

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.07.001

# 温拌剂对再生沥青与沥青混合料性能影响及作用机理

仰建岗<sup>1</sup>, 黄锦化<sup>2</sup>, 高杰<sup>\*1</sup>, 姚玉权<sup>3</sup>, 罗露花<sup>4</sup>

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学 交通运输工程学院, 江西 南昌 330013; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 4. 江西省天驰高速科技发展有限公司, 江西 南昌 330103)

**摘要:**为研究 Sasobit 温拌剂对再生沥青及再生沥青混合料性能的影响, 分析其作用机理。通过动态剪切流变试验、弯曲梁流变试验测试了不同温拌剂掺量下沥青高、低温流变性能。采用马歇尔试验分析了温拌剂对再生沥青混合料压实温度的影响。结合水敏感性试验、车辙试验及低温弯曲试验分析了温拌剂添加前后再生沥青混合料路用性能的变化规律。采用傅里叶变换红外光谱分析了温拌剂在再生沥青中的作用机理。结果表明: Sasobit 温拌剂掺量增加可以改善再生沥青抗变形能力以及抗荷载变形程度, 而抗疲劳开裂以及低温抗裂性则反之, 对再生沥青抗永久变形能力影响不明显; 当沥青混合料回收料 (RAP) 掺量为 40% 时, 以 4% 为目标空隙率添加老化沥青质量 3% 的 Sasobit 温拌剂, 可使热拌再生沥青混合料压实温度降低 20~30 °C; 相同 RAP 掺量下, 使用 Sasobit 温拌剂的再生沥青混合料的水稳定性、低温抗裂性均低于普通热拌再生沥青混合料, 而高温稳定性则反之; Sasobit 温拌剂的使用不会改变再生沥青中羰基与亚砷基振动幅度, 表明其在再生沥青中不发生化学反应, 对再生沥青混合料降温的效果属于物理降黏作用; Sasobit 温拌剂不能恢复老化沥青中已经降解的 SBS 改性剂性能; Sasobit 温拌剂能够影响再生沥青混合料高、低温性能以及水稳定性, 工程使用中应综合考虑路用性能与压实温度之间的平衡确定合理的温拌剂掺量。

**关键词:** 道路工程; 再生沥青混合料; 流变试验; Sasobit 温拌剂; 路用性能; 机理

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 07-0001-10

## Influence and Mechanism of Warm Mix Agent on Performance of Recycled Asphalt and Asphalt Mixture

YANG Jian-gang<sup>1</sup>, HUANG Jin-hua<sup>2</sup>, GAO Jie<sup>\*1</sup>, YAO Yu-quan<sup>3</sup>, LUO Lu-hua<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;  
2. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;  
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;  
4. Jiangxi Tianchi Expressway Technology Development Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330103, China)

**Abstract:** To study the influence of the Sasobit warm mix agent on the performance of recycled asphalt and recycled asphalt mixture as well as the mechanism of warm mix agent, the high and low temperature rheological characteristics of the asphalts with different of warm mixing agent contents are tested by using the dynamic shear rheological test and flexural beam rheological test. The influence of the warm mixing agent on the compaction temperature is analyzed by using the Marshall test. The change of road performance of recycled asphalt mixture before and after adding the warm mix agent is analysed by using water sensitivity test, rutting test and low temperature bending test. The mechanism of warm mix agent in recycled asphalt is

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52268068); 江西省教育厅青年科学基金项目 (GJJ210623); 福建省交通运输科技项目 (201901GS)

作者简介: 仰建岗 (1979-), 男, 江西南昌人, 博士, 副教授. (2851@ecjtu.edu.cn)

\* 通讯作者: 高杰 (1989-), 男, 陕西汉中, 博士. (gaojie@ecjtu.edu.cn)

analysed by FTIR. The result shows that (1) increasing the content of Sasobit warm mix agent can improve the deformation resistance and load deformation resistance of recycled asphalt, but the fatigue cracking resistance and low temperature crack resistance are on the contrary, which has no obvious influence on the permanent deformation resistance of recycled asphalt; (2) when the content of recycled asphalt mixture (RAP) is 40%, adding Sasobit warm mix agent at content of 3% with target porosity of 4% can reduce the compaction temperature of hot mixed recycled asphalt mixture by 20–30 °C; (3) with the same content of RAP, the moisture stability and the low temperature crack resistance of warm mix recycled asphalt mixture using Sasobit warm mix agent are lower than those of conventional hot mix recycled asphalt mixture, while the high-temperature stability is on the contrary; (4) the use of Sasobit warm mix agent will not change the vibration amplitude of carbonyl and sulfoxide groups in recycled asphalt, indicating that it does not undergo chemical reaction in recycled asphalt and its cooling effect on recycled asphalt mixture belongs to the physical viscosity reducing effect; (5) Sasobit warm mix agent cannot restore the performance of SBS modifiers that have already degraded in aged asphalt; (6) Sasobit warm mix agent can affect the high and low temperature performance and water stability of recycled asphalt mixture, a reasonable amount of warm mix agent should be determined by comprehensively considering the balance between road performance and compaction temperature in real projects.

**Key words:** road engineering; recycled asphalt mixture; rheological test; Sasobit warm mix agent; road performance; mechanism

## 0 引言

沥青路面养护工程会产生大量沥青混合料回收料 (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)<sup>[1-4]</sup>。沥青路面再生技术可以充分利用 RAP 中老化沥青及集料的剩余价值<sup>[5-6]</sup>, 常用于沥青路面养护工程。然而, 沥青路面再生过程中由于其较高的加热与施工温度, 不仅会消耗能源, 导致 RAP 老化程度加剧, 还会释放有害气体, 影响从业人员的健康<sup>[7]</sup>。温拌技术可以降低拌和与施工温度, 一般为 80~150 °C<sup>[8]</sup>。较低的拌和与施工温度使温拌技术具有良好的经济与环境效益<sup>[9-10]</sup>。近年来, 国内外相继出现了化学添加剂类、表面活性剂类、有机降黏类等温拌技术, 且温拌剂的种类逐渐增多, 其降温的效果及对沥青混合料的影响也有差异<sup>[11-12]</sup>。张争奇等<sup>[8]</sup>研究不同温拌剂的适用性, 发现有机温拌剂 Sasobit 能够很好地改善沥青混合料的高温稳定性, 低温抗裂性与水稳定性较温拌前也有小幅提升, 适用于高温重载地区。何兆益等<sup>[13]</sup>研究了 Sasobit 温拌沥青性能, 发现 Sasobit 会使沥青在低温环境下变脆变硬, 降低沥青的低温性能。XU 等<sup>[14]</sup>研究了蜡基温拌剂对含有 50% 老化沥青的混合沥青黏结剂流变性能的影响, 发现蜡基温拌剂可以抵消老化沥青对混合沥青的硬化作用。Rojas 等<sup>[15]</sup>研究了 3 种 Sasobit 掺量下温拌橡胶改性沥青流变特性, 发现 Sasobit 可以改善橡胶改

性沥青的模量和抗车辙性能, 且不会衰减沥青黏结剂的抗裂性能。时敬涛等<sup>[16]</sup>研究发现 Sasobit 温拌剂可以明显降低高黏沥青黏度, 改善高黏沥青的抗车辙能力, 但会降低高黏沥青的低温性能。朱得斌等<sup>[17]</sup>采用布氏黏度仪研究了温拌沥青的黏温特性, 发现 Sasobit 温拌剂可降低温拌再生沥青拌和与压实温度约 20 °C, 并基于黏温特性提出了 Sasobit 温拌剂与最佳施工温度的关系模型。此外, 研究表明 Sasobit 温拌剂在温拌沥青中应用最广泛<sup>[16]</sup>。综上, 现有研究在分析 Sasobit 温拌剂在温拌沥青及温拌沥青混合料方面已经积累较多的研究成果。然而, Sasobit 温拌剂对温拌再生沥青及再生沥青混合料性能影响方面的系统性研究较少。

为此, 本研究依托福建省福银高速公路三明二期提升改造工程, 考虑 Sasobit 温拌剂优异的高温流变性能以及抗车辙性能, 结合养护路段高温多雨重载的运行条件, 选择 Sasobit 温拌剂进行温拌再生沥青与沥青混合料性能研究, 探明 Sasobit 温拌剂的作用机理。研究成果有望为路面热再生工程中 Sasobit 温拌技术在南方高温重载区域的科学应用提供参考。

## 1 试验与方法

### 1.1 原材料

原材料包括 RAP, 粗、细石灰岩集料, 矿粉, SBS 改性沥青, Evoflex8182 再生剂以及 Sasobit 温拌

剂。RAP 来源于福银高速将乐段中面层 AK-16 沥青混合料, 并采用铣刨、破碎、筛分的方法分为 0~6, 6~10, 10~16 mm 这 3 档, 级配与沥青含量见表 1。采用旋转蒸发法将老化沥青与溶剂分离, 测试老化沥青与 RAP 矿料基本性能指标, 结果见表 2。采用水洗筛分方法对粗、细石灰岩集料以及矿粉逐级分档, 测试分档后不同规格集料的技术指标, 结果见表 3。SBS 改性沥青、Evoflex8182 再生剂以及 Sasobit 温拌剂基本性能测试结果见表 4。

表 1 RAP 矿料级配与沥青含量测试结果

Tab. 1 Test result of RAP mineral aggregate gradation and asphalt content

筛孔尺寸/mm	通过率/%		
	0~6 mm	6~10 mm	10~16 mm
16.0	100.0	100.0	100.0
13.2	100.0	100.0	82.4
9.5	100.0	99.4	38.2
4.75	94.2	30.4	16.8
2.36	62.1	19.8	12.3
1.18	46.7	16.2	10.1
0.6	37.6	14.0	8.7
0.3	25.8	10.8	6.5
0.15	20.5	9.0	5.4
0.075	14.3	6.6	3.9
沥青含量/%	7.35	3.68	2.33

表 2 RAP 矿料及老化沥青技术性能测试结果

Tab. 2 Test result of technical performance of RAP mineral aggregate and aged asphalt

材料类型	指标	试验结果
RAP	含水率/%	0.8
	砂当量/%	84.3
RAP 中的沥青	25 °C 针入度/(0.1 mm)	26.7
	软化点/°C	68.5
	15 °C 延度/cm	13.1
	60 °C 动力黏度/(Pa·s)	2 350
RAP 中粗集料	压碎值/%	12.1
	针片状含量/%	14.3
RAP 中细集料	棱角性/s	31.8

## 1.2 温拌再生沥青样品设计与制备

采用 RAP 中回收的老化沥青, 分别掺加老化沥青质量比 2%, 4%, 6% Evoflex8182 再生剂制备再生沥青, 测试其 25 °C 针入度, 结果如图 1 所示。由图 1 可见, 当再生沥青 25 °C 针入度指标恢复至 SBS 改性沥青水平时, 最佳再生剂用量为 6%。以最佳再生

表 3 石灰岩集料技术指标测试结果

Tab. 3 Test result of technical indicators of limestone aggregate

集料规格/mm	压碎值/%	表观相对密度	针片状/%	黏附性
19~26.5	—	2.720	7.4	5 级
16~19	—	2.741	5.8	5 级
13.2~16	—	2.755	9.3	5 级
9.5~13.2	12.6	2.746	12.3	—
4.75~9.5	—	2.779	15.2	—
2.36~4.75	—	2.692	—	—
1.18~2.36	—	2.700	—	—
0.6~1.18	—	2.708	—	—
0.3~0.6	—	2.673	—	—
0.15~0.3	—	2.630	—	—
0.075~0.15	—	2.659	—	—
矿粉	—	2.736	—	—
技术要求	≤28	≥2.5	粒径>9.5, ≤15 粒径<9.5, ≤20	≥4 级
试验方法	T 0316	T 0304	T 0312	T 0616

表 4 SBS 改性沥青、再生剂及温拌剂技术指标测试结果

Tab. 4 Test result of technical indicators of SBS modified asphalt, rejuvenator and warm mix agent

材料类型	指标	试验结果
SBS 改性沥青	25 °C 针入度/(0.1 mm)	55.2
	软化点/°C	64.7
	5 °C 延度/cm	43.4
	135 °C 运动黏度/(Pa·s)	2.33
Evoflex8182 再生剂	物理形态	棕色液体
	25 °C 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.946
	相对密度	0.95
Sasobit 温拌剂	物理形态	白色固体
	闪点/°C	209
	pH 值	9.5±1

剂用量为参考, 分别掺加再生沥青质量比 1%, 3%, 5% Sasobit 温拌剂制备温拌再生沥青。老化沥青, 6% 再生剂用量的再生沥青以及 1%, 3%, 5% 温拌剂制备的温拌再生沥青分别采用 OA, REOA, REOA+1% WM, REOA+3% WM, REOA+5% WM 表示。

根据再生剂、温拌剂用量设计方案, 制备温拌再生沥青, 流程如下: 采用 155 °C 预热温度将 OA 沥青加热至熔融状态, 将 6% 再生剂添加至 OA 沥青, 并通过加热搅拌器以 155 °C 加热温度、1 500 rad/min 搅拌速度搅拌 30 min, 制备 REOA 沥青; 之后, 将设计用量温拌剂添加至 REOA 沥青, 并采用加热搅

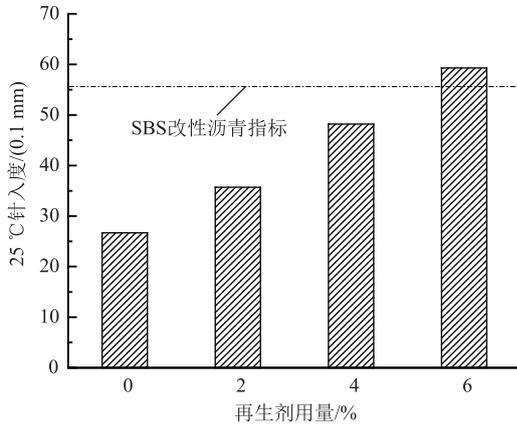


图1 再生沥青 25 °C 针入度指标测试结果

Fig. 1 Test result of penetration indicator of recycled asphalt at 25 °C

拌器以 155 °C 加热温度、3 000 rad/min 搅拌速度搅拌 20 min, 制备 REOA + 1% WM, REOA + 3% WM, REOA + 5% WM 温拌再生沥青。

### 1.3 温拌再生沥青混合料样品设计与制备

设计 40% RAP 掺量的 AC-20 再生沥青混合料, 级配如图 2 所示。再生沥青混合料中再生剂用量为老化沥青质量比 6%, 4% 空隙率控制目标下再生沥青混合料的最佳沥青含量为 4.3%。再生沥青混合料中 Sasobit 温拌剂用量为沥青总质量比 3%, 采用 120, 140, 160 °C 成型马歇尔试件, 并以 4% 空隙率确定最佳的温拌再生沥青混合料压实温度。此外, 设计普通热拌再生沥青混合料作为对照组用于比较温拌再生沥青混合料的性能之间的差异。

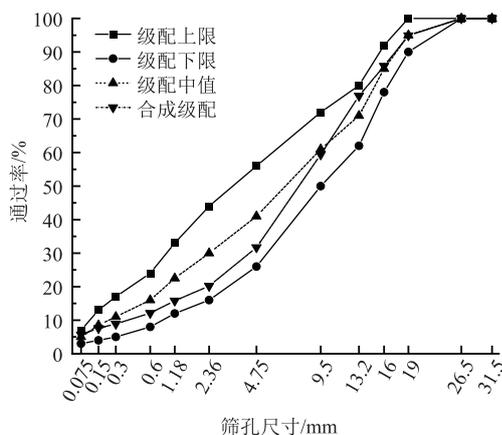


图2 设计级配

Fig. 2 Design gradation

温拌再生沥青混合料制备过程如下: 采用电热鼓风恒温干燥箱预热 RAP、新集料、SBS 改性沥青, 预热温度分别为 120, 180, 165 °C, 预热时间为 2 h; 将再生剂与 RAP 添加至沥青混合料拌和机中拌

和 60 s, 之后添加新集料、SBS 改性沥青、Sasobit 温拌剂拌和 60 s, 最后添加矿粉拌和 60 s 得到温拌再生沥青混合料。

### 1.4 试验方法

根据 JTG E20—2011 规程要求进行流变试验、沥青混合料水敏感性试验、车辙试验以及低温弯曲试验, 探究温拌再生沥青与再生沥青混合料性能的变化趋势。其中, 采用 DHR-1 型动态剪切流变仪测试再生沥青高、低温流变特性, 并进行 25 °C 线性振幅扫描试验。通过不同冲刷温度 (40, 50, 60 °C) 或冲刷压力 (176, 276, 376 kPa) 的水敏感性试验, 测试试验前后试件 25 °C 劈裂抗拉强度, 评估温拌再生沥青混合料水稳定性。采用车辙试验以及沥青混合料弯曲试验评价温拌再生沥青混合料高温抗变形能力以及低温抗裂性能。

采用 Breaker Alpha 傅里叶变换红外光谱仪测试沥青中特征官能团变化, 分析温拌剂的作用机理。以 966, 1 030, 1 700  $\text{cm}^{-1}$  处烯烃基 (C=C)、亚砷基 (S=O)、羰基 (C=O) 伸缩振动峰的变化表征不同沥青之间特征官能团的差异, 并采用羰基指数 ( $I_{C=O}$ )、亚砷基指数 ( $I_{S=O}$ ) 以及烯烃指数 ( $I_{C=C}$ ) 定量表征差异, 计算如式 (1)~(3) 所示。

$$I_{C=O} = \frac{A_{1700}}{A_{2923} + A_{2852}}, \quad (1)$$

$$I_{S=O} = \frac{A_{1032}}{A_{2923} + A_{2852}}, \quad (2)$$

$$I_{C=C} = \frac{A_{966}}{A_{2923} + A_{2852}}, \quad (3)$$

式中,  $A_{1700}$  为波数在 1 722.4~1 672.2  $\text{cm}^{-1}$  处围成的羰基峰面积;  $A_{2923}$  与  $A_{2852}$  为波数在 3 002.8~2 775.7  $\text{cm}^{-1}$  处围成的甲基峰面积;  $A_{1032}$  为波数在 1 042.6~987.1  $\text{cm}^{-1}$  处围成的亚砷基面积;  $A_{966}$  为波数在 977.3~954.1  $\text{cm}^{-1}$  处围成的烯烃基面积<sup>[17-18]</sup>。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 Sasobit 对温拌再生沥青流变性能的影响

5 种沥青 OA, REOA, REOA + 1% WM, REOA + 3% WM, REOA + 5% WM 的复数剪切模量 ( $G^*$ ) 指标、高温车辙因子 ( $G^*/\sin \delta$ )、中温疲劳因子 ( $G^* \sin \delta$ ) 测试结果分别如图 3~5 所示。

#### 2.1.1 复数剪切模量

$G^*$  用于表征沥青在一定条件下抵抗变形的能力, 其值越大说明沥青抗变形能力越强, 反之越弱。由

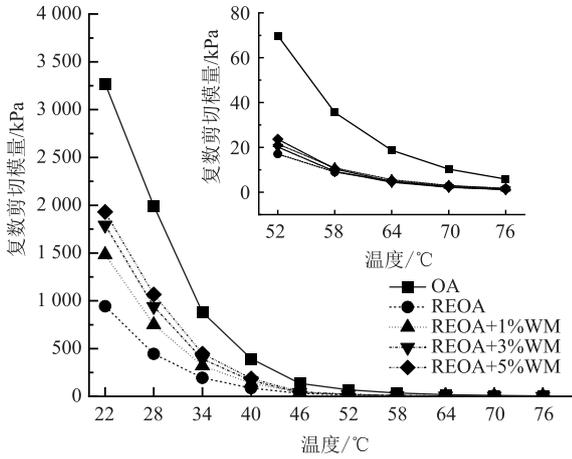


图 3 温拌再生沥青复数剪切模量测试结果

Fig. 3 Test result of complex shear modulus of warm mix recycled asphalt

图 3 可见,  $G^*$  均随测试温度的升高而逐渐降低, 降低的速率呈显著减小的趋势。相同测试温度情况下, 5 种沥青中 OA 沥青的  $G^*$  最大, REOA 沥青的  $G^*$  最小, 说明 OA 沥青的抗变形能力最强, 而再生剂的使用将会显著降低沥青的抗变形能力。随着温拌剂用量的增加, 温拌再生沥青  $G^*$  呈增加的趋势, 说明温拌剂的使用可以改善再生沥青的抗变形能力。然而, 不同温拌剂用量的温拌再生沥青  $G^*$  增长速率随温拌剂用量增加逐渐降低, 说明温拌剂对改善再生沥青的抗变形能力有限。此外, 当测试温度高于 52 °C 时, 3 种温拌剂掺量的温拌再生沥青  $G^*$  与 REOA 基本一致, 说明温拌剂并不能改善高温状况下再生沥青的抗变形能力, 仅在温度较低时有较显著的改善再生沥青抗变形的能力, 但是抗变形能力较 OA 沥青仍较低。因此, 温拌剂可以改善温拌再生沥青中温抗变形能力, 但对沥青高温抗变形能力基本没影响。

### 2. 1. 2 车辙因子

车辙因子用于评价最高路面设计温度下沥青材料抵抗永久变形能力的参数, 其值越大, 沥青抗永久变形能力越强。由图 4 可见, 5 种沥青的  $G^*/\sin \delta$  均随测试温度的增加而减小, 说明沥青的抗永久变形能力随着温度的增加而降低。相同测试温度情况下, OA 沥青的  $G^*/\sin \delta$  高于其他沥青, 说明老化可以改善沥青的高温抗车辙能力。相对于添加温拌剂, 再生剂的添加可以显著降低老化沥青的抗永久变形能力。当测试温度高于 64 °C 时, 随着温拌剂用量的增加, 温拌再生沥青的  $G^*/\sin \delta$  值较 REOA 沥青低, 温拌再生沥青的抗永久变形能力降低, 增加温拌剂用量对再生沥青抵抗永久变形能力不利。然而, 当

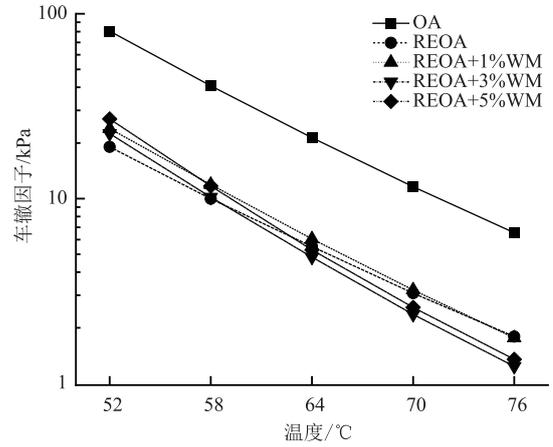


图 4 温拌再生沥青车辙因子计算结果

Fig. 4 Calculation result of rutting factor of warm mix recycled asphalt

测试温度低于 64 °C 时, 添加温拌剂可以在一定程度上增加  $G^*/\sin \delta$ , 但是效果并不明显。总体来说, 温拌剂对温拌再生沥青抗永久变形能力较再生剂效果不明显。此外, 对于每一种沥青, 其  $G^*/\sin \delta$  值对数均与试验温度呈良好的线性关系。

### 2. 1. 3 疲劳因子

疲劳破坏是引起沥青路面病害的主要因素之一, 而疲劳因子可用于评价沥青在反复荷载作用下抗疲劳开裂的能力, 其值越小, 沥青抗疲劳开裂的能力越强。由图 5 可见, 随着试验温度的增加, 5 种沥青的  $G^* \sin \delta$  逐渐减小。相同测试温度下, OA 沥青的  $G^* \sin \delta$  最大, REOA 最小, 说明老化可以降低沥青抗疲劳开裂的能力, 而再生剂可以显著改善老化沥青抗疲劳开裂性能。相同测试温度下, 随着温拌剂用量的增加, 温拌再生沥青  $G^* \sin \delta$  逐渐增加, 说明

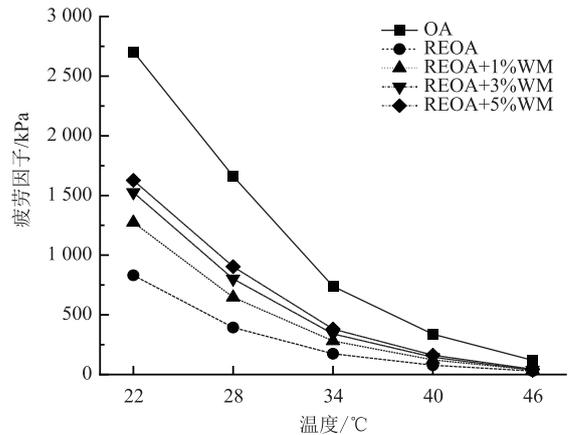


图 5 温拌再生沥青疲劳因子计算结果

Fig. 5 Calculation result of fatigue factor of warm mix recycled asphalt

温拌剂会降低再生沥青的抗疲劳开裂能力,原因在于温拌剂的主要成分是有蜡,其具有明显的脆性,对沥青的抗疲劳性能没有贡献且会产生负面影响<sup>[19]</sup>。总体来说,温拌剂使用对再生沥青抗疲劳开裂的能力不利,而再生剂可显著改善老化沥青抗疲劳开裂能力。

#### 2.1.4 LAS 疲劳特性

根据 LAS 试验得到 5 种沥青剪切应力与剪切应变变化曲线,如图 6 所示。一般,当材料应力达到峰值后,材料应变持续增加,而应力不断下降,材料发生屈服。材料的屈服应力越大时,表明该材料抗变形能力越强,而材料的屈服应变越大时,表明材料抗荷载变形程度越大,材料的弹性越好。采用剪切应力峰值作为材料的屈服应力,其对应的应变为材料的屈服应变,根据图 6 中试验结果,计算 5 种沥青的屈服应力与屈服应变,结果如图 7 所示。由图 7 可见,5 种沥青屈服应力的大小依次为:OA>REOA+5% WM>REOA+3% WM>REOA+1% WM>REOA;屈服应变的大小排序为:REOA+5% WM>REOA+3% WM>REOA+1% WM>REOA≈OA。对比可知,OA 沥青的屈服应力最大,屈服应变最小,说明 OA 沥青的抗变形能力最强,而抗荷载变形程度最小,材料的弹性最差。再生剂的使用可以显著降低老化沥青的屈服应力,导致老化沥青抗变形能力降低,但再生剂的使用对老化沥青抗荷载变形程度能力基本无影响。随着温拌剂用量的增加,再生沥青屈服应力与屈服应变在逐渐增加,再生沥青的抗变形能力增强,抗荷载变形程度越大,材料的弹性能力越好。因此,温拌剂的使用可以改善再生沥青的中温抗变形能力以及变形程度。

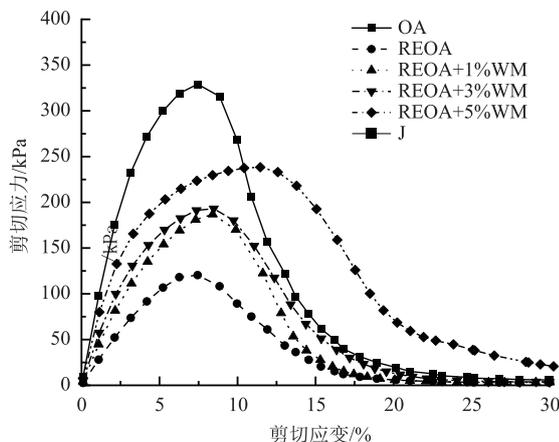


图 6 LAC 试验剪切应力与应变关系

Fig. 6 Relationship between shear stress and strain obtained by LAC test

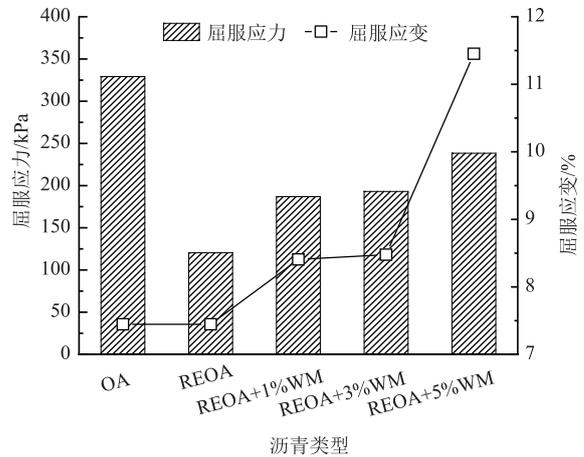


图 7 不同沥青屈服应力与屈服应变变化规律

Fig. 7 Yield stress varying with yield strain of different asphalts

#### 2.1.5 低温流变性能

测试 5 种沥青蠕变劲度与蠕变速率评价低温性能,结果如图 8 所示。由图 8 可见,测试温度越低,沥青的蠕变劲度模量以及蠕变速率越大。通常,不同测试温度情况下,沥青蠕变劲度模量设计要求 $\leq 300$  MPa,蠕变速率设计要求 $\geq 0.3$ <sup>[20]</sup>。比较 5 种沥青蠕变劲度模量与蠕变速率结果,OA 沥青 $-12$  °C 蠕变劲度模量与蠕变速率均不满足设计要求,老化沥青低温性能较差。随着再生剂添加进老化沥青后,REOA 沥青 $-12$  °C,  $-6$  °C 蠕变劲度模量与蠕变速率均满足设计要求,说明再生剂可以显著改善老化沥青低温性能。随着温拌剂添加进再生沥青中,温拌再生沥青 $-12$  °C,  $-6$  °C 蠕变劲度模量逐渐增大,蠕变速率则反之,温拌剂的添加将劣化再生沥青的低温性能。

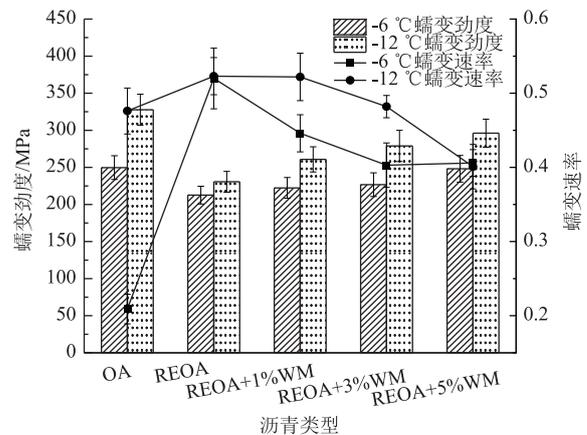


图 8 不同沥青低温性能测试结果

Fig. 8 Test result of low temperature performance of different asphalts

## 2.2 Sasobit 对温拌再生沥青混合料路用性能的影响

### 2.2.1 温拌再生沥青混合料成型温度确定

比较 40%RAP 掺量下温拌再生沥青混合料不同压实温度下空隙率变化, 结果如图 9 所示。可见, 压实温度与空隙率变化呈负相关, 且基本呈线性关系。以 4%目标空隙率确定温拌再生沥青混合料的压实温度, 得到温拌再生沥青混合料压实温度为 131.7 °C, 较普通热拌沥青混合料压实温度 (150~160 °C) 低 20~30 °C。在设计空隙率以及压实温度条件下, 两种再生沥青混合料马歇尔指标试验结果见表 5, 可知两种再生沥青混合料马歇尔指标基本一致, 说明 Sasobit 温拌剂的使用并不会显著影响再生沥青混合料的马歇尔指标。

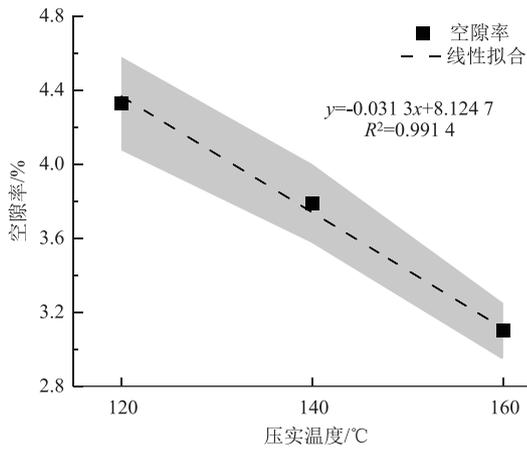


图 9 温拌再生沥青混合料压实温度与空隙率变化规律

Fig. 9 Compaction temperature varying with air voids of warm mixed recycled asphalt mixture

表 5 再生沥青混合料马歇尔指标试验结果

Tab. 5 Test result of Marshall indicator of recycled asphalt mixture

马歇尔指标	普通热拌再生	温拌再生
毛体积密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	2.439	2.437
空隙率/%	3.99	4.07
矿料间隙率/%	13.01	13.11
有效沥青饱和度/%	69.36	68.95
稳定度/kN	17.94	18.75
流值/mm	3.25	3.47

### 2.2.2 水稳定性

不同测试温度、不同冲刷压力情况下温拌再生沥青混合料与普通热拌再生沥青混合料水稳定性试验结果如图 10~11 所示。由图 10 可见, 两种再生沥青混合料劈裂抗拉强度比均随冲刷温度的增加而降低, 说明较高的试验温度可以加剧再生沥青混合料

的内部破坏, 降低再生沥青混合料的水稳定性。相同测试温度情况下, 温拌再生沥青混合料劈裂抗拉强度比较普通热拌再生沥青混合料低。由图 11 可见, 两种再生沥青混合料的劈裂抗拉强度比随动水冲刷压力的增加而降低, 说明较高的冲刷压力可以促使更多的水分进入再生沥青混合料中, 加剧再生沥青混合料的内部破坏。相同测试温度情况下, 温拌再生沥青混合料劈裂抗拉强度比较普通热拌再生沥青混合料低。总体来说, 高测试温度与高动水冲刷压力可以显著降低再生沥青混合料劈裂抗拉强度比, 劣化再生沥青混合料水稳定性。与普通热拌再生沥青混合料相比, 添加 Sasobit 温拌剂可以降低再生沥青混合料的水稳定性, 这主要是因为使用的 Sasobit 温拌剂主要成分是有蜡, 有机蜡融入沥青将会降低沥青与集料之间的黏附性, 促使集料与沥青之间更容易被温度、水压侵蚀<sup>[21]</sup>。

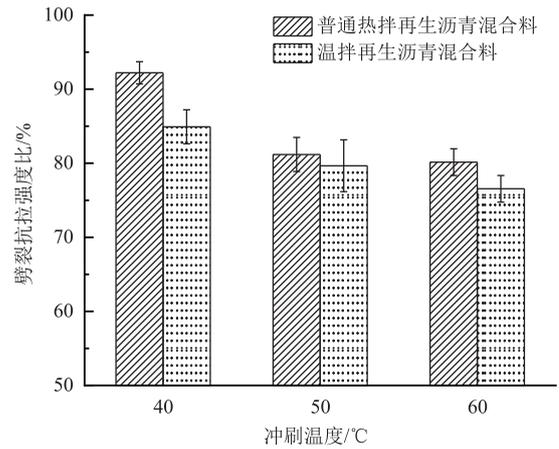


图 10 不同冲刷温度下再生沥青混合料水稳定性测试结果

Fig. 10 Test result of moisture stability of recycled asphalt mixture at different scouring temperatures

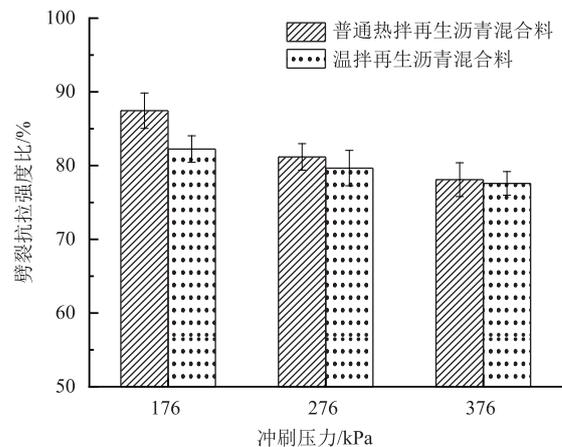


图 11 不同冲刷压力下再生沥青混合料水稳定性测试结果

Fig. 11 Test result of moisture stability of recycled asphalt mixture under different scouring pressures

### 2.2.3 高温稳定性与低温抗裂性

温拌再生沥青混合料与普通热拌再生沥青混合料车辙试验以及低温弯曲试验结果见表6。由表6可知,温拌再生沥青混合料动稳定度试验结果较普通热拌再生沥青混合料高,增幅达到14.5%,即温拌再生沥青混合料高温抗变形能力优于普通热拌再生沥青混合料,原因在于Sasobit温拌剂结构与SBS改性沥青结构相互交织,形成共同作用,导致高温环境下温拌再生沥青的抗变形能力得到显著提高,从而改善了温拌再生沥青混合料的高温抗变形能力<sup>[21]</sup>。温拌再生沥青混合料最大弯拉应变较普通热拌再生沥青混合料低,降幅达到7.2%,即温拌再生沥青混合料低温抗裂性能劣于普通热拌再生沥青混合料。研究表明<sup>[22]</sup>,在低温环境中,温拌再生沥青中SBS结构具有良好的弹性,Sasobit温拌剂中有机蜡成分结构呈现脆性,温拌再生沥青中SBS结构与Sasobit温拌剂结构交织,在外力作用下,交织中的Sasobit结构脆性限制了SBS结构弹性,导致温拌再生沥青低温性能下降,降低温拌再生沥青混合料的低温抗裂性。

表6 再生沥青混合料高温稳定性与低温抗裂性试验结果

Tab.6 Test result of high temperature stability and low temperature cracking resistance of recycled asphalt mixture

指标	普通热拌再生 沥青混合料	温拌再生 沥青混合料
60℃动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	5 526	6 325
-10℃最大弯拉应变/με	1 967	1 825

### 2.3 Sasobit 温拌再生机理

图12得到3种沥青OA, REOA, REOA+3%WM的红外光谱图,可见,3种沥青的图谱结构基本一致,说明再生剂与温拌剂的掺加并没有在沥青中产生新的组分,属于物理过程。沥青中的S=O, C=O在长期老化中产生,且特征峰的高度随着沥青老化程度的增加而增加。SBS改性沥青中SBS改性剂引起-C=C-吸收峰的振动,可用于表征SBS的特征峰。因此,由图12中3种沥青特征峰伸缩振动强度可见,再生剂添加到OA沥青中可以降低S=O, C=O处的伸缩振动,改善沥青老化程度,而温拌剂的添加并没有显著改善REOA+3%WM中S=O, C=O处伸缩振动。此外,3种沥青C=C伸缩振动没有显著差异。

为定量表征3种不同沥青特征官能团的变化,计算3种官能团指数 $I_{S=O}$ ,  $I_{C=O}$ ,  $I_{C=C}$ ,结果如图13所示。由图13可见,再生剂添加到OA沥青中后,

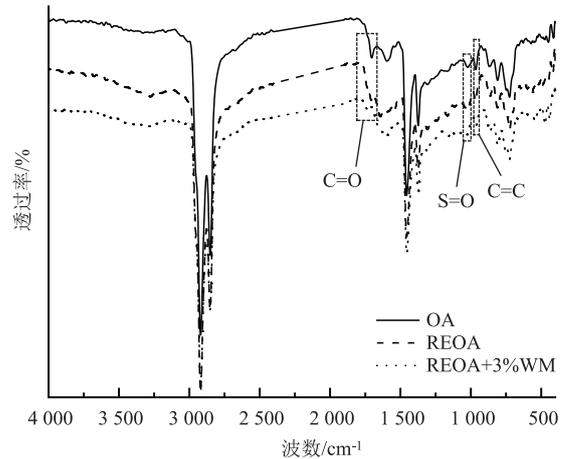


图12 温拌再生沥青红外光谱

Fig.12 Infrared spectra of warm mixed recycled asphalt

REOA中 $I_{S=O}$ ,  $I_{C=O}$ 指数较OA沥青分别降低0.16%, 4.21%,降低幅度达到7.84%, 63.12%。温拌剂添加到REOA沥青中后,REOA+3%WM中 $I_{S=O}$ ,  $I_{C=O}$ 指数较OA沥青分别降低0.21%, 3.84%,降低幅度达到10.29%, 57.57%。可见,温拌剂添加到温拌再生沥青中并不能显著影响 $I_{S=O}$ ,  $I_{C=O}$ 指数变化,温拌剂在沥青中不会影响沥青老化程度,而再生剂的添加可以显著改变 $I_{S=O}$ ,  $I_{C=O}$ 指数,改善沥青老化程度。此外,温拌剂与再生剂使用对3种沥青中 $I_{C=C}$ 指数波动影响较小,说明温拌剂与再生剂不会恢复降解的SBS改性剂。

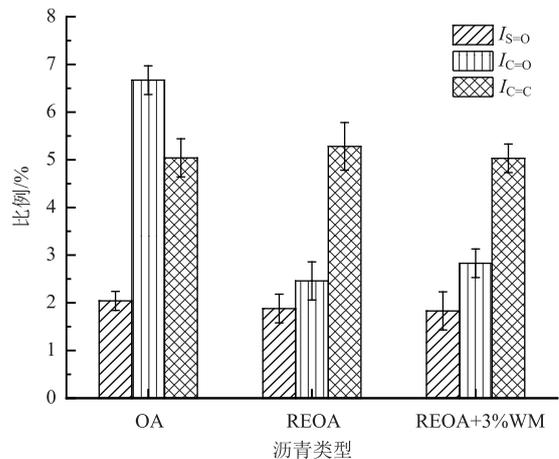


图13 温拌再生沥青官能团指数计算结果

Fig.13 Calculation result of functional group index of warm mixed recycled asphalt

综上所述,温拌再生沥青中,Evoflex8182再生剂可以改善SBS老化沥青的老化程度,恢复老化沥青性能,但是不会产生新的官能团,属于沥青组分调和过程。Sasobit温拌剂对沥青老化程度的变化无影响,且没有新的物质产生,表明其与再生沥青不

发生化学反应。温拌剂、再生剂均不会恢复已经老化降解的SBS改性剂。此外,根据Sasobit组成可知,Sasobit主要成分为有机蜡,熔点约为100℃,在沥青较高温度的作用下,Sasobit中有机蜡与再生沥青相融,从而降低再生沥青黏度,达到降低施工温度的效果,属于物理降黏作用。

### 3 结论

(1) 再生剂可以显著降低老化沥青复数剪切模量 $G^*$ ,车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 以及疲劳因子 $G^* \sin \delta$ ,而Sasobit温拌剂对再生沥青作用效果则反之。再生剂可以降低老化沥青的屈服应力,导致老化沥青抗变形能力降低,而再生剂对老化沥青抗荷载变形程度能力基本无影响。此外,再生剂可以降低老化沥青蠕变劲度,提高蠕变速率,而温拌剂对再生沥青作用效果反之。

(2) 4%目标空隙率下,掺加Sasobit温拌剂的再生沥青混合料压实温度较普通热拌再生沥青混合料低20~30℃。相同RAP掺量情况下,Sasobit温拌再生沥青混合料水稳定性与低温抗裂性较普通热拌沥青混合料低,而高温稳定性则反之。

(3) 老化沥青中羰基与亚砷基吸收峰的振动强度随再生剂的掺加而降低,说明再生剂会调和老化沥青组分,恢复老化沥青性能。Sasobit温拌剂掺加并不改变再生沥青羰基与亚砷基吸收峰的振动强度,说明温拌剂不会改变老化沥青组分,属于物理作用。再生剂与Sasobit温拌剂均不能改善老化沥青中C=C伸缩振动峰强度,说明再生剂与Sasobit温拌剂均不会恢复降解的SBS改性剂。

(4) 由于Sasobit温拌剂可以降低再生沥青混合料的碾压温度,因此,低温施工条件下,可通过使用Sasobit温拌剂降低再生沥青混合料压实温度,保障沥青路面施工质量。

#### 参考文献:

#### References:

[1] SHA A, LIU Z, JIANG W, et al. Advances and Development Trends in Eco-friendly Pavements [J]. Journal of Road Engineering, 2021, 1: 1-42.

[2] 张梦缘. 温拌再生SBS改性沥青及其混合料性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.

ZHANG Meng-yuan. Study on Performance of Warm Mix Recycled SBS Modified Asphalt and Asphalt Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.

[3] GAO J, YANG J, YU D, et al. Reducing the Variability of Multi-source Reclaimed Asphalt Pavement Materials: A Practice in China [J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122389.

[4] 姚玉权, 仰建岗, 高杰, 等. 就地热再生沥青混合料的材料组成波动及控制策略 [J]. 材料导报, 2022, 36 (16): 59-68.

YAO Yu-quan, YANG Jian-gang, GAO Jie, et al. Material Composition Volatility and Control Strategy for Hot In-place Recycling Asphalt Mixture [J]. Materials Reports, 2022, 36 (16): 59-68.

[5] MACIEJEWSKI K, RAMIĄCZEK P, REMISOVA E. Effects of Short-term Ageing Temperature on Conventional and High-temperature Properties of Paving-grade Bitumen with Anti-stripping and WMA Additives [J]. Materials, 2021, 14 (21): 6229.

[6] 仰建岗, 姚玉权, 孙晨. 不同工况对就地热再生沥青混合料性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (10): 14-24.

YANG Jian-gang, YAO Yu-quan, SUN Chen. Influence of Different Working Conditions on Hot In-place Recycled Asphalt Mixture Performance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36 (10): 14-24.

[7] SONG W, XU Z, XU F, et al. Fracture Investigation of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Using an Equivalent Energy Approach [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 253: 107892.

[8] 张争奇, 张天天, 王相友, 等. 不同类型温拌剂对沥青混合料路用性能影响及其效能评价 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (6): 711-718.

ZHANG Zheng-qi, ZHANG Tian-tian, WANG Xiang-you, et al. Effects of Different Types of Warm-mixed Agents on Pavement Performance of Asphalt Mixtures and Its Efficiency Evaluation [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43 (6): 711-718.

[9] 陈静云, 李榭, 王维营. 不同老化沥青掺量下的温拌再生沥青性能研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2017, 33 (5): 863-869.

CHEN Jing-yun, LI Jian, WANG Wei-ying. Performance of Warm Recycled Asphalt Binders with Different Aged Asphalt Percentage [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33 (5): 863-869.

[10] ZHANG S, WANG D, GUO F, et al. Properties Investigation of the SBS Modified Asphalt with a Compound Warm Mix Asphalt (WMA) Fashion Using the Chemical Additive and Foaming Procedure [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128789.

- [11] YOUSEFI A A, SOBHI S, ALIHA M R M, et al. Cracking Properties of Warm Mix Asphalts Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Recycling Agents under Different Loading Modes [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 300: 124130.
- [12] MACIEJEWSKI K, RAMIĄCZEK P, REMISOVA E. Effects of Short-term Ageing Temperature on Conventional and High-temperature Properties of Paving-grade Bitumen with Anti-stripping and WMA Additives [J]. *Materials*, 2021, 14 (21): 6229.
- [13] 何兆益, 蒋斌, 谭洋伟, 等. 不同增塑剂对 Sasobit 温拌沥青性能的影响 [J]. *应用化工*, 2022, 51 (1): 39-42.  
HE Zhao-yi, JIANG Bin, TAN Yang-wei, et al. Effect of Different Plasticizers on the Performance of Sasobit Warm Mix Asphalt [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51 (1): 39-42.
- [14] XU H, CHEN J, SUN Y, et al. Rheological and Physico-chemical Properties of Warm-mix Recycled Asphalt Mastic Containing High Percentage of RAP Binder [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289: 125134.
- [15] ROJA K L, ALJARRAH M F, SIRIN O, et al. Rheological, Thermal, and Chemical Evaluation of Asphalt Binders Modified Using Crumb Rubber and Warm-mix Additive [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34 (5): 04022049.
- [16] 时敬涛, 范维玉, 赵品晖, 等. Sasobit 温拌剂对高黏沥青流变性能的影响 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2020, 44 (6): 141-148.  
SHI Jing-tao, FAN Wei-yu, ZHAO Pin-hui, et al. Effect of Sasobit on Rheological Properties of High Viscosity Asphalt [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2020, 44 (6): 141-148.
- [17] 朱得斌, 蒋丽君, 张璐军. 基于粘温特性的 Sasobit 温拌再生沥青混合料施工温度研究 [J]. *中外公路*, 2016, 36 (3): 311-313.  
ZHU De-bin, JIANG Li-jun, ZHANG Lu-jun. Study on Construction Temperature of Sasobit Warm Mixed Recycled Asphalt Mixture Based on Viscosity Temperature Characteristics [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2016, 36 (3): 311-313.
- [18] HETTIARACHCHI C, HOU X, XIANG Q, et al. A Blending Efficiency Model for Virgin and Aged Binders in Recycled Asphalt Mixtures Based on Blending Temperature and Duration [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 161: 104957.
- [19] 苏卫国, 梁晨磊. 温拌技术对成品高黏沥青性能的影响 [J]. *河南科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 42 (4): 69-76, 9.  
SU Wei-guo, LIANG Chen-lei. Effect of Warm Mixing Technology on Performance of High-viscosity Asphalt [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 42 (4): 69-76, 9.
- [20] GAO J, YAO Y, HUANG J, et al. Effect of Hot Mixing Duration on Blending, Performance and Environmental Impact of Central Plant Recycled Asphalt Mixture [J]. *Buildings*, 2022, 12 (7): 1057.
- [21] 刘金亮, 王正同, 侯英杰, 等. 不同温拌剂的改性沥青流变特性微观分析 [J]. *公路交通科技*, 2022, 39 (9): 23-32.  
LIU Jin-liang, WANG Zheng-tong, HOU Ying-jie, et al. Microscopic Analysis on Rheological Properties of Modified Asphalt with Different Warm Mix Agents [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39 (9): 23-32.
- [22] 董文豪. 温拌改性沥青性能及碳排放评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.  
DONG Wen-hao. Research on Performance and Carbon Emission Evaluation of Warm Mix Modified Asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.