

文章编号:1007-9629(2021)04-0811-09

高掺 RAP 沥青界面融合行为的量化评价

陈 龙¹, 陈宏斌², 李 朋¹, 胡 朋¹, 何兆益³

(1. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357; 2. 甘肃省交通科学研究院集团有限公司, 甘肃 兰州 730030; 3. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 采用荧光显微镜(FM)和动态剪切流变仪(DSR),对多因素组合下高掺废旧沥青路面材料(RAP)沥青界面融合行为进行量化评价.结果表明:荧光图像可辨别RAP沥青与新添沥青界面融合行为的发生,随新添沥青掺量(ω)增加,平均光密度(AOD)、累计光密度(IOD)、图像灰度值(IGL)均线性增大;随加热温度和新添沥青标号提高,界面融合速率(DS)、融合程度(DOB)和界面扩散激活能(Q)均显著增加,各层位处新添沥青掺量(ω)趋于均匀一致,分布离散系数(DDC)逐渐减小;随加热时间延长,DS和DDC快速衰减,其余各量化指标增大并趋于稳定,表明改善沥青界面融合效应的关键在加热初期阶段.当粉胶比较小(0.1.0)时,加热温度每增长20℃,DS相对提升50%~120%;提高沥青标号或添加再生剂可分别提升DS值2、10倍左右,降低DS衰减幅度10%~50%;添加再生剂能够提升DOB值2~3倍,其改善沥青界面融合的效果尤为明显.

关键词: 废旧沥青路面材料; 界面融合行为; 量化评价; 光密度; 融合程度

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.019

Quantitative Evaluation on Interfacial Diffusion Behavior of Asphalt with High Percentage of RAP

CHEN Long¹, CHEN Hongbin², LI Peng¹, HU Peng¹, HE Zhaoyi³

(1. School of Transportation Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Gansu Provincial Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China;

3. College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The diffusion behaviors on asphalt interface of high percentage recycled asphalt pavement(RAP) under multi-factor coupling conditions were quantitatively characterized using fluorescence microscopy (FM) and dynamic shear rheometer(DSR). The results show that the fluorescence images can identify the diffusion action between RAP asphalt and virgin asphalt, and the quantitative evaluation indexes of interaction-average optical density(AOD), integral optical density(IOD) and image gray level(IGL) increase linearly with the rise of virgin asphalt content(ω). Additionally, with the rise of heating temperature and asphalt grade, the quantitative evaluation indexes i. e. the diffusion speed(DS), the degree of blending (DOB) and energy quantity(Q) increase significantly, and the distribution of virgin asphalt content(ω) in each layers reaching unanimity, leading to decrease of the discrete distribution coefficient(DDC). Moreover, the DS and DDC closely decrease exponentially with the extension of heating time, and the other indexes increase and tend to be stable finally, which show that the key to improve the diffusion action is in the early stage. Specifically, when the filler-asphalt ratio is small, every 20℃ growth in heating temperature

收稿日期:2020-03-09; 修订日期:2020-04-18

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFB1600100);国家自然科学基金资助项目(51978116);山东省自然科学基金资助项目(ZR2017LEE026,ZR2020QE274);山东交通学院博士科研启动基金项目(50004945,50004946)

第一作者(通讯作者):陈 龙(1989—),男,山东济南人,山东交通学院讲师,博士. E-mail:hellolong0701@163.com

is accompanied by 50%–120% increase in DS value, and the values of DS can be increased by 2, 10 times respectively with the rise of virgin asphalt grade and regenerant content, while the attenuation range of DS can be decreased by 10%–50%. The value of DOB can be increased by 2–3 times when regeneration agent is added, and the effects of improvement of diffusion action are particularly obvious.

Key words: reclaimed asphalt pavement materials; interfacial diffusion behavior; quantitation evaluation; optical density; degree of blending

国内外针对废旧沥青路面材料(RAP)铣刨回收再生利用的研究始于20世纪70年代石油危机凸显时期。截至目前,再生沥青路面里程及在路网所占比例均逐年攀升,美国、欧洲、中国等相继颁布了RAP循环再生应用施工技术指南^[1-5]。此外,各国在再生沥青混合料等路面材料配合比组成设计、常规路用性能与黏弹流变本构特性评价、国省干线工程施工工艺关键节点控制等方面也取得了丰硕的研究成果^[6-8]。

然而,目前多数已知研究成果主要针对RAP再生工程现场应用性能合格与否进行判别,缺乏针对RAP表面废旧沥青与新添沥青、再生剂(必要时)在界面区域扩散融合行为特征的深入研究报告,在多因素耦合条件下针对高掺RAP沥青界面融合行为进行量化评价的研究尤其空缺^[9]。毋庸置疑,RAP沥青界面渗透扩散、交互融合的行为特点及其最终呈现状态均可直接影响再生沥青混合

料的实际应用性能,RAP沥青与新添沥青在界面融合的薄弱区域也极可能成为再生沥青混合料功能失效首先发生的部位。因此,在各项影响因素及其组合作用下,科学合理地探究RAP沥青与新添沥青界面融合行为特点,精准量化表征并最大程度改善高掺RAP表面废旧老化沥青的物化特性和工作状态,是获得长寿命、耐久型再生沥青混凝土及其路面的技术关键^[10-12]。

1 试验材料与测试方案

1.1 试验材料

选用的RAP沥青为70#老化沥青(经室内旋转薄膜烘箱(RTFOT)+压力老化仪(PAV)标准老化试验制备获得),新添沥青分别采用70#和90#原样沥青,沥青再生剂为课题组自制复合型化学再生剂RA-2,矿粉为石灰岩质(粒径0.075 mm及以下)。原材料性能测试结果分别见表1、2。

表1 RA-2 沥青再生剂主要技术指标

Table 1 Main technique specifications of asphalt regeneration agent RA-2

Brookfield viscosity/(mPa·s)		Flow behavior index(25 °C)	Aromatic content(by mass)/%	Flash point/°C	After TFOT(163 °C, 5 h)		
25 °C	135 °C				Viscosity ratio (25 °C)	Viscosity ratio (135 °C)	Mass loss/%
823	19	0.96	55	220	1.26	1.17	1.31

表2 RAP 沥青和新添沥青主要技术指标

Table 2 Main technique specifications of RAP asphalt and virgin asphalts

Technique specification	RAP asphalt (70 #)	Virgin asphalt (70 #)	Standard value (70 #)	Virgin asphalt (90 #)	Standard value (90 #)
Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	18	75	60–80	94	80–100
Ductility(10 °C)/cm	3.1	37.6	≥15	84.6	≥20
Ductility(15 °C)/cm	14.4	132.2	≥100	187.0	≥100
Softening point/°C	77.0	49.0	≥44	45.5	≥45
Brookfield viscosity/(mPa·s)	3 231	383	—	186	—
Dynamic shear modulus(64 °C)/Pa	15 527.84	1 664.80	—	1 002.51	—
Phase angle(64 °C)/(°)	71.9	80.4	—	84.1	—
Density(25 °C)/(g·cm ⁻³)	1.096	1.037	Measured value	1.016	Measured value
Flash point/°C	280	265	≥260	260	≥245
Wax content(by mass)/%	2.2	1.5	≤2.2	1.4	≤2.2

1.2 测试方案

本文首先结合荧光显微镜(FM)和图像分析软

件,分别从定性和定量角度验证新添沥青-RAP 沥青界面区域的存在。FM 测试采用江南永新光学有

限公司生产的 XS-402 型落射式荧光显微镜,工作电流 0.45 A,放大倍率 400 倍. 图像分析采用美国 Media Cybernetics 公司开发的 Image Pro Plus 6.0 软件,光学特征参数分别选取平均光密度(AOD)、累计光密度(IOD)和图像灰度值(IGL). 试样制备方法为:将薄层刀片置于载玻片正中央,在其左右两侧分别涂抹 RAP 沥青与新添沥青;随后拿去薄层刀片,将载玻片置于电炉上方稍许加热,使左右两侧涂抹的沥青在中间细微缝隙区域恰好接触即可.

沥青界面融合行为采用动态剪切流变仪(DSR)进行测试. 表征界面融合的量化指标以菲克扩散定律为基准,从物理、力学和能量角度选取界面融合速率(DS)、融合程度(DOB)、界面扩散激活能(Q)、不同层位新添沥青掺量¹⁾(ω)和沥青层间分布离散系数(DDC)来进行评价,理论公式分别见式(1)~(4).

$$\omega_i = 0.5 - \frac{2}{\pi} \times \sum_{n=1}^{20} \frac{\sin(0.5n\pi)}{n} \times \cos\left(\frac{in\pi}{10L}\right) \times e^{-\left[\frac{(n\pi)^2}{L^2}\right] \times DS \times t} \quad (1)$$

$$DS = DS_0 \times e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (2)$$

$$DOB = \frac{G_t^* - G_0^*}{G_{mix}^* - G_0^*} \quad (3)$$

$$DDC = \sum_{i=1}^{20} (\omega_i - 0.5)^2 \quad (4)$$

式中: ω_i 为所求沥青层位中新添沥青的掺量, $0\% \leq \omega_i \leq 100\%$ (i 取 1~20); n 为新添沥青-RAP 沥青界面试样划分的总层位数,本文取 $n=20$; L 为新添沥青-RAP 沥青界面试样厚度,本文取 $L=2$ mm; t 为加热时间; T 为热力学温度; R 为理想摩尔气体常数, $R=8.314$ J/(mol·K); DS_0 为方程常数; G_0^* 为新添沥青-RAP 沥青界面试样在未施加作用的初始阶段的剪切模量; G_t^* 为新添沥青-RAP 沥青界面试样作用一定时间后的剪切模量; G_{mix}^* 为新添沥青-RAP 沥青界面试样 100%完全混溶后的剪切模量.

将直径 8 mm、厚度 1 mm 的新添沥青与 RAP 沥青上下叠放,上方新添沥青为扩散相,下方 RAP 沥青为受体相,从沥青结合料层面模拟 50%RAP 高掺量条件下(RAP 沥青与新添沥青掺配质量比 1:1)再生混合料沥青界面扩散融合能力. 若制备沥青胶浆界面试样,则在 RAP 沥青内掺配相应粉胶比的矿粉. 随后,采用铝箔条将叠放试样连同硅胶模具密封并一同置于烘箱加热(最大程度减少界面扩散过程中沥青热

氧化),一定时间后取出试样进行 DSR 测试^[13-15]. DSR 试样及层位划分示意图见图 1.

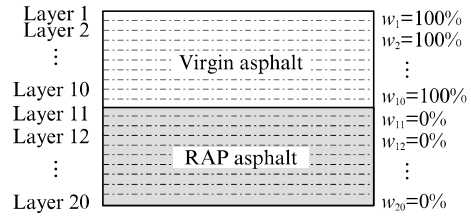


图 1 DSR 试样及层位划分示意图
Fig. 1 DSR sample and its layer distribution

2 结果与分析

2.1 荧光显微试验结果

通过对获取的沥青荧光显微图像进行定性分析可知,RAP 沥青与新添沥青在发光颜色、发光亮度等方面均表现出较大差异:RAP 沥青呈现紫灰色,颜色较为深暗;新添沥青呈现米黄色,颜色较为明亮. 另外,观测 RAP 沥青与新添沥青界面试样亦可发现,其界面区域通过荧光显微图像能够清晰识别. 随后,控制 RAP 沥青掺量 ω_{RAP} 为 0%、20%、40%、50%、60%、80%、100%,将 RAP 沥青与新添沥青混溶,各混溶沥青试样的光学特征参数(AOD、IOD、IGL)量化计算结果绘于图 2. 由图 2 可以明显看出,混溶沥青荧光显微图像的各项光学特征参数与 RAP 沥青掺量呈现较好的线性函数关系,并且随 RAP 沥青掺量减少,各项光学特征参数均逐渐增大.

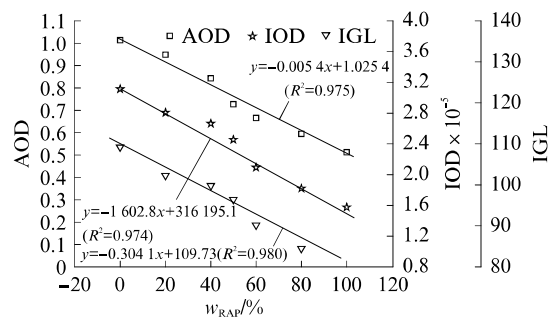


图 2 各混溶沥青试样的光学特征参数
Fig. 2 Optical characteristic parameters of miscible asphalt samples

2.2 DSR 试验结果

本文 DSR 试验采用不同的加热温度 θ (110、130、150 °C)、加热时间 t (10、20、30、60、120 min) 这 2 项外在因素和不同粉胶比 m_i/m_a (0、1.0、2.0)、新

1)文中涉及的掺量均为质量分数.

添沥青标号(70#、90#)、是否添加再生剂这3项内在因素组合后进行测试,计算结果和分析结论分别如下。

2.2.1 融合速率 DS

首先以沥青结合料试样为例,对其界面融合速率 DS 进行量化分析,结果见图 3。

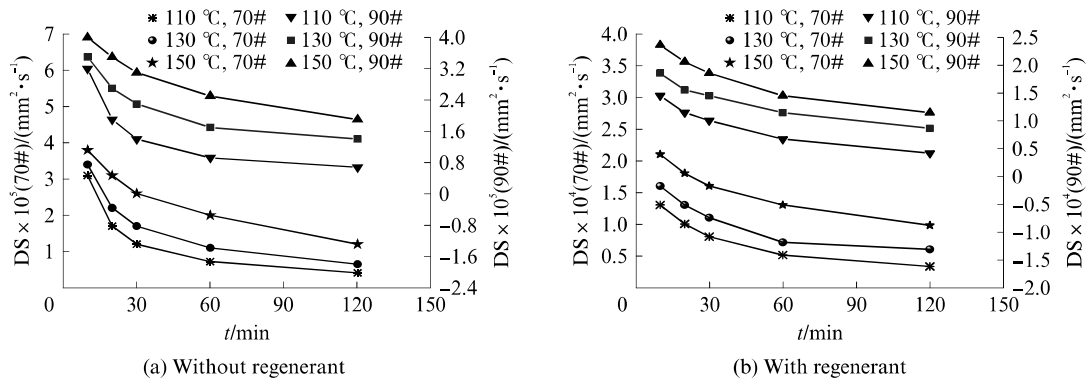


图 3 沥青结合料界面融合速率 DS
Fig. 3 Diffusion speed of asphalt binder interface

由图 3 可知,随加热时间延长,不同因素组合条件下的新添沥青-RAP 沥青界面融合速率 DS 值均呈指数函数快速减小,并最终趋于稳定,说明提升沥青界面融合行为的关键在加热前期阶段。另外,当加热温度较低时(110~130 °C),同一时刻各试样 DS 值之间的差异较小;当加热温度进一步升高(130~150 °C),各试样 DS 值之间的差异迅速增大。该现象

说明高温能够加速提升沥青界面融合速率,并且对 70# 新添沥青效果尤为明显。

以 10 min 时 DS 与 120 min 时 DS 的比值来表征沥青界面融合速率 DS 衰减幅度,结果列于表 3。由表 3 可以看出,较高的加热温度、90# 新添沥青以及添加再生剂均能够有效降低 DS 衰减幅度(降幅可达 10%~50%)。

表 3 沥青结合料界面融合速率 DS 衰减幅度
Table 3 Attenuation amplitude of diffusion speed with heating time for asphalt binder interface

Without regenerant						With regenerant					
70#			90#			70#			90#		
110 °C	130 °C	150 °C	110 °C	130 °C	150 °C	110 °C	130 °C	150 °C	110 °C	130 °C	150 °C
7.56	5.23	3.17	4.71	2.50	2.11	3.94	2.67	2.14	3.68	2.20	2.09

对 120 min 时不同粉胶比沥青胶浆试件的 DS 值作进一步分析,结果列于图 4。由图 4 可以看出:较高的加热温度、90# 新添沥青以及添加再生剂均能够显著改善 DS 值,并且当粉胶比较小时($m_f/m_a=0, 1.0$),其改善效果尤为明显;同等条件下,当粉胶比较小时,

使用 90# 新添沥青和添加再生剂能够使 DS 值分别提高 2、10 倍左右;并且加热温度每增长 20 °C, DS 值能够相对提高 50%~120%左右,该现象进一步从正面角度验证了上文分析的结论;但随着粉胶比继续增加($m_f/m_a=2.0$),其改善幅度快速降低。

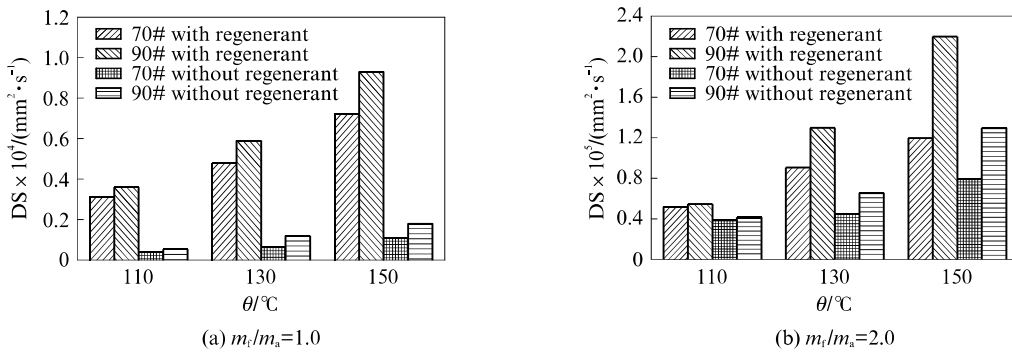


图 4 120 min 时不同粉胶比沥青胶浆试件的 DS
Fig. 4 Diffusion speed of asphalt interface for asphalt mortars with different filler-asphalt ratios at 120 min

2.2.2 融合程度 DOB

以沥青结合料试样为例,对界面融合程度 DOB 进行量化分析,结果见图 5. 由图 5 可知:随着加热时间、加热温度以及新添沥青标号的增大,沥青界面融合程度 DOB 均得到大幅提升;同等条件下,未添加再生剂的试样 DOB 值均不足 50%;而添加再生剂能够相对提升 DOB 值 2~3 倍,并且最终可实现界面 100% 完全混溶状态;另外,未添加再生剂时(图 5(a)),与 70# 新添沥青相比,90# 新添沥青在各加热温度和加热时间节点处对 DOB 值的提升幅度基本一致;但是,当添加再生剂时(图 5(b)),90# 新添沥青对 DOB 值的提升呈非匀速、非稳态变化,在加热时间段后期对 DOB 值的改善效果明显优于前期阶段,并且随加热温度增加逐级增长,说明添加再生剂能够使沥青界面融合程度的改善效果显著并

且持久,因此能够更好地提升 RAP 沥青界面再生性能.

对粉胶比分别为 1.0、2.0 的沥青胶浆试样界面融合程度进行计算,结果见图 6、7. 由图 6、7 可以看出:随着粉胶比的增加,DOB 值大幅递减;当未添加再生剂时(图 6(a)和图 7(a)),在各加热温度和加热时间节点处高标号新添沥青对沥青胶浆试样 DOB 数值的提升幅度基本一致;但是当添加再生剂时(图 6(b)和图 7(b)),高标号新添沥青对 DOB 数值的改善幅度随加热时间与加热温度的增长而逐级增长. 表明在再生剂作用下,沥青胶浆试样界面融合程度的改善效果亦较显著且持久,但其提升幅值随粉胶比增加呈逐级下降趋势. 该结论与图 5 中沥青结合料试样 DOB 分析结果完全一致.

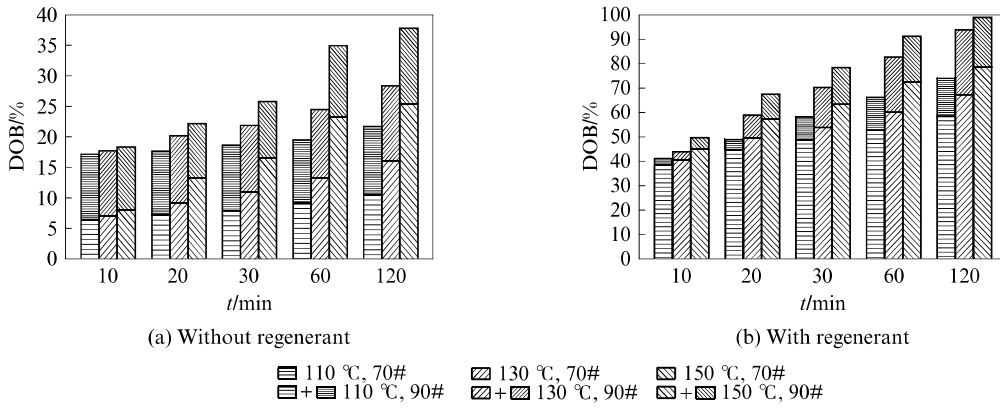


图 5 沥青结合料试样界面融合程度
Fig. 5 DOB for asphalt binders ($m_1/m_0=0$)

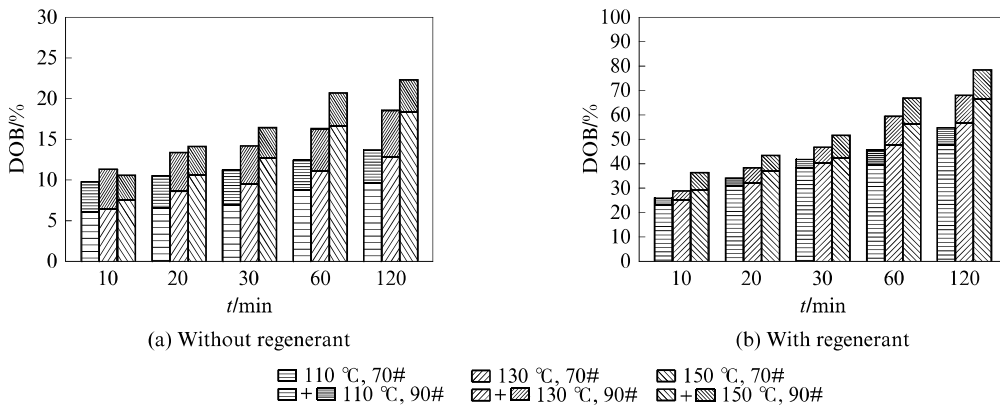


图 6 $m_1/m_0=1.0$ 时沥青胶浆试样界面融合程度
Fig. 6 DOB for asphalt mortars ($m_1/m_0=1.0$)

2.2.3 沥青层间分布特征

以沥青结合料试样为例,对不同因素组合下 90# 新添沥青在各层位中的掺量 ω 进行量化分析,

结果见图 8. 不同粉胶比沥青胶浆试样层间分布离散系数 DDC 计算结果分别见图 9~11.

由图 8~11 可以看出:随着加热时间的延长、加

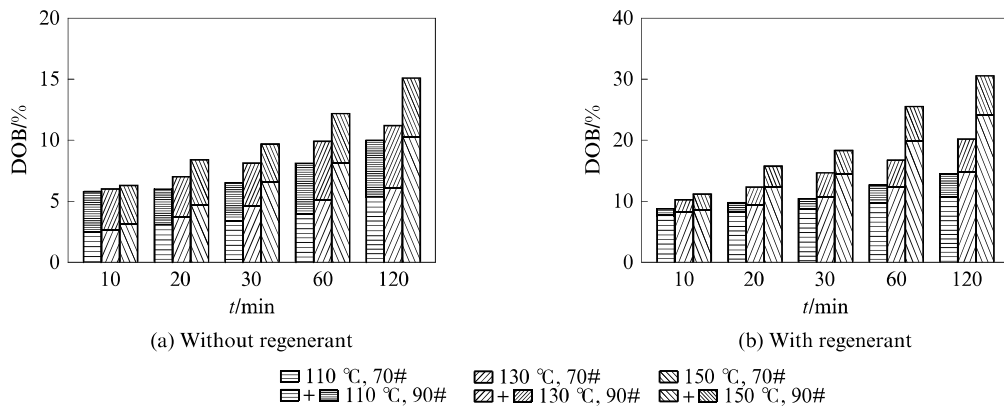


图 7 $m_1/m_2=2.0$ 时沥青胶浆试样界面融合程度
 Fig. 7 DOB for asphalt mortars ($m_1/m_2=2.0$)

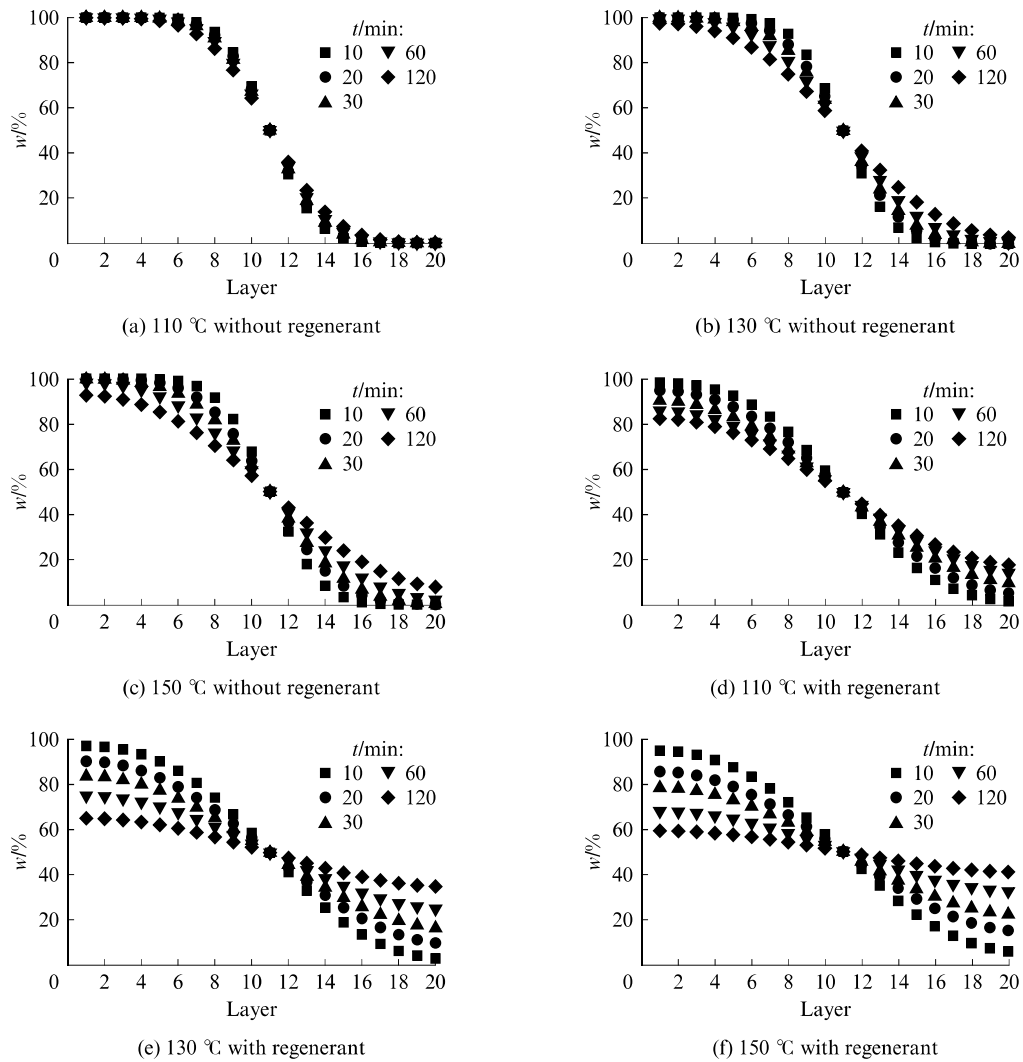


图 8 90# 新添沥青在各层位中的掺量
 Fig. 8 w in each layer for 90# virgin asphalt

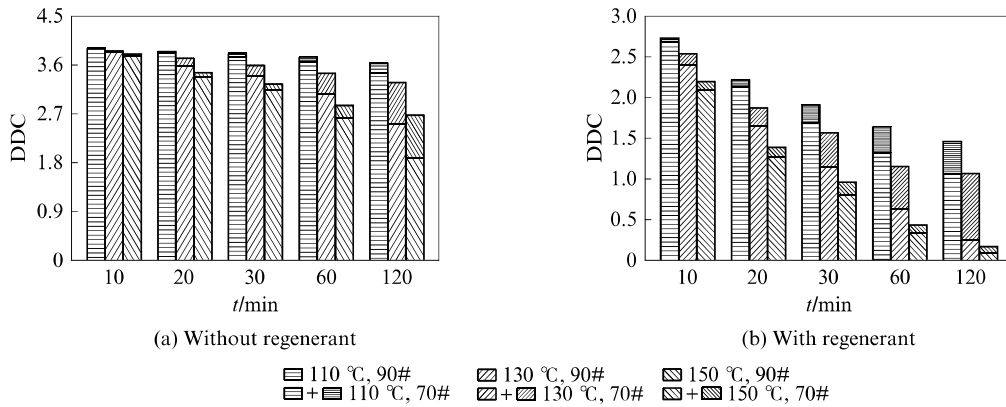


图 9 沥青结合料试样层间分布离散系数
Fig. 9 DDC for asphalt binders ($m_1/m_2=0$)

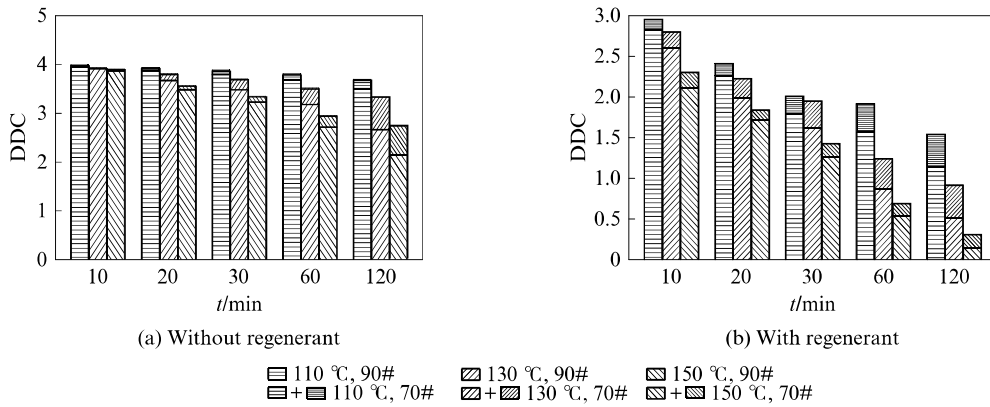


图 10 $m_1/m_2=1.0$ 时沥青胶浆试样层间分布离散系数
Fig. 10 DDC for asphalt mortars ($m_1/m_2=1.0$)

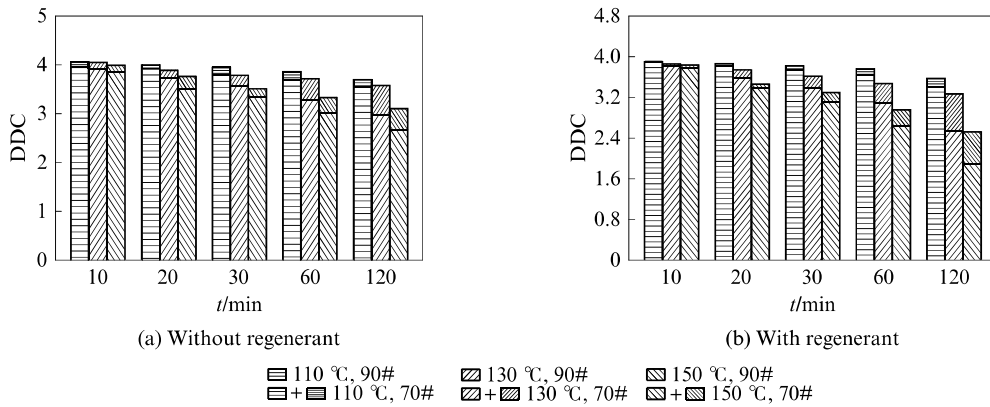


图 11 $m_1/m_2=2.0$ 时沥青胶浆试样层间分布离散系数
Fig. 11 DDC for asphalt mortars ($m_1/m_2=2.0$)

热温度的提高以及再生剂的添加,各层位处所含 90 #新添沥青掺量 w 逐渐接近混溶沥青标准值 0.5; 沥青层间分布离散系数 DDC 不断降低,再生沥青整体属性趋于均匀一致;添加再生剂后,在各加热温度和加热时间节点处,90 #新添沥青对试样层间分布

均匀性的提升幅度相比未添加再生剂时更为显著,并且随加热时间延长其提升幅度增大.该现象表明再生剂对沥青胶结料试样在界面区域扩散融合的改善效果较为显著且持久,但其提升幅度随粉胶比增加而不断下降.该行为不仅进一步有力证实了 RAP

沥青与新添沥青在界面区域的确能够发生分子扩散交融反应,同时也验证了前文基于融合速率 DS 和融合程度 DOB 分析得到的结论.

2.2.4 界面扩散激活能 Q

各沥青胶结料试样界面扩散激活能 Q 结果见表 4.

表 4 各沥青胶结料试样界面扩散激活能 Q
Table 4 Q in the asphalt interface

m_f/m_a	Regenerant	Virgin asphalt	10 min	20 min	30 min	60 min	120 min
0	Without	70 #	0.079 01	0.209 49	0.263 51	0.328 85	0.347 26
	Without	90 #	0.081 50	0.217 66	0.284 31	0.370 95	0.380 64
	With	70 #	0.064 27	0.206 15	0.228 67	0.264 76	0.321 73
	With	90 #	0.071 93	0.211 15	0.249 01	0.352 26	0.373 08
1.0	Without	70 #	0.055 62	0.188 75	0.250 99	0.322 64	0.331 29
	Without	90 #	0.064 18	0.201 44	0.257 78	0.360 98	0.367 26
	With	70 #	0.035 92	0.135 71	0.168 92	0.240 94	0.305 11
	With	90 #	0.049 89	0.146 80	0.197 05	0.261 93	0.332 16
2.0	Without	70 #	0.053 60	0.164 02	0.243 26	0.282 47	0.299 04
	Without	90 #	0.059 11	0.171 83	0.254 55	0.285 90	0.348 35
	With	70 #	0.046 24	0.143 85	0.232 18	0.256 49	0.295 79
	With	90 #	0.050 17	0.169 56	0.237 02	0.268 51	0.334 46

由表 4 可知,随着加热时间的延长,各沥青胶结料试样 Q 值快速增长并且逐步趋于稳定.究其原因,主要在于新添沥青、RAP 沥青分子在层间界面不断交换,扩散相中新添沥青掺量逐渐减小,受体相中新添沥青掺量快速增加,二者梯度差值逐渐减弱,导致界面分子扩散驱动力逐渐不足(见图 8~11),该现象验证了前文沥青界面融合速率 DS 随时间呈指数函数快速减小,界面融合的关键在加热初期阶段的结论.在同等条件下,90 # 新添沥青与 RAP 沥青在层间界面扩散需要打破的能量壁垒值较 70 # 新添沥青略高;添加再生剂后能够明显减小界面扩散所需的能量,这主要是因为 90 # 新添沥青与 RAP 沥青胶体结构的差异程度较后两者 70 # 新添沥青与 RAP 沥青相对更大,需要更高的能量以激活沥青界面分子,促使其发生扩散融合反应.因此,若新添沥青、RAP 沥青性能差异较大,建议事先添加少量再生剂以部分恢复 RAP 沥青性能.未添加再生剂时,掺入一定量矿粉能够减少驱动沥青界面扩散所需的能量.但是当添加再生剂且粉胶比较高时($m_f/m_a=2.0$), Q 值较低粉胶比条件下反而升高.究其原因,可能在于沥青胶浆因矿粉存在而造成其内部空隙相对增多,因此能够使沥青分子在界面迁移相对更加容易.但高矿粉含量下添加再生剂将使其小分子有效填充沥青胶浆内部空隙并裹附矿粉表面,从而发生激活界面扩散融合所需能量升高的行为,出现添加再生剂后作用效果反而下降的现象.

3 结论

(1) 荧光显微图像及其光学特征参数(平均光密度 AOD、累计光密度 IOD、图像灰度值 IGL)、基于动态剪切流变的界面融合速率 DS、融合程度 DOB、各层位中新添沥青掺量 ω 、分布离散系数 DDC 和界面扩散激活能 Q 可以分别从定性、定量角度直观表征 RAP 沥青与新添沥青界面融合特征.

(2) 随加热时间延长,界面融合速率 DS 呈指数函数快速减小;粉胶比较小时,提高新添沥青标号和添加再生剂可分别使 DS 值提升 2、10 倍左右,DS 衰减幅度降低 10%~50%;加热温度每提高 20 °C,DS 提升 50%~120%.

(3) 界面融合程度 DOB 与再生剂、新添沥青标号、加热时间和时间呈正相关关系,与粉胶比呈负相关关系.其中,添加再生剂可提升 DOB 值 2~3 倍并达到 100% 完全融合状态,并且添加再生剂对沥青界面融合的效果更为持久.

(4) 随加热温度及时间增加、新添沥青标号提高以及再生剂添加,沥青层间分布特征逐渐趋于均匀一致(DDC 值逐渐趋于 0),但其改善幅度随粉胶比增加而下降.

(5) 界面扩散激活能 Q 值随加热时间延长而快速增大并逐步趋稳,添加再生剂后 Q 值减小.该参数能够从能量角度有效揭示新添沥青、RAP 沥青分子界面融合的内机制.

参考文献:

- [1] 吕伟民,严家俊. 沥青路面再生技术[M]. 北京:人民交通出版社,1989:11-26.
LÜ Weimin, YAN Jiayi. Technical for highway asphalt pavement recycling [M]. Beijing: China Communications Press, 1989:11-26. (in Chinese)
- [2] 祝谭雍. 基于再生沥青混合料性能特点的再生路面设计研究[D]. 南京:东南大学,2017.
ZHU Tanyong. Structural analysis and design for recycled asphalt pavement based on the performance characteristics of recycled asphalt mixture [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [3] GAO L, LI H, XIE J G, et al. Evaluation of pavement performance for reclaimed asphalt materials in different layers [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159:561-566.
- [4] ARÁMBULA-MERCADO E, KASEER F, MARTIN A E, et al. Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158:432-442.
- [5] WAN J M, WU S P, XIAO Y, et al. Using interface shear characteristics to evaluate the residual performance of asphalt pavements [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(18):2070-2082.
- [6] 何兆益,陈龙,陈先勇,等. 厂拌热再生沥青混合料力学性能及应用研究 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5):871-875, 914.
HE Zhaoyi, CHEN Long, CHEN Xianyong, et al. Mechanical properties and application research of hot recycled asphalt mixture from central mixing plant [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5):871-875, 914. (in Chinese)
- [7] 郭乃胜,尤占平,赵颖华,等. 考虑再生剂作用的温拌再生沥青混合料路用性能 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4):674-681.
GUO Naisheng, YOU Zhanping, ZHAO Yinghua, et al. Performance of warm mix asphalt with recycled asphalt mixtures considering the effect of rejuvenating agent [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4):674-681. (in Chinese)
- [8] 郭德栋,张圣涛,李晋,等. 厂拌热再生过程中旧矿料颗粒的迁移行为 [J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(2):46-52.
GUO Dedong, ZHANG Shengtao, LI Jin, et al. Migration behavior of reclaimed mineral aggregate in process of central plant hot recycling [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2018, 48(2):46-52. (in Chinese)
- [9] 赵占立. 基于示踪法再生混合料中新旧沥青微观混合状态的研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2016.
ZHAO Zhanli. Study on micro state of blending of aged and virgin asphalt in recycling asphalt mixture based on trace method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 刘朝晖,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.
LIU Zhaohui, GAO Xinwen, ZHAI Long, et al. Diffusion characteristics of aged and virgin asphalt in reclaimed asphalt [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(5):18-24. (in Chinese)
- [11] BAGHAEE MOGHADDAM T, BAAJ H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114:805-816.
- [12] SIVILEVICCARONIUS H, VISLAVICCARONIUS K. Simulation of composition of recycled hot-mix asphalt mixture produced in asphalt mixing plant [J]. Construction and Building Materials, 2019, 214:17-27.
- [13] 陈龙,何兆益,陈宏斌,等. 新-旧沥青界面再生流变特征及分子动力学模拟研究 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(3):25-33.
CHEN Long, HE Zhaoyi, CHEN Hongbin, et al. Rheological characteristics and molecular dynamics simulation of interface regeneration between virgin and aged asphalts [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3):25-33. (in Chinese)
- [14] 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 hot recycling technical conditions [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3):418-422. (in Chinese)
- [15] 姜严旭. 热再生沥青混合料沥青再生与融合微观机制及性能评价研究 [D]. 南京:东南大学, 2018.
JIANG Yanxu. Study on performance evaluation of recycled asphalt and microscopic mechanism of asphalt blends in hot recycled asphalt mixture [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)