

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.01.045

废轮胎热解炭黑改性沥青混合料室内试验与评价

宋伟^{1,2}, 骆斌斌¹, 李闯民², 李因翔¹

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司山东分院, 山东 青岛 266000; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:以沥青质量的15%制备热解炭黑改性沥青, 配制AC-13热解炭黑改性沥青混合料, 进行了高温性能、低温性能、水稳定性和动态模量室内试验, 与基质沥青AC-13沥青混合料相比, 热解炭黑改性沥青混合料高温性能显著提高, 有更好的抵抗车辆荷载能力。热解炭黑改性沥青混合料的水稳定性和低温性能优于基质沥青混合料。

关键词:热解炭黑; 改性沥青混合料; 高温性能; 低温性能; 水稳定性

中国道路交通流量和行驶频率急剧增长, 大型车和重载车辆比例随之增大, 超载超速现象时常发生, 沥青路面所面临的挑战越来越大, 路面病害也随之出现, 如裂缝、车辙、泛油、松散等病害现象^[1]。若修复养护不及时, 将会衍生水损害现象, 严重破坏路面结构, 不但降低了沥青路面的使用寿命, 造成巨大的经济损失, 还对行车安全带来隐患。

1993年美国在46号公路设立了热解炭黑改性沥青混合料试验路并进行检测, 结果表明: 在相对较短的运行期间, 热解炭黑改性沥青混合料试验段表现良好^[2]。目前, 国内外关于热解炭黑改性沥青混合料高温性能的研究结论已基本达成一致, 热解炭黑掺入可改善沥青混合料的高温稳定性^[3]。对于低温性能及水稳定性方面呈两种观念: 第一种观念认为: 热解炭黑的掺入可以改善沥青混合料的低温抗裂性和水稳定性^[4-5]; 第二种观念认为热解炭黑的掺入对沥青混合料的低温抗裂性和水稳定性有不利影响, 但影响不大^[6]。为深入研究热解炭黑改性沥青混合料的路用性能, 选用基质沥青和掺量为15%热解炭黑改性沥青分别进行AC-13配合比设计并确定最佳油石比。通过车辙试验和低温弯曲小梁试验, 对比分析两种混合料的动稳定度、低温破坏强度、最大弯拉应变等参数, 评价两种混合料的高温性能和低温性能。针对水稳定性, 通过浸水马歇尔试验、浸水飞散试验、冻融劈裂试验和APA浸水车辙试验, 综合对比分析热解炭黑改性沥青混合料的水稳定性。通过单轴压缩动态模量试验, 评价沥青混合料的抵抗车辆荷载的能力。

1 原材料及配合比设计

1.1 废轮胎热解炭黑

选用中国产废轮胎热解炭黑, 依据相关规范对其检测, 结果满足JT/T 860.7-2017《沥青混合料改性添加剂 第7部分: 废旧轮胎热解炭黑》^[7]的技术要求, 结果见表1。

表1 热解炭黑检验结果

检测项目	单位	检测结果	技术要求
灰分	%	14.1	≤18.5
吸碘值	mg/g	8.3	≥8.0
吸油值	mL/(100 g)	7.6	≥7.0
pH值		6.54	≥6.0
0.045 mm 通过率	%	100	100
含水率	%	2.4	≤3
外观		黑色粉末	黑色粉末

1.2 沥青

研究采用高速剪切法, 将热解炭黑平铺在铁盘中放入110℃左右烘箱中预热6h; 取一定量的70#基质沥青于烘箱中加热熔融至135℃; 称取沥青质量15%的热解炭黑与基质沥青共混, 搅拌均匀; 先低速进行剪切, 当温度上升到155℃, 将剪切速率调至4000 r/min, 剪切45 min^[8]。完成热解炭黑改性沥青的制备, 将其命名为PCB-15%, 其性能指标见表2。

收稿日期: 2021-03-30(修改稿)

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(编号: 2020H0023); 萍乡市科技计划项目(编号: 2019-3)

作者简介: 宋伟, 男, 硕士, 助理工程师. E-mail: 728849539@qq.com

表 2 PCB—15%改性沥青性能指标

检测项目	单位	实测结果	检测方法	
25 ℃ 针入度	0.1 mm	54.8	T0604—2011	
软化点($T_{R\&B}$)	℃	51	T0606—2011	
10 ℃ 延度	cm	27.2	T0605—2011	
60 ℃ 动力黏度	Pa · s	328.7	T0620—2000	
质量变化	%	—0.226	T0610—2011	
RTFOT	25 ℃ 针入度比	%	70.07	T0604—2011
	软化点增量	℃	6.3	T0606—2011
	60 ℃ 黏度比	%	2.63	T0605—2011

1.3 矿料

粗、细集料均采用石灰岩集料,填料采用加工磨细的石灰岩矿粉,依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》^[9] 对其进行检测,各项技术指标符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[10] 要求,结果见表 3~5。

表 3 粗集料检验结果

集料规格/ mm	表观相 对密度	吸水率/ %	压碎 值/%	洛杉矶磨 耗值/%	针片状颗 粒含量/%
10~15	2.719	0.44	23.1	24.5	6.3
5~10	2.726	0.52	23.1	22.7	4.2
技术指标	≥2.60	≤2	≤26	≤28	≤10

表 4 细集料检验结果

检测项目	单位	检测结果	指标要求
表观相对密度		2.641	≥2.50
砂当量	%	64	≥60
棱角性	s	37	≥30

表 5 矿粉检测结果

检测项目	单位	检测结果	技术指标	检测方法	
亲水系数		0.6	<1	T0353	
含水量	%	0.3	≤1	T0103 烘干法	
塑性指数		2.7	<4	T0354	
粒度 组成	<0.6 mm	%	100	100	T0351
	<0.15 mm	%	96.1	90~100	
	<0.075 mm	%	91.2	75~100	

1.4 配合比设计

选用 AC—13 型沥青混合料级配,并按照 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》进行配合比设计,通过调整,最后确定矿料的合成级配如表 6 所示。合成级配的矿料比例为(10~15 mm):(5~10 mm):(0~5 mm):矿粉=26%:41%:29%:4%。

表 6 AC—13 合成级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0	8.0
级配下线	100	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0
级配中值	100	95.0	76.5	53.0	37.0	26.5	19.0	13.5	10.0	6.0
合成级配	100	96.2	79.3	53.0	35.9	24.5	17.0	11.9	8.0	5.7

以 4.7%为油石比中值,以 0.5%为梯度确定 4 个油石比分别为 3.7%、4.2%、5.2%、5.7%,以 4%为目标设计空隙率,分别成型热解炭黑改性沥青混合料马歇尔试件,测定每组油石比试件的毛体积密度、空隙率、矿料间隙率、饱和度、稳定度和流值,结果见表 7。根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》最终确定 PCB 改性沥青混合料最佳油石比为 4.7%。按照相同的试验和计算方法求得基质沥青混合料的最佳油石比为 4.6%。

2 热解炭黑改性沥青混合料路用性能

2.1 高温性能试验

室内车辙试验用于测定沥青混合料的高温抗车辙能力,是评价沥青混合料路用性能的重要指标,其测试方法模拟了沥青路面的车辆荷载作用。由于沥青混合料是一种弹塑性材料,当夏季高温时,混合料中的沥青变软,导致沥青路面强度和劲度模量降低,在车辆荷载

表 7 马歇尔试验结果

油石比/ %	毛体积 相对密度	空隙率/ %	矿料间隙 率/%	沥青饱和 度/%	稳定度/ kN	流值/ mm
3.7	2.356	6.5	14.8	56.7	12.86	2.12
4.2	2.386	5.3	14.3	62.1	13.76	2.57
4.7	2.395	4.1	14.2	68.3	13.98	3.24
5.2	2.381	2.6	14.6	77.6	13.46	3.98
5.7	2.364	1.7	15.1	83.6	12.91	4.57
技术指标要求	—	3~5	≥14	65~75	≥8	1.5~4

的反复作用下,沥青路面的塑性变形也逐渐增大,从而容易形成车辙^[11]。研究采用 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[9]中沥青混合料车辙试验的动稳定度评价两种沥青混合料的高温稳定性,试验结果见表 8。

表 8 沥青混合料车辙试验结果

混合料类型	变形量/mm		动稳定度/ (次·mm ⁻¹)
	45 min	60 min	
70 [#] 基质沥青混合料	1.998	2.386	1 624
PCB 改性沥青混合料	1.452	1.634	3 462

由表 8 可见:PCB 改性沥青在 45 min 的变形量和 60 min 的变形量均小于基质沥青,PCB 改性沥青混合料的动稳定度为 3 462 次/mm,70[#] 基质沥青混合料的动稳定度为 1 624 次/mm,PCB 改性沥青混合料的动稳定度与基质沥青混合料相比提高了 113%,由于

PCB 通过其改性机理提高了基质沥青的黏度和稠度,使沥青混合料之间的结构力更强,从而提高了沥青混合料的抗车辙能力。

2.2 低温抗裂性试验

沥青路面的低温抗裂性是指沥青路面在低温条件下抵抗温度收缩而产生裂缝的能力。由于混合料中的沥青在低温环境下,内部会产生一定的温度应力,当温度大幅度下降时,沥青逐渐发硬并开始收缩,若温度应力的增长速度大于沥青混合料的应力松弛速度,则混合料的劲度模量将急剧增大,所产生的拉应力或拉应变会大于沥青混合料的抗拉强度,从而导致沥青面层开裂^[12-13]。

研究采用低温弯曲试验,将成型好的车辙板切割成 250 mm×30 mm×35 mm 的小梁试件,在试验温度(-10±0.5)℃条件下,以 50 mm/min 的固定加载频率对小梁试件进行加载,具体结果见表 9。

表 9 沥青混合料低温弯曲试验结果

混合料类型	试验条件	抗弯拉强度	最大弯拉应变	弯曲劲度模量
		R_B /MPa	$\epsilon_B/\mu\epsilon$	S_B /MPa
70 [#] 基质沥青混合料	-10℃,	7.33	2 236.31	3 277.72
PCB 改性沥青混合料	50 mm/min	7.92	2 615.62	3 027.96

由表 9 可知:PCB 改性沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯拉应变较基质沥青混合料有明显的提高,弯曲劲度模量有所下降,抗弯拉强度较基质沥青混合料提高了 8%,最大弯拉应变提高了 17%,劲度模量降低了 8.3%,PCB 改性沥青可以有效改善沥青混合料的低温抗开裂性能。

2.3 水稳定性试验

沥青路面在水侵蚀和冻融循环的作用下,水进入

沥青路面结构内部,使沥青与集料之间的黏附性降低,造成沥青从集料表面发生剥离,进而形成剥落、松散、坑槽等病害,严重影响了路面的性能^[14]。依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的规定,用浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、浸水飞散试验和 APA 浸水车辙试验分别评定两种沥青混合料的水稳定性,试验数据及计算结果如表 10~13 所示。

由表 10、11 可知:通过浸水马歇尔试验和冻融劈

表 10 沥青混合料浸水马歇尔试验结果

混合料类型	稳定度/kN		残留稳定度/%
	浸水前	浸水后	
70# 基质沥青混合料	13.41	11.65	86.9
PCB 改性沥青混合料	15.53	12.62	81.3

表 11 沥青混合料冻融劈裂结果

混合料类型	劈裂强度/MPa		冻融劈裂比/%
	未冻融	冻融	
70# 基质沥青混合料	1.116	0.979	87.72
PCB 改性沥青混合料	1.152	0.935	81.16

表 12 沥青混合料浸水飞散试验结果

混合料类型	试验前 平均质 量/g	试验后 残留质 量/g	浸水飞 散损 失/%
基质沥青混合料	1 189.2	1 121.4	5.7
PCB 改性沥青混合料	1 185.7	1 142.1	3.6

裂试验,PCB 改性沥青混合料的稳定度和未冻融劈裂强度与基质沥青相比都有所增大,但浸水残留稳定度 MS_0 和冻融劈裂比有所下降,说明 PCB 改性沥青混合料的水稳定性较基质沥青混合料有所下降。但表 12 浸水飞散试验得出,PCB 改性沥青混合料的浸水飞

散损失小于基质沥青混合料,因此对于 PCB 改性沥青混合料的水稳定性需进一步验证。

APA 车辙试验方法可以更加真实模拟现场荷载和环境状态,试验结果与现场车辙存在良好的相关性^[15]。通过浸水车辙深度、车辙比和试验过程中观察试件表面矿料的剥落情况,可更合理地评价沥青混合料的水稳定性^[16-17]。

由表 13 可知:APA 浸水车辙的深度明显大于 APA 车辙深度,由于水冲刷和孔隙水压力的联动作用,使得沥青从集料表面剥离,造成矿料的松散。PCB 改性沥青混合料 AC-13 的车辙深度和浸水车辙深度都明显小于基质沥青混合料 AC-13,同时在试验过程中发现,基质沥青混合料试件表面轮迹带范围剥落现象较 PCB 改性沥青混合料试件更为明显。综合以上试验结果可以认为 PCB 改性沥青混合料的水稳定性更优。

2.4 动态模量试验

依据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0738 方法分别制作 AC-13(热解炭黑改性沥青)、AC-13(基质沥青)混合料试件,采用基本性能试验机(SPT)进行单轴压缩动态模量试验。中国沥青路面设计规范推荐 70# 基质沥青和改性沥青混合料在 20℃、10 Hz 条件下的动态模量范围分别为 8 000~12 000、8 500~12 500 MPa,试验结果见表 14。

表 13 沥青混合料 APA 试验结果

混合料类型	试件编号	车辙深度/ mm	试件编号	浸水车辙 深度/mm	车辙比/ %
普通沥青混合 AC-13	A-1	4.595	B-1	5.333	85.38
	A-2	4.782	B-2	5.652	
	A-3	4.429	B-3	5.186	
	平均值	4.602	平均值	5.390	
PCB 改性沥青 混合料 AC-13	C-1	3.253	D-1	3.871	88.59
	C-2	3.434	D-2	3.846	
	C-3	3.696	D-3	4.003	
	平均值	3.461	平均值	3.906	

由表 14 可知:基质沥青混合料和 PCB 改性沥青混合料的动态模量分别为 9 056.2、10 932.2 MPa,在 规定范围内。PCB 改性沥青混合料 AC-13 的动态模量大于普通基质沥青混合料 AC-13 的动态模量。由此可见 PCB 改性沥青混合料有更好的抵抗车辆荷载变形的能力。

3 结论

(1) PCB 改性沥青混合料的车辙变形率和 APA 车辙深度均低于基质沥青混合料,动稳定度较基质沥青混合料有显著的提高,表明 PCB 改性沥青混合料的

表 14 沥青混合料动态模量试验结果

混合料类型	试件编号	试验温度/ ℃	加载频率/ Hz	动态模量/ MPa	平均值/ MPa
基质沥青 混合料	B-1	20	10	8 994.3	9 056.2
	B-2			9 171.5	
	B-3			9 002.8	
PCB 改性 沥青混合料	D-1	20	10	11 105.6	10 932.2
	D-2			10 743.1	
	D-3			10 843.7	

高温性能优于基质沥青；低温弯曲试验发现：PCB 改性沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯拉应变均有所提高，因此认为 PCB 改性沥青混合料的低温抗裂性优于基质沥青。

(2) 由沥青混合料水稳定性试验知，浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验与浸水飞散试验和 APA 浸水车辙试验结论相反，PCB 改性沥青混合料的 APA 浸水车辙与车辙比均优于基质沥青，同时试验过程中，基质沥青混合料试件表面轮迹带范围剥落现象较 PCB 改性沥青混合料试件更为明显。且 APA 浸水车辙试验方法可以更加真实模拟现场荷载和环境状态，可更合理地评价沥青混合料的水稳定性，因此认为 PCB 改性沥青混合料的水稳定性优于基质沥青混合料。

(3) PCB 改性沥青混合料 AC-13 的动态模量大于普通基质沥青混合料 AC-13 的动态模量，PCB 改性沥青混合料有更好的抵抗车辆荷载变形的能力。

参考文献：

[1] 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，2001.

[2] Park T, Lovell C W. Using Pyrolyzed Carbon Black (PCB) from Waste Tires in Asphalt Pavement (Part 1, Limestone Aggregate)[J]. Creep Tests, 1996.

[3] 吕伟民. 炭黑加劲沥青及其混合料[J]. 石油沥青, 1989 (1): 49-53.

[4] 姚祖康, 卡尔·莫尼史密斯. 用炭黑加劲的沥青混合料的性状[J]. 同济大学学报, 1987(1): 82-95.

[5] 郝培文, 刘红瑛. 炭黑改性沥青混合料低温抗裂性能的研究[J]. 石油沥青, 1993(4): 29-33.

[6] Li Chuangmin, Fan Ziran, Wu Shaopeng, et al. Effect of Carbon Black Nanoparticles from the Pyrolysis of Discarded Tires on the Performance of Asphalt and its Mixtures [J]. Applied Sciences, 2018, 8(4): 624.

[7] JT/T 860.7—2017 沥青混合料改性添加剂 第 7 部分：废旧轮胎热解炭黑[S].

[8] 李睿, 杨帆. 掺废轮胎热解再生炭黑的沥青制备工艺及技术性能探讨[J]. 石油沥青, 2018, 32(5): 59-66.

[9] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[10] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].

[11] 张兴友, 谭忆秋, 王哲人. 白炭黑改性沥青及其混合料的路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2005(7): 23-25, 40.

[12] 陈卓. 沥青路面低温缩裂的原因与防治[J]. 石油沥青, 2009, 23(1): 62-64.

[13] 张熙颖. 沥青混合料低温抗裂性能蠕变试验研究与分析[J]. 中外公路, 2007, 27(6): 177-179.

[14] 韩海峰, 吕伟民, 何桂平. 水作用下沥青混合料永久变形特性的表现形式[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 4-8.

[15] 沈佳, 王慧. APA 车辙试验方法的研究进展[J]. 中外公路, 2016, 36(2): 66-69.

[16] 邵腊庚, 刘亮, 李闯民. APA 沥青混合料高温浸水车辙试验研究[J]. 中南公路工程, 2005, 30(4): 70-73.

[17] 谢军, 李宇峙, 邵腊庚. 沥青混合料水稳定性 APA 试验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20 (2): 53-57.