文章编号:1674-2869(2025)06-0629-05

再生剂在再生沥青混合料中的扩散融合行为研究

沈 凡[1],钟亚聃[1],向天翔[1],谯理格[2]
1. 武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205;
2. 中建商品混凝土江西有限公司,江西 南昌 330006

摘 要:为研究拌合工艺对再生剂与新老沥青扩散融合行为的影响,实现回收沥青路面材料(RAP)的有效利用,分别对采用4种工艺[RAP预热+温拌剂(HW工艺)、RAP预热(H工艺)、RAP冷加+温拌剂(CW工艺)、RAP冷加(C工艺)]制备的再生沥青混合料进行分层浸渍,提取出混合料内外层沥青试样,并利用凝胶渗透色谱(GPC)和原子力显微镜(AFM)进行测试分析。GPC归一化分子量曲线及不同区域面积积分分析表明:C工艺试样内外层曲线差异最大(外层小分子含量33.1%,内层大分子含量26.3%),HW工艺试样内外层曲线最接近(外层小分子含量25.7%,内层大分子含量21.3%),H工艺与CW工艺试样介于两者之间。AFM三维形貌显示:C工艺与HW工艺沥青试样较老化沥青呈现更密集的细长平滑小凸起,HW工艺呈现的凸起较C工艺更均匀。再生剂与新老沥青扩散融合过程不均匀,不同工艺下扩散融合效果由强到弱依次为HW、H、CW、C,RAP预热并添加温拌剂(HW工艺)最有利于促进再生剂的有效扩散融合。

关键词:道路工程;再生沥青混合料;分层萃取法;再生剂;扩散融合
中图分类号:U414 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202411004

Diffusion and fusion behavior of rejuvenator in recycled asphalt mixture

SHEN Fan[1], *ZHONG Yadan*[1], *XIANG Tianxiang*[1], *QIAO Lige*[2]
1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. China Construction Commercial Concrete Jiangxi Co., Ltd, Nanchang 330006, China

Abstract: To investigate the influence of mixing processes on the diffusion and fusion behavior between rejuvenator and aged/virgin asphalt, thereby promoting effective utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP), recycled asphalt mixtures prepared using four processes (RAP preheating+warm-mix additive (HW process), RAP preheating (H process), RAP cold addition+warm-mix additive (CW process), RAP cold addition (C process)) were subjected to layered extraction. Asphalt samples from the inner and outer layers of the mixture were obtained and analyzed using gel permeation chromatography (GPC) and atomic force microscopy (AFM). Analysis of GPC-normalized molecular weight curve and area integration of different regions revealed that the C process samples exhibited the most significant difference between the inner and outer layer curves (outer layer small-molecule content: 33.1%; inner layer large-molecule content: 26.3%), whereas the HW process samples showed the smallest difference (outer layer small-molecule content: 25.7%; inner layer large-molecule content: 21.3%). The H process and CW process samples showed intermediate results. AFM three-dimensional topography showed that both the C and HW process asphalt samples displayed denser, elongated, and smooth small bumps compared to the aged asphalt, with the bumps in the HW process samples more uniform than those in the C process samples. The results demonstrated that

收稿日期:2024-11-05
基金项目:国家自然科学基金(52178248);武汉市市政建设集团有限公司科技计划项目(wszky202109)
作者简介:沈 凡,博士,教授。Email:shenf@wit.edu.cn
引文格式:沈凡,钟亚聃,向天翔,等. 再生剂在再生沥青混合料中的扩散融合行为研究[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(6):629-633,652.

the fusion and diffusion process between the rejuvenator and the aged/virgin asphalt is not uniform. The effectiveness of diffusion and fusion under the different processes, ranked from strongest to weakest, is as follows: HW, H, CW, C. The process involving RAP preheating combined with warm-mix additive (HW process) is most conducive to promoting effective diffusion and fusion of the rejuvenator.

Keywords: road engineering; recycled asphalt mixture; hierarchical extraction; regenerator; diffusion and fusion

随着我国公路事业的发展,沥青路面广泛应用于城市道路与高速公路中,在车辆载荷及紫外线等反复作用下,沥青路面逐渐产生裂缝、坑槽等损伤,大量沥青路面亟待翻新重建[1-2]。回收沥青路面材料(reclaimed asphalt pavement, RAP)的再生利用是当前研究热点,而恢复老化沥青的性能是RAP再生利用的关键。工程实践中,通常通过掺加再生剂实现这一目标。利用再生剂恢复老化沥青性能后,将RAP与新集料、新沥青进行组成优化设计,可制备满足使用要求的再生沥青混凝土材料[3-5]。RAP再生利用效果主要取决于拌合过程中新沥青与再生剂向旧沥青内部的扩散程度。在施工实践中,再生剂主要依靠机械搅拌分散于RAP中,大部分再生剂首先吸附于老化沥青表面,随后通过扩散作用逐渐向老化沥青内部迁移,从而恢复其性能[6]。

基于此,国内外学者对不同实验条件下再生剂的扩散行为进行了研究。胡光胜与王凤楼等[7-8]采用软化点和针入度试验分析了温度及时间等因素对再生剂扩散的影响规律,发现温度对再生剂扩散影响最大,时间次之,温度与时间的交互作用及老化程度影响较小。Xu与汪海年等[9-10]通过建立3种不同程度老化沥青的分子模型,探讨了试验温度、老化沥青的种类及分子的类型对再生剂扩散的影响,发现除分子热运动外,分子作用力有利于再生剂的扩散,同时还发现沥青中存在的微孔促进了再生剂在沥青中的扩散。祁文洋等[11]基于菲克定律,利用扩散系数评价再生剂的扩散程度,发现再生剂在老化沥青内的扩散程度随沥青老化程度的增大而降低,此外升高预热温度或延长拌合时间可以提升再生剂的扩散程度。谢泽华等[12]研究了再生剂掺量对老化沥青性能的影响及再生剂在老化沥青中的渗透扩散过程,结果表明高渗透性再生剂的扩散能力较普通再生剂的扩散能力更强,预热温度和拌合时间对扩散进程的影响较大。在实际生产过程中,厂拌热再生技术采用分批投料方式,将新集料、RAP、再生剂及新沥青依次加入搅拌设备。搅拌过程中,再生剂与新沥青需逐步扩散并融入RAP所含的老化沥青中,此扩散融合程度直接影响再生沥青的性能恢复效果。因此,深入研究不同工艺条件下再生剂及新沥青与老化沥青的扩散行为,对优化再生效果、提高RAP利用效率具有重要意义。

本文基于厂拌热再生的制备工艺,以RAP的预热温度(130 ℃或30 ℃)以及是否添加温拌剂作为控制因素,制备再生沥青混合料,再以四氢呋喃溶液浸渍混合料表面沥青胶浆的分层萃取物为研究对象,采用凝胶渗透色谱(gel permeation chromatography, GPC)和原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM),研究不同工艺条件下再生剂在旧沥青中的扩散融合行为。

1 实验部分

1.1 原 料

沥青为Ⅰ-D改性沥青,针入度为49 (0.1mm),5 ℃延度为28 cm,软化点为82.5 ℃;再生剂为RA-75型再生剂;温拌剂为表面活性型温拌剂Evotherm M1。

钢渣(宝武环科武汉金属资源有限责任公司),粒径为9.5~13.2 mm,其各项技术指标均符合《沥青混合料用钢渣》(JT/T 1086—2016)的要求。RAP为服役10 a路段的铣刨料,经破碎筛分预处理后,选取其中粒径0~10 mm的粒组为本研究用RAP,高温燃烧炉实验确定其油石比为5.6%。由于RAP中存在的老化沥青会与石料吸附粘合,出现不同程度的团聚,因此需要对燃烧后的RAP进行筛分,得到其真实级配,其燃烧后级配见表1。

1.2 方案与方法

1.2.1 实验方案 以RAP的预热温度(130 ℃或30 ℃)以及是否添加温拌剂作为控制因素,分别以4种工艺[RAP预热+温拌剂(HW工艺)、RAP预热(H工艺)、RAP冷加+温拌剂(CW工艺)、RAP冷加(C工艺)]制备再生沥青混合料,研究不同工艺下再生剂在RAP中的扩散程度。钢渣再生沥青混合料的配合比为:钢渣与RAP的质量比为60∶40,新沥青用量为混合料质量的3.1%,再生剂用量为混

表1　RAP燃烧后级配

Table 1　Gradation of RAP after ignition (oven) test

筛孔尺寸 / mm	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
通过百分率 / %	100.0	100.0	84.3	53.5	35.7	29.4	21.7	17.0	14.4	12.9

合料中老化沥青质量的5%；温拌剂用量为沥青总质量（包括新沥青和老化沥青）的0.4%。基于厂拌热再生的工艺流程，各组新沥青预热温度均为165 ℃，钢渣预热温度为190 ℃，击实温度为160 ℃，拌合过程中采用沥青混合料自动拌合机，先将RAP和钢渣预拌60 s，再分别加入再生剂、新沥青和温拌剂进行搅拌，拌合时间为90 s，总拌合时间为150 s。

1.2.2　*分层浸渍实验*　三氯乙烯溶液是一类致癌物质，毒性较大，污染性强，试验中采用四氢呋喃溶液（2B类致癌物质）进行替代。

将钢渣再生沥青混合料按照制备工艺进行拌合，将混合料摊铺至牛皮纸上，手动分散降温；待混合料冷却至室温后，再用9.5 mm的标准筛进行筛分，取筛下混合料90 g用孔径38 μm的筛布进行包裹，置于盛有150 mL四氢呋喃溶液的容器中分别浸渍3次，3次浸渍时间均为2.5 min，要求四氢呋喃溶液能够完全浸没混合料。将浸渍溶液放置于60 ℃真空干燥箱内60 min，得到沥青的浸渍残留物。由于是分次分层浸渍，故第1次浸渍获得的沥青残留物定义为沥青胶浆外层，第3次浸渍获得的沥青残留物定义为沥青胶浆内层。

RAP中老化沥青的浸渍：将RAP用孔径38 μm的筛布包裹，再置于盛有四氢呋喃溶液的容器中，待RAP中的老化沥青完全溶解后，取出RAP并对浸渍溶液进行干燥处理，得到老化沥青样品。

1.2.3　*测试方法*

（1）GPC测试

采用美国Waters-1515型色谱仪（三根色谱柱串联，流动相为四氢呋喃）对老化沥青、再生剂及不同拌合工艺下内外层浸渍沥青试样进行测试并进行归一化处理，得到样品分子量对数（lgM_w）与单位质量分子量的微分[dwt/d(lgM_w)]关系图，该曲线能够反映不同分子量物质的含量，即组分的组成特征。老化沥青和再生剂的GPC曲线见图1。根据老化沥青和再生剂的分子量分布情况，以lgM_w在1.75、2.73、3.48和4.25时的值为分界点，并定义[1.75-2.73)、[2.73-3.48)、[3.48-4.25)分别对应小相对分子量、中相对分子量、大相对分子量区间。对样品不同相对分子量区间进行面积积分，得到分子量区间物质的面积占比，此面积占比对应不同物质的含量[13]。

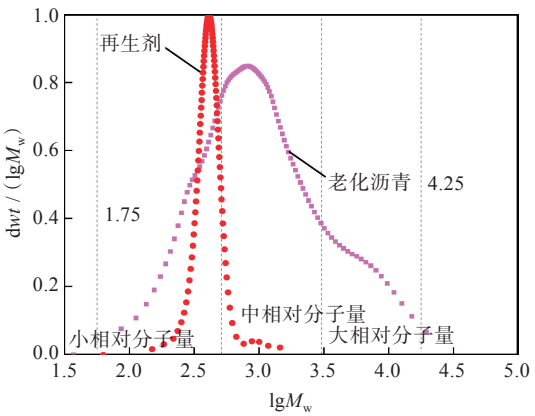

图1　老化沥青和再生剂的GPC曲线

Fig. 1　GPC curves for aged asphalt and regenerant

（2）AFM测试

将沥青样品滴至载玻片上，置于110 ℃烘箱中使其形成平整表面，随后缓慢冷却至室温。待样品温度恒定后，使用布鲁克Dimension ICON原子力显微镜（AFM）进行测试（扫描视野为10 μm × 20 μm）。

2　结果与讨论

2.1　GPC测试结果分析

将4种工艺制备的再生沥青混合料分层浸渍后选取内外层浸渍沥青试样进行GPC测试，归一化处理后的GPC曲线见图2。GPC曲线能够表征沥青组分的一致性：内外层沥青胶浆的GPC曲线重合度越高，组分一致性越高；反之，则组分离散程度越大。

由图2可知，不同制备工艺内外层浸渍沥青试样的GPC曲线均存在不同程度的分离现象，说明在机械拌合作用下，集料表面的沥青胶浆组成呈不均匀状态。其中，C工艺沥青试样（RAP冷加）的内外层曲线离散程度最大，而HW工艺试样（预热+温拌剂）的曲线重合度最高。H工艺试样（仅预热）与CW工艺试样（仅温拌剂）的内外层曲线离散度显著低于C工艺试样。这表明相较于RAP冷加，通过加入温拌剂或对RAP进行预热均能够促进再生剂、新沥青与老化沥青的融合，使集料表面的沥青胶浆更均匀。再生剂、新沥青与老化沥青融合得越充分，越有助于提升再生沥青混合料的

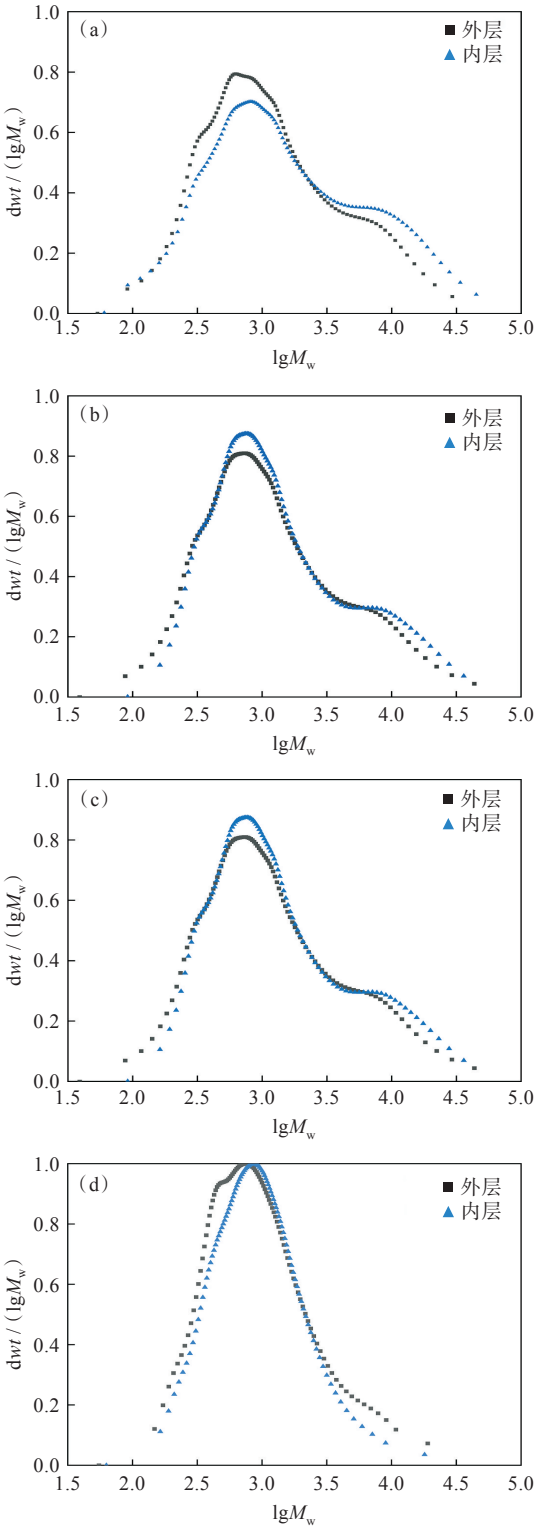

图2 不同拌合工艺沥青胶浆内层、外层的GPC曲线：(a)C工艺，(b)CW工艺，(c)H工艺，(d)HW工艺

Fig. 2 GPC curves for the inner and outer layers of asphalt mortar prepared usig different mixing processes: (a) C process, (b) CW process, (c) H process, (d) HW process

再生效果。

此外结合厂拌热再生施工工艺及分层浸渍实验可知，沥青胶浆外层在混合料拌合的初期主要由新沥青和再生剂组成，沥青胶浆内层主要由老化沥青组成。随着拌合的进行，新沥青与再生剂逐步向RAP中的老化沥青渗透扩散。

2.2 基于GPC的物质含量分布分析

在厂拌热再生沥青混凝土的制备过程中，新沥青、再生剂和老化沥青存在相互扩散融合行为。由于小相对分子量物质扩散更显著，新沥青、再生剂和老化沥青的扩散融合过程可以视为外层小相对分子量物质不断向内层扩散的过程。拌合初期，沥青胶浆外层小相对分子量物质含量较高，沥青胶浆内层小相对分子量物质含量较低，沥青胶浆内层主要由老化沥青组成，其中的大相对分子量物质扩散较慢。

对4种拌合工艺下提取的内外层浸渍沥青试样与再生剂及老化沥青的GPC曲线分3个区域进行面积积分，根据3个区域面积占比定量分析不同工艺条件下再生剂在RAP中的扩散融合行为：对于沥青胶浆外层与内层，以小相对分子量物质和大相对分子量物质为对象，分别反映小相对分子量物质向内层迁移扩散的情况；新沥青、再生剂与老化沥青融合后，老化沥青中大相对分子量物质的含量变化。分析结果见图3。

由图3可知，C、CW、H、HW工艺沥青胶浆外层小分子含量分别为33.1%、28.4%、27.5%、25.7%，较再生剂小相对分子量物质的含量(95.0%)显著降低，说明在机械拌合作用下，有大量小相对分子量物质参与扩散融合过程，降幅越大表明扩散越显著。

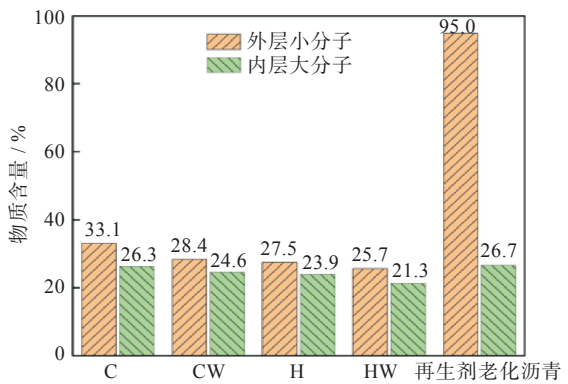

图3 不同工艺下沥青胶浆内层、外层物质含量

Fig. 3 Substance content of the inner and outer layers of asphalt mortar under different processes

此外，C、CW、H、HW工艺沥青胶浆内层大相对分子量物质含量分别为26.3%、24.6%、23.9%、21.3%，老化沥青中大相对分子量物质的含量为26.7%，说明有物质进入内层改变了内层中老化沥

青的组成，降幅越大表明有更多的物质进入沥青胶浆内层。对RAP进行预热显著降低了老化沥青的黏度，从而促进再生剂和新沥青与老化沥青的融合；而添加表面活性剂型温拌剂，则能够一定程度地乳化活化新沥青以及RAP中的老化沥青，提升再生剂在老化沥青中的扩散效率。因此，RAP预热与温拌剂添加均能有效促进再生剂、新沥青与老化沥青的扩散融合进程。各工艺下扩散融合效果由强至弱依次为HW工艺、H工艺、CW工艺、C工艺。

2.3　AFM三维形貌分析

RAP中老化沥青和C、HW工艺浸渍所得的内层沥青试样的AFM的三维形貌见图4。

在AFM三维形貌图中，观察到较粗亮白色柱状凸起，这是由高分子蜡晶与极性较强的大相对分子量沥青质缔结一些胶质分布在沥青油相中形成的，且在其周围还存在颜色深浅不一的较细长且平滑密集的小凸起，亮白色区域为极性沥青质，而深色区域为非极性的饱和分，平滑密集的小凸起是胶质与芳香分。由于各组分相对分子量有差异，收缩变形能力也不同，因此沥青质与饱和分高度起伏变化差距较大，表面形成“褶皱”[14-17]。

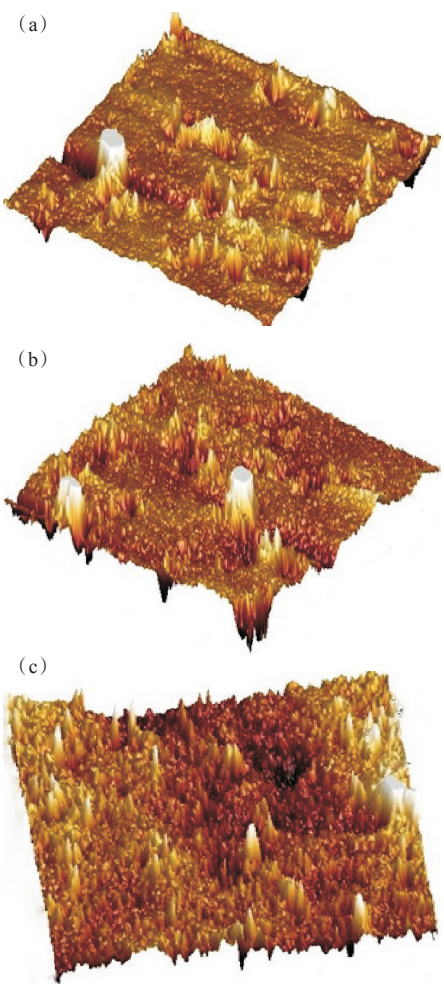

图4　老化沥青(a)、C工艺内层浸渍沥青(b)及HW工艺内层浸渍沥青(c)的三维形貌

Fig. 4　Three-dimensional topography of aged asphalt (a), inner layer impregnated asphalt from C process (b) and inner layer impregnated asphalt from HW process (c)

老化沥青的AFM形貌[图4(a)]中的大尺度、较粗亮的白色柱状凸起，“褶皱”及平滑密集小凸起均呈现分布不均匀的特征，说明老化沥青中大相对分子量沥青质含量较高。在图4(b)和图4(c)的AFM图中均观察到一些颜色深浅不一、较细长且平滑密集的小凸起，且该结构在图4(c)中分布更为密集均匀，此微观形貌演变表明再生剂及新沥青中的芳香分、饱和分等轻质组分已扩散至老化沥青中，实现了新/旧沥青及再生剂的融合。表明HW工艺[图4(c)]相较于H工艺[图4(b)]，促进了轻质组分向老化沥青的扩散深度与均匀性，对其扩散融合程度的提升更为显著。

3　结　论

(1)基于厂拌热再生工艺，在机械搅拌作用下，再生剂与新老沥青存在相互扩散融合的过程，形成的沥青胶浆呈现非均质分布特征。

(2)RAP冷加的热拌再生沥青混凝土中，再生剂与新老沥青的扩散融合效果最差；RAP预热与温拌剂添加均能有效促进再生剂、新沥青与老化沥青的扩散融合进程。各工艺下扩散融合效果由强至弱依次为HW工艺、H工艺、CW工艺、C工艺。

参考文献

[1]　屠艳平，陈国夫，徐雄，等.再生混凝土微粉对沥青及沥青混合料性能的影响[J].武汉工程大学学报，2023，45(3)：349-354.

[2]　卢忠明，米轶轩，吴少鹏，等.温拌LDHs改性沥青混合料抗紫外老化性能及应用研究[J].武汉工程大学学报，2024，46(5)：585-590.

[3]　刘欢，林杰.废旧沥青路面材料的再生利用研究[J].科技创新与应用，2022，12(26)：89-92.

[4]　慕博博.再生剂在老化沥青中扩散及再生效果研究[D].兰州：兰州理工大学，2021.

[5]　刘璐，崔亚楠，崔树宇.再生剂在老化沥青中扩散行为的多尺度研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版)，2023，20(5)：84-93.

[6]　况栋梁，刘文昌，张阳，等.基于表面润湿理论的再生剂-老化沥青界面扩散行为评价[J].中国公路学报，2020，33(7)：58-67.

(下转第652页)