

基于红外光谱的RAP老化沥青转移率研究

邹晓勇¹, 李宁^{2*}, 吴闻秀¹, 王鑫², 徐晓和¹

(1.金华市公路与运输管理中心, 浙江 金华 321000; 2.河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:再生沥青混合料制备过程中,一部分老化沥青先从回收料表面转移到新集料上,然后再与新沥青进行相互扩散、融合,其中老化沥青转移的比例对最终的再生效果起关键影响作用。为了研究沥青路面回收料(RAP)中老化沥青的转移程度,基于红外光谱试验对转移率(R_{MR})进行计算分析。试验采用AC-13级配的再生沥青混合料,将拌和后的再生沥青混合料过筛分离出新集料和RAP,抽提出再生沥青并采用红外光谱试验测定其羧基指数(I_{CI}),根据公式计算转移率,研究RAP加热温度、拌和时间 and 再生剂对转移率的影响。结果表明:将RAP加热温度从135℃提升至160℃,转移率提高了15.5%;将拌和时间从90 s延长至180 s,转移率可提升17%;添加再生剂可使转移率得到提升,且温拌再生剂的效果优于热拌再生剂。

关键词:RAP; 老化沥青; 转移率(R_{MR}); 红外光谱

中图分类号:U414

文献标志码:A

Study on Mobilization Rate of RAP Aged Asphalt Based on FTIR

ZOU Xiaoyong¹, LI Ning^{2*}, WU Wenxiu¹, WANG Xin², XU Xiaohe¹

(1.Jinhua Highway and Transportation Management Center, Jinhua, Zhejiang 321000, China; 2.College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: During the preparation of the recycled asphalt mixture, part of the aged asphalt is first transferred from the surface of the recycled material to the new aggregate and then diffused and fused with the new asphalt, in which the percentage of transferred aged asphalt plays a key role in the final regeneration effect. In order to study the degree of transfer of aged asphalt in reclaimed asphalt pavement (RAP), the mobilization rate (R_{MR}) was calculated and analyzed based on the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The AC-13 graded recycled asphalt mixture was mixed and sieved to separate the new aggregate and RAP. The recycled asphalt was extracted, and its carboxyl index (I_{CI}) was determined by FTIR. The R_{MR} was calculated according to the equation. In addition, the influences of RAP temperature, mixing time, and regenerants on the R_{MR} were evaluated. The test results show that the R_{MR} can be increased by 15.5% when the RAP temperature is raised from 135 °C to 160 °C. When the mixing time is extended from 90 s to 180 s, the R_{MR} can be increased by 17%. The addition of regenerants can improve the R_{MR} , and the effect of regenerants for warm mix is better than regenerant for hot mix.

Keywords: RAP; aged asphalt; mobilization rate(R_{MR}); FTIR

0 引言

随着可持续发展观念的大力倡导以及石料、沥

青等不可再生资源价格的上涨,再生技术由于可以回收利用废旧路面材料(RAP),在路面建设与养护过程中得到了广泛的应用^[1]。目前在再生沥青混合

收稿日期:2022-10-04(修改稿)

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划项目(编号:2021043);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(编号:B210202050)

作者简介:邹晓勇,男,大学本科,高级工程师.E-mail:271028497@qq.com

*通信作者:李宁,男,博士,副教授.E-mail:97457052@qq.com

料设计时,新沥青和老化沥青被认为是充分相融的^[2]。但在实际再生沥青混合料拌和生产过程中,老化沥青是以薄膜的形式紧密地裹覆于RAP的表层,并不能完全转移下来,与新沥青接触发生融合^[3-4]。所以,在制备再生沥青混合料时,RAP中老化沥青的转移量是影响再生沥青混合料性能的重要因素。

国内外众多学者都对老化沥青的转移规律进行了研究。Zhao等^[4]通过凝胶渗透色谱(GPC)发现老化沥青的大分子比例(LMSP)高于新沥青,建立了老化沥青含量和LMSP的关系,据此研究了不同RAP掺量下老化沥青的转移程度。结果表明:随着RAP掺量的提升,老化沥青转移率逐渐降低;Ding等^[5]借助荧光显微镜构建了老化沥青含量与平均灰度值(MGV)的关系,然后将再生混合料颗粒直接在荧光显微镜下观察,测定MGV,再根据公式计算老化沥青转移率。但该试验对样品的处理要求较高,既要保证观察面的平整度,又不能对表层的沥青造成损伤;苏卫国等^[6]采用三聚氰胺作为新沥青的示踪剂,通过扫描电镜(SEM)观测示踪剂在老化沥青中的分布情况,间接反映老化沥青的转移情况;然而王勋^[7]发现三聚氰胺这种纳米颗粒材料在沥青中分散时极易发生团聚,难以保证分散均匀性;杨毅文等^[8]则以RAP中的矿粉标记老化沥青,将再生混合料中的RAP和新集料分离,测定转移至新集料上的矿粉质量来表征老化沥青的转移,并基于对流传质理论的特性研究了多种因素对老化沥青转移的影响;杨林等^[9]和杨毅文等^[8]的试验思路一致,但不同的是采用磁铁矿新集料,利用其易于分离的特性,将新集料和RAP有效分离。此外,还有一些学者在开展再生剂的研究时发现,其能够有效提高老化沥青的转移程度^[10-11]。

目前测定老化沥青转移率并没有一个被广泛认可的方法,并且标记法中的示踪剂通常较难均匀分布于沥青当中。本文采用一种通过红外光谱仪来研究老化沥青转移程度的试验方法。该方法先基于老化沥青和新沥青羰基指数(I_{Cl})的差异,建立老化沥青含量和再生沥青羰基指数的线性关系基准图。然后将拌和后的新集料和RAP分离,抽提新集料表面的再生沥青并测定羰基指数(I_{Cl}),最后根据公式计算转移率。同时研究了RAP加热温度、拌和时间和再生剂对转移率的影响。研究结果对于再生沥青混合料

的配比设计和施工具有重要意义。

1 老化沥青转移率检测方法

再生沥青混合料在拌和过程中,老化沥青从RAP表层剥落、转移,与新添加的沥青进行融合形成再生沥青,然后重新分布于集料表面。但许多研究表明,并非全部的老化沥青参与融合,真正再生利用的仅是外层转移的部分老化沥青,内层较硬的老化沥青仍然紧密地黏附在集料上,作为集料的一部分存在,即所谓的“黑石”^[12],如图1所示。

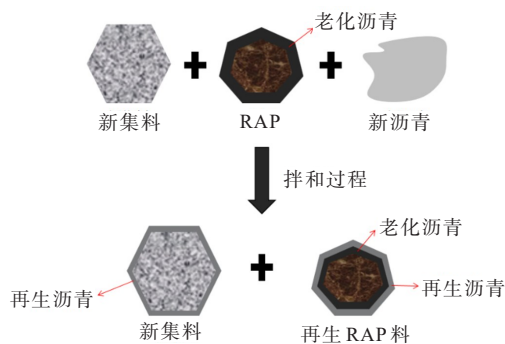


图1 再生沥青混合料中沥青分布示意图

Figure 1 Asphalt distribution in recycled asphalt mixture

为量化表征老化沥青的转移状况,本文定义了老化沥青转移率(Mobilization rate, R_{MR})指标。转移率为实际转移并与新沥青发生融合的老化沥青质量占老化沥青总质量的百分率,计算公式为:

$$R_{MR} = \frac{W_m}{W_R} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_{MR} 为转移率(%); W_m 为实际转移的老化沥青质量(g); W_R 为RAP中老化沥青的总质量(g)。

由于再生沥青中包含转移的老化沥青和新添加的沥青,则老化沥青所占比例可以通过式(2)计算:

$$\alpha = \frac{W_m}{(W_m + W_v)} = \frac{W_R \times R_{MR}}{(W_R \times R_{MR} + W_v)} \quad (2)$$

式中: α 为再生沥青中老化沥青所占比例; W_v 为新沥青的质量(g)。

将式(2)进行等式变换,可得:

$$R_{MR} = \frac{\alpha \times W_v}{(1 - \alpha) \times W_R} = \frac{\alpha \times P_v}{(1 - \alpha) \times P_R} \quad (3)$$

式中: P_v 、 P_R 分别为再生沥青混合料中新沥青和老化沥青的质量含量。

从式(3)可以看出:在再生混合料配合比设计完成之后,其 P_v 、 P_R 均为已知量。若要评估老化沥青的

转移率,关键要确定参与融合的再生沥青中转移老化沥青所占比例 α 。但想要通过直接测量再生沥青的物理化学性质或者微观形态很难确定 α 值,因此本文提出一种间接计算的方法来确定 α 值,从而确定老化沥青的转移率 R_{MR} 。

沥青的红外光谱图中,位于 $1\,695\text{ cm}^{-1}$ 波数处的羰基($\text{C}=\text{O}$)作为主要化学官能团之一,常用于监测沥青的氧化过程。随着沥青氧化的进行,羰基含量将逐渐增大^[13]。所以老化沥青的羰基峰要明显高于新沥青,新沥青与老化沥青中羰基显著的差异性为确定 α 值提供了可行性。沥青老化前后,位于 $1\,455\text{ cm}^{-1}$ 波数处的饱和 $\text{C}-\text{C}$ 振动键基本保持不变。因此羰基含量一般采用羰基指数(Carboxyl index, I_{CI})来表征,计算公式如式(4)所示:

$$I_{CI} = \frac{A_{\text{C}=\text{O}}}{A_{\text{C}-\text{C}}} \quad (4)$$

式中: I_{CI} 为羰基指数,无量纲; $A_{\text{C}=\text{O}}$ 为沥青红外光谱中 $1\,695\text{ cm}^{-1}$ 处羰基的峰面积,波数范围为 $1\,665\sim 1\,720\text{ cm}^{-1}$; $A_{\text{C}-\text{C}}$ 为 $1\,455\text{ cm}^{-1}$ 处饱和 $\text{C}-\text{C}$ 键的峰面积,波数范围为 $1\,392\sim 1\,488\text{ cm}^{-1}$ 。

本文确定转移率的具体步骤为:

(1) 抽提RAP中的老化沥青,将其按照不同的比例与新沥青在室内混溶形成再生沥青,进行红外光谱试验并按式(4)计算 I_{CI} 。

(2) 以老化沥青含量 α 为横坐标, I_{CI} 为纵坐标建立坐标系,将步骤(1)中测得的数据点绘制于该坐标系中,拟合老化沥青含量 α 与再生沥青 I_{CI} 的基准关系式。

(3) 将步骤(2)中 α 与 I_{CI} 的关系式代入式(3)中,从而建立 R_{MR} 与 I_{CI} 的关系式。

(4) 拌和再生沥青混合料,抽提新集料上的沥青并通过红外光谱试验测得 I_{CI} 值,基于步骤(3)中 R_{MR} 与 I_{CI} 的关系,最终即可算得转移率 R_{MR} 。

2 材料与试验

2.1 原材料及配合比

本文采用的新沥青为江苏某沥青厂生产的PG 76-22 SBS改性沥青,热拌再生剂和温拌再生剂分别来源于江苏和山东某公司。新沥青和再生剂的性能指标分别如表1、2所示。

表1 SBS改性沥青的基本性能指标

Table 1 Basic performance indexes of SBS modified asphalt

性能指标	单位	试验结果	技术要求
25℃针入度	0.1 mm	56.9	40~60
5℃延度	cm	40.2	≥ 20
软化点(环球法)	℃	82	≥ 60
布氏黏度 135℃	mPa·s	2 590	≤ 3
分级		PG 76-22	—

表2 再生剂的基本性能指标

Table 2 Basic performance indexes of regenerants

性能指标	单位	热拌再生剂	温拌再生剂
TFOT黏度比	%	1.16	1.3
TFOT质量损失	%	-0.5	-2.9
60℃动力黏度	mPa·s	2 040	150
饱和分含量	%	22.3	16
闪点	℃	242	230
密度	g/cm ³	0.998	0.989

RAP来源于江苏某服役11年的高速公路上面层AC-13混合料。将其破碎筛分出粒径小于4.75 mm的细颗粒,与粒径大于4.75 mm的粗新集料拌和,形成新的AC-13沥青混合料。原材料性质见表3,再生沥青混合料的配合比和级配曲线分别见表4和图2。采用这种方式,有利于新集料与RAP拌和后的分离,为新集料表层再生沥青 I_{CI} 的测试提供了可行性。

2.2 样品制备与试验

本文采用5种温度(85℃、110℃、135℃、160℃、185℃)对RAP进行加热,以研究RAP自身温度对老化沥青转移率的影响,新集料的加热温度恒定为190℃,在拌和前,材料均在相应的温度下保温2 h以保证拌和时的温度均匀性。拌和过程中,先将RAP和新集料、再生剂进行拌和,再加入新沥青拌和,两次拌和时间相等,为探究拌和时间对老化沥青转移率的影响,总拌和时间选取90 s、180 s、270 s共3种时长。同时,为探究再生剂对老化沥青转移率的影响,本文采取不加再生剂、加热拌再生剂、加温拌再生剂3种方式进行试验。根据再生剂厂商的推荐添加量及实际检测的再生效果,最终确定两种再生剂的添加量均为老化沥青质量的5%。试验样品制备条件见表5。

表 3 新集料和 RAP 的性质
Table 3 Properties of new aggregate and RAP

材料	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										沥青含量/%
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
粗新集料	100	91.3	56.0	0	0	0	0	0	0	0	—
细 RAP*	100	100	100	100	62.4	41.0	29.6	19.6	15.8	13.7	7.01

注:*指细 RAP 级配通过率未经抽提,直接筛分获得。

表 4 再生混合料配合比
Table 4 Mixture ratio of recycled mixture

混合料类型	总质量/g	RAP 掺量/%	总沥青含量/%	新沥青含量/%
AC-13 再生混合料	4 000	50	4.98	1.47

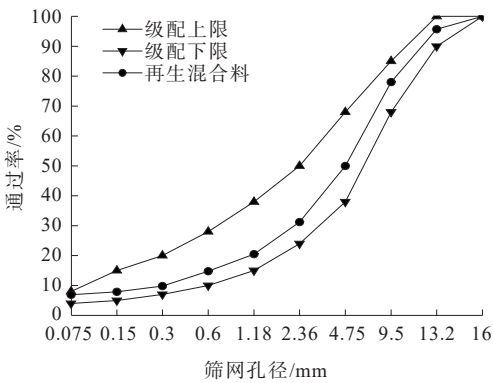


图 2 再生混合料的集料级配曲线
Figure 2 Gradation curve of recycled mixture

表 5 试验样品制备条件
Table 5 Preparation conditions of test samples

样品编号	RAP 温度/℃	拌和时间/s	再生剂类型
1	85	180	热拌再生剂
2	110	180	
3	135	180	
4	160	180	
5	185	180	
6	135	90	温拌再生剂
7	135	270	
8	135	180	无再生剂
9	135	180	

再生沥青混合料拌和完成后,待温度降至 70℃以下,将颗粒分散,然后过 4.75 mm 的筛网分离出 RAP 和裹附再生沥青的新集料颗粒(图 3)。将新集料颗粒浸没于三氯乙烯中,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的试验步骤将沥青

抽提,并进行 3 次平行红外光谱测试,测试的波数范围为 400~4 000 cm⁻¹。红外光谱试验采用美国 Nicolet IS20 红外光谱仪,按照衰减全反射法(ATR)进行^[14]。通过 OMINIC 软件对沥青的红外光谱图进行分析并测定 I_{CI},沥青红外光谱试验如图 4 所示。

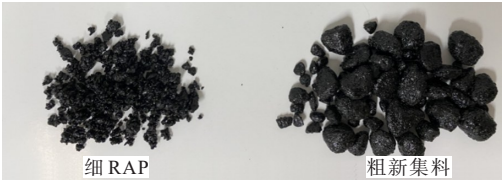


图 3 拌和后分离的新集料和 RAP
Figure 3 Separated new aggregate and RAP after mixing



图 4 沥青红外光谱试验
Figure 4 FTIR test of asphalt

3 试验结果与分析

3.1 羰基指数 I_{CI} 的计算

图 5 为新沥青与老化沥青的红外光谱图。

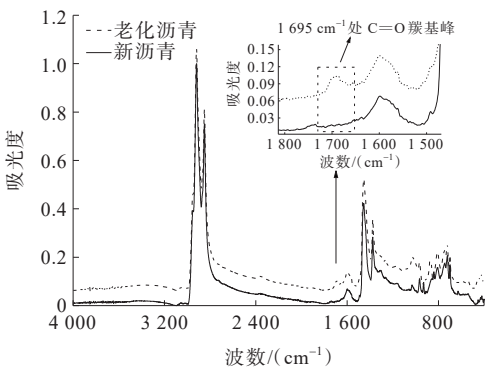


图 5 沥青红外光谱图
Figure 5 FTIR spectra of asphalt

从图5中可以发现:老化沥青在 $1\,695\text{ cm}^{-1}$ 波数处的羰基峰要明显高于新沥青。

采用式(4)计算再生沥青(不同老化沥青含量 α)的羰基指数 I_{Cl} ,结果如图6所示。

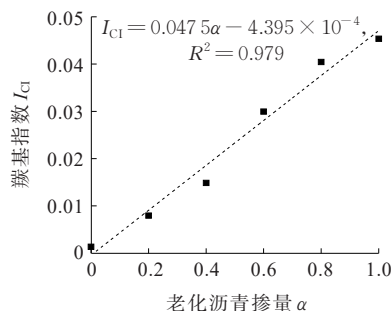


图6 再生沥青的羰基指数和老化沥青含量的关系

Figure 6 Relationship between I_{Cl} and aged asphalt content of recycled asphalt

从图6可以看出:随着老化沥青含量的增加,羰基指数 I_{Cl} 明显增大。拟合公式表明 I_{Cl} 与 α 值呈线性正相关,且相关系数 R^2 大于 0.95,说明二者具有较高的相互关联性。

3.2 老化沥青转移率的计算

图6中已经得到再生沥青羰基指数 I_{Cl} 和老化沥青含量 α 的关系式,将其带入式(3)即可得到式(5),式(5)是由新集料上再生沥青的 I_{Cl} 测定值来计算RAP中老化沥青转移率 R_{MR} 的公式。

$$R_{\text{MR}} = \frac{P_{\text{V}} \times (I_{\text{Cl}} + 4.395 \times 10^{-4})}{P_{\text{R}} \times (0.0471 - I_{\text{Cl}})} \quad (5)$$

表6以一具体实例展示老化沥青转移率的计算,RAP加热温度为 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$,总拌和时间为 180 s ,第一次拌和时加入热拌再生剂。通过实例表明,采用本文所述方法确定老化沥青转移率是可行的。

表6 老化沥青转移率 R_{MR} 计算实例

Table 6 Example of R_{MR} calculation of aged asphalt

参数	含义	计算方式	单位	数值
P_{V}	新沥青含量	由配合比确定	%	1.47
P_{R}	老化沥青含量	由配合比确定	%	3.51
I_{Cl}	新集料上抽提沥青羰基指数	试验测定		0.0199
α	再生沥青中老化沥青含量	图6	%	42.8
R_{MR}	老化沥青转移率	式(5)	%	31.4

3.3 不同因素对老化沥青转移率的影响

3.3.1 RAP加热温度

图7为拌和时间取 180 s ,添加热拌再生剂时,不

同RAP温度对老化沥青转移率 R_{MR} 的影响。

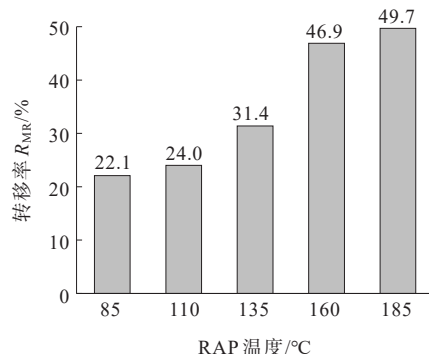


图7 不同RAP温度下的老化沥青转移率

Figure 7 R_{MR} of aged asphalt at different RAP temperatures

由图7可知:①将RAP温度控制在 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,参与拌和过程后,老化沥青的转移率仅为 22.1% 。而将RAP温度控制在 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,老化沥青的转移率则能达到 49.7% ,相比 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的RAP提升了约 125% 。这可能是由于长时间的老化及荷载作用,使沥青的黏度大幅增加并与集料的结合非常紧密,导致温度较低时沥青很难在机械拌和的作用下从RAP表面大比例剥落;②从图中老化沥青转移率随温度增加的变化趋势可以看出,RAP温度从 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升至 $185\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,转移率只有 2.8% 的增长,说明此时RAP表面易剥落的老化沥青已有较大比例参与到再生过程中;③在RAP温度从 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升到 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程中,老化沥青转移率显著上升,上升幅度达 15.5% 。

目前实际施工过程中,RAP温度一般在 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,根据上述试验结果可知,适当提升加热温度可以使RAP表面的老化沥青更多地参与到再生过程中,但温度不宜过高,否则会使沥青老化程度进一步加深,并且温度升高至一定程度后,对转移率的提升效果并不明显。

3.3.2 拌和时间

图8为RAP温度取 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$,添加热拌再生剂时,不同拌和时间对老化沥青转移率 R_{MR} 的影响。

由图8可知:①将总拌和时间控制在 90 s ,通过拌锅将RAP、新集料、新沥青以及再生剂进行拌和之后,老化沥青的转移率只有 14.4% 。延长拌和时间至 270 s 时,拌和后的老化沥青转移率增长至 34.5% ,相比 90 s 拌和时间的效果,提升了约 140% 。造成转移率相差如此大的原因可能是拌和的时间过短,导致

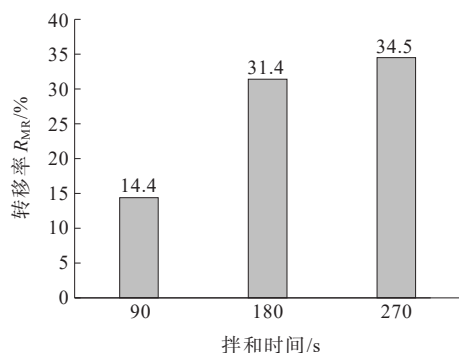


图8 不同拌和时间下的老化沥青转移率

Figure 8 R_{MR} of aged asphalt at different mixing time

机械搅拌过程中新集料与RAP间的摩擦还不够充分、再生剂对老化沥青的软化效果还没有较好地发挥出来,导致老化沥青在拌和过程中剥落的比例较小;②比较3种拌和时间的试验数据可以发现,拌和时间为180 s的老化沥青转移率比90 s时升高了17%,但延长至270 s时 R_{MR} 只提升了3.1%,说明延长拌和时间能够显著提升老化沥青的转移率,但180 s的拌和时长已经能使RAP表面易剥落的老化沥青发生较大比例的脱落和转移,导致延长至270 s的拌和效果提升有限,性价比较低。所以根据试验结果可知,标准的180 s室内拌和时间足以保证较高比例的老化沥青从RAP表面剥落,进一步延长拌和时间并不能明显提升老化沥青转移率。

3.3.3 再生剂

图9为RAP温度取135℃,拌和时间取180 s时,再生剂对老化沥青转移率 R_{MR} 的影响。

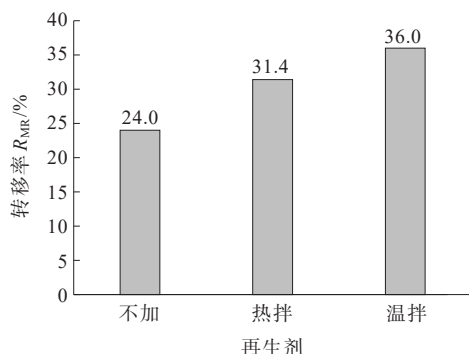


图9 不同再生剂添加情况下的老化沥青转移率

Figure 9 R_{MR} of aged asphalt at different regenerative agent additions

从图9可知:通过添加不同再生剂,可以使老化沥青的转移率出现不同程度的增长。这是由于再生剂一般主要由轻质油分组成,相同温度下再生剂通

常具备比沥青更好的流动性,并且与沥青具有良好的相容性,使得再生剂在渗透到老化沥青内部之后,让老化沥青得到一定的软化,进而更容易从RAP表面剥落转移。温拌再生剂对老化沥青转移率的提升尤为显著,与不加再生剂的转移效果相比,提升了约50%,这是因为温拌再生剂不仅具有热拌再生剂的各种特性,还具备额外的降黏效果,使老化沥青的黏性进一步降低,令其剥落转移的比例进一步升高^[15-16]。

4 结论

(1) 基于新沥青和老化沥青羰基指数的差异,通过红外光谱试验建立了老化沥青含量与再生沥青羰基指数的线性关系图并作为基准,进而提出再生沥青混合料中老化沥青转移率的量化计算方法。

(2) 拌和过程中,当RAP温度从135℃提升至160℃时,老化沥青转移率的增速最快,并在160℃时达到46.9%,但继续升高温度对转移率提升不大。

(3) 室内拌和时间由90 s提升至180 s时,老化沥青转移率提升了17%,并且标准180 s拌和时间下的转移率为31.4%,但进一步延长拌和时间则效果不佳。

(4) 添加再生剂能有效提高老化沥青的剥落比例。相较于不添加再生剂,添加热拌、温拌再生剂能使老化沥青转移率分别提升7.4%、12%。

参考文献:

References:

- [1] SI J J, LI Y, YU X. Curing behavior and mechanical properties of an eco-friendly cold-mixed epoxy asphalt[J]. Materials and Structures, 2019, 52(4): 81.
- [2] 韦万峰, 郭鹏, 唐伯明. 再生沥青混合料新旧沥青扩散混合效率研究综述[J]. 材料导报, 2017, 31(11): 109-114.
WEI Wanfeng, GUO Peng, TANG Boming. Review of the research on diffusion efficiency of virgin-aged asphalt in recycled asphalt mixture[J]. Materials Review, 2017, 31(11): 109-114.
- [3] 秦永春, 黄颂昌, 徐剑, 等. 厂拌温再生沥青混合料中新旧沥青的融合性研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(12): 24-28, 52.
QIN Yongchun, HUANG Songchang, XU Jian, et al. Research of blending performance of virgin and reclaimed asphalt in plant warm recycled asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and

- Development,2015,32(12):24-28,52.
- [4] ZHAO S, HUANG B S, SHU X, et al. Quantitative characterization of binder blending[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2015,2506(1):72-80.
- [5] DING Y J, HUANG B S, SHU X. Blending efficiency evaluation of plant asphalt mixtures using fluorescence microscopy[J]. Construction and Building Materials,2018, 161:461-467.
- [6] 苏卫国,张旺. 厂拌热再生中老化沥青有效再生率的研究[J]. 公路工程,2017,42(6):194-198.
SU Weiguo, ZHANG Wang. Study on effective recycling ratio of aged asphalt in central plant hot recycling technical conditions[J]. Highway Engineering, 2017, 42(6): 194-198.
- [7] 王勋. 高比例RAP厂拌热再生沥青混合料微观机理与性能试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
WANG Xun. Research on micro-mechanism and property test of the central plant hot recycling asphalt mixture at high RAP proportion[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2014.
- [8] 杨毅文,马涛,卞国剑,等. 老化沥青热再生有效再生率检测方法[J]. 建筑材料学报,2011,14(3):418-422.
YANG Yiwen, MA Tao, BIAN Guojian, et al. Proposed testing procedure for estimation of effective recycling ratio of aged asphalt in hot recycling technical conditions [J]. Journal of Building Materials,2011,14(3):418-422.
- [9] 杨林,李文博. 热再生沥青混合料有效再生率的影响分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(5):291-296.
YANG Lin, LI Wenbo. Analysis of the influence of effective regeneration rate of hot recycled asphalt mixture [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 291-296.
- [10] 岳秀梅. 再生剂对SBS老化沥青及热再生混合料性能的影响[J]. 公路工程,2016,41(3):78-84.
YUE Xiumei. The effects of recycling agent on aged SBS modified asphalt and behavior of hot recycled mixture[J]. Highway Engineering,2016,41(3):78-84.
- [11] 王子敬. 再生剂及温拌剂对再生沥青混合料性能影响研究[J]. 公路工程,2014,39(5):315-318,355.
WANG Zijing. Effect of recycled agent and warm mix agent on the properties of recycled asphalt mixture[J]. Highway Engineering,2014,39(5):315-318,355.
- [12] 郭鹏,谢凤章,孟建玮,等. 沥青再生过程中新-旧沥青界面混溶行为综述[J]. 材料导报,2020,34(13):13100-13108.
GUO Peng, XIE Fengzhang, MENG Jianwei, et al. Review on the interface blending behavior of virgin asphalt and aged asphalt during asphalt reclaiming[J]. Materials Reports,2020,34(13):13100-13108.
- [13] DING Y J, HUANG B S, SHU X. Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high RAP[J]. Construction and Building Materials,2016,126:172-178.
- [14] 张德鹏,徐金枝,郝培文,等. 基于GPC和FTIR的再生混合料新旧沥青融合程度研究[J]. 中外公路,2016,36(6): 214-219.
ZHANG Depeng, XU Jinzhi, HAO Peiwen, et al. Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency through GPC and FTIR[J]. Journal of China & Foreign Highway,2016,36(6):214-219.
- [15] 畅润田,王威,樊长昕,等. 一种植物油基再生剂对老化沥青性能的影响[J]. 中外公路,2022,42(3):186-189.
CHANG Runtian, WANG Wei, FAN Changxin, et al. Effect of a vegetable oil-based regenerant on performance of aged asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3):186-189.
- [16] 李韦剑. 温-热拌再生剂对再生沥青及其混合料性能的影响研究[J]. 西部交通科技,2020(4):71-74,123.
LI Weijian. Study on the influence of warm-hot mix regenerator on the properties of recycled asphalt and its mixture[J]. Western China Communications Science & Technology,2020(4):71-74,123.