

城市地下交通人防合建工程隧道施工关键工艺研究

艾嵩迪

通化市国防动员办公室 吉林 通化 134300

【摘要】：地铁站作为城市客流枢纽与战时人防关键载体，其交通运营效率与人防结构可靠性共同构成城市安全高效运转的基石。文章以城市地下交通人防合建工程隧道施工为研究载体，结合场地地质工况，采用现场工艺试验、公式荷载校核、分区工法对比的研究方法，研判开挖、支护、预埋、防水全流程施工要点。研究得出，CRD暗挖搭配盾构分区施工、一体化构件预埋工艺，可有效管控围岩沉降，提升结构抗力合格率。该套成套施工工艺适配软土互层地层六级人防隧道施工，可为同类平战结合地下合建工程提供标准化工艺参考。

【关键词】：平战合建隧道；抗爆衬砌；密闭施工；分区开挖；围岩承载力

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.047

国内城市地下空间集约化开发力度持续提升，交通与人防一体化合建隧道已成为城市防灾防空、轨道交通建设的主流形式，这类构筑物同时承载日常行车动荷载与战时爆炸冲击荷载，施工管控标准远高于单一功能隧道。当下多数施工现场沿用常规地铁隧道施工工艺，忽视人防抗力、气密性专项施工要求，极易引发节点密闭失效、衬砌抗爆性能不足等质量问题，行业适配性专项施工工艺体系较为缺失。基于此，立足现行人防与轨道交通双重施工规范，梳理合建隧道差异化施工要点，优化全流程关键施工工艺，能够降低工程整改成本，保障隧道平战转换功能落地，兼具工程实用价值与行业技术参考意义。

1 工程概况与合建隧道施工特性

1.1 项目基础工况

本次研究依托某市中心城区轨道交通3号线配套人防合建隧道项目，隧道总长872m，埋深9.2m—14.5m，为双线行车+六级人防掩蔽合建断面，标准断面净宽11.3m、净高8.7m，隧道分为普通行车区间、人防密闭区间、人防疏散口三大区段。场地自上而下地层为素填土、粉质黏土、中粗砂、中风化泥岩，地下水位埋深2.8m，孔隙水渗透性较强，围岩综合等级为Ⅳ级，局部浅埋段为Ⅴ级围岩。项目人防设计要求：衬砌抗爆等效静荷载0.3MPa，所有贯通孔洞密闭等级甲级，战时可快速封闭行车通道，满足1200人应急掩蔽需求。

1.2 交通人防合建隧道施工差异化特性

结构受力标准双重化是合建隧道最核心施工特征。普通市政隧道仅验算车辆动荷载、水土静态荷载，合建隧道需叠加战时冲击波等效荷载，衬砌厚度、主筋配筋率、混凝土抗渗抗爆等级均需提升一个等级，同一断面上下、左右配筋非对称布设，适配冲击波侧向受力特点。

节点构造施工专属化管控要求更高。行车通风口、电缆穿

墙孔、疏散门洞均为人防薄弱节点，不可后期开孔改造，所有密闭构件、止水抗力构件必须与主体结构同步预埋，严禁二次凿植施工，工序穿插时序区别于常规隧道。防水体系兼顾防渗与密闭双重作用。普通隧道防水以阻断地下水渗透为主，合建隧道防水层需兼具气密性、水密性，施工缝、变形缝需增设人防专用复合型止水带，杜绝战时冲击波裹挟气流、地下水穿透结构缝隙。

1.3 核心施工控制计算公式

结合人防工程荷载规范，推导隧道衬砌战时水平等效静荷载计算公式，用于校核开挖支护及衬砌结构承载力，适配本项目浅埋覆土工况：

$$q = \gamma_d \cdot \beta \cdot P_c$$

式中： q 为衬砌侧向战时等效静荷载（kPa）； γ_d 为浅埋覆土荷载修正系数，本项目取1.15； β 为隧道断面受力折减系数，马蹄形断面取0.78； P_c 为地面爆炸标准冲击波压力（kPa），六级人防工程取值300kPa。依托围岩极限平衡理论，设置初期支护围岩承载力校核公式，判定开挖步距、支护时序合理性，规避开挖扰动降低原生围岩抗力：

$$K = \frac{c + \sigma_v \tan \varphi}{q_{\max}}$$

式中： K 为围岩安全稳定系数，合建人防隧道要求 $K \geq 1.4$ ； c 为围岩黏聚力（kPa）； σ_v 为竖向水土自重应力（kPa）； φ 为围岩内摩擦角（°）； $q_{\max}$ 为单次开挖围岩最大附加应力（kPa）。

2 合建隧道前期筹备与开挖选型工艺

2.1 超前地质与人防专项勘察工艺

常规隧道超前勘察侧重地下水、围岩硬度研判，合建隧道

需增加围岩完整性、地层空洞专项探测,破碎围岩会大幅削弱隧道整体抗爆能力^[1]。施工采用地质雷达+水平钻探联合探测方式,每 30m 布设一组水平探孔,探孔深度超前掌子面 25m,重点排查隧顶上方 2 倍洞径范围内岩溶、老旧地下管线、废弃人防巷道,提前注浆回填软弱空腔,保证全域围岩抗力均匀性。为统一超前注浆施工标准,结合现场注浆试验确定超前小导管注浆参数,适配富水砂黏互层地层,具体参数如表 1 所示。

表 1 具体参数表

导管规格	外插角	环向间距	注浆压力	浆液配比(水泥水玻璃)	初凝时长
Φ42mm 无缝钢管	12°—15°	350mm	0.6—0.8MPa	1:0.6	45s—60s

2.2 分区开挖工法差异化施工工艺

人防密闭段优先选用 CRD 分步开挖工艺,核心优势为分步封闭围岩、快速架设抗力钢架,降低开挖扰动对衬砌抗爆结构的破坏。施工遵循“小进尺、强封闭、早成环”原则,单循环开挖进尺控制在 0.8m 以内,远小于普通隧道 1.2m 进尺标准,每开挖一个分部立即施作竖向中隔壁、临时仰拱,提升断面整体抗冲击波能力。

盾构施工区间优化同步掘进参数,适配人防管片特殊配筋要求。合建专用人防管片主筋直径较普通地铁管片增大 4mm,环向拼接螺栓增设密闭止水垫圈,掘进过程严控姿态偏差,管片拼装错台量控制在 3mm 以内,防止拼缝气密性不达标。两类区段开挖管控指标如表 2 所示。

表 2 两类区段开挖管控指标表

施工区段	开挖工法	单循环进尺	拱顶沉降限值	结构错台限值	临时支护拆除条件
人防密闭段	CRD 暗挖	≤0.8m	≤22mm	≤2mm	二衬强度达到设计 90%
普通行车段	土压盾构	1.2m/环	≤28mm	≤3mm	管片拼装完成即刻拆除

3 支护及人防专属构件施工关键工艺

3.1 人防等级初期复合支护工艺

合建隧道初期支护不可套用常规锚喷参数,需匹配围岩稳定系数要求,提升支护整体刚度。人防区间钢架选用 I22b 型钢,纵向间距 0.7m,相较普通隧道缩小 0.3m 间距,钢架底部增设人防专用锁脚锚杆,锚杆长度 4.5m,双向倾角 20° 布设,锁定钢架底部位移,抵御战时冲击波带来的基底剪切力^[2]。

喷射混凝土采用 C25 抗爆专用掺量混凝土,掺入复合型防爆纤维,纤维掺量 0.9kg/m³,提升混凝土抗裂、抗剥落性能。喷射作业分层施工,首层厚度 40mm 封闭围岩裂隙,二层一次性喷至设计厚度 180mm,表面平整度控制在 40mm/2m 以内,避免凹凸面产生冲击波应力集中。支护完成后定时采集围岩应力数据,代入初期支护围岩承载力校核公式复核稳定系数,若 K 值低于 1.4,立即补打注浆锚杆,加大围岩锚固力,直至满足人防安全系数标准。

3.2 人防门框及穿墙构件一体化预埋工艺

人防密闭门框为合建隧道核心抗力构件,也是施工故障率最高节点,必须采取钢筋一体化预埋工艺,禁止后期后置安装。施工前复测门洞轴线标高,将人防门框锚固筋与隧道二衬主筋双面焊接,焊接焊缝长度不小于 12d,门框底部设置抗浮限位槽钢,防止浇筑混凝土时门框偏移上浮^[3]。

各类管线穿墙密闭套管实行定位模块化预埋,电力、通风管线套管内置密闭挡环,挡环厚度 12mm,居中焊接于套管管壁,浇筑混凝土前封堵套管两端,防止浆液进入套管破坏密闭结构。表 3 为典型人防预埋构件安装精度管控标准。

表 3 典型人防预埋构件安装精度管控标准表

构件名称	平面偏差限值	垂直度偏差	缝隙预留公差	锚固搭接长度
人防防护密闭门门框	≤3mm	1/1000	1.5mm—2mm	≥400mm
管线密闭穿墙套管	≤5mm	2/1000	0mm	≥350mm

构件预埋完成后设置专属标识,严禁施工车辆、机具磕碰门框棱角,二衬浇筑完成后 7d 内完成门框初调试,保证门扇闭合后胶条压缩量不小于 3mm,满足甲级气密要求。

4 主体衬砌与人防密闭防水施工工艺

4.1 抗爆二衬混凝土浇筑工艺

合建隧道人防区间二衬采用 C40P8 抗爆防渗商品混凝土,掺入膨胀抗裂外加剂,限制混凝土收缩裂缝,规避裂缝削弱结构抗爆承载力。钢筋绑扎区分受爆面与普通面,隧道迎冲击波一侧主筋配筋率提升 18%,箍筋加密区间距缩小至 100mm,边角节点增放射状补强钢筋,分散爆炸应力^[4]。

浇筑采用分层匀速泵送工艺,分层厚度 500mm,振捣选用高频低幅振捣棒,杜绝过振离析。人防区间二衬严禁设置竖向施工缝,仅保留环向施工缝,环向缝位置避开冲击波受力截面,间距统一控制在 9m。混凝土养护周期延长至 14d,覆盖

保温保湿土工布,保证衬砌强度均匀增长。

4.2 平战结合复合型防水密闭施工工艺

合建隧道防水体系分为疏水层、气密防水层、抗力止水三层,区别于普通隧道双层防水结构。基面修整完成后铺设4mm厚丁基橡胶气密防水卷材,卷材搭接宽度120mm,搭接缝热熔满焊,杜绝气孔漏焊。环向、纵向施工缝内置中埋式人防专用钢边止水带,外侧配套粘贴遇水膨胀防暴止水胶,双重阻断水气流通通道。

隧道人防段变形缝增设不锈钢抗力止水压板,变形缝内部填充聚苯隔声抗力垫板,外部嵌缝采用人防专用聚氨酯密封胶,适配战时结构微量形变,同时保持缝隙气密性。防水施工完成后分段做气密性打压试验,试验压力0.12MPa,保压30min压力降不大于0.02MPa,方可判定密闭防水合格。

5 成品防护与平战转换配套施工工艺

5.1 衬砌成品抗力保护工艺

从人防工程耐久性力学理论来看,合建隧道衬砌、密闭门框属于永久抗力承重构件,成型后表层混凝土、焊接锚固节点受力稳定性较弱,外力磕碰、后期开孔扰动都会破坏结构应力完整性,弱化构件抗爆、气密性能,成品阶段精细化防护,是保障隧道长期平战使用性能的后置核心工序^[5]。

结合人防结构成品保护规范,施工单位需划分成品防护责任区域,落实构件分级防护管控。二衬及人防门框整体养护成型后,施工人员优先在行车道两侧边角、门框迎车立面粘贴加厚橡胶防撞护角,护角采用结构胶贴合固定,规避后期运营车辆、场内转运机具刮蹭损伤抗力构件。人防监理全程管控洞内二次作业行为,施工班组严禁在衬砌抗力区段随意开凿孔洞,机电、消防附属设施施工前置化规划点位,设施基座全部采用预埋密闭式构件,杜绝后期钻孔植筋破坏衬砌配筋结构。除此以外,施工人员分时段完成洞内双层回填注浆作业,衬砌混凝土实测强度达到设计85%时开展初次低压回填注浆,填补衬砌背部松散空隙;项目竣工验收前置阶段开展二次高压补强注浆,注浆压力恒定为1.0MPa,密实围岩与衬砌结合空腔,补

齐结构整体抗爆刚度,规避局部空腔受力不均引发的衬砌开裂问题。

5.2 洞口平战快速转换施工工艺

依托人防工程分区防护设计理论,隧道洞口直面外部地表冲击波、地表汇流水体,属于整座合建隧道防护等级最低、平战切换频次最高的薄弱区段,洞口构造施工需要兼顾日常通行排水、战时密闭阻断双重功能,构造尺寸、预埋构件、地表硬化均要匹配六级人防快速转换标准,以此补齐隧道外围防护闭环。

相较于洞内主体结构,洞口施工受地表水文、露天施工环境干扰更大,施工人员需针对性优化细部构造施工参数。首先施工人员加厚出入口挡土墙结构厚度至450mm,相较于普通市政隧道挡土墙提升150mm厚度,强化墙体抗冲击承载力,墙体顶板精准预埋承重防爆吊环,吊环锚固筋深入墙体主筋内部焊接固定,保障战时防爆封堵板块吊装承载力。其次洞口内侧配套安装模块化可拆卸密闭拦水闸,依托卡槽式安装结构适配工况切换,常态运营阶段开启闸体疏导路面雨水,战时快速闭合闸体阻断地下水、冲击波向内渗透。与此同时,施工人员对洞口外缘3m全域地表做素混凝土硬化处理,压实表层松散覆土,降低爆炸作用下地表土体塌陷挤压洞口结构的风险,全方位完善洞口外围平战一体化防护体系。

6 结语

综上所述,城市地下交通人防合建隧道施工核心受制于双重受力标准、密闭节点精度、围岩抗爆稳定性三大因素,文章结合现场工程工况,梳理分区开挖、复合支护、构件预埋、密闭防水全套关键工艺,依托力学公式与现场试验数据敲定最优施工参数,验证暗挖盾构组合工法的落地优势,厘清了合建隧道区别于普通隧道的施工管控要点。整套工艺可有效提升人防结构施工合格率,控制地层沉降变形,适配城区浅埋富水地层施工条件。后续行业可结合自动化监测、数字建模技术,动态优化施工参数,进一步完善复杂地质下多功能合建隧道精细化施工体系。

参考文献:

- [1] 李志鹏.地铁站人防结构与城市交通规划设计的协同优化[J].住宅产业,2026,(2):36-38.
- [2] 刘洋.Z市人防工程与地下空间协同发展存在的问题及优化策略研究[D].郑州大学,2025.
- [3] 韩冰.上海市域铁路人防工程施工风险评价研究[D].兰州交通大学,2024.
- [4] 方云杰.轨道交通工程人防设备施工流程与安全管理[J].上海建设科技,2024,(1):104-106.
- [5] 吴立桥,师龙,刘学军.城市轨道交通兼顾人防建设面临的矛盾及其对策思考[J].工程建设与设计,2023,(5):98-100.