doi:10. 3969/j. issn. 1006-8023. 2024. 02. 022

滨海高速公路改扩建温拌沥青混合料综合性能评价

周昆[1,3],徐书东[2*],徐庆超[1,3],董昭[2],王圣洁[1,3],柳久伟[2],王昱[1,3]
(1. 山东高速建设管理集团有限公司,济南 250014;2. 山东省交通科学研究院,济南 250102;
3. 山东高速半岛投资有限公司,济南 250014)

摘　要:评价不同温拌剂对沥青混合料性能影响规律,为工程应用中温拌剂的选择提供技术依据。分别选取 Sasobit、Aspha-min、Evotherm 3 种温拌剂制备温拌沥青混合料,基于车辙、低温弯曲、冻融劈裂、汉堡轮辙和动态模量试验,分析 3 种温拌剂对沥青混合料路用性能和动态模量的综合影响。研究表明,Evotherm 温拌剂对混合料的降温效果最佳,Aspha-min 温拌剂与 Sasobit 温拌剂对沥青混合料的降温效果相当;Sasobit 温拌剂能够提高混合料的高温性能,Evotherm 温拌剂能够提高混合料的水稳定性,Aspha-min 温拌剂的水热性能较差;中温条件下添加 Evotherm 温拌剂混合料模量最高,高温条件下添加 Sasobit 温拌剂混合料模量最高;构建混合料动态模量主曲线,Sasobit 和 Evotherm 温拌剂均能够改善混合料的高温性能,Sasobit 温拌剂造成混合料低温性能降低,Evotherm 和 Aspha-min 温拌剂对混合料的低温不产生影响。

关键词:道路工程;沥青混合料;温拌剂;降温效果;路用性能;动态模量
中图分类号:U414　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)02-0208-09

Comprehensive Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixture for the Reconstruction and Expansion of Coastal Highway

ZHOU Kun[1], XU Shudong[2*], XU Qingchao[1,3], DONG Zhao[2], WANG Shengjie[1,3], LIU Jiuwei[2], WANG Yu[1,3]
(1. Shandong Hi-Speed Construction Management Group Co. Ltd., Ji´nan 250014, China; 2. Shangdong Transportation Research Institute, Ji´nan 250102, China; 3. Shandong Hi-Speed Peninsula Investment Co., Ltd., Ji´nan 250014, China)

Abstract: In order to evaluate the impact of different warm mix agents on the performance of asphalt mixtures and provide necessary technical basis for the selection of warm mix agents in engineering applications, three warm mix agents, Sasobit, Aspha-min, and Evotherm, were selected to prepare warm mix asphalt mixtures. Based on rutting, low-temperature bending, freeze-thaw splitting, Hamburg wheel rutting, and dynamic modulus tests, the comprehensive effects of the three warm mix agents on the road performance and dynamic modulus of asphalt mixtures were analyzed. Research has shown that Evotherm has the best cooling effect on asphalt mixtures, while Aplha-min, and Sasobit have comparable cooling effects on asphalt mixtures; Sasobit warm mixing agent can improve the high-temperature performance of the mixture, Evotherm can improve the water stability of the mixture, while Aspha-min warm mixing agent had poor hydrothermal performance. The modulus of the mixture with the addition of Evotherm warm mixing agent was the highest under medium temperature conditions, and the modulus of the mixture with the addition of Sasobit warm mixing agent was the highest under high temperature conditions. The main curve of the dynamic modulus of the mixture had been constructed. Sasobit and Evotherm warm mix agents can improve the high-temperature performance of the mixture. Sasobit warm mix agent caused a decrease in the low-temperature performance of the mixture, while Evotherm and Aspha-min warm mix agents had no effect on the low-temperature performance of the mixture.

Keywords: Road engineering; asphalt mixture; warm mixing agent; cooling effect; road performance; dynamic modulus

---

收稿日期:2023-09-30
基金项目:山东省自然科学基金重点项目(ZR2020KE024)。
第一作者简介:周昆,高级工程师。研究方向为道路工程材料。E-mail:2503294943@qq.com
*通信作者:徐书东,硕士,工程师。研究方向为道路工程材料。E-mail:842631849@qq.com
引文格式:周昆,徐书东,徐庆超,等. 滨海高速公路改扩建温拌沥青混合料综合性能评价[J]. 森林工程,2024,40(2):208-216.

ZHOU K, XU S D, XU Q C, et al. Comprehensive performance evaluation of warm mix asphalt mixture for the reconstruction and expansion of coastal highway[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):208-216.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0　引言

沥青混合料作为我国高等级路面的主要形式,对于我国交通建设有着不可替代的作用,随着“双碳”目标的提出,传统热拌沥青混合料施工温度高、空气污染重等问题日益突出,成为亟须解决的技术难题。沥青混合料温拌技术能够在保证混合料良好性能的同时显著降低混合料的成型温度,降低环境污染[1-4],具有良好的社会环境效益,应用前景广阔。

根据温拌剂作用机理不同,可以将温拌技术分为有机降黏型、沸石发泡型和表面活性剂型 3 类[5-6]。有机降黏型温拌剂典型代表是南非 Sasol WAX 公司生产的 Sasobit 温拌剂,其主要成分为低熔点的有机蜡,高温条件下可以产生大量液体降低沥青的高温黏度,从化学角度改变沥青的黏温曲线,实现混合料的低温拌和。沸石发泡型温拌剂主要基于人工沸石降黏技术,其典型代表是合成沸石 Aspha-min 温拌剂,温拌剂呈晶体骨架结构,内部含有大量空隙,能够吸附大量水分子,高温条件下水分子被释放产生气泡,增大沥青与集料的裹覆面积,降低沥青的黏度。表面活性剂型温拌剂典型代表是美国 Mead-Westvaco 公司生产的 Evotherm 温拌剂,内含有极性较强的分子团能够吸附沥青中的极性分子,进而降低沥青中分子的作用力,降低了沥青的黏度,显著增加沥青混合料在较低温度时的拌和工作性。

针对各类温拌技术应用效果,国内外研究学者进行了大量研究,段鹏鹏等[7]分析了 Sasobit 掺量对沥青性能指标的影响规律,推荐了 Sasobit 温拌剂最佳掺量为 3%,研究发现掺加 Sasobit 温拌剂可以降低混合料成型温度 19~23 ℃;Zhuang 等[8]研究表明有机降黏型温拌剂能够改善胶粉沥青的高温和低温性能,但对胶粉沥青的抗老化性能不利;王黎明等[9]研究发现沸石发泡温拌剂能够降低 SMA 沥青混合料拌合温度 20 ℃,对混合料的路用性能及路面服役无显著影响;Woszuk 等[10]综述了沸石发泡型温拌剂的工作机理及在沥青混合料中的应用现状,揭示了温拌剂对沥青及混合料的性能影响规律;王铁庆[11]分析了表面活性剂型温拌剂对胶粉沥青性能的影响,研究发现添加温拌剂对胶粉沥青的高温黏度影响较小,但可以显著改善胶粉沥青的低温性能和弹性恢复指标;季节等[12]分析了不同温拌剂对橡胶沥青的影响,研究发现当温度低于 145 ℃时,有机降黏类温拌剂的降黏效果最好,当温度高于 145 ℃时,表面活性剂类温拌剂的降黏效果最好;张争奇等[13]研究表明 Sasobit 温拌剂可以显著改善沥青混合料的高温性能,适用于高温重载地区,Aspha-min 温拌剂低温抗裂性能更好,可用于严寒地区。

随着温拌技术不断发展,温拌剂种类越来越多,不同温拌剂的降温效果及温拌剂对于沥青混合料路用性能的影响各有不同,进行温拌剂选择时并没有明确的参考依据。本研究依托滨海高速公路改扩建工程,分别选择 Sasobit、Aspha-min、Evotherm 3 种温拌剂制备温拌沥青混合料,分析各类温拌剂对混合料路用性能及动态模量的影响规律,为工程应用中温拌剂的选择提供必要的技术支撑。

1　原材料

1.1　集料

试验所用集料为石灰岩,参照《公路工程集料试验规程》对原材料性能指标进行检测,试验结果见表 1。

表 1　原材料性能指标

Tab. 1 Performance index of raw materials

集料规格 Aggregate specifications	毛体积密度/(g·cm^{-3}) Gross bulk density	表观密度/(g·cm^{-3}) Apparent density	吸水率(%) Water absorption	针片状含量(%) Needle and sheet content	压碎值(%) Crushing value	砂当量(%) Sand equivalent
10~20 mm	2.710	2.743	0.45	10.3	16.8	—
5~10 mm	2.700	2.733	0.44	12.9	—	—
3~5 mm	2.703	2.731	0.51	—	—	—
0~3 mm	2.670	2.714	0.62	—	—	67.5
矿粉 Mineral powder	—	2.709	—	—	—	—
技术要求 Technical requirement	≥2.5	≥2.6	≤2.0	≤15	≤26	≥60

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2 沥青

试验所用沥青为 SBS 改性沥青,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》对沥青性能指标进行检测,试验结果见表 2。

1.3 温拌剂

项目所用温拌剂技术指标见表 3。试验用温拌剂的温拌剂如图 1 所示。

表 2 SBS 改性沥青技术指标

Tab. 2 Technical index of SBS modified asphalt

试验项目 Test items	技术要求 Technical requirement	试验结果 Results	试验方法 Test method
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/ 0.1mm Penetration (25 ℃, 5 s, 100 g)	40~60	53	T0604
延度(5 cm/min,5 ℃)/ cm Ductility (5 cm/min, 5 ℃)	≥20	49	T0605
软化点(℃) Softening point	≥60	69.5	T0606
运动黏度(135 ℃)/(Pa·s) Kinematic viscosity (135 ℃)	≤3	1.831	T0625
闪点(℃) Flash point	≥230	260	T0611
溶解度(%) Solubility	≥99	99.92	T0607
弹性恢复(25 ℃)(%) Elastic recovery (25 ℃)	≥75	84	T0662

表 3 温拌剂性质及主要成分

Tab. 3 Properties and main components of warm mixing agent

温拌剂 Warm mixing agent	外观 Appearance	密度/(g·cm^{-3}) Density	主要成分 Main components
Sasobit	白色颗粒状	0.94	合成饱和烃
Aspha-min	白色粉末状	0.63	硅铝酸钠,内含 21%结晶水
Evotherm	褐色液体	0.97	极性(亲油)部分,非极性(亲水)部分



(a) Sasobit温拌剂
(a) Sasobit warm mixing agent



(b) Aspha-min温拌剂
(b) Aspha-min warm mixing agent



(c) Evotherm温拌剂
(c) A Evotherm warm mixing agent

图 1 试验用温拌剂

Fig. 1 Warm mixing agent for test

根据温拌剂作用机理不同,制备温拌沥青混合料时,Sasobit 温拌剂采用湿拌法,先将沥青加热到 130 ℃,然后加入 Sasobit 温拌剂(其掺量为沥青质量的 3%),采用高速剪切机剪切 30 min 后制得温拌沥青,最后将温拌沥青与集料混合制备温拌沥青混合料。对于 Aspha-min 和 Evotherm 温拌剂采用干拌法,先将集料加热到 160 ℃,然后在加入沥青的同时将温拌剂(Aspha-min 温拌剂掺量为混合料质量的 0.3%,Evotherm 温拌剂掺量为混合料质量的 0.6%)投入到拌锅中,最后加入矿粉制得温拌沥青混合料。

1.4 级配设计

根据原材料筛分结果进行混合料级配设计,混合料级配类型为 AC-20,确定混合料级配如图 2 所示。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

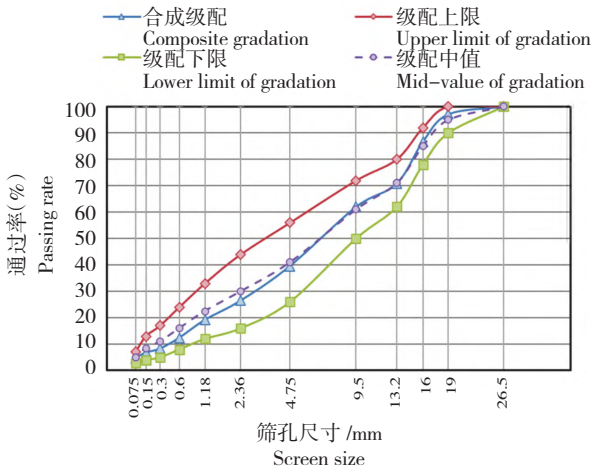


图 2　AC-20 混合料级配曲线

Fig. 2 Grading curve of AC-20 mixture

2　沥青混合料性能评价

2.1　成型温度

以常规热拌沥青混合料为基础，根据马歇尔试验法确定混合料最佳沥青用量为 4.4%，最佳成型温度(165 ℃)条件下混合料空隙率为 4.3%。基于体积等效原则分别在 125、135、145、155、165 ℃条件下成型温拌沥青混合料马歇尔试件，并对混合料的体积指标进行测试，试验结果如图 3 所示。

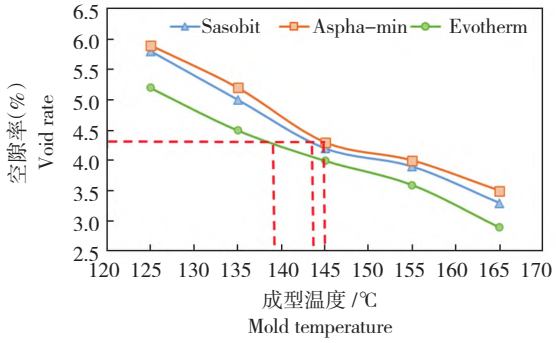


图 3　温拌沥青混合料空隙率与成型温度关系

Fig. 3 Relationship between void ratio of warm mix asphalt mixture and mold temperature

由图 3 可以看出，随成型温度的升高混合料空隙率逐渐降低，基于体积等效原则以 4.3%空隙率为目标空隙率，添加 Sasobit 温拌剂混合料最佳成型温度为 144 ℃，添加 Aspha-min 温拌剂混合料最佳成型温度为 145 ℃，添加 Evotherm 温拌剂混合料最佳成型温度为 138 ℃。研究表明，添加温拌剂可以降低混合料成型温度 20~30 ℃，相比于热拌沥青混合料，添加 Sasobit、Aspha-min、Evotherm 温拌剂混合料成型温度分别降低了 21、20、27 ℃，对于混合料的降温幅度 Evotherm 温拌剂效果最佳，Aspha-min 温拌剂与 Sasobit 温拌剂降温效果相当。

2.2　混合料路用性能

为进一步分析温拌剂对沥青混合料路用性能的影响规律，通过车辙试验、小梁弯曲试验和冻融劈裂试验分别对温拌沥青混合料的高温抗车辙性能、低温抗裂性能和水稳定性进行评价，试验结果如图 4—图 6 所示。

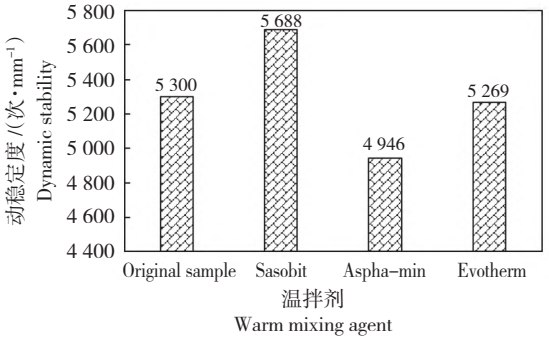


图 4　沥青混合料高温性能

Fig. 4 High temperature performance of asphalt mixture

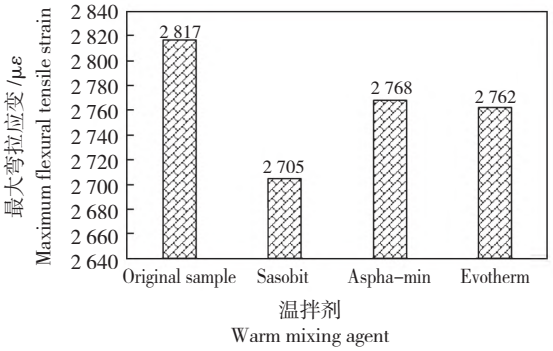


图 5　沥青混合料低温性能

Fig. 5 Low temperature performance of asphalt mixture

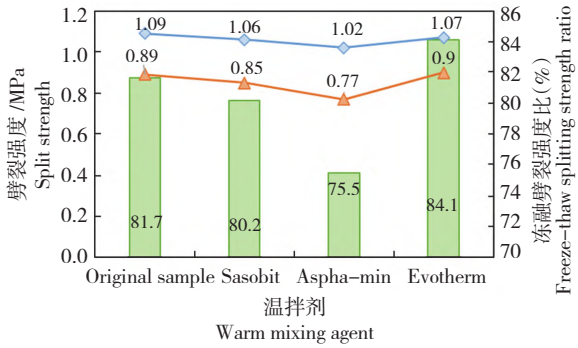


图 6　沥青混合料水稳定性

Fig. 6 Water stability of asphalt mixture

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 4—图 6 可以看出，相较于热拌沥青混合料，添加 Sasobit、Aspha－min、Evotherm 温拌剂混合料的高温性能分别变化了+7.3%、－6.7%、－0.6%，低温性能分别变化了－4.0%、－1.7%、－2.0%，水稳定性分别变化了－1.5%、－6.2%、+2.4%。研究表明，Sasobit 温拌剂能够提升混合料的高温抗车辙性能，但会造成混合料的低温抗裂性能略有降低，对混合料的水稳定性影响不明显；Aspha－min 温拌剂会导致混合料的高温性能和水稳定性降低，对混合料的低温性能影响较小；Evotherm 温拌剂能够提高混合料的水稳定性，对混合料的高温性能和低温性能几乎不产生影响。各种温拌剂对沥青混合料路用性能的影响不尽相同，主要是因为温拌剂的作用机理不同，Sasobit 温拌剂主要通过化学改性作用吸附沥青中的饱和酚组分，并在低温条件下析出与未被融化的 Sasobit 温拌剂形成网状晶体结构，降低了高温条件下沥青的流动性，使沥青混合料的稳定性得到改善，由于温拌剂的加入导致沥青变硬、变脆，低温条件更容易发生低温开裂[14]。Aspha－min 温拌剂主要通过高温条件下释放水分在沥青内部形成发泡效果，对沥青的性质几乎不产生影响，但拌和过程中温拌剂可能会产生残留影响沥青与集料间的黏附效果，导致混合料的高温性能和水稳定性降低。Evotherm 温拌剂主要成分含有胺类物质，提高了沥青与集料间黏附性，可以有效改善混合料的水稳定性。

2.3 汉堡试验

汉堡车辙试验[15-17]作为现阶段评价沥青混合料高温性能和水稳定性最为严苛的试验，与沥青混合料的路用性能有着较好的相关性。分别对几种沥青混合料进行汉堡车辙试验，试验水温为 50 ℃，试验结果见表 6。

表 6 汉堡轮辙试验结果

Tab. 6 Hamburg wheel rut test results

温拌剂 Warm mixing agent	碾压 10 000 次变形/mm Rolling 10 000 times for deformation	碾压 20 000 次变形/mm Rolling 20 000 times for deformation	剥落点/次 Stripping inflection point
Original sample	1.045	1.749	11 666
Sasobit	1.189	1.986	16 666
Aspha－min	2.616	3.357	11 111
Evotherm	1.858	2.652	16 666

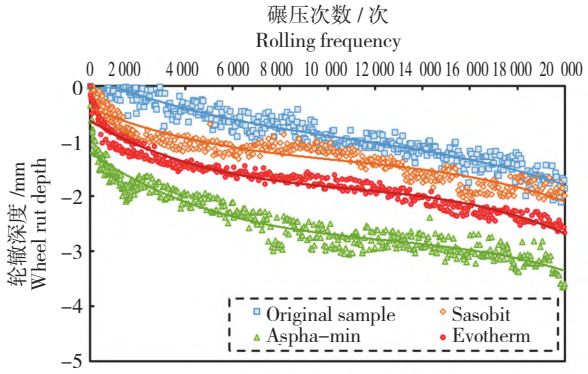


图 7 混合料汉堡轮辙试验曲线

Fig. 7 Hamburg wheel rut test curve of mixture

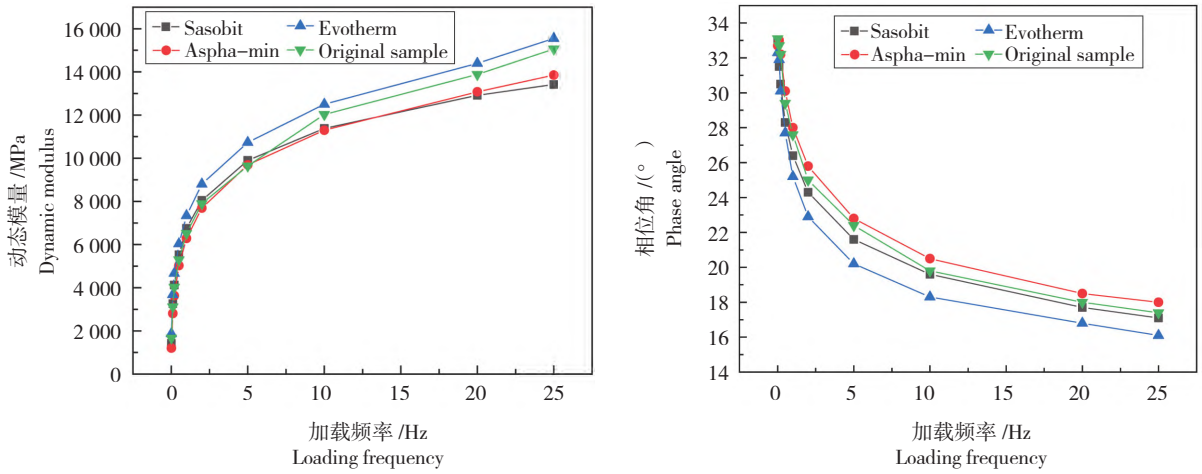
轮辙深度表征了混合料的抗车辙性能，剥落点表征了混合料的水稳定性。由上述试验可知，相较于热拌沥青混合料，添加温拌剂轮辙深度出现不同程度的增加，表明温拌剂会对高温水浴条件下的混合料车辙性能产生不利影响，其中各种温拌剂的抗车辙性能由大到小为：Sasobit、Evotherm、Aspha－min，与混合料的车辙试验结论基本一致。添加 Aspha－min 温拌剂混合料的剥落点明显降低，表明 Aspha－min 温拌沥青混合料的高温水稳定性较差，在高温多雨地区容易出现水损病害。

3 动态模量

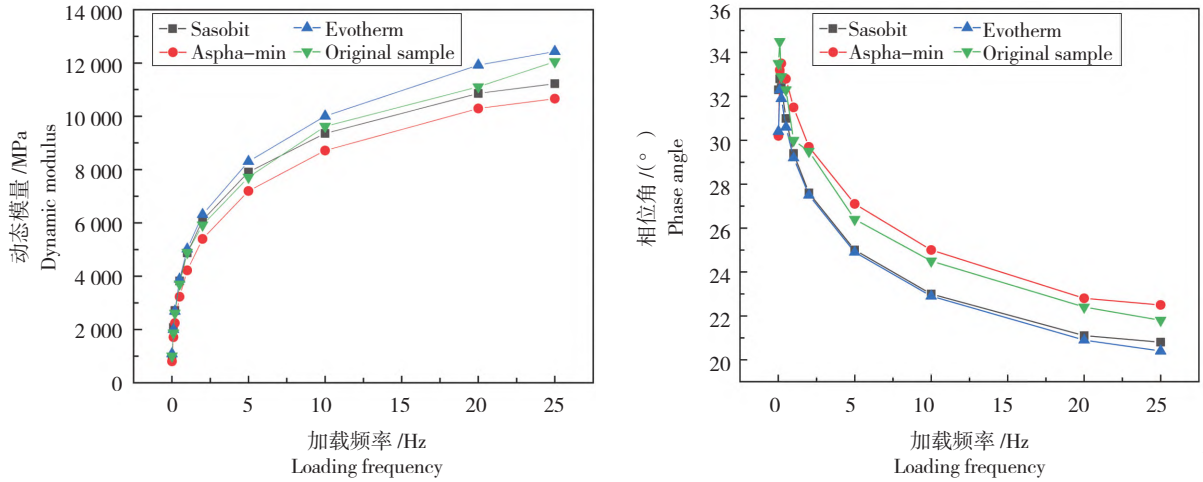
动态模量能够考虑不同加载频率、不同温度条件下沥青路面的力学响应，作为路面结构设计的重要参数，能较好地模拟沥青路面实际受力状态[18-21]。动态模量即应力与应变的最大值之比，反映了材料抵抗变形的能力。相位角表示材料施加正弦波形荷载时，响应应变的滞后性，反映了材料的黏弹性程度。采用 SPT 试验仪分别对几种沥青混合料的动态模量和相位角进行研究，试验温度为 15、20、37、54 ℃，加载频率为 25、20、10、5、2.0、1.0、0.5、0.2、0.1、0.01 Hz。试验结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出，几种沥青混合料在动态模量和相位角发展趋势上表现出相同的规律，即随着加载频率的增加混合料动态模量逐渐增大，在中温（≤20 ℃）条件下，随加载频率的增大，混合料相位

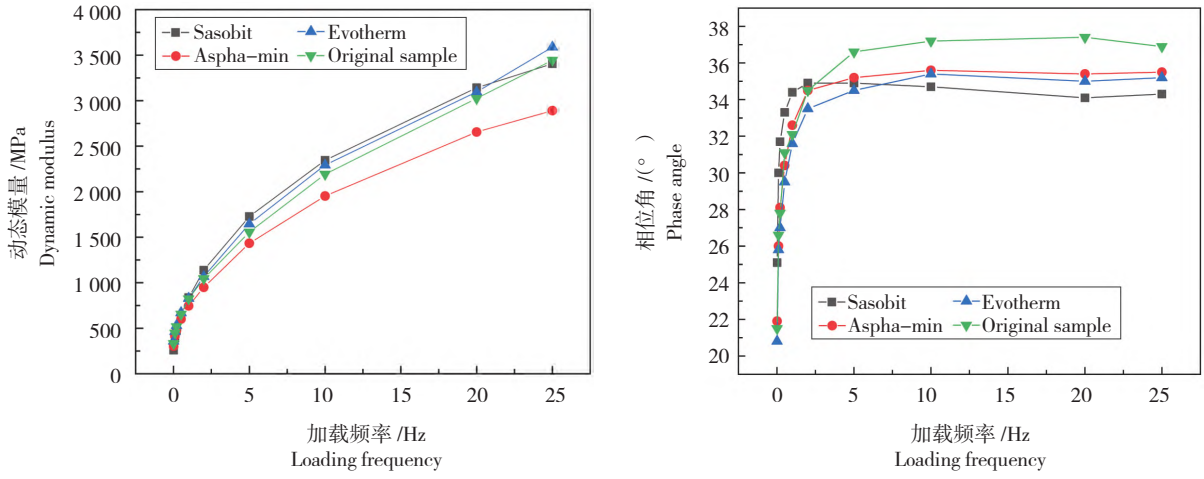
(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）15 ℃沥青混合料动态模量和相位角
（a）Dynamic modulus and phase angle of 15 ℃ asphalt mixture

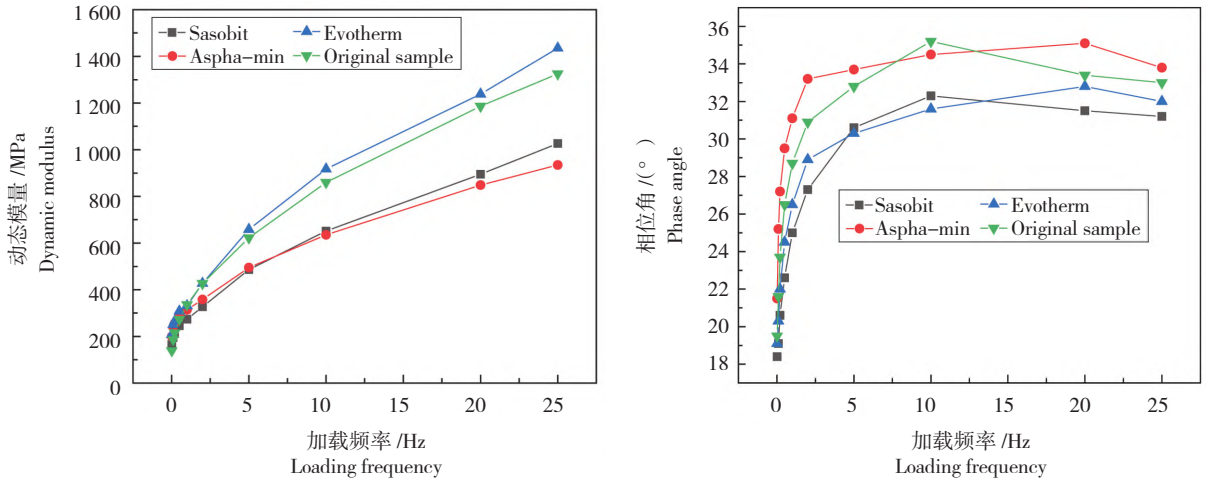


（b）20 ℃沥青混合料动态模量和相位角
（b）Dynamic modulus and phase angle of 20 ℃ asphalt mixture



（c）37 ℃沥青混合料动态模量和相位角
（c）Dynamic modulus and phase angle of 37 ℃ asphalt mixture

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(d) 54 ℃沥青混合料动态模量和相位角
(d) Dynamic modulus and phase angle of 54 ℃ asphalt mixture

图 8 混合料动态模量和相位角

Fig. 8 Dynamic modulus and phase angle of mixtures

角逐渐降低,混合料表现出更强的弹性性质,在高温(≥37 ℃)条件下,随加载频率的增大,混合料相位角逐渐增大,混合料表现出更强的黏性性质。对比几种混合料动态模量和相位角可知,在中温条件下 Evotherm 温拌沥青混合料具有更高的模量和更小的相位角,表明中温条件下 Evotherm 温拌剂提高了混合料的刚度和抗变形能力。而在高温条件下 Sasobit 温拌沥青混合料的动态模量更高相位角更小,表明高温条件下 Sasobit 温拌沥青混合料表现出更好的强度和弹性恢复能力,Sasobit 温拌剂的加入降低了沥青混合料在承受荷载发生形变时产生的永久变形。相比于热拌沥青混合料,添加 Aspha-min 温拌剂混合料的模量更小,混合料的刚度较低抗变形能力较差。

沥青混合料是一种黏弹性材料,其性质受温度和荷载作用时间的影响较大,基于黏弹性材料的时温等效原理,结合试验得到的不同温度条件下混合料动态模量,根据西格摩德(Sigmoidal) 函数构建几种沥青混合料的动态模量主曲线,如图 9 所示。

由图 9 可以看出,在低频区添加 Sasobit 和 Evotherm 温拌剂混合料动态模量均大于热拌沥青混合料,低频代表高温,表明 Sasobit 和 Evotherm 温拌剂均能够改善混合料的高温性能,但 Aspha-min 温拌剂对混合料的高温性能不利。而在高频区 Sasobit 温拌沥青混合料相较于热拌沥青混合料模量更高,高频代表低温,低温模量越高,混合料越容易出现开裂,表明 Sasobit 温拌剂对混合料的低温性能产生不利影响,而添加 Evotherm 和 Aspha-min 温拌剂混合料动态模量和热拌沥青混合料差异不明显,表明 Evotherm 和 Aspha-min 温拌剂对混合料的低温性能影响不显著。

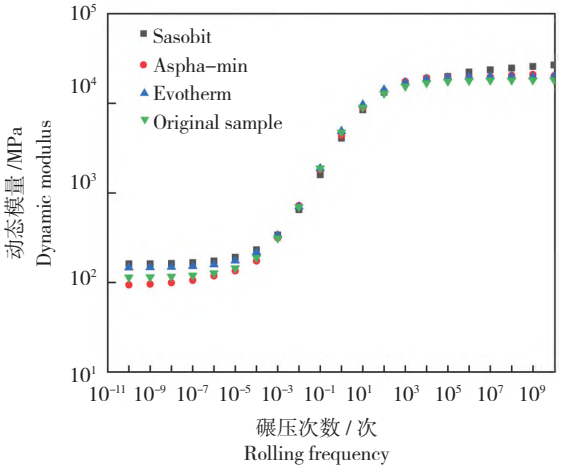


图 9 混合料动态模量主曲线

Fig. 9 Main curve of dynamic modulus of mixture

4 结论

1)添加 Sasobit、Aspha-min、Evotherm 温拌剂混合料成型温度分别降低了 21、20、27 ℃,对于混合料的降温幅度 Evotherm 温拌剂效果最佳,Aspha-min

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

温拌剂与 Sasobit 温拌剂降温效果相当。

2)Sasobit 温拌剂能够提高混合料的高温抗车辙性能,Evotherm 能够提高混合料的水稳定性,Aspha-min 温拌剂的水热性能较差,3 种温拌剂均会造成混合料的低温性能发生衰减,但影响不显著。

3)中温(≤20 ℃)条件下添加 Evotherm 温拌剂混合料模量最高,高温(≥37 ℃)条件下添加 Sasobit 温拌剂混合料表现出更好的强度和弹性恢复能力,添加 Aspha-min 温拌剂对混合料的模量产生不利影响。

4)构建了混合料动态模量主曲线,Sasobit 和 Evotherm 温拌剂均能够改善混合料的高温性能,Aspha-min 温拌剂对混合料的高温性能不利,Sasobit 温拌剂造成混合料低温性能降低,Evotherm 和 Aspha-min 温拌剂对混合料的低温不产生影响。

【参　考　文　献】

[1] 宋云连,高盼,吕鹏. 温拌沥青低温性能及其微观特性机理研究[J]. 材料导报,2021,35(S1):251-257.
SONG Y L, GAO P, LÜ P. Study on the low temperature performance and micro characteristic mechanism of warm mix asphalt[J]. Materials Reports, 2021, 35(S1): 251-257.

[2] 李包,李宁,陈晨,等. 具有一定服役年限的泡沫温拌沥青混凝土路面路用性能试验研究[J]. 公路工程,2022,47(2):127-132,187.
LI B, LI N, CHEN C, et al. Evaluation of road performance of foamed warm asphalt mixture based on field core samples[J]. Highway Engineering, 2022, 47(2): 127-132, 187.

[3] AMERI M, YAZDIPANAH F, RAHIMI YENGEJEH A, et al. Production temperatures and mechanical performance of rubberized asphalt mixtures modified with two warm mix asphalt (WMA) additives[J]. Materials and Structures, 2020, 53(4): 1-16.

[4] 徐加秋,阳恩慧,王世法,等. Sasobit 温拌沥青的低温性能评价指标研究[J]. 公路交通科技,2020,37(2):8-14,39.
XU J Q, YANG E H, WANG S F, et al. Study on low temperature performance evaluation indicator of sasobit warm mix asphalt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(2): 8-14, 39.

[5] 王枫成,南雪峰,朱建平. 泡沫沥青及其温拌混合料高温性能分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(23):228-233.
WANG F C, NAN X F, ZHU J P. Analysis of road performance of the asphalt-foam and foaming asphalt warm mixture[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(23): 228-233

[6] LU G Y, ZHANG S W, XU S F, et al. Rheological behavior of warm mix asphalt modified with foaming process and surfactant additive[J]. Crystals, 2021, 11(4): 410.

[7] 段鹏鹏,徐肖龙,雷涛,等. 不同温拌剂掺量对沥青混合料性能的影响[J]. 粘接,2022,49(10):89-93.
DUAN P P, XU X L, LEI T, et al. Influence of different content of warm mix agent on the performance of asphalt mixture[J]. Adhesion, 2022, 49(10): 89-93.

[8] ZHUANG R H, YU J Y, CHANG H, et al. Effect of warm mix agent on physical and aging properties of crumb rubber modified bitumen[J]. Materials Science Forum, 2019, 944: 1226-1233.

[9] 王黎明,马堃,李尊鹏. 沸石粉对沥青及温拌 SMA 混合料性能影响研究[J]. 森林工程,2022,38(4):147-154.
WANG L M, MA K, LI Z P. Research on the influence of zeolite powder on the performance of asphalt and warm mix SMA[J]. Forest Engineering, 2022, 38(4): 147-154.

[10] WOSZUK A, FRANUS W. A review of the application of zeolite materials in warm mix asphalt technologies[J]. Applied Sciences, 2017, 7(3): 293.

[11] 王铁庆. 橡胶沥青评价指标和温拌橡胶沥青 SMA 混合料技术研究[D]. 西安:长安大学,2017.
WANG T Q. Study on evaluation indexes of rubber asphalt and technology of warm mix rubber asphalt SMA mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.

[12] 季节,董阳,杨跃琴,等. 不同温拌剂对橡胶沥青性能的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(6):133-140.
JI J, DONG Y, YANG Y Q, et al. Effect of different warm additives on rubber asphalt performance[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(6): 133-140.

[13] 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 Z Q, ZHANG T T, WANG X Y, 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.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[14] 马峰,袁康博,傅珍,等.不同温拌剂对沥青混合料路用性能的影响[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(11):1500-1505.
MA F, YUAN K B, FU Z, et al. Effects of different warm mix agents on road performance of asphalt mixture [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2021, 44(11): 1500-1505.

[15] 周燕,陈拴发,郑木莲,等.温拌沥青混合料拌合压实特性研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(1):61-64.
ZHOU Y, CHEN S F, ZHENG M L, et al. Research on mixing and compaction property of warm mix asphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(1): 61-64.

[16] WANG W H, HUANG C W. Establishing indicators and an analytic method for moisture susceptibility and rutting resistance evaluation using a hamburg wheel tracking test [J]. Materials, 2020, 13(15): 3269.

[17] 齐琳,沙爱民,陈凯.沥青混合料水稳定性汉堡车辙试验研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(8):42-45.
QI L, SHA A M, CHEN K. Research on the water stability of asphalt mixtures based on the HWTD[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(8): 42-45.

[18] BATIOJA-ALVAREZ D, LEE J S, RAHBAR-RASTEGAR R, et al. Asphalt mixture quality acceptance using the hamburg wheel-tracking test[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(8): 338-349.

[19] AREFIN M S, QUASEM T, NAZZAL M, et al. Effect of short-term and long-term ageing on dynamic modulus of foamed warm mix asphalt[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(4): 524-536.

[20] 薛羽,栗培龙,高朋,等.沥青混合料动态模量主曲线方法对比分析[J].广西大学学报(自然科学版),2020,45(1):1-9.
XUE Y, LI P L, GAO P, et al. Comparative analysis of principal curve methods of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, 45(1): 1-9.

[21] 杨小龙,申爱琴,郭寅川,等.沥青混合料动态模量预估模型研究进展[J].材料导报,2018,32(13):2230-2240.
YANG X L, SHEN A Q, GUO Y C, et al. A review of dynamic modulus prediction model of asphalt mixture[J]. Materials Review, 2018, 32(13): 2230-2240.

(上接第207页)

[14] HATOUM A A, KHATIB J M, BARRAJ F, et al. Survival analysis for asphalt pavement performance and assessment of various factors affecting fatigue cracking based on LTPP data [J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12408.

[15] 刘力源,程怀磊,张翀,等.服役柔性基层沥青路面力学响应实测与分析[J].公路交通科技,2022,39(4):11-21,40.
LIU L Y, CHENG H L, ZHANG X, et al. Field measurement and analysis on mechanical response of asphalt pavement with flexible base course in service[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(4): 11-21, 40.

[16] 沈士蕙,张志栋.一种基于车辙试验仪的沥青混合料疲劳性能测试方法:CN110501243A[P].2022-04-05.
SHEN S H, ZHANG Z D. Asphalt mixture fatigue performance test method based on rutting tester: CN110501243A[P]. 2022-04-05.

[17] 吕松涛,刘超超,屈芳婷,等.沥青混合料疲劳性能试验与表征方法综述[J].中国公路学报,2020,33(10):67-75.
LÜ S T, LIU C C, QU F T, et al. Test methods and characterization of fatigue performance of asphalt mixtures: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 67-75.

[18] 中华人民共和国交通运输部.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社,2017.
Ministry of Transport of The People's Republic of China. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.

[19] 聂忆华,张起森.HMA疲劳极限存在性及其确定方法研究[J].中外公路,2007,27(5):191-194.
NIE Y H, ZHANG Q S. Study on the existence of HMA fatigue limit and its determination method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(5): 191-194.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net