

文章编号:1671-1637(2015)01-0010-08

## 基于国内外试验方法的橡胶沥青性能测试

李晓燕<sup>1,2</sup>, 平路<sup>3</sup>, 汪海年<sup>1</sup>, 张琛<sup>1</sup>, 尤占平<sup>4</sup>

(1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710068; 3. 山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250061; 4. 密歇根理工大学 土木工程与环境学院, 密歇根 霍顿 49931)

**摘要:**为统一橡胶沥青性能试验的评价指标,分别采用不同胶粉掺量对70<sup>#</sup>和90<sup>#</sup>的基质沥青进行改性,基于中国规范中的针入度、延度、软化点和弹性恢复试验以及Superpave中的动态剪切流变试验、布氏旋转粘度试验和弯曲梁流变试验等对橡胶沥青进行了性能评价。研究表明:胶粉的添加能显著改善沥青的高温性能,显著降低沥青的温度敏感性,但增大了沥青的高温粘度,增加了沥青混合料的拌和与压实难度;胶粉的溶胀作用会导致针入度的试验结果出现较大误差,因此,不建议采用针入度试验来评价橡胶沥青的性能;软化点可作为橡胶沥青高温性能的一个评价指标,对于90<sup>#</sup>基质沥青,胶粉掺量分别为10%、15%、20%和25%时的软化点比未掺胶粉时的软化点分别提高了11.23、11.97、15.18、21.10℃,对于70<sup>#</sup>基质沥青,胶粉的添加则使其软化点分别提高了4.02、8.18、12.83、14.45℃,因此,胶粉对70<sup>#</sup>基质沥青软化点的影响效果要大于对90<sup>#</sup>基质沥青的影响效果;胶粉对沥青低温性能的改善效果会随着温度的下降而降低,在研究胶粉对沥青低温性能的影响程度时,弯曲梁流变试验的结果比低温延度试验的结果更加明显,且由于橡胶沥青的低温延度较小,试验过程中容易产生较大误差,因此,建议采用弯曲梁流变试验评价橡胶沥青的低温性能。

**关键词:**道路工程;橡胶沥青;室内试验;性能测试;Superpave;评价指标

**中图分类号:**U414.75 **文献标志码:**A

## Performance test of rubber asphalt based on domestic and abroad test methods

LI Xiao-yan<sup>1,2</sup>, PING Lu<sup>3</sup>, WANG Hai-nian<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>1</sup>, YOU Zhan-ping<sup>4</sup>

(1. Road Structure and Materials Key Laboratory for Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Mechanics and Civil and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University, Houghton 49931, Michigan, USA)

**Abstract:** To unify the performance evaluation indicators of asphalt rubber, 70<sup>#</sup> and 90<sup>#</sup> base asphalts were modified with different rubber powder contents. The performance tests of rubber asphalts were conducted by Chinese specific tests such as penetration test, ductility test, softening point test and elastic recovery test, and Superpave methods such as dynamic shear rheology (DSR) test, Brookfield rotary viscosity test, and bending beam rheology (BBR) test. Analysis result shows that the addition of rubber powder can improve the high-temperature performance and reduce the temperature sensitivity of asphalt,

收稿日期:2014-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51378074);交通运输部应用基础研究项目(2014 319 812 180)

作者简介:李晓燕(1977-),女,山西运城人,西北工业大学讲师,长安大学工学博士研究生,从事路面材料性能及交通工程研究。

导师简介:尤占平(1971-),男,陕西商洛人,密歇根理工大学教授,工学博士。

but increase the viscosity of asphalt at high temperature and increase the difficulties in asphalt mixing and compaction. The swelling of rubber powder would lead big error in penetration test, so it is not recommended to apply penetration test in evaluation of rubber asphalt performance. Softening point can be regarded as one of evaluation indicators for high-temperature performance of rubber asphalt. For 90<sup>#</sup> base asphalt, its softening point increases by 11.23, 11.97, 15.18 and 21.10 °C when the rubber powder content is 10%, 15%, 20% and 25% respectively. For 70<sup>#</sup> base asphalt, its softening point increases by 4.02, 8.18, 12.83 and 14.45 °C when the rubber powder content is 10%, 15%, 20% and 25% respectively. It is also found the influence of softening point caused by rubber powder is larger on 70<sup>#</sup> base asphalt than on 90<sup>#</sup> base asphalt. The improvement of rubber powder on the low-temperature performance of asphalt would decrease with the decrease of temperature. To test the improvement of rubber powder on the low-temperature performance of asphalt, BBR test is more significant than low-temperature ductility test. Besides, big error will produce in low-temperature ductility test process because of its small value. Therefore, it is recommended to apply BBR test for the low-temperature performance evaluation of rubber asphalt. 8 tabs, 7 figs, 21 refs.

**Key words:** road engineering; rubber asphalt; laboratory test; performance test; Superpave; evaluation indicator

**Author resumes:** LI Xiao-yan(1977-), female, lecturer, doctoral student, +86-29-82334798, lixiaoyan309@163.com; YOU Zhan-ping(1971-), male, professor, PhD, +86-29-82334798, zyou@mtu.edu.

## 0 引 言

随着中国经济水平的不断增长,汽车工业的迅速发展,汽车保有量迅速增加。据不完全统计,2013年中国废旧轮胎的生产量居世界第一,达到2.8亿条,总质量约为 $1.018 \times 10^8$  t,而目前中国的废旧轮胎回收率却不足50%。大量的废旧轮胎给中国环境造成了巨大压力,被称为“黑色污染”<sup>[1-2]</sup>。将废旧轮胎加工成橡胶粉并作为一种沥青改性剂制备成橡胶沥青应用到沥青路面中可提高沥青路面的高温抗车辙、低温抗裂和抗疲劳性能,同时还具有减少噪音、防湿滑、碎冰雪以及提高行车安全系数的功能,带来了一定的环境与经济效益<sup>[3-5]</sup>。

近年来,国内外专家针对橡胶沥青进行了许多相关研究。Navarro等采用动态剪切流变仪(DSR)频率扫描试验、Brookfield旋转粘度试验对不同橡胶粉掺量的橡胶沥青结合料的流变特性与存储稳定性进行了研究,研究表明,随着胶粉掺量的增加,橡胶沥青的粘度显著增大,温度敏感性降低,热稳定性增大<sup>[6-7]</sup>;Mull等采用Superpave-12.5级配、30目胶粉,通过沥青粘温试验、Superpave简单剪切试验、频率扫描试验、重复剪切试验、动态模量试验、重复加载变形试验等研究橡胶沥青性能,研究表明,与普通基质沥青混合料相比,橡胶沥青混合料具有较好的高温抗车辙、低温抗裂和抗疲劳性能,从而可以很

好地兼顾混合料各项路用性能<sup>[8]</sup>;Kim等针对PG 70-22与PG 64-22两种沥青结合料,采用直接拉伸试验(DDT)测定不同橡胶沥青混合料的低温抗拉性能,研究表明,橡胶颗粒粒径大小与掺量的多少将直接影响橡胶沥青的低温性能,橡胶沥青的破坏应力随着橡胶掺量的增加而增大,随橡胶颗粒粒径的增大而减小<sup>[9]</sup>;Specht等采用数理统计方法与神经网络方法对橡胶沥青旋转粘度的影响因素进行预测与仿真,研究表明,胶粉掺量与拌和时间是影响橡胶沥青旋转粘度的主要因素<sup>[10]</sup>;Jeong等采用DSR与色谱凝胶分析(GPC)方法对基质沥青和不同拌和时间、拌和温度、胶粉掺量的橡胶沥青进行室内试验,研究表明,反应时间与反应温度对橡胶沥青的性能影响最为显著,胶粉掺量对橡胶沥青的流变参数 $G^*$ (复数模量)与 $\sin(\delta)$ (相位角正弦)有着显著影响<sup>[11]</sup>;徐东等采用热氧老化的方法,研究了老化时间对橡胶沥青混合料高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性的影响,结果表明,橡胶沥青老化后低温抗裂性能发生严重衰减,间断级配的橡胶沥青混合料比连续级配的橡胶沥青混合料耐老化<sup>[12]</sup>;关永胜等采用中国现行车辙试验、重复加载蠕变试验、动态模量试验等室内试验研究了间断级配橡胶沥青混合料ARAC13的抗车辙性能,结果表明,中国现行车辙试验不能模拟围压作用下沥青混合料的压密过程,不能反映ARAC13混合料抗车辙性能在压密前后

的变化,重复加载蠕变试验可以反映其性能变化<sup>[13]</sup>;杨永顺等对不同粒径、不同掺量的橡胶粉改性沥青的 60 ℃粘度、针入度、延度、软化点等指标与反应温度、反应时间的关系进行室内试验,研究表明,随着反应温度的升高与时间的延长,橡胶沥青的粘度显著下降<sup>[14]</sup>;黄卫东等考虑胶粉来源、胶粉掺量、油石质量比、空隙率等因素,应用车辙试验对橡胶沥青混合料的高温稳定性进行研究,结果表明,橡胶沥青混合料高温性能主要受胶粉来源、胶粉掺量、油石质量比、空隙率等因素影响,而胶粉目数等因素对其高温性能影响较小<sup>[15]</sup>。

然而,目前橡胶沥青性能评价的试验指标呈多样化,缺乏统一性。本文基于国内针入度试验、软化点试验、低温延度试验、弹性恢复试验和国外动态剪

切流变(DSR)试验、布氏(Brookfield)旋转粘度试验、弯曲梁流变(BBR)试验等多个测试手段,分析胶粉对沥青性能的影响,并对各个性能指标进行对比,为橡胶沥青性能评价试验指标的统一提供理论参考。

## 1 原材料及试验方案

### 1.1 基质沥青

本试验采用的基质沥青是壳牌 90<sup>#</sup> 和 70<sup>#</sup> 沥青,其基本性能见表 1。

### 1.2 废胶粉

试验采用细度为 40 目的废轮胎胶粉,由常温粉碎法生产工艺制成,胶粉的掺量分别为 0%、10%、15%、20% 和 25%,40 目胶粉的技术指标见表 2,表 2 中含量为质量分数。

表 1 壳牌 90<sup>#</sup> 和 70<sup>#</sup> 沥青基本性能

Tab. 1 Fundamental properties of Shell 90<sup>#</sup> and 70<sup>#</sup> asphalts

技术指标		90 <sup>#</sup> 沥青		70 <sup>#</sup> 沥青	
		性能指标	技术要求	性能指标	技术要求
针入度/0.1 mm	15 ℃, 100 g, 5 s	30	—	24	—
	25 ℃, 100 g, 5 s	88	80~100	71	60~80
	30 ℃, 100 g, 5 s	159	—	127	—
针入度指数		-1.126	-1.5~1.0	-1.378	-1.5~1.0
软化点/℃		46	≥45	48	≥46
延度(10 ℃, 5 cm·min <sup>-1</sup> )/cm		≥100	≥45	74.6	≥20
旋转粘度(135 ℃)/(Pa·s)		0.419	≤3	0.402	≤3
密度(15 ℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )		0.924	—	0.981	—
短期老化 (RTFO)后 残留物	质量变化/%	0.139	-0.8~0.8	-0.8~0.8	0.123
	残留针入度比(25 ℃)/%	79	≥57	84	≥61
	残留延度/cm	24	≥8	16	≥6

表 2 胶粉的技术指标

Tab. 2 Technical indicators of rubber powder

技术指标	相对密度	含水量/%	纤维含量/%	金属含量/%	灰分/%	炭黑含量/%	丙酮抽出物/%	橡胶烃含量/%
检测结果	1.065	0.67	0.01	0.03	5.42	31.98	5.62	56.00

### 1.3 试验方案

为比较橡胶沥青国内外性能试验指标,本文采用的试验方案见图 1。

## 2 试验结果

### 2.1 国内橡胶沥青性能试验结果

#### 2.1.1 针入度

本文采用的针入度试验温度分别 15、25、30 ℃。不同温度( $T_1$ )下沥青和橡胶沥青的针入度( $x$ )见图 2,对于 90<sup>#</sup> 和 70<sup>#</sup> 沥青,胶粉添加后沥青的针入

度降低,沥青变硬。如 25 ℃时,胶粉掺量为 10%、15%、20% 和 25% 的 90<sup>#</sup> 沥青针入度与基质沥青相比,分别减小 37.18%、44.21%、48.27 和 50.37%。

为研究胶粉掺量对沥青针入度的影响,分别进行温度和胶粉掺量对 90<sup>#</sup> 和 70<sup>#</sup> 沥青针入度影响的方差分析,结果见表 3。由此可知,温度能显著影响橡胶沥青的针入度,但胶粉掺量对沥青针入度却没有显著影响。这是由于橡胶颗粒的溶胀作用会导致自身粒径的增大,而针入度试验的针尖面积较小,在扎入橡胶沥青时可能会扎到橡胶颗粒上,且在下沉

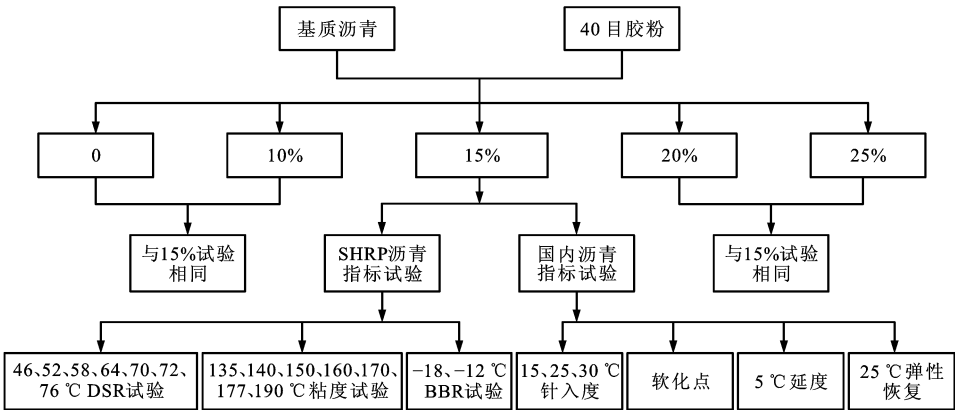


图 1 橡胶沥青性能试验方案

Fig. 1 Performance experimental program of rubber asphalt

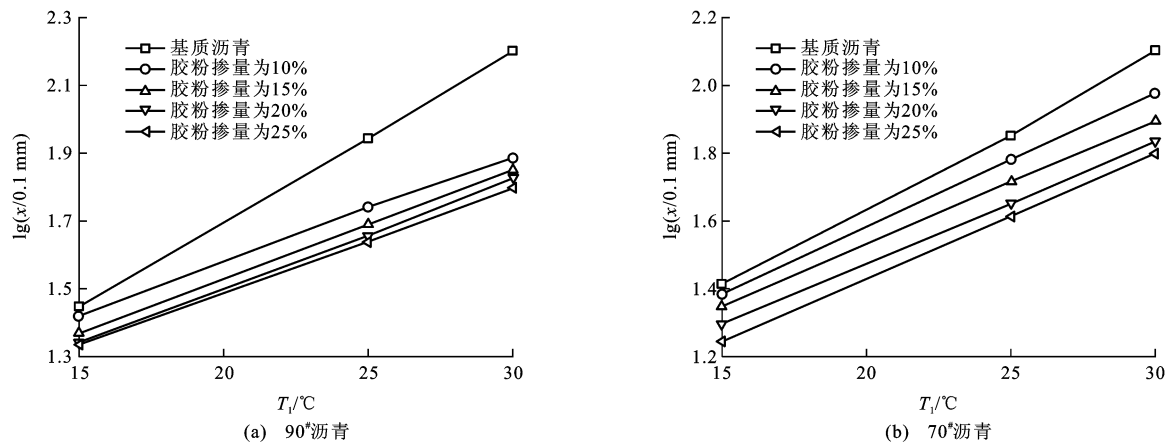


图 2 基质沥青和橡胶沥青的针入度试验结果

Fig. 2 Penetration test results of base asphalt and rubber asphalt

表 3 橡胶沥青针入度方差分析结果

Tab. 3 Variance analysis result of rubber asphalt penetration

差异源		平方和	自由度	均方	F 值	P 值
胶粉掺量	90# 沥青	4 925.80	4	1 231.40	3.360	0.067
	70# 沥青	3 225.48	4	956.37	4.297	0.058
温度	90# 沥青	9 906.30	2	4 953.10	13.720	0.003
	70# 沥青	10 321.90	2	5 160.93	39.861	0.000

过程中会受到较大的阻力作用,因而出现针入度随胶粉掺量的增加而变化不大的现象,这说明橡胶沥青的针入度试验存在较大的变异性<sup>[16]</sup>。

2.1.2 软化点

软化点是表征沥青高温性能的指标之一,是指沥青从粘塑性状态转变为粘流状态的临界温度,是一种条件粘度指标,一般认为软化点越高,沥青的高温稳定性越好<sup>[17]</sup>。图 3 为不同胶粉掺量下,沥青软化点的试验结果,从中可知,对于 90# 和 70# 沥青,胶粉的添加能显著增大沥青的软化点,如对于 90# 沥青,胶粉掺量为 10%、15%、20% 和 25% 时的软化点比基质沥青的软化点分别提高了 11.23、11.97、

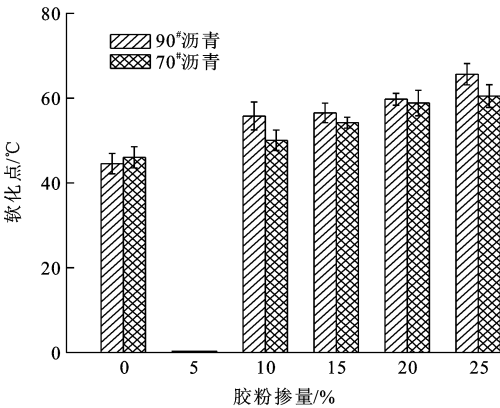


图 3 基质沥青和橡胶沥青软化点

Fig. 3 Softening points of base asphalt and rubber asphalt

15.18、21.10 °C,而对于 70# 沥青,10%、15%、20% 和 25% 的胶粉掺量则将基质沥青的软化点分别提高了 4.02、8.18、12.83、14.45 °C。

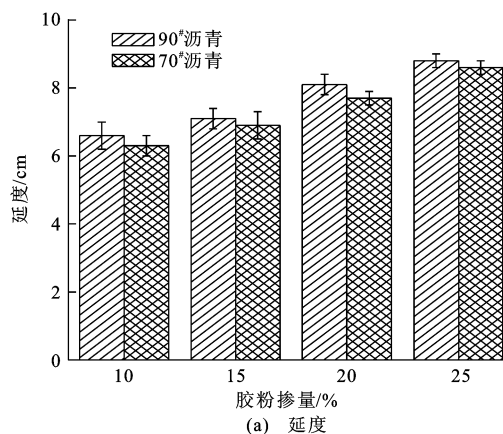
对不同沥青类型和胶粉掺量条件下的沥青软化点进行单因素方差分析,结果见表 4,从中可知,胶粉掺量对 70# 和 90# 沥青软化点都有显著的影响,这表明胶粉的添加能显著改善沥青的高温性能,提

高其高温抗车辙性能。比较 2 种沥青胶粉掺量单因素方差分析的  $F$  值可知,70# 沥青的  $F$  值大于 90# 沥青,因此,胶粉掺量对 70# 沥青软化点的改善作用显著大于对 90# 沥青作用,即胶粉对硬质沥青具有更好的改善效果。

表 4 橡胶沥青软化点方差分析结果

Tab. 4 Variance analysis result of rubber asphalt softening point

差异源		平方和	自由度	均方	F 值	P 值
胶粉	90# 沥青	436.289	4	715.056	178.764	12 768.857
掺量	70# 沥青	436.289	4	109.072	18 178.722	0.000



### 2.1.3 延度和弹性恢复

延度是表征沥青低温性能的试验指标,研究表明,延度越大,沥青的低温变形能力越大,低温抗裂性越好,沥青路面越不容易开裂。沥青的弹性恢复是反映沥青在受到外力作用后恢复至原状态的弹性能力力学指标,通常采用在延度以上用直线型延度试模来完成。沥青弹性恢复指标直接反映沥青的高温性能、低温性能、疲劳性与耐久性。本文的延度试验温度为 5℃,拉伸速度为 5 cm·min<sup>-1</sup>,弹性恢复试验温度是 25℃。橡胶沥青的延度和弹性恢复试验结果见图 4。

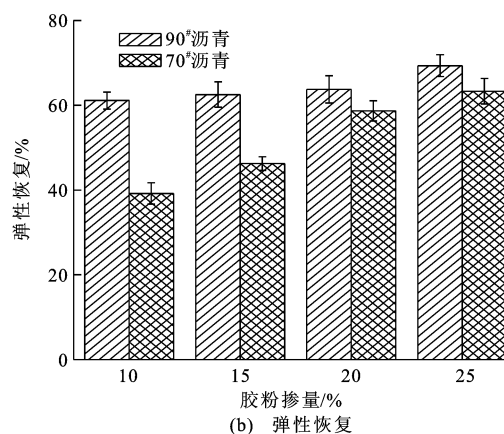


图 4 橡胶沥青的延度和弹性恢复结果

Fig. 4 Ductility and elastic recovery results of rubber asphalt

由图 4 可知,90# 沥青的延度和弹性恢复都要大于 70# 沥青的相应值,且沥青的延度和弹性恢复随胶粉掺量的增加而不断增大,表明胶粉的添加改善了沥青的低温性能和弹性性能。表 5 是胶粉对沥青延度和弹性恢复影响的方差分析结果,由此可知,胶粉对沥青延度和弹性恢复都有显著的影响,且对于沥青延度和弹性恢复,70# 沥青的  $F$  值大于 90# 沥青  $F$  值,这表明胶粉对 70# 沥青的延度和弹性恢复影响作用大于对 90# 沥青的影响作用。

表 5 橡胶沥青延度和弹性恢复方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis results of ductility and elastic recovery for rubber asphalt

差异源		平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
延度	90# 沥青	8.163 3	3	2.721 1	50.235 9	0.000
	70# 沥青	8.162 5	3	2.720 8	81.625 0	0.000
弹性	90# 沥青	123.729 1	3	41.243 1	131.977 8	0.000
恢复	70# 沥青	1 071.333 3	3	357.111 1	1 071.333 3	0.000

## 2.2 橡胶沥青 Superpave 性能试验结果

### 2.2.1 动态剪切流变试验

在试验温度分别为 46、52、58、64、70、76℃ 的条

件下测定橡胶沥青的抗车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$ ,研究橡胶沥青的高温抗车辙性能, $G^*/\sin(\delta)$  越大表示沥青的高温性能越好,即高温抗车辙性能越好<sup>[18]</sup>。试验中胶粉掺量分别为 0、10%、15%、20%、25%,基质沥青为壳牌 90# 沥青,结果见图 5。由图 5 可知,对于基质沥青和橡胶沥青来说,抗车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$  随着温度的升高而不断降低,且胶粉的添加能显著改善沥青的高温抗车辙性能<sup>[19]</sup>。

对不同胶粉掺量下沥青抗车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$  进行差异性分析(表 6),结果表明,当胶粉掺量由 0 依次增加到 20% 时,沥青的高温抗车辙性能持续显

表 6 不同胶粉掺量下沥青抗车辙因子的差异性分析结果

Tab. 6 Difference analysis results of rutting resistance factors at different rubber powder contents

胶粉掺量/%	0	10	15	20	25
0	—	S	S	S	S
10		—	S	S	S
15			—	S	S
20				—	N
25					—

注:S 表示有显著差异性;N 表示无显著差异性。

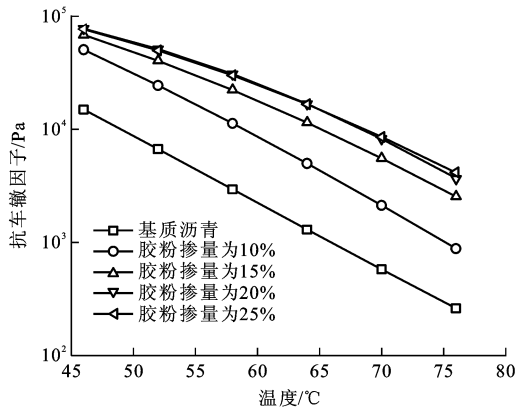
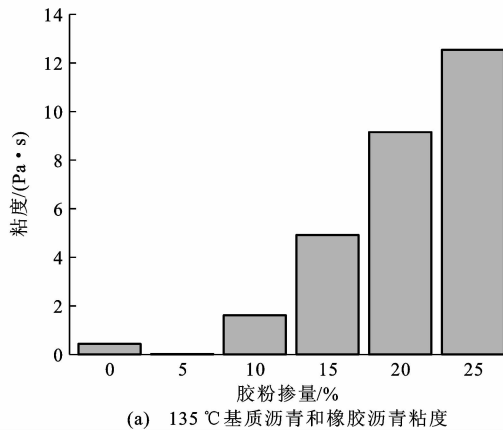


图 5 不同温度下基质沥青和橡胶沥青抗车辙因子

Fig. 5 Rutting resistance factors of base asphalt and rubber asphalt at different temperatures

著增大,两两差异性比较显著,而当胶粉掺量由 20% 增加到 25% 时,沥青的抗车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$

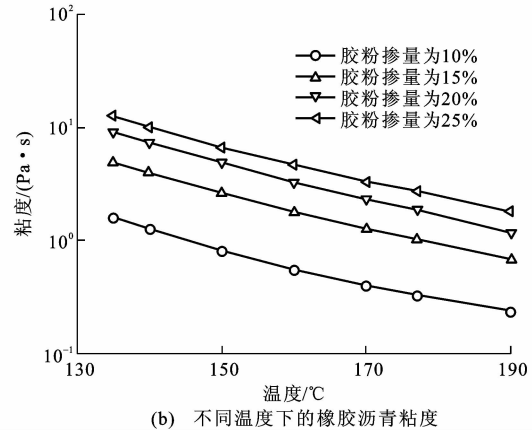


(a) 135 °C 基质沥青和橡胶沥青粘度

之间无显著差异性,表明当胶粉掺量由 20% 增大到 25% 时,沥青的高温抗车辙性能增加不显著。

### 2.2.2 布氏旋转粘度试验

另一个衡量沥青结合料性能指标的是沥青的粘度,高温下沥青的粘度越小,表示沥青混合料的可拌和性和可压实性越好,因此,美国公路战略研究计划(SHRP)对沥青的粘度也作了规定,要求沥青的 135 °C 旋转粘度不得大于 3 Pa·s。本文使用 Brookfield 旋转粘度仪来确定橡胶沥青的旋转粘度,试验中转子转速选择为 20 r·min<sup>-1</sup>,橡胶沥青转子为 27# 转子,质量为 10.5 g,90# 基质沥青试样的质量为 8.5 g,选用 21# 转子,试验温度分别为 135、140、150、160、170、177、190 °C<sup>[19]</sup>,胶粉掺量分别为 0、10%、15%、20%、25%,试验结果见图 6。



(b) 不同温度下的橡胶沥青粘度

图 6 基质沥青与橡胶沥青旋转粘度

Fig. 6 Rotary viscosities of base asphalt and rubber asphalt

由图 6 可知,胶粉的添加能显著提高沥青的旋转粘度,相较于基质沥青 135 °C 粘度,当胶粉掺量分别为 10%、15%、20% 和 25% 时,橡胶沥青粘度分别为基质沥青粘度的 3.72、11.32、21.04、28.84 倍,且随着胶粉掺量的增加,沥青粘度显著增大。

一般采用 Refutas 曲线来描述橡胶沥青粘度和温度的关系,即粘温曲线用粘度的重对数和温度的单对数关系描述为<sup>[20]</sup>

$$\lg[\lg(\eta)] = n - V_{TS} \lg(T_2)$$

式中: $\eta$  为沥青粘度 (Pa·s);  $T_2$  为粘度的试验温度,为绝对温度 (K);  $V_{TS}$ 、 $n$  为回归系数,  $V_{TS}$  表示沥青的感温性,其值越大,表示沥青的温度敏感性越大,反之越小。

对不同胶粉掺量下的橡胶沥青粘度由上面公式进行拟合,确定温度和粘度之间的关系,研究橡胶沥青的温度敏感性,结果见表 7。

表 7 橡胶沥青粘度-温度曲线拟合结果

Tab. 7 Fitting result of rubber asphalt viscosity-temperature curve

胶粉掺量/%	$n$	$V_{TS}$	$R^2$
10	2.386 1	0.882 8	0.999 0
15	2.202 7	0.767 1	0.999 0
20	2.162 1	0.733 6	0.997 7
25	2.033 4	0.666 7	0.999 3

由表 7 可知,橡胶沥青的粘度与温度曲线判定系数  $R^2$  都大于 0.99,表示 Refutas 曲线能很好地表征橡胶沥青的粘度与温度关系。  $V_{TS}$  值随胶粉掺量的增加而减小,表明高温下胶粉的添加能显著降低沥青结合料的温度敏感性。

### 2.2.3 弯曲梁流变试验

对于橡胶沥青的低温性能,国外采用弯曲梁流变(BBR)试验测量其低温劲度,来表征橡胶沥青的低温性能<sup>[21]</sup>。BBR 试验的橡胶沥青试样是先进行

旋转薄膜烘箱老化 (RTFOT), 再进行压力老化 (PAV)。试验在 100 g (980 mN) 的应力下加载 240 s, 取时间  $t$  为 60 s 时的橡胶沥青蠕变劲度  $S(t)$  作为表征沥青低温性能的指标之一, 低温下沥青的劲度越小, 表示低温性能越好。 $m$  值是沥青弯曲梁流变试验的另一个参数, 表征蠕变劲度  $S(t)$  随时间的变化率。SHRP 规范要求沥青的蠕变劲度  $S(t)$  不大于 300 MPa,  $m$  值大于 0.3。本研究中橡胶沥青 BBR 试验采用的温度为  $-12$ 、 $-18$   $^{\circ}\text{C}$ , 有 3 个平行试样, 图 7 是 90 $^{\#}$  基质沥青和橡胶沥青的蠕变劲度  $S(t)$  试验结果。

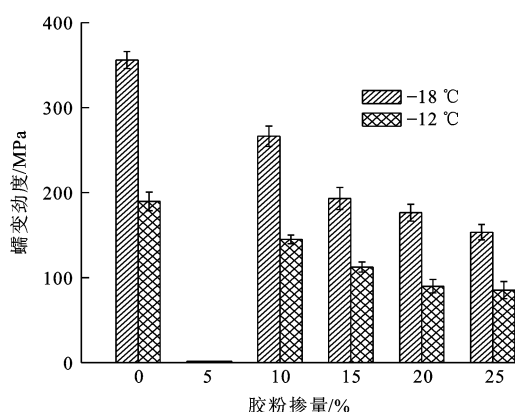


图 7 沥青的蠕变劲度

Fig. 7 Creep stiffness of asphalt

由图 7 可知,  $-18$   $^{\circ}\text{C}$  时沥青的蠕变劲度  $S(t)$  值要显著大于  $-12$   $^{\circ}\text{C}$  时沥青的蠕变劲度  $S(t)$  值, 且不同温度下的  $S(t)$  值均随着胶粉掺量的增加而显著降低, 即沥青的低温性能得到了显著改善。对不同温度下的  $S(t)$  值进行单因素方差分析, 分析胶粉掺量对  $S(t)$  的影响, 结果见表 8。

表 8  $S(t)$  方差分析结果

Tab. 8 Variance analysis result of  $S(t)$

差异源		平方和	自由度	均方	F 值	P 值
胶粉	—18 ℃	81 954.000	4	20 488.500	146.556	0.000
掺量	—12 ℃	22 672.293	4	5 668.073	287.858	0.000

由表 8 可知,  $P$  值均为 0, 因此, 胶粉掺量对沥青蠕变劲度  $S(t)$  的影响显著。通过比较不同温度下的  $F$  值可知,  $-18$   $^{\circ}\text{C}$  时胶粉掺量对  $S(t)$  的影响效果要小于  $-12$   $^{\circ}\text{C}$  下的效果, 因此, 推断胶粉对沥青低温性能的改善效果会随着温度的下降而有所降低。

### 3 结 语

(1) 通过进行橡胶沥青的国内外性能评价试验可知, 胶粉的添加能显著改善沥青的高温性能, 同时可显著降低沥青的温度敏感性, 但增大了沥青的高

温粘度, 增加了沥青混合料的拌和与压实难度。

(2) 通过进行中国规范中的针入度试验可知, 对于 70 $^{\#}$  和 90 $^{\#}$  基质沥青, 胶粉的添加能在一定程度上降低沥青针入度, 但胶粉对沥青针入度的降低效果并不明显, 且不同胶粉掺量下的沥青针入度指数没有显著的规律, 同时胶粉颗粒的溶胀作用会导致针入度的试验结果出现较大误差, 因此, 不建议采用针入度试验来评价橡胶沥青的性能。

(3) 软化点是目前国内使用比较普遍的沥青高温性能评价指标之一, 本文研究表明, 胶粉的添加能显著提高沥青的软化点, 此结论与 Superpave 中的动态剪切流变 (DSR) 试验结论一致, 因此, 可将软化点作为橡胶沥青高温性能的一个评价指标。方差分析表明, 胶粉对 70 $^{\#}$  沥青软化点的影响效果要大于对 90 $^{\#}$  沥青的影响效果。

(4) 胶粉对沥青的延度和弹性恢复都有显著的改善作用, 此结论与 Superpave 中的弯曲梁流变试验结论一致。方差分析表明, 胶粉对 70 $^{\#}$  沥青的延度和弹性恢复的影响要大于对 90 $^{\#}$  沥青的影响, 胶粉对弯曲梁流变试验中  $S(t)$  值的影响程度要显著大于对延度值的影响程度, 因此, 在研究胶粉对沥青低温性能的影响程度时, 弯曲梁流变试验要比低温延度试验的效果更加明显, 且橡胶沥青的低温延度值都较小, 试验过程中容易产生较大误差, 因此, 建议采用弯曲梁流变 (BBR) 试验来评价橡胶沥青的低温性能。

### 参考文献:

#### References:

- [1] BRESSETTE T, ZHOU H P, STONEX A, et al. Asphalt rubber and its potential use in China[C]// ICCTP. Seventh International Conference of Chinese Transportation Professionals. Shanghai: ICCTP, 2007: 776-785.
- [2] 胡 彪, 张晓雨, 赵 新, 等. 废旧橡胶制品资源化利用研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(2): 75-79.  
HU Biao, ZHANG Xiao-yu, ZHAO Xin, et al. Research progress on resource utilization of waste rubber products [J]. Materials Review, 2014, 28(2): 75-79. (in Chinese)
- [3] HE Z Y, LU Z F, ZHANG W W. Performance study on rubber powder modified asphalt of waste tire[C]// ICCTP. Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals. Beijing: ICCTP, 2010: 3272-3278.
- [4] 何立平, 申爱琴, 谢 成, 等. 橡胶沥青结合料性能正交试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(1): 7-12.  
HE Li-ping, SHEN Ai-qin, XIE Cheng, et al. Orthogonal test for rubber asphalt properties [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(1): 7-12. (in Chinese)

- [5] ZHOU H P, HOLIKATTI S, VACURA P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.
- [6] NAVARRO F J, PARTAL P, MARTINEZ-BOZA F, et al. Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen[J]. Energy and Fuels, 2005, 19(5): 1984-1990.
- [7] MAMLOUK M, MOBASHER B. Cracking resistance of asphalt rubber mix versus hot-mix asphalt[J]. Road Materials and Pavement Design, 2004, 5(4): 435-451.
- [8] MULL M A, STUART K, YEHIA A. Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(3): 557-566.
- [9] KIM S, LOH S W, ZHAI H, et al. Advanced characterization of crumb rubber-modified asphalts, using protocols developed for complex binders[J]. Transportation Research Record, 2001(1767): 15-24.
- [10] SPECHT L P, KHATCHATOURIAN O, BRITO L A T, et al. Modeling of asphalt-rubber rotational viscosity by statistical analysis and neural networks[J]. Materials Research, 2007, 10(1): 69-74.
- [11] JEONG K D, LEE S J, AMIRKHANIAN S N, et al. Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5): 824-831.
- [12] 徐东,王新宽,陈博. 橡胶沥青混合料老化再生及其路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(10): 48-52.  
XU Dong, WANG Xin-kuan, CHEN Bo. Research on properties of reclaimed rubber modified asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(10): 48-52. (in Chinese)
- [13] 关永胜,谈至明,张志祥. 间断级配橡胶沥青混合料抗车辙性能[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(5): 705-709.  
GUAN Yong-sheng, TAN Zhi-ming, ZHANG Zhi-xiang. Rutting performance of gap graded asphalt rubber mixtures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(5): 705-709. (in Chinese)
- [14] 杨永顺,曹卫东,李英勇,等. 橡胶沥青制备工艺及其性能的研究[J]. 山东大学学报:工学版, 2008, 38(5): 10-13.  
YANG Yong-shun, CAO Wei-dong, LI Ying-yong, et al. Preparation process and performance of asphalt-rubber[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(5): 10-13. (in Chinese)
- [15] 黄卫东,王伟,黄岩,等. 橡胶沥青混合料高温稳定性影响因素试验[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(7): 1023-1028.  
HUANG Wei-dong, WANG Wei, HUANG Yan, et al. Influencing factor research on high-temperature performance of asphalt rubber mixture[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(7): 1023-1028. (in Chinese)
- [16] 于新,孙文浩,罗怡琳,等. 橡胶沥青温度敏感性评价方法研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 266-270, 283.  
YU Xin, SUN Wen-hao, LUO Yi-lin, et al. Research on the evaluation index of temperature sensitivity of CRMA[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 266-270, 283. (in Chinese)
- [17] 凌天清,李耀楠,董强,等. 橡胶颗粒对微表处性能的影响及其降噪效果[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(5): 1-5.  
LING Tian-qing, LI Yao-nan, DONG Qiang, et al. Influence of rubber particles on micro-surfacing performance and its noise-reduction effect[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 1-5. (in Chinese)
- [18] XIAO F P, AMIRKHANIAN S N. Laboratory investigation of utilizing high percentage of rap in rubberized asphalt mixture[J]. Materials and Structures, 2010, 43(1/2): 223-233.
- [19] AKISETTY C K, LEE S J, AMIRKHANIAN S N. High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 565-573.
- [20] THODESEN C C. Development of prediction models of high temperature crumb rubber modified binders[D]. Clemson: Clemson University, 2008.
- [21] WANG Hai-nian, YOU Zhan-ping, MILLS-BEALE J M, et al. Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 583-590.