

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201708124

沥青混合料玻璃态转变温度的外部影响因素

牛 岩¹,张晨晨²,王旭东¹,张 蕾¹

(1.交通运输部 公路科学研究所,北京 100088;2.东南大学 交通学院,南京 210096)

摘 要:为探究环境因素、交通水平等外部条件对沥青混合料玻璃态转变温度的影响,研究选取升温速率、荷载频率、应变水平 3 个试验因素,采用 DMA 方法在不同试验水平下对沥青混合料试件进行温度扫描试验.利用 Boltzmann 模型拟合得到材料的玻璃态转变温度,通过对试验结果的统计分析,确定影响玻璃态转变温度的主要因素,并建立了多因素影响下的玻璃态转变温度预测模型.结果表明:采用 Boltzmann 模型能够准确有效地确定材料玻璃态转变温度;升温速率、荷载频率对沥青混合料的玻璃态转变温度有显著影响,玻璃态转变温度随着升温速率、荷载频率的增大而升高,玻璃态转变温度与升温速率、荷载频率的对数值存在良好的线性关系;处于弯拉受力模式下的沥青混合料,其玻璃态转变温度在线粘弹性区域内并无明显的应变依赖性.

关键词:道路工程;沥青混合料;玻璃态转变温度;动态力学分析法;影响因素;线性回归;方差分析

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)09-0137-07

External influence factors on the glass transition temperature of asphalt mixture

NIU Yan¹, ZHANG Chenchen², WANG Xudong¹, ZHANG Lei¹

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to explore the influence of external conditions on the glass transition temperature of asphalt mixture, such as environment and traffic, three factors including heating rate, load frequency, and strain level were considered in this research. Temperature sweep test was developed by DMA method at different test levels. The glass transition temperature of asphalt mixture was obtained by Boltzmann model. The main affecting factors of glass transition temperature were determined by statistical analysis of the experimental results, and then the prediction model of the glass transition temperature under multiple factors was established. Results show that the Boltzmann model could accurately and effectively determine the glass transition temperature of asphalt mixture. The heating rate and load frequency had a significant effect on the glass transition temperature, which increased as the heating rate and load frequency increased. In addition, there was a good linear relationship between the glass transition temperature and the logarithm of heating rate and the load frequency. The glass transition temperature of asphalt mixture had no obvious strain dependence in liner viscoelastic region under bending mechanics condition.

Keywords: road engineering; asphalt mixture; glass transition temperature; dynamic mechanical analysis (DMA); influence factors; liner regression; analysis of variance

沥青混合料是一种典型的温度敏感性材料,随温度的不同,沥青混合料呈现出 3 种明显不同的流变学状态:玻璃态、橡胶态、粘流态.玻璃态转变温度是材料在温度变化过程中的一个临界温度,在该温度之前材料处于玻璃态,表现为模量较高的脆性体.当温度继续升高到一定范围后,材料表现为柔软而富有弹性的橡胶态.通常将玻璃态与橡胶态之

间的转变区域称为玻璃态转变,所对应的转变温度定义为玻璃态转变温度.在该转变温度处,材料的物理、化学性能发生骤变,因此材料的玻璃态转变温度具有丰富的工程意义^[1].

材料的玻璃态转变温度与材料的低温性能密切相关,文献[2-4]通过试验证明玻璃态转变温度与沥青混合料的低温性能密切相关.当材料处于玻璃态时,材料的分子锻链结构几乎处于冻结状态,因此材料在较小的形变便可能被破坏.而当材料的温度高于其玻璃态转变温度时,由于分子锻链开始解冻,分子运动空间变大,材料拥有较好的变形能力.

材料的玻璃态转变温度可以通过试验直接测

收稿日期:2017-08-30

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFB0303103)

作者简介:牛 岩(1991—),男,硕士;

王旭东(1968—),男,研究员,博士生导师

通信作者:王旭东,xd.wang@rioh.cn

量,测量原理主要是利用材料在玻璃态转变温度时,力学性质和物理性质发生显著变化或突变.原则上说,所有在该时刻发生显著变化和突变的物理性质,都可以用来测量材料的玻璃态转变温度^[5].例如材料的体积、膨胀系数、比热容、介电常数等.

材料的玻璃态转变温度是高分子链运动从冻结到运动(或与之相反)的一个转变温度,因此凡是能够影响分子链柔韧性的因素都可以对玻璃态转变温度产生影响^[6].而沥青混合料作为一种多相粘弹性材料,其各项性能指标和力学响应具有明显的温度、荷载依赖性,在不同气候、荷载和行车速度等条件的耦合下,材料将产生不同的粘弹响应.

综上所述,目前对于材料玻璃态转变温度的研究主要集中于探讨材料玻璃态转变温度与低温性能的相关性以及材料玻璃态转变温度的确定方法.鉴于此,本研究选取升温速率、荷载频率、应变水平 3 个因素模拟沥青混合料在不同气候、不同交通量下的服役行为,利用动态力学分析仪测定沥青混合料在不同条件下的玻璃态转变温度,通过对试验结果的统计分析,确定影响沥青混合料玻璃态转变温度的主要因素,并且建立多因素综合作用下沥青混合料玻璃态转变温度的预估模型.

1 玻璃态转变温度影响因素分析

1.1 试验设计

1.1.1 试验材料与试件切割

本试验采用的沥青混合料切片长为 (60 ± 5) mm,宽为 (15 ± 1) mm,厚为 (3 ± 0.1) mm.沥青混合料切片试件的切割分两步进行,首先将 SGC 压实成型的试件用切割机切割为长 45 mm,宽 45 mm,高 10 mm 的长方体试块,再用高精度切割机(切割精度 $10\text{ }\mu\text{m}$)将试块切割为规定尺寸的切片试件,切割过程如图 1 所示.由于试验所需沥青混合料尺寸较小,如果混合料级配较粗,可能导致试验结果变异性增大,为增加试验结果精度,本试验采用细粒式沥青混合料 AC-5,矿料关键筛孔(4.75、2.36、0.075 mm)的通过率分别为 100%、84.8%、10%,沥青胶浆为 SBS 改性沥青,沥青混合料油石比为 6.5%.

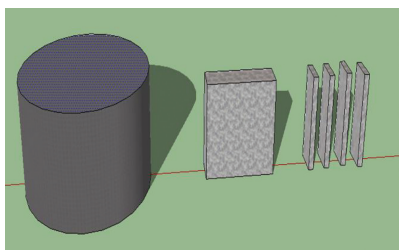


图 1 试件切割过程示意图

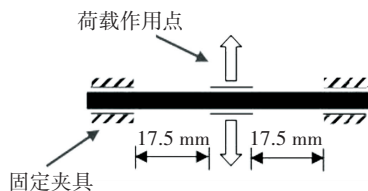
Fig.1 Procedure of sample shaping

1.1.2 试验设备与方法

沥青混合料玻璃态转变温度试验使用 DMA (Q800) 动态力学分析仪对沥青混合料进行温度扫描试验.即对沥青混合料试件在某一加载频率下施加恒定应变和线性加热速率,按照 0.01 s 的时间间隔采集沥青混合料在升温过程的粘弹参数.试验时首先将沥青混合料切片试件固定在 DMA 双悬臂夹具上,如图 2(a) 所示,然后在弯拉受力模式下对试件进行温度扫描,如图 2(b) 所示.试验采用氮气控制工作炉内的环境温度,对试件进行温度扫描时工作炉内的热电偶实时测量和采集试件温度.



(a) DMA 双悬臂夹具



(b) 双悬臂夹具受力示意图

图 2 DMA 设备简介图

Fig.2 Schematic of DMA equipment

试验设计采用控制变量法分别探究升温速率、荷载频率、应变水平对沥青混合料玻璃态转变温度的影响.温度扫描作为材料流变特性分析的一种方法,在试验过程中材料需处于线粘弹性区域,因此在温度扫描试验前需进行应变扫描确定材料的线粘弹性区域(liner viscoelastic region, LVR).根据相关研究表明,如果沥青混合料的复数模量降低至不超过其最大复数模量的 10%,则沥青混合料处于线粘弹性区间内.文献[7]发现沥青的线粘弹性区间随着温度的降低而减小;文献[8]研究发现沥青的线粘弹性区间随着频率的降低而减小.考虑到本研究试验条件组合方式较多,选择线粘弹性区间最小的情况进行应变扫描,即在温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、0.1 Hz 的条件下利用 DMA 对沥青混合料切片进行应变扫描试验.通过试验得到当应变水平小于 0.02% 时沥青混合料处于线粘弹性区间.根据应变扫描的结果确定温度扫描试验方案如下:1) 升温速率对材料玻璃态转变温度影响试验.温度过程为首先在初始温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温 10 min,然后分别按照 0.2、0.5、1、2、4、8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率至 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验的应变

水平为0.003%,加载频率为 10 Hz. 每个升温速率下进行 3 次平行试验. 2) 荷载频率对材料玻璃态转变温度影响试验. 温度过程为首先在初始温度-20 ℃ 恒温10 min,然后以 1 ℃/min 升温速率上升至 80 ℃,试验的应变水平为 0.003%,试验的加载频率分别为0.1、1、10、25、50、80 Hz. 每个荷载频率下进行 3 次平行试验. 3) 应变水平对材料玻璃态转变温度影响试验. 温度过程为首先在初始温度-20 ℃ 恒温10 min,然后以 1 ℃ /min升温速率上升至 80 ℃,荷载频率为 10 Hz. 试验的应变水平分别为 0.003、0.006、0.009、0.012、0.015、0.018%. 每个应变水平下进行 3 次平行试验.

1.2 试验数据处理与分析

1.2.1 玻璃态转变温度的确定

文献[9]提出利用材料在动态力学试验中的粘弹参数的变化曲线来确定材料的玻璃态转变温度;文献[10]根据材料的动态力学性能谱提出了 3 种玻璃态转变温度的定义方法: 1) 将储能模量曲线上折点所对应的温度定义为 T_g ; 2) 将损耗模量的峰值点所对应的温度定义为 T_g ; 3) 将相位角的峰值点所对应的温度为 T_g . 3 种不同的定义方法如图 3 所示.

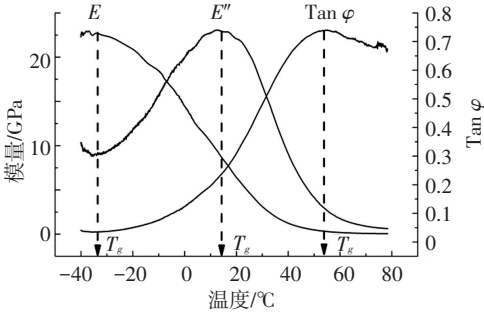


图 3 玻璃态转变温度定义

Fig.3 Definition of glass transition temperature

不同的研究采用的玻璃态转变温度的定义方法不同,本研究将复数模量 $E^* - T$ 曲线折点所对应的温度定义为沥青混合料的玻璃态转变温度. 为更加准确地获取材料的玻璃态转变温度,本研究采用 Boltzmann 模型

对 $E - T$ 曲线进行拟合,该模型函数表达式为

$$y = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2. \tag{1}$$

式中: y 为材料模量的对数值, x 为温度值, A_1 、 A_2 、 dx 、 x_0 均为回归系数, x_0 为曲线拐点; $y = A_1$ 、 $y = A_2$ 为 Boltzmann 函数的上下两条渐近线.

曲线特征如图 4 所示,曲线折点横坐标即材料的玻璃态转变温度 T_g ,计算公式为

$$T_g = -2dx + x_0. \tag{2}$$

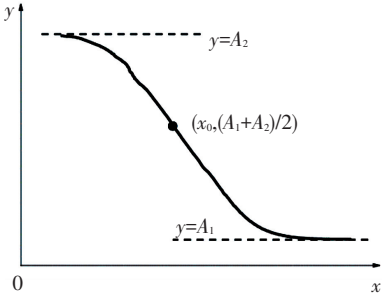


图 4 Boltzmann 函数

Fig.4 Boltzmann function

1.2.2 数据处理与分析

按照试验方案对沥青混合料试件进行不同升温速率、不同荷载频率以及不同应变水平下的温度扫描试验,得到图 5 所示的温度谱. 图 5(a)描述了材料在不同升温速率下复数模量变化规律. 由图可知;在低温和高温区,不同升温速率的 $E - T$ 曲线较为接近,即在该区段内沥青混合料的复数模量水平接近. 而在中温区,升温速率越高,曲线在水平方向上越偏向右侧. 图 5(b)描述了不同荷载频率下复数模量变化规律. 由图可见,在中温与低温区,荷载频率越高,沥青混合料的初始复数模量越大, $E - T$ 曲线的位置越高,而随着温度的升高,不同频率的下材料的复数模量的差距逐渐缩小.图 5(c)反应了不同应变水平下复数模量 $E - T$ 曲线的变化规律. 由图可见,不同应变水平下材料的 $E - T$ 曲线无明显变化,曲线特征几乎保持一致.

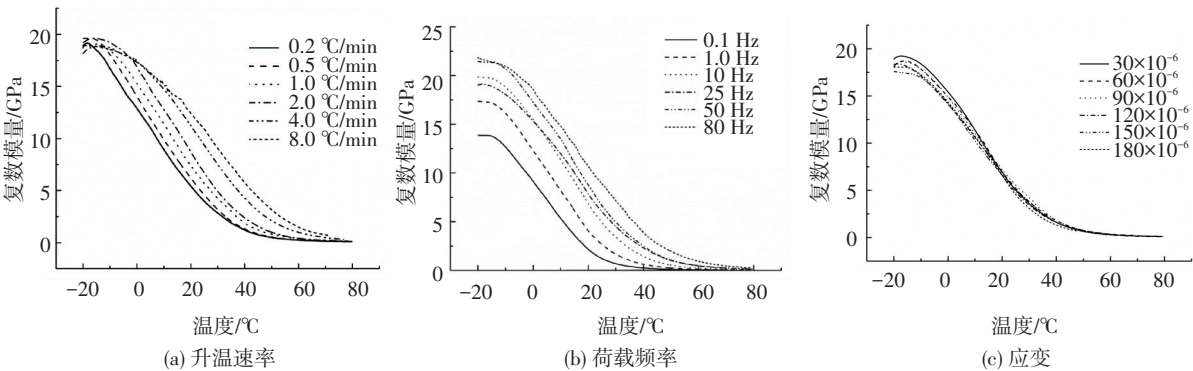


图 5 不同控制因素下沥青混合料温度谱

Fig.5 Temperature spectrum of asphalt mixture under different control factors

为明确材料的玻璃态转变温度在各试验因素下的变化规律,采用 Boltzmann 模型拟合上图中的温度谱曲线,并计算得到沥青混合料在不同升温速率、不同荷载频率以及不同应变水平下的玻璃态转变温度,对结果进行单因素方差分析. 结果分别见表 1~6.

表 1 不同升温速率下沥青混合料 T_g 试验结果表
Tab.1 T_g of asphalt mixture under different heating rates

升温速率/ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	玻璃态转变温度/ $^{\circ}\text{C}$			均值/ $^{\circ}\text{C}$	变异系数/ %
	样本 1	样本 2	样本 3		
0.2	-23.6	-23.8	-22.2	-23.2	3.14
0.5	-18.9	-19.1	-17.0	-18.4	5.25
1	-11.8	-11.7	-10.4	-11.3	5.71
2	-9.6	-9.6	-8.2	-9.1	7.54
4	-4.5	-5.6	-4.0	-4.7	13.8
8	-1.1	-1.4	-1.8	-1.5	12.0

表 2 不同升温速率下沥青混合料 T_g 方差分析表
Tab.2 ANOVA of T_g under different heating rates

方差来源	平方和	自由度	均值平方	F	P
组间方差	1 001.4	5	200.3	284	0.01
组内方差	8.5	12	0.7		

表 3 不同荷载频率下沥青混合料 T_g 试验结果表
Tab.3 T_g of asphalt mixture under different load frequencies

频率/ Hz	玻璃态转变温度/ $^{\circ}\text{C}$			均值/ $^{\circ}\text{C}$	变异系数/ %
	样本 1	样本 2	样本 3		
0.1	-14.9	-13.5	-13.9	-14.1	4.15
1	-12.7	-12.4	-13.3	-12.8	2.92
10	-11.8	-11.7	-10.4	-11.3	5.71
25	-9.6	-11.4	-10.6	-10.6	7.12
50	-10.3	-9.9	-10.5	-10.2	2.44
80	-10.2	-9	-9.2	-9.5	5.72

表 4 不同升温速率下沥青混合料 T_g 方差分析表
Tab.4 ANOVA of T_g under different heating rates

方差来源	平方和	自由度	均值平方	F	P
组间方差	44.8	5	9	19.7	0.01
组内方差	5.5	12	0.5		

表 5 不同应变水平下沥青混合料 T_g 试验结果表
Tab.5 T_g of asphalt mixture under different strain levels

应变/ 10^{-6}	玻璃态转变温度/ $^{\circ}\text{C}$			均值/ $^{\circ}\text{C}$	变异系数/ %
	样本 1	样本 2	样本 3		
30	-11.8	-11.6	-10.6	-11.4	4.79
60	-11.6	-12.4	-10.3	-11.4	7.57
90	-11.8	-11.7	-10.6	-11.4	4.89
120	-10.2	-10.4	-11.6	-10.7	5.74
150	-10.9	-11.2	-10.6	-10.9	2.4
180	-12.4	-12.7	-11.5	-12.2	4.12

表 6 不同应变水平下沥青混合料 T_g 方差分析表
Tab.6 ANOVA of T_g under different strain levels

方差来源	平方和	自由度	均值平方	F	P
组间方差	4.9	5	0.97	1.9	0.01
组内方差	6.2	12	0.51		

综合表 1~6 可知,同一试验水平下不同试验样本的玻璃态转变温度的变异系数均小于 15%,表明 Boltzmann 模型拟合结果稳定. 沥青混合料的玻璃态转变随着升温速率的增加而逐渐升高. 且由于 $F_{0.01}(5,12) = 3.11 < 284.41$,故在 0.01 的显著性水平下可以认为升温速率对于材料的玻璃态温度有显著影响;沥青混合料的玻璃态转变温度随着荷载频率的增大而升高. 且 $F_{0.01} = 3.11 < 19.69$,故在显著性水平 0.01 下可以认为荷载频率对于材料的玻璃态温度有着显著影响;不同应变水平下的玻璃态转变温度无明显变化规律,只是在某一温度左右浮动. 由于 $F_{0.01}(5,12) = 3.11 > 1.89$,故在 0.01 显著性水平下,不同应变水平下材料的玻璃态转变温度变化较小,由此表明:在线粘弹性区域内,沥青混合料的玻璃态转变温度并无明显的应变依赖性.

通过上述分析发现升温速率与荷载频率对沥青混合料的玻璃态转变温度有显著影响,为明确上述指标与玻璃态转变温度的关系,分别以试验的升温速率的对数值 $\lg \varphi$ 、荷载频率的对数值 $\lg f$ 为纵坐标、材料的玻璃态转变温度 T_g 为横坐标,得到如图 6、7 所示的关系.

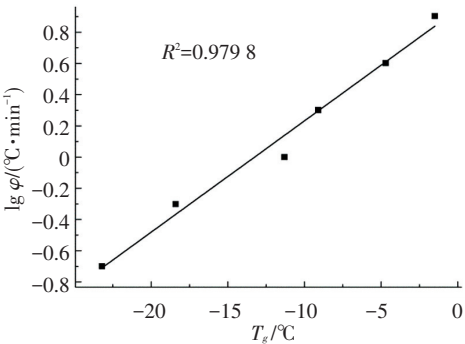


图 6 玻璃态转变温度与升温速率关系
Fig.6 Relationship between T_g and hating rate

由图 6 可知,沥青混合料的玻璃态转变温度与升温速率对数值存在良好的线性相关性: $\lg \varphi = 0.071 6 T_g + 0.949 2$,线性相关系数大于 0.95. 按照自由体积的概念,在玻璃态转变温度以上,分子通过锻链运动腾出多余的自由体积,因此在升温过程中,自由体积逐渐增大,但是由于温度升高导致锻链之间的阻力减小,这种位置调整不能及时跟进,致使沥青的体积总比该温度下最后应该具有的平衡体积小,升温速率越大,位置调整的滞后性越明显,进而

导致沥青混合料的玻璃态转变温度越高.

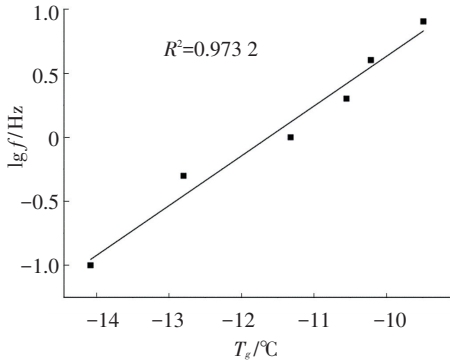


图 7 玻璃态转变温度与荷载频率关系

Fig.7 Relationship between T_g and load frequency

由图 7 可见, 沥青混合料的玻璃态转变温度与荷载频率的对数值之间存在良好的线性相关性: $\lg f = -0.3885T_g + 4.5167$, 两者线性相关系数大于 0.95, 因此荷载频率能够明显的影响材料的玻璃态转变温度. 主要原因是测试频率的变化相当于沥青混合料内部自由体积分数的变化, 较短的测试周期(较高的测试频率)相当于较大的自由体积分数, 而较长的测试周期(较低的测试频率)相当于较小的自由体积分数. 因此沥青混合料的玻璃态转变温度随着频率的增高而升高.

为确定试验因素各水平间的差异性, 采用“S 检验”法对设计试验水平进行事后多重比较^[11]. 首先列出因素各水平下指标平均值的差数三角形, 差数三角形的第 1 列按照指标平均值由大到小的顺序从上到下排列, 第 1 行按照指标平均值由小到大从左到右排列, $y_{(i)}$ 表示指标均值按照从大到小的第 i 个排列, A_i 为 $y_{(i)}$ 所对应的水平. 在给定的检验水平 α 下, 计算

$$D_{i,j}(\alpha) = \sqrt{\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right) \frac{S_e^2}{n-r} (r-1) F_{\alpha}(r-1, n-1)}$$

的值, 当 $|y_{(i)} - y_{(j)}| < D_{i,j}(\alpha)$, 则认为在水平 α 下, 水平 A_i 与 A_j 差异不显著, 否则认为 A_i 与 A_j 差异显著^[9]. 升温速率、荷载频率各试验水平事后多重比较的结果见表 7、8, 表中“Y”表示差异性显著, “N”表示差异性不显著.

表 7 升温速率各试验水平差异性

Tab.7 Comparison of test results under different heating rates						
		差异性				
升温速率/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.2/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	0.5/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	1/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	2/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	4/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	8/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)
8	Y	Y	Y	Y	N	
4	Y	Y	Y	Y		
2	Y	Y	Y			
1	Y	Y				
0.5	Y					
0.2						

表 8 荷载频率各试验水平差异性

Tab.8 Comparison of test results under different load frequencies

频率/Hz	差异性					
	0.1/Hz	1/Hz	10/Hz	25/Hz	50/Hz	80/Hz
80	Y	Y	Y	Y	N	
50	Y	Y	Y	N		
25	Y	Y	N			
10	Y	N				
1	N					
0.1						

除个别试验水平下的玻璃态转变温度无显著性差异外, 其余各水平下的试验结果均存在明显的差异性, 表明了沥青混合料在不同荷载频率、不同升温速率下具有迥异的粘弹特性响应, 也证明了沥青混合料是一种温度(频率)敏感性材料. 沥青路面服役条件受地域气候、材料特性及结构层位等因素影响, 呈现出较大的波动性, 因此开展不同升温速率、不同频率下的沥青混合料的玻璃态转变温度试验, 有助于掌握沥青混合料在不同服役条件下的玻璃态转变特性.

2 玻璃态转变温度多因素预测模型

2.1 全因素试验设计

在沥青混合料玻璃态转变温度影响因素分析中, 通过试验发现升温速率、荷载频率对材料的玻璃态转变温度有明显的影响, 在线粘弹性区域内沥青混合料的玻璃态转变温度无明显的应变依赖性. 为进一步探讨沥青混合料玻璃态转变温度在多因素影响下的变化规律, 建立多因素下的沥青混合料玻璃态转变温度预测模型, 本节试验选择升温速率 A (共 6 个试验水平: 0.2、0.5、1、2、4、8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$)、荷载频率 B (共 6 个试验水平: 0.1、1、10、25、50、80 Hz) 两个试验因素进行全因素试验设计. 试验材料和试验设备与前述试验相同, 每个试验水平需进行 3 次重复试验以提高试验结果的可靠性. 温度扫描试验的应变水平均为 0.003%, 以确保试验在材料的线粘弹区域内进行.

2.2 试验数据处理与分析

试验数据的处理仍采用 Boltzmann 模型拟合并计算得到沥青混合料玻璃态转变温度. 处理后的试验结果汇总见表 9. 对试验结果进行双因素等重复试验的方差分析, 方差分析结果见表 10.

上表 8 中 S_A 表示升温速率的效应平方和; S_B 表示荷载速率的效应平方和; S_{A*B} 表示升温速率和荷载频率的交互效应平方和; S_E 为误差平方和; S_T 为总离差平方和. 通过查表得 $F_{0.01}(5, 72) = 3.292$ 、

$F_{0.01}(25, 72) = 2.049$, 即在 0.01 显著性水平下 F_A 、 F_B 、 $F_{A \times B}$ 均大于相应的临界值. 由此可知升温速率 A 、荷载频率 B 以及 $A \times B$ 均对试验结果有显著影响, 并且升温速率与荷载频率的交互作用高度显著.

表 9 多因素试验结果
Tab.9 Result of multi-factor experiment

升温速率/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)	$T_g / ^{\circ}\text{C}$																	
	0.1 Hz			1 Hz			10 Hz			25 Hz			50 Hz			80 Hz		
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3
0.2	-26.5	-27.3	-26.7	-24.8	-25.2	-24.8	-23.6	-23.8	-22.2	-21.5	-20.9	-21.7	-19.9	-20.3	-20.1	-19	-18	-20.2
0.5	-22.4	-23.4	-22.7	-21.5	-20.9	-21.2	-18.9	-19.1	-17	-17.9	-18.5	-17.4	-16.5	-16.7	-16	-15.7	-15.4	-15.4
1	-14.9	-13.5	-13.9	-12.7	-12.4	-13.3	-11.8	-11.7	-10.4	-9.6	-11.4	-10.6	-10.3	-9.9	-10.5	-10.2	-9	-9.2
2	-11.7	-10.5	-11.6	-9.9	-10.4	-10.6	-9.6	-9.6	-8.2	-8.4	-8.7	-8.8	-8.2	-7.4	-7.8	-7.5	-7.1	-7.9
4	-6.2	-5.5	-5.7	-5.5	-5.4	-5.1	-4.5	-5.6	-4	-4.6	-3.9	-4.5	-4.2	-4.3	-3.7	-3.6	-3.7	-3.9
8	-5.7	-5.1	-5.7	-3.5	-2.8	-3.4	-1.5	-1.4	-1.8	-1.8	-0.5	-1.2	-1.4	-0.6	-0.9	-0.5	-0.2	0.1

表 10 多因素试验方差分析结果
Tab.10 Variance analysis of multi-factor experiment

方差来源	平方和	自由度	均值平方和	F	P
升温速率组间方差 (S_A)	5 676.6	5	1 135.3	3 696.6	0.01
频率组间方差(S_B)	336.9	5	67.4	219.4	0.01
双因素交互作用 方差($S_{A \times B}$)	56.2	25	2.2	7.3	0.01
组内方差(S_E)	22.1	72	0.3		

2.3 玻璃态转变温度预测模型

为准确评价沥青混合料玻璃态转变温度随升温速率、荷载频率的变化规律,采用多元回归方法寻求动态模量与频率和升温速率的综合关系,将二维平面内的 T_g - f 、 T_g - φ 关系曲线拓展到三维 T_g - f - φ 坐标空间内. 采用二维平面形式,对试验结果进行拟合,拟合结果为

$$z = 13.8x + 1.84y - 0.74xy - 14.7. \tag{3}$$

式中: z 为沥青混合料的玻璃态转变温度; x 为升温速率的对数值; y 为荷载水平的对数值; 拟合精度 $R^2 = 0.97$, 该模型的曲面如图 8 所示.

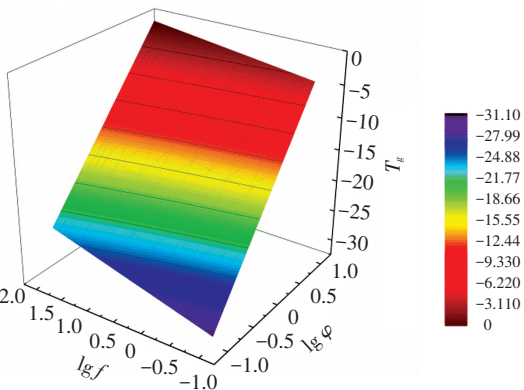


图 8 沥青混合料玻璃态转变温度曲面
Fig.8 Surface of glass transition temperature of asphalt mixture

由此可知,沥青作为一种典型的粘弹性材料,其玻璃态转变温度受升温速率、荷载频率的综合影响. 在上述两因素的耦合作用下,沥青混合料的玻璃态转变温度在 T_g - f - φ 三维空间中呈平面分布,在低频和低升温速率下,其玻璃态转变温度较低,而在高频和高升温速率下玻璃态温度较高. 而上述多因素下沥青混合料玻璃态转变温度预测模型的确立,提供了一种快速计算材料玻璃态转变温度的方法.

综合前述分析可知,荷载频率、升温速率对于沥青混合料的玻璃态转变温度存在显著影响,而沥青混合料的玻璃态转变温度在线粘弹性区域内并不存在明显的应变依赖性. 鉴于大量的研究已经证明材料的玻璃态转变温度与其低温性能具有良好的相关性^[12-20], 因此可以预见在高升温速率、高荷载频率下,沥青混合料更容易发生低温破坏,而低升温速率和低荷载频率下,沥青混合料具有良好的变形能力,能够防止低温开裂的发生.

3 结 论

- 1) 采用 Boltzmann 模型拟合确定沥青混合料玻璃态转变温度的方法稳定且有效.
- 2) 沥青混合料的玻璃态转变温度随着升温速率的增大而升高,且玻璃态转变温度 T_g 与升温速率 φ 的对数值之间存在良好的线性关系.
- 3) 沥青混合料的玻璃态转变温度随着荷载频率的增大而升高,且玻璃态转变温度 T_g 与荷载频率 f 的对数值之间存在良好的线性关系.
- 4) 在线粘弹性范围内,沥青混合料的玻璃态转变温度在线粘弹性区域内并无明显的应变依赖性.
- 5) 升温速率与荷载频率对沥青混合料的玻璃态转变温度有显著影响,因此在测量材料玻璃态转变温度时需要根据材料在路面结构中的位置、材料服役地点的温度变化规律以及交通量水平确定试验

的升温速率与荷载频率.

参考文献

[1] ZHANG Zhuyao, GRAHAM H, ADAM M. Properties of T/P92 weld metals for Ultra Super Critical (USC) power plant[J]. Micro-structure Mater Properties, 2011, 6(1/2): 20

[2] TAN Yiqiu, GUO Meng. Study on the phase behavior asphalt mastic [J]. Construction and Building Material, 2013, 47: 311

[3] 尹应梅.基于 DMA 方法的沥青混合料动态粘弹特性及剪切模量预估方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2010

YIN Yingmei. Research on dynamic viscoelastic characteristics and shear modulus of prediction methods for asphalt mixture based on dynamic mechanical analysis (DMA) means [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010

[4] 黄优,刘朝辉,李盛.沥青材料玻璃态转变温度求解及低温性能分析[J]. 材料学报, 2016, 30(8):141

HUANG You, LIU Zhaohui, LI Sheng. Glass transition temperature calculation and low temperature property analysis of asphalt [J]. Materials Review, 2016, 30(8): 141

[5] 常冠军.粘弹性阻尼材料[M].北京:国防工业出版社, 2012: 12

CHANG Guanjin. Viscoelastic damping materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 12

[6] 何曼君,陈维孝.高分子物理[M]. 修订版. 上海:复旦大学出版社, 2000: 241

HE Manjun, Chen Weixiao. Polymer chemistry [M]. Rev ed. Shanghai: Fudan University Press, 2000: 241

[7] 谭忆秋,李晓琳,吴建涛,等.温度及荷载频率对沥青-集料交互能力的影响[J]. 中国公路学报,2012, 25(3): 65

TAN Yiqiu, LI Xiaolin, WU Jiantao, et al. Influence of temperature and loading frequency on the interaction ability of asphalt and aggregate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 65

[8] AIREY G D, RAHIMZADEH B, COLLOP A C, et al. Linear viscoelastic limits of bituminous binders[J]. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 2002, 71: 89

[9] SHAW M T, MACKNIGHT W J. Introduction to polymer viscoelastic [M]. 3rd ed. Wiley, New York: A John Wiley & Sons Inc. Publication,1972

[10] 谭忆秋.沥青与沥青混合料[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2007: 157

TAN Yiqiu. Asphalt and asphalt mixture[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 157

[11] 赵选民.试验设计方法[M].北京:科学出版社, 2014: 16

ZHAO Xuanmin. Method of experiment design[M]. Beijing: Sci-

ence Press, 2007: 16

[12] 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 2009,19(2):1

CAO Liping, TAN Yiqiu, DONG Zejiao, 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

[13] 金磊,钱振东,郑彧.基于 DMA 方法的浇筑式沥青胶浆高温性能及评价指标[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(5): 1062

JIN Lei, QIAN Zhendong, ZHENG Yu. High temperature performance and evaluation index of gussasphalt mortar based on DMA method[J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2014, 44(5): 1062

[14] KRIZ P, STASTNA J, ZANZOTTO L. Effect of low temperature isothermal conditioning on glass transition in asphalt binders[C]//Conference of the Canadian Asphalt Technical Association. Ontario: CTAA, 2007: 161

[15] ANDERSON D, MARASTEANU M. Physical hardening of asphalt binders relative to their glass transition temperatures[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1999, 1661(1): 27

[16] SOLIMAN H, SHALABY A. Characterizing the low temperature performance of hot-pour bituminous sealants using glass transition temperature and dynamic stiffness modulus[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(11): 688

[17] NAM K, BAHIA H U. Effect of binder and mixture variables on glass transition behavior of asphalt pavement [J]. Association Asphalt Pavement Technologists, 2004, 73: 89

[18] 詹小丽.基于 DMA 方法对沥青粘弹性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007

ZHAN Xiaoli. Research on the viscoelastic properties of asphalt using DMA [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007

[19] 董雨明.硬质沥青及其混合料流变特性与低温性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2015

DONG Yuming. Research on rheological property and low temperature performance of hard grade bitumen and its mixture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009

[20] PELLINEN T K, WITCZAK M W, BONAQUIST R F. Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization [C]//Engineering Mechanics Division Conference. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2003: 83

(编辑 魏希柱)