

EA-10(C)环氧沥青混合料压实特性研究

陈鹏¹, 蒋利超², 李娣³, 张子建³, 崔磊³

(1. 湖北交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 湖北交投双柳长江大桥有限公司, 湖北 武汉 430400;

3. 江苏中路工程技术研究院有限公司, 江苏 南京 211800)

摘要: 粗级配环氧沥青EA-10(C)作为一种高比例粗集料构成的稳定骨架,其碾压施工工艺参数控制尤其严格。以双柳长江大桥粗级配环氧沥青钢桥面铺装工程为依托,采用旋转压实、马歇尔击实及车辙板轮碾3种试验方法,探究容留温度、容留时间和压实功对粗级配环氧沥青混合料成型效果的影响规律。结果表明:粗级配环氧沥青EA-10(C)最易压实容留温度为 $170\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最佳容留时间为0.5~1.5 h,压实温度不低于 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可保障混合料压实度,轮碾9~12遍时混合料空隙率约3%,构造深度达0.7 mm左右;通过试验段试铺验证了铺装碾压组合方式,工后检测空隙率1.8%,构造深度0.58 mm且表面零渗水,满足相关指标要求,为同类钢桥面铺装的施工温度与碾压工艺管控提供技术指导和数据支撑。

关键词: 大跨径悬索桥;钢桥面铺装;环氧沥青;压实度;空隙率;容留时间

中图分类号: U416.2; U443

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0016-06

Study on Compaction Characteristics of EA-10(C) Epoxy Asphalt Mixture

CHEN Peng¹, JIANG Lichao², LI Di³, ZHANG Zijian³, CUI Lei³

(1. Hubei Communications Investment Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 2. Hubei Communications Investment Shuangliu Yangtze River Bridge Co., Ltd., Wuhan 430400, China; 3. Jiangsu Sinoroad Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

Abstract: As a stable skeleton structure composed of a high proportion of coarse aggregate, the control of compaction construction process parameters of the coarse-graded epoxy asphalt EA-10(C) is particularly strict. Relying on the coarse-graded epoxy asphalt steel deck pavement project of the Shuangliu Yangtze River Bridge, three test methods of gyratory compaction, Marshall compaction and wheel rolling with ruts are adopted to explore the effects of containment temperature, containment time and compaction efficacy on the forming quality of coarse-graded epoxy asphalt mixture. The results indicate that the most easily compacted containment temperature of coarse-graded epoxy asphalt EA-10(C) is $170\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the optimal containment time is 0.5~1.5 h. A compaction temperature is not lower than $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ able to ensure the compactness of the mixture. After the rolling of wheel roller from 9 to 12 times, the void ratio of the mixture is approximately 3%, and the structural depth reaches about 0.7 mm. The combination method of pavement compaction is verified through the trial paving of the test section. After the construction, the void ratio is found to be 1.8%, the construction depth is 0.58 mm, and there is no water seepage on the surface, which meet the requirements of related indexes, and provide the technical guidance and data support for the control of construction temperature and rolling technology of similar steel deck pavement projects.

Keywords: long-span suspension bridge; steel bridge deck paving; epoxy asphalt; compactness; void ratio; containment time

收稿日期: 2026-02-25

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金面上项目(BK20231135)、中国施工企业管理协会科技研发项目(2024-C-102)、湖北省公路学会科技计划项目(2024-18-5)

作者简介: 陈鹏(1995—),男,硕士,工程师,从事桥梁建设管理工作。

通信作者: 李娣(1990—),女,硕士,高级工程师,从事钢桥面铺装技术研究及应用工作。电子信箱: ld@sinoroad.com

0 引言

2000年前后,我国迎来大跨径钢桥建设的集中爆发期,虎门大桥、江阴大桥等一批达到世界领先水平的缆索承重桥梁相继建成。近20余年,伴随我国经济的持续攀升与货运物流产业的快速扩张,目前已在长江、珠江、钱塘江、黑龙江等流域经济高地建

成了举世瞩目的大跨径桥梁群^[1-3]。钢桥面铺装是桥梁工程的核心环节,被喻为桥梁的“面子”工程,它直接暴露在自然环境中,不仅要承受车辆轮载的循环作用,还需与正交异性钢桥面板实现受力协同、变形同步^[4-7]。环氧沥青混合料具备优良的综合铺装性能,自 2000 年南京长江二桥率先将其应用于钢桥面铺装并取得成功后^[8-11],该铺装技术逐步被推广应用用于全国的桥梁铺装建设。截至目前,国内主跨超 500 m 的大跨径桥梁中,环氧沥青铺装的应用占比已超 80%。

传统环氧沥青铺装多采用悬浮密实型级配方案,此类级配属于细级配设计,虽然能有效保证铺装层的密实性与抗疲劳性能,但路面抗滑性能却受到一定影响。粗级配环氧沥青打破了传统级配范围限制,以性能平衡为设计核心,可有效兼顾铺装表面的抗滑需求^[12-13]。但其施工过程涉及集料分档优化、碾压工艺改进等创新性内容,目前国内尚未形成系统化的技术标准和成熟的施工规范^[14-17],仅深中通道、常泰大桥等少数桥面铺装工程应用,可借鉴的实践经验有限。

由于环氧沥青为热固性材料,其强度的形成源于主剂与固化剂的化学反应,随着化学反应的持续进行,环氧沥青的粘度会逐步上升,这就导致其粘度受温度和时间的影响较大,而拌和、碾压质量的控制核心正是环氧沥青的粘度指标。已有研究^[18-20]表明环氧沥青合理的拌和粘度为 0.3~0.5 Pa·s,合理碾压粘度为 1 Pa·s 以上,深入分析环氧沥青粘度随温度、时间的变化规律,明确与适宜拌和、碾压粘度对应的施工温度及时间参数,对提升环氧沥青混合料施工质量至关重要。本文以双柳长江大桥钢桥面铺装工程为背景,针对粗级配环氧沥青混合料,开展不同容留温度、不同容留时间、不同压实功下的旋转压实成型试验,最终确定基于粘度控制的环氧沥青施工温度与时间参数,为粗级配环氧沥青混合料的精细化施工提供可靠的技术参考。

1 工程概况

双柳长江大桥作为武汉都市圈环线高速东段跨越长江的关键性控制工程,采用主跨 1 430 m 的双塔单跨钢箱梁悬索桥结构形式,加劲梁选用整体式钢箱梁结构。该桥梁全线按照高速公路标准建设,设计速度为 120 km/h,采用双向 8 车道布置方式,桥面总宽度达 50.5 m;主桥行车道钢桥面铺装采用 3.5 cm

环氧沥青混凝土 EA-10(细级配)与 3.0 cm 环氧沥青混凝土 EA-10(粗级配)的复合结构形式(见图 1),总铺装面积为 58 201 m²。

铺装上层	环氧沥青混凝土 EA10(粗级配),厚度 30 mm
黏层	环氧树脂黏结剂 II 型, 0.60~0.80 kg/m ²
铺装下层	环氧沥青混凝土 EA10(细级配),厚度 35 mm
防水黏结层	环氧树脂黏结剂 II 型, 0.50~0.60 kg/m ²
钢桥面板	环氧富锌漆,厚度 80~150 μm
	喷砂除锈,清洁度: Sa3.0 级

图 1 双柳长江大桥钢桥面铺装结构

双柳长江大桥作为全球首座智慧悬索桥和长江上桥面最宽的钢箱梁悬索桥,其建成通车将助力武鄂黄黄一体化发展和武汉都市圈高质量建设,通过一跨过江、设置声屏障等措施守护长江生态与湿地鸟类,实现工程建设与长江大保护同频共生,为同类跨江大桥绿色智能建造提供了可借鉴的范例。

2 原材料及试验方法

2.1 原材料

2.1.1 环氧沥青结合料

环氧沥青结合料由热拌环氧树脂胶结料与沥青按既定配比复配而成,环氧树脂性能指标控制要求如表 1 所示,沥青选用 70 #道路石油基质沥青,技术要求及检测结果如表 2 所示,二者拌和后形成的环氧沥青结合料性能控制标准如表 3 所示。

表 1 环氧树脂结合料

试验项目	检测结果	技术要求	试验方法
拉伸强度(23℃)/MPa	6.91	≥3.0	GB/T 16777
断裂伸长率(23℃)/%	174	≥100	

表 2 70 #基质沥青

试验项目	检测结果	技术要求	试验方法
针入度(25℃)/(0.1 mm)	61	60~80	JTG E20 T0604
延度(15℃)/cm	>100	≥100	JTG E20 T0610
软化点/℃	48	≥47	JTG E20 T0606
闪点/℃	336	≥260	JTG E20 T0611

表 3 环氧沥青结合料

试验项目	检测结果	技术要求	试验方法
拉伸强度(23℃)/MPa	2.74	≥2.5	GB/T 16777
断裂伸长率(23℃)/%	109	≥100	
吸水率(7 d, 25℃)/%	0.22	≤0.3	GB/T 1034

2.1.2 矿料

粗级配环氧沥青混合料所用矿料体系包含粗集料、细集料及填料 3 类组分。粗集料与细集料的技

术要求及检测结果分别如表4、5所示,填料采用石灰岩机制矿粉,其性能指标要求如表6所示。

表4 粗集料				
试验项目	9.5~13.2 mm	4.75~9.5 mm	2.36~4.75 mm	技术要求
表观相对密度	2.969	2.945	2.934	≥2.6
压碎值/%	11	—	—	≤15
针片状/%	2.8	3.0	—	≤5
吸水率/%	—	0.46	0.62	≤2
粘附性	5	—	—	5
水洗法≤0.075 mm 含量	—	0.1	0.1	≤1

表5 细集料		
试验项目	0.6~2.36 mm	技术要求
表观相对密度	2.959	≥2.5
砂当量/%	80	≥65
吸水率/%	0.89	≤1.5
坚固性/%	1.8	≤5

表6 矿粉		
试验项目	检测结果	技术要求
含水率/%	0.2	≤1
亲水系数	0.8	≤1
塑性指数	3	≤4
表观密度	2.730	≥2.5

2.1.3 混合料级配

粗级配环氧沥青混合料EA-10(C)级配范围如表7所示,油石比6%,EA-10(C)配合比曲线如图2所示。目标配比曲线始终介于级配上限与下限之间,粒径分布覆盖0~16 mm全区间。在9.5 mm及以上筛孔,各曲线通过率均接近100%,体现粗集料主导的骨架结构特征;在0.075~4.75 mm细粒径区间,通过率随筛孔尺寸减小呈梯度下降,0.075 mm筛孔通过率控制在5%~15%,形成“粗集料骨架+细集料与填料填充”的密实结构,为环氧沥青混合料高温稳定性与承载能力提供了材料级配保障。

表7 粗级配环氧沥青混合料EA-10(C)推荐级配范围									
级配类型	通过下列筛孔(方孔筛,mm)的质量百分率/%								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	75	58	44	32	23	16	12
下限	100	95	35	20	20	15	11	8	6

2.2 试验方法

空隙率决定铺装层的耐久性与水稳定性,构造深度直接关乎行车抗滑安全性,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG 3410—2025)中T0736、T0702和T0703分别制备混合料试件,依据T0705、T0731分别进行混合料空隙率、构造深度测试,如图

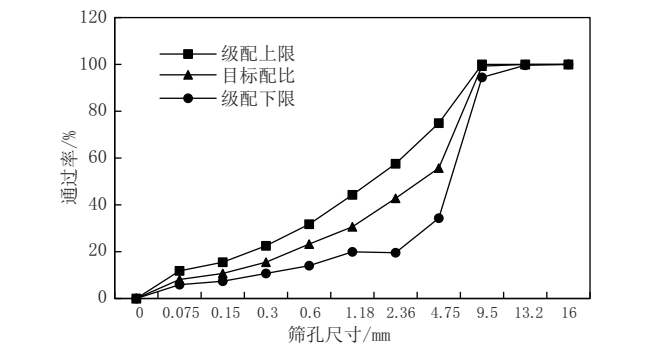


图2 粗级配环氧沥青EA-10(C)配合比曲线图

3所示,对比分析不同碾压次数、不同碾压温度和焖料时间对粗级配环氧沥青混合料质量的影响。

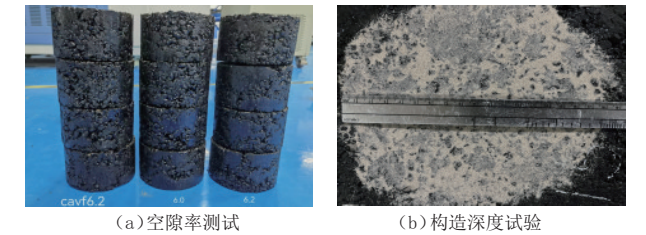


图3 环氧沥青混合料成型质量试验测试

3 结果分析与讨论

3.1 旋转压实混合料的压实特性

3.1.1 不同旋转压实次数

不同旋转压实次数下试件的混合料高度及空隙率变化情况如图4(a)所示。试验结果显示,混合料空隙率随压实次数的增加呈现持续下降趋势,当旋转压实次数达到40次时,混合料空隙率降至2.6%,刚好满足空隙率设计标准;当旋转压实次数超过40次后,即进入超压阶段,尤其当压实次数达到50次以后,空隙率的下降速率明显放缓,混合料压实度逐渐趋于稳定状态。

不同旋转压实次数对应的混合料表面构造深度及表观形态变化分别如图4(b)、(c)所示。研究发现,旋转压实次数与混合料表面构造深度呈负相关关系,压实次数越多,表面构造深度越小;当压实次数达到40次后,继续增加压实功会显著加剧对表面构造的影响;且此阶段空隙率下降速度减缓,而表面构造深度则出现急剧降低,胶浆易发生上浮现象,进而导致严重的糊面问题。

3.1.2 不同容留温度和时间

不同焖料温度条件下混合料空隙率的变化规律如图5(a)所示。空隙率与容留温度之间呈现显著的二次函数关联特征,据此可确定最易压实的容留温度为170℃,该温度下热拌环氧沥青的粘度为1.184 Pa·s;

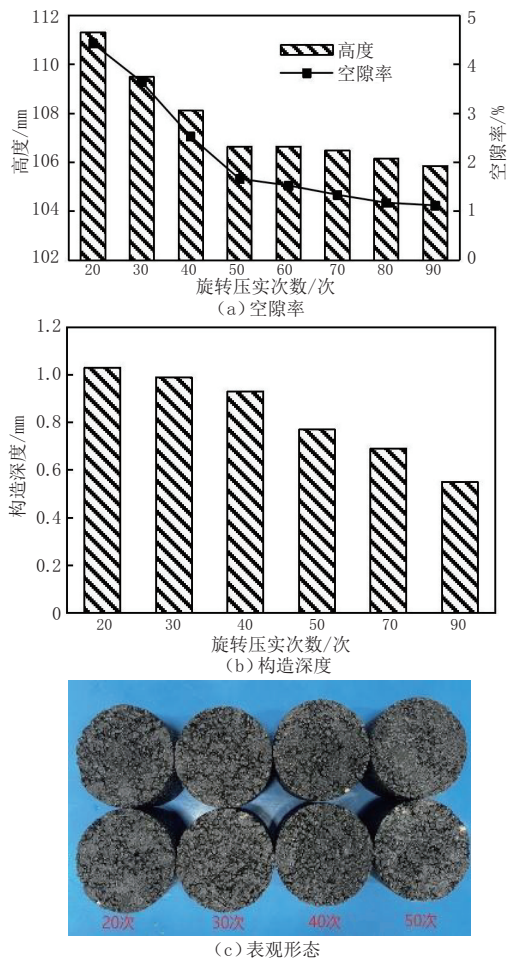


图4 不同旋转压实次数下混合料质量变化

按照±5℃的误差范围划定适宜区间,得出最易压实的容留温度区间为165~175℃,对应的环氧沥青粘度范围为0.9~1.48 Pa·s。

不同容留时间下混合料空隙率的变化情况如图5(b)所示。空隙率随容留时间的延长呈现先减小后增大的变化趋势,结合环氧沥青粘度随时间延长而逐渐增大的特性可知,混合料的压实效果并非随粘度降低而提升,粗级配环氧沥青混合料的最佳容留时间宜控制在0.5~1.5 h,在170℃料温温度下容留1 h后进行碾压,可获得最佳压实效果。

3.1.3 不同碾压温度

不同碾压温度下混合料表面构造深度及表观形态的差异如图6所示。试验结果表明,表面构造深度随碾压温度的升高而逐渐减小,当成型温度达到135℃及以上时,表面构造深度维持在0.7~0.8 mm,相较于低温碾压工况显著降低。这一现象说明,碾压成型温度越高,混合料表面越易出现糊面问题,135℃以上进行碾压作业时,糊面现象发生的概率显著增加。

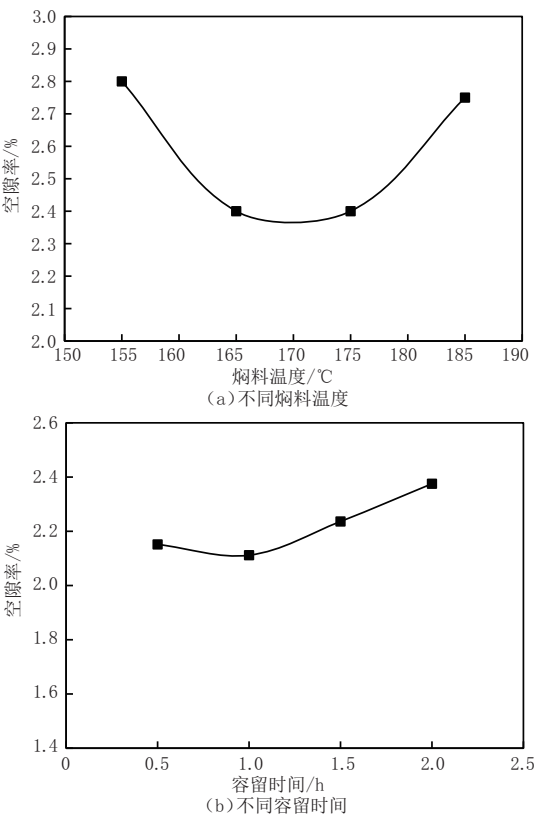


图5 不同料温温度和容留时间下混合料空隙率变化

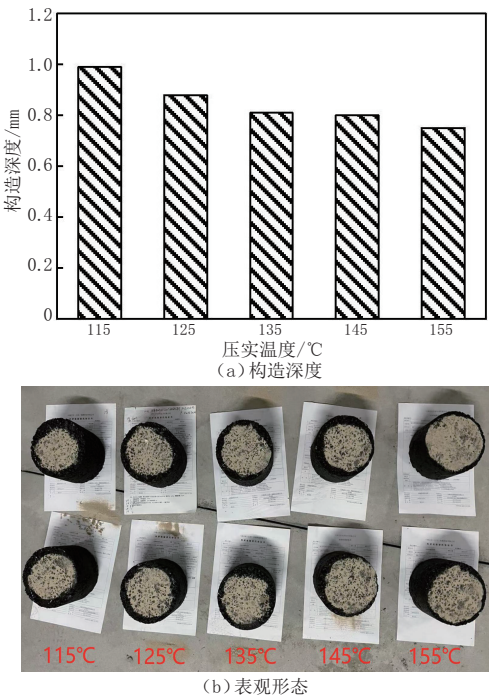


图6 不同碾压温度下混合料表面构造深度变化

3.2 马歇尔击实混合料的压实特性

不同击实次数下混合料的空隙率、沥青饱和度及矿料间隙率变化情况如图7(a)所示。对比试验数据发现,沥青饱和度随击实次数的增加呈缓慢上升趋势,矿料间隙率则基本保持稳定;当击实次数达到60次及以上时,混合料空隙率降至最小值,此时压实

效果最佳。

不同容留温度下混合料的空隙率、沥青饱和度及矿料间隙率变化如图7(b)所示。在焖料温度155~185℃的范围内,混合料的沥青饱和度与矿料间隙率基本无明显变化;当焖料温度为175℃时,混合料空隙率达到最低值,即该温度为最易压实的容留温度。这一结果表明,混合料的压实效果并非随温度升高(粘度降低)而提升,推荐粗级配环氧沥青混合料的最佳容留温度为175℃。

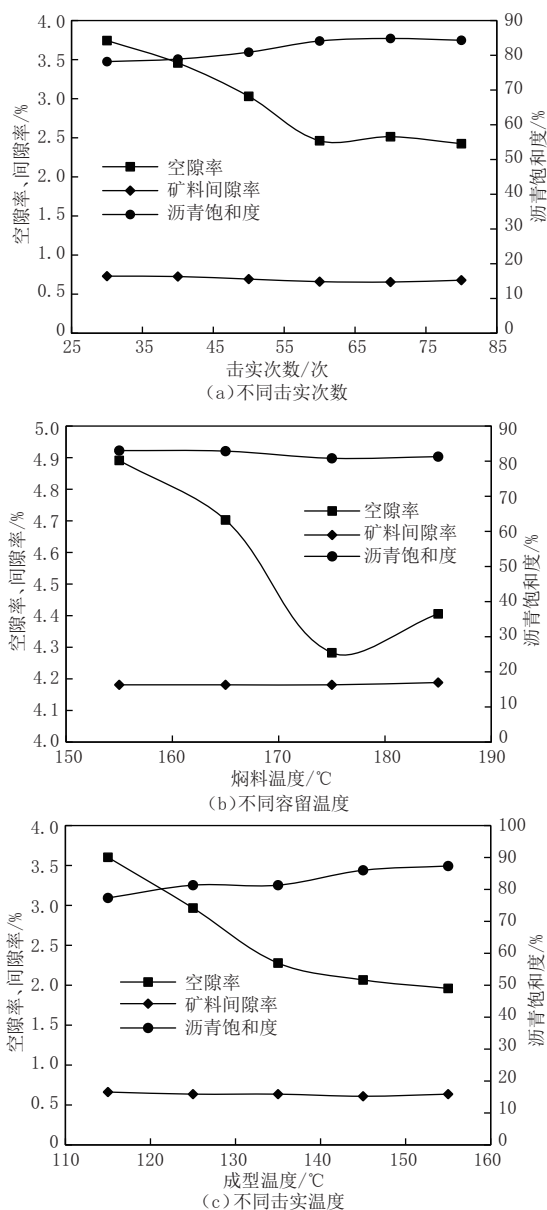


图7 不同击实次数、温度对混合料压实影响关系

不同击实温度下混合料的空隙率、沥青饱和度及矿料间隙率变化如图7(c)所示。在115~155℃的击实温度范围内,混合料的沥青饱和度与矿料间隙率相对稳定;当碾压温度处于135~155℃区间时,混合料空隙率的波动幅度较小,压实效果稳定;而当击

实温度低于135℃时,混合料空隙率会明显增大。上述结果表明,粗级配环氧沥青混合料在135℃以上进行复压作业,可保证压实质量,且无需额外增加压实功。

3.3 车辙板轮碾混合料的压实特性

不同碾压次数下混合料空隙率的变化情况如图8(a)所示。混合料空隙率随轮碾遍数的增加而逐渐降低:当轮碾遍数为5遍时,试件空隙较大,骨料之间未形成有效嵌挤;当轮碾遍数超过15遍后,试件表面胶浆上浮现象较为严重。结合粗级配环氧沥青混合料1%~3.5%的空隙率设计要求,确定轮碾次数宜控制在5~15遍范围内。

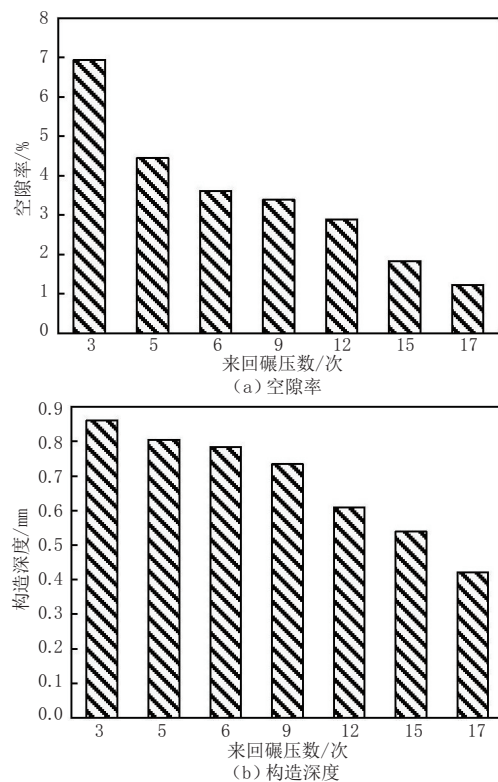


图8 不同碾压次数对混合料压实影响变化

不同碾压次数对混合料表面构造深度的影响如图8(b)所示。混合料表面构造深度随轮碾遍数的增加而不断减小,当轮碾遍数达到12遍以上时,构造深度出现明显下降,且试件表面胶浆开始上浮,易产生糊面问题,说明轮碾12遍以上属于超压阶段,综合推荐轮碾次数为9~12遍。

4 铺装试验段实施效果分析

为验证粗级配环氧沥青EA-10(C)碾压工艺的关键参数,指导主桥铺装工程的实际施工,保障钢桥面铺装的高质量建设,设置试验段进行现场验证。该试验段长约140 m,宽约8 m,碾压作业采用1台胶

轮压路机与 2 台钢轮压路机配合进行,具体碾压参数如表 8 所示。钢轮压路机初压 3 遍,碾压终了温度不低于 155 ℃;胶轮压路机复压 3 遍,碾压终了温度不低于 110 ℃;双钢轮压路机终压 1 遍,碾压终了温度不低于 90 ℃。

表 8 EA-10(C)环氧沥青混合料碾压检测

温度抽检	断面 1	断面 2	断面 3
初压	158	162	164
复压	139	137	130
终压	97	92	98

现场施工结果显示,粗级配环氧沥青 EA-10(C)铺装层整体碾压效果良好,表面平整密实,无明显裂缝等质量缺陷,也未出现明显离析现象(见图 9)。经现场检测,铺装层空隙率 1.8%,表面无渗水现象,路面平整度为 0.54 mm、摩擦系数为 68.5 BPN、表面构造深度为 0.58 mm,各项检测指标均符合相关规范及工程技术要求。

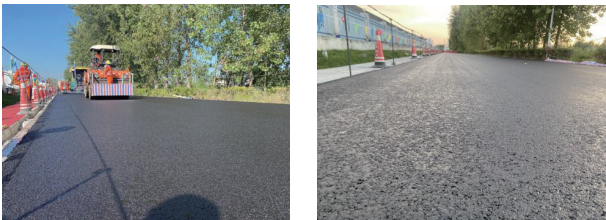


图 9 粗级配环氧沥青 EA-10(C)试验段实施

5 结 论

基于粗级配环氧沥青混合料旋转压实、马歇尔击实及车辙板轮碾 3 组成型试验,结合试验数据的系统分析,围绕混合料压实质量控制目标,得出以下核心结论,为粗级配环氧沥青混合料精细化施工提供理论支撑与实践依据。

(1)结合粗级配环氧沥青混合料空隙率、饱和度及矿料间隙率控制目标,旋转压实次数应控制在 32~40 次;40 次为压实临界值,超过此次数后易出现空隙率下降放缓、表面构造深度衰减及胶浆上浮糊面问题。最易压实容留温度为 170 ℃±5 ℃,最佳容留时间为 0.5~1.5 h,可确保环氧沥青处于适宜粘度区间。

(2)马歇尔击实试验表明,60 次击实可使混合料达到最小极限空隙率;粗级配环氧沥青混合料最佳容留温度为 175 ℃,击实温度控制在 135 ℃以上时,无需额外增加压实功即可保证设计压实度。

(3)车辙板轮碾试验显示,轮碾超 12 遍易因胶浆上浮导致空隙率、构造深度急剧下降及糊面问题;9~12 遍为最优轮碾区间,此区间内混合料空隙率约 3%、构造深度约 0.7 mm,可兼顾密实度与抗滑性能。

参考文献:

[1] 赵兴雅,王金枝.桥梁建设助长江流域发展,创新施工保长江绿色生态[J].黄冈师范学院学报,2021,41(6):9-14.

[2] 刘敏.LUHPC在双柳长江大桥钢混组合梁桥面板中的应用研究[J].交通科技与管理,2025(18):50-52.

[3] 柳涛.双柳长江大桥南主塔桩基施工关键技术[J].中华建设,2024(11):139-141.

[4] 徐仁华,徐建晖,况振华,等.相容剂对冷施工环氧沥青微观结构及性能的影响[J].石油沥青,2020,34(5):65-70.

[5] 朱文白,张辉,潘友强.大跨径钢桥面环氧沥青铺装典型病害研究[J].现代交通技术,2013,5(10):23-25.

[6] 彭祝涛,王滔,王杰,等.钢桥面环氧沥青铺装用冷拌浇注式混合料修复应用研究[J].公路交通技术,2020,36(6):36-41.

[7] 曾国东,黄红明,徐伟.静载作用下较厚型钢桥面环氧沥青铺装力学行为研究[J].中外公路,2023,43(5):156-162.

[8] Hui Zhang, Peiwei Gao, Youqiang Pan, Kuan Li, Zhixiang Zhang, Fei Geng. Development of cold-mix high-toughness resin and experimental research into its performance in a steel deck pavement[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235.

[9] 符适,吉泽中,虞浩,等.制备工艺对冷拌环氧沥青相容性的影响研究[J].公路工程,2021,46(2):112-116;163.

[10] 袁玲.环氧沥青混合料级配优化设计及性能分析[J].广东公路交通,2015(6):26-30.

[11] 李娣,张辉,崔磊,等.热拌环氧沥青 ESMA 混合料路用性能及组合式结构耐久性研究[J].公路交通技术,2025,41(2):17-24;38.

[12] 张肖宁,张顺先,徐伟,等.基于使用性能的钢桥面铺装环氧沥青混凝土设计[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012,40(7):1-7.

[13] 马会天,李娣,崔磊.抗滑耐久型环氧沥青铺装在三里河桥的应用[J].上海公路,2024(4):16-21;237.

[14] 郑军涛,杨明,李鹏飞,等.钢桥面环氧沥青铺装施工工艺及质量控制[J].工程建设与设计,2019(21):189-192.

[15] 潘友强,李款,解建光,等.国产热拌环氧沥青施工性能评估[J].上海公路,2020(3):19-23;32;99.

[16] 张林艳,赵映琴,封基良,等.环氧沥青混合料施工质量控制研究进展[J].科学技术与工程,2022,22(20):8577-8587.

[17] 黄红明,曾国东,周敏,等.基于施工控制的 TAF 环氧沥青混合料性能试验研究[J].中外公路,2018,38(5):262-266.

[18] 王泽勇,袁可兰.不同施工工艺下环氧沥青混合料性能研究[J].中外公路,2017,37(2):268-271.

[19] 刘攀,郝增恒,盛兴跃,等.钢桥面铺装高弹改性沥青混合料 SMA10 性能分析[J].公路交通技术,2021,37(6):14-20.

[20] 卢旭,李娣,崔磊,等.基于粘度的环氧沥青 ESMA 施工温度研究[J].上海公路,2024(1):155-159;193.