

# PE 改性沥青多尺度流变性能

李旭瑞<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000;

2. 中森检测认证有限公司, 河南 郑州 450000;

3. 交通运输行业公路建设与养护技术、材料及装备研发中心, 河南 郑州 450000;

4. 河南省固废材料道路工程循环利用重点实验室, 河南 郑州 450000)

**摘要:**为评价 PE(聚乙烯 Polyethylene, 简写 PE)改性沥青流变性能及不同流变指标之间相关性,基于不同 PE 改性剂掺量下的动态剪切流变试验和多应力蠕变恢复试验,以车辙因子、Shenoy 参数、低剪切黏度、不可恢复蠕变柔量和蠕变恢复率作为 PE 改性沥青流变性能多尺度评价指标,分析不同流变指标相关性;以老化指数和 Cole-Cole 图评价 PE 改性剂对沥青耐老化性能和黏弹性的影响。结果表明,随着 PE 改性剂掺量增加,车辙因子、低剪切黏度、Shenoy 参数和蠕变恢复率逐渐增加,且后三者与车辙因子呈正相关;不可恢复蠕变柔量逐渐降低,且与车辙因子呈非线性负相关。车辙因子与其余流变参数相关系数均在 90%以上。PE 改性沥青耐老化性能及弹性提高。PE 改性剂掺量大于 6%时,流变指标及老化指数受改性剂掺量影响幅度降低。

**关键词:**道路工程;PE 改性剂;沥青;流变;多尺度

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)01-0114-07

## 0 引言

随着中国工农业快速发展,PE 废旧塑料大量产生并堆积。将 PE 废旧塑料加工为改性剂制备改性沥青是实现 PE 废旧塑料无害化、资源化利用的有效途径。流变指标是评价沥青抗车辙性能和抗永久变形的重要指标<sup>[1]</sup>,不同学者针对 PE 改性沥青流变性能开展相关研究。PADHAN et al<sup>[2]</sup>使用交联和反应性聚合物基添加剂提高聚乙烯改性沥青的储存稳定性并研究其车辙因子和动态剪切蠕变性能;MASHAAN et al<sup>[3]</sup>对比分析了高密度聚乙烯(HDPE)和低密度聚乙烯(LDPE)流变试验中复数模量和相位角;XIN et al<sup>[4]</sup>采用动态剪切试验和多应力蠕变恢复试验,基于零剪切黏度和蠕变柔量等评价了碳纳米管/聚乙烯复合材料改性沥青的流变性能;杨小宾<sup>[5]</sup>对比分析了 Shenoy 参数和车辙因子对 PE、橡胶粉和 SBS 3 种不同改性沥青性能等级评价结果的差异;程金梁等<sup>[6]</sup>基于零剪切黏度和多重应力蠕变恢复试验研究了直投 PE 和 SBS 2 种改性沥青的流变性能;此外还有动态剪切流变试验中复数模量的弹性分量<sup>[7]</sup>、线性振幅扫描(LAS)<sup>[8]</sup>等方面的相关研究。综上可知,目前关于 PE 改性沥青流变性能的研究主要集中于车辙因子及蠕变等单一评价指标,关于不同评价指标相关性的研究较少。因此,有必要开展 PE 改性沥青多尺度流变性能的相关研究。

基于此,本研究基于不同 PE 改性剂掺量下的动态剪切流变试验和多应力蠕变恢复试验,以车辙因子、Shenoy 参数、低剪切黏度、不可恢复蠕变柔量和蠕变恢复率作为 PE 改性沥青流变性能多尺度评价指标,分析不同流变指标相关性,并以老化指数和 Cole-Cole 图评价 PE 改性剂对沥青耐老化性能和黏弹性的影响,以期 PE 改性沥青性能的全面系统评价提供参考。

收稿日期:2023-10-09 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20230259

基金项目:河南省交通运输厅科技项目(2020J-2-5)

作者简介:李旭瑞(1986—),男,高级工程师,研究方向为道路桥梁建设与检测。E-mail:411607753@qq.com

李旭瑞. PE 改性沥青多尺度流变性能[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(1):114-120.

## 1 原材料及试验方法

### 1.1 原材料

研究中未改性的普通沥青为市售 AH-70 石油沥青,性能满足 JTG F40—2004 要求。PE 改性剂为以农膜等废旧 PE 塑料为原材料经工业化加工而成的粒径为 4~6 mm 的颗粒状改性剂,密度 1.02~1.10 g/cm<sup>3</sup>,熔点 100~140 °C。以普通沥青质量为基准,PE 改性沥青中 PE 改性剂掺量分别为 4%、6%、8%。制备方法为熔融搅拌法,先将基质沥青加热至 170 °C±5 °C,再加入 PE 改性剂,以 3 000 r/min 速率剪切搅拌 30 min<sup>[9]</sup>。

### 1.2 试验方法与评价指标

#### 1.2.1 动态剪切流变试验

参照 ASTM-D7175-15,试验仪器为动态剪切流变仪,平行板直径为 25 mm,间隙 1 mm。测试温度为 40、46、52、58、64、70、76 °C,角频率 10 rad/s。测试不同温度下未老化和 TFOT 老化后沥青的复数模量  $G^*$  和相位角  $\delta$ 。根据试验结果可从不同方面评价改性沥青流变性能,美国 SHRP 计划中的 Superpave 研究体系以车辙因子  $G^*/\sin \delta$  作为沥青抗永久变形性能评价指标。但针对较大延迟变形的改性沥青,车辙因子  $G^*/\sin \delta$  指标存在一定失真。SHENOY 通过理论推导提出 Shenoy 参数来表征沥青的高温流变性能,Shenoy 参数表达式为  $G^*/(1-1/(\sin \delta \tan \delta))$ ,并通过试验验证该参数与路面高温性能和车辙因子有很强的相关性<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.2 低剪切黏度试验

聚合物改性沥青高温下通常表现为非牛顿流体特征,受剪切速率影响较大。但剪切速率较低时,改性沥青表现出类似牛顿流体的特征。当剪切速率几乎为零时,在规定的应力下测得的黏度称为零剪切黏度,可作为改性沥青长期荷载作用下抗永久变形的评价指标。但零剪切黏度是理论概念,需由动态剪切流变试验频率扫描结果利用 Cross 模型或 Carreau 模型等经非线性回归求得,操作及计算较为繁琐,且一些改性沥青表现出非正常的高零剪切黏度<sup>[11]</sup>。低剪切黏度为在低剪应变率或低试验频率下所测黏度,亦可作为改性沥青高温流变性能评价指标。低剪切黏度较易求解,且与零剪切黏度非常接近<sup>[12]</sup>。本研究低剪切黏度在动态剪切流变角频率为 0.1、0.01、0.001 rad/s 时求得。

#### 1.2.3 多应力蠕变恢复试验

根据 ASTM-D7405,在 64 °C 对 TFOT 老化的 PE 改性沥青进行 MSCR 测试。采用 0.1、3.2 kPa 2 种蠕变应力水平。每个试样测试 10 个加载周期,测试时间共计 300 s。每个加载周期加载蠕变阶段为 1 s,卸载恢复阶段为 9 s。当蠕变应力从 0.1 kPa 增加到 3.2 kPa 时无时间延迟。根据多应力蠕变恢复试验可得到不可恢复蠕变柔量和蠕变恢复率,两者计算方法为

$$J_{ir} = \frac{\epsilon_r - \epsilon_0}{\tau} \quad (1)$$

$$R = \frac{\epsilon_c - \epsilon_r}{\epsilon_c - \epsilon_0} \quad (2)$$

式中, $J_{ir}$  为不可恢复蠕变柔量; $R$  为蠕变恢复率; $\epsilon_r$  为残余应变; $\epsilon_0$  为初始应变; $\epsilon_c$  为加载过程的峰值应变; $\tau$  为加载应力水平。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Superpave 车辙因子

Superpave 体系采用车辙因子  $G^*/\sin \delta$  作为沥青抗车辙性能的流变指标。未老化及 TFOT 短期老化后 PE 改性沥青的车辙因子  $G^*/\sin \delta$  值如图 1 所示。从图 1 分析可知,相同改性剂掺量下,随着温度升高,改性沥青车辙因子逐渐降低;相同温度下,随着 PE 改性剂掺量增加,车辙因子逐渐增大。未老化及老化后,PE 改性沥青车辙因子变化趋势相同。Superpave 体系要求未老化沥青的车辙因子应不小于 1.0 kPa,老化后车辙因子应不小于 2.2 kPa,并将车辙因子达到此临界值的温度作为失效温度,以此确定沥青

PG 等级。老化前后不同类型沥青失效温度和性能分级如表 1 所示。由表 1 分析可知,老化前后,普通沥青及不同改性剂掺量的 PE 改性沥青 PG 分级分别一致。与基质沥青相比,添加 4%PE 时改性沥青 PG 分级提高 1 个等级,添加 6%PE 和 8%PE 时改性沥青 PG 分级提高 2 个等级。添加 PE 改性剂提高了改性沥青在未老化和老化条件下的抗车辙性能,这主要是由于 PE 改性剂增加了改性沥青的复数模量并降低了其相位角。

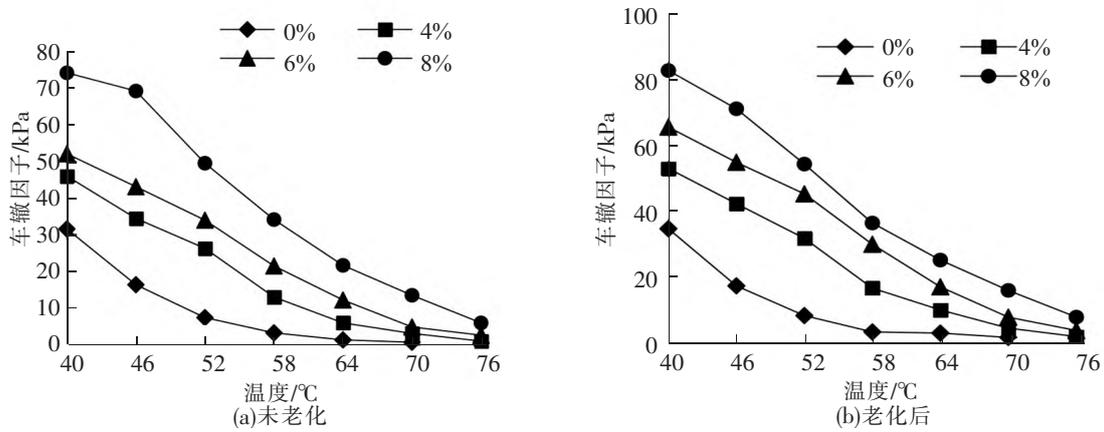


图 1 未老化及 TFOT 老化后沥青车辙因子  
表 1 不同沥青老化前后失效温度和性能分级

沥青类型	失效温度/℃		性能分级	
	老化前	老化后	老化前	老化后
基质沥青	66.4	67.6	PG64	PG64
4%PE 改性沥青	75.7	75.4	PG70	PG70
6%PE 改性沥青	>76	>76	PG76	PG76
8%PE 改性沥青	>76	>76	PG76	PG76

2.2 Shenoy 参数

根据动态剪切流变试验得到的不同条件下复数模量和相位角可计算得 Shenoy 参数。不同改性剂掺量和温度下 Shenoy 参数如图 2 所示。图 2 中 S-0%、S-4%、S-6%和 S-8%分别表示不同 PE 改性剂掺量下 Shenoy 参数值,C-0%、C-4%、C-6%和 C-8%分别表示不同 PE 改性剂掺量下 Shenoy 参数值与车辙因子差值。

由图 2 分析可知,相同改性剂掺量下,随着温度升高,改性沥青 Shenoy 参数值逐渐降低;相同温度下,随着 PE 改性剂掺量增加,Shenoy 参数值逐渐增大,这与车辙因子的变化规律整体一致。相同温度和改性剂掺量下,Shenoy 参数值均高于车辙因子,但差值受温度和改性剂掺量影响。PE 改性剂掺量从 0%增加到 4%和 6%时,相同温度下,随着改性剂掺量增加,Shenoy 参数值与车辙因子差值逐渐增大;相同改性剂掺量下,随着温度增加,Shenoy 参数值与车辙因子差值逐渐减小。PE 改性剂掺量为 8%时,Shenoy 参数值与车辙因子差值变化规律存在波动,且差值低于改性剂为 4%和 6%时差值。Shenoy 参数这种变化规律可能是由于该参数中含有阻尼系数  $\tan \delta$ ,使其对相位角的变化更敏感。根据 Shenoy 参数测试结果,PE 改性剂改善了改性沥青流变性能,提高了抗车辙性能,且 Shenoy 参数和车辙因子存在相关性。

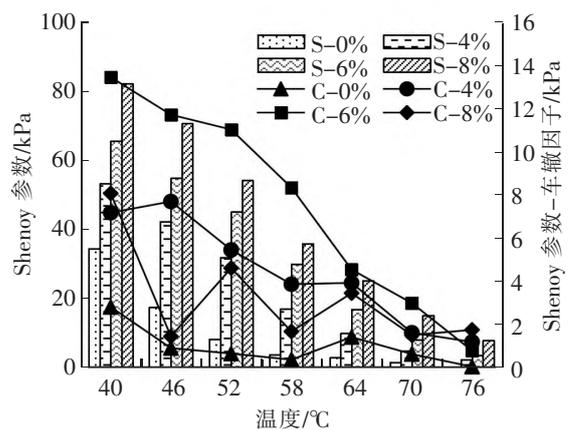


图 2 Shenoy 参数测试结果

2.3 老化指数和 Cole-Cole 图

老化指数和 Cole-Cole 图是对动态剪切流变试验结果从不同方面的进一步表征和分析。老化指数计

算方法如式(3)所示。老化指数值越高,表明对老化条件的脆弱性和敏感程度越高,沥青越容易老化。通过动态剪切流变试验结果可计算得到老化指数,以评价改性沥青的耐老化性能。

动态剪切流变试验中复数模量  $G^*$  包括储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  2 个分量,两者计算方法如式(4)、式(5)所示。储能模量为复数模量的同相分量,其数值表示沥青弹性的高低和可完全恢复变形。损耗模量是复数模量的异相分量,表示沥青黏性高低和不可恢复的变形。Cole-Cole 图是沥青储能模量和损耗模量之间的曲线图,有助于表示沥青的黏弹性特征,且无需将温度或频率作为坐标轴。

$$I_{age} = \frac{G_{aged}^* / \sin \delta_{aged}}{G_{unaged}^* / \sin \delta_{unaged}} \quad (3)$$

式中,  $G_{aged}^*$  为老化后复数模量;  $\delta_{aged}$  为老化后相位角;  $G_{unaged}^*$  为老化前复数模量;  $\delta_{unaged}$  为老化前相位角。

$$G' = |G^*| \cos \delta \quad (4)$$

$$G'' = |G^*| \sin \delta \quad (5)$$

式中,  $G'$  为储能模量;  $G^*$  为复数模量;  $\delta$  为相位角;  $G''$  为损耗模量。

研究中动态剪切试验在 64 °C 和 10 rad/s 测得的 PE 改性剂掺量为 0%、4%、6% 和 8% 时对应老化指数分别为 1.86、1.4、1.19、1.08。随着 PE 改性剂掺量增加,改性沥青老化指数逐渐降低。与未添加改性剂的沥青相比,PE 改性剂掺量为 4%、6% 和 8% 时,改性沥青老化指数分别降低了 24.6%、47.9% 和 65.5%; 改性剂掺量为 4% 和 6% 时,老化指数降低幅度增长明显; 改性剂掺量由 6% 增加到 8% 时,老化指数降低幅度减缓。这表明 PE 改性剂提高了改性沥青耐老化性能,且改性剂掺量小于 6% 时,老化性能受改性剂用量影响显著。

不同 PE 改性剂掺量下的复数模量对应的 Cole-Cole 图如图 3 所示。由图 3 可知,添加 PE 改性剂后 Cole-Cole 图中曲线向储能模量轴移动。随着 PE 改性剂掺量增加,这种移动变化逐渐增强。相比于改性剂掺量为 0% 和 4% 时,改性剂掺量为 6% 和 8% 时,曲线向储能模量轴移动显著,这表明改性沥青的弹性明显改善。在测试范围内,PE 改性剂掺量越高,改善效果越明显,改性沥青弹性和可恢复变形越高,这有利于提高改性沥青的抗车辙能力。

#### 2.4 低剪切黏度

在 64 °C 温度下,频率分别为 0.1、0.01、0.001 rad/s 时的低剪切黏度如图 4 所示。由图 4 分析可知,相同频率下,随着 PE 改性剂掺量增加,改性沥青的低剪切黏度逐渐增加。与未添加改性剂的普通沥青相比,改性剂掺量分别为 4%、6% 和 8% 时,改性沥青在 3 个频率下的平均低剪切黏度分别增加了 3.0 倍、5.5 倍和 6.8 倍。改性剂掺量分别为 4% 和 6% 时,低剪切黏度增长幅度较大; 改性剂掺量为 8% 时,低剪切黏度增长幅度降低。相同改性剂掺量不同频率下的剪切黏度差异不显著。与 0.1 rad/s 时低剪切黏度相比,0.01 rad/s 时低剪切黏度在不同改性剂掺量下提高幅度为 5%~10%,0.001、0.01 rad/s 时低剪切黏度基本相当,表明低剪切黏度在 0.01 rad/s 时已趋于稳定。根据低剪切黏度测试结果,掺加 PE 改性剂提高了改性沥青的黏度和抗车辙性能,提高幅度随改性剂掺量增加而增大。在掺量大于 6% 时,低剪切黏度增长幅度降低。

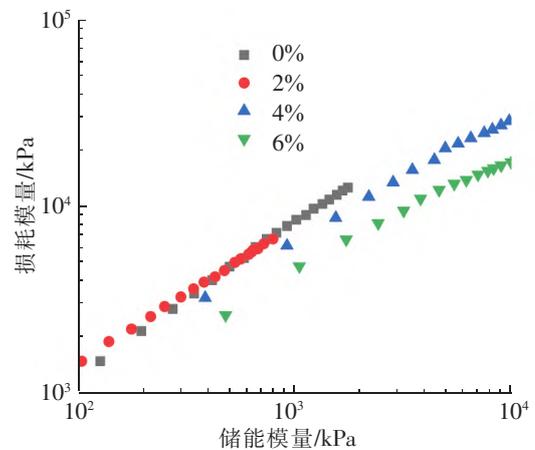


图 3 不同 PE 改性剂掺量下 Cole-Cole 图

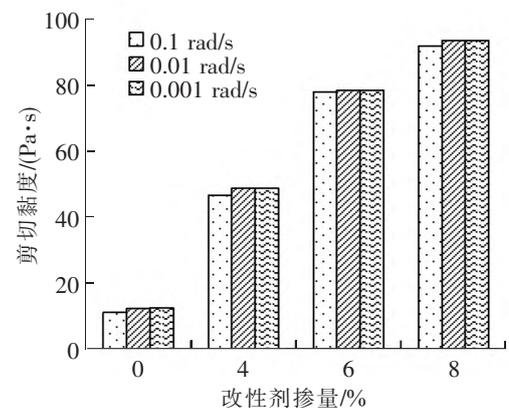


图 4 不同改性剂掺量和频率下低剪切黏度

2.5 多应力蠕变恢复试验指标

不同应力水平和改性剂掺量下,沥青不可恢复蠕变柔量和蠕变恢复率测试结果如图 5 所示。由图 5 分析可知,相同改性剂掺量下,与蠕变应力 0.1 kPa 时测试结果相比,蠕变应力 3.2 kPa 时不可恢复蠕变柔量增加,蠕变恢复率降低。相同蠕变应力水平时,随着 PE 改性剂掺量增加,不可恢复蠕变柔量逐渐降低,蠕变恢复率逐渐增加。与不含改性剂的普通沥青相比,PE 改性剂掺量分别为 4%、6%和 8%时,在 0.1 kPa 应力水平下,不可恢复蠕变柔量分别降低了 79.9%、94.0%和 95.2%,蠕变恢复率分别提高了 1.25 倍、4.21 倍和 6.77 倍;在 3.2 kPa 应力水平下,不可恢复蠕变柔量分别降低了 63.1%、94.8%和 95.1%。3.2 kPa 应力水平下,未添加改性剂的普通沥青蠕变恢复率几乎为零,改性剂分别添加 4%、6%和 8%时,蠕变恢复率分别增加到 1.21%、10.53%和 15.96%。从不同改性剂掺量下蠕变性能变化幅度可知,改性剂掺量为 4%和 6%时不可恢复蠕变柔量和蠕变恢复率变化显著。改性剂掺量从 6%增加到 8%时,蠕变性能变化幅度显著降低。为具有更好的路用性能,沥青应具有较低的不可恢复蠕变柔量和较高的蠕变恢复率,添加改性剂后不可恢复蠕变柔量的降低和蠕变恢复率的增加表明 PE 改性沥青具有更高的抗车辙能力,改性剂掺量 6%时沥青性能已有显著改善效果。

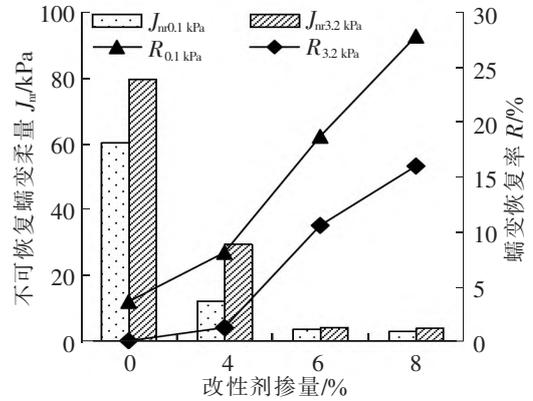


图 5 不同改性剂掺量下 MSCR 试验结果

2.6 不同流变指标相关性

为分析不同流变参数的相关性,基于温度为 64 °C 时测试结果,将车辙因子  $G^*/\sin \delta$  作为自变量,Shenoy 参数、低剪切黏度、不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$ 、蠕变恢复率  $R$  4 类其他流变指标分别作为因变量,分析其他流变指标与车辙因子之间相关关系,结果如表 2 和图 6 所示。

表 2 不同流变参数与车辙因子之间相关性

流变参数 $y$	流变参数 $x$ : 车辙因子	
	相关方程	相关系数 $R^2$
Shenoy 参数	$y = -0.0218x^2 + 1.589x + 0.8246$	0.9992
低剪切黏度	$y = 288.22\ln(x) + 35.191$	0.9864
不可恢复蠕变柔量 $J_{nr0.1}$	$y = 7.7911x - 1.121$	0.9801
不可恢复蠕变柔量 $J_{nr3.2}$	$y = -2.839\ln(x) + 8.2968$	0.9607
蠕变恢复率 $R_{0.1}$	$y = 1.2286x + 1.9708$	0.9860
蠕变恢复率 $R_{3.2}$	$y = 0.8426x - 1.6627$	0.9477

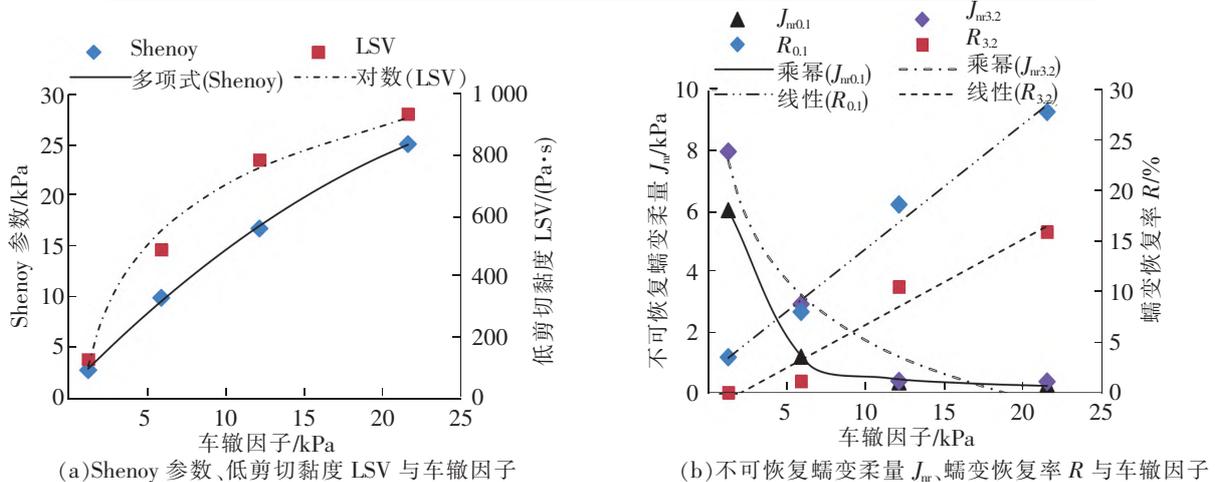


图 6 不同流变参数相关性

由表 2 和图 6 分析可知,Shenoy 参数、低剪切黏度、不可恢复蠕变柔量、蠕变恢复率与车辙因子之间具有明显的相关性,相关系数均在 90%以上。Shenoy 参数、低剪切黏度和蠕变恢复率随车辙因子增加逐渐增大。其中,Shenoy 参数和低剪切黏度与车辙因子之间为非线性关系,在小于 15 kPa 范围内,随着车辙因子增加,Shenoy 参数和低剪切黏度增长较快,之后增长幅度减少,尤其是 Shenoy 参数更为明显;蠕变恢复率与车辙因子之间为线性关系。不可恢复蠕变柔量随车辙因子增加逐渐减小,且为非线性关系。在小于 10 kPa 范围内,随着车辙因子增加,蠕变恢复率降低幅度明显,之后降低幅度减小并趋于平缓,尤其是应力水平 0.1 kPa 时不可恢复蠕变柔量,前期对车辙因子变化敏感,变化幅度受车辙因子影响非常显著。

### 3 结论

(1)PE 改性剂提高了改性沥青 PG 分级,改性剂掺量为 6%和 8%时 PG 分级相同。老化前后 PE 改性沥青性能变化趋势及 PG 分级相同。Shenoy 参数值与车辙因子变化规律一致,但相同条件下 Shenoy 参数值均高于车辙因子。PE 掺量不高于 6%时,两者差值与改性剂掺量呈正相关,与温度呈负相关。PE 掺量 8%时,两者差值变化规律存在波动。

(2)根据动态剪切流变试验得到的老化指数,PE 改性剂提高了改性沥青耐老化性能,且改性剂掺量不高于 6%时,老化性能受改性剂用量影响显著。改性剂掺量为 6%和 8%时,复数模量 Cole-Cole 曲线向储能模量轴移动显著,改性沥青的弹性明显改善。

(3)改性沥青低剪切黏度在 0.01 rad/s 时趋于稳定。改性剂掺量分别为 4%、6%和 8%时,低剪切黏度分别增加了 3.0 倍、5.5 倍和 6.8 倍。改性剂掺量大于 6%时,低剪切黏度增长幅度降低。随着 PE 改性剂掺量增加,改性沥青不可恢复蠕变柔量降低,蠕变恢复率增加,改性剂掺量不高于 6%时,蠕变性能变化显著。改性剂掺量从 6%增加到 8%时,蠕变性能变化幅度显著降低。

(4)Shenoy 参数和低剪切黏度与车辙因子呈非线性正相关,蠕变恢复率与车辙因子呈线性正相关;不可恢复蠕变柔量与车辙因子呈非线性负相关。车辙因子与其余流变参数相关系数均在 90%以上。

### 参 考 文 献

- [1]申冲冲,司春棣,凡涛涛,等. 变温重载作用下沥青路面结构动态变形特性研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2023,36(1):54-60.
- [2]PADHAN R K, SREERAM A. Enhancement of storage stability and rheological properties of polyethylene (PE) modified asphalt using cross linking and reactive polymer based additives[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 772-780.
- [3]MASHAAN N, CHEGENIZADEH A, NIKRAZ H. A comparison on physical and rheological properties of three different waste plastic-modified bitumen[J]. Recycling, 2022, 7(2): 1-13.
- [4]XIN X, YAO Z, SHI J, et al. Rheological properties, microstructure and aging resistance of asphalt modified with CNTs/PE composites[J/OL]. Construction and Building Materials, 2020, 262:120100[2023-10-09]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120100>.
- [5]杨小宾. 沥青抗车辙性能评价指标研究[J]. 山东交通科技, 2023(3):32-35.
- [6]程金梁,熊子佳,龚明辉,等. 高掺量直投改性剂对改性沥青流变性能的影响[J]. 石油沥青, 2022,36(5):1-7.
- [7]张文才,郝晓刚,李萍,等. 聚乙烯接枝马来酸酐含量对废旧聚乙烯改性沥青性能的影响[J]. 中国塑料, 2022,36(6): 24-31.
- [8]李宝玉. 石墨烯/聚乙烯复合改性沥青胶结料的流变性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021,40(7): 2461-2468.
- [9]张程志. 废旧 PE 改性沥青及其混合料性能试验研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2018.
- [10]李松. 沥青混合料高温蠕变性能的多尺度研究[D]. 南京:东南大学, 2022.
- [11]刘成,徐萌,权栋,等. DMA 法研究拌和温度对沥青黏弹性能的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(4):270-275.
- [12]周钊. 木屑生物沥青对沥青结合料流变特性的影响[J]. 公路工程, 2017,42(5):343-347.

## Multiscale Rheological Properties of PE Modified Asphalt

LI Xurui<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;

2. Zhongben Testing Certification Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;

3. Research and Development Center of Transport Industry of Technologies,

Materials and Equipments of Highway Construction and Maintenance, Zhengzhou 450000, China;

4. Henan Key Laboratory of Recycling Solid Waste Materials for Road Engineering, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** To evaluate the rheological properties of PE(Polyethylene) modified asphalt and the correlation between different rheological indicators, dynamic shear rheological tests and multi stress creep recovery tests were conducted under different PE modifier dosages. The multiscale evaluation indicators of the rheological properties of PE modified asphalt were rutting factor. By using Shenoy parameter, low shear viscosity, irreparable creep flexibility, and creep recovery rate as the evaluation index, the correlation between different rheological indicators was analyzed. The effect of PE modifier on the aging resistance and viscoelasticity of asphalt was evaluated by aging index and Cole-Cole plot. The results show that as the content of PE modifier increases, the rutting factor, low shear viscosity, Shenoy parameter, and creep recovery rate gradually increase, and the latter three are positively correlated with the rutting factor. The irrecoverable creep compliance gradually decreases and is non-linear and negatively correlated with the rutting factor. The correlation coefficient between the rutting factor and other rheological parameters is above 90%. PE modified asphalt has improved aging resistance and elasticity. When the dosage of the PE modifier is greater than 6%, the rheological index and aging index decrease significantly due to the influence of the modifier dosage.

**Key words:** road engineering; PE modifier; asphalt; rheology; multiscale

(上接第 86 页)

## Study on Dynamic Characteristics of Vehicle-CRTS II Slab Ballastless Track Coupling System Under Interlayer Split

CAO Meixue, WANG Mingsheng

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** With the extension of service time of CRTS II slab ballastless track structure, the impact of interlayer joints on track structure and traffic safety has become one of the urgent problems to be solved. In order to clarify the degree of influence of different degrees of interlayer separation on the dynamic characteristics of the vehicle-ballastless track system, a coupled dynamics model of vehicle-CRTS II track slab considering interlayer joints is established, and the effects of single joints with different sizes and multiple joints with different combinations of positions on the dynamic response of the vehicle and the track structure are investigated through the joint simulation of ABAQUS and Simpack. The results showed that the development of a single departure seam was significantly accelerated when the transverse depth and longitudinal length of the seam were 522 mm and 1.275 m and above, respectively. The most unfavorable combination of different positions of the multi-seam is the combination of the plate end and the edge of the slab. The conclusions of the study provide a reference value for the operation and maintenance of high-speed railroad track structures.

**Key words:** CRTS II slab ballastless track; interlayer separation damage; rigid and flexible coupling; dynamic response