

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.065

基于博纳帝再生设备的上面层再生混合料性能研究

刘燕燕¹, 裘秋波¹, 李政², 杨尔军¹, 周韡^{3*}

(1. 浙江顺畅高等级公路养护有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江金丽温高速公路有限公司;
3. 苏交科集团股份有限公司)

摘要:该文目的是研究基于博纳帝再生设备生产的上面层再生混合料的抗裂性能。以30%RAP 掺量的 AC-16 型沥青混合料为主要研究对象, 采用低温小梁试验、半圆弯曲试验、间接拉伸疲劳试验分别对再生混合料抵抗低温裂缝、反射裂缝及疲劳裂缝的能力进行了研究, 并与新拌混合料进行了对比。结果表明: 博纳帝再生设备生产的上面层再生混合料的低温抗裂性能相对较差; 相比新拌混合料, 抗反射裂缝能力有小幅下降, 但随着路龄的增加, 其抗裂性能衰减较快; 其疲劳裂缝敏感度增大, 疲劳寿命降低, 但变化并不明显。采用博纳帝再生设备生产的上面层再生混合料抗裂能力有所保障, 但对低温环境比较敏感。

关键词: 厂拌热再生; 上面层; 抗裂性能; 博纳帝再生设备

随着厂拌热再生技术越来越多地应用在公路养护及改造中, 厂拌热再生混合料的性能受到越来越多的关注。为实现废旧沥青混合料的高效加热, 提高再生混合料级配的稳定性, 意大利博纳帝公司开发了第三代热再生设备 RED 再生滚筒。当生产再生混合料时, 将新集料与 RAP 按设定的比例一起送入 RED 再生滚筒, 由于挡料板的特殊设计, RAP 不会与火焰直接接触, 加热后经过拌和站二次筛分进入各热料仓, 从而提高级配与性能的稳定性。

在许多地方标准中规定厂拌热再生混合料不宜用于高速公路以及一级公路的表面层, 主要原因是上面层对混合料级配稳定性及性能要求较高。相对于双滚筒再生设备, RED 再生设备的级配稳定性有明显优势, 但目前在中国的应用较少。基于博纳帝再生设备的上面层再生混合料性能有必要进一步验证。

裂缝是高速公路的主要病害形式, RAP 料的加入

对混合料的抗裂性能有一定的影响。目前中国采用的厂拌热再生上面层的 RAP 料掺量普遍为 20% 左右, 相比于新拌混合料, 并没有经济性优势。该文基于新型 RED 滚筒厂拌热再生设备, 以 AC-16 上面层混合料类型为研究对象, 采用 30% 的 RAP 掺量, 重点对其抵抗低温裂缝、反射裂缝及疲劳裂缝的能力进行研究与验证, 为厂拌热再生上面层沥青混合料的应用提供参考和依据。

1 材料与级配

以 30%RAP 掺量的 AC-16 上面层混合料为研究对象。其中铣刨旧料分为粗、细两档, 均为玄武岩, 铣刨料抽提筛分结果如表 1 所示。粗、细两档铣刨料采用 1:1 的掺配比例。

表 1 铣刨旧料抽提试验结果

旧料规格/mm	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											油石比/%
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
8~18	100	98.8	96.4	79.8	33.4	24.7	19.5	16.5	12.1	8.9	6.0	3.23
0~8	100	100	100	100	92.2	67.4	46.0	34.2	23.0	13.8	8.8	6.45

新加集料为玄武岩, 新加沥青为 SBS 改性沥青, 相关性能如表 2 所示。

收稿日期: 2019-09-06

作者简介: 刘燕燕, 女, 大学本科, 高级工程师, E-mail: lygzhouw@126.com

* 通信作者: 周韡, 男, 博士, 工程师, E-mail: lygzhouw@126.com

表 2 SBS 改性沥青性能试验结果

检测项目	单位	实测值	标准要求
针入度(25℃,100 g,5 s)	0.1 mm	59	50~70
延度(5℃,5 cm/min)	cm	33	≥25
软化点(环球法)	℃	88	≥65
25℃弹性恢复	%	84.9	不小于 80
相对密度		1.029	
粗集料与沥青的黏附性	级	5	≥5

30%RAP 掺量 AC-16 再生混合料级配如表 3 所示,总沥青用量为 5.0%。

表 3 30%RAP 掺量 AC-16 再生混合料级配

筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%	筛孔尺寸/ mm	通过百分 率/%
19	100	1.18	20.2
16	97.8	0.6	15.7
13.2	89.5	0.3	11.1
9.5	69.2	0.15	8.0
4.75	41.9	0.075	6.3
2.36	28.2		

2 试验方法

为了验证采用博纳帝再生设备的再生混合料抗裂性能,该文采用拌和站直接生产的混合料作为研究对象,分别对其低温抗裂性能、抗反射裂缝性能与抗疲劳开裂性能进行研究。

2.1 低温抗裂性能

低温性能表征的是沥青混合料抵抗低温收缩裂缝的能力,再生沥青混合料中含有较高比例的老化沥青,这对混合料的低温性能存在一定的影响。因此,需要对再生沥青混合料的低温性能进行评价。该文采用低温小梁试验方法对 30%RAP 料掺量的 AC-16 博纳帝再生混合料的低温性能进行研究。

2.2 抗反射裂缝性能

上面层厂拌热再生混合料中含有较多的老化沥青,沥青的延度随着老化程度的增加呈现下降趋势,反映到混合料性能上就是抗反射裂缝能力的下降。该文采用半圆弯曲试验(SCB 试验)评价博纳帝厂拌热再生混合料抵抗反射裂缝的能力。

(1) 试验方法

试验在 UTM 试验机上进行,采用三点加载模式,采用 25.4、38 mm 两种开口深度的试件进行试验。在室内成型 4 个试件,分别切割为半圆,同一试件切割出的半圆试件中心底部分别切割 25.4、38 mm 的切缝。最终制备 4 个 25.4 mm 切缝与 4 个 38 mm 切缝试件,共 8 个半圆试件。试验温度为 25℃,加载速率为 0.5 mm/min,分别测定不同开口深度试件条件的累积能量。

(2) 评价指标

采用 J_c 指标评价沥青混合料的抗裂能力,按以下公式计算:

$$J_c = \frac{-1}{b} \cdot \frac{dU}{da}$$
 (1)

式中: J_c 为临界应变能(kJ/m²); b 为试件厚度(m); a 为开口深度(m); U 为试件破坏时的累积能量(kJ); dU/da 为不同开口深度条件下破坏时累积能量的变化(kJ/m)。

试件破坏时的累积能量 U 按下式进行计算。

$$U = \sum_{i=0}^n [(x_{i+1} - x_i)y_i + 0.5(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)]$$
 (2)

式中: U 为试件破坏时的累积能量,即荷载—跨中挠度曲线下的面积; x_i 、 x_{i+1} 分别为第 i 、 $i+1$ 点的竖向位移(mm); y_i 、 y_{i+1} 分别为第 i 、 $i+1$ 点的荷载(kN)。

2.3 抗疲劳开裂性能

上面层沥青路面在车辆荷载的长期作用下通常会产生产生疲劳开裂现象。该文采用间接拉伸疲劳试验对 30%RAP 料掺量的 AC-16 博纳帝再生混合料的抗疲劳开裂性能进行研究。

(1) 强度试验

首先采用强度试验测试混合料的最大破坏荷载和抗拉强度,为疲劳试验施加不同的应力水平提供计算依据。试验采用 UTM-100 试验仪进行加载试验,每个应力比选取 4~6 个试件进行试验,以试件完全断裂作为判断疲劳失效的标准,具体试验参数如表 4 所示。

表 4 劈裂疲劳试验参数

总加载时 间/s	间歇时 间/s	初始最小 应力/MPa	试验温度/ ℃
0.1	0.4	0.1	15

(2) 疲劳试验

根据再生混合料试件的劈裂强度试验结果,选取 0.2、0.4、0.6 共 3 级应力比的应力值作为加载应力,

间接拉伸强度与破坏时最大荷载之间的计算公式如下：

$$R_T=\frac{2P_T}{\pi tD}\tag{3}$$

式中： R_T 为间接拉伸强度； P_T 为试件破坏时的最大荷载； D 为试件直径； t 为试件厚度。

试件破坏时的荷载作用次数定义为试件的疲劳寿命 N_f ，用来评价沥青混合料的疲劳抗裂性能。根据不同应力比条件下试件疲劳性能拟合疲劳方程：

$$\ln N_f=a\cdot\frac{\sigma}{R_T}+b\tag{4}$$

式中： σ 为施加的拉应力； R_T 为强度试验测得的间接拉伸强度； σ/R_T 为应力比，代表对试件施加的应力水平； a 和 b 为回归得到的参数。

3 试验结果及分析

3.1 低温抗裂性能

低温小梁试验结果如表 5 所示。

表 5 30%RAP 掺量 AC-16 再生沥青混合料低温性能试验结果

试件 编号	最大 荷载/ kN	跨中 挠度/ mm	抗弯拉 强度/ MPa	劲度 模量/ MPa	破坏 应变/ $\mu\epsilon$	规范 要求/ $\mu\epsilon$
1	1.669	0.59	12.80	4 666.2	2 743.5	$\geq 2\ 500$
2	1.634	0.56	13.97	5 314.2	2 629.2	
3	1.536	0.55	12.24	4 976.8	2 458.5	
4	1.511	0.59	13.84	5 391.5	2 566.5	
5	1.449	0.57	10.88	4 242.6	2 565.0	
6	1.438	0.59	11.77	4 288.9	2 743.5	
平均	1.540	0.58	12.58	4 813.4	2 617.7	

从表 5 可以看出：30%RAP 料掺量条件下，AC-16 抗弯拉强度为 12.58 MPa。破坏应变为 2 617.7 $\mu\epsilon$ 。虽然满足了技术要求，但性能普遍偏低，表明 RAP 料的掺入对低温性能具有比较大的影响。

3.2 抗反射裂缝性能

半圆弯曲(SCB)试验过程中获得的荷载与位移随时间的变化曲线如图 1 所示。

从图 1 可以看出：试验过程中是以恒定的位移变化率加载，传感器测定施加的荷载值。从加载过程可以看出，荷载都是先增大后减小，存在峰值。由于是位移控制的加载方式，可以解释为随着压头逐渐向下移

动，其对试件施加的荷载逐渐增大，裂缝处存在应力集中，裂缝扩展缓慢积累，到达峰值时，裂缝失效，裂缝出现明显扩展，其抵抗荷载的能力逐渐衰减。

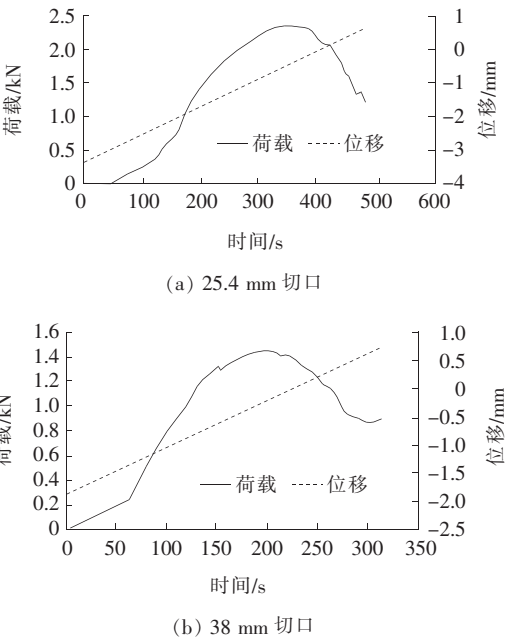


图 1 30%RAP 掺量 AC-16 再生沥青混合料荷载—位移—时间曲线

在恒定的位移变化率加载过程中，实际上是一个对试件做功的过程，而试件的响应主要是裂缝的扩展，是其断裂能耗散的过程。通过式(2)计算这一能量来表征其抵抗裂缝扩展的能力。计算结果见表 6、7。

对比未掺加 RAP 料的新拌 AC-16 混合料试件与使用较长一段时间的 AC-16 路面取芯试件的应变能 J_c ，如图 2 所示。其中 AC-16-30%表示 RAP 料掺加量为 30%的厂拌热再生新拌和成型试件，AC-16-5Y 与 AC-16-10Y 分别表示使用了 5 年与 10 年的未掺 RAP 料的 AC-16 路面取芯试件。

从图 2 可以看出：对比新拌混合料成型的试件，掺入 RAP 料后，其抗裂性能有所下降，但下降幅度比较小。表明对于厂拌热再生，其初始的抗反射能力基本能够达到全新 AC-16 混合料。但随着路龄的增加，未掺 RAP 料的 AC-16 路面其抗裂性能出现了较大的衰减。表明由于沥青的不断老化，路面的抗反射能力在使用过程中会不断衰减。因此，厂拌热再生路面的耐久性是需要重点关注的问题。

3.3 抗疲劳开裂性能

30%RAP 掺量 AC-16 再生沥青混合料间接拉伸强度试验结果如表 8 所示。

表 6 30%RAP 掺量 AC-16 再生沥青混合料不同切口深度 SCB 试验结果

试件 编号	切口深度 25.4 mm					切口深度 38 mm				
	峰值 荷载/ kN	峰值 位移/ mm	抗弯拉 强度/ MPa	达到峰 值时能 量/J	断裂能/ (J·m ⁻²)	峰值 荷载/ kN	峰值 位移/ mm	抗弯拉 强度/ MPa	达到峰 值时能 量/J	断裂能/ (J·m ⁻²)
1	1.86	2.17	1.42	1.38	430.66	0.86	1.42	0.66	0.72	223.95
2	2.31	1.86	1.71	1.69	514.46	1.56	1.66	1.15	0.93	282.90
3	1.57	1.18	1.23	1.76	567.79	1.53	1.12	1.22	0.93	303.74
4	2.18	3.01	1.61	2.03	609.51	1.45	1.66	1.08	1.25	379.61
平均	1.98	2.06	1.49	1.72	530.61	1.35	1.47	1.03	0.96	297.55

表 7 30%RAP 掺量 AC-16 再生沥青混合料临界应变能

试件 编号	切口深 度/mm	试件厚 度/mm	达到峰值 时能量/J	临界应变能 J_c / (kJ·m ⁻²)
1	38.0	44.0	0.72	1.19
	25.4	44.0	1.38	
2	38.0	45.0	0.93	1.33
	25.4	45.0	1.69	
3	38.0	42.0	0.93	1.55
	25.4	42.5	1.76	
4	38.0	45.0	1.25	1.36
	25.4	45.6	2.03	
平均				1.36

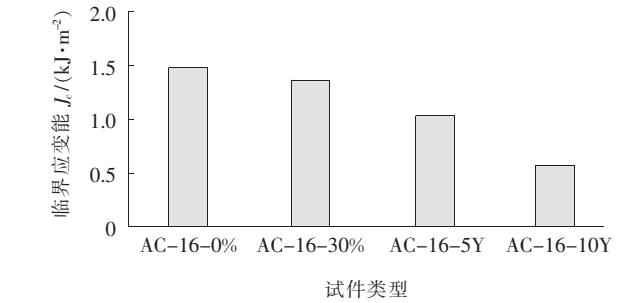


图 2 不同试件临界应变能

根据间接拉伸强度试验结果,进行劈裂疲劳试验。疲劳试验过程中记录试件的轴向变形位移,获得试件轴向位移随循环加载次数的变化曲线。应力比为 0.4 的位移曲线如图 3 所示,位移曲线随加载次数的变化呈横向反 S 形状。

表 8 AC-16 间接拉伸强度试验结果

试件高度/mm	最大荷载 P_T /kN	间接拉伸强度 R_T /MPa
45	23.11	2 182.611
41	17.89	1 854.451

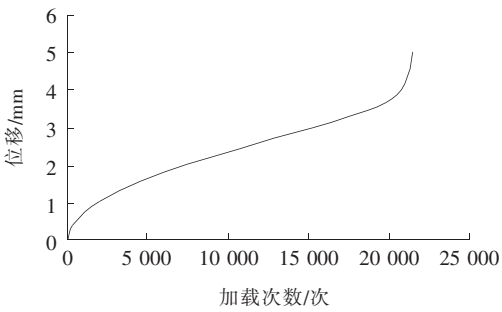


图 3 轴向位移随加载次数变化曲线(应力比:0.4)

根据试件位移变化曲线的第二个反弯点来确定试件的疲劳寿命。获得不同应力比条件下的疲劳次数如表 9 所示。

表 9 AC-16 不同应力比条件下的疲劳次数

应力比	疲劳次数/次	应力比	疲劳次数/次
0.2	62 500	0.6	3 350
0.4	18 750		

疲劳寿命取对数作为纵坐标,应力比为横坐标,绘制得到的疲劳曲线如图 4 所示。并拟合得到线性疲劳方程,如表 10 所示。

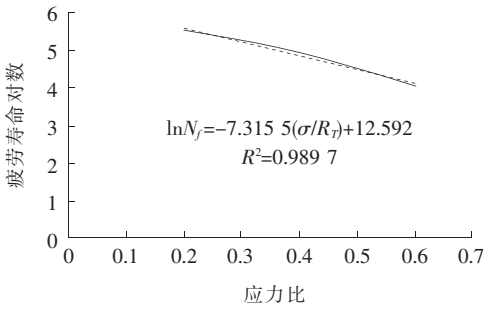


图 4 30%RAP 掺量 AC-16 疲劳寿命曲线

图 4 的线性疲劳方程中,斜率 a 表征材料的疲劳寿命对应力水平的敏感性, a 的绝对值越大,材料疲劳

寿命对应力水平越为敏感;而截距 b 则与材料的疲劳寿命有关, b 值越大,相同应力水平条件下材料的疲劳寿命越大。为便于分析 30%RAP 掺量 AC-16 混合料疲劳性能,将疲劳试验结果与间接拉伸强度相当的新拌 AC-16 混合料疲劳试验结果相比较,分析掺加 RAP 料后疲劳性能的变化。新拌 AC-16 混合料疲劳试验结果如表 11、12 所示。

表 10 AC-16 混合料间接拉伸疲劳试验结果

应力比	疲劳次数/次	疲劳次数对数	疲劳方程
0.2	62 500	11.043	$\ln N_f = -7.315\,5(\sigma/R_T) + 12.592$ $R^2 = 0.989\,7$
0.4	18 750	9.839	
0.6	3 350	8.117	

表 11 AC-16 新拌混合料间接拉伸疲劳试验结果

应力比	疲劳次数/次	疲劳次数对数	疲劳方程
0.2	69 500	11.149 08	$\ln N_f = -6.656\,1(\sigma/R_T) + 12.612$ $R^2 = 0.983\,8$
0.4	25 500	10.146 43	
0.6	5 010	8.519 191	

表 12 AC-16 新拌混合料与再生混合料疲劳方程对比

$ a $			b		
再生	新拌	变幅/%	再生	新拌	变幅/%
7.315 5	6.656 1	9.91	12.592	12.612	0.16

从表 10、11 可以看出:掺加 RAP 料后,各应力比条件下的疲劳次数均有降低;从表 12 的新拌混合料和再生混合料的疲劳试验结果对比中可以看出:表征疲劳敏感度的 $|a|$ 值在掺加 RAP 料后有所增大,但变动幅度小于 10%,表征疲劳寿命的 b 值在掺加 RAP 料后有所减低,变幅只有 0.16%,说明在掺加 30%RAP 料后,采用博纳帝再生设备生产再生混合料疲劳寿命有一定保证。

4 结论

- (1) 针对博纳帝再生设备生产的 30%RAP 掺量的 AC-16 型上面层沥青混合料的抗裂性能进行了评价与分析。
- (2) RAP 料的掺入对低温抗裂性能具有比较大的影响,不宜在低温地区使用。
- (3) 对比新拌混合料,掺入 30%RAP 料后,AC-16 抗反射裂缝能力有所下降,但下降幅度比较小。但随着路龄的增加,其抗裂性能将出现较快的衰减。
- (4) 对比新拌混合料,掺加 30%RAP 料后,疲劳敏感度增大,疲劳寿命降低,但变化并不明显。

参考文献:

[1] 黄晓明,赵永利. 沥青路面再生利用理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2014.

[2] 刘振丘. RAP 回收工艺及热再生沥青混合料路用性能关键影响因素研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2015.

[3] 鲍世辉. 高旧料掺量再生沥青混凝土配合比设计研究[D]. 东南大学硕士学位论文,2015.

[4] 曾俊,肖高霞,罗志刚. 沥青混合料水稳定性试验评价方法综述[J]. 公路交通技术,2011(2).

[5] 王欣,何文锋. 旧沥青混合料的检测及其性能评价[J]. 广东交通科技,2003(3).

[6] 朱忠林,岳作强. 回收沥青路面(RAP)材料的分类及其评价方法[J]. 现代交通技术,2009(6).

[7] 邱隆亮. SBS 改性沥青老化与再生机理研究[D]. 大连理工大学硕士学位论文,2012.

[8] 耿九光. 沥青老化机理及再生技术研究[D]. 长安大学博士学位论文,2009.

[9] Molenaar A, Scarpas A, Liu X, et al. Semi-Circular Bending Test: Simple But Useful[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002.

[10] 曹轲铭. 沥青混合料半圆弯拉试验方法研究[D]. 湖南大学硕士学位论文,2007.

[11] 董玲云. 厂拌热再生沥青混合料疲劳性能研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2013.