

DOI: 10.7672/sgjs2025120134

微波加热对沥青老化程度影响研究*

李党刚

(中铁二十局集团有限公司,陕西 西安 710016)

[摘要] 为研究微波加热对沥青老化程度的影响,通过室内模拟对不同加热方式下沥青混合料短期老化过程的模拟和对比分析,揭示微波加热对沥青老化程度的具体影响。未来研究可进一步探索微波加热条件下沥青老化的机理和影响因素,为沥青路面的养护、维修和回收提供更加精准的技术支持。分析试验包括常规性能试验、沥青的4组分分析试验及傅里叶红外光谱(FTIR)试验。

[关键词] 沥青;再生沥青混合料;老化;微波加热

[中图分类号] U414

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)12-0134-05

Influence of Microwave Heating on Asphalt Aging Degree

LI Danggang

(China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China)

Abstract: Microwave heating, as a new type of asphalt heating method, can be used to study the specific influence of microwave heating on the aging degree of asphalt by simulating and comparing the short-term aging process of asphalt mixtures under different heating methods, considering that asphalt hardly absorbs microwaves. This reveals the specific influence of microwave heating on the aging degree of asphalt. Future research can further explore the mechanisms and influencing factors of asphalt aging under microwave heating conditions, providing more precise technical support for the maintenance, repairing, and recycling of asphalt pavements. The experimental analysis includes conventional performance tests, asphalt four-component analysis tests, and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) tests.

Keywords: asphalt; recycled asphalt mixture; aging; microwave heating

0 引言

据不完全统计,我国每年产生的沥青路面废旧材料约3亿t^[1],其蕴含着巨大经济与社会价值。与之形成鲜明对比的是,我国新建与改扩建道路又需要大量沥青混合料,但对沥青路面废旧材料的高效、高质量再生利用率<30%^[2],大量堆弃或低质量利用不仅是对资源的巨大浪费,更造成环境污染。而欧洲每年仅产生约5000万t沥青路面废旧材料,却有70%以上再生后用于路面^[3];美国更是有高达83%~95%再生后用于热拌沥青混合料生产^[4]。我国对沥青路面废旧材料的高效利用严重不足,而石油沥青、石料等作为不可再生资源其获取成本越来越高,在资源日益紧缺、环保要求日益提高的背景下,如何高效、高质量再生利用沥青路面废旧材料

已是我国交通行业迫切需要解决的核心关键问题^[5]。

目前,旧沥青路面再生技术主要分为厂拌热再生、厂拌冷再生、就地冷再生和热再生^[6]。厂拌热再生相较于其他再生利用方式能获得更好的路用性能,因此,沥青混合料搅拌设备部分生产企业已研制并投产厂拌再生设备。加热方式基本上采用的是热气流加热法、干燥筒壁传导加热法、新集料传导加热法、红外线辐射加热法等传统加热方法。微波加热与传统加热方式作用原理不同,具有高效、均匀、无滞后、控制准确等独特优势^[7-10]。在其加热过程中,在微波作用下材料内部的分子能量在其引导下能迅速转化为热能,并传递给周围,是一种由内部向外部传递(由里及表)的过程。而且微波对混合材料加热具有相应的选择性,就微波加热沥青混合料而言,砂石集料吸热能力大于沥青,在微波加热沥青混合料过程中,砂石集料先于沥青升

* 陕西省重点研发计划项目(2021SF-453)

[作者简介] 李党刚,工程师,E-mail:490545208@qq.com

[收稿日期] 2025-01-05

温,通过砂石加热混合物中沥青不会出现传统方式加热时沥青烧焦和碳化现象,有助于促进新旧沥青混合物融合,改善再生沥青混合物性能;有利于废旧沥青混合物中沥青的重复使用^[11-13]。

因此,为研究微波加热对沥青老化程度的影响,本文通过室内模拟不同加热方式对新拌沥青混合物及再生沥青混合物的短期老化,对其老化性能进行对比分析。

1 试验方案

通过室内模拟不同加热方式对新拌沥青混合物及再生沥青混合物的短期老化,研究微波加热与烘箱加热在拌合、运输和摊铺等过程中对添加的新沥青老化与 RAP 旧沥青二次老化的影响。沥青混合物采用 AC-13 级配,原材料分别为玄武岩集料、60% 掺量的一级红铁粉(等体积代替矿粉 60%)、矿粉、RAP 及新沥青(70 号、90 号基质沥青及 SBS、SBR 与胶粉改性沥青),微波功率为 2.4kW。此外,在研究不同加热方式在拌合过程中对 RAP 旧沥青二次老化影响时,为避免再生剂与新沥青的影响,拌合过程中不再加入再生剂与新沥青,但拌合总时长与新拌沥青混合物一致。

1)烘箱加热与微波加热对新沥青短期老化方案。对于烘箱加热,首先,采用烘箱加热新沥青、玄武岩集料、铁粉与矿粉的混合物;随后,向拌锅中加入玄武岩集料与新沥青拌合 90s;接着加入铁粉与矿粉的混合物拌合 90s;最后,将沥青混合物放入 135℃烘箱加热 3h。对于微波加热,首先,采用烘箱加热新沥青,微波加热新沥青、玄武岩集料、铁粉与矿粉的混合物;随后,向拌锅中加入新沥青与玄武岩集料拌合 90s;接着加入铁粉与矿粉的混合物拌合 90s;最后,将沥青混合物采用微波加热设备加热到 135℃,每次加热后的沥青混合物温度完全冷却后再进行下一次加热,共加热 3 次。

2)烘箱加热与微波加热对 RAP 旧沥青二次老化方案。对于烘箱加热,首先,采用烘箱加热 RAP、玄武岩集料、铁粉与矿粉的混合物;随后,将 RAP 与玄武岩集料拌合 90s;接着加入铁粉与矿粉的混合物拌合 90s;最后,将沥青混合物放入 135℃烘箱加热 3h。对于微波加热,首先,采用烘箱加热新沥青,微波加热 RAP、玄武岩集料、铁粉与矿粉的混合物;随后,向拌锅中加入 RAP 与玄武岩集料拌合 90s;接着加入铁粉与矿粉的混合物拌合 90s;最后,将沥青混合物采用微波加热设备加热到 135℃,每次加热后的沥青混合物温度完全冷却后再进行下一次加热,共加热 3 次。

2 老化沥青抽提回收过程

1)离心抽提。参考规范要求,采用抽提仪对老化沥青混合物进行抽提。主要过程为:首先,取约 1 200g 沥青混合物装入烧杯,并向烧杯中注入三氯乙烯浸泡 30min,期间采用玻璃棒不断搅拌;随后,将烧杯中沥青混合物与三氯乙烯共同倒入离心抽提仪,加盖 1 层滤纸后密闭仪器;最后,启动抽提仪,期间多次从上盖孔向仪器内注入三氯乙烯,直至抽提液呈淡黄色为止。

2)分离矿粉。在抽提过程中,部分矿粉可能会混入抽提液,为了消除此影响,采用离心分离法处理抽提液。试验步骤为:首先,将相同质量的抽提液分别装入不同离心杯,为确保离心过程平衡,离心杯要对称放置在离心机内;随后,设置离心机的转速和时间,转速和时间通常设置为 4 000r/min 和 40min;最后,开启离心机,抽提液在高速旋转下因密度差异发生分层,矿粉由于密度较高受到较大向心力,将沉积在离心杯底部。

3)旋转蒸发。对于离心抽提液,须去除其中的三氯乙烯以回收沥青。因此,采用旋转蒸发法对三氯乙烯进行蒸发。具体步骤为:首先,将离心抽提液倒入旋转烧瓶,注意液体量≤400mL;随后,开启真空泵,使整个系统达到 710mm Hg 的真空度以形成负压环境,并将油浴锅中的硅油加热至 55℃;最后,开动旋转烧瓶,使其以 50r/min 的速度在油浴锅中旋转,当三氯乙烯完全蒸发后,将油浴温度提升至 155℃,继续加热 15min 后取出回收沥青。

3 不同加热方式下沥青老化的机理研究

沥青经不同加热方式老化后,常规性能表现为针入度与延度降低、软化点增大,宏观上表现为沥青更硬、更脆,利用 4 组分分析和傅里叶红外光谱试验从微观角度出发,对比分析不同加热方式下沥青老化过程中化学组分与官能团的变化规律。

3.1 4 组分分析(SARA)

目前 4 组分常用测试方法有溶剂沉淀及色谱柱(Corbett)法和棒状薄层色谱-氢火焰离子探测仪(TLC-FID)法。本文采用 TLC-FID 法对不同加热方式下的沥青进行 4 组分分析,该方法相较于 Corbett 法具有操作简单、速度快、数据精确、复现性好、污染少等优点。

3.1.1 组分变化

采用 MK-6S 型棒状薄层色谱分析仪进行试验分析,试验结果如表 1 所示。

由图 1(图中 1~6 分别代表 70 号、90 号基质沥青、SBS、SBR、胶粉改性沥青及 RAP 旧沥青)可知,

表 1 不同处理方式下不同种类沥青 4 组分试验结果

Table 1 Four component test results of different kinds of asphalts with different treatment methods

沥青种类	加热方式	沥青质/%	胶质/%	芳香分/%	饱和分/%
70 号沥青	未处理	14.5	25.9	37.3	22.3
	常规加热	18.6	29.8	31.2	20.4
	微波加热	16.5	28.4	34.1	21
90 号沥青	未处理	10.4	27.1	41.1	21.4
	常规加热	15.1	31.4	34	19.5
	微波加热	12.6	30.1	36.6	20.7
SBS 改性沥青	未处理	9.7	29.3	41.2	19.8
	常规加热	13.2	32.3	37	17.5
	微波加热	10.9	30.9	39.3	18.9
SBR 改性沥青	未处理	14.8	26	36.9	22.3
	常规加热	18.7	29.6	31.4	20.3
	微波加热	16.8	27.3	34.9	21
胶粉改性沥青	未处理	25.1	42.7	21	11.2
	常规加热	28.5	45.4	16.6	9.5
	微波加热	26.3	43.9	19.4	10.4
RAP 沥青	未处理	23.3	21.1	34.4	21.2
	常规加热	26	22.6	31.3	20.1
	微波加热	24.4	21.3	33.5	20.8

所有沥青在经过不同加热方式处理后,沥青质和胶质的质量分数普遍上升,芳香分和饱和分的质量分数在普遍下降。这表明不同沥青老化的过程中,芳香分和饱和分逐渐转换为沥青质与胶质,胶质外包着沥青质所形成的胶团数量增多,依靠沥青质的分子长链相互缠绕,形成更为牢固的三维网状结构,沥青变得更黏稠。

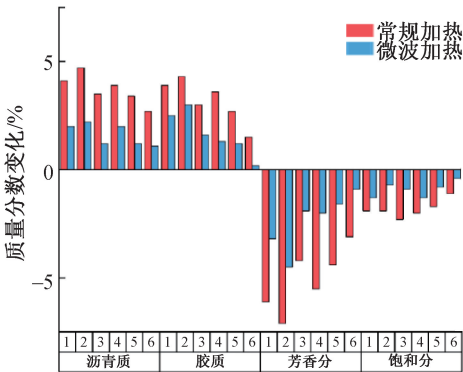


图 1 不同加热方式对不同沥青 4 组分变化的影响

Fig.1 The influence of different heating methods on the change of four components of different asphalts

不同类型的沥青对加热处理的反应表现出明显差异。与改性沥青相比,基质沥青在加热后沥青质和胶质的增加幅度相对更大,这表明基质沥青比改性沥青更易老化。另外,RAP 旧沥青在加热处理下的组分变化较小,这主要是因为已老化的沥青受加热老化影响程度低于新沥青,这一结论也说明 RAP 旧沥青常规性能指标的变化幅度通常小于新

沥青的原因,从而进一步证实 RAP 旧沥青在物理化学性质上的稳定性。与常规加热相比,微波加热下沥青质和胶质的增幅较小,芳香分和饱和分的降幅也较小。这表明微波加热是一种较温和的加热手段,对沥青组分的影响要小于常规加热。

3.1.2 胶体结构变化

沥青胶体理论认为,极性最强的沥青质被胶质包围形成胶团,游离于由芳香分与饱和分所组成的分散介质形成胶体结构。胶体指数(I_c)被认为能合理解释胶体结构稳定性,其计算公式如式(1)所示。 I_c 值较低时,沥青中芳香分含量较低,沥青质含量较高,胶体结构偏向于凝胶型结构; I_c 值较高时则相反,胶体结构偏向于溶胶型结构。研究表明,沥青受到不同程度的老化作用时, I_c 值高的沥青所受到的老化影响要低于 I_c 值低的沥青^[14]。整理 4 组分试验结果,不同沥青 I_c 值变化如图 2 所示。

$$I_c = \frac{C_f + C_j}{C_b + C_l} \tag{1}$$

式中: I_c 为胶体指数; C_f 为芳香分质量分数(%); C_j 为胶质质量分数(%); C_b 为饱和分质量分数(%); C_l 为沥青质质量分数(%)。

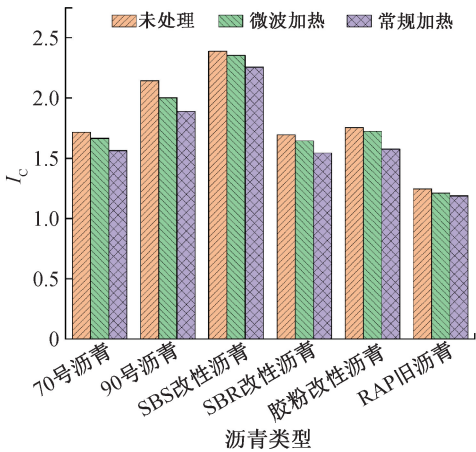


图 2 不同加热方式对不同沥青 I_c 值的影响

Fig.2 The influence of different heating methods on the I_c value of different asphalts

由图 2 可知,沥青老化处理前的 I_c 值各不相同。其中,70 号沥青、SBR 和胶粉改性沥青的 I_c 值相似,90 号沥青和 SBS 改性沥青的 I_c 值较高,这两种沥青的胶体结构相对于其他沥青偏向于溶胶型;而 RAP 沥青由于自身老化,因此其 I_c 值最低,其胶体结构与其他沥青相比更倾向于凝胶型结构。

不同沥青在加热作用下, I_c 值均发生下降,90 号沥青的 I_c 值变化率最大,说明抗老化性较其他沥青最弱,这与其宏观性能指标变化幅度最大结论相符;RAP 沥青较其他沥青已发生老化,胶体结构更

稳定, I_c 值变化率最小。

不同沥青在微波加热作用下其 I_c 值变化率明显小于常规加热作用下 I_c 值的变化率,因此,微波加热对不同沥青的组分影响要小于常规加热。

3.2 红外光谱分析

采用 WQF-510A 型红外光谱仪对不同加热方式下的不同沥青样品进行特征官能团研究,试验仪器波数范围为 $500 \sim 1\,000\text{cm}^{-1}$,红外光扫描次数为 16 次。试验过程中,沥青样品需用三氯乙烯溶液溶解,涂抹于溴化钾薄片,轻轻甩动至干燥后置入红外光谱仪。

针对基质沥青(70 号、90 号沥青)、改性沥青(SBS,SBR 及胶粉改性沥青)、RAP 沥青进行 FTIR 试验,以干燥剂去除 H_2O 的影响,并通过 OMNINC 软件对测试结果进行 CO_2 消除、平滑处理、基线校正。试验过程中,应尽可能确保溴化钾片厚度与沥青溶液浓度一致,以减小误差。此外,研究显示羰基和亚砷基常用于评估沥青的老化程度,而丁二烯和聚苯乙烯则用于表征改性沥青中改性剂的老化情况。因此,对基质沥青和改性沥青在关键区域进行局部放大以方便讨论,试验结果如图 3 所示。

由图 3 所示,不同沥青在不同加热处理下的红外光谱图在 $2\,923\text{cm}^{-1}$ (亚甲基— $\text{C}-\text{H}_2$ —中 $\text{C}-\text{H}$ 键的对称伸缩振动), $2\,852\text{cm}^{-1}$ (亚甲基— $\text{C}-\text{H}_2$ —中 $\text{C}-\text{H}$ 键的非对称伸缩振动), $1\,699\text{cm}^{-1}$ (羰基中 $\text{C}=\text{O}$ 键的伸缩振动), $1\,460\text{cm}^{-1}$ (亚甲基— $\text{C}-\text{H}_2$ —的剪式振动), $1\,377\text{cm}^{-1}$ (甲基— $\text{C}-\text{H}_3$ —的伞式振动), $1\,031\text{cm}^{-1}$ (亚砷基中 $\text{S}=\text{O}$ 键的伸缩振动)波数处的吸收峰出现波动,此外,改性沥青于 966cm^{-1} (丁二烯 $\text{C}=\text{C}$ 键的弯曲振动), 699cm^{-1} (聚苯乙烯苯环 $\text{C}-\text{H}$ 键的弯曲振动)附近出现区别于基质沥青的吸收峰。在这些吸收峰中, $1\,699, 1\,024, 966, 699\text{cm}^{-1}$ 更重要,前两者与沥青老化程度有关,后两者与改性剂含量有关。

观察 $966, 699\text{cm}^{-1}$ 附近的放大图发现,不同改性沥青样品在经过热处理后,此处的吸收峰呈现下降趋势,这种现象主要是由于热处理导致改性沥青中的聚合物改性剂发生降解和破坏。比较常规加热与微波加热发现,常规加热的吸收峰降低幅度明显大于微波加热,表明微波加热对改性沥青中聚合物的破坏作用要更小;此外,不同改性沥青在 $966, 699\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰降低幅度有所不同,按降低幅度从大到小顺序为 SBR 沥青、SBS 沥青、胶粉沥青。这表明在加热过程中,胶粉沥青中的聚合物改性剂相比于 SBS 和 SBR 改性沥青中的聚合物改性剂,具

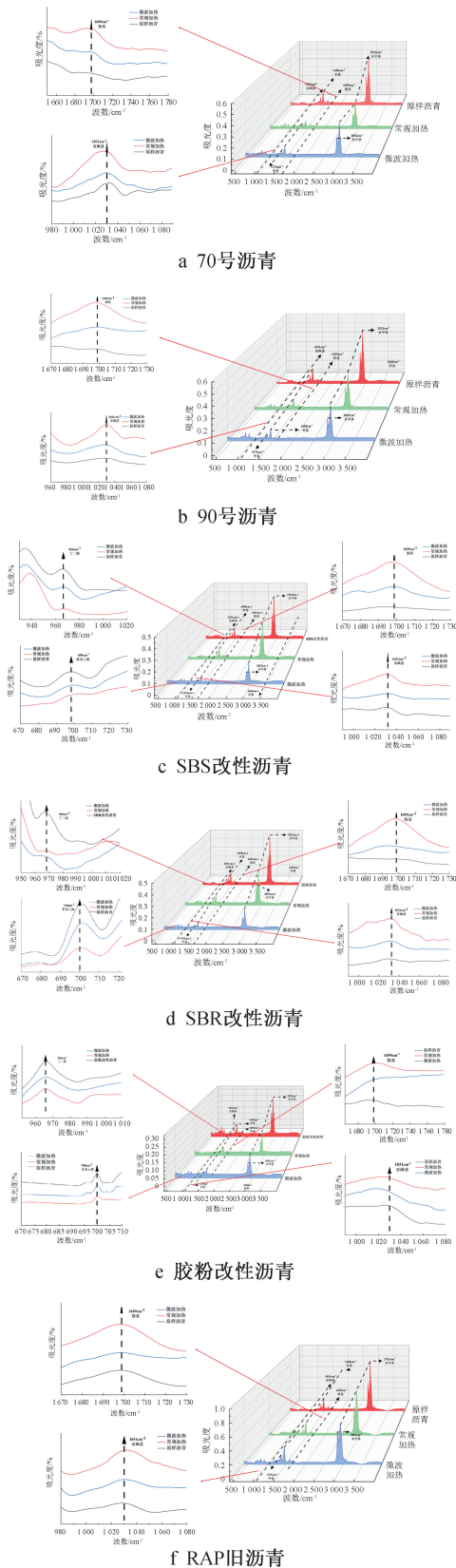


图 3 不同加热方式下 70 号、90 号沥青及 SBS, SBR 与胶粉改性沥青及 RAP 旧沥青 FTIR 试验

Fig. 3 FTIR test of No. 70 and No. 90 asphalt and SBS, SBR and crumb rubber modified asphalt and RAP old asphalt under different heating modes

有更优异的抗降解能力。热处理后,不同沥青样本在 1 699,1 031cm⁻¹ 处的吸收峰展现不同程度增强,表明不同加热方式对沥青均有一定程度的老化影响。不同沥青在 1 699cm,1 031cm⁻¹ 这 2 处吸收峰面积的增强程度依次为基质沥青、改性沥青、RAP 旧沥青。这说明聚合物改性剂的加入能增强沥青的抗老化性能,而 RAP 沥青由于已经历一定程度的老化,其分子结构更加稳定,因而相比于新沥青展现出更强的抗老化能力。此外,通过比较常规加热和微波加热发现,在微波加热条件下,不同沥青在 1 699,1 031cm⁻¹ 处吸收峰的增幅小于常规加热,说明微波加热对沥青老化的影响较小。

4 结语

1) 常规性能试验表明,不同加热方式均会造成沥青的残留针入度比与残留延度降低,软化点增量增大,沥青宏观上表现为更硬、更脆。对比不同沥青的指标变化幅度,基质沥青最大,改性沥青次之,RAP 旧沥青最小。此外,微波加热对这 3 项指标的变化幅度影响始终小于常规加热。

2) 沥青 4 组分试验中,与原沥青相比,不同沥青在不同加热方式下均表现为沥青质、胶质含量增加,芳香分、饱和分含量下降,但微波加热对组分的变化影响程度要小于常规加热。对比不同沥青老化前后的 I_c 值可发现,在沥青类型方面,基质沥青 I_c 值变化率最大,改性沥青次之,RAP 旧沥青最小;在加热方式方面,微波加热作用下,不同沥青 I_c 值的变化率要小于常规加热。

3) 红外光谱定性分析表明,不同沥青经热处理后在 1 699,1 024cm⁻¹ 处的波数上均观察到羰基与亚砷基吸收峰的显著增强,改性沥青在 966,699cm⁻¹ 处还出现丁二烯和聚苯乙烯吸收峰减小,且微波加热下沥青在这些波数上的吸收峰变化(无论是增强还是减少)均比常规加热要小。

参考文献:

[1] 交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[N]. 中国交通报, 2019-04-12(002).
Ministry of Transport. Statistical bulletin on the development of transportation industry in 2018 [N]. China traffic news, 2019-04-12(002).

[2] RICCARDI C, CANNONE FALCHETTO A, LOSA M, et al. Rheological modeling of asphalt binder and asphalt mortar containing recycled asphalt material[J]. Materials and structures, 2016,49(10):4167-4183.

[3] HANSEN K R, COPELAND A. Asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage [R]. 2015.

[4] 董强柱. 沥青路面就地热再生加热关键技术研究[D]. 西安;

长安大学,2018.

DONG Q Z. Study on the heating technology in asphalt pavement in-place hot recycling[D]. Xi'an:Chang'an University,2018.

[5] 徐浩,张文武,何兆益,等. 生物质再生沥青高温流变特性研究[J]. 应用化工,2021,50(7):1785-1788,1794.

XU H, ZHANG W W, HE Z Y, et al. Research on high temperature rheological properties of biomass recycled asphalt [J]. Applied chemical industry,2021,50(7):1785-1788,1794.

[6] 杨军,龚明辉,PAULI Troy,等. 基于原子力显微镜的沥青微观结构研究[J]. 石油学报(石油加工),2015,31(4):959-965.

YANG J,GONG M H,TROY P, et al. Study on micro-structures of asphalt by using atomic force microscopy [J]. Acta petrolei sinica (petroleum processing section),2015,31(4):959-965.

[7] 刘香香,贾晓东. 多重因素作用下沥青老化性能研究[J]. 应用化工,2019,48(10):2399-2402.

LIU X X,JIA X D. Study on aging performance of asphalt under multiple factors[J]. Applied chemical industry, 2019, 48(10): 2399-2402.

[8] 张琿. 沥青路面加热过程中的传热分析与试验研究[D]. 西安:长安大学,2017.

ZHANG H. Analysis and experiment study on heat transfer in the asphalt pavement heating process [D]. Xi'an: Chang'an University,2017.

[9] XU X X, GU H R, DONG Q Z, et al. Quick heating method of asphalt pavement in hot in-place recycling[J]. Construction and building materials,2018,178:211-218.

[10] 苏卫国,庄旭青,伍勇辉. 沥青路面就地热再生加热影响因素实验分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019,44(3):821-833.

SU W G, ZHUANG X Q, WU Y H. Experimental analysis of influencing factors of hot in-place recycling asphalt pavement heating [J]. Journal of Guangxi University (natural science edition),2019,44(3):821-833.

[11] 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 H R, DONG Q Z, LI J P, 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.

[12] 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 H R, DONG Q Z, LIANG F D, 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.

[13] 姚泽光. 旧沥青路面及沥青混合料加热技术研究[D]. 西安:长安大学,2014.

YAO Z G. Research on heating technologies of bituminous mixes and old asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University,2014.

[14] 胡莎. 沥青路面就地热再生及其加热工艺应用研究[D]. 西安:长安大学,2017.

HU S. Study on hot in-place recycling and its heating process of asphalt pavement[D]. Xi'an:Chang'an University,2017.