

文章编号:1007-9629(2021)05-1032-07

# 低密度聚乙烯改性沥青低温性能评价方法改进

杜镇宇, 袁捷, 肖飞鹏

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:**低密度聚乙烯(LDPE)改性沥青低温性能目前尚存争议,为准确评价LDPE改性沥青低温性能,对其进行弯曲梁流变仪试验,得到劲度模量( $S$ )和模量变化率( $m$ ),进而计算低温累积应力和耗散能比.基于动态剪切流变仪试验和时温等效原理,获取复数模量主曲线,求得玻璃态模量和交叉频率.基于测力延度试验,测得拉力-延度曲线,求出屈服应变能和拉断功等指标值.结果表明:随着LDPE掺量的增加,改性沥青 $S$ 增加, $m$ 减小,低温累积应力增大,耗散能比减小,玻璃态模量增大且交叉频率减小,表现为低温性能降低;但破坏其所需拉断功却更大,从破坏能量角度来讲,表现为低温性能改善.因此,仅基于评价LDPE改性沥青指标 $S, m$ 或低估了LDPE改性沥青低温性能,应考虑将拉断功补充作为其评价指标之一.

**关键词:**低密度聚乙烯;低温性能;评价指标;断裂能量

中图分类号:U414.7<sup>+5</sup>

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.05.018

## Improvement of Low Temperature Performance Evaluation Method of LDPE Modified Bitumen

DU Zhenyu, YUAN Jie, XIAO Feipeng

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Low density polyethylene(LDPE) modification to improve low temperature performance of bitumen is still controversial at present. In order to accurately evaluate the low temperature performance of LDPE modified bitumen, bending beam rheometer tests were carried out to obtain stiffness modulus( $S$ ), modulus change rate( $m$ ), and then the low temperature accumulated stress, dissipation energy rate were calculated. Based on dynamic shear rheometer test and the principle of time temperature equivalence, the master curve of complex modulus, the glass transition modulus and crossover frequency were obtained. Based on the force ductility test, the tension-ductility curve was measured, and the yield strain energy, breaking work and other index values were obtained. The results show that with the increase of LDPE content, the  $S$  of the modified bitumen increases, the  $m$  decreases, the low temperature cumulative stress increases, the dissipation energy rate decreases, the glass transition modulus increases and the crossover frequency decreases, which shows that the low temperature performance decreases. However, the breaking work required for the failure of LDPE modified bitumen is greater than that of base bitumen, which shows the better low temperature performance of LDPE modified bitumen from the point of view of failure energy. Therefore, low temperature performance of LDPE modified bitumen may be underestimated only based on the evaluation index of  $S, m$ . So breaking work should be considered as one of the supplementary evaluation indexes.

收稿日期:2020-06-27; 修订日期:2020-07-28

第一作者:杜镇宇(1991—),男,四川平昌人,同济大学博士生.E-mail:182468014@qq.com

通讯作者:袁捷(1971—),男,上海人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yuanjie@tongji.edu.cn

**Key words:** low density polyethylene; low temperature performance; evaluation index; fracture energy

聚乙烯(PE)因价格低廉和可用性,PE改性沥青在道路工程中的应用受到越来越多学者的关注<sup>[1-3]</sup>。然而,PE改性沥青及其混合料在实际工程中应用并不广泛。主要包括两方面原因:一是PE改性沥青存储稳定性差<sup>[4]</sup>,在长期运输过程中易离析。二是PE改性沥青低温性能尚存争议。有研究者认为,PE的加入不能改善沥青低温性能,相反,可能会降低其低温性能<sup>[5]</sup>。但也有一些研究人员持相反意见,认为PE的加入会提高沥青的低温性能<sup>[6]</sup>。目前PE改性沥青低温性能评价方法大多基于弯曲梁流变(BBR)试验和延度试验等,较少考虑PE改性沥青低温破坏能量方面的指标。因此,有必要对现有PE改性沥青低温性能评价方法进行研究和改进,以期准确评价其低温性能。

鉴于此,本文选择低密度聚乙烯(LDPE)作为改性剂,基于BBR试验、动态剪切流变(DSR)试验及测力延度试验,分析LDPE改性沥青低温流变特征及断裂性能,得到不同掺量LDPE改性沥青的劲度模量( $S$ ),模量变化率( $m$ ),低温累积应力( $\sigma(\xi)$ ),耗散能比(DER),屈服应变能( $E_y$ ),拉断功( $W_b$ ),玻璃态模量( $G_g^*$ )及交叉频率( $f_c$ )。分别从应力松弛能力和破坏能量角度对LDPE改性沥青低温性能进行了分析,发现现有评价方法的不足,提出改进思路,以期准确评价LDPE改性沥青低温性能提供参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料及试样制备

采用90#基质沥青,改性剂为中石化生产的低密度聚乙烯(LDPE)。文献表明,当聚乙烯在基质沥青中掺量(质量分数)为7%时,能在沥青中形成交联网络结构<sup>[7]</sup>,故具有较好的高温稳定性。因此本文将LDPE掺量定为7%,在保证沥青较好的高温稳定性基础上,探究其低温性能。另外,为了说明随着LDPE掺量的改变,沥青低温流变特性和断裂性能的变化趋势,增加一组4%的掺量。试样制备时为了让LDPE充分溶于基质沥青,在175℃下,先利用大叶片搅拌机以1 000 r/min速率搅拌45 min,再利用高速剪切机以5 000 r/min速率剪切45 min<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 试验方法

采用CANON弯曲梁流变仪,测试短期老化(RTFOT)及长期老化(PAV)后LDPE改性沥青小梁的劲度模量 $S$ 及模量变化率 $m$ ,进而计算低温累积

应力 $\sigma(\xi)$ 和耗散能比DER。

测力延度试验采用无锡市石油仪器设备有限公司生产的Lyy-10A-CL型测力延度仪,获取LDPE改性沥青拉力-延度曲线,进而求出屈服应变能 $E_y$ 和拉断功 $W_b$ 等指标值。试验采用八字模成型试件,拉伸速率为1 cm/min,温度为5℃。

使用8.25 mm平行金属板进行DSR试验,扫描频率为0.1~20.0 Hz,温度为5~55℃。得到LDPE改性沥青的复数模量和相位角主曲线,获得玻璃态模量 $G_g^*$ 和交叉频率 $f_c$ 。并基于时温等效原理,根据主曲线高频(低温)段的流变特征,对LDPE改性沥青低温性能进行分析。

微观图像采集利用Olympus公司生产的BX 41荧光显微镜。

## 1.3 低温性能评价指标计算方法

### 1.3.1 低温累积应力计算

沥青路面低温温缩开裂本质是由于气温骤降导致沥青混合料内部温度累积应力过大,来不及松弛释放而达到其承载极限,从而导致开裂<sup>[10]</sup>。美国战略公路研究计划(SHRP)指出,沥青性能对路面低温开裂直接贡献率为80%<sup>[10]</sup>。因此,有必要分析LDPE改性沥青和基质沥青低温应力累积效应的差异性。设初始温度为0℃,终点温度为-45℃,降温速率为1℃/h。根据玻尔兹曼叠加定理和时温等效定理,进行低温累积应力计算,计算过程如下:

通过BBR试验结果,获取LDPE改性沥青在不同温度下(-6、-12、-18℃)的时间-劲度模量曲线。进一步由蠕变柔量 $D$ 与劲度模量 $S$ 之间的关系( $D=1/S$ )可求出蠕变柔量 $D$ ,并基于玻尔兹曼叠加定理和卷积分逆定理可得:

$$\int_0^t J(t-\tau) \times D(\tau) d\tau = t \quad (1)$$

式中: $t$ 为物理时间; $\tau$ 为与松弛时间有关的积分变量; $J(t-\tau)$ 为 $(t-\tau)$ 时刻的松弛模量; $D(\tau)$ 为蠕变柔量。

因不易直接得到式(1)的解析解,可按照Hopkins等<sup>[11]</sup>提出的算法进行求解,但此方法迭代计算效率不高,故考虑采用Power-law数学模型,拟合蠕变柔量,再由Schapery<sup>[12]</sup>的数值估算方法,进一步得到松弛模量。由移位因子(shift factor)可以将不同温度下的物理时间 $t$ 转化到同一参考温度下的时间 $\xi$ ,得到低温累积应力 $\sigma(\xi)$ 为:

$$\sigma(\xi) = \int_0^{\xi} J_{T_0}(\xi - \xi') \frac{\partial \epsilon(\xi')}{\partial \xi'} d\xi' \quad (2)$$

式中:  $J_{T_0}(\xi - \xi')$  为在参考温度  $T_0$  下  $(\xi - \xi')$  时刻的松弛模量;  $\xi'$  为参考温度下与松弛时间有关的积分变量;  $\epsilon$  为收缩应变.

再采用高斯积分公式<sup>[13]</sup>可以求解上述积分,从而得到低温累积应力.

### 1.3.2 耗散能比(DER)计算

在标准 BBR 试验中,蠕变荷载很小,故试样不会断裂.对试样所做的外部功被转移到总能量的储存和耗散部分<sup>[14]</sup>.从应力松弛角度讲,沥青的耗散能越大、储存能越小则低温性能越好,即耗散能比(耗散能与储存能之比)越大,沥青的应力松弛能力越强,低温性能也更好<sup>[15]</sup>.利用五参数广义 Kelvin 模型(见图 1),来模拟 LDPE 改性沥青的蠕变柔量(见式(3)),计算耗散能和储存能.

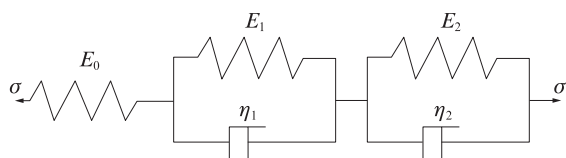


图1 五参数广义 Kelvin 模型

Fig. 1 Five parameters generalized Kelvin model

$$D(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \times (1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}) + \frac{1}{E_2} \times (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}) \quad (3)$$

式中:  $E_0, E_1, E_2$  为弹簧参数;  $\eta_1, \eta_2$  为黏壶参数.

通过对蠕变柔量进行拟合,可得到黏壶参数与弹簧参数.弹簧可用于描述能量的储存,黏壶可用于描述能量的耗散,因此,通过黏壶参数与弹簧参数的计算,可表征材料的能量储存和耗散能力<sup>[15]</sup>.则沥青材料的储存能  $W_s(t)$ 、耗散能  $W_d(t)$  及 DER 计算式为:

$$W_s(t) = \sigma_{\text{BBR}}^2 \left[ \frac{1}{E_0} + \frac{1}{2E_1} \left( 1 - 2e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} + e^{-\frac{2E_1 t}{\eta_1}} \right) + \frac{1}{2E_2} \left( 1 - 2e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} + e^{-\frac{2E_2 t}{\eta_2}} \right) \right] \quad (4)$$

$$W_d(t) = \sigma_{\text{BBR}}^2 \left[ \frac{1}{2E_1} \left( 1 - e^{-\frac{2E_1 t}{\eta_1}} \right) + \frac{1}{2E_2} \left( 1 - e^{-\frac{2E_2 t}{\eta_2}} \right) \right] \quad (5)$$

$$\text{DER} = \frac{W_d(t)}{W_s(t)} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_{\text{BBR}}$  为弯曲梁流变仪加载时小梁跨中应力大小.

### 1.3.3 屈服应变能( $E_y$ )计算

屈服应变能反映了沥青材料从开始变形到屈服阶段,外力对沥青材料所做的功,其值越大,表明材料内部累积应力越大,越易开裂<sup>[16]</sup>,计算方法见文

献[16].

### 1.3.4 拉断功( $W_b$ )计算

拉断功取拉力-位移曲线下的面积,面积越大,表明破坏材料所需要外力功越大,所需外界的能量越大.

### 1.3.5 玻璃态模量( $G_g^*$ )及交叉频率( $f_c$ )计算

采用 CAM 流变模型对复数模量主曲线进行拟合<sup>[17-18]</sup>,求得玻璃态模量和交叉频率.

### 1.3.6 显著性检验分析( $t$ 检验)

采用两独立样本显著性检验( $t$ 检验)<sup>[13]</sup>来预估 LDPE 的掺入对沥青低温累积应力是否造成显著性影响.

## 2 结果及分析

### 2.1 劲度模量及模量变化率

通过 BBR 试验,在  $-6, -12, -18$  °C 条件下,得到荷载作用 60 s 时 LDPE 改性沥青的劲度模量  $S$  及模量变化率  $m$ ,如表 1 所示.

表1 LDPE 改性沥青 BBR 试验结果

Table 1 BBR test results of LDPE modified bitumen

Group	$\omega_{\text{LDPE}}/\%$	Temperature/°C	S/MPa	$m$
B	0	-6	96	0.385
	0	-12	183	0.339
	0	-18	382	0.282
4LDPE-B	4	-6	117	0.326
	4	-12	201	0.292
	4	-18	396	0.241
7LDPE-B	7	-6	147	0.276
	7	-12	233	0.255
	7	-18	423	0.215

由表 1 可知,沥青劲度模量  $S$  随着 LDPE 掺量的增加而增大,  $m$  随着 LDPE 掺量的增加而减小,说明 LDPE 改性沥青低温性能随着 LDPE 掺量的增加而逐渐降低. Readshaw<sup>[19]</sup> 认为在荷载作用 7 200 s 时,沥青劲度模量与路面开裂程度直接相关.因 BBR 试验仅能测试荷载作用 0~240 s 时的数据,故基于时温等效原理,分别以  $-6, -12, -18$  °C 作为参考温度,求得不同参考温度下 LDPE 改性沥青的劲度模量,见图 2. 由图 2 可知(为避免数据点过密不易区分,图中未显示全部数据点,数据点间隔取为 20 个):无论在何种参考温度下,随着 LDPE 掺量的增加,劲度模量主曲线整体呈增大趋势,且较基质沥青更大;随着荷载作用时间的延长,3 组沥青的劲度模量均呈下降趋势,且基质沥青劲度模量下降速率最快.按照 Readshaw<sup>[19]</sup> 的理论,荷载作用 7 200 s 时 7%

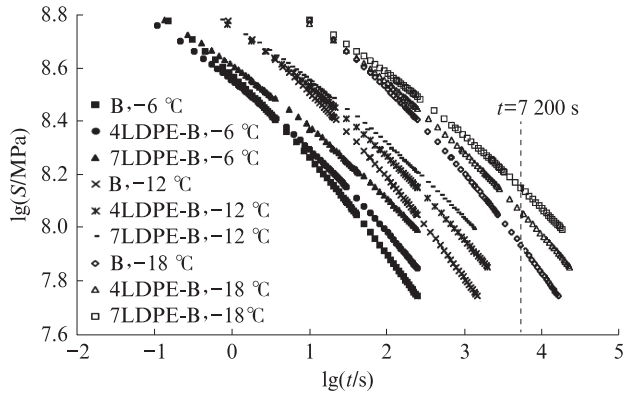


图2 不同参考温度下LDPE改性沥青的劲度模量主曲线

Fig. 2 Stiffness master curves of LDPE modified bitumen under different reference temperatures

LDPE改性沥青的劲度模量仍然较大,说明LDPE改性沥青低温性能较基质沥青要差.

2.2 耗散能比

利用五参数广义Kelvin模型,如图1所示,计算LDPE改性沥青在不同参考温度下(-6、-12、-18 °C)的弹簧参数、黏壶参数及耗散能比(DER),结果如表2所示.

由表2可知:当LDPE掺量相同时,随着温度的降低,沥青耗散能比DER不断减小,应力松弛能力下降;在同一温度下,随着LDPE掺量的增加,沥青DER不断减小,也表明其应力松弛能力不断下降,低温性能降低.因此,不论是降温还是掺入LDPE都会导致沥青应力松弛能力下降,从而使其低温性能降低.

表2 广义Kelvin模型弹簧参数、黏壶参数及耗散能比

Table 2 Spring parameters, glue pot parameters of generalized Kelvin model and DER

Bitumen	$w_{LDPE}/\%$	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Parameter/MPa					DER
			$E_0$	$E_1$	$E_2$	$\eta_1$	$\eta_2$	
B	0	-6	346.7	50.5	291.7	12 970	3 866	0.80
	0	-12	565.6	116.3	577.3	26 810	5 738	0.74
	0	-18	981.1	335.3	1 378.0	58 990	12 490	0.65
4LDPE-B	4	-6	354.7	80.1	334.4	17 070	4 006	0.73
	4	-12	533.2	190.2	719.7	35 650	7 313	0.64
	4	-18	890.5	422.9	1 484.0	70 200	13 140	0.57
7LDPE-B	7	-6	391.2	133.0	466.4	24 450	4 876	0.65
	7	-12	575.2	228.3	805.0	39 130	7 345	0.62
	7	-18	892.7	521.5	1 694.0	78 200	11 680	0.53

2.3 低温累积应力

为分析LDPE的掺入是否显著导致低温累积应力的增加,对3种改性沥青两两进行显著性检验( $t$ 检验,计算结果 $p$ 值见图3).由图3可知:随温度降低,基质沥青和LDPE改性沥青的低温累积应力不断增

加,且随着温度进一步降低(-20 °C左右),低温累积应力增长趋势猛然增大;从 $t$ 检验的结果来看,4%LDPE改性沥青大部分降温阶段的低温累积应力较基质沥青显著增大,当温度进一步降低(-35 °C左右), $p > 0.05$ ,这说明差异不显著;7%LDPE改性沥青在整个降温阶段低温累积应力都较基质沥青显著增大( $p < 0.05$ ).这是由于LDPE的掺入使沥青的应力松弛能力进一步降低.因此,从应力松弛能力的角度来讲,LDPE的掺入使得沥青低温累积应力增大,低温性能降低.

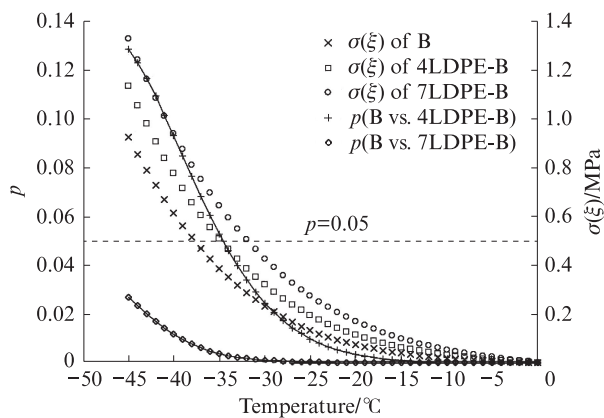


图3 LDPE改性沥青低温累积应力及显著性检验分析

Fig. 3 Low temperature stress of LDPE modified asphalt and significance test analysis

2.4 玻璃态模量和交叉频率

利用动态剪切流变仪对LDPE改性沥青进行试验.并基于时温等效原理,以15 °C为参考温度,绘制复数模量 $G^*$ 及相位角 $\delta$ 主曲线,如图4所示.利用CAM流变模型对复数模量主曲线进行拟合,得到玻璃态模量 $G_g^*$ 和交叉频率 $f_c$ ,如表3所示.

由图4可见,在高频(低温)区域,随着LDPE掺量的增加,复数模量增加,相位角减小.这说明LDPE

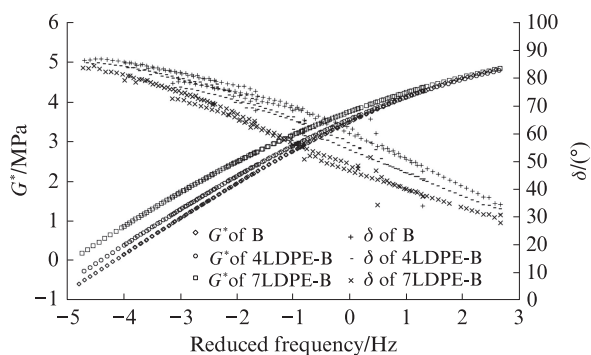


图4 LDPE改性沥青复数模量及相位角主曲线

Fig. 4 Complex modulus and phase angle mastercurves of LDPE modified bitumen

的掺入使得沥青的弹性成分增加.由表3可见,随着LDPE掺量的增加,沥青的玻璃态模量 $G_g^*$ 不断增大,交叉频率 $f_c$ 不断减小,因此其低温性能不断降低.

表4 劲度模量与玻璃态模量、交叉频率之间的关系

Table 4 Relationship between stiffness and glass transition modulus, cross frequency

Temperature/°C	S vs. $G_g^*$		S vs. $f_c$	
	Regression equation	$R^2$	Regression equation	$R^2$
-6	$G_g^* = 7\,262.9 S - 406\,950$	0.977 8	$f_c = -0.608\,8 S + 86.326$	0.859 6
-12	$G_g^* = 6\,398.3 S - 838\,608$	0.961 2	$f_c = -0.522\,2 S + 119.05$	0.882 4
-18	$G_g^* = 7\,079.6 S - 2 \times 10^6$	0.978 8	$f_c = -0.601\,5 S + 253.71$	0.810 9

## 2.5 屈服应变能及拉断功

LDPE改性沥青的屈服应变能及拉断功如表5所示.由表5可知,与基质沥青相比,高掺量LDPE改性沥青的屈服应变能更大,说明其在开始受力到屈服前的拉伸阶段内部累积应力更大,是应力松弛能力差的体现.因此,随着LDPE掺量的增加,沥青的低温性能降低.拉断功表征材料从开始受力到完全破坏时所需外力功的大小,即材料破坏的极限能量.由表5可见,与基质沥青相比,LDPE改性沥青的拉断功更大,即破坏LDPE改性沥青所需要的外力功更大.因此,在同样的低温条件下,仅从断裂能量角度来讲,LDPE改性沥青低温性能较基质沥青更强,这与BBR、DSR试验所得结论不一致.

表5 LDPE改性沥青的屈服应变能及拉断功

Table 5 Yield strain energy and breaking work of LDPE modified bitumen

Bitumen	$E_y/J$	$W_b/J$
B	0.248	1.399
4%LDPE-B	0.759	2.908
7%LDPE-B	1.303	4.436

## 2.6 低温增韧机制研究

为进一步探明LDPE对沥青的低温增韧机制,

表3 LDPE改性沥青的玻璃态模量和交叉频率

Table 3  $G_g^*$  and  $f_c$  of LDPE modified bitumen

Bitumen	$G_g^*/kPa$	$f_c/Hz$
B	307 163.07	32.15
4%LDPE-B	409 221.26	8.19
7%LDPE-B	666 511.03	0.38

进一步将LDPE改性沥青的劲度模量S与玻璃态模量 $G_g^*$ 、交叉频率 $f_c$ 在不同温度下(-6、-12、-18 °C)进行回归,结果如表4所示.由表4可知,不论在何种温度下,劲度模量与玻璃态模量、交叉频率之间均有较好的线性关系,其中劲度模量与玻璃态模量成正比,与交叉频率呈负相关.因此,从BBR试验、DSR试验得到的低温评价指标均一致表明,LDPE改性沥青低温性能较基质沥青有所降低.

对LDPE改性沥青进行荧光显微镜扫描,结果如图5所示.其中,颗粒为LDPE,黑色背景为沥青.由图5可知,随着LDPE掺量的增加,LDPE在沥青中的分布逐渐增多,且LDPE颗粒逐渐形成絮状纤维,这可能在沥青内部形成了“加筋”机制,故在其拉伸断裂时,所需的外界能量更大.

综上所述,从BBR和DSR试验得到的低温性能评价指标(S、m、DER、 $G_g^*$ 、 $f_c$ )计算结果来看,与基质沥青相比,LDPE改性沥青的应力松弛能力更差,导致其低温应力更大,说明LDPE改性沥青的低温性能较基质沥青要差.另外,从屈服应变能来看,LDPE改性沥青的内部低温累积应力较基质沥青大,这也是其应力松弛能力较差,低温性能较差的体现.但是,在同样的低温条件下,LDPE改性沥青拉断功较基质沥青更大,这说明如果从材料断裂能量的角度来讲,同样的低温条件下,LDPE改性沥青抗开裂能力(低温性能)更强,这与BBR和DSR试验的低温性能评价指标所得结论不一致.这说明,虽然LDPE改性沥青在低温应力松弛能力上不及基质沥青,但其极限破坏所需断裂能量却更大.

沥青路面低温开裂在本质上是由于气温骤降导致沥青混合料内部低温累积应力过大,来不及松弛

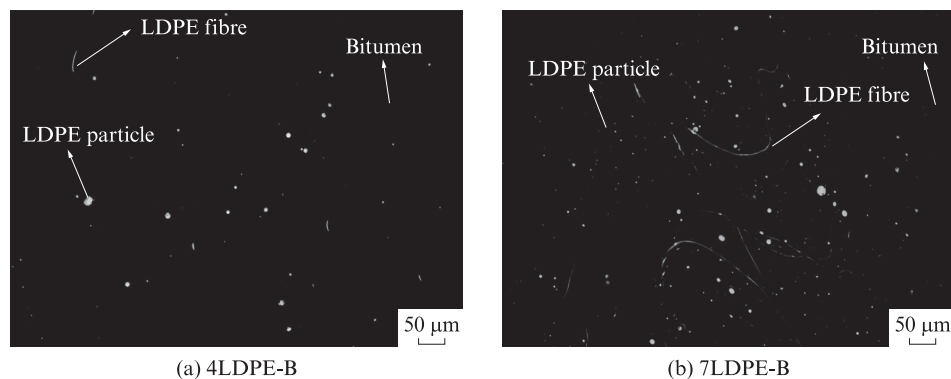


图5 LDPE改性沥青荧光显微图像

Fig. 5 Fluorescent micrograph of LDPE modified bitumen

释放而达到其承载极限所致<sup>[10]</sup>.而BBR试验是从材料变形和应力松弛能力角度出发,并未考虑LDPE改性沥青极限破坏能量的大小,故采用BBR试验指标评价LDPE改性沥青低温性能是不完善的.虽然美国国家公路与运输协会(AASHTO)曾提出过直接拉伸试验,但由于直接拉伸试验不易实施,材料易与模具脱离,而且目前市场上提供直接拉伸试验的技术设备支持也越来越少,因此,在实际研究中,直接拉伸试验用得也越来越少<sup>[13,20]</sup>.而测力延度试验较简单,仪器成本低廉<sup>[16]</sup>,因此可利用测力延度试验获得LDPE改性沥青的拉断功,并将其补充作为LDPE改性沥青低温性能评价指标之一.

### 3 结论

(1)低密度聚乙烯(LDPE)的掺入使得沥青的劲度模量增大,模量变化率减小,从低温应力松弛能力角度来讲,LDPE的掺入使沥青低温性能下降.BBR试验所得劲度模量与DSR试验所得玻璃态模量、交叉频率具有良好的线性关系,且2种试验的评价指标均表明,LDPE的掺入使得沥青的低温性能降低.

(2)在相同低温条件下,与基质沥青相比,LDPE改性沥青的拉断功更大,故从断裂能量的角度来讲,LDPE改性沥青的低温性能较基质沥青有所增加,这与DSR和BBR试验所得结论不一致,说明虽然LDPE改性沥青在低温应力松弛能力上不及基质沥青,但其极限破坏所需要的断裂能量却更大.

(3)常用评价LDPE改性沥青低温性能的方法仅从变形和应力松弛能力角度进行考虑,较少考虑LDPE改性沥青低温条件下的断裂性能,故为了全面评价LDPE改性沥青低温性能,可将测力延度试验获得的拉断功考虑在内.仅利用单一方法,或低估了LDPE改性沥青低温抗开裂性能.

(4)LDPE改性沥青低温增韧机制可能是由于

LDPE的掺入超过一定量时,会聚集形成絮状纤维,对沥青材料起到了加强增韧作用.

### 参考文献:

- [1] 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 Xiaoning. 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)
- [2] 陈建,许永明.聚乙烯改性沥青路用性能的室内研究[J].西安公路交通大学学报,1995,15(2):18-23.  
CHEN Jian, XU Yongming. Research on the pavement performance of polyethylene modified asphalt in laboratory[J]. Journal of Xi'an Highway University. 1995, 15(2): 18-23.(in Chinese)
- [3] 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)
- [4] LI Jun, ZHANG Yuxia, ZHANG Yuzhen. The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(6):1067-1073.
- [5] CHING Y C, AZAHARI H, REHAN M. Modification of bitumen characteristic by using recycled polyethylene[J]. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2014, 604: 33-40.
- [6] LEE N K, HESP S A M. Low-temperature fracture toughness of polyethylene-modified asphalt binders[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1994(1436): 54-59.
- [7] SINGH B, KUMAR L, GUPTA M, et al. Polymer-modified bitumen of recycled LDPE and maleated bitumen[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 127(1): 67-78.
- [8] 王涛.废旧塑料改性沥青相容性研究[D].青岛:中国石油大学,2010.  
WANG Tao. Study on compatibility of waste plastic-modified asphalt[D].Qingdao: China University of Petroleum, 2010.

- (in Chinese)
- [ 9 ] 李慧川. 废旧包装PE改性道路沥青的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.  
LI Huichuan. Experimental study on the waste plastic-package PE as road bitumen modifier[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.(in Chinese)
- [10] 詹小丽. 沥青低温性能评价指标的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.  
ZHAN Xiaoli. Study on low temperature performance evaluation index of bitumen[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.(in Chinese)
- [11] HOPKINS I L, HAMMING R W. On creep and relaxation [J]. Journal of Applied Physics, 1957, 28(8): 906-909.
- [12] SCHAPERLY R A. Approximate methods of transform inversion for viscoelastic stress analysis[C]//Proceeding of the 4th U. S. National Congress of Applied Mechanics. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1962, 2: 1075-1085.
- [13] CANNONE FALCHETTO A, MOON K H, WANG D, et al. Investigation on the cooling medium effect in the characterization of asphalt binder with the bending beam rheometer (BBR)[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018, 45(7): 594-604.
- [14] ASHISH P K, SINGH D, JAIN R. Evaluating the effect of carbon nanotube on low temperature property of asphalt binder through dissipated energy-based approach[J]. Journal of Material Civil Engineering, 2020, 32(3): 04019376.
- [15] 王子豪. 老化作用对多聚磷酸改性沥青性能影响研究[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2017.  
WANG Zihao. Study on the effect of aging on the performance of polyphosphoric acid modified asphalt[D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Technology, 2017.(in Chinese)
- [16] 刘成, 徐萌, 张玉贞. 测力延度在沥青低温性能研究中的进展与应用[J]. 石油沥青, 2016, 30(5): 63-68.  
LIU Cheng, XU Meng, ZHANG Yuzhen. The progress and application of force-ductility test in the low temperature performance research of asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2016, 30(5): 63-68.(in Chinese)
- [17] 董雨明. 硬质沥青及其混合料流变特性与低温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
DONG Yuming. Research on rheological property and low temperature performance of hard grade bitumen and its mixture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.(in Chinese)
- [18] 王腾. 复合型胶粉改性沥青胶浆及混合料性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.  
WANG Teng. Research on performance of compound rubber modified asphalt mortar and mixture [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.(in Chinese)
- [19] READSHAW E E. Asphalt specifications in british columbia for low temperature performance [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1972, 41: 562-581.
- [20] 徐加秋, 阳恩慧, 罗浩原, 等. 基于温度应力的温拌沥青胶结料低温力学性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1): 70-76.  
XU Jiaqiu, YANG Enhui, LUO Haoyuan, et al. Mechanical properties of warm mix asphalt at low temperature based on thermal stress calculations [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1): 70-76.(in Chinese)

(上接第 1031 页)

- LIU Shaopeng, HUANG Weidong, JI Shuzhen, et al. High SBS modified asphalt and its application in OGFC [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 10(3): 20-25. (in Chinese)
- [ 6 ] 李红平, 吴德军, 杨晨光. 不同改性沥青排水路面(OGFC-13)路用性能的研究[J]. 公路, 2009(6): 151-154.  
LI Hongping, WU Dejun, YANG Chenguang. Research on road performance of different modified asphalt drainage pavement (OGFC-13) [J]. Highway, 2009 (6): 151-154. (in Chinese)
- [ 7 ] LU X, ISACSSON U. Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens [J]. Fuel, 1998, 77(9/10): 961-972.
- [ 8 ] YUSOFF N I M, JAKARNI F M, NGUYEN V H, et al. Modelling the rheological properties of bituminous binders using mathematical equations [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 174-188.
- [ 9 ] ASGHARZADEH S M, TABATABAEE N, NADERI K, et al. An empirical model for modified bituminous binder master curves [J]. Materials and Structures, 2013, 46 (9) : 1459-1471.
- [10] DALY W H, NEGULESCU I, BALAMURUGAN S S. Implementation of GPC characterization of asphalt binders at louisiana materials laboratory [R]. Baton Rouge: Louisiana Department of Transportation, 2013: 1-2.
- [11] ZHU J Q, BIRGISSON B, KRINGOS N. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges [J]. European Polymer Journal, 2014, 54: 18-38.