

文章编号:1671-8879(2015)04-0032-09

PR-Module 改性沥青混合料力学性能

赵毅^{1,2}, 梁乃兴¹, 秦旻³, 李中秋², 郑嘉⁴

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 河北交通职业技术学院 土木工程系, 河北 石家庄 050091;
3. 重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074; 4. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要:为了确定 PR-Module 改性沥青混合料的力学性能和制备工艺参数,以 SK-70[#] 为基质沥青,选用 PR-Module 外掺剂制备改性沥青混合料,通过马歇尔试验、劈裂试验、静态抗压回弹模量试验和动态模量试验,研究 PR-Module 改性沥青混合料的制备工艺参数和力学性能。研究结果表明:掺入 PR-Module 改性剂后,PR-Module 改性沥青混合料的制备工艺参数比未掺 PR-Module 的普通沥青混合料有较大变化;随着 PR-Module 掺量的增大,沥青混合料的劈裂强度先增大后减小;PR-Module 外掺剂能明显提高沥青混合料的疲劳寿命和静态抗压回弹模量;在相同试验条件下,PR-Module 改性沥青混合料比未掺 PR-Module 的普通沥青混合料的动态模量大、相位角小;依据 Sigmoidal 函数方程,建立了参考温度为 20 ℃ 时 PR-Module 改性沥青混合料的动态模量主曲线,并与静态抗压回弹模量进行了对比分析,得出在相同温度下,静态抗压回弹模量与动态模量相对应的加载频率较小,大约为 0.03~0.07 Hz。

关键词:道路工程;PR-Module 改性沥青混合料;劈裂强度;疲劳寿命;静态抗压回弹模量;动态模量;主曲线

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Mechanical properties of PR-Module modified asphalt mixture

ZHAO Yi^{1,2}, LIANG Nai-xing¹, QIN Min³, LI Zhong-qiu², ZHENG Jia⁴

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Department of Civil Engineering, Hebei Jiaotong Vocational & Technical College, Shijiazhuang 050091, Hebei, China; 3. School of Economic and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
4. Sichun Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The modified asphalt mixture was made by taking SK-70[#] as the matrix asphalt and PR-Module as the additive, and the preparation process parameters and mechanical properties of PR-Module modified asphalt mixture were studied based on the Marshall test, the splitting test, the static modulus test and the dynamic modulus test. The results show that with the incorporation of PR-module modifier, the preparation process parameters of PR-Module modified asphalt mixture are clearly different from undoped PR-Module common asphalt mixture; With the increase of PR-Module content, splitting strength of the asphalt mixture increases first and then decreases; PR-Module additive can obviously improve fatigue life and the static compressive resilient modulus of asphalt mixture; under the same experimental condition, there will be higher

收稿日期:2015-03-25

基金项目:河北省高等学校科学研究青年基金项目(QN20131127);江西省交通运输厅重点科技项目(2012c0025)

作者简介:赵毅(1980-),男,河北保定人,河北交通职业技术学院讲师,重庆交通大学工学博士研究生,E-mail:zhaoyi980@163.com。

dynamic modulus and smaller phase angle using PR-Module modified asphalt mixture than using undoped PR-Module common asphalt mixture. According to the Sigmoidal equation, the dynamic modulus master curve for PR-Module modified asphalt mixture is established under 20 ℃ of the reference temperature, and compared with the static/modulus. Under the same temperature, static compressive resilient modulus corresponding to dynamic modulus is obtained at low frequencies, ranging from 0.03 Hz to 0.07 Hz. 8 tabs, 9 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; PR-Module modified asphalt mixture; splitting strength; fatigue life; static compressive resilient modulus; dynamic modulus; master curve

0 引 言

随着中国公路交通运输逐渐呈现大流量、重轴载、渠化交通的趋势,沥青路面严重的车辙、疲劳破坏等病害现象越来越明显^[1-2]。因此,如何提高沥青混合料的承载能力,改善路面结构的抗永久变形性能,一直是广大研究人员普遍关注的问题^[3-4]。

高模量沥青混合料(HMAC)具有良好的高温稳定性和抗疲劳性能,较高的动态模量,较强的抗车辙性能,在解决沥青路面永久变形以及改善路面疲劳破坏等方面均具有明显优势^[5]。文献^[6]表明,早在 20 世纪 80 年代,国外已经开始研究高模量沥青混合料,并取得丰富的研究成果。特别是法国,更是首次提出高模量沥青混合料的概念,而且在大量实际经验的基础上,制定了高模量沥青混合料的技术标准和设计规范。虽然中国在实际公路工程中也应用过高模量沥青混合料,但结合中国现有的试验方法和技术标准对高模量沥青混合料的制备工艺参数和力学性能仍缺少深入系统研究^[7]。为此,本文在总结国内外研究成果的基础上,以 SK-70[#] 石油沥青为基质沥青,选用 PR-Module 外掺剂制备高模量改性沥青混合料,通过一系列试验研究评价 PR-Module 改性沥青混合料的力学性能;依据时温等效原理,采用沥青混合料体积特性指标和胶结料剪切模量极值来估算动态模量极大值的方法,建立 PR-Module 改性沥青混合料动态模量主曲线,并与静态模量进行对比分析,从而为 PR-Module 改性沥青混合料路面结构设计和混合料力学性能评价提供参考。

1 试验材料

试验采用韩国生产的 SK-70[#] 沥青为基质沥青,按《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)检测,结果均符合技术要求。采用石灰岩碎石作为粗集料,机制砂作为细集料,磨细的石灰岩作为

矿粉,其各项技术性能指标均符合规范要求。考虑到充分发挥高模量改性沥青混合料的高温抗车辙性能,设计级配选用骨架嵌挤结构的粗粒式级配 AC-25 型,即粗集料公称最大粒径为 26.5 mm,矿料配合比设计如图 1 所示。

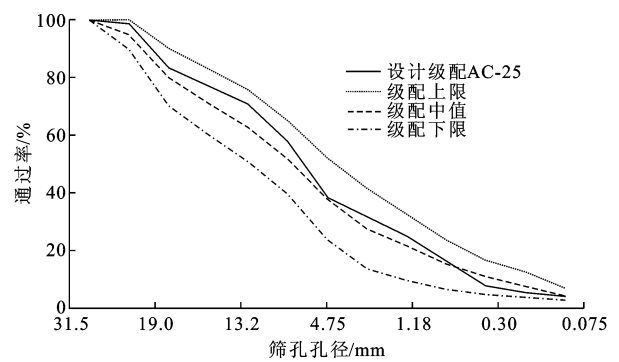


图 1 AC-25 PR-Module 改性沥青混合料矿料级配曲线
Fig. 1 Mineral aggregate gradation curves of PR-Module modified asphalt mixture AC-25

采用由法国路面材料实业公司 (PR INDUSTRIE) 研发并生产的 PR-Module 外掺剂,如下页图 2 所示,其技术性能指标见表 1。采用 PR-Module 掺量(质量比)分别为 0.5%、0.6%、0.7% 的 PR-Module 改性沥青混合料 (PR-Module modified asphalt mixture, PMAM) 以及未掺 PR-Module 改性剂的普通沥青混合料 (AC-25) 进行相关试验,分别表示为 PMAM-0.5、PMAM-0.6、PMAM-0.7 和 AC-0。PR-Module 改性沥青混合料的制备工艺流程如下页图 3 所示。

表 1 PR-Module 技术性能指标	
Tab. 1 Technical performance indexes of PR-Module	
性质	数值
颜色	灰色
直径/mm	5
密度/(g·cm ⁻³)	0.930~0.965
熔点/℃	175



图 2 PR-Module 外掺剂
Fig. 2 PR-Module additive

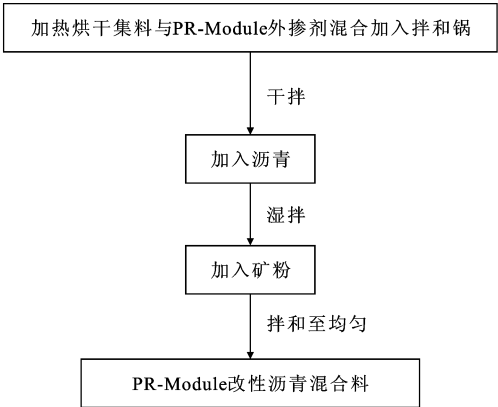


图 3 PR-Module 改性沥青混合料制备工艺流程
Fig. 3 Preparation process of PR-Module modified asphalt mixture

2 试验研究

2.1 马歇尔试验

PR-Module 外掺剂属于高模量改性剂,对于沥青混合料的拌和性能及击实性能均会产生影响,因此有必要对改性沥青混合料关键设计参数进行调整。本文采用马歇尔试验,经过多次试验分析确定了 PR-Module 改性沥青混合料的制备参数,并与未掺 PR-Module 改性剂的普通沥青混合料进行了对比,如表 2 所示。PMAM-0.5、PMAM-0.6、PMAM-0.7 和 AC-0 的体积特性指标如表 3 所示。

表 3 PR-Module 改性沥青混合料马歇尔体积特性指标

Tab. 3 Marshall volume characteristic parameters of PR-Module modified asphalt mixture								
PR-Module 掺量/%	最佳沥青用量/%	空隙率/%	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	矿料间空隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/0.1 mm	马歇尔模数/(kN·mm ⁻¹)
0	4.0	5.0	2.446	13.98	64.2	10.44	2.45	4.26
0.5	4.1	4.6	2.454	13.86	66.8	16.47	3.10	5.31
0.6	4.2	4.4	2.461	13.64	67.7	18.31	3.15	5.81
0.7	4.3	4.2	2.460	13.57	69.0	19.90	3.30	6.03

表 2 制备参数对比分析

Tab. 2 Comparative analysis of preparation parameters

参数名称	PR-Module 改性沥青混合料	未掺 PR-Module 的普通沥青混合料
最佳干拌时间/s	20	5~10
最佳拌和温度/℃	175	140~160
最佳湿拌时间/s	200	180
最佳击实温度/℃	162~163	120~150

由表 2 可知,PR-Module 改性沥青混合料的制备工艺参数比未掺 PR-Module 改性剂的普通沥青混合料在最佳干拌时间、最佳拌和温度、最佳湿拌时间、最佳击实温度 4 个方面分别延长或提高了约 10 s、25 ℃、20 s、27 ℃,制备工艺参数的确定进一步保证了 PR-Module 改性沥青混合料的生产质量。

由表 3 可知,AC-25 级配类型的沥青混合料掺入 PR-Module 改性剂后,其最佳沥青用量比未掺 PR-Module 改性剂的普通沥青混合料大约能提高 0.1%~0.3%,且随着 PR-Module 掺量的增加,最佳沥青用量、饱和度、稳定度等均呈增大趋势,相反,矿料间隙率、空隙率等均呈减小趋势。

2.2 劈裂试验

2.2.1 劈裂强度试验

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),对沥青混合料进行劈裂强度试验。由于本试验测得的劈裂强度会用于下面的劈裂疲劳试验,因此为了便于计算分析,劈裂试验的试件统一为直径(101.6±2) mm、厚度(40±2) mm 的圆柱体。劈裂强度试验结果见下页图 4。

由图 4 可知,在 PR-Module 掺量相同时,随着温度的增加,沥青混合料的劈裂强度均呈降低趋势;在试验温度相同时,随着 PR-Module 掺量的增大,沥青混合料的劈裂强度先增大后减小。由此说明,PR-Module 外掺剂的用量达到一定程度后对劈裂强度的提升作用不再显著,存在最佳 PR-Module 掺量。根据劈裂强度试验结果,结合法国路面材料实业公司(PR INDUSTRIE)推荐的外掺剂用量为沥青混合料的 0.6%~0.8%,本文重点研究 PR-Mod-

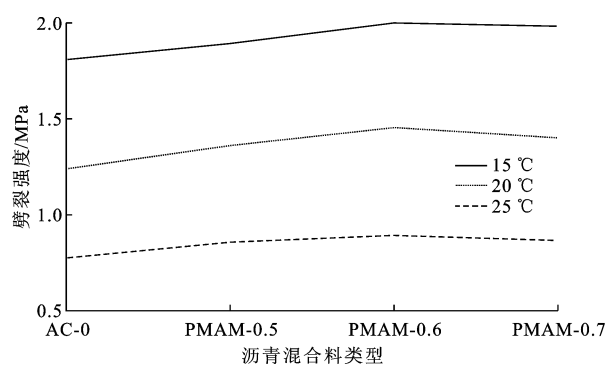


图 4 沥青混合料劈裂强度试验结果

Fig. 4 Splitting strength test results of asphalt mixture
ule 外掺剂掺量为 0.7% 及以下的高模量改性沥青混合料。

2.2.2 劈裂疲劳试验

劈裂疲劳试验, 又称间接拉伸疲劳试验。加载频率采用 10 Hz, 此时加载时间为 0.016 s, 大致对

应于沥青路面的行车速度 60~65 km/h。加载控制采用应力控制的方式。荷载波形采用半正弦波。为了与路面实际情况更接近, 在相邻的 2 个波形之间插入一段 0.4 s 的间歇时间。试验前需要预压, 预压荷载为最大荷载的 2%。本文设定疲劳破坏的约束条件为竖向变形大于等于 5 mm, 即竖向变形达到 5 mm 时, 试验仪器自动停机, 试验结束。根据规范采用击实法成型圆柱体试件, 尺寸大小与劈裂强度试验相同, 即直径 101.6 mm、厚度 40 mm。试验设备采用英国 Cooper 公司的气动伺服沥青材料试验机。PR-Module 改性沥青混合料劈裂疲劳试验结果如表 4 所示。在不同应力比时, 不同 PR-Module 掺量的改性沥青混合料相对于未掺 PR-Module 的普通沥青混合料 (AC-0) 疲劳寿命增长百分率如图 5 所示。

由表 4 可知, 相同温度下随着应力和应力比的

表 4 劈裂疲劳试验

Tab. 4 Splitting fatigue test results

混合料类型	15 °C			20 °C			25 °C		
	应力比	应力/MPa	疲劳寿命/次	应力比	应力/MPa	疲劳寿命/次	应力比	应力/MPa	疲劳寿命/次
AC-0	0.2	0.360	153 063	0.2	0.248	87 204	0.2	0.156	38 406
	0.3	0.540	7 172	0.3	0.372	6 408	0.3	0.234	4 963
	0.4	0.720	2 936	0.4	0.496	2 001	0.4	0.312	1 463
PMAM-0.5	0.2	0.378	209 574	0.2	0.272	135 768	0.2	0.172	108 654
	0.3	0.567	23 435	0.3	0.408	19 647	0.3	0.258	12 678
	0.4	0.756	9 064	0.4	0.544	7 643	0.4	0.344	5 687
PMAM-0.6	0.2	0.398	235 475	0.2	0.290	158 030	0.2	0.178	125 478
	0.3	0.597	26 940	0.3	0.435	23 657	0.3	0.267	15 987
	0.4	0.796	11 056	0.4	0.580	8 956	0.4	0.356	7 537
PMAM-0.7	0.2	0.396	250 835	0.2	0.280	170 943	0.2	0.174	137 934
	0.3	0.594	28 462	0.3	0.420	25 879	0.3	0.261	18 863
	0.4	0.792	13 577	0.4	0.560	9 684	0.4	0.348	8 525

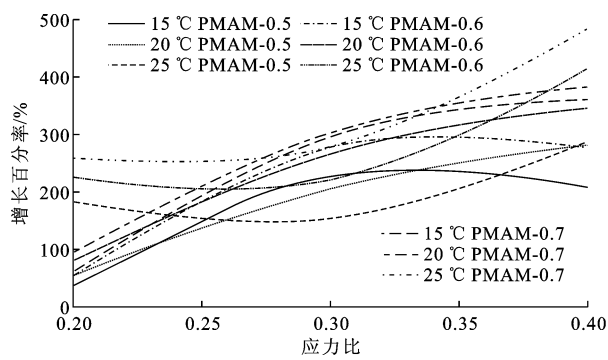


图 5 不同 PR-Module 掺量的改性沥青混合料
疲劳寿命增长百分率

增大, AC-0、PMAM-0.5、PMAM-0.6、PMAM-0.7 这 4 种沥青混合料的疲劳寿命均逐渐减小, 其减小程度逐渐变大; 在相同应力比下, 随着温度的增高, 4 种沥青混合料的疲劳寿命均逐渐减小。

由图 5 可知, 在 15 °C 和 20 °C 时, 随着应力比的增大, 不同 PR-Module 掺量改性沥青混合料的疲劳寿命增长百分率是逐渐增大的, 而在 25 °C 时却是先减小后增大。同时, 在温度和应力比相同时, 随着改性剂 PR-Module 的掺入, 沥青混合料的疲劳寿命得到较大幅度的增加, 例如 PMAM-0.7 比 AC-0 的疲劳寿命增长百分率高 259%~483%。总之, PR-Module 外掺剂能明显改善沥青混合料的疲劳性能。

Fig. 5 Fatigue life growth percentages of modified asphalt mixture of different PR-Module contents

2.3 静态抗压回弹模量试验

静态抗压回弹模量是中国现行沥青混合料路面结构设计中的重要参数之一。本文选取圆柱体单轴压缩法测试 PR-Module 改性沥青混合料的静态抗压回弹模量。静态抗压回弹模量测试方法简单,但存在明显缺陷,即静态抗压回弹模量试验采用统一的温度和加载速率,无法反映复杂的温度变化和荷载作用频率对沥青混合料力学性质的影响。

依据试验规程制作混合料试件,尺寸大小符合直径 100 ± 2.0 mm、高度 100 ± 2.0 mm 的要求。试验温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,加载速率为 2 mm/min ,试验结果如表 5 所示。

表 5 静态抗压回弹模量试验结果

Tab. 5 Static compressive resilient modulus test results

级配类型	PR-Module 掺量/%	抗压强度/MPa	回弹模量/MPa
AC-25	0	3.218	1 246
	0.5	3.862	1 625
	0.6	3.993	1 780
	0.7	4.211	1 864

由表 5 可知,PR-Module 外掺剂对沥青混合料的静态抗压回弹模量有显著影响,而且随着外掺剂掺量的逐渐提高,沥青混合料的静态抗压回弹模量呈逐渐增加的趋势。例如 PMAM-0.7 的静态抗压回弹模量比 AC-0 增长幅度高 49%。试验结果表明,PR-Module 外掺剂可以明显提高沥青混合料的静态抗压回弹模量。

2.4 动态模量试验

本试验选用 SHRP 推荐的沥青混合料简单性能试验仪(SPT)进行动态模量试验^[8]。采用常应变控制方式,加载波形为正弦波,应力水平采用 $(50\sim150)\times10^{-6}$ 微应变下对应的应力。轴向计量长度为 70 mm。试件采用旋转压实仪压实成型,试件尺寸为直径 150 mm、高 170 mm;冷却后钻芯取样,尺寸为直径 100 mm、高 150 mm。PR-Module 改性沥青混合料动态模量试验结果如下页表 6 所示。下面针对动态模量试验结果进行分析。

(1)PR-Module 掺量的影响

由表 6 可知,在相同试验温度和加载频率下,PR-Module 改性沥青混合料比未掺 PR-Module 改性剂的普通沥青混合料的动态模量要高,特别是高温时,即 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PMAM-0.5、PMAM-0.6、PMAM-0.7 的动态模量比 AC-0 约提高 13.6%、20.9% 和 31.3%;在相同试验条件下,随着 PR-Module 掺量

的提高,动态模量也逐渐增加,PMAM-0.7 在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的动态模量分别比 PMAM-0.5 约提高 8.6%、7.7%、36.1% 和 15.8%。由于 PMAM-0.7 动态模量的提高幅度无论是比 AC-0,还是比 PMAM-0.5 均较大,因此 PMAM-0.7 抵抗路面永久变形的能力较好。

相位角 φ 可以评价沥青混合料的粘性特征。相位角越大,材料更多表现为粘性特征,反之材料表现为弹性特征^[9]。动态模量 E^* 在数值上等于复数模量的模,可描述材料抵抗变形的能力。复数模量可用相位角表示, $E^* = |E^*| \cos(\varphi) + i|E^*| \sin(\varphi)$ 。由表 6 可知:在相同温度和加载频率下,随着 PR-Module 掺量的增大,PR-Module 改性沥青混合料的相位角逐渐减小,其粘性特征逐渐减弱,说明掺加 PR-Module 后的改性沥青混合料提高了其弹性性能。同时,随着温度的增大,PR-Module 改性剂降低沥青混合料相位角的程度是减小的。由此可知,高温状态下,PR-Module 改性沥青混合料中基质沥青本身的粘性特征逐渐表现突出。

(2)温度和加载频率的影响

由表 6 可知:温度从 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,动态模量降低幅度高达 88.6% 左右,其中 AC-0 降低幅度最大,达到 89.9%,说明 AC-0 的温度敏感性比 PMAM 系列大,弹性较差;特别是 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PMAM-0.7 的动态模量比 AC-0 约能提高 53.0% (0.1 Hz) \sim 23.3% (25 Hz)。

随着温度的增大,AC-0 与 PMAM 系列的相位角总体均呈增大趋势,其粘性特征逐渐增强。在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着加载频率的增大,PR-Module 改性沥青混合料的相位角逐渐减小;在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着加载频率的增大,PR-Module 改性沥青混合料的相位角呈现先增大后减小的变化趋势,其原因是在低温条件下受到高频荷载作用时,沥青胶结特性对混合料性能的影响更明显,但在高温条件下受到低频荷载作用时,沥青的胶结影响变小,嵌挤骨架对沥青混合料的影响起主导作用,而骨料的相位角相对较小,因此沥青混合料的相位角此时会下降。

在相同试验温度时,PR-Module 改性沥青混合料与未掺入 PR-Module 的普通沥青混合料的动态模量均随加载频率的增大而增大。

综上所述,PR-Module 改性沥青混合料与未掺 PR-Module 的普通沥青混合料的动态模量和相位角的变化趋势是一致的,即随着温度的增高或加载频率的降低,动态模量逐渐减小,相位角逐渐增大。

表 6 动态模量试验结果

Tab. 6 Dynamic modulus test results

温度/℃	加载频率/Hz	AC-0		PMAM-0.5		PMAM-0.6		PMAM-0.7	
		动态模量/MPa	相位角/(°)	动态模量/MPa	相位角/(°)	动态模量/MPa	相位角/(°)	动态模量/MPa	相位角/(°)
10	25.0	17 702	12.94	17 984	11.92	18 775	10.86	19 544	10.27
10	20.0	17 336	13.33	17 444	12.28	17 987	11.60	18 688	10.98
10	10.0	15 820	14.99	15 872	13.88	16 251	13.20	16 965	12.83
10	5.0	14 258	16.79	14 392	15.64	14 564	14.93	15 336	14.51
10	2.0	12 255	19.40	12 384	18.25	12 411	17.47	13 232	16.78
10	1.0	10 719	21.33	10 812	20.19	10 945	19.38	11 670	18.53
10	0.5	9 234	23.38	9 306	22.15	9 524	21.37	10 171	20.31
10	0.2	7 416	26.12	7 456	24.77	7 754	24.08	8 279	22.92
10	0.1	6 196	28.27	6 223	26.50	6 556	25.81	7 033	24.34
20	25.0	11 109	21.94	11 652	20.01	11 709	19.51	12 561	18.73
20	20.0	10 648	21.89	11 304	20.12	11 443	19.44	12 014	18.58
20	10.0	9 149	23.98	9 825	22.34	9 940	21.96	10 315	21.22
20	5.0	7 696	26.01	8 368	24.41	8 498	24.07	8 763	23.15
20	2.0	5 921	28.66	6 543	27.07	6 732	26.62	6 900	25.73
20	1.0	4 723	30.29	5 279	28.82	5 517	28.27	5 634	27.46
20	0.5	3 678	31.57	4 155	30.29	4 417	29.71	4 510	28.91
20	0.2	2 597	32.52	2 964	31.47	3 216	31.08	3 296	30.35
20	0.1	1 981	32.63	2 270	31.50	2 526	31.19	2 583	30.58
30	25.0	6 131	33.05	6 416	29.85	6 605	28.74	7 560	27.57
30	20.0	5 833	30.27	5 929	29.02	6 295	27.96	7 271	26.69
30	10.0	4 610	31.32	4 694	30.54	5 060	29.59	5 969	28.46
30	5.0	3 552	32.23	3 603	31.63	3 992	30.74	4 776	29.84
30	2.0	2 401	32.84	2 478	32.38	2 836	31.72	3 441	31.18
30	1.0	1 738	33.13	1 808	32.87	2 128	32.11	2 616	31.78
30	0.5	1 303	32.64	1 349	32.32	1 611	32.00	1 987	31.62
30	0.2	900	31.93	931	31.43	1 123	31.03	1 377	30.40
30	0.1	682	31.90	709	30.91	852	30.24	1 038	29.27
40	25.0	2 849	35.46	3 038	35.12	3 423	34.59	3 456	33.98
40	20.0	2 617	33.78	2 832	33.55	3 094	33.17	3 206	32.68
40	10.0	1 901	34.11	2 102	33.66	2 224	33.31	2 406	32.85
40	5.0	1 361	34.48	1 541	33.62	1 609	33.18	1 775	32.85
40	2.0	878	34.53	1 016	33.12	1 061	32.67	1 178	32.38
40	1.0	598	35.38	700	33.53	752	33.22	829	32.74
40	0.5	460	33.20	538	31.93	569	31.42	633	30.72
40	0.2	334	31.02	389	30.14	412	29.50	455	28.58
40	0.1	267	29.51	316	29.16	323	28.43	368	27.41

3 时温等效下动态模量主曲线

粘弹性材料的动态模量主曲线通常运用非线性最小二乘法通过 S 型函数(西格摩德(Sigmoidal)函数)进行数值拟合得到,从而建立动态模量与加载频率的关系,即

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

(1)

式中: $|E^*|$ 为动态模量(MPa); ω_r 为参考温度下的频率,也称缩减频率(Hz); δ 为动态模量值极小值; $\delta + \alpha$ 为动态模量极大值; β, γ 为描述 S 型函数形状的参数。

将不同温度下的动态模量平移形成主曲线,关键在于求出时间-温度平移因子 $a(T)$ 。时间-温度平移因子代表了各温度下的动态模量曲线到参考温

度下主曲线的平移距离。缩减频率、加载频率与平移因子的关系式为

$$\omega_r = \omega a(T) \text{ 或}$$
$$\lg(\omega_r) = \lg(\omega) + \lg[a(T)] \tag{2}$$

式中: ω 为加载频率(Hz); $a(T)$ 为温度 T 下的平移因子。

3.1 动态模量主曲线的拟合过程

本文采用不同于 AASHTO TP62—03^[10] 的另外一种建立动态模量主曲线的方法,即基于沥青混合料矿料间隙率 VMA 和沥青填隙率(沥青饱和度) VFA 确定动态模量主曲线的方法^[11-12]。

根据 Christensen 等在 SHRP 计划中的研究结果^[13],通过 Hirsch 模型可以合理地估计模量的极大值,并在更小的温度范围内将测试数据进行拟合,从而建立起动态模量主曲线。计算公式为

$$|E^*|_{\max} = P_c \left[4\,200\,000 \left(1 - \frac{I_{VMA}}{100} \right) + \frac{435\,000 \frac{I_{VFA} I_{VMA}}{10\,000} + 1 - P_c}{(1 - I_{VMA}/100)/4\,200\,000 + I_{VMA}/(435\,000 I_{VFA})} \right] \tag{3}$$

$$P_c = \frac{(20 + 435\,000 I_{VFA}/I_{VMA})^{0.58}}{650 + (435\,000 I_{VFA}/I_{VMA})^{0.58}} \tag{4}$$

式中: $|E^*|_{\max}$ 为最大极限模量(psi,1 MPa = 145 psi); I_{VMA} 为矿料间隙率计算参数(‰); I_{VFA} 为沥青填隙率计算参数(‰)。

根据表 3 中 PR-Module 改性沥青混合料的 VMA 和 VFA 值,采用式(3)、式(4)计算最大极限模量,并取对数作为 Max;AC-0、PMAM-0.5、PMAM-0.6、PMAM-0.7 的 Max 分别为 4.366、4.369、4.371、4.372。

本文采用阿伦尼斯(arrhenius)方程计算缩减频率^[14],有

$$\lg(\omega_r) = \lg(\omega) + \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \cdot \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \tag{5}$$

式中: T_r 为参考温度(℃); T 为试验温度(℃); ΔE_a 为拟合系数。

主曲线方程采用式(1),将式(5)代入式(1),主曲线方程可表示为

$$\lg(E^*) = \delta + (\text{Max} - \delta)/(1 + e^{\beta + \gamma(\lg(\omega) + \frac{\Delta E_a}{19.147\,14}(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15}))}) \tag{6}$$

将式(2)和式(5)联立,各个温度下的平移因子

可表示为

$$\lg[a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \cdot \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_r + 273.15} \right) \tag{7}$$

将前面计算的 Max 和选定的参考温度 $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 代入式(6)。本文利用 lstop1.5 软件数值拟合在不同温度和频率条件下,试验动态模量的对数值与式(6)预估的动态模量对数值之平方误差的总和最小确定拟合参数。

3.2 动态模量主曲线的拟合结果

依据上述时温转换原理,Sigmoidal 主曲线方程参数的拟合结果如表 7 所示。

表 7 Sigmoidal 主曲线方程参数拟合结果

Tab. 7 Fitting results of Sigmoidal master curve equation parameters

混合料类型	δ	β	γ	ΔE_a
AC-0	1.798 486	-1.042 445	-0.705 546	184 205.37
PMAM-0.5	1.927 078	-1.018 416	-0.721 260	182 861.74
PMAM-0.6	1.767 683	-1.167 881	-0.672 184	186 372.73
PMAM-0.7	1.820 587	-1.222 279	-0.678 271	186 422.58
R		S_e/S_y	R^2	
0.999 999 999 993 031		0.000 012	0.999 999 999 878 934	
0.999 999 999 993 232		0.000 010	0.999 999 999 909 174	
0.999 999 999 994 656		0.000 009	0.999 999 999 926 791	
0.999 999 999 990 454		0.000 015	0.999 999 999 800 496	

由表 7 拟合结果可知,其相关系数 R 接近于 1,表明相关密切;动态模量每级试验结果对数值的标准差 S_y 与试验对数值和预估对数值之差的平方标准差 S_e 的比值均小于 0.05,判定系数 R^2 均大于 0.99,表明其拟合效果良好。将表 7 中主曲线方程的拟合参数 ΔE_a 代入式(7),即可求出 $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时不同温度的平移因子,如表 8 所示。

表 8 不同温度的平移因子

Tab. 8 Shift factor under different temperatures

混合料类型	$\lg[a(10)]$	$\lg[a(20)]$	$\lg[a(30)]$	$\lg[a(40)]$
AC-0	1.159 023	0	-1.082 557	-2.095 975
PMAM-0.5	1.150 568	0	-1.074 661	-2.080 686
PMAM-0.6	1.172 660	0	-1.095 295	-2.120 636
PMAM-0.7	1.172 973	0	-1.095 588	-2.121 203

3.3 动态模量与静态抗压回弹模量对比分析

根据表 8 中不同温度的平移因子,可建立参考温度 $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时 AC-0、PMAM-0.5、PMAM-0.6、PMAM-0.7 的动态模量主曲线,将 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的动态模量主曲线和表 5 中 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的静态抗压回弹模量绘于下页图 6~图 9 中。由于静态抗压回弹模量没有考

考虑加载频率的影响,故在图中为一条水平直线^[15]。

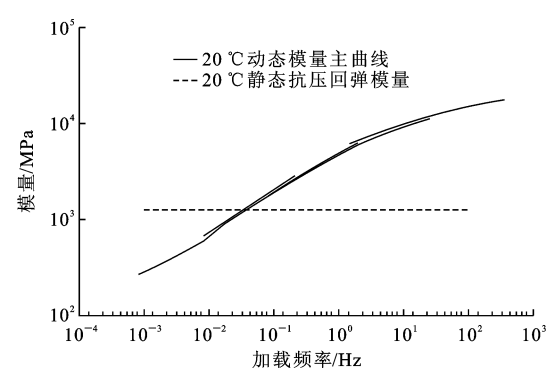


图 6 20 °C AC-0 动态模量主曲线及静态抗压回弹模量
Fig. 6 Dynamic modulus master curve and static modulus with AC-0 at 20 °C

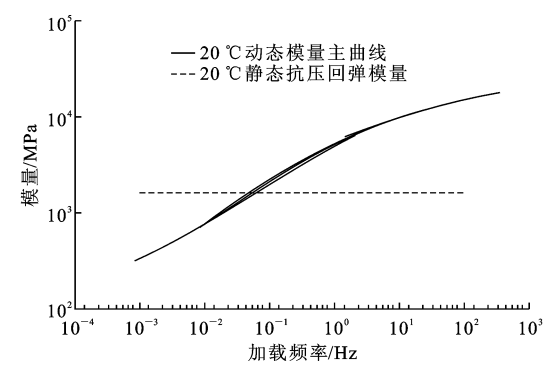


图 7 20 °C PMAM-0.5 动态模量主曲线及静态抗压回弹模量
Fig. 7 Dynamic modulus master curve and static modulus with PMAM-0.5 at 20 °C

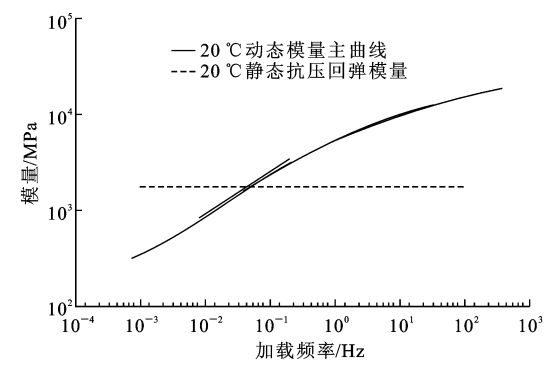


图 8 20 °C PMAM-0.6 动态模量主曲线及静态抗压回弹模量
Fig. 8 Dynamic modulus master curve and static modulus with PMAM-0.6 at 20 °C

由图 6~图 9 可得如下结论。

(1) PR-Module 改性沥青混合料与未掺 PR-Module 的普通沥青混合料的动态模量主曲线有着类似的变化规律,即均是随着加载频率的增大,动态模量增加。

(2) 根据动态模量主曲线能够预测加载频率很高或者很低时的动态模量。

(3) 根据上述方法,也可计算出其他参考温度下

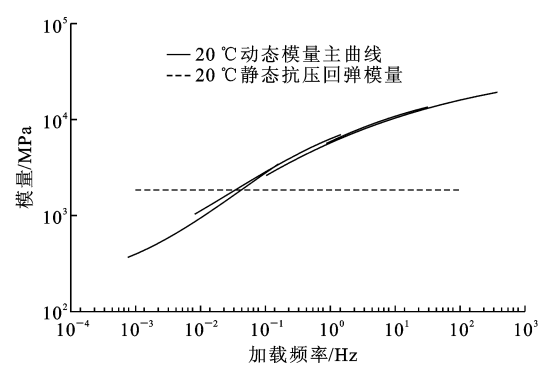


图 9 20 °C PMAM-0.7 动态模量主曲线及静态抗压回弹模量
Fig. 9 Dynamic modulus master curve and static modulus with PMAM-0.7 at 20 °C

例如 T_r 为 10 °C、30 °C、40 °C 时沥青混合料的拟合参数和平移因子,绘制其动态模量主曲线图,进而预估指定条件下沥青混合料的动态模量。

(4) 在温度为 20 °C 时,不同 PR-Module 掺量的沥青混合料的静态抗压回弹模量与动态模量相对应的加载频率较小,大约为 0.03~0.07 Hz,而且随着 PR-Module 掺量的增加,其对应的加载频率不相同,呈现先增大后减小的趋势。

4 结 语

- (1) 通过马歇尔试验确定了 PR-Module 改性沥青混合料的制备工艺参数。
- (2) 随着 PR-Module 掺量增大,沥青混合料的劈裂强度先增大后减小。PR-Module 外掺剂能明显改善沥青混合料的疲劳性能。如 PMAM-0.7 比 AC-0 的疲劳寿命增长百分率高 259%~483%。PR-Module 改性沥青混合料与未掺 PR-Module 的普通沥青混合料的疲劳试验变化规律相同。随着应力比的增大,不同 PR-Module 掺量改性沥青混合料的疲劳寿命增长百分率在 15 °C、20 °C 时是逐渐增大的,而在 25 °C 时却是先减小后增大。
- (3) PR-Module 外掺剂可明显提高沥青混合料的静态抗压回弹模量。例如 PMAM-0.7 的静态抗压回弹模量比 AC-0 增长幅度高 49%。
- (4) PR-Module 改性沥青混合料与未掺 PR-Module 的普通沥青混合料的动态模量和相位角的变化趋势是一致的。在温度和加载频率相同条件下,PR-Module 改性沥青混合料比未掺 PR-Module 的普通沥青混合料的动态模量要高,相位角要小。
- (5) 根据时温等效原理,建立了 20 °C 时 PR-Module 改性沥青混合料的动态模量主曲线,并与静态抗压回弹模量进行了对比,得出不同 PR-Mod-

ule 掺量的沥青混合料的静态抗压回弹模量与动态模量相对应的加载频率较小,约为 $0.03\sim 0.07\text{ Hz}$ 。

(6)选用动态模量主曲线可预估现有设备测试频率范围外的动态模量,为 PR-Module 改性沥青混合料路面的动态设计与分析提供参数。

参考文献:

References:

- [1] 沙爱民,周庆华,杨 琴.高模量沥青混凝土材料组成设计方法[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):1-5.
SHA Ai-min,ZHOU Qing-hua,YANG Qin. Material composition design method for high modulus asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2009,29(3):1-5. (in Chinese)
- [2] 周 亮,凌建明,林小平.考虑环境因素的沥青路面疲劳开裂预估模型[J].中国公路学报,2013,26(6):47-52.
ZHOU Liang,LING Jian-ming,LIN Xiao-ping. Prediction model for fatigue crack of asphalt pavement with environmental factors considered[J]. China Journal of Highway and Transport,2013,26(6):47-52. (in Chinese)
- [3] Rabbira G. Permanent deformation properties of asphalt concrete mixtures[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology,2002.
- [4] Zheng J L,Huang T. Study on triaxial test method and failure criterion of asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition,2015,2(2):93-106.
- [5] 杨 朋,张肖宁. PE 和 SBS 复合改性沥青混合料路用性能[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(10):4044-4049.
YANG Peng,ZHANG Xiao-ning. Pavement performance of high modulus asphalt mixtures modified by PE and SBS[J]. Journal of Central South University: Science and Technology,2012,43(10):4044-4049. (in Chinese)
- [6] Lee H J,Lee J H,Park H M. Performance evaluation of high modulus asphalt mixtures for long life asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials,2007,21(5):1079-1087.
- [7] 周庆华,沙爱民.高模量沥青混凝土路面永久变形[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(5):13-16.
ZHOU Qing-hua,SHA Ai-min. Permanent deformation of high modulus asphalt concrete pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2013,33(5):13-16. (in Chinese)
- [8] 陈磊磊,钱振东.基于简单性能试验的环氧沥青混合料动态模量研究[J].建筑材料学报,2013,16(2):341-344.
CHEN Lei-lei,QIAN Zhen-dong. Study on dynamic modulus of epoxy asphalt mixture based on simple performance test[J]. Journal of Building Materials,2013,16(2):341-344. (in Chinese)
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] AASHTO. Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt mixtures[S].
- [11] 侯 睿,郭忠印.硫磺改性沥青混合料的动态模量试验分析[J].建筑材料学报,2013,16(3):525-528.
HOU Rui,GUO Zhong-yin. Dynamic modulus test analysis of sulfur modified asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials,2013,16(3):525-528. (in Chinese)
- [12] AASHTO. Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixture [R]. Washington DC: American Association of State Highway Transportation Officials,2005.
- [13] Christensen J D W,Pellinen T,Bonaquist R F. Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,2003,72(1):97-121.
- [14] 周键炜,王大明,白琦峰.沥青混合料动态模量主曲线研究[J].公路工程,2009,34(5):60-62.
ZHOU Jian-wei,WANG Da-ming,BAI Qi-feng. Research on master curve of dynamic modulus of asphalt mixture[J]. Highway Engineering,2009,34(5):60-62. (in Chinese)
- [15] 赵延庆,薛 成,黄荣华.沥青混合料抗压回弹模量与动态模量比较分析[J].武汉理工大学学报,2007,29(12):105-111.
ZHAO Yan-qing,XUE Cheng,HUANG Rong-hua. Comparison of compressive resilient modulus and dynamic modulus of asphalt mixtures[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2007,29(12):105-111. (in Chinese)