

基于沥青荧光强度的再生沥青融合效果评价

李煜彬, 王端宜*, 郭秀林

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 为了评价在不同再生工艺下新旧沥青的融合效果, 该文分别针对热拌和温拌再生沥青混合料, 采取分层剥离法获得不同层次的再生沥青样品, 并通过样品的荧光强度对再生沥青的融合效果进行定量评价。研究结果显示: 用灰度均值作为技术指标可以准确评价再生沥青中新旧沥青的融合效果, 该方法操作简单, 易于实现, 可根据融合效果选择适合的再生工艺和温拌剂品种, 具有一定的理论和实际应用价值。

关键词: 再生沥青混合料; 分层剥离法; 沥青荧光强度; 灰度均值; 融合效果

随着可持续发展和绿色道路理念的提出, 沥青路面再生技术得到了快速发展。人们不仅关注回收沥青混合料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)利用的数量, 更加关注再生沥青混合料的质量和性能, 而决定再生沥青混合料质量和性能的主要因素就是新旧沥青的融合效果^[1-3]。已有研究表明^[4-5]: RAP在再生过程中可以分为3种假设状态: ①黑石状态。再生过程中旧沥青没有与新沥青产生融合, RAP可视作黑色的石料, 通过新掺配的沥青进行胶结; ②完全融合状态。旧沥青与新沥青100%融合, 共同作为新旧石料的胶结材料; ③中间状态。一定比例的旧沥青和新沥青融合, 形成混合料的胶结材料。

为了研究再生沥青中新旧沥青的融合效果, Huang等^[6]使用分层剥离法, 将再生沥青混合料中的RAP分离出来, 依次浸泡在4个装有三氯乙烯的烧杯中, 萃取包裹在RAP集料表面不同层次的再生沥青, 分别测试再生沥青样品的复数模量来评价新旧沥青的融合效果; Lee等^[7]采用凝胶渗透色谱法(GPC)进行分析, 根据大分子(LMS)在再生沥青中的比例来评估新旧沥青的融合情况; Bowers等^[8]使用傅里叶光谱(FTIR)技术, 通过评价样品的羟基百分率来评价再生沥青样品中新旧沥青的融合状态; 石鹏程等^[9]通过原子力显微镜对不同掺量新旧沥青融合情况的变化规律进行评价。然而, 上述评价方法过于复杂, 设备昂贵, 难以应用于实际工程。

荧光显微分析作为快速简便的检测方法, 常被用于观测改性沥青的微观结构, 如SBS的分布, 环氧树脂在沥青中的融合情况等^[10]。研究发现, 新旧沥青在相同的入射光下, 会激发出不同的荧光强度。利用这一特性, 荧光显微分析被逐渐引入到新旧沥青融合效果的研究中^[11-13]。基于上述背景, 该文拟通过荧光显微分析, 对分层剥离后的各层再生沥青进行荧光强度检测, 提出技术指标, 更方便地评价再生沥青中新旧沥青的融合效果。

1 原材料与试验设计

1.1 原材料

试验中, RAP为广州市花都区省道S118上面层铣刨料, 新沥青采用某品牌改性沥青(SBS I-D)。RAP经抽提试验后的旧沥青和新沥青的各项技术指标如表1所示。RAP烘干后进行燃烧筛分试验, 集料级配见表2。新集料采用石灰岩, 级配见表3。采用两种不同的温拌剂, 温拌剂1掺量为沥青质量的3%, 温拌剂2掺量为沥青质量的5%。两种温拌剂的技术指

表1 新旧沥青技术指标

沥青种类	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度 (5℃)/cm
旧沥青	7	88	5
新沥青	56	75	26

收稿日期: 2020-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51278203); 广东省自然科学基金资助项目(编号: 2019A1515011965)

作者简介: 李煜彬, 男, 硕士研究生, E-mail: 294215054@qq.com

* 通信作者: 王端宜, 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: tcdywang@scut.edu.cn

表 2 RAP 级配

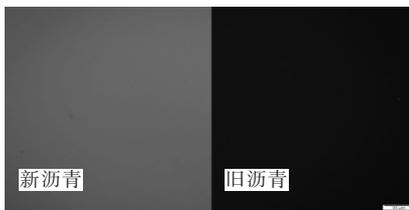
筛孔/mm	通过率/%	筛孔/mm	通过率/%
16.00	99.6	1.18	26.3
13.20	97.8	0.60	21.9
9.50	83.5	0.30	13.7
4.75	56.4	0.15	9.3
2.36	35.6	0.075	5.1

表 4 温拌剂技术指标

温拌剂种类	颜色	外观	25 °C 密度/ (g · cm ⁻³)	pH 值	熔点/ °C	建议掺量/ %
温拌剂 1	白色	固体颗粒	0.94	—	105	3
温拌剂 2	深琥珀色	液体	0.98	9.0	—	5

1.2 试验原理及使用仪器

Florian Handle 等^[14]研究发现,沥青在受到特定的激发光照射后,会产生能量跃迁,进入激发状态,从而产生一种比照射光波长长的肉眼可看到的光,这种现象称为荧光效应。沥青的荧光效应主要来源于沥青分子中的共轭大 π 键和碳氧双键中的电子跃迁。对于按二组分分类的沥青而言,主要由轻质油分产生荧光效应;对于按四组分分类的沥青而言,沥青的荧光效应主要来源于饱和分和芳香分。沥青在老化过程中,轻质油分减少,胶质和沥青质的含量增高,使得旧沥青的荧光强度减弱,如图 1 所示。



(a) 新沥青 (b) 旧沥青

图 1 新沥青和旧沥青荧光强度对比

研究中,采用 OLYMPIUS(奥林巴斯)IX73 倒置荧光显微镜(图 2)作为试验仪器,对沥青样本进行荧光效应强度检测,仪器搭载有大型传感器的 SCMOS 数码相机,能够清晰地将沥青的荧光效应转化成图像。

1.3 试验方案设计

此次试验通过分层剥离法,分别制作各层次的温拌和热拌再生沥青样品,并基于再生沥青的荧光强度,分析各层再生沥青的融合情况,以及再生沥青混合料中新旧沥青的融合程度,试验过程如下:

标如表 4 所示。为了研究不同温拌剂对再生效果的影响,温拌再生以及热拌再生过程中不采用再生剂。

表 3 新集料级配

筛孔/mm	通过率/%	筛孔/mm	通过率/%
26.5	100	13.2	23.6
19	84.1	9.5	1.3
16	55.2		



图 2 OLYMPUS IX73 倒置荧光显微镜

(1) 分层剥离制样。将 RAP 分别进行温拌和热拌再生,然后使用分层剥离法,对再生后的 RAP 分 3 层进行剥离,并萃取再生沥青,制作再生沥青样品。再生沥青混合料试验方案见表 5。

表 5 沥青混合料再生试验方案

拌和温度/ °C	温拌剂种类	RAP 用量 含量/%	新沥青 用量/%
180	无		
160	温拌剂 1	40	3.5
160	温拌剂 2		

(2) 标定样品制作。为了标定在不同新旧沥青掺量下再生沥青样本的荧光强度,提取 RAP 中的旧沥青,以 20% 为梯度增量,与新沥青按 0~100% 的不同比例进行拌和,获得标定样品。

(3) 获取样品的灰度均值。利用荧光显微镜,获取再生沥青样品和标定样品的荧光显微图像,经 Matlab 软件处理得出灰度均值,并采用沥青样品的灰度均值作为技术指标,表征沥青样品的荧光强度。然后通过线性回归,建立再生沥青标定样品灰度均值与旧沥青含量的关系方程。

(4) 再生沥青样品融合程度评价。根据再生沥青样品的灰度均值,通过回归方程进行计算,得出各样品中旧沥青的含量,进而评价在 RAP 上各层再生沥青的融合情况,以及对再生沥青混合物中新旧沥青的融合程度进行综合评价。试验流程如图 3 所示。

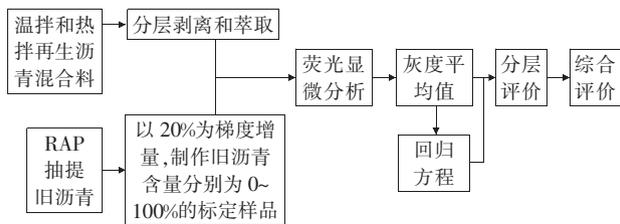


图3 试验流程图

2 再生沥青混合物与分层剥离

为了方便区分再生后的 RAP,进行试验前先将 RAP 进行筛分,取小于 9.5 mm 的 RAP,与大于 9.5 mm 的新集料和新沥青进行拌和,得到再生沥青混合物。再生试验方案中 RAP 含量为 40%,新沥青用量为 3.5%。

完成再生沥青混合物拌制后,将混合物中粒径小于 9.5 mm 的再生沥青混合物分拣出来,取 45 g。为减少矿粉对试验的影响,浸泡时用粒径为 400 目的滤布对混合物进行包裹。准备 3 个烧杯,分别标记序号,对应每个样本内的外中内 3 层沥青。每个烧杯内注入约 75 mL 四氢呋喃,用于溶解包裹 RAP 表面的沥青。在进行分层剥离时,将用滤布包裹着的再生混合物分别依次在 3 个烧杯内进行浸泡,前两个烧杯内浸泡时间保持相同,最后一个烧杯内浸泡时间适当延长,直至滤布内包裹在 RAP 表面的沥青被完全溶解于四氢呋喃中。完成再生沥青的萃取后,将烧杯放置于通风橱内风干,待液体蒸发至肉眼不可见后,放置于 60 °C 烘箱中加热约 15 min,将烧杯内四氢呋喃完全蒸发。

在进行再生沥青样本分层剥离前,应先进行标定试验,确定再生混合物在烧杯内的浸泡时间,使得完成分层剥离后,每组样品中各层沥青的质量大致相同。取热再生后的 RAP 4 份,各 45 g,分别进行分层剥离试验。前两个烧杯浸泡时间分别为 30 s、1 min、2 min、3 min,在最后一个烧杯内同样地浸泡至裹附在石料表面的沥青完全溶解为止。萃取得出各烧杯内沥青质量后进行比较,确定浸泡时间。试验结果如图 4 所示,确定浸泡时间为 2 min。

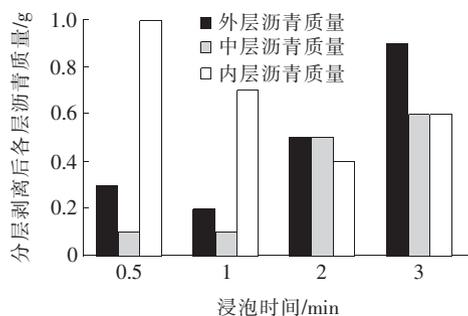


图4 不同浸泡时间下各层沥青质量

获得再生沥青样品后,将烧杯放入 165 °C 烘箱内加热至流动状态,用刮勺轻轻刮拭烧杯上的沥青,并滴在载玻片上,轻轻覆盖上盖玻片。随后将玻片放入 165 °C 烘箱内加热 2 min 左右,获得厚度约为 1 mm 的再生沥青样品,同一沥青样品制作 3 个平行试样。

3 荧光显微分析

3.1 参数设置与试验方法

对样品进行荧光显微分析时,为了将新旧沥青明显地区分开来,将荧光显微镜的发射光波长设为 450~490 nm,光强设置为 12 cd,曝光时间设为 1 s^[13],放大倍数为 200 倍。使用 Matlab 软件将各样品荧光显微图像转化为灰度图,并用图像中的灰度均值定量表示再生沥青样品的荧光强度。同一再生沥青样品设置 3 组平行试验,同一试验中取沥青样品 5 个不同位置进行荧光显微分析,并计算灰度均值。

为了验证再生沥青加入温拌剂后,沥青的荧光强度不受影响,对新沥青与加入温拌剂 1 和温拌剂 2 的温拌沥青荧光显微图像的灰度均值进行比较,结果如下:加入温拌剂 1 和温拌剂 2 的温拌沥青的灰度均值为 76.17、76.88,新沥青的灰度均值为 76.46,可见温拌剂的加入不影响沥青的灰度均值。

其次,为了证明使用 400 目滤布和四氢呋喃溶液进行分层剥离试验后,萃取所得沥青样品的荧光强度与原沥青一致,即试验过程不对沥青样品的荧光强度产生影响,取 40 g 未进行再生试验的 RAP 浸泡在四氢呋喃溶液中 15 min,进行剥离试验,完成并制样后与抽提所得旧沥青同时进行荧光显微分析,对比所得样品的灰度均值。试验结果见表 6。

比较表 6 发现,剥离试验所得沥青样品的灰度均值较旧沥青样品的灰度均值小,但是相差不大,差值为 0.17,可以认为所得沥青样品的荧光强度与原沥青基本一致,试验过程对沥青样品的荧光强度影响不大。

表 6 旧沥青与 RAP 分层剥离后沥青灰度均值对比

沥青种类	灰度均值	平均值	标准差
旧沥青	10.47	10.02	0.56
	9.23		
	10.36		
分层剥离试验 后沥青样品	10.82	9.85	0.95
	10.17		
	8.56		

3.2 回归方程建立

通过获取标定样品的灰度均值,对沥青的荧光强度进行标定,建立回归方程。以 20% 为梯度增量,将 RAP 中剥离出来的旧沥青按含量为 0%、20%、40%、60%、80%、100% 与新沥青在 165 °C 下进行拌和,并用玻璃棒搅拌约 10 min。将融合后的沥青样品放进 165 °C 烘箱保温 15 min,使新旧沥青均匀地融合,并制作标定样本。标定沥青样品融合前后荧光显微图像见图 5、6。

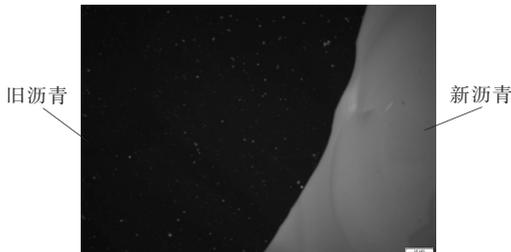


图 5 标定样品新旧沥青融合前荧光显微图像

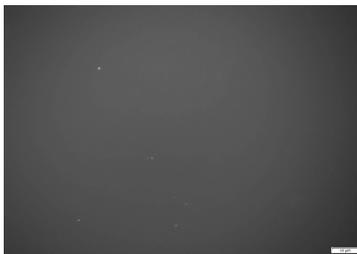


图 6 保温 10 min 后标定沥青样品荧光显微图像

通过荧光显微镜,获取沥青标定样品的荧光显微图像,经 Matlab 软件处理后计算出标定样品的灰度均值,如表 7 所示。

将标定样品的灰度均值与旧沥青含量进行对比,并作线性拟合,建立回归方程。

回归方程的表达式为:

$$y = -0.7035x + 76.259 \quad (1)$$

回归方程的相关度 R^2 为 0.98,有良好的线性关

表 7 标定样品灰度均值

样品	旧沥青含量/%	灰度均值	平均值	标准差
1	0	76.39	76.47	0.48
		77.10		
		75.92		
2	20	65.32	65.52	0.15
		65.69		
		65.56		
3	40	48.64	47.68	0.71
		46.96		
		47.44		
4	60	28.87	28.20	0.61
		27.40		
		28.32		
5	80	17.85	18.60	0.81
		18.23		
		19.73		
6	100	10.47	10.02	0.56
		9.23		
		10.36		

系。可以看出:新沥青与旧沥青之间的荧光强度存在明显差异,新沥青的灰度均值更高,即新沥青的荧光强度更强。随着样本中旧沥青含量的提高,再生沥青的灰度均值逐渐减少,呈负相关关系。

3.3 再生沥青样品分层评价

将各层再生沥青样品进行荧光显微分析,通过 Matlab 软件获取灰度均值,并对照回归方程,得出再生沥青样品中旧沥青的含量,试验结果见表 8。

对于 3 种再生沥青混合料,在沥青膜厚度方向上,再生沥青样品中的旧沥青含量均呈现从内层至外层逐渐减少的趋势;对于中间层再生沥青样品,旧沥青含量均为 40%~50%,且内层再生沥青中旧沥青含量均小于 100%,说明在再生过程中,新沥青确实能从外层扩散进入到旧沥青的内层,与旧沥青进行整体融合,但是各层沥青融合程度不同。显然,当新沥青扩散至内层越多,内层中再生沥青的旧沥青含量越少,再生沥青的融合程度越高。

热拌再生混合料中,内层再生沥青的旧沥青含量为 56.18%,相比而言,温拌再生混合料中内层再生沥青的旧沥青含量较高,分别为 59.01% 和 72.93%。说

表8 不同再生沥青样品中旧沥青含量

样品	旧沥青含量/ %	沥青层位置	灰度均值	平均值	标准差	样品旧沥青含量/%			
温拌剂 1 160 °C	40	外	62.64	59.18	2.48	24.28			
			57.52						
			57.37						
		中	48.97	45.33	2.64	43.97			
			44.22						
			42.79						
			33.18						
		内	31.92	34.74	3.14	59.01			
			39.13						
			63.20						
温拌剂 2 160 °C	40	外	73.66	68.37	4.27	11.21			
			68.24						
		中	34.92				40.10	2.26	54.28
			40.10						
			39.20						
		内	24.38				25.74	0.57	72.93
			25.74						
热再生 180 °C	40	外	24.74	46.04	0.66	42.95			
			45.94						
			46.90						
		中	45.29				37.58	2.50	54.98
			39.32						
			34.04						
内	39.38	36.73	0.46	56.18					
	37.12								
36.98									
36.09									

明当 RAP 含量为 40% 时,热拌再生混合料中能有效扩散进入旧沥青内层的新沥青更多,新旧沥青的融合效果更好。对于两种温拌剂而言,在使用温拌剂 2 的温拌再生沥青混合料中,新沥青大多停留在旧沥青的外层,外层再生沥青中的旧沥青含量为 11.21%,新沥青含量较高,有效扩散进入内层与旧沥青调和的新沥青较少。相对而言,使用温拌剂 1 的各层再生沥青样品中,中间层和内层旧沥青含量均低于使用温拌剂 2

的再生沥青样品,接近热拌再生沥青样品,但中间层再生沥青的旧沥青含量较热拌再生沥青少。说明相对于热拌再生沥青混合料,使用温拌剂 1 进行温拌再生时,新沥青扩散至中间层较多,相对而言进入内层与旧沥青进行调和的新沥青较少。

3.4 新旧沥青融合效果综合评价

再生的过程中,新沥青在一定的温度下,通过搅拌的机械作用与 RAP 和新集料进行拌和。在沥青膜厚度方向上,新沥青向裹附在 RAP 上的旧沥青从外至内进行扩散,新旧沥青进行调和^[15-16]。当新旧沥青融合程度越高,新沥青扩散进入旧沥青的比例越高,则再生沥青混合料中内层再生沥青的旧沥青含量越低,裹附在 RAP 内层的再生沥青样品的灰度均值就越高,直至新旧沥青达到完全融合。因此,可以利用内层再生沥青样品中新沥青的含量与新旧沥青完全融合时新沥青含量的比值,定量评价再生沥青混合料中新旧沥青的融合效果。

当新旧沥青完全融合时,再生沥青混合料中各层沥青的新沥青含量应完全相同。假设混合料中新沥青含量为 C_v ,旧沥青含量为 C_R ,则完全融合时,再生沥青混合料中内层沥青的新沥青含量 C 应为:

$$C = \frac{C_v}{C_v + C_R} \times 100\% \quad (2)$$

当新旧沥青部分融合时,假设通过荧光显微分析得第 3 层沥青中旧沥青含量为 C_3 ,则各再生沥青混合料中新旧沥青融合程度 BE 如式(3)所示:

$$BE = \frac{100 - C_3}{C} \times 100\% \quad (3)$$

结合式(1)、(2)、(3),计算出各再生沥青样品中新旧沥青的融合程度。

计算结果为在 RAP 含量为 40% 的条件下,热拌再生沥青混合料的新旧沥青融合程度为 67.81%,而使用温拌剂 1 和温拌剂 2 的温拌再生沥青混合料的融合程度分别为 63.43% 和 41.9%,均低于热拌再生沥青混合料。但是对于温拌再生沥青混合料,使用温拌剂 1 作为温拌剂进行温拌再生时,新旧沥青的融合程度更高,更接近热拌再生沥青混合料。

4 结论

研究通过分层剥离法,分别制作各层次的温拌和热拌再生沥青样品,并基于再生沥青的荧光强度,分层评价各再生沥青样品的融合情况,并综合评价再生沥

青混合料中新旧沥青的融合程度,得到如下结论:

(1) 通过荧光显微分析,对再生沥青中新旧沥青的融合效果进行评价,改进了对 RAP 进行分层剥离后所得再生沥青样品的评价方法。对再生沥青样品进行荧光显微分析,能够快速便捷地分析各层再生沥青样品融合情况,从而定量评价再生沥青混合料中新旧沥青的融合程度。

(2) 以灰度均值作为技术指标,能够定量评价再生沥青样品中新旧沥青的融合情况。对于再生沥青而言,随着再生沥青中旧沥青含量的增加,再生沥青的荧光强度减弱,灰度均值线性递减。使用灰度均值作为评价指标,能够计算出各再生沥青中旧沥青的含量,从而能够定量评价样品中新旧沥青的融合情况,对实际工程中选择适合的再生工艺和温拌剂,具有一定的指导和参考价值。

(3) 在不同的再生沥青混合料中,包裹在 RAP 外的各层再生沥青均呈现旧沥青含量从外层到内层递增的趋势。中层再生沥青中旧沥青含量约为 50% 左右,且内层旧沥青含量均小于 100%,说明再生过程中新沥青向旧沥青逐渐渗透,与旧沥青进行整体融合,但各层再生沥青的融合程度不同。

(4) 热拌再生沥青混合料中新旧沥青的融合程度高于温拌再生沥青混合料;对于使用不同温拌剂的温拌再生沥青混合料,使用温拌剂 1 比使用温拌剂 2 的融合程度更高。

参考文献:

- [1] SHEN J, AMIRKHANIAN J, MILLER A J. Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixture Containing Reclaimed Asphalt Pavement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(5): 376—384.
- [2] IMAD L Al-Qadi, AURANGZEB Q, CARPENTER S H. Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures[R]. Illinois Department of Transportation; Illinois Center for Transportation, 2012.
- [3] 杨鹏,王端宜,韩玉梅,等. 掺加再生老化沥青下 SBS 改性沥青特性研究[J]. *中外公路*, 2018, 38(3): 306—310.
- [4] TAO M, MALLICK R B. Effects of Warm-Mix Asphalt Additives on Workability and Mechanical Properties of

- Reclaimed Asphalt Pavement[J]. *Material Transportation Research Record*, 2009, 2 126: 151—160.
- [5] ZHAO S, HUANG B, SHU X, et al. Comparative Evaluation of Warm Mix Asphalt Containing High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44, 92—100.
- [6] HUANG B, LI G, VUKOSAVLJEVIC D, et al. Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement[J]. *Transportation Research Record*, 2005, 1 929: 37—45.
- [7] LEE S J, AMIRKHANIAN S N, PARK N W, et al. Characterization of Warm Mix Asphalt Binders Containing Artificially Long-Term Aged Binders[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(6): 2 371—2 379.
- [8] BOWERS B F, HUANG B, SHU X, et al. Investigation of Reclaimed Asphalt Pavement Blending Efficiency through GPC and FTIR[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50(1): 517—523.
- [9] 石鹏程,沈菊男,魏伟. 基于原子力显微镜和红外光谱仪的新旧沥青融合变化规律[J]. *公路*, 2019, 64(3): 225—229.
- [10] 樊亮,马士杰,王林. 荧光显微技术在沥青研究中的应用[J]. *公路工程*, 2011, 36(6): 70—73.
- [11] NAVARO J, BRUNEAU D, DROUADAINE I, et al. Observation and Evaluation of the Degree of Blending of Reclaimed Asphalt Concretes Using Microscopy Image Analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37: 135—143.
- [12] DING Y, HUANG B, SHU X. Blending Efficiency Evaluation of Plant Asphalt Mixtures Using Fluorescence Microscopy[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 461—467.
- [13] DING Y, HUANG B, SHU X, et al. Utilizing Fluorescence Microscopy for Quantifying Mobilization Rate of Aged Asphalt Binder[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(12): 04017243.
- [14] HANDLE F, FUSSL J, NEUDL S, et al. The Bitumen Microstructure: A Fluorescent Approach[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(1—2): 167—180.
- [15] 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综述[J]. *材料导报*, 2017, 31(6): 109—114.
- [16] 刘朝辉,高新文,翟龙,等. 再生沥青中新旧沥青扩散特性[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(5): 18—24.