

温拌剂及沥青类型对混合料动态模量的影响研究

宋云连¹, 蒋宇^{1*}, 刘恒²

(1. 内蒙古工业大学 内蒙古自治区土木工程结构与力学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 内蒙古自治区交通建设工程质量监督局, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:通过不同温度及加载频率下的动态模量试验,研究分别掺入 RH 型、Evo 型温拌剂的基质沥青及 SBS 改性沥青拌和形成的混合料的动态力学性能。同时根据时温等效原理,确定参考温度下的位移因子,通过 Sigmoidal 函数拟合了温拌基质沥青混合料、温拌 SBS 改性沥青混合料的动态模量主曲线。结果表明:① 不同温度及加载频率下,温拌 SBS 改性沥青混合料动态模量及相位角的分布较温拌基质沥青混合料集中,即温拌 SBS 改性沥青混合料性能较稳定;② 由 50 ℃ 车辙因子、0.01 Hz 时参考温度为 20 ℃ 的动态模量主曲线可知:掺入温拌剂,基质沥青混合料高温性能提高,SBS 改性沥青混合料高温性能下降;③ 综合考虑环境保护、力学性能,推荐基质沥青混合料中使用 RH 型温拌剂,SBS 改性沥青混合料中使用 Evo 型温拌剂。

关键词:温拌沥青混合料; 动态模量; 相位角; 位移因子; 主曲线

中图分类号: U414

文献标志码: A

在以层状体系理论为基础的沥青路面设计方法中,材料设计参数为路面设计研究重点,其大小对路面设计结果影响很大。考虑到沥青路面受到移动的车辆荷载作用,而动态模量能较好地反映沥青路面实际工况,引起了专家学者广泛的关注。陈磊磊等^[1]通过 SPT 试验研究了频率、温度两因素对环氧沥青混合料动态模量的影响,并构建了 20 ℃ 的动态模量主曲线;唐培培等^[2]对掺加不同温拌剂的 SBS 改性沥青混合料在不同温度及频率下的动态模量及相位角研究,结果表明随温度的降低及频率的增大,动态模量均呈现增大的趋势;侯睿等^[3]对不同硫磺掺量的沥青混合料开展动态力学性能研究,结果表明不同硫磺掺量的沥青混合料黏弹性及感温性在不同条件下动态力学性能均发生了不同变化;赵延庆等^[4]利用 SPT 简单性能试验机测量了 SMA-13 与 Superpave-20 两种级配沥青混合料在不同温度及频率下的动态模量,同时根据时温等效原理,通过非线性最小二乘拟合两种沥青混合料的动态模量主曲线及时温转化因子,并利用相同的时间-温度转化因子形成了相位角主曲线。

综上所述,专家学者主要针对试验温度、加载频率两方面对沥青混合料动态模量及相位角的影响进行研

究,但对不同类型温拌剂及沥青构成混合料的动态模量研究较少。因此,对分别掺入 RH、Evo 型温拌剂形成的温拌基质沥青混合料以及温拌 SBS 改性沥青混合料在不同试验温度和加载频率下的动态模量以及相位角进行分析与研究,同时为研究其动态模量主曲线,根据时温等效原理得到位移因子,最终通过 Sigmoidal 函数拟合温拌基质沥青、温拌 SBS 改性沥青混合料的动态模量主曲线。

1 沥青混合料设计

1.1 温拌剂

温拌剂分别选用有机降黏剂 RH 和表面活性剂 Evo,其主要技术指标如表 1 所示。

1.2 沥青

沥青分别为 AH-90[#] 基质沥青(JZ)和 SBS 改性沥青(SB)。温拌沥青是在两种沥青中分别加入推荐掺量为沥青质量 3% 的 RH 型温拌剂和 0.6% 的 Evo 型温拌剂后搅拌 30 min,得到基质-RH 沥青(JR)、基质-Evo 沥青(JE)、SBS-RH 沥青(SR)和 SBS-Evo 沥青(SE),其主要技术指标见表 2。

收稿日期:2020-09-28

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助项目(编号:2019MS05060);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(编号:NJZZ20064)

作者简介:宋云连,女,博士,教授。E-mail:751904198@qq.com

*** 通信作者:**蒋宇,男,硕士,助理工程师。E-mail:jiangyusx@163.com

表 1 温拌剂主要技术指标

温拌剂类型	外观(25℃)	黏度(20℃)/ (MPa·s)	密度(25℃)/ (g·cm ⁻³)	胺值/ (mgKOH·g ⁻¹)	Ash/ %	含水率/ %	pH	水溶性
RH	白色粉末状固体	—	0.894	—	0	0.1	—	不溶
Evo	深黄褐色液体	720	0.916	573	0	20.0	3.4	可溶

表 2 沥青主要技术指标

沥青类型	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度/ cm	闪点/ ℃
JZ	90.83	46.30	25.37	308
JR	106.30	43.31	59.73	—
JE	97.03	46.45	49.13	—
SB	69.90	67.95	34.80	332
SR	78.60	69.35	37.67	—
SE	65.70	66.85	35.63	—

注:延度试验过程中,基质沥青为 10℃,SBS 改性沥青为 5℃^[5]。

1.3 沥青混合料配合比设计

试验采用的粗、细集料为玄武岩和石灰石矿粉^[6]。沥青混合料采用 AC-13 密级配,其集料比例为 1[#]料(10~15 mm):2[#]料(5~10 mm):3[#]料(0~5 mm):矿粉=25%:32%:38%:5%。通过最佳油石比设计,确定基质沥青混合料油石比为 5.2%,SBS 改性沥青混合料油石比为 5%。

2 试验原理及方法

2.1 拌和温度确定

基于等效原理,以未添加温拌剂的热拌沥青混合料(HMA)标准马歇尔击实测得的体积参数为依据(等空隙率),测定不同拌和温度下温拌沥青混合料(WMA)的空隙率,当某一温度下 WMA 与 HMA 的空隙率同时达到设计空隙率(4%),此刻的拌和温度即为 WMA 的拌和温度。图 1 为添加温拌剂后的沥青混合料空隙率与拌和温度的变化曲线。由此可知,JR 和 JE 拌和温度为 135℃,SR 和 SE 拌和温度为 155℃。

2.2 沥青混合料动态模量试验

2.2.1 试件制作

由旋转压实仪成型 150 mm(直径)×170 mm(高),然后经过钻芯取样成 100 mm(直径)×170 mm(高)的试件,最后用切割机对两种试件的上下两面切割成型。最终的试件尺寸为 100 mm(直径)×150 mm(高)的圆柱体试件。

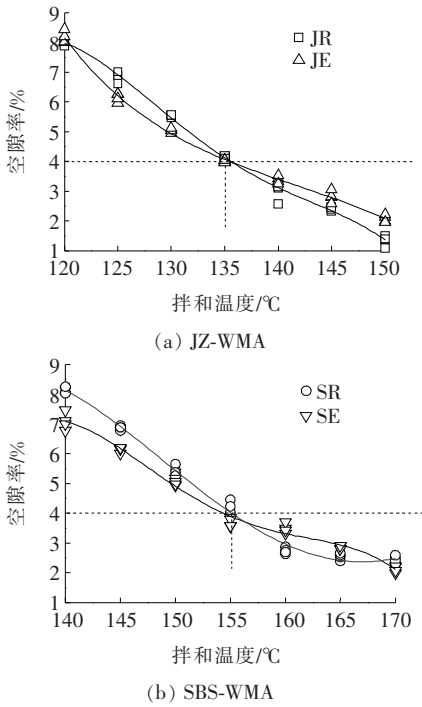


图 1 温拌沥青混合料空隙率随拌和温度变化曲线

2.2.2 单轴压缩动态模量试验

试验采用 UTM-100 万能试验机进行测试,试验温度分别采用 5℃、20℃、35℃、50℃,每个温度下采用 7 个加载频率:0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、5 Hz、10 Hz、20 Hz、25 Hz。试验采用无围压的方式进行,在目标加载频率和温度下,采用应力控制方式对试件施加不间断正弦函数荷载,从而得到动态模量和相位角。

2.3 时温等效原理

沥青混合料的动态力学性能虽然受荷载作用时间和温度的影响较大,但在一定的温度区域内可以通过改变温度或者延长得到相同的试验结果。时温等效原理表明:不同温度下,力学性能参数随荷载频率的变化曲线,可以平移到同一温度下(参考温度),形成一条光滑的曲线,这条曲线被称为主曲线。利用平移得到的主曲线变化规律,可以对该黏弹性材料因其他条件的限制无法直接测得的力学性能(如动态模量)进行分析预测。

选用的主曲线公式为 Sigmoidal 函数,表达为:

$$\lg E = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\lg f_r)}}$$

(1)

式中: E 为动态模量(MPa); f_r 为参考温度下的频率(缩减频率); δ 、 α 、 β 、 γ 为回归系数; δ 为动态模量最小值; $\delta + \alpha$ 为动态模量最大值; β 、 γ 为 Sigmoidal 函数的形状参数。

构建主曲线的关键是位移因子,首先通过位移因子求得在参考温度下的缩减频率,然后根据缩减频率与动态模量或相位角的关系图,运用函数拟合得到主曲线。具体步骤如下:

- (1) 在双对数坐标中,绘制不同温度下动态模量或相位角随频率的变化曲线。
- (2) 将不同温度下的动态模量形成平移主曲线

(横向平移使尽可能多的点重合),平移距离就是各个温度下的时温转化因子 α_T ,即位移因子。

在双对数坐标系下,位移因子的计算式为:

$$\alpha_T = \lg(f_r/f)$$

(2)

式中: f 为试验加载频率(Hz)。

由位移因子计算得到平移后的主曲线数据,最后对平移主曲线数据,按照 Sigmoidal 函数进行拟合得到动态模量主曲线。

3 试验结果与分析

3.1 沥青类型对温拌沥青混合料动态模量的影响

运用函数拟合得到动态模量主曲线如图 2 所示。

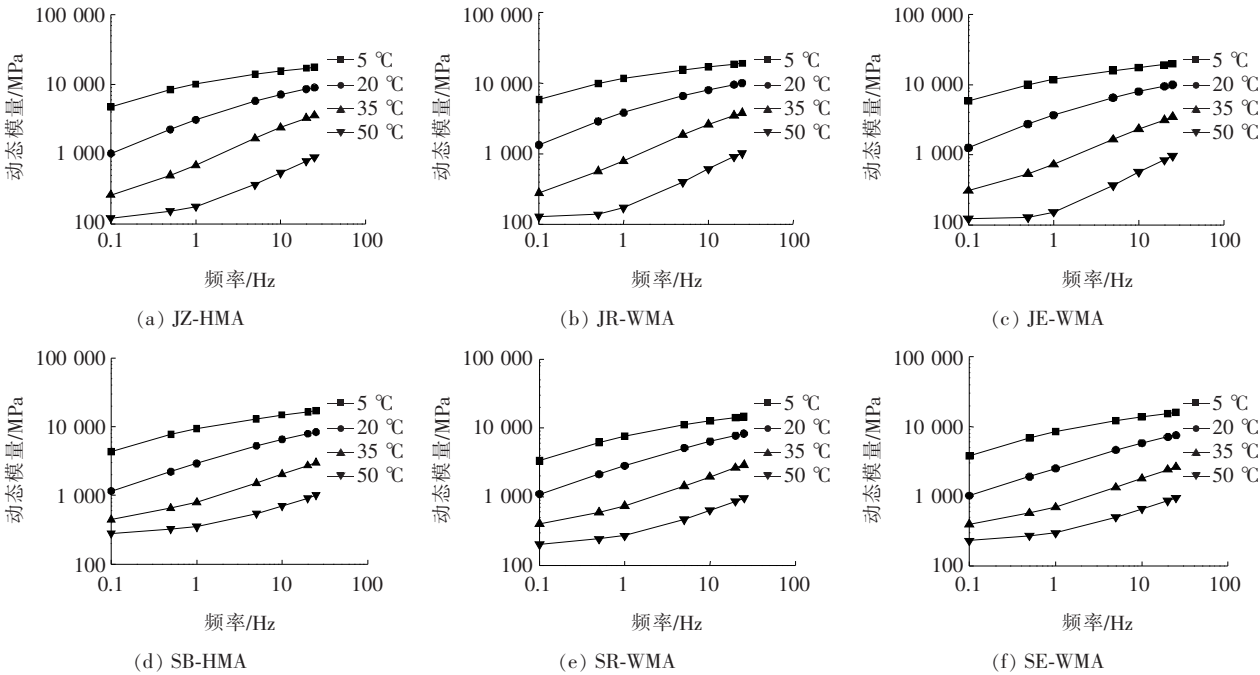


图 2 沥青混合料动态模量曲线

由图 2 发现:无论是否添加温拌剂,沥青混合料的动态模量随温度的升高逐渐降低,而且下降幅度逐渐减小。随频率的增大,动态模量逐渐增加,且不同温度下动态模量随频率变化的增加幅度不同。5 °C 和 20 °C 在 0.1~1 Hz 时,动态模量增加较快,较高频率时增长幅度较平缓;35 °C 和 50 °C 下,频率为 1~25 Hz 时,动态模量增加较快,较低频率时增长幅度平缓。主要原因是在低温高频下沥青混合料接近弹性,此时动态模量数值接近沥青混合料弹性模量数值;而高温低频下沥青混合料中的胶结料由于软化,黏聚力逐渐消散,矿料间的嵌挤作用产生的摩阻力占主导地位。同时发

现所有的基质沥青混合料动态模量比 SBS 改性沥青混合料分布区域较分散,说明 SBS 改性沥青混合料较基质沥青混合料性能好。

3.2 沥青类型对温拌沥青混合料相位角的影响

根据试验结果整理得到沥青混合料相位角曲线如图 3 所示。

由图 3 发现:混合料的相位角在低温状态下(5 °C)随着频率的增加逐渐减小;20 °C 时,JZ-HMA、JR-WMA、JE-WMA 的相位角随频率增加逐渐减小,而 SB-HMA、SR-WMA、SE-WMA 的相位角随频率增加先稳定增加随后减小;35 °C 时,JZ-HMA、JR-WMA、

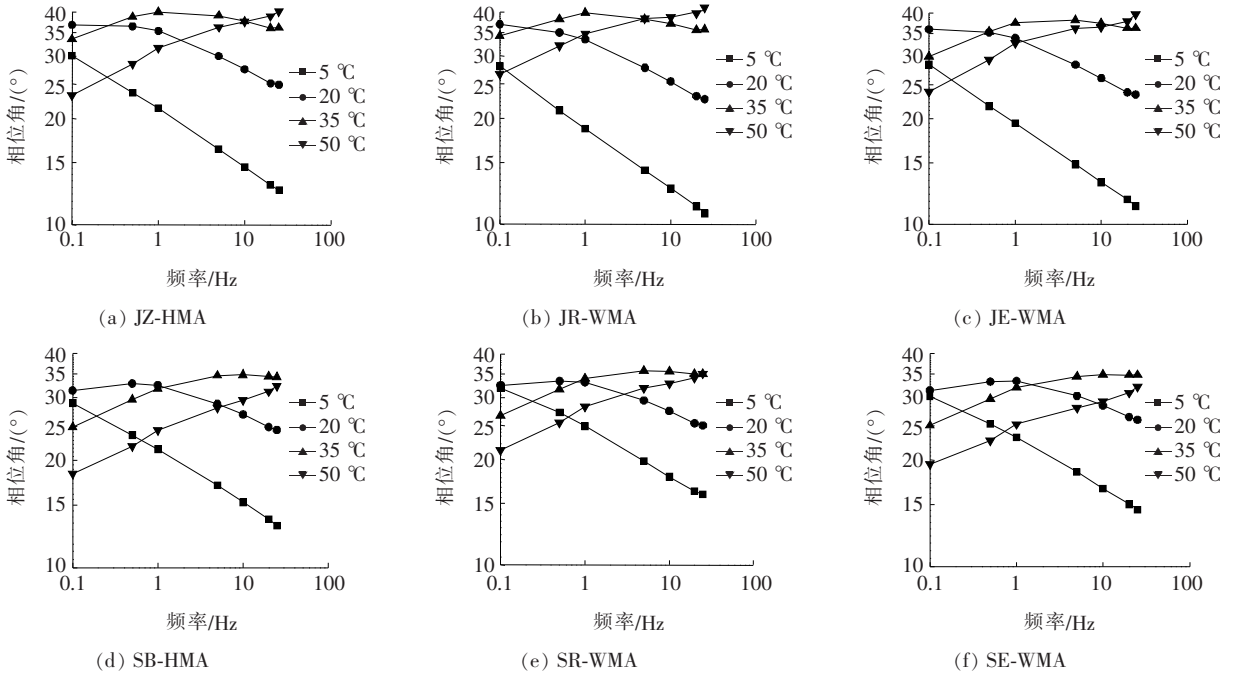


图 3 沥青混合料相位角曲线

JE-WMA 随着频率的增加,相位角先增加达到峰值,后逐渐减小,且在较低频率下易达到峰值,而 SB-HMA、SR-WMA、SE-WMA 的相位角随频率增加逐渐增加;50 °C 时,相位角随频率的增加逐渐增加。分析上述现象产生原因同 3.1 节所述。且从整体上来看,所有的基质沥青混合料相位角分布较 SBS 改性沥青混合料分散,即 SBS 改性沥青混合料性能比较稳定。

3.3 温拌沥青混合料车辙变形分析

车辙是在行车荷载重复作用下,沥青路面产生累积不可恢复的变形。NCHRP9-19 提出采用 10 Hz 下的沥青混合料车辙因子 $|E^*|/\sin \delta^{[7-8]}$ 表示高温抗车辙能力,其值越大,材料高温性能越好,主要对 20 °C、35 °C、50 °C 的车辙因子进行分析,结果见图 4。

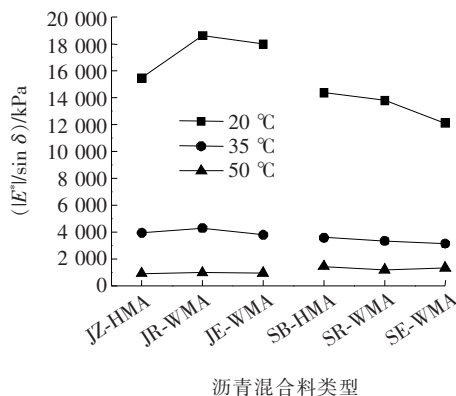


图 4 温拌沥青混合料车辙因子

由图 4 可知:不同温度下温拌沥青混合料的抗车辙能力不同。在 20 °C 时,SBS 沥青混合料的车辙因子均小于基质沥青混合料的车辙因子,其中基质沥青混合料中,加入温拌剂提升了沥青混合料的抗车辙能力,且 JR-WMA 的车辙因子最大;而在 SBS 改性沥青混合料中,发现加入温拌剂后其车辙因子减小,即降低了其高温性能。

在 35 °C 时,在基质沥青混合料中加入 RH 型温拌剂会提高抗车辙能力,而 Evo 型温拌剂会降低其高温性能;在 SBS 改性沥青混合料中加入温拌剂会降低抗车辙能力,其中 RH 型温拌剂优于 Evo 型温拌剂。

在 50 °C 时,基质沥青混合料的车辙因子排序为:JR-WMA(975.882 MPa)>JE-WMA(952.974 MPa)>JZ-HMA(889.536 MPa);SBS 改性沥青混合料的车辙因子排序为:SB-HMA(1 422.377 MPa)>SE-WMA(1 342.456 MPa)>SR-WMA(1 172.337 MPa)。说明 50 °C 时,SBS 改性沥青混合料抗车辙能力整体上优于基质沥青混合料;SBS 改性沥青混合料中加入温拌剂会降低抗车辙能力,且加入 RH 型温拌剂会使高温性能降低更明显;在基质沥青混合料中加入温拌剂会提高抗车辙能力,其中 RH 型温拌剂优于 Evo 型温拌剂。

同时发现,温度的变化对车辙因子影响显著,20 °C 车辙因子为 35 °C 车辙因子的 3~4 倍,35 °C 车辙因子为 50 °C 车辙因子的 2~3 倍。究其原因,主要是沥青混合料中的胶结料随着温度的变化导致其黏弹性发

生改变所致。

3.4 不同温拌沥青混合料动态模量主曲线

通过 2.3 节所述的位移因子求解方法,计算沥青混合料在参考温度(20℃)下的位移因子,如图 5 所示,用位移因子可以获得参考温度下的主曲线数据^[9-14],按照 Sigmoidal 函数进行拟合得到动态模量主曲线,如图 6、7 所示。

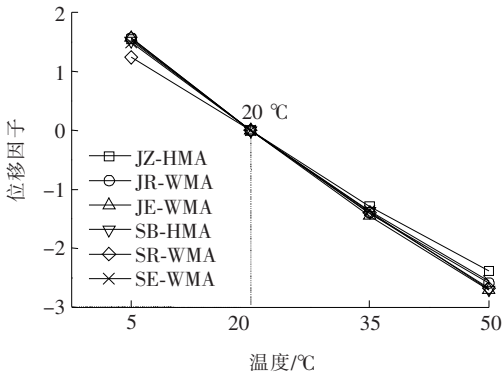


图 5 参考温度下不同温度的位移因子

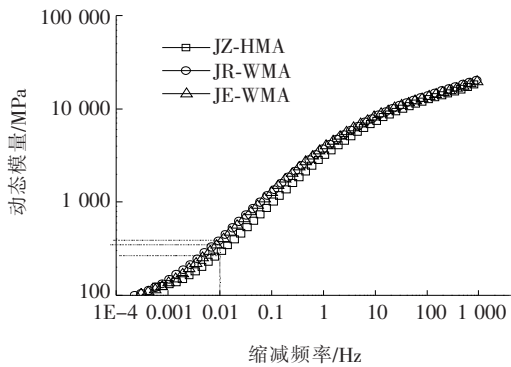


图 6 基质沥青混合料动态模量主曲线

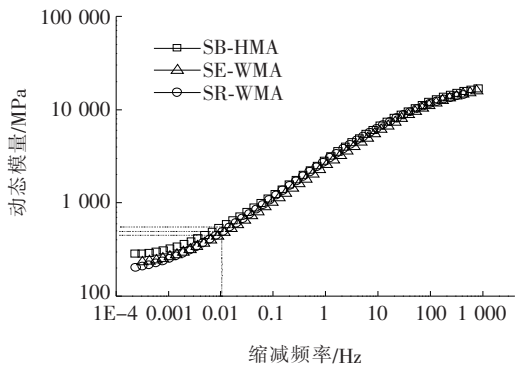


图 7 SBS 改性沥青混合料动态模量主曲线

由图 6、7 可知:参考温度为 20℃时的动态模量随缩减频率的变化呈 S 形变化规律。高频下随频率增加动态模量先增加后趋于平稳,在某一高频率下沥青混

合料的动态模量最后趋于一个稳定值,此时代表沥青混合料接近弹性状态。低频下随缩减频率的减小动态模量先减小后趋于稳定,稳定状态时各混合料的胶结料发生软化,此时动态模量主要受矿料间的嵌挤作用影响。

各沥青混合料在 20℃的主曲线上,0.01 Hz 对应的动态模量相差不大,为 320~420 MPa。根据上述分析,可以将主曲线上缩减频率为 0.01 Hz 时对应的动态模量,作为评价高温性能指标。由图 6 可知:JZ-HMA 主曲线动态模量为 272.42 MPa, JR-WMA、JE-WMA 的主曲线动态模量分别为 360.19 MPa、350.98 MPa。表明添加温拌剂增加了基质沥青混合料的高温稳定性。分析图 7 可知:SR-WMA 和 SE-WMA 的动态模量分别为 448.46 MPa、469.82 MPa,与 SB-HMA 动态模量 540.2 MPa 相比有所下降,即高温性能下降。

4 结论

(1) 在相同加载频率下,温拌沥青混合料动态模量随温度升高而减小;在相同试验温度下,随加载频率增加而增加;不同温度下,温拌沥青混合料相位角随加载频率的变化趋势各异,温拌基质沥青混合料相位角分布较温拌 SBS 改性沥青混合料分散。

(2) 由 50℃车辙因子以及 0.01 Hz 时参考温度为 20℃的动态模量主曲线可知:温拌 SBS 改性沥青混合料优于温拌基质沥青混合料的高温性能,在 SBS 改性沥青混合料中加入温拌剂会降低高温性能,但是 SE-WMA 与 SB-WMA 的高温性能较接近。而在基质沥青混合料中加入温拌剂会提高高温性能,其中 RH 型温拌剂优于 Evo 型温拌剂。

(3) 在考虑环境保护、力学性能的基础上,推荐基质沥青混合料中使用 RH 型温拌剂, SBS 改性沥青混合料中使用 Evo 型温拌剂。

参考文献:

[1] 陈磊磊,钱振东.基于简单性能试验的环氧沥青混合料动态模量研究[J].建筑材料学报,2013,16(2):341—344.
[2] 唐培培,申爱琴,付建村.掺不同温拌剂沥青混合料的动态模量及疲劳特性[J].建筑材料学报,2016,19(3):591—595.
[3] 侯睿,郭忠印.硫磺改性沥青混合料的动态模量试验分析[J].建筑材料学报,2013,16(3):525—528.
[4] 赵延庆,唐积民,白龙.利用沥青混合料复数模量确定松弛模量研究[J].建筑材料学报,2012,15(4):498—502.

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.042

高黏度改性沥青的研制及其 PAC-13 路用性能研究

郭小圣, 傅丽, 郭皎河, 王珂琦

(中国石化大连石油化工研究院, 辽宁 大连 116045)

摘要:为研制满足 JTG/T 3350-03-2020《排水沥青路面设计与施工技术规范》技术要求的高黏度改性沥青,以中国石化“东海牌”沥青为基质料,通过控制变量法研究改性剂、稳定剂等对高黏度改性沥青性能的影响规律,并通过均匀设计试验对沥青改性工艺进行优化研究,最后采用 PAC-13 级配评价高黏度改性沥青的路用性能。结果表明:采用“东海牌”沥青通过“湿法”工艺制备的高黏度改性沥青可完全满足指标要求,其 60℃ 动力黏度大于 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 且可根据需求进行定制调控,同时其 170℃ 布氏黏度较低,利于混合料拌和均匀;自主研发的 MAW-2 稳定剂不仅可使高黏度改性沥青储存稳定性满足指标要求,还可与聚合物改性剂协同提升沥青的动力黏度及其高温性能;当混合料空隙率为 20.3% 时,其马歇尔稳定度可达到 12.7 kN,20℃ 肯塔堡飞散损失和浸水飞散损失均较低,具有良好的高温稳定性,可有效防止排水沥青路面发生石料飞散等问题。

关键词:高黏度改性沥青; 60℃ 动力黏度; 稳定剂; 排水沥青混合料; PAC-13

中图分类号: U414

文献标志码: A

海绵城市是新一代城市雨洪管理概念,通常采用高空隙率排水沥青路面,将降雨透入到排水功能层横向排出并选择性收集储存,进而减少地表径流,最大限度地留住雨水,使城市在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”。目前广州、深圳等多个城市正大力推进海绵城市建设^[1]。国内外大量工程实践表明,沥青胶结料的性能对排水沥青路面的质量和耐久性具有决定性作用。高黏度改性沥青作为排水沥青路面铺设中的关键材料,可以提高沥青混合料的抗车辙能力、抗水损坏能力和抗飞散病害能力,因此可以延长排水沥青路面的使用寿命。

JTG/T 3350-03-2020《排水沥青路面设计与施

工技术规范》^[2]作为公路工程行业推荐性标准,已于2020年9月1日开始施行。该规范对高黏度改性沥青提出了更为严苛的技术要求,其中重要变化包括将60℃动力黏度最低要求提升至 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,并增加了储存稳定性离析48 h 软化点差不大于 2.5℃ 等指标要求(主要指标详见表1),这对过度依赖聚合物、树脂等成本高、稳定性差的沥青黏度提升方法提出了挑战。高黏沥青直投剂(干法)虽具有方便施工应用的优点,但存在价格昂贵、掺量高、拌和不易均匀等问题,在一定程度上限制了其应用和推广。

研究采用“湿法”工艺,利用中国石化“东海牌”石油沥青为原料,基于自主研发的 MAW-2 稳定剂,通

- [5] 交通部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [6] 交通部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程: JTG E42-2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [7] 庄传仪. 基于加速加载响应的柔性基层沥青路面设计指标与参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [8] WANG Xinhao. Integrating GIS Simulation Models and Visualization in Traffic in Pact Analysis[J]. Computers Environment and Urban Systems, 2005, 29(4): 471-496.
- [9] 于雷, 郭朝阳, 陈小兵, 等. 橡胶沥青混合料动态模量及其

- 主曲线研究[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 203-207.
- [10] 张飞, 王岚, 邢永明. 温拌胶粉改性沥青混合料的动态模量[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 476-483.
- [11] 李彩霞. 高模量沥青性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 253-256.
- [12] 沈路. 半柔性复合混凝土动态模量主曲线研究[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 272-275.
- [13] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹力学原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [14] 黄筑江. 特立尼达湖沥青(TLA)改性沥青混合料的动态模量试验研究[J]. 中外公路, 2017, 37(3): 247-252.

收稿日期: 2021-09-16

作者简介: 郭小圣, 男, 硕士, 助理研究员. E-mail: guoxiaosheng, fshy@sinopec.com