

沥青混合料动态剪切模量主曲线的确定

迟凤霞¹, 张肖宁², 王丽健³, 刘宇⁴

(1. 浙江省交通科学研究所, 杭州 310006; 2. 华南理工大学 道路工程研究所, 广州 510640; 3. 广东省高速公路有限公司, 广州 510100; 4. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为了克服条件评价的局限性, 采用动态剪切流变仪对沥青混合料进行了连续动态频率扫描。获得了跨越 15 个数量级的动态模量随频率变化的主曲线, 进行了沥青混合料全温全频分析, 掌握了材料的黏弹性力学行为。通过讨论与分析, 提出了极限频率、流变区、稳态区、低频转折点、高频转折点等概念。研究表明, 动态流变试验是获得沥青混合料主曲线的有效方法, 主曲线为全温全频分析提供了基础条件, 基于主曲线形态提出的 5 个概念能够客观地反映混合料的本质特性。

关键词: 道路工程; 沥青混合料; 动态剪切模量; 主曲线; 全温全频分析

中图分类号: U416.217 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)02-0349-05

Determination of master curve of dynamic shearing modulus of asphalt mixture

CHI Feng-xia¹, ZHANG Xiao-ning², WANG Li-jian³, LIU Yu⁴

(1. Zhejiang Scientific Research Institute of Communication, Hangzhou 310006, China; 2. Road Engineering Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Provincial Freeway Co., Ltd., Guangzhou 510100, China; 4. School of Communications Science & Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to overcome the limitation of the conditional evaluation, a dynamic frequency sweep of asphalt mixture was performed using a dynamic shearing rheometer, and the master curve of the dynamic modulus change with the frequency across 15 orders of magnitude was obtained. Based on the master curve, the full-time full-frequency analysis becomes possible to study the viscoelastic property of asphalt mixture. The concepts such as the ultimate frequency, the rheological region, the steady state region, the low-frequency or the high-frequency turning point, were presented after discussion and analysis. The study results indicate that the dynamic rheological test is an effective means to get the master curve of asphalt mixture which provides the sufficient conditions for the full-temperature full-frequency analysis. The 5 concepts derived from the form of the master curve reflect the essential properties of asphalt mixture.

Key words: road engineering; asphalt mixture; dynamic shearing modulus; master curve; full-temperature-full-frequency analysis

收稿日期: 2007-09-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50278037).

作者简介: 迟凤霞(1979-), 女, 博士. 研究方向: 道路工程. E-mail: chifengxia@126.com

通信作者: 张肖宁(1951-), 男, 教授. 研究方向: 道路工程. E-mail: prozxn@163.com

通常采用条件试验(即在既定温度或时间(频率)条件下进行试验测定)来评价沥青或沥青混合料的路用性能,如针入度、软化点等。SHRP 提出的某些指标,如车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 同样是条件指标,后来被证明作为改性沥青的高温评价指标具有局限性^[1]。事实上,沥青混合料性能是在全温全频范围内随温度或频率连续变化的,可能存在变化极限。因此,条件指标评价方法可能失真。沥青或沥青混合料特征函数的主曲线能够在全温全频范围内对材料性能进行动态描述,既描述材料性能变化关系又反映变化趋势,突破时间与设备的限制,用来分析较大范围内的材料信息,全面评价材料物性。目前,获得沥青混合料动态模量主曲线的方法多是基于少量单点频率(温度)试验测定,再通过时温换算获得。通过有限数量的样本点来获得宽频主曲线,势必存在一定的局限性;而且,由于试验具有一定的破坏性,要得到宽频主曲线需要对多个试件进行扫描,试件之间的差异性同样会影响主曲线的结果。因此,如何相对准确且快速地获得沥青混合料的宽频主曲线,以及如何通过沥青混合料宽频主曲线获取混合料的基本特性,是目前急需解决的难题。

一些研究表明,通过动态频率扫描(Dynamic frequency sweep,DFS)试验可以便捷地获得沥青混合料动态剪切模量及其他特征函数随频率变化的主曲线^[2]。本文结合国内外的研究成果,采用美国 TA 公司生产的高级剪切流变仪 AR-2000,通过对混合料进行连续频率扫描来获取沥青混合料的 G^* 随频率变化的主曲线。

1 试验方法

1.1 扭转剪切试验

AR-2000 高级流变仪(Advanced rheometer)可进行小梁试件扭转状态下的 DFS 试验,其试验原理及试验装置如图 1 所示。试验过程中通过空气驱动施加动态交变正弦剪切荷载,可选择应力控制或应变控制 2 种模式,试验结果中得到的复数剪切模量 G^* 的计算式为^[3]

$$G^* = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \quad (1)$$

式中: τ_{\max} 、 τ_{\min} 分别为最大和最小剪应力; γ_{\max} 、 γ_{\min} 分别为最大和最小剪应变。

1.2 试验材料

最初采用的小梁试件尺寸为 50 mm×10 mm

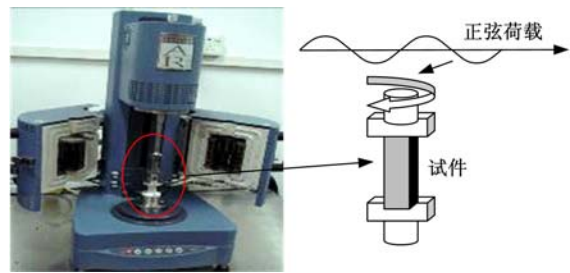


图 1 试验原理与设备

Fig. 1 Test principle and equipment

×6 mm,通过对不同类型沥青混合料的研究发现,50 mm×10 mm×10 mm 的尺寸更加精确^[2],本试验采用的小梁尺寸均为 50 mm×10 mm×10 mm。由于试验所需沥青混合料试件尺寸较小,若混合料级配过粗,可能导致试验结果变异性增大,研究中选用细级配沥青混合料以减少大粒径碎石颗粒的干扰,增加试验结果的精度。本文采用细粒式 AC-5 型沥青混合料^[4],其级配如表 1 所示,沥青为 A-50 和 A-70。

表 1 AC-5 型沥青混合料级配

Table 1 Aggregate gradation of AC-5

| 方孔筛 /mm | 9.50 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 通过率 /% | 100 | 97.7 | 74.1 | 56.5 | 42.7 | 22.0 | 14.3 | 8.5 |

1.3 试件制备与安装

设备要求试件尺寸最大误差不超过 0.2 mm,为减少试件尺寸的变异,提高试验精度,本试验采用可控制试件密度的振动轮碾成型设备碾压成型尺寸为 30 cm×30 cm×5 cm 的沥青混合料板,以保证试件达到设计的空隙率。为减小切割过程中锯片对集料产生的扰动,采用高精密度双面锯双面同步切割技术制备了沥青混合料小梁试件^[5]。

为确保试验精度,轴承与试件的中心必须在同一竖直线上。由于仪器通过上下夹片施加扭矩,为使试件两端受力均匀,采用测力扳手施加相同的紧固力。

1.4 试验条件

沥青混合料试件的 DFS 范围为 1~10 Hz,以对数为间隔取点,每个数量级 20 个点。为保证沥青混合料扫描试验处于线黏弹性范围内,经预备试验确定应变大小为 0.01% 以下。试验温度范围为 -20~90 °C,温度间隔为 10 °C,起始温度平衡时间为 1 h。

2 试验结果及分析

2.1 DFS 试验结果

沥青混合料的动态复数模量作为 2002 路面设计指南中主要的设计指标^[6-7],考虑到工程应用背景,本文选择沥青混合料黏弹性特征函数复数剪切模量作为测试与讨论的对象,采用 50[#] 沥青配制 AC-5 型沥青混合料进行了 DFS 试验。

在描述 DFS 试验测定的沥青混合料黏弹性特征函数的力学行为时,不仅要预先考虑材料应力水平(应变水平)的非线性响应,同时也必须考虑材料自身承受的温度环境和加载时间。因此,需要在具有时间轴-温度轴-应力与应变关系的三维空间内考虑研究对象表现出的力学行为。图 2 所示为 A-50 沥青配制 AC-5 型沥青混合料在温度-频率-复数剪切模量三维空间内的动态扫描结果。

由图 2 可见,当温度升到 60 °C 后,该曲面与水平面的夹角越来越小,说明沥青混合料复数模量随频率与温度的变化幅度越来越小,温度达到 80 °C 时,曲面已经接近水平面,沥青混合料的力学响应近似于典型的牛顿流体;低温时,随着温度降低,变化趋势也逐渐减小,0 ~ -20 °C 段曲面与水平面近似平行,说明沥青混合料已经从黏弹态向弹性体转变。

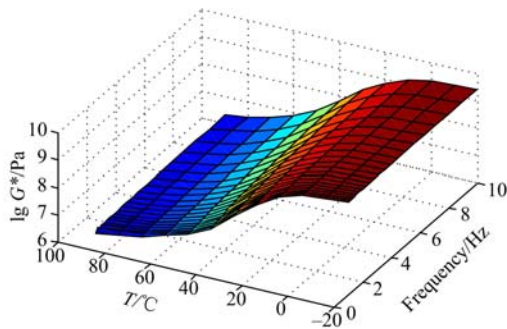


图 2 G* 三维分布图

Fig. 2 Three-dimensional distribution of G*

2.2 二维主曲线

在三维空间内对测定结果进行比较研究具有一定的难度,利用时温换算原则,可以把三维空间内的材料特性映射到二维空间内,同时将一定时间范围、温度范围内的试验测定结果拓延到更加广泛的时温空间内。将三维空间内不同温度和荷载作用下得到的力学性质映射到二维空间,通过平移后形成一条光滑曲线,即为主曲线。主曲线

时间历程并非试验测定经历的真实历程,通常称其为换算时间,沿换算时间坐标轴平行移动的距离 $\lg a_T$ 称为该温度相应于基准温度的移位因子, $\lg a_T$ 由 WLF 公式获得^[8]

$$\lg a_T = \frac{-C_1(T - T_g)}{C_2 + T - T_g} \quad (2)$$

本文选择 40 °C 作为基准温度(参考温度),各个温度相对参考温度的移位因子见表 2。

表 2 移位因子计算结果

Table 2 Results of shift factor

| 温度/°C | 50 [#] | 70 [#] | 温度/°C | 50 [#] | 70 [#] |
|-------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|
| -20 | 8.410 | 8.060 | 40 | 0 | 0 |
| -10 | 6.627 | 6.990 | 50 | -0.861 | -0.873 |
| 0 | 5.394 | 5.405 | 60 | -1.610 | -1.731 |
| 10 | 3.745 | 3.761 | 70 | -2.463 | -2.439 |
| 20 | 2.311 | 2.281 | 80 | -3.191 | -3.166 |
| 30 | 0.985 | 1.003 | 90 | -3.669 | -3.676 |

根据时温换算原则,将上述(A-50)沥青混合料三维频率扫描结果映射到二维空间内,经时温换算得到的主曲线如图 3 所示。由图可见,动态剪切复数模量随频率变化的主曲线成“S”型,可以跨过 15 个数量级,当温度为图示的 40 °C 时,(A-50)沥青混合料主曲线的频率范围为 $10^{-5} \sim 10^{10}$ Hz。沥青混合料动态剪切复数模量主曲线为研究沥青混合料性能提供了充分条件。

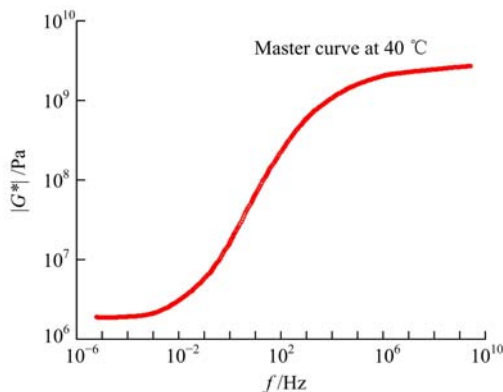


图 3 二维空间内的 G* 主曲线

Fig. 3 G* master curve in two dimension space

在二维空间内,对于参考温度下的主曲线,还可以根据各个温度所对应的移位因子移位得到主曲线族,获得沥青混合料在全温全频内的信息,并可在不同温度下进行全频域性能比较,这在三维空间中较难实现。(A-50)沥青混合料 10 ~ 80 °C 的主曲线族如图 4 所示。

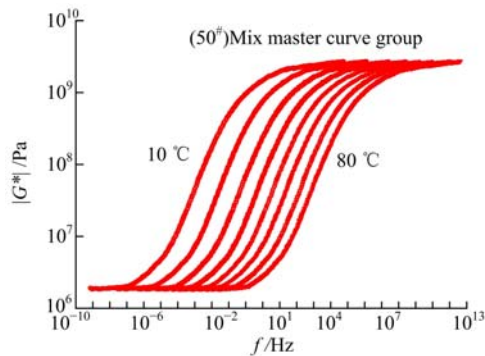


图 4 二维空间内的主曲线族

Fig. 4 Master curve group in two dimension space

2.3 分析与讨论

针对二维空间内的“S”型主曲线,可以得到主曲线的 3 条渐近线,以(A-50)沥青混合料 40 °C 时主曲线为例,如图 5 所示。

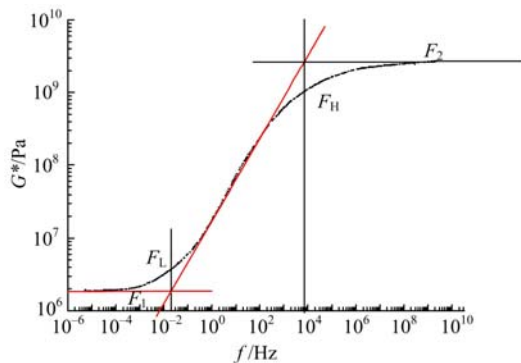


图 5 G* 主曲线特性图

Fig. 5 Characters of G* master curve

2.3.1 概念及分析

在高温低频部分主曲线逐渐变缓,并趋近水平线,若将沥青混合料进入极限状态起始点处的频率值定义为极限频率,则高温低频区的极限频率可称为第一极限频率(F_1),同样定义低温高频区的极限频率为第二极限频率(F_2)。将两个极限频率之间的范围称为流变区,即流变性能随频率的动态变化而变化,材料的相态改变、结构性能变化主要在此区间内进行,因此,流变区是材料性能研究的对象区间。相应地,将两个极限频率以外的部分分别称为低频稳态区和高频稳态区,即流变性能不随频率的变化而变化;再者,将沥青混合料由低频稳态区进入流变区的转折点定义为低频转折点(F_L),由流变区进入高频稳态区的转折点定义为高频转折点(F_H),如图 5 所示。

以上所给出的概念反映了该种沥青混合料的固有特性,流变区和稳态区描述材料的物理形态,

高、低频转折点分别代表材料物理形态转变的分界点,而极限频率则是标志材料进入极限状态的物理参量。本文得到(A-50)沥青混合料的第一极限频率为 9.58×10^{-5} Hz;由于高频稳态区未完全达到,因此第二极限频率尚无法给出。同时,由二维空间的主曲线族(见图 4)不难发现,对于某种混合料,随着温度的升高,低频转折点和高频转折点均升高,第一极限频率和第二极限频率两个参数值也相应增大,但是流变区和稳态区的范围大小不会改变。

对于沥青混合料的变形特性研究通常局限于流动区的频率和温度范围,限于研究手段,很少有关于低频稳态区和高频稳态区的研究报告。欧洲研究机构和 NCHRP9-10 曾经试图获取所谓的零剪切黏度(Zero shear viscosity, ZSV)来评价改性沥青的高温性能^[9],但 ZSV 是一个非线性条件下的极限黏度,并非主曲线意义下的第二极限频率(F_2)。他们还曾经试图通过测定沥青混合料的松弛弹性模量极限值来确定适宜的松弛时间描述其低温开裂抵抗能力,但在 BBR 试验中放弃了,仅形式地确定 60 s 作为相对时间条件。

另一方面,在建立沥青混合料黏弹本构关系时,不可避免地需要测定弹性极限与黏性流动极限,由于传统测定方法的限制,独立的极限弹性模量 E_0 与黏度 η 通常采用经验或者统计的方法予以推测^[10],这样的方法不可避免地带来较大的误差,影响本构方程的普适性。因此,采用 DFS 方法测定得到由低频稳态区、流变区、高频稳态区组成的沥青混合料特征函数主曲线不仅具有理论意义,同时也具有重要的工程意义。

2.3.2 全温全频比较分析

在全温全频范围内对沥青混合料进行研究,能够在确定材料性能变化关系的同时把握变化趋势。通过一个极端的例子可以证明条件试验得出的沥青混合料力学行为评价可能不足以反映其真实特性,对 A-50 和 A-70 两种标号的 AC-5 型沥青混合料二维主曲线的比较结果如图 6 所示。

流变区内存在两条主曲线近乎重叠的频率区段(1.0~538.5 Hz),在此区段内频率相同时动态复数模量相等或接近,即在此区段内仅仅根据 G^* 值无法区别两种混合料力学行为的差异。

无论高温低频区还是低温高频区,(A-70)沥青混合料的主曲线均高于(A-50)沥青混合料,即(A-70)沥青混合料的 G^* 高于(A-50)沥青混合

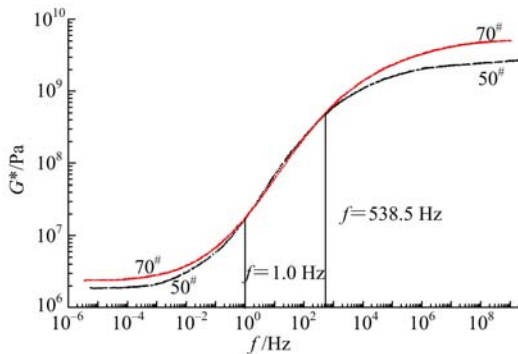


图 6 两种沥青混合料的 G^* 主曲线

Fig. 6 G^* master curves of two asphalt mixture

料。以沥青混合料的第一极限频率为例, A-70 沥青混合料的第一极限频率为 4.72×10^{-5} Hz, 对应的复数剪切模量为 2.38×10^6 Pa, (A-50) 沥青混合料的第一极限频率则为 6.05×10^{-5} Hz, 对应的复数剪切模量为 1.87×10^6 。显然, 据沥青标号推测(A-70)沥青混合料的高温性能劣于(A-50)沥青混合料, (A-70)沥青混合料的低温性能优于(A-50)沥青混合料的结论显然失真, 说明条件试验仅具有相对意义。

同样, 沥青混合料复数剪切模量存在的重叠频率区段表明, 在流动区中这一频率区段内, 尽管沥青品种差异较大, 但由于两种沥青混合料的矿质混合料级配组成相同, 两者间的复数剪切模量并无明显差异, 沥青品种或者沥青胶浆的性能差异并无显著影响。据此, 可以认为重叠区段内的力学行为将由级配类型与矿料品质决定, 而在其他的频率区段, 沥青品质则是主要的影响因素。

3 结 论

(1) 利用动态剪切流变仪克服了单点扫描和需要多个试件导致的试验平行性下降的缺陷。通过连续扫描, 较准确地获得了动态复数模量随频率变化的二维主曲线及主曲线族, 且主曲线跨越了 15 个数量级的频率范围, 为全温全频分析提供充分条件。

(2) 极限频率、流变区、稳态区、低频转折点和高频转折点均属于沥青混合料的固有特性, 这 5 个概念的提出为通过主曲线对混合料进行研究提供了依据。

(3) 通过全温全频分析能够真正全面地了解材料的性能, 准确把握性能变化关系及变化趋势, 具有条件评价所不具备的优势。

参考文献:

- [1] Bahia H U, Hanson D L, Zeng M, et al. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design[R]. NCHRP Report 459, National Cooperative Highway Research Program, Washington D C: National Academy Press, 2001.
- [2] Reinke Gerald H, Glidden Stacy. Development of mixture creep performance tests using a dynamic shear rheometer[J]. Transportation Research Board of the National Academies, 2004, 9: 1-43.
- [3] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 王富玉, 沙庆林, 张勇, 等. VCADF 和 VCAAC 矿料级配检验方法在 SAC13 级配设计中的应用[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(3): 538-543.
Wang Fu-yu, Sha Qing-lin, Zhang Yong, et al. Application of aggregate gradation test methods of VCADF and VCAAC for SAC13[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(3): 538-543.
- [5] 李晓民. 基于流变特性的沥青胶浆评价方法及性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2006.
Li Xiao-min. The research on evaluation method and property of asphalt mastic basing on rheological property[D]. Harbin: School of Traffic Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2006.
- [6] Hochuli A S, Sayir M B, Poulikakos L D, et al. Measuring the complex modulus of asphalt mixtures by structural wave propagation[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2001, 70(1): 646-659.
- [7] Pellinen T K, Witczak M W. Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, 71(1): 281-309.
- [8] 张肖宁. 沥青及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.
- [9] Anderson D A, Le Hir Y M, Planche J, et al. Zero shear viscosity of asphalt binders[C]// Presented at the 80st Annual Transportation Research Board Meeting, TRB, National Research Council, Washington D C, 2001.
- [10] Bahia H U, Hanson D L, Zeng M, et al. Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design[R]. NCHRP Report 459, 2001; National Cooperative Highway Research Program, National Academy Press, Washington D C, 2001.