

文章编号:1007-9629(2022)04-0408-07

# LDPE/EVA 复合改性沥青的流变性能

颜可珍<sup>1,2,\*</sup>, 李慧丽<sup>1,2</sup>, 洪哲<sup>1,2</sup>, 黎国凯<sup>1,2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术  
湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为探究掺入低密度聚乙烯(LDPE)和乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA) 2种聚合物的复合改性沥青的流变性能,选用掺量为0%、2%、4%的LDPE和掺量为0%、2%、4%、6%、8%的EVA进行复配,制备了14种复合改性沥青.通过流变性能试验、离析试验、傅里叶变换红外光谱(FTIR)等,分析了复合改性沥青的高低温性能及储存稳定性能.结果表明:复合改性沥青的车辙因子和失效温度均较基质沥青有所增大,且当EVA掺量大于4%时,其高温指标高于SBS改性沥青,LDPE与EVA均可大幅改善沥青的高温性能;2种聚合物的掺入对沥青的低温性能改善效果不明显;EVA的掺入能在一定程度上改善复合改性沥青的储存稳定性;LDPE、EVA与沥青之间未发生明显的化学反应.

**关键词:**复合改性沥青;高温流变性能;低温流变性能;储存稳定性

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.012

## Rheological Properties of LDPE / EVA Composite Modified Asphalt

YAN Kezhen<sup>1,2,\*</sup>, LI Huili<sup>1,2</sup>, HONG Zhe<sup>1,2</sup>, LI Guokai<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to investigate the performance of LDPE and EVA, 14 kinds of composite modified asphalt were prepared by 0%, 2%, 4% LDPE and EVA with 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, respectively. Rheological test, segregation test and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) test were applied for their high and low temperature performance and storage stability. The results show that the rutting factor and failure temperature of composite modified asphalt are higher than that of base asphalt. When EVA content is higher than 4%, the high temperature index of the composite modified asphalt is higher than that of SBS modified asphalt. LDPE and EVA can greatly improve the high temperature performance of asphalt. The addition of two kinds of polymers has no obvious effect on the low temperature performance of asphalt. The addition of EVA can improve the storage stability of composite modified asphalt to a certain extent. Infrared spectrum test results show that there is no obvious chemical reaction between LDPE, EVA and asphalt.

**Key words:** composite modified asphalt; high temperature rheological property; low temperature rheological property; storage stability

日益增长的交通量和高强度的荷载作用对沥青路面提出了更高的要求,聚合物改性沥青的应用也越来越广泛<sup>[1-3]</sup>. 废物再利用是当今环境可持续的研

究热点之一,将回收的聚合物用于沥青改性,既能提高沥青性能,又可减缓环境污染的压力<sup>[4]</sup>. 聚乙烯(PE)作为制备塑料的主要原料之一,在世界范围内

收稿日期:2021-01-07; 修订日期:2021-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778224)

第一作者(通讯作者):颜可珍(1975—),男,湖南桃江人,湖南大学教授,博士生导师,博士. E-mail: yankz@hnu.edu.cn

应用十分广泛,但废旧塑料回收困难且降解时间长,所造成的严重环境污染问题亟待解决.已有研究表明,PE可以显著改善沥青和沥青混合料的高温性能,然而PE与沥青之间的相容性较差,使得PE类改性剂在沥青领域的实际工程中应用受限<sup>[5-6]</sup>.因此,有必要进一步提升PE改性沥青的储存稳定性.乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)作为广泛使用的沥青改性剂,可以提高PE在沥青中的极性,从而改善与沥青的相容性,提升PE改性沥青的储存稳定性<sup>[6-8]</sup>.但2种聚合物对沥青进行复合改性的研究较少,复合改性沥青的使用性能还需进一步研究.

综上,本文采用低密度聚乙烯(LDPE)和EVA 2种聚合物对沥青进行复合改性.基于流变试验,得出改性剂掺量不同的LDPE/EVA复合改性沥青的失效温度、车辙因子和劲度模量等指标.与实际工程

应用比较广泛的SBS改性沥青相对比,分析单一改性、复合改性前后沥青的高温性能变化,并结合测力延度分析复合改性沥青的低温性能变化.通过离析试验分析EVA的掺入对LDPE改性沥青储存稳定性的影响,并通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)进行机理分析.研究了LDPE/EVA复合改性沥青的使用性能,并确定了改性剂的推荐掺量,以期对LDPE在沥青路面工程上应用的可行性提供参考.

## 1 原材料

基质沥青采用国产70<sup>#</sup>道路石油沥青(70<sup>#</sup>),其基本性能指标见表1;SBS为中石化巴陵YH791E型;2种聚合物改性剂分别为LDPE和EVA.图1和表2分别为2种聚合物改性剂在常温下的样品形态和基本物理参数.

表1 70<sup>#</sup>基质沥青性能指标  
Table 1 Performance index of 70<sup>#</sup> matrix asphalt

Index	Test result	Requirement	Test method
Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	73.30	60-80	T 0604-2011
Softening point/°C	48	>46	T 0606-2011
Ductility(15 °C)/cm	>150	>100	T 0605-2011
Viscosity(135 °C)/(Pa·s)	0.58		T 0625-2011

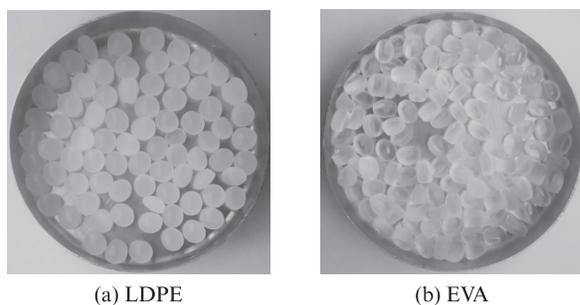


图1 2种聚合物改性剂在常温下的样品形态

Fig. 1 Sample morphology of two kinds of polymer asphalt modifier under normal temperature

表2 2种聚合物改性剂的基本物理参数  
Table 2 Basic physical parameter of two kinds of polymer asphalt modifier

Type	Appearance	Density (25 °C)/(g·cm <sup>-3</sup> )	Melting point/°C
LDPE	Translucent particle	0.935	125
EVA	Transparent particle	0.938	84

## 2 试样制备

SBS改性沥青的制备过程如下:首先,将70<sup>#</sup>基质沥青加热至流动状态,掺入4% SBS(以基质沥青质量计);然后,保持温度在(180±5)°C,以4 000 r/min的

转速高速剪切60 min;最后,以2 000 r/min的转速搅拌90 min,保证SBS在沥青中充分溶胀.

LDPE/EVA复合改性沥青的制备过程如下:首先,将70<sup>#</sup>基质沥青加热至流动状态,掺入各比例的LDPE和EVA;然后,保持温度在(165±5)°C,以2 000 r/min的转速搅拌20 min;接着升温至(180±5)°C,以4 000 r/min的转速高速剪切60 min;最后,保持温度在(165±5)°C,以2 000 r/min的转速继续搅拌20 min.

## 3 试验结果与分析

### 3.1 高温性能分析

本文采用动态剪切流变(DSR)试验(40~90 °C),分别对基质沥青、SBS改性沥青和LDPE/EVA复合改性沥青试样进行温度扫描,测定各沥青试样在不同温度条件下的车辙因子( $G^*/\sin \delta$ ),并确定其失效温度,对比分析复合改性沥青的高温性能.

#### 3.1.1 车辙因子

车辙因子( $G^*/\sin \delta$ )是评估沥青高温性能的重要参数之一,可表征高温下沥青路面的抗车辙性能,该值越大,路面的抗永久变形性能越好<sup>[9]</sup>.基质沥青、SBS改性沥青和LDPE/EVA复合改性沥青的车辙因子如图2所示(图中70<sup>#</sup>表示基质沥青、4% SBS表

示SBS掺量为4%的SBS改性沥青、0%LDPE+2%EVA表示LDPE掺量为0%、EVA掺量为2%的LDPE/EVA复合改性沥青,其他依此类推。由图2可知:SBS改性沥青和LDPE/EVA复合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 均大于基质沥青;当EVA掺量一定时,随着LDPE掺量的增加,复合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 不断增大;当LDPE掺量一定时,随着EVA掺量的增加,复

合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 不断增大,说明EVA和LDPE的掺入均可提高复合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ ,且两者掺量越大,高温性能越好。由图2还可见:当EVA掺量大于4%时,无论LDPE掺量是0%、2%还是4%,LDPE/EVA复合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 均高于SBS改性沥青,表明当EVA掺量大于4%的LDPE/EVA复合改性沥青的抗车辙性能较SBS改性沥青更佳。

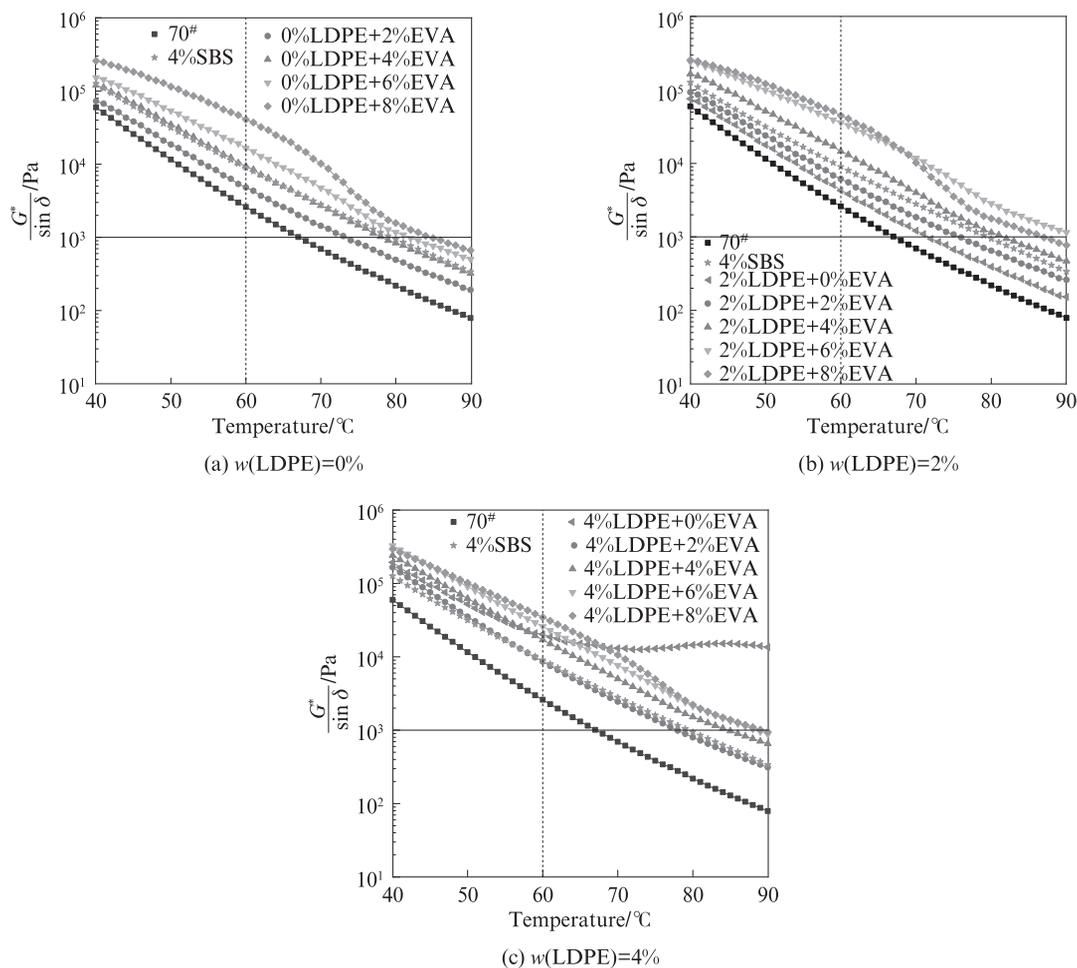


图2 各沥青的车辙因子  
Fig. 2 Rutting factor of asphalts

值得一提的是,当LDPE掺量为4%且EVA掺量为0%时,复合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 在40~60℃下的变化趋势与70#基质沥青一致;当温度超过60℃后,复合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 变化趋势逐渐平缓,不再随温度升高而降低(图2(c)).这是因为温度超过60℃时,LDPE掺量为4%、EVA掺量为0%的复合改性沥青中的沥青部分已融化,LDPE可能已从沥青中析出,从而影响其 $G^*/\sin\delta$ 的变化趋势;EVA掺入后,LDPE/EVA复合改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 随着温度的升高而逐渐降低,变化趋势与70#基质沥青一致,表明其高温性能变化更为稳定。

### 3.1.2 失效温度

一般地,将沥青的 $G^*/\sin\delta$ 为1 kPa时的温度定义为未老化沥青高温等级临界时的失效温度,用以确定沥青的高温性能等级<sup>[10]</sup>。图3为LDPE/EVA复合改性沥青的失效温度。由图3可见:各复合改性沥青的失效温度均高于基质沥青,且均大于70℃;当LDPE掺量一定时,随着EVA掺量的增加,复合改性沥青的失效温度有所提高,表明LDPE和EVA对复合改性沥青的PG等级均有显著影响,且有助于提升复合改性沥青的高温性能;当EVA掺量高于4%时,复合改性沥青的失效温度大于SBS改性沥青(失效

温度为79.4℃),这一趋势与复合改性沥青 $G^*/\sin \delta$ 的变化相似.因此,就高温性能而言,LDPE/EVA复合改性沥青中的EVA掺量不应小于4%.

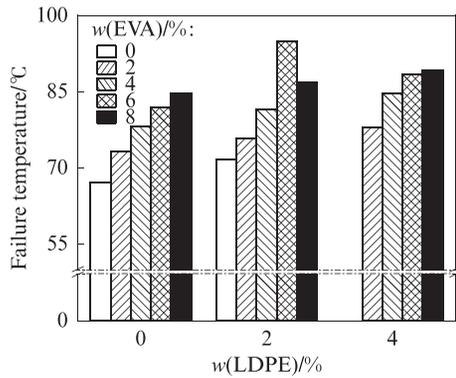


图3 LDPE/EVA复合改性沥青的失效温度

Fig. 3 Failure temperature of LDPE/EVA composite modified asphalt

### 3.2 低温性能分析

本文通过弯曲梁流变(BBR)试验评估了改性沥青的低温流变性能,得到了压力老化(PAV)沥青试样在-12、-18℃下的劲度模量(S)、蠕变速率敏感指数(m值)及低温临界温度.从低温断裂能角度,采用测力延度试验得到沥青黏韧性,综合分析了LDPE/EVA掺量对复合改性沥青低温性能的影响.

#### 3.2.1 劲度模量和蠕变速率敏感指数

S和m值分别表征沥青低温时的硬度和对应力的分散能力.沥青的S越小、m值越大,代表其低温性能越好.-12、-18℃下沥青S和m值的结果如表3所示.由表3可见,随着LDPE/EVA掺量的增加,复合改性沥青的S值整体上有所降低,m值的变化趋势不明确,所有复合改性沥青均符合在-12℃下 $S < 300$  MPa,  $m$ 值 $> 0.3$ 的Superpave规范中的沥青低温分级标准.由于仅通过S和m值来评价复合改性沥青的低温流变性能不够直观,本文采用以上2个参数的比值 $\lambda (\lambda = m/S)$ 来进行评价, $\lambda$ 值较高的复合改性沥青在低温下表现更好<sup>[11-12]</sup>.复合改性沥青的 $\lambda$ 值也列于表3.由表3还可见:在-12、-18℃下,当EVA掺量一定时,LDPE掺量为2%的复合改性沥青 $\lambda$ 值高于LDPE掺量为4%的复合改性沥青,其低温性能较优.

#### 3.2.2 低温临界温度

为进一步分析2种改性剂掺量对复合改性沥青低温性能的影响,分别对复合改性沥青的S和m值进行线性回归,得到 $S = 300$  MPa、 $m$ 值=0.3时复合改性沥青的低温临界温度( $T_{L,S}$ 和 $T_{L,m}$ ),由此计算出其

表3 LDPE/EVA复合改性沥青的劲度模量和蠕变速率敏感指数

Table 3 S and m-value of LDPE/EVA composite modified asphalt

w(EVA)/%	w(LDPE)/%	-12℃			-18℃		
		m-value	S/MPa	$\lambda \times 10^3 / \text{MPa}^{-1}$	m-value	S/MPa	$\lambda \times 10^3 / \text{MPa}^{-1}$
0	0	0.340	162	2.10	0.267	389	0.69
	2	0.372	121	3.07	0.249	276	0.90
	4	0.343	144	2.38	0.263	336	0.78
2	0	0.353	106	3.33	0.277	300	0.92
	2	0.381	110	3.46	0.321	227	1.41
	4	0.306	155	1.97	0.243	323	0.75
4	0	0.333	110	3.03	0.283	253	1.12
	2	0.388	101	3.84	0.321	243	1.32
	4	0.327	126	2.60	0.269	270	1.00
6	0	0.357	81	4.42	0.338	171	1.98
	2	0.327	84	3.89	0.263	204	1.29
	4	0.305	118	2.58	0.275	246	1.12
8	0	0.315	129	2.44	0.290	231	1.26
	2	0.334	85	3.92	0.291	207	1.41
	4	0.325	91	3.58	0.293	216	1.36

低温临界温度 $T_L (T_L = \max(T_{L,S}, T_{L,m}))$ ,结果见表4.由表4可见,与基质沥青相比,当EVA掺量为0%时,2%LDPE、4%LDPE改性沥青的 $T_L$ 几乎没有发生变化,表明LDPE的单一掺入对沥青的低温性能影响比较小.复合改性沥青的低温临界温度 $T_L$ 没有较为明显的变化规律,但均低于-12℃.

表4 LDPE/EVA复合改性沥青的低温临界温度

Table 4 Critical low temperature of LDPE/EVA composite modified asphalt

w(EVA)/%	w(LDPE)/%	$T_{L,S}/\text{°C}$	$T_{L,m}/\text{°C}$	$T_L/\text{°C}$
0	0	-15.6	-15.3	-15.3
	2	-18.9	-15.5	-15.5
	4	-16.9	-15.2	-15.2
2	0	-18.0	-16.2	-16.2
	2	-21.7	-20.1	-20.1
	4	-17.2	-12.6	-12.6
4	0	-20.0	-16.0	-16.0
	2	-20.4	-19.9	-19.9
	4	-19.3	-14.8	-14.8
6	0	-26.6	-30.0	-26.6
	2	-22.8	-14.5	-14.5
	4	-20.5	-13.0	-13.0
8	0	-22.1	-15.6	-15.6
	2	-22.8	-16.6	-16.6
	4	-20.7	-16.7	-16.7

### 3.2.3 测力延度

有研究指出,沥青混合料的低温性能与其劲度模量、黏韧性相关性较高.从黏韧性角度分析后发现,LDPE改性沥青的低温性能较基质沥青有所改善<sup>[13-14]</sup>.为进一步探究复合改性沥青的低温性能,本文从断裂能角度,在5℃,1 cm/min拉伸速率试验条件下对LDPE/EVA复合改性沥青进行测力延度试验,并计算出黏韧性面积( $A$ , N·mm).进行测力延度

试验时,70<sup>#</sup>基质沥青发生脆断,SBS改性沥青及LDPE/EVA复合改性沥青的试验结果如图4所示.由图4可见:当LDPE掺量一定、EVA掺量增加到8%时,复合改性沥青的黏韧性下降最为明显,说明过量的EVA会影响其低温性能;复合改性沥青的黏韧性和延度值虽较基质沥青有所改善,但仍远小于SBS改性沥青(图4(d)),LDPE/EVA复合改性沥青的低温性能需要进一步提高.

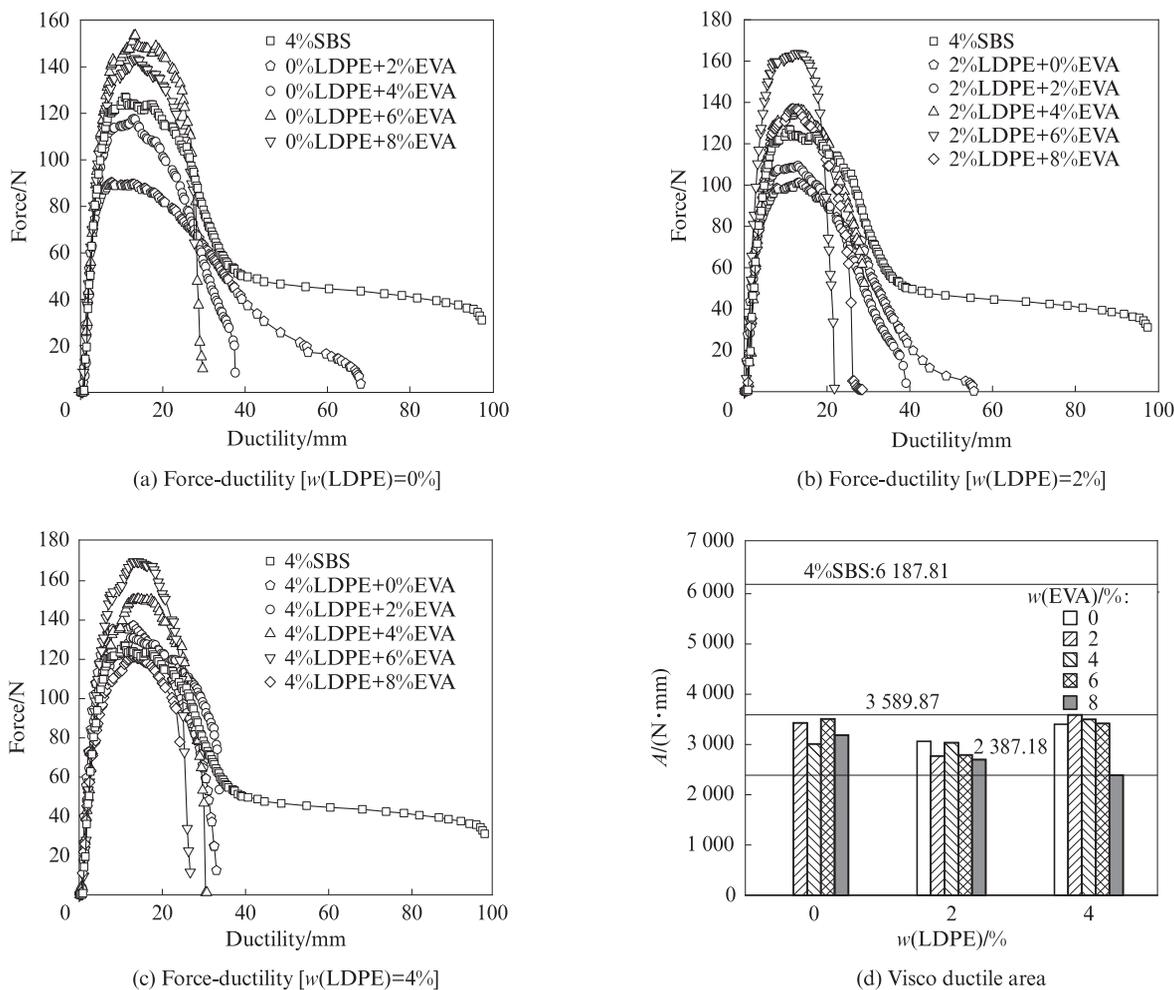


图4 LDPE/EVA复合改性沥青的测力延度和黏韧性面积

Fig. 4 Force-ductility and visco ductile area of LDPE/EVA composite modified asphalt

### 3.3 储存稳定性分析

复合改性沥青的储存稳定性可以通过离析试验来评价.本文采取直接观察法,并结合软化点差值,分析EVA的掺入对LDPE改性沥青离析情况的影响,结果见表5.由表5可知:(1)2%LDPE+0%EVA和4%LDPE+0%EVA改性沥青进行离析试验后,表面有结皮,随着EVA掺量的增加,复合改性沥青表面的结皮现象逐渐减少,表明EVA的掺入可以改善LDPE改性沥青的离析情况.(2)复合改性沥青随

着EVA掺量的增加,其软化点差值逐渐缩小;4%LDPE+0%EVA改性沥青的软化点差值最大,这也解释了其车辙因子变化趋势与基质沥青不同的原因;4%LDPE+8%EVA复合改性沥青的软化点差值较4%LDPE+0%EVA改性沥青下降了69.6%;2%LDPE+8%EVA复合改性沥青的软化点差值最小,为2.2℃,这说明EVA掺量越高,改性沥青的相容性改善效果越明显,但LDPE和EVA的掺量还需要结合改性沥青高低温性能进行综合分析.

表5 LDPE/EVA复合改性沥青离析情况  
Table 5 Segregation of LDPE/EVA composite modified asphalt

$w(\text{LDPE})/\%$	$w(\text{EVA})/\%$	Condition of crust	Difference in softening point
2	0	Thin full crust	4.1
	2	Thin full crust	3.8
	4	Slightly crusted edge	3.2
	6	Uniform dispersion with no crust	3.5
	8	Uniform dispersion with no crust	2.2
4	0	Thick full crust	12.5
	2	Thick full crust	11.7
	4	Thin full crust	10.8
	6	Slightly crusted edge	6.9
	8	Uniform dispersion with no crust	3.8

### 3.4 傅里叶红外光谱分析

研究表明,EVA是较为惰性的高分子,其极性较PE强,能够改善PE与沥青的相容性<sup>[6-7]</sup>.为进一步探究复合改性沥青储存稳定性改善的原因是否来自于LDPE、EVA与沥青之间所发生的化学反应,本文采用FTIR对70#沥青、LDPE/EVA复合改性沥青进行微观分析.图5为LDPE/EVA复合改性沥青的傅里

叶红外光谱图.由图5可见:沥青的波峰变化集中的波段是 $1\ 300\sim 1\ 500\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2\ 800\sim 3\ 000\ \text{cm}^{-1}$ ;对于LDPE单一改性沥青,没有新的吸收峰出现,即没有产生新的官能团,其化学组成未发生明显变化,说明LDPE与沥青之间主要是物理变化;LDPE/EVA复合改性沥青在 $1\ 242$ 、 $1\ 739\ \text{cm}^{-1}$ 处出现了新的吸收峰,生成了新的官能团 $(\text{CH}_3)_3\text{C}-\text{R}$ 和 $\text{C}=\text{O}$ ,但该新官能团为EVA带来的,并非发生了化学反应,这表明LDPE、EVA和沥青之间主要发生物理共混,是否有其他的化学反应还须进一步探究.

## 4 结论

(1)LDPE和EVA 2种聚会物改性剂的掺入使改性沥青的车辙因子、失效温度均有不同程度的增大.当EVA掺量大于4%时,复合改性沥青的高温指标均高于SBS掺量为4%的SBS改性沥青,表明LDPE与EVA复合可较大幅度提升改性沥青的高温性能.

(2)LDPE/EVA复合改性沥青均可以满足 $-12\ ^\circ\text{C}$ 下, $S < 300\ \text{MPa}$ 、 $m$ 值 $> 0.3$ 的低温指标要求.相比基质沥青,LDPE和EVA的掺入对LDPE/EVA复合改性沥青低温性能影响不大,其低温性能还需进一步改善.

(3)LDPE/EVA复合改性沥青较LDPE单一改性沥青的离析结果有较大提升,软化点差值减小,相容性增强.LDPE、EVA与沥青之间未发生明显的化学反应,主要为物理作用.

(4)综合LDPE/EVA复合改性沥青的高低温性能及储存稳定性可知,当LDPE掺量为2%~4%时,EVA的掺量可大于4%,但不宜大于8%.

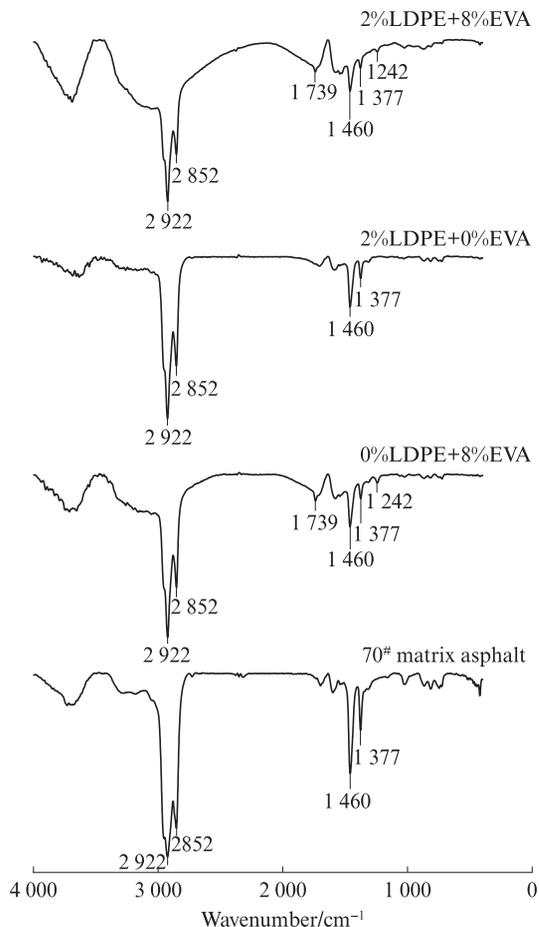


图5 LDPE/EVA复合改性沥青的傅里叶红外光谱图

Fig. 5 FTIR spectra of LDPE/EVA composite modified asphalt

### 参考文献:

- [1] 颜可珍,胡玥,王曾光,等.废胶粉/再生低密度聚乙烯复合改性

- 沥青研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1):145-149.
- YAN Kezhen, HU Yue, WANG Zengguang, et al. Research on modified asphalt by waste tire rubber powder and reclaimed low density polyethylene composite [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):145-149. (in Chinese)
- [ 2 ] 曾梦澜, 陈伟, 朱艳贵, 等. 布敦岩沥青湿法工艺掺量对改性沥青混合料性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11):94-101.
- ZENG Menglan, CHEN Wei, ZHU Yangui, et al. Effects of proportion of Buton rock asphalt on performance of modified asphalt mixture with wet method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11):94-101. (in Chinese)
- [ 3 ] LI J, XIAO F P, ZHANG L F, et al. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233:1182-1206.
- [ 4 ] XIAO F P, SU N Y, YAO S L, et al. Performance grades, environmental and economic investigations of reclaimed asphalt pavement materials [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211:1299-1312.
- [ 5 ] LI J, ZHANG Y X, ZHANG Y Z. The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(6):1067-1073.
- [ 6 ] BROVELLIC, HILLIOU L, HEMAR Y, et al. Rheological characteristics of EVA modified bitumen and their correlations with bitumen concrete properties [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48(19):1202-1208.
- [ 7 ] 范维玉, 任施松, 梁明, 等. EVA分子结构对其改性沥青性能的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(5):159-168.
- FAN Weiyu, REN Shisong, LIANG Ming, et al. Effect of EVA molecular structure on properties of EVA modified asphalt [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science), 2017, 41(5):159-168. (in Chinese)
- [ 8 ] YAN K Z, HONG Z, YOU L Y, et al. Influence of ethylene-vinyl acetate on performance improvements of the low-density polyethylene-modified bitumen [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278:123865.
- [ 9 ] LIN P, YAN C Q, HUANG W D, et al. Rheological, chemical and aging characteristics of high content polymer modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2019, 207:616-629.
- [ 10 ] XU L, LI X Y, ZONG Q D, et al. Chemical, morphological and rheological investigations of SBR/SBS modified asphalt emulsions with waterborne acrylate and polyurethane [J]. Construction and Building Materials, 2021, 272(9):121972.
- [ 11 ] LIU S T, CAO W D, SHANG S J, et al. Analysis and application of relationships between low-temperature rheological performance parameters of asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4):471-478.
- [ 12 ] LI J, XIAO F P, AMIRKHANIAN S N. Storage, fatigue and low temperature characteristics of plasma treated rubberized binders [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209:454-462.
- [ 13 ] 杜镇宇, 袁捷, 肖飞鹏. 低密度聚乙烯改性沥青低温性能评价方法改进研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5):1-15.
- DU Zhenyu, YUAN Jie, XIAO Feipeng. Improvement of low temperature performance evaluation method of LDPE modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):1-15. (in Chinese)
- [ 14 ] 颜可珍, 王道理. 聚合物改性沥青低温性能指标研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):479-484.
- YAN Kezhen, WANG Daocheng. Low temperature performance index of polymer modified asphalt [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):479-484. (in Chinese)