

## 多聚磷酸改性沥青及其混合料低温性能研究<sup>\*</sup>

刘红瑛,常睿,张铭铭,张振兴,郝培文<sup>†</sup>

(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)

**摘要:**采用常规低温性能试验和 Superpave 低温性能试验,研究了不同类型多聚磷酸(PPA)改性沥青胶结料的低温性能,对比分析了沥青胶结料低温性能评价指标之间的相应关系,并采用小梁弯曲试验和冻断试验验证了沥青混合料的低温抗裂性能,研究了沥青胶结料与混合料低温性能之间的相关性.最后对不同低温性能评价指标的合理性和不足之处进行了较为深入的分析.结果表明,PPA 掺入减小了沥青的延度和劲度模量,老化对 PPA 改性沥青低温性能的影响显著;应变能密度指标表明 PPA 可以改善沥青混合料低温抗裂性;PPA 复配 SBR 的改性沥青低温效果要优于 SBR 改性沥青;冻断温度与冻断强度能较准确地评价多聚磷酸改性沥青混合料的低温抗裂性能.

**关键词:**道路工程;多聚磷酸;改性沥青;低温;评价指标

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## Study on Low Temperature Performance of Polyphosphoric Acid Modified Asphalt and Asphalt Mixture

LIU Hongying, CHANG Rui, ZHANG Mingming, ZHANG Zhenxing, HAO Peiwen<sup>†</sup>

(Key Laboratory for Road Structure and Material of MOC, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Through the conventional low temperature performance test and Superpave low temperature performance test, the structural performance of different polyphosphoric acid(PPA) modified asphalt binder was investigated at low temperature, and the corresponding relationship of its performance evaluation index was analyzed. Further, the anti-cracking performance of asphalt mixture at low temperature was verified by the improved trabecular bending test and TSRST, and the correlation of low temperature performance between the asphalt binder and the mixture was studied. Finally, the rationality and deficiency of the evaluation index of different low temperature performance were analyzed. The results show that PPA reduced the ductility and stiffness modulus of asphalt, and the aging had great influence on the structural performance of PPA modified asphalt at low temperature. The strain energy density index shows that PPA can improve the cracking resistance of asphalt mixture at low temperature, the anti-cracking performance of PPA compound SBR modified asphalt was better than that of SBR modified asphalt, and the freezing temperature and freeze fracture strength can more accurately evaluate the low temperature performance of PPA modified asphalt.

<sup>\*</sup> 收稿日期:2016-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278060), National Natural Science Foundation of China(51278060)

作者简介:刘红瑛(1971-),女,河南开封人,长安大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail:9102@chd.edu.cn

**Key words:** road engineering; polyphosphoric acid; modified asphalt; low temperature; evaluation indexes

多聚磷酸改性沥青与传统的聚合物改性沥青相比,具有价格低廉、改性工艺简单和热储存稳定性好等优势.近年来多聚磷酸改性沥青越来越受到国内道路工程人员的重视,但目前对多聚磷酸改性沥青的研究仍处在初步阶段<sup>[1-3]</sup>.

近年来相关学者开展了关于多聚磷酸改性沥青的研究,王云普等对多聚磷酸复配 SBR 改性沥青进行了研究,研究了交联剂、增塑剂、制备工艺对沥青高低温性能的影响<sup>[4]</sup>;余文科自制了多聚磷酸改性剂,对多聚磷酸改性沥青的路用性能、微观形态和改性机理进行了研究,结果表明,多聚磷酸改善了沥青混合料的高温性能,对水稳定性和低温性能无显著影响<sup>[5]</sup>;曹卫东等通过针入度试验、软化点试验、弯曲梁流变试验、粘度试验及 4 组分试验对多聚磷酸改性沥青的技术性能及改性机理进行了研究,结果表明,多聚磷酸改性沥青的高温性能改善,温度敏感性降低,粘度增大,但低温性能略有下降<sup>[6]</sup>.目前大多数研究都只是针对多聚磷酸改性沥青的技术性能,而对于多聚磷酸改性沥青的高、低温评价指标研究较少,且缺乏系统性研究,长期的工程实践表明,试验所得到的沥青低温性能评价指标并不能客观且准确地反映沥青的实际路用性能<sup>[7-10]</sup>.因此,有必要在这些试验方法和评价指标间进行优选,以期得到能够反映沥青实际路用性能的最佳评价指标.

本文针对 PPA 改性沥青、聚合物改性沥青以及聚合物复配 PPA 改性沥青等,通过沥青低温性能常规试验、弯曲梁流变试验和蠕变柔量导数等对其低温性能进行系统研究,分析不同低温性能评价指标之间的关系,并进行小梁弯曲破坏试验和 SHARP 推荐的约束试件温度应力试验(TSRST),对混合料低温性能评价指标进行验证,最后对 PPA 以及聚合物改性沥青的低温性能评价指标进行了适用性分析.

## 1 试验材料与试验方案

### 1.1 原材料

采用 110% 工业级多聚磷酸,基质沥青为东明 70# 道路石油 A 级沥青,其技术指标见表 1 和表 2.

表 1 多聚磷酸技术指标

Tab. 1 Technical index of polyphosphoric acid

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 浓度/%	蒸汽压 25℃/Pa	表面张力 / (N·cm <sup>-1</sup> )	比热容/ (J·g <sup>-1</sup> ·℃ <sup>-1</sup> )	25℃密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	沸点 /℃
79.3	2.66×10 <sup>-6</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	1.487	1.964	420

表 2 东明 70# 沥青技术指标

Tab. 2 Technical index of Dong Ming 70# asphalt

试验项目	实测	要求
针入度(25℃, 100 g, 5s)/0.1 mm	68.2	60~80
延度(5 cm/min, 15℃)/cm	>100	≥100
延度(5 cm/min, 10℃)/cm	35	≥25
软化点(环球法)/℃	53.2	≥46
闪点(COC)不小于/℃	287	≥260
含蜡量(蒸馏法)/%	1.6	≤2.2
密度(15℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.006	实测值
溶解度(三氯乙烯)不小于/%	99.78	≥99.5
薄膜加热 质量损失不大于/%	0.46	≤±0.8
试验 针入度比不小于/%	63.5	≥61
(TFOT) 延度(15℃)不小于/cm	31	≥15
163℃, 5 h 延度(10℃)/cm	8	≥6

### 1.2 多聚磷酸改性沥青方案

依据国内外研究经验,多聚磷酸改性沥青中多聚磷酸的掺量(质量分数)一般都在 0.5~2.0%<sup>[11]</sup>.在多聚磷酸改性试验中,多聚磷酸掺量取 1%.在多聚磷酸复配聚合物改性中,SBS 掺量定为 4.5%,SBR 掺量定为 2.5%.考虑到聚合物的加入对基质沥青的高低温性能都有较好的改善,所以在复配改性中,多聚磷酸的掺量降低为 0.75%.最终确定 6 种方案:基质沥青、基质沥青+1.0%PPA、基质沥青+4.5%SBS、基质沥青+3%SBS+0.75%PPA、基质沥青+2.5%SBR、基质沥青+2.5%SBR+0.75%PPA.

### 1.3 多聚磷酸改性沥青制备工艺

不同改性沥青制备工艺如表 3 所示.

表 3 改性沥青制备工艺

Tab. 3 The preparation process of modified asphalt

组成	PPA 改性沥青	SBS(SBR) 改性沥青	PPA 复配 SBS(SBR)
基质沥青加热温度/℃	150~160	160~170	160~170
SBS(SBR) 溶胀时间/min	—	10	10
SBS(SBR) 剪切速率/(r·min <sup>-1</sup> )	—	4 000	4 000
SBS(SBR) 剪切时间/min	—	60	30
PPA 搅拌时间/min	30	—	10
PPA 复配 SBS(SBR) 剪切时间/min	—	—	30

## 1.4 试验方案

本文针对6种沥青胶结料进行常规试验<sup>[12]</sup>和Superpave试验<sup>[13]</sup>,对所得到的低温性能评价指标进行分析,并进行混合料的小梁弯曲破坏试验和约束试件温度应力试验(TSRST),对混合料的低温性能评价指标进行验证。

## 2 低温性能评价指标研究

### 2.1 延度试验

5℃延度试验结果如图1所示。

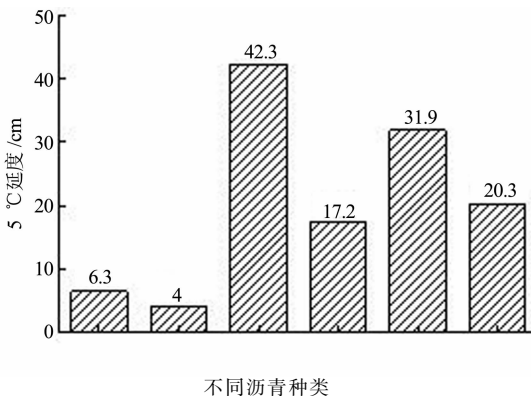


图1 6种沥青5℃延度

Fig.1 Softening point of six kinds of asphalt

由图1可知,聚合物改性沥青5℃延度比基质沥青大得多,而PPA改性沥青的延度值较基质沥青有所减小,聚合物复配PPA改性沥青的延度值要明显小于聚合物单一改性沥青。由此可知,PPA对沥青的塑性变形能力是有一定负面影响。

PPA与基质沥青发生了化学反应,改变了基质沥青的化学结构,使得沥青基质增多,粘稠程度增大,导致其低温状态下的塑性变形能力变差。而聚合物改性沥青的延度值较基质沥青提高了数倍,其粘度同样增大很多,但其改性机理属于物理改性,不同于PPA的化学改性,其延度值的增大其实并不是基质沥青的塑性变形能力增强,而是聚合物自身强大的变形能力在发挥作用。

延度反映的终究是沥青材料本身的塑性变形能力,其是否能够真正表征沥青实际的低温路用性能还没有定论。因为实际路面低温状态下的裂缝产生原因极其复杂,且很大程度上是由于沥青混合料的温度收缩应力造成的。同时实际路面遭受的低温远比延度试验采用的温度要低得多,在更低温度下,沥青的塑性变形能力是否能够用较高温度下的延度值

来表征尚不能确定。国内外对于延度指标的意义也有较大的争议,许多学者指出沥青延度试验与路面沥青的拉伸状态并不相符。因为延度试验采用的试件尺寸太大,而实际上沥青呈薄膜状态,应该用“微延度”试验更加合理。SHARP发明的直接拉伸试验(DTT)正是出于此原因,但其变异性较大,且试验仪器昂贵,并不适合大面积推广。目前国内外普遍认为,在尚未有更合理的替代试验时,延度试验仍具有重要意义。

### 2.2 Superpave评价指标研究

#### 2.2.1 BBR试验评价指标

##### 1) 原样沥青BBR试验结果

本文对6种沥青进行了一16℃和一18℃两个温度下的BBR试验,结果如表4表示。

表4 BBR试验结果  
Tab.4 Test results of BBR

沥青类型	劲度模量 (-16℃) /MPa	<i>m</i> 值	劲度模量 (-18℃) /MPa	<i>m</i> 值
基质沥青	191	0.426	278	0.387
1%PPA	137	0.426	267	0.374
4.5%SBS	182	0.374	275	0.349
3%SBS+0.75%PPA	155	0.382	257	0.315
2.5%SBR	182	0.374	206	0.365
2.5%SBR+0.75%PPA	155	0.433	190	0.371

由表4可知,-16℃时,PPA改性沥青的劲度模量较基质沥青有所减小,聚合物复配PPA改性沥青劲度模量较聚合物单一改性沥青也有所减小,且掺加PPA的沥青*m*值均比同组沥青有不同程度增大(基质沥青和PPA改性沥青相同),这表明PPA对于沥青的低温性能是有改善作用的。-18℃时,6种沥青劲度模量变化规律与-16℃相同,但是*m*值的变化只有SBR类改性沥青同-16℃相同,其他两组则相反,这表明温度的降低对*m*值的影响较大。

以劲度模量指标为标准,基质沥青和PPA改性沥青相比,-16℃时PPA改性沥青的劲度模量相对基质沥青减小了28.3%,而-18℃时只减小了4%,其他两组沥青也都发现此规律。虽然只有2℃的温差,但可以推断出:随着温度的降低,PPA对沥青低温性能的改善效果是逐渐削弱的。

进一步研究PPA对沥青低温劲度模量的影响,进行了RTFOT前后-18℃时BBR试验,改变PPA的掺量,由0.25%递增至1%。结果如图2

所示。

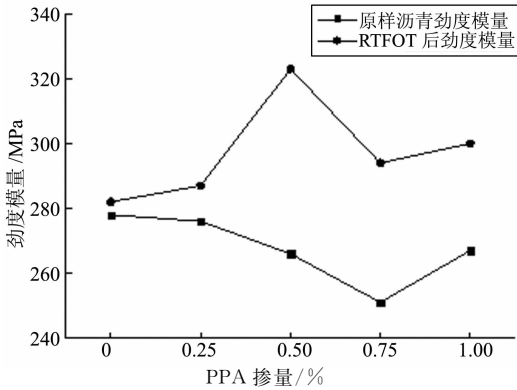


图 2 老化前后沥青劲度模量和 PPA 掺量的关系

Fig. 2 The relationship between the stiffness modulus of asphalt and the amount of PPA before and after aging

可以看出,老化前沥青劲度模量随着 PPA 掺量增加逐渐减小,在 0.75% 时达到最小值,然后又有所回升,总体上表现出减小的趋势。RTFOT 后沥青劲度模量较老化前明显增大,随着 PPA 掺量增大,劲度模量总体表现为增大趋势,在 0.5% 时达到峰值。试验结果表明,老化前 PPA 是有助于改善沥青的低温性能的,但是老化后却对低温性能有负面影响,且老化前后劲度模量都有一个峰值。

2) RTFOT, PAV 后沥青 BBR 试验结果

为了进一步研究 PPA 对沥青低温劲度模量的影响,对 RTFOT 和 PAV 后 6 种沥青胶结料进行了 -18℃ 下 BBR 试验,结果如图 3 所示。

由图 3 可知,6 种沥青的劲度模量随着老化程度的增加而逐渐增大,且 PAV 后的劲度模量较 RTFOT 后有大幅度增大。原样沥青中,PPA 改性沥

青劲度模量小于基质沥青,SBS(SBR)复配 PPA 改性沥青劲度模量小于 SBS(SBR)单一改性沥青,但 RTFOT 和 PAV 后却完全相反,说明老化对 PPA 的低温改性作用影响很大。

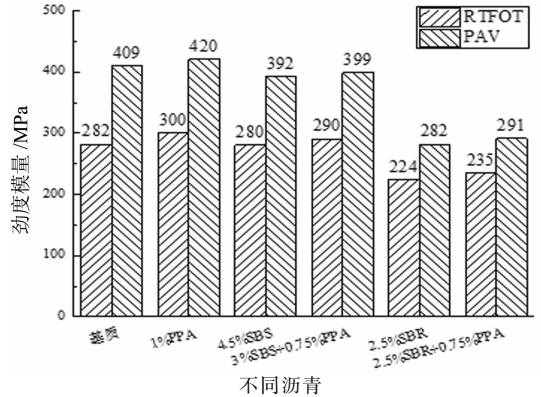


图 3 RTFOT 和 PAV 后沥青的劲度模量

Fig. 3 The stiffness modulus of asphalt after RTFOT and PAV

对 6 种沥青胶结料进行完整的 SHARP PG 分级,如表 5 所示。由表 5 可知,基质沥青、PPA 改性沥青和 SBS 类改性沥青低温等级都为 -22℃,SBR 类改性沥青低温等级为 -28℃,表明 SBR 对沥青的低温性能有良好的改善作用,但其对沥青的高温性能的改善不如 PPA 和 SBS。在高温方面,PPA 的改善作用优于 SBR 而不如 SBS。从 PG 温度范围来看,基质沥青的温度范围最小,PPA 改性沥青和 SBR 类改性沥青的温度范围相同,SBS 类改性沥青的温度范围最大。

表 5 6 种沥青 PG 分级  
Tab. 5 PG grade of six kinds of asphalt

项目	基质	1%PPA	4.5%SBS	3%SBS+0.75%PPA	2.5%SBR	2.5%SBR+0.75%PPA
PG 分级/℃	64~22	76~22	82~22	82~22	70~28	70~28
PG 温度范围/℃	86	98	104	104	98	98

2.2.2 蠕变柔量导数研究

蠕变劲度模量和  $m$  值是 Superpave 推荐的两个低温流变性能指标。劲度模量是最重要的指标,而  $m$  值相对来说是次要指标。但是这两个指标需要综合考虑,才能较全面地反映沥青的低温流变性能。

山东大学刘树堂教授通过理论推导,提出了蠕变柔量导数这一综合指标<sup>[14]</sup>。

$$J'(t) = \frac{m(t)}{S(t)} \times \frac{1}{t} \quad (1)$$

式中:  $J'(t)$  为蠕变柔量导数;  $S(t)$  为劲度模量;  $m(t)$  为流变参数;  $t$  为时间。

蠕变柔量可以表征荷载作用下,沥青的低温变形能力,柔量值越大,变形能力越强。高温状态下沥青需要小的变形,而低温状态下却需要大的变形能力才能抵抗开裂。 $J'(t)$  表征的是沥青蠕变柔量的变形速率,其值越大,则沥青低温状态下蠕变柔量的响应越灵敏,低温性能越好。由式(1)可知,蠕变柔量的导数  $J'(t)$  综合了劲度模量和  $m$  值两个流变参数, $m$

值越大,劲度模量  $S$  越小,则  $J'(t)$  越大,这正是 BBR 试验所希望得到的结果.由此可见,蠕变柔量导数是一项表征沥青低温流变性能的综合指标.6 种沥青的蠕变柔量导数如图 4 所示.

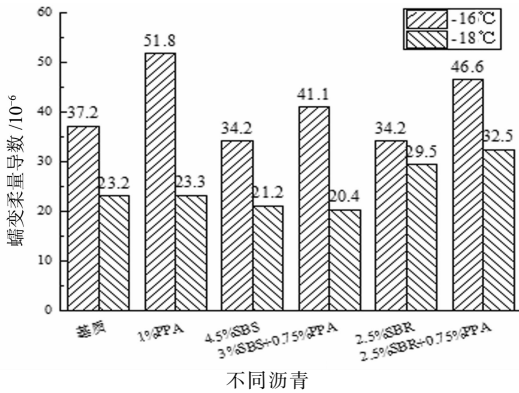


图 4 6 种沥青的蠕变柔量导数  
Fig. 4 Derivative of creep compliance of six kinds of asphalt

由图 4 可以看出:  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, PPA 的加入增大了对照组沥青的柔量导数;  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, PPA 改性沥青和 SBS 复配 PPA 改性沥青的柔量导数基本不变, 而 SBR 复配 PPA 改性沥青柔量导数有所增大.

### 3 沥青混合料低温性能验证

#### 3.1 低温小梁弯曲试验

##### 3.1.1 常规评价指标研究

试验采用电液伺服万能材料机 MTS, 采用单点跨中加载模式, 加载速率为  $50\text{ mm/min}$ . 试验温度为  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 试验结果如图 5 和图 6 所示.

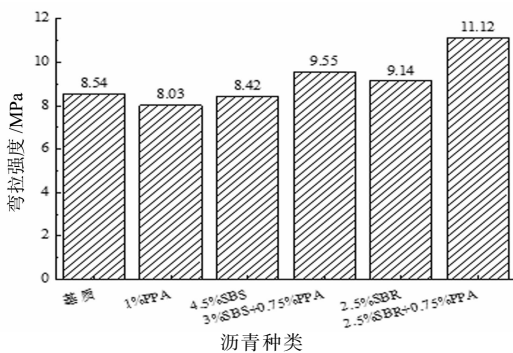


图 5 6 种沥青混合料沥青弯拉强度  
Fig. 5 Flexural tensile strength of six kinds of asphalt mixture

将 BBR 试验得到的沥青劲度模量与小梁弯曲试验得到的混合料劲度模量建立关系, 如图 7 和图 8 所示.

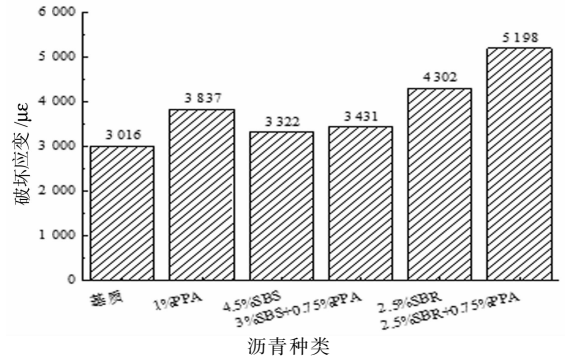


图 6 6 种沥青混合料破坏应变  
Fig. 6 Failure strain of six kinds of asphalt mixture

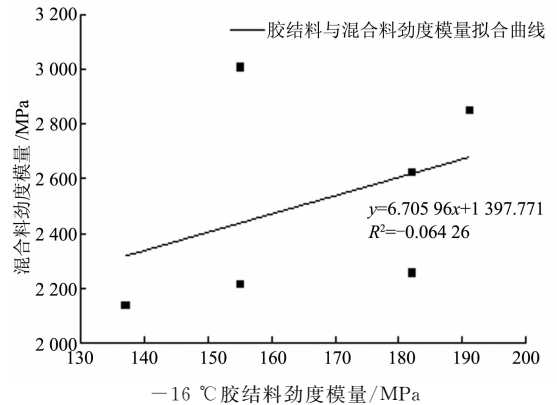


图 7  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  下胶结料与混合料的劲度模量相关性  
Fig. 7 Relativity of stiffness modulus between binder and mixture at  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$

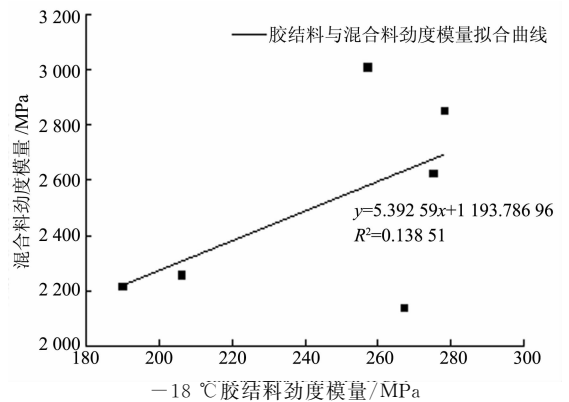


图 8  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  下胶结料与混合料的劲度模量相关性  
Fig. 8 Relativity of stiffness modulus between binder and mixture at  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$

由图 7 和图 8 可知,  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  时劲度模量相关系数  $R^2$  为  $-0.064$  和  $0.139$ , 表明沥青与沥青混合料劲度模量之间没有相关性. 这与胶结料和混合料试验的试验温度有关.

由图 5, 图 6 可知, PPA 改性沥青混合料的弯拉强度小于基质, 而破坏应变大于基质, 表明 PPA 减小了基质沥青混合料的开裂强度, 而增强了低温流

动变形能力. SBS(SBR)复配 PPA 改性沥青混合料的弯曲强度和破坏应变均大于 SBS(SBR)单一改性,表明 PPA 增强了聚合物改性沥青混合料的开裂强度和低温变形能力.

我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG-2004)要求采用破坏应变指标来评价沥青混合料的低温抗裂性能.实际上只是考虑了沥青混合料低温变形能力,并不能全面反映低温抗裂性能.劲度模量是应力与应变的比值,是一项综合指标.国内外许多研究都集中在沥青混合料劲度模量上,认为在低温条件下,混合料需要较小的劲度模量,这样在发生变形时,产生的应力相对较小,混合料的低温抗裂性能较好.但是当混合料本身的强度很高的时候,即使应力值较大,也不会开裂.劲度模量在评价沥青混合料时有一定的局限性,例如:A 沥青混合料的强度和破坏应变都要大于 B,低温抗裂性能优于 B.但是两者的比值,即劲度模量却并不一定小于 B.所以劲度模量也不能全面反映沥青混合料的低温抗裂性能.

### 3.1.2 应变能密度研究

低温状态下,沥青混合料可以视为弹性材料,其开裂过程是一个能力耗散的过程.沥青混合料内部储存的弹性应变能越多,则其低温抗裂性能越好.根据材料损伤准则,材料损伤过程包括裂缝的引发、亚临界状态增大和最终破坏 3 个阶段.这 3 个阶段在宏观上均可观察到.假定材料破坏形式与单位体积内的能量状态相对应,那么材料损伤就可以用应变能密度  $dW/dV$  来表示<sup>[15]</sup>.应变能密度表达公式如式(2)所示.

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\epsilon_0} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{ij}$  和  $\epsilon_{ij}$  为应力应变分量, $\epsilon_0$  为最大应力对应的应变值.

应变能密度  $dW/dV$  可以通过试验得到,应变能密度的临界值即为应力达到最大值时曲线下方的包络面积.

应力应变曲线的关系符合三次多项式形式,即式(3).

$$\sigma = A + B\epsilon + C\epsilon^2 + D\epsilon^3 \quad (3)$$

式中:A,B,C 和 D 为回归得到的材料基本参数.

将式(3)代入式(2),可得应变能密度

$$\frac{dW}{dV} = A\epsilon_0 + \frac{B}{2}\epsilon_0^2 + \frac{C}{3}\epsilon_0^3 + \frac{D}{4}\epsilon_0^4 \quad (4)$$

应变能密度计算结果如图 9 所示.

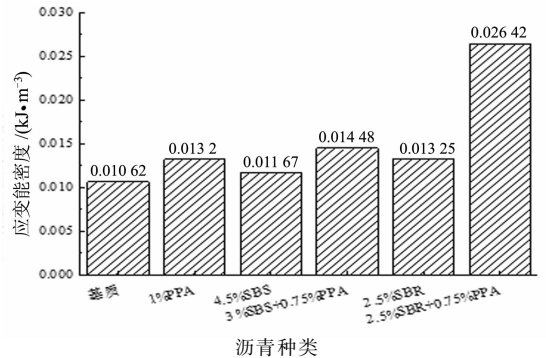


图 9 不同沥青混合料弯曲应变能密度  
Fig. 9 The bending strain energy density of different asphalt mixture

由图 9 可知,PPA 改性沥青混合料应变能密度大于基质沥青;SBS 复配 PPA 改性沥青混合料大于 SBS 单一改性沥青;SBR 复配 PPA 改性沥青混合料大于 SBR 单一改性.由此可知,PPA 可以改善沥青混合料的低温抗裂能力.SBR 的低温改性效果优于 SBS,尤其是 SBR 复配 PPA 改性效果最佳.

### 3.2 约束试件温度应力试验

#### 3.2.1 TSRST 试验结果与分析

用 10 °C/h 的降温速率,试验记录的是温度与拉伸荷载的数据,荷载和试件截面面积的比值即为应力<sup>[16-17]</sup>.图 10 为 5 种沥青混合料的温度应力曲线变化图.表 6 为冻断温度、冻断强度、转折点温度和斜率 4 个评价指标.

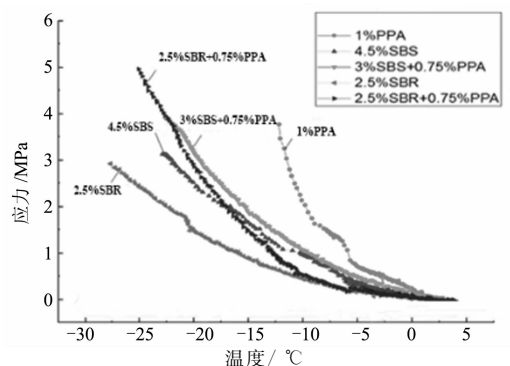


图 10 沥青混合料温度应力曲线  
Fig. 10 The curve of temperature and stress of asphalt mixture

表 6 TSRST 试验结果

Tab. 6 Test results of TSRST

评价指标	1% PPA	4.5% SBS	3% SBS + 0.75% PPA	2.5% SBR	2.5% SBR + 0.75% PPA
冻断温度/°C	-12.0	-22.2	-22.0	-26.8	-24.3
冻断强度/MPa	3.93	3.28	4.07	3.88	5.15
转折点温度/°C	-8.6	-18.8	-18.8	-21.0	-19.5
斜率/(MPa·°C <sup>-1</sup> )	0.62	0.25	0.34	0.19	0.46

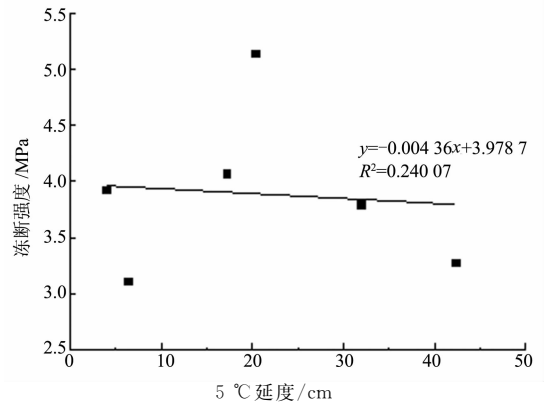
由表 6 可知,PPA 改性沥青混合料的冻断温度比其他 4 种改性沥青混合料高 10 °C 左右,并从图 10 可知,PPA 改性沥青混合料的温度应力曲线位于最上方,且应力的增长速率很大.这表明,与 SBS, SBR 类改性剂相比,PPA 对沥青混合料的低温性能改善不明显. SBS 复配 PPA 改性沥青混合料与 SBS 改性沥青混合料的冻断温度只相差 0.2 °C, SBR 复配 PPA 改性沥青混合料的冻断温度比 SBR 改性沥青混合料高 2.5 °C,属于试验误差范围之内,因此可以说明 SBS(SBR)复配 PPA 改性沥青混合料与 SBS(SBR)改性沥青混合料的低温性能处于同一水平.

国内对于 SBS 改性沥青具有优良的低温性能的观点基本上都是建立在传统评价指标——延度之上所作出的判断,本文在 5 °C 延度试验中,基质沥青为 6.3 cm,而 SBS 改性沥青延度值高达 42.3 cm,较基质沥青增大了近 7 倍.但是延度试验与实际路面的相关性较差,在试验方法上存在较大缺陷.因此,对于 SBS 改性沥青低温性能优劣需要重新审视.本文中 SBS 改性沥青的低温性能很好,和工程人员的认识相符.此外,SBS 改性沥青的性能受 SBS 改性剂类型及改性设备的影响很大.行业内达成的共识是星型改性剂要优于线型,且 SBS 改性设备的剪切研磨能力直接影响到 SBS 颗粒在沥青中的共溶状态,因此本文试验的结果有可能受到上述原因的影响.

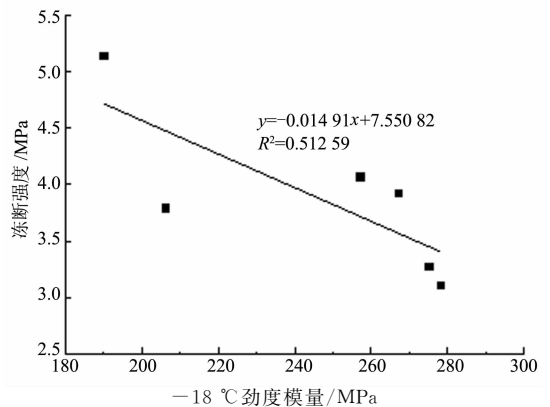
SBS(SBR)复配 PPA 改性沥青混合料的冻断强度均比 SBS(SBR)改性沥青混合料有较大幅度提高,尤其是 SBR 复配 PPA 改性沥青混合料的冻断强度的增大幅度最为明显.转折点温度的结果与冻断温度相同,反映出沥青混合料的低温松弛能力,转折点温度说明 PPA 对沥青混合料的应力松弛能力有负面影响.综合分析可知:PPA 降低了沥青混合料的应力松弛能力,而增大了沥青的抗裂强度,但由于应力松弛的速率不及温度急剧降低导致的应力累积速率,因此导致 PPA 改性沥青混合料的过早开裂.

### 3.2.2 胶结料指标与混合料指标相关性研究

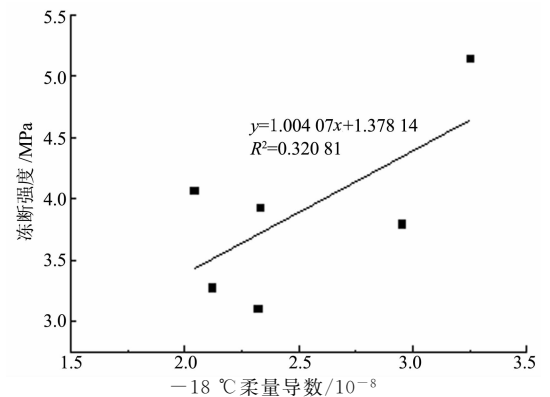
进一步研究低温评价指标之间的相关性,在胶结料指标选择延度、-18 °C 劲度模量和柔量导数 3 个代表性指标,混合料指标选取小梁弯曲试验破坏应变和应变能密度两个指标,以 TSRST 试验冻断强度为标准进行相关性分析.图 11 是各指标与冻断温度的相关性分析,相关系数如表 6 所示.



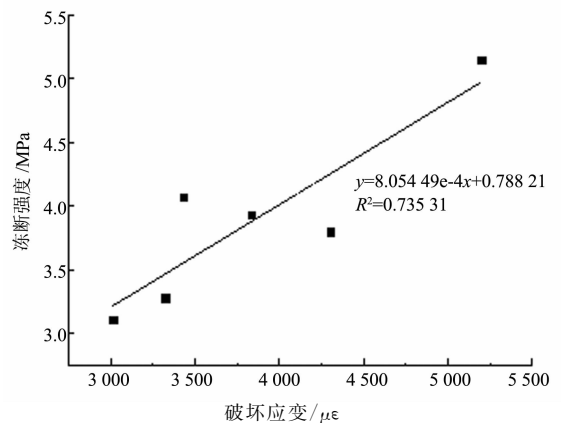
(a) 延度与冻断强度相关性



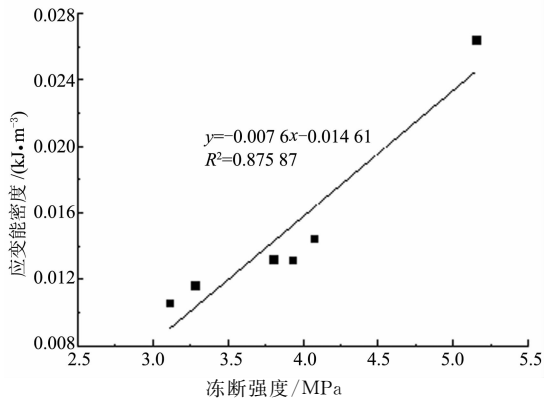
(b) 劲度模量与冻断强度相关性



(c) 柔量导数与冻断强度相关性



(d) 破坏应变与冻断强度相关性



(e)应变能密度与冻断强度相关性

图 11 各指标与冻断强度相关性  
Fig. 11 Relativity of different index and freeze fracture strength

表 6 低温指标与冻断强度相关性系数  
Tab. 6 Correlation coefficient of low temperature index and freeze fracture strength

评价指标	5 °C 延度	-18 °C 劲度模量	柔量导数	破坏应变	应变能密度
冻断强度相关性 $R^2$	-0.083 3	0.552 6	0.363 6	0.641 7	0.877 3

由表 6 可知,胶结料劲度模量与冻断强度的相关性为 0.552 6,说明两者之间有一定相关性,但相关性并不强.小梁弯曲试验破坏应变和应变能密度与冻断强度相关性分别为 0.641 7 和 0.877 3,相关性较高,6 种沥青混合料按照这 3 个指标的性能排序也比较一致,由此可知,小梁弯曲试验更侧重于测定沥青混合料的抗裂强度,而忽视了沥青混合料的低温应力松弛能力.

#### 4 低温评价指标适用性分析

5 种改性沥青低温性能综合对比排序见表 7.

表 7 5 种改性沥青低温性能排序  
Tab. 7 The order of low performance of five kinds of modified asphalt

评价指标	1% PPA	4.5% SBS	3% SBS + 0.75% PPA	2.5% SBR	2.5% SBR + 0.75% PPA
5 °C 延度	5	1	4	2	3
劲度模量	5	4	3	2	1
柔量导数	3	4	5	2	1
破坏应变	3	5	4	2	1
应变能密度	4	5	2	3	1
冻断温度	5	3	4	1	2
冻断强度	3	5	2	4	1

由表 7 可以看出,按照不同的低温评价指标,5 种沥青低温性能的排序有很大不同.以 TSRST 试验冻断强度为标准,分析各低温评价指标的适用性:

1)传统的延度指标能够在一定程度上反映沥青胶结料的低温性能,但不能准确评价沥青胶结料的实际路用性能,在尚无合适的替代试验出现的情况下,延度指标可以作为沥青胶结料低温性能的参考指标.

2)BBR 试验得到的劲度模量和蠕变柔量导数指标与冻断温度之间没有相关性,因此 BBR 试验并不能反映沥青胶结料的实际低温性能. BBR 试验采用固定低温下的经典梁理论来评价沥青胶结料的低温流动变形能力,与沥青路面实际低温收缩状态并不符合.

3)小梁弯曲试验得到的破坏应变和应变能密度指标与冻断强度之间的相关性较高.弯曲试验是在 -10 °C 固定温度下进行的,无法模拟沥青路面的温度收缩应力的产生,但在一定程度上可以表征沥青混合料的低温抗裂性能,本文认为弯曲试验的试验方法非常重要: i) -10 °C 对于路面实际温度来说偏高,建议应增加 -10 °C 以下试验; ii) 小梁试验加载速率 5 cm/min 过快,导致小梁底部拉应力急剧增大,沥青混合料来不及松弛就已断裂,而实际路面中的温度应力增长是比较缓慢的,沥青混合料有比较充足的时间来将应力耗散.梁底拉应力的逐渐增长可以在一定程度上模拟路面降温引起的温度应力,但如果拉应力的增长速率过于急剧,会导致实际测定的是小梁的抗裂强度,而忽视沥青混合料的应力松弛能力.建议尽可能降低试验的加载速率.

4)冻断温度与冻断强度对于评价不同改性沥青混合料低温抗裂性能相对直观适用.

#### 5 结 论

对 6 种沥青的常规低温评价指标与 Superpave 低温性能评价指标进行了研究,并通过小梁弯曲试验和冻断试验对 PPA 改性沥青混合料进行了低温性能验证,得出了以下结论:

1)PPA 掺入减小了沥青的延度及劲度模量,表明其低温拉伸性能变差,且随着 PPA 掺量的增加,劲度模量表现出减小的趋势,但 RFTOF 和 PAV 后,劲度模量却表现出增大趋势.老化对 PPA 改性沥青低温性能的影响显著.

2)BBR 试验采用固定低温下的经典梁理论来



评价沥青胶结料的低温流动变形能力,与沥青路面实际低温收缩状态并不符合,其得到的劲度模量和蠕变柔量导数不能合理评价多聚磷酸改性沥青的低温性能。

3) 低温弯曲试验无法模拟沥青路面的温度收缩应力的产生,但其在一定程度上表征了沥青混合料的低温抗裂性能,得到的破坏应变与应变能密度表明PPA可以改善沥青混合料低温抗裂能力,且其与冻断强度之间的相关性较好。

4) 冻断强度和冻断温度可以较准确地评价PPA改性沥青混合料的低温性能,PPA降低了沥青混合料的应力松弛能力,增大了沥青的抗裂强度,但由于应力松弛的速率不及温度急剧降低导致的应力累积速率致使PPA改性沥青混合料过早开裂。SBS(SBR)复配PPA改性沥青混合料的冻断强度相比SBS(SBR)单一改性沥青有明显提升,因此采用PPA复配聚合物对沥青进行改性的方法是可行的。

## 参考文献

- [1] 毛三鹏. 多聚磷酸在 SBS 改性沥青中的应用研究[J]. 石油沥青, 2010, 24(5): 28-32.  
MAO Sanpeng. Research on polyphosphoric acid used in SBS modified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2010, 24(5): 28-32. (In Chinese)
- [2] 张恒龙, 史才军, 余建英, 等. 多聚磷酸对不同沥青的改性及改性机理研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2): 255-260.  
ZHANG Henglong, SHI Caijun, YU Jianying, *et al.* Modification and its mechanism of different asphalts by polyphosphoric acid [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2): 255-260. (In Chinese)
- [3] FEE D, MALDONADO R. Polyphosphoric acid modification of asphalt [J]. Journal of the Transportation Research Record, 2010, 2179: 49-57.
- [4] 王云普, 张峰. 多聚磷酸与 SBR 复配改性国产 90 号沥青的研究[J]. 石油沥青与化工, 2007, 38(9): 53-55.  
WANG Yunpu, ZHANG Feng. Study on 90# road asphalt modified by polyphosphoric acid and SBR [J]. Petroleum Processing And Petrochemicals, 2007, 38(9): 53-55. (In Chinese)
- [5] 余文科. 多聚磷酸改性沥青的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学土木工程学院, 2011: 36-45.  
YU Wenke. Study on modified asphalt with polyphosphoric acid [D]. Chongqing: College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, 2011: 136-45. (In Chinese)
- [6] 曹卫东, 刘乐民. 多聚磷酸改性沥青的试验研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 252-254.  
CAO Weidong, LIU Lemin. Experimental study on modified asphalt with polyphosphoric acid [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(3): 252-254. (In Chinese)
- [7] 付力强, 王子灵, 黄晓明, 等. 多聚磷酸改性沥青的性能研究[J]. 公路交通科技, 2008, 5(2): 16-19.  
FU Liqiang, WANG Ziling, HUANG Xiaoming, *et al.* Performance research of polyphosphoric acid modified asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 5(2): 16-19. (In Chinese)
- [8] EDWARDS Y, TASDEMIR Y, ISACSSON U. Influence of commercial waxes and polyphosphoric acid on bitumen and asphalt concrete performance at low and medium temperatures [J]. Materials and Structures, 2010, 39(7): 725-737.
- [9] 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: 长安大学公路学院, 2012: 56-67.  
ZHANG Mingming. Study on micromechanism and performance of polyphosphoric acid modified asphalt [D]. Xi'an: Highway School, Chang'an University, 2012: 56-67. (In Chinese)
- [10] BENNERT T, MARTIN J V. Polyphosphoric acid in combination with styrene-butadiene-styrene block copolymer laboratory mixture evaluation [J]. Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 2008, 79(E-C160): 773-791.
- [11] 赵可, 杜月宗. 多聚磷酸改性沥青研究[J]. 石油沥青, 2010, 24(3): 4-10.  
ZHAO Ke, DU Yuezhong. Research on polyphosphoric acid modified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2010, 24(3): 4-10. (In Chinese)
- [12] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 26-30.  
JTG E20-2011 Standard test methods of asphalt and asphalt mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2011: 26-30. (In Chinese)
- [13] MACCARRONE S, HOLLERANETC G. Properties of polymer modified binders and relationship to mix and pavement performance [J]. AAPT, 1995, 76: 167-188.
- [14] LIU S T, CAO W, SHANG S, *et al.* Analysis and application of relationships between low-temperature rheological performance parameters of asphalt binders [J]. Construct Build Mater, 2010, 24(4): 471-478.
- [15] 李晓娟, 韩森. 基于弯曲试验的沥青混合料低温抗裂性研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2010, 40(6): 88-93.  
LI Xiaojuan, HAN Sen. Research of the crack resistance of asphalt mixture based on the low-temperature bending test [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2010, 40(6): 88-93. (In Chinese)
- [16] 郝培文. 沥青与沥青混合料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 98-105.  
HAO Peiwen. Asphalt and asphalt mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2009: 98-105. (In Chinese)
- [17] 张振兴. 多聚磷酸改性沥青技术性能及改性机理研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2015: 83-88.  
ZHANG Zhenxing. Research on the technical characteristic and mechanism of Polyphosphoric Acid modified asphalt [D]. Xi'an: Highway School, Chang'an University, 2015: 83-88. (In Chinese)