

沥青混凝土动态模量及时-温等效方程

黎 晓^{1,2}, 梁乃兴¹, 陈 玲²

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室, 云南 昆明 650011)

摘 要:应用简单性能试验仪(SPT)进行不同温度和频率下 2 种沥青混凝土材料动态模量试验, 利用时间-温度等效原理和 WLF 经验公式分析, 得到不同基准温度下材料动态模量主曲线簇及位移因子参数值; 在 Arrhenius 粘度公式基础上推导新的时-温等效方程, 提出了 WLF 经验公式中参数 C_1 、 C_2 的物理表达式, 并通过试验结果进行验证。研究表明: 作用频率和温度对沥青混凝土材料动态模量影响规律一致, 但材料相位角在不同温度状态下随加载频率呈现不同变化规律; WLF 经验公式参数 C_1 、 C_2 与材料玻璃点温度 T_g 及相应活化能 ΔE_0 相关, 随基准温度增加 C_1 减小而 C_2 增大, 推导的时-温等效方程能很好地解释这一变化规律; 研究成果可为其他沥青混合料动态特性试验研究提供参考。

关键词:道路工程; 沥青混凝土; 动态特性; 主曲线; 位移因子; WLF 经验公式; 时-温等效方程

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Dynamic modulus and time-temperature equivalence equation of asphalt concrete

LI Xiao^{1,2}, LIANG Nai-xing¹, CHEN Ling²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Meteorological Disaster Prevention of Land Transportation National Engineering Laboratory, Kunming 650011, Yunnan, China)

Abstract: Through dynamic modulus test at different temperatures and different frequencies of two asphalt concretes using simple performance tester, dynamic modulus master curves and parameters of shift factor at different reference temperatures were obtained according to time-temperature equivalence principle and WLF empirical formula. Based on the Arrhenius viscosity equation, a new time-temperature equivalence equation was deduced. The expressions of empirical parameter C_1 and C_2 were in WLF empirical formula proposed and proved by dynamic modulus test results of asphalt concretes. The results show that temperature and frequency have the same influence on the dynamic modulus, but the variation of the phase angle depends on the temperature status. The empirical parameter C_1 and C_2 are related to glass transition temperature T_g and activation energy ΔE_0 in WLF formula C_1 decreases and C_2 increases while the reference temperature rises, which can be explained by the deduced time-temperature equivalence equation. The study can provide reference for dynamic characteristics tests on other asphalt mixtures. 4 tabs, 7 figs, 14 refs.

Key words: road engineering; asphalt concrete; dynamic characteristic; master curve; shift factor; WLF empirical formula; time-temperature equivalence equation

0 引言

沥青路面力学-经验设计方法中材料力学性质是进行路面结构力学响应分析和厚度设计的重要参数。由于沥青材料的流变性状,沥青混合料力学性质与加载时间和温度相关,其应力-应变关系对加载时间、温度变化具有很大依赖性。目前美国 AASHTO2002 设计指南及 NCHRP 项目均采用动态性能试验来测定材料力学参数,因此考虑材料动态特性的路面设计方法已成为未来的发展方向。而目前中国沥青路面设计仍采用 15 ℃和 20 ℃时静态单轴压缩回弹模量作为沥青混合料材料劲度性质的参数^[1-3]。针对沥青路面设计中材料动态参数的系统研究已经开展多年,研究人员通过不同温度和频率下的周期加载方式测定沥青混合料动态模量,构建材料模量主曲线进而分

析其变化规律,已获得了一定的成果^[4-7]。
本文采用 NCHRP9-29 简单性能试验仪(SPT)对 2 种常用的沥青混合料进行动态模量试验研究,利用时温等效原理确定材料动态模量主曲线,通过分析不同基准温度下 WLF 时-温等效方程中参数变化规律,给出该经验公式中相关参数的物理表达式的推导。

1 试验方法

试验选择常用的 AC-20、AC-25 沥青混凝土材料进行动态模量测定试验。集料采用本地产石灰岩,沥青采用 SK70# 沥青,填料选用石灰岩矿粉,各材料性能均满足中国规范要求,设计级配见表 1。通过马歇尔试验确定 AC-25、AC-20 沥青混凝土相应最佳油石比分别为 4.0%和 4.4%。

表 1 试验沥青混凝土级配组成
Tab. 1 Gradation compositions of asphalt concretes in test

级配类型	下列筛孔(mm)的通过率/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-25	100	98.2	83.4	76.4	70.9	57.9	38.4	31.5	25.2	15.9	8.2	5.8	4.4
AC-20	100	100.0	97.6	90.2	84.7	68.9	39.1	24.0	18.6	14.8	8.4	6.1	4.9

动态模量试验参照 AASHTO TP62-03 标准,采用简单性能试验仪(SPT)完成^[8]。试验首先用旋转压实仪(SGC)成型 $\Phi 150\text{ mm}\times 170\text{ mm}$ 原始试件,空隙率控制在 $(4.0\pm 2)\%$,经钻取芯样以及双面锯切割后最终成型 $\Phi 100\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的圆柱体试件。试验温度为 10、20、30、40 ℃,每个试验温度设定 25、20、10、5、2、1、0.5、0.2、0.1 Hz 共 9 个加载频率。试验过程在 4 种温度环境下由低频到高频对试件施加轴向正弦波荷载,测定相应时间所施加的应力和轴向应变,在不考虑围压的情况下控制应变在 $(50\sim 150)\times 10^{-6}$ 之间,每个试验温度条件下进行 3 组平行试验。

2 试验结果分析

沥青混合料是具有粘弹性性质的多相复合材料,由于沥青材料的流变性状,混合料材料的力学性质与荷载作用时间(或频率)和温度条件相关。由于沥青混合料粘滞性质,应变滞后于应力,其延迟程度以相位角 φ 表征,随着相位角增大,材料性质更趋向于粘性。通过试验测定了不同温度、不同加载频率

下动态模量值和相应的相位角。
下页图 1、图 2 分别为 AC-25、AC-20 沥青混凝土在不同温度条件下的动态模量值随频率变化规律;下页图 3、图 4 分别为 AC-25、AC-20 沥青混凝土动态模量与相位角变化关系。由图 1 可见,材料动态模量随加载频率降低而减小,随试验温度降低而增大。而相位角的变化规律在不同温度条件下表现出差异性。由图 3、图 4 中动态模量-相位角曲线可看出,在 10 ℃、20 ℃时,随着材料动态模量减小(作用频率减小导致),相位角逐渐增加;30 ℃时,相位角随着荷载频率减小出现峰值,表现出先增加后减小的规律;40 ℃时,相位角是随着频率减小而减小的。

究其原因,在低温或常温状态下的沥青混合料劲度受胶结料性质影响较大,若荷载作用时间增大其粘滞性表现更明显;而温度较高时,尽管材料也表现出粘弹性,胶结料性质对于材料劲度也具有一定贡献,但沥青混合料中集料骨架的嵌挤对劲度影响相对于胶结料来说更加明显,随着荷载作用时间增加,相位角减小。而处于中间温度阶段,相位角随频

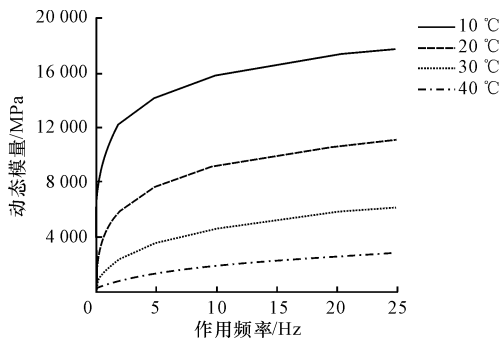


图 1 AC-25 沥青混合料不同温度的动态模量变化规律

Fig. 1 Variation of dynamic modulus under different temperatures(AC-25)

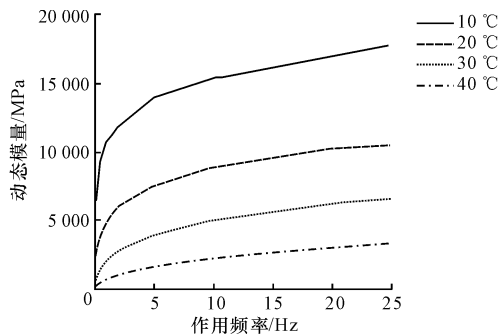


图 2 AC-20 沥青混合料不同温度的动态模量变化规律

Fig. 2 Variation of dynamic modulus under different temperatures(AC-20)

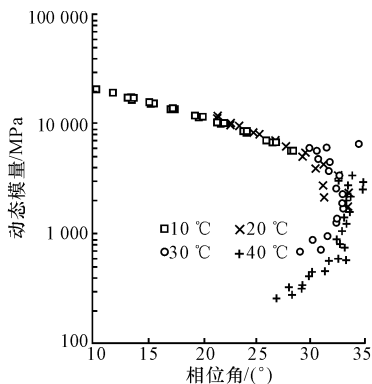


图 3 AC-25 沥青混合料不同温度的动态模量-相位角曲线

Fig. 3 Variation of dynamic modulus-phase angles under different temperatures(AC-25)

率增加是先增大后减小的。因此,由试验结果也能看到高温条件下相位角曲线离散性较大。上述变化趋势使相位角曲线无法同动态模量主线一样通过平移形成光滑的主曲线。

3 动态模量主曲线的构建及分析

沥青混合料作为典型的粘弹性材料,其高分子结构性能对外界激励的响应很大程度上依赖于作用速率或温度,材料在不同时间尺度上的力学行为遵

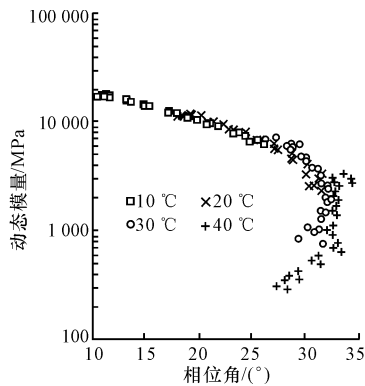


图 4 AC-20 沥青混合料不同温度的动态模量-相位角曲线

Fig. 4 Variation of dynamic modulus-phase angles under different temperatures(AC-20)

循时间-温度置换原则:即低温下测定的力学数据可以转换为短时(高频)条件下的结果;高温下测定的力学数据可转换为长时(低频)条件下的结果。这样在沥青混合料各种条件下的试验研究中,将本来需要很长时间的试验观测通过高温可较短时间完成,亦或是将需要在极短时间内进行的、难以完成的试验降低到合适温度来测定。

对本文中沥青混合料动态模量进行试验研究,可以将不同温度下测定的模量曲线通过水平移动,得到选定基准温度下的一条光滑曲线。Pellinen 提出采用如式(1)所示的 Sigmoidal 函数对动态模量“S”型主曲线进行非线性拟合^[9]。

$$\lg(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma[\lg(\xi) + \lg(a(T))]}} \quad (1)$$

式中: E^* 为动态模量(MPa); δ 为最小模量; α 为动态模量幅值; β 、 γ 为形状参数; ξ 为相应加载频率(Hz);温度位移因子 $a(T)$ 表示不同温度下模量曲线相对于基准温度模量曲线的平移量。

粘弹性材料的温度位移因子 $a(T)$ 常用 WLF 时-温等效方程来计算,见式(2)

$$\lg(a(T)) = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (2)$$

式中: C_1 、 C_2 为拟合参数; T_0 为基准温度(K),表示开尔文温度,数值上等于摄氏度 $T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$ 。

本文采用 1stopt 数学优化分析软件,根据试验结果拟合不同基准温度下 Sigmoidal 函数参数,通过计算得到材料动态模量主曲线方程,下页图 5 为 AC-25 不同基准温度下的模量主曲线。2 种沥青混凝土材料主曲线函数拟合结果及位移因子值见下页表 2。由残差平方和 SSE 以及与总偏差平方和 SST 的比值可以判断出,相应参数结果下的 Sigmoidal 函数具有很好的拟合优度。

表 2 中位移因子为基准温度 20 ℃ 下的计算结果,即构建主曲线时各温度条件下模量曲线的平移量,一定程度上也反映了材料性能与温度-作用频率相关性。可以看出,AC-20 温度依赖性相比 AC-25 更小。由于模量主曲线是通过平移各温度条件下模量曲线构建,因而表征曲线斜率的 γ 和模量值范围的 α 、 δ 不随基准温度改变而变化。表 3 为不同基准温度下 2 种类型材料的主曲线参数 β 和 WLF 温度位移因子参数拟合结果,可以看出其中表征曲线反弯点水平位置的 β 随基准温度升高而增大;而 WLF 方程中参数随着基准温度的升高呈现 C_1 减小而 C_2 增大的规律。

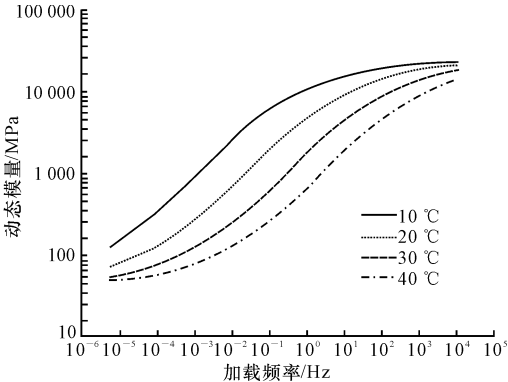


图 5 不同基准温度下 AC-25 沥青混合料动态模量主曲线

Fig. 5 Dynamic modulus master curves of AC-25 at different reference temperatures

表 2 Sigmoidal 函数拟合结果及基准温度 20 ℃ 的位移因子

Tab. 2 Fitting results of Sigmoidal function and shift factors at 20 ℃

类别	AC-25	AC-20
δ	1. 615	1. 962
α	781	2. 31
β	-1. 072	-1. 087
γ	0. 651	0. 872
C_1/C_2	2 225. 1	2 191. 3
SSE/SST	0. 007/9. 12	0. 017/8. 55
$\lg(a(T))$	10 ℃	1. 448
	30 ℃	-1. 240
	40 ℃	-2. 310

4 WLF 时-温等效方程

式(2)所示 WLF 经验方程最初是由大量材料试验的经验结果获得,是高分子材料长期使用性能及超短时间内行为预测的计算依据。研究人员曾在 Doolittle 方程基础上通过自由体积分数推导,得到了形式上与 WLF 经验方程极其相似的表达式,其推导结果表明 C_1 、 C_2 与玻璃化温度时的自由体积分数相关^[10]。但是由前述试验结果可知,不同类型材料的 C_1 、 C_2 值存在一定的差异,且随着基准温度的变化,

表 3 不同基准温度下沥青混凝土 WLF 时-温等效方程拟合参数

Tab. 3 Fitting results of WLF time-temperature equivalence equation at different reference temperatures

级配类型	参数	不同基准温度(℃)下的拟合参数					
		-10	10	20	25	30	40
AC-20	β	-4. 024	-1. 900	-1. 072	-0. 702	-0. 357	0. 267
	C_1	20. 611	17. 347	16. 075	15. 506	14. 976	14. 018
	C_2	106. 317	126. 317	136. 317	141. 317	146. 317	156. 317
AC-25	β	-3. 694	-1. 810	-1. 087	-0. 766	-0. 468	0. 068
	C_1	22. 462	18. 689	17. 241	16. 598	16. 001	14. 928
	C_2	99. 058	119. 058	129. 058	134. 058	139. 058	149. 058

C_1 和 C_2 同样存在不同的变化规律,这些都无法通过自由体积分数的常数表达式来进行解释,因此需要从新的角度对 WLF 时-温等效方程进行推导。

根据位移因子 $a(T)$ 定义^[11],有

$$a(T)=\frac{\tau_{T_1}}{\tau_{T_2}}\approx\frac{\rho_2 T_2}{\rho_1 T_1}\frac{\eta(T_1)}{\eta(T_2)}\tag{3}$$

式中: ρ_1 、 ρ_2 分别为温度 T_1 、 T_2 时的密度, τ_{T_i} 为材料温度 T_i 状态下的松弛时间; $\eta(T_i)$ 为粘度函数。

在试验温度范围内,沥青混合料密度变化很小且式(3)中温度为开尔文温度,故可视 $(\rho_2 T_2/\rho_1 T_1)$ 为近似为 1 的值^[12]。则 $a(T)$ 可以用不同温度下的粘度函数比值来表示

$$a(T)=\tau_{T_1}/\tau_{T_2}=\eta(T_1)/\eta(T_2)\tag{4}$$

当高分子材料为粘弹性状态且温度从 T_1 变化至 T_2 时,由 Arrhenius 粘度方程可得

$$\ln\left(\frac{\eta(T_1)}{\eta(T_2)}\right)=\frac{1}{R}\left[\frac{\Delta E_1}{T_1}-\frac{\Delta E_2}{T_2}\right]\tag{5}$$

式中: ΔE_i 为 T_i ($i=1,2$) 温度状态下对应的材料活化能(J/mol); R 为普适气体常数,其值等于 8. 314 (J/mol · K)。

对于式(5),若 $T_1>T_2$,根据表 2 中 $\lg(a(T))$ 试验结果可知,必有 $\Delta E_1/T_1<\Delta E_2/T_2$,而目前材料研究结果显示,处于不同温度状态下的材料活化能 ΔE_i 会由于温度变化而产生相应改变,升温过程会导致沥青材料分子间链段相互减弱^[10],即 $\Delta E_1<\Delta E_2$ 。那么对于式(5)右侧两项可以采用下式进行等效,则有

$$\frac{\Delta E_1}{T_1}=\frac{\Delta E_2}{T_2+r(T_1-T_2)}\tag{6}$$

式中: r 为不同温度状态转变速率的常数,可视其为反映材料温度敏感性的系数。

将式(6)代入式(5)右项,整理并换算对数项可得到

$$\lg\left(\frac{\eta(T_1)}{\eta(T_2)}\right)=-\frac{\Delta E_2}{2. 303RT_2}(T_1-T_2)/\left[\frac{T_2}{r}+(T_1-T_2)\right]$$

使得: $C_1=\frac{\Delta E_2}{2. 303RT_2}$, $C_2=\frac{T_2}{r}$ (7)

可以看到式(7)从形式上和 WLF 经验公式是一致的。从上述 C_1 、 C_2 参数表达式可以看出, C_1 和 C_2 与基准温度 T_2 以及相应状态下活化能 ΔE_2 有关。因此, 将其作为常数来描述材料物理状态变化时的时-温等效过程是不合理的, 必将导致较大的误差。由试验结果拟合可得图 6 所示材料基准温度活化能关系曲线。

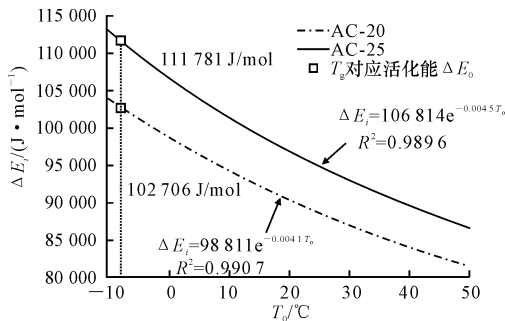


图 6 活化能 ΔE_i 与基准温度 T_0 的关系曲线
Fig. 6 Relationship curve of activation energy ΔE_i -reference temperature T_0

在式(6)基础上进一步考虑材料温度状态由玻璃点温度 T_g 向 T_1 状态下改变。首先当温度从 T_g 转变至基准温度 T_2 时, 根据前述讨论有

$$\frac{\Delta E_2}{T_2} = \frac{\Delta E_0}{T_g + \xi(T_2 - T_g)} \tag{8}$$

温度状态持续地从基准温度 T_2 转变为 T_1 , 则下列等效式亦成立

$$\frac{\Delta E_1}{T_1} = \frac{\Delta E_0}{T_g + \xi(T_2 - T_g) + r(T_1 - T_2)} \tag{9}$$

式中: ξ 同 r 含义一致, 即表示不同温度状态转变速率, 反映了材料的温度敏感程度; ΔE_0 为材料玻璃点温度对应的固有活化能, 是与材料有关的常数; T_g 为玻璃点温度(K)。

目前有研究提出了沥青混合料玻璃点温度测定方法以及沥青与沥青混合料玻璃化转变温度的关系曲线^[13~14], 参照文献[14]的研究结论, 本文取 $T_g = 265.15$ K。将式(8)和式(9)代入式(5), 经整理可以得到

$$\lg(a(T)) = \frac{\Delta E_0(T_1 - T_2)/2.303R[T_g + \xi(T_2 - T_g)]}{[T_g + \xi(T_2 - T_g)]/r + (T_1 - T_2)} \tag{10}$$

则有

$$C_1 = \frac{\Delta E_0}{2.303R[T_g + \xi(T_2 - T_g)]}$$
$$C_2 = \frac{T_g + \xi(T_2 - T_g)}{r}$$

由式(10)的 2 个参数表达式可知, C_1 与材料玻璃点温度 T_g 以及相应的固有活化能 ΔE_0 相关, C_2 与 T_g 和温敏系数 r 大小有关。当基准温度 T_0 一

定时, ΔE_0 越大则 C_1 越大, 温敏系数越小则 C_2 越大, 由此说明对于不同类型材料 C_1 、 C_2 是存在差异的; 而对于同一材料来说, 当基准温度 T_2 由玻璃点温度 T_g 开始并增大时, C_1 值相应变小而 C_2 值相应增大; 由式(10)亦可看出 C_1 、 C_2 值是 与 ΔE_0 和温敏系数 r 相关的常数, 上述规律均与前述基准温度变化时 C_1 、 C_2 的变化规律相吻合。这样通过式(10)表达式, 时-温等效方程中的参数就赋予了明确的物理意义, 前述的试验结果也能得到很好解释。

在式(10)基础上对试验结果进行最小二乘法拟合, 若考虑材料不同温度状态下温敏系数相同, 则能得到表 4 所示结果。可以看到, ΔE_0 、 ξ 和 r 均为与材料性质类型相关的常数, 且 ΔE_0 与图 6 中计算得到玻璃点温度下固有活化能值是一致的。图 7 所示为推导时-温等效方程计算所得动态模量值与试验测量值的对比。由图 7 可见, 动态模量数据点基本分布在等值线附近, 计算值与实测值具有较好的一致性, 该方程使得拟合结果也有较高的精度。

表 4 推导时-温等效方程拟合结果

Tab. 4 Fitting results of deduced time-temperature equivalence function		
拟合参数	AC-20	AC-25
$\Delta E_0/(J \cdot mol^{-1})$	102 706	111 781
$\xi=r$	2.448	2.624

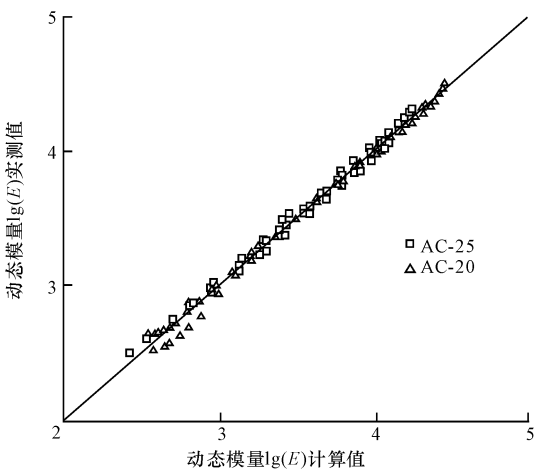


图 7 推导时-温等效方程动态模量计算值与实测值对比
Fig. 7 Comparison of calculated values and test values of dynamic modulus by deduced time-temperature equivalence equation

5 结 语

(1) 沥青混凝土材料动态模量随温度降低或荷载频率增大而增大, 在低温和常温状态时, 相位角随荷载频率增大而减小, 高温状态时, 相位角随荷载频率增大而增大, 中间温度状态测定的相位角存在先

增大后减小的变化规律。

(2)由时-温等效原理和 WLF 经验公式构建的 Sigmoidal 函数材料动态模量主曲线簇光滑连续,可反映沥青混合料时间-温度转换特征,计算结果具有较高的拟合优度。

(3)利用 Arrhenius 粘度公式推导得到与 WLF 经验公式形式一致的时-温等效方程,提出了具有明确物理意义的参数 C_1 、 C_2 表达式,证明采用单一常数的 WLF 方程描述沥青混凝土材料不同物理状态下时-温等效过程是不合理的;推导结果可以很好地解释参数 C_1 、 C_2 变化规律。

(4)WLF 经验公式的适用范围为 $[T_g, T_g + 100\text{ }^\circ\text{C}]$,因此低于材料玻璃点温度的参数变化规律还需更多试验验证;本文研究结果也可为其他沥青混合料的蠕变特性研究提供参考。

参考文献:

References:

- [1] 姚爱玲,张西玲,王选仓.测试方法对沥青混合料抗压回弹模量的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):21-24.
YAO Ai-ling, ZHANG Xi-ling, WANG Xuan-cang. Affect of test methods on compression module of asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(6): 21-24. (in Chinese)
- [2] Zhou H P, Holikatti S, Vacura P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products; a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [3] Maggiore C, Airey G, Marsac P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 49-54.
- [4] Zhao Y Q, Liu H, Liu W Q. Characterization of linear viscoelastic properties of asphalt concrete subjected to confining pressure[J]. Mechanics of Time Dependent Materials, 2013, 17(3): 449-463.
- [5] Zhao Y Q, Tang J M, Liu H. Construction of triaxial dynamic modulus master curve for asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37(4): 21-26.
- [6] 马翔,倪富健,陈荣生.沥青混合料动态模量试验及模型预估[J].中国公路学报,2008,21(3):35-39.
MA Xiang, NI Fu-jian, CHEN Rong-sheng. Dynamic modulus test of asphalt mixture and prediction model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 35-39. (in Chinese)
- [7] 裴建中,张久鹏,王秉纲.沥青混合料时间-应力-温度等效研究[J].建筑材料学报,2011,14(5):639-644.
PEI Jian-zhong, ZHANG Jiu-peng, WANG Bing-gang. Research on time-stress-temperature equivalence of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 639-644. (in Chinese).
- [8] AASHTO TP 62-03—2002, Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixture[S].
- [9] 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(3): 281-309.
- [10] 刘薇,金日光,励航泉.高分子材料时-温等效性的研究(I) 时-温等效理论的现状和非线性松弛活化能谱理论的提出[J].北京化工学院学报,1991,18(1):24-36.
LIU Wei, JIN Ri-guang, LI Hang-quan. Study on time-temperature of high polymer I: the present status of time-temperature equivalency theory and proposal of non-linear relaxation activation energy spectrum theory[J]. Journal of Beijing Institute of Chemical Technology, 1991, 18(1): 24-36. (in Chinese).
- [11] Ferry J D. Viscoelastic properties of polymer[M]. Hoboken: John Wiley and Sons Inc, 1970.
- [12] 郑强,林宇,叶一兰,等.高分子物理教学中 WLF 方程的系数求解与分析[J].高分子通报,2010(6): 99-105.
ZHENG Qiang, LIN Yu, YE Yi-lan, et al. The solution and analysis on parameters of WLF equation in teaching the course polymer physics[J]. Polymer Bulletin, 2010(6): 99-105. (in Chinese).
- [13] 曹丽萍,谭忆秋,董泽蛟,等.应用玻璃化转变温度评价 SBS 改性沥青低温性能[J].中国公路学报,2006, 19(2): 1-6.
CAO Li-ping, TAN Yi-qiu, DONG Ze-jiao, et al. Evaluation for low temperature performance of SBS modified asphalt using glass transition temperature[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 1-6. (in Chinese).
- [14] 尹应梅,张肖宁,邹桂莲.基于玻璃化转变温度的沥青混合料低温性能研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(10):89-93.
YIN Ying-mei, ZHANG Xiao-ning, ZOU Gui-lian. Investigation into low-temperature performance of asphalt mixture based on glass transition temperature[J]. Journal of South China University of Technology: Nature Science Edition, 2010, 38(10): 89-93. (in Chinese)

