

隧道内壁TiO₂光催化涂层净化效果试验研究

徐 贇¹, 褚炎泽², 蒋锦航³, 孙弋斐¹, 谈力昕⁴

(1. 金华市公路港航与运输管理中心, 浙江 金华 321000; 2. 金华市交通投资集团有限公司, 浙江 金华 321000; 3. 东阳市公路与运输管理中心, 浙江 东阳 322100; 4. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 针对人车混行公路隧道尾气污染治理难题, 通过模拟隧道环境, 系统评估了TiO₂光催化涂层在侧壁装饰材料上的净化效果与相关性能。试验采用有机-无机复合交联技术制备的纳米TiO₂涂层, 在16 W的LED光源照射下对NO₂和SO₂表现出显著降解能力, 12 h实际净化效率分别达13.0%和7.2%。清洁性能测试表明, 涂层表面超亲水特性使其除油率提升至76.74%, 且经酸碱溶液浸泡后仍能保持良好的亲水性, 证实其具有优异的抗污与耐腐蚀性。该技术可直接喷涂于隧道内壁, 可有效降低人车混行公路隧道污染物浓度, 节约通风能耗, 为绿色隧道运维提供借鉴。

关键词: 二氧化钛; 光催化; 尾气净化; 人车混行; 公路隧道

中图分类号: TU991.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0136-06

Experimental Study on Purification Performance of TiO₂ Photocatalytic Coating on Tunnel Lining

XU Yun¹, CHU Yanze², JIANG Jinhang³, SUN Yifei¹, TAN Lixin⁴

(1. Jinhua City Port and Transport Management Center, Jinhua 321000, China; 2. Jinhua Communications investment Group Co., LTD, Jinhua, 321000 China; 3. Dongyang City Port and Transport Management Center, Dongyang 322100, China; 4. Jiangsu Transportation Institute Group, Nanjing 210000, China)

Abstract: To address the challenge of exhaust pollution control in highway tunnels with mixed pedestrian and vehicle traffic, this study systematically evaluated the purification efficiency and performance of TiO₂ photocatalytic coatings applied to sidewall decorative materials through simulated tunnel environments. The experiment employed an organic-inorganic composite crosslinking technology to prepare a nano-TiO₂ coating, which demonstrated significant degradation capabilities for NO₂ and SO₂ under illumination with a 16 W LED light source, achieving practical purification efficiencies of 13.0% and 7.2% after 12 hours, respectively. Cleaning performance tests demonstrated that the superhydrophobic surface properties of the coating enhanced its oil removal rate to 76.74%, while maintaining a well hydrophilicity after immersion in acid/base solutions, confirming its excellent anti-fouling and corrosion resistance. This technology can be directly sprayed onto tunnel inner walls, effectively reducing pollutant concentrations in mixed-traffic road tunnels, saving ventilation energy consumption, and providing reference for green tunnel operation and maintenance.

Keywords: titanium dioxide; photocatalysis; exhaust purification; mixed-traffic; road tunnel

0 引 言

公路隧道是交通运输领域的重要组成部分, 作为现代经济和社会发展重要的基础设施, 我国公路隧道建设体量逐年增大。截至2024年底, 全国公路

隧道总计28 724处、32 596.6 km, 其中长、特长隧道达10 308处, 占比约36%^[1], 如图1所示。在“绿色隧道”建设理念逐渐普及的当下, 如何实现降本增效、节能减排, 是各地公路隧道建设、管养部门面临的主要问题。

隧道作为一种半封闭的地下构筑物, 狭长空间使其具有独特的通风特性, 导致其内部空气流动迟缓, 机动车尾气中的污染物难以扩散出去, 极易发生积聚^[2]。隧道内尾气产生的主要污染物包括一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、有机挥发物(VOC)、固体颗粒物等。这些污染物的积聚对驾乘人员、运维人

收稿日期: 2025-10-30

基金项目: 金华市科技计划项目(2024-4-187)

作者简介: 徐贇(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事公路建设养护管理工作。

通信作者: 谈力昕(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事地下空间设计、咨询工作。电子邮箱: 1245210321@qq.com

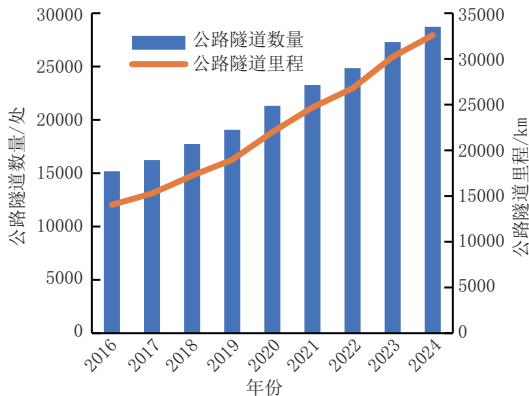


图1 2016—2024年中国公路隧道建设规模

员构成显著健康威胁^[3],特别是在人车混行通行模式下,隧道内行人因暴露时间长且缺乏防护,健康风险尤为严重。此外,隧道通风系统的需风量与风机启停策略与隧道内污染物的浓度及分布相关。为控制污染物浓度而频繁开启风机,产生的高能耗也是亟待解决的问题。

公路隧道行业普遍采用通风换气法,通过气流稀释隧道内污染物浓度来保障空气质量^[4]。但通风换气法对长隧道、特长隧道效果不明显,且会在行车道出口或排风口的位置造成二次污染。近年来,TiO₂光催化技术在公路设施空气净化领域的应用受到国内外学者的关注^[5-6]。针对国内人车混行公路隧道的特点,高效光催化涂层材料在该情况下的污染物治理研究中展现出显著的适用性,这是因为通常这些隧道的空间相对较小,车速较慢,但由于人车混行的特性,因此对空气质量提出了更高标准,尤其是要减少有害气体对行人健康的影响。

本研究针对人车混行公路隧道中尾气净化的迫切需求,采用有机-无机复合交联技术制备出纳米TiO₂涂层,通过SiO₂纳米颗粒与聚丙烯酸树脂的协同作用,显著提升涂层附着力(铅笔硬度≥3 H);通过高表面能活性剂赋予超亲水特性,有效抵抗油污附着,解决了传统光催化材料易失活、耐久性差的核心问题。同时,通过模拟隧道内服役环境开展试验,研究光催化涂层材料在隧道环境下对汽车尾气的净化能力,为人车混行公路隧道绿色运维提供借鉴。

1 光催化技术应用现状

光催化法是利用TiO₂等具备光催化活性的催化剂,在受到合适波长光照射时产生的游离电子及空穴,进而分解污染物。因此,具有反应条件温和、能耗低、净化效率高等特点。现状国内TiO₂光催化材料在公路行业的应用形式以光催化功能型路面为

主^[7-8],对CO、NO₂、TVOC等有害气体展现出明显降解效果^[9]。然而,在实际应用中也暴露出催化剂涂层在车辆循环荷载作用下的缺陷:包括附着力不足导致的剥落、脏污导致的性能衰减以及长期服役致使光催化活性降低等。

相比广泛研究的光催化路面,隧道内壁涂层具有显著优势:(1)避免车辆荷载导致的磨损与剥落;(2)减少轮胎摩擦带来的污染覆盖;(3)侧壁垂直面更易维护清洁,且不受交通流干扰。因此,隧道内壁涂层维护成本相对较低,更适合国内人车混行公路隧道的实际情况和经济条件。通过优化涂层材料配方及喷涂工艺,合理设置侧壁喷涂范围,可以达到效益最大化。公路隧道内环境具有特殊性,影响光催化涂层性能发挥,一方面隧道内普通光源难以充分激发催化^[10],且喷涂在基材上的实际效果未知;另一方面隧道内污染较为严重,光催化涂层在使用过程中,表面经过清洗后会逐渐损耗,净化能力会随之下降。目前,对于公路隧道内壁喷涂光催化涂层净化效果的研究仍较少,尚未出现人车混行公路隧道中的应用案例。

本次研究中重点通过试验探究两方面问题,一是考察模拟隧道内光照条件下TiO₂光催化涂层在侧壁装饰材料表面后的实际净化效果,二是考察清洁表面污渍时涂层的抗污和耐久性,从而确保涂层能够在特殊环境下长效稳定地发挥作用。

2 依托工程概况

金华市现有国省道隧道51条,总长4.6万m,农村公路隧道85条,总长约3.8万m。其中,多数隧道属于人车混行公路隧道,部分长、特长隧道步行通过需要30 min以上。隧道具有长空间、半密闭结构的特殊性,导致污染物不易排除,行人及驾乘人员通过的舒适性较差。现状隧道管养费用以机电设施运行所需的电费为主,频繁启动风机产生的能耗较高。

某隧道位于金华东阳市境内,于2017年建成通车。公路等级为一级公路,设计行车速度为80 km/h。隧道结构为分离式双洞隧道,单洞2车道,按隧道长度属于长隧道。隧道内人车混行,建筑限界宽度为:2.8 m(非机动车道)+8.8 m(行车道)+1.2 m(检修道)。隧道侧壁装饰原先采用2.5 m高釉面砖,存在开裂及脱落情况,考虑耐久性 & 方便清洁养护,可替换为搪瓷钢板。隧道照明系统方面,隧道内照明灯具统一调整为采用节能效果较好的LED光源,中间段基本

照明亮度取值4.5 cd/m²。LED灯源光谱380~700 nm,处于紫外线与可见光之间。隧道内污染物浓度的分布处于动态变化中,主要受风速、车流量、车型比例、隧道坡度和运营时段等的影响。该隧道采用纵向射流通风方式,风机可联动污染物检测传感器自动控制启停。

3 光催化涂层制备

3.1 技术路线

考虑到光催化涂层在隧道应用环境中的实际需求,通过将纳米级TiO₂光催化剂负载于SiO₂纳米颗粒、正硅酸四乙酯(TEOS)、水性聚丙烯酸树脂(PAA)组成的有机-无机复合的交联骨架中,加入高表面能活性剂提高涂层亲水性,制备出抗污性、耐久性好的光催化涂料。利用干湿喷交替的工艺,在保证涂层厚度的同时,控制了表面粗糙度,实现涂层耐久性与光学性能的兼顾。

3.2 涂层溶液配制

具体光催化涂层溶液配置步骤如下。

第一步,以水解SiO₂纳米颗粒作为主要硅源引入体系,增加孔隙结构,并利用正硅酸四乙酯在酸性条件下发生部分水解的特性,促使SiO₂纳米颗粒间形成局部交联网络,为涂层的长效耐久性奠定基础,其中,SiO₂颗粒的含量为4.0 wt.%。

第二步,采用水性透明聚丙烯酸树脂对SiO₂纳米颗粒进行表面包覆,通过树脂分子链的物理缠结与化学键合作用,可有效增强涂层微结构在水介质中的稳定性与界面黏结强度。为改善成膜性,消除纳米颗粒的聚集成团现象,加入C14~16烯基磺酸钠等高表面能物质作为分散剂。

第三步,涂料中引入TiO₂和Al₂O₃溶胶,提升涂层的光催化和耐久性。本研究采用混合掺杂的方法(TiO₂:Al₂O₃=1:1,总掺入量0.3 wt.%),通过调节无机填料比例,在保持涂层的透明性的同时,兼顾涂层机械性能。

3.3 喷涂工艺优化

通过浸涂和喷涂工艺均可在基底上制备涂层。使用多次浸涂工艺虽能有效增加涂层的厚度,但反复的浸渍—干燥循环会延长制备周期,且每次干燥速度不一,会导致涂层厚度分布不均,表面出现条纹和斑块。采用干湿喷交替的工艺可以兼顾涂层厚度与透明度,且更符合隧道侧壁大平面上的施工需求。前期测试表明,采用干喷(气压0.4~0.6 MPa)与湿喷

(固含量≈10%)交替工艺时,涂层铅笔硬度可提升至3H以上,且透光率达到90%以上。优化后喷涂工艺既解决了隧道侧壁施工中的材料堆积难题,又实现了涂层性能与透光率的协同。

4 净化效果试验

4.1 试验方案设计

本研究模拟隧道内污染物的局部聚集情况设计试验方案。试验舱体积为1.5 m³,污染物浓度采用CO在线分析仪、NO_x在线分析仪、SO₂在线分析仪组合使用,如图2所示。依据隧道内常见空气污染物主要成分及浓度,本研究以CO、NO₂和SO₂气体为目标污染物进行光催化净化试验,所用污染气体由空气混合稀释以保证安全。NO₂+CO+SO₂混合气目标体积分数为(5.0+50.0+0.5)×10⁻⁶,通过质量流量计控制流经光催化反应箱体的气体浓度。试验舱内照明光源采用功率为16 W的LED可见光源(光谱380~700 nm,发光效率不低于120 lm/W,色温4 000 K),模拟隧道内照明条件下侧壁表面照明情况,用来激发TiO₂纳米光催化材料的降解性能。试验材料采用隧道工程常用的侧壁装饰材料——搪瓷钢板作为载体,单块面积约0.05 m²,表面喷涂纯白色底漆。表面清洗活化后喷涂光催化涂层制成试件,如图3所示。



图2 光催化测试系统



图3 喷涂光催化涂层后的搪瓷钢板试件

具体试验步骤如下。

(1)将光催化涂层搪瓷钢板在实验室环境条件下养护1 d,然后直接入舱测试。

(2)将8块带涂层的试验样板放入试验舱A内,样板涂覆样品的一面朝向舱中心光源放置,关闭舱门。另外将8块相同规格的空白试验样板放入试验舱B内,其他条件与试验舱A相同。

(3)标准气瓶与试验舱连接,向舱内通入一定浓度的目标污染物(CO、NO₂、SO₂),并开启风扇。

(4)当舱内浓度达到目标值,关闭标准气气瓶减压阀,打开LED光源,并开始计时。

(5)在规定的时间内对舱内污染气的浓度进行测定。

(6)试验结束,净化舱内空气。

4.2 净化效果分析

试验中测得各污染物成分浓度变化结果如表1所示。

表1 试验舱内污染物成分体积分数变化						
时间	空白对照组			涂层		
	NO ₂ /10 ⁻⁶	CO/10 ⁻⁶	SO ₂ /×10 ⁻⁶	NO ₂ /10 ⁻⁶	CO/10 ⁻⁶	SO ₂ /10 ⁻⁶
0 min	5.02	50.7	0.60	4.85	48.2	0.67
3 min	5.00	50.4	0.57	4.83	47.9	0.66
10 min	4.94	50.2	0.55	4.75	47.8	0.61
1 h	4.85	49.8	0.49	4.59	47.6	0.54
3 h	4.70	49.1	0.40	4.38	47.0	
6 h	4.46	48.1	0.30	4.04	46.2	0.25
12 h	3.88	46.3	0.07	3.12	45.7	0.03

降解效率为试验时间内污染物降解效果的百分比,平均降解速率则是试验时间内污染物降解速率的平均值。以降解效率 η 以及平均降解速率 v 为指标,对不同污染物成分的净化效果进行分析评价。

$$\eta=(C_0-C)/C_0\times 100\%$$
$$v=(C_0-C)/t$$

式中: η 为降解效率,%; v 为平均降解速率; C_0 为试验舱内污染物的初始体积分数值; C 为试验舱内污染物采样时刻的体积分数值; t 为试验时间,min。

根据表1数据可以看出,两个实验组中污染物成分浓度都随着时间逐渐下降。空白组污染物浓度下降源于自然降解、仪器抽气及材料吸附。因此,实际的TiO₂光催化涂层效果需要减去空白对照组的降解效率。

根据图4的降解效率-时间曲线可以看出,总体净化效率随时间持续提升,12 h后NO₂实际净化效率为13.0%,SO₂实际净化效率为7.2%,涂层对NO₂的最

终降解效率高于SO₂气体。涂层对CO的净化能力则一般,这是由于CO分子结构稳定,试验所采用LED光源无法充分激发TiO₂的带电位,从而直接氧化CO。以NO₂实际净化效率为例,前1 h贡献了总降解量的35%,1~6 h贡献了总降解量的40%,6~12 h贡献了总降解量的25%(见表2)。

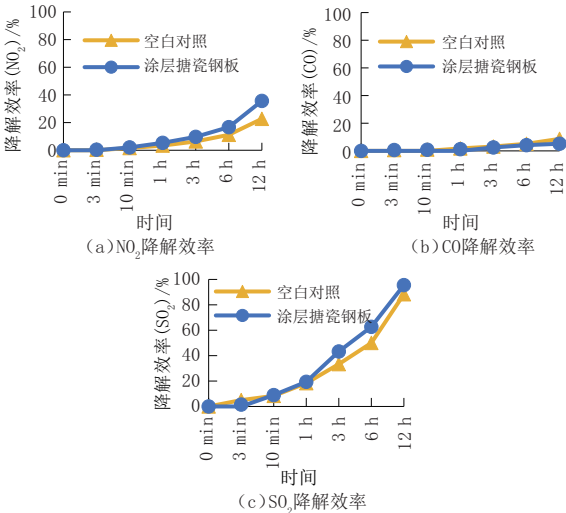


图4 污染物降解效率随时间的变化

时间节点	NO ₂ 实际净化效率
10 min	0.5%
1 h	2.0%
3 h	3.3%
6 h	5.5%
12 h	13.0%

根据图5的平均净化速率-时间曲线可以看出,光催化涂层对NO₂和SO₂的降解效率随时间呈现典型的三阶段特征。

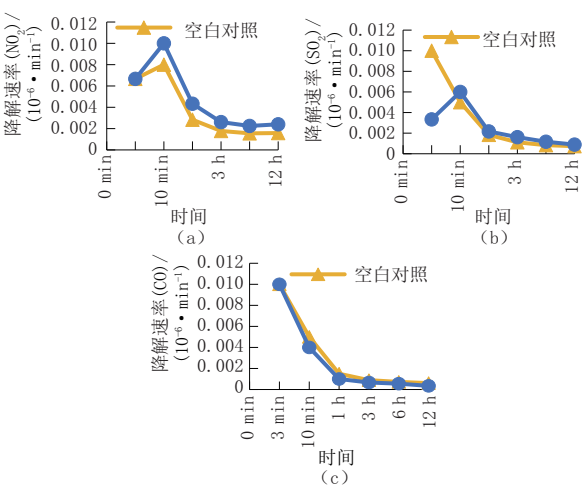


图5 污染物平均降解速率随时间的变化

(1)快速反应阶段(0~1 h):NO₂降解速率达到峰值0.01×10⁻⁶/min,SO₂降解速率显著提升(0.006×10⁻⁶/min),此阶段光催化活性位点充分暴露,反应驱

动力最强。

(2)缓慢衰减阶段(1~6 h):NO₂降解速率降至 $0.002 \times 10^{-6}/\text{min}$ (下降80%),SO₂降解速率降至 $0.001 \times 10^{-6}/\text{min}$ (下降83%),涂层光催化性能出现钝化。

(3)反应平衡阶段(6~12 h):NO₂、SO₂降解速率稳定在较低范围,反应逐渐趋于动态平衡状态。

基于试验数据,在实际隧道应用中充分利用前6 h的高效降解期,定期进行表面清洁,恢复催化活性。

5 清洁性能试验

5.1 抗污性能

该涂层在空气/水中分别呈现超亲水和超疏油特性,可有效抵抗油污。为了便于观察清洁效果,基材改为使用平玻璃,采用擦拭法去除油污。试验采用油雾喷涂法(大豆油)处理样片,通过以下步骤评估清洁效果:(1)喷涂前分别称取有涂层和空白样的原始质量;(2)喷油雾后分别再次称取质量;(3)用预湿无尘布往返擦拭一次;(4)自然干燥后最终称重,计算质量差及除油率。除油率计算方式为(擦拭去除油污质量-喷涂油污质量)×100%。试验结果如图6所示。

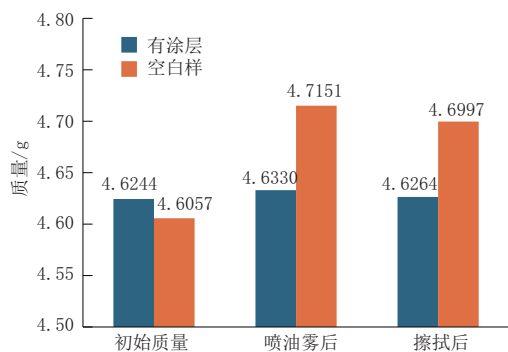


图6 涂层擦拭除油污结果

对比实验显示,有涂层的样品更不易吸附油污。当采用相同擦拭工艺时,涂层样品实现76.74%的除油率,较空白玻璃(14.1%)提升约5.4倍。目视观察涂层表面擦拭后恢复初始透光状态,而空白玻璃表面残留的油滴、油膜明显,直接影响视觉清晰度。

5.2 耐久性能

隧道侧壁脏污后,养护人员通常会使用酸性或碱性清洁剂进行清洁处理。涂层的耐腐蚀性试验结果如图7所示。当涂层分别暴露于稀硫酸(pH≈0.3)和饱和Ca(OH)₂溶液(pH≈12.5)环境48 h后取出自然晾干,虽然干燥后表面出现暂时性污染,但通过简单水洗即可恢复初始状态,且仍维持良好的亲水性。

试验结果证明本次制备的涂层具备较好的耐酸碱腐蚀性,同时又保持较好的亲水性,能够适应在隧道特殊环境下长期服役。这种特性源于涂层内部稳定的物理交联结构和化学键合作用。

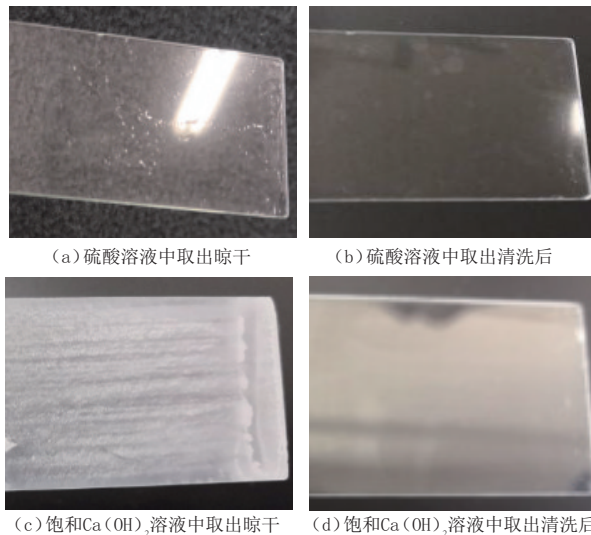


图7 样品在酸碱浸泡和清洗后的照片

6 经济与技术可行性分析

以依托人车混行隧道工程为例,单洞隧道长2 660 m,隧道侧壁及拱顶可喷涂面积约5.8万m²。隧道单洞安装14台射流风机,单台风机功率30 kW,根据隧道内环境监测按需开启,中等车流条件下单日单台风机开启总时长约2 h,年通风耗电量为61.3万kW·h。以涂层对NO气体12 h净化效率推算,风机运行时间减少13%,年均节电约7.9万kW·h。同时,涂层的抗污效果可减少隧道装饰的清洁频次,目前因行人通行要求墙面清洁频次为2次/月,采用墙面涂层后预计减少至1次/月,可节约清洁费用3.1万元。此外涂层对污染物的净化效果及抗污性能可以极大提升行人及养护人员的感官舒适性,降低洞内滞留尾气对健康的影响。

7 结 语

(1)将制备的纳米TiO₂光催化涂层溶液喷涂到隧道侧壁装饰搪瓷钢板上,在较少涂料用量下使之具备净化效果,尤其是对于NO₂、SO₂的降解效果较明显。在16 W光源下对NO₂实际净化效率为13.0%,SO₂实际净化效率为7.2%。

(2)喷涂纳米TiO₂光催化涂层后对试件的抗污效果及耐久性提升显著。与空白样品相比,有涂层的样品更不易吸附油污,且擦拭后的除油率提升至

76.74%。酸碱溶液浸泡后,有涂层样品仍能保持一定的亲水性,较快恢复透明状态。这一特性有助于保持涂层的长期净化效果,降低清洁劳动强度。

(3)采用优化的干湿交替喷涂工艺适用于在隧道内壁上施工。在本研究基础上,考虑进一步提高涂层净化效果及耐久性,在降低人车混行公路隧道内的污染物浓度,提高行人及驾乘人员的舒适性,保障人员健康,节约运营通风电能消耗等方面均有实际应用价值,有助于提高隧道绿色运营水平。

(4)为克服隧道真实环境的挑战,还需在以下方面开展深入研究:一是光环境复杂性,隧道内光照不均匀,需优化光源布局或辅助紫外激发;二是污染覆盖衰减,长期油污与粉尘附着可能阻塞催化活性位点,需定期清洁维护;三是长期耐久性,尽管酸碱试验表现良好,但实际环境下机械磨损、温湿度循环等影响需进一步验证;四是维护成本,建议结合自动化清洗设备,降低人工维护频次。

(上接第 131 页)

上,材料复用率达 100%。以典型工程测算,每延千米可节约直接成本约 37.8 万元,大幅降低了全寿命周期成本和资源消耗,符合交通基础设施绿色、低碳、可持续的新发展理念。

(5)未来研究可围绕将该协同设计理念延伸至更高防护等级(如 SA、SS 级)护栏的适配性研究;在更复杂气候、地质及长期服役条件下,对护栏的耐久性、可靠性进行持续观测与评估,为技术规范的进一步完善提供数据支撑。

参考文献:

[1] 郭忠印,方国靖.波形梁护栏加高改造设计研究[J].公路工程,2020,45(3):99-104.
 [2] 卢健,贾宁.路面加铺后套筒加高护栏防护能力分析[J].公路交通科技,2022,39(增刊2):190-196.
 [3] 李远军,宗炜.基于高速公路路面加铺的波形梁钢护栏防护改造方案研究与应用[J].建材世界,2016,37(3):71-74.
 [4] 王维利,荆迪菲,宋灿灿.公路波形梁护栏改造临界高度仿真研究[J].公路工程,2020,45(5):142-148;179.
 [5] 刘彬,李菲,赵秀京,等.波形梁护栏防阻块结构参数及防阻性能研究[J].公路,2019,64(1):197-201.
 [6] 陈岳峰,陈礼彪,曾俊铖.高速公路在用波形梁护栏适应性评价和提升改造技术研究[J].公路交通科技,2019,36(9):124-128;149.
 [7] 刘晓波,王新,刘思源,等.基于仿真模拟技术的SB级波形梁护栏

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部.2024 年交通运输行业发展统计公报[R].北京:中华人民共和国交通运输部,2024.
 [2] 刘冠宇.隧道内壁高效光催化降解 NO 涂层的制备、性能及机理研究[D].西安:长安大学,2022.
 [3] 任涛,陈结,刘戎,等.特长隧道汽车尾气流动规律研究[J].地下空间与工程学报,2022,18(增刊2):1008-1014.
 [4] 崔佳,苏昂,陈稳,等.空气净化技术在超长水下公路隧道通风中的应用研究[J].交通节能与环保,2024,20(2):211-216.
 [5] 许海勇,范益群,倪丹.城市地下快速道路空气净化技术的发展战略研究[J].城市道桥与防洪,2015(3):175-179.
 [6] Maggos T, Plassais A, Bartzis J, et al. Photocatalytic degradation of NO_x in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 136(3): 35-44.
 [7] 张文凯,王彦敏,宋淑琴,等.光催化降解汽车尾气道路材料的应用研究进展[J].材料导报,2022,36(增刊2):117-120.
 [8] 李思童,李书飞,王超,等.纳米二氧化钛雾封层技术及其在工程中的应用[J].城市道桥与防洪,2018(2):44-47.
 [9] 陈萌,金立生,储江伟,等.水泥光催化活性路面净化机动车排放 NO_x 性能研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(2):61-65.
 [10] 杜红昭.隧道内汽车尾气净化新材料制备与性能研究[D].西安:长安大学,2012.

梁板中心设置高度研究[J].中外公路,2021,41(2):352-356.
 [8] 王佳,吴亚伟.新型护栏碰撞特性仿真分析[J].城市道桥与防洪,2025(3):77-81.
 [9] 龚帅,李璇,胡学成,等.广清高速公路 A 级波形梁护栏加强方案研究[J].城市道桥与防洪,2024(3):34-38.
 [10] 姚日和,谢海周,武政杰,等.波形梁护栏的改造与提升技术研究[J].公路,2024,69(6):263-266.
 [11] 查庆,贾宁,刘宇,等.波形梁护栏高度偏差阈值及处置对策[J].公路交通科技,2023,40(增刊1):389-396.
 [12] 刘航,龚帅,刘思源,等.高速公路旧波形梁护栏改造研究[J].公路工程,2020,45(6):173-180.
 [13] 荆迪菲,康可心,宋灿灿.波形梁护栏加高改造方案研究[J].公路工程,2021,46(1):117-124.
 [14] 陈涛,吴灵生,田东翔,等.高速公路波形梁护栏安全性评价[J].长安大学学报(自然科学版),2017,37(6):92-98.
 [15] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J].振动与冲击,2011,30(1):152-156.
 [16] 闫书明,陈冠雄,刘航.几种改进的波形梁护栏的碰撞分析[J].公路工程,2016,41(1):167-171;201.
 [17] HANFENG Y, LIZHOU Z, ZHIPENG L, et al. Crash analysis and evaluation of a new separate W-beam guardrail on highways using the finite element method[J]. Engineering Structures, 2023, 278.
 [18] YIN H, XIAO Y, WEN G, et al. Design optimization of a new W-beam guardrail for enhanced highway safety performance[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 112: 154-164.