

文章编号:1007-9629(2024)04-0327-06

超大粒径沥青混合料的黏弹特性及温度影响

蒋应军^{1,2,*}, 易勇^{1,2}, 田甜^{1,2}, 张宇^{1,2}, 范江涛^{1,2}

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为精准表征超大粒径沥青混合料(LSAM-50)柔性基层路面的动态黏弹力学响应,对LSAM-50进行动态模量试验,分析了温度对LSAM-50黏弹参数的影响,构建了基于广义对数Sigmoidal模型的黏弹参数主曲线以及基于广义Maxwell模型的黏弹性本构关系。结果表明:温度对LSAM-50黏弹参数的影响显著,温度升高后LSAM-50模量的变化由集料嵌挤力主导,动态模量与存储模量随着温度的升高逐渐降低后趋于稳定;由于LSAM-50具有更大的粒径和集料嵌挤力,其高温抗变形能力比AC-20和AC-13更强;可用广义Maxwell模型构建LSAM-50的黏弹本构关系,其相关性不低于0.99。

关键词:超大粒径沥青混合料;动态模量;主曲线;线黏弹性

中图分类号:U416

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.04.006

Viscoelastic Properties and Temperature Effects of Super Large Particle Size Asphalt Mixture

JIANG Yingjun^{1,2,*}, YI Yong^{1,2}, TIAN Tian^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, FAN Jiangtao^{1,2}

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To accurately characterize the dynamic viscoelastic mechanical response of super large particle size asphalt mixture(LSAM-50) flexible subgrade pavement, LSAM-50 dynamic modulus test was conducted to analyze the effect of temperature on LSAM-50 viscoelastic parameters. The master curve of viscoelastic parameters was constructed based on the generalized logarithmic Sigmoidal model. The LSAM-50 viscoelastic principal structure based on the generalized Maxwell model was constructed. The results show that temperature has a significant effect on the viscoelastic parameters of LSAM-50, and the aggregate embedding force dominates the change of LSAM-50's modulus when the temperature increases. The dynamic modulus and storage modulus decrease gradually with the increase of temperature and then stabilize. As LSAM-50 has larger particle size and aggregate embedding force, LSAM-50 has stronger resistance to deformation at high temperature compared with AC-20 and AC-13. The generalized Maxwell model can be used to construct LSAM-50 viscoelastic relationship with correlation not lower than 0.99.

Key words: super large particle size asphalt mixture; dynamic modulus; master curve; linear viscoelasticity

长寿命沥青路面已经成为道路工程领域重要的研究课题^[1],但是其半刚性基层开裂问题无法避免^[2],开发全厚式沥青路面或许是实现长寿命沥青路面的有效途径。课题组前期开发的超大粒径沥青混合料

收稿日期:2023-05-06; 修订日期:2023-06-24

基金项目:交通运输行业重点科技项目(2021-MS1-011);陕西省创新能力支撑计划(2022TD-06);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102213401);陕西省交通科技项目(重大一类)(20-02K);山东省交通科技项目(2021B82)

第一作者(通讯作者):蒋应军(1975—),男,浙江兰溪人,长安大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jyj@chd.edu.cn

(LSAM-50)具有强度、抗车辙、经济性等方面的优势,或可作为柔性基层沥青路面材料^[3]。沥青混合料是典型的温度敏感性材料^[4-5],精准表征不同温度路面的力学行为是评价其路面服役性能的前提^[6]。

路面设计中考虑动态模量作为材料参数,体积参数、级配、加载频率、温度等因素对动态模量的影响得到了较多关注^[7-10]。部分学者构造动态模量主曲线来描述频域内沥青混合料的力学性质^[11-14]。也有部分学者基于沥青混合料的动态模量构建了黏弹性本构模型,以期为后续力学计算提供材料参数确定的依据^[15-17]。研究表明,基于动态模量构建的黏弹特性主曲线或黏弹性本构模型对沥青路面的线弹性力学响应具有较好的应用价值^[18]。

上述研究成果对明确沥青混合料的黏弹特性、提升路面力学计算的准确性具有重要的指导意义,但缺乏对较大粒径沥青混合料黏弹特性的

研究。为精准表征 LSAM-50 柔性基层沥青路面的力学响应,明确 LSAM-50 的黏弹特性是必要的前提。本文以 LSAM-50 为研究对象,以不同温度与频率下 LSAM-50 的动态模量为依据,构建 LSAM-50 的黏弹参数主曲线,建立 LSAM-50 的黏弹性本构关系。

1 试验

1.1 原材料

LSAM-50、AC-20 和 AC-13 的矿料级配见表 1。选取 70# 道路石油沥青、石灰岩碎石和石灰岩矿粉,按 JTGE20—2011《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》测试的沥青技术指标见表 2。LSAM-50、AC-20 和 AC-13 的最佳油石比(质量比)分别是 2.8%、4.2% 和 4.8%,其毛体积密度分别为 2.556、2.488 和 2.492 g/cm³。

表 1 沥青混合料的矿料级配
Table 1 Mineral grading of asphalt mixtures

Sieve size/mm	53	37.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
LSAM-50	100.0	70.0	60.0	42.0	34.0	26.0	18.0	14.0	10.0	7.5	4.5
AC-20	100.0	100.0	95.0	50.0	33.0	23.0	16.0	12.0	9.0	7.0	5.0
AC-13	100.0	100.0	100.0	73.5	45.0	35.0	23.0	15.5	11.0	8.0	6.0

表 2 沥青的技术指标
Table 2 Technical indexes of asphalt

Index	Measured value
Density/(g·cm ⁻³)	1.015
Penetration/(0.1 mm)	67
Ductility/cm	>100
Softening point/°C	48.1
Mass loss/%	0.03
After TFOT Ductility/cm	7
Penetration ratio/%	63

1.2 动态模量试验方法

动态模量试验参照 JTGE20—2011 执行,试验温度(T)由 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 向 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 逐级递增(-15 、 -10 、 -5 、 0 、 5 、 15 、 20 、 30 、 45 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$),加载频率(f)由 25.0 Hz 逐级递减至 0.1 Hz (25.0 、 20.0 、 10.0 、 5.0 、 1.0 、 0.5 、 0.1 Hz),结果取 4 次平行试验的平均值。动态模量(E^*)和相位角(δ)分别按式(1)、(2)计算。

$$E^* = \sigma_{\text{amp}} / \epsilon_{\text{amp}} \quad (1)$$

$$\delta = 360 t_s / t_p \quad (2)$$

式中: σ_{amp} 与 ϵ_{amp} 分别为应力和应变幅值; t_s 为应变滞后时间; t_p 为应力加载作用时间。

除 E^* 和 δ 外,存储模量(E')和损失模量(E'')也被广泛关注:

$$E' = E \cos \delta \quad (3)$$

$$E'' = E \sin \delta \quad (4)$$

2 LSAM-50 动态模量的温度依赖性

LSAM-50 动态模量的温度依赖性见图 1。由图 1 可见:

(1) LSAM-50 的 E^* 值随温度的变化呈现出显著的非线性变化特征。 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 E^* 值仅为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 8%,随着温度的升高(或频率的降低),沥青混合料变软,接近黏性,导致 E^* 值降低, δ 值增大。高温状态(或低频状态)下,沥青对混合料的影响变弱,此时主导沥青混合料模量变化的是集料的嵌挤力,继续增大温度(或缩减频率)会导致 δ 值的减小, E^* 值也会降低,但趋于稳定。

(2) E' 值随温度的变化与 E^* 值呈现类似的 S 型规律,在线黏弹性范围内的低温(或高频)状态下,LSAM-50 存储的能量较多,此时混合料的弹性性能突出;在高温(或低频)状态下,混合料存储的能量较少,弹性性能不显著。 E'' 值与 δ 值的变化规律类似,随着温度的升高(或频率的降低),沥青混合料的 E'' 值呈先增大后减小的变化趋势,随着温度的增加,LSAM-50 损耗的能量(或阻尼)也表

现出先增加后减小的趋势.分析原因,可能是因为温度变化(或频率变化)致使沥青混合料的性态转化导致的.在低温(或高频率)状态下,LSAM-50 趋向于玻璃态固体性态,此时混合料的性能受沥青的影响更大,具有更大的 E' 值, E''

值较小;在高温(或低频率)状态下,LSAM-50 逐渐趋于橡胶态,集料嵌挤力在混合料中展示出更大的影响, E' 和 E'' 值都趋于一个极小值,此时 LSAM-50 损耗的能量较多,黏性性能及阻尼作用比较显著.

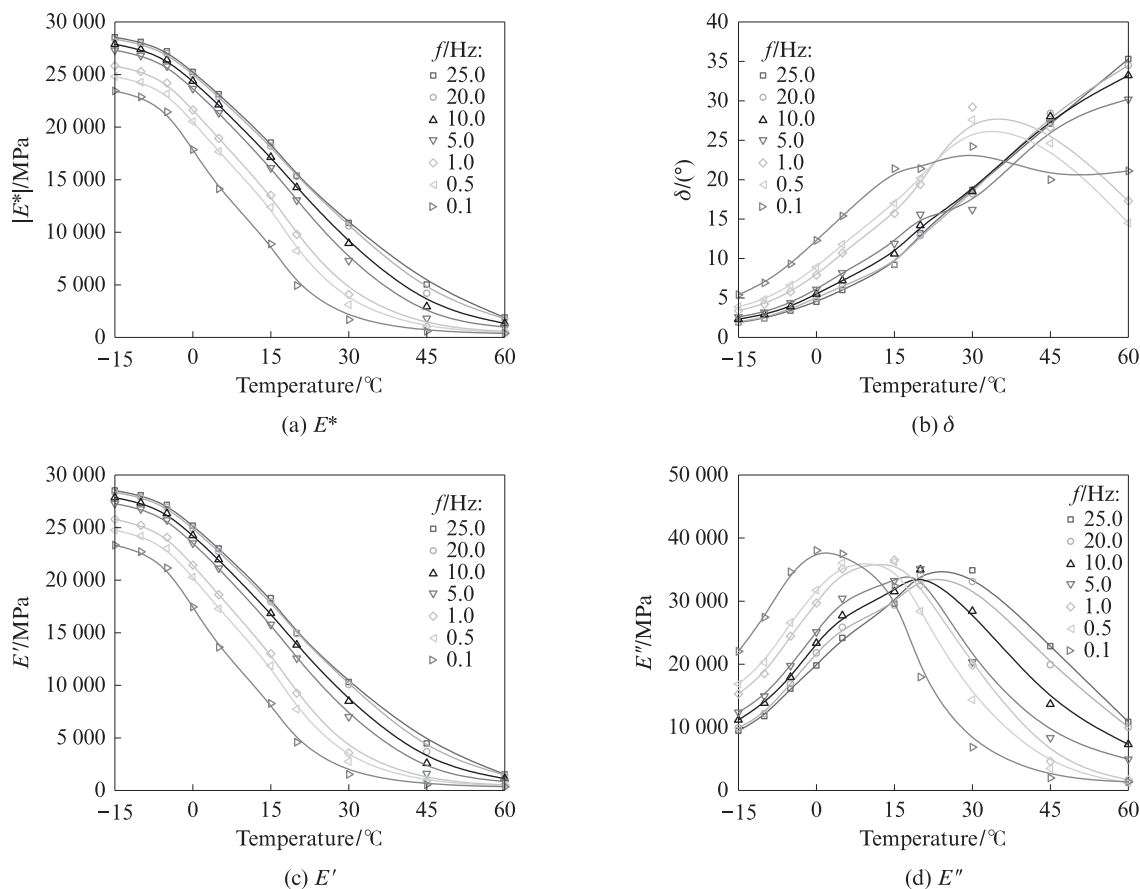


图1 LSAM-50 动态模量的温度依赖性

Fig. 1 Temperature dependence of dynamic modulus of LSAM-50

3 LSAM-50 动态黏弹性模型与验证

3.1 动态黏弹性的主曲线表征

为得到 LSAM-50 在更宽温度区域与更广频域内的动态力学特性,基于时-温等效原理,通过动态黏弹性参数(E^* 、 δ 、 E' 、 E'')主曲线表征黏弹性材料在不同温度与加载频率下的力学特性,但应满足以下 2 个要求:(1)黏弹性参数主曲线模型需满足 Kramers-Kronig (K-K) 关系;(2)黏弹性参数共用一套移位因子.

分析 E^* 值随温度(频率)变化的规律可知,温度较高(或低频率)时 E^* 值降低且趋近于最小值 E^*_{\min} , 温度较低(或高频率)时 E^* 值增大且趋近于最大值 E^*_{\max} , 广义对数 Sigmoidal 模型能够较好地描述 E^* 的变化特性(见式(5)).其中 $\lg |E^*|_{\max}$ 可通过 Hirsh 模型来进行计算,位移因子通过 Arrhenius 公式计算.

$$\lg |E^*(f)| = \lg |E^*|_{\min} + \frac{\lg |E^*|_{\max} - \lg |E^*|_{\min}}{(1 + \lambda e^{\beta + \gamma \lg f})^{\frac{1}{\lambda}}} \quad (5)$$

式中: $\lg |E^*|_{\min}$ 为温度较高(或频率趋近于 0 Hz)时的动态模量对数值,又称对数静态模量; $\lg |E^*|_{\max}$ 为温度较低(或频率趋近于 ∞)时动态模量对数值,又称对数玻璃态模量; β 、 γ 、 λ 为曲线形态拟合参数; f 为缩减频率, Hz.

根据近似 K-K 关系推导的相位角主曲线模型见式(6).

$$\delta(f) = -\frac{\pi}{2} k \frac{(\lg |E^*|_{\max} - \lg |E^*|_{\min}) \gamma e^{\beta + \gamma \lg f}}{(1 + \lambda e^{\beta + \gamma \lg f})^{1 + \frac{1}{\lambda}}} \quad (6)$$

根据广义对数 Sigmoidal 模型构建存储模量与损失模量主曲线,且存储模量与损失模量服从近似 K-K 关系:

$$\lg E'(f) = \lg E'_{\min} + \frac{\lg E'_{\max} - \lg E'_{\min}}{(1 + \lambda e^{\beta + \gamma \lg f_r})^{\frac{1}{\lambda}}} \quad (7)$$

$$E''(f) = -\frac{\pi}{2} k \frac{(\lg E'_{\max} - \lg E'_{\min}) \gamma e^{\beta + \gamma \lg f_r}}{(1 + \lambda e^{\beta + \gamma \lg f_r})^{1 + \frac{1}{\lambda}}} \quad (8)$$

式中: $\lg E'_{\min}$ 、 $\lg E'_{\max}$ 分别为频率趋近于 0 Hz 和 ∞ 时的存储模量对数值。

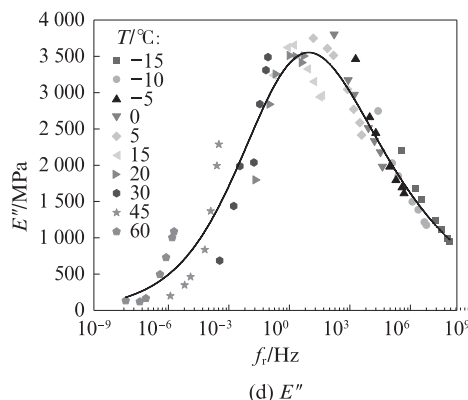
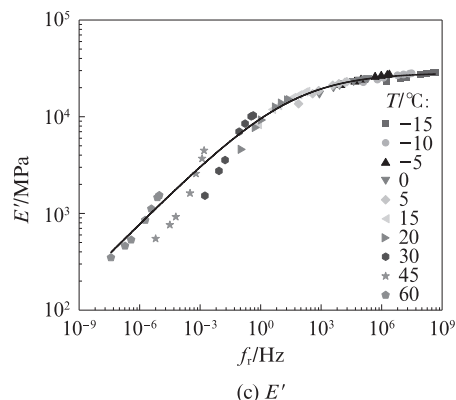
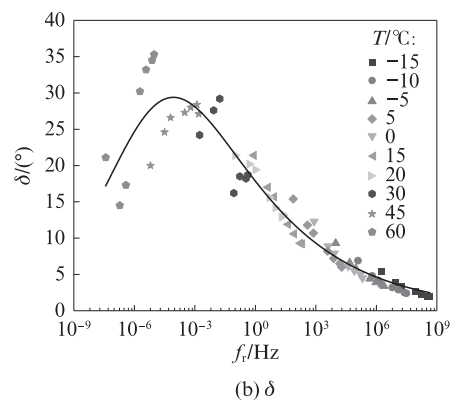
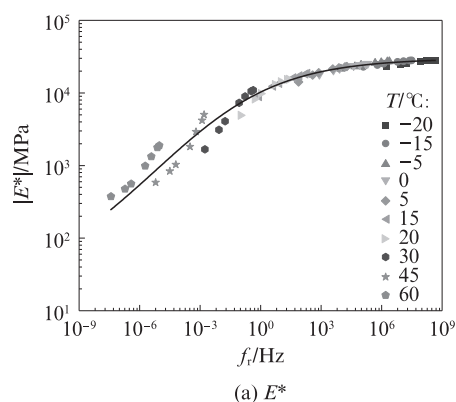


图2 LSAM-50的黏弹参数主曲线

Fig. 2 Master curves of viscoelastic parameters of LSAM-50

3.2 不同类型沥青混合料的主曲线

基于广义对数 Sigmoidal 模型构建了 3 种沥青混合料的动态模量主曲线, 如图 3 所示。由图 3 可见: 在缩减频率下, LSAM-50 在低频区具有明显的优势, 其 E^* 值远大于 AC-20 和 AC-13; 高频区 3 种沥青混合料的 E^* 值大致相当; 在高温或低频时, LSAM-50 具有较强的抵抗变形的能力, 这可能是因为高温状态下沥青呈流动状态, 主导沥青混合料模量变化的是集料的嵌挤力, LSAM-50 相比另外 2 种沥青混合料具有更强的嵌挤力。

课题组前期进行了 3 种沥青混合料的车辙试验, LSAM-50、AC-20 与 AC-13 在标准试验条件下 (60 °C、0.7 MPa) 的动稳定度分别为 14 360、2 515、1 938 次/mm, 验证了 LSAM-50 在高温状态下的抵抗变形能力。

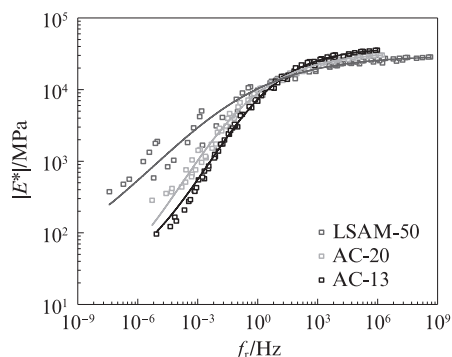


图3 3种沥青混合料的动态模量主曲线

Fig. 3 Master curves of dynamic modulus of three kinds of asphalt mixtures

4 LSAM-50 的广义 Maxwell 黏弹性本构关系

建立应力-应变关系模型是精准表征沥青混合

料黏弹性的前提,松弛模量是评价沥青混合料应力松弛的重要指标,研究人员基于 E' 与 E'' 主曲线,采用Prony级数同步拟合 E' 与 E'' 主曲线,随之确定离散松弛谱并构建松弛模量主曲线.广义Maxwell模型(n 个Maxwell元件与1个独立弹簧并联组成)在频域内的存储模量($E'(\omega)$)与损失模量($E''(\omega)$)与加载圆频率(ω)的数学表达式分别见式(9)、(10).基于广义Maxwell模型的动态模量预测值与实测值见图4.由图4可知,广义Maxwell模型预测 E^* 的相关系数 R^2 为0.995.

$$E'(\omega) = E_e + \sum_{i=1}^n E_i \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (9)$$

$$E''(\omega) = \sum_{i=1}^n E_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \quad (10)$$

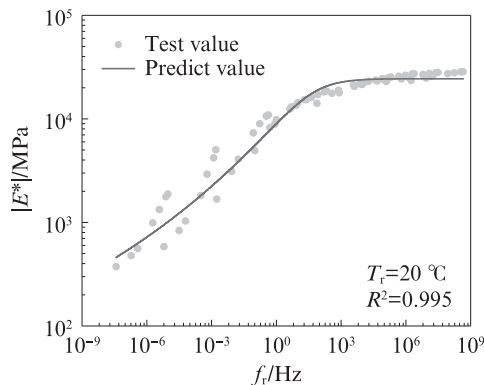


图4 基于广义Maxwell模型动态模量的预测值与实测值
Fig. 4 Predicted and measured values of dynamic modulus based on generalized Maxwell model

5 结论

(1)温度对超大粒径沥青混合料(LSAM-50)的动态黏弹参数有显著的影响,随着温度的升高,动态模量与存储模量呈S型曲线降低,相位角与损失模量呈开口向下抛物线变化.在高温(低频)下,集料嵌挤力主导LSAM-50模量的变化;在低温(高频)下,由于LSAM-50存储的能量较多,弹性性能突出.

(2)基于广义对数Sigmoidal模型和Kramers-Kronig关系可以得到LSAM-50黏弹参数主曲线,主曲线预测值与实测值的相关性大于0.93.

(3)相比AC-20和AC-13,LSAM-50在低温(高频)下的黏弹特性接近,而高温(低频)下具有更强的抵抗变形能力,LSAM-50应用在沥青路面中具有更好的抵抗车辙变形能力.

(4)基于广义Maxwell模型构建了LSAM-50的应力-应变本构关系,包括松弛时间谱及Prony级数

表达式,可以为后续计算LSAM-50路面的力学响应提供材料参数理论依据.广义Maxwell模型预测动态模量与实测动态模量的相关性大于0.99.

参考文献:

- [1] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219-3227.
ZHENG Jianlong, LÜ Songtao, LIU Chaochao. Technical system, key scientific problems and technical frontier of long-life pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65 (30) : 3219-3227. (in Chinese)
- [2] 陈渊召,李振霞.沥青路面半刚性基层温度效应监测研究[J].建筑材料学报,2016,19(2):325-329.
CHEN Yuanzhao, LI Zhenxia. Monitoring research on temperature effect of semi-rigid base for asphalt pavement [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):325-329. (in Chinese)
- [3] 邓长清.面向长寿命路面理念超大粒径LSAM-50柔性基层混合料关键技术研究[D].西安:长安大学,2021.
DENG Changqing. Research on key technology of LSAM-50 flexible base mixture based on long-life pavement concept [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [4] 温永,王祯国,董永康,等. Terminal Blend 橡胶泡沫沥青制备及性能评价[J].建筑材料学报,2023,26(10):1129-1136.
WEN Yong, WANG Zhenguo, DONG Yongkang, et al. Preparation and performance study of foamed terminal blend rubberized asphalt binders [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1129-1136. (in Chinese)
- [5] 朱运鼎,银花.基于灰色模型的沥青混合料低温指标预测[J].建筑材料学报,2023,26(10):1104-1110.
ZHU Yunding, YIN Hua. Prediction of low temperature index of asphalt mixture based on grey model [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1104-1110. (in Chinese)
- [6] 周兴业,王旭东,关伟,等.宽温度域内沥青路面结构响应规律分析[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(9):63-69.
ZHOU Xingye, WANG Xudong, GUAN Wei, et al. Analysis on response behavior of asphalt pavement structure in wide temperature range [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9):63-69. (in Chinese)
- [7] 周志刚,周扬,刘智仁.透水沥青混合料动态模量影响因素分析[J].材料导报,2022,36(13):121-127.
ZHOU Zhigang, ZHOU Yang, LIU Zhiren. Analysis of influencing factors on dynamic modulus of porous asphalt [J]. Materials Reports, 2022, 36(13):121-127. (in Chinese)
- [8] 吕松涛,张乃天,吴政达,等.三维应力状态下沥青混合料动态模量归一化[J].中国公路学报,2023,36(4):27-37.
LÜ Songtao, ZHANG Naitian, WU Zhengda, et al. Normalization of dynamic modulus of asphalt mixture under three-dimensional stress state [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(4):27-37. (in Chinese)
- [9] 索智,谭祎天,张亚,等.骨架密实型沥青稳定碎石混合料动态