

钢桥面环氧沥青铺装施工及路用性能分析

唐凌炜, 江胜文

[长大市政工程(广东)有限公司, 广东 中山 528400]

摘要: 为优化钢桥面双层环氧沥青铺装施工工艺并提升路用性能,开展了系统性现场试验与性能检测研究。通过对施工准备、材料性能与铺装关键工艺的分析,明确了防水黏结层及环氧沥青混合料的关键控制指标。在实测中,防水黏结层拉拔强度提升约15%,各结构层钻芯样品未发现脱层或断裂,界面粘结稳定可靠;面层渗水系数均为0 mL/min,显著优于设计标准(50 mL/min),摩擦系数远高于45 BPN设计值,构造深度为0.68~0.71 mm,满足不小于0.60 mm要求;6.3%油石比区域空隙率最低为1.2%,压实度合格率达100%。结果表明,该铺装体系在结构完整性、抗滑性及密实度等方面均符合规范要求,验证了所用施工工艺的适用性与有效性,为特大跨径钢桥面铺装工程提供技术支撑。

关键词: 钢桥面铺装;环氧沥青;施工工艺;路用性能

中图分类号: U443.3;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0221-05

Construction and Pavement Performance Analysis of Epoxy Asphalt Paving on Steel Bridge Decks

TANG Lingwei, JIANG Shengwen

[Changchang Municipal Engineering (Guangdong) Co., Ltd., Zhongshan 528400, China]

Abstract: To optimize the construction process of double-layer epoxy asphalt paving on steel bridge decks and enhance its pavement performance, the systematic field test and performance detection study are carried out. By analyzing the construction preparation, material properties and key paving techniques, the critical control indexes for the waterproof bonding layer and epoxy asphalt mixture are identified. In the field tests, the pulling strength of the waterproof bonding layer is improved by approximately 15%, and no delamination or fractures are observed in core samples from various structural layers, indicating stable and reliable interface bonding. The water permeability coefficient of surface layer is 0 mL/min, significantly better than the design standard (50 mL/min). The friction coefficient is much higher than 45 BPN design value. And the texture depth is 0.68~0.71 mm, meeting the requirement of not less than 0.60 mm. The void ratio in the 6.3% asphalt-to-aggregate ratio area is the lowest at 1.2%, and the qualified rate of compaction degree reaches 100%. The results show that the paving system meets the specification requirements in terms of structural integrity, skid resistance and compaction degree, validating the applicability and effectiveness of the construction process, and providing the technical support for long-span steel bridge deck paving projects.

Keywords: steel bridge deck paving; epoxy asphalt; construction process; pavement performance

0 引言

铺装是桥梁行车系的关键构成部分,其质量优劣对行车的安全、舒适程度,桥梁的耐用年限,以及社会效益都有着直接影响,是钢桥建设中不可或缺的核心工程,长期以来在学术界和工程界都备受关注,是研究的重点领域^[1-3]。因此,在大跨径跨江通道大桥的建设中,桥面铺装质量直接关系到桥梁的

使用寿命与行车安全。

环氧沥青混凝土是一种重要的钢桥面铺装材料,因其优异的高温稳定性和耐疲劳性能,而被广泛应用于国内夏季高温、重载车辆多的环境,并得到了良好的应用效果^[4-6]。因此,在钢桥面铺装过程中通常采用双层结构,钢桥面全体系双层环氧沥青混凝土铺装技术因其优良性能在工程中被广泛应用^[7-9]。

然而,桥面铺装技术在实际应用中受多种因素影响,施工工艺的精准控制和质量保障面临挑战^[10-12]。为确保深中通道项目桥面铺装工程的高质量完成,开展研究,旨在模拟钢桥面铺装实际工况,

收稿日期: 2025-04-18

作者简介: 唐凌炜(1983—),男,硕士,高级工程师,从事项目管理工。

对施工全过程进行严格把控和细致研究。对钢桥面环氧沥青铺装层施工方案和路用性能进行了深入剖析。以指导工程后续大面积施工及为同类桥梁工程的桥面铺装施工提供可借鉴的经验。

1 工程概况

基于深中通道钢桥面铺装层选取长度150 m,宽度18.75m段落,其钢桥面铺装结构为全体系双层环氧沥青混凝土。选取试验铺装结构方案与主桥相同,为“防水黏结层(环氧树脂(0.6±0.05) kg/m²)+下层35 mm 环氧沥青细级配环氧沥青混凝土+黏结层(环氧树脂(0.8±0.05) kg/m²)+上层30 mm 环氧沥青粗级配环氧沥青混凝土”,见图1。

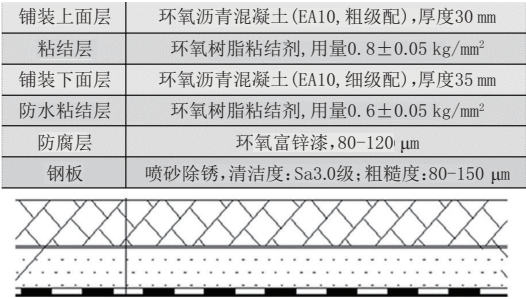


图1 钢桥面铺装层结构层

2 施工准备工作

2.1 施工规划

在进行钢桥面铺装施工时,对基面进行清理,达到合格标准后,需要对其进行抛丸处理,以此增强基面的粗糙度和清洁度,为后续施工提供较好的黏结条件。完成抛丸处理后,进行环氧树脂黏结剂刷涂工序,在该过程中使用机械刷涂为主,人工刷涂配合进行的施工工艺。在具体的操作过程中,使用两台环氧树脂智能涂布设备负责涂刷中间摊铺区域,采用梯队涂刷的方式,将搭接宽度控制在10 cm,以确保涂刷的均匀性和连续性。边带两侧各25 cm未被涂刷的部分将由人工配合进行涂刷,保证整个施工区域都能均匀地涂刷上环氧树脂黏结剂。同时,机械刷涂每道需搭接5 cm,进一步保障涂刷质量,避免出现漏刷现象。

防水黏结层的养生时间依据现场的实际气温以及环氧树脂的实际表干时间来确定。养生结束后,便可开展下面层环氧沥青混凝土的施工,此时摊铺机的拼装组合为9 m+10 m,以满足下面层的摊铺宽度需求。

当环氧沥青下面层完成养生并通过各项检测

后,便进入上面层环氧沥青的施工阶段。在试验路段中,上面层同样采用两台福格勒2100-3L摊铺机联合进行全断面摊铺,两台摊铺机之间的纵缝搭接宽度控制在5~10 cm,以此保证摊铺面的整体性和平整度。

值得注意的是,上下面层在施工过程中均采用“非接触式平衡梁法”来精确控制标高及摊铺厚度,确保铺装层的厚度和坡度符合设计要求。并且,在施工时会将两台摊铺机左右侧进行调换,使得上下面层的纵缝相互错开,有效避免了纵缝集中可能带来的质量隐患。

同时,在施工准备阶段,应明确关键控制参数,包括基层表面需经抛丸处理,粗糙度不小于1.5 mm,清洁干燥且含水率控制在4%以下;施工环境温度应保持在10~35℃之间,相对湿度不超过80%;黏结层喷涂量控制在0.4~0.6 kg/m²,搭接宽度不少于10 cm;摊铺机非接触式找平系统控制误差不大于±1 mm,压实作业须在混合料拌和后2 h内完成,确保施工质量符合设计标准。

2.2 原材料准备

试验中的基质沥青采用广州新粤沥青有限公司供应的壳牌70#沥青,环氧树脂采用KD-BEP环氧结合料和KD-HYP防水黏层油。热拌环氧沥青结合料作为一种三组分体系,其构成包括基质沥青、环氧树脂主剂及固化剂。具体配比次用主剂与固化剂按56:44的比例充分进行混合,而后将所得混合物与基质沥青按1:1的比例再次混合,经特定温度条件下的固化处理,最终形成热固性环氧沥青。其中,环氧树脂和沥青混合时使用A级70号基质沥青,其各项指标均满足表1和表2所示要求。

在集料选择上,采用粒径超过2.36 mm的粗集料玄武岩碎石,这类集料具有高品质特性,且颗粒形态接近立方体。细集料方面选用粒径处于0~2.36 mm区间的玄武岩机制砂,其质地纯净,不含有害杂质。矿质填料则使用石灰岩磨制的矿粉,该矿粉需满足干燥、洁净的要求,无泥土及团粒状物质,确保能在矿粉仓内顺畅流动。其级配组成见表3。

3 钢桥面铺装层施工关键技术

3.1 防水黏结层刷涂

使用环氧树脂智能化涂布系统进行环氧树脂黏结剂刷涂,现场施工采用1个作业点、两套环氧自动涂布设备进行全幅施工。环氧树脂黏结剂主剂和固

表 1 A 级 70 号石油沥青技术指标

试验项目	技术要求	检测结果
针入度(25 度, 100 g, 5 s, 0.1 mm)	60 ~ 80	63
针入度指数 PI	-1.5 ~ 1.0	-1.12
软化点 TR&B / °C	≥	47.5
延度[10(5 cm/min, cm)]	≥mm	21
延度[15(5 cm/min, cm)]	≥mm	>100
蜡含量(蒸馏法, %)	≤量(蒸)	1.72
闪点/°C	≥	344
溶解度/%	≥解度/%	99.8
密度(15 g/cm ³)	≥	1.037
600 动力黏度	≥	201
质量变化/%	≤±0.8	-0.078
残留针入度比(25 针, %)	≥%	66.7
残留延度(10 延, cm)	≥m	6.6

表 2 环氧树脂主剂的物理性能和技术指标

物理性能	技术要求	检测结果	是否满足规范要求
黏度(23 °C, [泊])	1 000 ~ 5 000	1 750	是
比重(23 °C)	1.00 ~ 1.20	1.132	是
环氧当量	190~200	204	是
闪点/°C	>220	245	是
外观	淡黄色透明液体	淡黄色透明液	是

表 3 级配组成

级配类型	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配	100.0	98.9	72.3	55.6	42.0	32.4	23.0	16.4	10.8
中值	100	97.5	75	60	47	34	26.5	18.5	10.5
下限	100	95	65	50	39	28	21	14	7
上限	100	100	85	70	55	40	32	23	14

化剂温度分别控制在(25±2) °C, 现场施工采用移动式智能化恒温房控制材料温度。将环氧树脂提前一天保温, 设定温度为 25 °C。以 1:1 的比例投入混合后搅拌 3 min 使其充分混合, 紧接着进行机械刷涂施工, 对刷涂机两侧边部各有 25 cm 未刷涂区域, 人工使用滚涂进行滚涂, 使环氧树脂材料均匀附着在底漆面上。

3.2 面层施工

在热拌环氧沥青混凝土的生产环节, 为降低环氧树脂主剂和固化剂的黏度, 运用智能化恒温房将二者预热至 50 ~ 60 °C。随后, 借助专用的混合及泵送设备, 严格依照 56:44 的重量比混合主剂和固化剂, 把环氧树脂与沥青按 50:50 的比例同时投入拌缸。混合料先进行 5 s 干拌, 接着 55 s 湿拌, 以此保障充足的拌和时间, 确保其质量。当环氧树脂防水黏结层养生 24 h 后, 进行环氧沥青下面层摊铺, 二者摊铺间隔为 1 d。经现场检测, 环氧防水黏结层已达

到表干状态, 满足摊铺要求。

在环氧沥青混凝土路面碾压施工中, 应严格遵循“紧跟、慢压、高频、低幅”的原则。初压时, 压路机需紧跟摊铺机进行碾压, 并且将初压区长度控制在较短范围, 这样能够在快速压实路面表面的同时, 有效减少热量散失。钢轮压路机在碾压过程中, 应选择植物油作为隔离剂, 并控制用量, 确保钢轮表面均匀覆盖一层油膜, 以达到不黏轮的效果。

值得注意的是, 在已完成的沥青面层上, 要防止碎石、矿物、油料和杂物等散落在上面, 以免影响路面质量。由于混合料在拌和时会同时进行化学固化反应, 所以从拌和生产开始到终压完成, 整个过程的时间需控制在 2 h 以内。若压路机黏起混合料, 需安排专人使用铲刀或刷子及时清除。

碾压工作完成后, 应采用 3 m 直尺对铺装面平整度进行检测。具体操作是将一根 3 m 长的直尺平行于路面中心线放置在完成的铺装层上, 此时路面表面距直尺边的变化距离应不超出 3 mm; 同时, 摊铺好的铺装层横坡需保持均匀, 当把这根 3 m 长的直尺沿垂直于路面中心线方向放置在行车道内时, 不应出现大于 5 mm 的凹坑。

4 路用性能测试

4.1 环氧树脂测试结果

为了全面检测环氧树脂的性能是否符合设计要求, 需要对不同部位的环氧树脂进行取样, 依据《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T3364-02—2019)^[13]进行相应的试验测试其关键性能指标。分别获取防水黏层、下面层、黏层和上面层不同层位的环氧树脂分别进行拉伸试验, 其中两黏层分别取内外侧两涂料机施工部位材料。

由检测结果可知(见表 4), 以上施工过程中所用材料, 内侧、外侧黏层处环氧树脂涂刷机和上、下面层环氧树脂取样成型的试件的拉伸强度和断裂延伸率均满足设计要求。

4.2 沥青混合料性能室内试验

在钢桥面铺装材料研究中, 环氧沥青混合料的室内性能验证是确保工程质量的重要环节。试验针对 6.2% 和 6.5% 两种油石比配比的混合料, 基于室内配合比成件的方式, 依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[14]中相应试验要求, 通过马歇尔试验、水稳定性测试、抗车辙性能测试和低温抗裂性能测试, 对所用配合比试件进行全面评

表4 环氧树脂拉伸实验结果汇总

试验项目分类	试验项目	技术要求	检测结果
防水黏层油环氧树脂拉伸试验(内/外)	拉伸强度 (23℃,MPa)	≥3.0	6.4/5.8
防水黏层油环氧树脂拉伸试验(内/外)	断裂延伸率 (23℃,%)	≥100	426.2/375.6
EA-10下面层环氧树脂结合料拉伸试验	拉伸强度 (23℃,MPa)	≥3.0	5.5
EA-10下面层环氧树脂结合料拉伸试验	断裂延伸率 (23℃,%)	≥100	197.3
第二层黏层油环氧树脂拉伸试验(内/外)	拉伸强度 (23℃,MPa)	≥3.0	5.1/4.4
第二层黏层油环氧树脂拉伸试验(内/外)	断裂延伸率 (23℃,%)	≥100	459.1/454
EA-10上面层环氧树脂结合料拉伸试验	拉伸强度 (23℃,MPa)	≥3.0	5.4
EA-10上面层环氧树脂结合料拉伸试验	断裂延伸率 (23℃,%)	≥100	197

估,探究其工程的适用性。

马歇尔试验结果显示,两种油石比混合料经60℃标准养生4 d后,关键参数均达到规范要求。检测结果详见表5。

表5 马歇尔体积指标检测结果

检测项目	技术要求	油石比 6.2%	油石比 6.5%
空隙率/%	0~3	1.2	1.1
马歇尔稳定度(60℃,完全固化)/kN	≥40	69.93	67.86
流值(60℃,完全固化)/mm	3.0~6.0	3.1	3.66
矿料间隙率/%	—	14.6	15.2
沥青饱和度/%	—	92.1	92.5

针对水稳定性、抗车辙性能和低温抗裂性能的综合测试指标结果见表6。

表6 综合检测结果

性能类别	指标名称	6.2% 油石比	6.5% 油石比	设计标准/ 基准值
水稳定性	冻融劈裂强度比/%	94.0	95.4	≥90%
	残留稳定度/%	93.7	96.1	≥90%
抗车辙性能	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	90 000	105 000	≥10 000
	压实度	最大理论密度99.7%	最大理论密度99.7%	最大理论密度97%以上
低温抗裂性能	弯曲极限应变/10 ⁻³	4.5	4.6	≥3×10 ⁻³

综合试验数据表明,环氧沥青混合料在关键路用性能指标上均满足钢桥面铺装技术要求,两种油石比配比方案各具优势:6.2%配比在基本性能达标前提下更具经济性,而6.5%配比则在抗水损、抗车辙等关键指标上表现更为突出。这为实际工程中的

配比选择提供了科学依据,同时也验证了该混合料体系在钢桥面特殊工况下的适用性。

4.3 钢桥面铺装层现场测试

针对环氧沥青铺装体系开展了系统性现场性能检测。通过分层检测与对比分析,全面评估了环氧沥青上下面层在实体工程中的实际表现,为钢桥面铺装质量控制提供了重要依据。下面层施工质量检测显示,不同油石比区域均展现出优异的密水特性。具体试验结果见表7。

表7 下面层施工质量检测结果汇总

检测指标	6.2%油石比 区域	6.5%油石比 区域	设计标准/备注
渗水系数	0 mL/min	0 mL/min	非渗透性(不大于0 mL/min)
平整度	0.31~0.64 mm	0.31~0.64 mm	不大于1.2 mm
平均厚度	32.8 mm	32.8 mm	满足设计(约30 mm)
厚度变异系数	12.60%	12.60%	局部厚度不足
空隙率	2.30%	2.10%	越低越好,合格率均超90%
压实度合格率	大于90%	大于90%	不小于90%,验证振动压实工艺有效性

上面层性能检测呈现差异化特征。两项油石比区域的渗水系数均满足设计标准,抗滑性能指标均符合要求,摩擦系数检测值远超设计基准,充分保障了行车安全需求。其中,不同油石比区域在压实特性上表现出差异,6.3%油石比区域展现出更优的压实特性,这与其沥青含量密切相关。铺装层平均厚度满足设计要求,但局部厚度需在后续施工中重点监控,详细结果见表8。

表8 上面层施工质量检测结果汇总

检测指标	6.2%油石比 区域	6.5%油石比 区域	设计标准/备注
渗水系数	0 mL/min	0 mL/min	非渗透性(不大于0 mL/min)
平整度	0.31~0.64 mm	0.31~0.64 mm	不大于1.2 mm
平均厚度	32.8 mm	32.8 mm	满足设计(约30 mm)
厚度变异系数	12.60%	12.60%	局部厚度不足
空隙率	2.30%	2.10%	越低越好,合格率均超90%
压实度合格率	大于90%	大于90%	不小于90%,验证振动压实工艺有效性

层间黏结体系检测结果表明,采用高标准的基面清理的工艺方案,能够使层间拉拔强度较传统工艺提升约15%,且破坏模式均表现为混合料内聚破

坏,证实了界面处理工艺对黏结性能的关键作用。钻芯取样显示各结构层间黏结完整,无脱层或断裂现象,环氧树脂黏结层施工质量稳定可靠。

综上所述,该钢桥面铺装体系整体路用性能均达到设计要求。其中,下面层厚度均匀性偏差主要源于混凝土基面平整度不足,建议采用三维激光整平技术进行基面预处理;上面层局部厚度不足问题可通过优化摊铺机自动找平系统参数加以改善。研究结果验证了环氧沥青铺装体系在特大跨径钢桥面工程中的适用性,为同类工程的质量控制提供了重要参考。

5 结 语

通过深中通道钢桥面铺装工程实践,系统开展了双层环氧沥青铺装体系施工工艺优化与路用性能评估。工程实践表明,采用智能化施工装备与精细化工艺控制的双层环氧沥青铺装技术,能够有效保障大跨径钢桥面铺装质量,其核心结论如下:

(1)利用机械协同施工的防水黏结层摊铺工艺,确保了环氧树脂材料性能的稳定性。现场拉伸试验数据显示,各结构层环氧树脂拉伸强度均超过 4.4 MPa,断裂延伸率最低达 197%,显著高于设计标准。其中防水黏层断裂延伸率突破 375%,展现出优异的变形协调能力。

(2)环氧沥青混合料室内试验验证了 6.2%~6.5% 油石比方案的技术可行性。两种配比均表现出超强的抗车辙性能和低温抗裂性,其中 6.5% 油石比方案在抗水损和压实特性方面更具优势,为实体工程配比选择提供了科学依据。

(3)现场施工质量检测表明,全体系铺装层渗水系数均为 0 mL/min,构造深度与摩擦系数指标优良。同时,采用“非接触式平衡梁法”与振动压实工艺,实现了铺装层平均平整度 0.48 mm、压实度 97% 以上的质量控制目标。

(4)层间黏结体系性能提升显著,改进型基面处理工艺使层间拉拔强度提升 15%,钻芯样本均呈现混合料内聚破坏模式。施工全过程 2 h 时效控制有效避免了环氧材料固化对施工质量的影响。

基于双层环氧沥青铺装层施工工艺与路用性能研究已成功指导深中通道钢桥面铺装工程实施,形成的施工工艺标准与质量控制要点,能够为同类大跨径钢桥面铺装工程提供了重要技术参考。后续研究将针对基面三维整平技术等方面开展深入探索,以进一步提升铺装体系耐久性。

参考文献:

- [1] 付新新,李姝,罗瑞林,等.国内外典型钢桥面铺装技术调研[J].上海公路,2024(4):78-84;239.
- [2] 俞雄文,胡美娟,肖玉荣,等.钢桥面铺装用环氧黏结剂力学性能——以阳江港大桥铺装用环氧黏结剂为例[J].科技和产业,2025,25(9):62-69.
- [3] 张兰军,牟建波.钢桥面铺装防水粘接层方案设计与试验研究[J].公路,2001(1):28-32.
- [4] 黄金生,姚波,何超,等.环氧沥青钢桥面铺装早期裂缝病害形态分析[J].公路,2024,69(6):1-11.
- [5] Quan X J, Chen X, Chen Y, *et al.* Study the epoxy resin content on the performance of hot-mix epoxy asphalt binder and mixture used in steel deck pavement[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2025, 26(1):106-119.
- [6] 宗海,周晓华,王晓,等.环氧沥青混凝土钢桥面铺装鼓包病害修复研究[J].公路交通科技,2006(2):119-122.
- [7] 王民,王明明,王滔,等.钢桥面沥青铺装磨耗层抗滑及耐磨耗性能分析[J].交通科学与工程,2024,40(6):34-41.
- [8] 刘诗城.中小跨径钢桥环氧沥青铺装优化设计[D].南京:东南大学,2021.
- [9] 刘攀,姚丹,刘誉贵,等.新型钢桥面铺装环氧树脂防水粘结剂性能评价[J].中国建筑防水,2019(5):44-48.
- [10] 姜兴碧.环氧沥青钢桥面铺装施工技术分析[J].科技创新与应用,2024,14(9):158-161.
- [11] 厉学武,曹进超.钢桥面环氧沥青混凝土铺装层施工技术研究[J].城市道桥与防洪,2010(6):19-21.
- [12] 赵正伟.钢桥面环氧沥青混合料铺装技术研究[J].城市道桥与防洪,2022(5):176-179.
- [13] JTG/T3364-02—2019,公路钢桥面铺装设计与施工技术规范[S].
- [14] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].