

文章编号:1007-9629(2022)09-0938-07

构建沥青基材料力学行为主曲线的两阶段方法

唐 成¹, 王端宜^{1*}, 胡 聪¹, 贲 迪², 邓凯聆¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641;

2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为建立普适性的沥青基材料力学行为主曲线构建方法,依据主曲线定义提出了将主曲线获取与主曲线拟合分离的两阶段方法,用基质沥青的试验数据对比了采用两阶段方法与规范方法绘制主曲线时的拟合效果,并用沥青砂浆及橡胶测试数据检验了采用两阶段方法绘制主曲线时的稳健性.结果表明:两阶段方法克服了规范方法需预设主曲线模型与移位因子方程的缺陷,可在主曲线拟合阶段对主曲线模型的准确性进行检验,并可用于主曲线模型或移位因子方程的优化;两阶段方法不仅适用于构建具有时温等效特性的沥青基材料力学行为主曲线,对非沥青基材料也有较好的适用性.

关键词:两阶段方法;主曲线;黏弹性;移位因子;时温等效;沥青基材料

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.09.008

Two-Stage Method for Developing Mechanical Behavior Master Curve of Asphalt Base Materials

TANG Cheng¹, WANG Duanyi^{1*}, HU Cong¹, YUN Di², DENG Kailing¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to establish a universal method for developing mechanical behavior master curve of asphalt base materials, a two-stage method was proposed to separate the drawing and fitting of the master curve into two independent stages according to the definition of the master curve. Using the test data of base asphalt, the fitting effect of the two-stage method and the standard method in drawing the master curve was compared. The robustness of the two-stage method in drawing the master curve was verified by using the test data of asphalt mortar and rubber. The results show that the two-stage method overcomes the defect of the standard method which requires the assumption of the master curve model and the shift factor equation. The accuracy of the master curve model can be tested in the master curve fitting stage and can be used to optimize the master curve model or the shift factor equation. The two-stage method is not only suitable for developing mechanical behavior master curve for asphalt base materials with time-temperature superposition characteristics, but also for non-asphalt base materials.

Key words: two-stage method; master curve; viscoelasticity; shift factor; time-temperature superposition; asphalt base material

沥青和以沥青作为胶结料的沥青砂浆、沥青混合料等沥青基材料的力学行为具有典型的黏弹性,且时温特性对其力学行为有重要影响.为研究沥

青基材料在宽时间域、宽频率域内的力学行为,对此类具有热流变简单性行为的材料而言,通常可采用时温等效原理,将不同测试温度下窄时间域与窄频

收稿日期:2021-07-20; 修订日期:2021-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278203);广东省自然科学基金资助项目(2019A1515011965)

第一作者:唐 成(1989—),男,湖南永州人,华南理工大学博士生.E-mail:ct_tangcheng@mail.scut.edu.cn

通讯作者:王端宜(1960—),男,吉林四平人,华南理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:tclywang@scut.edu.cn

率域的数据进行平移,所得到的光滑曲线称之为主曲线^[1].中华人民共和国航空航天工业部航天工业标准 QJ2487-93《复合固体推进剂单向拉伸应力松弛模量及其主曲线测定方法》中,对固体推进剂松弛模量主曲线的测定进行了规范化,但尚未出现规范化的沥青基材料主曲线绘制方法.Yin等^[2]对沥青与沥青混合料主曲线绘制方法的规范化进行了初步研究.美国 AASHTO R62-13《Standard practice for developing dynamic modulus master curves for asphalt mixtures》(后文称规范方法)对沥青混合料动态模量主曲线的绘制进行了规范化:首先,将移位因子方程以及缩减频率与频率的关系式代入主曲线模型;然后,使用规范求解工具或自定义函数拟合的方法进行函数拟合.绘制沥青的动态模量主曲线时,研究人员也通常采用规范方法^[3-4],但是该方法的拟合效果受主曲线模型、移位因子方程的选择及拟合初值的选取影响较大.此外,已有研究成果表明,沥青混合料层间剪切强度及沥青混合料的力学损伤行为也具有时温等效特性^[5-6].针对此类主曲线模型未知的力学行为,无法使用规范方法绘制主曲线,通常采用人工平移的方法,但是主观因素会严重影响平移的准确度.

基于此,本文根据主曲线的定义,提出将主曲线的获取与拟合进行分离的两阶段方法(TSM),以期作为沥青基材料流变学的研究提供借鉴.

1 试验

1.1 原材料

基质沥青(BA)为壳牌70#沥青,用SBS改性沥青(SBSMA)成型沥青砂浆试件,沥青的基本性能指标见表1;集料为辉绿岩,油石比(质量比)为0.12.试件成型方法参考文献[7],试件的高度为40.0 mm,直径为12.5 mm,孔隙率(体积分数)为1.01%.沥青砂浆的级配见表2.

表1 沥青的基本性能指标
Table 1 Basic property indicators of asphalts

Asphalt	Penetration (25 °C, 5 s, 100 g)/ (0.1 mm)	Ductility (10 °C, 5 cm· min ⁻¹)/cm	Softening point/°C
BA	67.3	36.2	46.3
SBSMA	51.6	>100.0	87.4

表2 沥青砂浆的级配
Table 2 Gradation of asphalt mortar

Sieve size/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio (by mass)/%	100.00	75.40	59.72	40.68	28.61	22.68	13.84

1.2 试验方法

采用马尔文Kinexus型动态剪切流变仪对沥青与沥青砂浆进行不同测试温度 T 下的频率扫描试验.基质沥青的测试温度 $T_a=4, 16, 28, 40, 52, 64, 76$ °C;沥青砂浆的测试温度 $T_m=5, 15, 25, 35, 45, 55$ °C.测试频率 f 为0.1~30.0 Hz,并按对数等间距取16个测试点.橡胶的测试温度 $T_r=-60\sim 100$ °C(间隔10 °C),其频率扫描结果参考文献[8].基质沥青试验数据用于对比采用两阶段方法与规范方法绘制主曲线时的拟合效果;沥青砂浆及橡胶试验数据用于检验采用两阶段方法绘制主曲线的稳健性.

2 主曲线的获取

2.1 测试温度为参考温度时移位因子的计算

满足时温等效原理的力学行为均可使用主曲线进行描述,如沥青基材料的动态模量 G^* 、松弛模量及蠕变柔量等.为便于阐述具体计算过程,本文以构建动态模量主曲线为例,论述具体的计算细节.计算可分为以下5个步骤.

第1步:选择某一测试温度作为参考温度 T_{ref} .

第2步:确定相邻测试温度插值区间.提取相邻测试温度 T_1, T_2 ($T_1 < T_2$)的动态模量测试结果,由 T_1 下最小测试频率的动态模量 G_1^* 与 T_2 下最大测试频率的动态模量 G_2^* ,可确定区间 $[G_1^*, G_2^*]$ 为插值区间.

第3步:计算相邻测试结果水平移动范围.在区间 $[G_1^*, G_2^*]$ 内按对数等间距选择 n 个插值点,通过插值确定 T_1 下动态模量为 G_1^*, G_2^* 时的频率分别为 $f_{T_1, n}, f_{T_1, 1}$, T_2 下动态模量为 G_1^*, G_2^* 时的频率分别为 $f_{T_2, n}, f_{T_2, 1}$;令 $\Delta f_1 = f_{T_2, n} - f_{T_1, n}$, $\Delta f_2 = f_{T_2, 1} - f_{T_1, 1}$,当固定 T_1 下的数据时, T_2 下的数据水平移动范围为 $[-\max(\Delta f_1, \Delta f_2), -\min(\Delta f_1, \Delta f_2)]$.

第4步:用寻优算法确定相邻温度的移位值.将第2步确定的水平移动范围按对数等间距划分为 m 份,本文 n, m 分别取25、100,接着将 T_2 下的动态模量数据按划分后的水平移动范围进行水平移动,并计算平移后两曲线在区间 $[G_1^*, G_2^*]$ 的 n 个插值点角频率 ω 差值的范数Norm,寻找使Norm最小的水平移动值 j^* . j^* 即为固定 T_1 下的数据时, T_2 下数据的水平移位值.

第5步:计算移位因子.重复第2~4步,求取所有相邻温度的移位值,并将测试温度与参考温度之间求取的所有移位值求和,同时根据测试温度与参考温度的高低,确定数值的符号,当测试温度低于参考温度时取正号,高于测试温度时取负号.

计算示意图见图1(图中 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 均为测试温度).需要说明的是,上述算法针对的是相邻测试温度的测试数据在y轴有重叠区域,当数据没有重叠

区域时,可使用线性方程或多项式分别对测试数据进行拟合,然后进行外延来获取重叠区域,再使用上述算法进行计算即可.

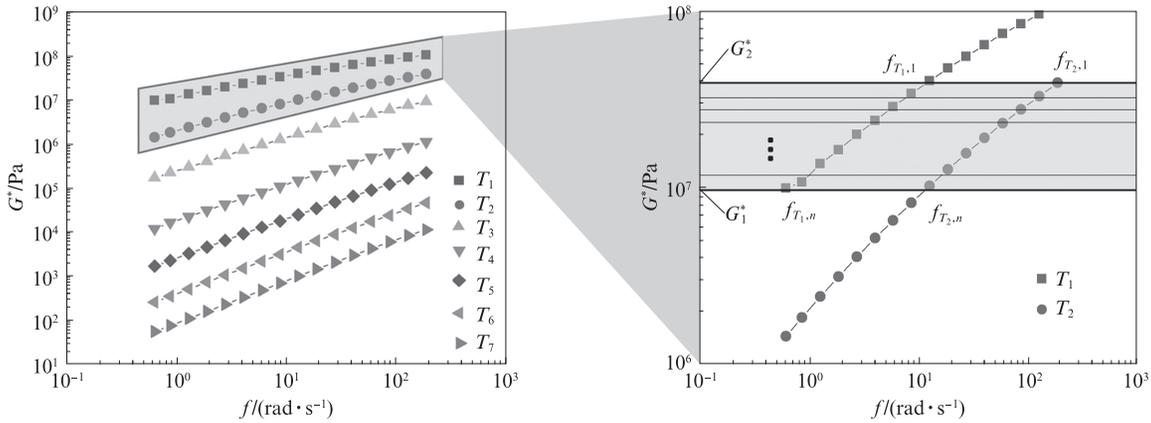


图1 计算示意图
Fig.1 Calculation diagram

2.2 目标温度作为参考温度下移位因子的求取

以不同的测试温度 T_a 作为参考温度,使用上述算法得到基质沥青的移位因子 α_T ,结果见图2.由图2可见,以不同测试温度作为参考温度时,在半对数坐标下,所有移位因子曲线形态完全相同,均仅在y轴发生了相对移动.这是因为绘制主曲线时,选择不同测试温度作为参考温度时,相同测试结果在半对数坐标轴下,其绝对距离会发生变化,但是相邻测试温度的测试结果在对数坐标下,相对移动的距离并未发生变化.求取任意参考温度下的移位因子,只需将移位因子在半对数坐标下沿着y轴进行垂直移动即可,但是需保证在选取的参考温度下移位因子的对数值为零.基于此,本文通过移位因子曲线插值并竖向移动的方法来确定任意目标参考温度下的移位因子,具体过程为:在得到以测试温度作为参考温度时的移位因子曲线后,使用插值法确定目标参考温度下的移位因子,再将所有测试温度下的移位因子减去目标参考温度的移位因子,即可得到最终的移位因子曲线.求取参考温度为4℃时的移位因子曲线后,通过插值并竖向移动来确定参考温度为25℃时的移位因子曲线的过程示意图见图3.

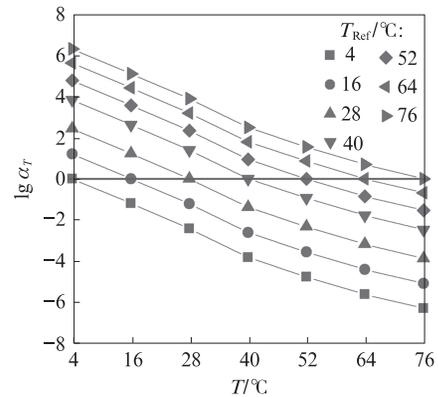


图2 不同测试温度作为参考温度时基质沥青的移位因子
Fig.2 α_T of BA at different test temperatures as reference temperatures

2.3 测试结果平移获取主曲线

在得到目标温度下的移位因子后,可在对数坐标下进行测试结果平移,从而获取主曲线.基质沥青选用 $T_a=15$ 、 25 、 35 ℃作为参考温度,其动态模量 G^* 主曲线及使用相同移位因子的相位角 δ 主曲线见图4.由图4可见:对数坐标下不同参考温度的动态模量主曲线完全相同且光滑,而采用规范方法绘制主曲线时由于参考温度的不同,平移后的主曲线经常会出现突变,并导致主曲线不顺滑,这表明本文所提出的方法具有

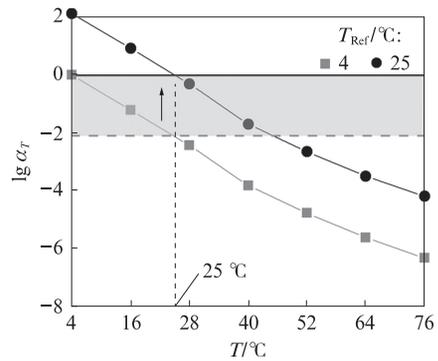


图3 移位因子竖向移动示意图
Fig.3 Schematic diagram of vertical movement of α_T

很高的精度与稳健性;相位角测试结果使用与绘制动态模量主曲线相同的移位因子时,也能得到相对光滑的相位角主曲线,这表明试验所用的沥青具有热流变简单性.此外,相较于规范主曲线计算方法,本文提出的两阶段方法在绘制主曲线过程中,不需要预设主曲

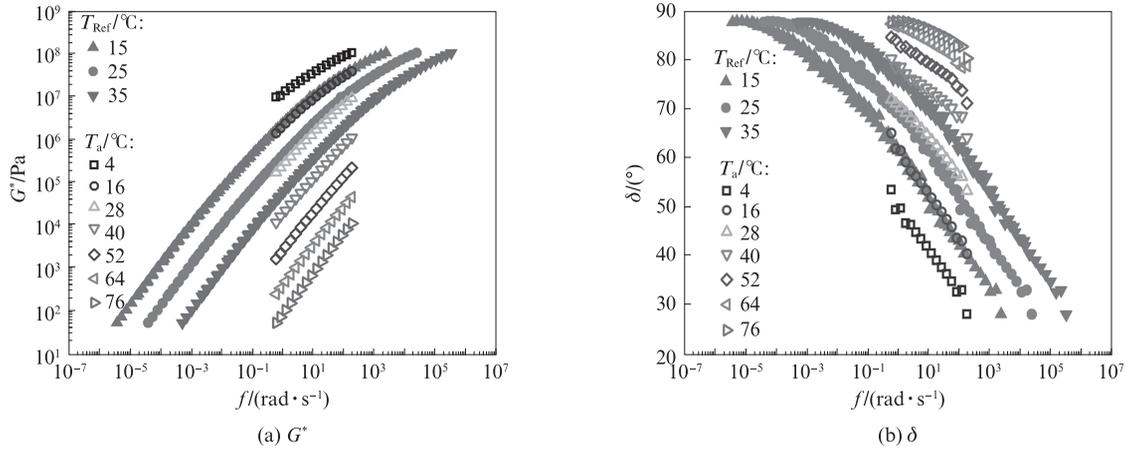


图4 基质沥青的动态模量与相位角主曲线
Fig. 4 Master curves of G^* and δ of BA

线模型与移位因子方程,可根据需要在获取主曲线后,使用主曲线模型或移位因子方程对主曲线或移位因子进行拟合,并最终确定模型参数.

3 拟合效果对比

选取 25 °C 作为参考温度,采用两阶段方法、规范方法分别结合 Christensen-Anderson(CA)模型(见式(1))、Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM)模型^[9](见式(2))对基质沥青的主曲线进行拟合,规范方法采用 WLF 方程作为移位因子方程(见式(3)).

$$\text{CA model} \begin{cases} |G^*(\omega)| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\frac{\lg 2}{R_c}} \right]^{-\frac{R_c}{\lg 2}} \\ |\delta(\omega)| = 90 \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{\frac{\lg 2}{R_c}} \right]^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{CAM model} \begin{cases} |G^*(\omega)| = G_g \left[1 + \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^{\frac{\lg 2}{R_c}} \right]^{-\frac{m_c R_c}{\lg 2}} \\ |\delta(\omega)| = 90 m_c \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{\frac{\lg 2}{R_c}} \right]^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\lg \alpha_T = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (3)$$

式中: G_g 为玻璃态模量,模型拟合时取 10^9 Pa; ω_c 为交叉频率; R_c 为流变学指数; m_c 为形状参数; C_1, C_2 为材料常数.

基质沥青主曲线采用两阶段方法与规范方法的拟合结果见图5.由图5(a)、(b)可见:两阶段法结合CA模型(TSM+CA模型)及两阶段法结合CAM模型(TSM+CAM模型)对基质沥青的动态模量主曲线均具有较好的拟合效果,平滑的动态模量主曲线散点基本分布在

拟合曲线上;对相位角主曲线而言,当角频率 $\omega > 0.1$ rad/s 时, TSM+CA 模型具有较好的拟合效果,当 $\omega < 0.1$ rad/s 时, TSM+CA 模型拟合曲线会低估真实的相位角值,而 TSM+CAM 模型能极大地改善 TSM+CA 模型的相位角拟合效果.由图5(c)、(d)可见:以 WLF 方程作为移位因子方程的规范方法并结合 CA 模型(WLF+CA 模型)及 CAM 模型(WLF+CAM 模型)拟合时,拟合曲线的拟合优度 R^2 均大于 0.95,但是平移得到的主曲线散点数据存在突变且不平滑,拟合曲线与主曲线散点并不能较好地贴合;采用 WLF+CAM 模型在一定程度上改善了 WLF+CA 模型的拟合效果,特别是相位角主曲线的拟合效果.这是因为 CAM 模型本身相较于 CA 模型,对沥青相位角主曲线的低频段具有更好的拟合效果,但其拟合效果仍劣于采用 TSM+CAM 模型,这主要是因为规范方法采用将移位因子方程及缩减频率与频率的关系式代入主曲线模型进行拟合,主曲线的确定与拟合同时进行,取得理想拟合效果的前提是主曲线模型和移位因子方程均具有足够的准确度.

通过比较采用规范方法与两阶段方法绘制主曲线时的拟合效果,发现主曲线模型和移位因子方程仍有较大的改善空间.已有研究表明,式(4)所示的二次多项式相较于 WLF 方程具有更好的拟合效果^[10],但是该方程不满足当 T 取参考温度 T_{ref} 时,移位因子数值为零的要求.为此,本文提出式(5)所示的改进型二次多项式移位因子方程(ponynomial).

$$\lg \alpha_T = aT^2 + bT + c \quad (4)$$

$$\lg \alpha_T = a(T - T_{ref})T^2 + b(T - T_{ref}) \quad (5)$$

式中: a, b, c 均为模型参数.

使用改进型二次多项式移位因子方程并结合 CAM 模型(ponynomial+CAM 模型)对基质沥青的主曲线进行拟合,拟合效果见图6.由图6可见,基质沥

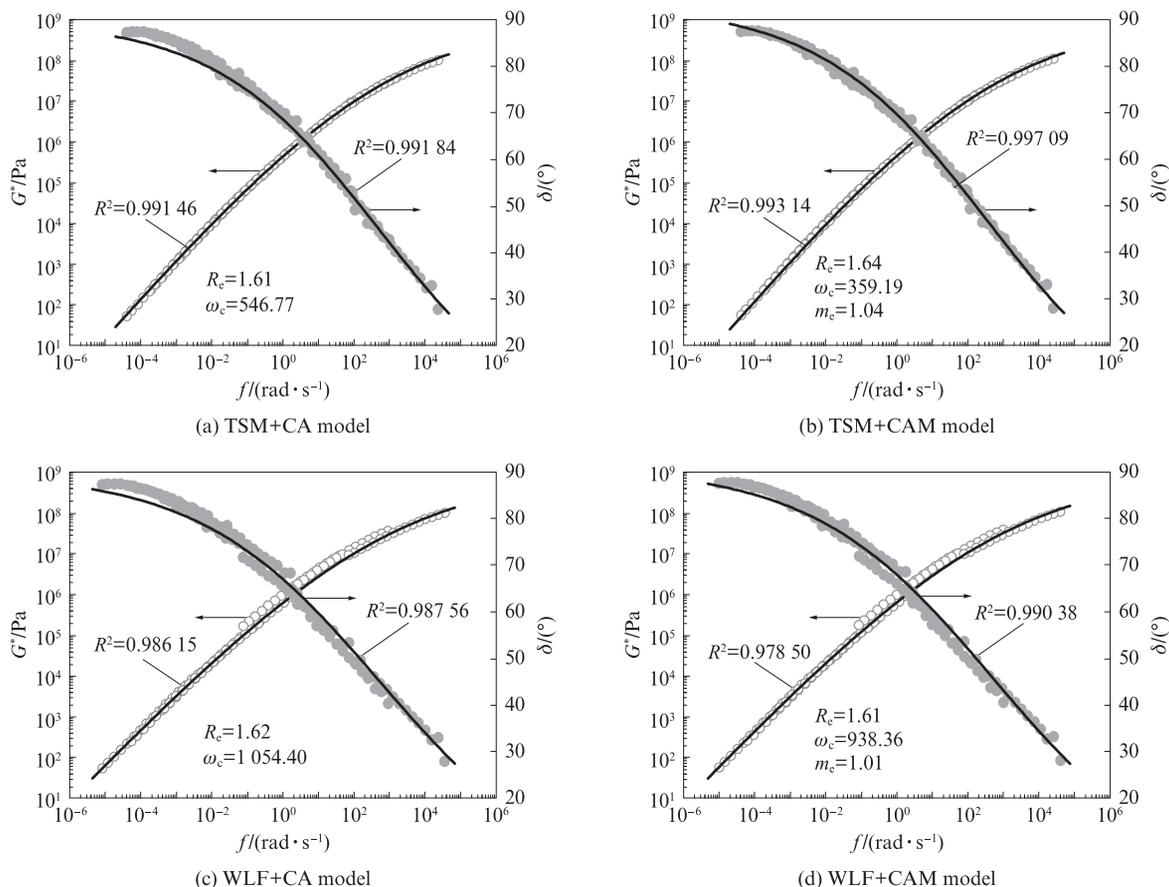


图5 基质沥青主曲线采用两阶段方法与规范方法的拟合结果

Fig. 5 Fitting results of two-stage method and traditional method for master curves of BA

青动态模量与相位角主曲线采用 polynomial+CAM 模型的拟合效果均优于 WLF+CAM 模型的拟合效果,这主要是因为改进型二次多项式相较于 WLF 方程对移位因子具有更好的拟合效果,说明采用规范方法拟合沥青基材料主曲线时,默认使用 WLF 方程会潜在影响沥青基材料主曲线的拟合效果.比较图 6 与图 5(b)可知,采用 polynomial+CAM 模型的拟合效果与 TSM+CAM 模型仍存在较大差距,这是因为

polynomial+CAM 模型虽然改善了 CA 模型与 WLF 方程的准确度,但是仍然不能完美地刻画沥青的主曲线与移位因子,这也是研究人员提出更多新型主曲线拟合模型与移位因子方程的原因.

由前文比较可知,采用 TSM+CAM 模型具有最好的拟合效果,以此为基准可比较其他方法在主曲线拟合后与真实主曲线数据的偏离程度.基质沥青采用两阶段方法及规范方法拟合后的主曲线见图 7.由图 7 可知:采用 TSM+CA 模型、TSM+CAM 模型拟合的动态模量主曲线具有较好的重合度,在高频段相位角下主曲线也具有较好的重合度,但是在低频段会表现出 CA 模型低估相位角值;比较规范方法拟合主曲线与基准线的位置可知,使用规范方法拟合的动态模量主曲线会低估动态模量值,规范方法采用 WLF+CA 模型、WLF+CAM 模型会低估低频段的相位角值而高估高频段的相位角值, polynomial+CAM 模型会高估相位角值.动态模量试验是获取沥青基材料松弛模量 Prony 级数的重要方法^[11-12],对真实动态模量与相位角数据的低估或高估会影响 Prony 级数的拟合效果,并潜在地影响仿真计算结果的准确性.

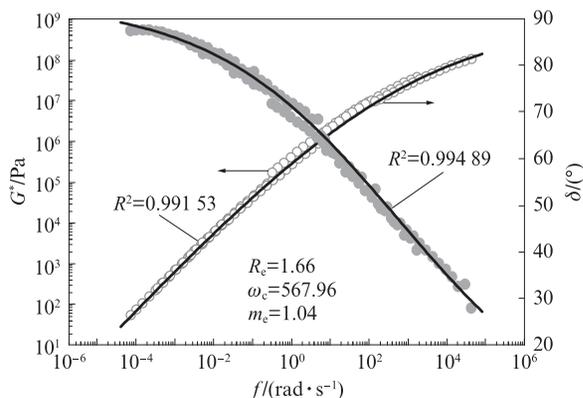


图6 基质沥青主曲线采用改进的二次多项式移位因子方程的 CAM 模型拟合结果

Fig. 6 Fitting results of polynomial+CAM model for master curves of BA

规范方法采用将移位因子方程及缩减频率与频率的关系式代入主曲线模型进行拟合,移位因子方

程的参数与主曲线方程的参数同时确定,最终的拟合效果与主曲线模型及移位因子方程的准确度存在较大关联.两阶段方法可实现主曲线的获取与拟合过程的分离,其本质是将移位因子的计算和主曲线的拟合进行了分离.与规范方法相比,两阶段方法对于参考温度的选择不会影响主曲线的最终形态,而且可在主曲线的拟合过程中对不同数学模型的拟合精度及适用性进行检验,对开展主曲线拟合模型与

移位因子方程的研究具有重要意义.

4 稳健性验证

为验证两阶段方法绘制主曲线的稳健性,本研究对沥青砂浆及非沥青基材料橡胶进行主曲线绘制.需要指出的是对于沥青砂浆而言,当用规范方法绘制主曲线时,可采用已知主曲线模型进行拟合,但对橡胶而言并不存在广泛使用的主曲线模型,因此无法使用规范方法

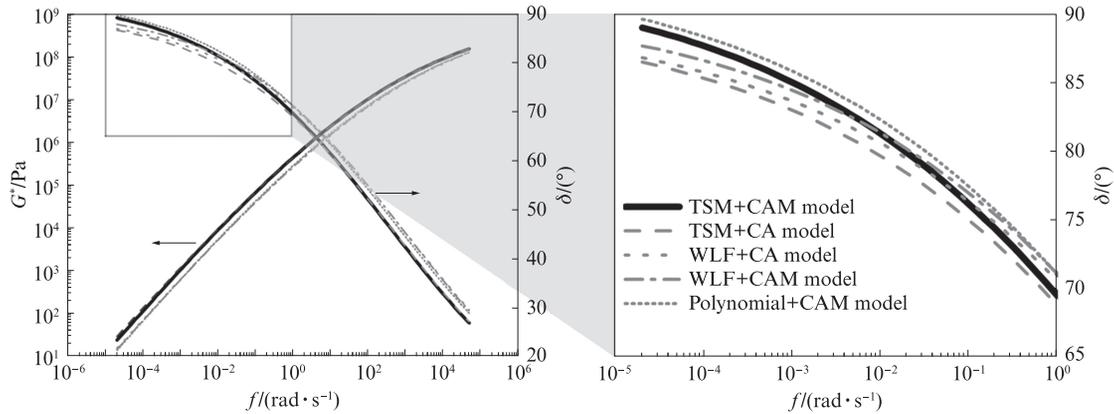


图7 基质沥青采用两阶段方法与规范方法拟合的主曲线
Fig. 7 Master curves fitted by two-stage method and standard method of BA

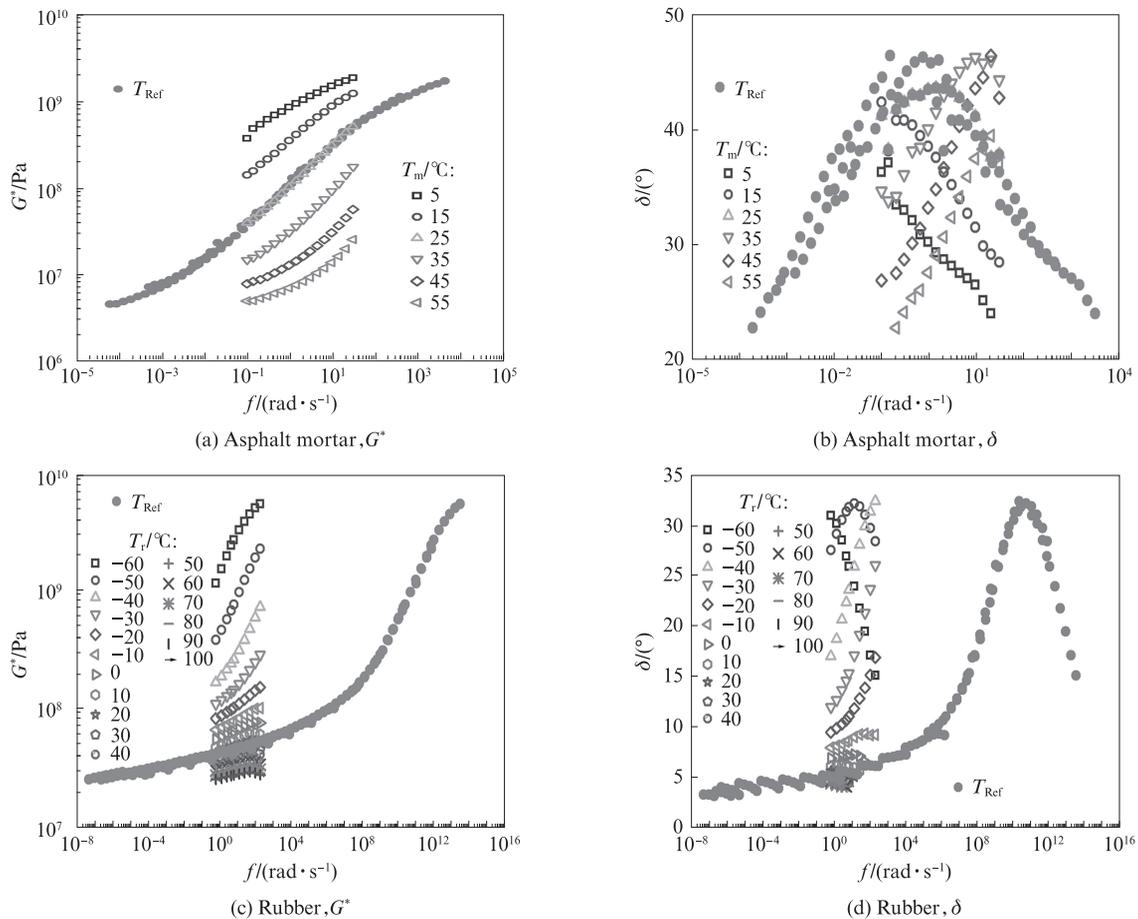


图8 采用两阶段法计算得到的沥青砂浆与橡胶主曲线
Fig. 8 Master curves of asphalt mortar and rubber by two-stage method

进行主曲线拟合.选取25℃作为参考温度,采用两阶段方法计算得到沥青砂浆及橡胶的主曲线,结果见图8.由图8可见,使用两阶段方法能绘制光滑的沥青砂浆、橡胶的动态模量主曲线,且能准确地刻画沥青砂浆及橡胶材料相位角主曲线的“单峰”特性,说明本文所提出的两阶段方法对沥青砂浆、非沥青基材料(如橡胶)的主曲线也有很好的计算效果.

本文仅仅展示了不同材料动态模量与相位角主曲线的计算效果.需要指出的是,沥青基材料蠕变柔量主曲线或松弛模量主曲线的计算也可使用上述两阶段方法的计算原理进行.此外,已有的研究成果表明,沥青混合料层间剪切强度及沥青混合料的力学损伤行为也可使用主曲线描述^[7-8],两阶段方法对此类问题也有较好的适用性.

5 结论

(1)提出了构建沥青基材料主曲线的两阶段方法,可实现主曲线的获取与拟合2个阶段的分离.通过移位因子曲线的插值与平移,可得到任意参考温度下的移位因子与主曲线.

(2)采用两阶段方法绘制主曲线可克服规范方法需要预设主曲线模型与移位因子方程的缺陷,对力学行为模型未知的材料具有较好的适用性.

(3)使用规范方法结合CA模型或CAM模型拟合主曲线时,会低估沥青的动态模量,高估沥青高频段的相位角.两阶段方法在主曲线拟合阶段可对主曲线模型的准确性进行检验,并可用于主曲线模型或移位因子方程的优化.

(4)两阶段方法不仅对构建沥青基材料黏弹性力学行为主曲线有很好的效果,对非沥青基材料及具备时温等效特性材料的力学行为主曲线的绘制也具有较好的扩展性.

参考文献:

- [1] 谭忆秋,单丽岩.沥青与沥青混合料黏弹特性[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017:128-130.
TAN Yiqiu, SHAN Liyan. Viscoelastic characteristics of asphalt binder and asphalt mixture [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2017:128-130.(in Chinese)
- [2] YIN Y M, HUANG W K, LÜ J B, et al. Unified construction of dynamic rheological master curve of asphalts and asphalt mixtures[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(9):1057-1067.
- [3] ZHANG H L, CHEN Z H, XU G Q, et al. Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices [J]. Fuel, 2018, 221:78-88.
- [4] LIU Q, WU J T, ZHOU P F, et al. The master-curve band considering measurement and modeling uncertainty for bituminous materials[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021:5543279.
- [5] 张海伟,郝培文,唐成,等.沥青路面加铺结构中土工布夹层黏结失效时温特性[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(11):183-190.
ZHANG Haiwei, HAO Peiwen, TANG Cheng, et al. Time-temperature characterization of bond failure for geotextile interlayer in asphalt overlay [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11):183-190.(in Chinese)
- [6] 李进.沥青混合料破坏强度主曲线试验研究[D].大连:大连理工大学,2019.
LI Jin. Experimental study on master curve of failure strength of asphalt mixture[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.(in Chinese)
- [7] KIM Y R, LITTLE D N, LYTTON R L. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures[J]. Journal of materials in Civil Engineering, 2003, 15(1):75-83.
- [8] 负迪.基于胎-路接触的沥青路面纹理指标优化及抗滑性能预测研究[D].西安:长安大学,2021.
YUN Di. Texture characterization optimization and skid resistance prediction of asphalt pavement based on tire-road contact [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.(in Chinese)
- [9] DA SILVA L S, DE CAMARGO F M M, DEALENCASTRO V L, et al. Study of rheological properties of pure and polymer-modified Brazilian asphalt binders [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(2):539-546.
- [10] 迟凤霞.基于变形特性的沥青混合料形态学研究[D].广州:华南理工大学,2008.
CHI Fengxia. Study on morphology of asphalt mixture basing on characteristic of deformation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2008.(in Chinese)
- [11] 黄文柯.沥青混合料微观结构的三维粘弹本构及虚拟力学试验研究[D].广州:华南理工大学,2016.
HUANG Wenke. Research on three-dimensional viscoelastic constitutive model and numerical mechanics experiment of asphalt mixture based on internal microstructure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [12] 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.
ZHAO Yanqing, TANG Jimin, BAI Long. Determination of relaxation modulus using complex modulus of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(4):498-502.(in Chinese)