

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.05.005

沥青砂浆的动态模量及其主曲线研究

常明丰¹, 张冬冬², 刘勇², 盛燕萍¹

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘要: 为了研究不同沥青用量、温度条件下沥青砂浆动态模量的变化, 并为了获得更宽频率域和温度域的动态模量, 采用静压方法成型 AC-13 沥青混合料去除粗集料级配的沥青砂浆试件, 进行简单性能试验, 测定沥青砂浆不同沥青用量和不同温度的动态模量, 并利用时温等效原理计算沥青砂浆动态模量主曲线方程。结果表明: 相同沥青用量和温度下, 沥青砂浆的动态模量随加载频率的增大而增大, 随着沥青用量的增加, 沥青砂浆的动态模量减小, 相同频率、不同油石比的动态模量最小相差 1.28%, 最大相差 23.90%; 随着温度的升高, 沥青砂浆的动态模量减小, 5, 10 °C 时动态模量的差异较小, 20 °C 时动态模量下降较多; 从沥青砂浆动态模量主曲线可获得更宽频率域和温度域的动态模量值。

关键词: 道路工程; 沥青砂浆; 简单性能试验; 动态模量; 主曲线

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2016) 05-0028-05

Study on Dynamic Modulus of Asphalt Mortar and Its Master Curve

CHANG Ming-feng¹, ZHANG Dong-dong², LIU Yong², SHENG Yan-ping¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710061, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710068, China)

Abstract: In order to study the changes of dynamic modulus of asphalt mortar with different asphalt contents at different temperatures, and to obtain the dynamic moduli with wider frequency ranges and temperature ranges, the asphalt mortar specimens of AC-13 asphalt mixture which removed coarse aggregates are prepared by a static pressing method. The dynamic moduli of asphalt mortar with different asphalt contents at different temperatures are measured by simple performance test, and the master curve equation of dynamic modulus of asphalt mortar is calculated by the time-temperature equivalence principle. The result shows that (1) under the condition of the same asphalt content and temperature, the dynamic modulus of asphalt mortar increases with the increase of loading frequency, the dynamic modulus of asphalt mortar decreases with the increase of asphalt content, the minimum difference of dynamic moduli with different asphalt-aggregate ratios under the same frequency is 1.28%, and the maximum difference is 23.90%; (2) the dynamic modulus of asphalt mortar decreases as the temperature rises, and the difference of dynamic moduli is smaller at 5 °C and 10 °C, but the dynamic modulus declines greatly at 20 °C; (3) the dynamic moduli with wider frequency and temperature ranges can be obtained from the master curve of dynamic modulus of asphalt mortar.

Key words: road engineering; asphalt mortar; simple performance test (SPT); dynamic modulus; master curve

收稿日期: 2015-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51408047, 51208047); 中国博士后科学基金项目 (2014M550476)

作者简介: 常明丰 (1982-), 男, 江苏铜山人, 博士. (mfchang99@126.com)

0 引言

对于沥青混合料,温度和频率对沥青混合料力学性能的影响较大,其黏弹性性质表现出高温低频与低温高频条件下的等效关系。由于车辆行驶速度的差异较大及沥青路面使用区域的广泛性,对应较宽的频率域和温度域,通常可使用的温度范围为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。然而,在试验过程中,无法保证试验在较高或较低的频率和温度下进行。因此,为了利用有限可行的试验频率和温度得到全频域、全温域的结果,借助时温等效原理可得相应的主曲线,根据主曲线可推算较宽频域范围内的力学指标,从而得知沥青砂浆及相应沥青混合料的黏弹性性质。

在沥青混合料动态模量主曲线分析方面,Witczak 通过对 200 多组沥青混合料进行了 2 800 组动态模量测试后给出了 Witczak 预测模型,目前该模型的应用最为广泛^[2-3]。在国内,为了获得更宽频率域和温度域的动态模量,许多学者利用 Witczak 模型对不同种类的沥青混合料动态模量主曲线进行了预测回归分析^[4-9],以及分析了添加改性剂的沥青混合料的动态模量主曲线^[10-12]。

综合分析已有文献,对于动态模量主曲线的研究集中于沥青混合料,对作为沥青混合料组成部分的细集料、矿粉与沥青形成的沥青砂浆动态模量主曲线研究尚未有报道,而沥青砂浆的黏弹性性质在很大程度上影响沥青混合料的性质,有必要研究其力学特性。因此,本文以 AC-13 沥青混合料的级配为基础,计算对应细集料的级配及沥青用量,成型沥青砂浆试件,并进行不同温度下的 SPT 动态模量试验,研究了沥青砂浆的动态模量主曲线。

1 沥青砂浆试件的制备

1.1 配合比设计

沥青砂浆所采用的级配为 AC-13 沥青混合料级配细集料部分,细集料的粒径范围为 1.18 ~ 2.36 mm, 0.6 ~ 1.18 mm, 0.3 ~ 0.6 mm, 0.15 ~ 0.3 mm, 0.075 ~ 0.15 mm, 以及粒径小于 0.075 mm 的矿粉,各筛孔的筛余百分率见表 1。

本文 AC-13 沥青混合料的集料为石灰岩、沥青为 SK-70# 基质沥青,其最佳油石比为 4.7%,沥青膜厚度为 7.68 μm ,根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004),由粗集料的比表面积、沥青相对密度和沥青膜厚度,计算沥青砂浆的油石比

为 13.53%^[13]。

表 1 沥青砂浆的级配

Tab. 1 Gradation of asphalt mortar						
筛孔尺寸/ mm	1.18 ~ 2.36	0.6 ~ 1.18	0.3 ~ 0.6	0.15 ~ 0.3	0.075 ~ 0.15	<0.075
AC-13 筛余 百分率/%	9.04	7.08	5.18	3.69	3.05	5.09
沥青砂浆的筛 余百分率/%	27.29	21.37	15.64	11.14	9.21	15.35

1.2 试件的制备

根据沥青砂浆的油石比计算集料和沥青的质量比,由实测各档集料的毛体积密度换算为各档集料的体积比,已知试件体积的情况下可得各档集料的用量。由于沥青砂浆中集料的粒径小、沥青含量高,本文采用静压成型沥青砂浆试件,成型沥青砂浆的尺寸为直径 100 mm、高度 100 mm。

2 沥青砂浆试验结果与分析

2.1 沥青用量对砂浆动态模量影响

由于沥青砂浆中沥青的含量较高,沥青对砂浆力学性能的影响较大。因此,该部分通过对不同油石比(4.2%, 4.7%, 5.2%)沥青混合料所对应的沥青砂浆进行 SPT 动态模量试验, SPT 试验仪和沥青砂浆试件见图 1、图 2,为了使试件整体达到 3 种测试温度(5, 10, 20 $^{\circ}\text{C}$),需对各试件保温 4 h,得到了沥青用量对砂浆动态模量的影响,见图 3。



图 1 SPT 试验仪

Fig. 1 SPT tester

由图 3 可知,对于 3 种油石比,随着加载频率的增加,动态模量增大。频率 10 Hz 相当于车速 60 ~ 65 km/h,加载频率的增加对应于行车速度的增大,行车荷载对路面的作用时间越短,动态模量越大,

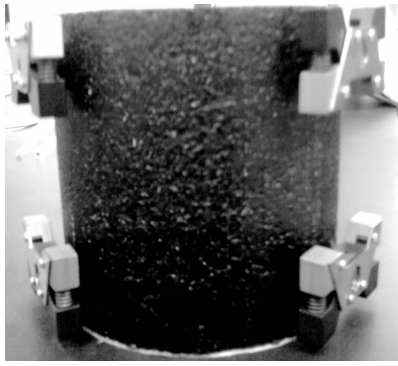


图2 沥青砂浆试件

Fig. 2 Specimen of asphalt mortar

使得沥青路面累积的永久变形越小。油石比的增大,即沥青含量的增大,相同加载频率条件下动态模量呈现减小的趋势。

5℃时,3种油石比在最小频率0.1 Hz对应的动态模量分别为2.515, 1.667, 1.242 GPa,最大频率25 Hz对应的动态模量分别为9.921, 8.639, 8.392 GPa,动态模量由低频至高频分别增加了3.94倍,5.18倍,6.76倍。10℃时,3种油石比在最小频率0.1 Hz对应的动态模量分别为1.659, 0.947, 0.480 GPa,最大频率25 Hz对应的动态模量分别为10.074, 7.465, 5.105 GPa,动态模量由低频至高频分别增加了6.07倍,7.88倍,10.64倍。20℃时,3种油石比在最小频率0.1 Hz对应的动态模量分别为0.335, 0.283, 0.227 GPa,最大频率25 Hz对应的动态模量分别为4.387, 4.443, 3.381 GPa,动态模量由低频至高频分别增加了13.12倍,15.68倍,14.90倍。

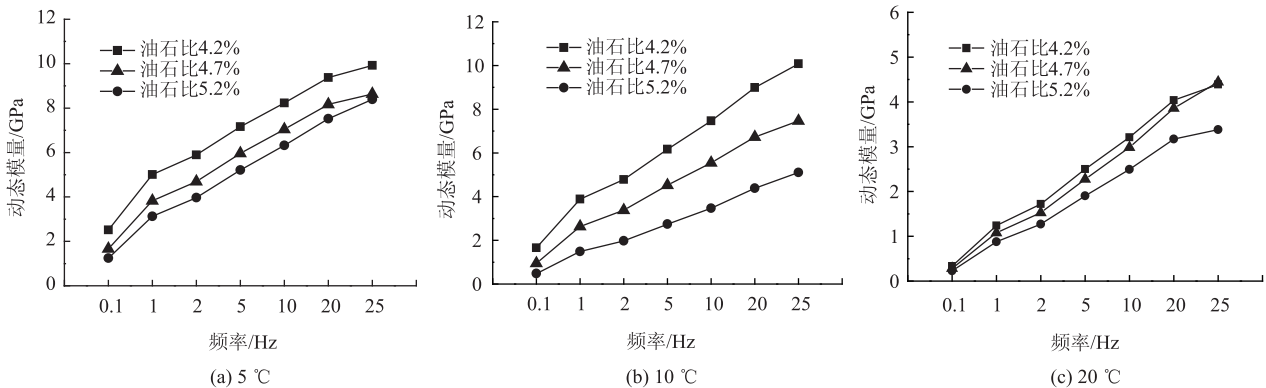


图3 动态模量

Fig. 3 Dynamic moduli

此外,温度为20℃时,对于沥青砂浆来说温度较高,3种油石比所测的动态模量大幅减小,并且3种油石比的动态模量之间的差异较小,对于动态模量,相同频率、不同油石比之间最小相差1.28%,最大仅相差23.90%,低频(对应高温)与高频(对应低温)之间的动态模量差异最大,这也说明温度对于黏弹性材料性质具有极大的影响。

2.2 温度对砂浆动态模量的影响

沥青材料的黏弹性性质对温度的敏感性较强,特别对于仅由细集料和矿粉组成的沥青砂浆,温度的影响更加显著。沥青砂浆动态模量随温度的变化曲线见图4。

由图4可以看出,随着温度的升高,同一频率下动态模量呈减小的趋势,5,10℃时动态模量的差异较小,20℃时动态模量出现较大的跳跃,与前3种温度的区别较大。

以10 Hz为例,油石比4.2%,4.7%和5.2%对

应于5℃时的动态模量分别为6.735, 6.839 GPa和6.321 GPa,对应于20℃时的动态模量分别为3.209, 2.984 GPa和2.494 GPa,由5℃升至20℃后,沥青砂浆的动态模量分别降低了59.73%,55.57%,58.16%,下降幅度较大,说明温度对沥青砂浆性能的影响较大。

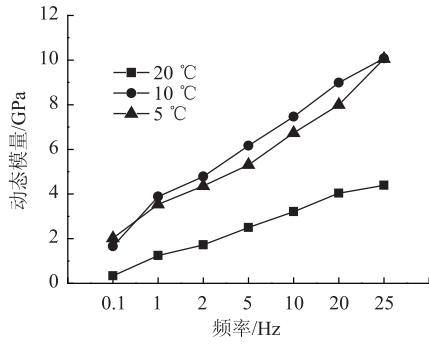
3 砂浆动态模量的主曲线确定与分析

对于沥青砂浆,试验温度为5,10℃和20℃,根据时温等效原理,以10℃作为参考温度,求5℃和20℃对应的移位因子后,通过式(1)得到两种温度不同频率对应的缩减频率。

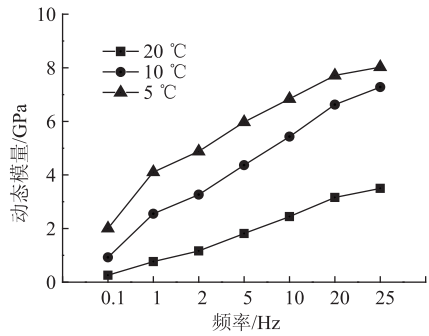
$$f_r = f\alpha_T, \quad (1)$$

式中, f_r 为缩减频率,即参考温度下的频率; α_T 为移位因子,温度 T 的函数; f 为频率。

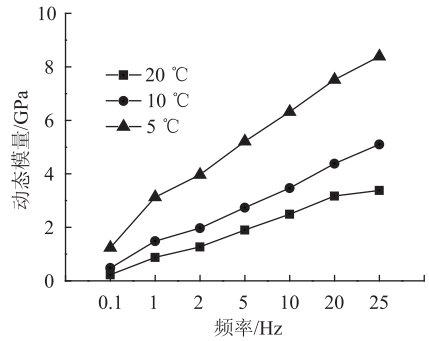
利用式(2)及不同油石比的动态模量值进行



(a) 4.2% 的油石比



(b) 4.7% 的油石比



(c) 5.2% 的油石比

图4 动态模量

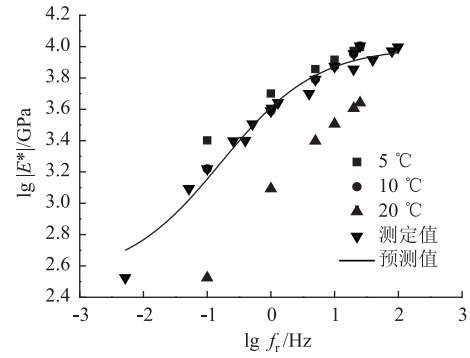
Fig.4 Dynamic moduli

Sigmoidal 函数拟合, 可得式中的各参数值, 拟合后的主曲线呈“S”形, 见图5。

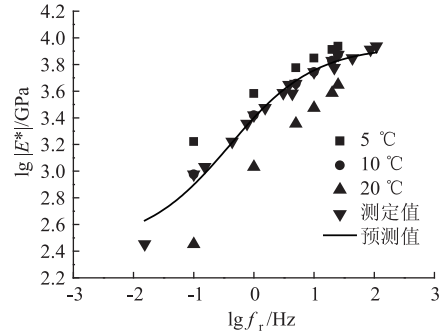
$$\lg |E^*| = \delta + \alpha / (1 + e^{\beta + \gamma \lg f_r}), \quad (2)$$

式中, $|E^*|$ 为动态模量; δ 为动态模量的最小值; $\delta + \alpha$ 为动态模量的最大值; β, γ 为 S 形函数外形的描述参数, β, γ 则取决于沥青结合料的特性和 δ 与 α 的大小; α 为变量, 是等级的函数, δ 和 α 取决于集料级配、沥青含量和空隙率。

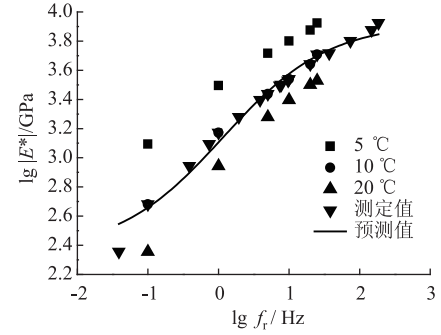
为了进一步表示温度与移位因子之间的关系, 可采用二次多项式函数进行分析, 见式 (3)。



(a) 4.2% 的油石比



(b) 4.7% 的油石比



(c) 5.2% 的油石比

图5 缩减频率与动态模量的关系

Fig.5 Relationships between reduced frequency and dynamic modulus

$$\lg \alpha_T = aT^2 + bT + c, \quad (3)$$

式中, T 为温度; a, b, c 为二次多项式的系数。

3 种油石比对应的移位因子、式 (2) 中的系数、式 (3) 中的参数具体结果见表 2。

由表 2 和图 5 可知, 利用 Sigmoidal 函数拟合的缩减频率与动态模量之间的关系曲线, 其相关系数较高, 均大于 0.97, 动态模量主曲线反映了加载频率与黏弹性材料性质的关系, 并可从全频域范围预测动态模量值, 由于相关系数较大, 预测值和实测值之间的差异处于可接受的范围内。

表 2 沥青砂浆动态模量主曲线参数

Tab. 2 Master curve parameters of dynamic modulus of asphalt mortar

参 数	油石比/%		
	4.2	4.7	5.2
δ	2.524 40	2.452 40	2.355 83
α	1.472 16	1.484 06	1.568 03
β	-1.037 30	-0.567 78	0.086 56
γ	-1.327 87	-1.413 65	-1.340 18
R^2	0.971 24	0.977 71	0.977 82
a	-0.000 61	0.003 08	-0.008 84
b	-0.110 54	-0.173 89	-0.306 52
c	1.166 15	1.430 45	2.180 77
移位因子 $\lg a_T$	5 °C	0.598 25	0.638 12
	10 °C	0	0
	20 °C	-1.287 56	-0.813 61

综上所述,利用时温等效原理,可以把三维空间内的材料特性,即黏弹性材料指标与温度、频率的三维关系映射到二维空间内,由得到的主曲线将一定时间、温度范围内的试验结果外延到更加广泛的时温范围内。

4 结 论

(1) 利用 SPT 试验测定了由 AC-13 沥青混合料去除粗集料成型的不同沥青含量,沥青砂浆在 3 种温度与 7 种频率下的动态模量;

(2) 相同沥青用量和温度下,沥青砂浆的动态模量随加载频率的增大而增大,随着沥青用量的增加或温度的升高,沥青砂浆的动态模量减小;

(3) 根据时温等效原理,通过 3 种温度、7 种频率下的动态模量数据在计算移位因子的基础上确定了沥青砂浆的动态模量主曲线,从而为沥青砂浆提供更宽频率域和温度域的动态模量参数。

参考文献:

References:

- [1] 张肖宁. 沥青与沥青含量的黏弹力学原理及应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
ZHANG Xiao-ning. Viscoelastic Mechanics Principle and Application of Asphalt and Asphalt Mixtures [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [2] WITCZAK M W, PELLINEN T K, EL-BASYOUNY M M. Pursuit of the Simple Performance Test for Asphalt

Concrete Fracture Cracking [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, 71: 767-778.

- [3] WITCZAK M W, KALOUSH K, PELLINEN T, et al. Simple Performance Test for Superpave Mix Design [C] // Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2002: 765-783.
- [4] 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 (8): 163-167.
ZHAO Yan-qing, WU Jian, WEN Jian. Determination and Analysis of Dynamic Modulus of Asphalt Mixture and Its Master Curve [J]. Highway, 2006 (8): 163-167.
- [5] 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.
- [6] 韦金城, 王林, 马士杰. 多孔隙大碎石沥青混合料动态模量试验研究 [J]. 石油沥青, 2008, 22 (1): 15-19.
WEI Jin-cheng, WANG Lin, MA Shi-jie. Research on Large Stone Permeable Asphalt Concrete Dynamic Modulus [J]. Petroleum Asphalt, 2008, 22 (1): 15-19.
- [7] 韦金城, 崔世萍, 胡家波. 沥青混合料动态模量试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2008, 11 (6): 657-661.
WEI Jin-cheng, CUI Shi-ping, HU Jia-bo. Research on Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11 (6): 657-661.
- [8] 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.
- [9] 李瑞霞, 郝培文. 布敦岩沥青混合料动态模量及主曲线研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (10): 42-45.
LI Rui-xia, HAO Pei-wen. Research on Dynamic Modulus Test and Master Curve of BRA Modified Asphalt Mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33 (10): 42-45.

(下转第 45 页)

- LIN Xiu-xian. Design Methods of Flexible Pavement Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 1988.
- [3] 沈金安. 国外沥青路面设计方法总汇 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- SHEN Jin-an. Summary of Foreign Design Methods of Asphalt Pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [4] AASHO. The AASHO Road Test, Special Report 61F [R]. Washington, D. C.: Highway Research Board, 1962.
- [5] VESIC A S, DOMASCHUK L. Theoretical Analysis of Structural Behavior of Road Test Flexible Pavements, NCHRP Report10 [R]. Washington, D. C.: Highway Research Board, 1964.
- [6] 魏密, 杨群, 郭忠印. 安定理论在柔性路面设计中的应用 [J]. 公路交通技术, 2007 (1): 5-9.
- WEI Mi, YANG Qun, GUO Zhong-yin. Application of Shakedown Theory in Flexible Pavement Design [J]. Technology of Highway and Transport, 2007 (1): 5-9.
- [7] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent Deformation Behavior of Granular Materials [J]. Road Materials and Pavement Design, 2005, 6 (1): 31-51.
- [8] 高启聚. 土基与粒料层永久变形设计指标和控制模型研究, SDJTKYS2011—2 [R]. 济南: 山东省交通科学研究所, 2011.
- GAO Qi-ju. Research on Design Indexes and Models for Controlling Permanent Deformation of Subgrade and Unbound Aggregate Layer, SDJTKYS2011 - 2 [R]. Jinan: Shandong Provincial Traffic Science Institute, 2011.
- [9] JTGD50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S].
- JTGD50—2006, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [10] JTGE40—2007, 公路土工试验规程 [S].
- JTGE40—2007, Test Methods of Soils for Highway Engineering [S].
- [11] PEREZ I, MEDINA L, ROMANA M G. Permanent Deformation Model for A Granular Material Used in Road Pavements [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20 (9): 790-800.
- [12] AASHTO. A Manual of Practice of Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide [M]. Washington, D. C.: Highway Research Board, 2008.

(上接第32页)

- [10] 刘红, 孔永健, 曹东伟. 加入聚酯纤维对沥青混合料动态模量的影响 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (8): 25-29.
- LIU Hong, KONG Yong-jian, CAO Dong-wei. Influence of Adding Polyester Fiber on Dynamic Modulus of Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (8): 25-29.
- [11] 王昊鹏, 杨军, 施晓强, 等. 高模量沥青混合料动态模量及其主曲线研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (8): 12-17.
- WANG Hao-peng, YANG Jun, SHI Xiao-qiang, et al. Research on Dynamic Modulus and Master Curve of High Modulus Asphalt Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (8): 12-17.
- [12] 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.
- [13] 常明丰. 基于颗粒物质力学的沥青混合料细观特性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- CHANG Ming-feng. Study on Mesoscopic Characteristic of Asphalt Mixture Based on Particulate Matter Mechanics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.