。系统锚杆施工环节普遍存在注浆渗漏问题，锚固段浆液填充饱满度不足，实体锚固长度无法满足施工图纸设计要求。支护结构成型后回填注浆作业的滞后开展，会让支护结构与围岩之间形成大范围空洞区域，围岩持续收敛变形挤压支护结构本体，各类病害相互叠加影响，逐步削弱初期支护整体承载能力[1]。

2 隧道初期支护质量缺陷的预防管控

2.1 施工方案编制与前期技术筹备

施工方案的科学编制是从源头规避支护病害的基础工作，方案编制工作摒弃通用模板套用的粗放模式，编制人员结合超前地质预报探明的洞身围岩实际状态，对支护设计内容进行分段细化调整，编制工作严格遵循 JTG/T3660-2020《公路隧道施工技术规范》各项条文标准，洞身不同区段依据围岩等级确定钢架布设间距、锚杆孔径、杆件布设密度等核心施工参数。富水破碎带、断层等特殊复杂区段单独编制专项施工补充方案，细化地层排水预处理、超前小导管预加固等配套施工内容，成套施工方案完成后经由项目技术负责人初审、现场监理复审，修正完善后投入现场实施。

前期技术交底工作针对不同层级作业人员差异化落实，摒弃单一的书面条文宣读模式，利用洞内成型的样板支护实体开展现场实操教学，结合同类工程出现的支护空鼓、钢架沉降等既往病害案例剖析施工失误诱因，一线作业人员可直观掌握施工管控核心要点。施工现场执行严格的岗前准入考核机制，支护作业人员需通过理论知识与现场实操双重考核，考核达标后方可参与现场施工，杜绝仅凭施工经验作业、无证上岗等乱象，消除人为操作引发的质量隐患。

物资筹备阶段落实全品类支护原材料进场验收机制，型钢、硅酸盐水泥等主材进场时核验原厂质量合格证明资料，型钢原材料按照 TB10204-2020《铁路隧道混凝土工程施工质量验收标准》，以每 60t 为一个检验批次完成现场抽样送检工作，

喷射混凝土用碎石严格管控含泥量指标，进场物料含泥量稳定控制在 3%以内，筛分不合格的砂石材料直接清出施工场地。进场原材料实行分区分类存放管理，水泥物料存放于防雨防潮库房，型钢材料垫高堆放规避受潮锈蚀问题，原材料性能稳定性得到保障，避免支护实体结构强度受到影响。施工机具在作业启动前完成整机调试校准，湿喷机风压管路、注浆泵压力仪表等核心设备逐一校验标定，施工现场提前完成作业平台搭设、拱脚作业面清渣平整工作，软弱围岩区段提前开挖临时引排水沟槽，降低围岩渗水浸泡作业基面对施工造成的干扰[2]。

2.2 现场关键工序全过程质量管控

喷射混凝土、钢拱架、系统锚杆、回填注浆四项核心施工内容为现场管控重点，全工序旁站监督实现施工质量闭环管理。喷射混凝土作业遵循分片、分段、分层的施工模式，单段作业长度控制在 3m 范围，掌子面围岩揭露后的 4 小时内完成初喷封闭作业，裸露围岩可得到有效防护，围岩风化剥落、裂隙扩张问题得到抑制，围岩破损衍生的支护质量问题大幅减少。复喷施工分为多层分次喷射，侧壁位置单层喷射厚度不超过 80mm，拱顶位置单层喷射厚度控制在 60mm 以内，规避单次喷浆厚度过大引发的混凝土下坠、空鼓问题，现场技术人员动态记录湿喷机工作风压，施工风压稳定维持在 0.3MPa 至 0.5MPa 区间，结合围岩表面干湿状态微调设备参数。喷混凝土作业完成后及时开展洒水养护，洞内养护周期不低于 7 天，混凝土表层始终保持湿润状态，规避表层干裂、起砂脱落等表观病害。

钢拱架架设施工先彻底清除拱脚虚渣与松散围岩体，IV、V级围岩区段通过加装预制混凝土垫块提升拱脚基底承载性能，钢架节段拼接过程采用扭矩扳手紧固连接螺栓，逐点检查拼接缝隙尺寸，缝隙超标位置采用同标号细石混凝土填充密实，钢架外侧混凝土保护层厚度依托定型塑料垫块统一管控，技术人员全程旁站监督作业流程，螺栓漏拧、垫块缺失等隐蔽性施工问题可有效杜绝[3]。

系统锚杆钻孔作业完成后，采用高压风管清理孔道内部残留岩粉，含水钻孔先引流排净孔内积水再开展注浆作业，封闭式孔底注浆施工风压稳定保持 0.3MPa，管理人员核对单根锚杆实际注浆用量，结合理论注浆数值判定锚固饱满状态。初期支护结构成型 7 天后开展分段式背后回填注浆，作业按照边墙向拱顶递进、下部结构向上部结构推进的顺序开展，浆液回流堆积引发的拱顶空洞问题可有效规避，施工现场严格执行工序验收标准，上道工序验收不合格不得开展后续施工。

2.3 试验检测与监控量测动态管控

施工现场结合现行规范搭建立取样检测与数据反馈机制，成品质量检验、施工动态监测双向同步落实，全面排查各类潜在质量隐患。原材料与支护实体检测依照规范标准设定抽检频次，喷射混凝土试块按照 JTG/T3660-2020 要求，每 200m³体量成型一组标准养护试块，同步留置同条件养护试块用于洞内实体强度核验，锚杆施工完成后以单施工段为单元开展抗拔试验，抽样数量占比控制在总杆件数量的 1%，抗拔承载力无法满足设计标准的锚杆做好点位标记并及时补打整改，所有不合格施工项建立专项整改台账，检测、整改、复检全流程闭环落实，杜绝质量隐患遗留。

洞内监控量测测点与初期支护施工同步布设，测点固定于钢拱架主筋位置，III级围岩区段每 10m 设置一处监测断面，地质条件薄弱的IV、V级围岩区段监测断面间距加密至 5m，测量人员固定每日同一时段采集拱顶下沉、周边收敛核心数据，实测数据对照规范预设预警指标完成比对分析，掌子面掘进作业会在单日围岩收敛速率超过 3mm 时暂停，施工参数结合实测变形数据优化调整，钢架布设间距、喷混凝土厚度等关键指标适配现场围岩状态，监测数据为现场施工优化提供数据支撑。

项目定期整合全洞监测台账，归纳围岩变形发展规律，变形数值持续偏大的区段提前布设补强支护结构，动态监测模式可实现隐患前置处置，各类支护质量病害的产生概率得到有效控制。专人负责监测数据的整理归档工作，每周开展监测数据专项分析会议，研判围岩整体稳定状态，变形增速异常的区段提前预警处置，支护开裂、结构变形等常见病害问题可有效规避。

3 隧道初期支护质量缺陷的分级处理措施

3.1 轻微缺陷局部整修处理

表层破损、局部尺寸偏差等不影响整体结构受力的病害统一归类为轻微缺陷，修补作业全程参照 JTG/T3660-2020 公路隧道施工技术规范修补条款执行[4]。缺陷区域施工前完成表层清理工作，高压风配合小型毛刷清除混凝土表层浮渣与粉尘，浅表蜂窝麻面区域剔除松散劣质混凝土物料，剔除作业直至露出密实混凝土基面，清理完成后洒水润湿作业基面，维持适配修补施工的含水率条件。宽度不足 0.2 毫米的喷射混凝土表层细微裂缝，采用环氧树脂浆液完成表层封闭处理，裂缝走向位置开槽后填充专用修补材料，锚杆端头外露、钢架局部保护层厚度不足的点位，切除杆件外露多余部分后，采用同配合比修补喷射混凝土包裹成型。

喷层局部厚度偏小区域实行分次补喷作业，单次补喷厚度严格符合规范限值，规避一次性填料过多造成的修补层脱落问题。区段整体锚固性能不受小幅偏低锚杆抗拔值影响的点位，无需开展整段返工作业，原锚杆周边增设短锚筋强化辅助锚固效果。修补作业全部采用与原支护同标号原材料，修补完成后养护周期不少于七天，目视核查配合简易尺量验收方式核验修补质量，修补区域外形、厚度达标即可完成工序施工，局部整修作业不会扰动周边完好支护结构，围岩原有稳定状态可保持

不变。

3.2 中度缺陷综合加固修复

支护背后空洞、喷层大面积开裂、小范围钢架偏位、锚杆注浆不饱满等病害归类为中度缺陷，这类问题会改变局部支护结构受力状态，表层简单修补无法彻底消除安全隐患。缺陷处置前期依托地质雷达探测技术，精准锁定空洞分布范围与空间尺寸，探测验收工作遵循 JTG3420-2018 公路工程试验检测规范标准。空空洞高度不足 30cm 的支护背部区域，采用低压回填注浆工艺，水泥净浆为主要注浆物料，注浆风压控制在 0.2~0.3MPa，注浆孔自下而上依次布设，邻孔出现溢浆现象后封堵注浆管口。空洞高度超过 30cm 的区段，先填充粒径适配的碎石物料再开展注浆作业。

局部钢架出现内移变形、钢架间距超出设计限值的区段，原有钢架间隙增设补强小钢拱架，新增钢架与原钢架通过钢筋焊接形成整体结构，外侧加厚喷射混凝土形成复合支护体系。成片锚杆锚固性能不达标的区段，依托原有锚杆布设间隙补打系统锚杆，补打杆件的孔径、埋深严格匹配原设计参数，补锚作业完成后统一实施孔底注浆施工。0.2mm 至 1mm 宽度的支护面层裂缝，借助压力注浆工艺将修补浆液注入裂缝内部，实现裂缝内部密实固结。加固作业采取分段施工模式，结合围岩稳定状态将单段加固长度控制在 5m 以内，注浆体与喷射混凝土强度达到设计标准后，复测支护外形尺寸与结构密实度，核验合格后恢复隧道掘进施工。

3.3 严重缺陷专项治理与应急处置

支护大变形、大面积喷层崩落、钢架扭曲失稳、围岩涌水坍塌前兆等问题属于严重缺陷，这类重大病害极易引发洞身坍塌险情，处置方案需要通过项目、监理、设计三方联合会审确认，处置流程符合 JTG/T3660-2020 危损支护处置相关要求。险情出现后第一时间停止掌子面掘进作业，疏散洞内非作业人员，现有监控量测实时数据可用于划定危险管控区域，危险区段前后布设临时钢支撑完成锁口支护，围岩进一步收敛变形可得到有效遏制。钢架整体扭曲断裂、大面积初期支护失效的区段，采用分段跳槽换拱工艺拆除破损支护结构，单次拆除循环长度控制在 2~3m，单段拆除完成后立即架设新钢拱架，同步喷射混凝土封闭围岩表层，换拱作业期间增设超前小导管预注浆，加固周边松散围岩体，降低拆除施工对围岩结构的扰动。

围岩裂隙涌水引发的支护破损问题，先布设引排盲管疏导地下水，地层水环境稳定后再开展支护重建施工。缺陷治理阶段加密监测断面布设密度，常规 10m 监测断面缩短至 3m，日常监测频次同步提升，加固施工参数结合实时变形数据动态调整。重大缺陷治理完成后开展不少于 14 天的持续跟踪监测，监测数据长期稳定、变形速率低于规范预警阈值即可判定治理合格，整理缺陷成因、处置工序、监测数据形成专项档案，病害管控经验可用于优化后续施工管控细则[5]。

4 结语

本文系统分析了隧道初期支护常见的各类质量缺陷及形成诱因，构建了从前期技术筹备、全过程工序管控到动态监测的完整预防体系，并对轻微、中度、严重缺陷制定差异化处置与应急治理方案。通过源头防控、过程把控、分级治理的闭环管理模式，可有效整治支护病害，降低隧道施工安全风险，对提升隧道初期支护标准化施工水平具有实际参考意义。

参考文献：

[1] 刘昊林.隧道工程超前支护施工技术与质量控制措施[J].交通世界,2025(25):153-155.

[2] 陈丽俊,陈建勋,郭会杰,高剑峰,杨宝东,温金鹏.软岩隧道初期支护拱脚收敛变形控制新方法[J].中国公路学报,2025,38(6):246-257.

[3] 张正蕾.公路隧道初期支护施工质量控制的有关思考[J].散装水泥,2024(2):176-178.

[4] 陈骁奇.隧道施工中初期支护的现场质量把控要点与问题处理[J].智能建筑与工程机械,2025,7(7):14-16.

[5] 姚力.隧道工程超前支护施工技术与质量管控要点[J].四川建材,2024,50(12):199-201.