

文章编号: 0451-0712(2001)01-0037-05

中图分类号: U443.33

文献标识码: B

# 南京长江第二大桥钢桥面铺装技术研究

黄 卫<sup>1</sup>, 李淞泉<sup>2</sup>

(1. 东南大学 南京市 210096; 2. 南京长江二桥建设指挥部)

**摘 要:**环氧沥青混凝土是一种特殊的热固性材料,具有优越的路用性能。其在国外应用于钢桥面铺装已有 30 多年的历史,取得了丰富的经验。本文从材料、混合料性能、配合比设计、生产和摊铺等方面介绍了环氧沥青混凝土应用于钢桥面铺装的技术。

**关键词:**南京长江第二大桥; 桥面铺装; 环氧沥青; 沥青混合料

## 0 前言

钢桥面铺装尤其是大跨径正交异性钢桥面板的铺装技术,在国际上一直是一个热点和难点。桥面铺装直接铺设在正交异性钢板上,在行车荷载、风载、温度变化及地震等因素影响下,其受力和变形远较公路路面或机场道面复杂,因而对其强度、变形稳定性、疲劳耐久性等均有更高要求。同时,又由于铺装所处的特殊位置,在使用性能上又提出重量轻、高粘结性、不透水性等特殊要求。作为桥梁行车系的重要组成部分,桥面铺装的好坏直接影响到行车的安全性、舒适性、桥梁耐久性及投资效益和社会效益。

从铺装材料和施工方法角度来分,目前世界上主要采用的桥面铺装方案有四类:①以德国、日本为代表的高温拌和浇注式沥青混凝土(Gussasphalt)方案;②以英国为代表的沥青玛蹄脂混凝土(Mastic asphalt)方案(实际上也是浇注式沥青混凝土,只是铺装厚度和工艺与日本有所不同);③德国和日本等国近期采用的改性沥青 SMA 方案(Stone Mastic Asphalt);④以美国为代表的环氧树脂沥青(Epoxy asphalt)混凝土方案。

我国近几年大跨径桥梁建设事业发展迅猛,但桥面铺装技术一直是个难点。已建桥梁先后采用过日本、英国的铺装技术,但由于我国特殊的气候和交通条件,这些技术不能完全适用。

环氧沥青混凝土由壳牌石油公司最初开发用于机场道面以抵抗飞机燃油和喷气的侵害,1967 年首次用于美国 San Mateo-Hayward 大桥正交异性钢

板桥面的铺装层。它是通过在沥青中添加热固性环氧树脂和固化剂,经固化反应而形成的一种强度高、韧性好的沥青混凝土。将这种材料用作钢桥面铺装的国家主要有美国、日本、加拿大、荷兰和澳大利亚,其中美国应用最为广泛。美国和日本还编写了相应的环氧沥青桥面铺装规范。表 1 列出了世界上部分采用环氧沥青混凝土铺装的正交异性钢板桥。

表 1 采用环氧沥青混凝土铺装的正交异性钢板桥

桥 名	摊铺年份	铺装厚度/mm
美国 San Mateo 桥	1967	50
美国 San Diego 桥	1969	50
美国 Long Beach 桥	1970	50
美国 Fremont St. 桥	1973	50
巴西 Rio de Janeiro 桥	1974	50
澳大利亚 West gate 桥	1976	50
美国 Luling 桥	1984	57
中国台北 Kuan Du 桥	1983	50
美国 Golden Gate 桥	1986	50
加拿大 Lion Gate 桥	1975	35
荷兰 Bagestein 桥	1980	不详
美国 Hale Boggs 桥	1983	63.5

## 1 环氧沥青混凝土的特性

环氧沥青混凝土用于桥面铺装,主要具有如下优良性能:

(1)强度高,韧性也不差。

环氧沥青混凝土的马歇尔稳定度是普通沥青混凝土稳定度的 5~8 倍,而流值却大致相同。说明环

氧沥青混凝土不仅具有较高的强度,而且还具有一定的柔韧性<sup>[3]</sup>。

(2)良好的层间结合能力。

使用环氧沥青摊铺的粘结层具有很好的粘结能力。在 23℃ 温度下,以 500 mm/min 的延伸率对环氧沥青粘结层材料进行拉伸试验,其拉伸强度可达 8.1 MPa,断裂延伸率达 230%。

(3)良好的温度稳定性。

环氧沥青是一种热固性材料,在高温下会变软但不会流动。用环氧沥青混凝土摊铺的桥面铺装具有良好的高温稳定性,一般不会出现车辙或推挤拥包等病害。而在低温下它也不过分脆硬,强度反而低于普通沥青混凝土<sup>[4]</sup>。

(4)优良的抗疲劳性能。

无论是环氧沥青混凝土本身的疲劳性能还是混凝土和钢板复合试件的疲劳性能,环氧沥青混凝土都远大于普通沥青混凝土。一般至少高出一个数量级。

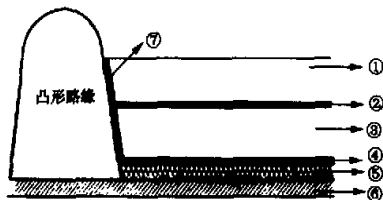
(5)良好的耐久性。

环氧沥青混凝土抗燃油腐蚀、抗水害性能十分优越。

## 2 铺装结构与材料

### 2.1 铺装结构

环氧沥青混凝土铺装方案结构如图 1 所示。



- ① 铺装上层(面层):环氧沥青混凝土(25 mm);
- ② 粘结层:环氧沥青(0.45 L/m<sup>2</sup>);
- ③ 铺装下层(保护层):环氧沥青混凝土(25 mm);
- ④ 粘结层:环氧沥青(0.68 L/m<sup>2</sup>);
- ⑤ 富锌防锈层(40~80 μm);
- ⑥ 16Mnq 钢桥面板(14 mm);喷砂除锈(Sa2.5 级);
- ⑦ 边侧防水涂层:环氧沥青。

图 1 环氧沥青混凝土铺装结构

### 2.2 铺装材料

#### 2.2.1 结合料

环氧沥青一般由两组分组成:组分 A(环氧树脂)和组分 B(由石油沥青和固化剂组成的匀质合成

物)。如果组分 A 和组分 B 之间相容性较差,还需添加介质。

组分 A、组分 B 及两者混合后的技术指标如表 2~表 4 所示。

表 2 组分 A 技术指标

指 标	要 求	试 验 方 法
粘度(23℃)/泊	110~150	ASTM D 445
环氧当量	185~192	ASTM D 1652
含水量/%	≤0.05	ASTM D 1744
闪点(克利夫兰敞口杯)/℃	≥200	ASTM D 92
比重(23℃)	1.16~1.17	ASTM D 1475
外观	透明琥珀状	目视

表 3 组分 B 技术指标

指 标	要 求	试 验 方 法
酸值(KOH/g)/mg	40~60	ASTM D 664
闪点(克利夫兰敞口杯)/℃	≥200	ASTM D 92
含水量/%	≤0.05	ASTM D 95
粘度(100℃)/(Pa·s)	>14	布氏粘度计, HBT 型 采用 3 号轴(100 转/min)
比重(23℃)	0.98~1.02	ASTM D 1475
颜色	黑	目视

表 4 环氧沥青技术指标

指 标	要 求	试 验 方 法
抗拉强度(23℃)/MPa	≥1.516 8	ASTM D 638
断裂时的延伸率(23℃)/%	≥200	ASTM D 638
热固性(300℃)	不熔化	小试件放置在热板上
粘度增加至 100Pa·s (在 121℃时)/min	≥50	布氏粘度计

#### 2.2.2 集料

集料应采用干净、坚硬、耐磨的非酸性矿料,表面 100%为破碎面,形状以立方体为主。其技术指标列于表 5。为减小高温季节太阳辐射对铺装层的升温作用,宜选用浅色集料。

表 5 铺装用集料技术指标

指 标	试 验 方 法	标 准
洛杉矶磨耗损失(100 转后)	ASTM C 131	≤7%
洛杉矶磨耗损失(500 转后)	ASTM C 131	≤22%
砂当量	ASTM D 2419	≥42
磨光值(PSV)	ASTM D 3319	≥44%
长宽比大于 3:1 的颗粒含量	ASTM D 4791	≤5%
视密度/(g/cm <sup>3</sup> )	T0304-94	≥2.65

矿质填料采用石灰石粉,至少包含 90%的碳酸钙,不含活性石灰。

### 3 配合比设计

环氧沥青混凝土的基本性能指标有马歇尔稳定度、流值、恢复率和孔隙率,配合比设计按常规沥青混合料设计方法进行,性能指标见表 6。

表 6 环氧沥青混凝土的性能指标

性 质	指 标	
	未固化试件	60℃下固化试件
马歇尔稳定度/kN	≥5	≥40
流值/0.1 mm	≥20	≥20
恢复率/%	—	≥60
孔隙率/%	≤4.0	≤4.0

环氧沥青混凝土的配合比设计也以马歇尔试验为主。根据马歇尔试验得出最佳沥青用量,然后再根据环氧沥青混凝土和钢板的复合试件的疲劳性能,对该用量进行必要调整。根据美国的研究发现,对应于最佳耐疲劳性能的最佳沥青用量要比从马歇尔试验中得到的最佳沥青用量多 0.5%。另外也有人将混合料拌和的和易性作为环氧沥青混凝土组成设计的一个依据。

### 4 粘结层试验研究

铺装层和钢板之间的粘结强度对桥面铺装的使用寿命有很大影响。由现场破坏调查可知,铺装层和钢板之间粘结力的丧失主要发生在沥青混合料和防锈涂装层之间,也就是说,粘结层的粘结强度不足。在钢桥面铺装中,常用作粘结层的材料有热熔型粘结材料、溶剂型粘结剂和热固性粘结材料。南京长江第二大桥粘结层采用环氧沥青热固性粘结材料。由表 4 可知,环氧沥青热固性粘结耐高温性要求达到 300℃以上。拉伸试验表明,在 23℃下,环氧沥青粘结料拉伸强度大于结合料(1.76 MPa),其抗拉强度可达 8.1 MPa,断裂延伸率可达 232%,显示了其极好的强度和变形能力。检验粘结层性能最常用的试验方法是拉拔试验和剪切试验。

表 7 为常温和 60℃的粘结层剪切强度试验结果。针对南京长江第二大桥实际结构,考虑水平力作用(摩擦系数为 0.5),采用有限元分析计算,常温时钢板与铺装间的最大剪应力为 0.48 MPa,60℃时为 0.33 MPa。试验结果满足理论分析上的要求。

为比较环氧富锌漆和无机硅酸锌漆与铺装层间的粘结强度,拉拔试验中采用了分别经这两种涂料防锈处理的钢板试件。试验在 3 种温度下进行:低温

(0±2℃)、常温(23±2℃)和高温(60±2℃)。试验结果见表 8 所示。

表 7 环氧沥青铺装剪切试验结果

温度/℃	防锈漆类型	固化条件	剪切强度/MPa	破坏面位置
18.8	环氧富锌漆	自然固化*	5.5	粘结层与漆膜间
17		完全固化	6.84	
60		自然固化*	0.34	
60		完全固化	1.00	

\* 冷模湿布粘结层材料,自然固化 5 d 后铺装环氧沥青混凝土,120℃固化 4 h。

表 8 环氧沥青铺装拉拔试验结果

试 验 温 度/℃		0±2	23±2	60±2
粘结强度/MPa	无机硅酸锌漆	7.13	1.55	0.92
	环氧富锌漆	4.24*	>2.23	0.97

\* 试件破坏面产生在拉头和胶粘剂间,不能反映铺装层和钢板间真正的粘结强度。

由表 8 中的试验结果发现,在常温和高温下表面喷涂环氧富锌漆的钢板和铺装层间的粘结强度都大于表面喷涂无机硅酸锌漆的钢板和铺装层间的粘结强度。环氧沥青混凝土铺装层和钢板之间的粘结强度随着温度的升高而减小。而环氧沥青混凝土本身的抗拉强度也随温度升高而减小。另外,所有试件的破坏面都没有发生在两铺装层之间,说明桥面铺装分两层摊铺时其层间粘接力是牢固稳定的。通过观察高温下破裂面发生在粘结层和钢板之间的试件发现,粘结层表面略微有些粘手,但其形态仍保持为固态,说明粘结层能承受 60℃高温。

### 5 疲劳试验

疲劳试验在 MTS (Material Testing System) 810 上进行。采用四点滚轴支座,荷载施加在钢板中部的肋板上。为保证试件在整个试验过程中始终和支座紧密接触,采用最小荷载 0.5 kN。疲劳试验的荷载波形为正弦波,频率为 10 Hz,加载力定为 5 kN。试验时,每隔一定次数记录一次动挠度;荷载每作用 10~30 万次后停止加载,测量一次静挠度。整个试验过程中根据 MTS 显示的加载值和动挠度变化情况以及对试件外观的监视,判断试件是否出现疲劳破坏。

图 2 和图 3 是室温下(18℃),2 号复合梁疲劳试验过程中跨中动挠度和静挠度的变化情况。复合梁试件动挠度与静挠度和加载次数的拟合曲线都为

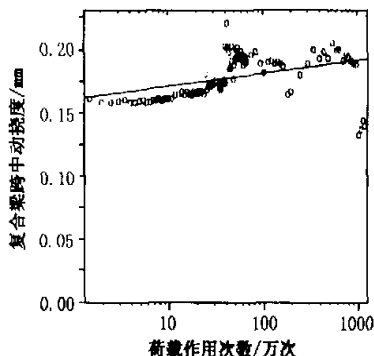


图 2 2号复合梁挠度和荷载作用次数关系

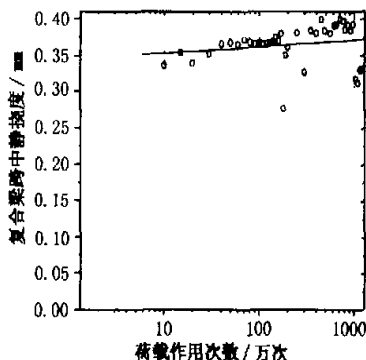


图 3 2号复合梁挠度和荷载作用次数关系

直线。拟合线的斜率都为正值,但其数值都很小。斜率为正说明复合梁在加载过程中刚度模量略有减小;数值很小说明在整个试验过程中复合梁的损伤很小而且稳定。

随后将最大荷载提高到 6 kN(最小荷载仍为 0.5 kN),采用相同荷载波形对 4 号复合梁在 18 ℃ 下进行了疲劳试验。4 号复合梁在疲劳试验前后荷载—挠度线性回归方程的斜率相对差别为 6%,在试验允许范围内可以认为它们没有变化。4 号复合梁在经过 1 200 万次,最大荷载为 6 kN 的等幅循环加载后,同样没有损伤。

疲劳试验结果表明,设计的环氧沥青桥面铺装结构,在常温下能够满足南京长江第二大桥 15 年设计使用年限内交通和载荷的作用要求。

5 号复合梁在经过 8.5 万次,最大荷载为 12 kN,最小荷载为 0.05 kN 的等幅循环加载后,沥青混凝土从跨中开裂;6 号复合梁在经过 48 万次最大荷载为 10 kN,最小荷载为 0.05 kN 的等幅循环加载后,沥青混凝土从跨中开裂。根据 4~6 号复合梁的疲劳试验数据,采用半对数坐标绘制复合梁试件

的疲劳寿命和疲劳荷载间的拟合曲线,由拟合曲线可得到沥青混合料处于张拉状态时的复合梁弯曲疲劳寿命公式:

$$\log_{10} N = 5.230 - 0.357L \quad (1)$$

式中:  $L$  为疲劳荷载(kN);  $N$  为疲劳寿命(万次)。

## 6 混合料拌和

导致环氧沥青优异性能的化学反应开始于环氧树脂、固化剂改性沥青和集料在拌制过程中的混合时刻。在拌制温度下,该反应使结合料粘度逐渐增加,故要求环氧沥青混合料在温度下降至规定最小值之前摊铺并压实。如果不能遵守这些规定并将混合料温度维持在规定拌和温度范围内,将导致混合料变成硬化、不可操作的块体。因此在环氧沥青混合料的拌制过程中,控制温度和时间是极为重要的。

拌和楼必须位于距离施工现场足够近的位置,以使环氧沥青可以在规定的摊铺时间内运送到摊铺机内。拌和楼须进行必要改造,配备安装环氧沥青组分存储罐、混合罐以及相关的加热器、给料线和计量设备。

环氧沥青由专用的混合机混合并保持在要求的温度范围(135~150 ℃)内,然后通过专用管道添加到搅拌机中与集料混合。环氧沥青混合料的出料温度用红外线测温仪测量,控制在 121 ℃ 左右。

## 7 施工

### 7.1 喷涂粘结层

在喷涂粘结层之前,桥面钢板上应先进行喷砂除锈和防锈漆的涂覆。防锈漆一般选用无机硅酸锌漆或环氧富锌漆。南京长江第二大桥采用环氧富锌漆。

粘结层材料也采用环氧沥青。采用特殊的撒布设备喷涂。

为利于环氧沥青粘结层的喷涂施工并引起化学反应,组分 A(环氧树脂)加热至 82~93 ℃,组分 B(固化剂和沥青)加热至 150 ℃,通过计量系统按规定比例混合后,经混合器/反应器和喷涂杆喷到桥面钢板上。其喷涂率在钢板上为 0.68 L/m<sup>2</sup>,在两层铺装层之间为 0.45 L/m<sup>2</sup>。

为防止桥面上凝聚的水分破坏粘结层和钢板间的粘结力,桥面温度和气温必须高于或等于 10 ℃ 时才能施工。

粘结层施工应领先铺装施工足够长的距离,以防止铺路机打滑,但也不能超过各铺装操作预定的长度。喷涂后的粘结层在车道开放交通之前或在喷涂完后的 3 d 内,必须用铺装混合料覆盖。

## 7.2 环氧沥青混凝土的摊铺

环氧沥青混凝土采用常规摊铺机和压路机摊铺并压实。但对每辆运料车中的混合料都有严格的时间和温度要求。对应于不同的混合料温度,都有一个最小允许时间和最大允许时间。混合料从开始拌和到倒入摊铺机中,所花的时间必须介于这两时间之间。如果超出了最大允许时间,则混合料必须废弃。

为保证混合料在摊铺时温度在规定范围内,摊铺机上的熨平板在放下之前,可先用板上的燃烧器加热,但其温度不能超过铺装用混合料自身的温度(110~121℃)。

初压必须紧跟着铺装层的摊铺。初压完成之前摊铺层的温度不得低于 83℃。终压必须在摊铺层温度下降至 66℃之前完成。故复压压路机和终压压路机应紧跟在初压压路机后面完成碾压操作。

纵向接缝应与交通车道边缘错开 15 cm,或位于一条车道中央的 1/3 区内。为使摊铺道上面层间的接缝牢固顺直,可以用锯将摊铺道的斜坡部分切开,并清除斜坡部分的材料。

环氧沥青混凝土面层冷却至室温 2 h 后,即可开放交通,但其最终强度的形成需在 5~7 周后。

参加本课题研究的还有:东南大学杨军、程刚、倪富健、钱振东、王晓、王建伟等;南京长江二桥建设指挥部:娄学全、万姗姗、胡明义、李一鸣、孙斌等。

## 参考文献:

- [1] 黄卫,等. 南京长江第二大桥钢桥面铺装材料试验研究报告. 2000.
- [2] 黄卫,等. 南京长江第二大桥环氧沥青混凝土铺装试验段研究报告. 2000.
- [3] 吕伟民. 国内外环氧沥青混凝土材料的研究与运用. 石油沥青, 1994(3).
- [4] 壳牌沥青手册. 1995.

# Study on Steel Deck Paving Technology of the Second Large Bridge over the Yangtse River in Nanjing

Huang Wei<sup>1</sup>, Li Songquan<sup>2</sup>

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Construction Headquarter of Nanjing Yangtse River Second Bridge Project, Nanjing, China)

**Abstract:** Epoxy asphalt concrete is a kind of special thermosetting material with outstanding road performances. It has been used in steel deck pavement for more than 30 years at abroad, so a lot of experiences have been obtained by engineers. This paper introduces technologies of epoxy asphalt concrete used in steel deck pavement concerning properties of materials and mixtures, design of mixture ratio, production and laying.

**Key words:** The Second Large Bridge over the Yangtse River in Naging; Bridge deck pavement; Epoxy asphalt; Asphalt mixture

产品质量 企业形象