

钢—混组合梁桥面铺装层病害分析与施工工艺优化

文 / 唐益国 沈阳市市政工程设计研究院有限公司

摘要：钢—混组合梁桥面铺装层病害频发，严重制约结构耐久性与行车安全性。本文系统分析了铺装层典型裂缝、脱层、车辙、局部破损等病害类型及其成因，指出材料性能不足、钢—混变形差异、重载环境耦合及施工缺陷是核心影响因素。针对现行施工工艺短板，提出高性能材料优化——改性沥青与纤维增强混凝土、粘结层工艺改进——喷涂均匀性控制与界面加强、分层摊铺与温度精准调控、智能施工技术应用——数字化监控与自动化设备等综合优化措施。通过材料—结构—工艺协同创新，可显著提升铺装层抗裂性、层间粘结力及动态适应性，为延长组合梁桥面服役寿命提供技术支持。

关键词：钢—混组合梁；桥面铺装层；病害分析；施工工艺优化

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.050

引言

随着现代交通基础设施的迅猛发展，钢—混组合桥梁以其独特的结构优势在桥梁工程中占据重要地位。然而桥面铺装层病害频发，已成为制约其长期稳定运行的关键因素。铺装层病害不仅削弱桥梁的整体性能，更直接威胁行车安全，亟须深入研究其成因及防治策略。国内外学者虽已对桥面铺装层病害类型及施工工艺进行了广泛探讨，但仍存在理论研究与实际应用脱节、工艺优化措施缺乏系统性等问题。本研究立足钢—混组合桥梁的结构特性，综合分析铺装层病害的类型、机理及其影响因素，重点探讨施工工艺中的关键环节，旨在提出切实可行的优化措施，以提升铺装层的耐久性和可靠性，为桥梁工程的可持续发展提供有力支撑。

一、钢—混组合梁桥面铺装层病害类型

(一) 裂缝

钢—混组合梁桥面铺装层的裂缝是最常见的典型病害之一，产生原因非常复杂且形式多样。横向裂缝主要是由于铺装层材料温度变化收缩应力与基层被限制产生应力，特别是在昼夜温差大的地方，受铺装层沥青不断发生热胀冷缩作用的影响，会形成按梁段有规律性出现的纵向裂缝。纵向裂缝与车辆荷载作用有关，如重载车辆长时期沿车道线行驶，会在轮迹带部分造成局部压集中的应力，再加上传动轴、组合梁之间的滑移或者剪切变形，便容易导致铺装层沿纵桥方向开裂。网状裂缝是由基面平整度差，进而引起的一些局部应力集中点，加上材料老化后抗裂性能差，相互叠加造成的结果。如铺装层施工时，混凝土基面处理不到位存在残余浮浆、油污等，当汽车荷载和环境共同作用下，使铺装层产生纵向裂纹逐步向外扩展成网状裂纹。或是由于钢板受盐害等侵蚀，进而引起的锈蚀后体积膨胀，从内部破坏铺装层结构造成开裂。

(二) 脱层与空鼓

脱层和空鼓问题是钢—混组合梁桥面铺装层破损最常见的两种病害类型。其根本原因就是层间粘结失效，

从面层与钢板或混凝土基层间的粘结机理可知，铺装层与钢板及混凝土基层间的粘结力受施工方法、材料性能及外界环境等多方面的影响，在铺装层的防水粘结层施工过程中，如果钢板表面没有清理干净，则不容易形成连贯的界面，进而导致铺装层与钢板之间会有一层“薄弱夹层”，之后此层受到车辆重复荷载应力的作用，就会发生铺装层与基层剥离的现象。



图1 钢—混组合梁桥面铺装层裂缝

(三) 车辙与磨损

车辙是钢—混组合梁桥面铺装层在重载交通作用下的典型永久性变形，铺装层材料高温稳定性和承重车辆轮迹带重复荷载作用下共同导致。比如沥青混合料处于夏季高温状态下时，沥青胶结料黏度降低，抗剪强度变小，随着重载车辆碾压后，铺装层材料沿轮迹带两侧被挤压推移，进而产生沿轮迹带凹陷的现象。而针对钢—混组合梁来说，在桥面钢板刚性支撑的作用下，桥面铺装层产生形变相对减少，但是局部应力集中，依然会加速铺装层塑性流动。而磨损则是指铺装层表面骨料脱落、纹理丧失，特别是在行车中转弯多或者制动频繁的路段，由于车辆轮胎和铺装层之间的摩擦，把沥青膜磨掉，进

而造成的防滑性能下降,会出现许多细小坑洞现象。车辙、磨损与桥面沥青防滑性能衰退有一定的关系。

(四) 局部破损与剥落

局部破损和剥落是对钢-混组合梁桥面铺装层造成损害的突发性病害,它主要是由于外力冲击或者材料自身劣化所引起的。比如重载车辆超速或者紧急制动行驶时,轮胎会对桥面铺装层造成瞬间的冲击荷载,由于铺装层厚度较小、强度不均匀,在受冲击荷载下,易在轮迹带边缘处形成坑槽状破损。如果局部破损部位没有得到及时修补,在破损部位出现的裂缝容易使积水渗入和积存,冰冻作用下破损区扩展。钢-混组合梁中,钢板局部锈蚀也会加速铺装层脱落,进而产生“锈蚀—剥离—渗漏”的恶性循环。



图2 钢-混组合梁桥面铺装层局部破损与脱落

二、钢-混组合梁桥面铺装层的病害成因分析

(一) 材料因素——沥青混凝土性能、粘结层失效

铺装层材料本身的力学性能和耐久性决定了病害的发生,其中沥青混凝土作为铺装层的主要材料,存在高温稳定性差、低温抗裂差、水稳定性不足等问题。其中,夏天气温高,沥青变软,黏度降低,集料间嵌挤力小,重载车辆使路面重压反复作用,产生剪切变形形成车辙。冬天气温低,沥青变脆,抗拉强度降低,温度梯度造成的收缩应力使沥青路面上下的层间产生了剥离现象,从而形成了横向或纵向裂缝。粘结层失效是造成铺装层脱落的主要原因。

(二) 结构因素——钢梁与混凝土协同变形差异

由于钢-混组合梁的复合结构特点,铺装层有复杂的变形场。钢梁和混凝土桥面板是通过剪力连接件,联结在一起工作的。但由于两者弹性模量差别较大,钢材弹性模量约相当于混凝土的10倍,当施加外力荷载后会不均匀变形。车荷载作用于铺装层时,因钢梁刚度较高,可以很快地将荷载力传递给铺装层,而混凝土板则受力后变形滞后,由此会在铺装层表面上出现“局部应力集中”现象。特别是在轮迹带边缘处,当剪切应力大于铺装层的抗剪强度时,会破坏铺装层表面,进而产生纵缝、斜向剪切裂缝等裂缝形式。

(三) 荷载与环境因素——重载、温度、湿度

外部荷载和环境因素均会直接导致铺装层产生病害,重载交通反复荷载作用于铺装层会造成车辙以及疲劳破坏。同时,由于超载车辆的轴重远大于设计车辆荷载,在轮压的作用下,产生远大于设计的剪应力。加之重载车辆频繁的制动、起步对铺装层表面产生的瞬时冲击荷载,也会加速铺装层表面的磨耗以及局部脱落。温度变化会使铺装层产生周期性的影响,夏季高温会使沥青变软,冬天温度降低会使沥青变硬,昼夜温差使铺装层发生热胀冷缩,在没有设置合理伸缩缝,或者铺装层材料抗裂度不够的情况下,必然出现裂缝。

三、钢-混组合梁桥面铺装层施工工艺现状分析

(一) 材料配比与质量控制

目前钢-混组合梁桥面铺装层材料配比和质量控制均存在严重局限性,大部分铺装层材料的设计以经验为主,并无组合梁结构系统的优化配比。沥青混凝土的级配设计直接采用普通道路工程的经验值,而忽视了钢-混结构变形协调,对于材料弹性模量及抗剪的要求。在施工中,由于集料粒径和沥青含量无法合理搭配,使混合料孔隙率偏大或者黏聚力不足,在重载、温度的作用下,易造成车辙及裂缝的产生。另外,粘结层材料的选择和铺装层材料的匹配度问题也十分严重,许多工程都采用改性沥青,或者环氧树脂粘结剂,没有对其进行钢板、混凝土基层的黏附强度验算,在这种情况下使用会影响其长期荷载的粘结性能,会发生层间剥离的现象。对于材料质量控制来说,目前施工中现场对来料检测的规范程度还不够到位,对来料集料含泥量、沥青针入度等指标的变化没有及时校正。

(二) 粘结层施工技术缺陷

施工粘结层是钢-混组合梁桥面铺装的重要步骤,但是由于目前一些工艺问题仍然存在较多的技术缺陷。比如,部分施工队基层处理不到位,如钢板表面除锈不到位或者混凝土基层浮浆清理不到位,造成粘结层与地面粘结效果差。粘结层施工方法粗放,如改性沥青分布不均匀,环氧树脂涂层厚度不一致,或遇潮湿天气后影响了粘结剂的固化,都会导致层间抗剪性能不足。部分未根据组合梁变形特点,对粘结层结构进行优化,例如梯度模量材料未应用于减少钢-混界面应力突变点,剪力钉部位局部粘结处理不足,导致铺装层处于车辆荷载作用下发生脱层空鼓现象。黏结层施工之后缺少防护措施,未铺设隔离层,或提前开放交通,进而使黏结层遭到污染与损害。

(三) 摊铺与压实工艺不足

钢-混组合梁桥面铺装层的摊铺及压实的难度较大,在摊铺时组合梁顶面平整度很难控制,常出现厚度薄厚不一以及离析等问题。在横纵坡交汇处,混合料的分布容易产生混匀的困难。另外也会影响铺装层的压实密度。在压实工艺上也有很多欠缺的地方,例如压路机吨

位以及碾压遍数没有严格的控制标准，有的为了工期进度就减少复压遍数，进而导致铺装层孔隙率过大、耐久性降低。压实温度控制存在不合理，如初压温度过高会导致沥青老化严重，终压温度过低无法消除车轮痕迹。对于比较复杂的部位，边角、伸缩缝附近，未用到小型振动设备或者人工补压，所以这部分的压实厚度也很难满足设计要求，是早期损坏的开始。

四、钢-混组合梁桥面铺装层施工工艺优化分析

(一) 高性能材料选择——改性沥青、纤维增强混凝土

铺装层材料是提高钢-混组合梁桥面耐久性的主要手段，也是提高桥面抗变形能力的重要途径。利用高模量改性沥青，SBS与橡胶粉复合改性沥青，掺入纳米级填料或天然岩沥青来改善抗车辙能力，利用温拌沥青降低沥青老化的施加温度。对铺装层表面功能层可采用纤维增强混凝土，如玄武岩纤维混凝土或聚丙烯腈纤维混凝土，并利用其三维横向分布的纤维网络，来阻止塑性收缩裂缝。另外，在粘结层材料方面应根据界面特性来制定不同的材料配方，例如钢板与沥青铺装层之间的环氧沥青粘结剂中加入硅烷偶联剂。

(二) 粘结层工艺改进——喷涂均匀性、粘结强度提升

粘结层施工工艺的精细化是确保铺装层与界面协同工作的关键，首先需强化基层处理标准，对钢板表面采用真空喷砂至Sa2.5级洁净度，并立即喷涂防锈阻蚀剂，防止二次氧化。混凝土基层则需通过高压水枪清除浮浆并晾干至恒定含水率。粘结层喷涂应引入智能化设备，例如采用静电喷涂技术或高精度雾化喷嘴，结合激光测厚反馈系统实时调控洒布量，避免局部涂胶或漏涂。为提升粘结强度，可在改性沥青中掺入水性环氧树脂或反应型树脂，利用其固化后形成的互穿网络结构增强界面抗剪性能。对于剪力钉密集区域，可预涂环氧胶泥填充凹槽，再整体喷涂粘结层，避免应力集中。

(三) 分层摊铺与温度控制优化

摊铺工艺的优化需兼顾材料特性与结构受力需求。铺装层宜采用分层摊铺策略，下层采用粗粒式沥青混合料以提供骨架支撑，上层则选用细粒式纤维增强混凝土或SMA碎石封层，形成“刚柔并济”的复合结构。摊铺过程中需通过激光定位与3D找平系统动态调整松铺厚度，重点控制纵坡、横坡交汇处的平整度，避免局部厚度突变引发应力集中。温度控制方面，应建立拌和—运输—碾压全链条温控体系，拌和站需实时监测沥青混合料出场温度，运输车加盖双层保温篷布并配置温度传感器，摊铺机熨平板预热至规定温度后分段作业，初压采用高频低振幅压路机紧跟摊铺消除推移，复压与终压则根据实时温度反馈调整碾压遍数，确保密实度达标的同时避免过压导致骨料破碎。

(四) 智能施工技术应用——数字化监控、自动化设备

智能技术的应用可显著提升施工精度与质量控制水平。首先需构建信息化管理平台，整合BIM建模、物联网传感与GIS定位技术，实现从材料进场到压实完成的全流程数据追溯。例如在摊铺机上安装红外测温仪与激光扫描仪，实时采集混合料温度场与表面平整度数据，并通过无线传输至后台分析系统，自动预警温度离差或厚度异常。粘结层施工可引入机器人喷涂设备，结合机器视觉识别钢板锈蚀区域，动态调整喷涂轨迹与流量，确保粘结层均匀性。压实工艺中可部署智能压路机，其内置加速度传感器与压力检测模块能实时计算压实度，并通过AI算法优化碾压路径与遍数。此外，还可利用无人机搭载热成像相机对铺装层温度分布进行空中监测，结合数字孪生技术模拟压实效果，提前识别薄弱区域。通过构建“感知—决策—执行”闭环系统，可实现施工误差从厘米级向毫米级的跨越，全面提升钢-混组合梁桥面铺装层的长期服役性能。

结语

钢-混组合梁桥面铺装层的病害防治与施工工艺优化需从材料、结构、环境及工艺多维度协同突破。本文通过分析裂缝、脱层、车辙等典型病害的成因，揭示了材料性能劣化、钢-混变形不协调、重载环境耦合作用及施工缺陷的核心影响机制。针对性提出的高性能材料选型、粘结层工艺改进、分层摊铺与温度精准调控、智能施工技术应用等优化措施，已初步形成“材料—结构—工艺”一体化解决方案。研究表明，通过提升铺装层材料的抗裂性与耐疲劳性、优化层间粘结体系、精细化施工过程控制，可显著延长组合梁桥面铺装层的使用寿命，降低后期维护成本。

参考文献

- [1] 徐升桥, 邹永伟, 金令, 等. 耐候钢-混凝土组合结构加劲梁悬索桥的技术创新[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(7): 1-6.
- [2] 李木生. 浅谈桥面沥青混凝土铺装层裂缝病害分析及对策[J]. 江西建材, 2023(2): 252-253.
- [3] 王佐才, 赵玺, 王均义, 等. 钢-PPUC组合正交异性钢桥面板疲劳性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(5): 131-141.
- [4] 土木工程. 移动荷载和温度耦合作用下钢桥面沥青铺装层应力响应与车辙[D]. 2023.
- [5] 燕立柱, 王宏畅, 黄九达. 旧混凝土桥沥青铺装层结构与材料性能研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(10): 153-160.

作者简介: 唐益国, 1976.02.01, 男, 满族, 辽宁省阜新市阜新县, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥隧。