

废旧聚乙烯蜡温拌再生沥青混合料 性能优化与评价

马 峰¹, 黄锐哲¹, 傅 珍², 史 柯¹, 金彦鑫¹

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710064)

摘 要: 研究将 2% 聚乙烯蜡 (PEW) 温拌剂掺入温拌再生沥青混合料 (RWMA), 对比热拌再生沥青混合料 (RHMA)、热拌沥青混合料 (HMA) 的可压实性、黏弹性及路用性能, 旨在探索 PEW 温拌剂对混合料性能优化效果。结果表明, PEW 的添加显著降低了 RWMA 的拌合及成型温度, 在 140~150 °C 区间表现出良好的降温效果及压实度, 提升了施工性能; RWMA 在动态模量和相位角的测试中显示出优越的高温抗变形能力, 并且在高温低频及低温高频下, 黏弹性能逐渐提升; RWMA 在高温下动稳定度优于 RHMA 和 HMA, 高温性能较优。同时, 再生后的沥青混合料低温抗裂能力有所下降, 水稳定性较差。

关键词: 道路工程; 温拌再生; 聚乙烯蜡沥青混合料; 性能评价

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)06-1520-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241176

Performance optimization and evaluation of polyethylene wax rejuvenated warm mix asphalt mixture

MA Feng¹, HUANG Rui-zhe¹, FU Zhen², SHI Ke¹, JIN Yan-xin¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The study incorporated 2% polyethylene wax (PEW) warm-mix agent into warm-mix rejuvenated asphalt mixtures (RWMA) and compared their compactability, viscoelasticity, and performance with hot-mix rejuvenated asphalt mixtures (RHMA) and hot-mix asphalt (HMA). The aim was to explore the optimization effect of PEW on the performance of the mixtures. The results indicated that the addition of PEW significantly reduced the mixing and forming temperatures of RWMA, demonstrating good cooling effects and compaction within the 140–150 °C range, thereby enhancing construction performance. RWMA exhibited superior high-temperature deformation resistance in dynamic modulus and phase angle tests, with viscoelastic properties gradually improving under high-temperature low-frequency and low-temperature high-frequency conditions. The dynamic stability of RWMA at high temperatures was better than that of RHMA and HMA, indicating superior high-temperature performance. However, the low-temperature cracking resistance of the rejuvenated asphalt mixture decreased, and its

收稿日期: 2024-11-01.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604601).

作者简介: 马峰 (1978-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 道路材料与结构. E-mail: mafeng@chd.edu.cn

water stability was poor.

Key words: road engineering; warm mix rejuvenation; polyethylene wax asphalt mixtures; performance evaluation

0 引言

目前有超过35%的高等沥青路面超过了设计使用年限,存在破损严重的问题,路面养护需求也呈上升趋势^[1-3]。在当前能源短缺及环境问题日益严重背景下,温拌再生作为一种绿色交通施工技术^[4,5],具有降低施工温度、减少施工过程中有害气体排放等优点,发展前景广阔。

温拌再生技术最早可追溯到Kolo-veidekke与Shell公司在1995年提出并展开路面铺筑工作,随后便逐渐开始得到了大面积的普及及发展^[6-8]。进入21世纪后,国内外众多学者开展了相关研究。仰建岗等^[9-11]研究了Sasobit温拌剂对再生沥青及其混合料性能的影响,发现其可改善高温性能和降低压实温度,但对低温抗裂性和抗疲劳性有不利影响。左锋等^[12,13]选用Sasobit作为温拌剂评估了不同回收料掺量对再生沥青混合料(Reclaimed asphalt pavement, RAP)的路用性能影响,发现RAP最佳掺量为30%,在此掺量下显著提高了再生沥青混合料的抗车辙性能、抗疲劳性能和水稳定性。Xu等^[14-16]探讨了高比例RAP结合温拌技术对再生沥青结合料流变性能的影响,Sasobit在提高黏度和抗车辙性能方面表现更好,而Evotherm在提高疲劳性能方面更优。Zawawi等^[17-19]探讨了Evotherm 3G温拌剂在降低沥青生产温度、减少能耗及对混合料性能影响的作用,发现其在较低的压实温度下具有与传统热拌沥青混合料相似的稳定性和流动性。Yousefi等^[20,21]通过平衡混合设计方法(BMD)评估温拌再生沥青混合料中添加RAP、再生剂和抗剥落剂对性能的影响,得出温拌添加剂显著提升了性能,RAP提高了抗车辙和抗水损害能力但降低抗裂性,不同再生剂效果各异,抗剥落剂能够显著改善综合性能。通过上述研究可以发现温拌再生沥青混合料多存在低温抗裂性及抗疲劳性不足、RAP掺量不易控制、选用温拌剂成本较高等问题。本研究旨在寻找一种经济环保的温拌剂,推动温拌技术发展。

废旧塑料裂解蜡作为垃圾焚烧的副产物,如

若不妥善处理会对环境造成严重危害^[22-24]。本文将新聚乙烯蜡与回收聚乙烯蜡按1:1配比制备温拌剂,以2%比例掺入RWMA,并与RHMA和HMA的性能进行对比研究。研究重点在于验证聚乙烯蜡作为新型温拌剂在RWMA中的实际应用效果,以明确其在温拌再生技术中的可行性。本研究为聚乙烯蜡作为环保型温拌剂的实际应用提供了重要的理论依据,具有显著的经济效益。

1 原材料

1.1 沥青

选取SBS改性沥青作为研究对象,主要技术指标见表1。

表1 SBS改性沥青主要技术指标

Table 1 SBS modified asphalt main technical indicators

技术指标	试验值	规范值
软化点/℃	69.0	≥60
25℃针入度(0.1 mm)	53.0	40~60
针入度指数PI	0.1	≥0
5℃延度/cm	29.0	≥20

1.2 温拌剂与再生剂

采用新聚乙烯蜡(NPEW)和回收聚乙烯蜡(RPEW)按照1:1混掺制备聚乙烯蜡基温拌剂(PEW),RPEW与NPEW主要技术指标见表2。

表2 RPEW及NPEW主要技术指标

Table 2 RPEW and NPEW main technical specifications

型号	软化点/℃	黏度(CP-DS@140℃)	密度/(g·cm ⁻³)	分子量	外观
RPEW	115.0	20~30	0.93	3 000~5 000	片状
NPEW	—	25~35	0.92	1 500~2 500	粉末

再生剂Lignin-Based Softener由常州路必思新材料科技公司生产,主要技术指标见表3。

1.3 再生沥青混合料

试验采用福银高速沥青路面铣刨回收料,共有0~6、6~12、12~16 mm三种规格,粗细集料均为石灰岩。各档技术指标见表4。

表 3 LBS 主要技术指标

Table 3 LBS main technical indicators

测试项目	性能指标
60℃时的黏度/cSt	50~175
饱和度/%	32
芳烃含量/%	61
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	0.96~1.12

表 4 RAP 技术指标

Table 4 RAP technical indicators

RAP 类型	沥青含量/%	表观相对密度/(g·cm ⁻³)	毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)
0~6	7.22	2.66	2.610
6~12	3.11	2.70	2.665
12~16	2.21	2.72	2.675

2 混合料设计及测试方法

2.1 沥青混合料旋转压实试验

采用旋转压实成型 Ø150 mm 的沥青混合料试件,拌和温度分别为 140℃、150℃、160℃、170℃、180℃,以 4% 空隙率为混合料的拌和压实的控制指标,进行旋转压实。压实过程中有效内旋转角、旋转速率、垂直压力分别为 1.16°±0.02°、(30±0.5) r/min、(600±18) kPa。

2.2 单轴压缩动态模量试验

按照 AASHTO TP 62-03 的要求,通过取芯机取芯,得到高度及直径分别为 150、100 mm 的 HMA、RWMA、RHMA 试件。试验温度采用 5℃、25℃、45℃,为模拟实际路面受力情况,加载频率为 0.1、0.5、15、10、25 Hz,由高频至低频进行重复加载,相邻两个加载频率之间的时间间隔为 2 min。

2.3 沥青混合料路用性能试验

采用车辙试验对 HMA、RWMA、RHMA 的高温性能进行评价。试验轮压、碾压速率、试验温度分别为 0.7 MPa、2 次/min、60℃。

采用低温小梁弯曲试验对 HMA、RWMA、RHMA 的低温性能进行评估。试验温度及加载速率分别为 -10℃及 50 mm/min。

采用裂缝扩展性能试验评估 HMA、RWMA 和 RHMA 的抗裂性能。使用旋转压实制备直径 100 mm、厚度 50 mm 的半圆弯曲试件。在初始应力 0.1±0.01 kN 下,以 0.05 kN/s 速率加载,随后进行 50 mm/min 的线性加载。

采用冻融劈裂及浸水马歇尔试验对 HMA、RWMA、RHMA 的水稳性能进行评价。

2.4 沥青混合料配合比设计

2.4.1 Superpave-19 热拌沥青混合料设计

设置老化沥青掺量 30%,回收料掺量 30%^[25,26]。基于 Superpave-19 进行级配设计,得出在 4.46% 沥青掺量下,混合料空隙率为 13.7%,饱和度为 69.7%,粉胶比为 1.34%,满足旋转压实相关规范要求。

2.4.2 Superpave-19 再生沥青混合料设计

以干拌方式掺加 6% 再生剂,RWMA 掺加 2% 温拌剂^[27]。基于旧沥青混合料抽提后的级配以及上节热拌沥青混合料设计对再生沥青混合料进行级配及配合比优化,得出在沥青掺量为 4.51% 时,混合料空隙率为 13.7%,饱和度为 70.7%,粉胶比为 1.35%,满足旋转压实规范要求。

3 结果与讨论

3.1 可压实性能分析

3.1.1 温拌再生沥青混合料拌合温度

采用等密实度原理法以密实度为压实标准,采用密实度-压实温度类比原理研究温拌沥青混合料降温效果^[28]。

混合料制备过程中在 140℃、150℃、160℃、170℃、180℃ 下分别成型温拌再生沥青混合料试件,以确定沥青混合料施工温度。不同温度下,空隙率测试结果见图 1。

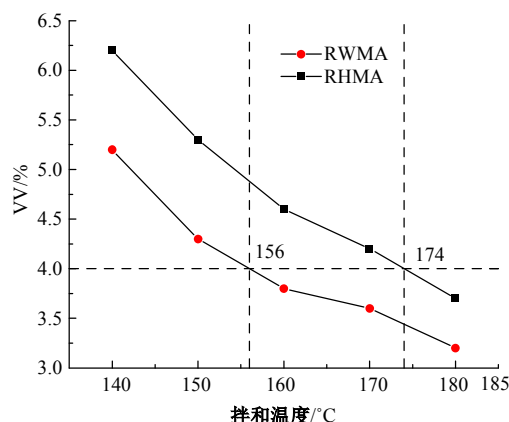


图 1 不同温度下试件空隙率

Fig. 1 Specimen void ratio at different temperatures

由图 1 可知,随着温度的升高,RWMA 和 RHMA 的空隙率逐渐降低。尤其在较低温度时,空隙率的下降速度较快,随着温度的上升,衰减速率逐渐减缓。在 140~150℃ 的温度区间,RWMA 的空隙率在 5.2%~4.3% 间变化;在 150~160℃ 时,空隙率则在 4.3%~3.8% 间波动,满足 4% 的

设计要求,达到了良好的降温效果。

选取 4% 的空隙率作为混合料的工程设计指标,以量化研究不同拌合条件下的施工温度。通过旋转压实试验,在不同温度下观察混合料空隙率变化,当空隙率达到 4% 时对应的温度即为成型温度。RWMA 和 RHMA 的拌合及成型温度详见表 5。

表 5 RWMA 及 RHMA 拌合及成型温度
Table 5 RWMA and RHMA mixing and molding temperatures

沥 青	拌和温度/℃	成型温度/℃	降低温度/℃
RWMA-R30	156	146	18
RHMA-R30	174	164	18

由表 5 可得,聚乙烯蜡的添加显著降低了沥青混合料的拌合及成型温度,降低幅度约为 18℃。因此,当聚乙烯蜡用于温拌再生沥青混合料时,其拌合温度为 156℃,压实温度为 146℃。这一温度设置相较于热拌沥青混合料,能够获得更优的温拌效果。

3.1.2 旋转压实特性

通过旋转压实过程中压实度与旋转压实次数对沥青混合料的压实特性进行表征^[29]。为定量表征沥青混合料压实特性,采用压实度、能量密度指数(CEI)、交通密度指数(TDI)、压实速率(K_1)、密实度斜率(K_2)进行评价。温拌再生沥青混合料不同拌合温度试件的高度-压实曲线如图 2 所示。

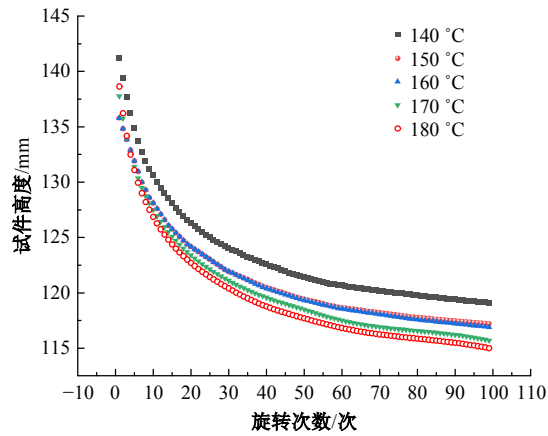


图 2 试件高度-压实曲线
Fig. 2 Specimen height-compaction curve

由图 2 可知,不同温度下沥青混合料试件的高度下降趋势基本一致。在压实初期,试件高度迅速降低,且随着压实次数的增加,下降速率逐渐放缓。不同压实温度下,试件高度曲线存在一定差异。具体而言,随着压实温度升高,试件在压实

初期的高度降低速度更快,且最终压实高度显著低于低温条件下的试件,表明其压实度较高。不同温度下温拌再生沥青混合料试件的能量密度指数(CEI)、交通密度指数(TDI)、压实速率(K_1)、密实度斜率(K_2)见图 3。

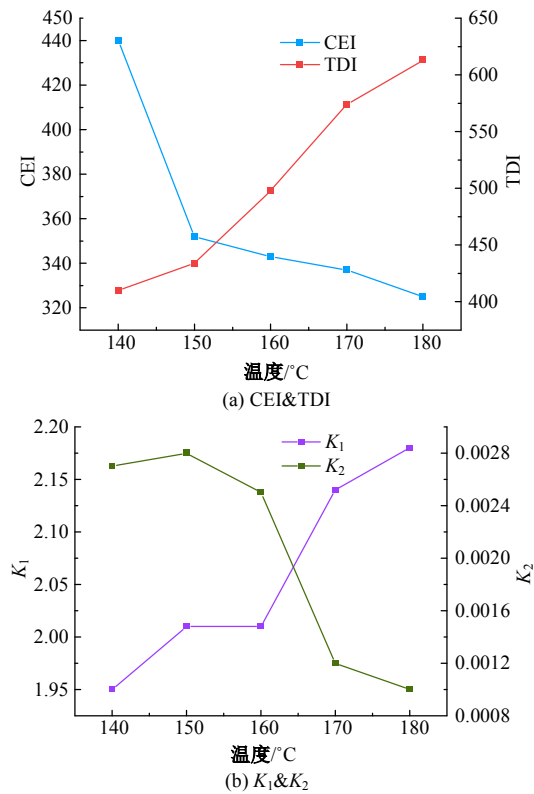


图 3 旋转压实指标
Fig. 3 Rotational compaction index

由图 3(a)可知,随着拌合温度的增加,CEI 逐渐降低,TDI 则逐渐上升。这表明温拌再生沥青混合料在高温条件下更易被压实,且在开放交通后,其抗变形能力逐步增强。当温度从 140℃ 升高至 150℃ 时,CEI 降低幅度可达 20%,进一步提升温度时,CEI 的下降速率减缓。在 140℃ 至 180℃ 的温度范围内,TDI 呈缓慢上升的趋势。综合分析表明,RWMA 的压实特性在 150℃ 时发生显著变化,其抗变形能力与拌合温度之间存在正相关关系。

由图 3(b)可知,随着温度的增加,CEI 逐渐降低,压实速率 K_1 逐渐上升,表明沥青混合料的压实特性与拌合温度密切相关。在较高温度下,混合料试件的密度上升速率较快,具备更优的压实性。此外, K_2 在温度增加过程中呈现先增后减的趋势,当温度超过 150℃ 时, K_2 与温度之间呈负相关,表明随着温度的升高,温拌再生沥青混合料的

抗变形能力显著增强。

3.2 黏弹性能分析

3.2.1 动态模量

沥青混合料动态模量与相位角通过测定规定温度的正弦压应力作用下试件的轴向压应变进行表征^[30],以反映其黏弹特性。沥青混合料在 5℃、25℃、45℃下的动态模量及相位角见图 4。

由图 4 可知,沥青混合料的动态模量在不同温度下呈现相似的趋势,即动态模量随频率增加

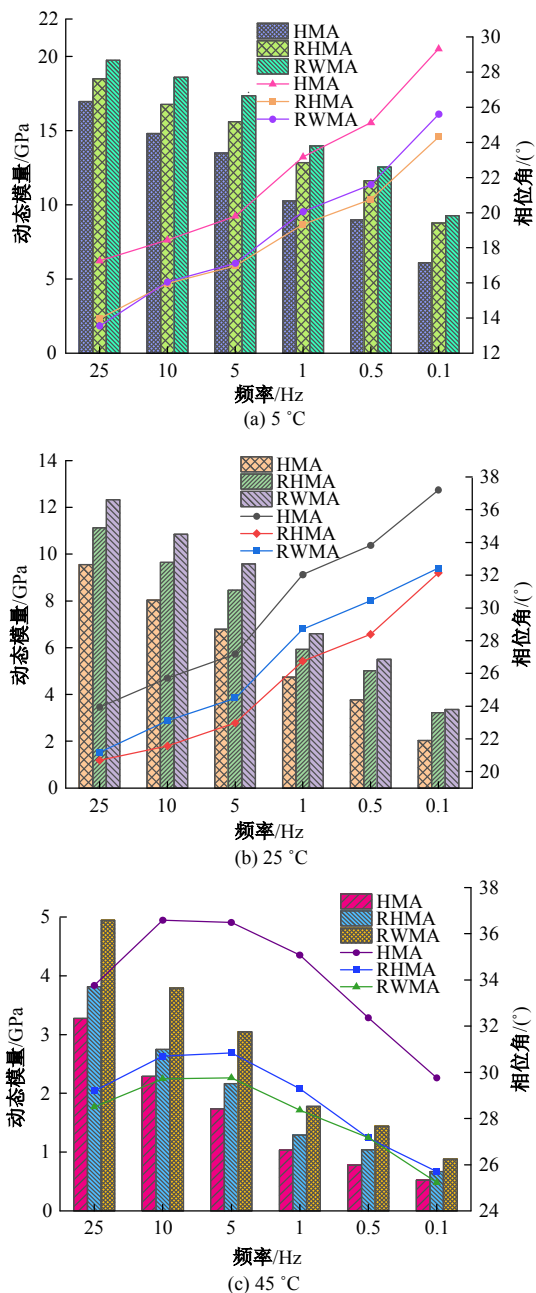


图 4 动态模量/相位角-频率曲线图

Fig. 4 Dynamic modulus/phase angle-frequency curve

而提升,随温度降低而增强。尽管不同的制备方法未改变混合料对温度和频率的依赖性,但在不同温度和频率条件下,动态模量的表现有所差异,依次为 $RWMA > RHMA > HMA$,表明 RWMA 的高温性能优于 RHMA 和 HMA。此外,相位角随频率变化的趋势随温度而变化:在 5℃和 25℃时,相位角随着频率的增加而减小,反映了低温下集料和沥青胶结料的弹性主导;而在 45℃时,相位角呈现先增加后减小的趋势,表明高温下黏性成分占据主导地位。总体上,相位角随着温度的升高而增大,但在高温(25~45℃)和低频(0.1~1 Hz)条件下,随着温度升高,相位角逐渐减小。

实验通过不同温度下沥青混合料的车辙因子

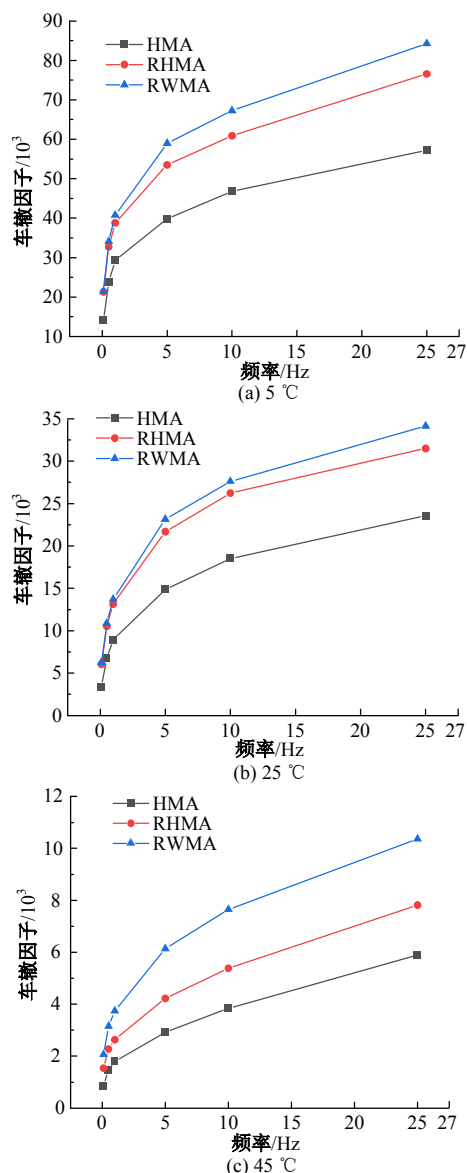


图 5 车辙因子-频率曲线图

Fig. 5 Rutting factor-frequency

来进一步表征其抗变形能力,具体结果见图5。

由图5可得,车辙因子随着频率的增加和温度的降低呈现逐步上升的趋势,这表明在低温高频条件下,沥青混合料表现出更高的刚度和更强的高温抗变形能力。在相同温度和荷载频率条件下,车辙因子从高到低依次为RWMA、RHMA和HMA。这说明相比于RHMA和HMA,RWMA具有更优越的高温稳定性。

3.2.2 主曲线分析

沥青混合料力学特性满足时温等效原理^[31],其在不同温度及频率下的力学行为可通过将动态模量转换至基准温度以表征黏弹性行为,从而拟合出一条光滑的动态模量主曲线。不同沥青混合料试件的动态模量主曲线见图6所示。

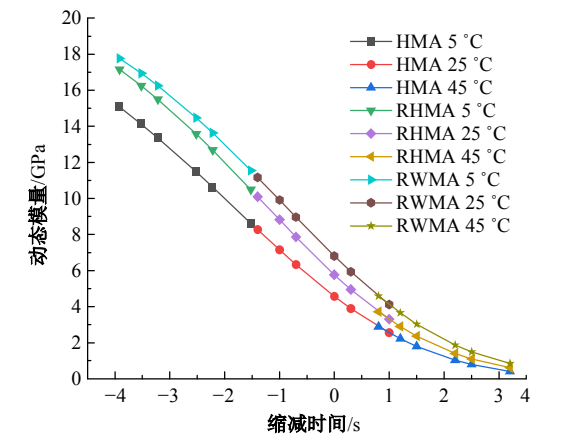


图6 HMA、RHMA、RWMA 动态模量主曲线图
Fig. 6 HMA、RHMA、RWMA dynamic modulus master plot

图6可得,各温度和频率下的动态模量均可拟合为一条平滑均匀的主曲线。通过该主曲线,可以在更宽的频率范围及更高的模量区间内预测混合料试件的动态模量表现。此外,不同混合料的主曲线呈现出近似“S”形态,且动态模量与缩减时间呈负相关关系。在缩减时间(−1.5~1 s)范围内,动态模量变化尤为显著。

进一步研究不同沥青混合料试件的力学强度影响,比较3组混合料试件的动态模量,并采用

CAM模型对其黏弹性性能进行了分析。改进后的CAM拟合动态模量主曲线见图7,拟合结果见表6。

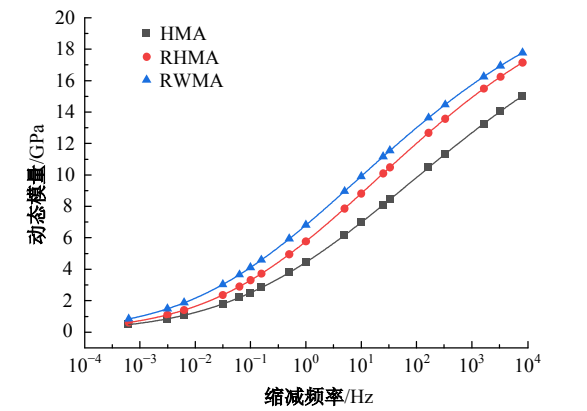


图7 沥青混合料动态模量主曲线
Fig. 7 Master curve of dynamic modulus of asphalt mixtures

由图7及表6可得,3种沥青混合料试件的动态模量主曲线均呈现随缩减频率增加而提升的趋势,但各主曲线参数表现出一定差异。 G_g^* 反映混合料的低温抗裂性能,数值越大,抗裂性能越差。RWMA和RHMA的 G_g^* 数值相近,均低于HMA,表明再生后材料性能有所衰减,且RHMA略优于RWMA。 G_e^* 反映混合料的高温抗变形性能,数值越大,性能越强,结果显示RWMA>RHMA>HMA,说明温拌再生后提升了沥青混合料的高温抗变形能力。 f_c 代表沥青混合料中弹性与黏性成分相等时的频率,值越大,低温抗裂性能越好。其中,HMA>RHMA>RWMA,表明HMA的低温性能最佳。 R 值反映沥青混合料在不同温度及频率下的抗变形能力,截距越大,抗变形能力越强。RHMA的 R 值低于HMA及RWMA,表明热拌再生后材料抗变形能力减弱。

通过改进的CAM模型各温度及频率下的相位角进行拟合,得到的相位角主曲线如图8所示。拟合结果展示了不同温度和频率条件下沥青混合料的黏弹性变化规律。

由图8可得,RHMA相位角主曲线与HMA

表6 动态模量主曲线拟合结果 Table 6 Dynamic modulus master curve fitting results						
沥青类型	平衡态复数模量 G_g^*	玻璃态复数模量 G_e^*	弹性极限 阈值 f_c	形状参数 k	形状参数 m_e	G_e^* 与 G_g^* 在对数 坐标上截距 R
HMA	23 313.49	62.106 27	0.029 48	0.166 57	0.628 69	1.121 755
RHMA	23 405.07	90.856 17	0.021 10	0.185 16	0.655 99	1.048 897
RWMA	23 450.50	95.157 82	0.005 27	0.180 70	0.687 75	1.123 425

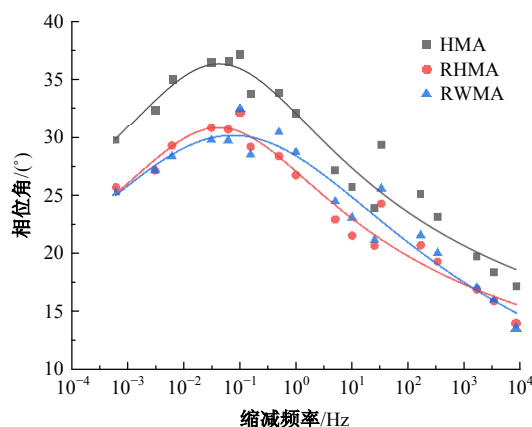


图 8 沥青混合料相位角主曲线图

Fig. 8 Asphalt mixture phase angle master plot

的趋势未发生明显变化,温拌再生后,沥青混合料相位角出现向后移动的趋势;HMA在高频时相位角较大,表现出更多黏性特征,低温性能优异。RHMA在低频范围黏性成分更多,RWMA则在高频范围黏性成分更多。

3.3 路用性能分析

3.3.1 高温性能

研究对成型的HMA、RWMA、RHMA车辙板进行车辙试验,试验结果见图9。

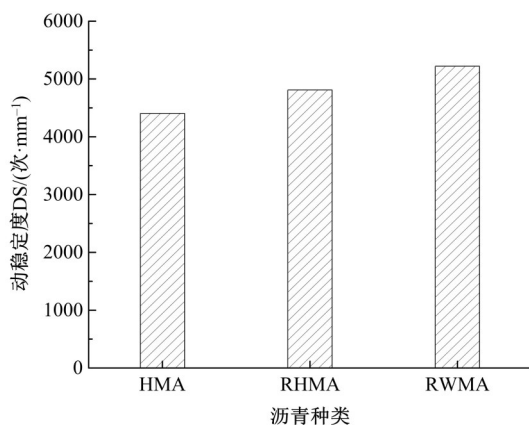


图 9 车辙试验结果

Fig. 9 Rutting test results

由图9可得,动稳定度由高到低为:RWMA、RHMA、HMA,表明再生后沥青混合料高温性能有所提升。与HMA相比,RWMA和RHMA的动稳定度分别提升18.5%及9.2%,表明在RAP掺量相同时,RWMA具有更好的高温性能,与前述动态模量数据结果一致。

3.3.2 低温性能

最大弯拉应变值可用于表征沥青混合料在集中荷载作用下的低温柔韧性和松弛特性,数值越

大,低温性能越佳。试验通过低温弯曲试验模拟沥青路面在低温荷载条件下受力状况,评价HMA、RWMA、RHMA的低温抗裂性能,试验结果见图10。

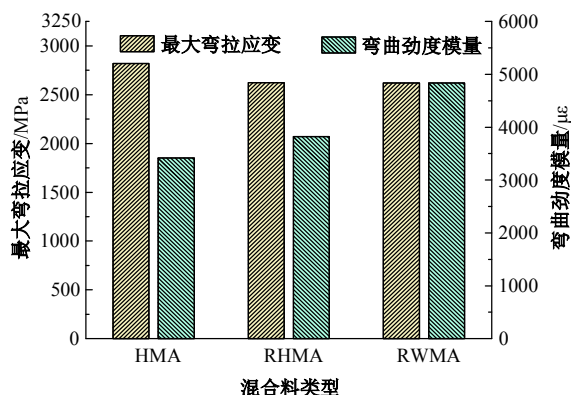


图 10 小梁弯曲试验结果

Fig. 10 Trabecular bending test results

由图10可得,最大弯拉应变值从大到小依次为:HMA、RHMA、RWMA,且RWMA与RHMA数值接近,表明再生后沥青混合料的低温性能有所下降,但热拌和温拌再生混合料之间的低温性能差异不明显。劲度模量由大到小依次为:RWMA、RHMA、HMA,表明再生后的混合料劲度模量有所提高,且温拌再生相比热拌再生具有更优的低温劲度。

3.3.3 抗裂性能

沥青混合料裂缝扩展性能是指混合料在开裂后在外界荷载作用下继续扩展的能力。在完成沥青混合料低温抗裂性能研究后,本文通过断裂功 W_f 、断裂能 G_f 、峰后斜率 m 、柔性指数 FI 对沥青混合料抗开裂能力进行进一步表征。 W_f 、 G_f 表征沥青混合料断裂过程中从裂缝扩展至完全展开所做的功及能量; m 、 FI 表征沥青混合料在裂缝扩展过程中的发展速率及损失性能。在25℃时不同试件的半圆弯拉试验结果见图11。

由图11(a)可得,沥青混合料再生后断裂功及断裂能均出现衰减,断裂功及断裂能由大到小分别为:HMA、RHMA、RWMA,表明混合料再生后,裂缝扩展至所需的能量和做功均减少,抗裂性能削弱。此外,在相同RAP掺量下,热拌再生表现出更好的抗裂性能。

由图11(b)可得,沥青混合料再生后斜率逐渐增加,柔性指数逐渐衰减,表明相较于原样HMA混合料,再生后裂缝扩展速率逐渐加快。同时,温拌再生发展速率较热拌再生更快。

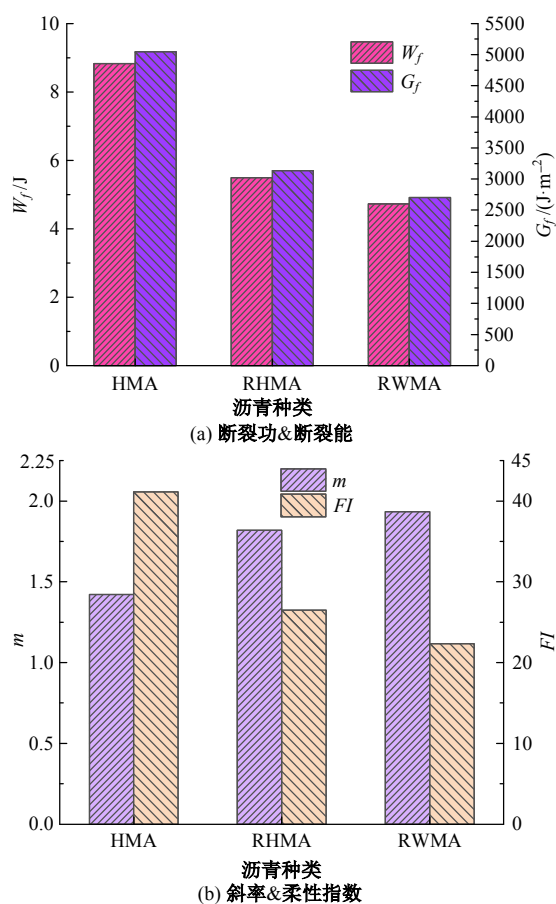


图11 半圆弯拉试验结果

Fig. 11 Results of semicircular bending and tensile tests

3.3.4 水稳性能

通过浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验对温拌再生沥青混合料水稳定性进行评价,水稳定试验结果见图12所示。

由图12可得,沥青混合料再生后,浸水残留稳定度和冻融劈裂强度均有所下降。在相同

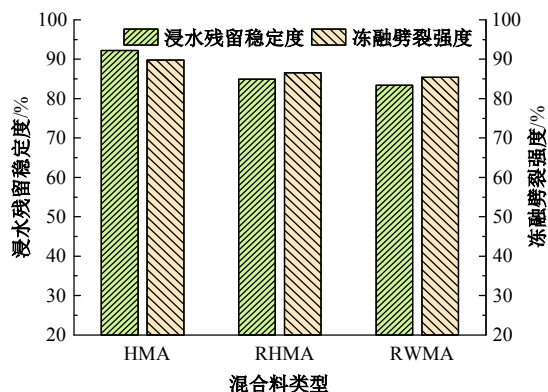


图12 浸水马歇尔及冻融劈裂试验结果

Fig. 12 Immersion marshall and freeze-thaw split test results

RAP 掺量下,RHMA 的残留动稳定度和冻融劈裂强度优于RWMA,表明 RHMA 相 cc 比 RWMA 具有更好的水稳性。在浸水马歇尔试验中,RHMA 和 RWMA 的残留动稳定度分别较 HMA 降低了 7.9% 和 9.5%;在冻融劈裂试验中,RHMA 和 RWMA 的冻融劈裂强度分别较 HMA 下降了 3.6% 和 4.9%。两项试验结果表明,再生沥青混合料的水稳定性在浸水条件下比在冻融条件下更为敏感。

4 结 论

(1)废旧聚乙烯蜡的添加显著降低了温拌再生沥青混合料的拌合及成型温度。在 140~150 °C 区间内,RWMA 的空隙率变化满足 4% 的设计要求,显示出良好的降温效果。同时,较高的拌合温度能够有效提升混合料的压实度,从而改善施工性能。

(2)RWMA 在高温条件下展现出优异的黏弹性性能,其动态模量顺序为 RWMA>RHMA>HMA,充分反映了温拌再生沥青混合料的高温抗变形能力。此外,随着温度的升高,相位角也随之增加,揭示了黏弹性行为与温度和频率之间的密切关系。主曲线分析进一步证实,温拌再生沥青混合料在高温下的性能提升,为其实际应用提供了坚实的理论支持。

(3)RWMA 在低温抗裂性上略有下降,但其低温劲度优于 RHMA,表现出较好的综合低温性能。在水稳性方面,RHMA 优于 RWMA,但相比于 HMA,其性能仍有所下降。尽管再生后 RWMA 和 RHMA 的抗裂性能和水稳性均有所下降,但 RHMA 在水稳性方面表现相对更优。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 1-81.
Editorial Department of China Highway Journal. Review of academic research on road surface engineering in China·2024[J]. China Journal of Highway and Transportation, 2024, 37(3): 1-81.
- [2] 王枫成. 废旧塑料在沥青道路工程中的应用进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(8): 225-230.
Wang Feng-cheng. Progress in the application of waste plastics in asphalt road engineering[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(8): 225-230.

- [3] Huang L L, Lin J D, Huang W H, et al. Developing pavement maintenance strategies and implementing management systems[J]. *Infrastructures*, 2024, 9(7): No. 101.
- [4] 金鑫, 付昊轩, 杨野, 等. 沥青温拌再生剂研究现状与发展趋势[J]. *材料导报*, 2023, 37(增刊 2): 183-190.
Jin Xin, Fu Hao-xuan, Yang Ye, et al. Research status and development trend of asphalt warm mixing regnerant[J]. *Materials Review*, 2023, 37(Sup. 2): 183-190.
- [5] 郭鹏, 鲁承慧, 谢凤章, 等. 微观尺度下温拌再生混合料新旧沥青界面融合特性[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(10): 89-97.
Guo Peng, Lu Cheng-hui, Xie Feng-zhang, et al. Interface fusion characteristics of warm-mixed recycled mixture between new and old asphalt at microscopic scale[J]. *China Journal of Highway and Transportation*, 2021, 34(10): 89-97.
- [6] Jin X, Fu H X, Li D L, et al. Research on the preparation and performance of biomimetic warm-mix regeneration for asphalt mixtures[J]. *Coatings*, 2024, 14(7): No. 825.
- [7] Li J E, Wang Z X, Chen C P, et al. A novel reactive warm-mix rejuvenator and its effects of synergistic rejuvenation and temperature reduction on aged SBS modified bitumen[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416: No. 135266.
- [8] Jiangsan H, Lan W, Hui W, et al. Quantitative study on regeneration mechanism of warm mixed recycled asphalt[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 408: No. 137104.
- [9] 仰建岗, 黄锦化, 高杰, 等. 温拌剂对再生沥青与沥青混合料性能影响及作用机理[J]. *公路交通科技*, 2023, 40(7): 1-10.
Yang Jian-gang, Huang Jin-hua, Gao Jie, et al. Effect and mechanism of warm mixing agent on properties of reclaimed asphalt and asphalt mixture[J]. *Journal of Highway and Transportation Science and Technology*, 2023, 40(7): 1-10.
- [10] Shi K, Ma F, Liu J, et al. Evolution of SBS-modified asphalt performance under aging and rejuvenation cycle conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416: No. 135156.
- [11] Wen Y L, Ma F, Fu Z, et al. Evaluation on the fatigue and self-healing properties of aged and rejuvenated SBS-modified asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 412: No. 134773.
- [12] 左锋, 叶奋, 宋卿卿. RAP 掺量对再生沥青混合料路用性能影响[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2020, 50(4): 1403-1410.
Zou Feng, Ye Fen, Song Qing-qing. Effect of RAP content on the pavement performance of recycled asphalt mix[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology)*, 2020, 50(4): 1403-1410.
- [13] 田耀刚, 覃超, 张梦缘, 等. 温拌SBS改性再生沥青混合料的路用性能研究[J]. *应用化工*, 2024, 53(5): 1031-1035.
Tian Yao-gang, Qin Chao, Zhang Meng-yuan, et al. Study on road performance of warm-mix SBS-modified recycled asphalt mixtures[J]. *Applied Chemical Engineering*, 2024, 53(5): 1031-1035.
- [14] Xu H, Sun Y R, Chen J Y, et al. Investigation into rheological behavior of warm-mix recycled asphalt binders with high percentages of RAP binder[J]. *Materials*, 2023, 16(4): No. 1599.
- [15] Valdes-Vidal G, Calabi-Floody A, Sanchez-Alonso E, et al. Highway trial sections: performance evaluation of warm mix asphalt and recycled warm mix asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: No. 120069.
- [16] Dong W H, Ma F, Fu Z, et al. Investigating the properties of a novel organic composite warm mix additive on SBS modified asphalt binder[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 444: No. 137885.
- [17] Zawawi M A, Hassan N A, Mahmud M Z H, et al. Effect of evotherm 3G on the performance of asphalt mixture[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2023, 130: No. 103392.
- [18] Alsarayreh D, Carrion A J D. Evaluation of the mechanical performance of warm bio-recycled asphalt mixtures[J]. *Sustainability*, 2024, 16(3): No. 1287.
- [19] Wang L, Wu H, Guo Z Y, et al. Evaluation of high-temperature and antireflection cracking performance of warm mixed recycled asphalt mixture[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(3): No. 04022472.
- [20] Yousefi A A, Haghshenas H F, Underwood B S, et al. Performance of warm asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement, an anti-stripping agent, and recycling agents: a study using a balanced mix design approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 363: No. 129633.
- [21] Liu Z H, Chen Q, Pei J W, et al. Performance evaluations of warm-mix reaction-rejuvenated SBS modified asphalt mixtures incorporated with wax-based ad-

- ductive[J]. Sustainability, 2024, 16(12): No. 5234.
- [22] 曾伟. 基于废旧塑料裂解产物的温拌剂对沥青性能的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学材料科学与工程学院, 2019.
- Zeng Wei. Research on the effect of warm mixing agent based on waste plastic cracking products on asphalt performance[D]. Chongqing: School of Materials Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [23] 史绍松, 李传强, 凌天清, 等. 不同熔点的废旧PE裂解蜡温拌沥青性能研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(10): 275-280, 285.
- Shi Shao-song, Li Chuan-qiang, Ling Tian-qing, et al. Study on the properties of warm mix asphalt from waste PE pyrolysis wax with different melting points [J]. New Chemical Materials, 2022, 50(10): 275-280, 285.
- [24] Negi P, Dubey P K, Palodkar A V, et al. Thermo-kinetics of chemical recycling of real-world waste plastics[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(44): 15951-15963.
- [25] Zheng Y Q, Chen S H, Huang W K, et al. Principle analysis of the mix design and performance evaluation of the asphalt-filler volume equivalent substitution method[J]. Construction and Building Materials, 2023, 367: No. 130276.
- [26] 吴军, 夏海廷, 郭荣鑫, 等. 基于改进多点支撑骨架状态模型的热再生沥青混合料配合比设计 [J]. 材料导报, 2024, 38(增刊1): 186-192.
- Wu Jun, Xia Hai-ting, Guo Rong-xin, et al. Hot recycled asphalt mixture proportion design based on improved multi-point support skeleton state model [J]. Materials Guide, 2024, 38(Sup. 1): 186-192.
- [27] Prasad A N, Saboo N, Pani A. Material and mix design aspects of hot recycled asphalt mixes: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(50): 108411-108447.
- [28] Cui Y A, Chen Q, Li M R, et al. Study on low temperature crack resistance of warm-mixed recycled SBS modified asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: No. 134120.
- [29] Yu Q X, Liu J Y, Xia H X. Analysis of influence of surfactant on the properties of diluted asphalt mixtures [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: No. 101335.
- [30] 何兆益, 李金凤, 周文, 等. 多孔沥青混合料的动态模量及其预估模型 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2022, 52(6): 1375-1385.
- He Zhao-yi, Li Jin-feng, Zhou Wen, et al. Dynamic modulus of porous asphalt mixture and its prediction model[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(6): 1375-1385.
- [31] Fan X Y, Lv S T, Ge D D, et al. Time-temperature equivalence and unified characterization of asphalt mixture fatigue properties[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: No. 129118.