

填料对再生沥青胶浆黏弹响应的影响

陈华鑫, 牛昌昌, 况栋梁, 田俊壮, 杨 凯

(长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要: 笔者通过布氏黏度试验和重复蠕变试验,对再生沥青和 3 种再生沥青胶浆的黏弹特性进行了研究,分析不同填料对再生沥青胶浆黏度、 $\Delta E\eta$ (黏流活化能)、GV 值(蠕变劲度的黏性部分)和累计应变 γ_{acc} 的影响. 研究表明:沥青和沥青胶浆的黏度恢复水平具有很大差异,再生系数从大到小依次为:矿粉沥青胶浆 > 水泥沥青胶浆 > 消石灰沥青胶浆 > 沥青;再生沥青的黏流活化能比原样沥青低,而 3 种再生沥青胶浆的黏流活化能与相应原样沥青胶浆相比均有不同程度的增大;再生沥青和再生沥青胶浆的 GV 值以及 γ_{acc} 的恢复水平同样具有很大的差异性. 综合上述指标来看,3 种填料对老化沥青胶浆黏弹特性的恢复具有不同程度的积极影响,且影响程度为:矿粉 > 水泥 > 消石灰.

关键词: 再生沥青胶浆; 填料; 黏弹特性; 黏流活化能; GV 值; γ_{acc}

中图分类号: U414 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.016

0 引言

国内外学者对旧路面沥青混合料再生进行了大量的研究^[1-4],研究重点集中在 RAP 和旧沥青的再生恢复性能,老化沥青胶浆的再生鲜有探究. 根据现代胶浆理论,胶浆决定了沥青混合料的路用性能和服役寿命^[5-6]. 文献[7]研究了熟石灰、石灰石矿粉和波特兰水泥对沥青玛蹄脂黏度的影响,发现不同填料沥青玛蹄脂的黏度与填料掺量呈良好的线性相关性. 文献[8]研究发现消石灰显著提高沥青胶浆的抗剪切应力和车辙因子 $G^*/\sin \delta$,且沥青胶浆的黏度和软化点随着消石灰掺量的增加而大幅提高. 徐波等^[9]研究了不同填料和不同粉胶比对橡胶沥青胶浆高、低温性能的影响,进而优选填料及粉胶比.

综合各类研究发现,老化和再生沥青胶浆的研究较少. 笔者从沥青胶浆的角度出发,对不同填料再生沥青胶浆的黏弹性能进行研究,并与再生沥青黏弹性能进行比较,得出沥青、沥青胶浆以及不同填料沥青胶浆之间的再生差异.

1 试验材料

选用兰炼 90#基质沥青,其基本技术指标见表 1. 选用普通石灰石矿粉、P·O42.5 水泥及消石

灰 3 种填料,100 ℃烘箱中保温 2 h 后测试性能指标,具体结果见表 2. 再生剂选用施工现场提供的 A 再生剂,基本指标见表 3.

表 1 沥青技术指标
Tab. 1 The technical indications of asphalt

测试指标	原样	TFOT
针入度(25 ℃)/0.1 mm	83.3	58.4
软化点/℃	48.2	52.6
延度(5 ℃,1 mm/min)/cm	12.5	7.1

2 试验方案

2.1 试验样品制备

制备粉胶比为 1 的不同填料沥青胶浆,矿粉沥青胶浆中填料全部为矿粉;水泥沥青胶浆中的填料全部为水泥;消石灰沥青胶浆中填料 30% 为消石灰,其余 70% 为矿粉. 沥青编号 O_1 ,矿粉沥青胶浆编号 K_1 ,水泥沥青胶浆编号 S_1 ,消石灰沥青胶浆编号 X_1 .

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》TFOT 试验规程,将 O_1 、 K_1 、 S_1 和 X_1 进行短期老化,得到相应的 O_2 、 K_2 、 S_2 和 X_2 .

向 O_2 、 K_2 、 S_2 和 X_2 中加入沥青质量 5% 的再

收稿日期:2016-10-30;修订日期:2017-01-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978031)
作者简介:陈华鑫(1973—),男,安徽太湖人,长安大学教授,工学博士,主要从事沥青路面材料研究,E-mail:CH@gl.chd.edu.cn.

生剂,加热搅拌 20 min,分别得到 O₃、K₃、S₃ 和 X₃.

表 2 不同填料基本技术指标
Tab.2 Properties of different fillers

填料 种类	$\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	$<0.075\text{ mm}$ 含量	亲水 系数	SA/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)
矿粉	2.736	91.5	0.88	0.682
水泥	2.984	93.1	0.79	1.112
消石灰	2.422	90.2	—	2.209

表 3 A 再生剂基本技术指标
Tab.3 Properties of A regenerative agent

测试指标	测试结果
60 ℃ 黏度/cSt	575
闪点/℃	>220
饱和分/%	24.4
芳香分/%	73.8
TFOT 前后黏度比	1.4
TFOT 前后质量变化/%	0.1

2.2 试验方法

笔者采用布氏黏度计测试各个试样在不同温度条件下的布氏黏度.将试样加入盛样筒中,并与转子一起放入 110 ℃ 烘箱中保温 1.5 h 左右,然后取出转子与盛样筒安装在黏度计上开始测试,温度选取 110、125、140 和 155 ℃.

采用 Bohlin Gemini II 型动态剪切流变仪对上

述试样进行 MSCR 试验.将待测样品制成一定厚度的直径为 25 mm 的试样,并置于上下夹板之间,待温度升至试验温度后,使上压板下压直至样品厚度为 2 mm 时停止,刮除多余样品后进行重复蠕变试验.试验温度 64 ℃,应力水平选为 10 Pa,蠕变模式为加载 1 s,卸载 9 s,共计进行 100 次循环.

3 试验结果与分析

3.1 布氏黏度试验

各试样黏度试验结果见表 4.笔者将沥青胶浆老化后的黏度与原样黏度的比值定义为老化系数,原样黏度与再生沥青胶浆黏度的比值定义为再生系数.从表 4 中可以看出,沥青和不同填料沥青胶浆的布氏黏度经过老化后迅速增加,经过再生后布氏黏度呈现不同程度的降低,但是变化幅度并不一致,随着温度升高,同类沥青胶浆老化再生前后黏度的差异性逐渐减小.图 1 为 110 ℃ 时不同沥青胶浆黏度的老化系数和再生系数的差异.从图 1 可看出,与沥青相比,沥青胶浆的老化系数和再生系数均较以高.不同填料沥青胶浆相比较,老化系数与再生系数呈现一致差异性,均是矿粉沥青胶浆最大,水泥沥青胶浆次之,消石灰沥青胶浆最小.

表 4 布氏黏度试验结果
Table.4 The results of brookfield viscosity

试样类别	试验温度/℃				拟合方程	相关系数
	110	125	140	155		
O1	1.40	0.54	0.25	0.13	$y = 1.8E + 14x - 6.916$	0.997
O2	2.01	0.78	0.35	0.15	$y = 6.3E + 14x - 7.104$	0.999
O3	1.42	0.54	0.26	0.13	$y = 3.2E + 13x - 6.565$	0.999
K1	3.61	1.46	0.66	0.35	$y = 3.8E + 14x - 6.872$	1.000
K2	5.40	1.99	0.88	0.43	$y = 1.1E + 16x - 7.512$	1.000
K3	3.42	1.48	0.67	0.35	$y = 1.1E + 14x - 6.619$	0.999
S1	6.21	2.95	1.30	0.64	$y = 3.4E + 15x - 7.183$	1.000
S2	9.15	3.45	1.46	0.78	$y = 1.3E + 16x - 7.420$	0.999
S3	6.01	2.86	1.28	0.63	$y = 1.0E + 15x - 7.012$	1.000
X1	8.58	3.24	1.45	0.74	$y = 3.6E + 15x - 7.169$	0.998
X2	12.38	4.54	1.95	0.9	$y = 2.0E + 16x - 7.463$	1.000
X3	8.37	3.19	1.43	0.73	$y = 1.5E + 15x - 6.980$	0.998

图 2 为 3 种填料的微观形貌.从图 2 中可以看出:①同种微观尺寸下,矿粉粒径明显大于水泥颗粒和消石灰颗粒;②矿粉颗粒表面规则平整,存在明显的棱角,另外两种颗粒形状不规则,表面存在凹陷,尤其是生石灰存在大量的裂痕,所以在相同粉胶比条件下,矿粉颗粒与沥青之间的物理吸附作用最弱.另外,生石灰中含有大量碱性物质,沥青中的酸性组分在高温条件下能够很好地渗透

进生石灰裂缝内部,产生强烈的化学反应,生成更多的结构沥青,使消石灰沥青胶浆体系内部更加稳定,能够更好地抵抗沥青的热氧老化,同时再生剂分子也更难扩散进入消石灰沥青胶浆体系,故消石灰沥青胶浆的老化及再生系数最小,水泥沥青胶浆次之,矿粉沥青胶浆最大.温度介于 110 ~ 160 ℃,沥青胶浆的表观黏度对温度的依赖性服从阿伦尼乌斯方程:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\Delta E_{\eta}}{RT} \tag{1}$$

式中： η 为表观黏度； R 为摩尔气体常量； T 为热力学温度； A 为指前因子； ΔE_{η} 为黏流活化能，表征沥青胶浆在黏流态时的流动能力对温度依赖性的大小。对 $1/T - \ln \eta$ 进行拟合，发现 $\ln \eta$ 与 $1/T$ 具有很好的线性相关性，通过公式(1)求得沥青和不同沥青胶浆的 ΔE_{η} 。

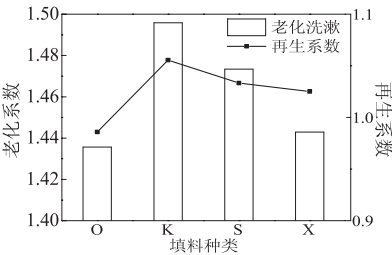


图 1 填料对老化再生系数的影响
Fig.1 The effect of fillers on regeneration and aging coefficients

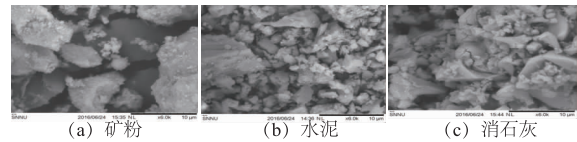


图 2 不同填料微观形貌
Fig.2 The microstructures of different fillers

图 3 为沥青及沥青胶浆黏流活化能。分析图 3 可以看出，经过老化后，沥青和沥青胶浆的黏流活化能显著增加。再生沥青的 ΔE_{η} 比原样低 1%，而 3 种再生沥青胶浆的 ΔE_{η} 与原样沥青胶浆相比均出现不同程度的增大，其中再生矿粉沥青胶浆 ΔE_{η} 同比增加 0.7%，再生水泥沥青胶浆 ΔE_{η} 增加 1.2%，再生消石灰沥青胶浆 ΔE_{η} 增加 2.1%，说明再生沥青的温度敏感性增强，而再生沥青胶浆的温度敏感性减弱。由表 1 黏度结果看出，再生沥青黏度未恢复至原样沥青水平，而再生沥青胶浆黏度已经低于原样沥青胶浆黏度，这表明同等再生条件下，沥青黏度恢复滞后于温度敏感性恢复，沥青胶浆温度敏感性恢复滞后于黏度恢复。

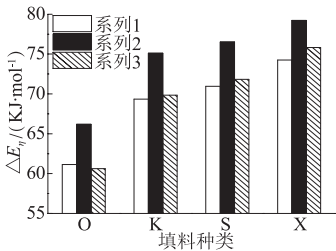


图 3 沥青及沥青胶浆黏流活化能
Fig.3 The viscous flow activation energies of asphalt and asphalt cements

3.2 重复蠕变试验

Burgers 模型由 Maxwell 模型 (G_0, η_0) 和 Kellvin 模型 (G_1, η_1) 组成，其中 G_0, G_1 代表弹性部分， η_0, η_1 代表黏性部分，具体见图 4。沥青及沥青胶浆作为典型的黏弹性材料，其在剪切蠕变荷载作用下，最先产生瞬时变形 γ_e ，表征了材料的弹性响应；随着时间的延续，材料产生连续变形 γ_{de} ，此部分变形表征材料黏弹性响应，包括延迟弹性变形 γ_{de} 和黏性流动变形 γ_v 。卸去荷载后，瞬时弹性变形 γ_e 得到瞬间恢复，而延迟弹性变形则随着时间逐渐恢复，但是黏性变形却无法恢复，成为永久性变形^[11]，沥青蠕变恢复过程中应变-时间曲线见图 5。Burgers 模型具体的本构方程如下：

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1} [1 - e^{-tG_1/\eta_1}] + \frac{\tau_0}{\eta_0} t = \gamma_e + \gamma_{de} + \gamma_v \tag{2}$$

式中： γ 为剪应变； t 为蠕变时间； τ_0 为恒定剪应力； G_0, η_0 为 Maxwell 模型中弹性模量和黏性系数； G_1, η_1 为 Kellvin 模型中弹性模量和黏性系数。

式(2)两边同时除以 τ_0 可以得到

$$J(t) = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} [1 - e^{-tG_1/\eta_1}] + \frac{t}{\eta_0} = J_e + J_c + J_v \tag{3}$$

式中： J_e 为瞬时弹性变形模量； J_c 为延迟弹性变形模量； J_v 为黏性流动变模量。

SHRP 计划将蠕变劲度的黏性成分 $G_v = 1/J_v$ 作为沥青基材料高温性能的评价指标，很多学者也通过室内试验论证了 G_v 与车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 相比较而言，前者与沥青混合料的动稳定度 D_s 具有更好的相关性^[10]。

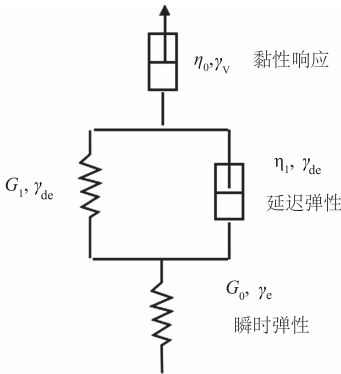


图 4 Burgers 模型
Fig.4 Burgers mode

3.2.1 Burgers 模型参数拟合

通过 Origin 对各个试样的第 50 次、51 次蠕变试验结果进行拟合，并取平均值作为最终结果，相关系数达到 0.99 以上，说明 Burgers 模型能够很好的反映沥青及不同填料沥青胶浆老化及再生前后的蠕变过程，具体拟合结果汇集于表 5。

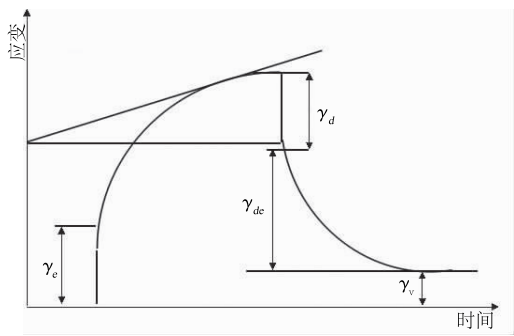


图 5 沥青蠕变恢复过程中应变-时间曲线

Fig. 5 Strain-time relationship curve of asphalt in creep-recovery phase

图 6 为蠕变柔量实测值与拟合值. 图 6 显示不是沥青及沥青胶浆老化再生前后,蠕变柔量实测值与通过 Burgers 模型四参数拟合值差异性很小,蠕变柔量曲线基本重合,表明运用 Burgers 模型对沥青及沥青胶浆老化再生前后的蠕变柔量进行拟合具有科学准确性.

3.2.2 G_v 值

由表 5 中 Burgers 参数,根据公式 $J_v = t/\eta_0$ 以及 $G_v = 1/J_v$ 可以计算 G_v 值,沥青及不同沥青胶浆的 $t - \lg(G_v/1\ 000)$ 曲线见图 7. 分析图 7 可以看出, G_v 值在蠕变初期迅速降低,随着蠕变时间的进一步延续, G_v 值下降幅度逐渐减缓并最终趋于平稳,表明沥青及沥青胶浆的高温稳定性能在荷载作用初期即出现很大损失,并随着荷载时间的延长而进一步劣化.

表 5 沥青及不同沥青胶浆 Burgers 模型参数拟合
Fig. 5 Burgers model fitting parameters for asphalts and different asphalt mortars

试样类型	G_0/Pa	G_1/Pa	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\eta_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
O ₁	100 000	1 000	310	3 399
O ₂	100 000	1 000	342	2 002
O ₃	100 000	1 000	384	2 484
K ₁	100 000	1 000	871	4 650
K ₂	100 000	1 000	2 227	9 514
K ₃	100 000	1 000	618	2 654
S ₁	100 000	1 000	1 138	5 000
S ₂	100 000	1 000	2 895	3 481
S ₃	100 000	1 000	841	4 328
X ₁	50 000	1 000	991	7 940
X ₂	100 000	1 000	3 645	5 000
X ₃	100 000	1 000	712	2 497

对第 50 和 51 个蠕变周期内加载 0.5 s 时的 G_v 平均值进行分析(具体 G_v 值见图 8). 显而易见,老化作用使,不同填料沥青胶浆的 G_v 值显著

增大,老化后消石灰沥青胶浆延续并进一步扩大了其在 3 种原样沥青胶浆中的优势. 3 种再生老化沥青胶浆的 G_v 值显著降低并低于对应的原样沥青胶浆,再生沥青的 G_v 值与原样沥青 G_v 值相差不大. 说明在同等再生条件下,单一老化沥青的恢复能力低于胶浆体系中老化沥青的恢复能力. 主要因为老化沥青与再生剂比例一定时,填料的存在增加了老化沥青与再生剂的接触空间,降低再生剂分子的扩散阻力,沥青胶浆具备更强的再生恢复能力.

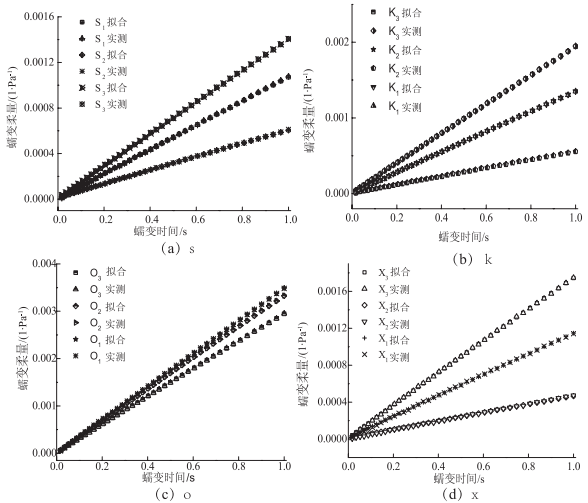


图 6 蠕变柔量实测值与拟合值
Fig. 6 Measured and predicted results of creep compliance

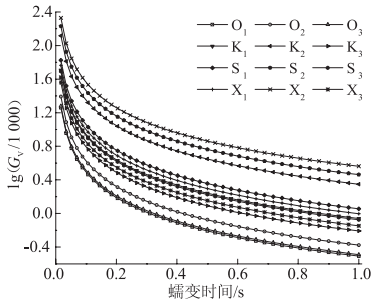


图 7 沥青及沥青胶浆 $t - \lg(G_v/1\ 000)$ 曲线
Fig. 7 The $t - \lg(G_v/1\ 000)$ relationship curve of asphalt and asphalt cements

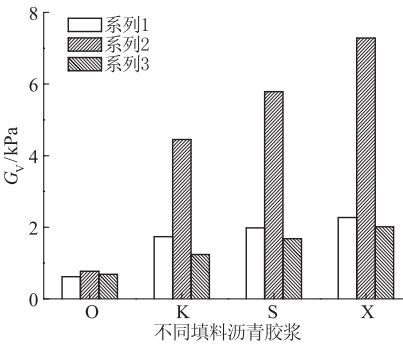


图 8 沥青及不同沥青胶浆胶浆 G_v 值
Fig. 8 The G_v of asphalt and different asphalt cements

3.2.3 累计应变

图 9 为第 50 次蠕变的应变变化曲线. 从图 9 可以看出, 基质沥青及其胶浆在 9 s 的卸载时段内, 应变恢复量很小, 这说明它们的弹性恢复能力较差, 永久变形量较大. 另外, 填料的引入显著降低了沥青的蠕变变形量, 其中消石灰改善效果最优, 其次为水泥, 矿粉改善效果最低. 经过短期老化后, 矿粉沥青胶浆应变量下降最多, 达到 62.6%, 其次为水泥沥青胶浆为 58%, 消石灰沥青胶浆仅为 43.2%, 这说明老化作用对消石灰沥青胶浆的影响最小. 经过再生, 沥青及 3 种沥青胶浆的应变量大为提高, 其中矿粉沥青胶浆和水泥沥青胶浆提高幅度更大, 应变量分别增加了 2.5 倍和 2.7 倍, 而消石灰沥青胶浆应变量仅仅增加 1.3 倍.

从图 9 中可以看出, 二者累积应变发展速率相近. 相比矿粉颗粒, 水泥颗粒碱组分含量更多, 比表面积更大, 而且颗粒不规则度更高, 水泥颗粒具有更强的吸附活性, 但是相对较小的粒径弱化了水泥颗粒对沥青的体积增强作用^[12], 所以二者的高温稳定性差距不是很显著.

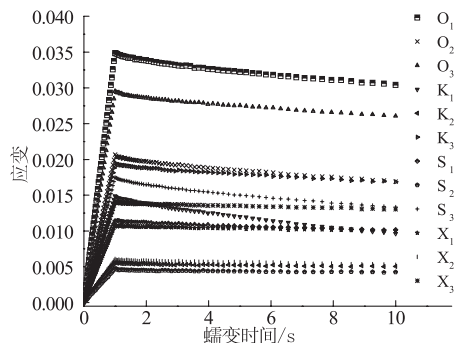


图 9 单蠕变周期内应变—时间曲线

Fig. 9 Strain-time relationship curve in single creep-recovery cycle

消石灰更大的比表面积显著增强了消石灰颗粒与沥青间的物理与化学吸附作用. 另外, 消石灰中含有大量的 CaO, 强碱性赋予了其较高的化学吸附能, 较小的分子量也促进了沥青中的羧酸及亚砷等与 CaO 反应生成不可溶钙盐, 因此消石灰与沥青能够产生物理和化学的协同作用^[13], 生成更多的结构沥青, 弱化了由于粒径小而引起的体积增强作用衰减影响. 老化过程中, 消石灰沥青胶浆中轻质组分损失相对更少, 同样地, 再生剂更难扩散进入消石灰沥青胶浆.

图 10 为 100 次蠕变循环周期内各个试样的累计应变发展曲线. 从图 10 可以看出, 发展速率大致分为三块区域, 3 种不同填料沥青胶浆老化后的累积应变发展速率最小, 其次为原样沥青胶浆以及再生沥青胶浆, 沥青的累积应变发展速

率最大. 再生沥青胶浆累积应变发展速率均超过原样沥青胶浆, 尤其是再生矿粉填料沥青胶浆, 提升幅度最大. 说明再生剂的引入, 能够很好地渗透溶解老化沥青, 并有效填充大分子之间的间隙, 削弱相互禁锢作用, 增强了分子间的相互运动, 胶浆体系中的老化沥青性能得到很好地恢复. 由于矿粉与沥青之间的物理吸附作用相对较小, 胶浆体系对老化沥青分子的束缚能力较弱, 从而使得老化矿粉沥青胶浆的再生恢复能力更好.

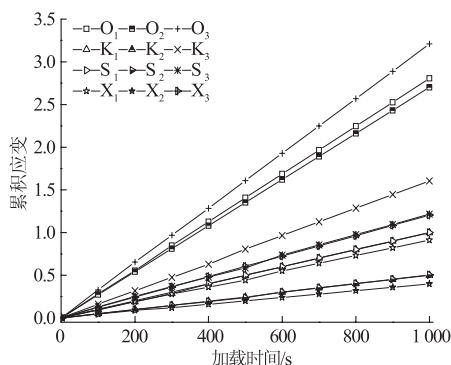


图 10 累计应变随时间变化规律

Fig. 10 Accumulative strain varying with time

4 结论

(1) 对不同填料沥青胶浆老化再生前后的蠕变曲线进行非线性拟合, 拟合曲线与实测曲线具有优异的相关性, 表明 Burgers 模型对沥青胶浆在荷载作用下的蠕变行为的适用性不受填料以及体系老化状态的影响.

(2) 同等再生条件下, 老化沥青胶浆的黏度、 G_v 值和 γ_{acc} 恢复水平平均高于老化沥青, 沥青胶浆温度敏感性的恢复滞后于黏度的恢复, 而沥青温度敏感性的恢复超前于黏度的恢复.

(3) 填料增加了老化沥青与再生剂的接触空间, 减小了再生剂分子的扩散阻力, 对于黏弹响应而言, 在同等再生条件下, 老化沥青胶浆比老化沥青具备更高的再生恢复能力.

参考文献:

- [1] DURRIEU F, FARCAS F, MOUILLET V. The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: comparison between laboratory and on site aging[J]. Fuel, 2007, 86(10): 1446–1451.
- [2] HE G, WONG W. Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials[J]. Construction and building materials, 2007, 21(8): 1809–1819.
- [3] 郝培文, 蒋鹤, 王宏, 等. 水泥对泡沫沥青冷再生混合料强度影响机理[J]. 功能材料, 2016, 47(3): 3090–3096.
- [4] 许培俊, 刘建飞, 丛培良, 等. 基于室内模拟老化试

验对沥青性能的研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(3): 94-97.

[5] MILJKOVIC M, RADENBERG M. Fracture behaviour of bitumen emulsion mortar mixtures[J]. Construction and building materials,2014,62:126-134.

[6] ALHDABI A, AI N H, RUDDOCK F, et al. Development of sustainable cold rolled surface course asphalt mixtures using waste fly ash and silica fume[J]. Journal of materials in civil engineering,2013,26(3): 536-543.

[7] MWANZA A D, WANG H, HAO P W. Effects of type and content of mineral fillers on the consistency properties of asphalt mastic[J]. Journal of testing and evaluation,2012,40(7):1-9.

[8] MA L X, LI Z D, HUANG J F. Characterization of asphalt binders modified with hydrated lime and limestone dust[C]. Materials science forum. trans tech publications,2011.

[9] 徐波,刘运新,王英. 填料对橡胶沥青胶浆高低温性能的影响[J]. 功能材料,2016,47(1):1106-1109.

[10] 张肖宁,孟勇军,邹桂莲. 基于重复蠕变的改性沥青高温指标[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2008,36(2): 23-28.

[11] 秦先涛,祝斯月,李祖仲,等. 基于重复蠕变试验的阻燃沥青胶浆高温性能[J]. 公路交通科技,2015,32(2): 21-27.

[12] 李平,孙鸿伟,张争奇,等. 水泥与消石灰对沥青胶浆性能影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2007,28(3): 40-43.

[13] 柳浩,李晓民,张肖宁,等. 消石灰与矿粉沥青胶浆流变性能比较[J]. 北京工业大学学报,2009,35(11):1506-1511.

Effects of Fillers on Viscoelastic Response of Recycled Asphalt Cement

CHEN Huaxin ,NIU Changchang, KUANG Dongliang, TIAN Junzhuang, YANG Kai

(School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061,China)

Abstract: In this paper, brookfield viscosity test and repeated creep test were adopted to investigate the viscoelastic properties of recycled asphalt and 3 recycled asphalt cements, the viscosity, ΔE_{η} (viscous flow activation energy), G_v (the viscous part of creep stiffness) and cumulative strain γ_{acc} of recycled asphalt cements with different fillers were analysed. The experimental results indicated that the recovery levels of viscosity of asphalt and asphalt mastics showed great difference. The regeneration factors in decreasing order were slag asphalt cement > cement asphalt mortar > lime mortar asphalt > asphalt; the viscous flow activation energies of 3 kinds of recycled asphalt cements were increased to varying degrees as well as the corresponding asphalt cements. But the viscous flow activation energy of recycled asphalts were lower than virgin asphalt, the recovery levels of G_v and γ_{acc} also showed great differences between the recycled asphalt and recycled asphalt cements. Based on the above indicators, 3 kinds of fillers showed different degrees of positive impact on the restoration of viscoelastic properties of aging asphalt mortar, and the order of influences was slag > cement > lime.

Key words: recycled asphalt cement; filler; viscous flow activation energy; G_v ; γ_{acc}