

钢桥面铺装层耐久性与抗滑性能研究

武煜昕

新疆建业建筑安装工程有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：本文系统梳理了钢桥面铺装层在耐久性与抗滑性能方面所面临的核心问题，深入剖析了影响这两项关键性能的内在机理与外部因素。在此基础上，对当前主流的铺装材料体系（如环氧沥青、浇注式沥青、SMA及高黏改性沥青混合料）进行了综合性能对比分析，并探讨了新型材料（如聚氨酯、树脂基复合材料）的发展潜力。同时，本文详细阐述了提升铺装层耐久性与抗滑性能的关键技术路径，包括精细化材料设计、界面粘结强化、结构优化设计以及预防性养护策略。最后，结合智能感知与数字孪生等前沿技术，展望了未来钢桥面铺装向高性能化、长寿命化、智能化方向发展的趋势，旨在为相关领域的科研与工程实践提供理论参考和技术支撑。

关键词：钢桥面铺装；耐久性；抗滑性能；材料体系；界面粘结；结构设计

引言

我国基础设施建设加速，大跨径桥梁成为关键纽带。正交异性钢桥面板因优势在大跨径桥梁广泛应用，但需依赖钢桥面铺装层。它不仅是车辆与桥梁的接触面，承担传递荷载等功能，还是保护钢结构的屏障。不过，其工作环境严苛：钢桥面板刚度低，车辆荷载下易致铺装层疲劳开裂；钢材导热系数高，铺装层温度变化大，易引发车辙、泛油、低温开裂；界面粘结性能决定结构完整性，脱层会致结构性破坏；服役期需维持抗滑性能，其会随多种因素衰减。耐久性与抗滑性能不足分别会造成经济损失、社会影响及威胁行车安全。因此，本文旨在系统研究二者内在关联、影响因素及提升策略，为构建可靠、安全、经济的钢桥面铺装体系提供依据。

1 钢桥面铺装层失效模式与核心挑战

钢桥面铺装层的失效是一个多因素耦合作用下的复杂过程，其主要失效模式可归纳为以下几类：

1.1 车辙变形

车辙是高温季节最常见的病害之一。在重载、渠化交通的反复碾压下，铺装材料在高温下发生不可逆的塑性流动，形成纵向带状凹陷。车辙不仅影响行车舒适性和安全性（易导致车辆失控），还会在雨天形成积水，进一步降低抗滑性能并加速水损害。

1.2 疲劳开裂

这是由钢桥面板的柔性特性决定的根本性挑战。车辆荷载通过铺装层传递至U肋、横隔板等部位时，会在这些位置上方的铺装层底部产生反复的拉应力。当累积的拉应变超过材料的疲劳极限时，便会产生自下而上的反射裂缝。裂缝的出现为水分侵入提供了通道，加速了层间脱粘和材料老化，最终导致网裂、坑槽等严重病害。

1.3 层间脱粘

铺装层与钢板之间（通常通过防腐层和粘结层实现连接）以及铺装层上下结构层之间的粘结失效，是导致铺装层整体性丧失的致命原因。脱粘的原因包括：界面处理不当（如喷砂除锈不达标、清洁度不足）、粘结材料选择或施工质量不佳、温度应力与荷载应力的综合作用、以及水分侵蚀削弱界面化学键合等^[1]。一旦发生脱粘，铺装层便如同“鼓包”一样，在荷载作用下极易破碎。

1.4 抗滑性能衰减

新铺筑的路面具有优良的宏观构造深度（Macrotexture）和微观构造深度（Microtexture），能有效排除水膜并提供轮胎-路面间的摩擦力。然而，在长期交通荷载作用下，集料棱角被磨平（磨光），细集料和沥青胶浆被推向路表填充空隙（泛油），加之灰尘、油污等污染物的覆盖，都会导致宏观和微观构造深度减小，从而引起抗滑性能的持续衰减。对于钢桥面而言，由于铺装层通常较薄，这一问题尤为突出。

1.5 水损害与老化

水分通过裂缝、孔隙或层间缺陷侵入铺装结构内部，在冻融循环或车辆动水压力作用下，会剥离沥青与集料的粘附，软化沥青胶结料，甚至腐蚀钢板。同时，沥青材料在长期的热、氧、紫外光作用下会发生老化，表现为变硬、变脆，延展性和粘结力下降，进一步加剧了开裂和松散的风险。

上述失效模式并非孤立存在，而是相互关联、互为因果。例如，车辙积水会加速水损害和抗滑衰减；疲劳开裂为水分侵入和层间脱粘创造了条件；而层间脱粘又会放大局部应力，加速疲劳开裂。因此，解决钢桥面铺装的难题，必须采取系统性的思维，从材料、结构、界

面、施工到养护进行全链条优化。

2 耐久性与抗滑性能的影响因素及机理分析

2.1 耐久性影响因素

(1) 材料自身性能：这是耐久性的内因。沥青胶结料的高温稳定性、低温抗裂性、疲劳性能、抗老化能力以及与集料的粘附性，共同决定了混合料的整体耐久性。集料的强度、耐磨性、与沥青的粘附等级同样至关重要。(2) 结构层间界面：如前所述，界面是整个铺装体系的薄弱环节。防腐涂层（如富锌漆）与钢板的附着力、粘结层（如环氧树脂、橡胶沥青）与防腐层及铺装层的粘结强度，是防止脱层的关键。界面的有效剪切强度和抗水损害能力直接决定了铺装层的服役寿命。(3) 交通荷载特性：交通量、轴载大小、轮迹分布（渠化程度）直接影响铺装层所承受的应力水平和疲劳损伤速率。重载、超载交通是加速铺装层破坏的主要外部驱动力^[2]。(4) 环境因素：极端高温会软化沥青，诱发车辙；极端低温会使材料变脆，增加开裂风险；昼夜温差和季节性温差引起的温度应力是导致疲劳开裂的重要因素；降雨、湿度则与水损害密切相关。

2.2 抗滑性能影响因素

(1) 集料特性：这是决定抗滑性能的基石。集料的磨光值（PSV）越高，抵抗轮胎磨光的能力越强，能长期保持良好的微观纹理。集料的形状（针片状含量低）、坚固性也会影响其在混合料中的稳定性和耐磨性。(2) 混合料级配与空隙率：开级配或间断级配（如SMA）能形成丰富的宏观构造深度，有利于快速排水。但空隙率过大可能导致耐久性下降，过小则不利于排水。需要在抗滑与耐久之间找到最佳平衡点。(3) 沥青用量与性质：沥青用量过多容易导致泛油，覆盖集料表面，降低微观纹理。高黏度改性沥青虽然能提高耐久性，但也可能增加泛油倾向。因此，精确控制沥青用量和选择合适的改性剂至关重要。(4) 交通磨损与污染：这是抗滑性能衰减的直接原因。随着时间推移，轮胎的反复摩擦会磨平集料棱角，同时将路面的细料和沥青推向表面，形成光滑的“釉面”。此外，车辆泄漏的油污、大气沉降的粉尘也会填充路面纹理，降低摩擦系数。

2.3 耐久性与抗滑性能的协同与矛盾

耐久性与抗滑性能之间既存在协同效应，也存在内在矛盾。一方面，一个结构完整、无车辙、无裂缝的铺装层，其抗滑性能的衰减速率会大大降低。反之，良好的抗滑性能减少了水膜的形成，也有助于减轻水损害，间

接提升了耐久性。另一方面，为了追求高抗滑性能，往往需要采用高磨光值的坚硬集料和较大的宏观构造深度，但这可能导致混合料的和易性变差，施工难度增加，甚至影响密实度，从而对耐久性构成挑战。例如，过多的粗集料可能使混合料在钢桥面板的局部变形下更容易松散。因此，如何在材料设计和结构配置上实现二者的最优平衡，是钢桥面铺装技术的核心课题。

3 主流铺装材料体系及其性能评价

目前，国内外应用较为广泛的钢桥面铺装材料体系主要有以下几种：

3.1 环氧沥青（EA）铺装体系

EA是由环氧树脂与石油沥青在特定条件下反应形成的热固性材料。其最大特点是固化后形成三维网络结构，具有极高的强度、模量、高温稳定性和优异的抗疲劳、抗老化性能。美国SanMateo-Hayward大桥、国内的江阴长江大桥等均采用了EA铺装。其优点在于超长的预期寿命（可达20年以上），但缺点也非常明显：施工窗口期短（需在A、B组分混合后的有限时间内完成摊铺碾压），对施工工艺要求极其苛刻；低温韧性相对较差，存在低温开裂风险；一旦损坏，修复困难且成本高昂。

3.2 浇注式沥青（GA）铺装体系

GA起源于德国，是一种矿粉含量极高、沥青含量丰富（通常>8%）的悬浮密实型混合料。它在高温（约220-250℃）下呈流淌状态，无需碾压即可自流平成型，能完美贴合钢桥面板的复杂几何形状，与钢板的追随性极佳。GA具有优良的密水性、抗疲劳性和低温性能。常与SMA表层组成双层铺装体系（GA+SMA）。其缺点是高温稳定性相对较弱，单独使用时易产生车辙，且初期开放时间较长。

3.3 高黏改性沥青（HVMA）铺装体系

HVMA是在基质沥青中添加高剂量聚合物（如SBS）或其他改性剂，使其60℃动力黏度达到20000Pa·s以上。以此制备的SMA或AC混合料，兼具SMA的骨架嵌挤结构和高黏沥青的强粘结力，具有良好的高温抗车辙、抗水损害和抗疲劳性能。该体系施工工艺与传统沥青路面相似，适应性强，修复方便，在我国近年来得到了大规模推广（如港澳大桥、南沙大桥）。其挑战在于高黏改性沥青的成本较高，且对原材料和配合比设计的精度要求高。

3.4 性能对比与适用性分析

表1：性能对比

特性	环氧沥青(EA)	浇注式沥青(GA)	高黏改性沥青(HVMA-SMA)
高温稳定性	极优	中等	优
低温抗裂性	中等（有风险）	优	优

续表:

特性	环氧沥青(EA)	浇注式沥青(GA)	高黏改性沥青(HVMA-SMA)
抗疲劳性	极优	优	优
密水性	优	极优	优
施工便利性	差(窗口期短)	中等(高温作业)	好(类似常规沥青)
可修复性	差	中等	好
成本	高	中高	中高
典型应用	长寿命、少维修需求桥梁	欧洲广泛,国内部分项目	国内新建大跨径桥梁主流

选择何种体系,需综合考虑桥梁的重要性、交通量与荷载等级、当地气候条件、施工技术水平及全寿命周期成本等因素。

4 提升耐久性与抗滑性能的关键技术路径

4.1 材料精细化设计

(1) 胶结料优化:针对不同需求,开发复合改性沥青。例如,在SBS改性基础上复配抗剥落剂、抗老化剂、增韧剂等,以协同提升各项性能。探索生物基、废胶粉等环保改性剂的应用。(2) 集料优选与处理:严格选用高磨光值($PSV > 42$)、高粘附性(≥ 4 级)的优质玄武岩或辉绿岩。采用机制砂替代天然砂,以改善级配和棱角性。必要时对集料进行表面处理(如硅烷偶联剂),增强与沥青的化学键合^[3]。(3) 级配精准调控:采用贝雷法等先进方法设计骨架密实型级配,在保证足够空隙率(提供宏观纹理)的同时,确保混合料的密实度和稳定性。对于表层,可适当增加4.75mm~9.5mm粒径集料的比例,以提升抗滑耐久性。

4.2 界面粘结强化技术

(1) 防腐层与粘结层一体化设计:采用与铺装层材料相容性更好的专用防腐涂料,并确保其表面具有适宜的粗糙度。粘结层材料的选择应与上下层材料匹配,如EA体系用环氧树脂粘结层,GA/HVMA体系可用橡胶沥青或专用改性乳化沥青。(2) 施工过程控制:严格执行钢板喷砂除锈标准($Sa2.5$ 级),确保清洁、干燥、粗糙的界面。精确控制粘结层的洒布量和均匀性,并在规定的时间窗口内完成铺装层的摊铺,以保证最佳的化学与物理粘结效果。

4.3 结构优化设计

(1) 双层或多层结构:这是目前最主流的解决方案。下层(如GA或HVMA-10)侧重于追随性、密水性和抗疲劳性;上层(如SMA-10或SMA-13)则专注于提供高抗滑性能和耐磨性。两层之间设置粘结层,形成牢固的整体^[4]。(2) 功能梯度设计:探索材料性能沿厚度方向梯度变化的设计理念。例如,从下至上,材料的模量逐渐降低,柔韧性增加,以更好地适应钢板变形;而表层则

集中高磨光值集料,最大化抗滑效益。

4.4 预防性养护与智能管养

(1) 早期干预:在铺装层出现微裂缝或轻微抗滑衰减时,及时采用雾封层、微表处等预防性养护措施,可以有效封闭裂缝、恢复表面纹理,大幅延长使用寿命。(2) 基于性能的养护决策:建立包含抗滑性能(横向力系数SFC、构造深度TD)、结构完整性(探地雷达GPR检测脱空、FWD弯沉)等指标的综合评价体系,指导科学养护。(3) 智能感知与数字孪生:未来可将光纤光栅、压电传感器等嵌入铺装层,实时监测应力、应变、温度和湿度。结合BIM和数字孪生技术,构建铺装层的全生命周期健康档案,实现从“被动修复”到“主动预测”的转变。

5 结语

钢桥面铺装层的耐久性与抗滑性能关乎大跨径桥梁安全运营,受材料、结构等多重因素复杂影响且关系协同矛盾。当前主流铺装体系各有优劣,需依工程条件选。未来研究发展聚焦多方向:材料创新上,持续研发纳米改性沥青等新一代智能铺装材料;设计理论深化方面,建立精细化数值模型,为结构优化提供可靠工具;施工与质量控制智能化,借助物联网等技术实现全流程智能监控与质量追溯;全寿命周期管理,将设计、施工等纳入统一评估框架,推动绿色基建。通过多学科交叉融合与技术创新,钢桥面铺装技术将迈向更高性能、长寿命、智能化新阶段,为国家重大交通基础设施安全与韧性筑牢根基。

参考文献

[1]张岩.大跨径钢桥面铺装层受力特性与长效服役性能评价[C]//广西大学广西县域经济发展研究院.2025年第五届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会议论文集.陕西交通控股集团有限公司宝天分公司,2025:102-103.

[2]孙蒙蒙.钢桥面铺装层交通及荷载特性分析[J].安徽建筑,2026,33(01):86-88.

[3]宁雨.公路项目钢桥面铺装的层间黏结性能影响因素分析[J].交通科技与管理,2026,7(01):117-119.

[4]江金峰.在役大跨径正交异性钢桥面铺装改造设计[J].四川水泥,2025,(12):213-215.