

文章编号: 1002-0268 (2010) 03-0081-05

钢桥面复合改性沥青混合料铺装路用性能研究

李宇峙¹, 徐 敏², 黄云涌¹, 颜 奇¹

(1. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076; 2 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 针对钢桥面铺装早期损坏中热稳定性不足的问题, 依据聚合物改性原理, 选取了 3 种改性剂, 通过设计正交试验, 采用极差分析和综合平分法, 研制出了一种钢桥面铺装新材料——复合改性沥青; 测试了该胶结料的基本性能, 并对其混合料进行了高温车辙、低温弯曲、水稳定性及疲劳试验。结果表明: 复合改性沥青的温度敏感性低、抗剪切变形能力强, 其混合料的路用性能均得到了明显改善, 尤其是高温抗车辙能力提高显著, 且经济效益可观, 适用于钢桥面铺装。

关键词: 桥梁工程; 钢桥面铺装; 复合改性沥青; 路用性能; 经济效益

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

Research on Performance of Compound Modified Asphalt Mixture in Steel Deck Pavement

LI Yuzhi¹, XU Min², HUANG Yuyong¹, YAN Qi¹

(1. Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410076 China;

2 Mid-South Survey & Design Institute, Changsha Hunan 410014, China)

Abstract: To cope with the deficiency of high temperature stability in early damages of steel deck pavement, based on theory of polymer modification, three polymer modifiers were used to develop a new material (compound modified asphalt) for steel deck pavement by designed orthogonal test together with range analysis and synthesis score method. Performances of the compound modified asphalt and its mixture were measured, and the tests such as rutting test, low temperature bending test, water stability test and fatigue test were performed. The result shows that the compound modified asphalt has lower temperature susceptibility and better ability to resist shear deformation. The performance of the mixture was improved remarkably especially the capacity of rutting resistance, and its economic benefit is considerable. Thus the mixture is suitable for steel bridge deck pavement.

Key words: bridge engineering; steel deck pavement; compound modified asphalt; performance; economic benefit

0 引言

大跨径钢桥桥面结构具有刚度相对小而变形相对较大, 热容性强, 钢桥面板和沥青铺装层温度胀缩性不一致的特征。在外界环境 (行车荷载与温度应力) 的综合作用下, 桥面板的应力应变特征异常复杂, 对铺装材料使用性能提出的要求达到了近乎苛刻的地步, 其中关键一项是应满足 70℃高温条件下的高温

稳定性要求^[1]。而我国已建、在建或规划中的大跨径钢桥大多都集中在南方地区, 夏季钢桥面铺装层的温度易达到 60~70℃, 因此, 在该区域内对钢桥面沥青铺装的热稳性进行研究, 具有重要的意义。

目前, 钢桥面铺装材料主要分 5 类^[2]: (1) 普通沥青混凝土; (2) 沥青玛蹄脂混凝土 (SMA); (3) 高温拌和浇注式沥青混凝土; (4) 环氧沥青混凝土; (5) 剪力键水泥混凝土。其中以环氧沥青混凝土的路

收稿日期: 2009-03-13

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20070536001)

作者简介: 李宇峙 (1947—) 男, 湖南长沙人, 博士生导师, 教授, 研究方向为路面结构及新材料. (liyuzhi@yahoo.com)

用性能最好, 疲劳寿命最长, 但其施工控制复杂且造价高, 难以推广应用。大量经验表明, 沥青铺装层若采用常规的道路沥青面层易发生早期破坏, 且很难经受起高温条件下的考验, 其热稳性不足的问题表现得尤为突出。实际工程例子也屡见不鲜, 如江阴长江公路大桥^[3], 钢桥面铺装层曾采用浇注式沥青混凝土, 在通车的几个后, 局部路段就出现了 5~8 mm 明显的塑性变形, 随后车辙深度不断加大, 最大的车辙深度超过 20 mm; 广东虎门大桥(铺装层曾采用单层改性 SMA) 如出一辙, 也存在较为明显的车辙等高温稳定性病害。国外的钢桥面铺装也或多或少存在高温稳定性问题^[4], 其主要是由铺装层材料的热稳性不足、恶劣的使用环境及桥面板独有的受力特性等导致的。可见当前几种钢桥面铺装材料都不能给出令人满意的答案。鉴于此, 本文致力于研究一种复合改性沥青铺装材料。经实体工程验证, 表明其具备比普通沥青混凝土优异得多的力学性能, 如优良的高温抗车辙性、低温抗开裂性、耐久性及抗老化等等, 能够有效地解决钢桥面沥青铺装高温稳定性不足的问题, 且社会效益可观, 应用前景广阔。

1 原材料

1.1 集料

集料均应干净、坚硬、无风化、无杂质, 形状以立方体为佳, 选取原则应以其磨耗值为主。综合考虑其他性能指标, 本研究使用集料均由湖南嘉升石场提供, 粗集料为玄武岩, 规格为 4.75~9.5 mm, 细集料为石灰岩, 规格为 0~4.75 mm, 填料宜采用憎水性石料, 建议采用干燥、洁净的石灰岩矿粉。集料的主要技术指标见表 1, 均符合《规范》^[5] 的要求。

表 1 集料的主要技术指标

Tab 1 Technical indexes of aggregates			
技术指标		实测值	技术要求
粗集料	洛杉矶磨耗损失/ %	12.6	≤28
	压碎值/ %	9.2	≤26
	坚固性/ %	1.5	≤12
	粘结力/ 等级	5	≥4
细集料	砂当量/ %	90.8	≥60
矿粉	含水量/ %	0.3	≤1

1.2 复合改性沥青的研制

沥青结合料对其混合料的高温性能具有重大的贡献作用, 文献 [6] 指出: 沥青混合料的高稳定性能有 60% 依赖于矿料级配的嵌挤作用, 另外 40% 来自于沥青结合料本身, 这主要由于混合料的粘弹性受制于沥青, 因此选择温度敏感性低的沥青, 可以在一定

程度减少或防止车辙, 对钢桥面铺装具有重要意义。

本研究选用 70[#] 沥青, 3 种聚合物改性剂 (分别简称 A、B、C), 通过设计正交试验, 采用一次掺配法, 利用胶体磨进行研磨加工。再对各复合改性沥青试样进行基本性能的测试, 最后采用极差分析法, 分析各类改性剂及其掺量对 70[#] 沥青性能的影响规律。以高温稳定性为出发点, 再通过综合平分法确定各因素水平之间的最佳组合。试验按照《规程》^[7] 及 SHRP 性能分级试验方法^[8-9] 进行。为了方便对比分析, 对 70[#] 沥青和 SBS 改性沥青进行了平行试验, 将所得各类沥青性能数据列于表 2 和表 3。

表 2 沥青性能试验结果

Tab 2 Result of asphalt performance test				
技术指标	实测值			标准要求 (改性)
	70 [#] 沥青	SBS 改性 沥青	复合改 性沥青	
针入度 (25 °C, 5 s, 100 g) / 0.1 mm	64	42	21	30~60
针入度指数 PI	-0.92	0.83	3.76	>0
软化点 (R&B) / °C	48.5	75.4	97.6	>60
延度 (15 °C) / cm	>150	>150	48	
表观粘度 ^{135 °C} / (Pa·s)	0.625	1.640	3.710	<3.0
表观粘度 ^{190 °C} / (Pa·s)	—	0.342	0.674	
RTFOT 质量损失/ %	-0.15	-0.21	0.32	-1.0~+1.0
老化后 25 °C 针入 度比/ %	63	71	83	>65

表 3 SHRP 性能分级试验结果

Tab 3 Result of SHRP performance classification test					
技术指标		实测值			标准要求 (改性)
		70 #沥青	SBS 改性 沥青	复合改 性沥青	
DSRG */	试验温度/ °C	70	76	88	
sin δ	原样沥青/ kPa	1. 58	1. 42	14 3	≥1. 00
(82 °C)	RTFOT 残留沥青/ kPa	2. 37	3. 29	20 6	≥2. 20
BBR 试验	试验温度/ °C	— 18	— 18	— 12	
PAV	蠕变劲度 S/MPa	236	197. 3	263. 5	≤300
残留沥青	蠕变速率 m	0. 29	0. 328	0. 314 (— 18 °C)	≥0. 300
	PG 分级	FG 70-22	PG76-28	PG88-22	

由表 2、表 3 可知:

(1) 复合改性沥青的 PI 值、软化点、 $G^*/\sin \delta$ 和表观粘度值相对 70[#] 沥青、SBS 改性沥青都有大幅度的增长, 表明其温度敏感性低、高温下抵抗剪切变形的能力强, 高温稳定性得到明显改善。

(2) 经 RTFOT 老化后, 复合改性沥青的针入度比要高于其他两种沥青, 且 $G^*/\sin \delta$ 较原样沥青都有不同程度的提高, 表明其抗老化能力强, 老化后沥青的弹性作用增大, 主要原因是短期老化使沥青与改

性剂的相容性得到进一步改善。

(3) 3种沥青按SHRP规范分级: 复合改性沥青PG88-22, SBS改性沥青PG76-28, 70[#]沥青PG70-22, 表明复合改性沥青的高温适应温度较后两者分别高出了2~3等级, 且 $G^*/\sin \delta$ 在88℃的实测值远大于规范要求, 说明其可以适应更高的温度范围。但低温适应温度较70[#]沥青没有变化, 较SBS改性沥青低了一个等级, 表明低温性能改善效果不明显。

1.3 级配设计

设计基本思想: 用粗集料形成骨架, 细集料、填料和沥青砂胶填充孔隙, 通过调整粗、细集料比例, 获得合适的VMA, 使混合料具备抗永久变形能力强、透水性小、耐久性好的特点。混合料配合比设计采用马歇尔设计方法, 经过计算与试验结果比较, 最后得到本研究所用级配, 见表4, 其最佳油石比为4.8%。

表4 设计级配

	通过下列筛孔(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
设计值	100	67.1	28.9	23.3	18.9	15.4	12.4	10.0	8.1

2 路用性能验证

2.1 高温稳定性能

夏季钢桥面铺装层内部温度大致在60~70℃范围内, 如此严酷的环境对沥青混合料的高温稳定性提出了很高的要求, 不是一般沥青混合料所能胜任的, 故有必要在60℃和70℃的温度条件下, 对复合改性沥青混合料的动稳定度进行验证, 本文采用车辙试验方法, 测试以下不同铺装材料的动稳定度, 见表5。

表5 各种铺装材料高温抗车辙试验结果

铺装材料类型	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	
	60℃	70℃
浇注式沥青混合料	1 215	465
SMA	6 342	4 846
环氧沥青混合料	12 600	9 000
环氧树脂混合料	21 155	12 691
SBS改性沥青混合料	7 306	4 256
复合改性沥青混合料	17 030	11 420

由表5可知: 复合改性沥青混合料的动稳定度远大于浇注式沥青混合料、近SBS改性沥青混合料或SMA的2倍之多, 甚至高于环氧沥青混合料, 但略小于环氧树脂混合料, 70℃时仍可达上万余次, 完全可以满足钢桥面铺装动稳定度大于8 000次/mm的技术要求, 可见复合改性沥青混合料具备与热固性(环

氧类)钢桥面铺装材料相当的动稳定度。主要原因: 除了与所选级配有关外, 还跟改性剂的种类有必然关系, A、B、C 3种聚合物改性剂在沥青中是以微粒状态分布的, 相互形成了三维空间网状结构, 能使沥青膜处于比较稳定的状态, 高温时不会因剪切而发生塑性变形, 从而使得混合料的高温抗车辙能力增强, 有效地减少由于混合料高温稳定性不足而产生的车辙破坏, 这表明复合改性沥青混合料是一种适用于气候炎热、重载较多、长大纵坡等路段, 更宜于作为钢桥面铺装的新材料。

2.2 低温抗裂性能

沥青混合料作为钢桥面铺装时, 易产生以下两种形式的低温开裂: 其一, 由于钢桥面板与沥青铺装层的收缩性能不一致而产生的裂缝; 其二, 因加劲肋和横隔板顶部产生较大的负弯矩导致的受拉开裂, 此种效应在行车荷载的作用下尤其明显。因此本文按《规程》^[7]的要求, 采用低温弯曲小梁试验方法来评价复合改性沥青混合料的抗拉强度和变形能力, 试验温度为-10℃和0℃, 试验结果见表5。

表5 沥青混合料低温弯曲破坏试验结果

铺装材料类型	different asphalt mixtures					
	抗弯拉强度/ MPa		极限弯拉应变/ (× 10 ⁻⁶)		弯拉回弹模量/ MPa	
	-10℃	0℃	-10℃	0℃	-10℃	0℃
普通沥青混合料	7.64	8.43	1 657	2 240	4 625	3 772
SBS改性沥青混合料	8.86	9.41	2 411	3 045	3 678	3 095
复合改性沥青混合料	10.3	10.7	2 297	2 897	4 485	3 687
环氧树脂混合料	12.1	12.6	563	737	21 490	17 678

表5表明, 复合改性沥青混合料的低温抗裂性能较普通沥青混合料有明显的提高, 其抗弯拉强度仅次于环氧树脂混合料, 极限弯拉应变要小于SBS改性沥青混合料, 表明其具有较高的抗弯拉强度, 尽管低温变形能力不如SBS改性沥青混合料, 但完全满足铺装层层底弯拉应变应大于332 $\mu\epsilon$ ^[10]的技术要求。

2.3 水稳定性能

沥青混合料的水稳定性是指其抵抗受水侵蚀, 逐渐产生沥青膜剥落、掉粒、松散、坑洞等水破坏的能力。本研究用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验, 测定沥青混合料在受水前后的残留稳定性和劈裂强度比来评价沥青混合料水稳定性, 试验结果见表6。

从表6的数据可以看出, 复合改性沥青混合料的水稳定性要优于其他2种沥青混合料。主要原因: 掺入各种添加剂的沥青较SBS改性沥青具有更多的粘性成分, 存在较多的极性物质, 润湿性良好, 抗水分离

换能力强，这就使得集料表面沥青膜变厚，降低了水对沥青与集料界面的侵蚀破坏作用，使混合料的水稳定性得以增强。

表 6 沥青混合料水稳定性试验结果

Tab 6 Result of water stability test for different asphalt mixtures

铺装材料类型	残留稳定度 (MS0)/ %	劈裂强度比 (TSR)/ %
普通沥青混合料	89.8	88.6
SBS 改性沥青混合料	92.8	90.5
复合改性沥青混合料	95.4	94.8

2 4 抗疲劳性能

钢桥面铺装在外界荷载（行车荷载与温度荷载）的多次循环作用下，主要产生以下几种疲劳破坏形式^[11-13]，即：（1）纵肋肋顶或纵隔板顶部的纵向裂缝；（2）横隔板顶部的横向裂缝；（3）因铺装层与钢板之间粘结力丧失而出现的脱落现象，可见有必要对铺装材料的抗疲劳性做出合理评价。为了使室内试验较好地反映实际受力情况，本文采用控制应力模式，在疲劳试验机 MTS810 上进行试验，中点加载，频率为 10 Hz，试件尺寸为 300 mm×50 mm×50 mm，试验温度为 20 ℃，疲劳试验结果见表 7。

表 7 沥青混合料疲劳试验结果

Tab 7 Result of fatigue test for different asphalt mixtures

应力比	铺装材料类型			
	①普通(70 [#]) 沥青混合料	②SBS 改性 沥青混合料	③复合改性 沥青混合料	④环氧沥青 混合料
	疲劳寿命/次			
0.2	17 856	30 746	60 991	—
0.3	6 183	10 264	26 256	178 015
0.4	2 311	4 096	10 356	56 543
0.5	1 328	2 283	4 896	18 129
0.6	625	988	2 477	6 580
0.7	416	605	1014	2 760
疲劳方程	$N_f=144.41 \cdot x^{-3.0412}$	$N_f=217.61 \cdot x^{-3.1426}$	$N_f=451.02 \cdot x^{-3.214}$	$N_f=527.48 \cdot x^{-4.9477}$
相关系数	0.996 4	0.993 7	0.975 1	0.994 4

由表 7 可得知，各种钢桥面铺装材料疲劳寿命大小顺序为：④环氧沥青混合料>③复合改沥青混合料>②SBS 改性沥青混合料>①普通沥青混合料，在相同应力比（0.3）下，③的疲劳寿命分别是②、①的 2.6 和 4.3 倍，仅为④的 15%，表明③的疲劳性能改善效果要强于②，但不及④。主要原因是添加剂类型和改性方式的差别，②、③是聚合物改性，属于物理变化过程，疲劳寿命差异完全在于添加剂的种类及掺量；④是热固性材料，其改性过程属于化学变化，固化后的混合料具有很高的劲度模量，在应力控制模式中，表现为疲劳寿命最长。在单对数坐标上，疲劳寿

命与应力比表现为线性关系，且相关性良好，可用方程： $N_f=k(\sigma/S)^{-n}$ 进行回归，关系曲线见图 1。

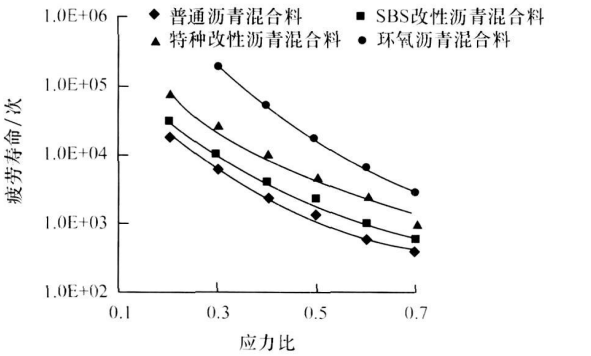


图 1 铺装材料疲劳寿命曲线

Fig 1 Fatigue life curves of steel deck pavement materials

3 经济性分析

经济性分析在工程建设方案比选中扮演着重要角色。一种好的钢桥铺装材料，除了满足路用性能条件外，还必须综合考虑其使用成本。本文根据市场价格，对比了几种沥青的成本，见表 8。

表 8 沥青成本估算

Tab 8 Cost estimation of asphalts

沥青种类	改性剂掺量/ %	价格/(元·t ⁻¹)	增幅/ % (与 70 [#] 沥青相比)
70 [#] 沥青	0	4 600	0
SBS 改性沥青	6	5 300	15.2
复合改性沥青	12(A、B、C 合计)	6 200	34.8
环氧沥青	—	60 000	1204.3

由上表可知，几种沥青使用成本由低到高排序为：70[#]沥青<SBS 改性沥青<复合改性沥青<环氧沥青，虽然复合改性沥青的价格较 SBS 改性沥青高出了 19.6 个百分点，但仅为环氧沥青的 10.3%，其施工工艺远不及环氧沥青复杂。复合改性沥青混合料良好的路用性能要明显优于 SBS 改性沥青混合料和普通沥青混合料，尤其是高温抗车辙能力，能够提高钢桥面铺装的耐久性，延长其寿命，可以减少铺装层维修次数，节省养护、维修费用，改善行车条件，社会效益可观。

4 工程应用

为了验证复合改性沥青混合料的路用性能，结合佛山—环海八桥匝道钢桥面工程铺筑了试验路段。因该种沥青粘度较大，其现场施工温度要高于一般沥青混合料。由钻芯试件密度试验测得面层压实度都不小

于97%, 说明混合料具有较好的可压实性。在竣工后, 对试验路段弯沉检测中发现, 其实测值都要小于设计弯沉值, 且路面平整度较高。试验路检测结果表明复合改性沥青混合料具备良好的路用性能。

5 结语

(1) 复合改性沥青的针入度指数、软化点、 $G^*/\sin \delta$ 和表观粘度较 70[#]沥青和SBS改性沥青都有显著的提高, 其混合料的动稳定度大, 抗永久变形能力强, 表明复合改性沥青及其混合料的高温稳定性得到了极大的提高。

(2) 复合改性沥青混合料具有良好的路用性能, 其低温性能、抗疲劳性和水稳定性较 70[#]沥青混合料均有显著改善。

(3) 复合改性沥青的价格略高于SBS改性沥青, 远低于环氧沥青, 且施工简单, 经济效益可观。考虑其各项路用性能, 尤其是良好的高温抗车辙能力, 在气候炎热、重载较多、长大纵坡等路段推荐使用或更宜于作为钢桥面的铺装。

参考文献:

References:

- [1] 张力, 陈仕周. 钢桥面铺装技术的研究与发展 [J]. 公路, 2001 (1): 1—5
ZHANG Li, CHEN Shizhou. Research and Development of Steel Deck Pavement Technology [J]. Highway, 2001 (1): 1—5.
- [2] 李宇峙, 徐敏, 李家庆, 等. 环氧树脂混凝土路用性能及其钢桥面铺装施工工艺研究 [J]. 公路, 2008, 10: 103—107.
LI Yuzhi, XU Min, LI Jiaqing, et al. Research on Performances and Construction Technology of Epoxy Asphalt Mixture for Steel Bridge Decks [J]. Highway, 2008 (10): 103—107.
- [3] 关永胜, 迟占华, 宗海. 大跨径钢桥桥面铺装早期病害分析及对策 [J]. 中外公路, 2005, 25 (6): 99—102
GUAN Yongsheng, CHI Zhanhua, ZONG Hai. Analysis and Countermeasure for Early Disease on Long-span Steel Bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25 (6): 99—102
- [4] 东南大学. 钢桥面铺装技术调研报告 [R]. 南京: 东南大学, 2001: 392—393
Southeast University. Investigation Report on Steel Deck Pavement Technology [R]. Nanjing: Southeast University, 2001: 392—393.

- [5] 中华人民共和国交通部. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004
P. R. China. Ministry of Communications. JTG F40-2004 Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavement [S]. Beijing: China Communications Press, 2004
- [6] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003
SHEN Jin'an. Performances of Asphalt and Asphalt Concrete [M]. Beijing: China Communications Press, 2003
- [7] 中华人民共和国交通部. JTJ 052-2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000
P. R. China. Ministry of Communications. JTJ 052-2000 Test Specifications of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2000
- [8] 李宇峙. SHRP 沥青结合料规范及沥青混合料设计简介 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
LI Yuzhi. Introduction of SHRP Asphalt Binder Standard and Asphalt Mixture Design [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [9] 赵可, 李海骢. 改性沥青感温性评价指标的讨论 [J]. 中国公路学报, 2000, 13 (4): 1—7.
ZHAO Ke, LI Haicong. Study on Evaluation Index of Sensitive-temperature Property for Modified Asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13 (4): 1—7.
- [10] 李星星. 耐高温环氧树脂混凝土胶粘剂在钢桥面沥青铺装中的应用研究及环氧树脂混凝土初步研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
LI Xingxing. Research on the Application of Epoxy Resin Adhesive to Paving on Steel Bridge Deck and Epoxy Concrete [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007.
- [11] 黄卫, 胡光伟, 张晓春. 大跨径钢桥面沥青混合料特性研究 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (2): 53—55.
HUANG Wei, HU Guangwei, ZHANG Xiaochun. Study on Asphalt Concrete Paving Performance on Long-span Steel Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19 (2): 53—55.
- [12] 刘振清, 黄卫, 刘清泉, 等. 钢桥面沥青混合料铺装体系疲劳特性的损伤力学分析 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (2): 117—129
LIU Zhenqing, HUANG Wei, LIU Qingquan, et al. Damage Mechanics on the Fatigue Characteristics of Asphalt Mixture Surfacing for Steel Bridge Decks [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (2): 117—129.