

文章编号:1671-6833(2018)01-0007-05

废橡胶裂解炭黑改性沥青混合料的黏弹特性研究

冯振刚<sup>1</sup>, 孙安石<sup>1</sup>, 张东阳<sup>2</sup>, 李新军<sup>1</sup>, 栗培龙<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510507)

**摘 要:**采用简单性能试验机对废橡胶裂解炭黑 (PCB) 改性沥青混合料进行了动态模量试验, 研究了不同温度与荷载频率对其动态模量和相位角的影响. 通过数值分析方法, 拟合了 PCB 改性沥青混合料的动态模量和相位角主曲线, 分析了 PCB 对沥青混合料黏弹特性的影响. 结果表明, PCB 改性沥青混合料的动态模量和相位角依赖于温度和荷载频率的变化: 低温和高频时, PCB 的加入使得沥青混合料的动态模量明显增大, 相位角明显减小, 弹性特征增强, 黏性特征减弱; 高温和低频时, PCB 对沥青混合料黏弹性的影响不明显.

**关键词:**废橡胶裂解炭黑; 沥青混合料; 黏弹特性; 动态模量; 相位角

**中图分类号:** U414      **文献标志码:** A      doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.01.013

0 引言

废橡胶裂解炭黑 (PCB) 是废旧橡胶在高温条件下热分解得到的一系列裂解产物中的一种. 采用 PCB 对沥青进行改性, 不仅可以改善沥青混合料一些方面的性能, 而且可以降低成本, 提高废旧橡胶的回收利用率, 具有良好的经济与环保效益<sup>[1-3]</sup>. 目前, 针对 PCB 改性沥青混合料的性能研究主要是基于常规力学方法, 获得的参数可以用于评价或预测沥青混合料的路用性能. 然而, 作为一种具有黏弹性质的材料, 对 PCB 改性沥青混合料的黏弹特性进行研究有助于深入认识其在实际路面应用中对环境因素与行车荷载的动态响应.

动态模量与相位角作为表征沥青混合料黏弹特性的重要参数, 能较好地反映沥青路面的实际受力状况与动态响应<sup>[4-7]</sup>. 简单性能试验机 (SPT) 利用动态试验方法可以测定沥青混合料的动态模量与相位角, 从而用于评估沥青混合料的路用性能<sup>[8-9]</sup>. 赵延庆等<sup>[10]</sup>研究了荷载频率和温度对 Superpave 20 与 SMA-13 两种沥青混合料动态模量的影响, 分析了不同荷载频率与温度下动

态模量与相位角的变化; 刘红等<sup>[11]</sup>利用 SPT 研究了掺入聚酯纤维的沥青混合料在不同温度及荷载频率下的动态模量; 王吴鹏等<sup>[12]</sup>测试了两种高模量改性沥青混合料的动态模量, 预测了两种高模量沥青混合料的高、低温性能. 然而, 基于 SPT 对 PCB 改性沥青混合料黏弹特性的研究还鲜有报道.

笔者选用 PCB 对密级配沥青混合料 AC-13 进行改性, 制备了 PCB 改性 AC-13 沥青混合料. 采用 SPT 分别测试了沥青混合料在不同温度与荷载频率下的动态模量和相位角, 研究了 PCB 对沥青混合料动态模量及相位角的影响. 通过数值分析方法拟合了 PCB 改性沥青混合料的动态模量和相位角主曲线, 进一步分析了 PCB 对沥青混合料黏弹特性的影响.

1 试验过程

1.1 原材料

沥青, 韩国 SK-70# 基质沥青, 物理性能见表 1; 矿料为玄武岩类材质; 废橡胶裂解炭黑, 由废轮胎经高温裂解、超细化粉碎与表面活化而成, 粒径约为 150 μm.

收稿日期:2017-07-20; 修订日期:2017-09-26

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目 (51508032); 陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目 (20160111); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2015JZ012); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题 (KLTLR-Y13-11); 中央高校基本科研业务费资助项目 (310821163404; 310821171005)

**作者简介:**冯振刚 (1986—), 男, 河南项城人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事道路建筑材料方面的研究, E-mail: zg-feng@chd.edu.cn.

1.2 混合料级配

废橡胶裂解炭黑改性沥青混合料 (PCB/AC-13) 采用与普通密级配沥青混合料 (AC-13) 相同的级配, 沥青混合料的级配见表 2.

表 1 SK-70#沥青的物理性能

Tab.1 Physical properties of the SK-70# asphalt

试验指标		试验结果
针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm		73
软化点/℃		50.70
黏度 (60 ℃)/(Pa·s)		97.50
黏度 (135 ℃)/(Pa·s)		0.86
延度 (15 ℃)/cm		108.2
TFOT 后	质量损失/%	0.000 5
	残留针入度比/%	89.8
	软化点增值/℃	1.6

经试验确定 AC-13 的最佳沥青用量为

表 2 AC-13 沥青混合料的级配

Tab.2 Gradation of AC-13 asphalt mixtures

筛孔尺寸/mm	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
质量通过百分率/%	100.0	95.0	75.0	45.0	35.0	26.8	17.5	11.4	8.3	5.3
级配上限/%	100	100	85	68	50	38	28	20	15	8
级配下限/%	100	90	68	38	24	15	10	7	5	4

2 结果与讨论

2.1 PCB 对沥青混合料动态模量的影响

PCB 对沥青混合料动态模量的影响见图 1. 由图 1 可知, 与 AC-13 相比, PCB/AC-13 在不同温度和频率下的动态模量曲线呈现出相似的变化趋势, 即随着温度的升高动态模量逐渐减小. 这主要是因为温度较低时, 沥青混合料呈现弹性特性, 动态模量较大; 随着温度的升高, 沥青发生软化, 粘结力下降, 使得沥青混合料弹性逐渐减弱, 黏性逐渐增加, 由弹性逐渐向黏性转变, 因而动态模量逐渐减小.

从图 1 中可以看出, PCB/AC-13 的动态模量在较低温度时 (4.4 ℃ 和 21.1 ℃) 明显大于 AC-13, 表明 PCB 的加入可以增大沥青混合料抵抗变形的能力. 随着温度的升高, 两种沥青混合料的动态模量差值逐渐减小. 在相同荷载频率下, 温度升高至一定程度时 (54.4 ℃), 两种沥青混合料的动态模量趋近相同. 这表明 PCB/AC-13 与 AC-13 在较高温度下, 两者表现出的黏弹性能比较接近.

PCB/AC-13 与 AC-13 的动态模量均随着荷

4.51%, PCB/AC-13 的最佳沥青用量为 4.49%, 炭黑用量为最佳沥青用量的 10%.

1.3 试件制备

PCB 改性沥青混合料通过干法制备, 采用 JGUS-200 型旋转压实仪成型试件, 两种沥青混合料试件的尺寸均为  $\Phi 150\text{ mm} \times h 170\text{ mm}$ , 混合料拌和温度为 180 ℃, 旋转压实成型温度约为 150 ℃, 将成型试件进行钻芯取样, 并切割成  $\Phi 100\text{ mm} \times h 150\text{ mm}$  的圆柱体试件.

1.4 SPT 试验

采用 SPT 对上述圆柱体试件进行动态模量试验. 依据《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》<sup>[13]</sup> 规定, 在 4.4、21.1、37.8、54.4 ℃ 4 个温度和 25、10、5、1、0.5、0.1 Hz 6 个频率下进行试验, 按照由低温向高温、由高频向低频的顺序测得不同温度和不同频率下两种沥青混合料的动态模量和相位角.

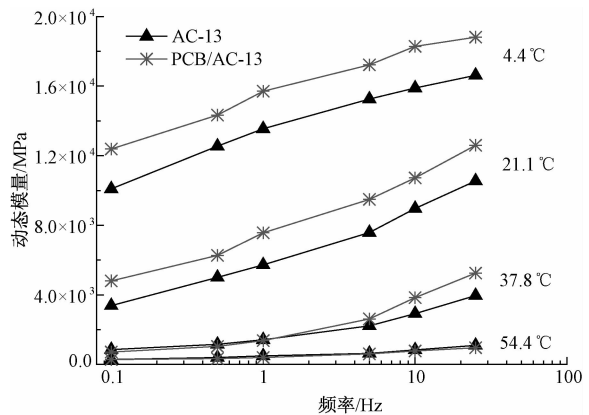


图 1 PCB 对 AC-13 动态模量的影响

Fig.1 Influence of PCB on the dynamic modulus of AC-13

载频率的降低而逐渐减小, 温度越低, 动态模量随频率的变化越明显 (见图 1). 在较低温度时 (4.4 ℃ 和 21.1 ℃), 两种沥青混合料在不同荷载频率下的动态模量差值比较接近, 动态模量曲线近似平行. 当温度升至 37.8 ℃ 时, PCB 对沥青混合料动态模量的影响受频率的影响较为明显, 从 25 Hz 到 1 Hz, PCB/AC-13 的动态模量相比于 AC-13 有所增大, 且随频率的降低增大的幅度减小. 当频率小于 1 Hz 时, PCB/AC-13 与 AC-13 的

动态模量曲线几乎重合。54.4 ℃ 时,PCB/AC-13 与 AC-13 的动态模量比较接近,几乎不受频率的影响。这表明较低温度时(4.4 ℃ 和 21.1 ℃),频率对沥青混合料动态模量的影响较大,PCB 对沥青混合料动态模量的提高作用受频率的影响不显著;随着温度的升高(37.8 ℃),频率对沥青混合料动态模量的影响减弱,PCB 对沥青混合料动态模量的影响依赖于频率的变化;当温度进一步升高(54.4 ℃),频率对沥青混合料动态模量的影响很小,PCB 对沥青混合料动态模量的影响几乎不受频率的影响。

2.2 PCB 对沥青混合料相位角的影响

PCB 对沥青混合料相位角的影响如图 2 所示。PCB/AC-13 在不同温度和频率下的相位角呈现出与 AC-13 相似的变化趋势:在 4.4 ℃ 和 21.1 ℃ 时,两种沥青混合料的相位角均随着荷载频率的降低而逐渐增大;在 37.8 ℃ 时,两种沥青混合料的相位角均随着频率的降低,表现出先增加后减小的变化趋势;在 54.4 ℃ 时,两种沥青混合料的相位角均随着频率的降低而减小。这表明在较低温度时(4.4 ℃ 和 21.1 ℃),荷载频率降低,沥青混合料的黏性特征逐渐显著;当温度升高到一定程度时(37.8 ℃),沥青混合料的黏弹性变化会在频率为 5 Hz 左右出现一个转折点,频率大于 5 Hz 时,沥青混合料随频率的降低黏性特征逐渐增强,频率小于 5 Hz 时,沥青混合料随频率的降低弹性特征逐渐增强;当温度继续升高到 54.4 ℃ 时,荷载频率降低,沥青混合料的弹性特征逐渐显著。这是由于随着温度的升高,沥青混合料的黏性行为逐渐显著,随着荷载频率的降低,沥青混合料应力松弛所需要的时间增加。即高温状态时混合料对应力和应变的敏感程度不如低温状态时敏感,所以导致相位角在高、低温状态出现相反的趋势<sup>[14]</sup>。此外,当温度升高和荷载频率降低时,沥青混合料会逐渐变软,此时矿料骨架作用增加并强于结合料的黏性作用,混合料中的矿料多呈现弹性特性,黏性性能不再明显,导致了相位角减小。

从图 2 可以看出,与 AC-13 相比,在 4.4、21.1、37.8 ℃ 下,PCB/AC-13 的相位角在不同温度和频率下均有所减小,表明 PCB 的加入可以增大沥青混合料的弹性成分,弹性特征较为显著。在 54.4 ℃ 下,PCB/AC-13 的相位角在低频时略小于 AC-13,随着频率的增大,两者的相位角趋于一致,表明高温 PCB 对沥青混合料黏弹特性的影响不大。

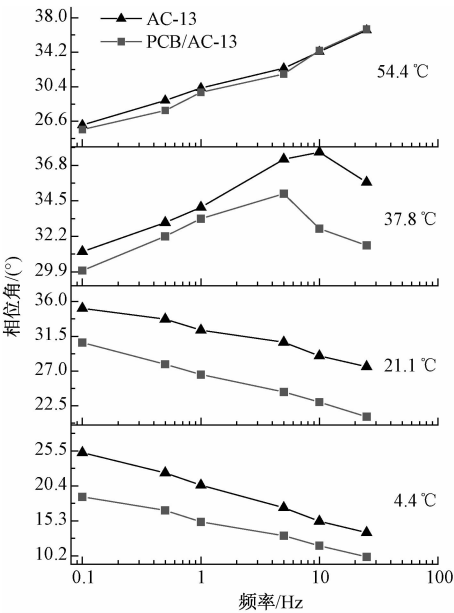


图 2 PCB 对 AC-13 相位角的影响  
Fig.2 Influence of PCB on the phase angle of AC-13

2.3 PCB 对沥青混合料动态模量和相位角主曲线的影响

以 21.1 ℃ 为参考温度,根据西格莫德函数,利用数值分析软件进行系数回归和检验,西格莫德函数模型:

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

式中:  $|E^*|$  为沥青混合料动态模量的模;  $f_r$  为缩减频率;  $\delta$  为动态模量极小值的对数;  $\alpha$  为动态模量极大值的对数;  $\beta$ 、 $\gamma$  分别为回归参数。

在主曲线构成过程中,将各温度下的动态模量曲线平行移动,得到各个温度下的移位因子,如表 3 所示。在拟合过程中,获得各温度下的移位因子后,可计算出不同温度和频率所对应的缩减频率,结果见表 4。最后利用 Origin 数值分析软件进行非线性拟合,拟合出西格莫德函数的回归参数,结果见表 5。

表 3 PCB/AC-13 和 AC-13 的移位因子		
Tab.3 Shift factor of PCB/AC-13 and AC-13		
混合料种类	转换温度/℃	移位因子 ln[ a(T) ]
AC-13	4.4	2.314
	21.1	0.000
	37.8	-2.194
	54.4	-3.989
PCB/AC-13	4.4	2.228
	21.1	0.000
	37.8	-2.203
	54.4	-4.060

表 4 PCB/AC-13 和 AC-13 的缩减频率

Tab.4 Reduced frequency of PCB/AC-13 and AC-13

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	频率 $f/\text{Hz}$	缩减频率 $f_r/\text{Hz}$	
		AC-13	PCB/AC-13
4.4	25.0	5.146E+03	4.230E+03
4.4	10.0	2.058E+03	1.692E+03
4.4	5.0	1.029E+03	8.460E+02
4.4	1.0	2.058E+02	1.692E+02
4.4	0.5	1.029E+02	8.460E+01
4.4	0.1	2.058E+01	1.692E+01
21.1	25.0	2.500E+01	2.500E+01
21.1	10.0	1.000E+01	1.000E+01
21.1	5.0	5.000E+00	5.000E+00
21.1	1.0	1.000E+00	1.000E+00
21.1	0.5	5.000E-01	5.000E-01
21.1	0.1	1.000E-01	1.000E-01
37.8	25.0	1.600E-01	1.568E-01
37.8	10.0	6.401E-02	6.272E-02
37.8	5.0	3.201E-02	3.136E-02
37.8	1.0	6.401E-03	6.272E-03
37.8	0.5	3.201E-03	3.136E-03
37.8	0.1	6.401E-04	6.272E-04
54.4	25.0	2.565E-03	2.175E-03
54.4	10.0	1.026E-03	8.701E-04
54.4	5.0	5.130E-04	4.351E-04
54.4	1.0	1.026E-04	8.701E-05
54.4	0.5	5.130E-05	4.351E-05
54.4	0.1	1.026E-05	8.701E-06

表 5 动态模量主曲线的回归系数

Tab.5 The fitting parameters of dynamic modulus master curve

混合料种类	$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$R^2$
AC-13	2.071 60	4.322 05	-1.109 36	-0.532 70	0.994 70
PCB/AC-13	2.180 26	4.374 54	-1.156 43	-0.620 96	0.998 65

根据回归结果,确定在参考温度 21.1℃ 下 AC-13 与 PCB/AC-13 两种沥青混合料的动态模量和相位角主曲线,结果分别见图 3 和图 4。由图 3 可知,两种沥青混合料的动态模量主曲线呈“S”型,通过分析动态模量主曲线可以确定两种沥青混合料在极端温度及荷载频率下的动态响应,也能表征任意温度和任意荷载频率下沥青混合料的黏弹特性。由图 4 可知,两种沥青混合料的相位角主曲线不是一条相对光滑的曲线。相位角主曲线可以直观地判别出沥青混合料的黏弹特性,将其与动态模量主曲线结合起来,能够全面地表征沥青混合料的动态力学特性。

由图 3 和图 4 可以看出,在图中“标定线”右侧(低于 37.8℃)的频率范围内,即低温和高温

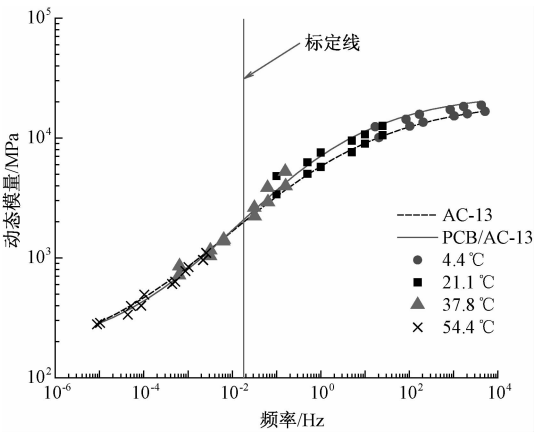


图 3 PCB 对 AC-13 动态模量主曲线的影响

Fig.3 Influence of PCB on dynamic modulus master curve of AC-13

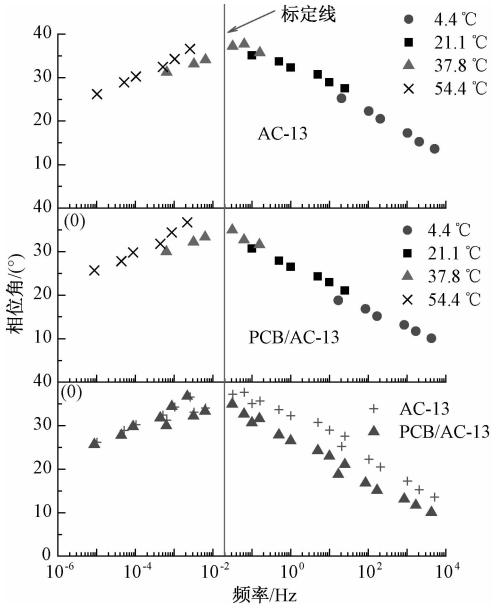


图 4 PCB 对 AC-13 相位角主曲线的影响

Fig.4 Influence of PCB on phase angle master curve of AC-13

时,PCB/AC-13 的动态模量大于 AC-13,而相位角小于 AC-13。这表明在低温和高温时,PCB 的加入使得沥青混合料的动态模量明显增大,相位角明显减小,弹性特征增强,黏性特征减弱。在图中“标定线”左侧(高于 37.8℃)的频率范围内,即高温和低频时,PCB/AC-13 的动态模量主曲线和相位角主曲线与 AC-13 基本重合,表明高温和低频时,PCB 对沥青混合料黏弹性的影响不明显。

3 结论

(1)PCB 改性沥青混合料的动态模量随温度的升高与荷载频率的降低逐渐减小,减小速率随温度的升高而减缓。PCB 改性沥青混合料的相位角在较低温度时随着荷载频率的降低逐渐增大,

当温度升高至一定值时相位角随着频率的降低,表现出先增加后减小的变化趋势,温度继续升高,相位角则随着频率的降低而减小。

(2)在低温和高频时,PCB 的加入使得沥青混合料的动态模量明显增大,相位角明显减小,弹性特征增强,黏性特征减弱。高温和低频时,PCB 对沥青混合料黏弹性的影响不明显。

参考文献:

[1] 叶智刚,孔宪明,余剑英,等. 橡胶粉改性沥青的研究[J]. 武汉理工大学学报,2003,25(1):11-14.

[2] 黄彭,吕伟民,张福清,等. 橡胶粉改性沥青混合料性能与工艺技术研究[J]. 中国公路学报,2001,14(S1):6-9.

[3] 李丽华,马强,王翠英,等. 废旧轮胎颗粒水泥混合土三轴试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(4):33-35.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 马莉骅. 沥青及沥青混合料老化过程中的黏弹性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学材料科学与工程

学院,2012.

[7] BIRGISSON B, SORANAKOM C, NAPIER J, et al. Microstructure and fracture in asphalt mixtures using a boundary element approach [J]. Journal of materials in civil engineering, 2004, 16(2):116-121.

[8] WU J M, LIANG J P, ADHIKARI S. Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads [J]. Journal of traffic and transportation engineering: English edition, 2014, 1(6):439-447.

[9] 朱磊,何兆益,曹东伟. 沥青混合料动态特性试验研究[J]. 西部交通科技,2009(8):40-44.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 中华人民共和国交通部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTJ 052—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[14] 李德超. 沥青混合料动态模量试验研究[J]. 公路,2008(1):134-140.

Viscoelastic Characteristic of Asphalt Mixture Modified with Pyrolysis Carbon Black from Waste Tires

FENG Zhengang<sup>1</sup>, SUN Anshi<sup>1</sup>, ZHANG Dongyang<sup>2</sup>, LI Xinjun<sup>1</sup>, LI Peilong<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang' An University, Xi' An 710064, China; 2. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co., Ltd, Guangzhou 510507, China)

**Abstract:** In this paper, the dynamic modulus of pyrolysis carbon black (PCB) modified asphalt mixture was tested by the simple performance tester (SPT). The influence of different temperature and load frequency on dynamic modulus and phase angle of the asphalt mixture was investigated. The dynamic modulus and phase angle master curves were fitted by numerical method to analyze the viscoelastic characteristic of PCB modified asphalt mixture. Experimental results showed that the dynamic modulus and phase angle of PCB modified asphalt mixture were dependent on the change of temperature and load frequency. At lower temperature and higher frequency, the dynamic modulus of asphalt mixture increased but phase angle decreased greatly with the addition of PCB, indicating that the elastic behavior of PCB modified asphalt mixture was enhanced while the viscous behavior was weakened. At higher temperature and lower frequency, the PCB showed little influence on the viscoelastic characteristic of asphalt mixture.

**Key words:** pyrolysis carbon black from waste tires;asphalt mixture;viscoelastic characteristic;dynamic modulus;phase angle