

不同添加剂型高模量沥青混合料模量及疲劳性能对比研究

郭立成^{1*}, 徐钦升², 周敏³, 闫翔鹏², 曾国东³, 韦金城²

¹佛山市路桥建设有限公司, 广东 佛山

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³佛山市交通科技有限公司, 广东 佛山

Email: 956438206@qq.com

收稿日期: 2021年3月17日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月28日

摘要

针对高模量添加剂粮莠不齐的现状, 为科学合理进行添加剂型高模量沥青混合料模量和疲劳参数指标设计, 促进其在实际工程中推广应用, 采用AMPT和UTM两种实验设备对6种添加剂型高模量沥青混合料进行动态模量和四点弯曲疲劳试验, 对不同添加剂型高模量沥青混合料的模量及疲劳性能研究, 建立混合料动态模量主曲线和疲劳曲线, 预测混合料的高低温性能和疲劳寿命。研究结果表明: EME添加剂型高模量沥青混合料的高温抗车辙性能更优、疲劳寿命更好; PR Module和YJW-6添加剂型高模量沥青混合料的高温性能、疲劳寿命相近; 混合料抗疲劳性能及对于应变水平变化的敏感性EME型 > PR Module型 > YJW-6型; 70#基质沥青与高模量添加剂拌和后的混合料模量和相位角数据均优于SBS改性沥青, 高模量添加剂在改善基质沥青的高温性能和黏弹性能方面具有更好的效果。

关键词

高模量添加剂, 动态模量, 疲劳寿命, 疲劳曲线

Comparative Study on Modulus and Fatigue Performance of High Modulus Asphalt Mixtures with Different Additives

Licheng Guo^{1*}, Qinsheng Xu², Min Zhou³, Xiangpeng Yan², Guodong Zeng³, Jincheng Wei²

¹Foshan Road and Bridge Construction Co., Ltd., Foshan Guangdong

²Shandong Transportation Institution, Jinan Shandong

*第一作者。

文章引用: 郭立成, 徐钦升, 周敏, 闫翔鹏, 曾国东, 韦金城. 不同添加剂型高模量沥青混合料模量及疲劳性能对比研究[J]. 材料科学, 2021, 11(4): 462-470. DOI: 10.12677/ms.2021.114054

³Foshan Traffic Technology Co., Ltd., Foshan Guangdong
Email: 956438206@qq.com

Received: Mar. 17th, 2021; accepted: Apr. 21st, 2021; published: Apr. 28th, 2021

Abstract

Aiming at the current situation of uneven high modulus additives, in order to scientifically and rationally design the modulus and fatigue parameters of additive-type high-modulus asphalt mixture, and promote its popularization and application in practical engineering, two kinds of experimental equipment, AMPT and UTM, were used to conduct dynamic modulus and four-point bending fatigue tests on 6 kinds of additive-type high modulus asphalt mixtures. The modulus and fatigue performance of different additive-type high modulus asphalt mixtures were studied and the main dynamic modulus curve and fatigue curve of the mixture were established, to predict the high and low temperature performance and fatigue life of the mixture. The research results show that: EME additive type high modulus asphalt mixture has better high-temperature rutting resistance and better fatigue life; the high temperature performance and fatigue life of PR module and YJW-6 additive type high modulus asphalt mixture are similar; the anti-fatigue performance of the mixture and the sensitivity to changes in strain level EME > PR Module > YJW-6 type; the modulus and phase angle data of 70# matrix asphalt mixed with high modulus additives are better than SBS modified asphalt. High modulus additives have better effects in improving the high temperature performance and viscoelastic properties of matrix asphalt.

Keywords

High Modulus Additives, Dynamic Modulus, Fatigue Life, Fatigue Curve

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

为了减少沥青路面车辙损害及提高路面基层混合料的强度,法国于 20 世纪最早提出了高模量沥青混合料的概念[1] [2] [3] [4],所谓高模量沥青混合料是指在道路沥青路面修建中,一种模量较高、抗车辙性能较好、耐疲劳性能更优的路面材料。依据法国 LPC 沥青混合料设计指南的定义[5],即 15℃、10 Hz 条件下,复数模量不小于 14,000 Mpa 的沥青混合料。法国对于高模量沥青混合料的应用主要通过 1) 选用低标号硬质沥青,即 30#以下的沥青; 2) 在混合料中添加高模量改性剂,这两种技术途径实现[6] [7]。

国内对于高模量沥青混合料的应用研究主要从高模量改性剂入手,于 2001 年始从法国引进高模量改性剂,并结合我国实际道路特点和气候条件,对高模量沥青混合料展开了大量应用研究,并在市政道路交叉口、京珠高速及粤赣高速等高速公路中,进行了相关试验路的铺筑[8];辽宁交科院[9]在交通部西部建设科技项目中,着重从高模量改性剂来提高沥青混合料动态模量入手,开展了添加剂型高模量沥青混合料的研究,并在抚顺-南杂木高速公路中面层铺筑了掺加“PR-M”、“路宝牌”高模量外掺剂的试验段;此外还有很多高校和科研院所也对添加剂型高模量沥青混合料进行了大量研究,如山东建筑大学道路研究室[10]从混合料的高温性能入手,研发了一种新型高模量添加剂并取得了较好的应用效果;长安大

学[11]开展了添加 PR 系列高模量改性剂的沥青混合料性能试验研究,并在道路工程应用中进行了相关试验路的铺筑[12][13]。虽然国内进行了大量的添加剂型高模量沥青混合料研究,但都是从各自的研究角度展开,基于目前高模量添加剂良莠不齐的现状,为科学进行添加剂型高模量沥青混合料模量和疲劳参数指标设计,促进添加剂型高模量沥青混合料在实际工程中推广应用,仍需进一步研究探索。

在实际工程应用中,添加剂型高模量沥青混合料由于其简便的生产、施工工艺,施工和易性好及混合料各项性能均衡稳定等特点而受到广泛关注,因而,在对目前市场中多种添加剂对比后,本文优选 PR Module、YJE-6 和 EME 三种高模量改性剂,对沥青混合料的模量及疲劳性能研究,建立混合料动态模量主曲线、疲劳曲线及疲劳方程,预测这 6 种添加剂型高模量沥青混合料的高低温性能和疲劳寿命,并进一步对高模量改性剂与沥青胶结料间的相互作用进行研究。

2. 材料与试验方案

2.1. 原材料

1) 集料

粗集料、细集料均选用优质石灰岩,矿粉由优质石灰岩加工而成,集料各项技术指标均满足 JTG-F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》要求。

2) 沥青

沥青选用 70#和 SBS 改性沥青,其主要技术指标结果如表 1、表 2 所示。从表 1、表 2 来看,两种沥青的各项指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》要求。

Table 1. 70# asphalt performance index test results

表 1. 70#沥青性能指标试验结果

试验项目	指标要求	试验结果
针入度(100 g, 5 s, 25°C)/0.1mm	60~80	67
针入度指数 PI	-1.5~1.0	0.7
软化点(5°C)	≥46	47.6
延度(5 cm/min, 10°C)/cm	≥20	76
溶解度/%	≥99.5	99.88
闪点/°C	≥260	268
60 度动力粘度/Pa·s	≥180	272
质量变化/%	≤±0.8	-0.36
RTFOT 指标	残留针入度比/%	≥61
	残留延度(5°C)	≥6

Table 2. SBS modified asphalt performance index test results

表 2. SBS 改性沥青性能指标试验结果

试验项目	技术要求	试验结果
针入度(100 g, 5 s, 25°C)/0.1mm	40~60	57.9
软化点(5°C)	≥45	88
延度(5 cm/min, 15°C)	≥20	33.5
25°C弹性恢复/%	85	≥55
溶解度/%	≥99	99.4

Continued

RTFOT 指标	闪点	≥ 230	336
	离析	≤ 2.5	1.1
	质量变化	$\leq \pm 1.0$	0.02
	针入度比	≥ 65	82.1
	残留延度(5℃)	≥ 15	24.75

3) 高模量改性剂

对目前市场上多种高模量改性剂比选, 本文选用 3 种现役工程中应用的功能性高模量改性剂: PR Module、YJW-6 和 EME 型高模量添加剂, 根据高模量剂推荐掺量, 用量分别为 0.7%、0.3%和 1%。采用直投式加入拌和, 三种高模量添加剂外观形态如图 1 所示。

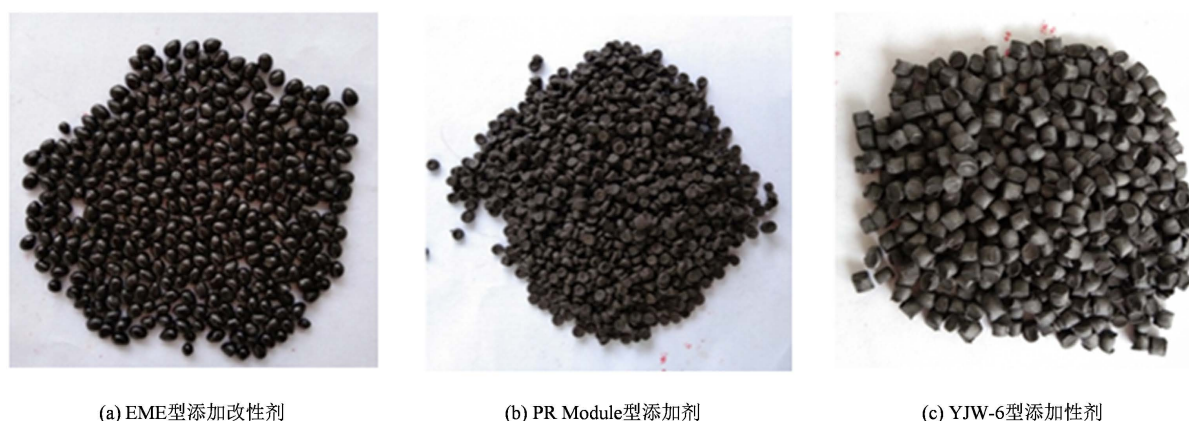


Figure 1. Different types of high modulus additives
图 1. 不同类型高模量添加剂

2.2. 级配选择

本文级配选用高模量沥青混合料常用 AC-20 型级配, 合成级配见表 3, 级配曲线见图 2。

2.3. 试验方案

本文采用沥青混合料性能试验机(Asphalt Mixture Performance Tester, AMPT)和 UTM-100 分别对 70# 和 SBS 两种沥青、PR Module、YJW-6 及 EME 三种改性剂组成的六种 AC-20 型高模量沥青混合料进行单轴压缩动态模量试验和小梁四点弯曲疲劳试验, 具体试验方案如表 4、表 5 所示。

Table 3. Synthetic gradation
表 3. 合成级配

筛孔尺寸(mm)	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配	100.0	100.0	97.7	88.3	76.2	59.6	37.6	25.5	18.0	12.8	9.4	6.4	4.8
AC-20 规范级配上限	100.0	100.0	100.0	92.0	80.0	72.0	56.0	44.0	33.0	24.0	17.0	13.0	7.0
AC-20 规范级配下限	100.0	100.0	90.0	78.0	62.0	50.0	26.0	16.0	12.0	8.0	5.0	4.0	3.0
AC-20 规范级配中值	100.0	100.0	95.0	85.0	71.0	61.0	41.0	30.0	22.5	16.0	11.0	8.5	5.0

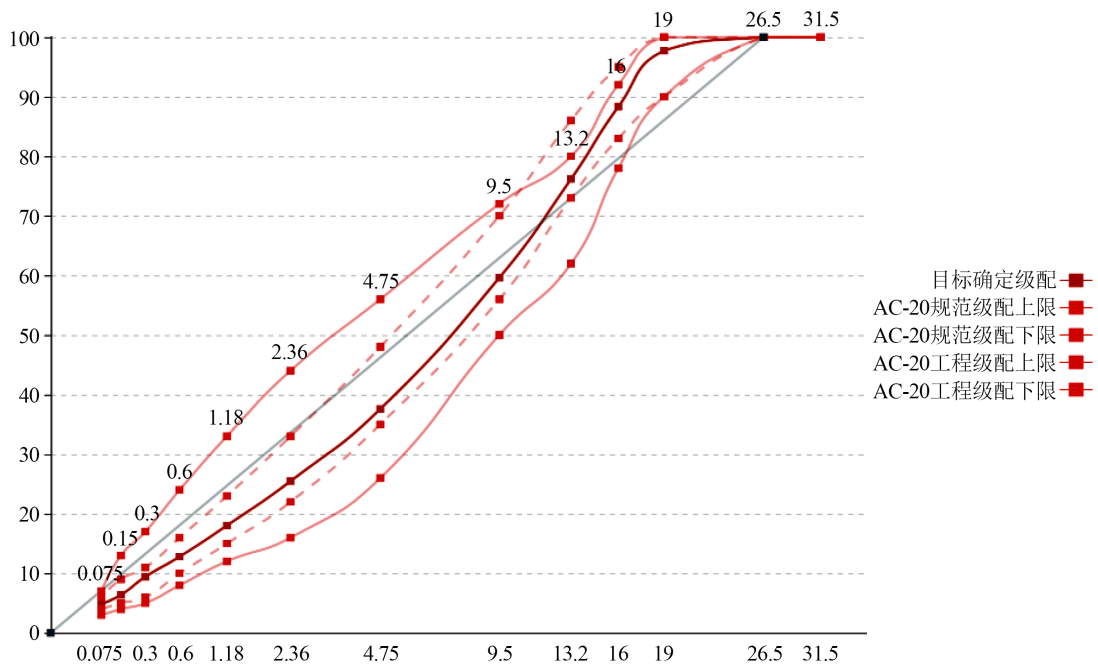


Figure 2. Gradation curve
图 2. 级配曲线图

Table 4. AMPT uniaxial compression dynamic modulus test program
表 4. AMPT 单轴压缩动态模量试验方案

试验参数	试验方案
应变水平	75~125 $\mu\epsilon$, 无围压
试验温度	5°C、15°C、20°C、30°C、45°C、55°C
加载频率	0.1、0.2、0.5、1、2、5、10、20、25 Hz
加载波形	半正矢波
平行试验次数	3 次

Table 5. Four-point bending fatigue test plan of trabecular
表 5. 小梁四点弯曲疲劳试验方案

试验参数	试验方案
应变水平	150、230、400、600
试验条件	15°C, 10 Hz
加载波形	正旋波
平行试验次数	6 次

3. 试验结果分析

3.1. 单轴压缩动态模量

3.1.1. 动态模量与相位角

为了更好地接近道路实际状态的行车情况,对加载频率 10 Hz 条件下的动态模量及相位角进行分析,试验结果如图 3 所示。

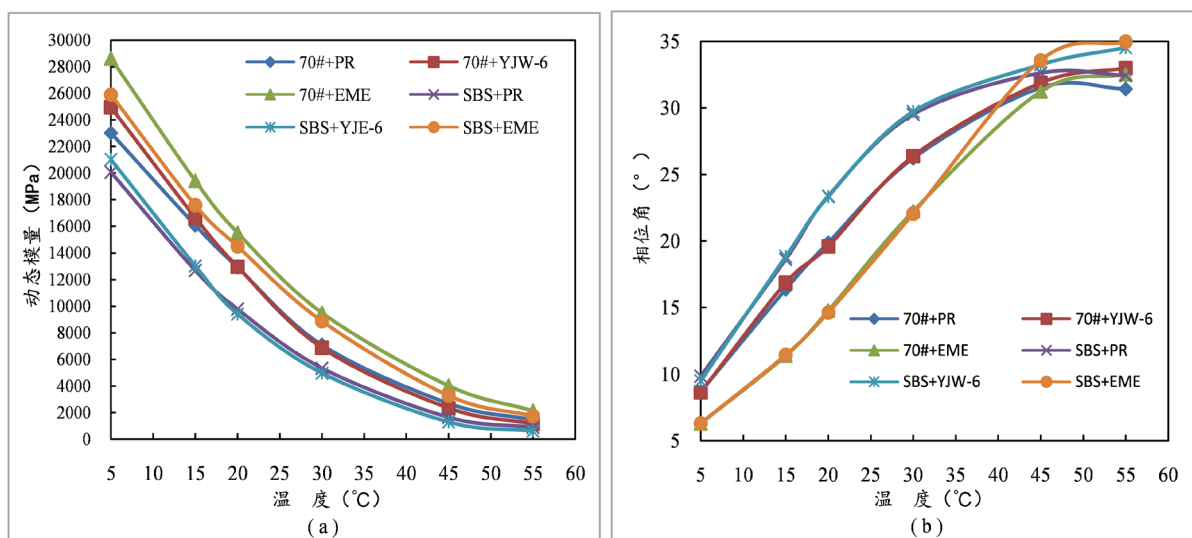


Figure 3. Modulus and phase angle of different additive type high modulus asphalt mixture

图 3. 不同添加剂型高模量沥青混合料模量及相位角

通过图 3 可知, 相同加载频率下, 以上六种高模量沥青混合料的模量和相位角随温度升高变化趋势一致, 动态模量随温度升高不断减小, 相位角随温度升高不断增大。

由图 3(a)动态模量对比曲线可知, 对于同一种沥青材料, 相同试验条件下 EME 型高模量沥青混合料的动态模量高于另外两种混合料, PR Module、YJW-6 型高模量沥青混合料的整体模量曲线相近, 动态模量差别较小。高温环境下, 沥青混合料会渐渐表现出粘塑性, 其粘性成分增加, 如果此时材料的模量较小, 就容易导致沥青路面产生变形, 变形累积就易形成车辙、拥包等路面损坏[14]。由试验结果可知, 高温环境下(45°C)对于 70#沥青, EME 添加剂型高模量沥青混合料的动态模量 4018 MPa 是 YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料 2534 MPa 的 1.59 倍, 是 PR Module 型高模量沥青混合料 2617 MPa 的 1.54 倍, PR Module 型高模量沥青混合料与 YJW-6 型混合料模量比接近 1; 而对于 SBS 改性沥青, 三种添加剂型高模量沥青混合料动态模量比为 2.05:1.03:1, 表明相同试验条件下, EME 添加剂型高模量沥青混合料的抗高温车辙能力更佳, PR Module 和 YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料的抗高温车辙能力接近。

通过图 3(b)相位角可知, 45°C 之前, EME 添加剂型高模量沥青混合料的整体相位角小于其余两种添加剂型高模量沥青混合料, 而 PR Module、YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料的相位角曲线近乎重叠; 45°C 之后(高温环境下), PR Module 型高模量沥青混合料的相位角明显偏小, 表明高温环境下, PR Module 型高模量沥青混合料能保持更好的弹性性能, 对温度变化的敏感性更小。

由图 3 可知, 高模量改性剂采用直投式加入混合料拌和, 在相同试验条件下, 70#基质沥青和 PR Module、YJW-6、EME 三种改性剂拌和的高模量沥青混合料模量要高于采用 SBS 改性沥青与之拌和的, 且相位角还偏低, 表明高模量改性剂在改善 70#基质沥青高温性能及黏弹性能方面的效果明显强于高模量改性剂与 SBS 改性沥青复合的效果。

3.1.2. 动态模量及相位角主曲线

沥青混合料是一种典型的粘、弹性材料, 其性质受温度、荷载作用的影响较大, 通过动态模量分析混合料性质时, 通常要考虑其在不同温度、不同加载频率下的模量和相位角, 但由于室内设备自身原因条件, 要得到在一个荷载或频率较宽范围内的模量值不易实现, 因此根据时温 - 等效原理, 将不同试验温度、加载频率条件下的混合料模量曲线按某一基准温度(20°C)曲线平移建立主曲线, 对六种添加剂型高

模量沥青混合料的高低温性能(低温区为 5℃ 以下, 高温区为 45℃ 以上)进行预测分析, 其模量及相位角主曲线如图 4 所示。

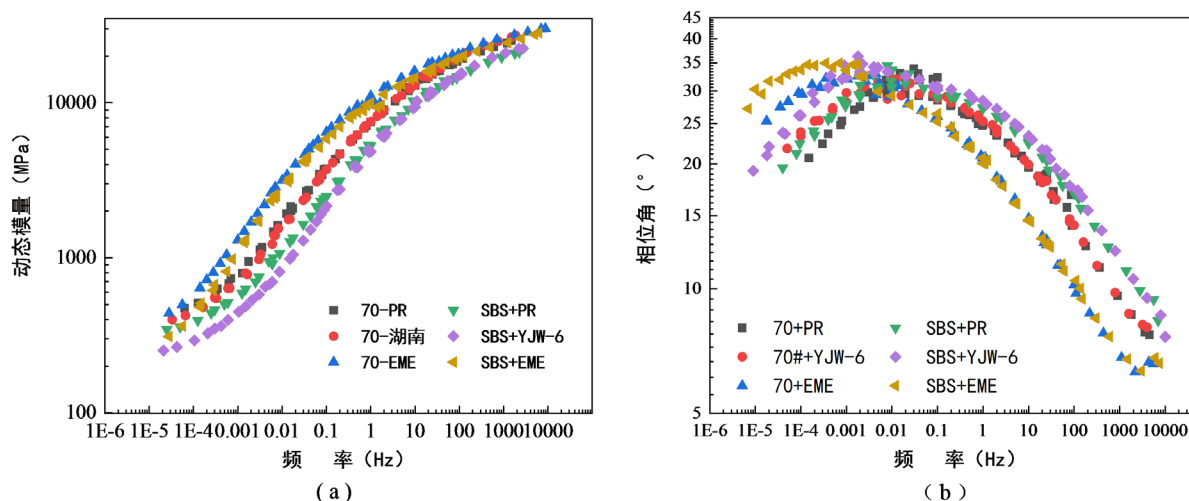


Figure 4. Modulus and phase angle master curve of different additive type high modulus asphalt mixture
图 4. 不同添加剂型高模量沥青混合料模量及相位角主曲线

混合料低频时模量与高温环境相对应, 高频时模量则对应低温环境。高温环境下如果混合料的模量值较大, 就能够有效减小沥青混合料的破坏应变, 提高混合料的抗车辙能力和抗高温变形能力; 低温环境下, 如果混合料的模量值偏大, 就容易导致路面材料内部在较小的变形产生较大的应力, 造成其开裂, 出现低温病害。通过图 3 可以看出, 这六种 AC-20 型高模量沥青混合料的动态模量及相位角主曲线整体变化趋势一致。由图 4(a)可知, 同一种沥青对应的 EME 添加剂型高模量沥青混合料的模量曲线最高, 而 PR Module 和 YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料的模量主曲线相近, 因此, EME 添加剂型高模量沥青混合料的高温抗车辙性能更优, 而 PR Module 与 YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料的高温抗车辙性能相近。

通过图 4(b)对混合料相位角主曲线分析可知, 高温环境下, 同一种沥青材料对应的 PR Module 添加剂型高模量沥青混合料的相位角更小, 表明 PR Module 型高模量添加剂在改善沥青黏弹性能方面效果更佳, 混合料高温时的弹性性能表现更佳, 抗高温变形能力更优。

由图 4 可知, 对于不同沥青材料, 在试验条件相同情况下, 70#基质沥青与高模量添加剂拌和的沥青混合料动态模量主曲线高于 SBS 改性沥青与添加剂拌和的沥青混合料, 且相位角主曲线更低, 表明高模量添加剂在改善 70#基质沥青高温性能及黏弹性能方面效果强于高模量添加剂与 SBS 改性沥青复合的效果, 拌合后沥青混合料的模量及相位角性能更佳。

3.2. 疲劳性能分析

3.2.1. 高模量沥青混合料疲劳曲线

按照表 5 试验方案, 对六种添加剂型高模量沥青混合料进行疲劳试验, 混合料不同应变水平下的疲劳寿命与应变关系如图 5 所示。

由图 5 可知, 这六种添加剂型高模量沥青混合料的疲劳寿命变化趋势一致, 对于同一种沥青材料, 应变水平一定的情况下, EME 型高模量沥青混合料的疲劳寿命最优; PR Module 添加剂型混合料的疲劳寿命略高于 YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料, 但两者的差别较小。

根据新版规范 GB/T 36143-2018 [15]高模量沥青混合料的疲劳寿命要求, 对 230 $\mu\epsilon$ 水平条件下的混

合料疲劳寿命评价, 70#沥青对应的不同添加剂型高模量沥青混合料疲劳寿命 EME 型:PR Module 型:YJW-6 = 1.22:1.06:1; 而对于 SBS 改性沥青, EME 型:PR Module 型:YJW-6 = 1.18:1.04:1, 表明 EME 添加剂型高模量沥青混合料的疲劳寿命最大, 而 PR Module 和 YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料的疲劳寿命相近。

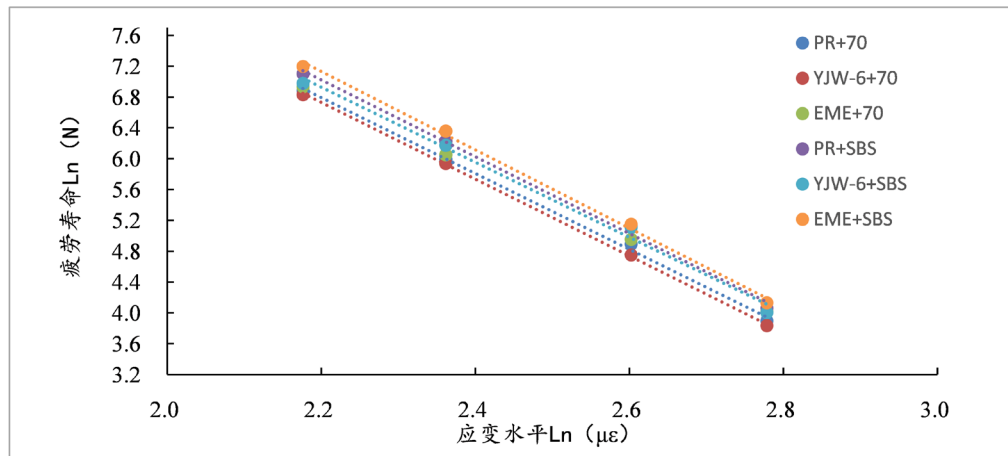


Figure 5. Fatigue curve of different additive type high modulus asphalt mixture
图 5. 不同添加剂型高模量沥青混合料疲劳曲线

3.2.2. 高模量沥青混合料疲劳方程

根据图 4 结果, 建立这六种不同添加剂型高模量沥青混合料的疲劳方程, 公式如下:

$$Lg(N) = A - B \times Lg(\epsilon) \quad (2.1)$$

其中: N ——试验终止时重复荷载作用次数(次);

ϵ ——试验控制应变水平($\mu\epsilon$);

A 、 B ——疲劳方程系数。

由公式得出的这六种高模量沥青混合料疲劳方程见表 6。

Table 6. Fatigue equation of different additive type high modulus asphalt mixture
表 6. 不同添加剂型高模量沥青混合料疲劳方程

混合料类型	疲劳方程	相关系数
PR + 70	$Lg(N) = 17.514 - 4.8764Lg(\epsilon)$	0.9953
YJW-6 + 70	$Lg(N) = 17.38 - 4.8477Lg(\epsilon)$	0.9957
EME + 70	$Lg(N) = 18.11 - 5.0776Lg(\epsilon)$	0.9969
PR + SBS	$Lg(N) = 18.158 - 5.0517Lg(\epsilon)$	0.9988
YJW-6 + SBS	$Lg(N) = 18.058 - 5.0345Lg(\epsilon)$	0.9976
EME + SBS	$Lg(N) = 18.755 - 5.25Lg(\epsilon)$	0.9995

对图 5 疲劳曲线进行线性拟合, 得出混合料疲劳方程相关系数 $R^2 > 0.99$, 相关性较好。方程系数 A 代表图 4 疲劳曲线高低, 值越大表明混合料抗疲劳性能越好, 方程系数 B 代表疲劳曲线斜率; 值越大说明混合料疲劳寿命对于应变水平的变化越敏感。由表 6 可知, 不同添加剂型高模量沥青混合料的抗疲劳性能 EME 型 > PR Module 型 > YJW-6 型, 同样, 对于应变水平变化的敏感性 EME 型 > PR Module 型 >

YJW-6 型。

4. 结论

本文通过对六种添加剂型高模量沥青混合料单轴压缩动态模量和四点弯曲疲劳数据对比分析, 得出以下主要结论:

1) 不同添加剂型的高模量沥青混合料动态模量及相位角依赖温度和加载频率的变化趋势一致, 相同加载频率下, 模量及相位角随着温度的升高呈现出相同的变化规律。

2) 根据时间温度置换原理, 利用非线性最小二乘法建立了不同添加剂型高模量沥青混合料的模量及相位角主曲线, 基于主曲线对混合料高低温性能进行分析, EME 添加剂型高模量沥青混合料的高温抗车辙性能更优, PR Module 和 YJW-6 添加剂型高模量沥青混合料的高温抗车辙性能相近; PR Module 型添加剂在改善沥青黏弹性能方面效果更佳, 混合料高温时的弹性性能表现更佳, 对温度的敏感性变化更低。

3) 相同试验条件下对比分析了高模量添加剂与沥青胶结料的相互作用, 结果显示, 高模量添加剂在改善 70# 基质沥青高温性能和黏弹性能方面的效果明显强于高模量添加剂与 SBS 改性沥青复合的效果, 沥青混合料的模量及相位角更佳。

4) 建立了这六种添加剂型高模量沥青混合料的疲劳曲线和疲劳方程, 基于模型对混合料的疲劳寿命、抗疲劳性能及对应变水平变化的敏感性进行分析评价, EME 型混合料的疲劳寿命最好; PR Module 型和 YJW-6 型高模量沥青混合料的疲劳寿命相近, 混合料的抗疲劳性能及对于应变水平变化的敏感性 EME 添加剂型 > PR Module 型 > YJW-6。

参考文献

- [1] 马峰, 傅珍, 编译. 硬质沥青和高模量沥青混凝土在法国的应用[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 221-223.
- [2] Xiao, F., Ma, D., Wang, J., et al. (2019) Impacts of High Modulus Agent and Anti-Rutting Agent on Performances of Airfield Asphalt Pavement. *Construction and Building Materials*, **204**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.138>
- [3] Cao, W., Liu, S., Li, Y. and Xue, Z. (2016) Rutting-Resistance Performance of SBS and Anti-Rutting Additive Composite-Modified Asphalt-Concrete Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, **44**, 921-929.
- [4] 彭煜. 高模量沥青混合料专用硬质沥青的研制与应用[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2014.
- [5] 法国 RST“沥青混合料设计”工作组. 法国沥青混合料设计指南[R]. 南京: 江苏省交通科学研究院, 2010.
- [6] 王海阳, 李宜锋, 郑木莲. 不同添加剂下高模量沥青混合料路用性能研究[J]. 中国科技论文, 2019, 14(9): 1004-1009.
- [7] 王晓燕, 韦金城, 等. 欧美沥青混合料设计方法与我国的工程实践[R]. 济南: 山东省交通科学研究院, 2015.
- [8] 屈新龙, 文龙. 高模量改性沥青混合料路用性能试验研究[J]. 施工技术, 2019, 48(4): 133-136.
- [9] 高模量沥青混凝土应用技术研究[R]. 沈阳: 交通部西部交通建设科技项目. 辽宁省交通科学研究院, 2007: 6-12.
- [10] 扈少华. 添加剂型高模量沥青混合料特性及应用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- [11] 夏选朋, 张若楠, 付宏伟. 高模量沥青混合料的特性和新发展[J]. 中外公路, 2005, 25(2): 123-127.
- [12] 李志厚, 李志刚, 张航, 等. 高模量沥青混凝土在国内外的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(1): 51-56.
- [13] 王锬, 郝培文. 高模量沥青及其混合料路用性能研究[J]. 公路工程, 2015, 30(3): 5-8.
- [14] 黄优. 沥青混合料梯形梁动态模量试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [15] 李豪, 陈晓佳, 熊良铨, 黄婉利, 贾渝, 等. GB/T36143-2018 道路用高模量抗疲劳沥青混合料[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.