

不同热再生拌和工艺对混合料再生效果的影响研究

李正中^{1,2}, 田克³, 柴东然³, 肖庆一⁴, 耿磊⁵

(1.天津市交通科学研究院,天津市 300074;2.长安大学 公路学院;3.北京市首都公路发展集团有限公司;
4.河北工业大学 土木与交通学院;5.江苏中路工程技术研究院有限公司)

摘要:为分析再生拌和工艺对沥青混合料再生效果的影响,设计了3种热再生拌和工艺(再生剂同步添加工艺、再生剂异步添加工艺、再生剂一新沥青预混合工艺),并通过车辙试验、低温弯曲试验、间接拉伸开裂试验、动态模量试验等方法对再生混合料的性能进行试验分析。研究表明:不同热再生拌和工艺对再生沥青混合料的性能具有明显影响,由于再生剂一新沥青预混合工艺能够有效提高再生剂与老化沥青的融合程度,进而提高再生效果,因此,采用该工艺的再生混合料具有较好的抗车辙性能以及动态力学性能,低温抗裂以及综合抗裂性能也有一定程度的改善。

关键词:热再生;拌和工艺;扩散;性能;间接拉伸开裂试验

厂拌热再生沥青混合料的应用近年来较为常见,但是旧料利用率普遍较低,如何在确保再生沥青混合料性能的前提下,进一步提高旧料利用率一直是再生问题研究讨论的热题。Daniel等发现,再生沥青混合料与普通沥青混合料相比,路用性能试验需要考虑拌和过程中新旧沥青的相互作用;Zhao等发现,旧料掺量较高可能会影响再生沥青混合料的抗裂性,这不仅是因为老化沥青劲度模量的增加,还因为新老沥青不能有效均匀混合。其他研究采用了Bonaquist的方法,通过比较新旧沥青动态模量主曲线的重叠程度来间接评价沥青的融合程度。总体来说,已有研究常常忽略再生拌和工艺对再生混合料性能的影响,而拌和工艺一直以来都是工业界非常关心的重要技术问题;Huang等研究发现,RAP旧料中老化沥青与新沥青的相互作用主要发生在两个阶段,一是在新旧沥青接触时;二是接触之后发生的扩散作用,而且扩散作用是关键阶段。祁文祥等通过模拟再生剂在老化沥青中的扩散过程发现,再生效果随着渗透程度的加深而提高,影响扩散效果的因素主要包括材料本身及拌和工艺条件;丁录玲等通过模拟旧料中老化沥青在新集料表面的迁移过程,对旧料掺量、再生剂用量、再生剂与RAP旧料的拌和温度及拌和时间对再生剂扩散渗透的影响进行研究,发现老化沥青性质、再生剂性质和拌和温度是影响热再生效果的关键要素,而且,随着扩散温度的

提升、再生剂黏度的降低或极性的增加,再生剂的扩散渗透速率将逐渐增大;沈凡等通过模拟3种不同再生剂在老化沥青中的扩散过程,并借助AFM原子力显微镜和GPC凝胶渗透色谱,测定了不同扩散位置处沥青的微观结构和分子分布数量,研究得出,老化沥青中逐渐增大的沥青质团会阻碍再生剂中分子量较大的改性组分在老化沥青中的移动,使得再生剂的再生作用减弱。鉴于上述研究对新旧沥青之间的扩散问题做了大量分析,而对工业界比较关注的热再生拌和工艺问题研究不足,该文在现有设备及工艺条件下设计3种热再生拌和工艺,通过对再生沥青混合料的路用性能和力学性能进行试验分析,对比不同热再生拌和工艺的再生效果,为热再生技术的推广提供参考依据。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料性能检测

研究采用阿布森法对RAP旧料中的旧沥青进行回收,将回收得到的旧沥青按照规范要求分别测定其25℃针入度、软化点、15℃延度和15℃密度,试验结果如表1所示。新加普通沥青采用山东生产90#A级道路石油沥青,其常规性能指标试验结果如表2所示。再生剂性能如表3所示。

收稿日期:2019-01-24(修改稿)

基金项目:天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(编号:15JCYBJC23100);河北省自然科学基金资助项目(编号:E2016202279)

作者简介:李正中,男,博士研究生,高级工程师,E-mail:lizhengzhonglzz@163.com

表 1 RAP 旧料中回收沥青的性能检测数据

检测项目	单位	试验数据
25℃针入度	0.1 mm	20.1
软化点	℃	63.9
15℃延度	cm	2.6
15℃密度	g/cm ³	1.033

表 2 新加沥青性能检测数据

检测项目	单位	试验数据
25℃针入度	0.1 mm	95.1
软化点	℃	47.9
135℃旋转黏度	mPa·s	435.7
10℃延度	cm	77.1
25℃密度	g/cm ³	1.028
薄膜烘箱 质量变化	%	0.16
试验后 残留针入度	%	62.4

表 3 再生剂性能检测数据

检测项目	单位	试验数据
60℃黏度	mPa·s	78.5
30℃黏度	mPa·s	782
闪点	℃	238
饱和分含量	%	25.37
外观		棕黑色,黏稠
25℃密度	g/cm ³	0.986 2
薄膜烘箱试验前后黏度比	%	0.755
薄膜烘箱试验前后质量变化	%	-1.035

1.2 混合料配合比设计

选用掺加 30%RAP 旧料的 AC-13C 型再生沥青混合料来评价不同热再生拌和工艺下混合料的路用性能及力学性能。其中,RAP 旧料公称最大粒径为 13 mm,再生混合料矿料合成级配组成见表 4。RAP 旧料中沥青含量为 3.5%(质量比),再生混合料中新加沥青掺量为 3.3%(质量比),再生剂用量为旧沥青质量的 18%,再生剂与旧沥青充分融合后再生沥青的性能见表 5。

2 拌和再生工艺设计

根据中国目前主流的厂拌热再生设备及工艺条

表 4 热再生沥青混合料矿料合成级配
(30% RAP 旧料掺配率)

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
0.075	5.8	2.36	31.2
0.15	8.4	4.75	45.0
0.3	12.6	9.5	76.7
0.6	18.1	13.2	96.8
1.18	24.3	16.0	100

表 5 再生沥青性能检测数据

检测项目	单位	试验数据
25℃针入度	0.1 mm	89.2
软化点	℃	50.3
135℃旋转黏度	mPa·s	485.7
10℃延度	cm	53.7
25℃密度	g/cm ³	1.038
薄膜烘箱 质量变化	%	0.12
试验后 残留针入度	%	61.6

件,采用试验室模拟的方法,设计出 3 种不同的热再生拌和工艺,为方便分析与叙述,将其分别进行编号。在此基础上,拟通过对比分析不同拌和工艺下对应的再生沥青混合料的路用性能和力学性能,选择确定一种满足相对最优条件的再生工艺,为厂拌热再生工艺设计提交试验依据。

(1) 第 1 种拌和再生工艺:再生剂异步添加工艺(编号Ⅰ)。具体拌和参数为:将 RAP 旧料在 110℃烘箱中预热 2 h 后直接喷入再生剂,随后倒入 160℃拌和锅中搅拌 120 s,再加入已在 185℃烘箱内预热 6 h 的新集料拌和 40 s,然后加入已加热至 160℃的新沥青拌和 40 s,最后加入预热的矿粉搅拌 40 s。

(2) 第 2 种拌和再生工艺:再生剂同步添加工艺(编号Ⅱ)。具体拌和参数为:将 RAP 旧料在 110℃烘箱中预热 2 h,随后倒入 160℃拌和锅中,边搅拌边缓慢匀速加入再生剂 120 s,再加入已在 185℃烘箱内预热 6 h 的新集料拌和 40 s,然后加入已加热至 160℃的新沥青拌和 40 s,最后加入预热的矿粉搅拌 40 s。

(3) 第 3 种拌和再生工艺:再生剂-新沥青预混合工艺(编号Ⅲ)。具体拌和参数为:将 RAP 旧料在 110℃烘箱中预热 2 h,随后加入已在 185℃烘箱内预热 6 h 的新集料,一并倒入 160℃拌和锅拌和 40 s,然后将已加热至 160℃的掺有再生剂的新沥青倒入拌和

锅中拌和 40 s,最后加入预热的矿粉搅拌 40 s。其中,向新沥青中掺加再生剂的过程,可以看作是以再生剂作为改性剂制备改性沥青,具体制备工艺为:采用 FJ300-SH 数显高速分散均质机将再生剂以 2 000 r/min 的速度融入加热至 160 ℃ 的新沥青中。

3 试验结果与分析

3.1 高、低温性能试验结果及分析

以 60 ℃ 动稳定度值、-10 ℃ 低温弯曲应变值作为高、低温性能评价指标。根据 JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》相关要求,对采用不同工艺拌和成型的再生混合料分别进行高温车辙试验和低温弯曲试验。其中,各工艺对应的车辙试验均采用 3 个车辙板试件,每组动稳定度值变异系数不超过 20%;每组低温弯曲试验采用 6 个试件(经车辙板试件锯制),6 个测定值中与其平均值之差大于其标准差 1.82 倍的试验结果均予以舍弃,最终计算结果如表 6 所示。

表 6 不同拌和工艺下的再生混合料的高、低温性能试验结果

工艺 编号	车辙试验数据		低温弯曲试验数据	
	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	抗弯拉强 度/MPa	最大弯拉 应变/μ€	弯曲劲度 模量/MPa
I	2 715	11.67	2 156	5 486
II	3 126	11.86	2 136	5 532
III	4 391	10.18	2 268	4 799
技术要求	≥800		>2 000	

由表 6 可以看出:① 3 种拌和工艺下对应的再生沥青混合料的动稳定度值和低温弯拉应变值均满足 JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》相关要求;② 高温车辙试验显示:工艺 III 对应的动稳定度值最高,说明向旧料中加入掺有再生剂的新沥青,其再生混合料的高温稳定性相对较好;工艺 II > 工艺 I,说明相对于再生剂异步添加工艺,再生剂同步添加工艺有利于提高再生混合料的高温性能;③ 低温性能试验显示:工艺 I、II 对应的低温弯曲破坏应变值基本一致,说明这两种拌和工艺对再生混合料低温性能的影响无显著差别,而工艺 III 对应的再生混合料的低温性能较工艺 I、II 具有一定的优势。

分析认为,工艺 I 和 II 都是直接将再生剂喷洒在旧料表面,喷洒过程中会存在分布不均匀以及喷洒在

拌和锅内壁、喷洒量损失等问题,不利于再生剂的扩散,并造成新旧沥青融合程度不佳;工艺 III 虽然将再生剂融解在新沥青中,看似比工艺 I、II 降低了再生剂的浓度,但是避免了再生剂的浪费问题,且再生剂在新沥青中分布相当均匀,与 RAP 旧料接触后,其有效成分能够均匀吸附在 RAP 旧料表面,进而逐渐渗透进入老化沥青深处,使得老化沥青成分组成得到调整,黏弹性得到恢复,促进再生混合料的力学特性逐渐由弹性体向黏弹塑性体转变。

3.2 间接拉伸开裂试验及分析

间接拉伸开裂试验(IDEAL-CT)是 NCHRP 9-57 中《评价沥青混合料抗裂性能的试验室有效的试验方法》确定的理想抗裂试验,它与传统的间接拉伸劈裂试验相似,都是在 20 ℃ 下以 50 mm/min 的加载速率对圆柱形试件进行加载,与现场的疲劳开裂及温缩开裂具有良好的相关性。对不同直径和厚度的任一圆柱形试件都可以进行测试,并且仅根据新定义的开裂试验指数(CT_{index})便能得出较为可靠的断裂性质, CT_{index} 越大,开裂速率越慢,其计算公式如下。

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{P/l} \times \left(\frac{l}{D} \right) \quad (1)$$

式中: G_f 为断裂能 G_f , G_r 为断裂功(载荷与垂直位移曲线的面积)除以开裂面的面积; P/l 为模量参数(或荷载一位移曲线的斜率); l/D 为应变公差参数(或荷载下的变形公差)。

根据 Liu, C. 等、Bazant, Z. P. 等的研究成果,经优化后, CT_{index} 的最终计算式为:

$$CT_{index} = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{m_{75}} \times \left(\frac{l_{75}}{D} \right) \quad (2)$$

式中: t 为试件厚度; $|m_{75}|$ 为 75% 荷载峰值处的斜率; l_{75}/D 为沥青混合料在荷载降低到 75% 荷载峰值处的应变容限;62 为标准试件的厚度(mm)。

由于此项试验操作简便、可重复性良好、对沥青混合料组成(骨料、黏结剂等)敏感性较好、与现场开裂的相关性较高,因此,选用该方法对再生混合料的综合抗裂性能进行试验研究,结果如表 7 所示。

由表 7 可以看出:不同拌和工艺对应的再生混合料的疲劳寿命差别不大,其中,工艺 II 和 III 对应再生混合料的抗疲劳性能基本相同,工艺 I 略差。主要原因可能是,采用再生剂异步添加时,将再生剂直接快速喷洒在 RAP 旧料表面,喷洒过程中不可避免会存在喷洒不均匀、局部处再生剂浓度过高、喷洒量损失等问题,从而对试验结果有所影响。

3.3 动态模量试验结果及分析

参考 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》和英国《EN 12697—24 2010—02 def》相关要求,试验采用在 SGC 压实成型的 150 mm×170

mm 试件上取芯得到的 100 mm×150 mm 试件,分别在 5、20、35、50 ℃下采用 25、10、5、1、0.5、0.1 Hz 加载频率进行测试。采用意大利产 AMPT—Pro 试验设备进行测试,数据如表 8 所示。

表 7 不同拌和工艺下再生混合料的间接拉伸开裂试验结果

工艺 编号	试件 编号	荷载峰 值/kN	断裂能/ (J·mm ⁻²)	断裂能平均值/ (J·mm ⁻²)	开裂试验指数/ (J·mm ⁻²)	开裂试验指数平 均值/(J·mm ⁻²)
I	I—1	22.9	9 540.1	9 365.2	48.6	34.8
	I—2	25.3	9 055.0		20.4	
	I—3	23.2	9 651.5		48.3	
	I—4	24.1	9 214.1		22.0	
II	II—1	20.7	9 708.7	9 423.7	40.5	37.0
	II—2	20.6	9 284.0		35.4	
	II—3	19.1	9 704.0		38.9	
	II—4	20.0	8 997.7		33.1	
III	III—1	19.9	9 225.2	9 509.1	35.8	37.3
	III—2	20.2	9 785.1		39.5	
	III—3	19.8	9 234.7		36.0	
	III—4	21.4	9 791.4		37.80	

表 8 不同拌和工艺下的再生混合料的动态模量试验结果

工艺 编号	试验温 度/℃	不同加载频率(Hz)下的动态模量/MPa					
		25	10	5	1	0.5	0.1
I	5	23 252	21 378	19 556	15 206	13 235	9 276
	20	10 415	8 262	6 850	4 081	3 159	1 649
	35	3 942	2 834	2 075	978	714	373
	50	1 286	615	438	235	196	142
II	5	24 319	21 426	19 543	14 922	12 924	9 001
	20	10 749	8 551	7 112	4 288	3 344	1 765
	35	3 894	2 776	2 005	962	700	365
	50	1 377	755	529	257	203	134
III	5	25 937	23 523	21 867	17 534	15 678	11 539
	20	13 888	11 352	9 656	6 227	5 004	2 814
	35	5 111	3 689	2 794	1 390	1 044	595
	50	1 578	1 037	752	412	347	262

(1) 工艺Ⅲ对应的再生沥青混合料的动态模量明显高于其他工艺,工艺Ⅱ对应值略大于工艺Ⅰ对应值。由此说明,再生剂与新沥青预混工艺,可以获得较为均匀的融合效果,因此拌和成型的再生混合料的动态模量较高;而工艺Ⅰ和Ⅱ将再生剂直接喷洒在 RAP 旧

料表面上,不利于再生剂在新旧沥青之间的融合渗透以及新旧料的拌和均匀性,从而导致其再生混合料的模量总体偏低。同时,可以发现,随着试验温度的提高,各工艺对应的再生混合料的动态模量持续减小且逐渐接近,这主要是由于新旧沥青的黏度随着温度提

高而逐步降低,再生混合料的力学特性随之逐渐由弹性体向黏弹塑性体转变。

(2) 随着加载频率的提高,各工艺对应的再生混合料的动态模量持续增加,但其增加幅度范围在加载频率范围内存在区别,具体体现为:加载频率较小时,动态模量增幅比较明显,随着加载频率的提高,其动态模量增幅趋于平缓。根据时温等效原理,在低频情况下,等同于高温情况,再生沥青混合料主要表现为黏塑性,不同工艺对应的再生混合料的动态模量接近;随着频率提高,再生沥青混合料的力学特性由黏塑性向弹性转变,不同工艺对应的再生混合料的动态模量差异逐渐增大,最终逐渐趋于稳定。总体来说,在相同频率条件下,工艺Ⅲ对应的再生混合料的动态模量明显高于其他工艺,工艺Ⅱ对应值略大于工艺Ⅰ对应值。

4 结论

为优化厂拌热再生的拌和工艺参数,根据目前主流的厂拌热再生设备及工艺条件,采用试验室模拟的方法,设计出3种不同的再生拌和工艺,并通过不同试验对不同拌和工艺对应的再生混合料的性能进行试验分析,得到如下结论:

(1) 通过高、低温性能规范试验,基于再生剂—新沥青预混工艺的再生混合料具有较高的抗高温变形能力和低温抗裂性,采用再生剂异步添加和同步添加工艺的再生混合料的高、低温性能基本接近,略逊于再生剂—新沥青预混工艺对应试验数值。

(2) 通过间接拉伸开裂试验(IDEAL—CT)对比分析,以断裂能和CT指数平均值作为评价指标,基于再生剂—新沥青预混工艺的再生混合料具有相对较高的综合抗裂能力,但3种拌和工艺对应的再生混合料的综合抗裂能力差距并不显著。

(3) 通过动态模量试验分析,采用再生剂—新沥青预混工艺的再生混合料具有较高的动态模量,而再生剂异步添加和同步添加工艺的再生混合料的动态模量存在一定差距。

(4) 3种再生拌和工艺在工程现场都具有一定的代表性,从室内试验结果来看,再生剂—新沥青预混拌和工艺相比其他两种工艺,具有易于操作、工艺简单、无污染等特点,且再生剂能够根据设计用量足额使用,

具有良好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] Daniel, J.S., N. Gibson, et al. Effect of Long—Term Aging on RAP Mixtures: Laboratory Evaluation of Plant Produced Mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2013, 82: 327—365.
- [2] Zhao, S., B. Huang, et al. Quantitative Characterization of Binder Blending: How Much RAP—RAS Binder is Mobilized During Mixing[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2015(2 506): 72—80.
- [3] Mogawer, M., T. Bennert, et al. Performance Characteristics of Plant—Produced High RAP Mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2012, 81.
- [4] McDaniel, R., A. Shah, et al. Effects of Reclaimed Asphalt Pavement Content and Virgin Binder Grade on Properties of Plant Produced Mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2012: 81.
- [5] Huang, B., G. Li, et al. Laboratory Investigation of Mixing Hot—Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2015.
- [6] 祁文祥, 李立寒. 沥青再生剂扩散程度评价与影响因素研究[J]. 建筑材料学报, 2014(6).
- [7] Texas A&M Transportation Institute. Experimental Design for Field Validation of Laboratory Tests to Assess Cracking Resistance of Asphalt Mixtures[R], 2016.
- [8] Liu, C. and M. L. Lovato. Elastic Constants Determination and Deformation Observation Using Brazilian Disk Geometry[C]. Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, Orlando, USA, 2008.
- [9] Illinois Center for Transportation. Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS[R], 2015.
- [10] National Research Council. Fatigue Response of Asphalt—Aggregate Mixes[R], 1994.
- [11] Texas A&M Transportation Institute. The Overlay Tester: Comparison with Other Cracking Test Methods and Recommendations for Surrogate Cracking Tests [R], 2016.
- [12] Ma, W., N. H. Tran, A. Taylor, et al. Comparison of Laboratory Cracking Test Results and Field Performance[C]. the 90th Association of Asphalt Paving Technologists' Annual Meeting, Portland Oregon, USA, 2015.