

Sasobit 温拌橡胶沥青及混合料高温蠕变特性

何 亮^{1,2,3}, 凌天清¹, 马 育¹, 何兆益¹, 马 涛⁴, 黄晓明⁴

(1. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室, 重庆 400074; 2. 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; 3. 诺丁汉大学 诺丁汉交通工程研究中心, 英国 诺丁汉 NG7 2RD; 4. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘 要:为了研究 Sasobit 温拌橡胶沥青及混合料的高温蠕变特性,制备了 Sasobit 温拌剂掺量为 3% 的温拌橡胶沥青,确定了 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料的成型温度与基本路用性能;通过结合料与混合料蠕变试验全面评价了 Sasobit 温拌橡胶沥青路面的高温性能,并进行了混合料 Burgers 模型参数拟合分析。研究表明:Sasobit 橡胶沥青结合料高温蠕变性能优于 SBS 改性沥青,Sasobit 进一步提高了橡胶沥青高温性能;SBS 改性沥青混合料的高温性能优于 2 种橡胶沥青混合料;3% 的 Sasobit 掺量不仅能有效降低橡胶沥青混合料的施工温度 20 ℃,而且能较大提升其高温性能,却不过分降低其低温性能;随着温度的升高或围压的出现,Sasobit 能够更好地提升橡胶沥青混合料的高温性能,使其更加接近 SBS 改性沥青混合料。

关键词:道路工程;温拌橡胶沥青;蠕变特性;高温性能;Sasobit

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

High-temperature creep properties of asphalt-rubber and mixture with Sasobit warm mix additives

HE Liang^{1,2,3}, LING Tian-qing¹, MA Yu¹, HE Zhao-yi¹, MA Tao⁴, HUANG Xiao-ming⁴

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Traffic and Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory for Special Region Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Nottingham Transportation Engineering Centre, The University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK; 4. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study high-temperature creep properties of asphalt-rubber and mixture with Sasobit warm mix additives, warm mix asphalt-rubber with 3% Sasobit dosage was produced, molding temperature and basic road performance of Sasobit warm mix asphalt-rubber mixture were determined. High-temperature properties of Sasobit warm mix asphalt-rubber pavement were evaluated comprehensively through binder and mixture creep tests, and fitting analysis of mixture Burgers model parameters was done. The result shows that the high-temperature creep performance of asphalt-rubber binder is better than that of SBS modified asphalt, and Sasobit improves the high-temperature performance of asphalt-rubber further. High temperature performance of SBS modified asphalt mixture is better than that of Sasobit warm mix asphalt-

rubber mixture and asphalt-rubber mixture. 3% Sasobit dosage can not only effectively reduce the construction temperature of asphalt-rubber mixture by 20 ℃, but also improve the high-temperature performance but not reduce the low temperature performance too much. With the temperature increase and confining pressure emergence, Sasobit can better promote high-temperature performance of asphalt-rubber mixture, making it close to that of SBS modified asphalt mixture. 5 tabs, 6 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; warm mix asphalt-rubber; creep property; high-temperature performance; Sasobit

0 引 言

废轮胎橡胶沥青路面以其良好的耐温变性能、抗疲劳和抗滑性能,降低路面噪音和筑路成本,以及废物循环利用的优势受到筑路界的高度关注。但是橡胶沥青的高粘度、高施工温度等特点仍然对施工造成很大的限制,不仅要消耗大量的能源,而且在生产和施工的过程中还会排放出大量的废气和粉尘,严重影响周围的环境质量和施工人员的身体健康。另外,过高的拌和碾压温度在现场条件下并不好控制,这将可能带来沥青与矿料不易充分裹覆,压实度不足孔隙率偏大等问题,同样制约着橡胶沥青路面修筑技术的发展^[1-5]。将沥青温拌技术应用到橡胶沥青混合料中,降低混合料的拌和与碾压温度,并同时保持橡胶沥青混合料优良的路用性能,将会大大推广橡胶沥青路面在中国的应用,并形成环境保护、废物利用和延长道路寿命的三赢局面。

温拌橡胶沥青混合料是一种新兴的技术,目前国内外一些研究者率先开展了试验性的初步探索,但相关的理论、试验及应用技术尚不完善^[6-11]。温拌剂一般会对沥青路用性能产生一定的影响,特别是国际上广泛使用的 Sasobit 降粘温拌剂会对沥青的高温稳定性与低温抗裂性产生重要影响,这直接影响该技术在橡胶沥青路面的推广使用。另外,在中国大部分地区,沥青路面的高温稳定性是目前道路建设者最关心的问题,因此有必要首先对温拌橡胶沥青及混合料的高温性能进行深入研究。为此,本文采用国际上使用最广泛的 Sasobit 降粘温拌剂制作温拌橡胶沥青,确定了 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料的成型温度与基本路用性能;通过结合料与混合料蠕变试验全面评价了 Sasobit 温拌橡胶沥青路面的高温性能,并与橡胶沥青、SBS 改性沥青及混合料做对比;最后通过 Burgers 模型参数拟合分析

了 3 种改性沥青混合料的高温粘弹特性,为推广温拌橡胶沥青路面技术提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验材料

基质沥青:70 号 A 级道路石油沥青。改性沥青:SBS 改性沥青。废旧橡胶粉:常温研磨法生产废轮胎胶粉,40 目。温拌剂:Sasobit。集料:玄武岩集料。

1.2 Sasobit 温拌橡胶沥青制备与主要技术指标

橡胶沥青(AR)制备采用湿法工艺,将基质沥青加热到 180 ℃~185 ℃,加入 20%的橡胶粉(内掺),采用高速剪切机进行搅拌,速度为 1 000 r/min,反应时间为 60 min,制得原样橡胶沥青。Sasobit 温拌橡胶沥青(SAR)制备采用机械搅拌,在制得的原样橡胶沥青中加入已确定的 3%(质量分数)Sasobit 温拌剂,搅拌 5 min 至均匀。Sasobit 温拌橡胶沥青与原样橡胶沥青基本技术指标测试结果见表 1。

表 1 温拌橡胶沥青测试结果
Tab. 1 Test results of warm mix asphalt rubber

测试项目	AR	SAR	AR 技术指标
针入度(25 ℃)/0.1 mm	40.3	30.2	30~70
软化点/℃	76	89	>65
弹性恢复(25 ℃)/%	84	78	>60
粘度(180 ℃)/(Pa·s)	2.7	1.4	2.5~5.0
延度(5 ℃)/mm	78	43	>50

从表 1 中可知,原样橡胶沥青各指标符合交通部公路所《橡胶沥青及混合料设计施工技术指南》中橡胶沥青的技术要求;温拌橡胶沥青 180 ℃粘度、5 ℃延度接近原样橡胶沥青的 1/2,其余各指标均符合 AR 技术要求,其中针入度降低了 1.01 mm,软化点大大增加为 89 ℃,弹性恢复减少了 6%。

1.3 蠕变试验混合料试件制作

试验采用的 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料、原样橡胶沥青混合料分别由制备好的 Sasobit 温拌橡

胶沥青、原样橡胶沥青与符合《橡胶沥青及混合料设计施工技术指南》中 ARHM13 要求的玄武岩集料拌和而成,确定的 ARHM13 集料设计级配见下页表 2。

表 2 ARHM13 设计级配
Tab. 2 Designed gradation of ARHM13

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
设计级配	100	94.8	68.4	27.4	21	16.5	13.1	9.6	8.3	6.7
级配上限	100	100	71	35	28	23	19	15	12	10
级配下限	100	95	62	25	20	15	12	10	8	6

试件成型采用 PINE 旋转压实仪(SGC)旋转压实 100 次成型直径为 150 mm 的混合料圆柱体试件,控制空隙率为 4%。待混合料冷却后将其钻芯、切割成直径 100 mm,高 150 mm 的圆柱体试件。为了进行对比,又以相同的集料、级配与方法成型了 SBS 改性沥青混合料试件,空隙率仍为 4%。

1.4 试验方案

(1)Sasobit 温拌橡胶沥青结合料高温蠕变试验
首先通过不同高温条件下 Sasobit 温拌橡胶沥青与原样橡胶沥青的结合料蠕变试验研究了 Sasobit 在橡胶沥青剪切蠕变特性中的影响,并同时与 SBS 改性沥青进行对比。

(2)Sasobit 温拌橡胶沥青混合料成型温度与基本路用性能试验

首先确定橡胶沥青混合料最佳油石比,在该油石比下变换不同温度成型 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料,通过控制成型试件的孔隙率确定其合适的成型温度。然后进行车辙、冻融劈裂、低温小梁弯曲等混合料基本路用性能试验,并同时与 SBS 改性沥青混合料进行对比。

(3)Sasobit 温拌橡胶沥青混合料高温蠕变试验
通过混合料高温蠕变试验研究了温度、时间与围压等因素对 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料、原样橡胶沥青混合料与 SBS 改性沥青混合料蠕变特性的影响,并采用通用 Burgers 粘弹性模型分析了 3 种改性沥青混合料的模型参数,得出了 Sasobit 温拌剂对橡胶沥青混合料高温粘弹性指标的影响规律。

2 试验结果分析

2.1 Sasobit 温拌橡胶沥青结合料蠕变特性研究

将 Sasobit 温拌橡胶沥青(SAR)、原样橡胶沥青(AR)与 SBS 改性沥青(SBS)分别进行 60℃、40℃剪切蠕变试验。试验用仪器为 BOHLIN 动态剪切流变试验机 II 型(DSR),试验机上有 2 块直径为 25 mm 的平行板,板间距设置为 1 mm,剪切蠕变试验加载应力为 10 Pa,加载时间为 300 s,由此得出蠕变柔量与时间的函数关系如图 1(a)、(b)所示。

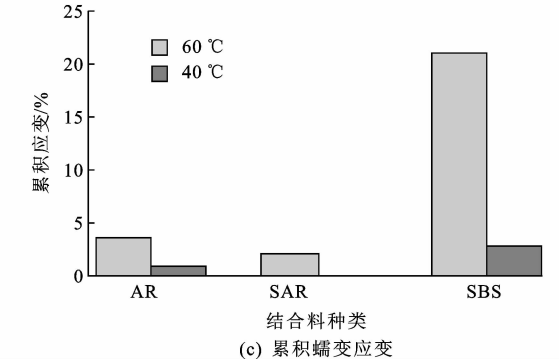
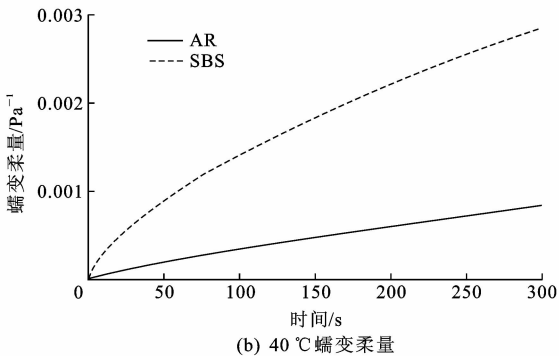
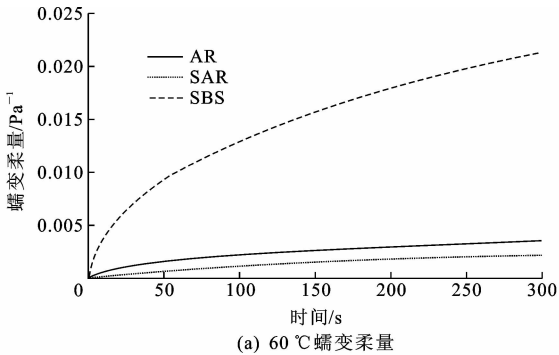


图 1 温拌橡胶沥青结合料剪切蠕变特性
Fig. 1 Shear creep property of warm mix asphalt-rubber

由于 Sasobit 温拌橡胶沥青在 40℃时过硬,测试平行板无法有效接触加载,所以无法得出其 40℃蠕变试验结果。从图 1(a)中可以看出,随着时间的增长 3 种改性沥青的蠕变柔量逐渐增加,SBS 改性沥青的增加速率远远高于 Sasobit 温拌橡胶沥青与原样橡胶沥青,原样橡胶沥青的增加速率又高于温拌橡胶沥青;图 1(b)中由于温度降低 20℃各种改性沥青的蠕变柔量均大大降低,增长趋势与图 1(a)基本

相同,温拌橡胶沥青由于在该温度下过硬而无法进行试验,这正反映了温拌橡胶沥青优良的高温性能。

通过换算成累积蠕变应变如图 1(c)所示,发现 60 ℃时原样橡胶沥青的累积应变约为 SBS 改性沥青的 1/6,Sasobit 温拌橡胶沥青的累积应变接近原样橡胶沥青的 1/2,说明橡胶沥青本身具有很好的高温稳定性,Sasobit 温拌剂进一步提高了橡胶沥青高温性能优势;40 ℃时原样橡胶沥青的累积应变在 SBS 改性沥青的 1/3~1/4,说明随着温度的升高橡胶沥青的高温稳定性将进一步优于 SBS 改性沥青。

2.2 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料成型与基本路用性能研究

2.2.1 温拌橡胶沥青混合料成型温度的确定

与热拌橡胶沥青混合料相比,温拌橡胶沥青混

合料只是在混合料拌和过程中增加了温拌剂,因此在集料、混合料的级配一样的前提下,温拌橡胶沥青混合料的油石比选定直接采用与相应热拌橡胶沥青混合料一致的油石比,必要时进行微调^[12]。

首先,采用确定的 ARHM13 设计级配进行原样橡胶沥青混合料旋转压实试验确定最佳油石比,混合料成型温度为 180 ℃,以空隙率 4.0%为控制指标,得到最佳油石比为 6.5%,相关体积指标见表 3。

然后,采用原样橡胶沥青混合料的最佳油石比 6.5%与矿料级配,变化不同的出料温度 180 ℃、170 ℃、160 ℃、150 ℃、140 ℃成型 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料试件,分别测试各个出料温度下混合料的空隙率,结果见表 4。

表 3 ARHM13 混合料旋转压实设计结果

Tab. 3 Design results of ARHM13 mixture by gyratory compaction

体积指标	油石比/%	毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	最大理论密度/(g·cm ⁻³)	VV/%	VMA/%	VFA/%
ARHM13	6.5	2.423	2.519	4.0	18.0	77.7
技术指标				3~5	≥14	70~85

表 4 不同成型温度下温拌橡胶沥青混合料的空隙率

Tab. 4 VV of warm mix asphalt-rubber mixture at different temperatures

成型温度/℃	180	170	160	150	140
VV/%	3.9	3.9	4.0	4.2	4.5

按照原样橡胶沥青混合料空隙率 4.0%作为设计指标,在此选取 160 ℃作为温拌橡胶沥青混合料的成型温度,此时空隙率也为 4.0%。该成型温度比相应的热拌橡胶沥青混合料降低了 20 ℃。

2.2.2 温拌橡胶沥青混合料基本路用性能

按照确定的出料温度成型 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料与原样橡胶沥青混合料,并进行相关路用性能测试,并同时与 SBS 改性沥青混合料对比,结果如下页图 2 所示。

从图 2 中可以看出,3 种改性沥青混合料都具有优良的高温稳定性,其中 SBS 改性沥青混合料最优,橡胶沥青混合料明显不如 SBS 改性沥青混合料,3%掺量的 Sasobit 温拌剂大大提升了橡胶沥青混合料的高温性能,使其接近 SBS 改性沥青混合料。该结果与结合料蠕变试验结果相反,且沥青路面的高温抗车辙能力 70%的贡献率来自矿料级配的嵌挤作用,只有 30%来源于沥青结合料,温拌橡胶沥青与原样橡胶沥青混合料中均不添加纤维,因此需要通过混合料蠕变试验来进一步分析 3 种改性沥青路面在高温下的力学特性。

3 种改性沥青混合料的冻融劈裂强度比十分接近,且都具有合格的水稳定性。橡胶沥青混合料与 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料的低温性能大大优于 SBS 改性沥青混合料,3%掺量的 Sasobit 温拌剂降低了橡胶沥青混合料的低温性能,但其混合料性能仍明显优于 SBS 改性沥青混合料。

2.3 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料蠕变特性研究

2.3.1 温拌橡胶沥青混合料蠕变试验分析

采用 IPC 沥青混合料基本性能测试仪(SPT)在规定的不同高温温度和有无围压条件下对 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料、原样橡胶沥青混合料、SBS 改性沥青混合料进行单轴静载压缩蠕变试验。综合《壳牌沥青手册》与《沥青及沥青混合料路用性能》推荐的方法,试验采用应力加载控制模式,应力水平为 0.1 MPa,蠕变时间为 60 min,试验温度分别为 40 ℃、60 ℃,围压为分别为 0、20 kPa。

(1)温度对混合料蠕变特性的影响

温度是沥青混合料粘弹性能的重要影响因素,下页图 3 是在 40 ℃、60 ℃无围压条件下单轴静载压缩蠕变试验的蠕变变形曲线。

从图 3 中可以看出:

40 ℃时,在无围压条件下,SBS 改性沥青混合料的蠕变应变最小,而 Sasobit 温拌橡胶沥青与橡胶沥青混合料蠕变应变均较大,Sasobit 对橡胶沥青混合料高温性能提升有限。

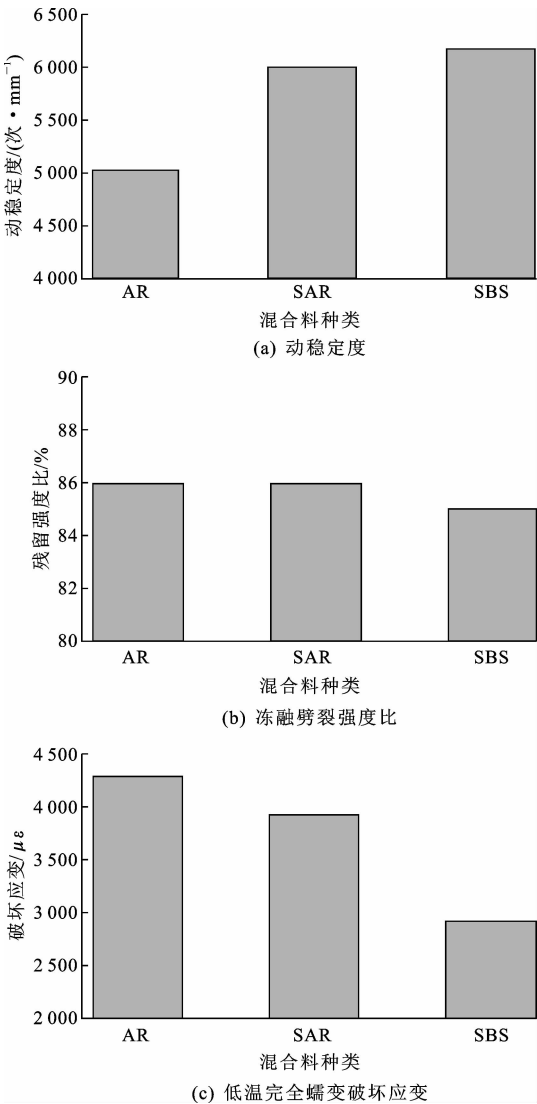


图 2 温拌橡胶沥青混合料基本路用性能

Fig. 2 Basic road performance of warm mix asphalt-rubber mixture

60 ℃时,各种改性沥青混合料的蠕变应变均大大增加,其中橡胶沥青混合料已经破坏,Sasobit 温拌橡胶沥青开始进入破坏期,SBS 改性沥青混合料仍然在变形稳定发展阶段。

NCHRP 9-19 项目中,流变时间(flowtime) F_t 与混合料的高温性能相关性最好, F_t 越大,混合料劲度越大,高温性能越好^[13]。60 ℃时 3 种改性沥青混合料的 F_t 如图 4 所示, F_t 大小依次是 SBS、SAR、AR,其中 SAR 的 F_t 大大高于 AR,进一步证明了该温度下的高温性能优劣程度依次为:SBS 改性沥青混合料、Sasobit 温拌橡胶沥青混合料、橡胶沥青混合料,随着温度升高 Sasobit 对橡胶沥青混合料高温性能的提升效果增强。

(2) 围压对混合料蠕变特性的影响

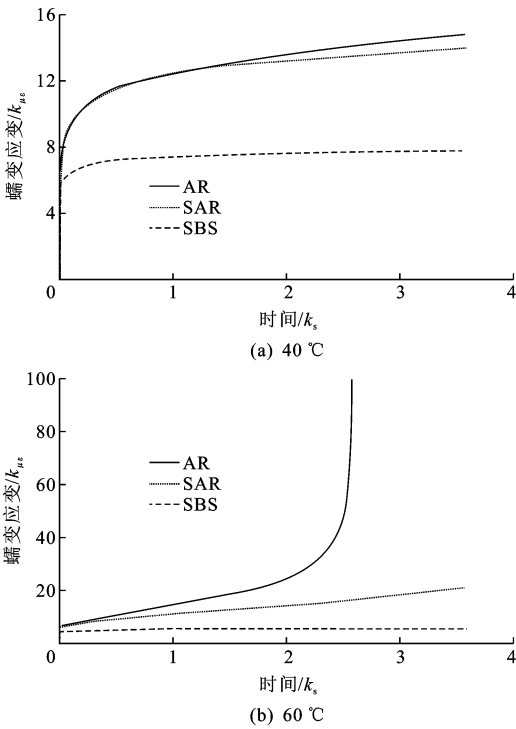


图 3 不同温度下单轴静载压缩蠕变

Fig. 3 Uniaxial static load compression creep at different temperatures

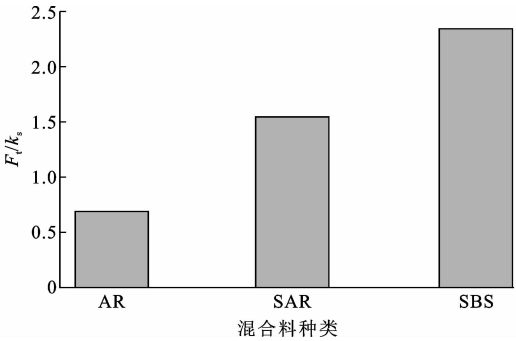


图 4 60 ℃试件的流变时间

Fig. 4 Flow time of specimen at 60 ℃

Kaliush 研究认为,有侧限的重复荷载永久变形试验是模拟实际路面比较好的试验方法^[14],因此增加了围压为 20 kPa 的混合料蠕变试验。由于本试验是为了得到 Burgers 模型参数,不希望试件发展到破坏阶段,所以温度始终保持 40 ℃,结果如下页图 5 所示。

比较图 3(a)与图 5(a)中可以发现,随着围压的出现混合料的蠕变变形变小,这符合沥青路面实际受力状态;橡胶沥青混合料的最终蠕变变形始终约为 SBS 改性沥青混合料的 2 倍,围压对其抗变形能力几乎没有影响;但 Sasobit 温拌橡胶沥青混合料在有围压条件下的蠕变变形大幅减小至接近 SBS 改性沥青混合料,试验终了时蠕变柔量见下页图

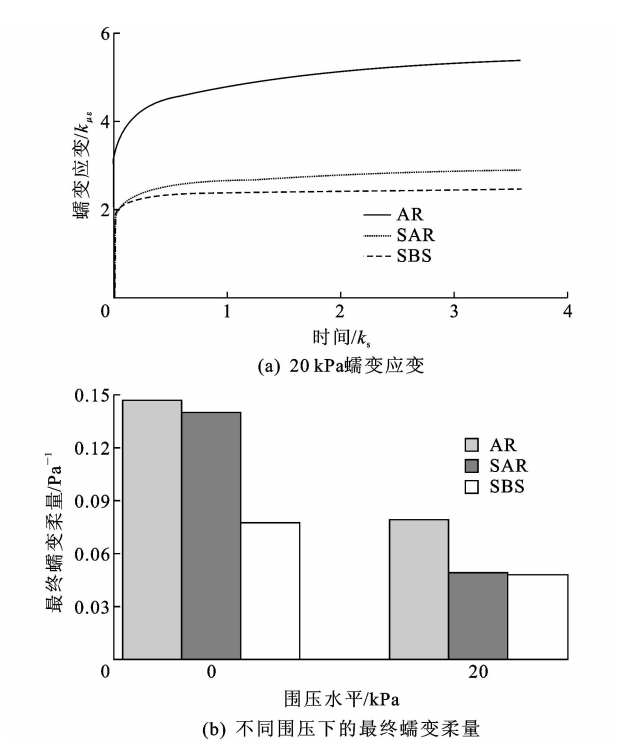


图 5 有侧限静态蠕变试验
Fig. 5 Static load compression creep test with lateral restriction

5(b),说明其在实际路面中会具有更好的高温性能,Sasobit 温拌剂的添加十分必要。

综合以上试验结果分析发现,温拌橡胶沥青、橡胶沥青的结合料蠕变性能优于 SBS 改性沥青,但其混合料的蠕变性能却不如 SBS 改性沥青。分析这 2 种结果认为:在橡胶沥青与温拌橡胶沥青中始终存在橡胶颗粒核心的固形物且在溶胀反应过程中体积会膨胀^[1-5],SBS 改性沥青中却没有,而动态剪切流变仪的平行板试验间距设置为 1 mm,橡胶颗粒核心很可能会严重影响试验结果,因此前两者的结合料剪切蠕变试验结果较高;而在混合料试验中,混合料含有矿粉和集料,避免了 SBS 改性沥青结合料试验中没有固形物的试验影响,且 SBS 改性沥青混合料里面添加了纤维,而温拌橡胶沥青与橡胶沥青混

合料中没有,因此 SBS 改性沥青混合料蠕变特性优于温拌橡胶沥青与橡胶沥青混合料。

2.3.2 温拌橡胶沥青混合料 Burgers 模型参数分析

Burgers 模型可以同时反映瞬时弹性变形、蠕变、蠕变恢复和应力松弛等力学行为,还相对其他模型能够更完整地描述沥青混合料粘弹性能,但并不能反映沥青混合料稳定期和破坏期的变形特性^[15],所以只能采用 40 ℃ 蠕变变形数据。

Burgers 模型是由 Maxwell 元件与 Kelvin 元件串联组成,其本构方程为

$$\sigma + \frac{(\eta_1 + \eta_2)E_1 + \eta_1 E_2}{E_1 E_2} \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_1 E_2} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_2}{E_2} \ddot{\epsilon} \quad (1)$$

式中: t 为时间; ϵ 为应变; σ 为应力; E_1 、 E_2 为弹性模量; η_1 、 η_2 为粘性系数。

在 $t = 0$ 的瞬间给 Maxwell 元件施加恒定应力 σ_0 ,代入初始条件,解微分方程得 Burgers 模型的蠕变方程为

$$\epsilon(t) = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} t + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) \right] \quad (2)$$

该模型中包括 4 个参数,其中有 2 个弹性模量 (E_1 和 E_2) 和 2 个粘性系数 (η_1 和 η_2),由弹性变形、粘性变形和延迟函数项 3 部分组成。

其中 $\tau_{t1} = \eta_1 / E_1$ 称为松弛时间,是一个重要的材料内部时间参数,松弛时间比较长的材料显示弹性,而比较短的更接近液体; $\tau_{t2} = \eta_2 / E_2$ 称为延迟时间,延迟时间是一个材料常数,代表了 Kelvin 元件中粘性成分和弹性成分的比例,同时延迟时间也可以用来比较不同材料的延迟弹性,延迟时间越短,材料越接近弹性变形特性^[15]。

Burgers 模型的求解目前研究较多,本文采用目前数据分析常用的 Origin 软件进行非线性回归拟合见表 5,松弛时间 $\tau_{t1} = \eta_1 / E_1$ 与延迟时间 $\tau_{t2} = \eta_2 / E_2$ 如下页图 6 所示。

表 5 40 ℃ 各参数拟合结果 Tab. 5 Each parameter fitting results at 40 ℃						
围压水平/kPa	结合料种类	E_1	E_2	η_1	η_2	R^2
0	AR	18.1	16.0	99 687.8	2 037.0	0.983
	SAR	19.5	16.6	135 636.3	2 058.2	0.981
	SBS	27.3	147.8	405 294.0	7 102.2	0.957
20	AR	37.5	54.9	357 032.0	6 155.0	0.978
	SAR	50.0	43.3	1 027 835.4	2 514.2	0.969
	SBS	70.4	29.9	1 987 402.0	869.9	0.951

由表 5 中的判定系数 R^2 可知,拟和值和真实数 据是十分接近的,由此验证了 Burgers 模型在蠕变

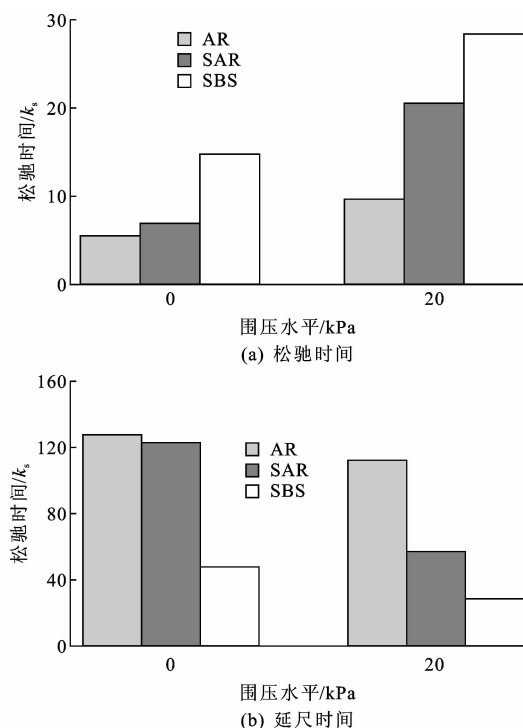


图6 Burgers模型参数分析

Fig. 6 Analysis of Burgers model parameters

试验数据处理上的可行性。由图6可知,3种改性沥青混合料的松弛时间随着围压的出现而增长,延迟时间随着围压的出现而下降,其中SBS改性沥青混合料的2个参数均为最优,明显优于橡胶沥青与温拌橡胶沥青混合料;Sasobit温拌橡胶沥青混合料的松弛时间长于原样橡胶沥青混合料,随着围压的出现其增长有较大提高,大大缩小了与SBS改性沥青混合料的差距,显示出更高的弹性,高温性能得到改善;Sasobit温拌橡胶沥青混合料的延迟时间短于原样橡胶沥青混合料,随着围压的出现其降低幅度较大,大大缩小了与SBS改性沥青混合料的差距,弹性抗变形能力增强表明其具有良好的高温抗永久变形能力。

由Burgers模型分析可知,Sasobit温拌剂大大改善了橡胶沥青混合料的松弛特性与延迟特性,对其提高其混合料高温性能很有必要。

3 结 语

(1)Sasobit温拌橡胶沥青、橡胶沥青的结合料蠕变性能优于SBS改性沥青,Sasobit温拌剂进一步提高了橡胶沥青高温蠕变性能优势,随着温度的升高橡胶沥青的高温蠕变性能将进一步优于SBS改性沥青;该试验结果反映了橡胶沥青与温拌橡胶沥青中始终存在的橡胶颗粒核心固形物对结合料剪

切蠕变的影响,而SBS改性沥青中没有固形物。

(2)3%的Sasobit掺量不仅能有效降低橡胶沥青混合料施工温度 20°C ,而且能较大提升其高温性能,却不过分降低其低温性能,对水稳定性基本没有影响;SBS改性沥青混合料的低温性能明显不如Sasobit温拌橡胶沥青与橡胶沥青混合料,但高温性能却优于2种橡胶沥青混合料。

(3)随着温度的升高和围压的出现,Sasobit温拌剂能够更好地提升橡胶沥青混合料的高温性能,使其更加接近SBS改性沥青混合料,同时从Burgers模型拟合参数分析上也得到了相同的结果,因此Sasobit温拌剂对提高橡胶沥青混合料高温性能很有必要。

参考文献:

References:

- [1] 黄文元,张隐西.道路路面用橡胶沥青的性能特点与指标体系[J].中南公路工程,2007,32(1):111-114.
HUANG Wen-yuan, ZHANG Yin-xi. The technical criteria frame of pavement used asphalt rubber in China[J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32 (1):111-114. (in Chinese)
- [2] 王旭东,李美江,路凯冀,等.橡胶沥青及混凝土应用成套技术[M].北京:人民交通出版社,2008.
WANG Xun-dong, LI Mei-jiang, LU Kai-ji, et al. The applied technology of the crumb rubber in the asphalt and mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [3] Takallou H B. The physical and chemical effects of crumb rubber on the properties of asphalt rubber pavements[R]. Nanjing: Asphalt Rubber Conference 2009, 2009.
- [4] Mull M A, Stuart K, Yehia A. Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(3):557-566.
- [5] Hirato T, Murayamma M, Sasaki H. Development of high stability hot mix asphalt concrete with hybrid binder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6):424-431.
- [6] Akisetty C. Evaluation of warm asphalt additives on performance properties of CRM binders and mixtures [D]. Clemson: Clemson University, 2008.
- [7] Xiao F P, Zhao W B, Amirkhanian, S N. Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(10):3144-3151.

- [8] 商淑杰. 温拌橡胶沥青结合料及其胶浆性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
SHANG Shu-jie. Study on the performance of rubberized warm asphalt binder and its mortar[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- [9] Wang H N, Dang Z X, You Z P, et al. High-temperature viscosity performance of crumb-rubber-modified binder with warm mix asphalt additives[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(5): 687-696.
- [10] Cao W D, Liu S T, Cui X Z. Determination of compacting temperatures of rubberized asphalt mixtures containing warm mix asphalt additives[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99-100: 875-880.
- [11] Liu S T, Cao W D, Fang J G. Orthogonal test research of asphalt rubber modified by warm asphalt additive [C]. Wei H, Wang Y H, Rong J, et al. Proceedings of the 10 th International Conference of Chinese Transportation Professionals. Reston: ASCE, 2010: 3480-3492.
- [12] 马涛. SMA 路面现场热再生技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
MA Tao. Research on hot in-place recycling technology of SMA pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese)
- [13] Bonaquist R. Refining the simple performance tester for use in routine practice [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2008.
- [14] Kaliush K E. Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures[D]. Tempe: Arizona State University, 2001.
- [15] 张久鹏. 基于粘弹性损伤理论的沥青路面车辙研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
ZHANG Jiu-peng. Research on rutting of asphalt pavement based on viscoelastic-damage mechanics theory[D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (in Chinese)

(上接第 15 页)

- [11] 倪彤元, 戴晓栋, 杨杨, 等. SBS 与废胶粉复合改性沥青性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2009(6): 65-67.
NI Tong-yuan, DAI Xiao-dong YANG Yang, et al. Experimental study on compound modified asphalt by SBS and crumb rubber[J]. New Building Materials, 2009(6): 65-67. (in Chinese)
- [12] 宋家楠, 黄治治, 徐向辉. 胶粉/SBS 复合改性沥青与 SBS 改性沥青、橡胶沥青的基本性能比较研究[J]. 北方交通, 2012(7): 3-5.
SONG Jia-nan, HUANG Zhi-ye, XU Xiang-hui. Comparative study on basic performance of rubber powder/SBS compound modified asphalt, SBS modified asphalt, and rubber asphalt[J]. Northern Communications, 2012(7): 3-5. (in Chinese)
- [13] 卢晓明, 周碧辉, 孙烈. 废胶粉-SBS 复合改性沥青路用性能的试验研究[J]. 物流工程与管理, 2009, 31(7): 117-118.
LU Xiao-ming, ZHOU Bi-hui, SUN Lie. The scrap rubber powder-SBS compound modified asphalt road uses the performance experimental study[J]. Logistics Engineering and Management, 2009, 31(7): 117-118. (in Chinese)
- [14] 李正中, 宋晓燕, 魏连雨, 等. 胶粉改性沥青评价指标及试验方法适应性分析[J]. 中外公路, 2010, 30(6): 207-210.
LI Zheng-zhong, SONG Xiao-yan, WEI Lian-yu, et al. Analysis on evaluation indexes and adaptation for test method of rubber powder modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(6): 207-210. (in Chinese)
- [15] 郝培文, 刘涛. 利用 SHRP 结合料规范评价改性沥青的技术性能[J]. 公路交通科技, 2003, 20(1): 11-13.
HAO Pei-wen, LIU Tao. SHRP asphalt binder standards used for evaluation of performance of modified asphalt[J]. Technology of Highway and Transport, 2003, 20(1): 11-13. (in Chinese)
- [16] 向丽, 程健. 废橡胶粉改性道路沥青的制备工艺和性能研究[J]. 石油沥青, 2008, 22(1): 12-14.
XIANG Li, CHENG Jian. Study on performance and process condition of crumb rubber modified asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2008, 22(1): 12-14. (in Chinese)
- [17] 徐惠生. 改性沥青红外光谱分析[J]. 安徽化工, 2007, 33(1): 62-64.
XU Hui-sheng. The analysis of the infrared spectrum for modified asphalt[J]. Anhui Chemical Industry, 2007, 33(1): 62-64. (in Chinese)