

微波诱导新旧沥青的融合程度

董淼¹, 单景松^{2*}, 张斌¹, 丛凯¹, 张新正¹, 韩威林²

1. 山东省公路桥梁建设集团有限公司, 山东 济南 250014;

2. 山东科技大学土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590

摘要:为促进废旧沥青混合料在再生沥青中的高质量分数应用,在新旧沥青混合料中添加纳米材料作为吸波剂提高微波加热效率,依据新旧沥青在荧光显微镜下被激发的荧光强度差异,观察微波诱导下掺加不同吸波剂(单掺纳米 SiC、单掺纳米 Fe₂O₃、复掺纳米 SiC-纳米 Fe₂O₃, 纳米 SiC 与纳米 Fe₂O₃ 质量比为 1:2)再生沥青混合料试件的新旧沥青的融合程度,采用灰度量化表达沥青的融合程度。结果发现:单掺纳米 SiC 或单掺纳米 Fe₂O₃ 均能提高再生沥青混合料试件中新旧沥青交界处的灰度,单掺纳米 SiC 后试件新旧沥青交界处的灰度优于单掺纳米 Fe₂O₃,复掺纳米 SiC-纳米 Fe₂O₃ 后新旧沥青交界处的灰度比单掺任一种吸波剂更优,复掺纳米 SiC-纳米 Fe₂O₃ 后试件新旧沥青交界处的灰度为新沥青的 72.14%。

关键词:新旧沥青融合;荧光显微镜;吸波剂;灰度;微波

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)05-0077-06

引用格式:董淼,单景松,张斌,等. 微波诱导新旧沥青的融合程度[J]. 山东交通学院学报,2025,33(5):77-82.

DONG Miao, SHAN Jingsong, ZHANG Bin, et al. The fusion degree of new and old asphalt induced by microwave[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(5): 77-82.

0 引言

新旧沥青的融合程度是实现废旧沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)在再生沥青混合料中高比例应用的关键因素之一。采用微波加热方式,在沥青混合料中加入吸波剂可提高新旧沥青的融合效率,以及再生过程中旧沥青的激活程度。通过傅里叶红外光谱仪、能谱仪、扫描电镜、原子力显微镜等仪器观测新旧沥青融合后的微观结构,分析新旧沥青融合的微观机理。

再生剂广泛应用在 RAP 再生过程中。赵培馨^[1]研究以废机油作为再生剂的再生苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS)改性沥青的物理性能,通过红外光谱试验研究 SBS 改性沥青的再生微观机理,认为适量废机油对 SBS 改性沥青有较好的再生效果。谢远光等^[2]研究基于新型再生剂的老化 SBS 改性沥青的流变特性及微观机制,分析老化沥青与再生沥青的宏观性能与微观机理,验证适量再生剂可在一定程度上改善老化沥青的低温性能。姚志杰^[3]采用人工制备老化沥青和再生沥青,采用动态剪切流变、红外光谱、凝胶色谱、表面自由能等方法研究沥青在老化和再生过程中的流变性能、化学组成、黏附性和微观结构等的变化规律,认为添加再生剂可减小老化沥青的复数模量和相位角,有效增强沥青与集料间的界面黏附性和抗剥落性能。Xu 等^[4]构建新沥青黏结剂和老化沥青黏结剂的混合模型,研究再生剂向新沥青黏结剂和老化沥青黏结剂的扩散过程,发现再生剂能根据温度改善新沥青黏结剂和老化沥青黏结剂的混合效率,使老化沥青黏结剂的分子结构更接近新沥青黏结剂。胡皓天^[5]采

收稿日期:2023-11-30

基金项目:山东省企业技术创新项目(202350101571)

第一作者简介:董淼(1984—),男,江苏徐州人,工程师,主要研究方向为路面工程,E-mail:21525105@qq.com。

*通信作者简介:单景松(1978—),男,山东东营人,教授,工学博士,主要研究方向为道路材料,E-mail:54730867@qq.com。

用纳米压痕仪、扫描电子显微镜及能量色散谱仪测试分析再生粗骨料-沥青胶浆界面过渡区的纳米力学参数、微观形貌特征及化学元素组成,实现再生粗骨料-沥青胶浆多重界面结构表征与再生粗骨料沥青混合料宏观性能的评价。

研究者对新老沥青的融合程度进行量化评价。赵占立^[6]以环氧树脂作为示踪剂,采用能谱仪扫描获得示踪元素的分布图,采用均匀系数分析新沥青中示踪剂的分布,通过扫描电镜和红外光谱定量分析新旧沥青融合程度。石鹏程等^[7]采用原子力显微镜和傅里叶红外光谱分析仪对再生沥青混合料中新旧沥青的融合情况进行试验研究,采用加权变化法从微观尺度分析新旧沥青融合的变化规律,证明新沥青在再生沥青混合料中的质量分数大于 50.3%时,新旧沥青的融合效果较好。王腾^[8]采用磁铁矿集料代替新集料实现热再生沥青混合料的新旧料分离,采用甲苯浸泡-静置法分离热再生沥青混合料中的集料和沥青,通过棒状薄层色谱分析热再生过程中沥青的组分变化情况,提出准确有效测定热再生过程中新旧沥青融合程度的计算公式。张俊杰^[9]提出基于荧光粒子表征和激光扫描共聚焦显微镜结合的试验方法,确定新旧沥青融合、扩散三维观测及量化表征的可行性方案,分析施工接触阶段和路面服役状态下的加热温度、加热时间、新旧集料不同融合情况及均质情况等因素对新旧沥青融合程度的影响,发现加热温度和更小粒径的新集料都显著影响新旧沥青融合和扩散过程。张德鹏等^[10]分层萃取再生沥青混合料,并采用凝胶渗透色谱和傅立叶红外光谱定量监测,对比分析后确定各层沥青的融合程度。微波加热比传统热传导方式更有助于旧沥青充分加热,促进新旧沥青的融合,但沥青结合料对微波不敏感^[11]。

为促进 RAP 在道路工程中的规模应用,本文在新旧沥青混合料中添加纳米材料提高微波加热效率,通过荧光显微镜试验测试分析新旧沥青融合交界处,探究新旧沥青再生过程中融合程度的量化评价方法,以期对比微波诱导条件下单一与复合纳米吸波剂对新旧沥青融合程度的影响,以期旧沥青的规模化利用提供数据参考。

1 新旧沥青融合试件的制备

1.1 试验设计

新旧沥青的融合程度与老化沥青、新沥青和新旧沥青的融合处理有关^[12]。制备再生沥青混合料时,微波加热能提高加热效率,有效防止沥青的二次老化,促进新旧沥青融合^[13]。纳米吸波剂具有质量小、比表面大、吸波能力强等优点,在微波加热领域应用广泛。在微波加热诱导下的新旧沥青融合过程中,向旧沥青混合料中加入纳米吸波剂吸收微波能,转换为热能,减少微波反射,提高加热效率及旧沥青的激活程度^[14-16]。

将符合文献[17]要求的 70# 基质沥青进行老化处理制备老化沥青试件,再将未老化处理的 70# 基质沥青均匀铺在老化沥青上方作为新沥青层,通过微波设备加热新旧沥青层,制备新旧沥青融合试件。设计 5 种类型的沥青融合试件,对比分析不同吸波剂对新旧沥青融合试件路用性能的影响,试验设计方案如表 1 所示。

表 1 试验设计方案

试验编号	试件组成		新沥青质量/g	旧沥青质量/g	吸波剂质量/g
	沥青组成	吸波剂			
1	新沥青-新沥青	无	100	0	0
2	新沥青-老化沥青	无	50	50	0
3	新沥青-老化沥青	单掺 SiC	50	50	0.50
4	新沥青-老化沥青	单掺 Fe ₂ O ₃	50	50	1.00
5	新沥青-老化沥青	复掺纳米 SiC-纳米 Fe ₂ O ₃	50	50	0.25/0.50

1.2 新旧沥青融合试件制作步骤

新旧沥青内分子的布朗运动引起新旧沥青的融合,在温度和压强不变的环境下,70[#]基质沥青和老化沥青的组分存在差异,70[#]基质沥青的轻质油分由外至内向老化沥青扩散,扩散后二者融合,两相沥青中的组分重新组合,直至达到新相态^[12],沥青融合试件的制作步骤如下。

1) 将 70[#]基质沥青放置在旋转薄膜烘箱中老化处理 85 min,再放置在压力老化容器中老化 20 h,称取相应质量的沥青倒入玻璃盘中,放入烘箱中,加热至 160 ℃ 后断电,使其自然降温,保证沥青表面光滑平整。

2) 将新沥青放入烘箱中加热至 160 ℃,取 50 g 新沥青倒入小烧杯中,并称取相应质量的吸波剂加入烧杯中,在新沥青温度降至 140 ℃ 前快速搅拌,使吸波剂分散均匀,保证沥青的融合效果,若沥青温度低于 140 ℃,进行二次加热,但加热次数不大于 3 次,防止沥青老化。

3) 制得吸波沥青后,将盛放吸波沥青的小烧杯放入温度为 160 ℃ 烘箱内加热至流动状态^[18],将流动状态吸波沥青倒在老化沥青表面,缓慢倾斜玻璃盘使之表面平整,放入烘箱加热至 160 ℃,保温 30 min 后关闭电源,自然冷却至室温,保证沥青表面光滑平整。所取吸波沥青与老化沥青质量相等,两类沥青成层厚度基本相等,控制每层厚度为 0.4~0.6 cm。

4) 冷却后将新旧沥青玻璃盘取出放入微波炉中加热,设定旋转加热 3 min,功率为 5 kW。

制作新沥青融合试件时,将新沥青放入烘箱中,加热至 160 ℃ 呈流动状态后,取 100 g 均分至 2 个小烧杯中,逐次分层浇筑至玻璃盘中即可。

1.3 荧光显微镜观测试件制作

新旧沥青试件冷却后,在试件表面倒入高度为 1 cm 的水。将试件放入冰柜中冰冻至上部水完全冻结,保证在持续低温状态下切割沥青,新旧融合沥青因低温脆性发生脆断。当冰冻温度低于沥青的低温脆点时,沥青发生低温破坏,影响沥青性能。70[#]基质沥青的低温脆点约为-20 ℃。进行冰冻操作时,控制冰柜温度为(-10±2)℃。切割新旧沥青试件时,用玻璃切割机切割玻璃盘底部,同时双手轻轻按压玻璃盘两侧,将玻璃盘和沥青同时掰断。因新旧融合沥青的低温脆性,玻璃盘及新旧融合沥青发生一体式脆断,可完整地暴露新旧沥青交界面,同时不破坏融合面。

将切割下的新旧沥青融合交界处放置在两层载玻片间并压实,采用荧光显微镜进行观测,调整荧光显微镜的工作电流,增强图片清晰度,设荧光显微镜发射的光波波长为 450 nm,曝光时间为 1 s,发光强度为 12 cd,采用 10 倍物镜和 4 倍物镜对比观测。

2 新旧沥青融合交界处荧光显微镜观测方法

新旧沥青均匀融合后,再生沥青被激发的荧光强度介于新、旧沥青间^[13-14]。通过荧光显微镜 4 倍、10 倍物镜观测新旧沥青交界处图像,分别在距新旧沥青融合交界处 200、600 μm 的新沥青与老化沥青图像中框选 4 张边长为 200 μm 的正方形图,以 4 倍物镜为例,如图 1 所示,编号为 1~4,依次为从新沥青至老化沥青的 4 张图片。截取小图后导入软件 MATLAB 中生成灰度图,如图 2 所示,计算 4 张小图的平均灰度。

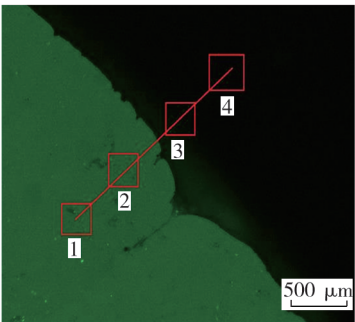


图 1 新旧沥青融合交界处

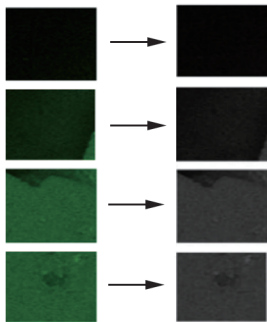


图 2 灰度图处理

基于荧光显微镜观测灰度变化方法的优势包括:1) 通过图像处理和数据分析获得灰度,可量化不同样品、不同部位的灰度并进行对比,更客观地评估新旧沥青的融合程度。2) 荧光显微镜具有较高的分辨

率,能观察再生沥青混合料中的微小结构,分析灰度变化,定量评估不同成分间、新旧沥青间的融合程度。
3)进行可视化直观展示新旧沥青的融合程度,通过高清图像和图像处理技术,可清晰地观察沥青颗粒的分布、接触状况以及新旧沥青的融合程度,有助于更好地解释相关现象。

每组试验选取 6 张图像(3 张 4 倍物镜,3 张 10 倍物镜),采用 4 倍物镜能较好地观察交界处整体融合情况,采用 10 倍物镜则亮度变低,但调高亮度后能更精确观察交界处融合情况。将位置 2 与位置 3 的平均灰度作为交界处沥青的灰度,定量评价新旧沥青交界处沥青的融合程度。

3 荧光显微镜下试件灰度

3.1 新沥青试件

未参加吸波剂的新沥青试件在荧光显微镜 4 倍、10 倍物镜下的图片如图 3 所示,不同物镜下试件新沥青融合处灰度如表 2 所示。由图 3、表 2 可知:未参加吸波剂时,新沥青在 4 倍、10 倍物镜下的平均灰度分别为 55.12、83.91,后者为前者的 1.52 倍,原因是采用 10 倍物镜观察时调高了图片的亮度,观察的界面范围更小,后续分析仅展示 10 倍物镜下图片。

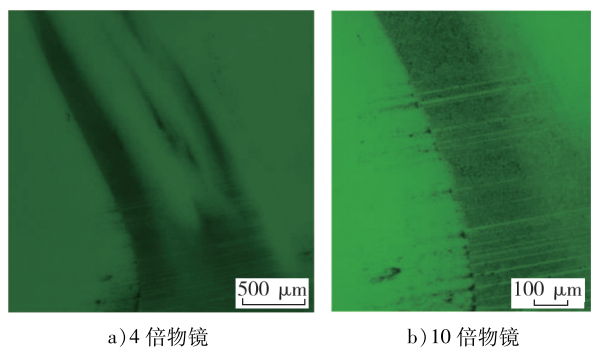


图 3 荧光显微镜下新沥青试件观察图片

表 2 不同物镜下试件新沥青融合处灰度

位置编号	灰度	
	4 倍物镜	10 倍物镜
1	58.77	84.78
2	52.64	88.08
3	57.60	79.74
4	58.28	79.98
平均灰度	55.12	83.91

3.2 未参加吸波剂、掺加不同吸波剂试件的新旧沥青融合情况

10 倍物镜下,未参加吸波剂、掺加不同吸波剂试件的新旧沥青融合情况如图 4 所示,新旧沥青交界处灰度变化如表 3 所示。

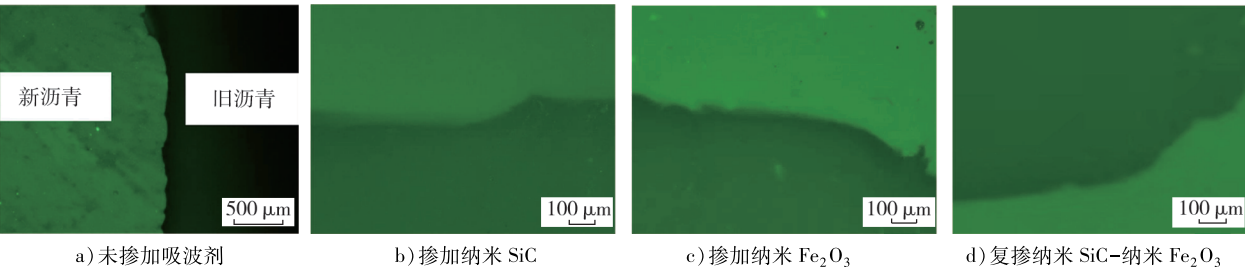


图 4 荧光显微镜 10 倍物镜下未参加吸波剂、掺加不同吸波剂试件的新旧沥青融合情况

表 3 荧光显微镜 10 倍物镜下不同试件的新旧沥青融合交界处灰度

位置编号	灰度			
	未参加吸波剂	单掺纳米 SiC	单掺纳米 Fe ₂ O ₃	复掺纳米 SiC-纳米 Fe ₂ O ₃
1	74.48	73.68	72.44	79.87
2	59.37	63.61	66.25	70.79
3	25.66	47.74	27.80	50.27
4	8.05	45.38	24.00	49.65

由图 4 可知:未掺吸波剂试件的新旧沥青融合交界处的分界区域较明显,交界处新沥青向老化沥青的融合扩散不明显;单掺纳米 SiC 后,试件的新旧沥青融合交界处颜色变浅,新旧沥青重叠,吸波剂只存在于新沥青中,未融入老化沥青;单掺纳米 Fe_2O_3 后,试件的新旧沥青融合交界处颜色较深,存在明显的分界;复掺纳米 SiC-纳米 Fe_2O_3 后,试件的新旧沥青融合程度明显优于单掺一种吸波剂,交界处新旧沥青融合重叠情况更明显,吸波剂已扩散至老化沥青,新旧沥青的融合更好。

由表 3 可知:未掺吸波剂试件的新旧沥青融合交界处的灰度随位置变化幅度较大,二者在微波加热条件下融合不理想;掺加不同吸波剂试件的新旧沥青融合交界处的灰度均随位置编号的增大而减小,复掺纳米 SiC-纳米 Fe_2O_3 试件的灰度变化幅度最小,其次是单掺纳米 SiC,单掺纳米 Fe_2O_3 试件的灰度变化幅度最大。单掺纳米 SiC 后,试件新旧沥青融合交界处灰度显著增大,交界处新旧沥青灰度差距较小,灰度变化幅度较小,二者融合较好。单掺纳米 Fe_2O_3 条件下试件的新旧沥青融合交界处的灰度随位置编号变化较快,说明新旧沥青的融合效果较差。复掺纳米 SiC-纳米 Fe_2O_3 的条件下试件新旧沥青融合程度明显优于单掺一种吸波剂,平均灰度最大。

荧光显微镜 4 倍、10 倍物镜下,不同试件新旧沥青融合交界处的灰度如表 4 所示。由表 4 可知:4 倍物镜下,试件新旧沥青融合交界处的灰度按从大到小顺序为复掺纳米 SiC-纳米 Fe_2O_3 、单掺纳米 Fe_2O_3 、单掺纳米 SiC、未掺吸波剂的试件,其中单掺纳米 Fe_2O_3 和单掺纳米 SiC 灰度相近,这可能是低倍物镜下较难锁定界面准确位置的误差所致;10 倍物镜下,试件新旧沥青融合交界处的灰度按从大到小顺序为复掺纳米 SiC-纳米 Fe_2O_3 、单掺纳米 SiC、单掺纳米 Fe_2O_3 、未掺吸波剂的试件,分别为新沥青灰度的 72.14%、66.36%、56.03%、50.67%。表明加入一定量的纳米 SiC,或复掺 SiC- Fe_2O_3 对促进新旧沥青的融合作用显著。

荧光显微镜 10 倍物镜下单掺纳米 Fe_2O_3 的新旧沥青融合试件的灰度为单掺纳米 SiC 的新旧沥青融合试件的 84.45%,交界处的重叠区域不如纳米 SiC 明显。少量纳米 Fe_2O_3 已进入旧沥青,表明纳米 Fe_2O_3 在微波条件下的活性更强。纳米 SiC 和纳米 Fe_2O_3 在相同体积下,纳米 SiC 质量更小,相同质量下纳米 SiC 体积较大,故在等质量掺配下,纳米 SiC 促进新旧沥青融合的效果优于纳米 Fe_2O_3 。

4 结论

在微波诱导条件下定量评价掺加不同吸波剂再生沥青混合料中新旧沥青的融合程度,对比分析吸波剂纳米 SiC 和纳米 Fe_2O_3 对新旧沥青融合的影响。

- 1) 依据新旧沥青在荧光显微镜下被激发出的荧光强度差异,提取新旧沥青交界处附近位置的灰度,计算新旧沥青交界处的灰度,实现新旧沥青融合程度的量化表征。
- 2) 掺加吸波剂后,新旧沥青融合交界处荧光显微镜图像产生相互侵入堆叠效果,颜色变浅,说明掺加吸波剂后提高了新旧沥青的融合程度。
- 3) 吸波剂纳米 SiC 和纳米 Fe_2O_3 均能提高新旧沥青的融合程度,单掺纳米 SiC 对新旧沥青的融合优于单掺纳米 Fe_2O_3 ,复掺纳米 SiC-纳米 Fe_2O_3 对新旧沥青的融合优于单掺一种吸波剂,融合程度可达到新沥青融合程度的 72.14%。

参考文献:

[1] 赵培馨. 废机油再生 SBS 改性沥青的性能评价[J]. 天津建设科技,2022,32(2):24-28.
[2] 谢远光,殷鹏. 基于新型再生剂的 SBS 改性沥青的流变特性及微观机制[J]. 新型建筑材料,2021,48(6):95-100.

表 4 荧光显微镜 4 倍、10 倍物镜下
新旧沥青融合交界处的灰度

试验编号	灰度	
	4 倍物镜	10 倍物镜
1	55.12	83.91
2	34.60	42.52
3	38.09	55.68
4	38.57	47.02
5	40.41	60.53

- [3] 姚志杰. 再生剂与老化沥青微观作用机理研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- [4] XU G J, WANG H. Diffusion and interaction mechanism of rejuvenating agent with virgin and recycled asphalt binder: a molecular dynamics study[J]. *Molecular Simulation*, 2018, 44(7): 1433–1443.
- [5] 胡皓天. 再生粗骨料沥青混合料性能及界面过渡区微观特性研究[D]. 扬州:扬州大学,2021.
- [6] 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.
- [7] 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): 225–230.
- [8] 王腾. 热再生过程中新旧沥青的融合行为研究[D]. 济南:山东交通学院,2020.
- [9] 张俊杰. 热再生沥青混合料中新旧沥青融合过程解析与表征研究[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [10] 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.
- [11] GULISANO F, GALLEGO J. Microwave heating of asphalt paving materials: principles, current status and next steps[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 278(3): 121993.
- [12] 罗于杰. 新旧沥青融合行为多尺度评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2021.
- [13] 李煜彬. 基于分层剥离方法的再生沥青融合效果评价[D]. 广州:华南理工大学,2020.
- [14] 魏建明. 沥青、集料的表面自由能及水分在沥青中的扩散研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2008.
- [15] 张钦展,苏兴,马银东等. 微波对旧沥青激活及新旧沥青融合的试验探究[J]. *中国公路*, 2023(9): 119–120.
- [16] 张富强. 吸波材料对微波加热再生沥青混合料效率影响研究[D]. 西安:长安大学,2020.
- [17] 中华人民共和国交通部,交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [18] 李煜彬,王端宜,郭秀林. 基于沥青荧光强度的再生沥青融合效果评价[J]. *中外公路*, 2022, 42(1): 193–198.

The fusion degree of new and old asphalt induced by microwave

DONG Miao¹, SHAN Jingsong^{2*}, ZHANG Bin¹, CONG Kai¹,
ZHANG Xinzhen¹, HAN Weilin²

1. Shandong Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Abstract: To promote the high-quality application of waste asphalt mixtures in recycled asphalt, nano-materials are added to the new and old asphalt mixtures as radar absorbing materials to improve microwave heating efficiency. Based on the difference in fluorescence intensity when the new and old asphalt are excited under a fluorescence microscope, the degree of fusion between the new and old asphalt in recycled asphalt mixture specimens with different absorbent agents (single addition of nano-SiC, single addition of nano-Fe₂O₃, and composite addition of nano-SiC-nano-Fe₂O₃, the mass ratio of nano-SiC to nano-Fe₂O₃ is 1 : 2) under microwave induction is observed, and the fusion status of the asphalt is quantified using gray level. The research results show that both single addition of nano-SiC and single addition of nano-Fe₂O₃ can improve the gray level at the interface of the new and old asphalt in the recycled asphalt mixture specimens. The gray level at the interface of the new and old asphalt after single addition of nano-SiC is better than that after single addition of nano-Fe₂O₃. After the composite addition of nano-SiC-nano-Fe₂O₃, the gray level at the interface of the new and old asphalt is superior to that with either absorbent agent alone, with the gray level at the interface of the new and old asphalt in the specimens after the composite addition of nano-SiC-nano-Fe₂O₃ being 72.14% of the new asphalt.

Keywords: new and old asphalt fusion; fluorescence microscopy; radar absorbing material; gray scale; microwave

(责任编辑:王惠)