

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.06.033

钢桥面铺装体系材料选型与设计

谢胜加^{1,2}, 唐冬晔¹, 程志强^{1,2}

[1.上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市200433; 2.上海绿色路面材料工程技术研究中心,上海市200433]

摘要:结合铺装材料的配合比设计和性能试验,研究分析了典型铺装材料的高温稳定性、抗疲劳开裂性能和黏结层应用性能。结果表明:环氧沥青混合料EA表现出较好的抗车辙特性,其60℃最终车辙深度为沥青玛蹄脂碎石混合料SMA的30%左右,70℃最终车辙深度仅为SMA的25%左右;对于SMA,在铺装设计时需要考虑一个临界应变水平,并在结构设计时宜控制其实际应变水平低于该临界值;存在最佳黏结材料用量使层间黏结强度达到最大,且拉拔试验和斜剪试验得到的最佳用量一致,2种试验结果具有一致性。

关键词:钢桥面;桥面铺装;材料选型;设计

中图分类号: U443.33

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)06-0121-04

0 引言

大跨径桥梁施工工艺和质量要求特殊^[1],更是路网交通的关键节点,保证其交通安全通畅就尤为关键,因而要求桥面铺装具有更长的使用寿命,路用性能更可靠。桥面铺装材料主要采用沥青混合料,易受到交通环境、结构特点及温度条件等影响^[2-4],其设计、施工、维修保养一直是一个亟需解决的工程技术难题。

钢桥面铺装体系材料一般主要包含桥面铺装层材料和防水黏结层材料^[5]。铺装层材料保护桥面钢板不受交通荷载直接作用,同时为桥面钢板提供保护层,防止外界水分对钢板的侵蚀作用。桥面铺装层和钢板两者通过防水黏结层的黏结形成整体受力。此外,防水黏结层作为直接涂覆于钢板表面的层次,也是钢板防水的最后一道屏障。

本文重点评价钢桥面铺装体系的铺装层和防水黏结层材料的应用性能,在对铺装材料进行配合比设计的基础上,分析典型铺装材料的高温稳定性、抗疲劳开裂性能,以期为钢桥面铺装材料的选型和设计提出适合的试验方法,为钢桥面铺装材料研究提供理论指导。

1 钢桥面铺装体系材料

1.1 铺装结构层材料

常见的钢桥面铺装结构层材料主要包括浇注式

沥青混凝土(GA),环氧沥青混合料(EA)和沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)。3种沥青铺装材料用于钢桥面铺装的性能对比7面图见图1。图1右侧性能(低温抗裂性、高温稳定性和抗疲劳性能)为路用性能;左侧性能(变形随从性、维护简易、施工简易和损伤自愈性能)为施工工艺的操作程度。性能对比7面图中所列的数字代表着该项性能的评分情况,分值越高表明该项的性能越好;另外,用细直线将3种混合料的性能评分围成一个范围,该范围面积越大,说明该混合料的综合性能越好。总体而言,3种混合料各有优势。EA的路用性能表现较好,然而其对生成、施工诸环节要求较为严格,因此其可操作性相对较差;SMA的性能虽然不及EA,但由于我国对SMA的应用和研究已有多年,积累了较为丰富的实践经验,因此其可操作性较好。在工程造价方面,以同样厚度相比较,EA的铺装成本最高,GA铺装次之,SMA比普通沥青费用约增加20%~30%^[6]。

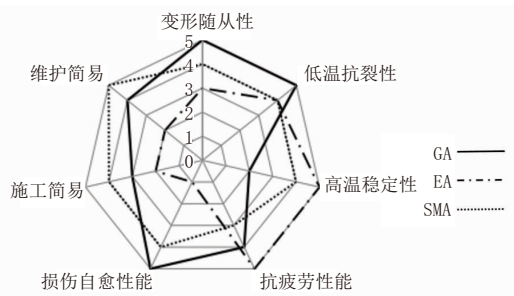


图1 3种材料性能对比7面图

通常情况下,桥面铺装材料不会单独采用其中一种,而多采用复合式铺装体系,这样可以充分发挥不同铺装材料的特点,使整个体系达到最佳搭配。如在美国通常采用双层环氧沥青铺装体系,在一些寒冷地

收稿日期: 2022-08-26

基金项目: 上海市交通委员会科研项目(JT2021-KY-016); 交通运输部科研项目(2021-ZD1-004)

作者简介: 谢胜加(1990—),男,硕士,工程师,主要从事道路工程研究及设计工作。

区则偏向采用双层浇注式沥青混凝土。在我国也有双层 SMA 的铺装体系。双层体系可以充分考虑各铺装上下层的功能特点,根据不同的情况选择不同的结构层材料以达到预期效果。

1.2 防水黏结层材料

应用于桥面铺装防水层的材料可以分为卷材类防水层和涂料类防水层 2 类。卷材类防水层往往包含沥青类、聚合物改性沥青类和合成高分子类(橡胶型、橡塑型、树脂型)3 种。涂料类防水层则包括沥青类和合成高分子类(橡胶型、有机无机复合型、树脂型)2 种。目前,钢桥面铺装的防水层以涂料类为主。主要原因是防水卷材对施工的要求极高,一旦在施工过程中有空气和水分引入卷材与钢板之间,就会使两者的黏结能力下降,在交通荷载与环境高温共同作用下,造成卷材直至铺装的整体滑移。虽然卷材在国内应用不多,但在其他国家确有一定程度的应用。

虽然卷材与钢板之间的黏结问题限制了卷材在钢桥面铺装中的应用,但值得注意的是相比防水涂料,卷材在隔绝水分与钢板接触、防止施工机械对防水层的损害等方面具有独特的优势。若能解决卷材与钢板之间的黏结问题,开发新的施工方法来降低卷材的施工难度,卷材应用于钢桥面铺装仍有广阔前景。

1.3 典型钢桥铺装结构组合

我国的钢桥面铺装结构组合基本以双层式铺装为主。该体系充分考虑各铺装层的功能特点,根据不同情况选择不同结构层材料以达到预期的效果。3 种典型的双层铺装结构为:双层 SMA、GA+SMA 和双层 EA。

双层 SMA 在我国应用较为广泛,1997 年在虎门大桥的应用使改性沥青 SMA 钢桥面铺装研究在我国迅速成为热点。GA+SMA 铺装组合形式在我国应用也较为广泛。为了适应钢板的变形以及防止外界水分对钢板的锈蚀,采用低空隙率、抗疲劳性能优良、变形适应性较好的 GA 作为铺装下层,上面层则采用抗车辙性能好、耐磨耗高的改性沥青 SMA。该结构组合取长补短,充分考虑 2 种材料的特点并发挥了各功能层的作用。双层 EA 在美国应用最为广泛,我国也于 2001 年在南京长江二桥桥面铺装中首次采用双层环氧沥青混合料铺装结构,此结构组合铺装层厚度通常为 5~5.5 cm。3 种典型铺装结构在钢桥面铺装中的应用情况见表 1。

表 1 钢桥面铺装应用情况

桥名	摊铺年份	铺装结构
广东虎门大桥 (主跨 888 m 钢箱梁 悬索桥)	1997 2003	60 mm 改性 SMA-13 30~40 mm 改性 SMA+30~40 mm 改性 SMA
武汉白沙洲大桥(主桥为 双塔双索斜拉桥)	2000	45 mm SMA-13+ 30 mm SMA-10
重庆鹅公岩长江大桥 (210 m+600 m+210 m 钢箱梁悬索桥)	2000	双层改性 SMA
湖北宜昌长江公路大桥 (主跨 960 m 钢箱梁)	2001	双层改性 SMA
上海卢浦大桥 (主径 750 m 拱桥)	2003	30~40 mm 改性 SMA+30~40 mm 改性 SMA
东海大桥	2005	浇注式 GA+ 改性 SMA
江阴长江大桥	2004	25 mm 浇注式 GA+35 mm 环氧 沥青混合料 EA
重庆菜园坝大桥(主跨 420 m 钢箱梁拱桥)	2007	Elinminator 防水黏结体系 + GA+SMA
重庆朝天门长江大桥	2009	浇注式 GA+ 改性 SMA
上海闵浦二桥	2010	浇注式 GA+ 改性 SMA
南京长江二桥	2001	50 mm 双层环氧沥青混合料 EA
舟山桃夭门大桥	2003	55 mm 双层环氧沥青混合料 EA
南京长江三桥	2005	50 mm 双层环氧沥青混合料 EA
润扬长江双桥	2005	50 mm 双层环氧沥青混合料 EA
苏通长江大桥	2007	50 mm 双层环氧沥青混合料 EA

2 铺装材料配合比设计

2.1 SMA-10

本研究的高弹改性沥青 SMA-10 采用玄武岩作为粗骨料,石灰岩作为细集料及填料,添加 0.3% 聚酯纤维,黏结料为高弹改性沥青。SMA-10 沥青混合料性能指标见表 2,路用性能试验结果见表 3。

试验按照设计级配,分别采用 4 种油石比成型马歇尔试件,并测试马歇尔试件的体积参数和相应力学指标。根据表 3 的试验结果可得出,当空隙率为 3% 时,油石比为 6.9%,在此油石比下,试件的饱和度为 75.5%,矿料间隙率为 17%,各项体积参数指标均满足表 2 中的要求,故 SMA-10 沥青混合料的最佳油石比选择为 6.9%。

2.2 GA-10

浇筑式沥青混合料是一种在高温状态下浇筑式施工的特殊沥青混合料,因此其配合比设计与马歇尔设计方法有着显著差别。

GA-10 混合料性能要求见表 4。其中对于 GA 的施工和易性和低温抗裂性等有着具体要求。

表2 SMA-10 沥青混合料性能指标要求

技术指标	技术要求	试验方法
马歇尔试件击实次数/次	双面 50 或 75	JTJ 052—2000 T0702
空隙率 VV/%	2.0 ~ 3.0	JTJ 052—2000 T0705
矿料间隙率 VMA/%	≥17	JTJ 052—2000 T0705
粗集料骨架间隙率 VCA _{min} /%	≤VCA _{DRC}	JTJ 052—2000 T0705
沥青饱和度 VFA/%	75 ~ 85	JTJ 052—2000 T0705
稳定度 / kN	≥6.0	JTJ 052—2000 T0709
流值 / mm	2 ~ 5	JTJ 052—2000 T0709
肯塔堡飞散试验的混合料损失(浸水飞散试验)/%	≤15	JTJ 052—2000 T0733
析漏量 /%	≤0.1	JTJ 052—2000 T0732
残留稳定度 /%	≥80	JTJ 052—2000 T0709
冻融劈裂强度比 /%	≥80	JTJ 052—2000 T0729
车辙动稳定度(60 ℃)/(次·mm ⁻¹)	≥6 000	JTJ 052—2000 T0719
低温弯曲极限应变(-10 ℃, 50 mm·min ⁻¹)/(μm·m ⁻¹)	≥7 000	JTJ 052—2000 T0715
渗水系数/(mL·min ⁻¹)	≤50	JTJ 052—2000 T0730

表3 SMA-10 沥青混合料路用性能

技术指标	SMA-10	技术要求
空隙率 VV/%	3.0	2.0 ~ 3.0
矿料间隙率 VMA/%	17.0	≥17
稳定度 / kN	8.76	≥6.0
流值 / mm	4.7	2 ~ 5
肯塔堡飞散试验的混合料损失 /%	4.13	≤15
析漏量 /%	0.05	≤0.1
残留稳定度 /%	94	≥80
冻融劈裂强度比 /%	91	≥80
车辙动稳定度(60 ℃)/(次·mm ⁻¹)	7 120	≥6 000
低温弯曲极限应变(-10 ℃, 50 mm·min ⁻¹)/(μm·m ⁻¹)	7 321	≥7 000

表4 GA-10 混合料性能要求

试验项目	要求	试验方法
流动性(240 ℃)/s	≤20	
贯入度(50 ℃)/mm	1~4	
贯入度增量(50 ℃)/mm	≤0.4	
弯曲极限应变(-10 ℃)/(μm·m ⁻¹)	≥8 000	JTJ 052—2000 T0715

根据所选用的级配曲线和各种矿料的筛分结果,计算各种矿料所需用量。在沥青混合料油石比7%~8%范围内,以0.3%的增量递增制备3组试件,每组平行试件5个,并测试其性能(见表5)。

由表5可知,油石比为7.6%和7.9%时,GA-10混合料的流动性、贯入度及其增量均满足性能要求;当油石比从7.9%增加到8.2%时,GA-10混合料的流动

表5 GA-10 混合料性能试验结果

油石比 /%	贯入度 /mm	贯入度增量 /mm	刘埃尔夫流动性 /s
7.6	3.38	0.21	15.4
7.9	3.49	0.27	8.1
8.2	3.73	0.35	4.4
要求	1~4	≤0.4	≤20

性明显改善,而热稳定性的降低并不明显。根据既有经验,在一定范围内油石比越大,混合料的低温性能越好。因此,确定7.9%为GA-10混合料的最佳油石比。

3 铺装体系材料性能分析

3.1 高温稳定性分析

高温稳定性作为铺装材料的基本路用性能在桥面铺装材料性能评价中应予以考虑。我国目前评价沥青混合料高温稳定性的常用试验方法为轮辙试验,本研究也采用该方法来评价钢桥面铺装的高温抗车辙性能。对于浇筑式沥青混凝土,由于其车辙深度超过了仪器的传感器测试范围,因此在这里不予考虑。

试验通过成型300 mm×300 mm×50 mm的车辙试件,分别在60 ℃(规范值)和70 ℃条件下进行。试验中施加的轮压为0.7 MPa。不同温度下车辙试验变形与时间关系曲线见图2。

由图2可知,EA表现出较好的抗车辙特性,60 ℃最终车辙深度为SMA的30%左右,70 ℃最终车辙深度仅为SMA的25%左右。这主要是由环氧沥青混凝土的热固性所决定的。从现役钢桥面铺装车辙深度的调查结果来看,双层EA的车辙深度与GA+SMA的车辙深度基本相同,两者的不一致可能是环境温度和受力特点两方面原因造成的。

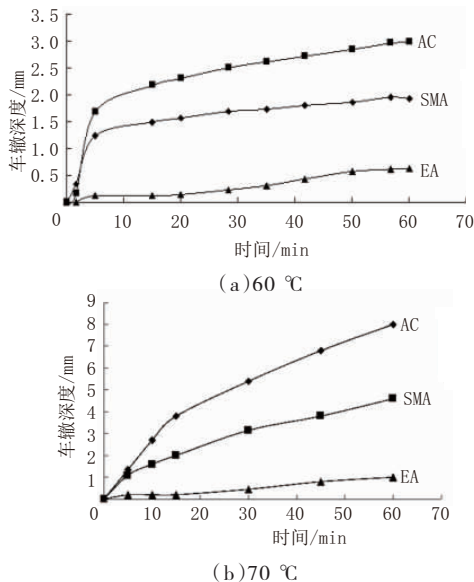


图2 不同温度下车辙试验变形与时间关系曲线

3.2 疲劳性能分析

钢桥面铺装的疲劳病害主要形式为车载作用下,因桥面板局部刚度变异部位产生较大的弯矩所导致的横桥向和纵桥向的拉应力(变)疲劳裂缝。评价疲劳性能的试验方法主要为小梁弯曲试验方法。该方法在国内外应用较为广泛,主要评价沥青混合料在小应变状态、反复荷载作用下的劲度模量变化特征。力学分析表明,小梁弯曲疲劳试验由于其受力模式与钢桥面铺装非常接近,因此该试验方法也是评价钢桥面铺装材料疲劳性能的较好方法。

四点梁弯曲疲劳受力示意图见图3。

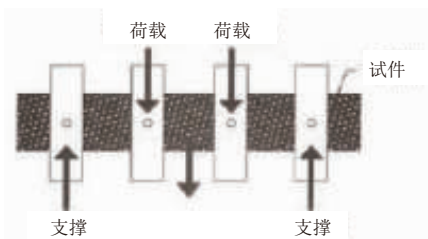


图3 四点梁弯曲疲劳受力示意

以 SMA 混合料为例,本文采用 UTM-90 对其进行疲劳加载试验研究。加载方式为应变控制,加载波形为正弦波荷载,试验温度为 15 °C^[7],加载频率为 10 Hz。分别采用 500 μm/m、750 μm/m、1 000 μm/m、1 250 μm/m、1 500 μm/m 这 5 个应变水平对 SMA-10 进行疲劳试验,测定其初始动态弯拉模量,记录疲劳作用次数,并计算得到疲劳作用曲线(见图4)。

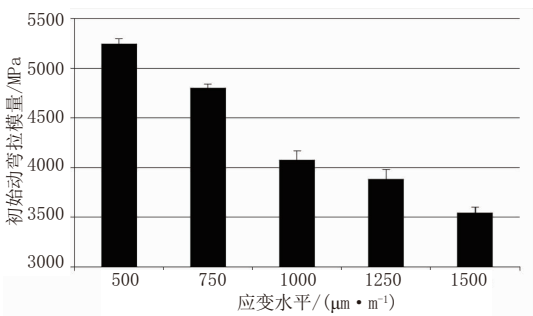


图4 弯曲动态模量随应变水平的变化

由图4可知,随着应变水平的不断提高,初始动态弯拉模量降低。说明随着应变水平的提高,小梁试件的抗变形能力显著下降。从下降趋势来看,当应变水平高于 1 000 μm/m 以后,初始动态弯拉模量变化范围为 500 MPa;应变水平从 500 μm/m 增至 1 000 μm/m 时,初始动态弯拉模量下降约 1 000 MPa。这说明一方面应变水平的增加与初始动态弯拉模量的下降具有一定的非线性关系,另一方面表明 1 000 μm/m 可能是一个影响疲劳特性的应变水平拐点,当应变超过 1 000 μm/m 以后,很可能材料已经发生了某种形式或程度的破坏,以至于初始动态弯

拉模量对应变的反应不敏感。因此该应变水平对于控制钢桥面铺装层疲劳损害具有积极意义,在铺装设计时应采用相应的措施,将铺装表面拉应变控制在一定范围以内。

3.3 防水黏结层应用性能评价

防水黏结层与钢板之间必须有足够的黏结力,使桥面铺装与钢板形成整体受力。拉拔试验和剪切试验是目前用于评价钢桥面铺装层间黏结最主要的 2 种试验方法。

目前应用于桥面铺装的防水黏结材料基本属于沥青基属的柔性防水材料,其黏结能力随着用量的变化而有所不同。当黏结材料用量较低时,其黏结能力随着用量的增加而逐渐提高;当超过一定用量时,黏结材料用量越大,其黏结能力反而下降。这是由于当黏结材料用量过大时,多余的黏结材料将产生“润滑效应”,造成铺装层与钢板之间易于滑动,从而降低了两者的黏结强度。

为分析黏结材料用量对防水黏结层黏结能力的影响,本文分别采用拉拔试验和斜剪试验进行评价。试验温度为 25 °C,防水黏结材料为环氧沥青。拉拔强度和抗剪强度随环氧沥青用量的变化趋势见图5。

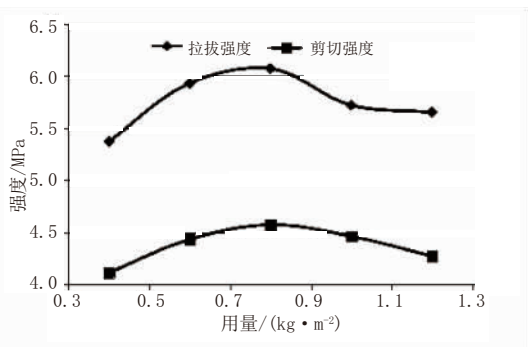


图5 25 °C 条件下拉拔强度和抗剪强度随环氧沥青用量的变化图

由图5可知,存在一最佳用量使层间黏结强度达到最大,同时也发现采用拉拔试验和斜剪试验得到的最佳用量是一致的,即 2 种试验结果具有一致性。最终得到环氧沥青的最佳用量为 0.75 kg/m²。

4 结 语

(1)提出了配合比设计的指标与标准,指出了材料配合比设计时的要点。

(2)通过轮辙试验,发现 EA 表现出较好的抗车辙特性,60 °C 最终车辙深度为 SMA 的 30% 左右,70 °C 最终车辙深度仅为 SMA 的 25% 左右。

(3)根据室内小梁疲劳试验,发现对于 SMA,在铺装设计时需要考虑一个临界应变水平,并在结构

(下转第 139 页)

表4 各分段抗浮计算工况表

结构段	竣工期	稳定运行期	检修期
标准断(底高程 -2.61 m)	/	考虑	考虑
标准断(底高程 -2.787 m)	/	考虑	考虑
过芸溪倒虹	/	考虑	考虑
后浦溪倒虹	/	考虑	考虑
贞岱渠倒虹	/	考虑	考虑
深青溪倒虹	/	考虑	考虑

表5 各分段抗浮计算成果表

结构段	稳定运行期	检修期
标准(底高程 -2.61 m)	1.56	1.33
标准断(底高程 -2.887 m)	1.58	1.31
过芸溪倒虹	1.38	1.18
后浦溪倒虹	1.35	1.17
贞岱渠倒虹	1.34	1.16
深青溪倒虹	1.41	1.2

结构段抗浮稳定安全系数均大于 1.10, 均满足抗浮设计要求。

5 结论

本文对厦门市北溪引水主干渠结构断面进行了分段设计, 并采用 Robot 有限元进行分析计算, 为类似工程提供相关参考。

参考文献:

[1] 曹光辉.小断面长距离引水隧洞施工与技术分析[J].低碳世界,2021,11(6):127-128.
 [2] 建筑结构静力计算手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
 [3] 张吕伟.ROBOT 软件在特种结构计算中的应用[J].特种结构,2006,23(2):65-66.
 [4] SL 191—2008,水工混凝土结构设计规范[S].
 [5] GB 50069—2002,给水排水工程构筑物结构设计规范[S].
 [6] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].

~~~~~  
 (上接第 124 页)

设计时应控制实际应变水平低于该临界值。

(4)通过斜剪、拉拔试验分析了黏结层性能,发现存在最佳黏结材料用量使层间黏结强度达到最大;且拉拔试验和斜剪试验得到的最佳用量一致,2种试验结果具有一致性。

### 参考文献:

[1] 黄卫.大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J].土木工程学报,2007(9):65-77.  
 [2] 王民,周启伟,胡德勇,等.三种不同钢桥面铺装材料的疲劳特性分

析[J].公路工程,2016,41(3):40-42.  
 [3] 王民,方明山,张革军,等.港珠澳大桥钢桥面沥青铺装结构设计[J].桥梁建设,2019,49(4):69-74.  
 [4] 郭娟,王峰.Sasobit-LM 对 SBS 改性沥青桥面性能的影响[J].科技通报,2017,33(12):233-236.  
 [5] 陈志一.大跨径正交异性钢桥面铺装防水粘结层研究[D].西安:长安大学,2008.  
 [6] 张洁.钢箱梁桥面铺装新型材料的研究[D].广州:华南理工大学,2006.  
 [7] 彭广银.基于复合梁的水泥混凝土桥面铺装疲劳试验研究[D].南京:东南大学,2010.