

文章编号:1671-8879(2018)02-0019-07

沥青混合料相位角预估模型

张 倩¹, 范哲哲^{1,2}, 张尚龙^{1,3}, 李彦伟⁴, 石 鑫⁴

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467000; 3. 河西学院 土木工程学院, 甘肃 张掖 734000;
4. 石家庄交通运输局, 河北 石家庄 050001)

摘 要:为了给沥青路面材料设计提供科学依据, 针对沥青混合料黏弹性特性, 依托简单性能试验 (SPT) 结果, 分析加载频率与温度耦合作用下相位角的变化特征, 基于这一规律, 提取不同温度 T 下相位角随加载频率的变化曲线, 以拐点温度区为阈值, 将整个试验过程划分为 $T \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C} < T < 30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 这 3 个温度段, 引入温度、频率、材料级配等参数。首先采用控制变量法对各个因子与相位角的相关性进行分析论证, 确定各参变量的引进形式; 然后采用 Levenberg-Marquadt 方法结合通用全局优化算法对试验数据进行综合处理, 提出包含温度、频率、油石比、空隙率和级配特性等因素的相位角预估模型。研究表明: 每种混合料都存在一个拐点温度, 拐点温度附近, 无论频率如何变化, 相位角基本恒定; 温度低于拐点温度时, 相位角随加载频率的增加而降低, 温度高于拐点温度时, 相位角随加载频率的增加而增加; 中、高温条件下改性剂的作用越来越明显, 导致 $T \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的预估精度明显高于 $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时的预估精度, 因此对高温状态相位角的预估要分别考虑基质沥青和改性沥青 2 种情况, 但在引入油石比、空隙率对预估模型进行修正后, 避免了高温状态需针对沥青类型分别预估的问题, 提高了预估精度, 且模型相关系数较高。

关键词:道路工程; 预估模型; 分段预估; 相位角; 沥青混合料

中图分类号: U414 文献标志码: A

Prediction model of phase angle of asphalt mixture

ZHANG Qian¹, FAN Zhe-zhe^{1,2}, ZHANG Shang-long^{1,3}, LI Yan-wei⁴, SHI Xin⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;
2. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467000, Henan, China; 3. School of Civil Engineering, Hexi University, Zhangye 734000, Gansu, China;
4. Transportation Bureau of Shijiazhuang, Shijiazhuang 050001, Hebei, China)

Abstract: To provide scientific basis for asphalt pavement material design, simple performance test (SPT) was conducted to study viscoelastic property of asphalt mixtures. Changing rule of phase angle was analyzed under the coupling action of loading frequency and temperature. Based on this law, the curves of phase angle changing with loading frequency at different temperatures were extracted. Based on three temperature segments of $T \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C} < T < 30\text{ }^\circ\text{C}$ and $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$, parameters of temperature, frequency, and material gradation were introduced by taking

收稿日期: 2017-10-07

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(SJ08E208); 河北省交通科技项目(Y-2010090);

陕西省教育厅专项科研计划项目(12JK0795)

作者简介: 张 倩(1971-), 女, 陕西泾阳人, 副教授, 工学博士, E-mail: zhzzqs@126.com.

turning point temperature zone as threshold value. Control variable method was used to demonstrate the correlation between each factor and the phase angle so as to determine the introduction form of each parameter. Then the Levenberg-Marquadt method and the general global optimization algorithm was used to deal with the experiment data synthetically. The prediction model of phase angle, including temperature, frequency, oil stone ratio, voidage rate and gradation characteristic was proposed. The results show that there is a turning point temperature in each mixture. No matter how the frequency changes, phase angles almost keep the same near the turning point temperature. When the temperature is lower than the turning point temperature, phase angle decreases with the increase of loading frequency. When it's higher than the turning point temperature, phase angle increases with the increase of loading frequency. Under the condition of medium and high temperature, the effect of modifier becomes more significant, which makes the prediction accuracy under $T \leq 25$ °C is significantly higher than that of under $T \geq 30$ °C. Therefore the forecast of phase angle under the state of high temperature is divided into two situations as the matrix asphalt and modified asphalt. However, after introducing the oil stone ratio, ratio to revise the forecast model, the trouble of separate estimates of the asphalt type at high temperature is avoided, and the forecast accuracy is improved. The model correlation coefficient is higher. 6 tabs, 3 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; prediction model; fragment forecast; phase angle; asphalt mixture

0 引言

动态模量和相位角是衡量沥青混合料特性的重要指标,动态模量从弹性角度表征混合料在荷载作用下恢复变形的能力^[1-3],相位角则从黏性角度表征混合料在荷载作用下抵抗变形的能力^[4-6]。假定2种沥青混合料的动态模量相等,但1#混合料的相位角明显比2#混合料小,则1#混合料弹性更好,卸载后变形更容易恢复,说明仅用动态模量评价沥青混合料性能是不够的,必须同时考虑相位角,它反映了黏弹性中黏性与弹性成分的比例及影响程度。

近年来,对动态模量的研究有了很大进展^[7-11],但对相位角的探讨却不多。文献[12]中从相位角的角度研究了在不同纤维掺量下沥青的疲劳性能,认为通过相位角的大小可以判断混凝土材料的黏弹性;文献[13]中在研究动态模量主曲线时,忽视了相位角的性质,得到的动态模量主曲线和相位角主曲线的某些物理意义存在较大偏差;文献[14]~文献[16]中得到了复数剪切模量、相位角随频率变化的主曲线;文献[17]、文献[18]中选取黏弹性模型,研究了沥青混合料黏弹性参数。已有文献给出的结论大都是:低温状态混合料呈弹性,频率越低,相位角越大;高温状态,混合料呈黏弹性,频率越低,相位角越小;温度介于高低温之间时,随着频率的降低,相位角先增加后减小^[19-21],也有学者给出了相位角主

曲线,但未见进一步分析和应用^[22-24]。陈辉等采用4种沥青混合料试件进行单轴压缩动态模量试验,确定基于广义西格摩德模型的动态模量主曲线和存储模量主曲线,最后根据2种模量主曲线拟合参数计算得到相位角主曲线模型方程,但并未提出相位角预估模型^[25]。

如何进行相位角的预估,如何把相位角预估与动态模量结合起来共同描述材料的黏弹特性,这些问题值得探索。鉴于此,本文采用简单性能试验(SPT)进行沥青混合料动态模量试验,分析相位角在加载频率与温度耦合情况下的变化规律,根据沥青混合料的黏弹特性,对相位角分段预估,提出包括温度、频率、油石比、空隙率、级配特性等因素在内的相位角预估模型。

1 SPT 试验

试验采用70#石油沥青,矿粉为石灰石矿粉,性能指标见文献[1],集料选用花岗片麻岩,性能指标符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求,见下页表1、表2,混合料级配见下页表3。

采用旋转压实仪成型直径150 mm、高140 mm的预备试件,之后钻芯取样,得到圆周光滑、平行、直径为100 mm的圆柱体试件,对钻芯得到的试件两端进行切割,得到直径100 mm、高130 mm的芯样试件,最后根据实测空隙率调整旋转压实次数及沥

青混合料用量,确保试件的空隙率与目标值偏差不超过 $\pm 0.5\%$,平行试件 3 个。

表 1 粗集料性能

Tab. 1 Coarse aggregate properties

检测项目	标准要求	不同集料粒径(mm)下的试验结果	
		[10,20]	[5,10]
压碎值/%	≤ 28	15.78	
洛杉矶磨耗损失/%	≤ 30	15.15	13.26
表观相对密度	≥ 2.5	2.748	2.794
毛体积相对密度	实测值	2.698	2.711
吸水率/%	≤ 3.0	0.87	0.81
坚固性/%	≤ 12	6.8	
针片状颗粒含量/%	≤ 15	5.0	4.9
含泥量(水洗法)/%	≤ 1	0.27	0.30

注:含泥量、针片状颗粒含量均为质量分数,下同。

表 2 细集料性能

Tab. 2 Fine aggregate properties

检测项目	标准要求	试验结果	
		粒径 3~5 mm	石屑
表观相对密度	≥ 2.5	2.823	2.760
毛体积相对密度	实测值	2.699	
坚固性/%	≤ 12	5.3	
含泥量(筛洗法)/%	≤ 3	1.2	2.4

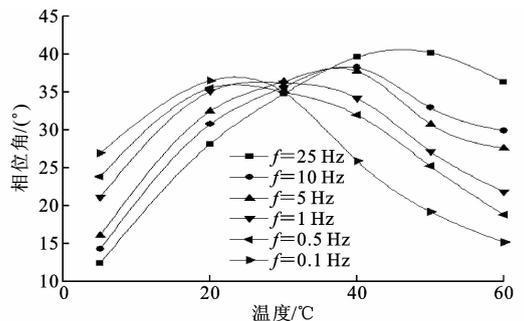
表 3 沥青混合料级配

Tab. 3 Asphalt mixture gradations

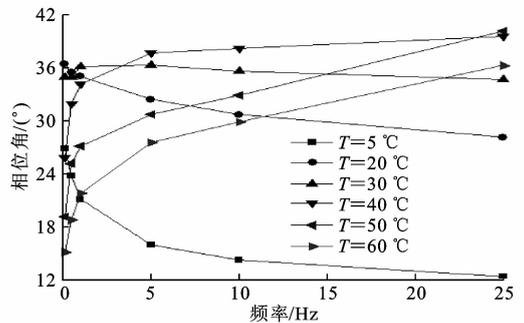
级配类型	不同筛孔尺寸(mm)下的通过率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-16	100	96.2	88.1	62.2	40.7	24.2	19.2	15.9	12.7	9.8	6.7

沥青路面要承受反复作用的行车动载,因此采用动态加载模式分析其在荷载作用下的黏弹特性与受力状况比静态模式下更符合实际。SPT 是美国公路合作研究计划(NCHRP)路用性能规范用来测定沥青混合料在线黏弹性范围内单轴压缩动态模量的仪器,测得的动态模量可用于评价沥青混合料的材料性能,并作为材料设计、沥青路面设计和评价分析的参数。本研究采用 SPT 在无侧限条件下,按一定的温度和加载频率对沥青混合料试件施加半正弦波轴向压应力。具体试验参数如下:①试验温度 T 为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$;②加载频率 f 为 0.1 、 0.5 、 1 、 5 、 10 、 25 Hz ;③采用 Haversin 波形荷载形式;④采用应变控制模式,系统所施加的应力应使试件在垂直方向产生的微应变控制为 $85 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$,以保证材料在加载范围内应力应变关系为线性;⑤试验前施加一定的预压荷载,该预压应力为加载应力的 5% ,持续时间 30 s ,以避免荷载作用下试件端部产生虚假变形,又能保证试件端

部与压头接触良好,为减小试验时所施加的动态波形循环荷载对试件的冲击,且避免卸载时试件与压头脱空,设定接触压力为加载应力的 5% 。试验采集最后 5 个波形的荷载及变形曲线,记录并计算相应动态模量及相位角,剔除异常数据后取均值,分析加载频率与温度耦合情况下相位角的变化规律,见图 1。



(a) 相位角随温度的变化



(b) 相位角随加载频率的变化

图 1 相位角随加载频率和温度的变化曲线

Fig. 1 Curves of phase angle change with temperatures and loading frequencies

由图 1 可知:中低温情况下($5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$),相位角随温度的升高而增加,随频率的增加而减小;温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,频率 0.1 Hz 时的相位角为 36.52° ,频率 25 Hz 时的相位角为 28.17° ;温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,频率 0.1 Hz 时的相位角为 26.96° , 25 Hz 时的相位角为 12.45° ;温度越低,相位角随频率的增加降低得越快;较高温情况下($30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$),相位角随温度的升高而降低,随频率的增加而增加, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下相位角的增加速度基本相同;不同加载频率下相位角随温度的变化曲线在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近几乎相交,即各频率下的相位角在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 近似相同,为了验证这一特性,另测得 3 种沥青混合料 SMA-13、AC-20、ATB-30 在不同加载频率下相位角随温度的变化曲线,见下页图 2,发现该规律也基本成立。这 3 种沥青混合料的性能指标同 AC-16,其级配见文献[1]。

如果称相交处的温度为拐点温度,则每种混合料都可能存在一个拐点温度,温度低于拐点温度时,相位角随加载频率的增加而降低;温度到达拐点温

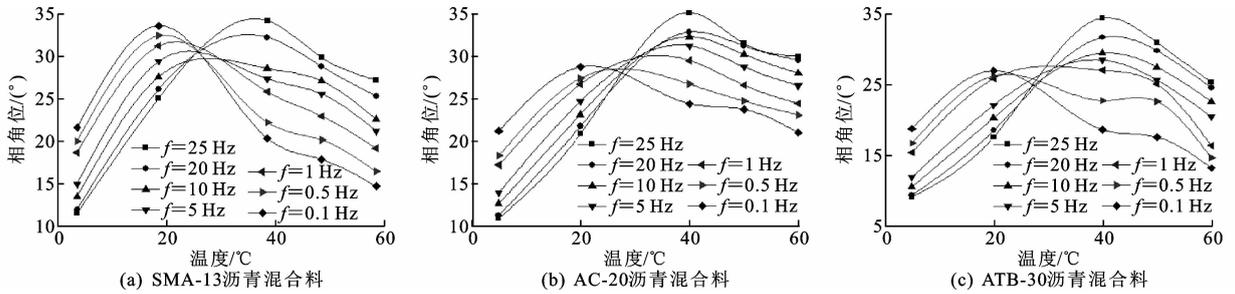


图2 不同荷载频率下3种沥青混合料相位角随温度的变化曲线

Fig. 2 Curves of phase angle with change of temperatures under different load frequencies of three kinds asphalt

度时,任何加载频率下的相位角均趋于一个定值;温度高于拐点温度时,相位角随加载频率的增加而增加。由于操作方法、外界环境因素不同或设备本身原因等,试验结果可能存在一定偏差,因此得到的不同荷载频率下相位角随温度的变化曲线并非交于一点,而是在一个较小温度范围内趋于一致,分析发现

该温度范围为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2 沥青混合料相位角预估

不同温度下相位角随加载频率的变化表明,相位角预估要针对不同的温度分段考虑,图3是对4种混合料370组相关试验数据的分析结果。

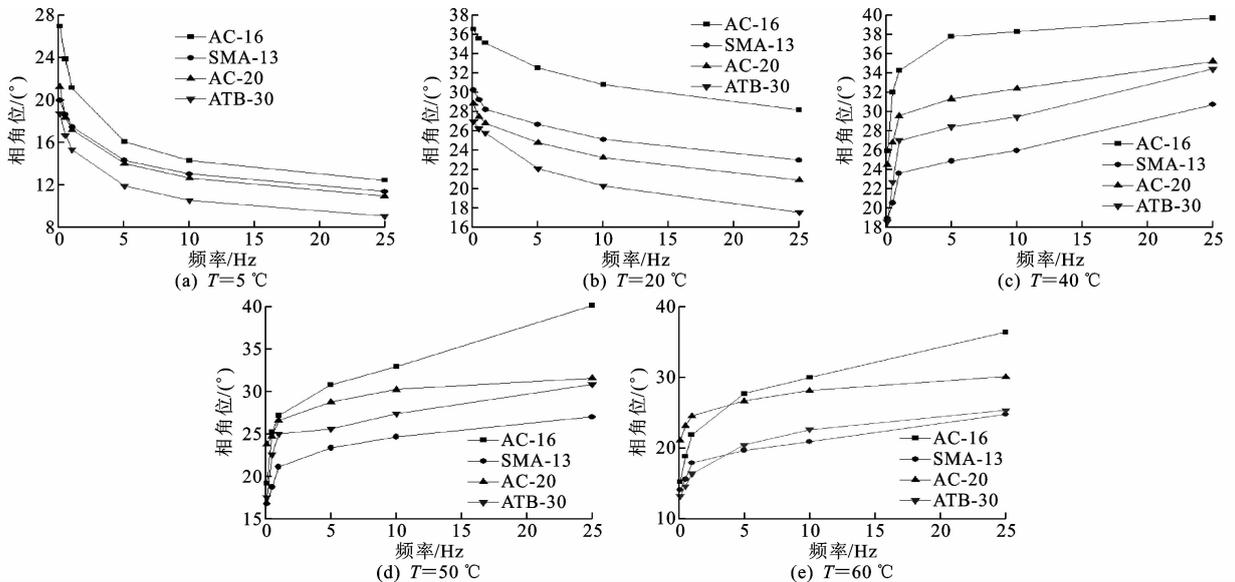


图3 不同温度时相位角随频率的变化曲线

Fig. 3 Curves of phase angle with change of loading frequencies under different temperatures

分析图3发现:① $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,4种混合料相位角均随频率的增加而减小, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时变化更明显;② $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $0.1\sim 5\text{ Hz}$ 相位角增加很快, $5\sim 25\text{ Hz}$ 相位角增加幅度减小,且 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时各混合料相位角变化趋势几乎平行,表明随着温度升高混合料级配特性开始发挥作用;③ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时相位角随频率增加而增加,不同混合料呈现出规律变化,表明高温状态下材料级配特性在混合料性能中已占主导,AC-16、ATB-30混合料在高温状态下相位角变化较大,SMA-13、AC-20混合料相位角变化幅度相对平稳,可能因为SMA-13、AC-20采用改性沥青,温度升高改性剂的作用越来越明显。

沥青混合料高温稳定性形成机理来源于结合料的黏结性和矿料级配的嵌挤作用,低温高频荷载作用下,主要表现为弹性性能,随着加载频率增加,弹性性能增强,因而相位角减小;高温低频荷载作用下,矿料级配嵌挤作用占主导,相位角不再随频率的增加而减小,而随频率的增加而增加,当温度高于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,混合料级配的差异、集料嵌挤程度的不同表现得更突出,相位角随频率的变化曲线有一定波动。

目前尚未见关于相位角预估模型的文献,没有经验公式可借鉴。本文通过对不同温度 T 下相位角随频率变化曲线的分析,考虑引入温度、频率、混

合料级配以及沥青黏度建立相位角预估模型。为得到方便应用的相位角预估方程,根据前述图像特征,将整个试验过程划分为 $T \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C} < T < 30\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 这 3 个温度段。首先采用控制变量法对各因子与相位角的相关性进行分析,确定各变量的引进形式;然后采用 Levenberg-Marquadt 法结合通用全局优化算法对试验数据进行综合处理,具体计算结果如下

$$\varphi = -0.129\ 7 T^{0.383\ 3} [\ln(f) - 11.772\ 6] \cdot \rho_4^{-1.695\ 2} (\rho_{200}^2 - 0.467\ 7 \rho_{200} + 30.137\ 5) \rho_{38}^{1.258\ 4} \quad T \leq 25\text{ }^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\varphi = -10.156\ 3 T^{-0.541\ 0} f^{0.072\ 8} \cdot \rho_4^{-1.178\ 2} \rho_{200}^{0.041\ 8} (\rho_{38}^2 - 112.064\ 2 \rho_{38} + 361.253\ 1) \quad T \geq 30\text{ }^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中: φ 为相位角; ρ_{38} 为 9.5 mm 筛孔的通过率(%); ρ_4 为 4.75 mm 筛孔的通过率(%); ρ_{200} 为 0.075 mm 筛孔通过率(%)。

$25\text{ }^\circ\text{C} < T < 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对于给定的任一混合料,首先借助式(1)求得 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 对应的相位角,然后借助式(2)计算 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时的相位角, $25\text{ }^\circ\text{C} \sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 间相位角的预估则用等插值法计算。

相位角预估模型相关特征值见表 4。

表 4 相位角预估模型相关特征值

Tab. 4 Related characteristic values of phase angle forecast model

温度/ $^\circ\text{C}$	均方差 RMSE	残差平方 和 SSE	相关系 数 R	判定系 数 R^2
≤ 25	2.119 2	494.009 6	0.962 1	0.925 7
≥ 30	2.817 7	833.625 9	0.873 7	0.763 3

从表 4 的 R 值可以看出, $T \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的预估精度明显高于 $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时的预估精度,分析认为中、高温条件下改性剂的作用越来越明显,因此对高温状态相位角的预估分为基质沥青和改性沥青 2 种情况分析。

对于基质沥青

$$\varphi = 0.000\ 5 T^{-0.606\ 0} f^{0.083\ 3} \rho_{200}^{0.066\ 4} (\rho_{38}^2 - 150.379\ 7 \rho_{38} + 6\ 920.237\ 0) \quad (3)$$

对于改性沥青

$$\varphi = 208.819\ 3 T^{-0.236\ 4} f^{0.059\ 1} \rho_4^{-2.320\ 2} \cdot \rho_{200}^{1.238\ 2} (\rho_{38}^2 - 37.185\ 8 \rho_{38} + 436.347\ 4) \quad (4)$$

$T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,相位角预估模型相关特征值见表 5。

可以看出,对基质沥青和改性沥青分开预估后,预估精度均有所提高,这也验证了前述随温度升高改性剂作用对相位角影响越来越明显的结论。为了

表 5 $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时 2 种沥青相位角预估模型相关特征值

Tab. 5 Related characteristic values of two kinds asphalt phase angle forecast model when $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$

沥青种类	均方差 RMSE	残差平方 和 SSE	相关系 数 R	判定系 数 R^2
基质沥青	2.672 2	308.862 5	0.916 3	0.839 6
改性沥青	2.214 2	308.862 5	0.891 2	0.794 3

避免因沥青种类不同而需分开预估的情况,有必要引入表征沥青性质和用量的参数对上述模型进行修正。考虑到同一材料同一级配的混合料因沥青种类不同,其沥青用量和空隙率有明显差别,为此引入油石比、空隙率进行试运算,得到如下修正模型

$$\varphi = -4.034\ 0 T^{-0.490\ 8} f^{0.074\ 8} \rho_4^{-1.625\ 1} \cdot \frac{\rho_{200}^{1.260\ 5} (\rho_{38}^2 - 93.862\ 7 \rho_{38} + 429.172\ 8) \cdot P_a^{-1.636\ 0}}{(P_a + V)^{-1.483\ 9}} \quad (5)$$

式中: P_a 为油石比(%); V 为空隙率(%)。

$T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,相位角修正预估模型相关特征值见表 6。

表 6 $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时相位角修正预估模型相关特征值

Tab. 6 Related characteristic values of phase angle modified forecast model when $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$

均方差 RMSE	残差平方 和 SSE	相关系 数 R	判定系 数 R^2
2.655 6	740.488 9	0.897 5	0.805 5

由表 6 可知,修正模型仍有较高的相关系数,同时又避免了高温状态需针对沥青类型分别预估的麻烦。

3 结 语

(1) 针对沥青混合料的黏弹特性,分析了加载频率与温度耦合情况下相位角的变化规律,发现每种混合料都存在一个拐点温度,拐点温度附近不管频率如何变化,相位角基本恒定,拐点温度前后,相位角随频率的变化趋势相反,这种现象为建立相位角预估模型提供了思路。

(2) 以拐点温度区为阈值,分析各温度段相位角的影响因素,确定参变量的引进形式,分段建立相位角预估模型。发现 $T \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$ 时的预估精度明显高于 $T \geq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时的预估精度,中、高温条件下改性剂的作用越来越明显,因此对高温状态相位角的预估需分为基质沥青和改性沥青 2 种情况,在引入油石比、空隙率对预估模型进行修正后,避免了高温状态针对沥青类型分开预估的麻烦,提高了预估精度。

(3) 本文突破以往相位角相关研究的局限,建立

的相位角预估模型可以与动态模量结合起来共同描述材料的黏弹特性,为沥青路面材料设计提供一定参考。但该模型是基于4种沥青混合料试验结果提出的,后期研究将继续开展更多试验以验证和改进模型。

参考文献:

References:

- [1] 张尚龙. 基于动态模量的沥青混合料车辙预估模型研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
ZHANG Shang-long. Research of asphalt mixture rutting prediction model based on dynamic modulus [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2014.
- [2] KIM Y J, LEE H D, HEITZMAN M. Dynamic modulus and repeated load tests of cold in-place recycling mixtures using foamed asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2009,21(6):279-285.
- [3] 邹会宗. 沥青混合料动态模量试验研究[D]. 西安:长安大学,2013.
ZOU Hui-zong. The experimental research of asphalt mixture dynamic modulus[D]. Xi'an: Chang'an University,2013.
- [4] 谢来斌. 基于温度场和动态模量的沥青混合料车辙预估模型研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
XIE Lai-bin. Research of asphalt pavement rutting prediction model based on temperature field and dynamic modulus[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2013.
- [5] 张肖宁. 沥青与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.
ZHANG Xiao-ning. Theory and application of viscoelastic mechanics of asphalt and asphalt mixture[M]. Beijing:China Communications Press,2006.
- [6] 周键炜,王大明,白琦峰. 沥青混合料动态模量主曲线研究[J]. 公路工程,2009,34(5):60-62.
ZHOU Jian-wei, WANG Da-ming, BAI Qi-feng. Research on master curve of dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2009, 34 (5): 60-62.
- [7] 闫振林,胡霞光,肖昭然. 沥青混合料动态模量预估模型研究[J]. 公路,2008(1):175-179.
YAN Zhen-lin, HU Xia-guang, XIAO Zhao-ran. Research on dynamic modulus predictive models of bituminous mixture[J]. Highway,2008(1):175-179.
- [8] 陈亮. 沥青混合料动态模量预估模型及试验研究分析[J]. 山西建筑,2015,41(10):120-121.
CHEN Liang. The dynamic modulus prediction model and experimental research analysis on asphalt mixture [J]. Shanxi Architecture,2015,41(10):120-121.
- [9] 马士杰,付建村,韦金城,等. 大粒径透水性沥青混合料动态模量预估模型研究[J]. 公路交通科技,2010,27(5):36-40.
MA Shi-jie, FU Jian-cun, WEI Jin-cheng, et al. Study on dynamic modulus prediction model of large stone porous asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (5):36-40.
- [10] 王翼,朱靛雯,孙立军. 沥青路面剪切变形预估模型[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013,41(11):1688-1696.
WANG Yi, ZHU Jing-wen, SUN Li-jun. Prediction model of shear deformation of asphalt mixture pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2013,41(11):1688-1696.
- [11] 梁俊龙. 沥青路面动态模量及裂缝扩展研究[D]. 西安:长安大学,2016.
LIANG Jun-long. Study on dynamic modulus and crack propagation of the asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University,2016.
- [12] 张慧斌. 聚酯纤维沥青混凝土动态参数与相位角研究[J]. 山西交通科技,2016(6):28-31.
ZHANG Hui-bin. The study on the dynamic parameters and phase angle of polyester fiber asphalt concrete [J]. Shanxi Science and Technology of Communications,2016(6):28-31.
- [13] 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.
- [14] 张肖宁,尹应梅,邹桂莲. 不同空隙率沥青混合料的粘弹性能[J]. 中国公路学报,2010,23(4):1-7.
ZHANG Xiao-ning, YIN Ying-mei, ZOU Gui-lian. Viscoelastic performance of asphalt mixture with different void contents [J]. China Journal of Highway and Transport,2010,23(4):1-7.
- [15] 叶青. 基于粘弹性的沥青混合料疲劳性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
YE Qing. Evaluation based on the viscoelastic properties of asphalt mixture fatigue [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2016.
- [16] 朱磊. 沥青混合料粘弹性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2010.

- ZHU Lei. Research on viscoelastic properties of asphalt mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [17] 梁国彦. 沥青混合料粘弹性模型的适用性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- LIANG Guo-yan. Research on the applicability of the asphalt mixture viscoelasticity model [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.
- [18] 关宏信. 沥青混合料粘弹性疲劳损伤模型研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- GUAN Hong-xin. A research on viscoelastic fatigue damage model of asphalt mixture [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [19] 罗桑, 钱振东, HARVEY J. 环氧沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 16-20.
- LUO Sang, QIAN Zhen-dong, HARVEY J. Research on dynamic modulus for epoxy asphalt mixtures and its master curve [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(6): 16-20.
- [20] 李鹏. 全厚式车辙试验影响因素分析及对半刚性基层沥青路面的车辙预估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- LI Peng. The total thickness rutting test and impact factor analysis of semi-rigid asphalt pavement rutting prediction [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [21] 胡家波, 樊亮, 武剑峰. 热再生沥青混合料动态模量试验研究[J]. 公路工程, 2014, 39(5): 122-125.
- HU Jia-bo, FAN Liang, WU Jian-feng. Research on dynamic modulus of hot-recycled asphalt mixture [J]. Highway Engineering, 2014, 39(5): 122-125.
- [22] 尹应梅. 基于DMA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 Ying-mei. Research on dynamic viscoelastic characteristics and shear modulus predicting methods for asphalt mixtures based on dynamic mechanical analysis (DMA) means [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [23] 于雷, 郭朝阳, 陈小兵, 等. 橡胶沥青混合料动态模量及其主曲线研究[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 203-207.
- YU Lei, GUO Zhao-yang, CHEN Xiao-bing, et al. Dynamic modulus of rubber asphalt mixture and its principal curve [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2015, 35(2): 203-207.
- [24] 马林, 张肖宁. 间接拉伸与单轴压缩模式沥青混合料动态模量比较分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 11-17.
- MA Lin, ZHANG Xiao-ning. Comparison of HMA dynamic moduli between indirect tension and uniaxial compression test modes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 11-17.
- [25] 陈辉, 罗蓉, 刘涵奇, 等. 基于广义西格摩德模型研究沥青混合料动态模量和相位角主曲线[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2017, 41(1): 141-145.
- CHEN Hui, LUO Rong, LIU Han-qi, et al. Research on dynamic modulus master curve and phase angle master curve of asphalt mixture based on generalized logistic sigmoidal model [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2017, 41(1): 141-145.