

文章编号:1671-6833(2022)03-0052-07

# 糠醛抽出油再生沥青的流变和感温性能研究

吴文亮,代生林,斯 李

(华南理工大学 土木与交通学院,广东 广州 510641)

**摘 要:** 为了解糠醛抽出油作为沥青再生剂对不同老化程度沥青的再生效果,对糠醛抽出油再生沥青的流变性能和感温性能进行研究。通过将糠醛抽出油添加到轻度、中度和重度 3 种不同老化程度的沥青中,采用动态剪切流变试验和弯曲蠕变试验,研究糠醛抽出油对老化沥青的流变性能及感温性能的影响规律,并以不同指标对再生沥青的流变性能和感温性能进行评价。研究结果表明:随着糠醛抽出油掺量的增加,老化沥青的中温抗疲劳性能和低温抗开裂性能均得到提升,高温抗变形性能则降低;不同老化程度的沥青在合适的糠醛抽出油掺量下性能能够恢复至基质沥青水平;多重应力蠕变试验对沥青高温抗变形性能的评价比车辙因子更适用;疲劳因子与线性扫描振幅试验对沥青中温抗疲劳性能的评价结果一致;再生沥青的感温性能在不同的温度区间具有不同的表现,在 46~76 ℃ 时,随着糠醛抽出油掺量的增加,3 种再生沥青的感温性能均增强;在 -18~-6 ℃ 时,蠕变速率指数对感温性能的评价结果比蠕变劲度指数好,重度老化再生沥青的感温性能随着糠醛抽出油掺量的增加而增强,轻度和中度老化再生沥青的感温性能则相对减弱。以各项指标基本恢复到基质沥青水平为标准确定的最佳掺量为轻度老化 4%,中度老化 7%,重度老化 8%。

**关键词:** 糠醛抽出油;再生沥青;沥青老化程度;流变性质;感温性能

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2022.03.005

## 0 引言

世界范围内的道路网铺筑材料绝大部分为沥青,沥青路面的性能会在使用中不断下降,直至需要维护或重建。随着沥青老化,沥青微观结构的多相态破坏变得严重,导致宏观性能的衰减<sup>[1]</sup>。沥青的老化还表现为部分轻质组分向重质组分的转化。沥青的再生技术旨在恢复老化沥青的流变性能,使其能用于沥青混合料的再生,提高材料的可持续性和环境效益<sup>[2]</sup>。沥青的再生需要使用再生剂,它通过增添老化沥青中缺失的轻质组分,使再生沥青恢复或接近基质沥青的性能<sup>[3]</sup>。Koudelka 等<sup>[4]</sup>比较了欧洲市面上的 10 种再生剂,均不能同时满足老化沥青的多个指标。

糠醛抽出油是润滑油生产过程中的一种副产品,含有较多的轻质芳香烃<sup>[5]</sup>,可明显调节老化沥青中轻重组分的比例<sup>[6]</sup>。道路沥青的研究中,糠醛抽出油可作为低标号沥青调配到高标号沥青

的添加剂<sup>[7]</sup>,还可辅助生产 SBS、SEBS、SIS 等改性沥青<sup>[8]</sup>,与聚磷酸混合能够降低改性沥青中 SBS 的含量<sup>[9]</sup>。当糠醛抽出油与树脂混合的质量比为 6:1 时,对老化沥青的再生效果较好<sup>[10]</sup>。糠醛抽出油与 AH-90 直馏沥青混合调制的再生剂能恢复改性沥青的性能<sup>[11]</sup>。将糠醛抽出油、橡胶填充油和醇基苯甲酯增塑剂混合制备再生剂,当糠醛抽出油质量分数为 10% 时,基质沥青可再生,当糠醛抽出油质量分数为 5% 时,SBS 改性沥青可再生<sup>[12]</sup>。这些研究表明糠醛抽出油具有较好的再生潜力。但实际的路面维护中,废沥青都处于不同程度的老化状态,沥青组分比例失调的程度不同,再生的难度也不同<sup>[13]</sup>。

鉴于此,本文选择糠醛抽出油作为再生剂,制备了 3 种不同老化程度的沥青,研究糠醛抽出油对老化沥青流变与感温性能的影响规律,探究不同指标对其性能评价的适用性,并分析糠醛抽出油作为再生剂的再生效果与应用潜力。

收稿日期:2021-08-16;修订日期:2021-11-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378223)

作者简介:吴文亮(1981—),男,黑龙江鸡西人,华南理工大学副教授,博士,主要从事沥青路面研究,E-mail:ctwlwu@scut.edu.cn。

1 材料与试验方法

1.1 材料

1.1.1 再生剂

糠醛抽出油为黑色黏稠液体,主要技术指标如表 1 所示。

表 1 糠醛抽出油主要技术指标  
Table 1 Main technical indexes of  
furfural extraction oil

指标	实测值
运动黏度(100 ℃)/(mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	5.03
密度(20 ℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.920 6
闪点/℃	202
凝点/℃	2
芳烃质量分数/%	76.64

1.1.2 沥青

(1)基质沥青与老化沥青。采用壳牌 70 #沥青作为基质沥青(O),在实验室条件下使用旋转薄膜烘箱(RTFOT)和压力老化容器(PAV)制备 3 种不同老化程度的沥青以供使用,分别是:轻度(D)、中度(M)、重度(L)。制备方法:轻度老化沥青使用 RTFOT 老化 2.5 h,中度老化沥青使用 RTFOT 老化 5 h,重度老化沥青使用 RTFOT 老化 85 min+PAV 老化 20 h。

(2)再生沥青。糠醛抽出油的掺量是根据针入度、软化点、延度、旋转黏度确定的,这些指标值越接近基质沥青,沥青的再生效果越好。首先在 135 ℃下以质量分数为 1%的掺加梯度比例将糠醛抽出油加入老化沥青中,使用剪切机搅拌 15 min,制备再生沥青并检验其性能。基质沥青、老化沥青、再生沥青的技术指标如表 2 所示,沥青编号后的数字代表掺量(质量分数,如 D2 表示糠醛抽出油质量分数为 2%的轻度老化沥青)。

表 2 沥青的主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of asphalt

沥青类型	针入度/(0.1 mm)	软化点/℃	延度(10 ℃)/cm	黏度(135 ℃)/(Pa·s)
O	70.0	46.8	30.4	0.412
D	42.0	52.8	6.0	0.535
D2	51.8	48.6	10.0	0.510
D4	68.3	46.7	39.5	0.412
D6	90.1	45.2	98.6	0.357
M	34.0	55.0	4.3	0.660
M5	55.6	49.7	14.8	0.450
M7	77.9	47.5	44.7	0.414
M9	92.4	45.1	99.8	0.350
L	27.0	57.0	0	0.748
L6	57.1	49.1	13.8	0.469
L8	72.6	47.6	43.7	0.415
L10	95.3	45.7	95.6	0.370

1.2 试验方法

1.2.1 流变性能测试

采用 Kinexus 动态剪切流变仪(DSR)测试再生沥青的流变性能。

(1)频率扫描。频率扫描的试验温度分别为 4、24、44、64 ℃,采用 0.5%应变控制,扫描频率为 0.01~30 Hz。室内试验难以测定沥青在瞬时荷载与长期蠕变下的力学响应,Williams-Lanbel-Ferry(WLF)时温等效原理<sup>[14]</sup>认为,黏弹行为在升温与延时下等效,则低温下的力学响应可转换为短时/高频下,高温下则转换为长时/低频下。通过 WLF 时温等效原理,设定参考温度为 25 ℃,并利用 Sigmoidal 模型<sup>[15]</sup>将频率扫描结果绘制成复数剪切模量-加载频率主曲线,如图 1 所示。

(2)温度扫描和多重应力蠕变(MSCR)试验。为了更准确地预测糠醛抽出油再生沥青的高温性能,选择温度扫描试验的车辙因子  $G^*/\sin \delta$  和 MSCR 试验的不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$  进行评价,并

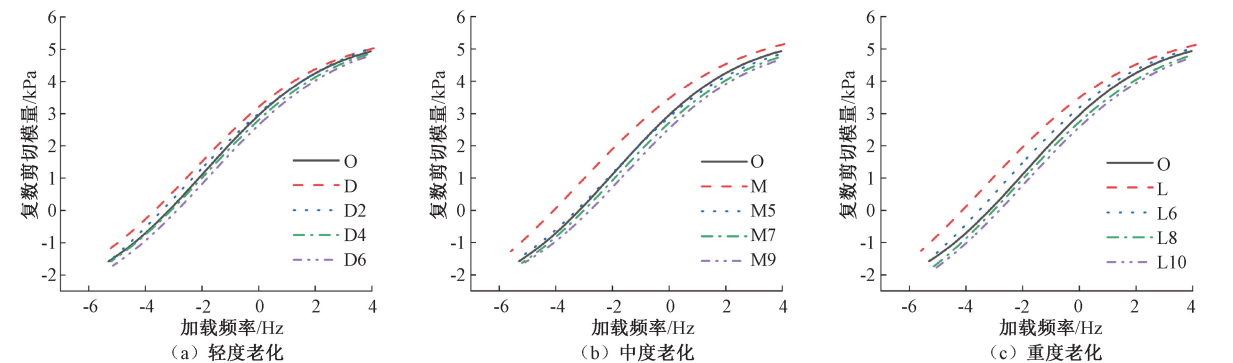


图 1 复数剪切模量-加载频率主曲线

Figure 1 Main curve of complex shear modulus-frequency

分析 2 种指标的关系。

测试沥青的高温性能常采用温度扫描,以正弦振荡的模式对沥青进行固定应变的加载,得到复数剪切模量  $G^*$ 、相位角以及车辙因子。扫描温度为 46~76 ℃,升温间隔为 6 ℃,角频率为 10 rad/s。

MSCR 试验设置样品试验温度为 60 ℃,加载频率为 10 rad/s。分别在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 的应力水平下,进行加载 1 s 后卸载恢复 9 s 的加载过程,循环 10 次。

(3)疲劳因子指标和线性扫描振幅(LAS)试验:疲劳因子  $G^* \sin \delta$  为评估沥青在常温下抗疲劳破坏能力的指标,其作为线性黏弹性模量类指标不能表征沥青混合料的疲劳损伤特性,但可用于基质沥青的抗疲劳性能评价<sup>[16]</sup>。

线性扫描振幅试验则采用动态的频率、应变,能更好地模拟路面的实际荷载,试验得到的疲劳寿命  $N_f$  可以较好地反映沥青混合料的抗疲劳性能<sup>[17]</sup>。试验过程包括频率扫描和振幅扫描:先进行频率扫描,在 25 ℃ 下,采用 0.1% 应变控制,扫描频率为 0.2~30 Hz;再进行振幅扫描,在 25 ℃ 的温度和 10 Hz 的频率下,应变从 0.1% 线性增加到 30%,循环 3 100 次得到沥青的疲劳寿命。

1.2.2 弯曲蠕变(BBR)试验

采用 TE-BBR-F 型弯曲梁流变仪进行 BBR 试验以探究各沥青的低温抗裂性能,评价指标为蠕变劲度  $S$  和蠕变速率  $m$ 。选取的温度为 -18、-12、-6 ℃,加载时间为 60 s,试验温度为低温等级加 10 ℃,则该试验温度可分别代表 -28、-22、-16 ℃ 的低温等级。

2 分析与讨论

2.1 宽频域下动力学性能

复数剪切模量-加载频率主曲线如图 1 所示,

复数剪切模量与加载频率均取对数。由图 1 可知,复数剪切模量从高频(低温)至低频(高温)呈减小趋势,符合升温时沥青从弹性体变为流体的规律,且低频时越大的模量表征越好的高温性能,高频时越大的模量表征越差的低温性能。沥青的老化表现为复数剪切模量的增大,老化沥青与基质沥青的模量差值在低频时比高频时大,表明沥青老化能较明显地提升高温性能,略降低低温性能,且老化程度越高,高温性能越强,低温性能越差。

掺加糠醛抽出油后,同频率下模量随掺量的增大而减小。这是因为糠醛抽出油补充了沥青老化损失的轻质组分,会降低老化沥青的高温性能,但增大了低温下的流动性,减小了低温脆性破坏的可能。由图 1 可知,D4、M5、M7、L8 再生沥青性能较为接近基质沥青水平。

2.2 高温抗变形性能

2.2.1 车辙因子

车辙因子  $G^*/\sin \delta$  可用于评价沥青的高温性能,其值越大,高温下的抗剪切变形能力越强,高温性能越好。沥青的车辙因子随温度的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知,车辙因子随温度的增加而减小,这是因为高温使沥青变软,降低了抗变形能力。沥青老化程度越高,车辙因子越大,高温性能越好,这也验证了频率扫描的试验结果。掺加糠醛抽出油后,车辙因子呈减小趋势,掺量越大车辙因子减小越明显。在 46~76 ℃ 下,再生沥青在 D4、M7、L8 掺量下的车辙因子与基质沥青基本相同。

2.2.2 多重应力蠕变(MSCR)试验

MSCR 试验采用应变恢复率  $R$ 、不可恢复蠕变柔量  $J_{nr}$  和不可恢复蠕变柔量的应力敏感性参数  $J_{nr diff}$  评价沥青的高温性能。 $R$  表示沥青蠕变

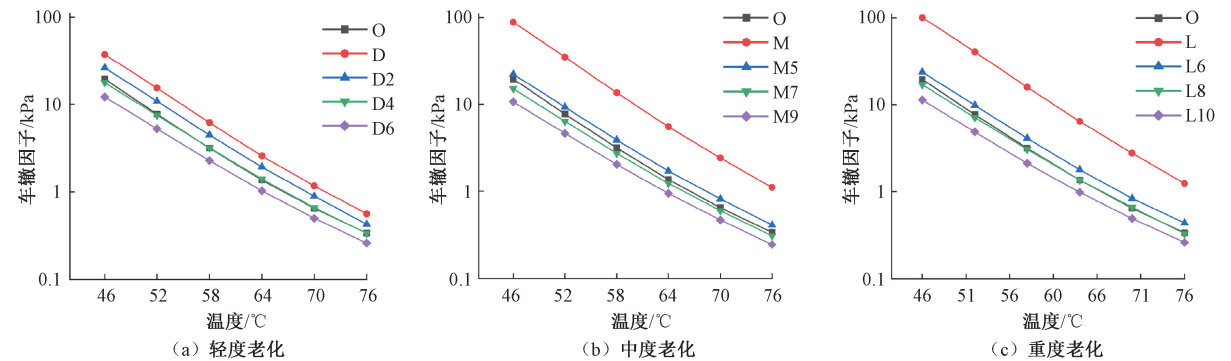


图 2 车辙因子随温度的变化曲线

Figure 2 Change curves of rutting factor with temperature

过程中弹性变形量的占比, $J_{nr}$ 表示不可恢复的变形量。 $R$ 越大、 $J_{nr}$ 越小时,表示沥青在高温下的变形容易恢复,高温性能好。样品在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 下的 MSCR 试验结果如表 3 所示。

表 3 MSCR 试验结果  
Table 3 MSCR test results

沥青 类型	$J_{nr}/kPa^{-1}$		$J_{nr diff}/\%$	$R/\%$	
	0.1 kPa	3.2 kPa		0.1 kPa	3.2 kPa
O	3.959	4.347	9.8	0.6	0.1
D2	1.582	1.756	11.0	4.1	1.7
D4	2.121	2.396	13.0	2.9	0.5
D6	3.047	3.457	13.5	2.0	0.2
M5	1.399	1.568	12.1	5.0	2.1
M7	2.634	2.952	12.1	2.8	0.7
M9	3.526	3.909	10.9	1.1	0.2
L6	1.018	1.120	10.0	4.5	2.4
L8	1.389	1.521	9.5	3.3	1.5
L10	1.877	2.100	11.9	3.0	0.9

由表 3 可知,基质沥青的  $J_{nr}$  在 2 种应力条件下均最大, $R$  均最小。这是因为基质沥青在蠕变过程中变形多为不可恢复的黏性变形,不具有较好的抗永久变形能力。各沥青的  $J_{nr}$  在 3.2 kPa 时比 0.1 kPa 时的大, $R$  则相反。这是因为应力水平较高时的变形不易恢复,弹性变形量也较小。

掺加糠醛抽出油后,再生沥青的  $J_{nr}$  随掺量的增加而增大,但始终小于基质沥青; $R$  随掺量的增加而减小,但始终大于基质沥青。这是因为糠醛抽出油增加了沥青中黏性小分子的比例,会减小沥青的弹性变形量,掺量越大高温性能降低越多,但总体上再生沥青抗永久变形能力比基质沥青好。

车辙因子评价结果已表明,糠醛抽出油掺量为 D4、M7、L8 时,车辙因子基本恢复到基质沥青水平。对比同掺量下的  $J_{nr}$  评价结果,发现 0.1 kPa 时,D4、M7、L8 再生沥青的  $J_{nr}$  分别为基

质沥青的 53.5%、66.5%、35.1%, $R$  分别为基质沥青的 4.8、4.7、5.5 倍;3.2 kPa 时, $J_{nr}$  分别为基质沥青的 55.1%、67.9%、35.0%, $R$  分别为基质沥青的 5、7、15 倍。表明此掺量下再生沥青的高温性能比基质沥青有较大提升。从以上 2 种评价方法的试验原理和结果来看,MSCR 试验更符合路面实际荷载状况,所以更适合用来评价再生沥青的高温性能。

2.3 中温抗疲劳性能

2.3.1 疲劳因子

沥青在常温下的抗疲劳性能可用疲劳因子  $G^* \sin \delta$  评价, $G^* \sin \delta$  越大,沥青受荷载作用造成的性能损失越快,抗疲劳性能越弱。疲劳因子随温度的变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,疲劳因子随温度的降低呈线性增大,说明降温会使沥青的抗疲劳性能大幅下降。相同温度下,糠醛抽出油的掺量越大,疲劳因子越小,说明糠醛抽出油能够改善沥青的抗疲劳性能,改善效果随掺量增加而增强。在 D4、M5、L6 时,再生沥青的抗疲劳性能已优于基质沥青,再加大掺量对抗疲劳性能的改善仍可提高,但效果相对减弱。

2.3.2 线性扫描振幅(LAS)试验

沥青受剪切应力,应变从 0.1% 线性增加到 30% 的过程中应力也在增大,当达到一定的应变时,应力出现峰值,即表示沥青发生疲劳破坏。LAS 应力-应变曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,应力峰值均出现在 10% 应变附近。随糠醛抽出油掺量的增加,再生沥青的应力峰值右移且峰值减小,说明掺加糠醛抽出油使沥青变软,能承受的应力峰值降低了,但能承受的应变水平增强,这可减缓应力增加时对沥青的疲劳损害。在 D4、D6、M7、L8、L10 时,再生沥青应力峰值、疲劳破坏时的应变均接近基质沥青水平。

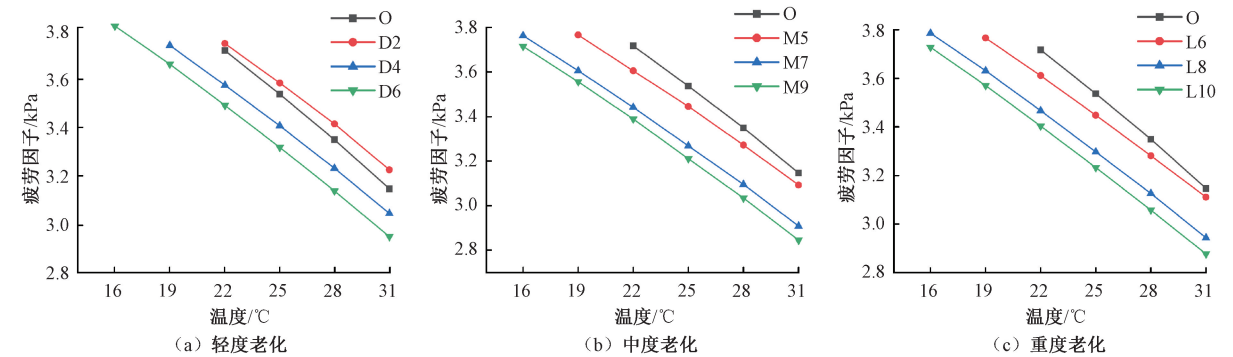


图 3 疲劳因子随温度的变化曲线  
Figure 3 Change curves of fatigue factor with temperature



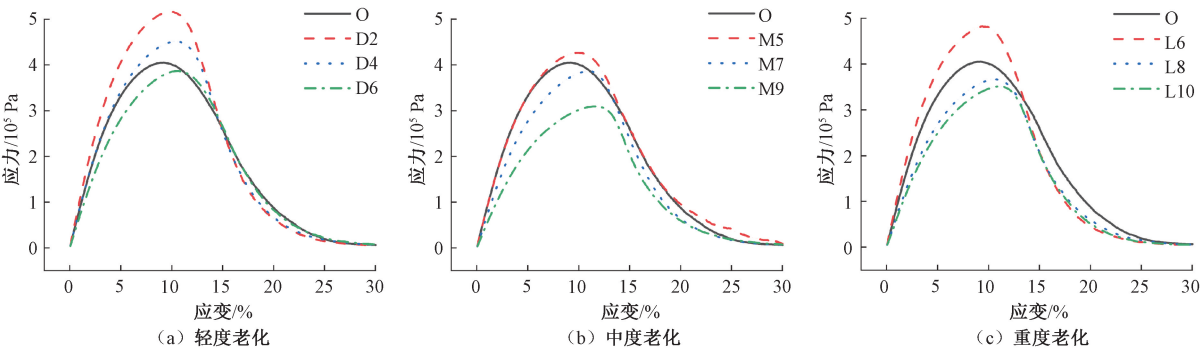


图 4 LAS 应力-应变曲线  
Figure 4 LAS stress-strain curve

LAS 试验还可获得沥青疲劳寿命  $N_f$ ,  $N_f$  越大, 沥青的抗疲劳寿命越长。各沥青在应变水平为 2.5%、5% 时的疲劳寿命  $N_f$  如图 5 所示。

由图 5 可知, 2 种应变水平下, 随着糠醛抽出油掺量的增加,  $N_f$  提高, 这印证了疲劳因子的评价结果, 即糠醛抽出油可以使沥青的抗疲劳性能改善。2.5% 的应变水平下, D6、M5、L8 掺量的再生沥青  $N_f$  与基质沥青相当, 再加大掺量,  $N_f$  提高, 抗疲劳性能更优; 5% 的应变水平下, 除 M5、L6 掺量的再生沥青  $N_f$  低于基质沥青, 其余再生沥青

的  $N_f$  均高于基质沥青, 表明糠醛抽出油提升老化沥青抗疲劳性能的能力在高应变水平下的效果更好。以 2 种应变水平下的  $N_f$  均较接近基质沥青水平为标准, 适宜的掺量为 D4、D6、M7、L8。

2.4 低温抗开裂性能

弯曲蠕变 (BBR) 试验获得的指标为蠕变劲度  $S$  和蠕变速率  $m$ 。  $S$  表示沥青在低温时抵抗荷载的能力,  $S$  越小沥青越软, 低温下不易开裂。  $m$  表示沥青在荷载作用下  $S$  的变化快慢,  $m$  越大时  $S$  变化越慢, 沥青在低温荷载作用下内部拉应力越小, 低温下也不易开裂。 沥青的 BBR 试验结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 再生沥青蠕变劲度均小于基质沥青, 蠕变速率均大于基质沥青; 随着温度升高, 各沥青蠕变劲度均减小, 蠕变速率均增大, 表明掺加糠醛抽出油能改善沥青在低温时的柔韧性和应力松弛能力, 提高低温抗开裂性能, 改善效果随掺量增加而提高。 SUPERPAVE<sup>[18]</sup> 中认为  $S < 300$  MPa 且  $m > 0.3$  时可防止沥青的低温开裂现象。 由图 6 可知, 基质沥青的蠕变劲度和蠕变速率在 -12 °C 时可达标, 其低温等级为 -22 °C。 掺加糠醛抽出油后, 在掺量为 D6、M9、L8、L10 时可将再生沥青的低温等级提升至 -28 °C, 其余掺量下低温等级仍保持 -22 °C。

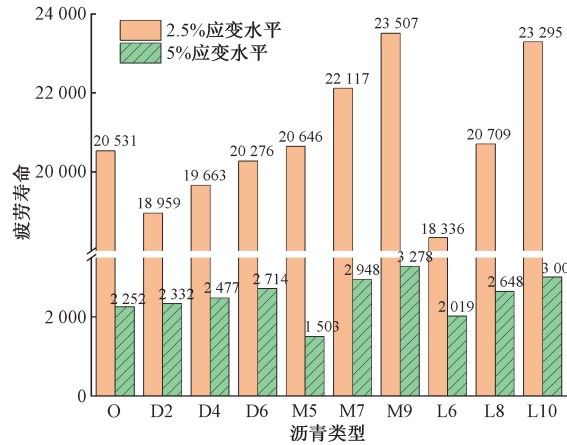


图 5 沥青疲劳寿命  
Figure 5 Fatigue life of asphalts

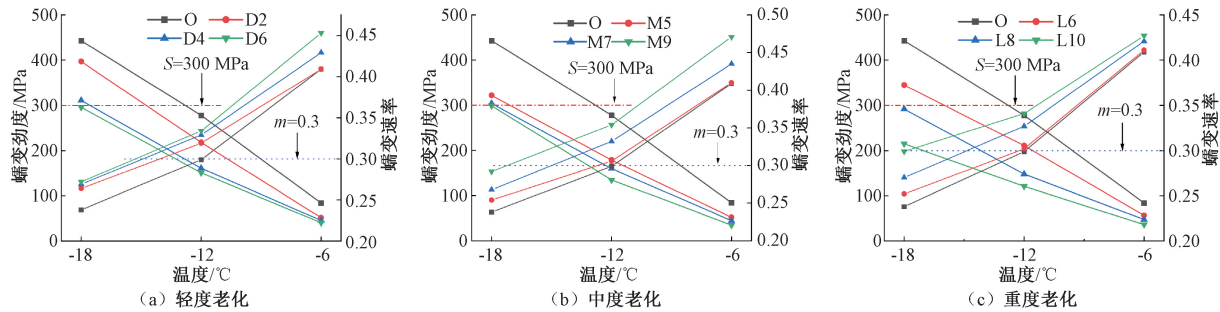


图 6 BBR 试验结果  
Figure 6 BBR test results

2.5 感温性能评价

沥青的感温性能即温度改变时,对黏滞性等性能产生影响的强弱,感温性能影响着沥青材料拌和、碾压和使用时的性能。不同使用条件下的温度不同,对感温性能的需求也不同。沥青再生中还存在黏度恢复较感温性能恢复滞后的情况<sup>[19]</sup>,因此有必要对感温性能进行研究。本文选取车辙因子指数  $GTS$  和低温蠕变指数  $STS$  评价再生沥青的感温性能,  $GTS$  试验温度为  $46\sim76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $STS$  试验温度为  $-18\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.5.1 车辙因子指数

车辙因子反映沥青高温抗变形的能力较好,与温度的线性关系也较好,  $GTS$  越大,感温性能越好。将车辙因子取对数后与温度进行线性拟合,其斜率可以反映车辙因子随温度的变化情况,计算式<sup>[20]</sup>为

$$\lg(G^*/\sin \delta) = GTS \cdot T + K。$$
 (1)

式中:  $G^*/\sin \delta$  为车辙因子,  $\text{kPa}$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $GTS$  为车辙因子指数;  $K$  为常数。

采用式(1)进行拟合,结果如表 4(第 2、3 列)所示。由表 4 可知,随着糠醛抽出油掺量增大,  $GTS$  增大,再生沥青在  $46\sim76\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的感温性能增强,但仅 M9、L10 再生沥青的感温性能优于基质沥青,其余再生沥青的感温性能较基质沥青有  $1\%\sim6\%$  的削弱。

2.5.2 低温蠕变指数

(1)蠕变劲度指数  $STS_s$ 。在  $-18\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  的低温下,将蠕变劲度  $S$  取对数后与温度进行线性拟合,其斜率定义为蠕变劲度指数  $STS_s$ 。当  $STS_s$  越大时,感温性能越好。计算式为

$$\lg S = STS_s \cdot T + M。$$
 (2)

式中:  $S$  为蠕变劲度,  $\text{MPa}$ ;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $STS_s$  为

蠕变劲度指数;  $M$  为常数。

采用式(2)进行拟合,结果如表 4 所示(第 4、5 列)。由表 4 可知,糠醛抽出油掺量增大,中度老化沥青的  $STS_s$  减小,感温性能下降;轻度和重度老化沥青的  $STS_s$  则基本无变化,感温性能不受影响。各再生沥青的  $STS_s$  都比基质沥青小,在  $-18\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  的低温下,感温性能弱于基质沥青。

(2)蠕变速率指数  $STS_m$ 。在  $-18\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  的低温下,将蠕变速率  $m$  与温度进行线性拟合,其斜率定义为蠕变速率指数  $STS_m$ 。  $STS_m$  越小时,感温性能越好。计算式为

$$m = STS_m \cdot T + N。$$
 (3)

式中:  $m$  为蠕变速率;  $T$  为温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $STS_m$  为蠕变速率指数;  $N$  为常数。

采用式(3)进行拟合,结果如表 4 所示(第 6、7 列)。由表 4 可知,糠醛抽出油掺量增大,重度老化再生沥青的  $STS_m$  减小,感温性能增强;轻度和中度老化再生沥青的  $STS_m$  增大,感温性能下降。以  $STS_m$  评价,仅 D6、M9 时的感温性能弱于基质沥青。对比  $STS_s$  和  $STS_m$  对沥青感温性能的评价,发现两者表征的感温性能变化规律不同,但  $STS_m$  与温度的相关系数比  $STS_s$  大,本文以  $STS_m$  的评价结果为准。

2.6 确定糠醛抽出油最佳掺量

通过试验测定了再生沥青的各项性能,以再生沥青各项性能均基本恢复到基质沥青水平时的掺量作为最佳掺量。综合来看,在 D4、M7、L8 的掺量下效果最佳,此时再生沥青的施工和易性、抗疲劳性、疲劳寿命、抗开裂性均与基质沥青的表现基本相当;高温性能和  $-18\sim-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的感温性能较基质沥青更优;  $46\sim76\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的感温性能稍弱,

表 4 感温性能线性拟合指标

Table 4 Linear fitting index of temperature sensitivity						
沥青试样	$GTS$	$GTS$ 与温度的 相关系数	$STS_s$	$STS_s$ 与温度的 相关系数	$STS_m$	$STS_m$ 与温度的 相关系数
O	-0.056 2	0.996	-0.060	0.940	0.014 3	0.973
D2	-0.059 8	0.999	-0.074	0.946	0.012 1	0.981
D4	-0.057 1	0.998	-0.070	0.968	0.013 3	0.980
D6	-0.056 9	0.998	-0.072	0.966	0.015 1	0.968
M5	-0.058 0	0.998	-0.066	0.960	0.010 9	0.986
M7	-0.057 8	0.997	-0.070	0.965	0.013 9	0.982
M9	-0.054 8	0.998	-0.078	0.978	0.014 9	0.969
L6	-0.058 2	0.997	-0.065	0.935	0.012 9	0.960
L8	-0.057 4	0.998	-0.066	0.979	0.012 6	0.980
L10	-0.054 7	0.997	-0.065	0.960	0.010 7	0.962

但削弱均不足 3%。可见糠醛抽出油在合适掺量下对于不同老化程度的沥青,能够恢复大部分性能至基质沥青水平,因此具有良好的再生潜力。

3 结论

(1)通过分析各沥青在宽频域下的主曲线,发现老化会使得沥青的复数剪切模量增大,高温抗变形性能增强。掺加糠醛抽出油后,模量随掺量的增加而减小,会削弱高温抗变形性能。车辙因子恢复至基质沥青水平时的掺量下,MSCR 试验表明再生沥青的高温抗变形性能比基质沥青好。

(2)糠醛抽出油对老化沥青抗疲劳性能和抗开裂性能的改善效果均随掺量的增加而提升。

(4)随糠醛抽出油掺量增加,再生沥青的感温性能在 46 ~ 76 ℃ 时增强;在 -18 ~ -6 ℃ 时,重度老化再生沥青增强,轻度和中度老化再生沥青下降。

(5)以各项指标基本恢复到基质沥青水平确定的最佳掺量为轻度老化 4%,中度老化 7%,重度老化 8%,此掺量下大部分性能与基质沥青相当。

参考文献:

[1] 王明,刘黎萍,罗东. 纳米尺度沥青微观结构特征演化分析[J]. 中国公路学报,2017,30(1):10-16.

[2] KASEER F, MARTIN A E, ARÁMBULA-MERCADO E. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States; a literature review[J]. Construction and building materials, 2019, 211:974-987.

[3] 吕伟民. 沥青再生原理与再生剂的技术要求[J]. 石油沥青,2007,21(6):1-6.

[4] KOUDELKA T, COUFALIK P, VARAUS M, et al. Rejuvenated binders, reclaimed binders and paving bitumens, are they any different? [J]. RILEM bookseries, 2018,20:208-214.

[5] 季节,孙鹏飞,黄海龙. 糠醛抽出油对道路石油沥青性能的影响分析[J]. 石油沥青,2013,27(4):6-9.

[6] MANSOURKHAKI A, AMERI M, DARYAEE D. Application of different modifiers for improvement of chemical characterization and physical-rheological parameters of reclaimed asphalt binder[J]. Construction

and building materials,2019,203:83-94.

[7] 姜化宁,曹祖斌,韩冬云,等. 催化裂化油浆糠醛抽出油调和道路沥青[J]. 应用化工,2014,43(增刊2):274-276.

[8] AKIRA S. Modified bitumen composition and method for manufacture thereof;JP20080328553 [P]. 2010-07-01.

[9] ZHANG F, HU C B, ZHANG Y. The effect of PPA on performances and structures of high-viscosity modified asphalt[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2018,134(3):1729-1738.

[10] 李路礼. 道路老化沥青再生剂研究[D]. 上海:华东理工大学,2011.

[11] 张新功,魏建明,崔海滨,等. 焦化蜡油糠醛抽出油制备沥青再生剂的研究[J]. 石油化工高等学校学报,2015,28(3):1-6.

[12] XU H P, WANG F L, SHEN B X, et al. The synthesis and application of a new asphalt hot recycling agent [J]. Petroleum science and technology, 2014,32(9):1050-1057.

[13] ZHANG H T, LIU H W, ZHANG Z D. Study on the mechanism of the repeated asphalt ageing and recycling based on the macro-performance [J]. Road materials and pavement design, 2016,17(4):920-932.

[14] WILLIAMS M L, LANDEL R F, FERRY J D. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids [J]. Journal of the American chemical society, 1955, 77(14):3701-3707.

[15] YU J M, REN Z B, GAO Z M, et al. Recycled heavy bio oil as performance enhancer for rubberized bituminous binders[J]. Polymers, 2019,11(5):800.

[16] 王超. 沥青结合料路用性能的流变学研究[D]. 北京:北京工业大学,2015.

[17] CHEN H, BAHIA H U. Modelling effects of aging on asphalt binder fatigue using complex modulus and the LAS test [J]. International journal of fatigue, 2021, 146:106150.

[18] ASTM Committee. Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR): D6648 - 2008 [S]. Berlin: Burggrafenstrasse, 2008.

[19] 陈华鑫,牛昌昌,况栋梁,等. 填料对再生沥青胶浆黏弹响应的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017,38(2):72-77.

[20] 王立志. 道路沥青温度敏感性评价方法的研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2009.

Research on Stability of Loess Roadbed Reinforced with Cement-soil Mixing Piles

DENG Yousheng, MENG Liqing, CAI Mengzhen, SUN Yani, LI Long, ZHENG Yunfang

(College of Civil and Architectural Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Aiming to solve the problem of the stability of roadbed in the condition of rainfall infiltration in loess area, cement-soil mixing pile was adopted as the foundation reinforcement treatment method. Based on the foundation geotechnical test of loess and the unconfined compressive strength test results of cement soil modified with different amounts of fly ash and coal gangue, according to the M-C criterion and the load-settlement principle of roadbed in rainfall infiltration conditions, the roadbed model treated with cement soil mixing pile in rainfall infiltration was constructed by using the finite element analysis software ABAQUS. Combined with the numerical simulation results, the load settlement variation law of loess roadbed reinforced with cement-soil mixing piles with different rainfall duration, rainfall intensity and pile elastic modulus was analyzed; the bearing characteristics of loess roadbed were discussed; and the influence of rainfall infiltration on the stability of loess roadbed was explored. The research results showed that the cement-soil mixing pile had a significant strengthening effect on the vertical direction of the loess roadbed in the condition of rainfall infiltration, and the displacement of the roadbed slope foot could increase with the increase of rainfall intensity and rainfall duration. In the condition that the rainfall intensity was 2 mm/h and the rainfall duration was 18 h, the road pavement settlement decreased with the increase of pile elastic modulus. When the elastic modulus of the pile was 300 MPa, the cement-soil mixing pile had the best reinforcement effect on the loess roadbed.

**Keywords:** rainfall infiltration; loess; cement-soil; roadbeds reinforcement; ABAQUS

(上接第 58 页)

Study on Rheological and Temperature Sensitive Properties of Recycled Asphalt from Furfural Extraction Oil

WU Wenliang, DAI Shenglin, SI Li

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In order to find out the regeneration effect of furfural extraction oil as asphalt regeneration agent on asphalt with different aging degrees, the rheological properties and temperature sensitivity of furfural extraction oil recycled asphalt were studied. By adding furfural extraction oil to asphalt with mild, moderate and severe aging degrees, the dynamic shear rheological tests and bending creep tests were used to study the influence of furfural extraction oil on the rheological properties and temperature sensitivity of aged asphalt, and the rheological properties and temperature sensitivity of recycled asphalt were evaluated with different indexes. The results showed that with the increase of furfural extraction oil content, the middle temperature fatigue resistance and low temperature crack resistance of aging asphalt were improved, and the high temperature deformation resistance was reduced. The performances of asphalt with different aging degree could be restored to the level of matrix asphalt under suitable furfural extraction oil content. The multiple stress creep test was more suitable for evaluating the high temperature deformation resistance of asphalt than the rutting factor. The evaluation results of the fatigue factor and linear scanning amplitude test on mesothermal fatigue resistance of asphalt were consistent. The temperature sensitivity of recycled asphalt had different performance in different temperature ranges. In the temperature range of 46-76 ℃, with the increase of furfural extraction oil content, the temperature sensitivity of three kinds of recycled asphalt was enhanced. In the temperature range of -18--6 ℃, the evaluation results of the creep rate index on the temperature sensitivity were better than those of the creep stiffness index. Temperature sensitivity of severe aging recycled asphalt increased with the increase of furfural extraction oil content, while the temperature sensitivity of mild and moderate aging recycled asphalt decreased. With the basic recovery of each index to the same as the virgin asphalt, the optimum content was determined as mild aging 4%, moderate aging 7%, severe aging 8%.

**Keywords:** furfural extraction oil; recycled asphalt; degree of asphalt aging; rheological properties; temperature sensitivity