

## 不同沥青混合料的动态模量及其与路用性能关系的研究

嵯永昌<sup>1</sup>, 张金喜<sup>2\*</sup>, 张阳光<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 交通工程北京市重点实验室, 北京市 100124; 2. 北京市城市交通运行保障工程技术研究中心)

**摘要:** 沥青种类、集料最大公称粒径、添加抗车辙剂等因素对沥青混合料动态模量具有一定影响,同时对其路用性能也有重要影响。该文选择具有不同沥青种类、不同集料最大公称粒径、是否添加抗车辙剂的6种沥青混合料,开展了动态模量试验和路用性能试验,分析了沥青种类、集料最大公称粒径、抗车辙剂等因素对沥青混合料动态模量和路用性能影响的规律。研究表明:温度与加载频率是影响沥青混合料动态模量的关键因素,沥青种类、集料最大公称粒径、抗车辙剂对沥青混合料的动态模量也有显著影响。抗车辙剂的使用可以提高沥青混合料的抗车辙性能,并降低沥青混合料对温度变化的敏感程度。另外,对于基质沥青混合料,动态模量的增加会降低沥青混合料的疲劳寿命,但对于加入抗车辙剂或使用改性沥青的沥青混合料,在沥青混合料动稳定性和动态模量得到提高的同时,不会降低沥青混合料的抗疲劳性能。

**关键词:** 道路工程; 沥青混合料; 动态模量; 路用性能; 影响因素

传统的路面设计是通过静态加载的方式得到回弹模量值,以此作为沥青路面力学计算的基础。然而沥青混合料作为典型的黏弹性材料,沥青路面在实际动态交通荷载作用下,受到温度与频率的影响,其力学响应特征是动态变化的,动态模量是表征其在动态荷载作用下力学响应特征的重要参数。在JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中,沥青混合料的动态模量已经成为路面设计必不可少的参数之一。

沥青混合料在时间和温度条件下的力学响应是等效的,因此国内外许多学者,通过借助时温等效原理与西格摩德(Sigmoidal)数学模型绘制动态模量主曲线,同时采用W. L. F方程计算移位因子,将有限的加载频率与试验温度下的动态模量扩展到更为广阔的频率与温度区间内,以此来研究温度与荷载频率对于动态模量的影响,并且通过非线性最小二乘法进行拟合分析。动态模量主曲线与移位因子相结合,可以反映沥青混合料在温度与频率综合作用下的动态模量变化趋势,可以用于分析和预测不同温度与荷载频率下的路面力学响应特征。

已有研究表明:温度与荷载频率是影响沥青混合料动态模量最为重要的两个环境因素,但集料最大公称粒径、沥青种类、添加剂等因素对沥青混合料动态模

量影响的研究还有待进一步加强。特别是不同沥青混合料类型在影响沥青混合料动态模量的同时,对其路用性能、抗疲劳性能有何影响,目前还没有系统的成果。该文选择具有代表性的沥青混合料级配、沥青种类,并考虑是否使用抗车辙剂,开展不同沥青混合料动态模量、路用性能和抗疲劳寿命试验,探讨不同沥青混合料的动态模量及其与路用性能和抗疲劳寿命的关系。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

为了研究动态模量的影响因素,按照沥青种类、集料最大公称粒径、添加剂等不同因素共制备了AC-16、AC-25(基质、改性、基质+抗车辙剂)6种沥青混合料。集料选用石灰岩、填料选用机制砂与石灰岩矿粉,沥青选用70#基质沥青与SBS改性沥青,材料均满足相关规范要求,技术指标如表1所示。AC-16与AC-25沥青混合料级配见表2,确定最佳油石比分别为AC-16(基质、改性)4.3%、4.2%与AC-25(基质、改性)4.1%、3.9%。添加剂采用RA抗车辙剂,采用内掺法,掺量为0.3%。

收稿日期:2021-07-10(修改稿)

作者简介:嵯永昌,男,硕士。E-mail:yongchangzhuo@163.com

\*通信作者:张金喜,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:zhangjinxi@bjut.edu.cn

表1 沥青技术指标

沥青种类	针入度 (25℃)/mm	软化点/ ℃	延度/cm	
			15℃	5℃
70# 基质沥青	70.67	43.40	136.24	—
SBS 改性沥青	61.00	61.25	93.64	22.73

表2 沥青混合料级配

混合料	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%												
	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-16	100	100	99.6	96.3	86.2	72.3	46.7	33.0	22.5	14.9	9.3	8.6	8.0
AC-25	100	95.0	82.5	74.0	66.5	55.0	38.0	29.0	22.5	16.0	11.0	8.5	5.0

### 1.3 单轴压缩动态模量试验

单轴压缩动态模量试验参照 JTG E20—2011 T0738《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》。试验温度分别为-10、5、20、35 和 50℃;加载频率分别为 0.1、0.5、1.5、10、25 Hz;试验设备采用 UTM-100 液压伺服机进行。试验顺序由低温到高温,由高频到低频,采用应力控制模式,通过 UTM-100 对试件施加半正弦荷载。为了减小误差,每组平行试验试件个数不少于 4 个,试验开始前,试件应在环境箱中保温 4 h 以上。

### 1.4 沥青混合料路用性能试验

沥青混合料路用性能主要指沥青混合料的高温稳定性、水稳定性与低温抗裂性,同时疲劳寿命作为沥青路面设计的关键因素,在混合料的路用性能研究中亦作为评价指标之一。该研究主要分析沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、疲劳寿命 3 项指标与动态模量间的关系。高温稳定性通过车辙试验评价,低温性能通过低温小梁弯曲试验评价,疲劳寿命通过间接拉伸疲劳寿命试验评价。相关试验均参照 JTG E20—2011《公路沥青及沥青混合料试验规程》进行。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 动态模量试验结果及分析

作为典型的黏弹性材料,复数模量是描述沥青混合料力学响应特征的重要指标,复数模量是沥青混合料的基本材料属性。复数模量由实部与虚部组成,其实部表征弹性特征,称为存储模量,虚部表征黏性特征,称为损失模量,如式(1)所示:

$$E^* = E' + iE'' \quad (1)$$

式中: $E^*$  为复数模量(MPa); $E'$  为存储模量(MPa);

### 1.2 试件制备

试件采用 Superpave 旋转压实成型,原始试件尺寸为直径 150 mm,高度 170 mm,经钻芯切割后获得直径为(100±2) mm、高度为(150±2.5) mm 的圆柱体试件。控制试件空隙率为 4%±0.5%。

$E''$  为损失模量(MPa)。

复数模量的绝对值,即为沥青混合料的动态模量,即:

$$|E^*| = \sqrt{(E')^2 + (E'')^2} \quad (2)$$

式中: $|E^*|$  为动态模量(MPa)。

完成单轴压缩动态模量试验后,通过数据汇总处理得到 6 种沥青混合料动态模量见表 3。

由表 3 可知,沥青混合料作为典型的黏弹性材料其动态模量对于试验温度与加载频率具有明显的依赖性。试验温度对动态模量的影响可以描述为:在不同的加载频率下,6 种沥青混合料的动态模量均随着试验温度的升高而逐渐降低,不同沥青混合料的动态模量受温度的影响一致。这主要是因为沥青混合料作为黏弹性材料,在低温时其力学特征主要表现为弹性,随着试验温度的升高,其力学特征由弹性向黏性转变,沥青与集料间的黏附性变差,混合料强度下降,导致其动态模量降低。加载频率与动态模量的关系为:在相同的试验温度条件下,6 种沥青混合料的动态模量均随加载频率的减小呈降低趋势,且变化趋势基本一致。这主要是由于沥青混合料的力学响应与瞬时的加载与卸载之间存在滞后现象,随着加载频率的增加,这种滞后现象愈加明显,因此沥青混合料的动态模量呈现出随加载频率增加而升高的趋势。

### 2.2 动态模量主曲线

沥青混合料在时间和温度条件下的力学响应是等效的并且可以相互转换,即时间温度等效原理。根据时间温度等效原理,可以将沥青混合料在各自试验温度不同加载频率下获得的动态模量转换至参考温度下,将动态模量数据点拟合成一条光滑的动态模量曲线,即该参考温度下的动态模量主曲线。通过动态模量主曲线,可以在全温度全频率范围内预测动态模量值。

表 3 6 种沥青混合料动态模量

沥青混合料类型	温度/ ℃	不同频率(Hz)时的动态模量/MPa					
		25	10	5	1	0.5	0.1
AC-16(基质)	-10	21 970	20 035	19 187	16 172	15 448	12 775
	5	17 806	16 057	14 909	12 690	11 171	8 279
	20	10 093	9 034	7 653	5 280	4 481	3 513
	35	4 229	3 376	2 803	1 228	969	769
	50	991	771	634	456	316	251
AC-16 (基质+ 抗车辙剂)	-10	22 170	20 345	19 817	17 567	16 172	15 625
	5	18 971	16 325	15 534	13 396	10 183	9 134
	20	11 506	9 807	8 494	5 558	4 458	2 457
	35	4 492	3 699	2 862	2 161	1 690	1 160
	50	1 067	947	736	481	333	276
AC-16(改性)	-10	22 858	21 459	20 990	18 944	18 265	16 425
	5	19 202	17 981	16 325	14 359	12 176	9 368
	20	11 923	10 276	8 936	5 934	4 755	2 634
	35	4 833	3 981	3 071	2 222	1 690	1 016
	50	1 158	990	808	477	396	288
AC-25(基质))	-10	22 410	20 974	19 803	16 971	15 674	13 411
	5	18 432	16 825	15 651	12 870	11 681	8 988
	20	10 815	9 244	7 930	5 474	4 878	3 550
	35	4 270	3 417	2 671	1 486	1 202	816
	50	1 045	816	714	437	311	267
AC-25 (基质+ 抗车辙剂)	-10	22 915	21 739	21 091	19 412	18 832	16 964
	5	19 803	18 190	15 907	14 872	12 490	9 195
	20	12 027	10 304	8 940	6 077	5 018	3 033
	35	4 640	3 449	2 918	1 992	1 737	1 306
	50	1 204	825	726	486	397	287
AC-25(改性)	-10	23 493	22 581	21 881	19 893	19 238	17 146
	5	20 518	19 193	18 066	16 971	15 674	12 109
	20	12 451	10 710	9 442	6 642	5 610	3 611
	35	5 134	4 292	3 428	2 377	1 847	1 380
	50	1 484	1 067	816	538	411	301

沥青混合料的动态模量主曲线可以用西格摩德(Sigmoidal)数学模型进行拟合,表达式如下:

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \lg f_r}} \quad (3)$$

式中:  $|E^*|$  为动态模量(MPa);  $\delta$  为动态模量最小对数值(MPa);  $\alpha + \delta$  为动态模量最大对数值(MPa);  $\beta, \gamma$  为模型形状系数;  $f_r$  为参考温度下的加载频率(Hz)。

西格摩德模型给出了在参考温度下沥青混合料动

态模量与时间(频率)的函数关系。动态模量数值由试验温度平移至参考温度的距离称之为移位因子,移位因子反映了沥青混合料动态模量与试验温度之间的依赖关系,如图 1 所示。移位因子可由 W. L. F 方程计算得出,如式(4)、(5)所示:

$$f_r = f \cdot a_t \quad (4)$$

$$\lg a_t = \frac{-C_1(t-t_0)}{C_2 + (t-t_0)} \quad (5)$$

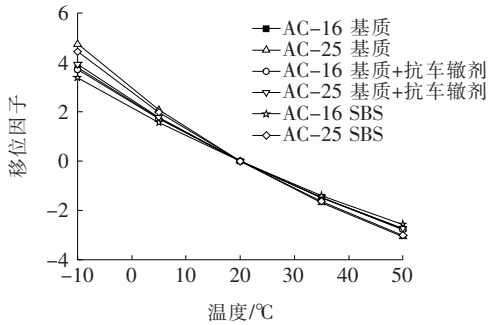
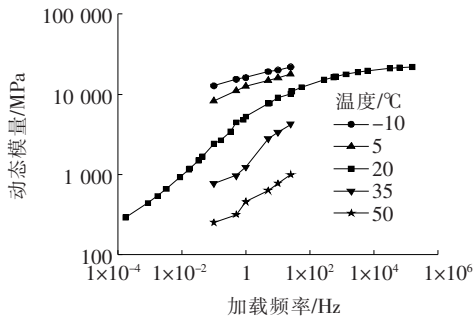


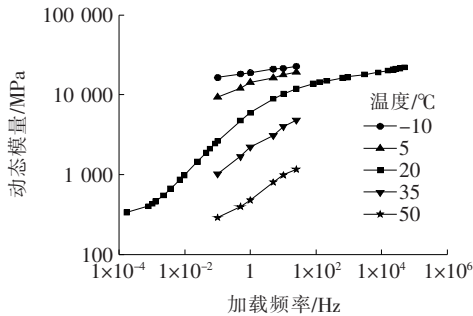
图1 6种沥青混合料移位因子示意图

式中: $f_r$ 为参考温度下的加载频率(Hz); $f$ 为试验加载频率(Hz); $t$ 为试验温度(°C); $t_0$ 为参考温度(°C); $\alpha_t$ 为移位因子,是温度的函数; $C_1, C_2$ 为经验参数。

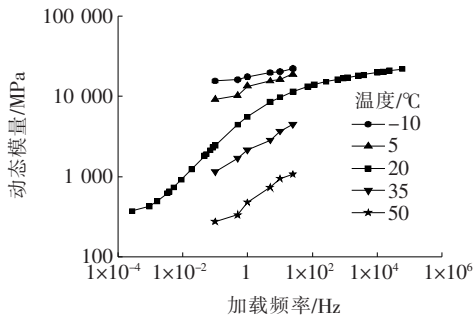
由图1可知:在温度为20°C时6种沥青混合料的移位因子相同,故试验选择20°C作为参考温度,绘制6种沥青混合料在20°C时的动态模量主曲线(图2、3),



(a) AC-16 基质沥青混合料

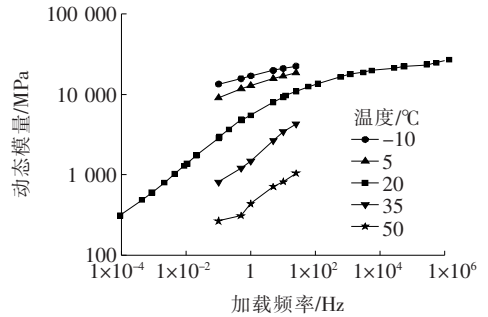


(b) AC-16 改性沥青混合料

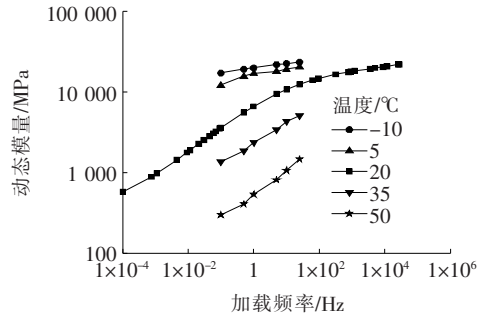


(c) AC-16 基质+抗车辙剂沥青混合料

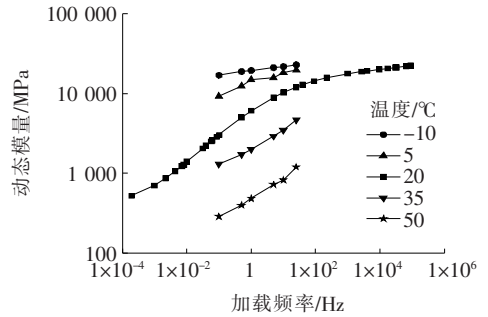
图2 AC-16 动态模量主曲线



(a) AC-25 基质沥青



(b) AC-25 改性沥青



(c) AC-25 基质+抗车辙剂沥青混合料

图3 AC-25 动态模量主曲线

并通过非线性最小二乘法进行拟合分析,通过判定系数 $R^2$ ,评判西格摩德模型的拟合优度。通过计算,得到6种沥青混合料动态模量主曲线方程系数如表4所示。

由图2、3可知:沥青混合料动态模量主曲线与移位因子相结合,可以反映沥青混合料在温度与加载频率综合作用下的动态模量变化规律,可以用于分析与预测不同温度和加载频率下的沥青路面力学响应特征。

### 2.3 沥青混合料路用性能试验结果

通过对6种沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性与抗疲劳性能的试验研究,得到试验结果如图4、5与表5所示。

## 3 动态模量影响因素分析

### 3.1 沥青混合料动态模量影响因素分析

6种沥青混合料动态模量主曲线如图6所示。

表 4 沥青混合料动态模量主曲线方程系数

沥青混合料类型	$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$C_1$	$C_2$	$R^2$
AC-16(基质)	2.012	2.369	-0.882	-0.622	19.98	187.8	0.999 8
AC-16(改性)	2.095	2.303	-0.732	-0.605	22.03	208.3	0.997 2
AC-16(基质+RA)	2.125	2.259	-0.731	-0.621	20.71	213.7	0.995 2
AC-25(基质)	1.910	2.452	-1.108	-0.558	17.241	139.1	0.999 3
AC-25(改性)	2.072	2.333	-0.982	-0.470	18.31	153.7	0.996 5
AC-25(基质+RA)	2.101	2.300	-0.724	-0.531	17.83	166.8	0.994 7

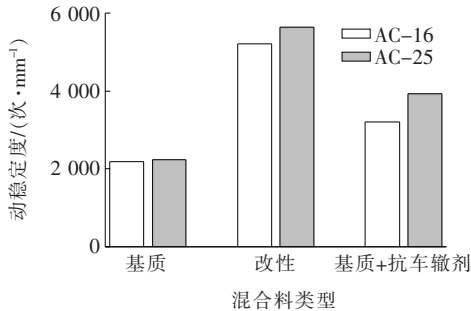


图 4 6 种沥青混合料动稳定度试验结果

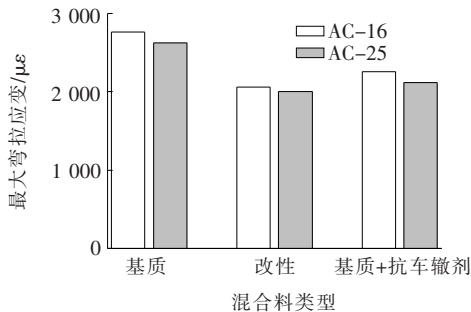


图 5 -10 °C 低温小梁弯曲试验结果

表 5 间接拉伸疲劳试验结果

混合料类型	不同应力比下的间接拉伸强度/MPa			
		0.3	0.5	0.7
基质	AC-16	9 681	641	81
	AC-25	8 341	601	61
改性	AC-16	12 001	1 381	201
	AC-25	12 721	1 408	321
基质+ 抗车辙剂	AC-16	10 161	761	181
	AC-25	10 201	961	121

### 3.1.1 沥青种类对混合料动态模量的影响

由图 6 可以看出:在大部分试验频率范围内两种改性沥青混合料的动态模量主曲线位于相应的基质沥青混合料上方,在低温高频区段内,不同种类的沥青混合料动态模量值较为接近,结合表 1 可知:SBS 改性沥

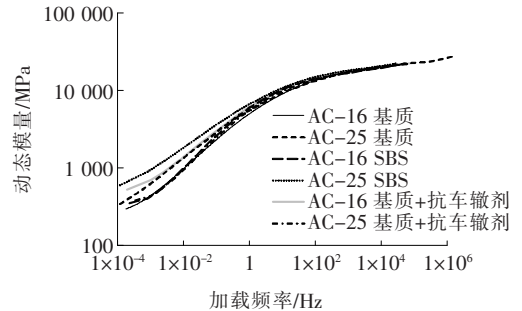


图 6 6 种沥青混合料动态模量主曲线

青的黏弹性优于 70# 基质沥青,说明优质沥青对于沥青混合料的性能改善作用是显著的。但是相同级配的沥青混合料动态模量主曲线存在趋近交叉现象,说明不同沥青种类混合料在不同的加载频率下对应力的敏感程度是不同的。在低温高频区段内,SBS 改性沥青混合料的动态模量主曲线斜率稍大于基质沥青混合料,说明在此区段内改性沥青混合料对应力的敏感性要大于基质沥青混合料,但是在高温低频区段内则相反。在 1 Hz 附近区段内,相同级配两种沥青混合料的动态模量主曲线趋于一致,两者性能基本相当。

### 3.1.2 集料最大公称粒径对混合料动态模量的影响

不同级配的沥青混合料其动态模量均随着试验温度的升高而降低,随着加载频率的降低而减小,且变化趋势基本一致。在图 6 中,AC-25 沥青混合料始终位于 AC-16 上方,在高温低频区段内二者差值较大,这是因为沥青混合料的动态模量受温度的影响较大,而其他条件相同时,最大公称粒径越大的沥青混合料其高温性能越好,因此最大公称粒径越大的沥青混合料其动态模量值越高。同时,可以看出 AC-25 沥青混合料动态模量受试验温度的影响较大,并且当温度达到 10 °C 以上时,随着试验温度的升高,其动态模量发生较大变化,在图 6 中即表现为斜率明显增大,结合移位因子图可以得到,集料的最大公称粒径越大,混合料对温度的敏感性越强。

### 3.1.3 抗车辙剂对混合料动态模量的影响

由图6可以看出:加入抗车辙剂的AC-16与AC-25沥青混合料的动态模量主曲线在低频高温区段内显著高于基质AC-16与AC-25沥青混合料,在高频低温区段内二者则较为接近。因为沥青混合料是感温材料,并且在高温区间内,集料间的嵌挤效果下降明显,混合料强度降低,因此沥青混合料的动态模量会出现较大损失。抗车辙剂的加入降低了沥青混合料对温度的敏感性,增强了混合料的弹性恢复能力,沥青混合料强度增加,抗车辙能力显著提升,高温稳定性增加。但是在低温条件下,由于沥青混合料整体变硬,此时抗车辙剂的加入对沥青混合料动态模量的影响不大。

### 3.2 沥青混合料动态模量与路用性能的关系

沥青混合料在不同温度条件下的动态模量可以作为评价沥青路面高低温性能的指标。结合表3与图4、6可以看出:在低频高温区段内,6种沥青混合料的动态模量都迅速减小,在主曲线上表现为斜率增大,这与实际城市道路中,夏季高温时期上坡路段、信号交叉口、公交车站、停车场等车辆低速重载行驶路段容易发生车辙病害的现象相对应。在低频高温区段内,AC-16(改性)、AC-25(改性)与AC-16(基质+抗车辙剂)、AC-25(基质+抗车辙剂)的动态模量显著高于相应的基质沥青混合料。结合图4可知:6种沥青混合料的抗车辙能力依次为AC-25(改性) $>$ AC-16(改性) $>$ AC-25(基质+抗车辙剂) $>$ AC-16(基质+抗车辙剂) $>$ AC-25(基质) $>$ AC-16(基质),说明影响沥青混合料高温性能最关键的因素是沥青种类,同时抗车辙剂的加入也会提升混合料的抗车辙能力,在合理配比与其他因素相同的情况下,AC-16与AC-25混合料的抗车辙性能无显著差别。相反地,结合图5、6可知:在低温条件下,动态模量数值越高沥青混合料的形变能力越弱,低温性能越差,路面越容易发生低温开裂病害。但是在较高的加载频率下,沥青混合料的动态模量值明显增大,并且由于实际路面中,车辆荷载作用时间短,故较高的加载频率对沥青路面低温性能并无太大影响。

动态模量作为沥青路面设计的重要因素,其数值大小与路面疲劳寿命存在着直接联系。结合图6与表5可知:动态模量较高的基质沥青混合料,其疲劳寿命较小,动态模量与疲劳寿命呈负相关。同时结合图4可以看出:基质沥青混合料的高温稳定性与抗疲劳性能是一对矛盾体,高温稳定性好,抗车辙能力会降低,反之亦然。但是加入抗车辙剂或使用改性沥青后,可

以在提升沥青混合料高温稳定性的同时获得较好的抗疲劳性能,抗车辙剂与改性沥青的使用可以在增加沥青混合料动稳定度与动态模量的同时不会降低混合料的抗疲劳性能。

## 4 结论

以沥青混合料室内动态模量试验结果为基础,绘制了AC-16(基质)、AC-16(改性)、AC-16(基质+抗车辙剂)、AC-25(基质)、AC-25(改性)、AC-25(基质+改性)6种沥青混合料动态模量主曲线,研究了沥青混合料动态模量影响因素以及动态模量与沥青混合料性能之间的关系,得到如下结论:

(1) 温度与加载频率是影响沥青混合料动态模量的关键因素。在不同的加载频率下,沥青混合料的动态模量随试验温度的升高迅速降低;在不同的试验温度下,沥青混合料的动态模量随加载频率的增大而逐渐增大。

(2) 沥青种类是影响沥青混合料动态模量的重要因素,两种沥青混合料在不同的温度加载频率范围内对应力的敏感程度不同,不同沥青种类的沥青混合料对温度、加载频率的适应范围不同。沥青混合料的动态模量随集料的最大公称粒径的增大而增加,集料的最大公称粒径越大,混合料的动态模量值越大。随着抗车辙剂的加入,沥青混合料对温度的敏感性降低,添加抗车辙剂的沥青混合料的动态模量值随试验温度的变化而变化的程度在不同的加载频率下均小于基质沥青混合料。

(3) 对于基质沥青混合料,动态模量增加的同时其疲劳寿命会降低,但对于加入抗车辙剂或使用改性沥青的沥青混合料,在沥青混合料动稳定度和动态模量得到提高的同时,不会降低沥青混合料的抗疲劳性能。

### 参考文献:

- [1] 黎晓,梁乃兴,陈玲. 沥青混凝土动态模量及时-温等效方程[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014(3).
- [2] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [3] MEDANITO, HUURNLAN M. Superposition Principle to Determine Properties of Bituminous Mixtures in the Time-Temperature Domain[C]. Proceedings of the Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Air-Fields. Trondheim, Norway, 2005: 88—93.
- [4] 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(1).