

# 聚合物复合改性沥青种类对浇注式沥青混合料 GA10 性能的影响

刘攀<sup>1</sup>, 盛兴跃<sup>1</sup>, 郝增恒<sup>1</sup>, 李凯<sup>2</sup>, 李璐<sup>1</sup>, 全弘彬<sup>1</sup>

(1. 重庆市智翔铺道技术工程有限公司, 重庆市 401336; 2. 重庆交通大学, 重庆市 400074)

**摘要:**浇注式沥青混合料是中国大跨径钢桥面应用规模最大的铺装材料,其沥青结合料主要采用聚合物复合改性沥青。该文选择4种聚合物复合改性沥青,研究其混合料GA10的流动性、高温性能、低温性能和疲劳性能,并与湖沥青复合改性沥青及其混合料GA10进行同步对比。结果表明:聚合物复合改性沥青GA10的低温性能和疲劳性能均明显优于湖沥青复合改性沥青GA10;浇注式沥青混合料的路用性能与沥青结合料的性能有重要的相关性;高温黏度和软化点较高的聚合物复合改性沥青,其混合料GA10具有更好的高温稳定性,而低温延度和弹性恢复率较大的聚合物复合改性沥青,其混合料GA10则具有更优的低温抗裂性和疲劳性能。根据实体工程要求,应选择合适的聚合物复合改性沥青。

**关键词:**钢桥面铺装; 聚合物复合改性沥青; 浇注式沥青混合料 GA10; 路用性能

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

浇注式沥青混合料不同于普通热拌沥青混合料,其拌和温度高,拌和时间长,沥青结合料和矿粉含量较大,流动性好,无须碾压,依靠自身的流动性即可摊铺,这是其最显著的特征,同时其空隙率几乎为零。浇注式沥青混合料的上述特点决定其具有优异的防水性能、抗开裂性能和与钢板的追从性能<sup>[1-4]</sup>。由于其优异的使用性能,在中国被广泛用于钢桥面铺装下面层,

目前浇注式沥青混合料铺装体系已成为中国大跨径钢桥面应用规模最大的铺装方案<sup>[5-7]</sup>。

用于浇注式沥青混合料的结合料主要包括聚合物复合改性沥青、天然沥青复合改性沥青及改性硬质沥青等<sup>[2,8-12]</sup>。沥青结合料对其性能有决定性影响,一方面沥青结合料需要具有较高的黏度保证混合料的高温性能,但黏度过大又会影响其施工和易性。因此,选

- \*\*\*\*\*
- [10] 魏宏云,周卫峰,李源渊. 不同成型方式的水泥碎石性能对比[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(8):84-90.
- [11] 常艳婷,陈忠达,张震,等. 不同成型方法级配碎石的抗变形性能[J]. 武汉大学学报(工学版),2017,50(2):251-256.
- [12] 王龙,解晓光,李长江. 级配碎石性能的振动与击实成型对比试验[J]. 中国公路学报,2007,20(6):19-24.
- [13] 洪亮,刘涛,杨三强. 水泥稳定砾石骨料振动与击实成型对比试验[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(6):63-67.
- [14] HUANG Jianyou, PEI Jianzhong, LI Yang, et al. Investigation on Aggregate Particles Migration Characteristics of Porous Asphalt Concrete (PAC) during Vibration Compaction Process[J]. Construction and Building Materials, 2020, 243(5): 1-8.
- [15] 付其林,刘朝晖,马年祖,等. 开级配大粒径沥青碎石成型方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2016,36(4):33-40.
- [16] 陈忠达,袁万杰,高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究[J]. 中国公路学报,2006,19(1):32-37.
- [17] 蒋应军. 多级嵌挤骨架密实二灰碎石组成设计方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(5):732-736.
- [18] 林绣贤. 沥青混凝土合理集料组成的计算公式[J]. 华东公路,2003(1):82-84.
- [19] 沙庆林. 多碎石沥青混凝土 SAC 系列的设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

收稿日期:2020-12-25

基金项目:重庆市重点产业共性关键技术创新专项重点研发项目(编号:cstc2017zdcy-zdyf0297);重庆市科技创新领军人才支持计划项目(编号:CSTCCXLJRC201720)

作者简介:刘攀,男,硕士,工程师. E-mail:787461693@qq.com

择沥青结合料要综合考虑各方面性能。在中国,早期常采用 SBS 改性沥青与温度敏感性极低及耐久性较好的湖沥青复配制备浇注式沥青混合料的结合料(湖沥青复合改性沥青),并得到大量工程应用,如上海东海大桥、上海长江大桥、重庆朝天门大桥等<sup>[13-14]</sup>。然而由于湖沥青需进口,价格昂贵且质量不够稳定,因此,中国相关科研机构开发出了浇注式沥青混合料专用聚合物复合改性沥青来代替湖沥青复合改性沥青,取得了良好的效果。目前中国大跨径钢桥面铺装浇注式沥青混合料多采用聚合物复合改性沥青,如武汉杨泗港长江大桥、舟山秀山大桥、武汉沌口长江大桥、云南龙江特大桥、重庆寸滩长江大桥等重大重点工程<sup>[6,15]</sup>。

该文选择 4 种自主研发的聚合物复合改性沥青,在相同工况下成型浇注式沥青混合料,评价其混合料

的流动性、高温稳定性、低温弯曲性能以及疲劳性能,得出其性能优劣,并分析聚合物复合改性沥青的常规性能与浇注式沥青混合料路用性能的联系,为后续工程应用中混合料的选择以及沥青结合料的性能改善提供参考依据。

## 1 试验部分

### 1.1 原材料选择

选择 4 种聚合物复合改性沥青(分别记为改性沥青 A、B、C 和 D)和湖沥青复合改性沥青(记为改性沥青 E),其技术要求及检测结果见表 1。采用性能指标符合规范的玄武岩集料和石灰石矿粉(重庆某石料厂),具体性能指标见表 2~4。

表 1 改性沥青技术指标检测结果

项目	单位	改性沥青 A	改性沥青 B	改性沥青 C	改性沥青 D	改性沥青 E
针入度(25 ℃)	0.1 mm	31.5	35.1	32.3	33.1	27.5
软化点	℃	115.3	106.9	104.4	103.0	86.0
延度(5 ℃)	cm	16.8	27.8	20.5	35.6	7.4
旋转黏度(175 ℃)	mPa·s	935.0	910.0	907.0	890.0	592.0
弹性恢复率(25 ℃)	%	95.3	97.0	96.5	97.2	80.1
RTFOT	针入度比(25 ℃)	%	75.5	73.9	74.0	68.5
	延度(5 ℃)	cm	8.7	15.3	11.3	3.2

表 2 粗集料技术指标检测结果

粗集料/ mm	表观相 对密度	压碎值/ %	细长扁平颗 粒含量/%	洛杉矶磨 耗损失/%	吸水率/ %	黏附性/ 级	水洗法≤0.075 mm 含量/%
5~10	2.924	8.9	2.4	12.4	0.92	5	0.5
3~5	2.928	—	—	—	0.81	—	0.7

表 3 细集料技术指标检测结果

细集料/mm	表观相对密度	砂当量/%	亚甲蓝值/(g·kg <sup>-1</sup> )
0~3	2.930	86	5.5

表 4 矿粉技术指标检测结果

表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水率/ %	通过率/%			亲水系数	塑性指数	外观
		0.6 mm	0.15 mm	0.075 mm			
2.742	0.8	100	94.5	88.6	0.8	2.4	无团粒结块

从表 1 可以看出:聚合物复合改性沥青的综合性能明显优于湖沥青复合改性沥青。4 种聚合物复合改性沥青的技术指标不尽相同,其中改性沥青 A 具有最

大的软化点和旋转黏度,改性沥青 D 具有最大的延度和弹性恢复率,改性沥青 B 的针入度最大,而改性沥青 C 的各项技术指标居中。

1.2 级配及最佳油石比确定

根据经验,浇注式沥青混合料的集料级配设计原则是尽量接近级配范围的中值,按照集料以及矿粉的

筛分结果进行级配拟合,结果见表 5。聚合物复合改性沥青油石比均为 7.9%,湖沥青复合改性沥青油石比为 8.5%。

表 5 GA10 设计级配

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
级配范围	100	80~100	63~80	48~63	38~52	32~46	27~40	24~36	20~30
设计级配	100	99.8	72.1	55.0	47.2	38.8	33.8	29.7	26.9

1.3 试验方法

在相同条件下,成型 5 种浇注式沥青混合料 GA10,按照规范要求,评价浇注式沥青混合料 GA10 的流动性、高低温性能和疲劳性能等。

2 结果与讨论

2.1 流动性

浇注式沥青混合料的流动性主要用于评价其工作和易性。进行刘埃尔流动度试验评价 GA10 的流动性,拌和温度为 230℃、235℃和 240℃,试验结果见表 6。

表 6 GA10 流动性试验结果

改性沥青种类	不同拌和温度(℃)时的流动度/s		
	230	235	240
A	23.4	18.7	15.5
B	21.7	15.9	13.6
C	18.6	16.1	12.0
D	18.2	13.4	9.9
E	25.3	21.8	15.6

由表 6 可见:① 5 种浇注式沥青混合料的流动性均能满足施工技术要求,且相同拌和温度下,聚合物复合改性沥青 GA10 的流动性优于湖沥青复合改性沥青 GA10,这是因为湖沥青中矿物质含量较高,实际有效沥青含量低于聚合物复合改性沥青 GA10。拌和温度能显著影响浇注式沥青混合料的流动性,一定范围内,拌和温度越高,混合料的流动性越好;② 在相同条件下,GA10-D 的流动性优于 GA10-C、GA10-B 和 GA10-A。聚合物复合改性沥青 D 的高温黏度较小,在拌和温度、矿料级配及油石比相同的情况下,其混合料具有更佳的工作和易性。因此,聚合物复合改性沥青 GA10 的流动性同沥青结合料的高温黏度息息相关。

2.2 高温稳定性

2.2.1 静态贯入度试验

贯入度反映的是浇注式沥青混合料在静载作用下的高温抗变形性能<sup>[16]</sup>。进行贯入度试验评价 GA10 的高温稳定性,试验温度采用 40℃、60℃和 70℃,分别为国外规范标准、中国国内规范标准和钢桥面铺装可能出现的最高温度,试验结果见表 7。

表 7 GA10 静态贯入度试验结果

改性 沥青 种类	40℃		60℃		70℃	
	贯入度/ mm	增量/ mm	贯入度/ mm	增量/ mm	贯入度/ mm	增量/ mm
A	0.92	0.12	2.58	0.24	3.14	0.30
B	1.10	0.14	2.96	0.28	3.50	0.34
C	1.16	0.14	3.16	0.28	3.68	0.36
D	1.28	0.16	3.40	0.32	3.98	0.40
E	1.18	0.13	2.46	0.26	3.50	0.28

由表 7 可以看出:聚合物复合改性沥青 GA10 和湖沥青复合改性沥青 GA10 均具有优异的高温稳定性。温度对浇注式沥青混合料的高温稳定性影响显著,随着温度的升高,贯入度值及其增量值随之增大。当温度为 60~70℃时,聚合物复合改性沥青 GA10 贯入度变化变缓,受温度的影响程度小于湖沥青复合改性沥青 GA10。在相同温度下,4 种聚合物复合改性沥青 GA10 的贯入度大小顺序为:GA10-D>GA10-C>GA10-B>GA10-A。

2.2.2 动态贯入度试验

按照德国 TPA-StB《路用沥青混合料测试技术规范》进行动态贯入度试验<sup>[9]</sup>,试验温度为 60℃,试验结果见表 8。

由表 8 可以看出:5 种浇注式沥青混合料 GA10 的动态贯入度试验结果与静态贯入度试验结果类似。

表 8 GA10 动态贯入度试验结果

改性沥青 种类	动态贯入 度/mm	改性沥青 种类	动态贯入 度/mm
A	2.65	D	3.11
B	2.82	E	2.67
C	2.87		

2.2.3 车辙试验

为了进一步分析浇注式沥青混合料 GA10 的高温变形情况,对其进行车辙试验,试验温度为 60 ℃,轮压为 0.7 MPa,试验结果见表 9。

表 9 GA10 车辙试验结果

改性沥青种类	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	车辙深度/mm
A	1 119	3.97
B	845	4.23
C	727	4.23
D	630	4.45
E	790	4.39

从表 9 可以看出:5 种浇注式沥青混合料 GA10 的动稳定度大小顺序为:GA10-A>GA10-B>GA10-E>GA10-C>GA10-D,车辙深度近乎相反。车辙试验结果也表明了浇注式沥青混合料 A 具有最佳的高温性能。

综上所述,相同条件下,GA10-A 的高温性能优于 GA10-B、GA10-C 和 GA10-D。聚合物复合改性沥青 A 的软化点和高温黏度高于聚合物复合改性沥青 B、C 和 D,这表明聚合物复合改性沥青的高温性能很大程度受沥青结合料软化点和高温黏度的影响。

2.3 低温抗裂性

抗弯应变可以反映浇注式沥青混合料在低温时抵抗变形的能力。进行低温弯曲试验评价 GA10 的低温抗裂性,试件尺寸为 300 mm×100 mm×50 mm,试验温度为-10 ℃,试验结果见表 10。

表 10 GA10 低温三点弯曲试验结果

改性沥青 种类	抗弯拉强 度/MPa	抗弯应变/ (10 <sup>-3</sup> με)	劲度模量/ MPa
A	14.6	10 030	1 447
B	14.1	10 467	1 404
C	14.0	10 772	1 453
D	12.9	11 087	1 329
E	13.8	8 168	1 690

从表 10 可以看出:湖沥青复合改性沥青作为结合料,因其低温延度较差,引起混合料低温弯曲性能也相对较差。采用聚合物复合改性沥青作为沥青结合料,可有效提高浇注式沥青混合料的低温抗变形能力,体现出聚合物复合改性沥青 GA10 低温性能的优越性。5 种浇注式沥青混合料 GA10 的弯拉应变大小顺序为:GA10-D>GA10-C>GA10-B>GA10-A>GA10-E,与沥青结合料的低温延度大小顺序大致相同。聚合物复合改性沥青 GA10 的低温抗裂性同沥青结合料的低温延度具有较好的相关性。

2.4 疲劳性能

疲劳次数可以作为浇注式沥青混合料疲劳性能的评价指标。进行四点小梁弯曲疲劳试验评价 GA10 的疲劳性能,试验采取 600 με 和 800 με 微应变水平,试验温度为 15 ℃,初始劲度模量取第 100 个加载循环时的劲度模量,试验结果见表 11。

表 11 GA10 四点小梁弯曲疲劳试验结果

改性沥青 种类	应变水 平/με	初始模 量/MPa	终止模 量/MPa	疲劳次 数/万次
A	600	6 873	3 695	>200
	800	6 299	3 151	91
B	600	6 520	3 386	>200
	800	6 417	3 220	103
C	600	6 404	3 371	>200
	800	6 298	3 174	106
D	600	6 197	3 217	>200
	800	6 235	3 103	128
E	600	10 761	5 099	32.5

从表 11 可以看出:劲度模量是混合料疲劳性能的重要影响因素,600 με 微应变条件下,5 种浇注式沥青混合料初始劲度模量依次为:GA10-E>GA10-A>GA10-B>GA10-C>GA10-D。研究表明<sup>[17]</sup>:初始劲度模量和沥青结合料的低温黏度相关,结合料低温黏度越高,其混合料的初始劲度模量则越大。

600 με 微应变条件下,4 种聚合物复合改性沥青 GA10 的疲劳次数均超过 200 万次,而湖沥青复合改性沥青 GA10 的疲劳次数仅为 32.5 万次。800 με 微应变条件下,4 种聚合物复合改性沥青 GA10 的疲劳次数大小顺序为:GA10-D>GA10-C>GA10-B>GA10-A。浇注式沥青混合料的疲劳性能与沥青结



合料的低温延度具有重要的相关性。低温延度和弹性恢复率越高的沥青结合料,其混合料在反复弯曲过程中,能吸收更多的弯曲应变能,其疲劳性能越好。

### 3 结论

(1) 聚合物复合改性沥青具有比湖沥青复合改性沥青更优异的综合性能,4种聚合物复合改性沥青的性能各有优劣。

(2) 5种浇注式沥青混合料的流动性均能满足施工要求,聚合物复合改性沥青GA10的低温性能和疲劳性能均显著优于湖沥青复合改性沥青GA10,高温性能则基本相当。

(3) 聚合物复合改性沥青GA10的路用性能与其沥青结合料的性能息息相关,相同条件下,软化点和高温黏度越高的结合料,其混合料的高温性能越优异,而工作和易性则较差;低温延度和弹性恢复率越高的结合料,其混合料的低温性能和疲劳性能更佳。

(4) 浇注式沥青混合料的性能不是单纯地受结合料某一两项技术指标的影响,是一个比较复杂的综合影响结果。因此,结合料的性能如何影响浇注式沥青混合料的路用性能,还有待更多的试验进一步验证。实体钢桥面铺装工程中,应根据工程特点、服役环境及设计文件等因素选择合适的聚合物复合改性沥青。

### 参考文献:

- [1] WANG H C, LI G F. Study of Factors Influencing Gussasphalt Mixture Performance[J]. Construction & Building Materials, 2015, 101: 193—200.
- [2] 王朝辉, 陈谦, 高志伟, 等. 浇注式沥青混凝土现状与发展[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 135—145.
- [3] 李浩, 王志祥, 刘锋, 等. BRP改性剂对GMA浇注式沥青混凝土高温性能影响研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 291—295.

- [4] 王贤良, 王志祥. 钢桥面铺装浇注式沥青混合料性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 1 956—1 962.
- [5] 胡德勇, 吕奖国, 王民, 等. 浇注式沥青混合料特点及发展动态[J]. 公路交通技术, 2015, 31(6): 14—17.
- [6] 张毅, 李璐, 刘攀. 沌口长江公路大桥试验段铺装结构的路用性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(7): 41—45, 51.
- [7] 朱定, 李书亮. 港珠澳大桥钢桥面铺装方案比选及浇注式沥青混合料(GMA)标准化施工工艺控制[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 161—164.
- [8] XIN C F, LU Q, AI C F, et al. Optimization of Hard Modified Asphalt Formula for Gussasphalt Based on Uniform Experimental Design[J]. Construction & Building Materials, 2017, 136: 556—564.
- [9] 王民, 包广志, 李璐, 等. 不同沥青结合料的浇注式沥青混合料性能对比分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 57—61.
- [10] 姚鸿儒, 王仕峰. 钢桥面铺装用聚合物改性沥青的研究与应用进展[J]. 石油沥青, 2014, 28(6): 66—71.
- [11] 杨军, 潘友强, 邓学钧. 桥面铺装浇注式沥青混凝土性能[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 49—53.
- [12] 章登精. 浇注式硬质直溜沥青混凝土钢桥面铺装设计和施工技术研究[J]. 公路, 2015, 60(7): 21—29.
- [13] 李玉龙, 陈仕周, 孙大权, 等. 东海大桥桥面铺装的研究与工程应用[J]. 中外公路, 2006, 26(2): 150—153.
- [14] 伍朝晖, 杨睿, 王民, 等. 重庆朝天门长江大桥钢桥面铺装结构与材料设计[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(4): 72—74.
- [15] 钟庆军, 肖晶晶. 云南龙江特大桥钢桥面铺装设计[J]. 山西建筑, 2016, 42(15): 178—180.
- [16] 社会民, 虎见. 清水河大桥钢桥面铺装浇注式沥青混凝土高温稳定性评价指标研究[J]. 公路, 2017, 62(3): 293—295.
- [17] 郝增恒. 沥青品种对浇筑式沥青混凝土疲劳性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 950—952.