

# 大跨径钢-混凝土组合结构桥梁桥面铺装材料的研究与应用

赵明宇<sup>1,3</sup>, 李志强<sup>1</sup>, 谯理格<sup>2</sup>, 王 晴<sup>1</sup>, 丁庆军<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中建商品混凝土有限公司, 湖北 武汉 430074;  
3. 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** 目的 针对大跨径钢-混凝土组合结构桥梁服役过程中对铺装层材料的性能需求, 提出高黏高弹薄层铺装结构与材料, 为该类桥梁桥面铺装工程提供参考。  
**方法** 开发粘韧性优异的高黏高弹改性沥青材料, 提出 1 cm 高黏高弹防水粘结应力吸收层 + 5 cm 高黏高弹 SMA 沥青混凝土的薄层大跨径桥面组合铺装方案, 研究铺装层的服役性能规律。  
**结果** 高黏高弹防水粘结应力吸收层可阻止钢-混凝土组合结构桥梁中混凝土板的裂缝反射, 具有优良的防水与粘结性能; 高黏高弹 SMA 磨耗层具有优异的水稳定性能、高温稳定性能、低温抗裂性能与抗滑性能。  
**结论** 笔者提出的组合铺装结构与材料在武汉鹦鹉洲长江大桥中成功应用, 可有效防止铺装层服役过程中出现推移、拥包、开裂等桥面病害。

**关键词** 钢-混凝土组合梁; 铺装层结构; 铺装材料; 路用性能; 工程应用

中图分类号 TU398.1 文献标志码 A

## Research and Application of Deck Pavement Materials in Long-span Steel-concrete Composite Bridges

ZHAO Mingyu<sup>1</sup>, LI Zhiqiang<sup>1</sup>, QIAO Lige<sup>2</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, DING Qingjun<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering of Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;  
2. China Construction Ready Mixed Concrete Co. Ltd., Wuhan, China, 430074; 3. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures of Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 430070)

**Abstract:** Based on the reinforced concrete structure bridge for the requirement of pavement material and structure in the process of service, this paper has developed high-viscous and high-

收稿日期: 2022-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908378, U21A20149); 硅酸盐建筑材料国家重点实验室开放基金(SYSJJ2020-07); 高性能土木工程材料国家重点实验室开放基金项目(2019CEM010); 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2021-BS-170); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC220313)

作者简介: 赵明宇(1987—), 男, 博士, 主要从事土木工程材料方面研究。

elastic asphalt key materials with the excellent performance of viscosity and toughness, has designed the scheme of pavement of high-viscous and high-elastic stress-absorbing waterproof interlayer and high-viscous and high-elastic SMA asphalt concrete layer, and comprehensive studies for performance were carried out. The results show that the crack reflection of concrete slab of the reinforced concrete structure bridge can effectively be prevented by the stress-absorbing waterproof interlayer and it has outstanding waterproof and bonding performance. High-viscous and high-elastic SMA asphalt concrete layer has excellent water stability, high temperature stability, low temperature anti-cracking and skid-resistance and noise-reducing performance. The scheme of pavement has applied in Wuhan Parrot Island Bridge and the effect is outstanding.

**Key words:** steel-concrete composite beam; pavement structure; pavement materials; road performance; engineering application

随着我国公路交通网络不断规划,大跨度桥梁,特别是大型跨江海桥梁的建设得到了迅速发展。其中,钢结构桥梁由于其施工速度快、自重轻等优点得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。然而,钢桥面板由于铺装材料的粘结性能及协同变形性能不足等问题,易在服役早期阶段即出现铺装层滑移等破坏<sup>[2-4]</sup>。而钢架-混凝土板组合桥面结构则可以避免钢桥面铺装这个技术难题,提高桥面铺装层服役寿命<sup>[5]</sup>。

混凝土桥面板铺装基面在进行抛丸打毛等粗糙化处理后,与钢桥面相比其粗糙度改善明显,目前主要采用双层沥青铺装结构进行铺装,如双层 SMA(沥青玛蹄脂碎石混合料)方案、GA(浇筑式沥青混凝土)下面层 + SMA 上面层方案、AC(密级配沥青混合料)下面层 + 4 cm SMA 上面层方案等,基本能够满足普通混凝土桥面铺装的服役要求,避免推移、拥包等桥面铺装常见病害。然而对于跨径大、柔性高、厚度薄、交通量大的特殊工程,则存在裂缝反射、防水脱粘、车辙变形等方面的服役隐患,目前尚缺乏成熟的研究与应用依据<sup>[6-7]</sup>。基于此,笔者通过分析大跨径悬索桥钢-混凝土组合桥面结构特点及铺装层性能要求,提出新型钢-混凝土组合结构桥面铺装方案,并开发可提升铺装效果的高黏高弹沥青铺装层材料,实现铺装方案的工程应用。

1 原材料与实验方法

1.1 沥青与改性剂

笔者采用北京路翔科技有限公司生产的 70#基质沥青进行改性,性能指标见表 1。

表 1 基质沥青性能指标

Table 1 Performance index of matrix asphalt		
25 ℃针入度/0.1 mm	软化点/℃	25 ℃延度/cm
69	47.5	>100

使用的改性剂为湖南合得力橡胶科技有限公司生产的 178 μm 废胎橡胶粉、中国石化巴陵分公司生产的 YH-791 线形 SBS、江西三连 T-100 萘烯树脂(增黏组分)、济南永宸化工的邻苯二甲酸二丁酯(增塑组分)、济南合顺化工的二甲苯(增容组分)。

1.2 集料

笔者所研究的组合铺装层结构中使用的集料为粒径 5 ~ 10 mm、10 ~ 15 mm、15 ~ 20 mm 的粗集料与粒径 0 ~ 5 mm 的细集料。其中,粗集料采用湖北京山玄武岩石料,表观相对密度 2.99,吸水率 0.56%,针片状含量 12.2%,压碎值 12.5%,粘附性等级 5 级;细集料采用湖北宜昌石灰石集料,表观相对密度 2.67,砂当量 75%,含泥量 2.4%。

1.3 其他材料

制备桥面铺装沥青混合料的填料采用石灰石磨细矿粉,表观密度 2.68 kg/m<sup>3</sup>,小于 0.075 mm 颗粒掺量 92.4%;纤维采用武汉博

盾工程科技有限公司生产的聚酯纤维,长度规格 7.0 mm,断裂伸长率 22.5%,掺量 0.25%。

1.4 实验方法

笔者使用的沥青改性设备为 FLUKO 公司的 FM300 型实验室高剪切分散乳化机,转速为 300 ~ 11 000 r/min;沥青与沥青混合料的制备与基本性能测试均按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052—2011)中的相应规定操作。

粘接性能与铺装层阻止裂缝反射性能测试采用 MTS 公司生产的 MTS505.90 型电液伺服疲劳测试系统,阻止裂缝反射性能测试控制应力水平 0.3,加载频率 10 Hz;防水性能采用 DTS 型电动油毡不透水仪测试。

2 大跨径钢-混凝土组合结构桥梁桥面铺装特点分析与铺装方案设计

2.1 铺装层特点分析

武汉鹦鹉洲长江大桥为钢-混组合梁桥面结构,大桥桥面宽 38 m,主跨径 2 150 m (225 m + 2 × 850 m + 225 m),混凝土桥面板结构尺寸如图 1 所示。钢架间架设预制混凝土桥面板,在桥面板缝隙处二次浇筑 C50 钢纤维混凝土,形成整体桥面板。

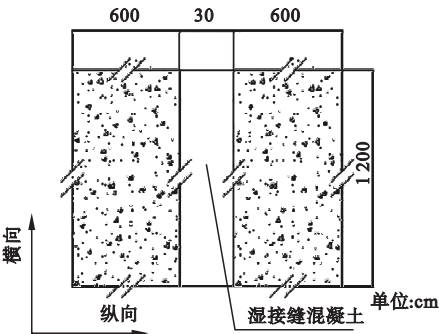


图1 鹦鹉洲长江大桥桥面板结构

Fig. 1 The deck structure of the Wuhan Parrot Island Bridge

由于大跨径悬索桥的桥面受力特点与普通钢-混组合梁不同,以及鹦鹉洲长江大桥桥梁二期荷载要求较低的要求,笔者认为其桥

面铺装层材料与结构存在以下技术特点:

(1)铺装层反射裂缝问题。鹦鹉洲长江大桥属于悬索桥,整体结构柔性较大,且混凝土桥面板的接缝较多,在行车载荷作用下对铺装层将产生反射应力<sup>[8-10]</sup>,同时由于鹦鹉洲长江大桥铺装层厚度较薄,易导致反射裂缝贯穿铺装层,影响桥面板整体耐久性。

(2)铺装层与混凝土桥面板粘结抗剪问题。由于鹦鹉洲长江大桥二期荷载要求,严格限制了铺装层厚度需小于 65 mm,因此对铺装层与混凝土板间的抗剪能力提出了更高的要求,处理不当易导致铺装层与混凝土板脱离,产生病害。

(3)钢-混凝土组合梁铺装层防水问题。沥青混凝土渗水,易导致水分渗入混凝土面板内部及钢桁架结构处,引起锈蚀<sup>[11]</sup>,尤其是冬季除冰盐随融化的雨雪下渗,侵蚀钢结构<sup>[12]</sup>,造成桥梁结构使用寿命降低。

(4)武汉地区气候问题。武汉夏季高温,因此要求铺装层有较好的高温稳定性,避免出现车辙等病害。

2.2 铺装方案设计

依据武汉鹦鹉洲长江大桥桥面板结构特点及铺装难点,笔者提出混凝土桥面板 + 渗透结晶型防水材料 + 高黏高弹防水粘结应力吸收层 (10 mm) + 高黏高弹改性 SMA-16 (50 mm) 的铺装方案,铺装层结构如图 2 所示。

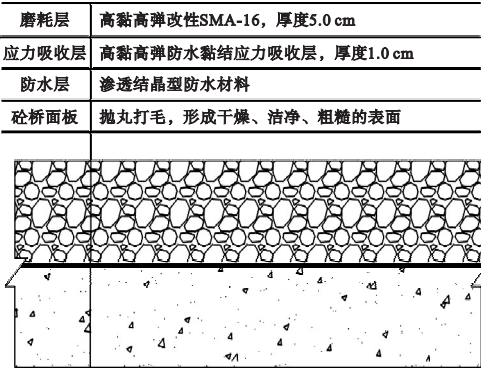


图2 鹦鹉洲长江大桥桥面铺装层结构

Fig. 2 The deck pavement structure of the Wuhan Parrot Island Bridge

该方案有以下特点:

(1)基于铺装层厚度要求较薄,而导致的防水性能的要求更高的问题,方案首先考虑利用渗透结晶型防水材料(DPS),在不增加铺装层厚度的前提下,提高混凝土自身的防水性能。

(2)高黏高弹防水粘结应力吸收层凭借其自身优异的黏弹性,可以提高混凝土与沥青铺装层之间的界面粘结强度和抗剪强度,并吸收反射应力,阻止下层裂缝反射;同时可阻止水分渗透,进一步提高桥面防水性能。

(3)高黏高弹改性沥青与普通改性沥青相比具有更加优异的黏聚能力,在单层铺装的情况下,能够提高铺装层内部抗剪能力与层间粘接能力,降低武汉夏季高温条件下铺装层出现车辙、推移、拥包的风险。

3 高黏高弹改性沥青性能研究

3.1 高黏高弹改性沥青的制备

为提升沥青材料的黏弹性能,研究采用橡胶粉-SBS 复合改性的方法制备高黏高弹改性沥青,剪切温度 160 ~ 190 ℃,剪切时间 40 min,溶胀温度 130 ℃,溶胀时间 120 min,制备工艺流程如图 3 所示。制备的样品分为两组:在橡胶粉掺量 12% 的条件下,调整 SBS 掺量(2%、4%、6%、8%);在 SBS 掺量 6% 的条件下,调整橡胶粉掺量(6%、9%、12%、15%)。

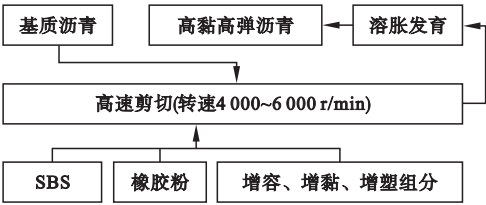


图 3 高黏高弹改性沥青制备工艺流程

Fig. 3 Preparation process of high viscosity and high elastic modified asphalt

3.2 高黏高弹改性沥青黏弹性能规律

3.2.1 基本性能

不同改性剂下的高黏高弹改性沥青基本性能指标如图 4、图 5 所示。从图 4 可以看出,在橡胶粉掺量 12% 的情况下,改性沥青的软化点、5 ℃延度、60 ℃黏度随 SBS 掺量的增加而提高,针入度随 SBS 掺量增加而降低,在 SBS 掺量达到 8% 时,软化点达到 92.5 ℃、60 ℃黏度 87 632 Pa·s,说明 SBS 在改性体系中提升了沥青的温度稳定性。从图 5 可以看出,与 SBS 相比,橡胶粉在复合改性体系中对性能影响程度相对较小,在 SBS 掺量 6% 的情况下,增大橡胶粉掺量,软化点、60 ℃黏度提高,针入度降低,且 5 ℃延度也出现一定程度下降。分析原因在于橡胶粉在沥青中的改性作用机制与 SBS 不同<sup>[13-14]</sup>,SBS 通过在沥青中形成改性网络骨架实现性能的改善,而橡胶粉主要依靠其表面溶胀效应与沥青胶体结构中的轻质组分结合而影响沥青性能,并未形成改性网络。

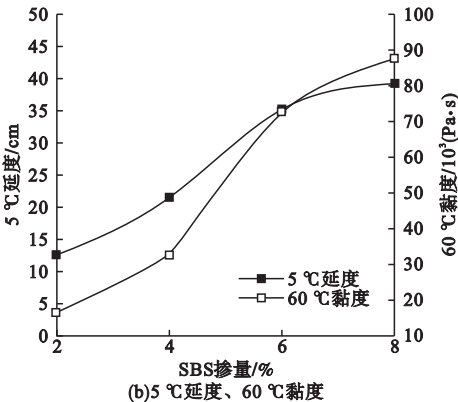
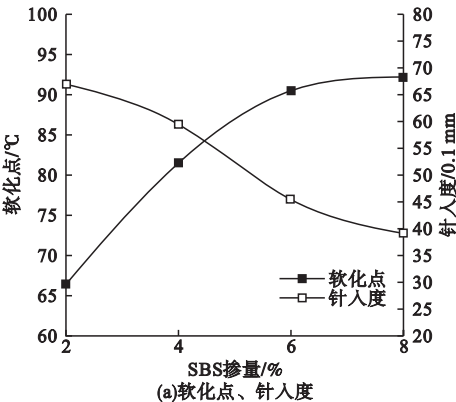


图 4 不同 SBS 掺量对高黏高弹改性沥青基本性能指标的影响

Fig. 4 The basic performance of modified asphalt with different content of SBS

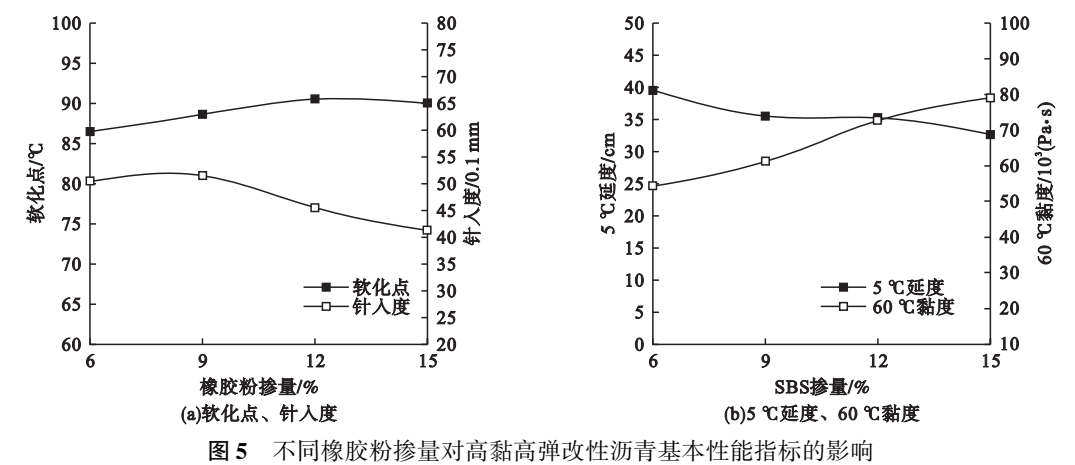


Fig. 5 The basic performance of modified asphalt with different content of rubber powder

3.2.2 弹性恢复性能

复合改性沥青的黏弹性能较好,在 25 °C 下的弹性恢复率均能达到 95% 以上,性能区

度不明显(见图 6),因此笔者通过 5 °C 下的弹性恢复实验表征不同组成下高黏高弹沥青的弹性恢复行为。

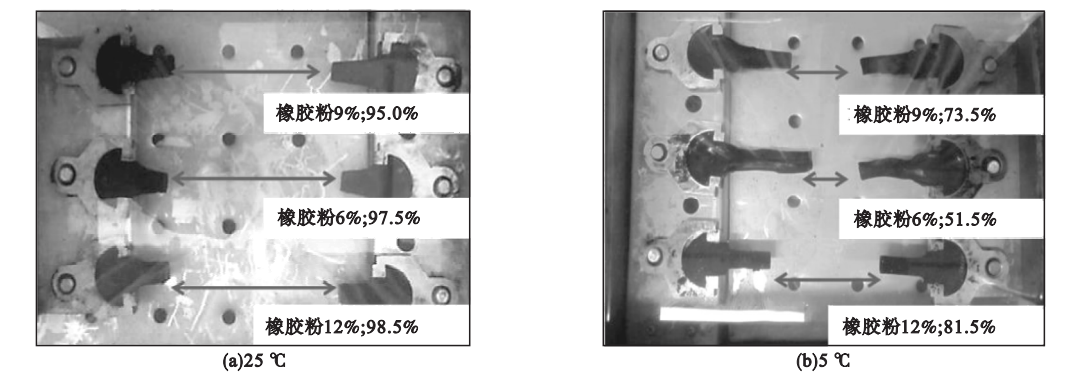


图 6 不同温度下的弹性恢复性能对比

Fig. 6 Comparison of elastic recovery performance

不同材料掺量下高黏高弹改性沥青 5 °C

弹性恢复行为规律如图 7 所示。

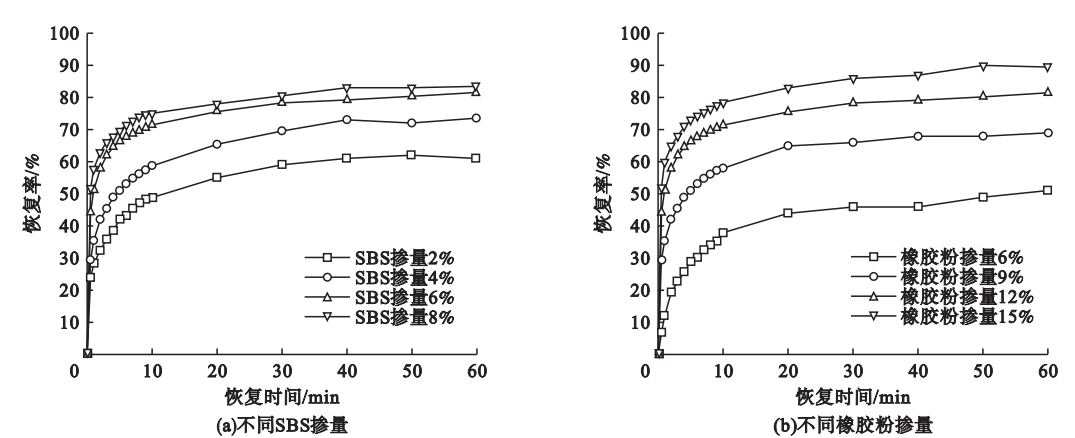


图 7 不同 SBS/橡胶粉掺量下高黏高弹改性沥青 5 °C 弹性恢复行为规律

Fig. 7 Elastic recovery performance of modified asphalt with different content of rubber powder and SBS



从图 7 中可以看出,随着 SBS 或橡胶粉掺量的增加,高黏高弹改性沥青的弹性恢复性能提升,其中在 SBS 掺量 6% 的条件下,橡胶粉掺量对弹性恢复性能影响更为显著,在橡胶粉掺量 6% 时,弹性恢复为 51.5%;在橡胶粉掺量 15% 时,弹性恢复为 89.5%。说明沥青中的 SBS 改性分子网络连续相,在 5℃ 的较低温度下,沥青由高弹态向玻璃态转变,使恢复时的 SBS 链段运动受到限制,因此不易恢复到拉伸前的状态;而橡胶粉通过充分溶胀形成了分散于沥青中的弹性单元,虽然在一定程度上降低了沥青的延度,然而随着沥青变形的橡胶颗粒却在沥青体系中产生了较大的回弹劲度,从而与 SBS 分子网络相互促进,协同提高了沥青的弹性恢复能力。在笔者研究的工程条件下,可提升铺装层的应力吸收效果与分散反射应力的能力。

3.2.3 韧性与黏韧性

不同 SBS/橡胶粉掺量下高黏高弹改性沥青的黏韧性实验结果如图 8 所示。由图可知,高黏高弹改性沥青在承受拉应力时均表现出典型的改性沥青黏韧性特征,在经历过应力峰值后出现屈服现,在 12% 橡胶粉掺量下,沥青的黏韧性受 SBS 掺量影响显著,随着 SBS 掺量的增加,高黏高弹沥青中的 SBS 分子网络更加完整,在受到拉伸的过程中屈服应力增大,表现为黏韧性曲线后段上扬;在 6% SBS 掺量下,沥青的黏韧性同样随着橡胶粉掺量的增加而提升,其中在橡胶粉掺量较低时 (<10%),对黏韧性的影响程度不大,此时的橡胶颗粒在沥青中的分散程度较高,对改性体系整体的影响程度有限,而当橡胶粉掺量达到 15% 时,橡胶颗粒的变形产生了较大的回弹屈服应力,在黏韧性曲线上表现为拉伸变形的后期带来了屈服应力的较大提升。

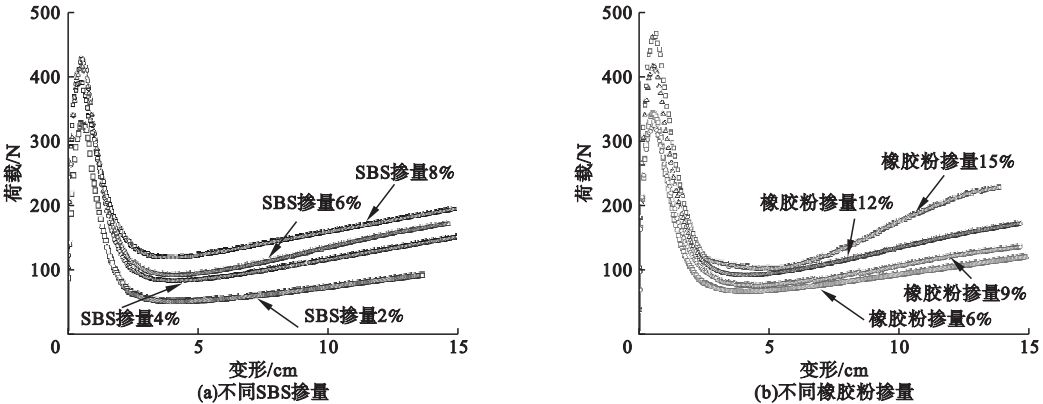


图 8 不同 SBS/橡胶粉掺量下高黏高弹改性沥青的粘韧性曲线

Fig. 8 The viscosity and toughness curve of modified asphalt with different content of rubber powder and SBS

基于大跨径钢-混凝土组合结构桥梁的铺装层结构特点,要求防水粘结应力吸收层高黏高弹沥青具备更突出的回弹性能,用于吸收桥面板湿接缝位置产生的反射应力,并抵御水分渗透压力,因此选取掺量 6% SBS、15% 橡胶粉为防水粘结应力吸收层用高黏高弹沥青组成。而 SMA 面层由于采用单层铺装,行车荷载在混合料内部与铺装层界面的剪应力更大,因此要求高黏高弹沥青具备优异的黏聚力。同时考虑到橡胶粉掺量过高会

导致沥青高温黏度增大,增加 SMA 的压实难度,因此选取掺量 8% SBS、12% 橡胶粉为 SMA 用高黏高弹沥青组成。

4 桥面铺装层性能研究

4.1 防水粘结应力吸收层性能研究

4.1.1 防水性能

笔者研究了沥青洒布量在 0.7~2.2 kg/m<sup>2</sup> 时的防水粘结应力吸收层防水性能变化规律,结果见图 9。由图可知,高黏高弹改性沥青在

成膜后表现出较好的黏弹性特性,在0.3 MPa水压下,均能满足30 min以上的不透水时间,且随着洒布量的提高、沥青膜增厚,对水分的抵抗能力逐渐增强;在水压达到0.5 MPa的情况下,沥青膜的防水性能表现出不同程度的降低,其下降幅度则随着沥青膜增厚而降低,在洒布量大等于1.3 kg/m<sup>2</sup>后,沥青膜仍能保证60 min以上的不透水时间。

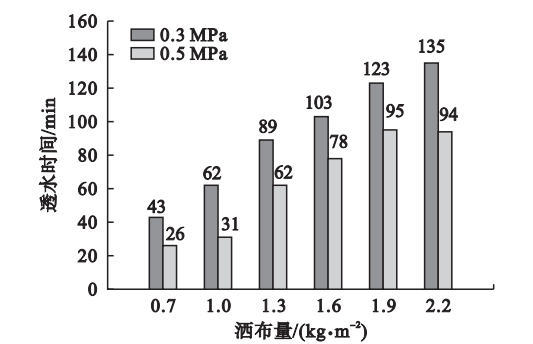


图9 高黏高弹防水粘结应力吸收层的防水性能  
Fig. 9 The waterproofness of high viscosity and high elastic waterproof adhesive layer

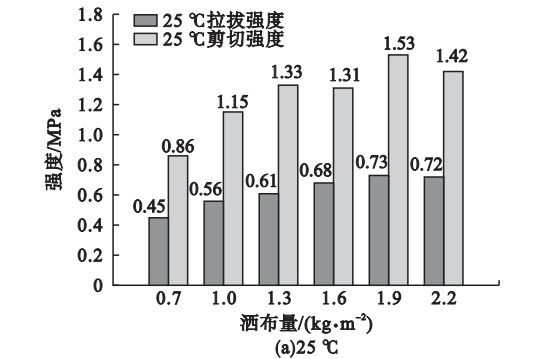
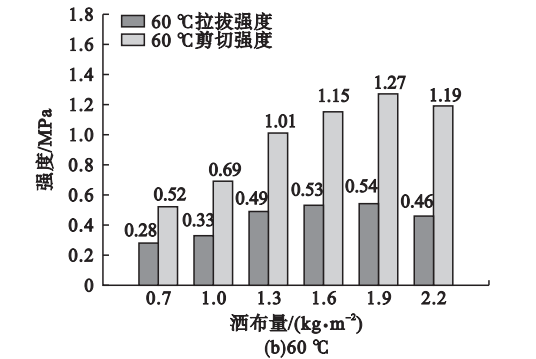


图10 高黏高弹防水粘结应力吸收层粘结性能  
Fig. 10 The adhesive performance of high viscosity and high elastic waterproof adhesive layer

4.1.2 粘接性能

不同沥青洒布量的铺装层组合试件的剪切强度与拉拔强度变化规律见图10。由图可知,25 °C下铺装层间拉拔强度与抗剪强度分别高于0.4 MPa与0.8 MPa,并且随着洒布量的增大层间粘结强度升高;而在洒布量大等于1.9 kg/m<sup>2</sup>后,拉拔强度与抗剪强度出现不同程度降低,说明过厚的沥青膜内会出现滑移,降低层间粘结强度;随着温度的升高,在60 °C的实验环境下层间粘结性能降低,而当洒布量大等于1.3 kg/m<sup>2</sup>时,组合结构的层间拉拔强度与抗剪强度仍能保证高于0.4 MPa与0.8 MPa。在夏季高温条件下,铺装层间温度会达到60 °C,因此实验结果表明,在洒布量大等于1.3 kg/m<sup>2</sup>时,高黏高弹改性沥青能够满足夏季高温下的层间粘结要求,降低铺装层出现推移、拥包等病害的风险。



4.1.3 阻止裂缝反射性能

笔者对铺装层组合试件进行动态疲劳加载,在混凝土板微裂纹出现后开始计次,将

SMA-16 底面裂纹出现作为初裂的判断依据,将裂纹扩展至 SMA-16 顶面作为终裂的判断依据(见图11)。

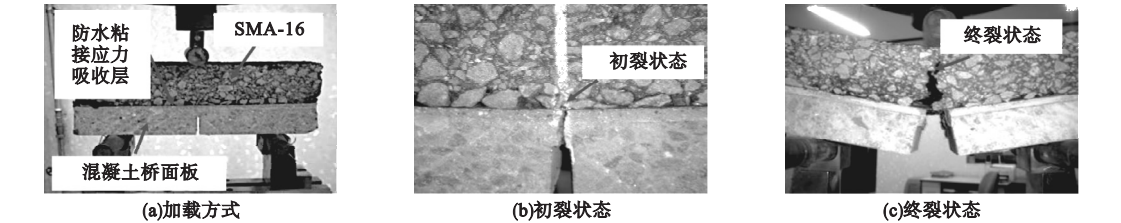


图11 铺装层组合试件加载方式与破坏状态  
Fig. 11 Loading method and failure state of crack reflection blocking test

不同沥青洒布量的高黏高弹防水粘结应力吸收层阻止裂缝反射性能变化规律见图 12。

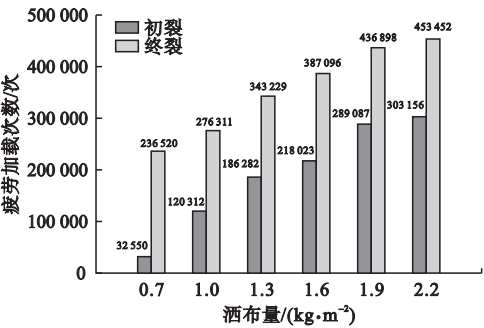


图 12 高黏高弹防水粘结应力吸收层阻止裂缝反射性能

Fig. 12 The crack reflection blocking performance of high viscosity and high elastic waterproof adhesive layer

由图 12 可知,阻止裂缝反射能力随着洒布量的增加而提高,由 0.7 kg/m<sup>2</sup> 提高至 1.9 kg/m<sup>2</sup> 时,初裂疲劳次数提高了约 9 倍,而达到 1.9 kg/m<sup>2</sup> 后,疲劳次数的提高程度放缓,说明沥青膜厚度较薄时难以实现裂纹处的应力吸收,而是传递至 SMA 下表面,而在形成较厚的防水粘接应力吸收层后,裂缝处的应力被黏弹性的过渡层吸收分散,在 SMA 下表面难以形成集中应力<sup>[15-16]</sup>,从而推迟了

SMA 开裂破坏的出现时机,降低了在桥梁行车荷载条件下,混凝土桥面板间裂缝反射并贯穿铺装层的问题。

综合以上实验结果分析,在洒布量较低时,防水、粘结与应力吸收的效果有限,而洒布量提高后可提升过渡层的综合性能。同时考虑到洒布量高于 2.0 kg/m<sup>2</sup> 后,在 SMA 施工时的高温、高频低幅震动碾压作用下会使过多的应力吸收层中高黏高弹沥青进入 SMA 结构内部,导致泛油现象出现,因此笔者确定 1.3 ~ 1.9 kg/m<sup>2</sup> 为高黏高弹防水粘接应力吸收层的洒布量。

4.2 高黏高弹 SMA 性能研究

普通改性 SMA-16 与高黏高弹 SMA-16 的性能对比结果见表 2。高黏高弹改性沥青依靠自身黏弹性可在 SMA 的骨架密实型结构中更好地与集料包裹黏附,从而提升材料的内聚力。由表 2 可知,采用高黏高弹改性沥青制备的 SMA 材料的水稳定性能、高温稳定性能、低温抗裂性能与普通改性 SMA 相比均得到不同程度提高,其中在 70 ℃ 的高温车辙试验中,高黏高弹 SMA 的动稳定度仍保持在 6 000 次/mm 以上,表现出了较好的高温稳定性能。

表 2 普通 SMA 与高黏高弹 SMA 性能对比

Table 2 The performance comparison between common and high viscoelastic SMA

材料	浸水残留 稳定度/%	冻融劈裂 强度比/%	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )		肯塔堡飞散 损失/%	-10 ℃最大 弯拉应变/10 <sup>-6</sup>
			60 ℃	70 ℃		
普通改性 SMA-16	92.2	89.4	7 186	3 915	8.6	2 987
高黏高弹 SMA-16	96.0	94.5	8 147	6 959	2.7	3 650

4.3 工程应用

基于实验结果,高黏高弹铺装材料与方案在武汉鹦鹉洲长江大桥桥面铺装工程中得到了应用。施工过程如下:①混凝土桥面板预处理,采用抛丸打毛设备对混凝土表面粗糙化处理;保证水泥混凝土路面清洁和干燥,确保表面没有浮灰;②DPS 喷洒,采用机器喷撒方式,用量为 0.25 ~ 0.3 kg/m<sup>2</sup>;③高黏高弹防水粘结应力吸收粘结层施工,采用沥青碎石同步封层车施工,沥青洒布量为 1.7 ~

1.9 kg/m<sup>2</sup>,同步撒布粒径 9.5 ~ 13.2 mm 的碎石,覆盖率 70% ~ 85%,对碎石空缺处以及洒铺过量处及时进行补洒与清扫,同步洒布车后用轮胎压路机碾压 2 ~ 3 遍;④高黏高弹 SMA 摊铺,混合料出厂温度控制在 180 ~ 190 ℃,摊铺温度高于 165 ℃,两台摊铺机同步作业,熨平板、夯锤双振动方式,摊铺机速度控制在 2.0 ~ 3.0 m/min,保证摊铺过程匀速连续;⑤高黏高弹 SMA 压实,全部采用 5 台 13t 钢轮震荡式压路机紧跟慢压。



武汉鹦鹉洲长江大桥作为武汉二环线的过江通道,交通量大、环境湿热,铺装材料与方案使用至今,桥面铺装层未出现反射裂缝、推移拥包等桥面病害。

## 5 结 论

(1)高黏高弹沥青由于其优异的黏弹性能和温度稳定性能,提升了防水粘结应力吸收层的层间粘结、防水和阻止裂缝反射的能力,并提高了 SMA 面层的抗水损害、抗车辙、抗开裂的能力。

(2)笔者提出的钢-混凝土组合梁的铺装结构具有层间粘结能力强,高温稳定性能、防水性能好的技术优势,可实现大跨径钢-混凝土组合梁桥面的薄层铺装,解决铺装层中存在的推移、拥包、车辙、开裂及防水性能差等问题,具有推广应用前景。

## 参考文献

- [1] 张健康,胡光伟,俞先江,等.大跨径钢桥面铺装体系关键技术研究进展[J].交通运输工程与信息学报,2008,6(6):12-42.  
(ZHANG Jiankang, HU Guangwei, YU Xianjiang, et al. Research advance of the key-technology of long-span steel bridge pavement system [J]. Journal of transportation engineering and information, 2008, 6(6): 12-42.)
- [2] WANG L, HOU Y, ZHANG L, et al. A combined static-and-dynamics mechanics analysis on the bridge deck pavement [J]. Journal of cleaner production, 2017, 166: 209-220.
- [3] 姚永永. 钢箱梁桥面铺装层材料与结构优化设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
(YAO Yongyong. Optimization design research on deck surfacing materials & structure for steel-box girder bridge [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.)
- [4] 刘松, 刘自楷, 邹云华. 一种新型钢桥面铺装粘结剂的研制[J]. 交通科技, 2005(10): 129-130.  
(LIU Song, LIU Zikai, ZOU Yunhua. Development of a new adhesive for steel bridge deck pavement [J]. Transportation science & technology, 2005(10): 129-130.)
- [5] MA H, ZHANG Z, DING B, et al. Investigation on the adhesive characteristics of engineered cementitious composites (ECC) to steel bridge deck [J]. Construction and building materials, 2018, 191: 679-691.
- [6] 丁庆军, 王发洲, 黄绍龙. 桥面铺装层材料设计[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(4): 56-58.  
(DING Qingjun, WANG Fazhou, HUANG

Shaolong. Material design of bridge pavement [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2002, 24(4): 56-58.)

- [7] 李星新. 基于健康监测的钢桥面板疲劳寿命评估[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
(LI Xingxin. Fatigue life evaluation of orthotropic steel plate based on health monitoring [D]. Changsha: Central South University, 2012.)
- [8] 李潜. 基于防水粘结应力吸收的桥面铺装技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.  
(LI Qian. The study of the bridge deck pavement technique based on waterproof-bod-stress absorbing layer [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.)
- [9] 何亮, 饶志鹏, 凌天清, 等. 大跨径钢桥沥青铺装层裂缝行为研究进展[J]. 公路, 2018, 63(7): 71-81.  
(HE Liang, RAO Zhipeng, LING Tianqing, et al. Progress of researches on fracture behavior of long-span steel bridge deck asphalt pavement [J]. Highway, 2018, 63(7): 71-81.)
- [10] SARIDE S, KUMAR V V. Influence of geosynthetic-interlayers on the performance of asphalt overlays on pre-cracked pavements [J]. Geotextiles and geomembranes, 2017, 45(3): 184-196.
- [11] 陈志超. 水泥混凝土桥面铺装防水性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
(CHEN Zhichao. Study on pavement's waterproof-ness of concrete bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.)
- [12] 黄利勇. 常用桥型 FRP 桥面板设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
(HUANG Liyong. Study on design of FRP bridge deck of common bridges [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.)
- [13] 董大伟, 凌天清, 江宽, 等. 废轮胎橡胶粉在高黏改性沥青中的应用性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 78-84.  
(DONG Dawei, LING Tianqing, JIANG Kuan, et al. Application of waste tire rubber powder in high-viscosity modified asphalt [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2020, 39(1): 78-84.)
- [14] LI Peilong, DING Zhan, ZOU Peng, et al. Analysis of physico-chemical properties for crumb rubber in process of asphalt modification [J]. Construction and building materials, 2017, 138: 418-426.
- [15] TUR R R, SONG P, WANG S. Thermal analysis on the interactions among asphalt modified with SBS and different degraded tire rubber [J]. Construction and building materials, 2018, 182: 134-143.
- [16] 孙雅珍, 翟晓星, 李宁. 沥青路面反射裂缝扩展机理与防裂效果分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(6): 1023-1029.  
(SUN Yazhen, ZHAI Xiaoxing, LI Ning. Analysis on propagation mechanism of asphalt pavement reflective crack and anti-cracking effect [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(6): 1023-1029.)  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)