

文章编号:1671-8879(2007)03-0025-06

## 改性沥青结合料低温性能评价指标

汪双杰, 台电仓

(中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710075)

**摘 要:**针对高寒多年冻土区特点,选用基质沥青与丁苯橡胶(SBR)改性沥青,通过测力延度试验进行沥青结合料低温性能多指标评价对比,据此提出韧性比指标与常规技术指标试验、夏普计划(SHRP)动态剪切试验及弯曲梁流变仪试验等不同试验指标进行相关性分析。结果表明:韧性比指标与动态剪切试验、弯曲流变仪试验及常规技术指标有良好的相关性,采用韧性比作为评价沥青结合料低温性能的主要指标合理可行;为保证低温性能,建议多年冻土地区沥青韧性比不宜低于 4.5。

**关键词:**道路工程;沥青结合料;低温性能;指标;评价;测力延度;韧性比

**中图分类号:**U414.75

**文献标志码:**A

## Evaluating indices for low-temperature performance of SBR modified asphalt binder

WANG Shuang-jie, TAI Dian-cang

(The First Highway Survey and Design Institute of China, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the temperature characteristics in permafrost areas, the base asphalt and SBR modified asphalt were selected to test the low-temperature performance of bituminous binder. The force ductility, the relativity of toughness ratio were analyzed by the customary index test, SHRP dynamic shear test and bending beam rheometer test. The results show that: there is respectively good relativity for toughness ratio index with dynamic shear test, bending beam rheometer test and customary technology index; it is feasible to take the toughness ratio as the main index to evaluate low-temperature performance of bituminous binder; in permafrost areas, the toughness ratio should be greater than 4.5. 4 tabs, 3 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; bituminous binder; low-temperature performance; indices; evaluating; force ductility; toughness ratio

## 0 引 言

青藏高原寒冻期长,太阳辐射紫外线强烈,昼夜温差夏季最高可达 35℃左右,冬季温差也在 20℃左右。在这种特殊气候条件下,低温开裂、冻融循环疲劳损坏及沥青老化是沥青路面破坏的主要原

因<sup>[1]</sup>。长期以来,青藏公路以提高路面低温稳定性为设计目标,对沥青的温度敏感性、低温特性以及沥青混合料的低温力学性质进行了广泛的研究。但纵观各国现行指标体系,除了夏普计划(SHRP)指标体系之外,其他指标体系在评价沥青性能时所采用的指标主要包括:针入度、针入度指数、软化点、当量

收稿日期:2006-04-10

基金项目:国家西部交通重大科技项目(2002318000)

作者简介:汪双杰(1962-),男,安徽安庆人,教授级高级工程师,博士,E-mail:wangshi@ccroad.com.cn。



软化点、粘度、脆点、当量脆点、延度以及老化后的质量损失、残留针入度比、残留延度比等,用来反映沥青的温度敏感性、高温稳定性、低温抗裂性以及老化后的性能。研究表明,沥青结合料性能对混合料的低温开裂的影响最大。但是,对于青藏高原多年冻土区特殊的自然环境及施工条件,现行的沥青性能评价指标尚不能满足公路建设的实际需要。本文在对多年冻土地地区常用的高标号(基质、改性)沥青以及普通地区使用的低标号基质、改性沥青进行研究的基础上<sup>[2]</sup>,采用 FDT 试验(测力延度试验)、常规技术指标和 SHRP 技术指标对沥青试样进行性能评价,通过对比分析,提出适于多年冻土区沥青路面的沥青结合料低温性能评价指标。

## 1 FDT 试验

### 1.1 试验内容

青藏高原多年冻土地地区气温低,冻结期大于 200 d,通过常规指标试验很难对各试验沥青低温性能进行优劣评价。本文采用 FDT 试验对 6 种丁苯橡胶(SBR)改性沥青进行了低温性能研究,采用“韧性比  $R_{T/V}$  ( $R_{Toughness/Viscosity}$ )”、拉伸柔度  $f$ 、屈服应变能  $E$ 、基质沥青当量劲度  $S_a$ 、改性剂当量劲度  $S_{SBR}$  等指标进行评价对比,从中选择最合理的指标。同时,对 9 种基质沥青和改性沥青进行了常规技术指标试验、SHRP 的动态剪切试验(DSR)、弯曲梁流变仪试验(BBR),并对不同的指标进行了相关性分析,以验证测力延度试验方法的可行性,并选择高标号沥青低温性能评价的合理指标。

### 1.2 沥青试样

(1)试验所用沥青如表 1 所示。

表 1 沥青试样

代号	沥青 1	沥青 2	沥青 3	沥青 4	沥青 5	沥青 6	沥青 7	沥青 8	沥青 9
沥青	欢喜岭	兰炼	克拉玛	克拉玛	兰炼	兰炼	兰炼	克拉玛	兰炼
种类	160#	160#	依 160#	依 130#	130#	160#	160#	依 130#	130#
特性	改性	路安 特改性	金石 改性	金石 改性	安宁 改性	安宁 改性	基质	基质	基质

(2)沥青 1~沥青 6 共 6 种沥青均掺入 20% SBR 改性剂,其中除沥青 1 采用胶质磨法外,其余均采用母体法改性。

### 1.3 试验设备及试验条件

FDT 试验采用中国产 GYLCY1200A-60 型立式改性沥青测力延度仪,试验在 5℃ 的水浴内进行,拉伸速率为 50 mm/min;由计算机系统自动采集荷载、延伸度数据,直接输出峰值力、延伸度、屈服

应变能,并绘制荷载-延伸度曲线;试验采用了与普通延度试验相同的“8”字模和直线模进行对比试验;试件成型与普通延度试验一样,试件成型以后,要在  $(5 \pm 0.1)^\circ\text{C}$  恒温水槽中保养 30 min,然后用小刀进行修剪,修剪齐整后,再放入  $(5 \pm 0.1)^\circ\text{C}$  恒温水槽中保养 1~1.5 h;启动计算机、测力延度机,进入测试程序;放置好试件,立即开始试验,直至试件被拉断,停止试验,并保存数据文件及 FDT 曲线。

常规技术指标的获取均依照有关规范<sup>[3]</sup>所要求的仪器和条件进行试验。

## 2 试验结果分析

### 2.1 FDT 试验结果

#### 2.1.1 计算机输出 FDT 曲线

在低温状态下,沥青 1~沥青 6 试样在受到荷载的拉伸过程中,由计算机每 2 s 自动采集一组荷载-延伸度数据,并输出各个试样的 FDT 曲线,如图 1 所示。

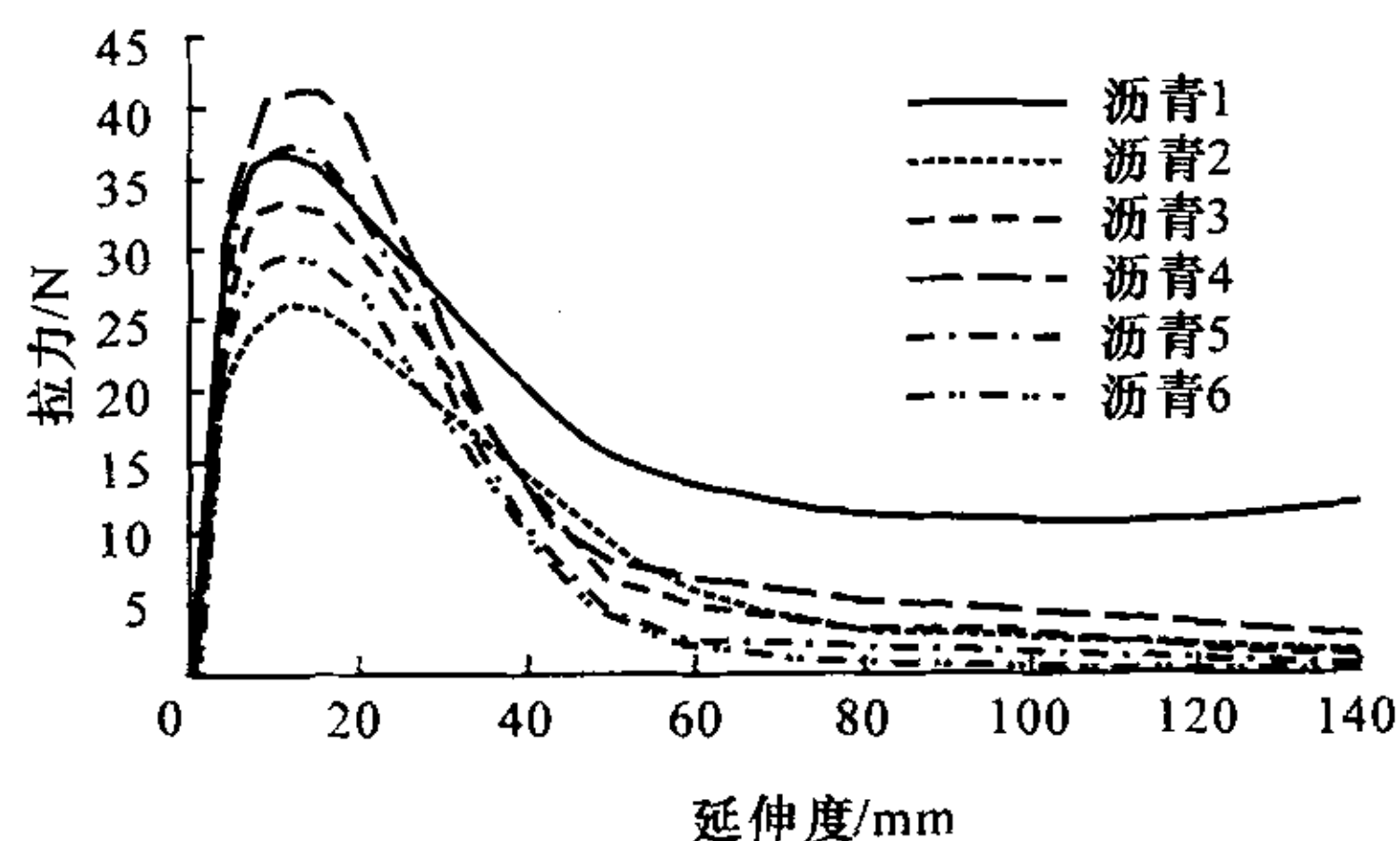


图 1 FDT 荷载-延伸度曲线

#### 2.1.2 FDT 计算图示与指标定义

FDT 荷载-延伸度典型曲线计算图式见图 2。

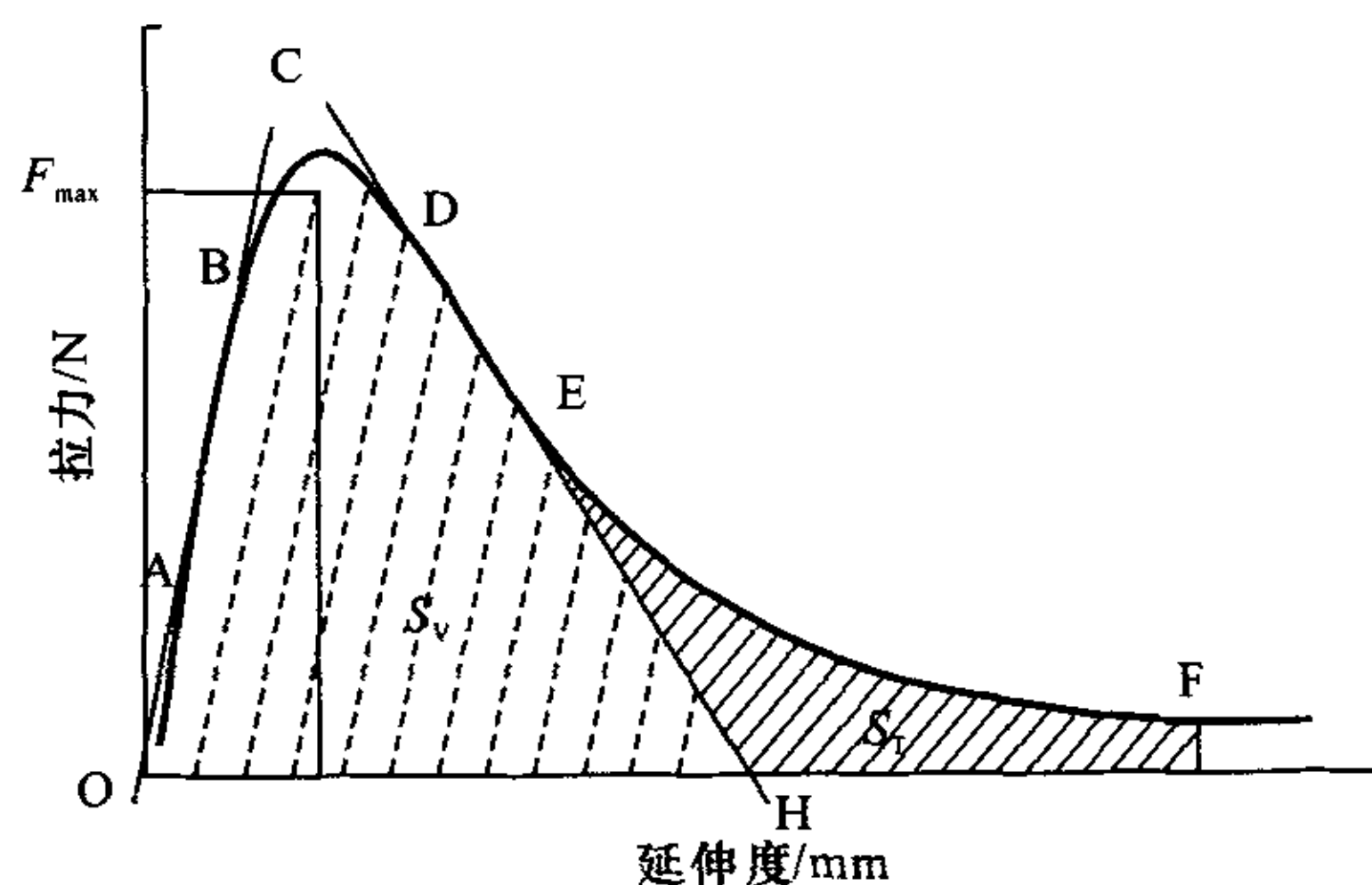


图 2 FDT 荷载-延伸度典型曲线计算图式

注:  $\overline{AB}$  为 FDT 曲线上上升部分的直线段;  $\overline{DE}$  为 FDT 曲线下落部分的直线段(对应 20~35 mm 延伸度);  $S_v$  为曲线 OABCD 与  $x$  轴及  $\overline{DH}$  所围面积;  $S_r$  为曲线 EF 与  $x$  轴及  $\overline{EH}$  所围面积。

(1)拉伸柔度( $f$ )为峰值力( $F_{max}$ )与其对应的延伸度( $D$ )之比值

$$f = F_{max}/D \quad (1)$$

(2)基质沥青当量劲度( $S_a$ )为 2~8 mm 延伸度



内荷载、延度数据线性回归( $R^2>0.9$ )的直线斜率。

(3)SBR 当量劲度( $S_{SBR}$ )为对应于 20~35 mm 延伸度的 FDT 曲线下降段(实为直线段的斜率),计算方法同(2)。

(4)屈服应变能( $E$ )为荷载拉伸沥青试样所做的功

$$E = F_{\max}D = S_V$$

(2)

(5)粘韧性面积( $S$ )为 FDT 曲线与  $x$  轴所围成区域的面积(延度在 1.2 m 内的面积)。

(6)韧性比( $R_{T/V}$ )为

$$R_{T/V} = S_T/S_V$$

(3)

2.1.3 FDT 指标的计算结果

按图 2 及 FDT 指标定义,对图 1 进行计算,结果列于表 2。

表 2 不同沥青 FDT 指标计算结果

试验指标	沥青 1	沥青 2	沥青 3	沥青 4	沥青 5	沥青 6
峰值力对应延伸度 $D/10^{-3} \text{ m}$	10.00	12.67	11.00	11.83	11.67	11.83
峰值力 $F_{\max} / \text{N}$	35.67	25.33	33.00	42.67	38.67	28.33
拉伸柔度 $f/10^{-3} (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.23	0.50	0.33	0.28	0.30	0.42
屈服应变能 $E/\text{J}$	0.38	0.65	0.75	0.99	0.96	0.98
粘韧性面积 $S/(\text{N} \cdot \text{m})$	1.96	1.16	1.40	1.85	1.18	0.95
韧性比 $R_{T/V}$	8.20	6.31	5.45	4.96	4.12	4.70
基质沥青当量劲度 $S_a/\text{MPa}$	2.48	1.50	3.78	5.28	4.06	1.68
SBR 当量劲度 $S_{SBR}/\text{MPa}$	0.51	0.49	0.83	1.05	1.06	0.80

2.2 韧性比  $R_{T/V}$  指标对比

表 2 中的  $R_{T/V}$  值能够很明显地将沥青的档次区分开,沥青 1、沥青 2、沥青 3 的  $R_{T/V}$  值比其他沥青都大。从表 2 中的劲度数据可知,6 种沥青试样的  $S_a$  值相差较大,变化范围为 1.50~5.28 MPa;但  $S_{SBR}$  却仅在 0.49~1.06 MPa 范围内有较小的波动。因此,上升段的斜率确实能反映基质沥青的性能,而下降段的斜率也能反映改性剂的性能,这一点与 FDT 试验的拉伸机理的分析相吻合。如果从沥青试样的性质进行分析,因沥青 2、沥青 6 的基质沥青均为同一种 160# 沥青(来自不同生产厂家),其  $S_a$  值分别为 1.50 MPa、1.68 MPa,数值接近,结果比较符合实际。沥青 1、沥青 3 虽也同为 160# 沥青,但基质沥青不同,  $S_a$  分别为 2.48 MPa、3.78 MPa,其结果相差较大。同样,沥青 4、沥青 5 虽同为 130# 沥青,但  $S_a$  偏大,分别达 5.28 MPa、4.06 MPa,且相差更大。对比 FDT 曲线可知,沥青 1 比较特殊,当拉力降低到大约 10 N、延伸度达到 1.2 m 时,其拉力又出现反弹。究其原因,主要受改性工艺的影响,由于沥青 1 采用了胶体磨法进行改性,

致使 SBR 改性剂颗粒不能很好地分散到沥青相中。

由表 2 中的评价指标可知,  $R_{T/V}$  减小,而其对应的  $E$  相应增大,此时沥青达到屈服所做的功也越大,很显然对应沥青的低温性能降低。因为  $D$  对低标号沥青其值相差太小,难以区分优劣,因此  $R_{T/V}$ 、 $E$  值更加适合高标号重交通沥青。通过  $R_{T/V}$ 、 $E$  指标对 6 种 SBR 改性沥青的低温性能进行试验,优劣排序为:沥青 1、沥青 2、沥青 3、沥青 4、沥青 6、沥青 5。

2.3 韧性比  $R_{T/V}$  评价指标适应性验证

2.3.1  $R_{T/V}$  与常规技术指标之间的相关性分析

改性、基质沥青的常规技术指标的试验结果见表 3。主要对薄膜加热试验(TFOT)前后的 8 项常规技术指标进行测试,侧重从沥青的感温性能、低温延度、当量脆点( $T_{1.2}$ )、弹性恢复等指标进行分析<sup>[4-8]</sup>。

由表 3 可知,3 种基质沥青(沥青 7、沥青 8、沥青 9)的 5℃延度明显小于其他 6 种改性沥青的延度,且 6 种改性沥青在试验机的量程内未见拉断。将 5℃、15℃、25℃的针入度与温度进行线性回归,求出针入度指数  $PI$ 。

表 3 显示,不同种类沥青的感温性能有明显的差异,沥青 4、沥青 8、沥青 9 这 3 种沥青的回归直线斜率最大,温度敏感性最强;  $PI$  值都小于 -1.0,其  $A$  值分别为 0.06、0.054、0.050,  $A$ 、 $PI$  值均不符合“八五攻关沥青性能指标建议”的  $A_{\max}<0.0482$  和  $PI_{\min}>-1.2$  的要求,即不符合沥青路用性能的 B 级要求;这 3 种沥青的当量脆点  $T_{1.2}$  也较高,分别为 -10℃、-12.2℃、-18.2℃。再比较所有沥青试样的低温延度、25℃弹性恢复率、TFOT 的 25℃针入度比,可见沥青 7、沥青 8、沥青 9 的 5℃延度都明显小于其余 6 种沥青,虽然这 3 种沥青的针入度比较大,但 TFOT 残留沥青的延度较小。综合考虑低温延度、 $T_{1.2}$ 、TFOT 后延度和针入度比,说明这 3 种沥青的低温性能明显较差。

对于其余 6 种改性沥青,基质沥青的 5℃延度均大于 200 cm,因此,单纯靠低温延度难分优劣;综合比较  $T_{1.2}$ 、柔度范围(即当量软化点减去当量脆点)、TFOT 后延度可知,沥青 1、沥青 2、沥青 3 处于同一等级,但沥青 1 弹性恢复率达 95%,针入度比也达 75%;沥青 3 略差于沥青 1、沥青 2;而沥青 6 的 TFOT 延度虽稍小,但其  $T_{1.2}$  达到 -27.4℃,其弹性恢复率、老化后 5℃延度、 $PI$  值要比沥青 4 高,所以低温性能较沥青 4 好;沥青 5 老化后 5℃低温延度最小,低温性能是 6 种改性沥青中最差的对 9



表 3 常规技术指标试验结果

试验项目及条件		沥 青 种 类								
		沥青 1	沥青 2	沥青 3	沥青 4	沥青 5	沥青 6	沥青 7	沥青 7	沥青 9
针入度/(0.1mm)	25 ℃	147	149	144	124	104	149	141	121	130
	15 ℃	50	52	51	35	42	65	54	38	40
	5 ℃	18	20	19	8	17	30	20	10	13
延 度 ( 5 cm · min <sup>-1</sup> )/cm	15 ℃	200	200	200	187	200	200	172	100	132
	5 ℃	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	112.0	123.4	38.9
软化点/℃		55.0	45.2	45.4	50.0	51.7	48.2	43.8	45.4	43.9
脆点/℃		-28.3	-24.8	-23.8	-18.5	-25.0	-24.5	-20.2	-16.4	-14.8
运动粘度/(mm <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> )	135 ℃	400.2	390.2	360.4	375.5	440.5	410.0	160.5	140.5	180.3
动力粘度/(Pa · s)	60 ℃	1 024.0	932.5	831.2	623.5	970.0	960.5	410.1	321.2	370.5
密度/(g · cm <sup>-3</sup> )	15 ℃	1.021	1.021	1.011	1.014	1.009	1.013	0.986	0.976	0.987
A (直线斜率)		0.046	0.044	0.044	0.060	0.039	0.035	0.042	0.054	0.050
R (相关系数)		0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999
PI		-0.85	-0.57	-0.62	-2.45	0.11	0.95	-0.39	-1.91	-1.43
T <sub>1.2</sub> /℃		-20.7	-22.9	-22.2	-10.0	-24.3	-27.4	-23.9	-12.2	-18.2
T <sub>800</sub> /℃		45.7	43.4	42.0	37.4	47.5	53.7	42.7	39.9	38.3
柔性范围/℃		66.4	66.3	64.2	47.4	71.8	81.1	66.6	52.2	56.5
弹性恢复	恢复长度/cm	9.5	2.5	3.2	3.5	3.5	3.6	0.8	1.1	1.8
	恢复率/%	95	25	32	35	35	36	8	11	18
薄膜加热试验 (163 ℃, 5 h)	质量损失/%	-0.049	-0.480	-0.230	-0.390	-0.430	-0.550	-0.500	-0.450	-0.500
	针入度(25 ℃)/0.1 mm	110	82	87	80	69	72	107	86	78
	针入度比/%	75	55	60	65	67	48	76	71	59
	延度(15 ℃)/cm	200.0	200.0	200.0	164.0	112.0	118.5	89.0	163.4	78.0
	延度(5 ℃)/cm	175	162	155	148	138	153	42	72	13
	延度比(5 ℃)/%	87.5	81.0	77.5	74.0	69.0	76.5	37.5	58.3	33.4

种沥青试样的低温性能进行优劣排序为：沥青 1、沥青 2、沥青 3、沥青 6、沥青 4、沥青 5、沥青 8、沥青 7、沥青 9。

参照  $R_{T/V}$  对沥青的低温优劣排序,除沥青 4、沥青 5 顺序略有不同之外,其他沥青试样排序基本一致,说明韧性比指标比较合理。

2.3.2 韧性比  $R_{T/V}$  同 SHRP 试验指标相关性分析  
6 种改性沥青 SHRP 的 DSR 和 BBR 试验结果见表 4。

(1)疲劳性能分析。SHRP 对抗疲劳性能、低温抗裂性能采用 PAV 残留沥青进行了 DSR、BBR 试验。并针对该地区特殊的气候特点,仅对 PAV 残留沥青进行了 DSR、BBR 试验指标同韧性比相关性进行分析。

$|G^*|$  反映了沥青结合料的复数剪切模量; $\delta$  表示了产生的应变(应力)响应滞后于施加的应力(应变)荷载的相位角,即复数剪切模量中粘性成分和弹性成分的比例;而  $|G^*| \sin \delta$  综合反映了沥青结合料在剪切过程中由于粘性摩擦生热而损失的能

量,称为损失剪切模量。 $|G^*| \sin \delta$  值越小,说明其低温抗疲劳性能越好。表 4 结果表明,沥青 2 的抗疲劳性能最好。但若损失模量比较接近,则损失正切越大,其粘性成分越多,说明其抗疲劳性能越好,如表 4 中沥青 3 和沥青 6 的  $|G^*|$  值分别为 5.785、5.780 MPa,后者  $\delta$  大于前者,说明后者抗疲劳性能优于前者。依此结果进行抗疲劳优劣排序为:沥青 2、沥青 4、沥青 1、沥青 6、沥青 3、沥青 5。

(2)低温性能分析。对沥青试样低温性能的评价仍然要依靠 BBR 试验结果,并采用了劲度模量  $s$  不超过 300 MPa,而劲度变化速率  $m$  值不小于 0.3 作评价要求。分析表 4 中 -12 ℃、-18 ℃、-24 ℃ 时 6 种改性沥青的  $s$  和  $m$ ,不难发现,-18 ℃ 满足  $s < 300$  MPa、 $m > 0.3$  要求的只有沥青 1、沥青 2,而其余 4 种沥青只在 -12 ℃ 时满足此要求,但是沥青 3、沥青 4 在 -18 ℃ 时的  $s$  和  $m$  值均同时满足。由此说明,沥青 1、沥青 2 的低温性能最好。沥青 3、沥青 4、沥青 5、沥青 6 只能满足 -12 ℃ 的要求。因此,综合其  $s$ 、 $m$  指标要求和大小,对 6 种沥青进行低



表 4 压小老化试验(PAV)后残留沥青的 DSR、BBR 试验结果

试验项目与条件			PAV 后残留沥青试样(压力老化 20 h,100 ℃,2.1 MPa)						规范要求 <sup>[5]36</sup>
			沥青 1	沥青 2	沥青 3	沥青 4	沥青 5	沥青 6	
DSR 试验	10 ℃	$\delta /(^{\circ})$	44.60	34.70	36.20	33.90	37.20	38.40	<5 000 kPa
		$G^{*} / \text{kPa}$	7 614.98	7 608.76	9 795.14	8 114.48	9 896.22	9 306.67	
		$ G^{*}  \sin \delta$	5 346.88	4 445.36	5 785.07	4 525.81	5 983.25	5 780.82	
	13 ℃	$\delta /(^{\circ})$	48.60	36.00	34.70	32.90	35.20	35.70	
		$G^{*} / \text{kPa}$	6 459.36	6 776.48	8 436.04	7 085.64	8 595.25	8 365.79	
		$ G^{*}  \sin \delta$	4 845.24	3 983.11	4 802.46	3 848.74	4 954.58	4 881.78	
	16 ℃	$\delta /(^{\circ})$	53.50	37.20	34.00	32.30	34.00	33.70	
		$G^{*} / \text{kPa}$	4 609.29	5 808.47	7 550.28	5 975.27	7 413.46	7 604.76	
		$ G^{*}  \sin \delta$	3 705.21	3 511.80	4 222.06	3 192.90	4 145.55	4 219.46	
BBR 试验	-24 ℃, 60 s	$s / \text{MPa}$	423.000	282.000	209.500	214.250	238.667		$s < 300 \text{ MPa}$ $m > 0.3$
		$m$	0.319	0.275	0.263	0.262	0.248		
	-18 ℃, 60 s	$s / \text{MPa}$	156.000	119.000	89.400	84.500	118.500	110.500	
		$m$	0.401	0.320	0.297	0.292	0.286	0.281	
	-12 ℃, 60 s	$s / \text{MPa}$			43.900	45.600	55.500	44.500	
		$m$			0.312	0.309	0.323	0.330	

注： $G^{*}$  为复数模量(kPa)， $\delta$  为相位角( $^{\circ}$ )； $s$  为劲度模量； $m$  为劲度变化速率。

温性能优劣排序为：沥青 1、沥青 2、沥青 3、沥青 6、沥青 4、沥青 5。

(3) 韧性比  $R_{T/V}$  同  $m$  值相关性分析。对沥青的低温抗裂性能进行常规技术指标评价时，只能采用多项指标综合评价，很难找到某一个常规技术指标与 FDT 试验的韧性比指标的相关性。而 SHRP 中 BBR 试验的  $m$  值反映了沥青劲度的时间敏感性以及应力松弛性能，在  $s$  值接近时， $m$  值越大，说明其应力松弛性能越好，低温抗裂性能也就越好。将沥青 2、沥青 3、沥青 4、沥青 5、沥青 6 的 -18 ℃ 的  $m$  值与 5 ℃ 的  $R_{T/V}$  进行线性回归后得图 3 所示曲线，相关性系数达 0.947 6。由此可知， $m$  与  $R_{T/V}$  有较好的相关性。

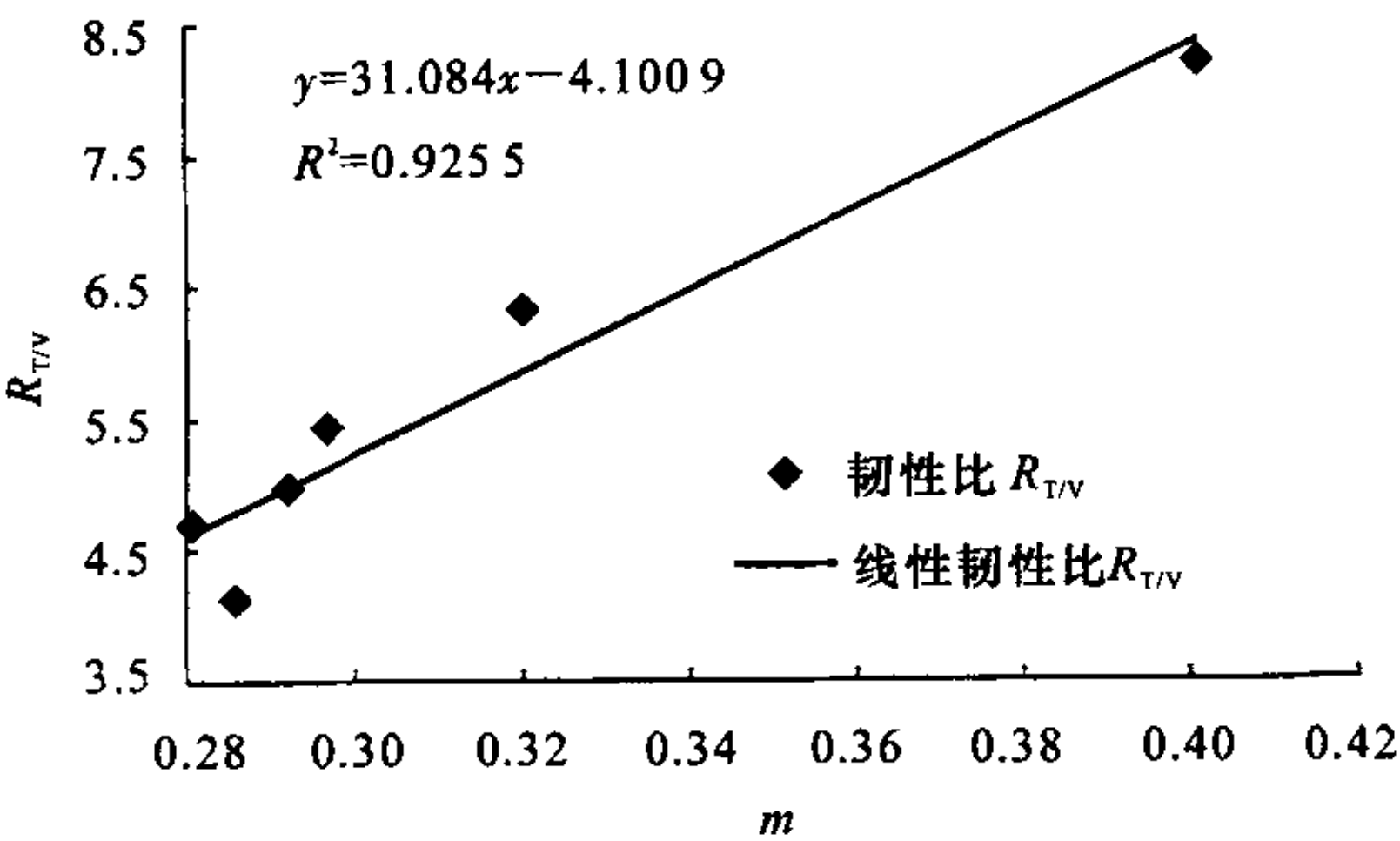


图 3  $R_{T/V}$  与  $m$  的相关性曲线

由于 AASHTO MP1 要求  $m$  值应不小于 0.3，故若将  $m = 0.3$  代入图 3 中的直线回归方程，可求出  $R_{T/V} = 5.22$ 。所以，综合常规技术指标、SHRP 技术指标的评价方法，建议寒区修筑路面时选择沥青结合料的韧性比  $R_{T/V}$  值应该不小于 4.5。

3 结 语

(1) 采用常规延度指标对沥青的延展性能进行评价的方法不适合高标号改性沥青，从试验结果看到，其 5 ℃ 延度大部分都大于 200 cm，仅依靠这样单一指标无法分出优劣，所以急需寻找一个对高标号改性沥青比较敏感的评价指标。

(2) 低温性能良好的 SBR 改性沥青，其“韧性比  $R_{T/V}$ ”、拉伸柔度越大时，其应变性能反而越小，这与 DSR、BBR 试验以及常规技术指标均有良好的相关性。利用中国产设备，采用 FDT 对改性沥青的低温性能进行评价是经济合理的，应用韧性比的评价指标是简易可行的，建议多年冻土地区的“沥青韧性比  $R_{T/V}$ ”值应不低于 4.5。

(3) 采用不同剂量的改性剂对同一种沥青进行改性，其低温性能会有很大的不同。对于试验所采用的 2 % SBR 改性剂，尽管不同的评价方法和指标对沥青低温性能的优劣排序基本相同，但因 6 种沥青均为 130#、160# 改性沥青，其改性后的低温性能并不理想。因此，针对多年冻土地区的特殊环境，在选择沥青材料时应该综合考虑耐老化、抗疲劳的性能。

(4) 沥青材料是一种不具有结晶性的无变形的高分子有机化合物，当加入橡胶等有机或无机改性剂后，这种结构复杂的高聚物使沥青分子的化学结构变得更加复杂，其力学性能对温度的反映更加强



烈,改性沥青的拉伸机理变得更复杂,改性沥青在青藏高原环境下的低温稳定性问题有待进一步研究。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 武懋民,汪双杰,章金钊. 多年冻土区公路工程[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
  - [2] 中交第一公路勘察设计研究院,东南大学. 多年冻土区沥青路面耐久性能研究[R]. 西安:中交第一公路勘察设计研究院,2005.
  - [3] JTJ 052-2000,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
  - [4] 田小革,郑健龙,张起森. 老化对沥青结合料粘弹性的影响[J]. 交通运输工程学报,2004,4(1):3-6.  
TIAN Xiao-ge, ZHENG Jian-long, ZHANG Qi-sen. Effect of aging on viscoelastic performance of asphalt binder [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(1):3-6.
  - [5] 熊 萍,郝培文. SBS 改性沥青储存稳定性试验方法和评价指标的研究[J]. 中国公路学报,2005,18(1):1-6.  
XIONG Ping, HAO Pei-wen. Study of the experimental method and evaluating index of SBS modified asphalt storage stability [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1):1-6.
  - [6] 陈华鑫,李宁利,张争奇,等. 沥青材料的感温性分析[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):8-11.  
GHEN Hua-xin, LI Ning-li, ZHANG Zheng-qi, et al. Temperature susceptibility analysis of asphalt binders[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006,26(1):8-11.
  - [7] 徐永杰. 热拌沥青混合料拌合质量的控制[J]. 筑路机械与施工机械化,2006,23(6):20-22.  
XU Yong-jie. Quality control of hot asphalt mixture [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006,23(6):20-22.
  - [8] 原健安,纪 东,祝志刚. SBS 剂量对改性沥青性质的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(3):19-22.  
YUAN Jian-an, JI Dong, ZHU Zhi-gang. Effect of different dosage SBS on properties of modified asphalt [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005,25(3):19-22.
- 
- (上接第 24 页)
- ZHANG Zheng-qi, ZHAO Zhan-li, ZHANG Wei-ping. Effect of aggregate gradation on performance of asphalt with aggregate [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005,25(2):1-5.
  - [6] 杜顺成,戴经梁. 沥青混合料永久变形评价指标[J]. 中国公路学报,2006,19(5):18-22.  
DU Shun-cheng, DAI Jing-liang. Permanent deformation evaluation index of asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(5):18-22.
  - [7] 徐 皓,倪富健,陈荣生,等. 排水性沥青混合料耐久性[J]. 交通运输工程学报,2005,5(2):27-31.  
XU Hao, NI Fu-jian, CHEN Rong-sheng, et al. Durability of porous asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(2):27-31.
  - [8] 张宜洛. 抗滑级配类型沥青混合料的抗滑性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(1):7-10.  
ZHANG Yi-luo. Skid resistance regularity of different grades bituminous mixture [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(1):7-10.
  - [9] 高 英,曹荣吉. 沥青混合料级配类型选择分析[J]. 公路,2002,(1):84-87.  
GAO Ying, CAO Rong-ji. Analysis of choice for asphalt mixture gradation [J]. Highway, 2002, (1):84-87.
  - [10] JTG F40-2004,公路沥青路面施工技术规范[S].
  - [11] 沈金安. 特立尼达湖沥青及其应用前景[J]. 国外公路,2000,20(2):28-31.  
SHEN Jin-an. Trinidad lake asphalt and its application prospect [J]. Journal of Foreign Highway, 2000,20(2):28-31.
  - [12] 倪富健,赖用满,沈 恒,等. TLA 复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路交通科技,2005,22(1):13-16.  
NI Fu-jian, LAI Yong-man, SHEN Heng, et al. Research on pavement performance of composite modified asphalt mixture with Trinidad lake asphalt (TLA) [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005,22(1):13-16.
  - [13] 沈金安. 特立尼达湖改性沥青的性能[J]. 国外公路,2000,20(3):30-32.  
SHEN Jin-an. Performance of Trinidad lake asphalt modified asphalt [J]. Journal of Foreign Highway, 2000,20(3):30-32.