

Research on Dynamic Modulus and Master Curve of Asphalt Mixture

Guoqi Xu*, Liquan Hu, Jiang Yan, Shaowen Du, Kan Jia

Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Email: *1456179017@qq.com

Received: June 25th, 2019; accepted: July 10th, 2019; published: July 17th, 2019

Abstract

Three test pieces of cylindrical asphalt mixture were formed by Superpave Gyratory Compactor, and the test pieces of dynamic modulus were obtained by the core. Dynamic modulus tests were carried out on three different types of asphalt mixtures by using the UTM-30 test system at different test temperatures and load frequencies. The relationship between the dynamic modulus of asphalt mixture and the test temperature, load frequency, asphalt type and mixture type was analyzed. The dynamic modulus master curve of the asphalt mixture was constructed by using the Sigmoidal function. The study has shown that under the same test conditions, the dynamic modulus was reduced with the increase of test temperature and the decrease of load frequency, and the dynamic modulus was increased with the decrease of temperature and the increase of load frequency. The dynamic modulus of SMA-13 asphalt mixture is better than SBS modified asphalt when using high modulus modified asphalt. The dynamic modulus of asphalt concrete is mainly related to high modulus modified asphalt binder at 20. The master curve of dynamic modulus takes a good correlation from the measured values of the dynamic modulus.

Keywords

Road Engineering, Asphalt Mixture, Dynamic Modulus, Main Curve

沥青混合料动态模量及主曲线 试验研究

徐国其*, 胡力群, 严江, 杜少文, 贾侃

长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安

Email: *1456179017@qq.com

*通讯作者。

文章引用: 徐国其, 胡力群, 严江, 杜少文, 贾侃. 沥青混合料动态模量及主曲线试验研究[J]. 土木工程, 2019, 8(5): 931-938. DOI: 10.12677/hjce.2019.85108

收稿日期：2019年6月25日；录用日期：2019年7月10日；发布日期：2019年7月17日

摘要

采用旋转压实仪成型了三种沥青混合料圆柱形试件，并钻芯取得动态模量试验试件。使用UTM-30试验系统在不同试验温度和荷载频率条件下，对三种不同类型沥青混合料进行了动态模量试验。分析了沥青混合料动态模量与试验温度、荷载频率、沥青种类及混合料类型的变化关系。利用西格摩德(Sigmoidal)函数构建了沥青混合料的动态模量主曲线。研究表明：在相同试验条件下，试验温度升高和荷载频率减小使动态模量减小，温度降低和荷载频率增大使动态模量提高。采用高模量沥青对SMA-13沥青混合料动态模量的提高能力优于SBS改性沥青。20℃试验温度下，沥青混凝土的动态模量主要与高模量改性沥青胶结料有关。动态模量主曲线与动态模量实测值有较好的相关性。

关键词

道路工程，沥青混合料，动态模量，主曲线

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

路面承受的荷载主要是行驶中的车辆对路面施加的动态荷载，并且我国大多数铺面材料为沥青混合料，其为黏弹性组合体。材料在一定加载形式及加载频率下的动态响应称为动态模量，相比于抗压回弹模量，路面结构的力学响应能较好地通过动态模量这一指标进行表征。因此沥青路面设计新规范[1]将沥青混合料的动态模量作为关键指标之一。因此，对动态模量这一设计指标的研究对沥青路面结构设计及路面性能耐久性有较高的价值。

徐志荣[2]等利用静压成型切割试件，通过无侧限抗压测试方法得到试件动态模量数据，并对比了不同成型方式试件的空隙率对动态模量产生的差别进行了分析。结果表明：静压成型更贴合动态模量测定，试验结果离散性较小。文献[3]在规定温度下用超声波直接测定沥青混合料动态模量的试验过程，并将超声透射法测得的动态模量与标准动态模量试验值进行了比较。研究表明在频率为 2, 5, 8 和 10 Hz 的情况下，超声透射计算得到的模量大于标准动态测试得到的模量。王昊鹏[4]等通过简单性能试验机得到了两种高模量改性沥青混合料的动态模量试验值，求得了动态模量主曲线，并通过主曲线预测了试验中两种高模量沥青混合料的高温稳定性及低温抗裂性。文献[5]研究了沥青混合料动态模量的拟合模型，利用 Arrhenius 公式，基于时间 - 温度等效原理，得到了沥青混合料的主曲线。李强[6]等采用不同受力方式对 3 种沥青混合料进行试验，研究沥青混合料动态模量主曲线与受力模式、围压、应变水平三个因素的关系，结果表明：沥青混合料受力状态、围压及应变水平影响其动态模量。动态模量试验值与各因素之间存在较好相关性。大量研究也在动态模量的预估模型取得丰硕的成果[7] [8] [9] [10] [11]。

结合以上研究，本文主要分析不同沥青混合料在不同试验温度和荷载频率情况下，混合料动态模量变化情况。对沥青混合料的动态模量主曲线进行研究。

2. 原材料与试验方法

2.1. 试验原料

试验采用高模量改性沥青(HMB)及成品 SBS 改性沥青，沥青相应实验检测指标均按照相应规范严格执行其各项技术指标见表 1 所示。

Table 1. Asphalt related technical indicators
表 1. 沥青相关技术指标

沥青种类	针入度/0.1 mm	延度/cm	动力粘度/(Pa.s)	软化点/℃
HMB	43.4	57.4	4.425	93.1
SBS I-C	75	32.8	2.878	70.5

试验采用的粗为优质的玄武岩集料，相应技术指标如表 2 所示。细集料为优质机制砂，技术指标见表 3。矿质填料选用亲水系数小，安定性好的石灰石矿粉，各项性质均符合要求。

Table 2. Technical specifications of coarse aggregates
表 2. 粗集料技术指标

技术指标	集料规格				技术要求
	10~20 mm	10~15 mm	5~10 mm	3~5 mm	
毛体积相对密度	2.688	2.662	2.630	2.605	/
表观相对密度	2.727	2.714	2.695	2.737	≥2.45
吸水率/%	0.530	0.718	0.955	1.786	≤3.0
针片状含量/%	8.5	10.5	8.0	/	/
与沥青的粘附等级/级	5	5	5	5	≥4

Table 3. Technical Specifications of Fine aggregate
表 3. 细集料技术指标

技术指标	表观相对密度	坚固性 > (0.3 mm 部分)	亚甲蓝值	棱角性(流动时间)
	2.740	0.4	0.8	33

2.2. 沥青混合料组成设计

试验涉及到的三种沥青混合料分别为(SMA-13 级配 + HMB)，(SMA-13 级配 + SBS 改性沥青)，(AC-20 + SBS 改性沥青)。SMA-13 级配矿料组成为 10~15 mm: 5~10 mm: 3~5 mm: 机制砂 = 37:37:6:10:10，纤维含量按石料 3‰添加。AC-20 级配矿料组成为 10~20 mm: 3~10 mm: 机制砂: 矿粉 = 38:28:28:6，最后确定三种沥青混合料油石比分别为 6.1%，7.9%及 4%。按最佳油石比成型马歇尔试件，并测定试件相应体积指标。三种沥青混合料技术指标如表 4 所示。

2.3. 试验方案

试件成型使用美国 PINE 公司 AFG1C 型旋转压实仪，旋转压实 75 次成型高度为 170 mm，直径为 150 mm 地圆柱形试件。待试件固化形成强度后钻芯取样，切割形成高度为 150 mm，直径为 100 mm 的混合料试件。

Table 4. Technical specifications of asphalt mixture
表 4. 沥青混合料技术指标

混合料种类	表观相对密度	空隙比/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/KN	流值/mm
SMA-13 + SBS 改性沥青	2.417	3.8	17.8	78.7	10.5	34.0
SMA-13 + HMB	2.338	3.6	17.9	74.1	13.4	30.5
AC-20 + HMB	2.565	4.9	17.23	65.20	12.2	27.8

试件制作完成后，在 UTM-30 多功能沥青混合料测试机上进行动态模量试验。试验中对试件施加轴向正弦压应力荷载，平均微应变范围控制在 85~115 μm 。三种沥青混合料在 5℃、20℃及 40℃温度下分别采用 0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、5 Hz、10 Hz 和 25 Hz 加载频率测定试件的动态模量及相位角，每个试验温度下进行三组平行实验。考虑到沥青混合料的黏弹性及混合料结构内温度和荷载频率对沥青混合料力学响应的影响，本文分析不同试验温度、不同荷载频率及不同混合料级配对沥青混合料动态模量和相位角的影响。

3. 试验结果分析

3.1. 不同沥青对试验结果的影响

在 20℃试验温度下，(SMA-13 级配 + HMB)及(SMA-13 级配 + SBS)沥青混合料在不同荷载频率下的动态模量和相位角变化如图 1(a)、(b)所示。

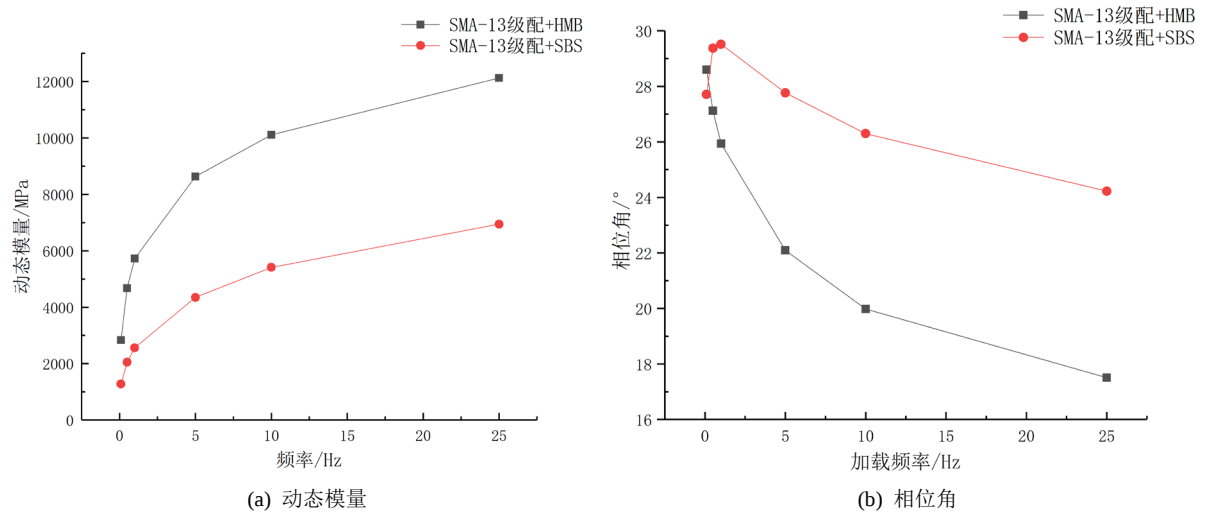


Figure 1. Comparison of dynamic modulus test results of different asphalt mixtures at 20℃
图 1. 20℃下不同沥青混合料动态模量试验结果对比

由图可知(a)中沥青混合料采用高模量沥青动态模量明显高于 SBS 改性沥青，(b)中相位角有所减小。说明了在相同温度及相同级配下，试验所用的高模量沥青混合料相比于 SBS 改性沥青混合料模量有相应提高，抗变形能力有一定程度的提升。高模量改性沥青的掺入相比于 SBS 改性沥青提高了沥青混合料的动态模量，提高了荷载作用下的不可恢复变形，延长路面服役周期。原因在于高模量改性沥青相比于 SBS 改性沥青，增强了集料与沥青的粘结能力，从而使混合料抗变形能力提高，动态模量随之增大。高模量沥青混合料有较好的应用前景。

3.2. 不同加载频率对试验结果的影响

在相同试验温度 20℃不同加载频率下，三种沥青混合料动态模量试验结果见表 5。

Table 5. Dynamic modulus test results at different loading frequencies
表 5. 不同加载频率下动态模量试验结果

加载频率	SMA-13 级配 + HMB		SMA-13 级配 + SBS		AC-20 级配 + HMB	
	动态模量相位角		动态模量相位角		动态模量	相位角
0.1 Hz	2836	28.60	1278	27.71	4420	24.50
0.5 Hz	4673	27.12	2051	29.37	6304	20.44
1 Hz	5724	25.94	2562	29.52	7085	19.80
5 Hz	8628	22.09	4349	27.77	9294	18.78
10 Hz	10109	19.98	5410	26.30	10610	15.19
25 Hz	12124	17.51	6946	24.22	12106	14.99

由表 5 中数据可知，在相同试验温度下，试件加载频率越大其动态模量值越大，荷载频率的增加，相位角逐渐减少。结合图 1(a)可知，在较低正弦荷载频率下(0.1~1 Hz 左右范围内)，动态模量增长较快。相位角曲线在较低正弦荷载频率下切线斜率较大，变化较快。这是由于沥青混合料这种黏弹性材料在较大的正弦荷载频率作用下，轴向应变滞后于应力，试件被加载后，在力的作用下试件不会被立即压缩，卸载后也不会立即回弹，所以较大正弦荷载频率作用时发生的应变较小表现为较大的模量，同时增长速度也会降低。而在较低的正弦荷载频率作用下，应变滞后应力的效果减弱，所以表现为较小的模量及较快的变化速度。

3.3. 不同混合料组成级配对试验结果的影响

为了分析不同混合料组成级配动态模量和相位角的关系，本文选取了两种普遍使用的沥青混合料：沥青玛蹄子碎石混合料(SMA-13 + HMB)及 AC 密级配沥青混合料(AC-20 + HMB)在 20℃下进行了测试。试验结果如图 2(a)、(b)所示。

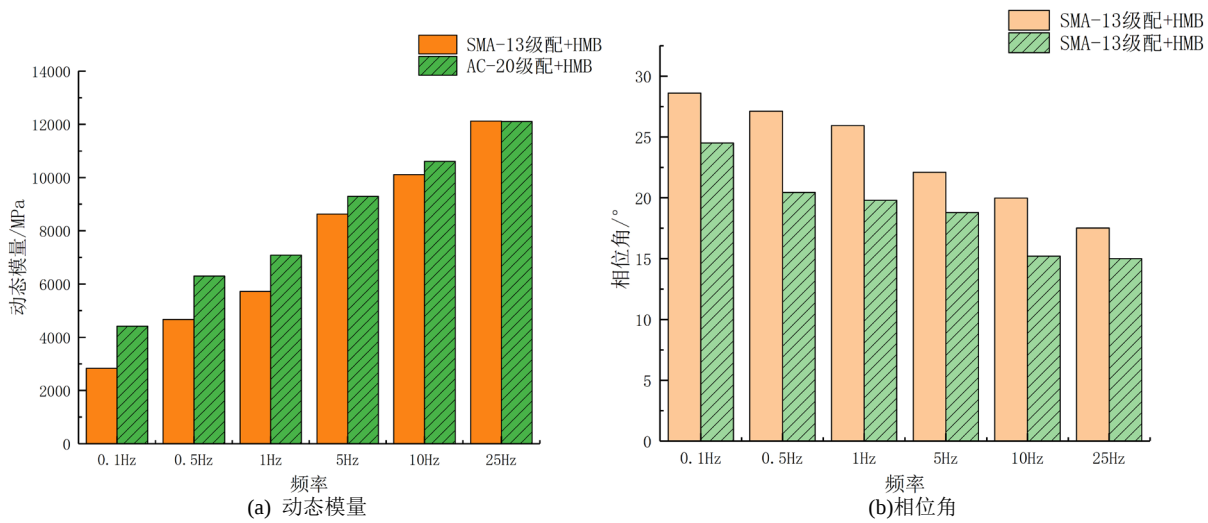


Figure 2. Comparison of dynamic modulus test results of different grades of mixed materials at 20°C
图 2. 20℃下不同级配混合料动态模量试验结果对比

由图 2(a)可知, AC 密级配沥青混合料在各荷载频率下与沥青玛蹄子碎石混合料相比, 动态模量相差不大。(b)中 AC 密级配沥青混合料相位角略低于沥青玛蹄子碎石混合料。这是由于试验温度较低与常温接近, 在此试验温度下, 沥青胶结料对沥青混凝土的劲度起关键的作用, 混合料的矿料骨架的嵌挤作用影响不大。两种混合料所用沥青均为高模量改性沥青(HMB), 沥青胶结料性能相近, AC 密级配沥青混合料中沥青胶浆所占体积百分比较大。从而结果表现为 AC 密级配沥青混合料动态模量略高于沥青玛蹄子碎石混合料。同时可以说明 AC 型级配的高模量沥青混合料具有现实使用意义, 路面结构抗变形能力较普通 AC 型级配的沥青混合料有较大的提升。

3.4. 不同温度对试验结果的影响

在 5℃和 20℃试验温度下, (SMA-13 + HMB)沥青混合料分别在的动态模量和相位角变化如图 3(a)、(b)所示。

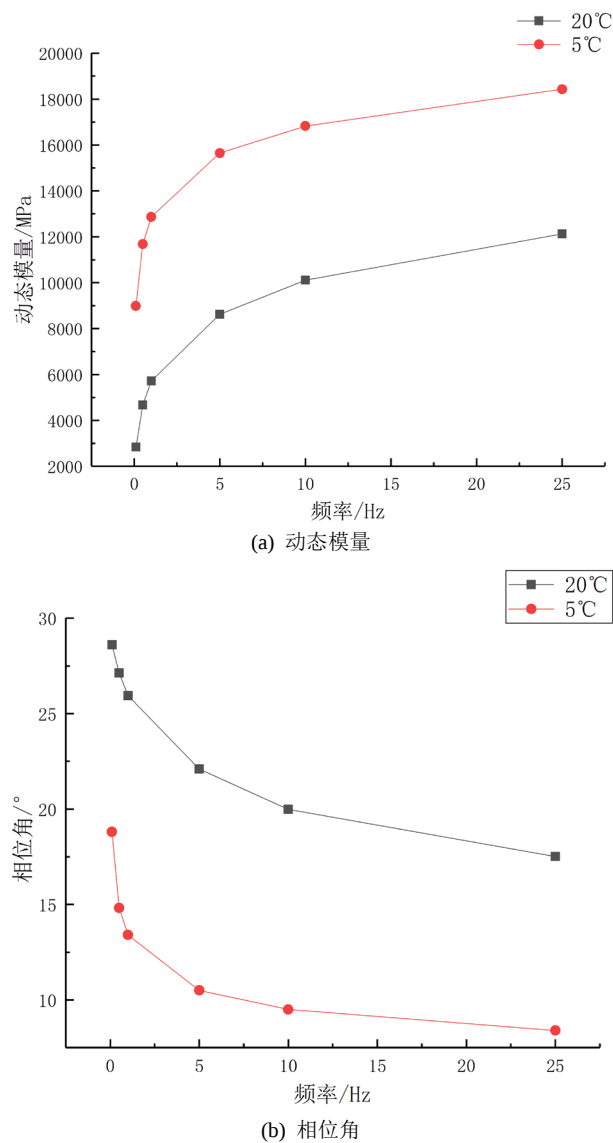


Figure 3. Comparison of dynamic modulus of asphalt mixture at different temperatures
图 3. 不同温度下沥青混合料动态模量对比

由图 3 可知, 沥青混合料的动态模量随着温度的升高而降低, 随着温度的升高相位角有所升高。在 10 Hz 的荷载频率下, (a) 中 20℃ 混合料动态模量时 5℃ 的 2 倍左右。原因是沥青混合料是一种具有粘弹性的复合材料, 随着温度升高, 沥青结合料逐渐变软, 沥青黏度下降, 黏性是此时沥青混合料主要的力学响应, 导致沥青混合料对荷载反应滞后过程减弱, 沥青混合料由弹性逐渐向塑性转化, 抗变形能力降低, 混合料动态模量降低。

4. 动态模量主曲线分析

针对组成设计相同的沥青混合料不同温度条件的动态模量, 每个温度条件下进行试验去测定动态模量, 试验量较大且过于繁琐。为了方便探究不同温度下和加载频率下的沥青混合料的动态模量, 可利用现有动态模量的试验数据, 采用时温置换原理, 通过平移形成一条在参考温度下的曲线, 该曲线称为主曲线[12] [13]。通过主曲线, 可以得到在某一温度及加载频率下的动态模量值。

本文以 5℃、20℃ 及 40℃ 下沥青玛蹄子碎石混合料(SMA-13 + HMB)在不同加载频率下的动态模量数据, 选用 20℃ 作为参考温度, 根据时间-温度置换原理, 移位因子 $\lg a(T)$ 通过不同温度动态模量试验值下非线性最小二乘法拟合得到, 最后求得西格蒙德(Sigmoidal)函数。最终确定高模量沥青玛蹄子碎石混合料动态模量主曲线。拟合函数为西格蒙德函数, 其表达式为

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

利用该函数拟合试验所得的高模量沥青玛蹄子碎石混合料动态模量数据, 依据上述方法求得 $\lg a(T)$, $\lg \omega_r$ 缩减频率根据公式 $\lg \omega_r = \lg \omega + \lg a(T)$ 得到。最后得到参考温度下高模量沥青玛蹄子碎石混合料的动态模量主曲线方程为

$$\lg |E^*| = 2.4890 + \frac{3.6025}{1 + e^{0.5870 - 0.6505(\lg \omega_r)}}$$

参考温度下高模量沥青玛蹄子碎石混合料的动态模量主曲线如图 4 所示。

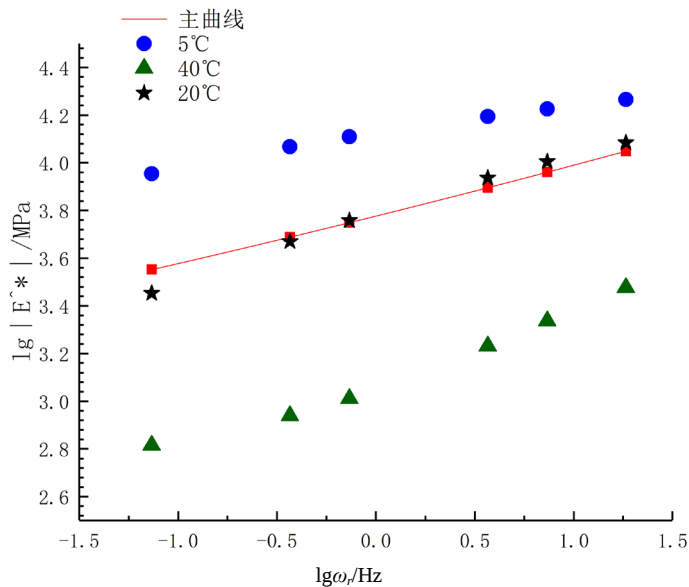


Figure 4. Dynamic modulus master curve of asphalt mixture

图 4. 沥青混合料动态模量主曲线

由图 4 中动态模量主曲线与动态模量实测值对比可知, 两者相关性较好。表明利用主曲线来预测不同温度和加载频率下沥青混合料动态模量值较为方便, 试验数据更加合理精确。可精确快速得到在大范围内的试验温度和加载频率下的混合料动态模量。

5. 结论

- 1) 在相同的荷载频率下, 动态模量随着温度的升高而降低, 相位角随着温度升高而增大。在相同的试验温度下, 相位角随着荷载频率的增大而升高, 相位角随着荷载频率增大而降低。
- 2) 高模量改性沥青对沥青混合料动态模量的提升优于 SBS 改性沥青。在温度及荷载频率相同情况下, (SMA-13 + HMB) 沥青混合料动态模量明显高于 (SMA-13 + SBS 改性沥青) 沥青混合料。
- 3) 常温条件下, 高模量改性沥青胶结料对沥青混凝土的动态模量起关键的作用。在 20℃ 荷载频率相同情况下, (AC-20 + HMB) 沥青混合料动态模量 (SMA-13 + HMB) 沥青混合料相差很小, 源于其沥青结合料相同。
- 4) 高模量沥青混合料的动态模量主曲线与动态模量实测值有较好的相关性, 可由主曲线预测不同试验温度和加载频率下的混合料动态模量。

参考文献

- [1] 交通运输部公路科学研究院. JTGD50-2017 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [2] 徐志荣, 常艳婷, 陈忠达, 孙建, 刘芸. 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.
- [3] Norambuena-Contreras, J., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, A., et al. (2010) Dynamic Modulus of Asphalt Mixture by Ultrasonic Direct Test. *NDT & E International*, 43, 629-634. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.06.007>
- [4] 王昊鹏, 杨军, 施晓强, 周文章. 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.
- [5] Wang, T., Lin, J.T., Pang, L., et al. (2013) Study on the Viscoelastic Performance of Asphalt Mixture Based on Dynamic Modulus. *Advanced Materials Research*, 753-755, 728-733. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.728>
- [6] 李强, 李国芬, 王宏畅. 受力模式对沥青混合料动态模量的影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 816-822.
- [7] 刘彬, 罗蓉, 陈辉, 冯光乐. 基于级配设计的沥青混合料动态模量预测模型研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(3): 467-471.
- [8] 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.
- [9] 杨小龙, 申爱琴, 郭寅川, 赵学颖, 吕政桦. 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.
- [10] 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(3): 35-39+52.
- [11] 万成, 张肖宁, 贺玲凤, 王绍怀, 段跃华. 沥青混合料动态模量数值预测方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 16-21+28.
- [12] Witczak, M.W. and Bari, J. (2004) Development of a Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures. Arizona State University, Arizona.
- [13] 姚连军, 李丽. 基于抗压回弹模量和动态模量的沥青路面设计参数研究[J]. 公路交通技术, 2014(2): 20-23.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/> 顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org