

轨道交通声屏障的现状与发展研究

王鑫, 彭亚东, 林韬, 徐海啸, 聂彦军

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082)

摘要: 为解决轨道交通噪声污染问题, 系统梳理国内典型轨道交通声屏障的应用现状, 聚焦设计、运维及检修环节的核心技术难题。重点研究防火性能中的传统防护措施与新型碳纳米防火涂料应用, 防眩光性能的材料选型、结构优化及涂层技术, 耐久性提升的吸声材料选取、特殊部位设计及螺栓检修优化等关键技术点, 同时分析结构设计不合理与施工不规范导致的结构性隐患。通过对比实验数据与工程案例, 对典型问题进行深度剖析, 提出针对性优化方案。研究成果可为轨道交通声屏障的设计升级、性能提升及行业技术发展提供参考。

关键词: 城市轨道交通; 声屏障; 防火性能; 防眩技术; 耐久性; 碳纳米防火涂料; 防眩光涂层

中图分类号: U491.92

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0198-05

Research on Current Situation and Development of Sound Barriers in Rail Transit

WANG Xin, PENG Yadong, LIN Tao, XU Haixiao, NIE Yanjun

(Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: To address the issue of noise pollution from rail transit, the application status of typical domestic rail transit sound barriers is systematically sorted out, and the core technical problems are focused on the design, operation and maintenance, and repair links. The key technical points including the traditional protective measures and application of new carbon nano-fireproof coatings in fire resistance, the material selection, structural optimization and coating technology for anti-glare performance, the selection of sound-absorbing materials for durability improvement, the design of special parts and the optimization of bolt maintenance are specially studied. At the same time, the structural hazards caused by unreasonable structural design and non-standard construction are analyzed. By comparing the experimental data with engineering cases, the typical problems are deeply analyzed, and the targeted optimization solutions are proposed. The research findings can provide a reference for the design upgrade, performance improvement and industrial technical development of rail transit sound barriers.

Keywords: urban rail transit; sound barrier; fire resistance; anti-glare technology; durability; carbon nano-fireproof coating; anti-glare coating

0 引言

近20年来,随着我国工业化进程加速与交通运输网络的快速扩张,噪声污染已成为影响人居环境的关键问题,与水污染、大气污染、固体废弃物污染并列为四大环境污染^[1]。环境监测数据显示,我国约17%的城市道路交通噪声达到中度污染水平,49%的城市存在轻度交通噪声污染,其中轨道交通噪声对沿线居民生活质量、公共健康及生态环境造成显著影响。

轨道交通噪声主要源于轮轨相互作用与动力系统运行,高架线路中列车通行还会激发结构振动产生二次噪声^[2]。在列车正常运行速度下,轮轨噪声占主导地位,其控制需从声源、传播途径及受声点三个维度切入。由于声源降噪受技术条件与运营成本限制,从传播途径入手的噪声控制技术具有更高的经济可行性与工程适用性,声屏障作为该领域的核心技术手段,凭借其高效降噪特性在轨道交通工程中得到广泛应用^[3]。

当前我国轨道交通声屏障在钢结构设计、吸声隔声材料选型、防腐处理及后期运维检修等方面仍存在诸多问题。据行业规范要求,声屏障屏体设计年限为15年,钢结构设计使用年限为30年,远低于

收稿日期: 2025-10-27

作者简介: 王鑫(1982—),男,学士,正高级工程师,从事桥梁、隧道、综合管廊、深基坑、管线穿越等设计及咨询工作。

桥梁结构 100 年的设计基准期^[4]。如何通过设计优化延长使用寿命、降低更换成本,已成为行业亟待解决的关键技术难题。基于国内典型工程案例,系统分析声屏障应用现状与核心问题,提出针对性优化方案,为行业技术升级提供支撑。

1 我国声屏障现状

1.1 结构组成与降噪机制

轨道交通声屏障主要由支撑框架、金属吸声板、透明隔声窗等部件构成,通过螺栓锚固于桥梁结构上^[1],其结构示意图如图 1 所示。声屏障通过反射、绕射、吸收与透射抑制四种核心机制实现噪声控制。

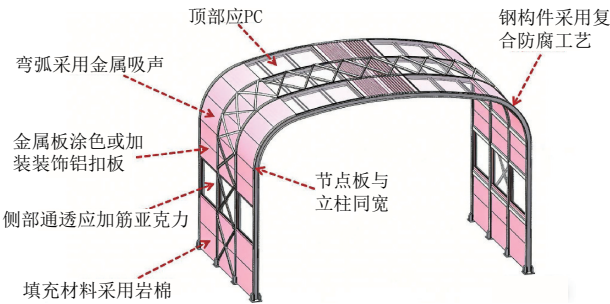


图 1 声屏障结构示意图

反射作用:屏障表面将部分声波反射回声源方向,减少直接传播至受声区的声能。

绕射抑制:通过优化屏障高度与长度,削弱声波绕射传播强度。

吸收机制:内部填充的多孔吸声材料(如玻璃棉、岩棉)通过摩擦与黏滞作用将声能转化为热能,降低反射声波强度。

透射控制:采用高密度材料(亚克力板、PC 板)或多层复合结构,阻挡声波穿透,提升隔声性能^[5]。

1.2 发展历程与工程应用

国外声屏障研究起步较早,美、日、法等国于 20 世纪 60 年代开展理论研究并实施工程应用,早期以混凝土类声屏障为主,80 年代后吸声类产品成为主流。我国声屏障应用始于 1992 年贵黄高速公路的百米实验性工程,随后逐步推广至轨道交通领域^[6]。2002 年,京山铁路北京站段建成 1 100 m 长铁路声屏障示范工程,综合考虑声学、结构、景观等多维度因素,标志着我国轨道交通声屏障技术进入规范化发展阶段。

21 世纪以来,声屏障技术不断创新:2011 年梁李斯等人研发的闭孔泡沫铝板声屏障,在 30~630 Hz 频段降噪效果显著优于传统百叶声屏障;2013 年叶颖

等人设计的模块化声屏障实现美观与实用的统一;2014 年耿传智等人通过实验验证,带圆形或三角形凸起的声屏障可通过提升凸起高度优化降噪性能^[7]。

当前国内声屏障已形成多元化应用格局,代表性工程包括以下几个。

深圳东部过境通道全封闭声屏障采用明亮颜色和大面具通透板,创新颜色的使用体现了城市的开放与包容,如图 2 所示。



图 2 深圳东部过境通道全封闭声屏障

青岛胶州湾海底隧道全封闭声屏障整体采用大面积的蓝色通透屏体,对应青岛这座海滨城市,顶部的菱形造型和蓝色通透结合,仿佛海浪在拍打,如图 3 所示。



图 3 青岛胶州湾海底隧道全封闭声屏障

上海北横通道全封闭声屏障在声屏障隧道入口处设计独特的子弹头造型,使得司机在驶入通道前及时适应光线变化,也令路面至全封闭声屏障的结构过渡视觉上顺滑,如图 4 所示。



图 4 上海北横通道全封闭声屏障

成都天府机场高速全封闭声屏障金属声屏障单元板采用那个同色系不同色号错拼,营造氛围感色彩,天蓝色调与天空遥相呼应,色彩搭配不显突兀,如图 5 所示。

尽管我国声屏障发展迅速,但仍存在吸声隔声材



图5 成都天府机场高速全封闭声屏障

料选型混乱、钢结构防腐效果不佳、后期运维困难、后加装技术不成熟等问题,制约了其长期稳定运行。

2 存在问题及对应解决方案

2.1 防火性能优化

2.1.1 防火现状与技术要求

轨道交通声屏障造价高昂,全封闭类型单项目造价常达数千万元,火灾不仅会造成重大资产损失,产生的毒烟与坠落物还可能引发二次事故,威胁人员与车辆安全^[8]。根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017),无防火保护的钢结构耐火时间仅15~20 min,远低于声屏障规范要求的1.5~2.5 h^[2],需依据《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)进行耐火验算并采取防护措施。

2.1.2 传统防火措施分析

现有钢结构防火保护措施及应用局限性如下。

防火板:热固性树脂浸渍纸高压层积板,表面性能优良,但声屏障钢结构尺寸较小,固定难度大,且受活塞风影响易脱落,存在安全隐患。

柔性毡状隔热材料:以玻璃棉、岩棉为基材,具备不燃性与优异隔音性能,但同样存在固定困难与脱落风险,在轨道交通领域应用受限。

外包混凝土/金属网抹砂浆:通过包覆隔绝热量,但增加构件重量与安装难度,提升桥梁二期恒载,经济效益不佳。

2.1.3 防火涂料技术应用

防火涂料通过表面涂装提升材料耐火能力,分为厚型(非膨胀型)与薄型(膨胀型)两类。

厚型防火涂料:涂层厚度 ≥ 15 mm,热导率低,通过形成釉状保护层隔绝氧气,但涂层厚重导致建筑物自重增加,需添加轻质隔热骨料优化性能。

薄型防火涂料:涂层厚度1.5~4.0 mm,受热膨胀发泡形成泡沫隔热层,兼具隔氧与吸热作用,防火效果显著。

碳纳米防火涂料:新型高科技产品,以碳纳米

管、石墨烯为核心成分,实现防腐与防火双重功能。其阳极保护性能可长效防护钢结构,但当前单价达5 500元/t,较传统镀锌+防火涂料方案(3 500元/t)高出60%,应用范围受限。随着技术迭代与成本降低,碳纳米防火涂料在轨道交通领域的应用前景广阔。

2.2 防眩光技术改进

2.2.1 眩光产生机制

声屏障在阳光照射下的光学效应直接影响交通安全性,光滑浅色表面易产生镜面反射形成眩光,干扰驾驶员与行人视线;粗糙或深色表面则以漫反射为主,眩光现象较弱^[9]。此外,光线吸收导致的屏体温度升高,还可能加速材料老化,影响使用寿命。

2.2.2 防眩光优化措施

针对眩光问题,可通过材料选型、结构与表面处理多维度优化。

低反射率材料选型:选用亚克力、聚碳酸酯板等具有磨砂或哑光效果的材料,降低光线反射强度,如图6所示。

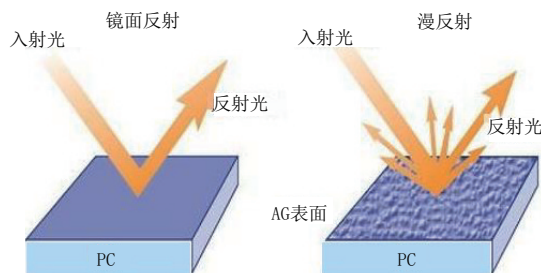


图6 声屏障眩光措施(磨砂处理)

颜色设计优化:采用灰色、米色、绿色等柔和色系,避免鲜艳或高反光颜色。

结构形态调整:优化弧形屏障的曲率与角度,采用不规则纹理或图案设计,减少光线集中反射。

防眩光表面处理:通过磨砂处理、喷涂AG涂层或镀膜AG处理提升防眩效果。其中,防眩光涂层利用薄膜干涉原理,通过氮化硅或二氧化钛薄膜引导光线弯折,已广泛应用于光伏板与电子产品显示屏,在声屏障领域的应用正逐步拓展。

2.3 耐久性提升方案

声屏障实际使用寿命常低于设计要求,主要受恶劣使用环境、设计构造不合理、施工不规范及运维不及时等因素影响。考虑到轨道交通运营特殊性,日间线路运营期间难以开展养护维修,需通过技术优化提升耐久性并改善检修便利性^[10]。

2.3.1 吸声材料科学选型

吸声材料性能直接影响声屏障降噪效果与使用

寿命,常用材料性能对比如表 1 所示。岩棉与玻璃棉因造价经济、吸声效果优良(吸声系数分别为 0.9、0.95),是轨道交通领域主流选择。需注意的是,采用 PVF 薄膜包裹离心棉时,设计应明确全包裹要求,避免施工单位仅正面贴敷导致玻璃纤维外泄,影响材料使用寿命与环境质量。

表 1 吸声材料性能对比分析表						
名称	常用密度/(kg·m ⁻³)	吸声性能	防火性能	可加工性	性价比	价格/(元·m ⁻²)
岩棉	80~120	0.9	良好	简单	高	42~63
玻璃棉	32、48	0.95	较好	简单	高	42~63
聚酯纤维板	180~200	0.75	一般	一般	一般	126~145
泡沫铝	100~500	0.65	良好	较难	较低	494~623
复合冲孔铝板	2 700	0.85	良好	一般	高	140~160
微孔岩板	1 500	0.65	较好	一般	一般	498~550

2.3.2 特殊部位结构设计优化

伸缩缝处构造强化:高架防撞墙伸缩缝处的声屏障,需考虑钢筋混凝土伸缩量,对立柱翼板与支座板进行加宽处理。工程调查显示,未做加宽处理的伸缩缝处屏体易发生单侧跌落事故。

柱脚螺栓检修优化:通过在工字钢立柱柱脚内侧设置 L 型钢构件,将隔音屏放置于 L 型钢翼缘上,使锚固螺栓位于 L 型钢内侧,避免螺栓被屏体隔绝,降低高空检修难度与成本,如图 7 所示。

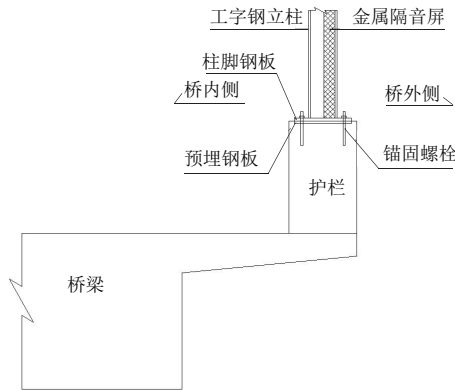


图 7 立柱柱脚螺栓被屏体隔绝

梁柱连接节点改进:将传统侧部连接节点调整至顶部,既错开 PC 板压板节点缩小尺寸,又避免节点暴露于雨雪侵蚀,提升螺栓耐久性。

凹凸型屏体应用:采用具有防撞设计的凹凸型声屏障系统,增强抗冲击与抗震动性能,通过增大翼板宽度补偿热胀冷缩位移,有效防止屏体脱落。该构造已在常州地铁二号线成功应用,如图 8 所示。

2.3.3 紧固件与固定方式升级

防松螺母组合应用:柱脚采用双底自锁防松动垫圈+法兰型止退螺母+普通螺母的组合形式,利用双层自锁垫圈的齿牙系统产生高抵抗力,实现 100% 防松效果,适用于轨道交通等振动环境。

焊接限位板固定:替代传统 L 型角钢+螺栓固定方式,减少螺栓使用数量,降低屏体脱落风险。

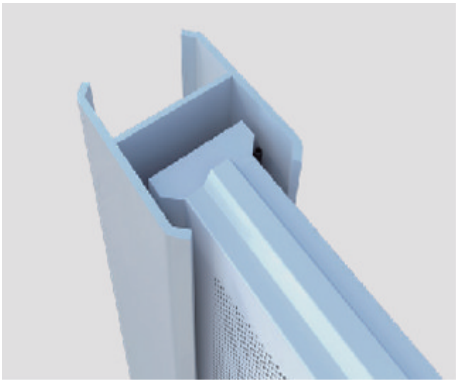


图 8 凹凸型声屏障

防坠落安全设计:除规范要求的防坠落钢丝绳外,通过结构优化从根本上解决屏体热胀冷缩导致的脱出问题。

2.3.4 检修设施配置

全封闭与半封闭声屏障可在顶部设置检修平台,或配备轨行式检修车,为后期养护维修提供便利,减少对轨道交通运营的影响。

3 声屏障绿色低碳发展研究展望

在“双碳”目标引领下,“交通+光伏”已成为行业发展重要趋势。国家层面,《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确鼓励在交通枢纽场站及公路、铁路沿线合理布局光伏发电设施;地方层面,《上海交通领域光伏推广应用实施方案》要求新建道路全影形隔音棚实现光伏全覆盖,北京市提出在建及新建轨道交通项目开展区间声屏障光伏一体化试点^[11]。

光伏声屏障系统兼具噪声控制与清洁能源生产功能,可取代常规声屏障应用于学校、医院、居民区等场所,为周边用电设备提供绿色电力,具有广阔的应用前景。其核心技术难点包括光伏组件与声屏障结构的一体化设计、抗风载与抗震性能优化、发电效率提升及成本控制等,需通过跨学科协同创新实现技术突破。后续研究将聚焦光伏声屏障的结构力学

性能、声学性能与发电性能协同优化,为工程应用提供技术支撑。

4 结 语

轨道交通声屏障作为控制交通噪声污染的关键工程设施,其技术与性能优化直接关系到沿线人居环境质量与交通运营安全。通过系统梳理我国轨道交通声屏障的应用现状与发展历程,聚焦防火、防眩光、耐久性三大核心技术痛点及结构性隐患,结合典型工程案例与实验数据,提出了针对性的优化方案:防火性能方面,明确了传统防护措施的限制性,凸显了碳纳米防火涂料等新型材料的应用潜力;防眩光技术方面,构建了材料选型、结构与表面处理相结合的多维解决方案;耐久性提升方面,从吸声材料选型、特殊部位构造优化、紧固件升级及检修设施配置等块面形成了完整技术体系。

研究表明,轨道交通声屏障的性能提升需兼顾声学效果、结构安全、施工便利性与运维经济性,通过设计优化与技术创新可有效延长使用寿命、降低全生命周期成本。随着“双碳”目标的深入推进,光伏声屏障等绿色低碳技术将成为行业发展的重要方向,其一体化设计与多性能协同优化仍需进一步探

索。本文提出的技术方案与研究思路,可为轨道交通声屏障的工程设计、施工运维及技术升级提供参考,助力我国城市轨道交通事业朝着更安全、更环保、更可持续的方向发展。未来,还需结合更多实际工程案例开展长期跟踪研究,持续完善技术标准与应用体系,推动声屏障技术在轨道交通领域的深度应用与创新发展。

参考文献:

- [1] GB/T 50157—2013 地铁设计规范[S].
- [2] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
- [3] 王鹏,李建锋,张勇.轨道交通声屏障降噪性能影响因素分析[J].铁道工程学报,2020,37(8):98-103.
- [4] JTG/T D31-03—2018 公路声屏障设计与施工技术规范[S].
- [5] 李明华,张晓东.声屏障吸声材料性能测试与应用研究[J].噪声与振动控制,2019,39(4):182-186.
- [6] 陈志强,王丽娟.我国声屏障技术发展历程与现状分析[J].公路交通科技,2018,35(12):142-148.
- [7] 耿传智,刘军,吴昊.凸起型声屏障降噪性能数值模拟与实验研究[J].振动与冲击,2014,33(22):123-127.
- [8] GB 51249—2017 建筑钢结构防火技术规范[S].
- [9] 赵宇,陈晓峰.轨道交通声屏障防眩光技术研究[J].城市轨道交通研究,2021,24(5):165-168.
- [10] 刘建国,张宏,王磊.轨道交通声屏障耐久性提升技术措施[J].铁道标准设计,2022,66(3):145-149.
- [11] 中华人民共和国国务院.“十四五”现代综合交通运输体系发展规划[Z].北京:中华人民共和国国务院,2022.

(上接第187页)

防护绿地局部较宽的情形。

4 结 语

本文梳理总结了杭州中心城区跨钱塘江非机动车交通现状问题,分析未来非机动车过江交通发展趋势,借鉴国内外经验,提出了扩建非机动过江通道、丰富非机动车过江方式和优化两岸非机动车骑行上下桥等策略,并提出了三种上下桥骑行道衔接模式,为杭州及其它拥江发展城市的优化完善非机动车过江交通提供参考借鉴。

参考文献:

- [1] 程勋.宁波常洪大桥非机动车过江方案研究[J].城市道桥与防洪,2025(9):226-230.
- [2] 王大为.公路过江桥增设慢行道问题与对策研究[J].公路与汽运,2023(3):29-32;46.
- [3] 黄越.跨江桥梁的慢行交通设计研究[J].市政技术,2024(5):154-160.
- [4] 张伟略,黄岩.城市骨干道路过江交通人非通道设置方案研究[J].城市道桥与防洪,2019(1):37-40.
- [5] 孔令斌,戴彦欣,陈小红,等.城市综合交通体系规划标准GB/T

51328实施指南研究[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.

- [6] 彭然,刘斐阳,黄雨蝉,等.江河水域对城市交通的影响研究——以中国典型的临江城市为例[J].现代城市研究,2022(4):122-130.
- [7] CJJ 37—2012 城市道路工程设计规范[S].
- [8] CJJ 193—2012 城市道路路线设计规范[S].
- [9] 顾浩磊.上海松浦大桥老桥拓宽改造项目设计与施工[J].建筑技术开发,2023(3):122-124.
- [10] 屈兴威.以电动自行车为主的市政道路非机动车道纵坡研究[J].工程建设与设计,2019(2):102-103.
- [11] 任衍方.考虑电动自行车影响的道路设计研究[J].城市地理,2015(18):210.
- [12] 方培.电动自行车越江通道设计对策浅析[J].隧道与轨道交通,2025(2):42-45;74.
- [13] 胡程.大型桥梁中非机动车越江交通组织模式探讨[J].中国市政工程,2020(4):91-94;106.
- [14] 易军伟.慢行交通过江问题浅析[J].城市道桥与防洪,2020(12):20-22;47.
- [15] 何武超,谢波.中兴大桥人非过江系统设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2022(9):67-70;90.
- [16] 徐雅洁,张艳平,户佐安.转弯曲率对自行车流交通特性的影响研究[J].交通科技与经济,2025(4):24-30.