

Experimental Study on the Influence of Temperature and Loading Frequency on Dynamic Modulus of Asphalt Mixture

Ming Luo¹, Chao Chen², Tiantian Li³

¹Jiangxi Anyuan Luqiao Group Co., Ltd., Pingxiang Jiangxi

²Pingxiang Economic Development Zone Agricultural Water Conservancy Station, Pingxiang Jiangxi

³Institute of Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan
Email: 284922619@qq.com

Received: Aug. 28th, 2019; accepted: Sep. 10th, 2019; published: Sep. 17th, 2019

Abstract

In order to study the effect of loading time and temperature on dynamic modulus of pyrolysis carbon black modified asphalt for waste tyres mixture, this paper adopts commonly used AC-20 to prepare three kinds of asphalt mixture such as pyrolysis carbon black modified asphalt for waste tyres, SBS modified asphalt mixture and asphalt 70 matrix. The dynamic modulus test was carried out by using the single axis compression dynamic modulus test method of asphalt mixture, and the effects of test temperature and loading frequency on the dynamic modulus of three kinds of asphalt mixture were obtained. The measured dynamic modulus of pyrolysis carbon black asphalt modified asphalt provides reference for pavement design of asphalt mixture.

Keywords

Road Engineering, Pyrolysis Carbon Black Modified Asphalt for Waste Tyres, Asphalt Mixture, Dynamic Modulus Test

温度和加载频率对沥青混合料动态模量影响规律试验研究

罗 鸣¹, 陈 超², 李甜甜³

¹江西安源路桥集团有限公司, 江西 萍乡

²江西萍乡经济开发区农技水利站, 江西 萍乡

³长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南 长沙
Email: 284922619@qq.com

收稿日期：2019年8月28日；录用日期：2019年9月10日；发布日期：2019年9月17日

摘要

为了探讨加载时间和温度对废轮胎热解炭黑改性沥青混合料动态模量影响规律，本文采用常用级配 AC-20，配制了废轮胎热解炭黑改性沥青、SBS改性沥青混以及70号基质沥青等三种沥青混合料，采用沥青混合料单轴压缩动态模量试验方法进行动态模量试验，得出试验温度与加载频率对三种沥青混合料动态模量的影响规律。实测的废轮胎热解炭黑改性沥青动态模量为沥青混合料路面设计提供参考。

关键词

道路工程，废轮胎热解炭黑改性沥青，沥青混合料，动态模量试验

Copyright © 2019 by author(s) 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

由于沥青结合料类材料的顶面法回弹模量，无法反映模量对温度和加载时间的依赖性。我国新的公路沥青路面设计规范[1]规定了新的测试和取值方法。沥青路面动态参数的引进，逐步推进了我国沥青路面设计方法由静态设计方法向动态设计方法的转变。

当前对于普通沥青以及 SBS 改性沥青沥青混合料动态模量都有相关试验研究[2] [3]，并有规范推荐取值范围。我国已经发布了废轮胎热解炭黑改性沥青混合料行业标准[4]。对废轮胎热解炭黑改性沥青及混合料性能已有研究[5] [6]。在但对废轮胎热解炭黑改性沥青混合料设计参数的研究相应缺乏。鉴于此，为了完善废轮胎热解炭黑改性沥青混合料设计参数，本文采用常用级配 AC-20，以 SK70#基质沥青、SBS 改性沥青(基质沥青为 SK70# + SBS，剂量为 4%)以及废轮胎热解炭黑改性沥青(15%掺量废轮胎热解炭黑 + 85%SK70#基质沥青)三种结合料，配制了废轮胎热解炭黑改性沥青混合料、SBS 改性沥青混合料以及基质沥青混合料。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》JTG E20-2011 中 T0738 方法，进行了不同温度和不同频率条件下的动态模量对比试验研究，得出了温度和加载频率对三种沥青混合料动态模量的影响规律。

2. 试验材料和混合料组成

2.1. 原材料检测

试验矿料选用辉绿岩粗集料、细集料和石灰岩矿粉。三种沥青结合料为：SK70#基质沥青、SBS 改性沥青(基质沥青为 SK70# + SBS，剂量为 4%)以及废轮胎热解炭黑改性沥青(15%掺量废轮胎热解炭黑 + 85%SK70#基质沥青)。经检测，粗集料、细集料、矿粉、废轮胎热解炭黑及三种沥青的各项技术指标都满足我国现行标准[4]和规范[7]规定的相应技术要求。

2.2. 矿料级配

本试验研究矿料级配选用 AC-20 级配，矿料级配曲线见图 1。

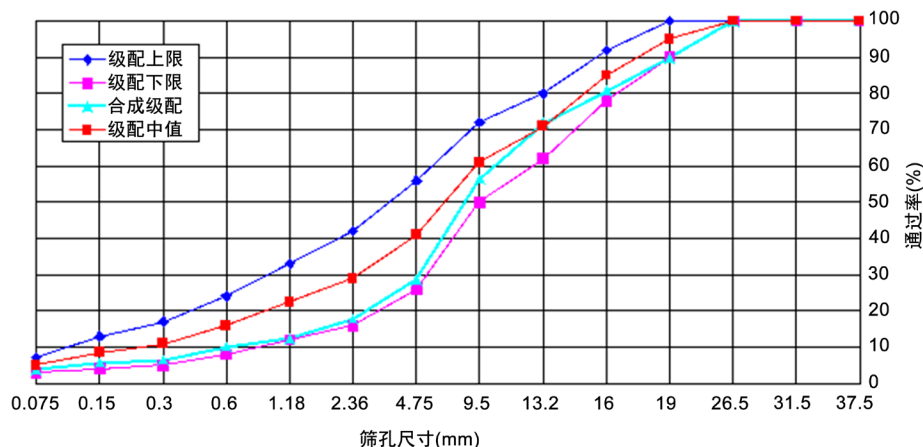


Figure 1. Composite mineral aggregate grading of AC-20
图 1. AC-20 矿料合成级配图

2.3. 混合料最佳油石比及体积参数

以图 1 确定的级配进行马歇尔配合比试验。三种沥青混合料马歇尔配合比设计结果见表 1。三种沥青混合料均满足密级配沥青混凝土混合料马歇尔试验技术要求[7]。

Table 1. Marshall test results for different mixtures
表 1. 不同混合料马歇尔试验结果

混合料类型	最佳油石比 (%)	毛体积相对密度	空隙率 (%)	矿料间隙率 (%)	沥青饱和度 (%)	稳定度		流值	
						均值 (kN)	C _v (%)	均值 (mm)	C _v (%)
AC-20 (TLA)	4.1	2.573	3.6	14.3	74.8	10.7	13.2	4.0	20.9
AC-20 (SBS)	4.1	2.569	3.7	13.9	73.4	11.0	14.9	3.8	22.9
AC-20 (基质)	4.0	2.570	3.8	14.0	72.9	10.0	12.5	3.5	24.1
技术要求			3~5	≥12	65~75	≥8		2~4	

3. 动态模量试验

3.1. 试验设备

《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)规定沥青混合料动态模量试验可以采用 MTS 810 系列伺服液压材料试验机、UTM 系列伺服液压或气压材料试验机和基本性能试验仪(SPT)等进行测试[3] [8]。本文中沥青混合料动态模量试验采用仪器为澳大利亚 IPC 公司生产的 Superpave 基本性能试验机(SPT)。

3.2. 试验频率的选择

行车速度是影响荷载作用频率的一个主要原因[9] [10]，试验荷载频率选择尽量包括在道路可能出现的适用范围。荷载频率 0.1 Hz 时大体相当于行车速度很慢的情形，与城市平交路口、收费站、长大陡坡等特殊路段车辆行驶状态相似。荷载作用频率为 5 Hz 时相应的行车速度约为 30~40 km/h，相当于我国二级及二级以下公路及大部分城市道路车行速度。荷载作用频率为 10 Hz 时相应的行车速度大约为 60~65

km/h, 25 Hz 的荷载频率相当于行车速度 120 km/h 以上情况, 因此试验荷载频率选择 0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、5 Hz、10 Hz、25 Hz 的范围能包括实际道路上车辆行车速度。

3.3. 试验温度的选择

对单轴压缩动态模量测试的试验温度, 美国 AASHTO TP62-03 中规定试验温度为 -10°C 、 4.4°C 、 21.1°C 、 37.8°C 、 54.4°C 等 5 个。美国 ASTM D3497 中规定试验温度为 5°C 、 25°C 、 40°C 等三个。本文按照我国试验规程规定[8], 采用的试验温度为 -10°C 、 5°C 、 20°C 、 35°C 、 50°C 。

3.4. 试验结果

依据《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011) T0738 方法制作 AC-20 (SBS)、AC-20 (炭黑)、AC-20 (基质)沥青混合料试件, 进行单轴压缩动态模量试验。每个试验温度、加载频率下均进行 5 次平行试验。按照试验数据的离散程度进行弃差处理后, 确定的有效测试数据, 按 t 分布法(保证率 90%)计算整理动态模量代表值, 作为试验结果。三种 AC-20 沥青混合料动态模量试验结果如表 2。对照我国沥青路面设计规范[1]推荐的 70 号沥青和 SBS 改性沥青混合料在 20°C 、10 Hz 条件下动态模量取值范围(MPa), 本文室内试验实测的 70 号和 SBS 改性沥青混合料动态模量值为 7380.9 MPa, 8549.9MPa, 稍偏低, 但接近取值范围的低值。AC-20 (炭黑)改性沥青混合料动态模量值 8930.1 MPa, 虽然比 SBS 改性沥青混合料动态模量提高了 4.5%, 但也比 SBS 改性沥青推荐值[9000~13500 MPa]低值小, 基本接近取值范围的低值。

Table 2. Test results of dynamic modulus of three AC-20 asphalt mixtures

表 2. 三种 AC-20 沥青混合料动态模量试验结果

混合料类型	试验温度($^{\circ}\text{C}$)	频率(Hz)					
		25	10	5	1	0.5	0.1
AC-20 (SBS)	-10	19351.8	18862.8	18440.4	17266.3	16670.6	15066.5
	5	15897.4	14933.4	14139.7	12109.2	11171.4	8927.4
	20	9830.3	8549.9	7595.5	5525.8	4727.9	3159.7
	35	4255.7	3376.7	2803.5	1768.6	1437.9	886.1
	50	1438.3	1091.4	886.1	553.3	456.8	302.5
AC-20 (基质)	-10	18872.4	18254.4	17716.9	16212.9	15448.8	13411.4
	5	15067.1	13909.5	12960.8	10571.3	9496.5	7031.9
	20	8782.9	7380.9	6364.3	4264.9	3505.6	2120.7
	35	3515.1	2660.4	2127.6	1228.5	963.9	551.9
	50	1111.8	806.1	633.9	372.1	300.3	192.9
AC-20 (炭黑)	-10	19907.3	19489.1	19115.7	18023.6	17442.7	15803.6
	5	16806.8	15825.6	14992.6	12775.4	11717.3	9135.5
	20	10415.5	8930.1	7818.8	5418.8	4513.7	2805.6
	35	4137.4	3156.9	2539.5	1489.6	1177.5	690.4
	50	1225.3	899.9	717.4	438.2	361.7	245.3

4. 动态模量试验结果分析

4.1. 试验温度对动态模量测试结果的影响

利用表 2 的三种 AC-20 沥青混合料动态模量试验结果，绘制 6 个频率，5 个温度与三种沥青混合料动态模量的关系，见图 2~7。

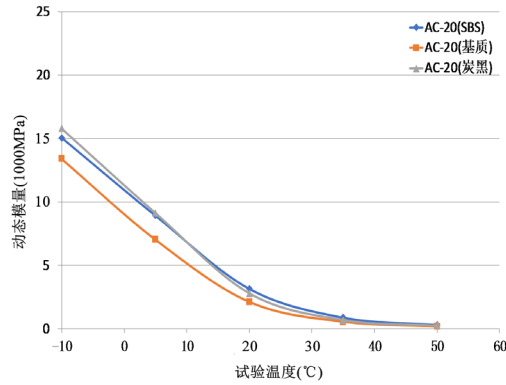


Figure 2. Temperature and dynamic modulus (0.1 Hz)
图 2. 温度与动态模量关系图(0.1 Hz)

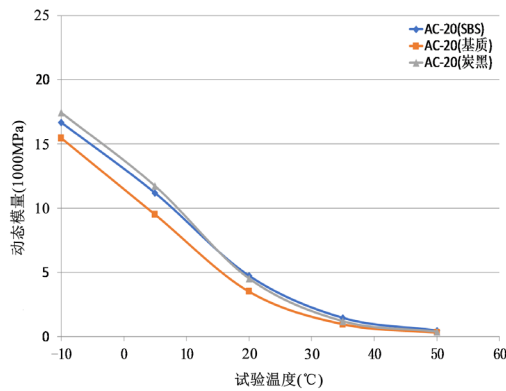


Figure 3. Temperature and dynamic modulus (0.5 Hz)
图 3. 温度与动态模量关系图(0.5 Hz)

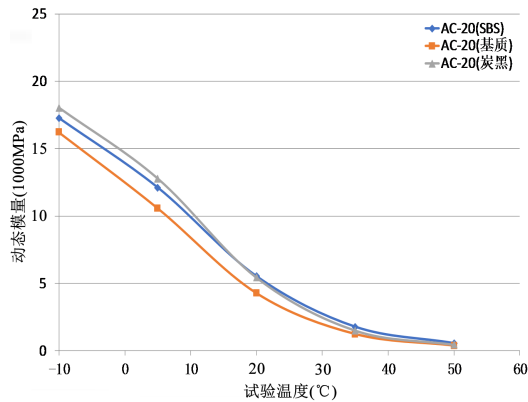


Figure 4. Temperature and dynamic modulus (1 Hz)
图 4. 温度与动态模量关系图(1 Hz)

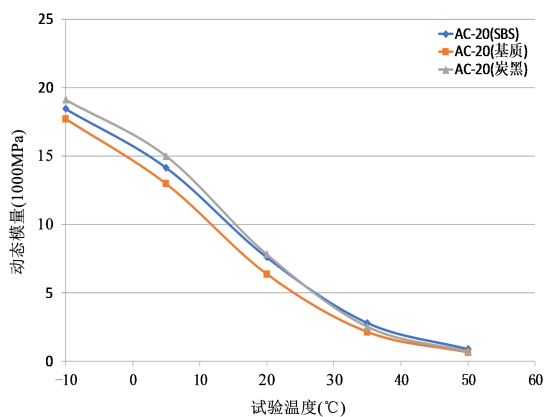


Figure 5. Temperature and dynamic modulus (5 Hz)
图 5. 温度与动态模量关系图(5 Hz)

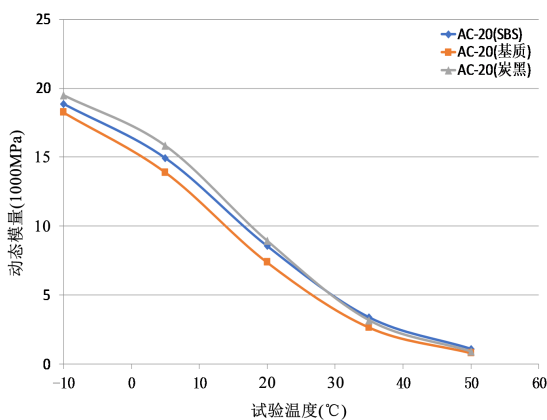


Figure 6. Temperature and dynamic modulus (10 Hz)
图 6. 温度与动态模量关系图(10 Hz)

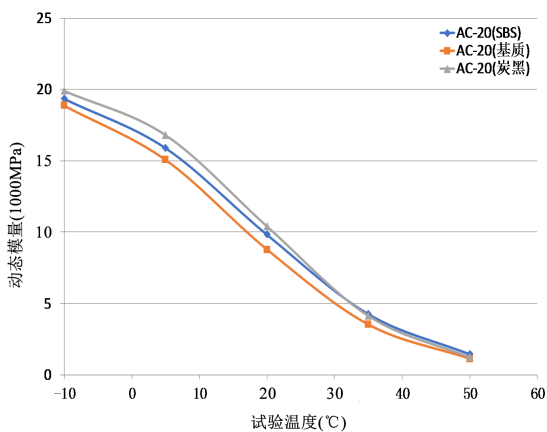


Figure 7. Temperature and dynamic modulus (25 Hz)
图 7. 温度与动态模量关系图(25 Hz)

由图 2~7 相应荷载频率下, 试验温度与动态模量关系图中可知:

- 1) 不同荷载频率下三种沥青混合料动态模量随着试验温度的升高逐渐减小。说明三种沥青混合料动态模量受温度的影响规律一致。

2) AC-20 (炭黑)、AC-20 (SBS)在不同荷载频率下,相同温度时,其动态模量都要大于 AC-20 (基质)混合料,这说明在级配类型相同时沥青性能对混合料的动态模量影响较大,炭黑、SBS 添加剂对沥青混合料不同荷载频率下的改性效果显著。

3) 对于 SBS 改性沥青混合料和炭黑改性沥青混合料动态模量有重叠、交叉现象。在低频 0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz 时随着温度从-10℃开始升高,AC-20 (炭黑)动态模量大于 AC-20 (SBS)动态模量,但两者差距逐渐减小,在 20℃附近 AC-20 (TLA)动态模量逐渐减小至小于 AC-20 (SBS)混合料动态模量,但是随着温度的进一步升高到 50℃两者的动态模量变化幅度很小,比较接近。荷载频率在 5Hz、10Hz、25Hz 时,在 30℃附近 AC-20 (炭黑)动态模量开始减小至小于 AC-20 (SBS)混合料动态模量,但是在高温范围内 AC-20 (炭黑)、AC-20 (SBS)两种混合料动态模量比较接近。这说明在常温以下范围内 AC-20 (炭黑)比 AC-20 (SBS)硬,但是随着温度的升高两者的动态模量相差越来越小,较接近,这说明 AC-20 (炭黑)与 AC-20 (SBS)的耐高温性能相当。

4) 按照我国沥青路面设计规范[1],路面结构层材料设计参数的确定方法,对于高速公路和一级公路的施工图设计阶段宜采用水平一,即通过室内试验实测确定。在试验温度 20℃,加载频率 10Hz 条件下,AC-20 (炭黑)动态模量实测值比 AC-20 (SBS)的大约 4.5%,因此采用 AC-20 (炭黑)代替 AC-20 (SBS)混合料可以减薄路面厚度。但是随着温度提高,两种动态模量接近甚至稍微超过(见图 4~7)。说明不同的改性沥青,由于改性机理不同,动态模量随温度变化模量降低程度是不同的。

4.2. 加载频率对动态模量测试结果的影响

沥青混合料作为一种典型的粘弹性材料,在应力作用下的应力应变呈现非线性的关系,当沥青混合料经受动态荷载作用时,应变的产生相应于应力有一定的滞后。在整个加、卸的过程中,沥青混合料完成变形响应需要一定的时间,而非瞬时产生[9]。路面结构内影响荷载作用频率的因素较多,其中最主要的因素之一是行车速度,荷载作用频率随着行车速度的增大而增大[10]。图 8 具体体现了三种沥青混合料在相应温度下荷载施加频率与动态模量的关系。

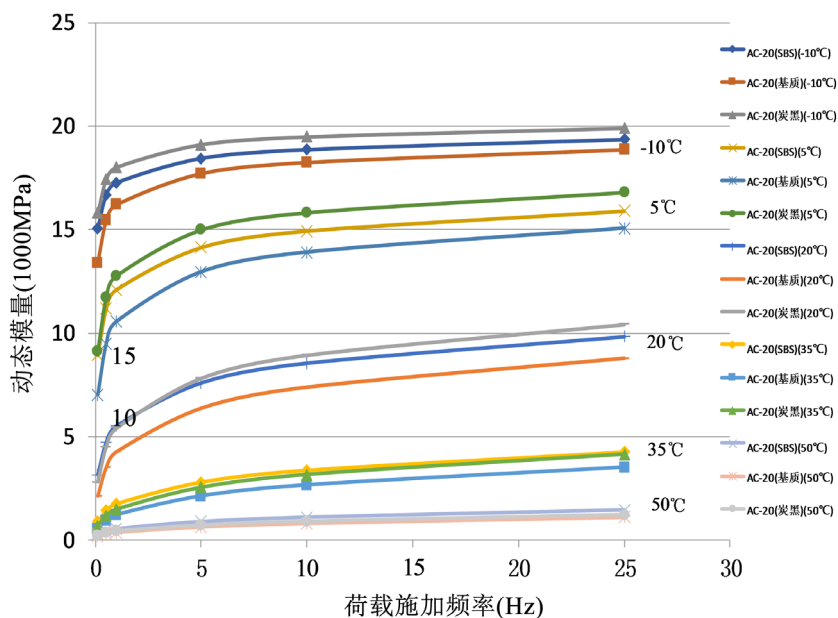


Figure 8. Relations between load frequency and dynamic modulus
图 8. 荷载施加频率与动态模量关系图

通过对图 8 三种沥青混合料在不同温度下动态模量随荷载施加频率的关系图, 可以看出:

1) 在试验温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内, 在不同荷载频率作用下, 三种沥青混合料动态模量都随着荷载频率的加大而增长。随着试验温度的升高, 各种荷载频率条件下, 三种沥青混合料动态模量都明显降低。

2) 在试验频率 $0.1\text{ Hz}\sim 25\text{ Hz}$ 范围内, AC-20 (炭黑)、AC-20 (SBS)的模量曲线始终位于 AC-20 (基质)上方, 这说明炭黑、SBS 对混合料性能改善作用显著。但 AC-20 (炭黑)、AC-20 (SBS)的模量存在重叠、交叉现象。说明两者改性沥青混合料由于改性剂和沥青混合料改性机理不同, 表现出不同的适用范围。

3) 在 20°C 以内 1 Hz 以下低温低频范围内 AC-20 (炭黑)动态模量增长速率明显大于 AC-20 (SBS)、AC-20 (基质), 这说明低温低频条件作用下, 炭黑改性沥青混合料能更好的承受低荷载频率作用。随着温度的渐增, 在低频范围内 SBS 改性沥青混合料动态模量渐增至与炭黑改性沥青混合料相当甚至超过, 这说明在高温低频条件作用下 SBS 改性沥青混合料抵抗行车荷载能力较炭黑改性沥青稍突出。随着荷载频率的增大两种改性 AC-20 沥青混合料动态模量增长速率渐趋一致, 动态模量趋势线有渐趋平行重叠趋势, 说明在高温高频条件下, 这主要是因为当荷载频率很大时相当于行车速度很快, 车辆对路面的作用较小的缘故, 沥青混合料自身特性起决定作用, 动态模量 AC-20 (炭黑)和 AC-20 (SBS)非常接近, 明显高于 AC-20 (基质)。在低温高频条件下, AC-20 (炭黑)动态模量明显大于 AC-20 (SBS), 这说明低温高频条件作用下, 炭黑改性沥青混合料能更好的承受低温高率环境荷载作用。高温低频条件下 SBS 改性沥青混合料与炭黑改性沥青基本重叠, 说明两者强度不分上下。

5. 结论

通过对 AC-20 (SBS)、AC-20 (炭黑)、AC-20 (基质)三种沥青混合料, 在 5 个试验温度、6 个加载频率进行单轴压缩动态模量试验, 得出如下结论。

1) 不同荷载频率下三种沥青混合料动态模量随着试验温度的升高逐渐减小, 在相同温度条件下, AC-20 (炭黑)、AC-20 (SBS)其动态模量始终大于 AC-20 (基质)混合料的。不同温度条件下, 三种沥青混合料动态模量都随着荷载频率的加大而增长。随着试验温度的升高, 各种荷载频率条件下, 三种沥青混合料动态模量都明显降低。

2) 在试验频率范围内, 相同温度时, AC-20 (炭黑)、AC-20 (SBS)的模量曲线始终大于 AC-20 (基质)动态模量, 但 AC-20 (炭黑)、AC-20 (SBS)的模量存在重叠、交叉现象。在我国规定 20°C , 10 Hz 条件下, AC-20 (炭黑)改性沥青混合料动态模量值 8930.1 MPa 。

3) 低温低频、低温高频条件作用下, AC-20 (炭黑)较 AC-20 (SBS)混合料能更好的承受低荷载频率作用; 高温低频、高温高频条件下, AC-20 (炭黑)和 AC-20 (SBS)动态模量非常接近, 两者抵抗行车荷载能力相当。

基金项目

湖南省教育厅资助科研项目和项目编号 18A117, 长沙理工大学实践创新项目和项目编号 SJCX201910, 湖南省自然科学基金和项目编号 2019JJ40312。

参考文献

- [1] 刘伯莹. 公路沥青路面设计规范(JTG D50-2017) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [2] 赵延庆, 潘友强, 黄荣华. 基于动态模量的沥青路面力学响应分析[J]. 重庆交通大学学报, 2008, 27(1): 57-60.
- [3] 马韶军. 基于动态模量的施工过程监测及控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 6.
- [4] 田波, 李闯民, 何哲, 等. 沥青混合料改性添加剂第 7 部分: 废旧轮胎热解炭黑(JT/T 860.7-2017) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [5] Li, C.M., Fan, Z.R., Wu, S.P., Li, Y.Y., Gan, Y.W. and Zhang, A.M. (2018) Effect of Carbon Black Nanoparticles

from the Pyrolysis of Discarded Tires on the Performance of Asphalt and its Mixtures. *Applied Sciences*, **8**, 624. <https://doi.org/10.3390/app8040624>

- [6] Li, C.M., Ning, F. and Li, Y.Y. (2019) Effect of Carbon Black on the Dynamic Moduli of Asphalt Mixtures and Its Master Curves. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, **13**, 918. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0526-6>
- [7] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范(JFG F40-2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [8] 李福普, 李闯民. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTG E20-2011)释义手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] 曾胜, 吴羽, 徐琦. 路面动态模量的特性分析[J]. 交通科学与工程, 2004, 20(2): 34-37.
- [10] 赵延庆, 潘友强, 黄荣华. 基于动态模量的沥青路面力学响应分析[J]. 重庆大学学报, 2008, 27(1): 58-60.