

文章编号:1671-6833(2016)05-0001-05

沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究

栗培龙, 饶文字, 冯振刚, 李建阁

(长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 动态模量是沥青混合料黏弹性动态响应的重要表征参数之一. 选择 3 种级配的沥青混合料进行不同试验条件的沥青混合料性能试验, 分析了沥青混合料动态模量随加载频率及试验温度的变化规律, 得到了不同加载频率下动态模量随试验温度的衰减模型; 分析了加载频率对动态模量衰减率的影响, 并讨论了动态模量移位因子, 绘制了沥青混合料动态模量主曲线. 结果表明, 随着加载频率的升高, 沥青混合料的动态模量逐渐增大, 但温度越高, 增加幅度越小; 动态模量随着温度的升高呈指数关系衰减, 加载频率越高, 衰减速率越大, 其中改性沥青混合料 AC-13 的动态模量随温度衰减速率最小; 在较高的温度下(如 55 ℃), 不同加载频率的动态模量差异很小. 动态模量主曲线和移位因子可以较好的描述加载频率和试验温度对沥青混合料黏弹性响应的影响.

关键词: 沥青混合料; 沥青混合料性能试验; 黏弹性动态响应; 动态模量; 主曲线

中图分类号: U414.75 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.001

0 引言

沥青混合料是一种典型的黏弹性材料, 其力学响应与沥青路面的车辙、开裂、疲劳等病害密切相关, 因此沥青混合料的力学响应越来越受到国内外道路领域研究者的关注^[1-2]. Little^[3]、Schwartz^[4]进行了沥青混合料的黏弹性响应分析; 栗培龙^[5]分析了试验温度、应力水平等因素对沥青混合料黏弹性响应的影响; 锁利军^[6]进行了基于第二主应力的沥青混合料力学性能试验研究, 但以上参数不能很好地反应沥青混合料的动态响应. NCHRP-29^[7]项目开发了能够反映黏弹性响应的沥青混合料性能试验(asphalt mixture performance test, AMPT)设备, 并提出了相应的评价参数, 其中动态模量是沥青路面设计中最重要参数之一, 也是沥青路面结构设计体系由静态向动态转变的关键. 万成^[8]进行了沥青混合料动态模量数值预测方法研究; 李强^[9]分析了受力模式对沥青混合料动态模量的影响; 赵薇^[10]进行了动态模量试验分析及 Witczak 预估模型的验证, 但沥青混合料

动态响应的影响因素及变化规律仍需进一步研究. 笔者采用 AMPT 设备测试沥青混合料在不同试验条件下的动态模量, 讨论试验温度和加载频率对沥青混合料黏弹性动态响应的影响, 并根据时间—温度等效原理, 得到了沥青混合料动态模量主曲线, 用以描述沥青混合料的动态响应.

1 试验材料

为了分析试验温度和加载频率对不同沥青混合料动态模量影响规律, 选择常用的 3 种沥青、3 种级配分别拌制组成差异显著的沥青混合料, 即采用 SK-SBS 改性沥青(SK-SBS)拌制 AC-13 混合料, 茂名 70#(MM)沥青拌制 AC-16 混合料, 中海 90#(ZH)沥青拌制 AC-20 混合料, 进行 AMPT 试验. 沥青性能指标和集料级配如表 1 和表 2 所示. 粗细集料选用角闪岩, 石灰岩矿粉用作填料, 采用马歇尔设计方法确定最佳沥青用量, 3 种沥青混合料的最佳油石比分别为 5.2%、4.9% 和 4.3%, 设计孔隙率 4.0%.

收稿日期:2016-04-22; 修订日期:2016-08-02

基金项目: 交通运输部基础 research 计划项目(2014319812151); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JQ7242); 国家自然科学基金资助项目(51008031)

作者简介: 栗培龙(1980—), 男, 江苏邳州人, 长安大学副教授, 工学博士, 从事路面材料与结构研究.

表 1 沥青基本指标

Tab.1 Properties of asphalt binders

试验项目		SK-SBS	MM	ZH
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)		1.031	0.986	1.005
针入度(25℃,5 s,100 g)/(1/10 mm)		69	74	86
软化点(R&B)/℃		75.0	49	45.5
延度(5 cm·min ⁻¹)/cm		42(@ 5℃)	154(@ 15℃)	>150(@ 15℃)
闪点/℃		298	283	272
针入度指数		-0.032	-0.495	-0.991
薄膜加热试验 (163℃,5 h)	质量损失/%	0.08	-0.35	0.04
	针入度比/%	65.0	68	76.3
	残留延度(5 cm·min ⁻¹)/cm	23(@ 5℃)	44.3(@ 15℃)	>150(@ 15℃)

表 2 矿料级配

Tab.2 Aggregate gradation

级配/mm	通过下列筛孔的通过率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13	—	—	100	95.6	72.7	40.4	30	19.4	14.5	10.3	8.1	5.1
AC-16	—	100	96.5	89	75	48	30	22	16	11	8	5
AC-20	100	99.2	90.2	76	62.2	37	26.7	18.3	12.6	8.1	5.9	5

2 试验方法

为了减小试模边界效应的影响并加速试验进程,首先采用 Troxler 4140 型旋转压实仪成型 $\phi 150\text{ mm}\times H\text{ }150\text{ mm}$ 的大型试件,再钻芯并切割得到尺寸为 $\phi 100\text{ mm}\times H\text{ }110\text{ mm}$ 的试件.采用 AMPT 试验设备,进行正弦波加载,应力水平为 50~150 微应变下对应的应力;试验温度分别为 5、15、25、45、55℃;荷载频率分别为 0.01、0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、25 Hz.

3 结果分析与讨论

3.1 试验条件对沥青混合料动态模量的影响

沥青混合料是典型的黏弹性材料,其黏弹性响应依赖于试验温度和加载频率.一般而言,温度

越低,沥青混合料越接近弹性材料;温度越高,越接近黏性材料^[11].不同温度和加载频率下,3 种沥青混合料的动态模量(E^*)随加载频率及温度变化如图 1、图 2 所示.

由图 1 可知,3 种沥青混合料在不同温度下动态模量随加载频率的增加而不断增大,但在不同频率范围内增大的幅度不同,在低频范围内动态模量急剧增大,即变化敏感度较大;而在 5~25 Hz 的高频范围内,动态模量增加缓慢.温度越高,沥青混合料的动态模量随加载频率的增加幅度越小,3 种沥青混合料的 45℃ 和 55℃ 动态模量随频率的变化不显著.可见,不管是基质沥青混合料还是改性沥青混合料,随着温度升高,沥青混合料的黏性表现充分,加载频率对动态模量影响越来越小.

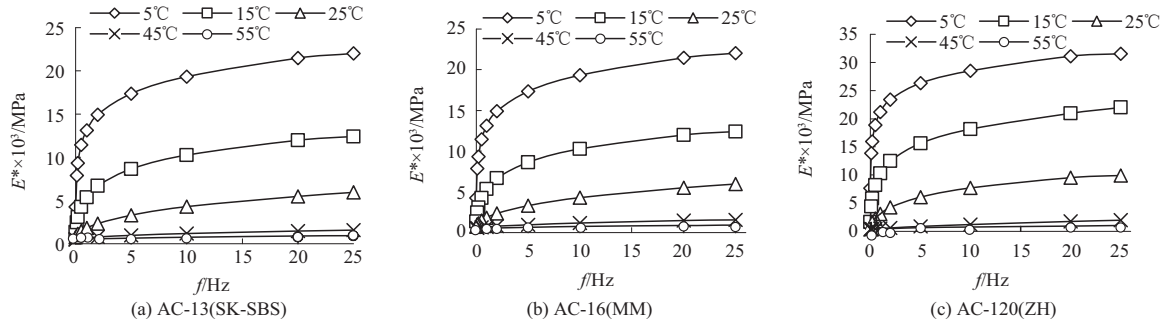


图 1 沥青混合料的动态模量随加载频率变化

Fig.1 Changes of dynamic modulus with loading frequency

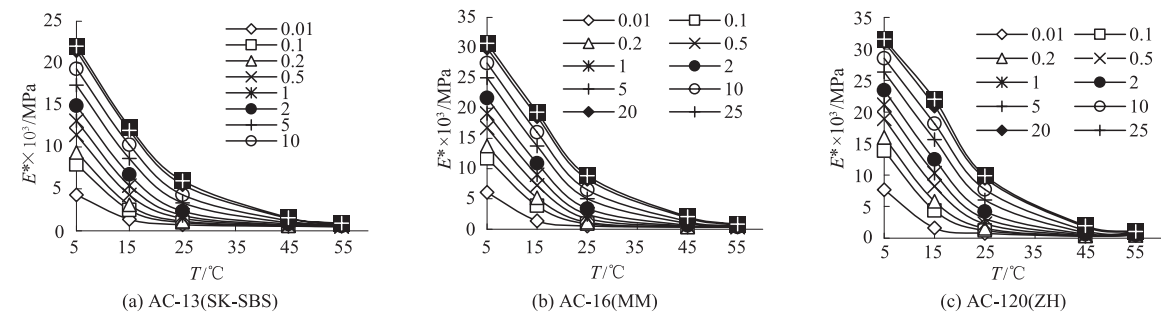


图 2 沥青混合料的动态模量随温度变化

Fig.2 Changes of dynamic modulus with temperature

由图 2 可知,3 种沥青混合料的动态模量变化趋势相同,随着温度升高逐渐衰减.但在相同试验条件下,不同混合料的动态模量存在较大差异,随着温度升高,不同加载频率的动态模量差异越来越小,当达到 55 ℃ 时动态模量趋于相同.不同加载频率下的动态模量随温度都呈指数模型衰

减,将试验测定的动态模量按照式 (1) 进行回归,相关系数 R^2 均达到 0.99 以上,回归模型列于表 3 中.

$$E^* = ae^{-T/k} + b. \tag{1}$$

式中: E^* 为动态模量,MPa; T 为试验温度,℃; a 、 k 、 b 均为回归参数.

表 3 动态模量与温度的关系回归模型

Tab.3 Regression model of dynamic moduli with temperature

频率/Hz	E^*		
	AC-13 (SK-SBS)	AC-16 (MM)	AC-20 (ZH)
0.01	$7\,775.0e^{-T/6.9} + 500.9$	$13\,462.1e^{-T/5.9} + 329.3$	$17\,353.7e^{-T/5.7} + 420.0$
0.1	$14\,369.3e^{-T/7.5} + 503.9$	$20\,982.7e^{-T/8.4} + 194.1$	$25\,132.1e^{-T/8.1} + 279.9$
0.2	$16\,444.0e^{-T/8.1} + 486.3$	$23\,393.0e^{-T/9.4} + 100.4$	$27\,156.2e^{-T/9.3} + 169.1$
0.5	$19\,050.8e^{-T/9.1} + 440.6$	$26\,927.6e^{-T/10.8} - 67.1$	$30\,030.8e^{-T/11.0} - 55.7$
1	$20\,972.9e^{-T/10.1} + 373.6$	$29\,708.6e^{-T/11.9} - 235.6$	$32\,270.8e^{-T/12.6} - 327.0$
2	$22\,883.3e^{-T/11.3} + 286.6$	$32\,666.9e^{-T/13.2} - 449.9$	$34\,540.3e^{-T/14.4} - 730.3$
5	$25\,450.9e^{-T/13.0} + 131.8$	$36\,363.5e^{-T/15.2} - 883.7$	$37\,698.4e^{-T/17.3} - 1\,561.4$
10	$27\,529.7e^{-T/14.5} - 55.8$	$39\,007.9e^{-T/17.1} - 1\,385.1$	$40\,496.4e^{-T/20.0} - 2\,537.9$
20	$29\,886.3e^{-T/16.1} - 282.4$	$41\,953.2e^{-T/19.5} - 2\,174.9$	$44\,137.5e^{-T/22.8} - 3\,791.5$
25	$30\,396.7e^{-T/16.7} - 380.6$	$42\,890.9e^{-T/20.3} - 2\,429.9$	$45\,070.3e^{-T/24.2} - 4\,420.1$

将模型参数 k 定义为动态模量衰减指数,反应了动态模量随温度的衰减率, k 值越大,混合料动态模量随温度的衰减速率越快.由 3 种沥青混合料的动态模量衰减指数与加载频率的关系如图 3 所示.由图 3 可知,加载频率越高,动态模量随温度衰减速率越大,但其增加率越来越缓慢;对于同一加载频率而言,3 种沥青混合料的动态模量随温度衰减速率存在显著差异,其中 AC-20 (ZH) 混合料的衰减速率最大,AC-13 (SK-SBS) 混合料的衰减速率最小.

3.2 沥青混合料动态模量主曲线分析

沥青混合料等黏弹性材料的力学响应依赖于材料试验时的温度和加载频率,试验温度和加载

频率在某种程度上具有一定的等效性.由于试验设备规格的限制,很难在非常宽的温度和频率范

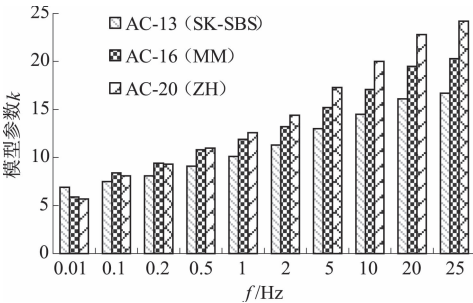


图 3 动态模量衰减指数与加载频率的关系

Fig.3 Relationship between the attenuation index of dynamic modulus and loading frequency

围内测试沥青混合料的动态特性,可以将这些试验结果在某一参照温度下进行转换,用这种方法绘制的曲线被称之为主曲线,用于预估某一给定混合料在任意温度下的动态模量. 处理方法是 将 AMPT 试验结果以不同温度动态模量与加载频率的关系绘制在双对数坐标系中,典型曲线如图 4 所示.

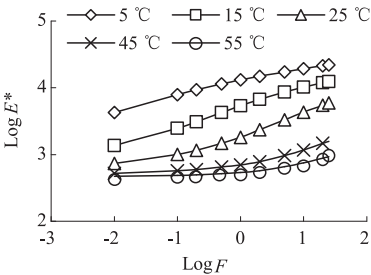


图 4 混合料动态模量的对对数曲线
Fig.4 Typical curves of dynamic modulus in log-log space

如图 4,每一温度下的动态模量曲线(或部分)是平行的并且可以水平移动. 曲线可以转换为某一特定温度下的动态模量值,即改变曲线的位置可以实现向标准温度的转换,如图 5. 每一个曲线和标准温度之间的差异称为移位因子 α , α 可以表示如下,

$$\alpha = \log (E^*_T / E^*_0). \tag{2}$$

式中: α 为移位因子; E^*_T 为在温度 T 时的动态模量; E^*_0 为参照温度 T_0 时的动态模量.

可见,移位因子反映了材料特性对温度的依赖性. α 在高于参照温度时大于 0;在低于参照温度时小于 0;在等于参照温度时等于 0. 动态模量主曲线可以通过将数据沿着对数频率坐标轴水平移动而得到. 作为加载频率和温度函数的动态模量,可以简化为换算频率的函数. 3 种沥青混合料的动态模量在不同温度下的移位因子列于表 4 中.

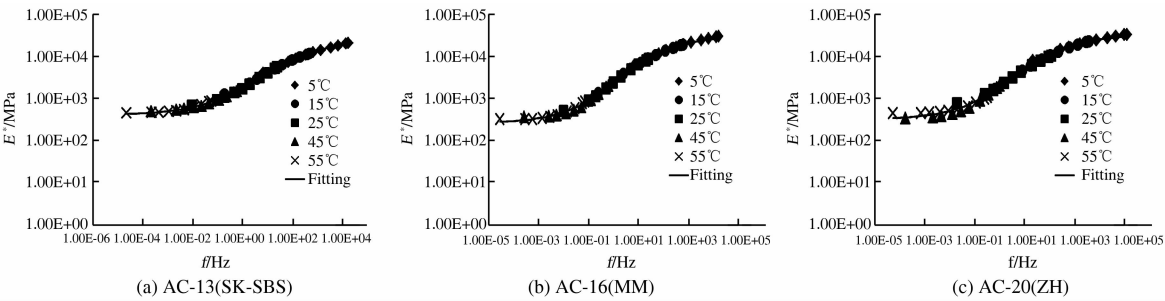


图 6 动态模量主曲线
Fig.6 Dynamic modulus master curves

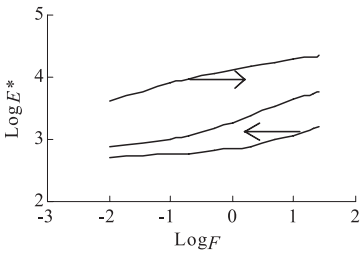


图 5 根据参考温度的转换方法
Fig.5 Conversion according to a reference temperature

表 4 动态模量移位因子					
Tab.4 Shift factors of dynamic modulus					
沥青混合料	试验温度/℃				
	5	15	25	45	55
AC-13 (SK-SBS)	2.9	1.3	0	-1.55	-3.0
AC-16(MM)	3.0	1.4	0	-2.0	-2.4
AC-20(ZH)	3.0	1.3	0	-2.0	-3.0

以 25 °C 作为参考温度,可以得到 3 种沥青混合料的动态模量主曲线,如图 6 所示.

由图 6 可知,除 AC-20(ZH)的动态模量在高温范围内有些分散外,3 种混合料的主曲线拟合度均较好,3 种混合料的动态模量主曲线基本都呈扁平状“S”型曲线. 主曲线反映了材料模量对加载频率的相关性,沥青混合料的动态模量主曲线随加载频率增加而增大,依据动态模量主曲线可以确定材料在很高或很低加载频率下的力学特性. 此外,随着温度的升高,动态模量值都呈现逐渐减小的趋势,即在低温状态下,混合料主要表现为弹性,而在高温条件下混合料的黏性更为显著. 由此可见,动态模量主曲线描述了加载频率对材料性质的影响,而移位因子描述了温度对材料性质的影响,二者结合起来就能反应沥青混合料对温度和频率的敏感性,从而全面地描述沥青混合料的黏弹性力学响应.

图7为3种沥青混合料动态模量主曲线.由图7可以看出,在低温(低于参考温度 25°C)高频范围内,3种沥青混合料中AC-20(ZH)的动态模量值最大,AC-13(SK-SBS)的动态模量最小;而在高温(高于参考温度 25°C)低频范围内,AC-13(SK-SBS)的动态模量值最大,AC-16(MM)的动态模量值最小.由此可见,在低温高频状态下,矿料级配对沥青混合料动态模量的贡献较大,粗级配混合料的弹性显著,强度较高;在高温低频状态下,沥青逐渐软化,混合料的黏性表现显著,结合料对混合料动态模量的贡献更为显著,因此使用改性沥青的AC-13(SK-SBS)混合料动态模量最大.

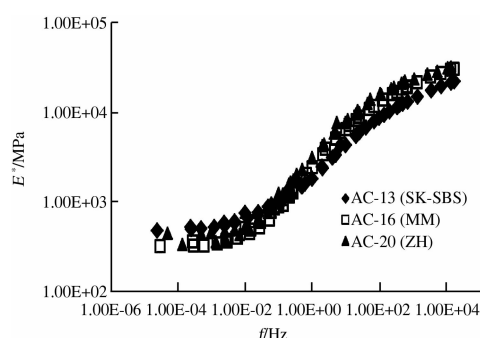


图7 3种沥青混合料动态模量主曲线对比

Fig.7 Dynamic modulus master curves of the three asphalt mixtures in comparison

4 结论

(1)随着加载频率升高,动态模量逐渐增大,温度越高,增加幅度越小.在低频范围内动态模量急剧增大,即变化敏感度较大;在 $5 \sim 25\text{ Hz}$ 的高频范围内,动态模量增加率越来越缓慢.

(2)沥青混合料的动态模量随着温度的升高呈指数关系衰减,达到较高的温度时(如 55°C),不同加载频率的动态模量差异很小.加载频率越高,动态模量随着温度的衰减速率越大,但其增加率越来越缓慢;使用改性沥青AC-13混合料的动态模量随温度衰减速率最小.

(3)在低温高频状态下,矿料级配对沥青混合料动态模量的贡献较大,粗级配混合料的弹性显著;在高温低频状态下,沥青逐渐软化,混合料的黏性表现显著,结合料对混合料动态模量的贡献更为显著.

参考文献:

- [1] SAADEH S, MASAD E, LITTLE D. Characterization of asphalt mix response under repeated loading using anisotropic nonlinear visco-elastic-viscoplastic model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(10): 912-924.
- [2] TASHMAN L, MASAD E, ZBIB H, et al. Microstructural viscoplastic continuum model for permanent deformation in asphalt pavements[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(1): 48-57.
- [3] LITTLE D N, BUTTON J W, YOUSSEF H. Development of criteria to evaluate uniaxial creep data and asphalt concrete permanent deformation potential[J]. Transportation Research Record, 1993, 1471: 49-57.
- [4] SCHWARTZ C W, GIBSON N H, SCHAPERLY R A, et al. Viscoplasticity modeling of asphalt concrete behavior[C]//The 15th ASCE engineering mechanics conference. New York, ASCE, 2002: 144-159.
- [5] 栗培龙, 张争奇, 王秉纲. 沥青混合料黏弹性响应影响因素分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(3): 96-100.
- [6] 锁利军, 王秉纲, 郑传超. 基于第二主应力的沥青混合料强度试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 79-82.
- [7] WITCZAK M W, KALOUSH K, PELLINEN T. Simple performance test for Superpave mix design[R]. NCHRP Report 465, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D. C., 2002.
- [8] 万成, 张肖宁, 贺玲凤, 等. 沥青混合料动态模量数值预测方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 16-21.
- [9] 李强, 李国芬, 王宏畅. 受力模式对沥青混合料动态模量的影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 816-822.
- [10] 赵薇, 周刚, 肖丽. 沥青混凝土动态模量试验及 Witczak 预估模型验证[J]. 公路, 2012(7): 39-45.
- [11] LI P L, YANG B, ZHANG Z Q, et al. Analysis of Factors Influencing Visco-elastic response of asphalt mixture[C]//Proceedings of international workshop on energy and environment in the development of sustainable asphalt pavements. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2010: 147-151.

(下转第11页)