

文章编号:1007-9629(2021)01-0161-11

微波敏感型沥青再生剂再生性能及机理

李永翔^{1,2}, 米世忠^{2,3}, 李 军²

(1. 内蒙古农业大学 能源与交通工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古路桥集团有限公司
内蒙古自治区道路材料循环利用与养护工程技术研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010010;
3. 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)

摘要: 采用动态剪切流变仪(DSR)、弯曲梁流变仪(BBR)、红外光谱仪(IR)和扫描电子显微镜(SEM)等测试了原样沥青、RTFOT短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h)长期老化沥青和YG-1再生沥青的流变参数及微观指标;利用灰关联分析法建立了流变参数与微观指标之间的关联度,结合Comsol数值分析结果,阐述了微波敏感型沥青再生剂的再生机理。结果表明:沥青储能模量、损耗模量、复数剪切模量与沥青组分以及官能团的关联度值均大于0.8,劲度模量变化率与胶质含量的关联度值为0.743,关联度较好;微波敏感型沥青再生剂能够恢复老化沥青组分比例和官能团数量,使老化沥青再生,其乳液体系和微波发热材料加速了再生剂与老化沥青的融合。

关键词: 道路工程; 再生剂; 沥青性能; 再生机理; 微波

中图分类号:U416.26

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.022

Regenerated Performance and Its Mechanism of Microwave Sensitive Asphalt Rejuvenate Agent

LI Yongxiang^{1,2}, MI Shizhong^{2,3}, LI Jun²

(1. College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
2. Inner Mongolia Autonomous Region Road Materials Recycling and Maintenance Engineering Technology Research Center, Inner Mongolia Road and Bridge Group Co., Ltd., Hohhot 010010, China; 3. Key Laboratory for Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The rheological parameters and microscopic indexes of the original, short-term aging, long-term aging and regenerated asphalts were tested by dynamic shear rheometer(DSR), bending beam rheometer(BBR), infrared spectrometer(IR) and scanning electron microscope(SEM). The relationship of rheological parameters and microscopic indexes was established by grey correlation analysis, combined with Comsol numerical analysis results, the regeneration mechanism of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent was studied. The results show that the correlation degree between storage modulus, loss modulus, complex shear modulus and component and functional groups change of asphalt is greater than 0.8, and the correlation degree between m value and bitumen resin is 0.743, the correlation degree is better. Microwave sensitive asphalt rejuvenate agent can restore the proportion of the aged asphalt component and the number of functional groups by component adjustment, and the microwave heating material and the emulsion system accelerate the fusion of the regeneration agent and the aged asphalt.

Key words: road engineering; regeneration agent; asphalt performance; regeneration mechanism; microwave

收稿日期:2019-08-08; 修订日期:2019-09-22

基金项目:交通运输部企业技术创新项目(2014315490010);内蒙古自治区交通运输厅建设科技项目(NJ-2020-13);内蒙古自治区科技计划(2020GG0257)

第一作者:李永翔(1983—),男,内蒙古和林人,内蒙古农业大学讲师,博士。E-mail:lyxiang@foxmail.com

沥青路面就地热再生技术具有施工周期短、交通干扰小、一次成型、旧料利用率高、层间热连接等优点,被广泛应用于沥青路面功能性修复中^[1-2]。目前就地热再生软化旧路面的方式主要有明火加热、热风循环加热、红外加热和微波加热等^[3-4]。但是,这几种方式都存在不同程度的缺陷:明火加热是利用火焰直接对沥青路面进行加热,加热温度难以控制,火焰与沥青路面直接接触,容易引起沥青路面的二次老化;热风循环加热是利用燃料对空气进行加热,再通过风嘴喷射热空气到路面表面进行加热,加热效率低,且容易产生热风泄漏,对施工路段植被造成破坏;红外加热是利用可燃气体先对辐射板如金属网等进行加热,再通过辐射板释放红外线加热沥青路面,但红外线穿透能力有限,依然存在沥青路面表面温度过高而内部温度未达到耙松要求的情况;微波具有很好的穿透性,通过微波对路面进行加热能够有效降低路面的温度梯度,减少二次老化,但由于石料对微波的敏感性较低,微波作用于路面时其穿透深度会超过就地热再生层的厚度,在一定程度上造成微波能量的浪费,经济性较差。鉴于上述现状,亟需一种高效的沥青就地热再生软化路面方式,以解决目前存在的问题。

微波辅助微波敏感型沥青再生剂(简称 YG-1)软化沥青路面技术^[5-6],是在微波加热路面前,先将 YG-1 喷洒到沥青路面表面,然后 YG-1 在微波的辅助下渗透到沥青路面内部一定深度,最终实现旧路面软化和再生的技术。相较普通微波加热技术,该技术可使路面软化时间从 30~40 min 缩短到 5~7 min,大大提升了路面软化效率,能够有效解决就地热再生软化沥青路面过程中效率低、旧路面混合料二次老化严重等问题。本文通过分析原样沥青、短期老化沥青、长期老化沥青和 YG-1 再生沥青储能模量 G' 、损耗模量 G'' 、复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、劲度模量 S 和劲度模量变化率 m 值等流变参数的变化,对 YG-1 的再生性能进行研究。同时利用灰关联分析法,分析各流变参数与沥青红外光谱(IR)、四组分等微观试验结果的相关度,并结合 Comsol 软件数值模拟结果,对 YG-1 的再生机理进行阐述,以使微波辅助微波敏感型沥青再生剂软化沥青路面技术得到更好的应用。

1 试验材料和方法

1.1 微波敏感型沥青再生剂

YG-1 是一种非离子慢裂乳液型沥青再生剂^[7],具有极强的微波敏感性($\epsilon_r = 64.04$ F/m, $\tan \delta =$

0.493),主要成分为芳香族溶剂油、表面活性剂、水和微波吸收粉末,相关参数见表 1。

表 1 YG-1 的相关技术指标
Table 1 Related technical indexes of YG-1

Index	Test result	Test method
Demulsification speed	Slow-breaking	T0658
Particle charge	Nonionic	T0653
Sieve residue(1.18 mm)(by mass)/%	0.02	T0652
Engela viscosity	6.20	T0622
Evaporation residual content(by mass)/%	63.4	T0651
Residue solubility(by mass)/%	83.9	T0607
Storage stability at room temperature (1 d/5 d)(by mass)/%	0.3/0.8	T0655

1.2 试验沥青的制备

选用盘锦 90# 沥青进行试验,沥青的基本参数如表 2 所示。

表 2 盘锦 90# 沥青的基本指标
Table 2 Basic indexes of Panjin 90# asphalt

Aging status	Index	Testing results	Test method
No aging	Penetration(25 ℃)/(0.1 mm)	85	T0604
	Softening point/℃	47.5	T0606
	Ductility(10 ℃)/cm	36.2	T0605
RTFOT	Mass change/%	-0.27	T0610
	Penetration(25 ℃)/(0.1 mm)	54	T0604
	Ductility(10 ℃)/cm	8.8	T0605

1.2.1 老化沥青制备

老化沥青采用 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的制备方法,短期 RTFOT 老化和长期 RTFOT+PAV(20 h)老化沥青的性能如表 3 所示。

表 3 老化沥青的性能指标
Table 3 Indexes of aged asphalt

Aging status	Index	Testing results	Test method
RTFOT	Penetration(25 ℃)/(0.1 mm)	54	T0604
	Softening point/℃	49.3	T0606
	Ductility(10 ℃)/cm	8.8	T0605
RTFOT+ PAV (20 h)	Penetration(25 ℃)/(0.1 mm)	34	T0604
	Softening point/℃	56.0	T0606
	Ductility(10 ℃)/cm	3.9	T0605

1.2.2 再生沥青的制备

参照 JTG F41—2008《公路沥青路面再生技术规范》中再生剂掺量(质量分数,文中涉及的掺量、含量等均为质量分数)的确定方法,通过测定不同再生

剂掺量的再生沥青性能恢复状况,综合确定再生剂的掺量。试验时,将 RTFOT+PAV(20 h)长期老化沥青加热到 110 ℃,分别加入 8%、10%、12%、14% 的 YG-1,然后用玻璃棒搅拌,直至再生沥青中的水分充分蒸发,再生沥青不再有汽包产生为止,最后测定再生沥青的三大指标,绘制曲线,确定再生剂掺量。不同 YG-1 掺量再生沥青的性能如表 4 所示。

表 4 不同 YG-1 掺量再生沥青性能指标

Table 4 Indexes of regenerated asphalt at different contents of YG-1

Sample	$w(\text{YG-1})/\%$	Penetration (25 ℃)/(0.1 mm)	Softening point/℃ (10 ℃)/cm	Ductility
Original asphalt	0	85	47.5	36.2
RTFOT+ PAV(20 h) aged asphalt	0	34	56.0	3.9
Regenerated asphalt by YG-1	8	46	54.1	14.2
	10	64	49.3	24.9
	12	87	45.9	33.2
	14	98	41.4	31.1

由表 4 可以看出,随着 YG-1 掺量的增加,老化沥青性能都得到了不同程度的恢复。当 YG-1 掺量接近 12% 时,老化沥青性能基本恢复到原样沥青的水平,最终确定进行老化沥青再生的 YG-1 掺量为 12%。

1.3 微观分析

利用扫描电子显微镜(SEM)和 IR 对原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h)长期老化沥青和 YG-1 再生沥青的微观表面性状、官能团变化进行观察和测试;采用 JTG E20—2011 中的 T0618 方法对 4 种沥青进行四组分测试,分析沥青在老化和再生过程中四组分的变化规律。

1.4 沥青流变试验

利用动态剪切流变仪(DSR)、弯曲梁流变仪(BBR)对原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h)长期老化沥青和 YG-1 再生沥青在不同温度下的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 、复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 、车辙因子 $|G^*|/\sin \delta$ 、劲度模量 S 、劲度模量变化率(蠕变率) m 值、疲劳因子 $|G^*| \sin \delta$ 等指标进行测试,并对再生沥青进行 PG 分级,以分析 YG-1 的再生效果。

2 微观分析结果与讨论

2.1 红外光谱分析

原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h)长期老化沥青和 YG-1 再生沥青的红外谱图如图 1 所示。

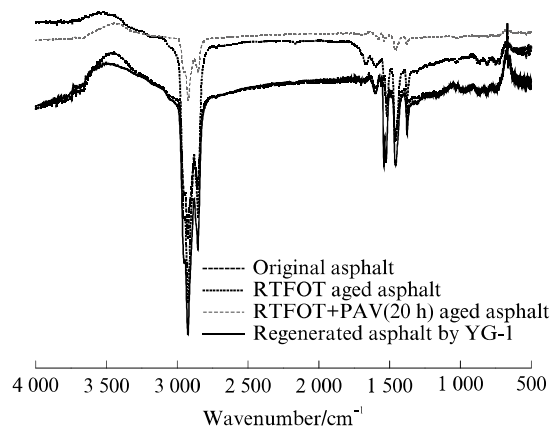


图 1 4 种沥青的红外谱图

Fig. 1 Infrared spectra of four kinds of asphalt

由图 1 可以看出:YG-1 再生沥青的特征吸收峰和其他沥青基本相同;2 923、2 845 cm^{-1} 为脂肪族甲基— CH_3 和亚甲基— CH_2 —伸缩振动峰,沥青中芳环形式存在的 $\text{C}=\text{C}$ 伸缩振动频率位于 1 370~1 610 cm^{-1} 之间,在此区间出现了 3~4 个吸收峰,分别位于 1 380±10、1 600±10、1 450~1 500 cm^{-1} ,其中 1 450~1 500 cm^{-1} 和 1 600 cm^{-1} 是具有高度芳香烃特征的吸收峰^[8]。为分析沥青老化和再生过程中官能团的变化规律,同时减少由于制样厚度等因素对试验结果造成的影响,本文采用归一化方法,将甲基亚甲基吸收峰(2 923、2 845 cm^{-1})面积 $A_{\text{CH}_3/\text{CH}_2}$ 、芳环形式存在的 $\text{C}=\text{C}$ 吸收峰(1 370~1 610 cm^{-1})面积 $A_{\text{CH}_2=\text{CH}_2}$ 除以全部峰谱(450~4 000 cm^{-1})面积 A_{Tot} ,以表征沥青老化和再生过程中 2 组官能团的变化规律,比值分别记为 $I_{\text{CH}_3/\text{CH}_2}$ 、 $I_{\text{CH}_2=\text{CH}_2}$,计算公式如式(1)、(2)所示。计算结果如表 5 所示。

$$I_{\text{CH}_3/\text{CH}_2} = \frac{A_{\text{CH}_3/\text{CH}_2}}{A_{\text{Tot}}} \quad (1)$$

$$I_{\text{CH}_2=\text{CH}_2} = \frac{A_{\text{CH}_2=\text{CH}_2}}{A_{\text{Tot}}} \quad (2)$$

表 5 4 种沥青 $I_{\text{CH}_3/\text{CH}_2}$ 、 $I_{\text{CH}_2=\text{CH}_2}$ 计算结果Table 5 Calculation results of $I_{\text{CH}_3/\text{CH}_2}$ 、 $I_{\text{CH}_2=\text{CH}_2}$ of four kinds of asphalt

Sample	$I_{\text{CH}_3/\text{CH}_2}$	$I_{\text{CH}_2=\text{CH}_2}$
Original asphalt	27.7	21.7
RTFOT aged asphalt	23.9	19.1
RTFOT+PAV(20 h)aged asphalt	16.5	12.8
Regenerated asphalt by YG-1	25.1	22.3

由表 5 可知,加入 YG-1 后,位于 2 923、2 845 cm^{-1} 和 1 370~1 610 cm^{-1} 之间的吸收峰得到了恢复,说

明再生剂使沥青官能团数量得到了恢复.同时,再生后的红外谱图没有其他明显的特征峰值出现,说明 YG-1 中的微波敏感材料和表面活性剂对沥青官能团的影响不大.

2.2 扫描电镜分析

利用 SEM 对原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h)长期老化沥青和 YG-1 再生沥青的微观表面性状进行观察,结果如图 2 所示.

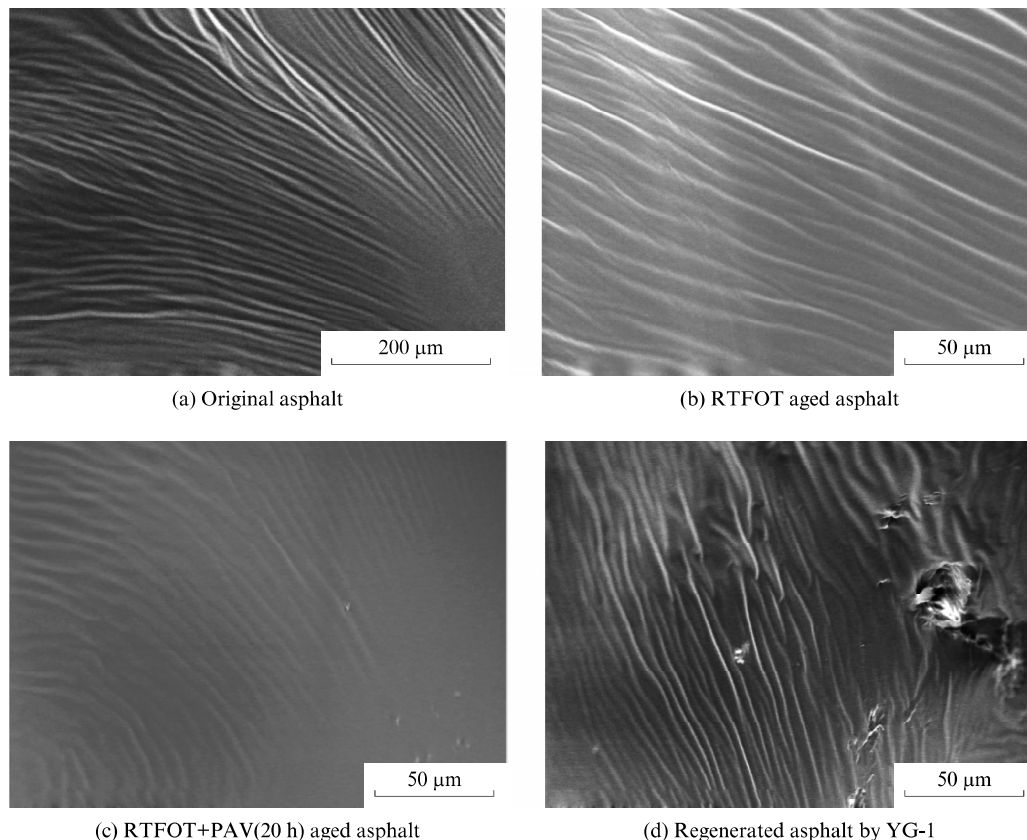


图 2 4 种沥青的 SEM 图
Fig. 2 SEM images of four kinds of asphalt

由图 2 可以看出:原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h)老化沥青的 SEM 图类似,3 种沥青表面呈条纹状分布,表面光滑无杂质;YG-1 再生沥青的表面性状发生了一定改变,在沥青表面部分区域出现不均匀的突起,突起部分与沥青结合紧密,且在单位区域分布的数量大致相同.结合 YG-1 的组成,推断突起部分为 YG-1 中的微波敏感型材料,其性能较为稳定,在沥青再生过程中相对均匀地分布在沥青中.

2.3 四组分分析

对原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h)长期老化沥青和 YG-1 再生沥青进行四组分试验,其沥青质(At)、胶质(R)、芳香分(Ar)和饱和分(Sa)含量如表 6 所示.

由表 6 可知,经过 RTFOT 短期老化和 RTFOT+PAV(20 h)长期老化后的沥青饱和分和芳香分含量减少,沥青质和胶质含量增加.在 RTFOT+PAV

表 6 4 种沥青的四组分试验结果
Table 6 Four component test results of four kinds of asphalt
w/%

Sample	At	R	Ar	Sa
Original asphalt	9.42	27.44	41.12	22.02
RTFOT aged asphalt	11.12	28.69	39.53	20.66
RTFOT+PAV(20 h) aged asphalt	13.57	30.51	36.27	19.65
Regenerated asphalt by YG-1	9.82	27.41	41.05	21.72

(20 h)长期老化沥青中加入 YG-1 后进行四组分分析,发现与 RTFOT+PAV 长期老化沥青相比,再生沥青中的饱和分、芳香分含量增加,沥青质和胶质含量降低,成分组成向原样沥青靠拢;与原样沥青相比,再生沥青中的沥青质相比原样沥青有所增加,胶质、饱和分、芳香分含量略有降低.分析原因是 YG-1 中含有大量的芳香分和一定量的饱和分,加入老化沥青后一方面通过组分调节作用补充了老化沥青中减少的芳香分和饱和分,另一方面由于芳香分对沥

青质有一定的溶解作用,在整个再生过程中,老化沥青中的沥青质部分被溶解,最终导致沥青质的含量降低,组分得到还原。为量化 YG-1 再生效果,本文对比分析了 4 种沥青样品的胶体指数(I_c)^[9]。 I_c 反映沥青的溶胶-凝胶比例,对于同种沥青,其值越小沥青老化程度越高,反之则老化程度低, I_c 计算公式如式(3)所示,4 种沥青 I_c 的计算结果如表 7 所示。

$$I_c = w(R+Ar)/w(At+Sa) \quad (3)$$

表 7 4 种沥青的胶体指数
Table 7 I_c of four kinds of asphalt

Sample	$w(R+Ar)/\%$	$w(At+Sa)/\%$	I_c
Original asphalt	68.56	31.44	2.18
RTFOT aged asphalt	68.22	31.78	2.15
RTFOT+PAV(20 h) aged asphalt	66.78	33.22	2.01
Regenerated asphalt by YG-1	68.46	31.54	2.17

由表 7 可知, YG-1 使长期老化沥青的 I_c 由 2.01 恢复到 2.17, 与原样沥青 I_c (2.18) 基本相同, 老化沥青得到了恢复。

3 流变试验结果与讨论

3.1 高温流变参数测试及评价

通过 DSR 的温度扫描模式, 对 4 种沥青的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 、复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 随温度变化的规律进行研究。试验扫描频率为 10 rad/s, 试验温度分别为 40、46、52、58、64 °C。将试验数据利用半对数坐标作图, 得出各项指标随温度变化规律, 如图 3 所示。

储能模量 G' 表征材料在发生形变时, 由于弹性形变而储存能量的大小^[10]。由图 3(a) 可以看出: 4 种沥青的储能模量 G' 都随着温度的增加而减小, RTFOT+PAV(20 h) 老化沥青的储能模量 G' 远高于原样沥青, 在 40 °C 时是原样沥青的将近 20 倍, 且随着温度的升高差距仍在增加; RTFOT 老化沥青 40 °C 的储能模量 G' 是原样沥青的约 2 倍, 但随着温度的升高差距增加不明显。分析可知, 沥青老化后, 在相同外力作用下沥青弹性变形所需的外力增加, 随着温度的升高该现象更加明显, 而 YG-1 再生沥青的储能模量 G' 得到了有效的恢复, 与原样沥青相当, 说明 YG-1 使得老化沥青弹性变形能力得到了恢复。

损耗模量 G'' 表征材料在发生形变时, 由于塑性形变而损耗的能量大小, 反映了沥青材料黏性大小^[10]。由图 3(b) 可以看出: 4 种沥青的损耗模量 G''

呈现出与储能模量 G' 相同的变化规律, 随着温度的增加而减小, RTFOT+PAV(20 h) 老化沥青的损耗模量 G'' 同样远高于原样沥青, 是原样沥青的约 10 倍, 但不同于储能模量 G' 的是, 随着温度的增加, 二者差距倍数变化不大。分析可知, 沥青老化后, 发生相同塑性变形所需的外力增大, 而 YG-1 再生沥青的损耗模量 G'' 与原样沥青相当, 说明 YG-1 能够有效恢复老化沥青的塑性变形能力。

复数剪切模量 G^* 是沥青材料黏弹性的综合体现, 是评价沥青结合料抵抗变形能力的综合指标, 其值越高, 沥青结合料的抗变形能力越强^[11]。由图 3(c) 可以看出: 4 种沥青的复数剪切模量 G^* 随着温度的增加而减小, RTFOT+PAV(20 h) 老化沥青的损耗模量 G^* 同样高于原样沥青, 是原样沥青的约 10 倍, 说明沥青老化后的抗变形能力增加; YG-1 再生沥青的复数剪切模量 G^* 得到了有效的恢复, 且略高于原样沥青, 说明 YG-1 能够有效恢复老化沥青的变形能力。

相位角 δ 表征黏弹性材料的黏性与弹性比例, 完全弹性材料 $\delta=0^\circ$; 完全黏性材料 $\delta=90^\circ$; 而黏弹性材料应力、应变响应相位滞后 δ 在 $0\sim90^\circ$ ^[11]。由图 3(d) 可以看出, 4 种沥青的相位角 δ 随着温度的增加而增加, 相同温度下, 相位角 δ 的大小排序为: 原样沥青 > YG-1 再生沥青 > RTFOT 老化沥青 > RTFOT+PAV 老化沥青。说明随着沥青的老化, 沥青的黏性降低, 弹性增加; 同种沥青随着温度的增加, 沥青的黏性增加, 弹性降低。YG-1 的加入使长期老化沥青恢复到与原样沥青基本相同的黏弹性性能。

分析 4 种沥青的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 、复数剪切模量 G^* 、相位角 δ 等参数后可知, YG-1 再生沥青的各项指标都接近原样沥青, 在高温性能方面表现出与原样沥青接近的性能。

3.2 低温流变参数测试及评价

在 Superpave 沥青评价体系中^[12], BBR 用于评价沥青胶结料的低温蠕变特征, 测量沥青的挠曲蠕变劲度和柔量。本节通过测试原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、RTFOT+PAV(20 h) 长期老化沥青、YG-1 再生沥青 4 种沥青样品在 -12、-18、-24 °C 时的劲度模量 S 和劲度模量变化率(即蠕变率) m 值, 分析 YG-1 再生沥青的低温性能, 试验结果如图 4 所示。

劲度模量 S 是指在某荷载作用时间和温度条件下应力和总应变的比值, 蠕变率 m 是劲度模量 S 随时间的变化速率。劲度模量值越低, 表明沥青的低

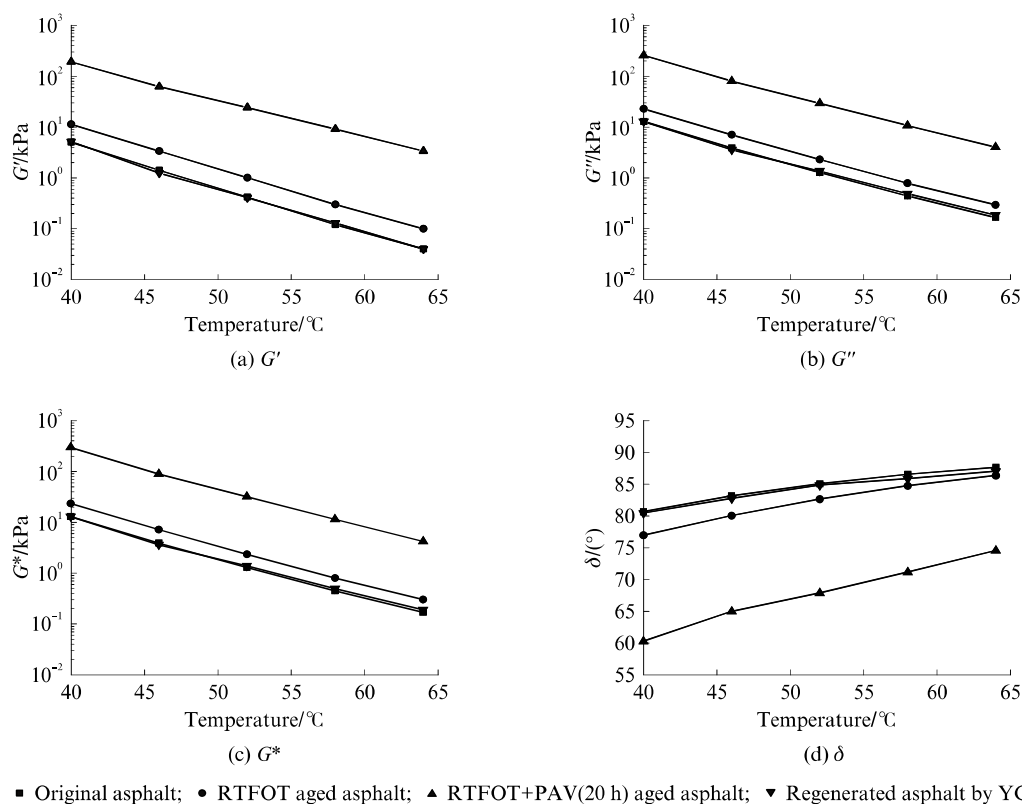


图3 4种沥青高温流变参数随温度的变化规律

Fig. 3 Variation of high temperature rheological parameter of four kinds of asphalt with temperature

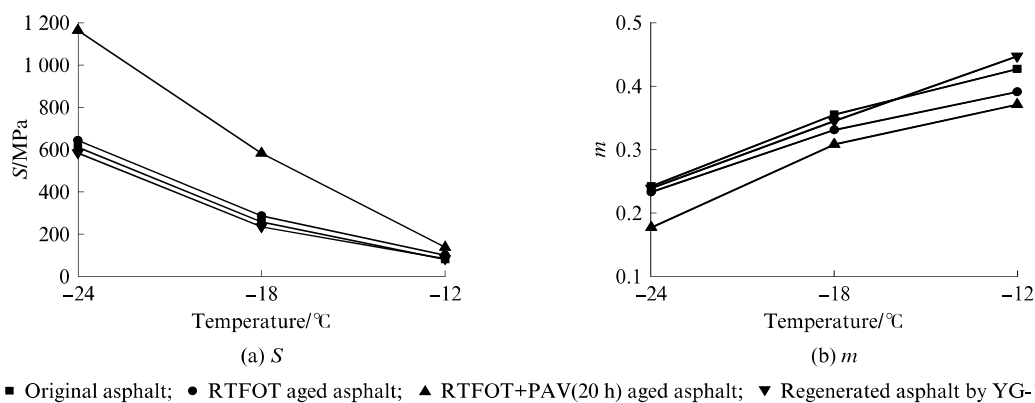


图4 4种沥青低温蠕变参数随温度的变化规律

Fig. 4 Variation of low temperature parameter of four kinds of asphalt with temperature

温变形能力越好; m 值越大, 表示沥青的松弛能力越好, 低温性能越好^[12]. 由图 4(a)可以看出, 随着温度的降低, 4 种沥青的劲度模量 S 值都呈现升高的趋势, 其中原样沥青、RTFOT 短期老化沥青、YG-1 再生沥青的劲度模量 S 值相近, RTFOT+PAV(20 h) 长期老化沥青劲度模量 S 值偏大, 且随着温度的降低, S 值降低速率快于其余 3 种沥青. 由图 4(b)可以看出: m 值呈现出与 S 值相反的变化规律, 4 种沥青的 m 值都随着温度的降低而降低; 不同温度下, RT-

FOT+PAV(20 h) 长期老化沥青的 m 值均最小, 原样沥青和 YG-1 再生沥青的 m 值接近, 说明 YG-1 再生沥青的低温松弛能力与原样沥青相近, 低温性能较好.

3.3 疲劳性能参数测试及评价

将原样沥青和 YG-1 再生沥青进行 RTFOT+PAV(20 h) 老化, 得到 2 种长期老化沥青. 参照 Kennedy 等^[12]研究成果, 取 25、22、19、16 °C 这 4 种温度, 进行 2 种长期老化沥青疲劳因子 $G^* \sin \delta$ 的测

定,结果如图 5 所示.由图 5 可以看出:再生沥青与原样沥青经过长期老化后,在不同温度下的疲劳因子相近;随着温度的增加,2 种长期老化沥青的疲劳因子逐渐减小,即材料柔性越好,其抗疲劳能力越强;YG-1 再生沥青的疲劳性能与原样沥青相近.

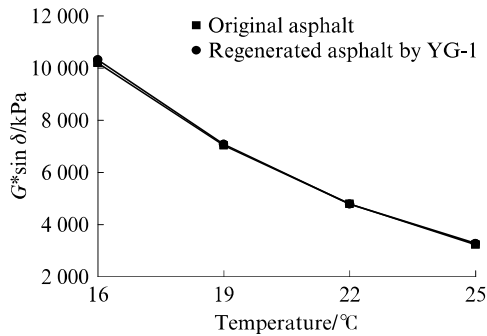


图 5 2 种沥青疲劳因子 $G^*\sin\delta$ 随温度的变化规律
Fig. 5 Variation of fatigue factor $G^*\sin\delta$ of two kinds of asphalt with temperature

4 沥青流变参数与微观试验结果的灰关联分析

灰色关联分析法是对一个系统发展变化态势进

行定量描述和比较的方法,依据空间理论的数学基础,确定参考数列和若干比较数列之间的关联系数和关联度^[13].关联度描述了系统发展过程中因素间相对变化的情况,如果两者在发展过程中相对变化基本一致,则认为两者关联度大,反之则关联度小.

本节进行灰关联分析时,将沥青质、胶质、芳香分、 I_{CH_3/CH_2} 、 $I_{CH_2=CH_2}$ 值 5 个指标在老化和再生过程中的变化值作为母数列,以 58 ℃ 下的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 、复数剪切模量 G^* 、相位角 δ ,以及 -12 ℃ 劲度模量 S 和劲度模量变化率 m 值 6 个指标在老化和再生过程中的变化值作为子数列,分析沥青宏观性能与微观变化之间的关联度.沥青老化和再生过程中微观结构指标和流变特性参数变化值如表 8 所示.微观指标与流变参数灰关联分析结果如表 9 所示.

从表 9 可以看出:4 种沥青 58 ℃ 下的储能模量 G' 、损耗模量 G'' 和复数剪切模量 G^* 与沥青的组分和官能团变化关联度显著,关联度均大于 0.8,可知 4 种沥青的黏性、弹性以及抵抗变形能力受沥青组分比例和官能团数量影响较大;-12 ℃ 劲度模量变化率 m 值与胶质含量变化的关联度较好,关联度为

表 8 4 种沥青老化及再生过程中各参数指标变化值
Table 8 Parameters change ratio of four kinds of asphalt at aging and regenerating process %

Sample	At ratio	R ratio	Ar ratio	I_{CH_3/CH_2} ratio	$I_{CH_2=CH_2}$ ratio	G' ratio (58 ℃)
Original asphalt	85.4	96.4	104.2	96.9	99.8	5.0
RTFOT aged asphalt	100.8	100.7	100.2	127.4	114.8	12.4
RTFOT+PAV(20 h) aged asphalt	123.0	107.2	92.0	34.8	17.6	377.2
Regenerated asphalt by YG-1	90.7	95.7	103.6	141.0	167.7	5.4

Sample	G'' ratio (58 ℃)	G^* ratio (58 ℃)	δ ratio (58 ℃)	S ratio (-12 ℃)	m ratio (-12 ℃)
Original asphalt	24.3	23.2	105.5	80.6	104.4
RTFOT aged asphalt	38.5	37.0	103.3	100.0	95.6
RTFOT+PAV(20 h)aged asphalt	310.9	314.6	86.7	135.9	90.7
Regenerated asphalt by YG-1	26.2	25.1	104.6	83.6	109.3

表 9 微观指标与流变参数灰关联分析结果
Table 9 Gray correlation analysis results between microscopic indicators and rheological parameters

Microscopic indicator	G'	G''	G^*	δ	S	m
At	0.871	0.880	0.880	0.641	0.639	0.666
R	0.882	0.859	0.861	0.688	0.604	0.743
Ar	0.862	0.835	0.837	0.754	0.588	0.625
I_{CH_3/CH_2}	0.822	0.817	0.818	0.672	0.729	0.653
$I_{CH_2=CH_2}$	0.821	0.818	0.818	0.669	0.719	0.637

0.743,而受其他微观指标影响相对较小,-12 ℃ 劲度模量 S 值受官能团的影响要高于受组分的影响,即 4 种沥青的低温变形能力受官能团影响大于受组分的影响,胶质含量与沥青的松弛能力相关性较大;58 ℃ 相位角 δ 受芳香分的影响最大,关联度为 0.754,即 4 种沥青的黏性与弹性比例受芳香分含量的影响较大.

分析可知,沥青的流变性能受沥青的组分比例和官能团数量影响显著,YG-1 通过调节老化沥青的组分和官能团数量,可以实现老化沥青的再生.

5 YG-1 再生过程数值分析

本节利用 Comsol 软件进行数值分析,研究在微波作用下 YG-1 渗入混合料内部后,对混合料内部温度场的影响。

5.1 模型的建立

本节建立的模型由石料、沥青和 YG-1 组成,图 6 为模型示意图。模拟中假设沥青混合料中有微裂纹存在,以裂纹存在于沥青膜中为例进行分析,模拟对比分析 YG-1 渗透前后混合料的温度分布规律。简化后的模型如图 7 所示,模型中沥青膜厚设置为 0.2 mm,空隙(或 YG-1)宽度为 0.4 mm,模拟的初始温度为 25 ℃。

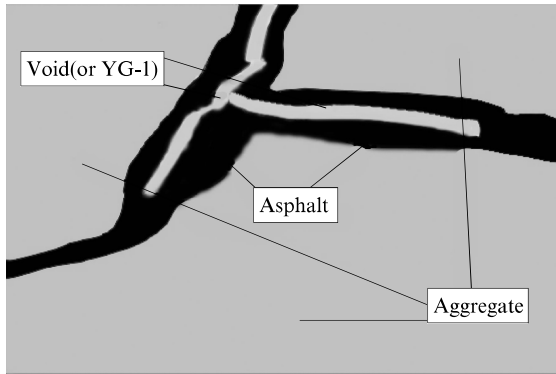


图 6 数值分析模型示意

Fig. 6 Numerical analysis model schematic diagram

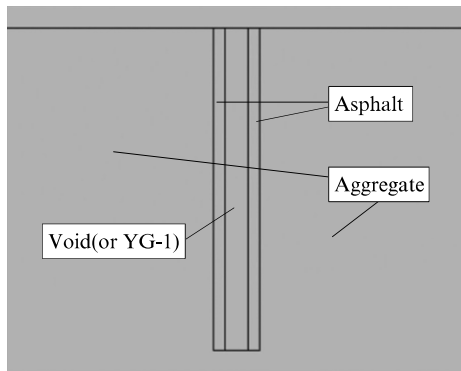


图 7 简化后的数值分析模型

Fig. 7 Simplified numerical analysis model

5.2 模型中参数的选取

模拟的参数除 YG-1 通过实测获得外,其余参数通过查阅相关文献获得^[7,14-17],模拟中用到的参数如表 10 所示。

5.3 模拟结果分析

模拟结果如图 8 所示,图中分别列出了微波作用 90、180、270 s 时加入 YG-1 前后的沥青混合料温

表 10 模拟中不同材料的参数取值表

Table 10 Parameter value table for different materials in simulation

Parameter	Asphalt	Aggregate	YG-1
Relative dielectric constant	4.00	8.00	64.04
Differential permeability	1	1	1
Electrical conductivity/($S \cdot m^{-1}$)	2.0×10^{-4}	1.7×10^{-4}	5.05
Thermal conductivity/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0.700	3.355	0.683
Density/($kg \cdot m^{-3}$)	1 000	2 700	980
Atmospheric specific heat/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1 670	920	3 300
$\tan \delta$	0.001 0	0.041 0	0.492 8

度场分布。由图 8 可以看出, YG-1 的加入明显改变了混合料内部温度场的分布, YG-1 具有能量集中作用。添加 YG-1 前, 能量吸收遵循由上到下逐渐减小的规律, 即靠近微波波源的温度高于远离波源的温度; 添加 YG-1 后, 能量集中在 YG-1 添加位置, 温度由 YG-1 添加位置向两侧逐渐降低。

6 YG-1 再生机理分析

YG-1 以乳液形式存在, 不同于普通沥青再生剂, 其除含有普通沥青再生剂中的再生组分外, 还有微波发热材料、表面活性剂、水等成分, 因此沥青再生机理与普通再生沥青相比有一定差异。结合 2~5 节沥青再生过程中流变参数、微观指标和灰关联分析结果, 得出 YG-1 的再生机理如下。

(1) 通过组分调节恢复了沥青中各组分的比例和官能团数量。YG-1 中的再生成分(芳香族溶剂油、增塑剂)与老化沥青融合后, 补充了老化沥青中的芳香分和饱和分, 使得老化沥青的组分和官能团数量得到了恢复, 如第 2 节所述。由第 4 节的灰关联分析结果可知, 沥青中各组分含量和官能团数量与沥青流变性能的相关性较好, 可知沥青组分比例和官能团数量的恢复是沥青性能恢复的根本原因。YG-1 再生老化沥青后, 其中的沥青质、胶质含量降低, 芳香分、饱和分含量增加, I_{CH_3/CH_2} 、 $I_{CH_2=CH_2}$ 值得到恢复, 从而使沥青的流变性能参数得到了恢复, 使再生沥青性能与原样沥青相近。

(2) 微波发热材料和乳液体系加速了再生成分与老化沥青的融合。普通沥青再生剂与老化沥青的融合主要是通过浓度差扩散实现, 而 YG-1 中再生成分与老化沥青的融合除浓度差扩散作用外, 还存在“微爆扩孔”作用^[5], 即微波敏感型材料在微波作用下快速升温, 在热量积聚到一定程度后 YG-1 中的水分发生汽化, 产生“微爆”作用而加速了老化沥青与再生剂的融合。因此相比普通再生剂, YG-1 具

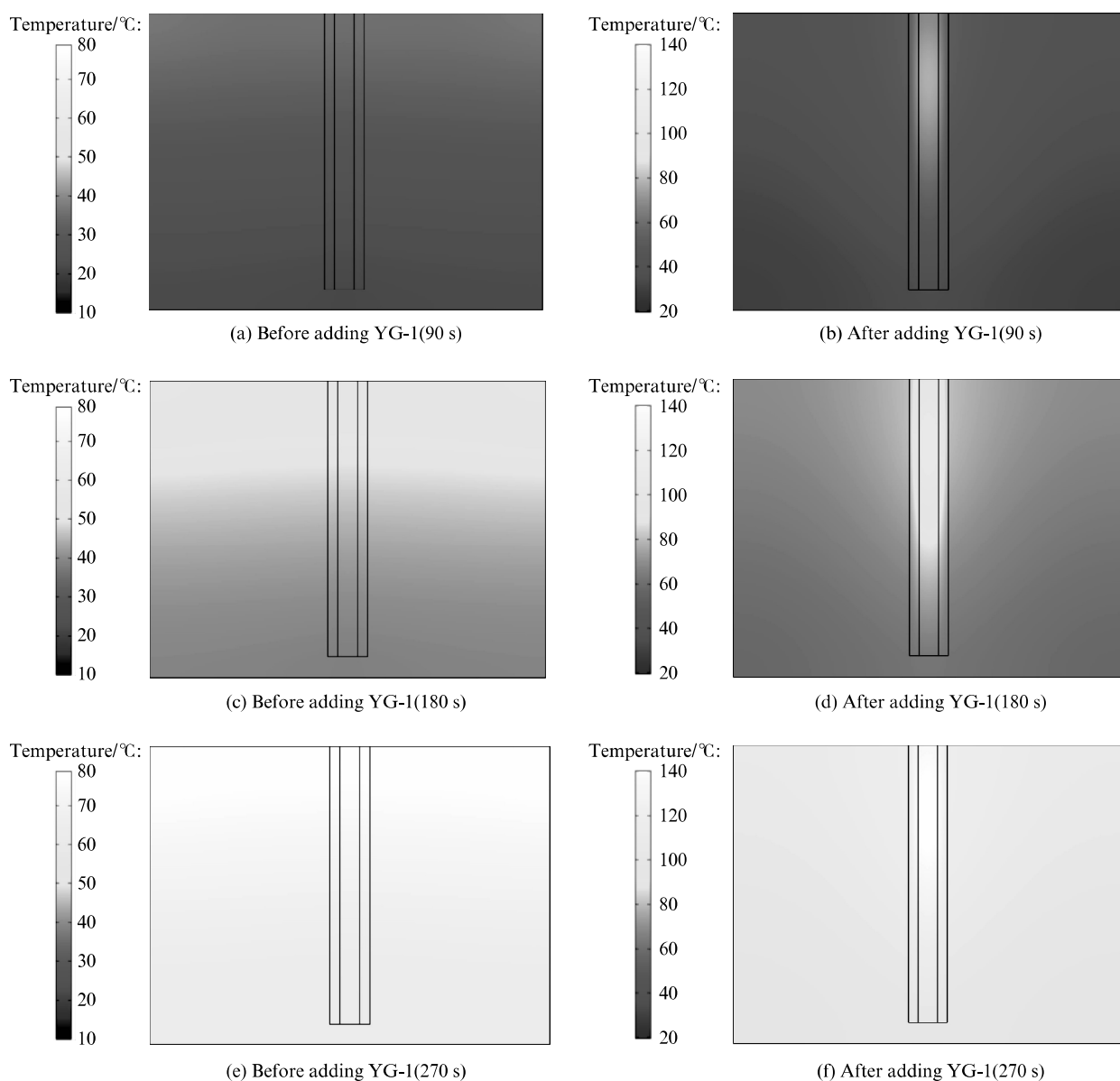


图 8 YG-1 加入前后混合料温度场分布

Fig. 8 Temperature field distribution of mixture before and after YG-1 addition

有与沥青更好的融合性。

(3) 水的降黏作用. 在温度相同的条件下, 老化沥青的黏度随着再生剂与老化沥青的融合而逐步降低, 普通沥青再生剂的降黏主要依靠再生剂自身黏度较低的特点, 通过调和作用来降低老化沥青的黏度, 而由于 YG-1 中水的存在, 使沥青在再生过程中产生“发泡降黏”作用, 从而使再生沥青获得更低的黏度, 有利于再生路面的压实, 可以在一定程度上避免因路面加热温度过高导致沥青的“再次”老化。

(4) 再生过程中的温度持续补给. 沥青再生过程中, 首先要保证沥青和再生剂具有一定温度, 才能使再生剂与老化沥青快速充分融合. 结合 YG-1 的再

生过程可知, 与普通再生剂不同, YG-1 的热量主要依靠微波提供, 由于微波具有穿透性, 因此在 YG-1 渗透到路面内部时, 能得到持续的供热, 使其始终保持一定的高温, 保证了 YG-1 和沥青在融合过程中的温度。

7 结论

(1) YG-1 在再生过程中能够恢复沥青四组分比例和官能团数量, 其中的微波发热材料在沥青再生过程中得到了整体保留, 并且相对均匀地分布在沥青中. 再生后的沥青红外谱图没有其他明显的特征峰值出现, 说明 YG-1 中的微波敏感材料和表面

活性剂对沥青官能团的影响不大。

(2)通过分析原样、RTFOT 短期老化、RTFOT+PAV(20 h)长期老化、YG-1 再生 4 种沥青的流变参数,得到了沥青在老化和再生过程中流变性能的变化规律。YG-1 再生沥青的流变性能得到了全面恢复。

(3)利用灰关联分析法,发现 4 种沥青的黏性、弹性以及抵抗变形能力受沥青组分变化和官能团变化影响较大;劲度模量变化率 m 值与胶质含量变化的关联度较大;劲度模量 S 值受官能团的影响要高于受组分的影响;黏性与弹性比例受芳香分含量的影响较大。

(4)分析 YG-1 的再生机理可知, YG-1 通过组分调节作用恢复了沥青中各组分的比例和官能团数量,其中的微波发热材料、乳液体系、水的降黏作用以及温度持续补给加速了再生成分与老化沥青的融合,相较其他再生剂, YG-1 具备与沥青更好的融合性。

参考文献:

- [1] CAO R J, LENG Z, HSU S C. Comparative eco-efficiency analysis on asphalt pavement rehabilitation alternatives: Hot in-place recycling and milling-and-filling[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210:1385-1395.
- [2] BOURAIMA M B, ZHANG X H, RAHMAN A, et al. A comparative study on asphalt binder and mixture performance of two traffic lanes during hot in-place recycling(HIR) procedure[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223:33-43.
- [3] 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 Hairong, DONG Qiangzhu, LIANG Fengdian, 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. (in Chinese)
- [4] 马建,孙守增,芮海田,等.中国筑路机械学术研究综述·2018[J].中国公路学报,2018,31(6):1-164.
MA Jian, SUN Shouzheng, RUI Haitian, et al. Review on China's road construction machinery research progress:2018[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6):1-164. (in Chinese)
- [5] 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 Yongxiang, HAO Peiwen, 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. (in Chinese)
- [6] 李永翔,李军,于敏,等.微波敏感型沥青再生剂在坑槽修补中的应用[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(3):467-470,475.
LI Yongxiang, LI Jun, YU Min, et al. Application of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent in pothole repair[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(3):467-470, 475. (in Chinese)
- [7] 李永翔,郝培文,曹海波,等.微波敏感型沥青再生剂软化效果影响因素分析[J].公路交通科技,2018,35(11):17-25.
LI Yongxiang, HAO Peiwen, CAO Haibo, et al. Analysis on influencing factors of softening effect of microwave sensitive asphalt rejuvenate agent[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(11):17-25. (in Chinese)
- [8] 郑健龙,陈骁.沥青老化效应的试验研究[J].公路交通科技,2007(6):20-23,28.
ZHENG Jianlong, CHEN Xiao. Tests of the asphalt aging effect[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007(6):20-23, 28. (in Chinese)
- [9] 刘星.道路用 LDHs 耐老化沥青的性能、作用机理与应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2015.
LIU Xing. Study on performance, mechanism and application of LDHs modified bitumen[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 王霞,李浩,宋永明,等.木粉/聚丙烯复合材料的流变性能研究[J].西南林业大学学报,2016,36(4):145-151.
WANG Xia, LI Hao, SONG Yongming, et al. Research on rheological properties of wood flour/polypropylene composites[J]. Journal of Southwest Forestry College, 2016, 36(4):145-151. (in Chinese)
- [11] 雷俊安,郑南翔,许新权,等.温拌沥青高温流变性能研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):904-911.
LEI Jun'an, ZHENG Nanxiang, XU Xinquan, et al. Study on high temperature rheological properties of warm mixed asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):904-911. (in Chinese)
- [12] KENNEDY T W, HUBER G A, HARRIGAN E T, et al. Superior performing asphalt pavements(superpave): The product of the SHRP asphalt research program[R]. Washington, D. C.: Strategic Highway Research Program, 1994.
- [13] 银花,李凯.沥青零剪切粘度与高温流变参数灰色关联分析[J].建筑材料学报,2020,23(1):108-113,121.
YIN Hua, LI Kai. Gray relation analysis of zero shear viscosity and high temperature rheological parameters of asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):108-113, 121. (in Chinese)
- [14] 邹玲.沥青混合料热物性参数研究[D].西安:长安大学,2011.
ZOU Ling. Research on thermal physical parameters of asphalt mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [15] 李自光,任武,黄樱,等.基于 ANSYS 的微波加热再生沥青路面温度控制仿真与试验[J].中国工程机械学报,2010,8(2):204-207,218.