

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.11.003

微波敏感型沥青再生剂软化效果影响因素分析

李永翔¹, 郝培文¹, 曹海波², 张海伟¹, 吴平³

- (1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;
2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075;
3. 内蒙古路桥集团有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:微波敏感型沥青再生剂是一种用于沥青路面就地热再生的乳液型再生剂,具有极强的微波敏感性,可以在微波作用下实现沥青路面的快速软化和再生。为了使微波敏感型沥青再生剂在就地热再生中发挥最佳性能,通过微波敏感型沥青再生剂的理化特性试验和自行设计的混合料软化试验,对影响微波敏感型沥青再生剂软化效果的影响因素:微波作用方式(不同时间、不同功率)、再生剂用量、混合料空隙率、集料类型进行了研究,分析了各影响因素对混合料软化效果的影响规律。通过路试,验证了微波敏感型沥青再生剂的软化效果。研究表明,微波敏感型沥青再生剂软化效果受微波作用时间和作用功率的双重影响,微波作用时间越长软化效果越好,而作用功率存在最佳值;随着微波敏感型沥青再生剂用量的增加,混合料的软化效果增强,但当用量大于某值时,软化效果增加不明显;混合料的空隙率越大,软化效果越好;混合料的软化效果受集料类型影响,但与集料的微波敏感程度相关性不大。

关键词:道路工程;再生剂;就地热再生;沥青混合料;微波

中图分类号: U416.26

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)11-0017-09

Analysis on Influencing Factors of Softening Effect of Microwave Sensitive Asphalt Rejuvenate Agent

LI Yong-xiang¹, HAO Pei-wen¹, CAO Hai-bo², ZHANG Hai-wei¹, WU Ping³

- (1. Key Laboratory for Road Structure and Materials of Transport Industry, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;
2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China;
3. Inner Mongolia Road and Bridge Group Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: Microwave sensitive asphalt rejuvenate agent is an emulsion rejuvenate agent used for hot in-place recycling of asphalt pavement. It has strong microwave sensitivity and can realize rapidly softening and recycling asphalt pavement under the action of microwave. In order to optimize the performance of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent in hot in-place recycling, the factors influencing softening effect of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent, including microwave action mode (different time, different powers), amount of rejuvenate agent, void ratio of mixture and type of aggregate are studied by physical and chemical properties test and self-designed mixture softening test, and the influence rule of each factor on softening effect of mixture is analyzed. The softening effect of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent is verified by road test. The study result shows that (1) the softening effect of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent is affected by both action time and power of the microwave, the longer the action time, the better the softening effect, and the optimal value of the action power exists; (2) with the increase of

收稿日期: 2018-03-24

基金项目: 交通运输部企业技术创新项目(2014315490010)

作者简介: 李永翔(1983-),男,内蒙古和林格尔人,博士。(lyxiang@foxmail.com)

microwave sensitive asphalt rejuvenate agent amount, the softening effect of mixture is enhanced, but the softening effect does not increase obviously when the amount of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent is more than a certain value; (3) the softening effect is improved with the voids of asphalt mixture; (4) the softening effect of the asphalt mixture is affected by the category of aggregate, but not interrelate to the microwave sensitivity of aggregate.

Key words: road engineering; rejuvenate agent; hot in-place recycling; asphalt mixture; microwave

0 引言

沥青路面就地热再生技术可以有效修复车辙、裂缝、波浪、拥包等路表病害,使受损路面恢复使用性能,同时就地热再生具有旧料利用率高,再生过程不产生废料,对交通干扰少,开放交通速度快等优点,被广泛应用于公路和市政道路中^[1-4]。虽然就地热再生技术得到了广泛应用,但还存在一些缺陷^[5-6],如软化沥青路面的方式不理想。现阶段沥青路面就地热再生主要采用明火加热、红外加热和热风循环加热3种方式^[7],这几种加热方式不同程度的存在以下缺陷:(1)加热效率低,达到再生要求的温度往往需要加热几十分钟;(2)通过热传导方式加热路面,导致再生层的温度梯度大,表面层温度过高,沥青二次老化严重,而下面层加热温度不足,不满足就地热再生耙松的要求,使集料发生破碎影响再生混合料的级配;(3)对环境影响大,由于在施工中路面上加热温度高,产生的沥青烟有害气体污染环境,同时高温对再生路面周围植被破坏,采用热风循环加热时破坏尤为严重^[8]。为解决就地热再生加热过程中存在的问题,相关学者进行了大量的研究。顾海荣等^[7,9]通过数值分析的方法研究了沥青路面加热过程中热能传递的规律,从理论上指出路面分层逐次加热对提高路面软化效率的作用。Huang Kai等^[10]通过建立离散元模型,对比了连续加热法和间歇加热法的加热效果,提出间歇加热法能有效提升再生层温度的均匀性,降低原路面沥青的二次老化,并通过试验进行了验证。董强柱等^[11]利用试验结合理论分析的方法研究了沥青路面加热过程中的能量输入与升温特性的关系,提出加热机阶梯配制功率能够有效改善沥青路面加热效果。以上学者通过改进加热方式在一定程度上改善了就地热再生中的问题,但由于沥青路面固有的热传递性能差,热量只能缓慢向下传递,不能从根本上解决加热效率低的问题,因此部分学者提出利用穿透性能好的微波进行路面加热。孙铜生等^[12]建立了微波加热沥青混合料热传热数学模型,并对实际微波加

热实际路面的热量传递规律进行了模拟,验证了沥青路面短时间升温的可行性。朱松青等^[13-14]通过建立二维微波加热传热模型,对微波作用的沥青路面温度场进行了研究,得出微波加热沥青路面温度场的分布规律。长安大学张翼飞等^[15]在考虑微波间干扰、耦合的基础上,对微波加热装置进行仿真研究,并在此基础上开发出就地微波加热设备。虽然微波具有穿透性和良好的加热效果,但目前还未能在大加热功率和大工程量的就地热再生中实现应用^[7],介于上述原因,研究人员开发出了微波敏感型沥青再生剂^[8](以下简称YG-1),以期解决微波软化沥青路面过程中面临的功率不足无法大规模应用的问题。YG-1是一种能在较低微波功率作用下快速渗透到沥青路面内部,通过“微爆扩孔”、“通道渗透”等作用实现沥青路面快速软化的新型再生剂,该再生剂不但能够使旧沥青混合料再生,而且能够提升原路面的软化效率,为沥青路面就地热再生提供了新方法。本研究对YG-1的微观形态、电磁特性、再生成分指标等理化特性进行了测试,并对影响YG-1软化效果的微波作用方式(不同时间、不同功率)、用量、混合料空隙率、集料类型等因素进行了分析研究,对其软化混合料的技术特性进行了研究。

1 微波敏感型沥青再生剂理化特性分析

1.1 外观及微观形态观测

本节通过目测和光学显微镜两种观测手段,观察YG-1的宏观和微观形态。

(1) 宏观形态

将YG-1置于玻璃管中,YG-1为土黄色,无分层,无沉淀,分布均一的不透明乳液;将YG-1置于玻璃板上,无颗粒和异物。YG-1在宏观上表现为各组分均匀分布。

(2) 微观形态

采用光学显微镜分别放大100倍和1000倍,可以看出,YG-1的各组分在微观上分布并不均匀,部分组分存在聚团现象,并呈现岛状分布的特点。

1.2 电磁特性分析

YG-1 由多种材料复配而成^[8], 其中包含有机再生成分、纳米微波敏感材料、水等, 电磁特性复杂, 采用常规的开放环境测试系统误差较难处理^[16], 因此本节选用了如图 1 所示的测试系统。测试系统整体等效为一个双端口网络, 两端口位于待测 YG-1 两侧, 根据微波网络理论, 可以将此系统的网络参数与材料的电磁参数相关联, 从而测得 YG-1 的电磁参数。

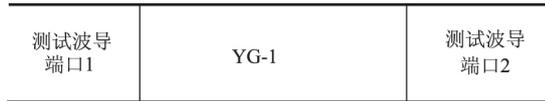


图 1 材料测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of material test system

通过矢量网络分析仪, 测得 YG-1 的电参数为 $\epsilon_r = 64.04$, $\tan \delta = 0.493$ 。根据微波发热理论^[17], 在微波作用下单位时间内单位体积介质所产生的热量为 P , 符合式 (1):

$$P = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r\tan\delta \cdot f \cdot E^2, \quad (1)$$

式中, $\tan \delta$ 为介质的损耗角正切; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为测试材料介电常数; f 为微波频率; E 为电场强度。

参考沥青混凝土^[18] 电参数 $\epsilon_r = 35.45$, $\tan \delta = 0.015$, 可知, YG-1 相比沥青混合料单位时间单位体积产生的热量约为沥青混合料的 60 倍, 微波发热及吸收能力极强。

1.3 其他理化参数的测定

YG-1 是由多种成分复配而成的沥青再生剂乳液, 具有乳液和再生剂的双重特性, 本研究参照现行的《公路沥青路面再生技术规范》^[19] (JTG F41—2008)、《公路沥青路面施工技术规范》^[20] (JTG F40—2004) 中对再生剂和乳化沥青的相关技术要求, 对其中部分适用 YG-1 的指标进行了测试, 测试结果如表 1 所示。

由测试结果可知, YG-1 为非离子慢裂型沥青再生剂乳液, 乳液乳化效果、储存稳定性满足现行规范对乳化沥青的要求; YG-1 蒸发残留物即再生成分满足现行规范对沥青再生剂的指标要求。

由 1.1~1.3 节的测试结果可知, YG-1 是一种复合型沥青再生剂乳液, 乳液为非离子慢裂型, 常温下为土黄色, 储存稳定性良好, 具有极强微波吸收能力和发热能力, 乳液中的再生成分满足现行规范中对沥青再生剂的要求。

表 1 YG-1 再生剂参数测试结果

Tab. 1 Test result of parameters of YG-1 rejuvenate agent

试验项目	测试结果	试验方法 ^[21]
破乳速度	慢裂	T 0658
粒子电荷	非离子	T 0653
筛上残留物 (1.18 mm 筛) /%	0.02	T 0652
恩格拉黏度	6.20	T 0622
蒸发残留物含量 /%	63.4	T 0651
残留物溶解度 /%	83.9	T 0607
残留物针入度 (25 °C) / (0.1 mm)	277	T 0604
残留物延度 (15 °C) / cm	21.0	T 0605
残留物闪点 / °C	233	T 0633
残留物薄膜烘箱试验前后质量变化 /%	2.7	T 0610
常温储存稳定性 (1 d/5 d) /%	0.3/0.8	T 0655

2 微波敏感型沥青再生剂软化效果影响因素分析

2.1 微波作用方式对软化效果的影响

YG-1 软化沥青混合料需在微波环境下进行, 微波作用方式对其软化混合料的效果至关重要。本节通过自行设计的混合料软化试验, 研究了微波功率 P 和作用时间 t , 对混合料软化效果的影响规律, 建立了软化效果与微波功率 P 和作用时间 t 的关系式。

(1) 沥青混合料软化试验方法

沥青混合料软化试验步骤如下:

① 成型相同配比马歇尔试件 16 组, 每组 4 个。本节试验选用的混合料类型为 AC-13;

② 将成型好的混合料试件一面涂抹 YG-1, 本节试验 YG-1 用量为 6.5 g/试件 (约合 0.8 kg/m²);

③ 将涂抹 YG-1 的试件放入功率可调的微波合成仪中进行试验;

④ 将微波作用后的马歇尔试件置于 0.5 m 的高度, 涂抹 YG-1 的面朝下, 让其自由下落到硬质地面上, 同一试件重复 3 次, 确保松动的集料脱落;

⑤ 称量散落的集料质量 m_g , 计算散落质量 m_s 与原马歇尔试件质量 m_0 的比值, 记为 $W_i = m_s/m_0 \times 100\%$;

⑥ 计算每组 4 个试件 W_i 的平均值, 记作质量损失 W_p ;

⑦ 通过质量损失 W_p 来评价混合料的软化效果, W_p 越大, 混合料的软化效果越好。

(2) 试验条件及结果分析

本节试验采用功率 P 为 100, 300, 500, 700 W, 作用时间 t 为 1, 3, 5, 7 min 进行混合料的软化试

验。对试验结果进行拟合,建立质量损失 W_p 与微波功率 P 和时间 t 的关系式,如式(2)所示:

$$W_p = \frac{-10.33 + 1.54t + 0.06P - 9.87 \times 10^{-5}P^2 + 3.99 \times 10^{-8}P^3}{1 - 0.18t + 0.03t^2 - 1.23 \times 10^{-3}t^3 - 1.93 \times 10^{-3}P + 1.99 \times 10^{-6}P^2} \quad (2)$$

式(2)方差 $R^2 = 0.9979$,说明质量损失 W_p 与时间 t 和功率 P 有很好的相关性。质量损失 W_p 随时间 t 和功率 P 的变化规律如图2所示。

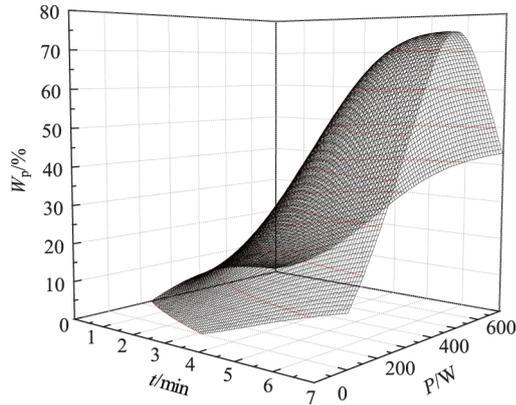


图2 质量损失随时间和功率的变化规律

Fig. 2 Rules of quality loss varying with time and power

由图3可知,功率相同的情况下,混合料质量损失 W_p 随着时间的增加而逐渐增加。试验7 min后, W_p 由大到小的作用功率依次为 $500 \text{ W} > 300 \text{ W} > 700 \text{ W} > 100 \text{ W}$ 。由图4可知,不同功率在不同时间段的质量损失差 W_c 不同,当功率为 100 W 时, W_c 在各时段几乎为0;当功率为 300 W 时, W_c 呈现先增后减的现象, W_c 最大值出现在 $3 \sim 5 \text{ min}$ 时段;功率为 500 W 和 700 W 时, W_c 都呈现出递减的现象, W_c 最大值出现在 $1 \sim 3 \text{ min}$ 时段,但各时段的 W_c 均为 $500 \text{ W} > 700 \text{ W}$ 。分析可知,沥青混合料的软化效果并未随着功率的增大而增大,当功率值大于或小于一定值时,软化效果都不好,功率存在最佳值。

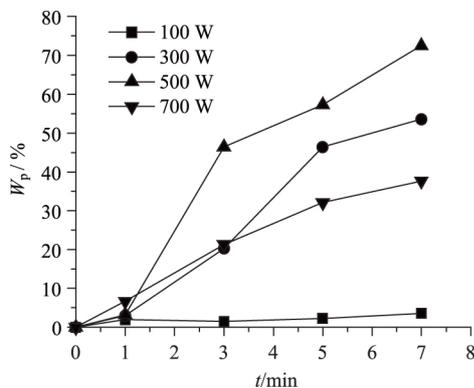


图3 质量损失随时间的变化规律

Fig. 3 Rule of quality loss varying with time

分析上述现象是由于 YG-1 软化混合料关键在于“微爆扩孔”作用^[8],即 YG-1 中的微波敏感材料在微波的作用下急剧升温,当其温度高于某值时,其周边的水发生瞬间汽化,在微小密闭的空间发生微爆现象,在微爆力的作用下,冲开软化后的沥青使 YG-1 继续渗透到混合料内部,实现混合料的进一步软化。在微波的作用下,“微爆扩孔”作用持续进行, W_p 随着时间的增加而增加。当功率过低时(如 100 W),微波敏感材料吸收能力过低,不足以支撑“微爆扩孔”现象大范围发生,产生了试验中混合料未软化的现象;当功率较低时(如 300 W),微波敏感材料吸收能量不足,“微爆扩孔”作用发生较慢,随着微波作用时间延长,能量集聚,“微爆扩孔”作用才大量发生,因此出现了质量损失差 W_c 先增大后减小的现象;当功率恰当时(如 500 W),微波敏感材料吸收能量恰好支持足量“微爆扩孔”作用的发生, YG-1 渗透得以保障,随着时间的延长, YG-1 逐渐消耗,软化作用减弱,因此出现了质量损失差 W_c 先大后小的现象;当功率过高时(如 700 W),微波敏感材料在短时间内吸收大量能量,温度升高过快,微爆在 YG-1 未充分渗透到混合料内部时已经发生,因此没有起到很好的扩孔作用,影响了其对混合料的软化效果。

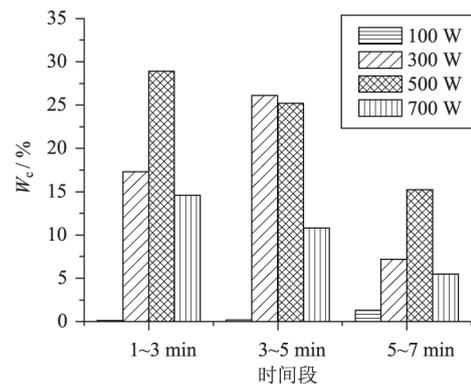


图4 不同时间段质量损失差值

Fig. 4 Differences of quality loss in different time periods

除功率和时间外,微波入射方向也是微波作用的变量之一。本节采用锡纸包裹马歇尔试件侧面的方法阻止微波由试件侧面进入,改变微波入射方向,研究了不同微波入射方向对混合料软化效果的影响,该试验方法更接近于就地热再生的实际工况。

试验采用前期试验中软化效果较好的试验条件,

功率 500 W, 作用时间 5 min, YG-1 用量 6.5 g/试件 (约合 0.8 kg/m²), 对包裹锡纸后混合料的软化效果进行测试, 并与未包裹锡纸的试验结果进行对比, 结果如表 2 所示。

表 2 包裹锡纸前后试件质量损失试验结果

Tab. 2 Test result of samples' quality loss before and after wrapping tin foil

质量损失 / %	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W _p
包裹锡纸	52.8	52.2	56.4	58.2	54.9
未包裹锡纸	55.1	59.0	61.9	53.2	57.3

由试验结果可知, 微波入射方向对 YG-1 软化沥青混合料的影响并不大, 两组试验中质量损失 W_p 基本相同。分析原因是由于 YG-1 和沥青混合料的吸收微波能力相差较大, 如前 1.2 节所述, YG-1 具有极强的吸波能力, 试验中的微波能量大部分被 YG-1 吸收, 包裹锡纸后虽然改变了微波的入射方向, 但并未改变 YG-1 和混合料对微波的吸收量, 而混合料软化的关键在于 YG-1 吸收微波后发生的“微爆扩孔”等作用, 在吸收能量不变的情况下最终表现为两组试样软化效果相当。

2.2 YG-1 用量对软化效果的影响

本节采用与 2.1 节相同的试验方法, 选取 2.1 节试验过程中软化效果较好的试验条件, 即微波作用功率 P 为 500 W 和时间 t 为 5 min。YG-1 的用量 l 取值分别为 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3 kg/m², 试验结果见图 5。对质量损失 W_p 和 YG-1 用量 l 进行相关性分析, 二者关系式如式 (3) 所示。

$$W_p = -31.94 + 163.01l - 68.04l^2. \quad (3)$$

关系式的 R² = 0.974 6, 质量损失 W_p 和 YG-1 用量 l 具有较好的相关性。

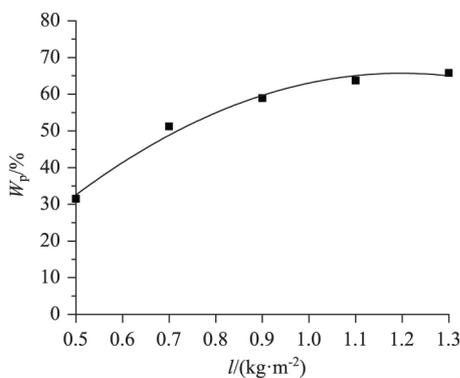


图 5 质量损失随 YG-1 用量的变化规律

Fig. 5 Rule of quality loss varying with dosage of YG-1

对式 (3) 中 W_p 进行求导, 即可得到质量损失增量率 S_z 与 YG-1 用量 l 的关系式, 如式 (4) 所示:

$$\text{即: } S_z = (\dot{W}_p) = 163.01 - 136.8l. \quad (4)$$

由试验结果可知, 随着 YG-1 用量 l 的增加, W_p 增大, 混合料的软化效果变好, 但当用量超过 1.1 kg/m² 时, 软化效果增加不明显, W_p 出现下降趋势, 由式 (3) 可知 l 存在最佳值。由式 (4) 可知, 质量损失增加率 S_z 与 YG-1 用量 l 成反比, 即单位用量的 YG-1 软化效果随着用量的增加而逐渐降低。可以得出结论, 虽然增加 YG-1 用量可以在一定程度上改善沥青混合料的软化效果, 但当用量 l 达到某一值后, 对软化混合料效果提高将变得不明显, 出现降低的趋势; 在一定范围内, 随着 YG-1 用量的增大, 单位用量的 YG-1 对沥青混合料的软化效果降低。

这是由于在混合料软化过程中, YG-1 用量增加, 能够保证足量 YG-1 渗透入混合料内部, 为“微爆扩孔”作用提供充足的原料。但当用量 l 达到一定量后, “微爆扩孔”作用达到极限值, 再增加用量对混合料的渗透软化效果增加不明显。

为说明 YG-1 与普通沥青再生剂的区别, 在试验条件相同的情况下, 选用未涂抹再生剂、涂抹普通沥青再生剂和涂抹 YG-1 的 3 组试件进行软化试验。试验条件为功率 500 W, 作用时间 5 min, YG-1 用量为 6.5 g/试件 (约合 0.8 kg/m²)。试验结果如表 3 所示。

表 3 软化沥青混合料对比试验结果

Tab. 3 Comparison test results of asphalt mixture softening

质量损失 / %	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W _p
未用再生剂	4.3	2.1	1.2	5.2	3.2
普通再生剂	6.3	5.3	2.1	4.7	4.6
YG-1	55.1	59.0	61.9	53.2	57.3

由试验结果可知, 涂抹普通沥青再生剂并没有起到软化沥青混合料作用, 其质量损失 W_p 接近未涂抹再生剂单纯加热的混合料试件质量损失。试验结束发现涂抹普通沥青再生剂的试件试验后只在边角上出现了少量脱落, 并未出现混合料松散的现象, 与涂抹 YG-1 后混合料的状态差别明显。

分析原因是由于 YG-1 在微波作用下通过“通道渗透”、“分相渗透”、“微爆扩孔”、“持续软化”4 步实现沥青混合料的软化^[8], 而普通沥青再生剂主要成分为非极性有机分子, 因此对微波不敏感, 不具备发生软化混合料的条件, 所以未发生混合料的软化。

2.3 混合料空隙率对软化效果的影响

本节对不同空隙率的混合料进行软化试验, 研究混合料空隙率对软化效果的影响规律。软化试验

方法同 2.1 节, 试验条件为微波功率 P 为 500 W, 作用时间 t 为 5 min, YG-1 用量 l 为 0.8 kg/m^2 。试验选择不同级配类型的 3 种混合料, 分别为 SMA-16、AC-16、OGFC-20, 成型后测量空隙率, 结果如表 4 所示。软化试验结果如图 6 所示。

表 4 不同类型混合料空隙率

Tab. 4 Voids of different types of mixture

混合料类型	SMA-16	AC-16	OGFC-20
空隙率/%	4.7	5.0	19.3

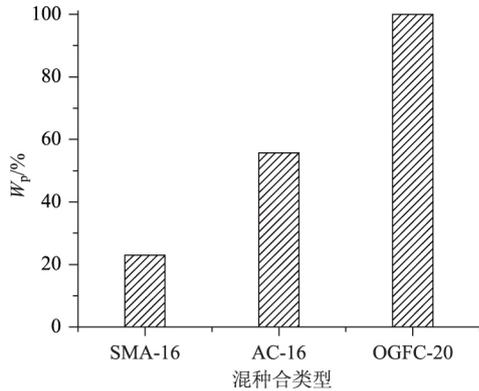


图 6 不同混合料类型的质量损失

Fig. 6 Quality losses of different types of mixture

由图 6 可知, 混合料空隙率对 YG-1 的软化效果影响大。空隙率为 19.3% 的 OGFC-20, 实现了混合料的完全软化; 空隙率为 5.0% 的 AC-16, 达到了 57.5%, 空隙率为 4.7% 的 SMA-16, 为 23.4%。由试验结果可知, 混合料空隙率越大软化效果越好。同时发现混合料的级配类型对软化效果也具有较大的影响, 空隙率接近的 SMA-16 和 AC-16 两种混合料, 分别为 23.4% 和 57.5%, 软化效果相差近 2.5 倍。

这是由于 YG-1 发挥作用的前提是“通道渗透”作用^[8], 即要求混合料有一定的连通空隙确保 YG-1 能够渗透到混合料内部, 较大的空隙率利于 YG-1 的“通道渗透”作用。因此出现混合料软化效果随着空隙率增大而增大的现象。同时混合料的软化效果与级配类型有关, 空隙率接近的 AC-16 软化效果明显优于 SMA-16, 分析原因是由于 SMA 型混合料中集料的嵌挤作用相较 AC 更为突出, 在沥青黏度降低的情况下, 依然表现出较好强度。

2.4 集料类型对软化效果的影响

不同类型集料对微波的敏感度不同, 本节通过混合料软化试验, 研究集料的微波敏感性是否对混合料软化效果有影响。试验采用相同级配不同集料

制备马歇尔试件, 软化混合料试验方法同 2.1 节, 试验条件微波功率 P 为 500 W, 微波作用时间 t 为 5 min, YG-1 用量为 l 为 0.8 kg/m^2 , 集料选用微波敏感性不同的 3 种集料类型分别为: 玄武岩、石灰岩和闪长岩, 逐档筛分回配成相同的级配, 试件的级配类型选用 AC-13。

对 3 种材料集料的升温速率进行测试, 测试方法如下:

(1) 选择相同粒径、相同质量的 3 种集料各 500 g, 洗净烘干后放置至常温备用。

(2) 将烘干后的集料放入微波合成仪中加热, 设置功率为 500 W。

(3) 分别测量加热时间为 100, 200, 300, 400, 500 s 的集料温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

(4) 进行时间-温度曲线拟合, 得出试件温度拟合曲线。

试验结果显示, 石料的温度与微波加热时间有很好的线性相关性, 拟合时间-温度曲线如图 7 所示, 3 种集料的升温速率排序为: 石灰岩 > 玄武岩 > 闪长岩。3 种集料的软化试验结果如表 5 所示。

表 5 不同集料类型的混合料软化结果

Tab. 5 Softening result of different types of aggregate

集料类型	石灰岩	玄武岩	闪长岩
试验后松散混合料温度/ $^{\circ}\text{C}$	91.5	86.3	81.1
质量损失 W_p / %	51.8	57.3	49.1

由表 5 可以看出, 不同集料类型成型的沥青混合料试件软化效果略有不同, 但相差不大, 由于不同集料对微波的敏感性存在差别, 试验后松散的混合料温度略有不同, 温度最高的石灰岩松散料温度比温度最低的闪长岩高出约 10°C , 但二者的质量损失差别并不大, 质量损失量 W_p 分别为 51.8% 和 48.1%, 相差 3.7%, 并未发现软化效果与集料类型的升温速率 (或微波敏感度) 有直接联系。

分析原因, 虽然石料类型对微波的敏感性不同, 导致最终试验后松散混合料温度存在一定差异 (如表 5 所示), 但由于混合料软化主要依靠微波敏感型沥青再生剂的“通道渗透”、“微爆扩孔”作用实现, 软化效果与混合料本身温度的相关性并不明显。集料材质对混合料软化效果的影响应是综合多因素得出的, 如石料的黏附性、石料的表面纹理等。在分析该因素时应根据工程实际具体分析。

2.5 微波敏感型沥青再生剂路试

为验证 YG-1 软化沥青路面的实际效果, 课题组在河南许昌进行了 YG-1 软化沥青路面路试。

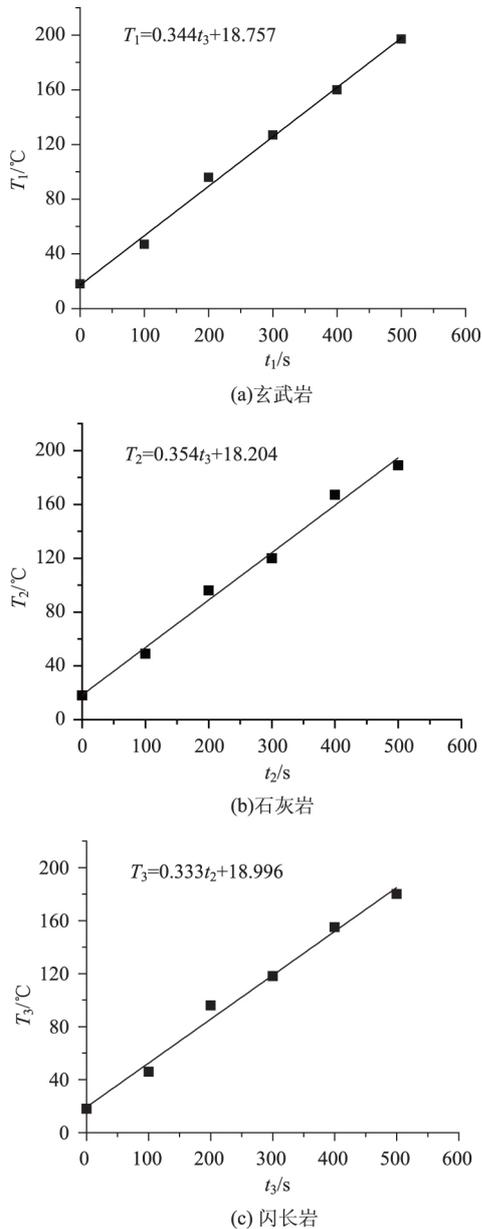


图 7 时间-温度拟合曲线图

Fig. 7 Time-temperature fitting curves

(1) 试验设备

试验设备选用威特 142TB 微波综合养护车。微波车加热板面积约 2 m^2 , 输入功率 135 kW , 由 90 个磁控管组成。

2.45 GHz 微波穿透沥青路面深度约 0.11 m ^[22], 按照微波综合养护车加热面积 2 m^2 计算, 路试单位体积消耗的微波功率为: $P_L = 135 \text{ kW} / (0.11 \text{ m} \times 2 \text{ m}^2) = 614 \text{ kW/m}^3$; 对比前述室内试验, 马歇尔试件的体积约为 $5.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, 按照单位体积消耗功率为 P_L 进行计算, 可知路试的平均功率与室内试验功率 300 W ($5.15 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times P_L = 0.316 \text{ kW}$) 相当。

(2) 试验路段基本情况

试验路段选用河南许昌某废弃公路, 原路面混合料类型为 AC-13, 路面状况良好, 试验时路面温度为 $16 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3) 试验步骤

① 路面清扫干净后, 将称好质量的 YG-1 均匀涂抹到试验路面上。结合室内试验结果, 路试 YG-1 用量为 0.8 kg/m^2 , 试验面积与微波车加热板面积相同;

② 使用微波加热板对涂抹 YG-1 的路面进行加热, 结合室内试验结果, 对路面的加热时间选定为 5 min ;

③ 对未涂抹 YG-1 的路面进行加热, 对比达到相同软化程度时的加热时间;

④ 加热结束后对路面的软化情况进行观察。

(4) 试验结果

涂抹 YG-1 的路面经过微波作用 5 min 后路面实现了部分软化, 软化区域呈圆形非连续分布, 软化的区域位于磁控管正下方, 偏离磁控管下方的区域软化效果较差。软化的沥青混合料呈松散状态, 软化深度约为 4 cm 左右。未涂抹 YG-1 的沥青路面, 达到相同的松散状态加热时间约为 30 min 。

分析产生上述现象的原因, 是由于微波场在沥青路面表面及内部的分布不均匀, 由 2.1 节的研究可知, 要实现混合料的快速软化微波功率应在合理范围之内, 偏离该范围混合料的软化效果较差。对应路试现象可知, 磁控管下方位置的微波能量满足软化沥青混合料微波功率的要求, 偏离磁控管位置的微波能量相对较弱, 低于软化所需要的功率, 因此出现了软化区域呈圆形非连续分布的现象。未涂抹 YG-1 的沥青路面软化是通过混合料中石料温度的升高实现的, 因此所需时间较长。

通过路试可以看出, YG-1 在微波作用下能够实现沥青路面的快速软化, 但由于现有设备微波场分布不均匀, 导致沥青路面软化区域不均匀不连续。因此需要对现有微波加热设备进行改进, 使微波场分布均匀才能更好的满足 YG-1 的工程应用。

3 结论

(1) 微波敏感型沥青再生剂是一种复合型沥青再生剂乳液, 宏观上表现为性质均一, 微观结构中存在部分组分聚团的现象。微波敏感型沥青再生剂中的再生成分满足现行规范中对沥青再生剂的所有要求, 乳液体系为慢裂型, 并具有良好的储存稳定

性和极强微波吸收能力。

(2) 微波敏感型沥青再生剂软化沥青混合料效果并非随着微波功率的增大而增加,在功率超过一定数值后,软化效果反而变差,功率存在最佳范围;随着微波作用时间的增加,软化作用持续发生,但单位时间的软化量减少;混合料软化效果与微波作用方式有很好的相关性。

(3) 沥青混合料软化效果随着微波敏感型沥青再生剂用量的增大而变好,但再生剂用量越大,单位用量对沥青混合料的软化效果越低。当用量超过某值后,增加再生剂用量提高软化效果的作用不明显。

(4) 混合料空隙率对微波敏感型沥青再生剂的软化效果影响明显。混合料的空隙率越大,软化效果越好。

(5) 不同集料类型对微波的敏感程度不同,在微波的作用下升温速率不同,但混合料的升温速率对最终沥青混合料的软化效果的影响并不明显,二者没有相关性。

参考文献:

References:

- [1] 沙爱民. 公路养护技术发展趋势 [J]. 中国公路, 2017 (3): 75-77.
SHA Ai-min. Development Trend of Highway Maintenance Technology [J]. China Highway, 2017 (3): 75-77.
- [2] 张益, 王全磊. 高速公路沥青路面就地热再生技术与经济效益分析 [J]. 公路交通技术, 2017, 33 (5): 37-40.
ZHANG Yi, WANG Quan-lei. Analysis of On-site Thermal Regeneration Technology and Economic Benefit of Asphalt Pavement on Expressway [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33 (5): 37-40.
- [3] 盛燕萍, 李海滨, 孟建党. 就地热再生技术在沥青路面养护工程中的应用 [J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37 (1): 134-140.
SHENG Yan-ping, LI Hai-bin, MENG Jian-dang. Application of Hot In-place Recycling Technology in Asphalt Pavement Maintenance [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2012, 37 (1): 134-140.
- [4] 柴明明, 李明, 齐桂才, 等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (10): 148-151, 158.
CHAI Ming-ming, LI Ming, QI Gui-cai, et al. Analysis of Carbon Emission during Hot In-place Recycling Asphalt Pavement Construction [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (10): 148-151, 158.
- [5] SILVA H M R D, OLIVEIRA J R M, JESUS C M G. Are Totally Recycled Hot Mix Asphalts a Sustainable Alternative for Road Paving? [J]. Resources Conservation and Recycling, 2012, 60: 38-48.
- [6] 肖克雄, 聂欣, 徐予睢. Sasobit 温拌剂在沥青路面就地热再生中的应用研究 [J]. 公路交通技术, 2016, 32 (6): 23-27.
XIAO Ke-xiong, NIE Xin, XU Yu-sui. Study on Application of Sasobit Warm Mix Agent in Hot Recycling of Asphalt Pavement [J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32 (6): 23-27.
- [7] 顾海荣, 董强柱, 梁奉典, 等. 多步法就地热再生工艺中的沥青路面加热速度 [J]. 中国公路学报, 2017, 30 (11): 170-176.
GU Hai-rong, DONG Qiang-zhu, LIANG Feng-dian, et al. Asphalt Pavement Heating Speed in Multi-stage Hot In-place Recycling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (11): 170-176.
- [8] 李永翔, 郝培文, 雷宇, 等. 微波敏感型沥青再生剂的开发及作用机理分析 [J]. 北京工业大学学报, 2018, 44 (1): 80-87.
LI Yong-xiang, HAO Pei-wen, LEI Yu, et al. The Development of Microwave Sensitive Asphalt Rejuvenate Agent and Its Mechanism Analysis [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44 (1): 80-87.
- [9] 顾海荣, 董强柱, 李金平, 等. 沥青路面就地热再生加热方式与传热过程 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2017, 34 (11): 96-99.
GU Hai-rong, DONG Qiang-zhu, LI Jin-ping, et al. Heating Modes and Heat Transfer Process of Asphalt Pavement Hot In-place Recycling [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2017, 34 (11): 96-99.
- [10] HUANG Kai, XU Tao, LI Guo-fen, et al. Heating Effects of Asphalt Pavement during Hot In-place Recycling Using DEM [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 62-69.
- [11] 董强柱, 顾海荣, 张琿, 等. 就地热再生过程中的沥青路面加热功率控制 [J]. 中国公路学报, 2016, 29 (4), 153-158.
DONG Qiang-zhu, GU Hai-rong, ZHANG Hui, et al. Heating Power Control in Asphalt Pavement In-place Hot Recycling [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29 (4), 153-158.
- [12] 孙铜生, 史金飞, 张志胜. 沥青路面微波热再生传热模型与解法 [J]. 交通运输工程学报, 2008 (5): 49-53, 60.

- SUN Tong-sheng, SHI Jin-fei, ZHANG Zhi-sheng. Heat Transfer Model and Solution of Microwave Hot Recycling for Asphalt Pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008 (5): 49-53, 60.
- [13] 朱松青, 史金飞, 姜来东, 等. 沥青路面微波现场热再生传热模型研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (2): 32-36.
- ZHU Song-qing, SHI Jin-fei, JIANG Lai-dong, et al. Research on Heat Transfer Model of Asphalt Pavements Subjected to Microwave Heating Recycling [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (2): 32-36.
- [14] 朱松青, 史金飞, 王鸿翔. 沥青路面现场微波加热再生模型与实验 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36 (3): 393-396.
- ZHU Song-qing, SHI Jin-fei, WANG Hong-xiang. Modeling and Experiment of Microwave Heating for Hot In-place Recycling of Asphalt Pavements [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36 (3): 393-396.
- [15] 张翼飞. 沥青路面微波养护车加热装置天线及其阵列仿真研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- ZHANG Yi-fei. Simulation Research for Antennas and Arrays of Heating Equipment of Microwave Asphalt Pavement Maintenance Vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [16] 潘雪峰. 沥青微波现场热再生装置加热平均温度研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- PAN Xue-feng. Research on Heating Uniform Temperature of Asphalt Microwave Hot Recycling Device [D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- [17] 钱鸿森. 微波加热技术及应用 [M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985.
- QIAN Hong-sen. Microwave Heating Technology and Its Application [M]. Harbin: Heilongjiang Science & Technology Press, 1985.
- [18] 薛亮. 微波加热沥青混合料技术性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- XUE Liang. Study on Technical Performance of Microwave Heating Asphalt Mixtures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [19] JTG F41—2008, 公路沥青路面再生技术规范 [S]. JTG F41—2008, Technical Specifications for Highway Asphalt Pavement Recycling [S].
- [20] JTG F40—2004, 公路沥青路面施工技术规范 [S]. JTG F40—2004, Technical Specifications for Construction of Highway Asphalt Pavements [S].
- [21] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. JTG E20—2011, Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering [S].
- [22] 高子渝, 焦生杰, 唐相伟. 频率对微波加热沥青混合料的影响 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29 (6): 32-36.
- GAO Zi-yu, JIAO Sheng-jie, TANG Xiang-wei. Influence of Frequency on Asphalt Mixture's Heating by Microwave [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29 (6): 32-36.
- (上接第 16 页)
- [11] TASHMAN L, WANG L B, THYAGARAJAN S. Microstructure Characterization for Modeling HMA Behavior Using Imaging Technology [J]. Road Materials and Pavement Design, 2017, 8 (2): 207-238.
- [12] YOU Z, GOH S W, DONG J. Predictive Models for Dynamic Modulus Using Weighted Least Square Nonlinear Multiple Regression Model [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2012, 39 (5): 589-597.
- [13] MASAD E, BUTTON J. Implications of Experimental Measurements and Analyses of the Internal Structure of HMA [J]. Transportation Research Record, 2004, 1891: 212-220.
- [14] 吴文亮, 张肖宁, 李智. 沥青混合料车辙试验中粗颗粒运动轨迹的分析 [J]. 华南理工大学学报, 2009, 37 (11): 27-30.
- WU Wen-liang, ZHANG Xiao-ning, LI Zhi. Analysis of Movement Track of Coarse Particles During Rutting Test of Asphalt Mixture [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37 (11): 27-30.
- [15] LI Kan, WANG Duan-yi, LI Jia, et al. Deformation Analysis of Asphalt Mixtures with Digital Image Correlation Method [J]. Advanced Materials Research, 2013, 831: 470-475.
- [16] ROMEO E. Two-dimensional Digital Image Correlation for Asphalt Mixture Characterisation: Interest and Limitations [J]. Road Materials and Pavement Design, 2013, 14 (4): 747-763.
- [17] 乔英娟. 沥青混合料位移场测定与流动性车辙分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- QIAO Ying-juan. Measurement of Displacement Field of Asphalt Mixture and Analysis of Flow Rutting [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [18] HUANG Qing-ming, GAO Wen, CAI Wen-jian. Thresholding Technique with Adaptive Window Selection for Uneven Lighting Image [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26 (1): 801-808.