

高黏改性沥青的温度敏感性评价及指标适用性分析

谢小迪¹, 吕大春^{2,3*}, 熊奎元^{2,3}, 王旺¹

(1. 广东交科检测有限公司, 广东 广州 510550; 2. 广西交科集团有限公司; 3. 广西道路结构与材料重点实验室)

摘要:为探讨不同掺量和种类高黏改性剂对沥青温度敏感性的影响,分析不同评价指标对高黏改性沥青温度敏感性的适用性,该文通过对两种掺量为0%、6%、8%、10%及12%的高黏改性沥青进行针入度试验和动态剪切流变试验,分别采用针入度指数 PI 、黏温指数 VTS 、复数模量指数 GTS 及复数指数 CNI 进行温度敏感性评价。试验结果与分析表明:两种高黏改性剂均可改善沥青的温度敏感性,其中 TPS 高黏改性剂掺量达到10%时,温度敏感性改善效果最佳。采用针入度指数 PI 评价高黏改性沥青的温度敏感性时容易失真,而采用复数指数 CNI 、复数模量指数 GTS 及黏温指数 VTS 均可对高黏改性沥青的温度敏感性做出一致性评价,并且具有较好的复现性,但复数指数 CNI 可以分别评价高黏改性沥青弹性和黏性对温度的敏感性,指标区分度更好。故综合考虑,推荐采用复数指数 CNI 评价高黏改性沥青的温度敏感性。

关键词: 沥青结合料; 高黏改性剂; 温度敏感性; 适用性分析

沥青是一种黏弹性材料,它的性能和柔软程度均随着温度的变化而发生改变,而温度敏感性则是衡量沥青这种性质的重要指标,温度敏感性大的沥青夏季容易产生车辙、推移、坑槽等病害,冬季容易出现脆性开裂等现象,所以温度敏感性不仅是沥青流变学的核心,也是沥青路面使用性能的核心。

高黏改性沥青是日本最早为透水沥青路面研发的专用沥青,具有高黏度、高软化点、高黏附性等特点,性

能稳定的高黏改性沥青对修筑透水沥青路面至关重要,可以有效地提高透水沥青路面高温抗飞散的能力。目前评价沥青温度敏感性的指标众多,中国规范规定对沥青的温度敏感性评价主要采用针入度指数(PI),最早是基于基质沥青的评价而设定的,但针入度属于一种经验性参数,再现性较差,力学性能指标不明确,对于高黏改性沥青的温度敏感性评价不一定适用。

该文分别采用针入度指数 PI 、黏温指数 VTS 、复

- *****
- [5] 赵延庆,吴剑,文健. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J]. 公路,2006(8).
- [6] Yusoff, Nur Izzi Md, Chailleux, Emmanuel, Airey, Gordon D. A Comparative Study of the Influence of Shift Factor Equations on Master Curve Construction[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2011, 4(6).
- [7] 陈辉,刘涵奇,罗蓉,等. 利用动态模量主曲线研究沥青混合料水稳定性[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017(3).
- [8] 王维平. 沥青混合料动态模量及其变化规律研究[J]. 中外公路,2017(5).

- [9] 罗鸣,陈超,王涛. 3种AC-20沥青混合料的动态模量及其主曲线拟合与分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2018(1).
- [10] 刘胜,刘靖宇. 测试方法对沥青混合料动态模量取值的影响[J]. 中外公路,2019(4).
- [11] 张金喜,姜凡,王超,等. 室内外老化沥青混合料动态模量评价[J]. 建筑材料学报,2017(6).
- [12] 张认,秦仁杰,何婉玉,等. 沥青混合料高温稳定性试验研究[J]. 路基工程,2019(4).
- [13] 樊向阳,罗蓉,冯光乐,等. 抗车辙剂改性沥青的高温性能评价指标[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017(4).

收稿日期:2021-08-10(修改稿)

基金项目:广西技术引导专项(编号:桂科AC16380112);广西壮族自治区新一代高性能橡胶沥青技术研发及产业项目(编号:2018AA21028)

作者简介:谢小迪,男,硕士,工程师. E-mail:371147410@qq.com

* 通信作者:吕大春,男,硕士,工程师. E-mail:1141496308@qq.com

数模量指数 GTS 及复数指数 CNI 对两种不同掺量的高黏改性沥青进行温度敏感性评价,以探讨不同评价指标对高黏改性沥青温度敏感性的适用性,以及研究不同掺量和种类高黏改性剂对基质沥青温度敏感性的影响。

1 试验材料

试验采用 70# 基质沥青,其技术指标满足 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的技术要求。

试验采用两种高黏改性剂,分别为意大利 I 型高黏改性剂和日本 TPS 高黏改性剂,掺量分别为 0%、6%、8%、10% 及 12%(外掺)。

2 室内试验

2.1 改性沥青的制备

将基质沥青在 135 °C 的烘箱中加热至融化状态,然后置于 150~160 °C 的烘箱中发育 2 h,随后加入称好相应质量分数的高黏改性剂,在 160~170 °C 的温度下用高速剪切仪以 4 000~5 000 r/min 的转速剪切 1 h。直至高黏改性剂全部溶解且分布均匀为止,即制得两种不同掺量的高黏改性沥青。对基质沥青也采用与改性沥青相同的加工过程,得到零掺量试样。

2.2 试验参数介绍

对两种不同掺量高黏改性沥青分别进行不同温度下的针入度指数试验、基于动态剪切流变仪(Dynamic shear rheometer, DSR)的黏温指数 VTS 试验、复数模量指数 GTS 试验及复数指数 CNI 试验。

针入度指数 PI 在中国规范中常用来表示沥青的温度敏感性,对基质沥青的要求为 $-1.8 \sim +1.0$,对聚合物改性沥青的要求为不小于 -1.2 。计算公式如下。

$$PI = \frac{20 - 500 A_{\lg Pen}}{1 + 50 A_{\lg Pen}} \quad (1)$$

$$\lg P = K + A_{\lg Pen} \times T \quad (2)$$

式中: $\lg P$ 为针入度对数; K 为线性回归常数项; $A_{\lg Pen}$ 为线性回归系数; T 为试验温度(°C)。

黏温指数 VTS 表示沥青黏度 η 随温度变化的情况,在国外常用来表示沥青的温度敏感性。陈华鑫等通过对不同掺量和种类的 SBS 改性沥青不同温标状态下换算的 VTS 进行比较,发现采用开氏温标能够更好地反映聚合物改性沥青的温度敏感性,计算式如下:

$$\eta = \frac{G^*}{\omega} \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628} \quad (3)$$

$$VTS = \frac{\lg(\lg \eta_1) - \lg(\lg \eta_2)}{\lg T_{K1} - \lg T_{K2}} \quad (4)$$

式中: G^* 为复数模量; ω 为角频率; δ 为相位角; η_1 、 η_2 分别为不同温度对应下的沥青黏度; T_{K1} 、 T_{K2} 分别为不同的开氏温度。

复数模量指数 GTS 和复数指数 CNI 均是基于动态剪切流变仪(DSR)试验得出的流变参数类温度敏感性评价指标。 GTS 是通过不同温度下 $\lg \lg G^* - \lg T$ 的对数坐标计算得到的斜率,常用来评价沥青的温度敏感性; CNI 则是在 GTS 的基础上,分别考虑了沥青的黏弹特性,分为弹性部分的存储模量 G' 和黏性部分的损失模量 G'' 两个部分。计算公式为:

$$CNI = G'TS + G''TS \times i \quad (5)$$

式中: $G'TS$ 为存储模量复数指数,是存储模量对数与绝对温度对数线性回归的斜率绝对值; $G''TS$ 为损失模量复数指数,是损失模量对数与绝对温度对数线性回归的斜率绝对值; i 为线性回归参数。

3 试验结果分析

3.1 针入度指数 PI 试验结果

沥青针入度指数 PI 常用来表示沥青的温度敏感性。 PI 值越大,则表示沥青的温度敏感性越小; PI 值越小,则表示沥青的温度敏感性越大。两种不同掺量高黏改性沥青的针入度试验结果及针入度指数计算结果见表 1。

由表 1 可得:两种高黏改性沥青不同温度下的针入度值均随着高黏改性剂掺量的增加而降低,表明高黏改性剂的掺入,会提高基质沥青的稠度和硬度。

从表 1 可得:

(1) 意大利 I 型高黏改性沥青的 PI 值随着改性剂掺量的增加而增大,这表明意大利 I 型高黏改性沥青的温度敏感性随着改性剂的增加而降低,温度性能稳定性得到改善。TPS 高黏改性沥青的 PI 值则随着改性剂掺量的增加,呈现先增加,后稳定的趋势。这表明 TPS 高黏改性剂的掺入在一定程度上可以改善基质沥青的温度敏感性。但改性效果具有上限阈值,当改性剂掺量达到阈值(6%)后,温度敏感性改性效果趋于稳定。

(2) 不同掺量高黏改性沥青的针入度指数相关系数均达到 0.99 以上,满足规范要求的置信区间达到

95%以上,说明不同掺量高黏改性沥青的针入度指数相关性均非常好。但这并不一定反映 PI 值一定适用于高黏改性沥青的温度敏感性评价。为了验证 PI 值

对于高黏改性沥青的适用性,分别对两种常用掺量(12%)高黏改性沥青进行复现性试验。试验结果见表 2。

表 1 针入度及针入度指数试验结果

沥青种类	掺量/ %	针入度/(0.1 mm)			PI	R^2
		15 °C	25 °C	30 °C		
TPS 高黏 改性沥青	0	23.2	65.7	106.4	-0.67	0.999 7
	6	21.8	49.9	69.5	1.11	0.997 1
	8	20.2	46.1	75.6	0.36	0.997 8
	10	21.1	44.1	73.3	0.81	0.993 2
	12	20.9	45.4	73.4	0.73	0.996 8
意大利 I 型高 黏改性沥青	6	22.9	51.7	71.2	1.28	0.996 8
	8	22.6	48.7	67.0	1.61	0.998 1
	10	21.7	44.2	63.3	1.76	1.000 0
	12	19.1	40.6	54.8	1.79	0.997 1

表 2 复现性试验结果

沥青种类	掺量/ %	针入度/(0.1 mm)			PI	R^2
		15 °C	25 °C	30 °C		
TPS 原试验	12	20.9	45.4	73.4	0.73	0.996 8
复现性试验	12	21.7	44.1	75.6	0.83	0.987 6
意大利 I 型原试验	12	19.1	40.6	54.8	1.79	0.997 1
复现性试验	12	20.5	41.1	55.2	2.27	0.998 6

由表 2 可得:两种高黏改性沥青的相关性系数均大于 0.95,在满足规范要求的置信区间达到 95%以上的前提下,两种不同掺量高黏改性沥青的针入度值均出现细微的重复性误差变化,从而导致了两种高黏改性沥青的 PI 值结果与第一次试验结果出现较大偏差,评价高黏改性沥青温度敏感性的结果可能失真。这表明针入度指数 PI 并不适用于高黏改性沥青的温度敏感性评价。

3.2 黏温指数 VTS 试验结果

分别对两种不同掺量高黏改性沥青进行黏温指数 VTS 试验,同时进行复现性试验,试验结果见表 3。

黏温指数 VTS 是通过沥青黏稠度随温度变化的情况来反映沥青的温度敏感性。由表 3 可得:两种不同掺量下高黏改性沥青的复现性试验相关性均大于 0.95,且与第一次测试结果偏差较小,复现性较好,这是因为沥青是高分子聚合物材料,具有流变性,相比针入度指数,黏温指数 VTS 力学性能指标更加明确,故采用黏温指数 VTS 相比针入度指数更加科学、客观。

表 3 黏温指数 VTS 试验结果

沥青种类	掺量/ %	初始结果		复现性结果	
		VTS	R^2	VTS	R^2
TPS 高黏 改性沥青	0	-7.797 2	0.997 8	-8.112 2	0.999 6
	6	-6.575 9	0.995 4	-6.918 3	0.996 5
	8	-5.899 4	0.996 2	-6.178 2	0.997 8
	10	-5.079 3	0.990 0	-5.300 4	0.992 1
	12	-5.550 1	0.998 4	-5.639 2	0.997 8
意大利 I 型高黏 改性沥青	6	-6.769 3	0.998 6	-6.776 5	0.996 8
	8	-5.926 8	0.993 9	-6.012 0	0.994 6
	10	-5.085 3	0.983 4	-5.112 4	0.989 6
	12	-4.302 3	0.971 8	-4.298 7	0.987 8

由表 3 可得:两种高黏改性沥青的 VTS 值均随着高黏改性剂掺量的增加呈现增大的趋势。表明高黏改性沥青的温度敏感性随着改性剂掺量的提高而改善。这主要是因为高黏改性剂的掺入改变了基质沥青的内部结构,在沥青内部形成网络结构,起到了“加筋”作用,从而使得高黏改性沥青抵抗剪切流动变形能力增

强,受温度影响的敏感度降低。

3.3 复数模量指数 GTS 试验结果

沥青是一种感温性能材料,其温度敏感性可采用复数模量指数 GTS 来评价。复数模量指数 GTS 通过 $\lg \lg G^* - \lg T$ 数据回归分析得到,如式(6):

$$\lg \lg G^* = GTS \times \lg T + C \quad (6)$$

式中: G^* 为复数模量(Pa); T 为试验温度(K以绝对温度表示); C 为常数。

根据式(6)可以计算两种不同掺量高黏改性沥青的复数模量指数 $|GTS|$ 值,结果列于表4。

表4 两种不同掺量高黏改性沥青复数模量指数 $|GTS|$ 值

沥青种类	掺量/ %	初始结果		复现性结果	
		$ GTS $	R^2	$ GTS $	R^2
TPS高黏 改性沥青	0	5.365 2	0.999 2	5.270 9	0.996 4
	6	4.365 3	0.996 5	4.341 5	0.985 9
	8	4.069 5	0.998 7	4.036 4	0.995 7
	10	3.643 8	0.998 6	3.717 7	0.991 4
	12	3.798 5	0.999 5	3.930 4	0.990 5
意大利 I型高黏 改性沥青	6	4.520 6	0.998 6	4.490 0	0.998 7
	8	3.769 9	0.996 0	3.736 3	0.996 5
	10	3.126 1	0.997 0	3.119 4	0.997 2
	12	2.575 6	0.997 2	2.565 7	0.997 3

由表4可知: $\lg \lg G^*$ 和 $\lg T$ 的相关系数非常高,均达到0.99以上。随着高黏改性剂掺量的增加,两种高黏改性沥青的复数模量指数 $|GTS|$ 基本呈现不断降低的趋势,其中当TPS掺量达到12%时,TPS高黏改性沥青的 $|GTS|$ 略有回升,表明TPS高黏改性沥青的温度敏感性随着改性剂掺量的增加而降低,当掺量达到12%时,温度敏感性略有上升。对比表3、4可得:虽然黏温指数 VTS 和复数模量指数 $|GTS|$ 均由动态剪切流变试验参数计算得出,相关系数也很高,但不同掺量高黏改性沥青间复数模量指数 $|GTS|$ 的区分度明显比黏温指数 VTS 高,并且复数模量指数 $|GTS|$ 的复现性试验与初始试验差值更小,复现性相比黏温指数 VTS 更好。综上所述,采用复数模量指数 $|GTS|$ 可以更加直观地区分高黏改性沥青的温度敏感性。

3.4 复数指数 CNI 结果

沥青是一种黏弹性材料,不但具有黏性,还具有弹性。 CNI 法不仅可以对胶结料温度敏感性进行整体表征,同时还能对胶结料存储模量 G' 和损耗模量 G'' 的温度敏感性分别进行量化表征。相比 $|GTS|$ 复数模量指数,复数指数 CNI 可以更全面地反映沥青黏弹特性间的温度敏感性。两种高黏改性沥青的复数指数 CNI 试验结果见表5。

表5 不同掺量高黏改性沥青 CNI 试验结果

沥青种类	掺量/%	G'	G''	CNI	R^2
TPS高黏 改性沥青	0	11.468	7.836	$11.468+i \times 7.836$	0.996 4
	6	8.946	6.430	$8.946+i \times 6.430$	0.992 9
	8	7.546	6.289	$7.546+i \times 6.289$	0.994 9
	10	6.538	5.854	$6.538+i \times 5.854$	0.990 2
	12	7.390	6.105	$7.390+i \times 6.105$	0.997 6
意大利I型高 黏改性沥青	6	10.173	7.304	$10.173+i \times 7.304$	0.996 0
	8	8.236	6.006	$8.236+i \times 6.006$	0.987 5
	10	6.667	5.075	$6.667+i \times 5.075$	0.982 9
	12	5.397	4.192	$5.397+i \times 4.192$	0.983 1

由表5可得:①两种高黏改性沥青的存储模量指数和损失模量指数均随着高黏改性剂掺量的增加呈现降低的趋势,其中TPS高黏改性沥青的存储模量指数和损失模量指数在掺量达到10%时达到最低,之后略有回升,表明高黏改性剂的掺入可以改善基质沥青弹性和黏性对温度的敏感性,从而增强基质沥青抵抗高温变形的能力;②不同掺量高黏改性剂对沥青的存储模量指数和损失模量指数影响各不相同,以意大利I

型高黏改性沥青为例,从6%掺量开始,每增加2%掺量高黏改性剂, G' 分别降低了1.295、1.937、1.569及1.270, G'' 分别降低了0.532、1.298、0.931及0.883,表明高黏改性剂对沥青的弹性温度敏感性改善效果比黏性温度敏感性好。

表6为不同掺量高黏改性沥青的复现性 CNI 试验结果。

表 6 不同掺量高黏改性沥青的复现性 CNI 试验结果

沥青种类	掺量/%	$G'TS$	$G''TS$	CNI	R^2
TPS 高黏 改性沥青	0	11.357	7.707	$11.357+i \times 7.707$	0.993 7
	6	8.915	6.399	$8.915+i \times 6.399$	0.984 1
	8	7.512	6.255	$7.512+i \times 6.255$	0.991 0
	10	6.713	6.029	$6.713+i \times 6.029$	0.978 0
	12	7.686	6.400	$7.686+i \times 6.400$	0.990 2
意大利 I 型高 黏改性沥青	6	10.130	7.261	$10.130+i \times 7.261$	0.985 0
	8	8.188	5.958	$8.188+i \times 5.958$	0.996 3
	10	6.658	5.066	$6.658+i \times 5.066$	0.991 4
	12	5.381	4.177	$5.381+i \times 4.177$	0.989 7

对比表 5、6 可得:存储模量指数和损失模量指数的复现性结果与初始测试结果相差均约为 0.1,具有良好的复现性。在实际工程应用中,相比常规温度敏感性指标 PI 值,可以更好地对样品进行溯源,以保证试验的客观性和科学性。

联合分析表 3~6 可得:采用复数指数 CNI 评价高黏改性沥青的温度敏感性与复数模量指数 GTS 和黏温指数 VTS 表现出相似的变化规律,表明以上 3 个评价指标均存在一致性,在实际工程中,均可采用这 3 个评价指标对高黏改性沥青进行温度敏感性评价,但在这 3 个评价指标中,采用 CNI 评价高黏改性沥青的温度敏感性最好,不但温度敏感性评价准确、指标区分度较高、复现性好,而且可以同时表征沥青弹性和黏性两部分的温度敏感性,更精确地分析温度对高黏改性沥青黏弹特性的影响。

4 结论

为探讨不同评价指标对高黏改性沥青温度敏感性的适用性,以及研究不同掺量和种类高黏改性剂对基质沥青温度敏感性的影响,分别采用针入度指数 PI 、黏温指数 VTS 、复数模量指数 GTS 及复数指数 CNI 对两种不同掺量的高黏改性沥青进行温度敏感性评价。通过试验结果和分析可以得出以下结论:

(1) 两种高黏改性剂均可改善沥青的温度敏感性,并且改善效果随着改性剂掺量的增加而增强,其中 TPS 高黏改性剂掺量达到 10% 时,温度敏感性改善效果最佳。

(2) 由于高黏改性沥青相对于常规沥青的黏度较大,基于条件黏度下建立的针入度指数 PI ,可重复性较

差、细微的针入度值变化就会引起针入度指数 PI 出现较大偏差,不适用于高黏改性沥青的温度敏感性评价。

(3) 采用复数指数 CNI 、复数模量指数 GTS 及黏温指数 VTS 均可对高黏改性沥青的温度敏感性做出一致性评价,并且具有良好的复现性,但采用复数指数 CNI 可以分别评价高黏改性沥青弹性和黏性对温度的敏感性,指标区分度更加好。故综合考虑,推荐采用复数指数 CNI 评价高黏改性沥青的温度敏感性。

参考文献:

- [1] 张文刚,贾致荣,王芳. TiO_2 对高粘沥青及 PAC-13 性能影响试验研究[J]. 公路工程,2017(5).
- [2] 于保阳,高超,张荣华. 基于东北季冻区气候下高黏改性沥青性能研究[J]. 中外公路,2019(1).
- [3] 吕大春,曾梦澜,刘斌清,等. TPS 高黏改性沥青 Super-pave 使用性能研究[J]. 公路工程,2019(6).
- [4] 陈瑶,谭忆秋,陈克群. TPS 改性剂对高粘沥青性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012(6).
- [5] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [6] Zhang Henglong, Chen Zihao, Xu Guoqing, et al. Evaluation of Aging Behaviors of Asphalt Binders through Different Rheological Indices[J]. FUEL, 2018, 10.
- [7] 于新,孙文浩,罗怡琳,等. 橡胶沥青温度敏感性评价方法研究[J]. 建筑材料学报,2013(2).
- [8] 王岚,胡江三,陈刚,等. 不同改性沥青温度敏感性[J]. 功能材料,2015(4).
- [9] 陈华鑫,刚增军,王应龙,等. SBS 改性沥青温度敏感性指标研究[J]. 建筑材料学报,2010(5).
- [10] 陈俊,岳学军,黄晓明. 沥青温度敏感性指标评价与附加指标研究[J]. 公路交通科技,2007(6).
- [11] 程承,彭超,陶桂祥,等. 木质素改性沥青的温度敏感性分析[J]. 科学技术与工程,2019(15).