

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.055

抗车辙剂对含再生粗集料沥青混合料性能影响研究

杜西江¹, 徐良¹, 胡靖^{2*}

(1. 中交一公局 第五工程有限公司, 北京市 100024; 2. 东南大学 智能运输系统研究中心)

摘要:采用再生集料替代沥青混合料中的天然集料具有巨大的经济潜力和环保优势,但其中的低强度水泥砂浆和砖块成分较天然集料更易在荷载作用下出现破坏,导致沥青混合料性能出现衰减,因此亟需探究改善含有再生集料沥青混合料性能的方法及其对沥青混合料性能的影响规律。该文选用富含聚乙烯 PE 的抗车辙剂,通过马歇尔配合比试验,分析不同抗车辙剂用量对再生集料沥青混合料的马歇尔力学指标、体积参数和沥青用量的影响;而后进一步探究抗车辙剂对再生集料沥青混合料的动稳定度、低温弯拉应变、冻融劈裂强度比和疲劳寿命的影响规律。试验结果表明:① 砖块成分对再生集料沥青混合料的马歇尔性能具有明显的负面影响,应在再生集料中控制其含量;② 富含 PE 抗车辙剂对提高再生集料沥青混合料的高温抗变形效果显著,同时也能在一定程度上改善再生集料沥青混合料的水稳定性、低温抗裂性和抗疲劳性能,具有良好的应用前景。

关键词:再生集料; 抗车辙剂; 沥青混合料; 路用性能

在过去的几十年中,中国传统建筑行业一直在消耗大量的不可再生资源。随着大批建筑构造物使用报废年限的临近,大量的建筑垃圾随之产生。常规的处理措施是简单掩埋处理,这种现象造成了极大的资源浪费和环境污染。近年来,工程界逐渐将眼光聚集如何科学、经济地二次利用这种建筑废弃物。通常而言,建筑垃圾主要包含了大量水泥混凝土块状物、水泥砂浆碎屑、少量的碎黏土砖和碎陶瓷等材料。由于这些成分也具有一定的强度,因此其在土木工程领域具有巨大的再利用潜力,其中的关键应用便是将处理后的建筑垃圾用作路基和沥青路面施工的再生集料。而将其再生应用在沥青混合料中成为近期道路工程研究的热点。由于再生集料中的水泥砂浆与砖块成分的抗压强度远小于天然集料,因此在沥青混合料中,再生集料的破碎现象比天然集料更加明显,导致沥青混合料性能出现衰减,因此亟需探究改善含有再生集料沥青混合料性能的方法。

抗车辙剂是以提高沥青路面抗车辙性能为主要功能的沥青混合料添加剂,一般由高分子聚合物、纤维等多种成分复合而成,具有良好的挤嵌、加筋、胶结以及弹性恢复等性能,可有效改善沥青混合料的路用性能。

在实际应用过程中,抗车辙剂具有施工要求简单、适用能力较强、效果突出以及性价比高等优点,为解决沥青路面病害,尤其是车辙病害提供了有效方案。

该文提出以抗车辙剂改善再生集料沥青混合料的思路,选用富含聚乙烯 PE 的抗车辙剂,通过马歇尔配合比试验,分析不同抗车辙剂用量对再生集料沥青混合料的马歇尔力学指标、体积参数和沥青用量的影响;而后进一步探究抗车辙剂对再生集料沥青混合料的动稳定度、低温弯拉应变、冻融劈裂强度比和疲劳寿命的影响规律,以期抗车辙剂在再生集料沥青路面中的推广应用提供参考与借鉴。

1 配合比设计

1.1 试验原材料

试验所用再生集料以建筑拆除固体废弃物中的废旧水泥混凝土为主要原材料,经过一系列破碎、筛分、除杂等集料加工工艺处理后的最终产品 RCA I,成分包含 91.3% 的纯再生混凝土集料和 8.7% 的砖质集料,其粒径为 4.75~19 mm。

同时作为试验对比集料,将纯再生混凝土集料和

收稿日期:2021-04-10(修改稿)

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20170671);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:2242020k30045)

作者简介:杜西江,男,工程师。E-mail:3592179643@qq.com

* 通信作者:胡靖,男,副教授。E-mail:hujingseu@126.com

砖质集料进行二次分拣,其中的纯再生混凝土集料作为 RCA II。根据 JTG E42—2005《公路工程集料试验

规程》,测试的再生粗集料 RCA I、RCA II 和天然辉绿岩粗集料性能如表 1 所示。

表 1 粗集料性能

项目	吸水率/ %	压碎值/ %	磨耗值/ %	针片状含 量/%	沥青黏附 等级/级	表观相对 密度
RCA I	4.12	24.7	28.7	7.8	4	2.31
RCA II	2.91	21.2	25.9	6.9	4	2.48
辉绿岩	0.60	14.9	11.5	2.7	5	2.85
技术要求	≤2.0	≤26	≤28	≤15	≥4	—

从表 1 可以看出:将再生粗集料 RCA I 中的砖质集料分离后,再生粗集料 RCA II 的性质略有改善。然而,两种再生粗集料的密度仍然比天然辉绿岩粗集料低得多。这主要是因为 RCA 粗集料中存在大量具有多孔结构的水泥附浆和砖质,增大了再生粗集料的吸水率;同时由于水泥附浆和砖质的强度较低,再生粗集料在混合、摊铺和压实过程中面临更高的压碎风险。总体来说,除吸水率外,两种再生粗集料基本满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

试验采用沥青结合料为 I—C 型 SBS 改性沥青,矿粉采用石灰岩,细集料采用天然辉绿岩,纤维采用聚氨酯纤维,其用量为混合料质量的 0.2%。抗车辙剂

为高分子聚合物聚乙烯 PE,其性能如表 2 所示,上述各原材料性能均满足规范要求。

表 2 抗车辙剂主要性能

聚合物 含量/%	表观密度/ (g·cm ⁻³)	熔融指数/[g· (10 min) ⁻¹]	直径/ mm	颜色	熔点/ ℃
≥90	0.94	4.2	2~3	黑色	≥92

参照以往研究经验,采用 30%(质量百分率)的再生集料替代相应粒径尺寸的天然辉绿岩粗集料,制备成型再生集料沥青混合料(RCAM—16),设计矿料级配如表 3 所示。

表 3 再生集料沥青混合料(RCAM—16)设计级配

级配	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	92.0	80.0	62.0	48.0	36.0	26.0	18.0	14.0	8.0
上限	100	90.0	76.0	60.0	34.0	20.0	13.0	9.0	7.0	5.0	4.0
合成	100	97.2	83.3	75.1	47.5	40.4	33.2	24.4	16.7	10.7	6.1

1.2 配合比设计

采用干拌法在沥青混合料中添加抗车辙剂,即将改性剂与配备集料先置于拌和锅中搅拌 60 s,以保证改性剂均匀分散,且充分裹覆粗集料;而后添加 SBS 改性沥青拌和 90 s,最后添加矿粉再拌和 90 s。拌和过程中严格控制拌和温度为 175~185℃。以常规马歇尔击实仪成型沥青混合料马歇尔试件,双面击实试件各 75 次,混合料成型温度控制为 160~165℃。

由于再生集料具有丰富的孔隙结构,其吸水率远高于天然集料,因此为保证熔融状态下的抗车辙剂能有效覆盖再生集料表面,选择抗车辙剂的用量为沥青混合料的 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%,远高于普通沥青混合料的常见用量(0.2%~0.6%)。

由于抗车辙剂用量较高,此时不能忽略其对马歇尔试验中各项体积参数的影响;同时抗车辙剂在沥青混合料拌和温度下处于熔融状态,能够自由流动,因此计算沥青混合料的马歇尔体积参数过程中,将抗车辙剂等同于 SBS 改性沥青一并考虑,具体的体积指标计算如式(1)~(4)所示:

$$\gamma_t = \frac{100}{\frac{P_s}{\gamma_s} + \frac{P_b}{\gamma_b} + \frac{P_r}{\gamma_r}} \quad (1)$$

$$VV = \left(1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_t}\right) \times 100 \quad (2)$$

$$VMA = \left(1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_{sb}} \times \frac{P_s}{100}\right) \times 100 \quad (3)$$

$$VFA = \frac{VMA - VV}{VMA} \times 100 \quad (4)$$

式中： γ_s 为沥青混合料最大理论密度； γ_s 为矿料有效密度； γ_b 为沥青相对密度； γ_r 为抗车辙剂相对密度； P_s 为混合料中矿料含量(%)； P_b 为混合料中沥青用量(%)； P_r 为混合料中抗车辙剂用量(%)； γ_f 为实测试件毛体积密度； γ_{sb} 为矿料合成毛体积密度； VV 为

试件空隙率(%)； VMA 为试件矿料间隙率(%)； VFA 为试件有效沥青饱和度(%)。

根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中的马歇尔配合比设计方法，结合马歇尔试验结果中各项体积指标和力学参数，确定不同抗车辙剂添加量的沥青混合料最佳沥青用量如表 4 所示。

表 4 抗车辙剂对沥青混合料(RCAM-16)马歇尔试验的影响

再生集料 RCA 种类	抗车辙剂 用量/%	最佳沥青 用量/%	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	空隙率/ %	沥青饱 和度/%	矿料间 隙率/%	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)
RCA I (8.7%砖质)	0	6.1	2.328	3.9	69.4	14.58	10.62	36.5
	0.5	6.0	2.331	3.9	68.3	14.32	10.95	36.1
	1.0	5.7	2.303	4.1	67.5	14.01	13.38	33.2
	1.5	5.4	2.273	4.1	67.0	13.82	13.76	29.0
	2.0	5.2	2.195	4.2	66.5	13.66	14.84	24.0
RCA II (0%砖质)	0	5.9	2.371	3.7	71.1	14.92	11.33	34.8
	0.5	5.8	2.315	3.9	70.3	14.73	12.45	34.2
	1.0	5.5	2.304	3.9	68.7	14.58	14.29	30.5
	1.5	5.2	2.268	4.0	68.1	14.18	16.12	24.9
	2.0	4.9	2.211	4.1	67.2	13.94	16.72	22.8
标准				3~5	65~75	>13.5	>8.0	20~40

由表 4 可以看出：相比于 RCA I 再生集料，采用不含砖质集料的 RCA II 替代天然粗集料时，沥青混合料的最佳沥青用量更低，也具有更高的马歇尔稳定度，同时沥青混合料的毛体积密度更高。此外，RCA I 相比于 RCA II 具有更低的 VMA ，表明虽然再生集料中的水泥砂浆成分能部分吸收沥青材料，但更多的沥青材料能被砖质所吸收。

另一方面，随着抗车辙剂的增加，含再生集料沥青混合料的最佳沥青用量逐渐降低，空隙率逐渐增大，马歇尔稳定度逐渐提高，而毛体积密度不断降低。这是由于抗车辙剂在沥青混合料成型过程融化，涂覆粗集料表面，一部分抗车辙剂填充嵌挤到了集料骨架中的空隙，挤占沥青填充空间，降低了沥青用量；同时也产生了聚合物的加筋作用，强化了沥青混合料中胶结体系内聚力和交联作用，从而提高和改善了沥青混合料马歇尔试件的力学性能。

2 路用性能试验结果与分析

根据马歇尔试验结果，选用 100%天然集料沥青

混合料、含 RCA I 沥青混合料、含 RCA I + 2% 抗车辙剂沥青混合料、含 RCA II 沥青混合料和含 RCA II + 2% 抗车辙剂沥青混合料作为研究对象，探究抗车辙剂对含再生集料沥青混合料路用性能的影响规律。

2.1 高温稳定性

在再生沥青混合料压实过程中容易破碎粗集料，削弱了混合料中粗集料骨架结构的稳定性，从而可能影响再生集料沥青混合料的高温稳定性。因此，有必要深入研究含再生集料沥青混合料 RCAM-16 的高温抗变形特征以及抗车辙剂对其的改善效果。

成型 300 mm × 300 mm × 50 mm 标准车辙板试件，并固定于标准的车辙板模具中，用于后续高温车辙试验。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》，分别设定试验温度为 60、70 °C，橡胶块接触压力为 0.70 MPa，试验时间为 60 min，沥青混合料的车辙试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知：60 °C 车辙试验中，含两种不同再生集料的沥青混合料的动稳定度均高于 100%天然集料沥青混合料，同时动稳定度均大于 3 000 次/min，表明再生粗骨料按一定比例取代天然粗骨料，沥青混合料

表5 抗车辙剂对沥青混合料(RCAM-16)

抗车辙性能的影响

混合料种类	动稳定度/(次·mm ⁻¹)		动稳定度 比/%
	60℃	70℃	
100%天然集料	3 324	1 031	31.0
RCA I	3 915	1 147	35.9
RCA I + 2%ARA	10 343	4 033	38.9
RCA II	4 112	1 488	36.2
RCA II + 2%ARA	10 589	4 219	39.8

的高温抗变形能力会有一定程度改善,这主要是由于再生集料表面相比天然骨料粗糙,集料间的摩擦力更大,不容易产生错动,沥青混合料在高温条件下仍表现出良好的结构强度和抗变形能力,基本可以满足夏季高温重载地区道路的使用要求。

同时,随着车辙试验温度的升高,5种沥青混合料的动稳定度均呈现明显的下降趋势,且由于5种沥青混合料所用的集料与添加抗车辙剂不同,动稳定度的下降幅度也呈现出一定差异。即随着试验温度的升高,天然集料沥青混合料的高温抗车辙性能表现最差,RCA I 沥青混合料的高温稳定性次之,RCA II 沥青混合料稍高,添加2%抗车辙剂的RCA I 沥青混合料有所改善,添加2%抗车辙剂的RCA II 沥青混合料的动稳定度比最大,说明剔除再生集料中的砖质能一定程度改善沥青混合料的高温稳定性,另一方面也表明抗车辙剂能显著提高再生集料沥青混合料的高温抗变形能力。

2.2 低温抗裂性

沥青路面的裂缝问题一直是影响其耐久性能的主要病害。试验采用小梁三点弯曲试验研究再生集料沥青混合料RCAM-16的低温抗裂性能,小梁试件由标准车辙板试件切割而成,尺寸为250 mm×30 mm×35 mm。试验温度设置为-10℃,加载速率设置为50 mm/min。分别对4种不同组成的再生集料沥青混合料和100%天然集料沥青混合料试件,进行低温小梁弯曲试验,以破坏弯拉应变作为其低温抗裂性的评价指标,试验结果如图1所示。

由图1可以看出:天然集料沥青混合料的低温破坏应变大于两种再生集料沥青混合料,说明沥青混合料低温性能随再生粗骨料掺入而降低,其原因主要是再生粗骨料中的水泥砂浆、砖块的强度低,抗拉能力较弱,低温弯曲变形时最先发生破坏;另一方面,采用

RCA II 再生粗集料制备的沥青混合料比采用 RCA I 再生粗集料具有更高的低温破坏应变,表明再生集料中砖质集料的增加对沥青混合料RCAM-16的低温抗裂性具有不利影响,其主要原因是再生集料中砖质成分的抗压强度远小于水泥砂浆。

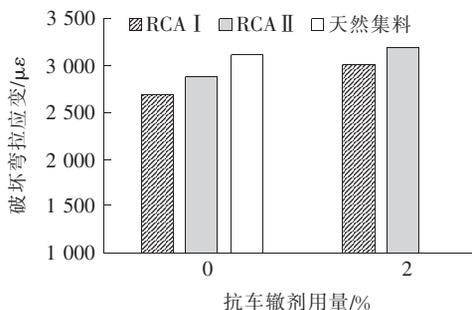


图1 低温小梁弯曲试验结果

同时随着抗车辙剂的添加,两种再生集料沥青混合料RCAM-16的低温破坏应变呈逐渐上升趋势。添加2%抗车辙剂后,RCA II 再生沥青混合料的低温破坏应变提高了308 με,RCA I 再生沥青混合料的低温破坏应变提高了314 με,两种再生集料沥青混合料的低温破坏应变基本达到或超过天然集料混合料。这是因为抗车辙剂有一部分聚合物纤维成分,对沥青混合料起到加筋、增韧、增强作用,从而可以在一定程度上改善沥青混合料的低温抗裂性。

2.3 水稳定性

由于再生集料中的水泥砂浆和砖质中含有较多的二氧化硅,在一定程度上会影响沥青与再生集料的黏附性能,因此必须重视再生集料沥青混合料的抗水损害能力;同时为了进一步分析抗车辙剂对再生集料沥青混合料RCAM-16的水稳定性作用,根据JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,分别进行了冻融劈裂试验和浸水马歇尔试验,以残留稳定度MSR和冻融劈裂比TSR作为评价指标,试验结果如图2、3所示。

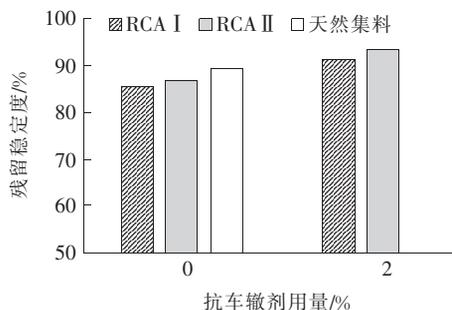


图2 残留稳定度试验结果

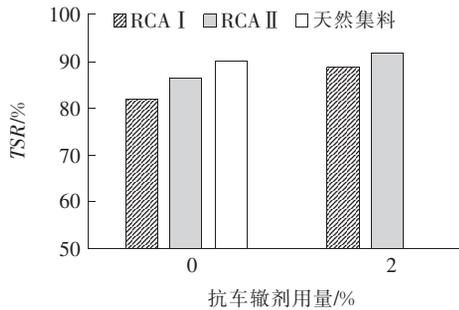


图 3 冻融劈裂强度比试验结果

由图 2、3 可知:天然集料沥青混合料的水稳定性能优于两种再生集料沥青混合料,而采用 RCA II (剔除砖质)再生粗集料制备的沥青混合料比采用 RCA I 再生粗集料具有更高的残留稳定度 MSR 和冻融劈裂比 TSR。与 RCA I 相比,剔除砖质集料后的 RCA II 再生粗集料为沥青混合料提供了更好的水稳定性。此外,RCA II 沥青混合料的 MSR 和 TSR 分别为 86.81%和 85.98%,而 RCA I 沥青混合料的 MSR 和 TSR 分别为 85.67%和 81.34%。显然,再生集料沥青混合料 RCAM-16 基本满足 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》中潮湿地区沥青混合料残留稳定度(>85%)和冻融劈裂比(>80%)的技术要求。结果表明,再生集料沥青混合料 RCAM-16 基本可用于潮湿地区。

同时,对于两种未添加抗车辙剂的再生集料沥青混合料,其 MSR 和 TSR 值基本都处于规范要求下限的附近。但当使用抗车辙剂进行混合料改性后,其水稳定性能均有了一定程度的改善。添加 2% 抗车辙剂后,RCA II 再生沥青混合料的 MSR 值提高到 93.49%,TSR 值提高到 91.57%;而 RCA I 再生沥青混合料的 MSR 值提高到 91.32%,TSR 值提高到 88.43%,表明添加抗车辙剂能在一定程度上改善再生集料沥青混合料的水稳定性。这是因为熔融状态车辙剂有效填充了再生集料表面的空隙结构,改善了沥青与再生集料之间的黏附性,能阻止水分子进入沥青与再生集料之间的界面区域,从而提高了沥青混合料的整体性,进而改善其水稳定性能。

2.4 抗疲劳性能

沥青路面承受着交通载荷和环境条件的重复作用,因此沥青混合料应具有良好的抗疲劳性能,以抵抗沥青路面裂缝的产生。根据 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,通过在 15℃ 下进行小梁三点弯曲测试,以评估 RCAM-16 的疲劳性能。

小梁试件尺寸为 250 mm×40 mm×40 mm,以频率为 10 Hz、半正弦波形荷载来模拟沥青路面的车辆作用,应力比选择为 0.5、0.4 和 0.3,疲劳寿命试验结果图 4 所示。

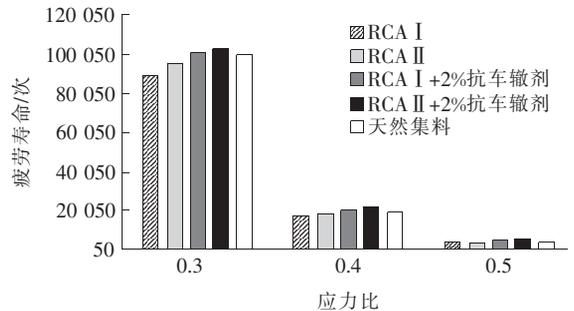


图 4 疲劳试验结果

从图 4 可以看出:随着应力比从 0.3 增加到 0.5,沥青混凝土 RCAM-16 的疲劳寿命急剧下降。应力比相同时,RCA I 沥青混合料的疲劳寿命次数最小,RCA II 沥青混合料的疲劳寿命次数次之,天然集料沥青混合料的疲劳寿命次数稍好,添加 2% 抗车辙剂的 RCA I 沥青混合料的疲劳寿命次数有所改善,而添加 2% 抗车辙剂的 RCA II 沥青混合料的疲劳寿命次数最大,表明添加抗车辙剂能提高再生集料沥青混合料的抗疲劳性能,且明显优于天然集料沥青混合料。

这是因为所添加的抗车辙剂具有良好的胶结作用,能够促进沥青与集料的结合,提高沥青黏附性;同时,抗车辙剂中的纤维使沥青、集料处于三维网状结构中,加强了沥青胶浆与集料之间的连接,在疲劳作用加载过程中,再生集料沥青混合料产生了弹性形变和剪切流动变形,当疲劳作用卸载时,弹性形变完全恢复,并且在纤维加筋的作用下,剪切流动变形也有所恢复,增强了再生集料沥青混合料的自愈能力,从而提高了其抗疲劳性能。

2.5 经济性分析

根据 5 种沥青混合料的配比情况,结合各类原材料的现有市场单价,进行单位质量条件下沥青混合料的成本分析,具体分析结果如表 6 所示。

由表 6 可知:添加 2% 抗车辙剂后,再生集料沥青混合料仅比天然集料沥青混合料造价高 4.3%~5.3%,同时添加抗车辙剂的再生集料沥青混合料的路用性能远优于天然集料沥青混合料。因此虽然添加抗车辙剂稍微提高了再生集料沥青混合料的造价,但是综合沥青混合料路用性能的改善效果以及其显著的环境意义,其成本的提高幅度应认为是可以接受的。

表6 再生集料沥青混合料成本分析

混合料种类	1 t 混合料所需天然集料量/kg	天然集料单价/(元·t ⁻¹)	1 t 混合料所需再生集料量/kg	再生集料单价/(元·t ⁻¹)	1 t 混合料所需沥青用量/kg	SBS 改性沥青单价/(元·t ⁻¹)	1 t 混合料所需抗车辙剂用量/kg	抗车辙剂单价/(元·t ⁻¹)	1 t 沥青混合料材料总成本/元	与天然集料沥青混合料成本比/%
天然集料	948	400	0	50	51.2	4 000	0	7 500	584.4	100.0
RCA I	659	400	283	50	57.4	4 000	0	7 500	508.0	86.9
RCA I + 2%ARA	653	400	279	50	48.4	4 000	19.6	7 500	615.6	105.3
RCA II	661	400	283	50	55.7	4 000	0	7 500	501.4	85.7
RCA II + 2%ARA	655	400	281	50	46.7	4 000	19.6	7 500	609.5	104.3

3 结论

(1) 砖质集料与沥青黏附性较差,强度低,对再生集料沥青混合料的马歇尔性能具有明显的负面影响,建议在路面沥青混合料中慎用。即随着砖质集料的出现,再生集料沥青混合料的马歇尔稳定度降低,空隙率增大,流值增大,最佳沥青用量提高。

(2) 添加抗车辙剂后,再生集料沥青混合料的 60℃动稳定度提高了 1 倍以上,且温度升高 10℃后,再生集料沥青混合料的残留动稳定度也明显提高。说明抗车辙剂能有效地改善再生集料沥青混合料的高温抗车辙能力。

(3) 不含砖质的再生集料沥青混合料的水稳定性优于含有砖质的再生集料;且添加抗车辙剂后,再生集料沥青混合料有一定程度的改善。4 种沥青混合料的水稳定性能为 RCA II + 2%抗车辙剂 > RCA I + 2%抗车辙剂 > RCA II > RCA I,均能满足潮湿地区沥青路面的使用要求。

(4) 不含抗车辙剂的再生集料沥青混合料的低温抗裂性和抗疲劳性能都低于添加抗车辙剂后的沥青混合料,但基本都能满足冬冷地区的技术要求。以低温弯曲破坏应变为指标,4 种再生集料沥青混合料的低温性能依次为 RCA II + 2%抗车辙剂 > RCA I + 2%

抗车辙剂 > RCA II > RCA I;以疲劳寿命次数为指标,相同应力条件下,4 种再生集料沥青混合料的抗疲劳性能依次为 RCA II + 2%抗车辙剂 > RCA I + 2%抗车辙剂 > RCA II > RCA I。

根据试验结果可得,添加富含聚乙烯 PE 抗车辙剂可有效改善再生集料沥青混合料的路用性能,其具有良好的实体工程应用前景。

参考文献:

- [1] 中国建筑垃圾资源化产业技术创新战略联盟. 中国建筑垃圾资源化产业发展报告(2014 年度)[Z], 2015-02-23.
- [2] 王罗春, 蒋路漫, 赵由才. 建筑垃圾处理与资源化[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [3] 彭超杰. 再生粗骨料沥青混凝土性能研究[D]. 华南理工大学硕士学位论文, 2017.
- [4] 侯月琴, 纪小平, 张文刚, 等. 含建筑垃圾再生骨料的沥青稳定碎石的性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013(10).
- [5] 王知乐. 利用废旧建筑垃圾制备沥青混合料的试验研究[J]. 公路, 2009(7).
- [6] 程永春, 杨金生, 马健生. 玄武岩纤维与抗车辙剂复合改性沥青混合料路用性能[J]. 科学技术与工程, 2017(32).
- [7] 成高立, 李卓琳, 罗要飞. 抗车辙剂对沥青混合料高温性能的影响分析[J]. 中外公路, 2018(2).
- [8] 路彦, 张荣辉, 傅轶, 等. 一种低熔点抗车辙剂对沥青混合料性能的影响[J]. 中外公路, 2012(5).