

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.042

沥青混合料动态力学性能的围压应力依赖性研究

石中州, 栾华锋, 董宏运

(中建八局第一建设有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要:为了研究沥青混合料动态力学性能的围压应力依赖性,分别对AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])两种沥青混合料开展不同试验温度、不同扫描频率和不同围压水平的三轴动态模量试验。首先分析不同温度和频率条件下围压应力对沥青混合料动态力学性能的影响;其次基于时温等效原理分别采用Boltzmann和Gussamp函数模型绘制了基准频率为10 Hz沥青混合料动态模量和相位角主曲线。研究表明:当试验温度低于20℃时,不同扫描频率条件下,围压对两种沥青混合料的动态力学性能几乎没有影响;当温度为55℃,扫描频率为0.1 Hz时,AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])沥青混合料的最大动态模量比值分别为3.50和2.49,当试验温度为50℃,扫描频率为0.1 Hz时,最小相位角比则分别为0.59和0.65。高温状态下,围压水平越大,则沥青混合料动态模量比越大,相位角比越小,两种沥青混合料的动态力学性能具有显著的围压应力依赖性。沥青混合料动态模量和主曲线整体变化趋势相同,但在高温区域围压水平升高,动态模量增大,相位角减小,围压应力对沥青混合料起到硬化作用,主曲线存在显著差异,此时应将沥青混合料视作非线性黏弹性材料。建议将围压引入沥青混合料动态模量试验中,探索新的沥青混合料三轴动态模量试验方法以代替现有的单轴压缩动态模量试验。

关键词:沥青混合料;动态模量;相位角;围压;主曲线

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

沥青混合料是典型的黏弹性材料^[1],其动态模量和相位角等动态力学参数受到多种因素的影响^[2]。明确各因素对沥青混合料动力性能的影响,对准确预测沥青路面服役性能并完善沥青路面设计方法具有重要意义。为了弥补弹性层状体系理论的不足和明确温度和沥青混合料动态模量的关系,现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[3]和美国MEPDG路面设计指南中均将沥青混合料视作线黏弹性材料,基于时温等效原理构建了单轴压缩荷载模式下的动态模量主曲线,并依据该曲线确定路面结构中沥青层的模量参数。两种方法认为动态模量只与试验温度和扫描频率有关,但事实上沥青混合料的动态力学参数具有明显的荷载依赖性^[4-6],尤其是在高温、重载条件下,沥青混合料的应力-应变之间非线性关系特征更加显著,并导

致沥青路面产生非线性力学响应行为^[7],目前主流的线弹性层状力学分析体系并不能描述这种现象。中国在开展沥青路面结构验算与分析时,沥青混合料的模量值取用的是标准温度20℃下的单轴动态压缩模量^[8],实际路面结构中沥青混合料的受力状态异常复杂,多处于三维应力状态^[9-10],单轴压缩荷载模式并不能获取围压应力对沥青混合料动态力学参数的影响。基于此,为了准确地描述沥青混合料的动态力学参数演化规律,明确路面结构中围压应力对其影响规律和程度,以试验温度、扫描频率、围压水平为试验变量条件,开展两种沥青混合料三轴动态模量试验。

1 数据来源

1.1 原材料与配合比设计

沥青种类为秦皇岛30[#]基质沥青和秦皇岛I-D-SBS1改性沥青,两种沥青的各项性质均符合《公

路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[11]所规定的技术要求。试验目标沥青混合料按照密实型级配类型设计,在开展沥青混合料配合

比设计时,结合矿料品质,选择合理的级配曲线,得出严格的粗细集料搭配比例。4种沥青混合料级配组成以及马歇尔体积参数试验结果见表1、2。

表1 两种沥青混合料级配组成

沥青混合料类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
SMA-13-SBS1	—	—	100.0	97.7	54.7	24.9	16.7	14.0	12.5	11.4	11.0	9.7
AC-13-SBS1	—	—	100.0	98.0	60.6	34.8	25.4	17.7	13.4	9.9	8.8	7.1
AC-20-30 [#]	—	100.0	95.3	72.9	52.6	30.4	21.1	14.7	12.0	9.5	7.7	5.9
AC-25-30 [#]	99.7	77.9	—	56.8	42.8	25.9	18.5	12.9	10.4	8.2	6.6	5.0

表2 两种沥青混合料马歇尔击实试验结果

沥青混合料类型	最佳油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	沥青饱和度/%	矿料间隙率/%
SMA-13-SBS1	5.5	2.470	4.5	73.4	17.3
AC-13-SBS1	5.1	2.554	4.0	75.8	15.8
AC-20-30 [#]	4.6	2.514	4.5	67.8	14.0
AC-25-30 [#]	4.1	2.537	3.8	71.4	13.3

1.2 试验设计

为了研究围压对沥青混合料动态力学参数的影响,本文开展控制轴向应变模式下的不同试验温度、扫描频率和围压水平的三轴动态模量试验,试验方案见表3。沥青混合料三轴动态模量试件严格按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制作,首先以最佳油石比采用击实成型圆柱体试件,使用钻芯机将成型后试件钻芯,然后将其切割为最终尺寸为100 mm×150 mm的圆柱体试件,将制备完成的试件放在通风处晾干,待干燥后测量试件的尺寸、质量、表干和塑封密度等基本物理参数,待试件再次完全干燥后,即开展沥青混合料的三轴动态模量试验。试验过程中,首先开展试验温度0℃、围压水平0 kPa的动态模量试验,对圆柱形试件依次从25 Hz到0.1 Hz进行频率扫描。试验结束后,记录该条件下的沥青混合料动态模量和相位角。接着保持试验温度0℃不变,依次从0 kPa到250 kPa变化围压水平,每个围压水平下都对圆柱形试件进行高频到低频的频率扫描。完成0℃所有围压水平下的试验之后,接着从低到高进行下一温度水平下的试验,并重复上述步骤,直至完成所有试验温度下的三轴动态模量试验。需要说明的是,为防止试验过程中试件出现高温蠕变损伤,在试验温度较高时相

应地减少荷载加载的循环次数。

表3 沥青混合料三轴动态模量试验方案

试验温度/℃	扫描频率/Hz	围压水平/kPa
0,5,10,15,20,30,40,50,55	25,20,10,5,2,1,0.5,0.2,0.1	0,50,100,150,200

2 试验结果分析

2.1 围压和动态模量比

实际上,在役沥青混合料处在三向应力状态之下,不考虑围压的影响,必定导致沥青混合料模量计算和取值的失真,因此有必要研究围压对沥青混合料动态模量的影响规律。为了更加直观表征围压的影响,分别计算围压水平为200 kPa、150 kPa、100 kPa和50 kPa与0 kPa状态下的动态模量比值,绘制试验温度为5℃、20℃和55℃条件下不同扫描频率的动态模量比值和围压的关系曲线分别见图1~3。

从图1可知:当试验温度为5℃时,以AC-20(AH-30[#])沥青混合料为例,当扫描频率为20 Hz、围压水平为200 kPa时,动态模量比值最大为1.01,当扫描频率为20 Hz、围压水平为50 kPa时,动态模量比值最小为0.99,不同扫描频率下,随着围压水平的升高,动态模量比值始终接近于1。动态模量比值的最大值与最小值几乎没有差别,说明低温条件下,围压水平对沥青混合料动态模量几乎没有影响。AC-25(AH-30[#])动态模量比值的最大值为1.03,因此也可以不考虑围压因素对沥青混合料动态模量的影响,同时也可看到不同扫描频率下的两种沥青混合料动态模量比值基本没有差别。

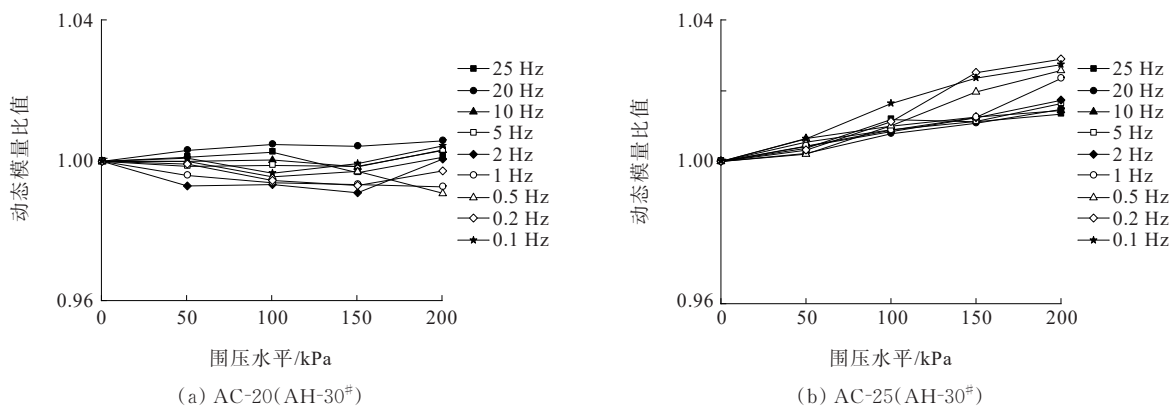


图1 试验温度 5 °C 时两种沥青混合料动态模量比与围压水平的关系曲线

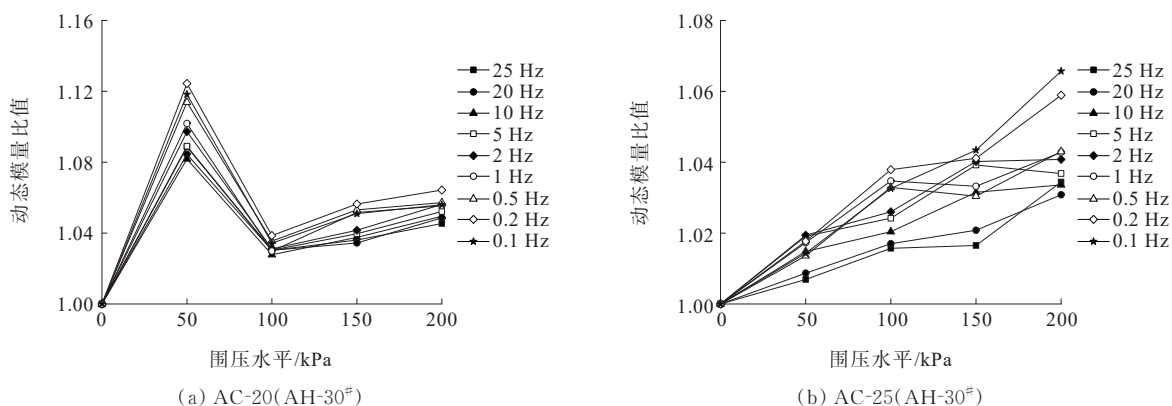


图2 试验温度 20 °C 时两种沥青混合料动态模量比与围压水平的关系曲线

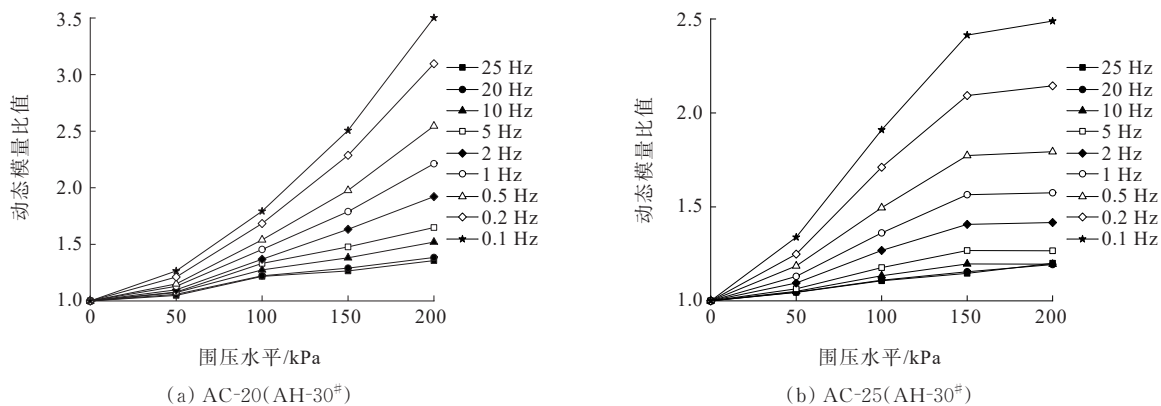


图3 试验温度 55 °C 时两种沥青混合料动态模量比与围压水平的关系曲线

从图2可知:试验温度为 20 °C 时,当扫描频率为 0.2 Hz、围压水平为 50 kPa 时,AC-20(AH-30[#]) 沥青混合料的动态模量最大比值为 1.12,当扫描频率为 10 Hz、围压水平为 100 kPa 时,动态模量比值最小为 1.03,从曲线形态可知,常温条件下,围压水平增大,动态模量比具有增大的趋势。同样的对于 AC-25(AH-30[#]) 沥青混合料而言也服从该变化规律。

从图3可知:试验温度为 55 °C 时,当扫描频率为

25 Hz 时,AC-20(AH-30[#]) 和 AC-25(AH-30[#]) 沥青混合料的动态模量最大比值分别为 1.35 和 1.20,动态模量相比于无围压状态分别增长了 35% 和 20%。当扫描频率为 10 Hz 时,AC-20(AH-30[#]) 和 AC-25(AH-30[#]) 沥青混合料的动态模量最大比值分别为 1.51 和 1.19,动态模量相比于无围压状态分别增长了 51% 和 19%,当扫描频率为 0.5 Hz 时,AC-20(AH-30[#]) 和 AC-25(AH-30[#]) 沥青混合料的动态模量

最大比值分别为2.55和1.79,动态模量相比于无围压状态分别增长了155%和79%。当扫描频率为0.1 Hz时,AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])沥青混合料的动态模量最大比值分别为3.50和2.49,动态模量相比于无围压状态分别增长了250%和149%。对于AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])两种沥青混合料而言,高温条件下,围压水平的增大,扫描频率的降低,动态模量比也随之有较大幅度的增长,围压水平和扫描频率对沥青混合料动态模量的影响十分显著。在低频高温条件下,必须考虑围压对沥青混合料力学性能的影响。

2.2 围压和相位角比

相位角表示沥青混合料中黏性部分,其值越大则材料中黏性所占比例越高^[12-13]。从上述分析可以看到,低温和常温条件下,围压水平对AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])沥青混合料动态模量的作用影响有限,而在高温55℃时更能体现出围压的作用。分别计算围压水平为200 kPa、150 kPa、100 kPa和50 kPa与0 kPa状态下的相位角比值,绘制试验温度为20℃和50℃条件下不同扫描频率的相位角比值和围压的关系曲线分别见图4、5。

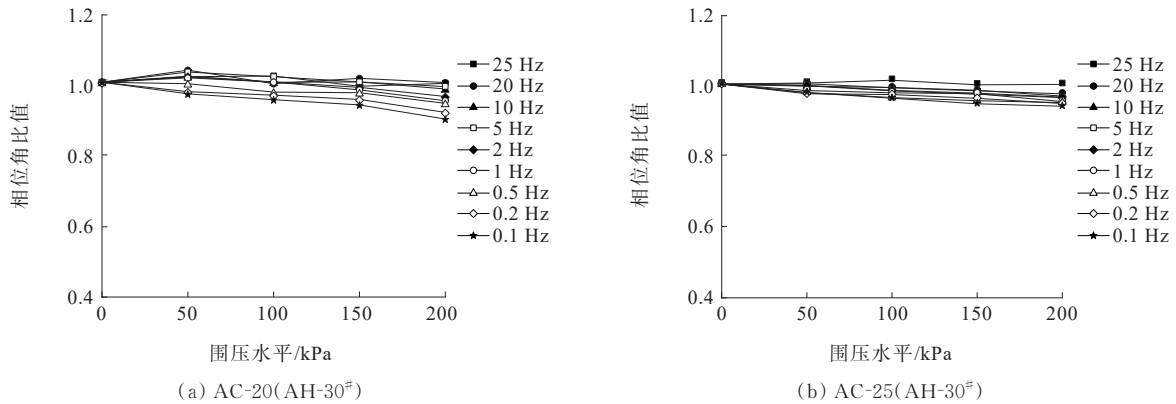


图4 试验温度20℃时两种沥青混合料相位角比值与围压水平的关系曲线

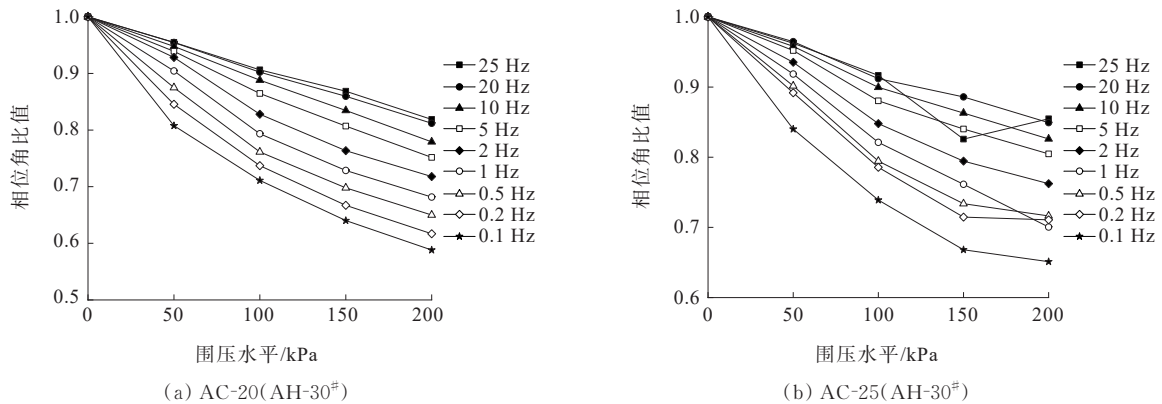


图5 试验温度50℃时两种沥青混合料相位角比值与围压水平的关系曲线

从图4可知:常温状态下AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])两种沥青混合料不同围压水平和不同扫描频率下的相位角比值接近于1几乎没有变化,说明当试验温度低于20℃时,围压对其黏弹性没有影响。从图5可知:当试验温度达到50℃时,随着围压水平的增大,两种沥青混合料的相位角比都有较大幅度的下降,且扫描频率越小,下降幅度更大。当扫描频率为0.1 Hz时,AC-20(AH-30[#])和

AC-25(AH-30[#])沥青混合料的相位角比分别为0.59和0.65,相较于动态模量比,相位角比的变化幅度更小。

3 三轴动态模量和相位角主曲线分析

由于试验仪器的限制,室内试验只能获取较窄温度区间内的沥青混合料动态力学性能,然而沥青

混合料的实际服役温度比室内试验条件更为宽广,可以基于主曲线得到更宽温度域的动态模量和相位角变化规律,预测其性能发展变化趋势,弥补室内试验的不足^[14]。

在试验温度很高或者很低时,沥青材料的动态模量分别趋近于极限值,在宽温域范围内呈现S形变化规律,可采用 Boltzmann 函数对动态模量主曲线进行非线性拟合,见图 6 和式(1),定义 T_1 和 T_2 分别代表模量主曲线拐点对应的温度值($T_1 < T_2$)。沥青混合料相位角可采用峰值型 Gussamp 函数模型构建试验温度与相位角的主曲线,见图 7 和式(2),定义 φ_{\max} 为相位角最大值, φ_{\min} 为相位角最小值, $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$, 代表相位角总变化范围。

$$\lg|E^*| = \frac{\lg|E_{\min}^*| - \lg|E_{\max}^*|}{1 + e^{(T - T_{E0})/dx}} + \lg|E_{\max}^*| \quad (1)$$

表 4 不同围压水平下 AC-20(AH-30[#]) 动态模量和相位角主曲线参数

围压水平/ kPa	动态模量主曲线参数						相位角主曲线参数				
	$\lg E_{\max}^* $	$\lg E_{\min}^* $	$T_{E0}/^{\circ}\text{C}$	dx	$T_1/^{\circ}\text{C}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$	$\varphi_{\min}/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	$T_{\varphi0}/^{\circ}\text{C}$	ω	
0	4.658 5	0.380 2	69.164 4	20.814 5	27.535 3	110.793 5	3.336 62	39.795 53	62.234 25	24.140 31	
50	4.650 2	0.779 1	66.456 2	20.210 0	26.036 1	106.876 3	3.522 50	35.832 62	58.933 10	23.092 71	
100	4.678 7	1.070 7	65.894 2	21.629 0	22.636 2	109.152 1	3.584 04	31.871 76	56.385 60	22.360 18	
150	4.636 5	1.895 4	57.905 5	19.125 6	19.654 3	96.156 7	3.801 73	29.219 69	55.046 02	21.701 98	
200	4.621 6	2.333 4	52.727 0	17.785 4	17.156 2	88.297 8	4.067 92	27.011 41	53.130 48	20.720 37	

从表 4 和图 6 可知:温度升高,不同围压水平的 AC-20(AH-30[#]) 沥青混合料动态模量逐渐减小,主曲线变化趋势相同,但在高温区域存在显著差异。当温度低于 40 °C 时,围压水平增大,沥青混合料动态模量之间几乎没有差异,围压水平 200 kPa 下动态模量与无围压下动态模量差距最大,但两者的比值也仅为 1.02。当温度达到 74 °C 时,两者的比值为 1.26;另一方面,由表 4 可知:不同围压水平下,主曲线第一个拐点处的温度 T_1 相差最大值约为 10 °C,而第二个拐点处的温度 T_2 则相差最大值 22 °C,这说明围压水平主要影响主曲线的第二个拐点处温度,即高温处的拐点。可见在高温区域围压水平对 AC-20(AH-30[#]) 沥青混合料的动态模量影响显著,温度越高,沥青材料变软,这种围压依赖性和材料非线性特性就越明显,呈现出围压强化特征,在进行路面结构设计和力学分析时必须考虑围压水平的影响。从表

$$\varphi = \frac{\Delta\varphi}{e^{(T - T_{\varphi0})/(2\omega^2)}} + \varphi_{\min} \quad (2)$$

式中: $\lg|E_{\min}^*|$ 、 $\lg|E_{\max}^*|$ 分别为沥青混合料动态模量对数最小值、最大值(MPa); T 为试验温度(°C); T_{E0} 为动态模量变化曲线斜率最大处对应的试验温度(°C); dx 为与曲线形态有关的回归系数; φ 为沥青混合料相位角(°); $\Delta\varphi$ 为沥青混合料相位角变化幅度(°); $T_{\varphi0}$ 为相位角变化曲线峰值处对应的试验温度(°C); ω 为与曲线形态有关的回归系数。

由于 AC-25(AH-30[#]) 和 AC-20(AH-30[#]) 沥青混合料动态模量和相位角主曲线变化规律较为接近,因此将 AC-20(AH-30[#]) 作为分析对象,以基准频率 10 Hz 为参考,将其他扫描频率下的动态模量平移至基准频率,采用式(1)进行非线性拟合,即可得到不同围压水平下 AC-20(AH-30[#]) 沥青混合料动态模量主曲线和相位角主曲线参数见表 4。

4 和图 7 可知:不同围压水平的 AC-20(AH-30[#]) 沥青混合料相位角主曲线均呈现随温度的升高先增大到峰值后再减小的趋势,但在大于 30 °C 的高温区域曲线形态存在明显的差异。围压水平升高,相位角主曲线峰值减小接近 13°,降低了沥青混合料中的黏性比例,变化斜率减小,也减弱了相位角主曲线对温度的敏感性。

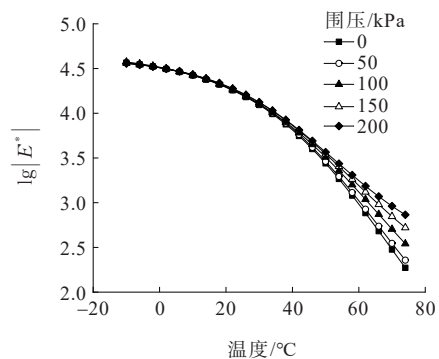


图 6 AC-20(AH-30[#]) 沥青混合料动态模量主曲线

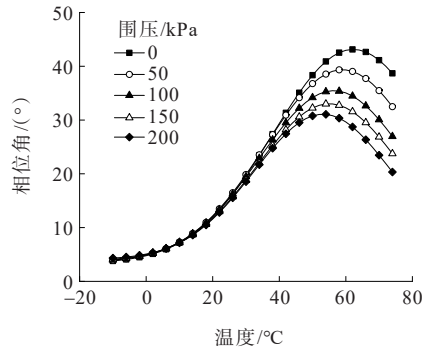


图7 AC-20(AH-30[#])沥青混合料相位角主曲线

在实体路面结构中,沥青混合料受力状态很复杂,中国现行规范中以单轴压缩动态模量作为结构设计中的材料参数,没有考虑围压对沥青混合料动态力学性能的影响,建议完善中国现行沥青混合料动态模量试验方法,使用三轴动态模量试验代替现有的单轴压缩动态模量试验。

4 结论

以AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])两种沥青混合料为研究对象,分别对两种沥青混合料开展三轴动态模量试验,研究围压水平对沥青混合料动态力学性能的影响规律,得到主要结论如下:

(1) 在低温和常温范围内,AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])两种沥青混合料的动态力学性能几乎不受到围压应力的影响。但当温度为55℃时,两种沥青混合料的动态力学性能的围压应力依赖性则十分明显。当扫描频率为0.1 Hz时,AC-20(AH-30[#])和AC-25(AH-30[#])沥青混合料的最大动态模量比值分别为3.50和2.49,最小相位角比(50℃)则分别为0.59和0.65。同时,温度为50℃时,相同条件下,扫描频率的降低,围压的作用更加显著,动态模量比和相位角比也分别有明显的增长和降低。高温低频条件下,沥青混合料的动态力学性能具有显著的围压应力依赖性。

(2) 温度升高,不同围压水平的AC-20(AH-30[#])沥青混合料动态模量和相位角分别逐渐减小,主曲线变化趋势相同,但在高温区域围压水平升高,动态模量增大,相位角减小,围压应力对沥青混合料起到

硬化作用,主曲线存在显著差异。在高温低频范围内,沥青混合料动态模量和相位角具有显著的荷载依赖性,应将沥青混合料视作非线性黏弹性材料。

(3) 建议完善中国的沥青路面设计规范,在确定沥青混合料的结构参数时,探索新的沥青混合料三轴动态模量试验规程以代替现有的单轴压缩动态模量试验。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王维平. 沥青混合料动态模量及其变化规律研究[J]. 中外公路,2017,37(5):285-288.
- [3] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S]. 北京:人民交通出版社,2017.
- [4] 刘朝晖,黄优,王旭东,等. 应变水平对沥青混合料动态模量及黏弹性的影响分析[J]. 中外公路,2017,37(1):188-192.
- [5] 周维锋. 不同受力模式下沥青混合料动态模量应变依赖特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(9):57-62.
- [6] 周兴业,蒋勇,王旭东,等. 基于温度与应变参数的沥青混合料动态模量依赖模型研究[J]. 公路交通科技,2019,36(3):7-13.
- [7] 周兴业. 基于足尺环道试验的沥青路面结构响应及其非线性分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [8] 尤远见. 沥青混合料动态模量的研究[D]. 济南:山东建筑大学,2017.
- [9] 赵延庆,叶勤,文健. 围压对沥青混合料动态模量的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2007,26(6):96-99.
- [10] 赵延庆,吴剑,文健. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J]. 公路,2006,51(8):163-167.
- [11] 交通运输部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [12] 张倩,范哲哲,张尚龙,等. 沥青混合料相位角预估模型[J]. 长安大学学报(自然科学版),2018,38(2):19-25.
- [13] 肖庆一,余天航,陈向阳,等. 铁尾矿沥青混合料动态模量试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(5):85-90,102.
- [14] 张晨晨,钱振东,王旭东,等. 基于DMA方法的沥青砂浆动态弯拉黏弹特性[J]. 公路交通科技,2019,36(3):22-28.