

## 改性沥青测力延度试验

周 燕<sup>1</sup>, 张 凯<sup>2</sup>, 陈拴发<sup>3</sup>, 苑瑞星<sup>3</sup>

(1. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 3. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:**为了评价改性沥青的低温性能,对 7 种代表性改性沥青进行了测力延度试验,提取了粘韧性、拉伸柔度等试验参数,分析了改性沥青老化前后的拉伸特性及拉伸变化机理,并采用灰关联法分析了改性沥青老化前后各参数指标与沥青混合料弯曲蠕变速率和弯曲应变能密度的关系。结果表明:由测力延度得到的峰值拉力、粘韧性以及韧性试验参数在老化前后变化规律不一致,这些单一指标都难以全面反映改性沥青的低温性能;拉伸柔度在老化前后变化规律稳定,而且是影响沥青混合料低温弯曲蠕变速率和弯曲应变能密度的最显著因素,从而验证了拉伸柔度评价改性沥青低温性能的合理性。

**关键词:**道路工程;改性沥青;低温性能;测力延度;灰关联法

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Research on force ductility test of modified asphalt

ZHOU Yan<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>, CHEN Shuan-fa<sup>3</sup>, YUAN Rui-xing<sup>3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to evaluate the low temperature performance of modified asphalt, seven representative modified asphalts were evaluated by force-ductility test. The toughness and tenacity, and tensile flexibility parameters were extracted, the tensile mechanism and characteristics were analyzed before and after aging. Grey relevant method is used to analyze the relationship of parameter indexes of modified asphalt before and after aging with bending creep rate and bending strain energy density. The results show that the change law of peak tension and toughness with tenacity parameters before and after aging in force-ductility test is inconsistent, the single index is difficult to overall reflect the low temperature performance of modified asphalt. The change law of tensile flexibility before and after aging in force-ductility test is stable, and it is the most significant factor influencing bending creep rate and bending strain energy density of asphalt mixture. The low temperature performance evaluation of modified asphalt by tensile flexibility is reasonable. 3 tabs, 5 figs, 9 refs.

**Key words:** road engineering; modified asphalt; low temperature performance; force-ductility; grey relevant method

# 0 引 言

当前,低温延度是中国现行改性沥青技术规范中唯一的低温性能指标,但低温延度能否准确评价改性沥青的低温性能一直存在质疑<sup>[1]</sup>。不同种类的改性沥青弯曲流变试验和直接拉伸试验结果相差很大,很难区分低温性能的优劣。国内外开展了有关沥青测力延度的研究,认为由测力延度得到的韧性值、粘弹比或粘韧性指标可有效地评价改性沥青的性能,但不同指标的评价结果差异较大<sup>[2-6]</sup>。为此,本文通过对沥青测力延度的大量试验,分析 7 种改性沥青在老化前后的拉伸特性与变化机理。同时,为了验证测力延度评价指标的可靠性以及对低温性能的影响,对结合料各性能指标与混合料低温弯曲蠕变速率和弯曲应变能密度进行灰关联分析,确定结合料各性能指标对混合料低温性能的影响顺序,讨论用测力延度拉伸柔度来评价改性沥青低温性能的可行性<sup>[7-9]</sup>。

## 1 测力延度试验与分析

### 1.1 曲线特征

图 1、图 2 为改性沥青测力延度的典型曲线。图 1 为基质沥青或 SBR 改性沥青的测力延度曲线图,应力在很短的时间内达到一个峰值,此时的拉力为屈服力  $F_1$ 。随着变形的增加,拉力很快降低,沥青试样中间部分很快变细,拉力近似为 0。

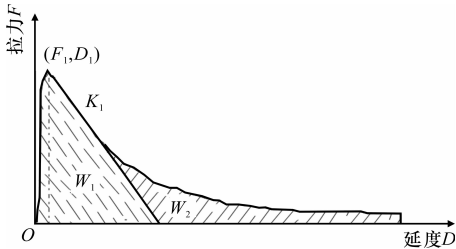


图 1 I 型测力延度

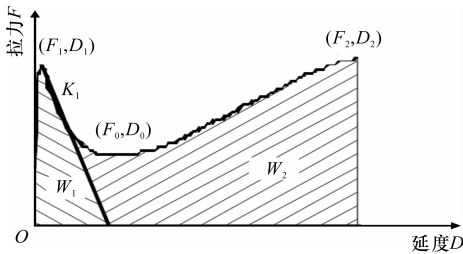


图 2 II 型测力延度

图 2 中沥青试件在开始拉伸时迅速出现颈缩现象,表现为一段拉力与变形成比例增加的直线,即  $OF_1$  段。随着继续拉伸,中间截面面积逐渐减小,拉

力下降,直至转折点拉力  $F_0$ ,此时延度为  $D_0$ ,细颈的截面面积变化不大,拉力维持在一定的数值不变,即  $F_1F_0$  下降段和  $F_0$  之后的相持阶段。随后,试件两段未成细颈部分的长度不断减小,而中间细颈部分的长度逐渐增加;拉力开始增加,直至某一程度(拉力为  $F_2$ ,延度为  $D_2$ )时突然断裂,力突变为 0,即  $F_0F_2$  上升段。

### 1.2 试验参数

采用与弹性恢复试验相同的直线试模进行测力延度试验,试验温度为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,拉伸速度为  $5\text{ cm/min}$ 。同一个样品平行试验 3 次,取平均值。可以得到的参数主要有拉伸柔度  $f$  和粘韧性  $W$ 。

#### 1.2.1 拉伸柔度 $f$

延度值为  $D$ ,拉力  $F_1$  与  $F_2$  中的较大者为最大拉力  $F_{\max}$ ,I 型测力延度只有一个峰值拉力,此时延度为  $D_1$ ,则拉伸柔度的表达式为

$$f = \frac{D}{F_{\max}} \tag{1}$$

拉伸柔度较好地反映了沥青的变形能力,随着温度降低,沥青脆性增加,拉伸柔度减少。

#### 1.2.2 粘韧性 $W$

以拉力和延度变形曲线所围成的面积,表征改性沥青的粘韧性。以  $K_1$  作为第 1 峰值力  $F_1$  之后下降阶段的斜率, $W_1$  表示  $K_1$  直线与左边曲线所围面积的粘弹性, $W_2$  为  $K_1$  直线与右边曲线所围面积的韧性。粘韧性  $W$  为  $W_1$  与  $W_2$  之和。

### 1.3 老化前后测力延度试验

为了研究测力延度对改性沥青的区分度,选择工程中常用的 SBR 改性、SBS 改性、GC 改性、QP 改性、TPS 改性、STR 改性和 SAM 改性沥青,分别进行老化(RTFOT)前后的测力延度试验。提取各样品老化前后测力延度的试验参数,汇总结果见表 1 和下页表 2(表中  $D_{\max}$  为最大延度)。

表 1 老化前的测力延度参数

试验参数	SBR 改性	SBS 改性	SAM 改性	QP 改性	GC 改性	TPS 改性	STR 改性
$D_{\max}/\text{cm}$	100.0	54.5	67.0	39.0	40.0	58.5	59.5
$F_1/\text{N}$	83	80	82	77	50	123	33
$F_2/\text{N}$		45	38	67	48	62	52
$F_0/\text{N}$		16	19	36	24	32	21
$f/(\text{cm} \cdot \text{N}^{-1})$	1.20	0.68	0.82	0.51	0.80	0.48	1.14
$W_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4.8	5.3	5.1	4.6	3.4	6.0	2.5
$W_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	3.6	12.4	15.3	15.2	10.4	19.5	18.4
$W/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	8.4	17.7	20.4	19.8	13.8	25.5	20.9

表 2 RTFOT 残留物测力延度参数

试验参数	SBR 改性	SBS 改性	SAM 改性	QP 改性	GC 改性	TPS 改性	STR 改性
$D_{\max}/\text{cm}$	100.0	50.5	62.5	36.0	38.0	46.0	41.5
$F_1/\text{N}$	109	98	106	97	66	160	46
$F_2/\text{N}$		32	35	60	55	76	67
$F_0/\text{N}$		22	31	49	34	49	31
$f/(\text{cm} \cdot \text{N}^{-1})$	0.92	0.52	0.59	0.37	0.58	0.29	0.62
$W_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	6.0	6.0	5.4	6.2	4.6	7.3	3.4
$W_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	9.8	10.5	15.7	16.6	13.1	22.9	15.6
$W/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	15.8	16.5	21.1	22.8	17.7	30.2	19.0

对比表 1 和表 2 的试验参数可以看出,老化后沥青拉伸长度和拉伸柔度均减小;第 1 峰值力  $F_1$  和转折点拉力  $F_0$  均增大,而不论老化前还是老化后,均在位移为 1.0~1.5 cm 时达到第 1 峰值力,所以老化后粘弹性  $W_1$  均是增大的。沥青老化后大分子的沥青质含量增加,沥青变硬,劲度增大,从而增加了沥青分子键长和键角伸张的阻力,宏观表现为第 1 峰值力增加。而转折点力反映了基质沥青的性能,以及改性剂与基质沥青的融合程度,受基质沥青的影响较大。

$F_0$  到  $F_2$  (第 2 峰值力) 值的变化,反映了改性沥青在第 2 变形阶段聚合物高分子在外力作用下的链端伸长和取向的过程。在这个过程中,聚合物相与沥青相之间以及聚合物相之间产生较大的相对位移。当聚合物相中聚集的应力超过了沥青相产生变形所需应力,或形变量超过聚合物微粒最大形变量时,产生应力集中而断裂。由于  $F_2$  值受到基质沥青性质、聚合物性质以及两者界面性质等因素的影响,所以  $F_2$  值老化后出现不规律的变化,从而引起  $W_2$  和  $W$  的不规律变化。

老化后沥青拉伸长度和拉伸柔度均减小,减小幅度为 50%~80%,各样品老化前后拉伸柔度的变化如图 3 所示。

由图 3 可看出,STR 改性沥青老化后延度降低

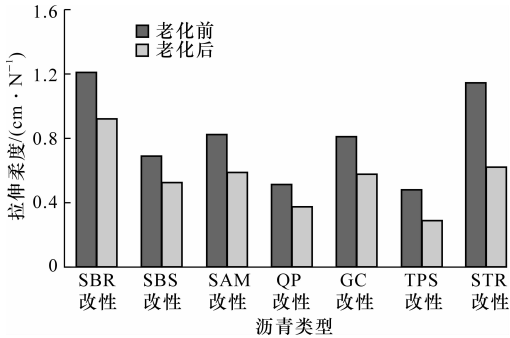


图 3 老化前后拉伸柔度的对比

较多,老化后拉伸柔度仅是老化前的 54%;而 SBR 改性沥青老化前后延度均大于 100 cm,但由于其拉力显示均小于 2 N,这里均取值 100 cm,导致拉伸柔度降低最小,是老化前的 76%。其他样品均因第 1 峰值力的增幅不同,拉伸柔度减小的程度也不同。由于 SBR 改性沥青延度取值存在偏差,故这里只讨论其他 6 种改性沥青老化前后拉伸柔度的变化。各样品老化前后拉伸柔度排序存在一致性:STR 改性>SAM 改性>GC 改性>SBS 改性>QP 改性>TPS 改性。相比测力延度其他参数,拉伸柔度较好地反映了改性沥青在低温条件下的变形能力。

2 拉伸柔度对混合料低温性能的影响

为了研究沥青结合料测力延度拉伸柔度对混合料低温性能的影响,分别测试了 SBS 改性、GC 改性、QP 改性、TPS 改性、STR 改性和 SAM 改性沥青的老化前后针入度、软化点、5℃延度、粘韧性、135℃粘度、弹性恢复等指标值。并进一步进行了各改性沥青混合料的弯曲蠕变试验和弯曲破坏试验,提取弯曲蠕变速率和弯曲应变能密度参数。其中,由于 SBR 拉伸柔度计算存在偏差,故分析时采用其他 6 种沥青样品,试验结果见下页表 3。

将不同种类的改性沥青混合料弯曲蠕变速率和弯曲应变能密度分别作为主行为,改性沥青老化前后各参数作为因子集序列,对原始数列进行均值化变换,分别生成改性沥青老化前后各指标与弯曲应变能密度和弯曲蠕变速率的灰熵关联度,如图 4、图 5 所示。

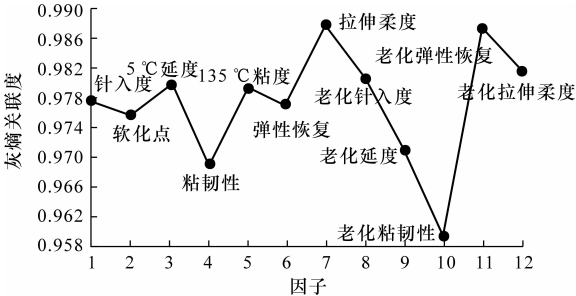


图 4 沥青各指标对弯曲应变能密度的灰熵关联度

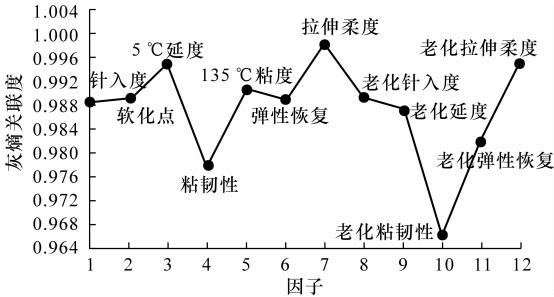


图 5 沥青各指标对弯曲蠕变速率的灰熵关联度

表 3 改性沥青及其混合料各指标值

影响参数	SBS 改性	SAM 改性	QP 改性	GC 改性	TPS 改性	STR 改性
弯曲蠕变速率/ $10^{-5}(\text{s}^{-1} \cdot \text{MPa})$	4.54	7.05	4.99	6.28	3.30	8.60
弯曲应变能密度/ $10^{-2} \text{ MPa}$	1.38	2.06	1.58	2.11	1.43	4.73
25 ℃针入度/0.1 mm	83.0	86.6	67.0	79.6	50.0	77.0
软化点/℃	52.7	81.1	84.0	81.5	89.9	85.4
5 ℃延度/cm	55.5	74.8	40.0	37.6	44.1	54.5
粘韧性/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	9.4	19.4	20.7	21.4	29.6	19.2
135 ℃粘度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	1.045	1.967	1.992	2.008	2.342	2.458
弹性恢复/%	97.0	98.0	92.0	96.5	99.0	88.0
拉伸柔度/ $(\text{cm} \cdot \text{N}^{-1})$	0.68	0.82	0.51	0.80	0.48	1.14
老化 25 ℃针入度/0.1 mm	66.5	78.0	63.2	74.8	46.7	60.5
老化 5 ℃延度/cm	44.2	52.5	20.2	26.5	18.6	36.5
老化粘韧性/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	11.6	20.0	17.8	22.4	36.0	18.4
老化弹性恢复/%	25.7	93.7	84.5	88.9	90.3	84.0
老化拉伸柔度/ $(\text{cm} \cdot \text{N}^{-1})$	0.52	0.59	0.37	0.58	0.29	0.62

各影响参数对弯曲应变能密度的影响从大到小依次为:拉伸柔度、老化弹性恢复、老化拉伸柔度、老化针入度、5 ℃延度、135 ℃粘度、针入度、弹性恢复、软化点、老化延度、粘韧性和老化粘韧性。

各影响参数对弯曲蠕变速率的影响从大到小依次为:拉伸柔度、老化拉伸柔度、5 ℃延度、135 ℃粘度、老化针入度、软化点、针入度、弹性恢复、老化延度、老化弹性恢复、粘韧性和老化粘韧性。

由图 4、图 5 可以看出,沥青各指标中,拉伸柔度为弯曲应变能密度和弯曲蠕变速率的首要影响因素;老化后拉伸柔度是弯曲应变能密度的第 3 影响因素,是弯曲蠕变速率的第 2 影响因素。由于低温弯曲应变能密度和弯曲蠕变速率较好地反映了改性沥青混合料在低温下的变形能力,沥青劲度又是沥青混合料劲度的关键,另外,拉伸柔度还具有较好的区分度,所以,推荐采用拉伸柔度来评价改性沥青的低温变形能力。

3 结 语

(1)多种改性沥青测力延度试验结果表明,改性沥青老化后虽然变形能力减弱,但第 1 峰值力显著增大,同时,第 1 峰值力与第 2 峰值力综合作用引起的粘韧性变化远大于变形减小引起的变化;峰值力、粘韧性以及韧性变化与老化前规律不一致,这些单一指标都难以全面反映改性沥青的低温性能。

(2)沥青各指标对弯曲应变能密度和弯曲蠕变速率的灰关联计算表明:拉伸柔度为弯曲应变能密度和弯曲蠕变速率的首要影响因素;老化后拉伸柔度是弯曲应变能密度的第 3 影响因素,是弯曲蠕变速率的第 2 影响因素。

(3)改性沥青测力延度拉伸柔度考虑了低温状态下拉力和变形双重因素,各改性沥青样品之间具有较好的区分度,而且是影响沥青混合料低温弯曲蠕变速率和弯曲应变能密度的最显著因素,拉伸柔度可较好地反映改性沥青的低温变形能力。

参考文献:  
References:

[ 1 ] 沈建荣,陆新民,沈火林.基于测力延度试验的聚合物改性沥青低温拉伸性能研究[J].石油沥青,2005,19(4):23-27.  
SHEN Jian-rong,LU Xin-min,SHEN Huo-lin. Study on low temperature tension performances of polymer modified asphalts based on force ductility test[J]. Petroleum Asphalt,2005,19(4):23-27.

[ 2 ] 陈佩林,周进川,张肖宁,等.沥青胶结料的测力延度试验研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(4):38-42.  
CHEN Pei-lin,ZHOU Jin-chuan,ZHANG Xiao-ning, et al. Experimental investigation into asphalt binder by force-ductility test[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition,2006,34(4):38-42.

[ 3 ] 朱阿峰,王怀专,陈晓玲.SBS 及 BRA 岩沥青改性沥青混合料性能对比研究[J].筑路机械与施工机械化,2011,28(10):64-66.  
ZHU A-feng,WANG Huai-zhuan,CHEN Xiao-ling. Comparative study on SBS and BRA rock asphalt modified asphalt mixtures performance[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2011,28(10):64-66.