

文章编号:1007-9629(2022)02-0206-08

# 骨架密实型沥青稳定碎石混合料动态模量研究

索 智<sup>1,2,3,\*</sup>, 谭祎天<sup>1,2</sup>, 张 亚<sup>4</sup>, 聂 磊<sup>1</sup>, 包 旭<sup>1</sup>

(1.北京建筑大学 土木与交通工程学院,北京 100044; 2.北京建筑大学 北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044; 3.北京建筑大学 北京市城市交通基础设施工程技术研究中心,北京 100044; 4.贵州省铜仁公路管理局,贵州 铜仁 554300)

**摘要:**为明确骨架密实型沥青稳定碎石混合料(skeleton dense asphalt treated base mixture, SDATBM)的力学性能,以动态模量为力学指标,对集料公称最大粒径为 25、30、40 mm 的 3 类 SDATBM(SDATBM-25、SDATBM-30、SDATBM-40)进行不同试验条件下的单轴动态压缩模量试验,并绘制上述 3 类 SDATBM 的动态模量主曲线,在此基础上探究了集料公称最大粒径、加载频率及温度对其动态模量的影响规律.结果表明:SDATBM 具有良好的力学性能;不同集料公称最大粒径的 SDATBM 动态模量在不同加载频率和温度下均有相同的变化趋势,3 类 SDATBM 的动态模量均随温度上升或加载频率降低而减小;在高温、低温域和极高频、极低频范围内,温度、加载频率变化对 SDATBM 的动态模量影响较小,而在 20~35 °C 和适中的加载频率范围内,温度、加载频率变化对 SDATBM 的动态模量影响最大;在较宽温度域、较大加载频率范围内,SDATBM 的动态模量随着集料公称最大粒径的增加而增加.

**关键词:**道路工程;骨架密实型;沥青稳定碎石;动态模量;动态模量主曲线

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.014

## Dynamic Modulus of Skeleton Dense Asphalt Treated Base Mixture

SUO Zhi<sup>1,2,3,\*</sup>, TAN Yitian<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya<sup>4</sup>, NIE Lei<sup>1</sup>, BAO Xu<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. Tongren Highway Administration Bureau of Guizhou Province, Tongren 554300, China)

**Abstract:** In order to clarify the mechanical properties of skeleton dense asphalt treated base mixture (SDATBM), dynamic modulus was used as a mechanical index and uniaxial dynamic compression modulus tests were carried out on three kinds of SDATBM (SDATBM-25, SDATBM-30 and SDATBM-40) with nominal maximum particle sizes of 25, 30, 40 mm under different test conditions, and the dynamic modulus master curves of the above three kinds of SDATBM were plotted. On this basis, influence of the nominal maximum particle size, loading frequency and temperature on the dynamic modulus was investigated. The results show that SDATBM has excellent mechanical properties; the dynamic modulus of SDATBM with different nominal maximum particle size has the same change trend at different frequency and temperature, and the modulus of three kinds of SDATBM decreases with the increase of temperature or the decrease of frequency; in the high temperature and low temperature region, temperature and frequency variations have little effect on the dynamic modulus, but in the temperature range of 20–35 °C and moderate

收稿日期:2020-10-16; 修订日期:2020-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778037, 52078024)

第一作者(通讯作者):索 智(1978—),男,辽宁沈阳人,北京建筑大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:suozhi@bucea.edu.cn

frequency range, temperature and frequency variations have the greatest influence on the dynamic modulus; in a wide temperature range and a large loading frequency range, the dynamic modulus of SDATBM increases with the increase of nominal maximum particle size.

**Key words:** road engineering; skeleton dense; asphalt treated base; dynamic modulus; dynamic modulus master curve

近年来,随着长寿命沥青路面理念的提出和展,以沥青稳定碎石混合料为代表的柔性基层路面材料逐步应用于沥青路面结构当中,并取得如消除反射裂缝病害、增强沥青路面抗疲劳开裂能力等良好的应用效果<sup>[1-2]</sup>.但相对半刚性基层材料和路面结构,沥青稳定碎石基层材料和结构存在模量低、抗车辙能力差等问题,限制了其应用<sup>[3-4]</sup>.国内外学者对沥青混合料结构的研究表明,骨架密实型沥青混合料具有良好的路用性能和突出的抗车辙能力<sup>[5-8]</sup>.冯新军等<sup>[9]</sup>对不同结构的沥青稳定碎石混合料进行对比后发现,骨架密实型沥青稳定碎石混合料(skeleton dense asphalt treated base mixtures,SDATBM)的高低温性能最优.可见,骨架密实型结构的应用为解决柔性路面结构抗车辙能力差这一问题提供了方法,然而目前有关SDATBM力学性能的研究报道较少.

考虑到路面在服役过程中经受动态荷载和环境变化的共同作用,静态模量无法直接反映路面材料在动态荷载下的力学响应,JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》中采用动态模量代替静态模量,以此作为沥青混合料的力学指标,并推荐了沥青混合料动态模量的预估参考模型.此外学者们虽然对 Witczak1-37A 模型、NCHRP1-40D 模型和 Hirsch 模型这 3 种典型模型进行了修正,但上述模型均是参考国外模型提出的,其测试方法、原材料和气候环境因素均不同于中国,它们在中国的适用性还有待商榷<sup>[10-15]</sup>.因此为明确 SDATBM 的力学性能,并探究集料公称最大粒径、温度和加载频率等对其影响规律,本文以集料公称最大粒径分别为 25、30、40 mm 的 3 类 SDATBM(SDATBM-25、SDATBM-30 和 SDATBM-40)为研究对象,以 SDATBM 的动态模量为力学指标,采用单轴压缩动

态模量试验对其力学性能进行测定,并建立 3 类 SDATBM 的动态模量主曲线,探究在较宽温度域、较大加载频率范围内上述因素变化对 SDATBM 动态模量的影响规律.

## 1 试验

### 1.1 原材料性能

基于前期研究得到的SDATBM-25、SDATBM-30和SDATBM-40的级配范围<sup>[16]</sup>,以各档集料通过率中值为目标级配,得到以上3类SDATBM的目标级配,见表1.选用70#基质沥青拌和混合料,70#基质沥青的基本性能如表2所示.混合料中粗、细集料均采用石灰岩,矿粉采用石灰岩矿粉.采用旋转压实方法成型大马歇尔试件,并采用马歇尔设计方法确定3类SDATBM混合料的最佳沥青用量(质量分数,下同).3类SDATBM的设计空隙率(体积分数)均取为4%,最终确定SDATBM-25、SDATBM-30和SDATBM-40的最佳沥青用量分别为3.8%、3.3%和3.0%.

### 1.2 试验方法

按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》要求,对 3 类 SDATBM 进行动态模量试验.利用 UTM 万能材料试验机对制备的圆柱体试件进行正弦振动加载,在不同试验温度和加载频率下对混合料动态模量进行测定.分别选取 5 个试验温度(—10、5、20、35、50 ℃)和 6 个频率(0.1、0.5、1.0、5.0、10.0、25.0 Hz)进行加载试验.参照 JTGD 50—2017,采用 0.7 MPa 作为试验加载应力.为保证加载过程中试件不受损坏,加载温度由低向高过渡,加荷频率由高到低过渡.栗培龙等<sup>[17]</sup>研究发现,试件的围压水平对于测定沥青混合料动态模量时产生的影响

表 1 3 类 SDATBM 的目标级配  
Table 1 Target aggregate gradation of three kinds of SDATBM

Sieve size/mm		37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	SDATBM-25	100	100	95	74	65	57	46	30	23	15	12	10	8	7
	SDATBM-30	100	95	83	66	57	45	30	22	16	13	10	9	8	7
	SDATBM-40	95	84	73	57	49	41	30	21	15	13	10	9	7	6

表 2 70#基质沥青的基本指标  
Table 2 Technical indexes of 70#matrix asphalt

Technical index		Measured value
Penetration/(0.1 mm)		67
Softening point/℃		52
Ductility/cm		>150
Density/(g·cm <sup>-1</sup> )		0.987
TFOT	Mass loss/%	-0.26
	Penetration ratio/%	77
	Ductility/cm	47

可以忽略不计,因此本文不考虑围压水平的影响,即SDATBM动态模量的测定在无围压状态下进行.

1.3 SDATBM 动态模量试验结果

将 SDATBM 的动态模量 ( $E^*$ , MPa) 定义为 SDATBM 稳定状态时的应力与应变之比,其计算式见式(1).

$$|E^*| = \frac{\sigma_{amp}}{\epsilon_{amp}} \tag{1}$$

式中: $\sigma_{amp}$ 为应力幅值,MPa; $\epsilon_{amp}$ 为应变幅值,%.

由式(1)计算得到不同试验条件下 3 类 SDATBM 的动态模量,结果见图 1.

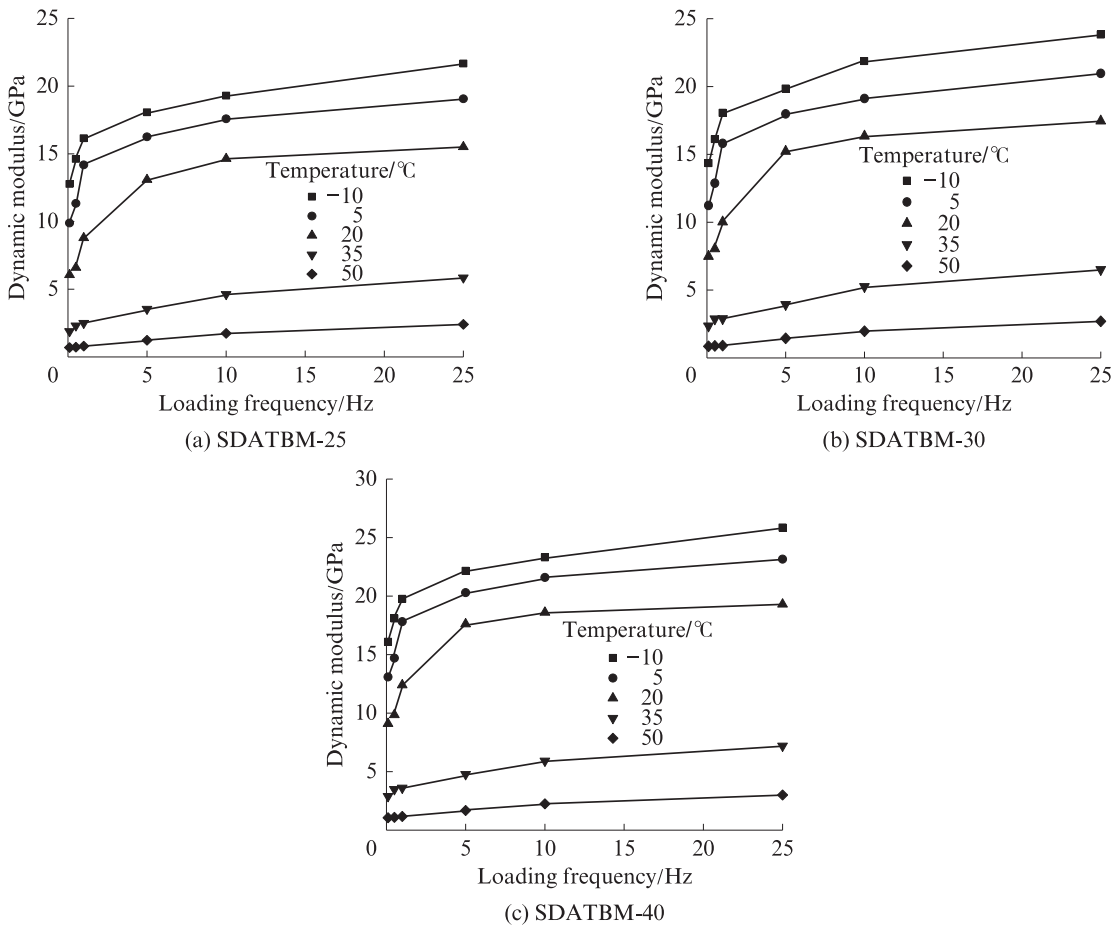


图1 不同试验条件下3类SDATBM的动态模量

Fig.1 Dynamic modulus of three kinds of SDATBM under different test conditions

由 JTG D50—2017 可知,在 5 Hz、20 °C 条件下,以集料公称最大粒径为 25 的沥青稳定碎石混合料 ATB-25 为代表的动态模量为 7~11 GPa,而 SDATBM-25 的动态模量试验值为 13.092 GPa,高于规范中的推荐值.这表明 SDATBM 具有更好的力学性能,同时也说明保证沥青稳定碎石混合料的骨架密实型结构对于提升沥青混合料的力学性能具有重要意义.

2 3 类 SDATBM 动态模量主曲线的建立及不同因素影响分析

2.1 3 类 SDATBM 动态模量主曲线的建立

沥青稳定碎石混合料作为一种黏弹性材料,加载频率和温度对其影响较大,并且由于在实际路面服役状态下,环境、车辆因素复杂多变,现有的室内加载频率和温度无法对较宽温度域、较大加载频率范围内沥青混合料的动态模量进行试验测量.因此

本文根据时间-温度等效原理,建立了3类SDATBM的动态模量主曲线,在明确极端环境条件下SDATBM力学特性的同时,进一步分析了较宽温度域、较大加载频率范围内集料公称最大粒径、温度及加载频率等因素变化对其动态模量的影响规律。

在不同测试温度下,按照时间-温度换算方法将黏弹性材料动态模量曲线在某一参考温度下进行平移转换,所合成的具有光滑特征的函数曲线通常称之为动态模量主曲线。该曲线不仅可以预估沥青混合料的长期力学性能,减少试验量,还可以预估沥青混合料在任意温度下的动态模量。为合成具有光滑特征的主曲线,首先需要选择合适的函数进行拟合。

$$\max E^* = p_c [4.2 \times 10^6 (1 - 10^{-2} \rho_{VMA}) + 43.5 \rho_{VFA} \rho_{VMA}] + (1 - p_c) [4.2 \times 10^{-6} (1 - 10^{-2} \rho_{VMA}) + 4.35 \times 10^{-5} \rho_{VMA} \rho_{VFA}^{-1}]^{-1} \quad (3)$$

式中: $\rho_{VMA}$ 为矿料间隙率,%; $\rho_{VFA}$ 为沥青饱和度,%; $p_c$ 为集料接触体积参数, $p_c = (20 + 4.35 \times 10^5 \rho_{VFA} \rho_{VMA}^{-1})^{0.58} + [650 + (4.35 \times 10^5 \rho_{VFA} \rho_{VMA}^{-1})^{0.58}]^{-1}$ ,无量纲。

$$\lg f_r = \lg f + \lg \alpha(T) \quad (4)$$

式中: $f$ 为加载频率,Hz; $T$ 为试验温度,°C; $\alpha(T)$ 为移位因子,是关于 $T$ 的函数。

动态模量主曲线建立过程中最为关键的是确定 $\alpha(T)$ 。 $\alpha(T)$ 决定对数时间坐标中各试验温度与参考温度下动态模量曲线间的平移距离。本文采用仅有1个未知参数的Arrhenius函数来确定不同温度下的 $\alpha(T)$ 。Arrhenius函数表达式见式(5):

$$\lg \alpha(T) = \frac{\Delta E_a}{2.303R} \left( \frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \quad (5)$$

式中: $\Delta E_a$ 为材料的活化能,kJ/mol; $R$ 为气体普适常数,取8.314 J/(mol·K); $T_r$ 为基准温度,°C。

基于上述模型,计算3类SDATBM动态模量最大值对数( $\alpha$ ),相关参数和计算结果见表3。选用JTGD 50—2017中规定的沥青混合料动态模量标准试验温度(20 °C)作为基准温度( $T_r$ ),使用excel中规划求解功能计算出6组加载频率和5组试验温度条件下,3类SDATBM动态模量试验值与主曲线模型预测值的平方差,并将平方差之和最小作为约束条件,确定Sigmoidal函数的拟合参数 $\delta$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 和 $\Delta E_a$ ,结果见表4。在基准温度(20 °C)下动态模量主曲线的 $\alpha(T)$ 计算结果见表5。

通过表5确定的 $\alpha(T)$ ,得到基准温度(20 °C)下3类SDATBM的动态模量主曲线,见图2。

本文参考AASHTOPP61-13《American association of state highway and transportation officials standard》的相关规定,采用Sigmoidal函数来确定SDATBM的动态模量主曲线<sup>[18]</sup>。Sigmoidal函数表达式为:

$$\lg |E^*| = \delta + \frac{\alpha - \delta}{1 + \exp(\beta + \gamma \lg f_r)} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 、 $\delta$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 为回归系数,其中 $\alpha$ 代表动态模量最大值对数,与沥青饱和度、矿料间隙率有关,可利用Hirsch模型确定<sup>[19]</sup>,Hirsch模型表达式见式(3); $\delta$ 代表动态模量最小值对数; $\beta$ 和 $\gamma$ 为描述Sigmoidal函数形状的参数,取决于沥青混合料的特性和 $\alpha$ 、 $\delta$ 的大小; $f_r$ 为参考温度下的加载频率,也称缩减频率,Hz,通过式(4)计算得到。

表3 3类SDATBM动态模量最大值对数计算表

Table 3 Calculation table of logarithm of dynamic modulus maximum of three kinds of SDATBM

SDATBM type	$\rho_{VMA}/\%$	$\rho_{VFA}/\%$	$\max E^*/\text{GPa}$	$\alpha$
SDATBM-25	12.7	67.1	3 451.772	6.538
SDATBM-30	12.5	68.1	3 466.702	6.540
SDATBM-40	12.1	68.5	3 489.884	6.543

表4 3类SDATBM动态模量主曲线的相关参数

Table 4 Related parameters of dynamic modulus main curves of three kinds of SDATBM

SDATBM type	$\delta$	$\Delta E_a/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\beta$	$\gamma$
SDATBM-25	4.08	238 584.93	-1.39	-0.42
SDATBM-30	4.42	259 964.02	-1.41	-0.45
SDATBM-40	4.72	302 379.25	-1.52	-0.46

表5 3类SDATBM动态模量主曲线的移位因子

Table 5 Displacement factor of dynamic modulus main curves of three kinds of SDATBM

SDATBM type	-10 °C	5 °C	20 °C	35 °C	50 °C
SDATBM-25	4.85	2.29	0	-2.07	-3.95
SDATBM-30	5.28	2.50	0	-2.25	-4.30
SDATBM-40	6.14	2.90	0	-2.62	-5.00

## 2.2 温度和加载频率对SDATBM动态模量的影响分析

由图2可见:(1)随着加载频率的增加,3类SDATBM的动态模量均增大;随着温度的增加,3类



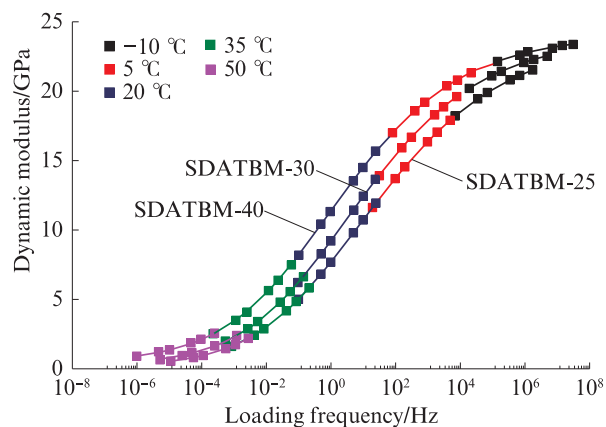


图2 3类SDATBM的动态模量主曲线

Fig. 2 Dynamic modulus main curves of three kinds of SDATBM

SDATBM的动态模量均减小;在低温高频时,3类SDATBM的动态模量可达21~25 GPa,在高温低频时,3类SDATBM的动态模量仅为7~10 GPa。(2)3类SDATBM的动态模量主曲线呈S状,随着温度的降低,主曲线斜率先增大后减小,在高温和低温域内,曲线段斜率较小,说明此温度域内温度变化对SDATBM的动态模量影响较小;在20~35 °C下SDATBM的动态模量曲线段斜率最大,说明在该温度域内SDATBM的动态模量变化最大。(3)当加载频率由极低向极高过渡时,主曲线斜率同样经历先大后小的过程,并且在极低和极高频率范围内,曲线斜率较小,即极低或极高频率范围内加载频率的变化对SDATBM动态模量的影响较小,只有在频率适中范围内,频率变化才会导致SDATBM动态模量变化较大。

上述原因与SDATBM自身的黏弹特性所导致的滞后效应有关<sup>[20]</sup>。当温度较低时,沥青混合料表现出明显的弹性特性,其力学表现受沥青影响较小,主要依赖其骨架结构,因此其动态模量较高;随着温度的增高,沥青混合料的弹性性能逐渐向黏性性能转化,导致动态模量降低,并且在此温度区域内,动态模量受温度的影响最为显著;当温度较高时,沥青的弹性性能转变为塑形性能,此时混合料本身动态模量较低,高温域内温度变化不会导致动态模量有较大变化。在循环加载过程中,因沥青材料的滞后效应导致弹性体不会出现完全压缩和完全回弹,因而SDATBM应变较小,动态模量较高。在极低频率时滞后效应几乎不存在,随着加载频率的逐渐增加,滞后效应出现并随之增加,因此其动

态模量随之增大。

此外由SDATBM动态模量变化规律可以反推出,当加载频率向极高频率增加时,SDATBM的滞后效应增加趋势有所减小,即在极高加载频率下,加载频率的变化对滞后效应的影响较小,仅在频率适中范围内,其变化才会导致沥青混合料的滞后效应现象变化显著。

### 2.3 集料公称最大粒径对SDATBM动态模量的影响分析

由图2还可见:在较大加载频率范围内,SDATBM-40的动态模量高于SDATBM-30,SDATBM-30的动态模量高于SDATBM-25,说明增大集料公称最大粒径可以在较宽温度域、较大加载频率范围内提升SDATBM的力学性能。但仅从动态模量主曲线中无法得到集料公称最大粒径对SDATBM力学性能的影响规律。为此,本文建立了6个加载频率、5个温度条件下,3类SDATBM的动态模量变化曲线(图3),以探究集料公称最大粒径对SDATBM动态模量的影响规律。

由图3可知:(1)在各加载频率下,随着温度的增加,集料公称最大粒径的变化对SDATBM动态模量的影响具有相同趋势。随着温度的增加,曲线间距减小,但动态模量增长率有所提升。以加载频率5.0 Hz为例,该频率下,−10 °C时,SDATBM-40的动态模量为22.16 GPa,较SDATBM-25增加了22.6%;50 °C时,SDATBM-40的动态模量为1.68 GPa,较SDATBM-25增加36.4%。(2)同一温度下,随着加载频率的增加,集料公称最大粒径的增加使得SDATBM动态模量的增长率降低。例如:在−10 °C、0.1 Hz时,SDATBM-40的动态模量较SDATBM-25增加了25.9%;在−10 °C、25.0 Hz时,SDATBM-40的动态模量较SDATBM-25增加了19.3%。在50 °C、0.1 Hz时,SDATBM-40的动态模量较SDATBM-25增加了52.3%;在50 °C、25.0 Hz时,SDATBM-40的动态模量较SDATBM-25增加了24.9%。

综上所述,增大集料公称最大粒径有利于提升SDATBM低温下的力学性能。低温时,任一加载频率下,集料公称最大粒径的增加均可显著提升SDATBM的力学性能;高温时,由于SDATBM的动态模量值较小,虽然集料公称最大粒径的增加导致其动态模量增长率较高,但动态模量值远低于低温时。

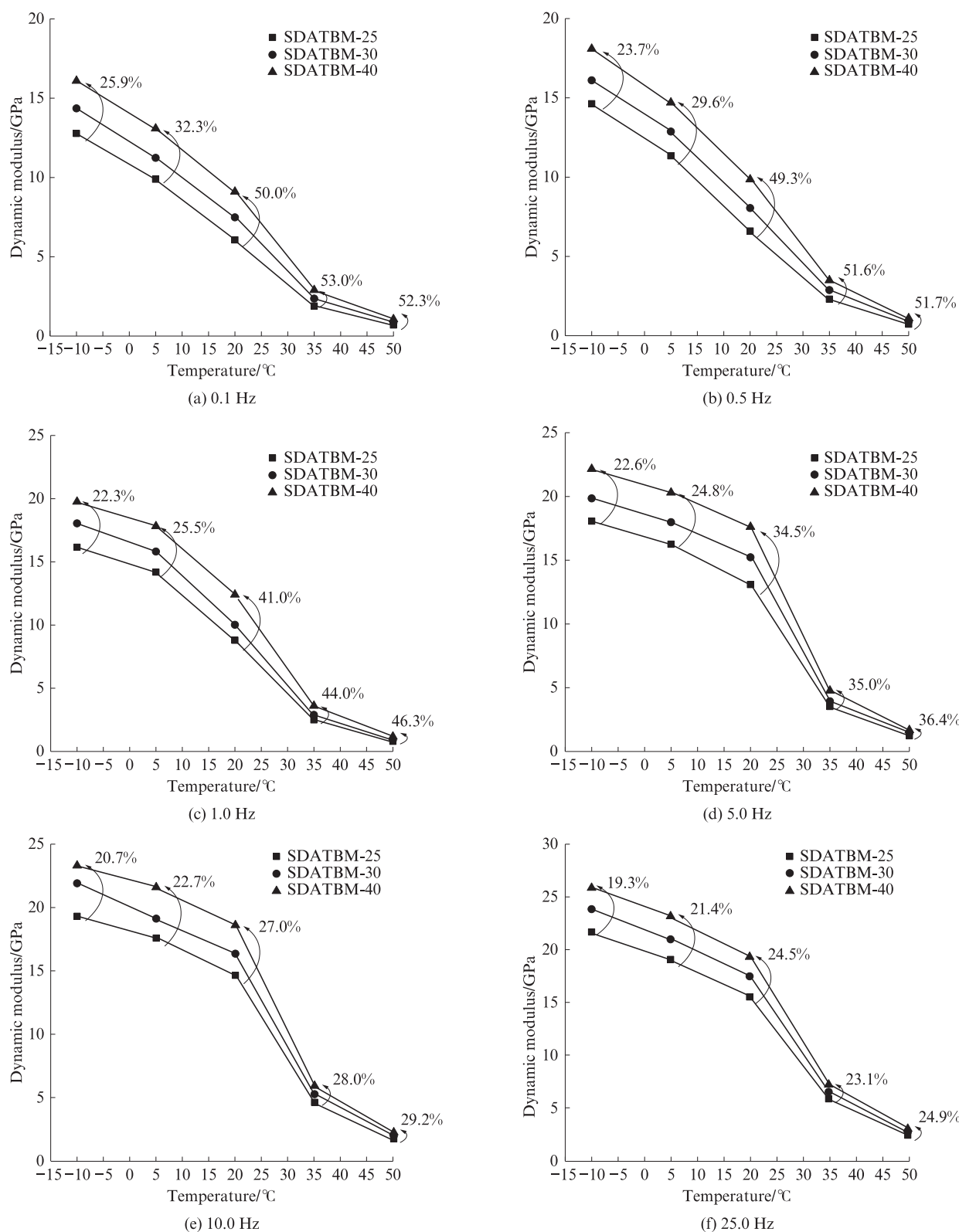


图3 不同加载频率下3类SDATBM的动态模量变化曲线  
Fig. 3 Dynamic modulus change curves of three kinds of SDATBM under different loading frequencies

### 3 结论

(1)在5 Hz、20 °C条件下,SDATBM-25的动态模量高于规范推荐值,说明SDATBM的力学性能优

异,因此保证沥青混合料的骨架密实型结构对其力学性能具有重要意义。

(2)不同温度、不同加载频率下,3类SDATBM的动态模量具有相同的变化趋势。随着温度的升高,

SDATBM的黏性特性增加,动态模量下降,并且在低温和高温域内,温度变化对SDATBM的动态模量变化影响较小,在20~35℃时,温度变化对SDATBM的动态模量变化影响显著;随着加载频率的增加,滞后效应出现并随之增加,导致SDATBM的动态模量增加,并且在极低和极高频率范围内,加载频率对SDATBM的动态模量变化影响较小,只有在加载频率适中范围内,频率的变化才会极大程度地影响SDATBM的动态模量。

(3)SDATBM的动态模量随着集料公称最大粒径的增大而增加,并且在较宽温度域、较大加载频率范围内,集料公称最大粒径的增加均有助于SDATBM力学性能的提升.特别在低温时,集料公称最大粒径的增加对SDATBM的动态模量增强效果最为显著。

#### 参考文献:

- [1] QIAN G P, HU C H, YU H N, et al. Case study: Ten year field performance evaluation of flexible base asphalt pavement design in heavy load condition [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(7):04020187.
- [2] 申结结,郑传峰,胡孝阳,等.半刚性基层与柔性基层沥青路面结构对比分析[J].公路,2019(1):9-12.  
SHEN Jiejie, ZHENG Chuanfeng, HU Xiaoyang, et al. Comparative analysis of asphalt pavement structure between semi rigid base and flexible base [J]. Highway, 2019(1):9-12. (in Chinese)
- [3] 申爱琴,张艳红,郭寅川,等.三类沥青路面结构力学响应的对比分析[J].长安大学学报(自然科学版),2009,29(4):1-7.  
SHEN Aiqin, ZHANG Yanhong, GUO Yinchuan, et al. Comparative analysis of mechanical response of three typical asphalt pavement structures [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2009, 29(4):1-7. (in Chinese)
- [4] 曹建建,郑炳锋.4类不同基层沥青路面长期性能研究[J].公路,2020(4):1-6.  
CAO Jianjian, ZHENG Bingfeng. Study on long term performance of four kinds of asphalt pavement with different base course [J]. Highway, 2020(4):1-6. (in Chinese)
- [5] 赵彬强,李俊.大粒径沥青混合料高温性能对比分析[J].公路,2018(9):28-32.  
ZHAO Binqiang, LI Jun. Comparative analysis of high temperature performance of large sized asphalt mixture [J]. Highway, 2018(9):28-32. (in Chinese)
- [6] 石立万,王端宜,吴文亮,等.基于数字图像处理的沥青混合料骨架研究[J].建筑材料学报,2016,19(4):767-772.  
SHI Liwan, WANG Duanyi, WU Wenliang, et al. Study of asphalt mixture skeleton based on digital image processing [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4):767-772. (in Chinese)
- [7] CAO W D, LIU S T, LI Y Y, et al. Effect of aggregate gradation on volumetric parameters and the high temperature performance of asphalt mixtures [C]// Fourth Geo-China International Conference. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2016: 42-50.
- [8] SHI L W, WANG D Y, MASLEY J, et al. Comparison analysis of the aggregate contact characteristics between skeleton-dense and suspended-dense structure asphalt mixture [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 470:889-892.
- [9] 冯新军,郝培文.密级配沥青稳定碎石基层混合料级配设计方法[J].中国公路学报,2009,22(4):33-38.  
FENG Xinjun, HAO Peiwen. Gradation design method of dense graded asphalt stabilized macadam base [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4):33-38. (in Chinese)
- [10] 杨小龙,申爱琴,郭寅川,等.沥青混合料动态模量预估模型研究进展[J].材料导报,2018,32(13):2230-2240.  
YANG Xiaolong, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. A review of dynamic modulus prediction model of asphalt mixture [J]. Materials Review, 2018, 32(13):2230-2240. (in Chinese)
- [11] 徐志荣,常艳婷,陈忠达,等.沥青混合料动态模量试验标准研究[J].交通运输工程学报,2015,15(3):1-8.  
XU Zhirong, CHANG Yanting, CHEN Zhongda, et al. Study on test standard of asphalt mixture dynamic modulus [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3):1-8. (in Chinese)
- [12] KONSTANTINA G, ANDREAS L, CHRISTINA P. Calibration of dynamic modulus predictive model [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102:65.
- [13] ASIFUR R A S M, RASHADUL I M, TAREFDER R A, et al. Assessment and modification of nationally-calibrated dynamic modulus predictive model for the implementation of mechanistic-empirical design [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11(5):502-508.
- [14] SOLATIFAR N, KAVUSSI A, ABBASGHORBANI M, et al. Development of dynamic modulus master curves of in-service asphalt layers using MEPDG models [J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(1):225-243.
- [15] CHRISTENSEN D W, BONAQUIST R. Improved Hirsch model for estimating the modulus of hot mix asphalt [J]. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16(S2):254-274.
- [16] 索智,罗亮,闫强,等.大粒径嵌锁式沥青混合料级配设计方法[J].公路,2020(1):208-211.  
SUO Zhi, LUO Liang, YAN Qiang, et al. Gradation design method of large size interlocking asphalt mixture [J]. Highway, 2020(1):208-211. (in Chinese)
- [17] 栗培龙,张争奇,王秉纲.沥青混合料黏弹性响应影响因素分析[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(3):96-100.  
LI Peilong, ZHANG Zhengqi, WANG Binggang. Analysis of influencing factors of viscoelastic response of asphalt mixture [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2010, 31(3):96-100. (in Chinese)
- [18] KHATTAB A M, EL-BADAWY S M, ELMWAFI M, et al. Comparison of Witczak NCHRP 1-40D & Hirsch dynamic modulus models based on different binder characterization

- methods: A case study[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 120:07003.
- [19] REMA A, SWAMY A K. Effect of construction methodology on uncertainty in asphalt concrete master curves[J] Journal of Transportation Engineering Part B:Pavements, 2019, 145(3): 04019021.
- [20] 薛羽,栗培龙,高朋,等. 沥青混合料动态模量主曲线方法对比分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(1): 1-9.
- XUE Yu, LI Peilong, GAO Peng, et al. Comparative analysis of principal curve methods of dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Guangxi University(Natural Science), 2020, 45(1): 1-9. (in Chinese)