

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.056

PR-Module 高模量沥青混合料动态模量— 温度分布研究

赵玉肖¹, 赵玉冕², 赵毅^{3,4*}

(1. 河北交通职业技术学院 土木工程系, 河北 石家庄 050091; 2. 中建路桥集团高速公路养护有限公司;
3. 重庆交通大学 材料科学与工程学院; 4. 重庆市智翔铺道技术工程有限公司)

摘要:为了研究 PR-Module 高模量沥青混合料的动态模量变化规律、时温等效下动态模量主曲线和沥青混合料层动态模量沿深度(温度)的分布规律,以 SK-70[#] 作为基质沥青,选用 PR-Module 作为改性剂制备高模量沥青混合料,通过简单性能试验(SPT 试验)测试了 PR-Module 掺量为 0%、0.3%、0.5% 和 0.7% 时沥青混合料的动态模量,并对比分析了 PR-Module 添加量、温度、加载频率对沥青混合料动态模量的影响;依据时温等效原理,通过非线性最小二乘法拟合得到高模量沥青混合料动态模量的主曲线方程。以抚吉高速公路为例,建立了行驶速度为 60、80、100、120 km/h 时高模量沥青混合料层动态模量沿深度(温度)的分布曲线。结果表明:不同 PR-Module 掺量的高模量沥青混合料的动态模量试验结果具有较好的一致性;建立了参考温度为 20 ℃ 时 PR-Module 高模量沥青混合料的动态模量主曲线方程。AC-25 型高模量沥青混合料在不同温度区间相比普通沥青混合料动态模量的增长率为 37%~63%。

关键词: PR-Module 高模量沥青混合料; 动态模量; 时温等效原理; 温度分布

高模量沥青混合料(High Modulus Asphalt Mixture, 简称 HMAM)是一种模量高、抗永久变形性能和抗疲劳性能优良的新型路面材料。高模量沥青混合料的概念最早由法国提出,即动态模量 E^* (15 ℃, 10 Hz) 不小于 14 000 MPa 沥青混凝土。材料模量是路面结构力学分析的重要参数之一。沥青混合料动态模量能够较好地反映行驶车辆作用于路面结构时材料模量的大小,较为真实地反映了路面结构动态力学特性。但沥青路面沥青混合料层的动态模量不是固定不变的,材料动态模量的大小与加载频率即行驶速度、环境温度等因素密切相关。沥青路面结构不同层位的温度分布存在明显差异,从而影响材料动态模量的分布,因此,沥青路面结构力学分析需了解沥青混合料层动态模量沿深度(温度)的分布规律。

该文以 SK-70[#] 道路石油沥青作为基质沥青,选用 PR-Module 作为改性剂制备高模量沥青混合料,

以简单性能试验研究高模量沥青混合料动态模量规律,根据时温等效原理建立动态模量主曲线方程;以江西抚(州)吉(安)高速公路为依托,根据实测沥青混合料层温度沿深度的分布,研究不同行驶速度和不同温度区间下沥青混合料层动态模量沿深度(温度)的变化规律,为高模量沥青混合料路面结构设计参数和混合料性能评价指标提供参考。

1 动态模量试验

1.1 试验材料

试验采用 SK-70[#] 道路石油沥青作为基质沥青,其技术指标检测结果如表 1 所示。集料采用石灰岩集料。研究表明:沥青路面永久变形主要位于面层,且集中于中下面层。因此,高模量沥青混合料的级配类型选取为 AC-20 和 AC-25。矿料级配曲线见图 1。

收稿日期:2019-12-02(修改稿)

基金项目:河北省交通运输厅科技项目(编号:QC2018-3);中国博士后科学基金资助项目(编号:43XB3787XB);江西省交通运输厅重点科技项目(编号:2012C0025)

作者简介:赵玉肖,女,教授。

* 通信作者:赵毅,男,博士(后),副教授, E-mail:1585513635@qq.com

表1 沥青技术指标检测结果

检测项目	单位	检测结果	技术要求
针入度(25℃,100g,5s)	0.1 mm	74	60~80
延度(15℃,5cm/min)	cm	>150	≥100
软化点 $T_{R\&B}$	℃	52	≥45
针入度比	%	≥61	72
RTFOT 老化后延度(15℃)	cm	≥15	>100
残留物 质量损失	%	≥±0.8	0.2

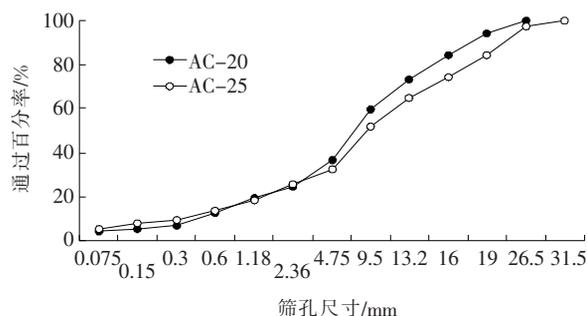


图1 矿料级配曲线

1.2 试验方案

选取法国产 PR-Module 作为高模量沥青混合料添加剂,该添加剂为颗粒状高分子物体、外观颜色呈灰黑色、略有刺激性气味,直径约为 5 mm,密度为 0.93~0.97 g/cm³,熔点为 175℃,实物形状如图 2 所示。



图2 PR-Module 改性剂

根据马歇尔试验确定高模量沥青混合料拌和工艺参数,如表 2 所示。动态模量试验圆柱体试件旋转压实成型,试件尺寸大小:直径为 100 mm、高为 150 mm。选用 SHRP 推荐的混合料基本性能试验仪(SPT 试验仪)进行动态模量试验。

PR-Module 掺量为 0%、0.3%、0.5%、0.7%,其对应的高模量沥青混合料简称为 HMAM-0、HMAM-0.3、HMAM-0.5、HMAM-0.7,最佳油石比分别为 4.0%、4.1%、4.2%和 4.3%。试验温度为 10、20、30、40℃;加载波形为正弦波;设计空隙率为 4.0%±2%。

表2 PR-Module 高模量沥青混合料制备参数

最佳干拌时间/s	最佳室内湿拌时间/s	最佳拌和温度/℃	击实温度/℃
20	200	175	162~163

1.3 动态模量试验结果

在不同温度和加载频率条件下,高模量沥青混合料和普通沥青混合料动态模量值存在一定差异,但总体变化趋势相对一致。PR-Module(简称 PR. M)掺量分别为 0、0.3%、0.5%、0.7%的 AC-25 以及 PR-Module 掺量为 0.5%的 AC-20 沥青混合料动态模量试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知:高模量沥青混合料和普通沥青混合料的动态模量均随温度升高而降低,随加载频率的增大而增大。高温条件下,沥青混合料动态模量下降较快,承载能力下降,路面容易出现车辙等病害;行驶速度越快,加载频率越大,路面材料动态模量越大,路面结构承载能力越强;PR. M 掺量是高模量沥青混合料动态模量重要影响因素之一。温度相同时,动态模量随着 PR. M 掺量的增加呈增长趋势。以加载频率为 20 Hz(相对于行驶速度为 100 km/h)的动态模量数据为例,选 HMAM-0 的动态模量作为基准,PR. M 掺量增加,其动态模量变化如表 3 所示。

当 PR. M 掺量为 0.7%时,高模量混合料的动态模量无论是在低温还是在高温条件下,其增长率均非常明显,尤其是高温时,其增长率是低温的 2~3 倍。PR. M 掺量为 0.5%时,高模量沥青混合料在高温特别是 40℃时,动态模量增长幅度也非常明显,增长 20%左右。PR. M 掺量越大其动态模量增加越大。综合考虑性能增长和工程经济性,该文推荐高模量沥青混合料 PR. M 掺量为 0.5%。

2 动态模量主曲线

沥青混合料是典型的黏弹性材料,其力学性能具有明显的温度和加载频率依赖性。根据时温等效原理,在高温、高频或低温、低频条件下,沥青混合料可以得到相同的力学性质。室内试验由于受到仪器设备或时间的限制,无法得到极端高温或高频等条件下沥青混合料的动态模量。沥青混合料动态模量主曲线是根据时温等效原理通过平移不同温度和加载频率下的模量曲线叠加形成一条的光滑曲线。利用主曲线即可预测沥青混合料室内试验条件无法测得的力学性质。

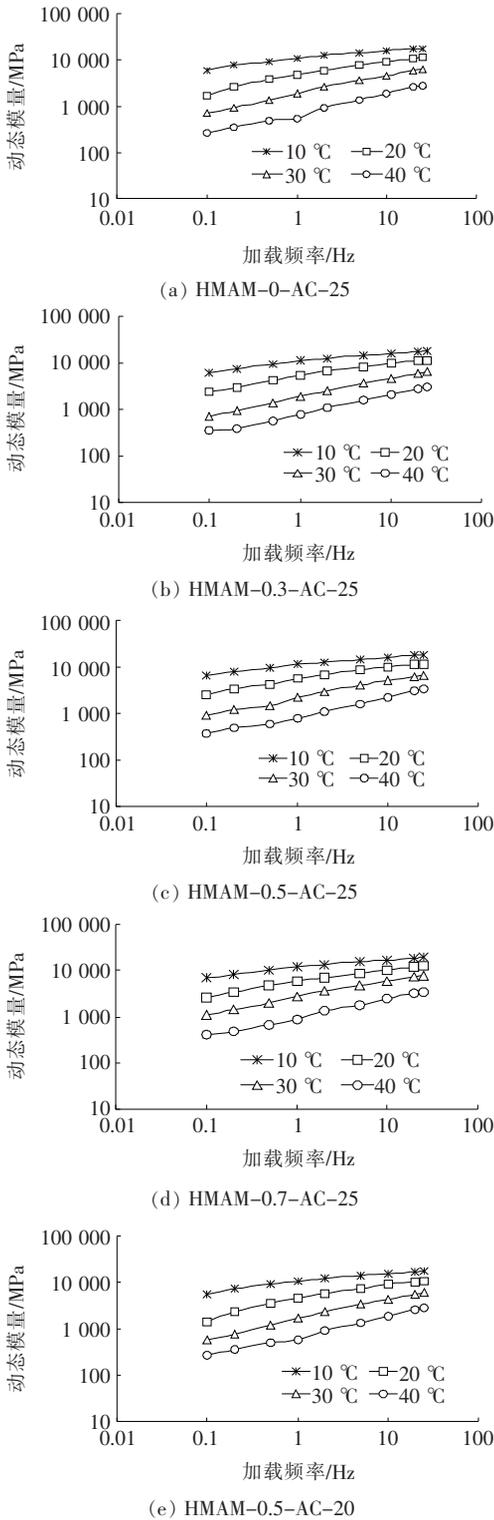


图 3 动态模量试验结果

通常运用非线性最小二乘法通过 S 形函数[西格摩德(Sigmoidal)函数]进行数值拟合得到动态模量主曲线。动态模量与加载频率的关系为:

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \log \omega_r}} \quad (1)$$

表 3 PR.M 掺量对 HMAM-AC-25 动态模量的影响

温度/ °C	动态模量增长率/%		
	HMAM-0.3	HMAM-0.5	HMAM-0.7
10	1.28	4.35	8.55
20	7.12	8.63	14.03
30	6.24	8.86	25.71
40	11.06	20.53	26.06

式中: $|E^*|$ 为动态模量(MPa); ω_r 为缩减频率(Hz); δ 为动态模量极小值(MPa); α 为动态模量极大值(MPa), δ, α 取决于骨料级配、沥青含量和空隙率; β, γ 为描述 S 形函数形状的参数。

时间-温度平移因子 $a(T)$ 为不同温度下沥青混合料动态模量曲线平移到参考温度下的距离。缩减频率、加载频率与平移因子的关系为:

$$\log \omega_r = \log \omega + \log a(T) \quad (2)$$

式中: ω 为加载频率(Hz)。

该文采用阿伦尼斯(Arrhenius)方程计算缩减频率,如式(3)所示:

$$\log \omega_r = \log \omega + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \quad (3)$$

式中: T_r 为参考温度(°C); T 为试验温度(°C); ΔE_a 为拟合系数。

将式(3)代入式(1),动态模量主曲线方程可表示为:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \left[\log \omega + \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \right]}} \quad (4)$$

将式(3)代入式(2)得平移因子 $a(T)$ 表达式为:

$$\log a(T) = \frac{\Delta E_a}{19.14714} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \quad (5)$$

一般选取 20 °C 作为参考温度 T_r 。根据式(4)利用 1stopt1.5 软件进行数值拟合,得到 PR.M 不同掺量下 AC-25、AC-20 沥青混合料动态模量主曲线方程拟合结果如表 4 所示。

由表 4 可知:高模量沥青混合料动态模量主曲线方程拟合相关系数之平方 R^2 接近于 1,表明其拟合效果良好。根据表 4 中拟合参数值和式(5)可得不同温度下高模量沥青混合料动态模量曲线的平移因子,如表 5 所示。

表 4 高模量沥青混合料动态模量主曲线方程拟合结果

混合料类型	δ	a	β	γ	ΔE_a	R^2
HMAM-0-AC-25	4.494	-3.470	1.213	0.515	197 997.133	0.99
HMAM-0.3-AC-25	4.392	-2.457	0.985	0.690	184 324.019	0.99
HMAM-0.5-AC-25	4.415	-2.561	1.045	0.639	188 226.579	0.99
HMAM-0.7-AC-25	4.490	-3.069	1.200	0.546	186 714.580	0.99
HMAM-0.5-AC-20	4.382	-2.382	0.959	0.718	178 613.141	0.99

表 5 高模量沥青混合料动态模量主曲线平移因子

混合料类型	参考温度/°C	$\log a(10)$	$\log a(20)$	$\log a(30)$	$\log a(40)$
HMAM-0-AC-25	20	1.246	0.000	-1.164	-2.253
HMAM-0.3-AC-25	20	1.160	0.000	-1.083	-2.097
HMAM-0.5-AC-25	20	1.184	0.000	-1.106	-2.142
HMAM-0.7-AC-25	20	1.175	0.000	-1.097	-2.125
HMAM-0.5-AC-20	20	1.124	0.000	-1.050	-2.032

参考温度为 20 °C 时,不同 PR.M 掺量的高模量沥青混合料动态模量主曲线如图 4、5 所示。

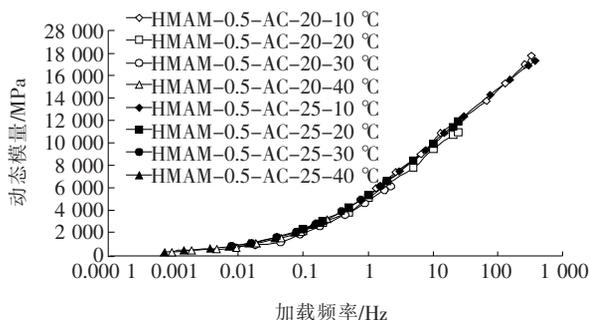


图 4 AC-20 和 AC-25 沥青混合料动态模量主曲线对比

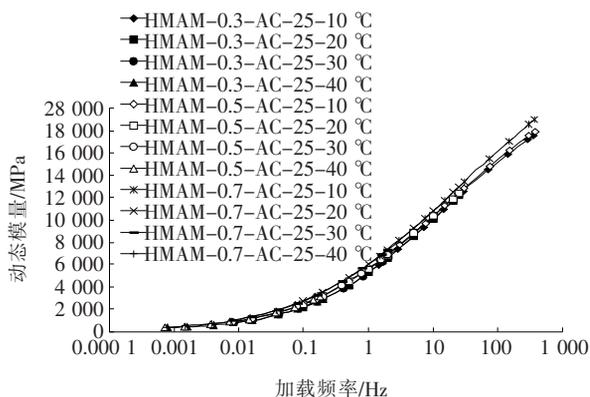


图 5 不同 PR.M 掺量的 AC-25 沥青混合料动态模量主曲线

3 沥青混合料层动态模量-温度分布

以抚吉高速公路为工程实例,高模量沥青路面试

验路路面结构模型如图 6 所示。通过实测或收集江西抚吉地区气象资料,并参考文献[12]、[13]推荐的沥青混合料层温度预估模型,计算得到抚吉高速公路沥青路面沥青混合料层温度沿深度的分布曲线如图 7 所示。路面材料表现的力学性能与现场路面荷载作用时间即车辆行驶速度密切相关。车辆行驶速度选取 60、80、100、120 km/h 4 种情况,按设计轴载为 100 kN,轮胎接地压强为 0.707 MPa 计算,轮胎每次对路表面的作用时间 t_0 表达式为:

$$t_0 = \frac{L}{v} = \frac{P}{n_w p B v} \tag{6}$$

式中: L 为接地长度(mm),取值 227 mm; P 为车辆轴重(kN); n_w 为轴的轮数(个),单轴轮数取 4; p 为接地压强(MPa); B 为接地宽度(mm),取 156 mm; v 为行车速度(km/h)。

荷载加载频率 f 可根据 Vander Pole 公式确定:

$$f = 1 / (2\pi t_0) \tag{7}$$

则车辆行驶速度 60、80、100、120 km/h 作用于路

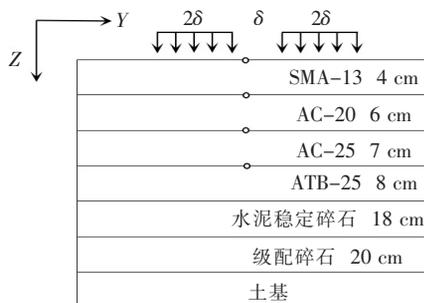


图 6 路面结构模型

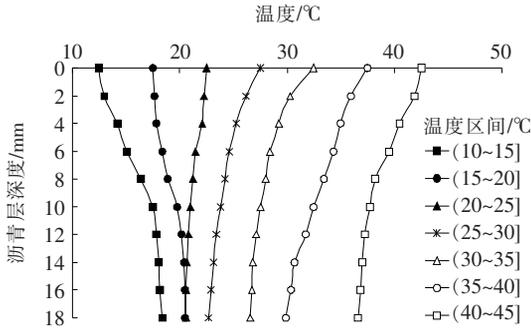


图 7 沥青路面沥青混合料层温度沿深度分布曲线

面的加载频率分别为 12、15、19 和 23 Hz。

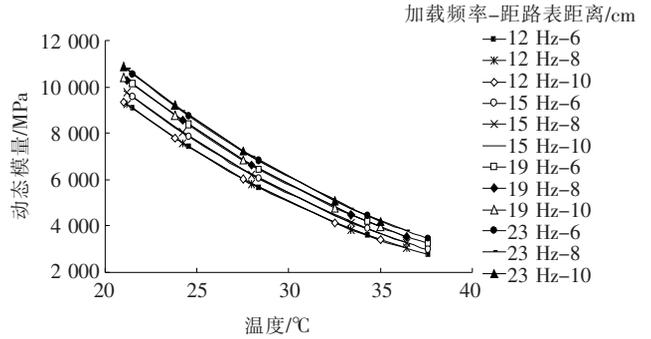
根据动态模量主曲线方程、不同行驶速度对应的加载频率和沥青混合料层温度沿深度的分布曲线,计算可得沥青混合料动态模量沿深度(温度)的分布。以 HMAM-0.5-AC-20、HMAM-0-AC-25、HMAM-0.5-AC-25 为例, HMAM-0.5-AC-20 为高模量沥青路面中面层,距路表 4~10 cm; HMAM-0-AC-25 和 HMAM-0.5-AC-25 均为普通沥青路面下面层和高模量沥青路面下面层,距路表 10~17 cm,以 2 cm 为间隔,对沥青混合料层分层分析,其动态模量-温度分布曲线如图 8 所示。

由图 8 可知: HMAM-0.5-AC-20、HMAM-0-AC-25 和 HMAM-0.5-AC-25 三种中、下面层沥青混合料动态模量在固定层位随温度升高而减小,随行驶速度(加载频率)增大而增大。根据动态模量主曲线计算得到的不同温度和不同行驶速度(加载频率)下沥青混合料动态模量-温度分布曲线呈线性关系。

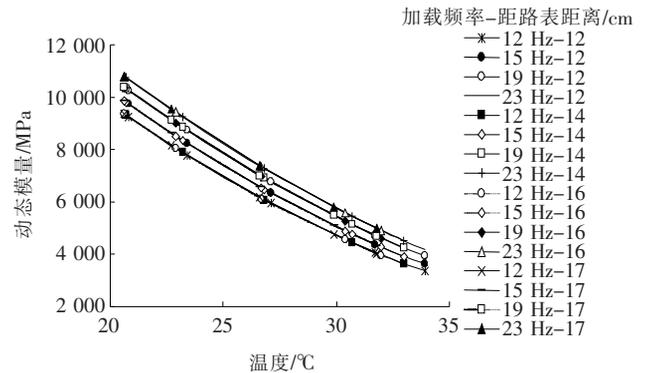
以车辆行驶速度 80 km/h 即加载频率为 15 Hz 为例,下面层 AC-25 型沥青混合料不同沥青层深度的动态模量分布如图 9 所示。由图 9 可知:在相同行驶速度(加载频率)下,以 2 cm 为间隔划分下面层,其不同沥青层深度的动态模量存在明显差异,以弹性层状连续理论体系进行沥青路面结构力学分析时,考虑不同沥青层动态模量沿深度(温度)分布,可更加真实地模拟沥青路面的受力状态。

以 AC-25 型沥青混合料为例,根据动态模量主曲线方程可计算高温时沥青混合料的动态模量,如图 10 所示。

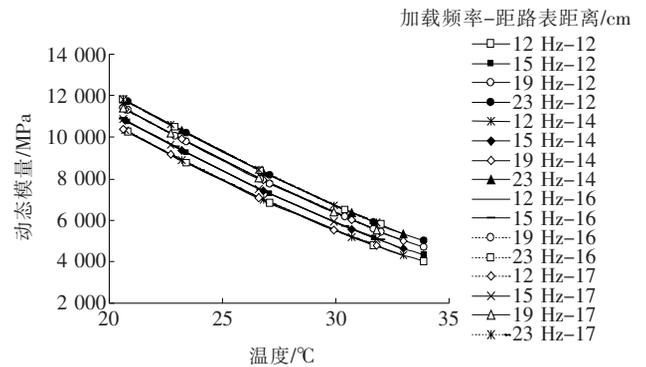
由图 10 可知:高温时, HMAM-0.5-AC-25 的动态模量远高于 HMAM-0-AC-25,提升 37%~63%,温度越高,提升效果越显著。可见, PR.M 改性剂可明显改善沥青混合料的高温稳定性能。



(a) HMAM-0.5-AC-20



(b) HMAM-0-AC-25



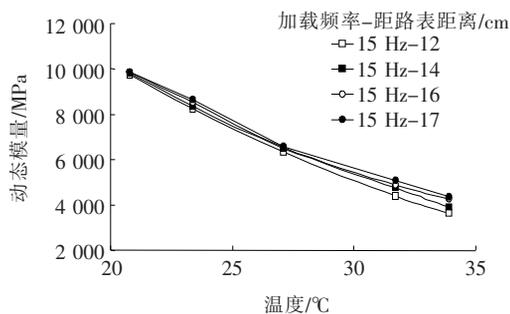
(c) HMAM-0.5-AC-25

图 8 动态模量-温度分布曲线

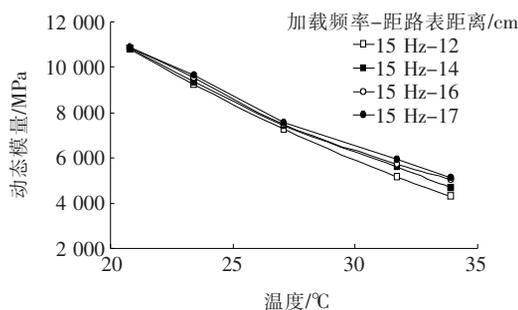
4 结论

(1) 不同 PR.M 掺量的高模量沥青混合料的动态模量试验结果具有较好的一致性。PR.M 掺量为 0.5% 时,高模量沥青混合料在高温时,其动态模量是普通沥青混合料的 1.2 倍。综合考虑性能增长和工程经济性,推荐高模量沥青混合料 PR.M 掺量为 0.5%。

(2) 运用时温等效原理、非线性最小二乘法拟合法以及 Sigmoidal 模型,建立了参考温度为 20 °C 时



(a) PR-M 掺量 0%



(b) PR-M 掺量 0.5%

图9 AC-25 动态模量-温度分布曲线(15 Hz)

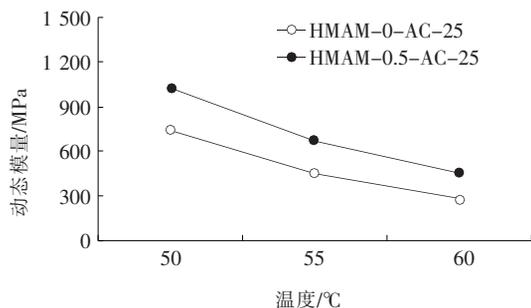


图10 15 Hz 时不同 PR-M 掺量沥青混合料高温状态动态模量-温度分布曲线

PR-Module 高模量沥青混合料的动态模量主曲线。选用动态模量主曲线可预测高温、高频或低温、低频等室内试验设备无法测试的动态模量值,为 PR-Module 高模量沥青路面的结构设计与使用寿命预估提供数据支撑。

(3) 以抚吉高速公路为例,建立了高模量沥青混合料动态模量-温度分布曲线。AC-25 型高模量沥

青混合料在不同温度区间比普通沥青混合料动态模量增长 37%~63%。由动态模量-温度分布曲线可推导出考虑不同行驶速度和沥青层温度分布时沥青混合料层的动态模量,为沥青路面使用寿命预估提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 徐建平,赵毅,梁乃兴,等.基于疲劳累积损伤的高模量沥青路面使用寿命预估[J].长安大学学报(自然科学版),2018(2).
- [2] 李彩霞.高模量沥青性能研究[J].中外公路,2018(5).
- [3] 赵毅,梁乃兴,秦旻,等.PR-Module 改性沥青混合料力学性能[J].长安大学学报(自然科学版),2015(4).
- [4] 周彦鋈.PR-P 高模量沥青混合料的动态模量及疲劳性能研究[J].中外公路,2017(6).
- [5] 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(2).
- [6] 赵毅,梁乃兴.全温域条件下沥青路面永久变形预估方法[J].哈尔滨工业大学学报,2018(11).
- [7] 黄新颜,沙爱民,邹晓龙,等.高模量沥青混合料的性能及适用场合[J].公路交通科技,2016(12).
- [8] American Association of State Highway Transportation Officials. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixture [R]. Washington D. C.: American Association of State Highway Transportation Officials,2005.
- [9] Christensen Jr D W, Pellinen T, Bonaquist R F. Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2003, 72:97-121.
- [10] 周键炜,王大明,白琦峰.沥青混合料动态模量主曲线研究[J].公路工程,2009(5).
- [11] 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(13).
- [12] 刚宪水.赣中地区沥青路面温度分布研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2014.
- [13] 宋小金,樊亮.沥青路面结构温度随深度变化规律研究[J].土木工程学报,2017(9).
- [14] 肖川,宋文霞,夏玮,等.动载作用下的半刚性基层沥青混凝土路面力学响应分析[J].公路,2014(7).