

文章编号:1671-8879(2008)02-0009-04

沥青胶结料高温性能试验方法的评价

周庆华^{1,2}, 贾 渝³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710021; 3. 江苏省交通科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘 要:介绍了两种评价沥青高温性能的方法:动态剪切流变试验(DSR)和重复蠕变试验。测试了 10 种沥青的车辙因子和蠕变参数。通过混合料高温车辙试验和沥青流变分析,比较了两种试验方法在评价沥青胶结料高温性能方面的适用范围和有效性。分析结果表明:车辙因子在评价基质沥青时具有较高的准确性,但不是评价改性沥青高温性能的最佳选择;而重复蠕变试验可以作为动态剪切试验的补充,能够较准确地判定基质沥青和改性沥青的抗车辙能力。

关键词:道路工程;沥青胶结料;高温性能;动态剪切试验;重复蠕变试验

中图分类号:U414.75

文献标志码:A

Evaluation on test methods for high temperature performance of asphalt binders

ZHOU Qing-hua^{1,2}, JIA Yu³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communications Technology, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 3. Jiangsu Province Research Institute of Transportation, Nanjing 210017, Jiangsu, China)

Abstract: The dynamic shear rheometer test and repeat creep test for evaluating the high temperature performance of asphalt binders were introduced. The rutting factors and creep parameters of ten asphalt binders were tested. Through theoretical analysis and experiment verification of asphalt rutting test, the applicability of the two methods in evaluating high temperature performance of asphalt binders was studied. The results show that the rutting factors have a high accuracy for evaluating the base asphalt, but they can not evaluate the high temperature performance properly. As the complement of dynamic shear rheometer test, the repeat creep test can accurately evaluate the rutting resistance ability of base asphalt and modified asphalt. 3 tabs, 10 figs, 9 refs.

Key words: road engineering; asphalt binders; high temperature performance; dynamic shear rheometer test; repeat creep test

0 引 言

美国公路战略研究计划(SHRP)于 1993 年提

出的以路用性能为依据的沥青规范是以流变学为基础,采用车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 对沥青胶结料的高温性能进行路用性能分级^[1]。随着聚合物改性沥青在

收稿日期:2007-04-15

作者简介:周庆华(1977-),女,河南新乡人,陕西交通职业技术学院讲师,长安大学博士研究生,E-mail:zghlsg@126.com

道路工程中的广泛应用,这套根据非改性沥青提出的规范是否适用于改性沥青,就成为工程人员讨论的热门话题^[2]。为了对改性沥青高温性能进行准确的评价,SHRP 计划的后续研究随即开展,即美国公路合作研究课题 NCHRP 9-10“改性沥青的 Superpave 体系”^[3-5]。在该项研究中,又提出了一种新的试验方法——重复蠕变试验。这两种试验方法在中国的推广时间并不长,尤其是重复蠕变试验,工程人员对这两种方法的特点还没有充分地认识。为此,本文通过混合料高温车辙试验验证和沥青流

变行为分析,比较了两种试验方法在评价沥青胶结料高温性能方面的适用范围和有效性^[6-7]。

1 两种方法的测试结果

本次试验共采用 4 种改性沥青产品,同时为了全面比较,还选用了 6 种基质沥青。

1.1 动态剪切流变试验

对原样沥青和旋转薄膜烘箱(RTFOT)老化后的沥青进行车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 的测试^[8],确定每种沥青胶结料的高温等级,测试结果如表 1 所示。

表 1 动态剪切流变试验测试结果

沥青名称		基质沥青 A	基质沥青 B	基质沥青 C	基质沥青 D	基质沥青 E	基质沥青 F	改性沥青 A	改性沥青 B	改性沥青 C	改性沥青 D
路用性能等级		PG64	PG64	PG64	PG70	PG64	PG64	PG70	PG76	PG76	PG76
不同温度(℃)下 原样沥青 $\frac{G^*}{\sin(\delta)}$ kPa	58	3.796	3.348	3.740	13.130	4.662	3.679	6.924	6.927	8.110	6.156
	64	1.693	1.408	1.629	5.689	2.631	1.682	3.953	3.950	4.622	3.589
	70	0.816	0.673	0.787	2.474	1.272	0.787	2.339	2.405	2.829	2.346
	76	0.406	0.337	0.387	1.120	0.745	0.386	1.514	1.623	1.813	1.367
	82							0.813	0.894	0.915	0.883
不同温度(℃)下 旋转薄膜 烘箱老化 $\frac{G^*}{\sin(\delta)}$ kPa	58	6.693	7.671	7.604	7.638	7.677	7.914	10.190	10.860	10.040	11.390
	64	3.483	3.677	3.105	4.766	3.402	2.551	5.714	5.920	5.069	6.598
	70	1.583	1.807	1.554	2.262	1.645	1.113	3.559	4.475	3.549	3.464
	76	0.724	0.735	0.647	1.034	0.827	0.782	1.991	2.620	2.614	2.638
	82							1.276	1.891	1.463	1.512

1.2 重复蠕变试验

重复蠕变试验在 DSR 仪器上完成,采用应力控制的模式。本试验采用的应力水平为 60 kPa,试验温度为 60 ℃。每个蠕变周期加载 1 s,恢复 9 s,荷载周期为 100 次。

在流变学模型理论中,描述沥青材料蠕变特性一般是通过弹性元件(弹簧)、粘性元件(粘壶)和塑性元件(滑块)的并串联组合来实现的。本文选择伯格模型作为沥青混合料的流变模型。伯格模型的本构方程为

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{G_0} + \frac{t}{\eta_0} + \frac{1}{G_1} (1 - e^{-\frac{G_1}{\eta_1} t}) \right] \quad (1)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为沥青样品的累积应变; σ_0 为沥青所受的应力; G_0 、 η_0 分别为 Maxwell 模型的弹簧系数和阻尼系数; G_1 、 η_1 分别为 Kelvin 模型的弹簧系数和阻尼系数; t 为时间。

式(1)反映出沥青的蠕变柔量 $J(t)$ 主要由 3 部分组成,包括弹性成分 $J_e(t)$ 、延迟弹性成分 $J_{de}(t)$

和粘性成分 $J_v(t)$,可写为

$$J(t) = J_e(t) + J_{de}(t) + J_v(t) \quad (2)$$

由于柔量的单位是 1/Pa,为了与 SHRP 沥青规范中指标一致,NCHRP 9-10 报告中采用了粘性柔度的倒数 G_v 作为评价高温性能的参数,将 G_v 称为蠕变劲度的粘性成分。本文采用重复蠕变试验中的两项指标:累积应变和 G_v ,对试验数据采用专业的回归分析软件进行分析,得到伯格方程中的 4 个参数,并进一步推导出 G_v 。为了准确地反映沥青的路用性能,试验原料采用的是经过旋转薄膜烘箱老化后(RTFOT)的残留沥青,重复蠕变累积应变和 G_v 指标见表 2。

2 相关性分析

本研究采用温度 60 ℃车辙试验作为室内评价沥青混合料高温性能的依据,试验中采用统一的集料和级配类型,在同样的试验条件下对制成的试件进行车辙试验,试验结果见表 3。

表 2 RTFOT 后残留沥青的重复蠕变试验结果

参数	基质沥青 A	基质沥青 B	基质沥青 C	基质沥青 D	基质沥青 E	基质沥青 F	改性沥青 A	改性沥青 B	改性沥青 C	改性沥青 D
G_v/Pa	565.2	425.5	1 463.0	2 604.0	800.1	315.6	2 911.0	3 383.8	4 137.0	2 325.8
累积应变/ 10^{-6}	10.14	7.86	3.98	2.38	6.96	16.28	0.49	0.41	0.19	0.80

表 3 沥青混合料的车辙试验结果

指 标	沥青名称									
	基质 沥青 A	基质 沥青 B	基质 沥青 C	基质 沥青 D	基质 沥青 E	基质 沥青 F	改性 沥青 A	改性 沥青 B	改性 沥青 C	改性 沥青 D
45 min 变形/mm	3.877	2.683	3.647	2.220	2.860	3.620	0.927	1.020	0.917	1.625
60 min 变形/mm	4.730	3.147	4.153	3.035	3.363	4.360	1.023	1.137	1.060	1.860
动稳定度/(次·mm ⁻¹)	753	1 376	1 255	1 425	1 303	851	6 634	5 409	3 938	2 742

动态剪切流变试验的 $G^*/\sin(\delta)$ 测试结果 (64 °C) 与混合料高温车辙试验的相关性分析见图 1、图 2。可以看出,经过短期老化后基质沥青的车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 与混合料车辙动稳定度指标有较好的关联性,而改性沥青老化后车辙因子与混合料动稳定度之间已不存在相关性,混合料的动稳定度随着车辙因子的增加而降低,显然是不合理的。

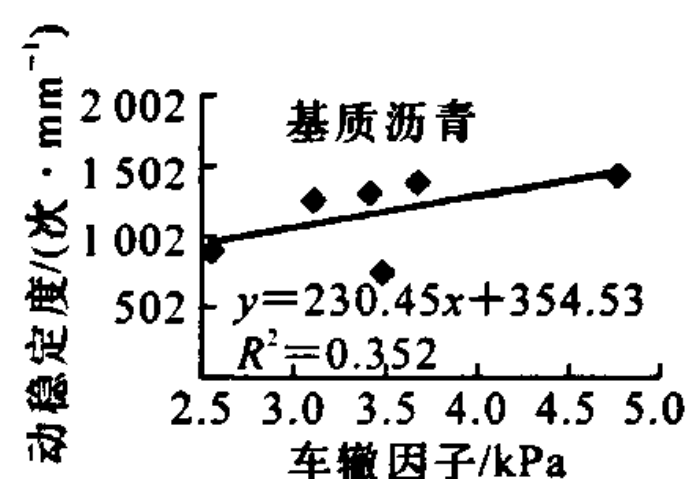


图 1 基质沥青车辙因子与动稳定度的相关性

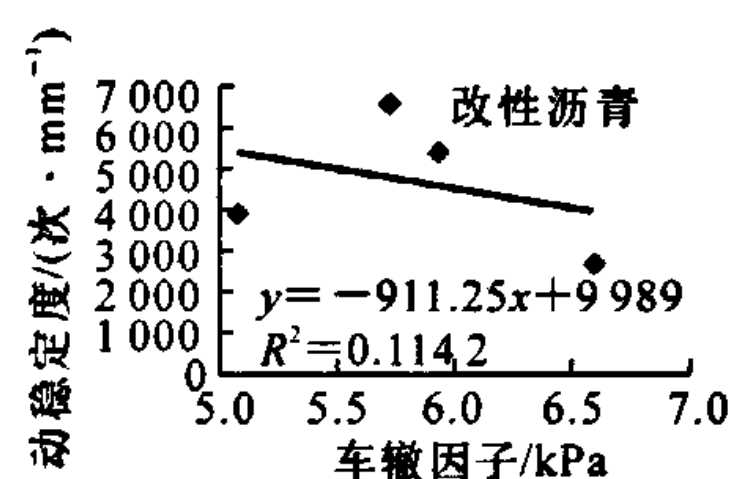


图 2 改性沥青车辙因子与动稳定度的相关性

分析重复蠕变试验与高温车辙试验的相关性,经过数据回归分析,结果见图 3、图 4。可以发现,沥青累积应变和蠕变劲度的粘性成分 G_v 两个参数与混合料车辙试验结果有良好的相关性。同时将基质沥青与改性沥青分别进行分析,可以发现仍然具有较好的回归关系,结果见图 5~图 8。

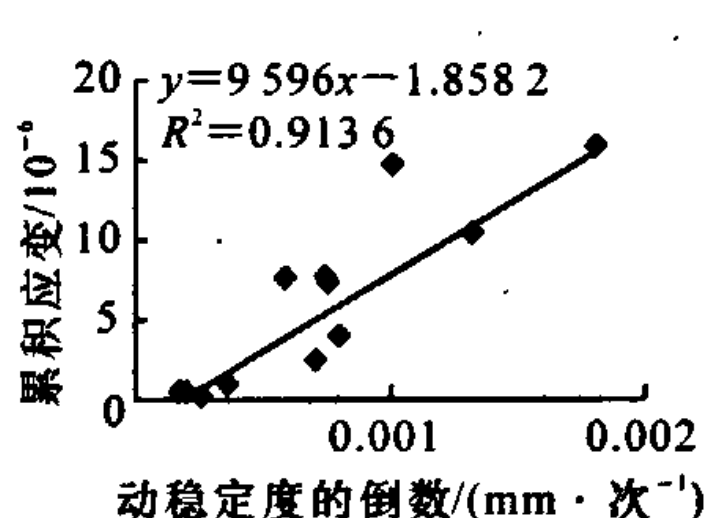
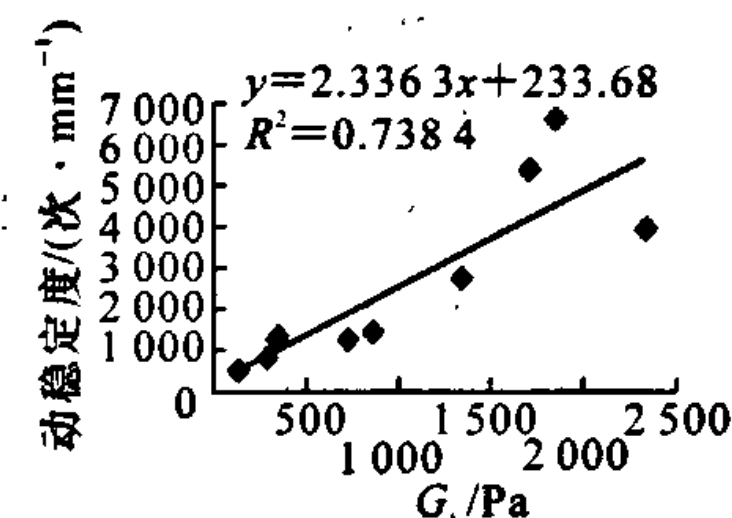
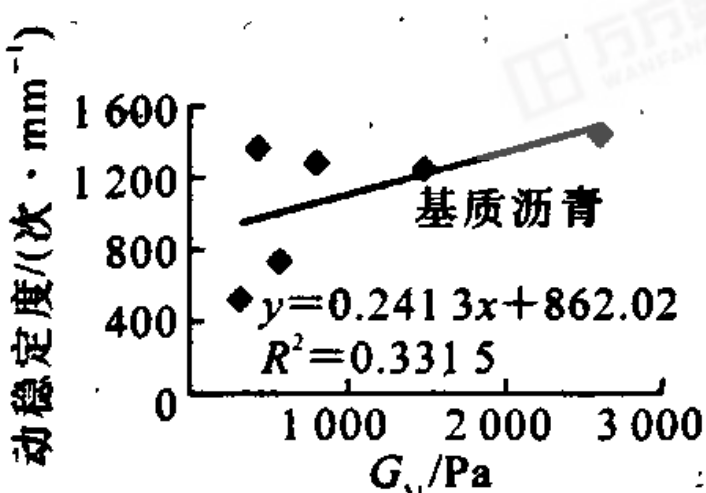
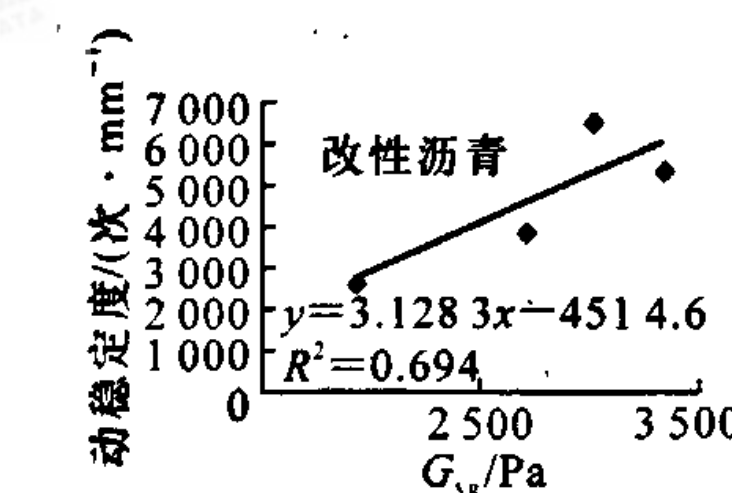


图 3 沥青累积应变与混合料动稳定度的关系

图 4 沥青劲度模量的粘性成分 G_v 与混合料动稳定度的关系图 5 基质沥青劲度模量的粘性成分 G_v 与混合料动稳定度的关系图 6 改性沥青劲度模量的粘性成分 G_v 与混合料动稳定度的关系

3 两种方法适用性的理论分析

3.1 两种试验的加载方式存在较大差异

动态剪切流变试验采用的是控制应力或控制应

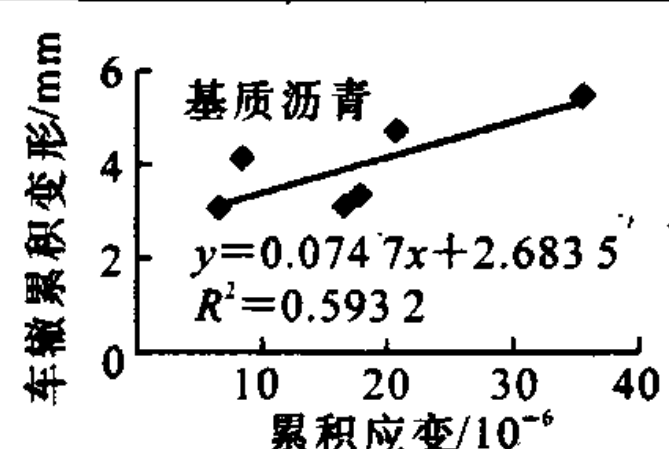


图 7 基质沥青蠕变累积应变与混合料车辙累积变形的关系

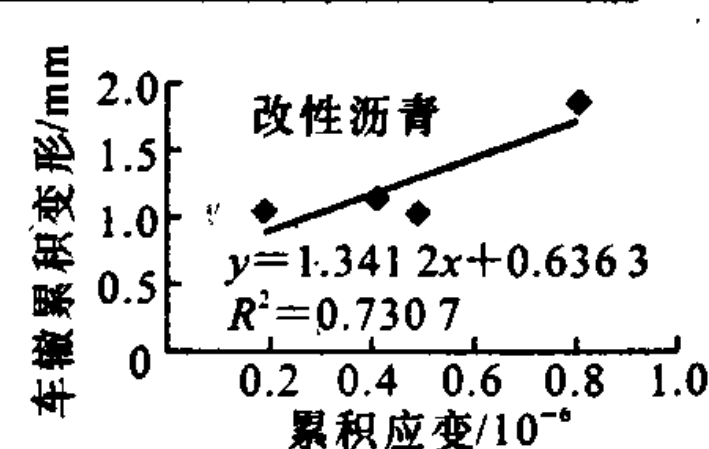
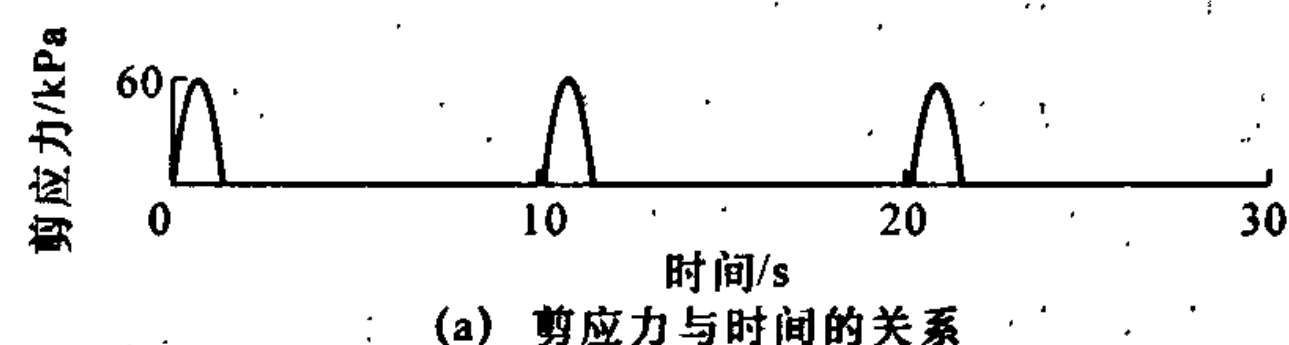
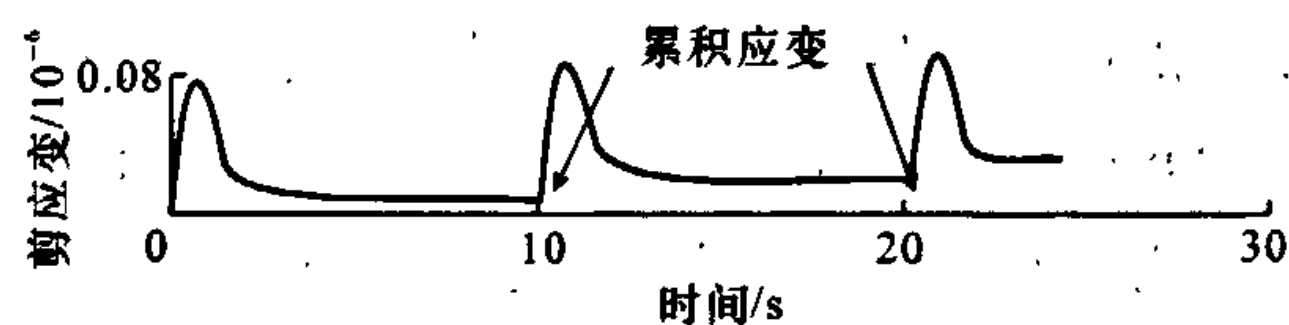


图 8 改性沥青蠕变累积应变与混合料车辙累积变形的关系

变的连续加载模式。试验假定在线粘弹性范围内,应力和应变呈现周期性的、可逆的变化规律。但事实上,沥青路面车辙的产生主要来自于车辆荷载不可逆的间断加载,两种不同的加载方式必然会造成沥青流变行为上较大的差异。重复蠕变试验采用蠕变-恢复的加载模式,如图 9 所示,使得沥青的变形在荷载不断的累积作用下逐渐增加,从加载和变形模式上较好地模拟了现场的实际情况。



(a) 剪应力与时间的关系



(b) 剪应变与时间的关系

图 9 重复蠕变试验的加载模式

3.2 描述沥青粘弹性流变行为的程度不同

沥青作为粘弹性材料,在受到外力作用后,其变形表现为弹性、延迟弹性和粘性变形,前两者在外力卸去后会立即或逐渐完全恢复,而后者因不能恢复而成为永久变形。对于基质沥青,其延迟弹性变形的能力往往很微弱,其变形主要表现为弹性和粘性变形;而改性沥青由于改性剂的添加会显著地提高沥青的弹性和延迟弹性变形能力^[9]。在动态剪切试验中 G^* 相当于沥青的劲度模量, δ 为弹性和粘性系数相对指标,用 $G^*/\sin(\delta)$ 作为控制车辙的指标,只是将沥青弹性和粘性部分分开。因此,在评价改性沥青高温性能时,车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 忽略了在外力卸去后延迟弹性使得一部分变形逐渐恢复的特性,从而出现基质沥青和改性沥青高温 PG 等级相同,但路用性能差别很大的现象。采用重复蠕变试

验,可以很好地弥补动态剪切流度试验的不足。图 10 中是两种同为 PG70 的沥青胶结料,在重复蠕变试验中 1 个周期内的变形情况,两者的差异可以很明显地表现出来。在 1 s 的加载时间内两种沥青出现了变形,但在随即的卸载时间内,基质沥青只有小部分变形恢复,而改性沥青变形恢复的程度是非常显著,1 个周期结束后只残留了很小的变形。

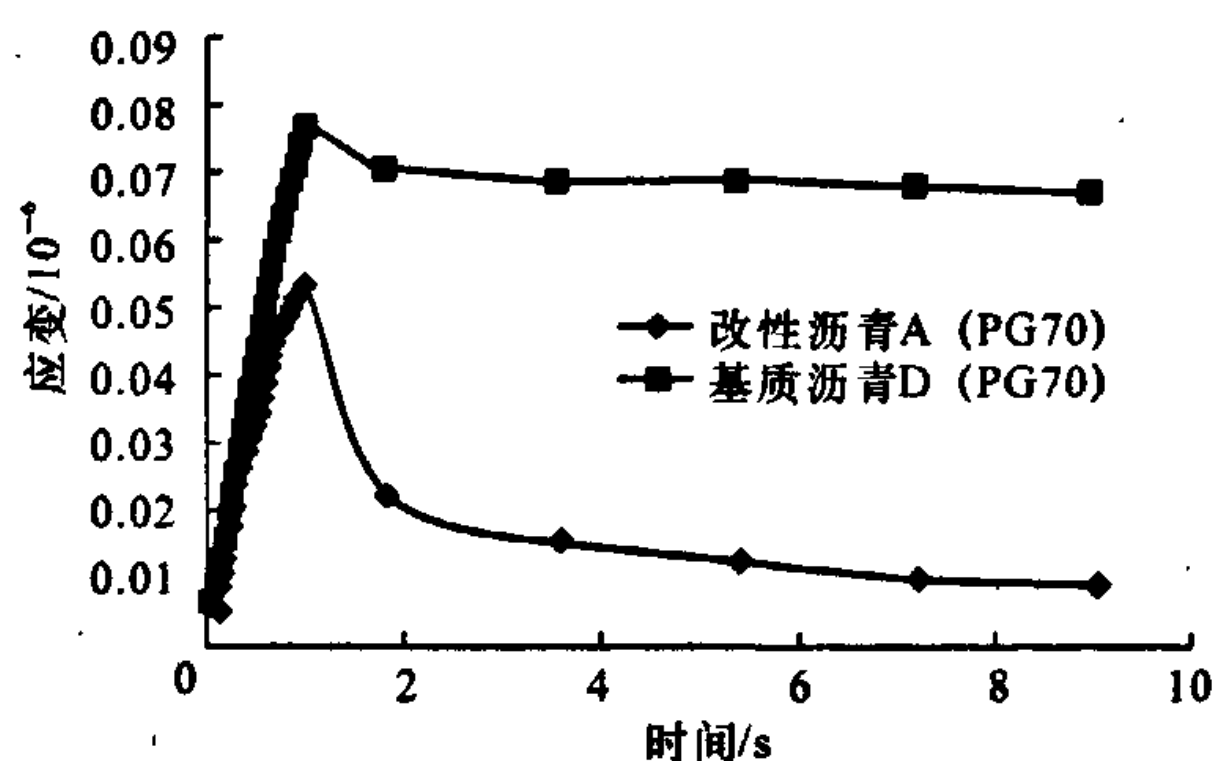


图 10 两种沥青重复蠕变试验 1 个周期的变形趋势

4 结 语

(1)通过试验对比和理论分析,发现车辙因子 $G^*/\sin(\delta)$ 在评价基质沥青高温性能方面具有相当的准确性,其高温等级的划分结果具有较高的可信度。但是在评价改性沥青时车辙因子存在一定的缺陷,无法对改性沥青的高温性能作出准确的评价。

(2)重复蠕变试验弥补了动态剪切流变试验的不足,用重复蠕变试验的累积应变和蠕变劲度的粘性成分指标能够较准确地评价改性沥青的抗车辙能力,与 DSR 试验相比具有较高的可信度。而且只需加载专业的软件,重复蠕变试验便可以在动态剪切流变仪上完成,具有良好的推广研究前景。

(3)由于试验条件的限制,本次研究只能在实验室进行混合料的相关试验,后续研究还需要做大量的验证。

参考文献:

References:

- [1] 贾 渝,王 捷. Superpave 沥青胶结料性能等级 (PG) 选择[J]. 石油沥青,2003,17(增刊):5-7.
JIA Yu, WANG Jie. Selecting performance grade of Superpave asphalt binder [J]. Petroleum Asphalt, 2003,17(S):5-7.
- [2] 袁迎捷,张争奇,胡长顺. Superpave 沥青规范对改性沥青的适用性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,

24(1):9-11.

YUAN Ying-jie, ZHANG Zheng-qi, HU Chang-shun.

Applicability of Superpave specification to modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1): 9-11.

- [3] 董瑞琨,孙立军. 考虑老化的沥青结合料低温感温性指标[J]. 中国公路学报,2006,19(4):34-39.

DONG Rui-kun, SUN Li-jun. Low temperature susceptibility indexes of asphalt binder with different aging degree [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 34-39.

- [4] 陈佩茹,李立寒,刘焰宇. 沥青高温性能指标评价[J]. 石油沥青,2002,16(3):27-30.

CHEN Pei-ru, LI Li-han, LIU Zhao-yu. Evaluation of high temperature performance parameters of modified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2002, 16(3): 27-30.

- [5] 刘 丽,郝培文,肖庆一,等. 沥青胶浆高温性能及评价方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(5):30-34.

LIU Li, HAO Pei-wen, XIAO Qing-yi, et al. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 30-34.

- [6] 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.

- [7] 袁健安,周吉萍,李玉珍. SBS 与沥青的相互作用性分析[J]. 中国公路学报,2005,18(4):21-26.

YUAN Jian-an, ZHOU Ji-ping, LI Yu-zhen. Analysis of interaction between SBS and asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 21-26.

- [8] 王 鹏,曾凡奇,黄晓明. 沥青高温性能指标的灰色关联度分析[J]. 交通运输工程学报,2006,6(3):32-36.

WANG Peng, ZENG Fan-qi, HUANG Xiao-ming. Grey relation degree analysis of high-temperature performance indexes of asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 32-36.

- [9] Bahia H U. Characterization of modified asphalt binder in Superpave mix design [R]. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2001.