

文章编号:1671-8879(2018)05-0009-09

# 多聚磷酸及橡胶粉复合改性沥青性能

周育名<sup>1</sup>, 魏建国<sup>1</sup>, 时松<sup>1,2</sup>, 高建平<sup>1</sup>, 段筱娟<sup>1</sup>, 程毅<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 平顶山市发展投资控股集团有限公司, 河南 平顶山 467000; 3. 辽宁省交通建设管理有限责任公司, 辽宁 沈阳 110005)

**摘要:**为研究多聚磷酸(PPA)与橡胶粉复合改性沥青的综合性能,以更好地确定其适用条件。分别采用常规试验及动态剪切流变试验,通过针入度、软化点、延度、针入度比、车辙因子、相位角、复数模量指数等指标,对不同橡胶粉含量及不同 PPA 掺量的改性沥青进行研究,详细评价 PPA 及橡胶粉复合改性后的高低温度性能、感温性能及短期老化性能。结果表明:复合改性沥青高温性能得到很大提升,软化点提高,抗车辙因子较基质沥青提高了 5~20 倍;动态剪切流变试验中,在高温高频率条件下,复合改性沥青的储存模量随着频率增加而增大,在中国道路行驶的允许车速范围内,随着车速的增加,改性沥青的弹性性能表现更佳,利于沥青路面的抗车辙作用;掺入 PPA 及橡胶粉改性对沥青的延度并无改善,且掺量越多,对沥青延度降低幅度越大,低温抗裂性能下降;复合改性后,沥青复数模量指数(GTS)斜率变小,说明感温性能得到提升;对于老化性能来说,掺入 PPA 能提高沥青老化前后的抗车辙因子,相位角增加的范围也较小,PPA 复配橡胶粉改性沥青老化前后高温抗变形能力优于橡胶粉单一改性沥青。综合看来,掺入 PPA 能有效改善橡胶粉改性沥青的高温性能、感温性能及短期老化性能,其中,掺量(质量分数,下同)1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青整体性能相对最佳。

**关键词:**道路工程;性能指标;动态剪切流变试验;复合改性沥青;橡胶粉;多聚磷酸

**中图分类号:**U412 **文献标志码:**A

## Properties of composite-modified asphalt with polyphosphoric acid and rubber powder

ZHOU Yu-ming<sup>1</sup>, WEI Jian-guo<sup>1</sup>, SHI Song<sup>1,2</sup>, GAO Jian-ping<sup>1</sup>,  
DUAN Xiao-juan<sup>1</sup>, CHENG Yi<sup>3</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. Pingdingshan Development Investment Holding Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, Henan, China; 3. Liaoning Provincial Transportation Construction Management Co., Ltd., Shenyang 110005, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to study the comprehensive performance of polyphosphoric acid (PPA) and rubber powder composite modified asphalt and its applicable conditions were investigated. Conventional and dynamic shear rheological tests were conducted, using indicators of the degree

收稿日期:2018-04-17

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51878075);广西交通科技项目(桂交科 2013-100-28);湖南省教育厅基金项目(16C0054);长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室开放基金项目(kfj150108)

**作者简介:**周育名(1985-),女,山东威海人,讲师,工学博士,E-mail:zhouyuming0503@163.com。

**通讯作者:**魏建国(1972-),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:jianguowei9969@126.com。

of targeting, softening point, ductility, penetration ratio, rutting factor, phase angle, and complex modulus index. Composite-modified asphalts with different contents of rubber powder PPA were studied. The high- and low-temperature performance, as well as the temperature-sensitive and aging properties, were evaluated in detail. The results show that the high-temperature performance of composite-modified asphalt is significantly improved, the softening point is higher, and the anti-rutting factor is approximately 5 to 20 times higher than that of the matrix asphalt. The deformation of asphalt is smaller under conditions of high temperature and large frequency, which is beneficial to the anti-rutting effect of asphalt, in a dynamic shear rheological test. The elastic property is better under a permissible speed, which is beneficial to the anti-rutting of pavements. However, the addition of PPA and rubber powder does not improve the ductility of the asphalt. The higher the amount of asphalt, the greater the decrease in its ductility. Further, the low-temperature performance of the asphalt decreases. The slope of the complex modulus index (GTS) of the modified asphalt declines, indicating that the temperature sensing performance is improved. The blending of the PPA can upgrade the anti-rutting factor of asphalt aging, lowering the degree of phase angle increase. The high-temperature deformation resistance of asphalt modified with PPA and compound rubber powder is better than that using only modified rubber powder. Therefore, the incorporation of PPA can effectively improve the high- and low-temperature performance, as well as the temperature-sensitive and aging properties. Among the results, 1.5% PPA+15% rubber powder composite modified asphalt showed the best overall performance. 6 tabs, 10 figs, 25 refs.

**Key words:** road engineering; performance index; dynamic shear rheology test; composite-modified asphalt; rubber powder; polyphosphoric acid

## 0 引言

截止到 2017 年底,中国高速公路已达 13.65 万 km,高速公路里程居世界第一。沥青路面由于其平整度好、行车舒适、视觉美观等特点,逐渐成为中国高等级公路路面的第一选择。然而,近年来交通载重量的不断提高,车辙病害已逐渐成为我国沥青路面主要损坏类型之一,部分道路车辙损坏高达 30%<sup>[1]</sup>。公路技术状况评定标准中已将车辙列为独立的检测指标,可见车辙病害重要性。因此,在沥青路面设计及施工过程中,防止车辙病害的发生是需要重点关注的问题。而车辙病害直接与沥青及混合料的高温性能相关,采用不同改性剂改善沥青的高温性能,进而提高路面的抗车辙能力,一直都是路面材料研究的热点。近年来,多聚磷酸(聚对苯二酐对苯二胺,PPA)单一改性沥青及 PPA 与其他改性剂复合改性沥青的性能研究逐渐开展。

20 世纪 70 年代就开始了 PPA 改性沥青研究。Baldino 等通过动态剪切流变试验(DSR)分析了不同 PPA 掺量对改性沥青性能的影响,证明 PPA 的加入改善了沥青的高温性能<sup>[2]</sup>。Domingos 等通过

多应力蠕变恢复试验,证明经过 PPA 改性后的沥青弹性更强,高温稳定性更好<sup>[3-4]</sup>。曹晓娟等通过 PPA 改性、PPA 及 SBS 复合改性沥青混合料性能的研究,得出 PPA 的掺入改善了混合料的抗车辙能力<sup>[5]</sup>。张铭铭采用红外光谱分析、热重试验等方法,对 PPA 改性沥青及混合料进行了研究,得出 PPA 的加入提高了沥青的高温性能,PPA 的适宜掺量(质量分数,下同)范围为 0.5%~1.0%<sup>[6]</sup>。PPA 改性对沥青低温性能的影响研究结论差别较大。Velasquez 等基于黏弹性理论,研究认为 PPA 加入改善了沥青的韧性和低温抗裂性能<sup>[7]</sup>;王岚等也得出了相同的结论<sup>[8-9]</sup>。Aflaki 等通过对比 PPA 改性沥青与基质沥青低温临界温度,认为改性沥青的低温性能变得更差<sup>[10]</sup>。曹晓娟等通过延度试验对比,认为 PPA 改性后降低了沥青的低温抗裂性能<sup>[5]</sup>;但王子豪通过对 PPA 改性沥青低温性能的研究,认为 PPA 加入后沥青低温性能有所提高,且随着 PPA 掺量的增加,低温抗裂性能增强<sup>[11]</sup>。Masson 等通过方差分析,指出 PPA 改性后沥青的低温性能无显著变化<sup>[12]</sup>。Sarnowski 通过对 PPA 改性沥青、PPA 及 SBS 复合改性沥青低温性能的研究,认为加入

PPA 后,其低温性能几乎无变化<sup>[13]</sup>;曹卫东等也得出相同的结论<sup>[14]</sup>。Mothe 等通过对 PPA 改性前后沥青动力学分析,得出 PPA 改性沥青的抗老化性能更好<sup>[15-16]</sup>。王岚等通过对 PPA 改性及 PPA 和 SBS 复合改性沥青老化性能分析,认为老化后其表现出更好的抗车辙性能<sup>[17]</sup>。目前对 PPA 改性沥青研究多集中在 PPA 单一改性基质沥青及 PPA 和 SBS、SBR 复合改性沥青的性能。随着绿色交通理念的不断深入,橡胶粉改性沥青得到广泛的应用,因此对于 PPA 与橡胶粉复合改性沥青性能的研究日益受到重视。

本文对 PPA 及橡胶粉复合改性沥青性能进行研究,分别采用 70<sup>#</sup> 基质沥青、YY-105 型 PPA、粒径为 0.2~0.3 mm 橡胶粉,通过 6 种方案进行试验,采用软化点试验、针入度试验及设定不同扫描温度、不同扫描频率条件下动态剪切流变试验,进行不同掺量 PPA 及橡胶粉复合改性沥青高温性能的研究。采用延度试验进行低温性能研究,采用动态剪切流变试验进行感温性能研究,采用旋转薄膜加热试验(RTFOT)和动态剪切流变试验进行老化性能研究,从多指标、多角度全面分析复合改性沥青性能变化趋势,为后续 PPA 及橡胶粉复合改性沥青的研究及应用提供参考。

## 1 原材料与试验设计

### 1.1 原材料

#### (1)基质沥青

采用山东东明石化集团生产的路畅 70<sup>#</sup> A 级沥青(简称路畅 70<sup>#</sup>),其技术指标如表 1 所示。

表 1 基质沥青技术指标

Tab. 1 Technical indexes of matrix asphalt

试验项目	检验结果	技术标准	试验方法
针入度(25 ℃,5 s,100 g)/ 0.1 mm	65	60~80	T 0604
软化点(R&B)/℃	49.5	≥46.0	T 0606
15 ℃延度/cm	>100	≥100	T 0605
10 ℃延度/cm	24.6	≥20.0	T 0605
闪点/℃	303	≥260	T 0611
密度(15 ℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.024	实测结果	T 0603
溶解度/%	99.8	≥99.5	T 0607
质量变化/%	-0.47	≤0.80	T 0610
残留针入度比(25 ℃)/%	69	≥61	T 0604
残留延度(10 ℃)/cm	12	≥6	T 0605

注:沥青技术指标和试验方法均参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)。

#### (2)PPA

选用广西越洋化工实业集团生产的 105%PPA (YY-105),具体产品参数如表 2 所示。

表 2 PPA 技术参数

Tab. 2 Technical parameters of PPA %

项目	YY-105	技术标准	试验方法
外观	无色黏稠液体	无色透明或略带浅黄、稠状液体	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 含量	76.0	≥75.3~76.7	《无机化工产品 化学分析用标准》(HG/T 3696—2011)
Cl 含量	0.001	≤0.005	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 含量	<0.01	≤0.01	
重金属含量(Pb 计)	0.001	≤0.002	《无机化工产品中重金属测定通用方法》(GB/T 23950—2009)
Fe 含量	<0.002	≤0.002	《工业用化工产品 铁含量测定的通用方法》(GB/T 3049—2006)
As 含量	0.005	≤0.010	《无机化工产品中砷测定的通用方法》(GB/T 23947—2009)

注:含量均为质量分数,下同。

#### (3)橡胶粉

采用广西交通科学研究院有限公司生产的橡胶粉,具体技术指标如表 3 所示。

表 3 橡胶粉技术指标

Tab. 3 Rubber powder technical indexes %

项目	检测结果	技术标准	试验方法
筛余物含量	5	<10	《硫化橡胶粉》(GB/T 19208—2008)
含水率	0.5	<1.0	
纤维含量	0	<0.1	
相对密度	1.11	1.10~1.30	《路用废胎硫化橡胶粉》(JT/T 797—2011)
金属含量	0.029	<0.030	
天然橡胶含量	41.95	≥30.00	
丙酮抽出物	7	≤16	《橡胶中溶剂抽出物的测定》(GB/T 3516—2006)
炭黑含量	29	≥28	《橡胶和橡胶制品 热重分析法测定硫化胶和未硫化胶的成分》(GB/T 14837—2014)
橡胶烃含量	54	≥48	

### 1.2 试验设计

依据经验,PPA 改性沥青中 PPA 掺量一般为 0.5%~1.5%<sup>[18]</sup>,橡胶粉改性沥青中橡胶粉掺量一般为 15%~20%<sup>[19]</sup>。因此,本文中设定 PPA 掺量分别为 0.5%、1%、1.5%,橡胶粉掺量分别为 15%、18%。在复合改性中,考虑到 PPA 的加入,因此选取橡胶粉掺量为 15%。最终确定的 6 种试验

方案:①基质沥青;②15%橡胶粉改性;③18%橡胶粉改性;④0.5%PPA+15%橡胶粉复合改性;⑤1%PPA+15%橡胶粉复合改性;⑥1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性。方案编号为 A~F。

采用高速剪切方法制备 PPA 复合改性沥青,通过对比剪切时间、剪切速度和剪切温度 3 个工艺参数对 PPA 复合改性沥青软化点、针入度、延度的影响,提出以下制备工艺:首先,对基质沥青进行称重后加热至 180 ℃;然后,加入相应的橡胶粉并进行搅拌,并保持 180 ℃溶胀 60 min,加入相应量的 PPA 保持 180 ℃的高温,对基质沥青、橡胶粉、PPA 以 5 000 r/min 的转速剪切 45 min;最后,冷却至常温即得到本文 PPA 及橡胶粉复合改性沥青。

评价沥青高温性能的指标主要是软化点、抗车辙因子  $G^*/\sin(\delta)$  和相位角  $\delta$  等( $G^*$  为复数剪切模量)。针入度反映沥青的相对黏度,能表征沥青常温时抗变形能力。延度主要反映沥青低温性能。软化点和针入度可以通过常规试验得到,而抗车辙因子和相位角主要基于 DSR 试验得到。流变性能测验所用试验仪器采用奥地利 Anton Paar 公司生产的 Physica MCR 301 型动态剪切流变仪进行试验,见图 1。试验采用小幅振荡剪切模式,对试样施加固定应变的正弦应力,见图 2。通过不同试验条件下的温度扫描和频率扫描步骤,测量不同结构的试样指标。

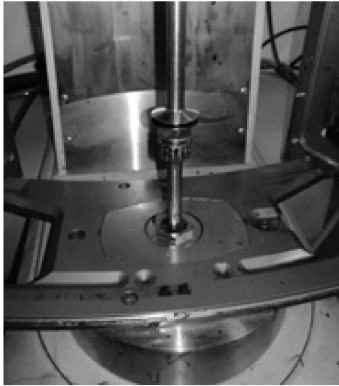


图 1 动态剪切流变仪  
Fig. 1 Dynamic shear rheometer

2 高温性能

沥青高温性能评价指标主要有软化点、抗车辙因子和相位角等。软化点可直观表征沥青高温性能,表明沥青内部聚合程度;抗车辙因子能够反映沥青结合料的永久变形能力, $G^*/\sin(\delta)$  越大,沥青结合料因能量耗散引起的永久变形就越小; $\delta$  表明沥

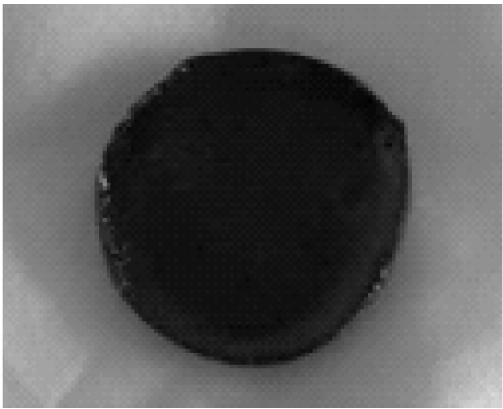


图 2 改性沥青 DSR 试验试样  
Fig. 2 Test specimen of modified asphalt DSR

青结合料的弹性成分所占的比例, $\delta$  越小,沥青结合料抵抗高温变形能力就越强<sup>[20]</sup>。

2.1 软化点

6 个方案沥青的软化点测试结果见图 3。

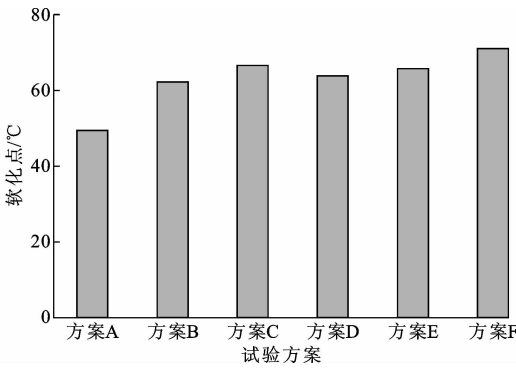


图 3 不同方案软化点试验结果  
Fig. 3 Test results of softening point of different schemes

由图 3 可知:提高胶粉掺量可有效提高沥青试样软化点,由于胶粉添入基质沥青溶胀后,胶粉之间互相黏连,形成一定的网络结构,沥青由近似匀质体变成了胶粉、沥青等共同组成的两相连续结构共混体系,提高了改性沥青的高温性能,且胶粉掺量越大,对沥青性能改善效果越好;在复合改性沥青中,提高 PPA 掺量可有效提高沥青试样软化点,18%橡胶粉掺量的改性沥青软化点与 1%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青的软化点相当;所有改性沥青的软化点均高于基质沥青的软化点,证明 PPA 及橡胶粉都能有效提高沥青的高温稳定性。

2.2 抗车辙因子

现行规范中软化点指标并不能全面评价沥青的高温性能,本文采用 DSR 得到的抗车辙因子和相位角 2 个指标进行综合评定。采用 Physica MCR 301 型动态剪切流变仪。采用小幅振荡剪切模式,对试

样施加固定应变的正弦应力,通过不同试验条件下的温度扫描和频率扫描来测量 2 层结构试样的性质。试验采用的平板直径为 25 mm,测试间隙为 1 mm,测试温度随条件而变化,因为常温下沥青黏稠度相对较大,夏季时,路面温度可达 60 ℃ 以上,因此本文研究 60 ℃~72 ℃ 时沥青结合料的感温性能。扫描温度分别为 60 ℃、66 ℃、72 ℃,试验结果如图 4 所示。

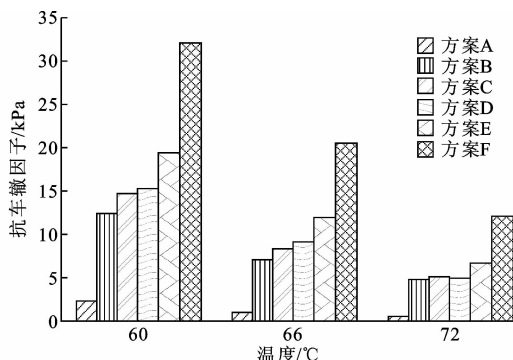


图 4 不同方案沥青抗车辙因子

Fig. 4 Asphalt  $G^* / \sin(\delta)$  of different schemes

由图 4 可知:无论是基质沥青还是改性沥青,随着温度升高,抗车辙因子会相应的降低,由于温度升高,沥青中弹性部分转化为黏性部分就越多,改性沥青恢复变形的能力减弱;在相同条件下,PPA 及橡胶粉复合改性沥青比基质沥青抗车辙因子增加 5~20 倍,说明改性后抗流变性能得到了极大的增强;温度不同时,随着 PPA 掺量的增加,抗车辙因子增大,高温性能增强,PPA 及橡胶粉复合改性沥青比橡胶粉单一改性沥青的抗车辙因子提高较大,改善效果明显。其中,1.5% PPA+15% 橡胶粉的复合改性沥青抗车辙效果相对更佳。

### 2.3 存储模量与损失模量

复数剪切模量  $G^*$  是由实数和虚数 2 个部分组成,其中实数部分为储存模量  $G'$ ,它反映沥青结合料在发生变形过程中能量的储存,是  $G^*$  中可恢复的弹性部分,其值为  $G^*$  乘以相位角的余弦值;虚数部分为损失模量  $G''$ ,它反映沥青结合料在发生变形过程中能量的散失,是  $G^*$  中不可恢复的黏性部分,其值为  $G^*$  乘以相位角的正弦值。高温时,沥青结合料  $G'$  越高其抗车辙能力越好;低温条件下, $G''$  越高,则代表其低温流动性就越好<sup>[18]</sup>。本文在 60 ℃ 温度,频率范围为 0.1~3 Hz 条件下,分别测试了不同方案在动态频率加载下的黏弹特性变化。根据文献<sup>[21]</sup>中的研究结果,频率 0.15、1.50 Hz 对应的实际行车速度分别是 8~16 和 80~100 km/h,因此本

文试验所采用的频率范围(0.1~3 Hz)涵盖了目前中国道路规定车辆正常行驶的速度范围。

由图 5 可知:从低频率到高频率变化时,复数剪切模量逐渐增加,即随着频率的增大,沥青的抗变形能力整体上升,在频率为 1.58 Hz 之后增长减缓,说明在较高频率下(车速超过 100 km/h),改性沥青的弹性变形基本保持不变,车速的增加对沥青路面的不利影响较小。

本文研究中,选择 60 ℃ 进行试验,在沥青作为路面材料使用过程中属于高温范畴。高温状态下沥青一般表现为黏性, $G''$  相对较大,占  $G^*$  的主要部分;在此条件下, $G'$  越大,则沥青的弹性性能越好,其抗车辙能力越高。从图 6、图 7 可知,在高温状态下,表示黏性的  $G''$  占绝对优势,但是随着频率的增加  $G'$  也在增大,说明在沥青路面使用过程中,随着车速的增加,弹性性能也在增加。在较低频率作用下(车速慢),改性沥青的弹性变形变化很大,间接说明了在 60 ℃ 情况下,低速重载交通作用下的路面容易产生车辙病害。车速超过 100 km/h 后,弹性变形变化较小。

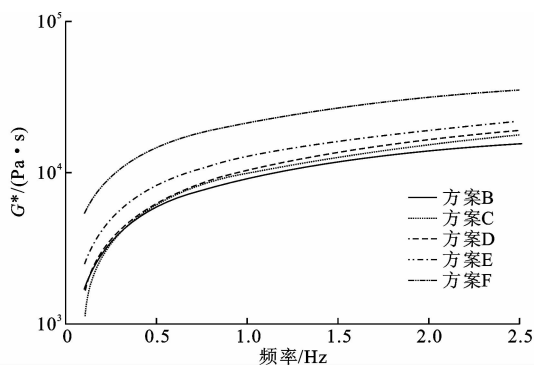


图 5  $G^*$  随频率变化的关系

Fig. 5 Relationships of  $G^*$  with frequencies

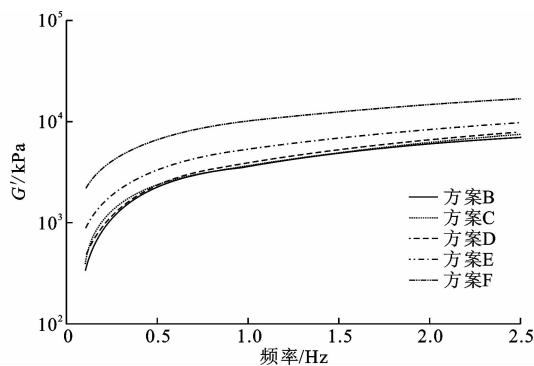


图 6  $G'$  随频率变化

Fig. 6 Changes of  $G'$  with frequencies

整体看来,PPA 含量的增加可以提升抗车辙

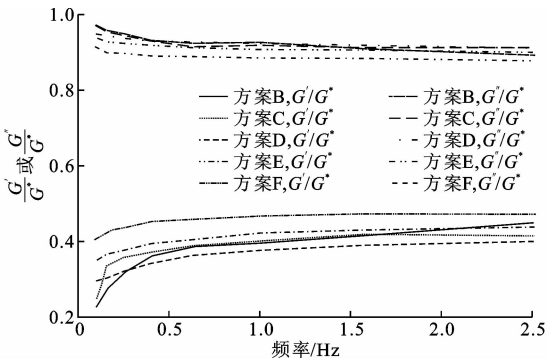


图 7 不同频率下  $G'/G''$  与  $G''/G'$  比率变化

Fig. 7 Changes of  $G'/G''$  and  $G''/G'$  with different frequencies

性,1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青的复数模量比其他组合更大,说明此种方案的抗车辙性能更佳。

2.4 相位角

相位角是评价沥青黏性(不可恢复部分)和弹性(可恢复部分)成分比例的指标, $\delta$  越小,沥青结合料高温性能越好。不同方案的相位角试验结果见图 8。

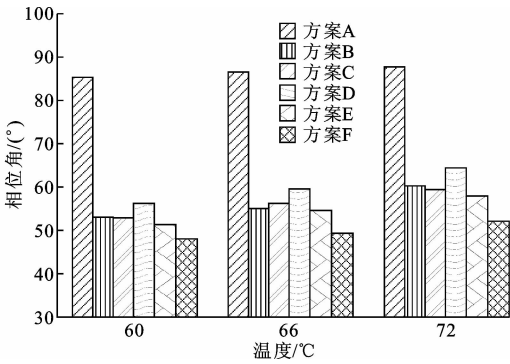


图 8 沥青温度扫描后的相位角

Fig. 8 Asphalt  $\delta$  of different schemes

由图 8 可知:随着温度升高,基质沥青及改性沥青的相位角都变大,改性沥青恢复变形能力变弱,高温性能降低,但总体影响不明显;复合改性沥青的相位角明显小于基质沥青,减小  $20^{\circ}\sim 38^{\circ}$ ,说明橡胶和 PPA 的改性作用使沥青的抗流变性能有较大增强;不同掺量的 PPA 及橡胶粉复合改性沥青之间相位角差别不大,差别在  $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ,但是 1.5%PPA+15%橡胶粉的改性效果最优。

3 低温性能

沥青低温性能评价一般采用脆点试验、延度试验和弯曲流变试验。本文采用延度试验,PPA 及橡胶粉复合改性沥青延度试验,结果如图 9 所示。

由图 9 可知:加入 PPA 后,复合改性沥青延度

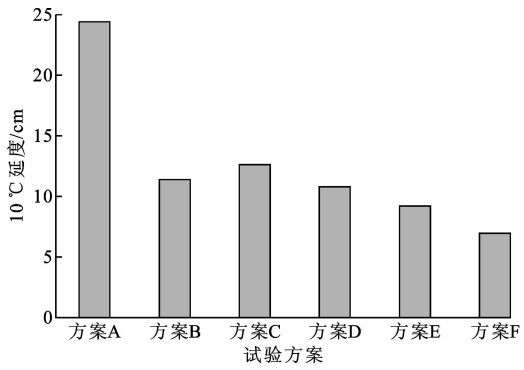


图 9 不同方案延度试验结果(10℃)

Fig. 9 Results of ductility tests(10℃) of different schemes

较基质沥青和橡胶粉单一改性沥青更小,说明 PPA 对沥青的低温延度并无改善,且随着 PPA 掺量的增加,延度持续降低;无论单一改性还是复合改性,其低温延度均较基质沥青低,PPA 掺量分别为 0.5%、1.0%、1.5%时,复合改性后沥青比 15%掺量橡胶粉单一改性沥青的延度分别降低 5.2%、20.0%、39.1%,PPA 掺量越高,沥青低温性能越差。

4 感温性能

相关研究表明<sup>[22-24]</sup>,在针入度评价体系中表述沥青性能适用温度的范围较窄,用针入度指数(PI)评价改性沥青感温性能时,PI 值仍有较大的差异,变异系数较高。因此对于 PPA 改性沥青及 PPA 复合改性沥青并不适用。SHRP 提出了一套基于 DSR 试验的性能测试,用复数模量指数(GTS)法来表征沥青使用性能,利用 DSR 来测定沥青在中、高温区的感温性能<sup>[25]</sup>。

复数模量指数是由  $G^*$  回归得到的,纵坐标用  $G^*$  的双对数,横坐标为绝对温度  $T$  的对数,作出关系图,从而回归求出 GTS 值。而  $\lg(\lg(G^*))$  和  $\lg(T)$  有很好的线性关系,有

$$\lg(\lg(G^*)) = G_{TS} \lg(T) + C \tag{1}$$

式中: $G^*$  为复数剪切模量(Pa); $T$  为试验温度,以绝对温度表示(K); $C$  为常数; $G_{TS}$  为复数模量指数 GTS 值,表示沥青在高、中温区的感温性。

一般在  $5^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$  范围内进行针入度试验。DSR 试验在材料有效作用范围内比针入度指数 PI 体系更宽泛。此外,根据式(1),由于 GTS 计算需用双对数  $G^*$  回归,所以整个试验的误差对 GTS 指标影响较小。因此,复数模量指数 GTS 比针入度指数(PI)评价沥青结合料的感温性能更加科学、可靠。不同方案、不同温度时复数剪切模量测试结果如表 4 所示。

表 4 复数剪切模量试验结果

Tab. 4 Results of ductility tests of different schemes

参数		方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E	方案 F
不同温度 (℃) 下的 $G^*$ /kPa	60	2.36	10.00	12.20	12.80	15.40	24.00
	66	1.09	5.84	7.30	7.89	9.81	15.60
	72	0.51	4.23	4.66	9.14	5.81	9.59

根据表 4,通过式(1)求出  $G_{TS}$  和  $C$ ,如表 5 所示。

表 5 不同方案复数模量指数

Tab. 5  $G_{TS}$  for different schemes

参数	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E	方案 F
$G_{TS}$	-3.278 1	-2.773 2	-3.127 2	-3.402 4	-3.068 0	-2.736 7
$C$	8.790 7	7.596 3	8.500 2	9.198 5	8.362 8	7.546 1
判定系数	0.824 2	0.984 4	0.997 4	0.999 7	0.999 9	0.999 9

由图 10 可知:随着 PPA 掺量的增加, $G_{TS}$  的绝对值逐渐变小,拟合直线越趋于平稳,即温度变化对改性沥青性能影响变小;在与沥青进行高温混溶时,一部分橡胶粉颗粒会经历解聚和脱硫,与沥青发生交换作用,颗粒中的硫、氧化硅、氧化铁等活性物质进入沥青胶体体系中,改善沥青温度敏感性;18%掺量橡胶粉改性沥青斜率与 1.0%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青斜率差别不大,说明两者的感温性能相当,1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青斜率最小,沥青温度敏感性得到较好提高。

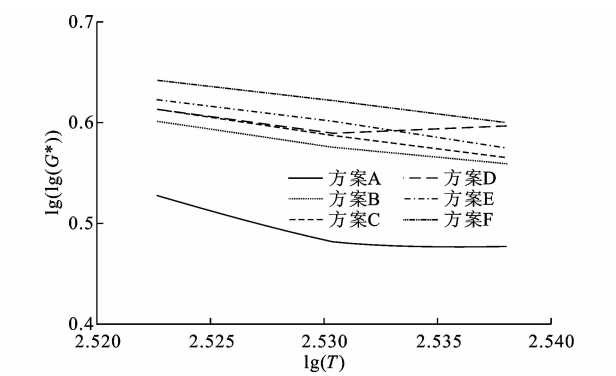


图 10 不同方案改性沥青  $\lg(T)-\lg(\lg(G^*))$  关系  
Fig. 10 Relationships of  $\lg(T)-\lg(\lg(G^*))$  of modified asphalt with different schemes

5 老化性能分析

本文采用常规试验和 DSR 来评价 PPA 改性沥青的短期老化性能。常规试验采用旋转薄膜加热试验,评价指标为软化点差、残留针入度比。DSR 试验通过老化前后  $G^*/\sin(\delta)$ 、 $\delta$ 、 $G^*$  对比分析评价老化性能,试验结果如表 6 所示。

表 6 不同方案改性沥青老化试验结果

Tab. 6 Degradation test results of modified asphalt with different schemes

方案	软化点/℃	25℃针入度/0.1mm	软化点差/℃	针入度比/%	$\frac{G^*}{\sin(\delta)}$ /kPa	$\delta/(^\circ)$
A	老化前	49.5	4.2	75.4	2.37	85.4
	老化后	53.7			2.96	87.3
B	老化前	63.8	2.7	77.6	12.50	53.2
	老化后	66.5			14.70	56.1
C	老化前	67.1	2.5	74.4	14.90	54.5
	老化后	69.6			17.70	57.6
D	老化前	63.9	6.2	72.4	12.80	56.3
	老化后	70.1			14.10	60.4
E	老化前	66.1	5.1	75.6	19.40	52.4
	老化后	71.2			26.50	54.0
F	老化前	71.5	3.9	77.8	32.20	48.3
	老化后	75.4			43.80	49.8

由表 6 可知:随着 PPA 掺量的增加,软化点差逐渐减小,针入度比逐渐增大,说明 PPA 复配橡胶粉可改善沥青抗老化性能;老化后车辙因子普遍提高,其中 1%PPA、1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青老化后的抗车辙因子增加较大,分别为 7.1、11.6,说明老化对改性沥青的高温性能有较大的影响,老化作用使沥青中轻质组分向重质组分转变,使沥青变得更硬,抗车辙能力变强,且这种作用随着 PPA 掺量的增加更为明显;相位角在老化后总体上都有所增加,说明老化降低了沥青的弹性性能,其中 1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青的相位角增加相对较小;整体来看,由于 PPA 改性剂的存在使得复合改性沥青的高温性能得到提升,其老化前后高温抗变形能力均优于橡胶粉单一改性沥青。

6 结 语

(1)通过常规高温性能试验及 DSR 剪切流变试验分析了 PPA 及橡胶粉复合改性的高温性能。PPA 的掺加提高了沥青的高温性能,PPA+橡胶粉复合改性沥青软化点得到较大提高,抗车辙因子增加 5~20 倍,且随着 PPA 掺量的增加,高温性能逐渐增强;PPA+橡胶粉复合改性沥青比橡胶粉单一改性沥青的抗车辙因子有较大的提高;在较高频率作用下(车速快),改性沥青的弹性变形变化较小,对沥青路面的影响小; $G^*$  随着频率的增大而增大,复合改性沥青抗车辙性能表现更佳;复合改性沥青的相位角明显小于基质沥青,减小  $20^\circ\sim 38^\circ$ ,说明橡胶以及 PPA 的改性作用使沥青的抗流变性能有较大

的增强。不同掺量的 PPA+橡胶粉复合改性沥青的相位角差别不大,为  $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 。1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青高温性能最佳。

(2)PPA 及橡胶粉改性对沥青的低温延度并无改善,其低温延度均比基质沥青低,且 PPA 掺量越高,沥青低温性能越差,建议 PPA 的掺量不超过 1%。随着 PPA 掺量的增加,PPA+橡胶粉复合改性沥青的感温性能得到改善,即温度变化对改性沥青性能影响变小。1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青斜率最低,沥青温度敏感性得到较好地提高。PPA 复配橡胶粉可改善沥青抗老化性能。老化后抗车辙因子得到提高,抗车辙能力增强,相位角在老化后均增加,说明老化降低了沥青的弹性性能,其中,1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青的相位角增加相对较小。由于 PPA 改性剂的存在,使得沥青高温性能得到一定改善,老化前后高温抗变形能力优于橡胶粉单一改性沥青。1.5%PPA+15%橡胶粉复合改性沥青具有较好的高温稳定性、感温性,老化后仍具有较好的性能,推荐在常年高温地区的公路路面使用。

(3)本文只对中国生产的路畅基质沥青进行改性研究。后续研究中可选择多种基质沥青进行改性并对比其性能变化,加强改性机理的研究。同时,如何提高 PPA 复合改性沥青的低温性能也是未来研究的重点。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] JTG H20—2007,公路技术状况评定标准[S].  
JTG H20—2007, Highway performance assessment standards[S].
- [2] BALDINO N, GABRIELE D, LUPI F R, et al. Rheological effects on bitumen of polyphosphoric acid (PPA) addition[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 397-404.
- [3] DOMINGOS M D I, FAXINA A L. Rheological behaviour of bitumens modified with PE and PPA at different MSCR creep-recovery times[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2015, 16 (9): 771-783.
- [4] NUNEZ J Y M, DOMINGOS M D I, FAXINA A L. Susceptibility of low-density polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking[J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 509-514.
- [5] 曹晓娟,张振兴,郝培文,等.多聚磷酸对沥青混合料低温性能影响研究[J].武汉理工大学学报,2014, 36(6):47-53.  
CAO Xiao-juan, ZHANG Zhen-xing, HAO Pei-wen, et al. Effect of polyphosphoric acid on the high and low temperature property of matrix asphalt mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(6):47-53.
- [6] 张铭铭.多聚磷酸改性沥青微观结构及技术性能研究[D].西安:长安大学,2012.  
ZHANG Ming-ming. Research on the microstructure and technical performance of polyphosphoric acid modified asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [7] VELASQUEZ R, TABATABAEE H, BAHIA H. Low temperature cracking characterization of asphalt binders by means of the single-edge notch bending (SENB) test[J]. Asphalt Paving Technology—Proceedings of Association of Asphalt Technologists, 2011, 80: 583-591.
- [8] 王 岚,王子豪,李 超.基于黏弹性理论的多聚磷酸改性沥青低温性能[J].复合材料学报,2017, 34(2): 322-328.  
WANG Lan, WANG Zi-hao, LI Chao. Based on viscoelastic theory to study the low temperature performance of polyphosphoric acid asphalt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(2): 322-328.
- [9] 刘红瑛,常 睿,张铭铭,等.多聚磷酸改性沥青及其混合料低温性能研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2017, 44(5): 104-112.  
LIU Hong-ying, CHANG Rui, ZHANG Ming-ming, et al. Study on low temperature performance of polyphosphoric acid modified asphalt and asphalt mixture[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2017, 44(5): 104-112.
- [10] AFLAKI S, HAJIKARIMI P, FINI E H, et al. Comparing effects of biobinder with other asphalt modifiers on low-temperature characteristics of asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26 (3): 429-439.
- [11] 王子豪.老化作用对多聚磷酸改性沥青性能影响研究[D].呼和浩特,内蒙古工业大学,2017.  
WANG Zi-hao. Study on the effect of aging on the performance of polyphosphoric acid modified asphalt[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2017.
- [12] MASSON J F, COLLINS P, WOODS J R, et al. Chemistry and effects of polyphosphoric acid on the microstructure, molecular mass, glass transition temperatures and performance grades of asphalts [J].



- Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2009, 78: 455-490.
- [13] SARNOWSKI M. Rheological properties of road bitumen binders modified with SBS polymer and polyphosphoric acid[J]. Roads Bridges-Drogi Mosty, 2015, 14(1): 47-65.
- [14] 曹卫东, 刘乐民, 刘兆平, 等. 多聚磷酸改性沥青的试验研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 252-255.  
CAO Wei-dong, LIU Le-min, LIU Zhao-ping, et al. Research on polyphosphoric acid modified asphalt[J]. China and Foreign Highway, 2010, 30(3): 252-255.
- [15] MOTHE M G, LEITE L F M, MOTHE C G. Kinetic parameters of different asphalt binders by thermal analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 106(3): 679-684.
- [16] ZHANG F, YU J. A study on the aging kinetics of PPA modified asphalt [J]. Petroleum Science and Technology, 2010, 28(13): 1338-1344.
- [17] 王 岚, 王子豪, 李 超. 多聚磷酸改性沥青老化前后高温流变性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(7): 1610-1616.  
WANG Lan, WANG Zi-hao, LI Chao. Research on the high temperature rheological properties of polyphosphoric acid modified asphalt[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(7): 1610-1616.
- [18] FINI E H, AL-QADI I L, YOU Z, et al. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder; Characterisation and modification[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2012, 13(6): 515-522.
- [19] 王笑风, 曹荣吉. 橡胶沥青的改性机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(2): 6-11.  
WANG Xiao-feng, CAO Rong-ji. Rubber asphalt modification mechanism[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2011, 31(2): 6-11.
- [20] 周庆华, 贾 渝. 沥青胶结料高温性能试验方法的评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 9-12.  
ZHOU Qing-hua, JIA Yu. Evaluation on test methods for high temperature performance of asphalt binders [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2008, 28(2): 9-12.
- [21] BAHIA H U, HANSON D I, ZENG M, et al. Characterization of modified asphalt binder in superpave mix design[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2001.
- [22] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.  
SHEN Jin-an. Road performance of asphalt and asphalt mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [23] 黄卫东, 孙立军, 张志全, 等. 沥青针入度指数的研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(3): 306-310.  
HUANG Wei-dong, SUN Li-jun, ZHANG Zhi-quan, et al. Study on penetration index[J]. Journal of Tongji University; Natural Science, 2005, 33(3): 306-310.
- [24] 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.  
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.
- [25] AASHTO—T 315, Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder [S].