

## 二阶热固性环氧沥青桥面铺装黏层黏结性能试验研究

周昌栋<sup>1</sup>,代明净<sup>2</sup>,赵明宇<sup>3</sup>,李志强<sup>3</sup>,雷宇翔<sup>4</sup>,丁庆军<sup>4\*</sup>

(1.宜昌市交通运输局,湖北宜昌 443000;2.宜昌市城市建设投资开发有限公司,湖北宜昌 443000;3.沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁沈阳 110168;4.武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室,湖北武汉 430070)

**摘要:**该文以宜昌伍家岗长江大桥为工程依托,针对铺装结构中RA沥青混凝土与高黏高弹SMA沥青混凝土层间的二阶热固性环氧沥青材料的不同洒布量、不同第一阶段固化时间、不同养护时间、不同服役温度下的界面抗剪与拉拔强度以及洒布量对耐剪切疲劳性能的影响开展研究。研究结果表明:随着二阶热固性环氧沥青洒布量的增加,黏结与抗剪强度提高,结构耐剪切疲劳性能增强,施工环境温度为25~35℃时,二阶热固性环氧沥青黏层与高黏高弹SMA的施工间隔建议44~52 h,施工完成后封闭养护时间应大于7 d,二阶热固性环氧沥青黏层可实现组合铺装结构的25℃抗剪强度 $\geq 3.8$  MPa,拉拔强度 $\geq 1.7$  MPa,60℃抗剪强度 $\geq 1.7$  MPa,拉拔强度 $\geq 0.9$  MPa,研究结果对二阶热固性环氧沥青材料在桥面铺装工程中的应用具有指导意义。

**关键词:**桥面铺装材料;二阶热固性环氧沥青;拉拔强度;剪切强度;黏结性能

中图分类号:U443

文献标志码:A

### Experimental Study on Adhesive Performance of Second-Order Thermosetting Epoxy Asphalt in Bridge Deck Pavement

ZHOU Changdong<sup>1</sup>, DAI Mingjing<sup>2</sup>, ZHAO Mingyu<sup>3</sup>, LI Zhiqiang<sup>3</sup>, LEI Yuxiang<sup>4</sup>, DING Qingjun<sup>4\*</sup>

(1.Yichang Transportation Authority, Yichang, Hubei 443000, China; 2. Yichang Urban Construction Investment and Development Co., Ltd., Yichang, Hubei 443000, China; 3.School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China; 4.State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract:** Based on the Wujiagang Yangtze River bridge project in Yichang, the interfacial shear strength and pull-out strength of the second-order thermosetting epoxy asphalt material between RA asphalt concrete and high viscoelastic SMA asphalt concrete in pavement structure were studied under different spraying amount, different first-stage curing time, different curing time, and different service temperatures. In addition, the influence of spraying amount on shear fatigue resistance was studied. The results show that with the increase in the spraying amount of the second-order thermosetting epoxy asphalt, the adhesive performance and shear strength are improved, and the shear fatigue resistance of the structure is enhanced. At a construction ambient temperature of 25–35 °C, the construction interval of second-order thermosetting epoxy asphalt layer and high viscoelastic SMA asphalt concrete is recommended to be 44–52 h. Closed curing time after construction should be more than 7 days. The second-order thermosetting epoxy asphalt layer can achieve the shear strength of  $\geq 3.8$  MPa and pull-out strength of  $\geq 1.7$  MPa of the composite pavement structure at 25 °C, as well as shear strength of  $\geq 1.7$  MPa and pull-out strength of  $\geq 0.9$  MPa at 60 °C. The research results have guiding significance for the

收稿日期:2022-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:U21A20149);硅酸盐建筑材料国家重点实验室开放基金资助项目(编号:SYSJJ2020-07);沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(编号:RC220313);辽宁省教育厅高校基本科研项目(编号:LJKMZ20220950)

作者简介:周昌栋,男,大学本科,教授级高级工程师.E-mail:1944635770@qq.com

\*通信作者:丁庆军,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:dingqj@whut.edu.cn

application of second-order thermosetting epoxy asphalt material in bridge deck paving engineering.

**Keywords:** bridge deck pavement material; second-order thermosetting epoxy asphalt; pull-out strength; shear strength; adhesive performance

## 0 引言

随着中国公路建设的发展,大跨径的桥梁建设节奏加快,钢桥面由于具有自重轻、架设方便、跨越能力大等优点,在大型跨江海桥梁工程中应用逐渐广泛。然而,钢桥面在车载作用下变形量大、导热快,铺装层间易发生脱黏、推移、拥包、开裂等一系列病害问题<sup>[1-2]</sup>,因此,近年来国内外学者围绕钢桥面铺装新材料开展了大量研究工作。

在钢桥面铺装材料中,除环氧沥青混凝土、浇筑式沥青混凝土、改性沥青玛蹄脂碎石混合料等铺装层材料之外,铺装层材料之间的黏结效果也是钢桥面铺装层中需要重视的“薄弱环节”。目前,常用的铺装层间黏结材料有环氧树脂防水黏结层、甲基丙烯酸甲酯、改性乳化沥青黏层、高黏改性沥青防水黏结层等,大量研究结果表明,在不同的铺装层服役与施工条件下,对黏结层材料也有不同的技术要求,如反应型树脂类黏结层在高温作用会出现老化问题。因此,在热拌沥青混凝土下层应用会引起黏结层强度出现不同程度衰减;如在高温重载的桥梁服役要求下,乳化沥青类黏结层材料对层间的黏结效果有限;在树脂沥青混合料中,由于胶浆含量高,铺装完成后表面光滑、构造深度小,在夏季高温条件下,层间易出现剪切、滑移等病害<sup>[3-6]</sup>。

近年来有学者提出将二阶热固性环氧沥青应用于桥面铺装层的层间黏层,由于其具有二阶段反应性特性,因此在常温条件下洒布后,可发生第1阶段固化反应,并达到指干。在一阶固化完成后,车辆和人员再进行下一阶段的施工作业,因而不会发生粘连。当热拌沥青混合料铺筑时,该黏结层在沥青混合料 165~170 °C 的温度作用下软化,与铺装上层底面中的沥青胶浆融合相连,并在此温度条件下发生第2阶段固化反应,生成固化的环氧沥青黏结层<sup>[7-8]</sup>。

目前,关于二阶热固性环氧沥青的研究主要围绕其固化反应原理、组成与自身性能规律开展,而直接将二阶热固性环氧沥青应用于钢桥面铺装黏层的研究少有报道,使二阶热固性环氧沥青黏层在工程

中的应用缺乏技术参考。比如由于部分工程存在施工时段降雨多,连续施工时间难以控制的情况,若二阶热固性环氧沥青黏结层与铺装上层不能连续施工,间隔时间过长,将会导致二阶热固性环氧沥青的第1阶段固化程度过高,在桥面上面层施工时难以软化融合、二阶反应程度低,从而降低层间黏结效果;若二阶热固性环氧沥青黏结层与铺装上面层的施工时间接近,不仅会导致摊铺、运输设备打滑、粘轮,还会引起二阶热固性环氧沥青黏结层薄膜破坏,影响黏结效果。因此,本文结合实际工程,针对不同固化时间、不同洒布量、不同龄期、不同服役温度下的二阶热固性环氧沥青黏结层组合试件的剪切、拉拔规律开展研究,为材料的应用提供理论参考。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

试验采用二阶热固性环氧沥青,性能指标见表1,下面层采用树脂沥青,性能指标见表2,上面层采用高黏高弹沥青,性能指标见表3,矿料采用0~4.75 mm、4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm 玄武岩碎石,矿粉采用石灰石磨细矿粉,各项性能指标均满足相应标准规范要求。

表1 二阶热固性环氧沥青性能指标

Table 1 Performance index of second-order thermosetting epoxy asphalt

项目	吸水率/ %	断裂伸长率 (25 °C)/%	断裂强度 (25 °C)/MPa	黏结强度(与保护 层,25 °C)/MPa
性能指标	0.15	119	3.8	1.7
技术要求	≤0.30	≥100	≥3.0	≥1.5

表2 树脂沥青性能指标

Table 2 Performance index of resin asphalt

项目	指干时间 (25 °C)/h	固化时间 (25 °C)/h	断裂伸长率 (25 °C)/%	断裂强度 (25 °C)/MPa
性能指标	16.2	54.2	106	3.3
技术要求	≥6.0	≤72.0	≥50	≥2.0

表3 高黏高弹沥青性能指标

项目	针入度(25℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	延度(5℃/cm)	软化点/℃	60℃黏度/(Pa·s)	弹性恢复(25℃)/%
性能指标	60.2	43.5	92.5	83 720	98.5
技术要求	40.0~80.0	≥20.0	≥70.0	≥20 000	≥85.0

1.2 试验方案

为模拟桥面铺装实际施工过程中的施工设备条件与环境气候条件,试验以宜昌伍家岗长江大桥(主跨1 160 m悬索桥钢箱梁桥面)工程为依托,在桥面铺装工程试验段中取样进行性能测试。

伍家岗长江大桥桥面铺装采用EBCL+RA+SMA组合的ERS铺装体系,具体结构为EBCL(Epoxy Bonding Chips Layer)环氧黏结碎石层+3 cm RA(Resin Asphalt)树脂沥青混合料下面层+4 cm SMA(Stone Mastic Asphalt)沥青玛蹄脂碎石混合料上面层,如图1所示。

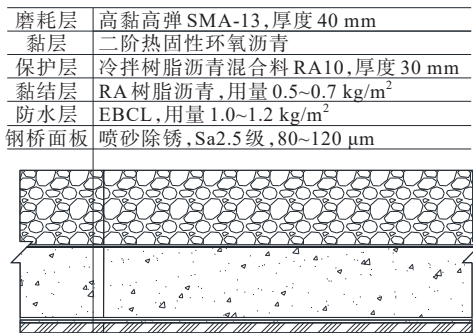


图1 伍家岗长江大桥桥面铺装层结构

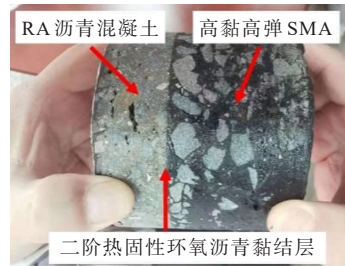
Figure 1 Pavement layer structure of Wujiagang Yangtze River bridge

试验段按照主桥铺装结构进行施工,长200 m,总宽度12 m(分2幅,每幅宽6 m),具体方案设计如下:①二阶热固性环氧沥青黏层在纵向分为4个区域,每部分长50 m,宽12 m,各区域的洒布量分别为0.8 kg/m<sup>2</sup>、1.0 kg/m<sup>2</sup>、1.2 kg/m<sup>2</sup>、1.4 kg/m<sup>2</sup>;②完成二阶热固性环氧沥青黏层施工后,进行高黏高弹SMA-13施工,高黏高弹SMA-13上面层在铺装横向分为4个区域,每部分长200 m,宽3 m,各区域分别在二阶热固性环氧沥青黏层施工完成后,间隔12 h、24 h、48 h、72 h进行摊铺;试验段整体施工完成后,每个区域分别在1 d、3 d、7 d取芯,得到直径10 mm的

组合结构试验样品,如图2所示;将取芯得到的样品表面进行切割打磨,待试件彻底干燥后用于后续室内拉拔与抗剪试验加载。



(a) 组合结构全厚度钻芯取样



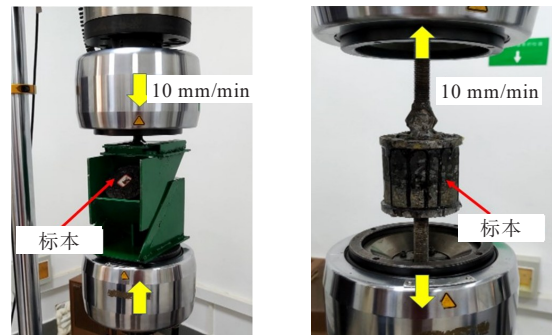
(b) 组合结构试验试件

图2 工程试验段取样过程

Figure 2 Sampling process of engineering test section

1.3 测试方法

研究试验设备为MTS动态力学试验系统,采用抗剪强度和拉拔强度评价层间黏结性能,斜剪试验、拉拔试验参考《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T3364-02—2019)进行<sup>[9-11]</sup>,试验加载夹具根据试验段芯样尺寸加工定制,其中拉拔夹具的上下平板与试件使用环氧树脂胶黏剂进行黏结,剪切试件以与竖向夹角为45°的方向进行剪切,试验温度分别为25℃、40℃、60℃、70℃,采用MTS配套环境箱进行温度控制,试验加载方式见图3。动态剪切疲



(a) 剪切试验

(b) 拉拔试验

图3 铺装层组合试件层间黏结性能试验加载方式  
Figure 3 Loading mode of interlaminar adhesive performance test of composite specimen of pavement



劳试验加载速率为 10 mm/min, 剪切疲劳性能测试采用控制应力方式, 波形为无间歇正弦波, 应力水平为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6, 循环应力比选取 0.2, 加载频率取 10 Hz, 循环加载结束以试件破坏为止。

## 2 静态加载条件下的层间黏结性能

### 2.1 不同洒布量对层间黏结性能的影响规律

图 4 为剪切与拉拔试验后破坏的试件界面形态。由图 4 可知: 剪切加载下的组合结构试件破坏位置为 RA 沥青混凝土与高黏高弹 SMA 之间的二阶热固性环氧沥青黏结层内部, 观察破坏后的试件表面可知, 在 RA 沥青混凝土的上表面与高黏高弹 SMA 的下表面, 均黏附有一定量的二阶热固性环氧沥青; 拉拔试验的试件破坏界面也出现在 RA 沥青混凝土与高黏高弹 SMA 层间, 少数拉拔试件的破坏出现在高黏高弹 SMA 内部, 结果说明二阶热固性环氧沥青能够在铺装层间界面位置起到界面黏结的作用, 与 RA 沥青

混凝土、高黏高弹 SMA 沥青混凝土的黏结效果良好, 在高黏高弹 SMA 摊铺与碾压过程中, 二阶热固性环氧沥青软化并与 SMA 胶浆发生混合, 使界面过渡层连续, 破坏并未出现在 RA 沥青混凝土或 SMA 沥青混凝土的表面。



图 4 剪切与拉拔破坏界面形态

Figure 4 Shear and pull-out failure interface morphology

图 5 为不同二阶热固性环氧沥青洒布量(0.8 kg/m<sup>2</sup>、1.0 kg/m<sup>2</sup>、1.2 kg/m<sup>2</sup>、1.4 kg/m<sup>2</sup>)下的组合结构试件剪切加载的荷载-位移曲线(试验第 1 阶段固化时间均为 48 h, 养护 7 d, 试验温度 25 ℃)。

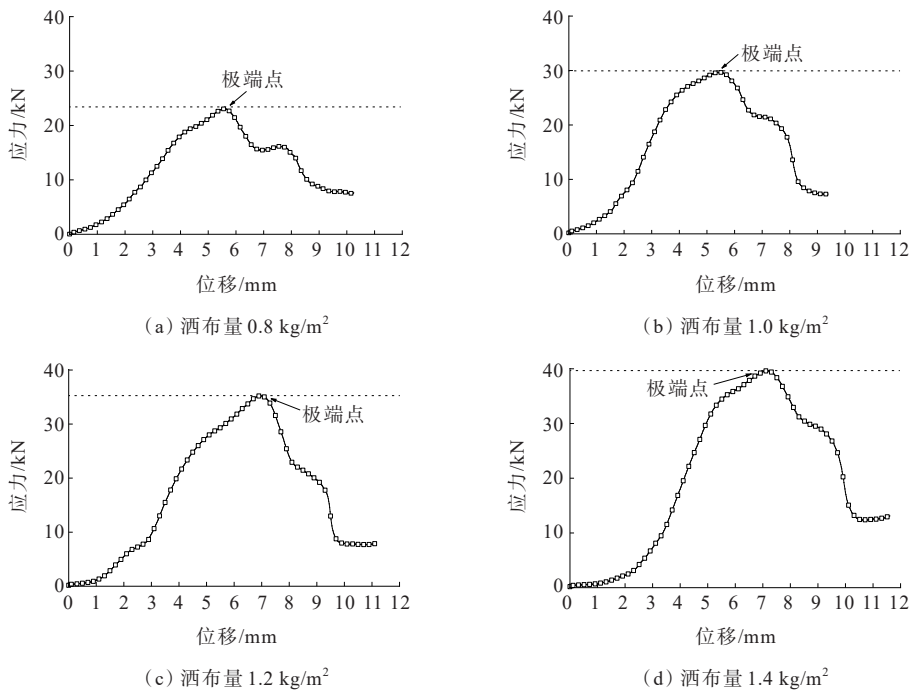


图 5 不同二阶热固性环氧沥青洒布量的组合结构试件剪切性能规律

Figure 5 Shear performance rule of composite structure specimen with different spraying amount of second-order thermosetting epoxy asphalt

由图 5 可知: 在 10 mm/min 的加载速率下, 随着试件层间界面处变形量的增加, 二阶热固性环氧沥青黏结层表现出逐渐增大的屈服应力, 当变形达到一定量后, 应力达到峰值, 界面出现破坏, 此时屈服应力并未直接下降, 而是在层间界面处仍然有一定

的应力屈服, 使界面黏结层的黏结性能逐渐下降, 直至完全破坏。

图 6 为不同二阶热固性环氧沥青洒布量(0.8 kg/m<sup>2</sup>、1.0 kg/m<sup>2</sup>、1.2 kg/m<sup>2</sup>、1.4 kg/m<sup>2</sup>)下的组合结构试件直接拉伸加载的荷载-位移曲线(试件的第 1 阶段固

化时间均为48 h,养护7 d,试验温度25℃)。由图6可知:随着拉伸位移的增加,其荷载曲线迅速升高,并在破坏后,荷载下降至零,组合结构试件完全断裂。其中,在洒布量达到1.2 kg/m<sup>2</sup>后,一部分的试件

断裂位置开始出现在高黏高弹SMA内部,说明二阶热固性环氧沥青洒布量达到1.2 kg/m<sup>2</sup>,在合理的固化条件下,其黏结强度可完全满足铺装层组合结构层间黏结效果。

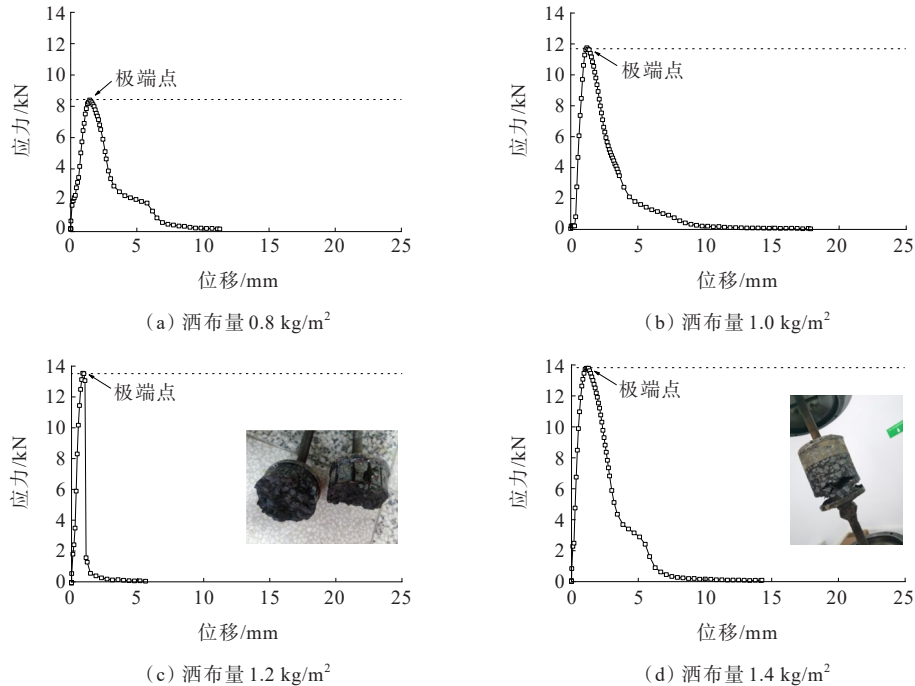


图6 不同二阶热固性环氧沥青洒布量的组合结构试件拉拔性能规律

Figure 6 Pull-out performance rule of composite structure specimen with different spraying amounts of second-order thermosetting epoxy asphalt

不同洒布量下的拉伸与抗剪强度计算结果如表4所示。由表4可知:随着二阶热固性环氧沥青洒布量的增加,剪切强度、拉拔强度随之增大,增加幅度逐渐降低。

表4 不同洒布量的组合结构试件层间黏结强度(25℃)

Table 4 Inter-layer bond strength of composite structure specimens with different spraying amount(25℃)

洒布量/(kg·m <sup>-2</sup> )	剪切强度/MPa	拉拔强度/MPa
0.8	2.490	1.083
1.0	3.140	1.503
1.2	3.905	1.732
1.4	4.223	1.758

## 2.2 不同一阶段固化时间对层间黏结性能的影响规律

图7为不同一阶反应时间(12 h、24 h、48 h、72 h)时的组合结构试件的抗剪强度与拉拔强度(试件的洒布量均为1.2 kg/m<sup>2</sup>,养护7 d,试验温度25℃)。

由图7可知:随着一阶反应时间的增加,组合

结构试件的抗剪强度与拉拔强度均呈现先增后减的趋势,当一阶固化时间在48 h时,试件的抗剪与拉拔强度最大,分别为3.905 MPa与1.732 MPa。由于二阶热固性环氧沥青洒布后,其组分即发生固化反应。若在洒布12 h即开始进行高黏高弹SMA上面层摊铺,其二阶热固性环氧沥青的第1阶段固化时间不足,在被加热后,自身黏度较小,不仅存在施工设备对黏结层的破坏,且黏度较低的二阶热固性环氧沥青在SMA不断振动、往复碾压的条件下,会被抽提至SMA内,使在界面位置处的二阶热固性环氧沥青膜减薄,降低界面黏结强度。而当其第1阶段固化时间较长时(72 h),二阶热固性环氧沥青黏结层已具有一定的硬度,在加铺高黏高弹SMA后,其第2阶段固化的程度较低<sup>[12-13]</sup>,难以与上面层间形成较好的黏结效果,从而使层间剪切与拉拔强度降低。

## 2.3 不同养护时间对层间黏结性能的影响规律

图8为不同二阶热固性环氧沥青养护时间(1 d、

3 d、7 d)下的组合结构试件的拉拔强度与抗剪强度(试验试件的洒布量均为 $1.2 \text{ kg/m}^2$ ,第1阶段固化时间48 h,试验温度 $25^\circ\text{C}$ )。

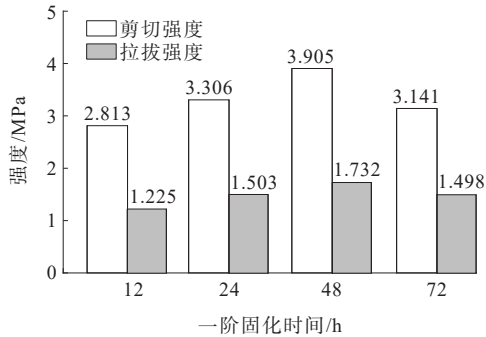


图7 不同一阶固化时间对组合结构试件层间黏结性能的影响规律

Figure 7 Effect of different first-order curing time on interlaminar adhesive performance of composite structure specimens

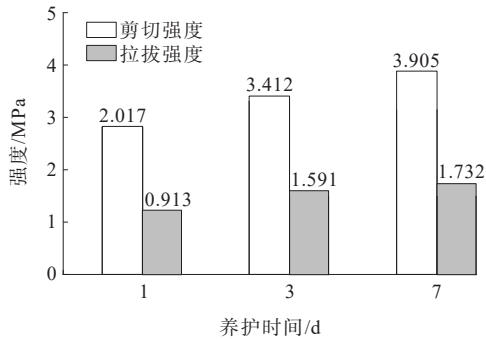


图8 不同养护时间对组合结构试件层间黏结性能的影响规律

Figure 8 Effect of different curing time on interlaminar adhesive performance of composite structure specimens

由图8可知:在高黏高弹SMA-13上面层铺装1 d后即进行拉拔与抗剪试验,得到的强度较低,说明二阶热固性环氧沥青的固化反应未完全完成,界面强度尚处于形成过程中,当3 d后对组合结构试件进行拉拔与抗剪强度测试,层间黏结效果较明显提高,说明二阶热固性环氧沥青的固化反应程度提高,当继续养护7 d后进行强度测试,其黏结抗剪强度小幅度提升,说明此时二阶热固性环氧沥青的固化反应已进入后期,黏结层黏结性能已达到开放交通的要求。

#### 2.4 不同服役温度对层间黏结性能的影响规律

图9为不同服役温度( $25^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$ )下的组合结构试件的拉拔与抗剪强度(试件的洒布

量均为 $1.2 \text{ kg/m}^2$ ,第1阶段固化时间48 h,养护7 d)。

由图9可知,随着服役温度的升高,二阶热固性环氧沥青黏层的黏结性能下降,这是由于二阶热固性环氧沥青仍然属于温度敏感性材料,当服役温度达到钢桥面夏季高温季节典型温度( $60^\circ\text{C}$ )时,二阶热固性环氧沥青中的沥青组分自身黏度下降,导致拉拔强度降低至 $1.000 \text{ MPa}$ 以下,剪切强度降低至 $1.800 \text{ MPa}$ 以下;当服役温度达到夏季极端气温( $70^\circ\text{C}$ )时,拉拔强度降低至 $0.721 \text{ MPa}$ ,剪切强度降低至 $1.192 \text{ MPa}$ 。

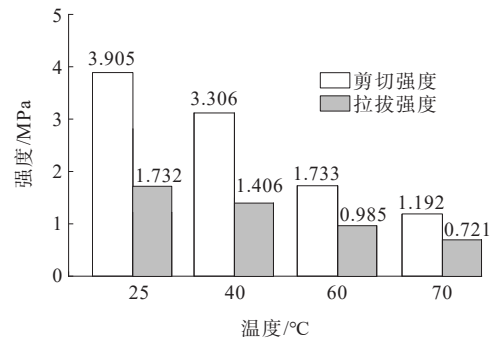


图9 不同服役温度对组合结构试件层间黏结性能的影响规律

Figure 9 Effect of different service temperatures on interlaminar adhesive performance of composite structure specimens

### 3 动态加载条件下的层间黏结性能

图10为不同二阶热固性环氧沥青洒布量( $0.8 \text{ kg/m}^2$ 、 $1.0 \text{ kg/m}^2$ 、 $1.2 \text{ kg/m}^2$ 、 $1.4 \text{ kg/m}^2$ )下的组合结构试件剪切疲劳试验结果。应用最小二乘法对取对数后的应力水平 $\sigma$ 与破坏时的循环加载次数 $N_f$ 进行拟合与回归,得到反映材料耐剪切疲劳能力的疲劳方程:

$$\ln N_f = -n \ln \sigma + k \quad (1)$$

式中: $N_f$ 为材料断裂破坏时的加载次数; $\sigma$ 为加载应力水平; $n$ 、 $k$ 分别为线性回归方程在坐标轴上的斜率与截距,2个参数共同反映了材料的耐剪切疲劳性能。 $n$ 值表示材料疲劳性能对应力水平变化的敏感度, $n$ 值越大,材料疲劳性能随应力水平改变变化越大; $k$ 值表示同一应力水平下材料的疲劳性能, $k$ 值越大,材料疲劳性能越好<sup>[14-15]</sup>。

不同洒布量的组合结构疲劳方程及参数见表5。

由图10、表5可知:不同的二阶热固性环氧沥青

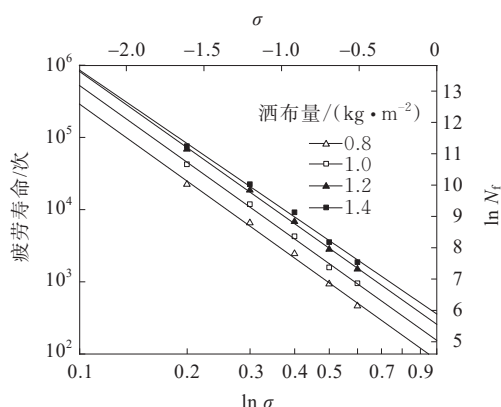


图10 不同二阶热固性环氧沥青洒布量组合结构试件的疲劳曲线

Figure 10 Fatigue curves of composite structure specimens with different spraying amounts of second-order thermosetting epoxy asphalt

表5 不同洒布量的组合结构疲劳方程及参数

Table 5 Fatigue equation and parameters of composite structure with different spraying amounts

洒布量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	疲劳方程 $\sigma$	$n$	$k$	$R^2$
0.8	$\ln N_f = -3.55 \ln \sigma + 4.42$	3.55	4.42	0.992 86
1.0	$\ln N_f = -3.53 \ln \sigma + 5.04$	3.53	5.04	0.995 07
1.2	$\ln N_f = -3.50 \ln \sigma + 5.57$	3.50	5.57	0.998 05
1.4	$\ln N_f = -3.38 \ln \sigma + 5.88$	3.38	5.89	0.993 55

洒布量对组合结构试件的耐剪切疲劳性能有明显影响。随着二阶热固性环氧沥青洒布量的增加,参数 $k$ 值呈现增大趋势, $n$ 值有减小趋势,说明铺装层组合结构对应力水平变换的敏感度下降,这有利于铺装层承载车辆动荷载时的耐疲劳性能提升。在二阶热固性环氧沥青洒布量为 $0.8 \sim 1.4 \text{ kg/m}^2$ 范围内,试件的耐剪切疲劳性能随洒布量的增加而增强,在洒布量 $1.4 \text{ kg/m}^2$ 时达到最佳,破坏时加载次数达到7.6万次,但相较于洒布量为 $1.2 \text{ kg/m}^2$ 时,其增加幅度不大,结构的性能强化效果不明显。综合铺装层其他方面性能及材料用量的经济成本考虑,二阶热固性环氧沥青铺装洒布量不建议高于 $1.2 \text{ kg/m}^2$ 。

#### 4 工程应用

伍家岗长江大桥位于宜昌长江公路大桥上游约6.3 km处,起点位于江城大道,跨长江、越伍临路,终点与花溪路对接,在起点及跨伍临路处分别设置艾

家互通、伍临路互通,大桥主桥,桥面宽31.5 m,采用双向六车道标准建设。基于本文试验结果:采用二阶热固性环氧沥青黏结层洒布量 $1.2 \text{ kg/m}^2$ ,黏结层洒布后44~52 h完成高黏高弹SMA施工,施工完成后封闭养护7 d,实现了二阶热固性环氧沥青黏结层在伍家岗长江大桥主桥桥面铺装工程中的应用(图11)。桥面现场铺装层拉拔试验结果表明:高黏高弹SMA铺装层与下层的拉拔强度达到 $1.68 \text{ MPa}$ (现场温度 $32 \text{ }^\circ\text{C}$ ),通车服役至今未出现铺装层间破坏。



图11 二阶热固性环氧沥青黏结层在宜昌伍家岗长江大桥上应用

Figure 11 Application of adhesive layer of second-order thermosetting epoxy asphalt on Wujiagang Yangtze River bridge in Yichang

#### 5 结论

(1) 二阶热固性环氧沥青随着洒布量的增加,黏结与抗剪强度提高,耐剪切疲劳性能增强;二阶热固性环氧沥青的一阶段固化时间、养护时间对拉拔强度、抗剪强度均有影响,在施工环境温度 $25 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,二阶热固性环氧沥青黏结层与高黏高弹SMA的施工间隔建议44~52 h,施工完成后封闭养护时间宜 $\geq 7 \text{ d}$ 。

(2) 在最优的施工参数条件下,二阶热固性环氧沥青黏层可实现RA与SMA组合铺装结构的 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 抗剪强度 $\geq 3.8 \text{ MPa}$ ,拉拔强度 $\geq 1.7 \text{ MPa}$ , $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 抗剪强度 $\geq 1.7 \text{ MPa}$ ,拉拔强度 $\geq 0.9 \text{ MPa}$ 。

(3) 组合结构试件的耐剪切疲劳性能总体趋势随洒布量的增加而增强,在二阶热固性环氧沥青洒布量 $1.2 \text{ kg/m}^2$ 时,破坏加载次数达到7.3万次。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 王虎,韩飞.大跨径连续刚构桥桥面铺装层技术研究现状综述[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1):



- 16-21.
- WANG Hu, HAN Fei. Literature review of research status of deck pavement technology of long-span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(1): 16-21.
- [2] 杨健, 高艳滨, 郭书峰. 钢桥面沥青铺装层破坏原理分析及对策研究[J]. 公路, 2022, 67(8): 73-76.
- YANG Jian, GAO Yanbin, GUO Shufeng. Failure principle analysis and countermeasures of asphalt pavement on steel bridge deck[J]. Highway, 2022, 67(8): 73-76.
- [3] 何清, 姜炜, 李知强, 等. ERS 钢桥面铺装技术在宜昌长江公路大桥中的应用[J]. 交通科技, 2012(3): 99-101.
- HE Qing, JIANG Wei, LI Zhiqiang, et al. Application of ERS steel deck pavement technology in Yichang Yangtze River highway bridge[J]. Transportation Science & Technology, 2012(3): 99-101.
- [4] 潘磊. 高性能环氧沥青的制备与性能表征[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- PAN Lei. Preparation and characterization of high-performance epoxy asphalt[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
- [5] 朱文白, 曹健, 李金桥. 复合浇注式沥青钢桥面铺装长期性能观测与路用性能演变规律研究[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 124-129.
- ZHU Wenbai, CAO Jian, LI Jinqiao. Study on long-term performance observation and performance evaluation of composite gussasphalt steel deck pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6): 124-129.
- [6] 王民, 樊向阳, 王滔, 等. 无损状态下钢桥面沥青铺装材料变形恢复特性[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊 1): 269-273.
- WANG Min, FAN Xiangyang, WANG Tao, et al. Deformation recovery characteristics of asphalt pavement materials for steel bridge deck under nondestructive condition[J]. Materials Reports, 2021, 35(sup 1): 269-273.
- [7] 陈明友. RA 与 SMA 层间二阶环氧沥青粘结层的试验研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(12): 141-142.
- CHEN Mingyou. Experimental study on second-order epoxy asphalt adhesive layer between RA and SMA[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology), 2019, 15(12): 141-142.
- [8] 向磊, 王欢. 基于摩擦力修正的钢桥面刚性铺装环氧树脂黏结层抗剪性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 187-191.
- XIANG Lei, WANG Huan. Study on shear performance of epoxy resin adhesive layer for rigid pavement of steel bridge deck based on correctional friction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 187-191.
- [9] ASTM. Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method): ASTM C1583/C1583M-13[S]. Philadelphia: ASTM, 2013.
- [10] ASTM. Standard test method for pull-off adhesion strength of coatings on concrete using portable pull-off adhesion testers: ASTM D7234[S]. Philadelphia: ASTM, 2019.
- [11] 招商局重庆交通科研设计院有限公司. 公路钢桥面铺装设计与施工技术规范: JTG/T 3364-02—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd.. Specifications for design and construction of pavement on highway steel deck bridge: JTG/T 3364-02—2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [12] 李嘉, 董亮, 夏杨嘉玲, 等. UHPC-沥青磨耗层环氧界面剂粘结性能研究[J]. 公路工程, 2020, 45(5): 51-55.
- LI Jia, DONG Liang, XIA Yangjialing, et al. Study on binding properties of epoxy interface agent for UHPC-asphalt abrasive layer[J]. Highway Engineering, 2020, 45(5): 51-55.
- [13] 李洋, 虞浩, 司晶晶. 固化剂掺量对二阶树脂粘结剂性能的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(6): 1067-1071.
- LI Yang, YU Hao, SI Jingjing. Study on the influence of curing agent on the properties of two-stage process resin adhesive binder[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(6): 1067-1071.
- [14] 丁兆东, 李杰. 混凝土疲劳分析方法综述[J]. 力学与实践, 2015, 37(1): 40-48.
- DING Zhaodong, LI Jie. Review of the analysis methods of fatigue of concrete[J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(1): 40-48.
- [15] 沈钱超, 吴帮伟, 沈燕, 等. 应力控制模式下沥青混合料疲劳损伤力学性能研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2020, 37(1): 38-44.
- SHEN Qianchao, WU Bangwei, SHEN Yan, et al. Research on mechanical properties of asphalt mixture fatigue damage under stress control mode[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2020, 37(1): 38-44.