

隧道增加 30%~50%，特别加强洞轴线间岩柱区域的勘探工作，钻孔间距控制在 25~30 米范围内，确保准确掌握中隔壁部位的岩性变化规律。岩体结构面调查构成地质勘察的重点内容，需要详细查明节理裂隙的产状、张开度、充填情况、连通性等特征参数，重点识别可能影响中隔壁稳定性的软弱结构面，建立三维地质模型指导设计施工。风险评估技术应建立量化的评价体系，围岩稳定性评价需要考虑双洞开挖的相互影响效应，采用数值分析方法计算不同施工阶段的围岩应力状态，识别潜在的失稳风险区域。地下水风险评估需要重点关注承压水、岩溶水对施工的影响，建立水文地质模型预测涌水量，制定相应的防排水措施。

二、小净距隧道开挖与支护施工关键技术

(一) 小净距隧道分步开挖工艺与爆破控制技术

小净距隧道分步开挖工艺必须严格控制开挖顺序，确保围岩应力释放的渐进性，避免因开挖扰动导致中隔壁失稳。开挖方法应根据围岩条件选择合适的分步方案，软弱围岩采用上下台阶法开挖，上台阶高度控制在 3~4 米范围内，下台阶开挖应在上台阶支护完成并达到设计强度后进行，台阶长度不超过 15 米。中硬围岩条件下可采用 CD 法开挖，先开挖上半断面左侧部分，完成初期支护后再开挖右侧部分，最后开挖下半断面，每步开挖完成后立即施作临时支撑确保断面稳定。爆破控制技术构成开挖工艺的核心要素，药量计算需要考虑对相邻洞室的振动影响，单次爆破药量应较常规隧道减少 30%~40%，周边眼药量控制在 0.2~0.3 公斤每米范围内。爆破参数设计应采用小药量、多循环的控制爆破方式，炮眼深度控制在 2.5~3.0 米范围内，装药系数不超过 0.6，起爆时间间隔采用毫秒延时雷管确保逐孔起爆。振动控制标准需要根据中隔壁厚度确定，质点振动速度应控制在 5 厘米每秒以下，必要时设置减振沟或采用静态破碎技术替代爆破作业^[3]。

(二) 小净距隧道临时支护系统设计施工技术

小净距隧道临时支护系统设计需要建立快速响应的支护机制，确保开挖暴露面在最短时间内得到有效保护，防止围岩应力重分布引起的局部失稳。支护构件选择应优先采用装配式钢支撑体系，工字钢或格栅钢架具备良好的承载能力与施工便利性，钢架间距根据围岩等级确定，软弱围岩条件下间距控制在 0.6~0.8 米范围内，中等围岩可适当放宽至 1.0 米。钢架与围岩之间应设置木垫板或钢垫板确保接触面均匀受力，垫板厚度不少于 5 厘米，长度覆盖钢架翼缘全宽。喷射混凝土施工技术需要采用湿喷工艺确保喷层密实度，混凝土强度等级不低于 C20，喷射厚度分层控制，初喷厚度 3~5 厘米封闭围岩表面，复喷达到设计厚度 10~15 厘米，喷射作业应在开挖完成后 4 小时内完成。锚杆支护施工需要重点加强

中隔壁部位的锚固效果，采用全长粘结型锚杆，锚杆直径不小于 25 毫米，锚固长度根据围岩条件确定，软弱围岩不少于 3 米，锚杆倾角向围岩内部倾斜 10~15 度，提高锚固体与围岩的摩擦阻力，确保支护系统整体稳定性（如图 2 所示）。

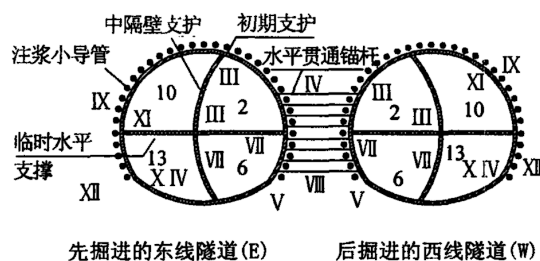


图 2 小净距隧道临时支护系统设计

(三) 小净距隧道中隔壁施工与加固处理技术

小净距隧道中隔壁施工技术需要建立精确的施工控制体系，确保中隔壁结构承载能力满足双洞荷载传递要求。施工工艺应采用分段浇筑方式控制混凝土水化热，每段长度控制在 10~15 米范围内，浇筑间隔时间不少于 7 天，避免温度应力对结构产生不利影响。模板系统设计需要采用大型钢模板确保成型质量，模板刚度应满足混凝土侧压力要求，支撑系统采用钢管脚手架加强，模板拼缝处设置止浆条防止漏浆^[4]。混凝土浇筑质量控制构成中隔壁施工的关键环节，混凝土强度等级不低于 C30，坍落度控制在 120~160 毫米范围内，浇筑采用分层浇筑方式，每层厚度不超过 50 厘米，振捣采用插入式振动器配合附着式振动器确保密实。加固处理技术主要针对对围岩条件较差的中隔壁部位，采用超前锚杆或管棚支护加强围岩承载能力，锚杆长度根据破碎带厚度确定，一般不少于岩柱宽度的 1.5 倍。注浆加固技术适用于节理裂隙发育的岩体，注浆材料选用水泥浆液或化学浆液，注浆压力控制在 0.5~1.0 兆帕范围内，注浆范围应覆盖中隔壁周边 3 米范围，形成加固圈提高整体稳定性。

三、小净距隧道施工监测与质量控制技术

(一) 小净距隧道施工过程变形监测与预警技术

小净距隧道施工过程变形监测技术需要建立全断面、多参数的实时监测体系，重点关注中隔壁变形规律与围岩应力释放过程。监测点布设应覆盖关键部位，拱顶沉降监测点间距控制在 10~15 米范围内，中隔壁水平位移监测采用收敛计或全站仪进行测量，测点设置在拱腰、边墙中部、仰拱等关键位置，确保变形数据的完整性与代表性。监测频率需要根据施工阶段动态调整，开挖期间每日监测不少于 2 次，支护完成后可调整为每日 1 次，稳定期可延长至每周 2~3 次。自动化监测系统应采用激光测距仪、倾斜仪、应变计等先进设备，实现 24 小时连续监测，数据采集间隔控制在 30 分钟以内。预警技术建立分级管控机制，变形速率作为主要预警指标，当日变

形量超过 5 毫米时启动黄色预警，超过 10 毫米启动橙色预警，超过 15 毫米启动红色预警，预警信息应及时推送至现场指挥人员。

(二) 小净距隧道围岩应力监测与数据分析技术

小净距隧道围岩应力监测技术需要建立深度覆盖的应力监测网络，准确掌握双洞开挖引起的应力重分布特征。监测设备选择应采用振弦式应力计或光纤应力传感器，具备高精度、长期稳定性的技术特点，应力计埋设

深度根据影响范围确定，一般设置在距离洞壁 3-5 米、8-10 米、15-20 米的不同深度位置，形成径向应力监测剖面。中隔墙区域应力监测构成重点监测内容，需要布设三维应力监测点，监测主应力大小、方向变化规律，识别应力集中区域与卸荷松弛范围（如图 3 所示）。应力计安装工艺要求钻孔直径与应力计外径匹配，间隙控制在 2-3 毫米范围内，采用水泥砂浆或环氧树脂进行回填密实，确保应力传递的准确性^[5]。

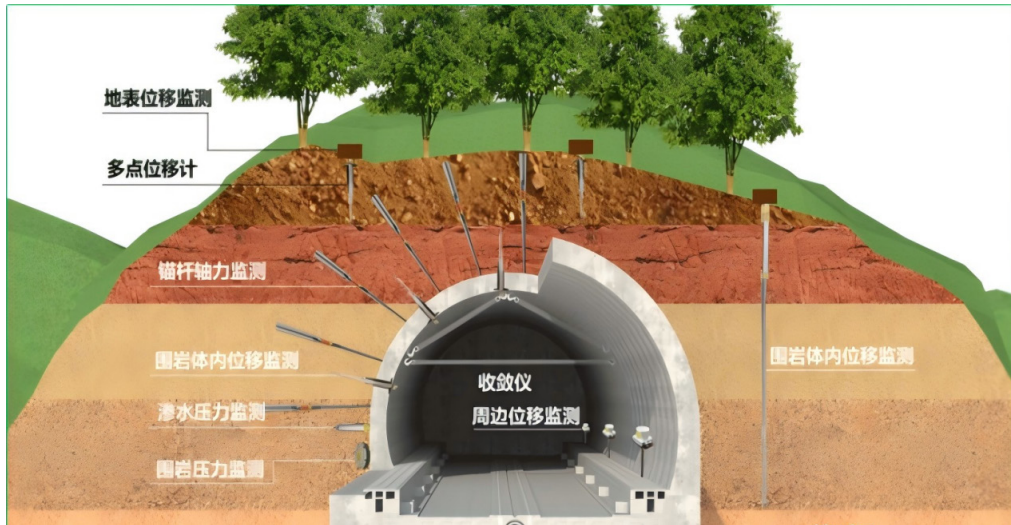


图 3 小净距隧道施工过程变形监测

数据分析技术需要建立应力演化规律的识别方法，重点分析先行洞开挖对后行洞围岩应力场的影响程度，建立应力与变形的关联模型。应力异常判识标准应根据围岩类型确定，当监测应力超过围岩强度的 70% 时需要加强监测频率，超过 85% 时应采取工程处理措施，数据分析结果为支护参数优化调整提供科学依据。

(三) 小净距隧道施工质量检测与缺陷处理技术

小净距隧道施工质量检测技术需要建立全方位、多层次的检测体系，重点关注支护结构完整性、混凝土浇筑质量、围岩稳定状态等关键指标。支护结构检测应采用无损检测方法，钢筋混凝土结构采用超声波检测仪检查内部缺陷，检测精度应达到毫米级别，重点检查中隔墙部位的混凝土密实度、钢筋保护层厚度、结构尺寸偏差等参数。喷射混凝土厚度检测采用钻芯取样法进行验证，取样频率为每 100 平方米不少于 3 个点，厚度偏差应控制在设计值的 ±10% 范围内。锚杆拉拔试验需要按照 5% 的比例进行抽检，拉拔力应达到设计锚固力的 1.15 倍，不合格锚杆应及时补强或重新施工。混凝土质量检测包括强度、抗渗性能、耐久性指标的全面评估，强度检测采用回弹法结合钻芯修正，28 天强度应达到设计等级要求，抗渗等级不低于 P8 级标准。缺陷处理技术需要根据缺陷类型制定针对性的修复方案，蜂窝麻面等表面缺陷采用聚合物砂浆修补，修补厚度根据缺陷深度确定，一般不超过 5 厘米。

空洞缺陷需要采用压力注浆进行填充，注浆材料选用高强度水泥浆液或环氧树脂，注浆压力控制在 0.2-0.5 兆帕范围内，确保填充密实。

结语

小净距隧道施工技术正朝着智能化、精细化、标准化方向持续发展。数字化监测技术与人工智能算法的深度融合将实现施工风险的精准预测与智能预警，新材料、新工艺的不断涌现将进一步提升施工效率与安全保障水平。随着技术标准体系的完善与施工经验的积累，小净距隧道施工技术将为复杂地质条件下的隧道工程建设提供更加可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 姚宁. 高速公路隧道工程中小净距隧道施工技术 [J]. 四川建材, 2025, (02): 152-155.
- [2] 杨波. 高速公路隧道工程中小净距隧道施工技术分析 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5 (21): 148-150.
- [3] 谷志强. 小净距隧道盾构施工加固技术研究 [J]. 四川建材, 2023, 49 (05): 130-132.
- [4] 张玉强, 马桂林. 高速公路小净距隧道施工方法研究 [J]. 江西建材, 2022, (07): 209-210+215.
- [5] 刘剑. 小净距隧道支护设计与施工控制技术 [J]. 工程建设与设计, 2020, (17): 188-190+193.

作者简介：王桃（1987 年 5 月—），男，汉族，四川省威远县人，本科，工程师，研究方向：路桥施工。