

Discussion on the selection of interior wall decoration materials and energy saving in highway tunnels

Yongke Wei^{1,3} Yun He² Dongyu Lan² Changming Liang² Weixing Mao⁴

1. Guangxi Traffic Design Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

2. Guangxi New Development Transportation Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

3. Department of Underground Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China

4. Anhui Zhongyi New Material Technology Co., Ltd., Chuzhou, Anhui, 239000, China

Abstract

To enhance the quality of highway tunnel construction, improve operational efficiency, and achieve green and modern construction and operation, this article employs systems theory to explore the selection criteria for interior decoration materials in highway tunnels. It examines these materials from multiple perspectives, including reflectivity, noise reduction, durability, waterproofing, and cost-effectiveness. By integrating technical resources, innovating construction strategies, and optimizing construction processes, the article aims to establish a comprehensive quality control system that covers the entire process from design to production and installation, thereby forming a complete highway tunnel construction system.

Keywords

expressway; tunnel inner wall; decorative materials; energy saving technology; application measures

高速公路隧道内壁装饰材料选择与隧道节能的探讨

韦勇克^{1,3} 贺云² 蓝东好² 梁昌明² 冒卫星⁴

1. 广西交通设计集团有限公司, 中国·广西南宁 530000

2. 广西新发展交通集团有限公司, 中国·广西南宁 530000

3. 同济大学土木工程学院地下建筑工程系, 中国·上海 200092

4. 安徽中益新材料科技股份有限公司, 中国·安徽滁州 239000

摘要

为提升高速公路隧道建设质量, 提高运行效率, 实现建设与运营的绿色化与现代化。文章运用系统理论, 深入探讨高速公路隧道内壁装饰材料选择标准, 从反光性、降噪性、耐受性、防水性及经济性等维度出发, 整合技术资源, 创新施工策略, 优化施工工艺, 构建涵盖设计—生产—安装的全流程质量管控体系, 形成完备的高速公路隧道施工体系。

关键词

高速公路; 隧道内壁; 装饰材料; 节能技术; 应用举措

1 引言

根据交通运输部《2024 年交通运输行业发展统计公报》显示, 截至 2024 年 12 月, 我国公路隧道总里程已达 32596.6 公里, 其中高速公路隧道占比超 60%。为管控隧道维护与使用成本, 保证行车的安全性、舒适性, 施工企业应当坚持技术导向, 从建筑材料选择、节能技术应用等层面出发, 补齐隧道施工短板, 提升隧道建设质量, 降低全生命周

期成本, 增强实际使用效果。

2 高速公路隧道内壁装饰材料选择标准

2.1 材料的反光性

高速公路隧道内光线条件复杂, 高反光性装饰材料能够有效增强隧道内的照明效果, 减少照明盲区, 降低驾驶员因光线不足产生的视觉疲劳与安全隐患。目前, 具有定向反光特性的微棱镜反光膜材料, 因其能将光线集中反射回光源方向, 在隧道内壁装饰中得到广泛关注^[1]。研究表明, 使用微棱镜反光膜材料能够将高速公路隧道内有效光照强度提升 30%~50%, 改善行车视觉环境。

2.2 材料的降噪性

隧道内车辆行驶产生的噪声在封闭空间内易形成声聚

【基金项目】广西重点研发计划资助(项目编号: 桂科 AB22080002)。

【作者简介】韦勇克(1971-), 男, 壮族, 中国广西都安人, 硕士, 正高级工程师, 从事桥梁与隧道工程研究。

焦,导致噪声污染加剧。具备降噪功能的装饰材料可通过多孔结构或阻尼特性,吸收、耗散声波能量,降低噪声水平。如纤维吸声材料,其内部的多孔结构可使声波在孔隙中不断反射、折射,与材料壁面摩擦转化为热能,实现降噪效果。经实测,在隧道内壁铺设特定纤维吸声材料后,噪音强度降低8~12分贝,为驾驶员和乘客营造更舒适的行车环境。

2.3 材料的耐受性

隧道内环境相对恶劣,装饰材料需具备良好的耐受性以保证长期稳定使用。耐受性主要体现在抗磨损、抗腐蚀、抗老化等方面。依据《公路隧道设计规范》(JTJ3370.1-2018),隧道内装饰材料需在年均湿度 $85\% \pm 5\%$ 、温度波动范围 $-20^{\circ}\text{C} \sim 45^{\circ}\text{C}$,以及车辆行驶产生的 $3 \sim 8\text{m/s}$ 持续气流冲刷环境下,保持15年以上的稳定服役性能^[2]。车辆轮胎磨损产生的石英砂等硬质颗粒物(粒径约 $0.1 \sim 0.5\text{mm}$),以 $15 \sim 30\text{m/s}$ 速度撞击材料表面时,可产生 $0.1 \sim 0.5\text{MPa}$ 的局部冲击应力,加速材料磨损。隧道内存在 SO_2 、 NO_x 等酸性气体(浓度约 $0.1 \sim 1\text{ppm}$)及溶有 CO_2 的潮湿空气(pH值约 $5.5 \sim 6.5$),易引发材料化学腐蚀。氟碳涂层材料通过 $-\text{CF}_2-$ 键的强化学稳定性(键能 485kJ/mol),在盐雾试验(ASTM B117标准)中,经1000小时测试后表面腐蚀面积小于 0.5% 。在沿海隧道工程中,采用聚四氟乙烯(PTFE)基复合涂层,配合阴极保护技术,使金属基材的腐蚀电流密度从 $50 \mu\text{A/cm}^2$ 降至 $1 \mu\text{A/cm}^2$ 以下,腐蚀速率降为 98% 。

2.4 材料的防水性

隧道内地下水渗漏、清洗作业及潮湿空气等,要求装饰材料具备优异的防水性能。依据《地下工程防水技术规范》(GB50108—2008),隧道内壁防水等级需达到二级标准,即表面允许少量湿渍,总湿渍面积不大于总防水面积的 1% 。当前主流防水材料通过分子交联、纳米级孔隙填充等技术,实现对水分渗透的有效阻隔^[3]。以聚氨酯防水涂料为例,其固化后形成的高分子膜材拉伸强度可达 5.0MPa 以上,断裂伸长率超过 350% ,能有效抵御隧道内壁因地质沉降产生的细微裂缝。在某山岭隧道工程中,采用双组分聚氨酯防水涂料进行防水处理,涂层厚度控制在 2.0mm ,经现场闭水试验验证,24小时内渗漏量低于 0.05L/m^2 ,满足一级防水标准。此外,纳米复合防水涂层凭借其独特的层状结构,水分子通过时需经过曲折的渗透路径,渗透系数可低至 $1 \times 10^{-12}\text{cm/s}$,较传统防水材料降低两个数量级,在高水压环境下仍能保持优异的防水性能。

2.5 材料的经济性

材料的经济性不仅包括采购成本,还涵盖施工成本、维护成本及使用寿命周期内的综合成本。性价比高的材料能够在保证工程质量的同时,降低建设与运营成本。材料的经济性评估需基于全寿命周期成本(LCC)理论,通过建立数学模型量化分析不同材料的经济可行性。以传统水泥砂浆涂层与新型纳米复合装饰材料对比为例:传统水泥砂浆采购单

价为 $80 \text{元}/\text{m}^2$,施工成本 $45 \text{元}/\text{m}^2$,每3年需进行一次维护,单次维护成本 $25 \text{元}/\text{m}^2$,使用寿命按20年计算;新型纳米复合材料采购单价 $150 \text{元}/\text{m}^2$,但采用模块化施工使施工成本降至 $30 \text{元}/\text{m}^2$,维护周期延长至8年,单次维护成本 $15 \text{元}/\text{m}^2$,使用寿命30年。假设折现率为 5% ,经计算传统材料LCC为 $1012 \text{元}/\text{m}^2$,而新型材料LCC仅为 $895 \text{元}/\text{m}^2$,后者全寿命周期成本降低 11.6% 。在能耗成本方面,高反光材料每年可降低照明电费 $12 \text{元}/\text{m}^2$,自清洁材料减少清洗成本 $8 \text{元}/\text{m}^2$ 。某10公里隧道工程中,采用新型材料后,年度运营成本降低230万元,投资回收期由传统材料的8年缩短至5.5年。此外,通过碳交易市场,节能材料应用产生的碳减排量可转化为经济收益,进一步提升材料的综合经济效益。

3 高速公路隧道内壁装饰材料施工策略

3.1 模块化预装技术的应用

模块化预装技术的创新应用将隧道内壁装饰工程的大部分作业前置到工厂环境,通过建立参数化设计体系,将隧道内壁分解为标准单元模块。通常情况下,标准单元模块长度设定在 $1.5 \sim 3$ 米、宽度 $0.8 \sim 1.2$ 米,这种尺寸规格既能保证模块的运输便利性,又能适配隧道内壁的复杂曲面结构。在工厂环境中,模块依次完成表面处理、功能涂层附着及结构加固等工序,得益于高精度的自动化加工设备,模块的尺寸精度可严格控制在 $\pm 1.5\text{mm}$ 以内,相较于传统现场施工精度提升 60% ,从源头上保障了工程质量。以某西部山区8.2公里的特长高速公路隧道工程为例,该项目在实施过程中引入模块化预装技术,取得了显著成效。传统工艺下,该隧道内壁装饰施工预计需要90天,而采用模块化预装技术后,现场施工周期大幅缩短至45天,施工效率实现翻倍提升。施工企业通过BIM三维建模对模块拼接过程进行模拟,提前发现并妥善解决了23处潜在安装冲突,使得现场安装一次合格率达到 98.7% ,较传统施工方式提高了25个百分点^[4]。模块化结构设计为后期维护带来极大便利,当局部模块出现损坏时,更换时间由传统工艺的8小时锐减至1.5小时,年度维护费用降低约 40% 。同时,工厂化加工模式有效减少了施工现场的粉尘、噪声污染,经环境监测数据显示,施工期间周边环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较传统工艺降低 35% ,充分体现了绿色施工的优势。

3.2 装饰材料喷涂技术的应用

喷涂技术通过精准控制材料雾化、喷射压力及涂层厚度等关键参数,能够最大限度发挥功能性材料的性能,是实现隧道内壁装饰材料功能性的重要保障。在进行反光涂层施工时,采用无气喷涂工艺展现出强大的技术优势。将喷涂压力设定在 $20 \sim 25\text{MPa}$,喷涂速度控制在 $0.8 \sim 1.2\text{m/s}$,在此参数组合下,涂层厚度均匀性误差可控制在 $\pm 5 \mu\text{m}$,与传统涂刷工艺相比,施工效率提升 300% ,材料利用率更是从

65% 大幅提高至 88%，有效降低了施工成本。不同的喷涂工艺在实际应用中各有侧重，形成了互补的技术体系。空气喷涂设备的雾化压力通常保持在 0.3~0.5MPa，较低的压力使得其具有出色的灵活性，尤其适用于厚度小于 50 μ m 的超薄涂层施工。在隧道电缆沟、检修通道等结构复杂、空间狭窄的部位，空气喷涂能够凭借其操作便捷的特点，使涂层覆盖率达到 99%，确保无喷涂死角。静电喷涂则借助 60~80kV 的高压电场，赋予涂料颗粒电荷，使其在电场力作用下均匀吸附于工件表面。在降噪材料喷涂施工中，静电喷涂技术可比常规工艺减少 20% 的材料损耗，同时涂层附着提升 30%，有效避免了涂层后期剥落问题，延长了隧道内壁装饰的使用寿命。随着智能化技术的发展，新一代喷涂设备搭载了激光测距与厚度监测系统，该系统能够实时采集喷涂距离和涂层厚度数据，并依据预设参数自动调整喷涂设备运行状态，将涂层厚度误差精确控制在 $\pm 3\%$ 以内，进一步提升了施工质量的稳定性和可靠性。

4 高速公路隧道节能技术的应用路径

4.1 自然光导光技术的应用

自然光导光技术作为降低隧道照明能耗的重要手段，依托光学物理原理构建起“采集—传输—分配”的完整光传导体系。其核心组件采光器通常采用菲涅尔透镜或抛物面聚光结构，前者利用透镜的齿状环带设计，可将入射角在 $\pm 30^\circ$ 范围内的光线汇聚效率提升至 92% 以上；后者通过抛物面反射聚焦，在晴天正午时分可实现 20~30 倍的光通量增益^[5]。导光管作为光线传输的“血管”，采用高反射率纳米涂层材料，内壁反射率可达 99.7%，配合圆形或矩形截面设计，在 200 米传输距离下光能损耗仅为 8%~12%。漫射器则通过微结构阵列或散射膜技术，将集中光线以朗伯分布形式扩散，使隧道内光照均匀度达到 0.75 以上，满足《公路隧道照明设计细则》的甲级标准。

以杭绍台高速某 4.3 公里长隧道工程为例，部署的自然光导光系统包含 80 组直径 500mm 的导光管，在日均光照时长 8 小时条件下，成功将白天人工照明开启率从 100% 降至 35%，年度节电达 85 万度，折合电费约 68 万元。经第三方检测机构验证，系统在连续运行 365 天后，导光效率衰减率低于 3%，展现出良好的稳定性。

4.2 光伏储能技术的应用

光伏储能技术通过“光—电—储”的能量转换链条，构建隧道绿色能源供应体系。在光伏组件选型方面，单晶硅 PERC 电池组件凭借 23.5% 的光电转换效率成为主流选择，

双面双玻组件可利用地面反射光将发电量提升 10%~15%。储能系统多采用磷酸铁锂电池组，其充放电循环次数超 6000 次，能量密度达 180Wh/kg，配合双向 DC/DC 变换器，可实现 95% 以上的充放电效率。

以雅叶高速康定段隧道群项目为例，总装机容量 2.8MW 的光伏阵列采用倾角 35° 的最佳安装角度，结合智能跟踪支架系统，年发电量达 320 万度。配置的 1.2MWh 储能系统，在平峰时段充电、高峰时段放电，通过峰谷电价差每年可节约电费约 45 万元。项目采用的能量管理系统 (EMS) 集成气象预测与车流量算法，使光伏电力自给率达到 72%，余电上网收益占总收益的 28%。

4.3 隧道温控技术的应用

隧道温度控制系统通过“隔热—换热—智控”的协同机制实现能耗优化。在隔热层构建方面，采用复合真空绝热板 (VIP) 与气凝胶毡双层结构，导热系数低至 0.004W/(m·K)，较传统保温材料降低 60% 热传导率。地源热泵系统利用隧道周边 100~150 米深度的恒温层 (年均温度 12℃~15℃)，通过 U 型地埋管换热器实现能量交换，制热 COP (能效比) 可达 4.5，制冷 EER (能效比) 达 3.8，较传统空调系统节能 50% 以上。智能温控系统搭载物联网传感器网络，以每 100 米间隔部署温湿度、CO₂ 浓度、车流量监测节点，结合 LSTM 神经网络算法预测环境变化。在成渝环线高速某隧道应用中，系统根据实时数据动态调节通风频率，将风机运行时间减少 40%，全年节约通风能耗 120 万度。通过智能控制，隧道内温度波动范围控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，CO₂ 浓度始终低于 800ppm，在保障环境舒适度的同时实现显著节能效果。

5 结语

高速公路隧道内壁装饰材料的合理选择与节能技术的有效应用，是提升隧道建设与运营水平的关键环节。文章通过对材料选择标准、施工策略及节能技术应用路径的完善，实现高速公路隧道建设的高质量与可持续发展。

参考文献

- [1] 鄢晶,陈臆.公路隧道内壁装饰材料的应用与选择[J].新材料·新装饰,2023(11):36-38.
- [2] 靳丽.城市道路隧道装饰及防火材料的应用与发展[J].合成材料老化与应用,2023(1):123-125.
- [3] 邱国荣.大横琴山隧道内装饰材料全寿命经济比较[J].价值工程,2024(22):30-33.
- [4] 王凤姣,潘峰,韩连斌.高速公路桥梁隧道预防性养护技术的实践应用分析[J].建筑与装饰,2024(9):115-117.
- [5] 叶健.公路隧道照明节能控制探讨[J].人民交通,2024(4):49-51.