

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.07.002

大掺量胶粉改性沥青胶结料流变性能对比研究

王国清¹, 曹东伟², 王志斌¹, 邱文利¹, 张少波¹

(1. 河北雄安京德高速公路有限公司, 河北 保定 071000; 2. 中路高科交通检测检验认证有限公司, 北京 100088)

摘要:废旧橡胶粉用于沥青改性技术可显著改善沥青的各项路用性能,同时提高废旧轮胎的循环利用率,近年来带来了显著的经济效益和社会效益。针对目前传统橡胶沥青技术的胶粉掺量普遍较低(通常不高于20%)的现状,从流变测量学的角度出发,对大掺量胶粉改性沥青(最高至50%)的路用技术性能开展了室内试验对比研究。通过动态剪切流变仪对基质沥青和不同掺量的胶粉改性沥青进行了频率扫描和多应力蠕变恢复试验,基于不同加载条件和工况下的动态力学响应分析,系统表征了胶粉改性沥青的黏弹特性和高温蠕变力学行为。结果表明:大掺量胶粉的加入进一步显著提高了沥青的弹性成分,沥青的储能模量与损耗模量随着胶粉掺量的增加而提高。基于时-温等效原理构建了沥青动态剪切模量和相位角主曲线,在低频区(高温区)内,大掺量胶粉改性沥青的动态剪切模量显著高于普通橡胶沥青(20%掺量),其相位角则小于普通橡胶沥青;而在高频区(低温区)内,大掺量胶粉改性沥青的线黏弹性指标与普通橡胶沥青的差异明显减小。在0.1 kPa和3.2 kPa蠕变应力条件下,随着胶粉掺量的增加,40%胶粉掺量的改性沥青体现出更好的抗车辙性能,50%胶粉掺量与30%胶粉掺量条件下改性沥青的黏弹特性和高温蠕变力学指标则较为接近。

关键词:道路工程;胶粉改性沥青;流变学;黏弹特性;动态模量;蠕变恢复

中图分类号:U414

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2022)07-0007-08

Comparative Study on Rheological Properties of Asphalt Binder Modified with High Content Crumb Rubber

WANG Guo-qing¹, CAO Dong-wei², WANG Zhi-bin¹, QIU Wen-li¹, ZHANG Shao-bo¹

(1. Hebei Xiong'an Jingde Expressway Co., Ltd., Baoding Hebei 071000, China;

2. China-Road Transport Verification & Inspection Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The application of waste rubber powder in asphalt modification technology can significantly improve the road performance of asphalt and improve the recycling utilization of waste tires, which has brought remarkable economic and social benefits in recent years. In view of the current situation that the content of rubber powder in traditional rubber asphalt technology is generally low (usually no more than 20%), from the point of view of rheological measurement, a comparative study on the road technical performance of asphalt modified with large content of rubber powder (up to 50%) is carried out in laboratory. The frequency scanning and multi-stress creep recover test on matrix asphalt and asphalts modified with different contents of rubber powder are carried out by dynamic shear rheometer. The viscoelastic properties and high temperature creep mechanical behavior of rubber powder modified asphalt are characterized systematically based on the dynamic mechanical response analysis under different loading conditions and working conditions. The result shows that (1) The addition of large content of rubber powder further significantly improved the elastic composition of asphalt, and the storage modulus and loss modulus of asphalt increased with the increase of

收稿日期:2022-01-12

基金项目:河北省交通运输厅科技项目(2020-08)

作者简介:王国清(1966-),男,天津红桥人,博士,高级工程师。(879818969@qq.com)

rubber powder content. (2) The dynamic shear modulus and phase angle master curves of asphalt are constructed based on the time-temperature equivalence principle. In the low frequency zone (high temperature zone), the dynamic shear modulus of high content rubber powder modified asphalt is significantly higher than that of ordinary rubber asphalt (20% content), its phase angle is smaller than that of ordinary rubber asphalt. While in the high frequency zone (low temperature zone), the difference of linear viscoelastic indicator between high content rubber powder modified asphalt and ordinary rubber asphalt is significantly reduced. (3) Under the condition of 0.1 kPa and 3.2 kPa creep stress, with the increase of rubber powder content, the modified asphalt with 40% rubber powder content shows better anti-rutting performance, and the viscoelastic properties and high temperature creep mechanical indicator of modified asphalt with 50% rubber powder content are close to those of modified asphalt with 30% rubber powder content.

Key words: road engineering; crumb rubber modified asphalt; rheology; viscoelasticity; dynamic modulus; creep recovery

0 引言

汽车工业的快速发展给人们的生活带来了巨大便利,但由此引发的环境污染问题日益严重,仅2011年我国废旧轮胎产生量便达到 1.018×10^7 t^[1]。汽车废旧轮胎难以分解,长期堆放会阻碍动植物生长,对环境造成不可逆的伤害。近年来,将废旧轮胎制成胶粉改性剂添加至沥青路面中是一种公认的绿色解决方案,胶粉改性沥青可以大量消耗废旧轮胎,减少道路建设中对自然资源的利用^[2-3],1 km的橡胶沥青路面可消耗约4 000条废旧轮胎^[4]。废旧橡胶粉用于沥青改性技术极大地降低了路面养护成本,提高了废旧轮胎的无害化利用率,在资源紧缺、提倡节能环保、可持续发展的当今社会有着重要的现实意义^[5]。

普通橡胶沥青的胶粉掺量都在20%左右,美国ASTM规范规定橡胶沥青的胶粉掺量不得低于15%^[6];南非规范规定废胎胶粉含量在18%~24%之间;澳大利亚的废胎胶粉含量约为25%^[7]。大掺量胶粉改性沥青的胶粉含量通常在30%以上,我国目前已有关于大掺量胶粉改性沥青制备技术的研究^[8]。大掺量橡胶沥青路面在保证沥青路面具有较好高温稳定性、抗老化性、抗疲劳性的同时,提高了废旧胶粉的利用率,更大程度地让橡胶粉得到合理利用^[9-13]。

我国学者已对普通橡胶沥青技术开展了丰富的研究,并且取得了较为深刻的认识^[14-18],包括橡胶沥青的形成机理、微观结构、老化机理、多尺度研究等等。但对于大掺量胶粉改性沥青的研究较少,尤其是当胶粉掺量达到50%左右。因此本研究从流变测量学的角度出发,对大掺量胶粉改性沥青的路

用性能开展了室内试验对比研究。根据加载方式的不同,常规的流变学试验包括应变扫描试验、频率扫描试验、温度扫描试验和蠕变试验等。流变测量学的目的是为了研究材料在不同加载条件下的动态力学响应。曹丽萍等使用动态剪切流变仪(Dynamic Shear Rheometer, DSR)对7种SBS改性沥青进行扫描试验,得到其相应的温度谱,同时基于温度谱得到的储能模量、损耗模量对SBS改性沥青其他黏弹性能的影响因素进行了分析。褚浩然等利用DSR扫描试验分析了沥青胶结料相关的黏弹参数,提出了综合评价沥青胶结料的高、低温动态流变指标。本研究结合已有沥青流变学研究成果,采用流变学的表征理论和方法,系统分析了大掺量胶粉改性沥青的线黏弹特性和高温蠕变特性。

1 材料与试验

1.1 试验材料

本研究所用的试验材料来自雄安新区京德高速公路实体建设工程,沥青胶结料种类共5种,包括1种基质沥青和4种胶粉改性沥青。其中基质沥青为70#道路石油沥青,胶粉改性沥青的掺量分别为20%,30%,40%和50%。技术性能指标如表1所示。

1.2 试验设备

本研究的主要沥青试验设备为奥地利某公司生产的MCR302动态剪切流变仪(Dynamic Shear Rheometer, DSR)。该型号流变仪采用模块化及智能化设计,具有完备的温控系统、夹具系统和扭矩输出系统,可进行应力控制或应变控制下的旋转测试,并在试验过程中实时采集样品应力应变响应、动态剪切模量等数据。

表 1 不同胶粉掺量的改性沥青技术指标
Tab. 1 Technical indicators of modified asphalt with different contents of rubber powder

指标	70# 基质沥青	不同胶粉掺量改性沥青		
		30% 掺量	40% 掺量	50% 掺量
针入度 (25 ℃, 5 s, 100 g)/ (0.1 cm)	76	41	42	45
延度 (5 ℃, 5 cm/min)/ cm	24	17	16	13
软化点 ($T_{R\&B}$)/ ℃	72	89.5	84.0	74.0
离析/ ℃	0.5	1.0	2.0	2.5
弹性恢复 (25 ℃) /%	94	96	95	91
布氏旋转黏度 (180 ℃)/ (Pa · s)	1.27	3.02	2.13	3.39
5 ℃ 测试延度最大力/N	—	102.8	91.3	77.6
闪点 (coc)/ ℃	243	274	276	278
PG 等级/℃	72~22	88~28	88~22	76~22

本研究共用到两种 DSR 平行板模具, 其直径分别为 25 mm 和 8 mm。其中, 25 mm 平行板模具用于沥青高温测试 (40 ℃ 以上), 对应平行板间隙为 1 mm; 8 mm 平行板模具用于沥青中温测试 (40 ℃ 以下), 对应平行板间隙为 2 mm。

1.3 试验方法

1.3.1 频率扫描试验

频率扫描试验是测量沥青线黏弹性力学参数的主要试验方法。在单一温度条件下, 通过对试样施加不同加载频率的小应变水平动态剪切试验, 可以获得沥青材料线黏弹性范围内的动态力学响应, 本研究中使用的频率扫描范围是 0.1 ~ 100 rad/s, 试验温度从 10 ℃ 依次增加到 70 ℃, 然后基于不同温度下的频率扫描试验结果, 结合时温等效原理能够将不同温度下的频率扫描数据进行水平位移, 得到一条代表沥青线黏弹性特征的动态剪切模量主曲线。本研究采用的 Christensen-Anderson-Marasteanu (CAM) 方程为沥青动态模量主曲线的拟合方程, 具体表达公式如下:

$$|G^*| = \frac{|G_g^*|}{[1 + (f_c/f')^k]^{m/k}}, \quad (1)$$

式中, $|G_g^*|$ 为沥青的玻璃态剪切模量, 本研究取 10^9 Pa; m , k 为形状拟合参数; f_c 为关于加载频率的主曲线位置拟合参数; f' 为换算加载频率, 按式 (2) 计算。

$$f' = \phi_T \times f, \quad (2)$$

式中, f 为实际加载频率; ϕ_T 为温度位移因子; 温

度位移因子可以通过 Williams-Landel-Ferry (WLF) 非线性拟合方程计算得到, 方程的具体形式如式 (3) 所示。

$$\lg \phi_T = -\frac{D_1 \cdot (T - T_0)}{D_2 + (T - T_0)}, \quad (3)$$

式中, T 为施加加载温度; T_0 为主曲线参考温度; D_1 , D_2 为 WLF 方程的拟合参数。

根据以上公式, 得到沥青频率扫描试验不同温度下的温度位移因子及换算加载频率, 且由 CAM 模型可给出沥青动态模量的预测值, 将试验测得的沥青动态模量按照换算加载频率进行水平位移, 即可得到一条表征沥青线黏弹性特征的动态模量主曲线。

1.3.2 多应力蠕变恢复试验

多应力蠕变恢复 (Multiple Stress Creep Recover, MSCR) 试验, 该试验在动态剪切流变仪 (Dynamic Shear Rheometer, DSR) 上完成, 试验结果能较好地反映沥青材料对高温车辙等病害的敏感性, 已经普遍用于国内外沥青以及沥青材料的高温黏弹性能分析评价。试验中分别选用 0.1 kPa 和 3.2 kPa 的蠕变应力水平对试样进行逐级加载, 每个应力水平进行 10 个周期, 每个周期包括 1 s 的加载阶段和 9 s 的卸载阶段。根据沥青在 MSCR 试验中的蠕变恢复曲线结果, 计算不可恢复柔量 (J_{nr}) 和恢复率百分比 (R) 分别表征沥青的蠕变恢复性能。每个加载周期内 R 和 J_{nr} 指标的计算公式如下, 最后将每级应力条件下 10 次循环的 R 和 J_{nr} 平均值作为指标代表值。

$$R = \frac{\gamma_p - \gamma_{nr}}{\gamma_p - \gamma_0}, \quad (4)$$

$$J_{nr} = \frac{\gamma_{nr} - \gamma_0}{\tau}, \quad (5)$$

式中, γ_p 为每个加载周期内的峰值应变; γ_{nr} 为每个加载周期内的残留应变; γ_0 为每个加载周期内的初始应变; τ 为每个加载周期内的蠕变应力。

2 胶粉改性沥青线黏弹特性分析

2.1 胶粉改性沥青模量主曲线

沥青材料是典型的黏弹性材料, 在交变应力作用下表现为动态黏弹性。其中储能模量是沥青材料重要的黏弹性参数之一。储能模量反映材料的弹性部分的贡献, 不涉及能量的转换, 储能模量越大, 表明材料中弹性成分越大, 弹性恢复能力越强, 因此储能模量与沥青的高温抗车辙能力具有一定程度的联系。对不同胶粉掺量的橡胶沥青进行 DSR 频率扫描试验, 并分别建立了沥青的储能模量主曲线、

损耗模量主曲线和动态剪切模量主曲线。

图1为胶粉改性沥青和基质沥青的储能模量主曲线。可以看到,不论是基质沥青还是胶粉改性沥青,其储能模量均是随着加载频率的增加而增加的。在低频区70#基质沥青的储能模量最低,40%胶粉掺量的橡胶沥青储能模量最大。橡胶沥青的储能模量变化规律相似且与基质沥青明显区别开来。低频区(高温)所有橡胶沥青的储能模量值均高于基质沥青,这表明橡胶颗粒的加入增加了沥青中的弹性成分,提高了沥青的高温变形恢复能力。还能看到,大掺量胶粉改性沥青的储能模量均显著高于普通橡胶沥青(20%掺量),且随着胶粉掺量的增加,储能模量也在逐渐增加,但值得注意的是,这种增加不是没有限制的,试验结果表明,50%胶粉掺量橡胶沥青的储能模量与30%橡胶沥青的储能模量值几乎相同,二者数据点存在大量重合,因此40%的胶粉掺量可能是最佳胶粉掺量。在高频区(低温)能够明显注意到,基质沥青储能模量逐渐超过了橡胶沥青,因此橡胶改性剂对于沥青流变性能的提升仅在高温条件下较为显著,在低温条件下弹性成分的增加并不能显著改善沥青的低温流变性能。

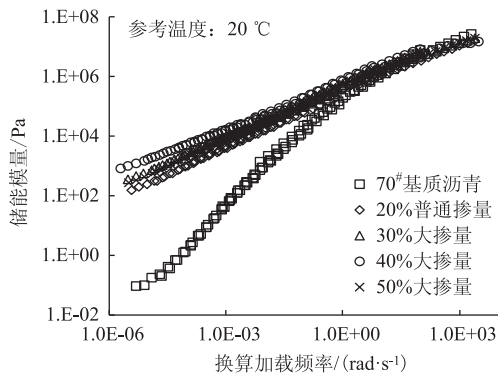


图1 不同沥青的储能模量主曲线

Fig.1 Master curves of storage moduli of different asphalts

损耗模量可以定量描述交变荷载作用下材料内部以摩擦形式为主要损失形式的能量,用来表征材料耗散变形的能力,可以在一定程度上评价沥青材料的抗疲劳特性,损耗模量越低,表明沥青材料的抗疲劳特性越好。图2是胶粉改性沥青和基质沥青的损耗模量主曲线,可以看出,不论是基质沥青还是改性沥青,其损耗模量均是随着加载频率的增加而增加的。在低频区70#基质沥青的损耗模量最低,40%胶粉掺量橡胶沥青的损耗模量最大。与普通橡胶沥青相比,大掺量胶粉的改性沥青的损耗模量较

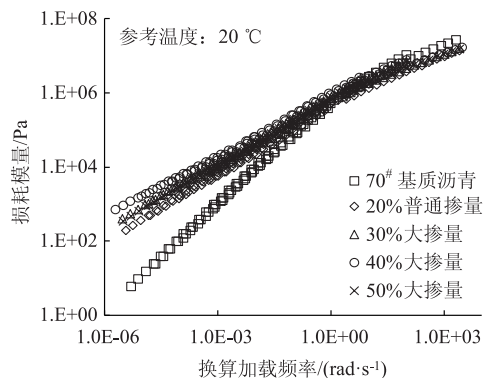


图2 不同沥青的损耗模量主曲线

Fig.2 Master curves of loss moduli of different asphalts

大,这可能是由于橡胶颗粒的增多增加了沥青内部发生摩擦的几率,从而增加了材料内部损失的模量。与储能模量的分析结果类似,50%胶粉掺量橡胶沥青表现出的宏观黏弹特性与30%胶粉掺量橡胶沥青相同,二者数据点存在大量重合。在高频区70#基质沥青的损耗模量已经超过了橡胶沥青的损耗模量,这表明橡胶颗粒的加入将显著改善低温时沥青材料的抗疲劳特性。高频区内普通橡胶沥青的损耗模量依然低于大掺量胶粉改性沥青,但与低频区不同的是,普通橡胶沥青与大掺量胶粉改性沥青的差异在逐渐减小。因此,普通橡胶沥青的抗疲劳特性要优于大掺量胶粉改性沥青,胶粉改性剂的加入能够增强沥青的抗低温开裂能力,但高温条件下基质沥青的抗疲劳能力则要优于胶粉改性沥青。与基质沥青相比,胶粉改性沥青有着更好的高温抗车辙能力和低温抗开裂能力。

基质沥青和橡胶沥青的动态剪切模量主曲线和WLF温度位移因子分别如图3和图4所示。动态剪切模量是沥青在动态荷载作用下的强度指标,普遍认为沥青复数模量值越大,其高温抗车辙能力越好。可以看到,在低频区(高温)40%胶粉掺量橡胶沥青有着最高的复数模量值,基质沥青的模量值明显低于其余4种橡胶沥青,普通橡胶沥青的复数模量值则低于大掺量胶粉改性沥青。在进入高频区(低温)以后,普通橡胶沥青与大掺量胶粉的改性沥青的模量值差异显著下降,有较多数据点存在重合。这说明与普通橡胶沥青相比,大掺量胶粉的改性沥青的抗车辙能力提升在高温范围内更加明显。此外,胶粉掺量对沥青模量主曲线也有显著影响。在一定范围内,橡胶沥青复数模量将随着胶粉掺量的增加而增加,40%胶粉掺量橡胶沥青的复数模量值明显高于30%胶粉掺量橡胶沥青及普通橡胶沥青。需要

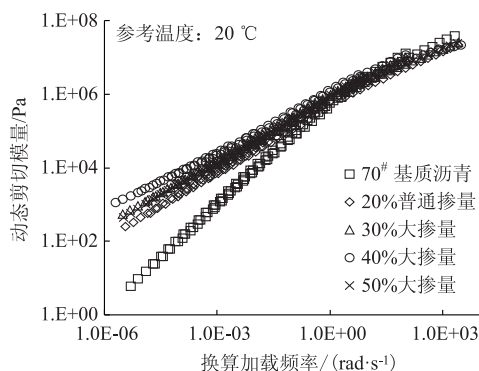


图3 动态剪切模量主曲线

Fig. 3 Master curves of dynamic shear modulus

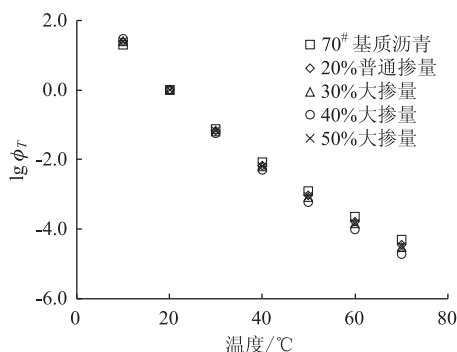


图4 WLF 温度位移因子

Fig. 4 WLF temperature shift factor

指出的是, 50%胶粉掺量橡胶沥青的模量主曲线与30%胶粉掺量模量主曲线几乎重合, 这表明胶粉掺量对于沥青高温抗车辙能力的提升存在最优化问题, 其抗车辙能力不会随着胶粉掺量的增加而持续增加。

2.2 胶粉改性沥青相位角主曲线

相位角是沥青等黏弹性材料特有的评价指标, 它表征由于黏性作用的影响, 材料自身应变与应力之间响应的延迟作用。对于完全黏性材料, 应变响应落后应力发生一个周期, 即相位角 $\delta = 90^\circ$; 应变与应力响应完全同步的材料属于完全弹性材料, 此时相位角 $\delta = 0^\circ$ 。沥青作为典型的黏弹性材料其相位角位于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。普通橡胶沥青与大掺量胶粉改性沥青相位角主曲线如图5所示。

不同加载频率下, 70#基质沥青的相位角大于胶粉改性沥青的相位角, 因此相比于基质沥青, 橡胶沥青的弹性特征更为突出。相比于普通橡胶沥青, 大掺量胶粉改性沥青的相位角较小, 其弹性行为更加显著。同一换算加载频率下, 普通橡胶沥青的相位角最大, 40%胶粉掺量橡胶沥青的相位角最小, 而30%和50%胶粉掺量橡胶沥青的相位角则位于二

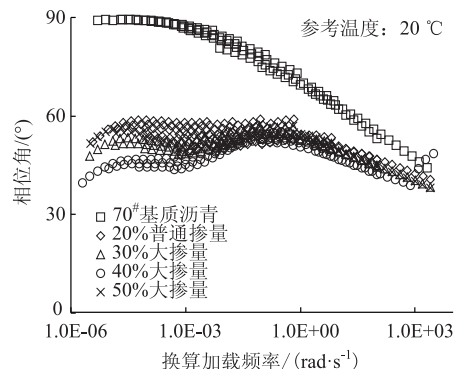


图5 不同沥青相位角主曲线

Fig. 5 Master curves of phase angles of different asphalts

者之间。由于缺少橡胶颗粒的加入, 基质沥青的黏性则更加显著。对于大掺量胶粉改性沥青而言, 随着胶粉掺量的增加, 弹性特征表现得愈加明显。还能注意到, 相位角的变化受到温度或者加载频率的显著影响。在低频(高温)区, 基质沥青与胶粉改性沥青的相位角差异较大, 且普通橡胶沥青与大掺量胶粉改性沥青之间的相位角也存在显著差异。而在高频(低温)区, 以上5种沥青的相位角差异显著减小, 相位角指标对于沥青的低温性能没有显著的区分度。可见, 相比于普通橡胶沥青, 大掺量胶粉改性沥青的优势主要体现在高温条件下的弹性性能。

2.3 胶粉改性沥青相位角和动态模量相关性分析

动态力学分析的主要技术之一就是利用温度和频率之间的相互关系构建主曲线, 以在更低的频率或更长的时间尺度上产生连续的流变参数变化。而Black Space图是由频率扫描试验中直接测得的复数剪切模量和相位角绘制的, 无需对流变数据进行任何处理, 因此能够方便地评价胶粉改性剂和胶粉掺量对基质沥青流变性能的影响。Black Space图消除了加载频率和试验温度的影响, 能够在一张曲线图中呈现所有动态力学响应数据。

基质沥青、普通橡胶沥青和大掺量胶粉改性沥青的Black Space曲线如图6所示, 可以看到Black Space曲线提供了一种快速、方便的方法来识别流变数据中的差异, 它能够区分基质沥青、普通橡胶沥青和大掺量胶粉改性沥青独特的流变行为, 而这也是前述分析无法做到的。在前文的研究中, 无论是模量主曲线还是相位角主曲线, 都只能区分基质沥青和胶粉改性沥青(普通掺量和大掺量)的流变特性, 而无法进一步区分普通橡胶沥青和大掺量胶粉

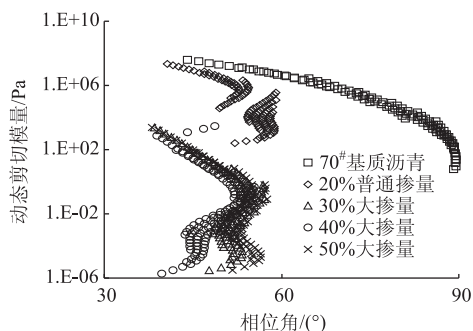


图6 不同沥青 Black Space 曲线

Fig. 6 Black Space curves of different asphalts

改性沥青的流变行为,因此 Black Space 图有助于我们深刻理解普通橡胶沥青和大掺量胶粉改性沥青之间的流变行为差异。

同时,与基质沥青相比,普通橡胶沥青和大掺量胶粉改性沥青都显示出聚合物网络的存在,这主要体现在流变数据朝着更低的相位角(更大的弹性行为)偏移。由于胶粉改性剂的加入,橡胶沥青表现出的流变学行为比基质沥青更加复杂,曲线反弯点较多,但相同的是,3 大类沥青 Black Space 图都存在一部分线性变化的阶段,利用该线性部分可以估计不同沥青材料的极限刚度。此外,低刚度条件下,不同沥青的相位角差异更加显著,40%掺量橡胶沥青的相位角最小,表明其弹性行为最为显著。在较大刚度条件下,不同胶粉掺量橡胶沥青的相位角差异明显减小,但仍低于基质沥青,因此胶粉改性后的沥青弹性行为更加突出。相比于普通橡胶沥青,大掺量胶粉改性沥青(30%大掺量、40%大掺量、50%大掺量)的变化趋势较为相似。在复数模量的中间段,曲线出现反弯点,在反弯点之后,曲线朝着更低的相位角偏移。

3 胶粉改性沥青高温蠕变恢复特性分析

3.1 胶粉掺量对沥青蠕变恢复性能的影响

不同种类沥青在 60 °C 下不同沥青的 MSCR 试验结果如图 7 所示,据此计算出的 MSCR 评价指标弹性恢复率(R)和不可恢复柔量(J_{ir})汇总于表 2 中。可以看出,大掺量胶粉改性沥青高温下的变形恢复能力明显高于普通橡胶沥青。例如当加载应力为 0.1 kPa 时,普通橡胶沥青弹性恢复率为 82.16%,而相同条件下,40%胶粉掺量橡胶沥青的弹性恢复率达到了 96.92%,是普通橡胶沥青的 1.18 倍。0.1 kPa 应力条件下,40%胶粉掺量橡胶沥青的不可恢复柔量值仅为 0.000 4 kPa⁻¹,普通橡胶沥青的不

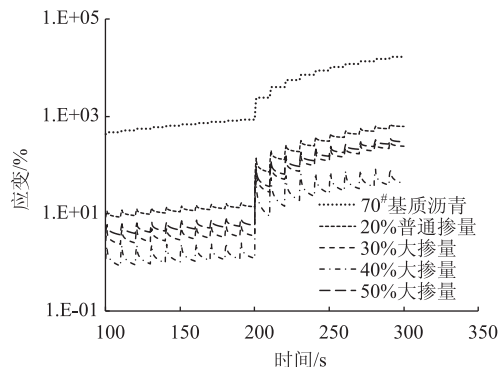


图7 不同沥青 MSCR 试验的时间-应变测试结果

Fig. 7 MSCR test based time-strain results of different asphalts

表2 MSCR 评价指标计算结果

Tab. 2 Calculation result of MSCR evaluation indicators

沥青种类	0.1 kPa 应力		3.2 kPa 应力	
	$R/\%$	J_{ir}/kPa^{-1}	$R/\%$	J_{ir}/kPa^{-1}
70# 基质沥青	1.73	4.27	-1.43	4.92
20% 普通掺量	82.16	0.06	52.97	0.19
30% 大掺量	94.41	0.01	70.81	0.07
40% 大掺量	96.92	0.000 4	91.11	0.01
50% 大掺量	90.82	0.02	66.83	0.09

可恢复柔量值为 0.06 kPa⁻¹,是 40%胶粉掺量橡胶沥青的 150 倍。沥青的 J_{ir} 指标在一定程度上表征沥青的高温抗变形能力,可以看作沥青的高温强度指标, J_{ir} 指标值越大,其高温变形能力越强,沥青的潜在抗车辙性能越差,越容易产生永久变形。由此可见,在提高胶粉掺量以后,沥青的高温恢复性能将得到显著改善,高温抗车辙能得到大幅增强。

此外,胶粉掺量对沥青的高温蠕变特性也有显著影响。从 R 和 J_{ir} 的计算结果可以看到,除 50%粉胶比外,随着胶粉掺量的增加,沥青的弹性恢复率逐渐增加而不可恢复柔量逐渐降低。在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 应力水平下,20%胶粉掺量的弹性恢复率最差,不可恢复柔量值最大;40%胶粉掺量橡胶沥青的弹性恢复性能最好,不可恢复柔量值也最小。30%和 50%胶粉掺量橡胶沥青的高温弹性恢复能力接近,均位于 20%胶粉掺量和 40%胶粉掺量之间。

3.2 胶粉改性沥青蠕变恢复性能温度敏感性分析

沥青是一种黏弹性材料,对温度变化较为敏感。温度敏感性的强弱直接影响到沥青胶结料的路用性能,因此基于 MSCR 的试验结果,本节分析了大掺量胶粉改性沥青和普通橡胶沥青在不同温度下的高温蠕变力学响应规律,MSCR 的试验温度分别为

60, 64, 70, 76, 82 °C 和 88 °C。

图8展示了不同温度下两种沥青高温蠕变恢复率指标的计算结果。从蠕变恢复率 R 的计算结果可以看出,温度变化对沥青的高温蠕变性能具有显著影响,不同温度下蠕变恢复率 R 的计算结果具有较大差异,随着温度增加,沥青的蠕变恢复能力逐渐下降。普通橡胶沥青和大掺量胶粉改性沥青均表现出优于基质沥青的高温变形恢复能力,在0.1 kPa应力条件下,70[#]基质沥青在88 °C时的蠕变恢复率 R 降低至-42.95%,而普通橡胶沥青和40%掺量胶粉改性沥青的蠕变恢复率 R 分别为47.20%和92.20%,明显高于基质沥青,因此胶粉改性剂能够显著提升高温条件下沥青的蠕变恢复能力。相比于普通橡胶沥青,大掺量胶粉改性沥青的温度敏感性更弱,不同温度条件下的蠕变恢复率 R 的变化幅度更小。在0.1 kPa应力条件下,普通橡胶沥青60 °C时的蠕变恢复率 R 为82.16%,而88 °C时的蠕变恢复率 R 将至47.20%,下降了34.96%。40%掺量胶粉改性沥青60 °C时的蠕变恢复率 R 为96.92%,而88 °C时的蠕变恢复率 R 将至92.20%,仅下降了4.72%,其变化幅度明显小于普通橡胶沥青。30%掺量胶粉改性沥青和50%掺量胶粉改性沥青的蠕变恢复率 R 则分别降低了27.06%和26.47%,均低于普通橡胶沥青,因此温度变化对普通橡胶沥青的高温恢复性能影响较大,对大掺量胶粉改性沥青的影响较小,其中40%胶粉掺量改性沥青的温度敏感性最弱,其蠕变恢复率 R 随温度变化幅度最小。

图9分别展示了0.1 kPa和3.2 kPa应力条件下的 J_{ir} 计算结果。由于基质沥青和胶粉改性沥青的 J_{ir} 指标数值计算结果相差较大,使用同一个坐标轴不易观察到所有指标的变化趋势,因此将基质沥青和胶粉改性沥青的指标计算结果分两部分进行表示。从不可恢复柔量 J_{ir} 的计算结果可以看出,温度变化对沥青的高温抗车辙性能具有显著影响,不同温度下不可恢复柔量 J_{ir} 计算结果具有较大差异,随着温度增加,不可恢复柔量 J_{ir} 逐渐增加,这表明沥青的抗车辙能力逐渐下降。普通橡胶沥青和大掺量胶粉改性沥青均表现出优于基质沥青的高温抗车辙能力,在0.1 kPa应力条件下,70[#]基质沥青88 °C时的不可恢复柔量 J_{ir} 为117.432 kPa⁻¹,而普通橡胶沥青和40%掺量胶粉改性沥青的不可恢复柔量 J_{ir} 分别为2.717 kPa⁻¹和0.093 kPa⁻¹,明显低于基质沥青,因此胶粉改性剂能够显著提升高温条件下沥青的抗车辙能力,不易产生路面永久变形。相比于普通橡胶

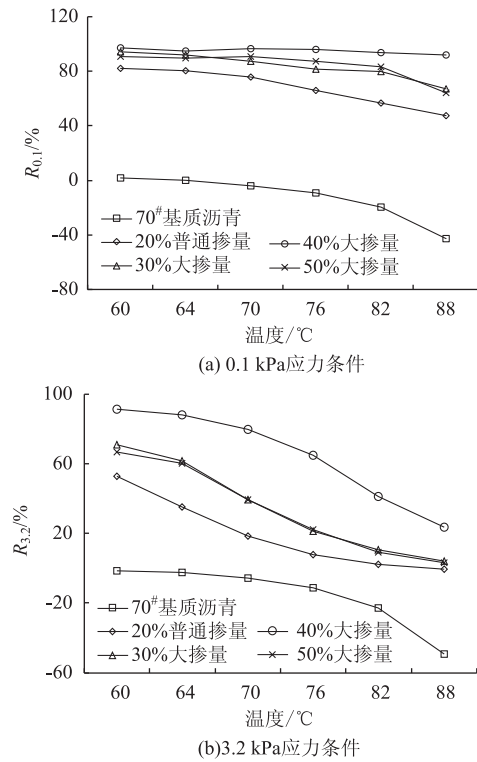


图8 不同温度下 R 的计算结果

Fig. 8 Calculation result of R at different temperatures

沥青,大掺量胶粉改性沥青的温度敏感性更弱,不同温度条件下的不可恢复柔量 J_{ir} 的变化幅度更小。在0.1 kPa应力条件下,普通橡胶沥青60 °C时的不可恢复柔量 J_{ir} 为0.06 kPa⁻¹,而88 °C时的不可恢复柔量 J_{ir} 增加至2.717 kPa⁻¹,增加了2.657 kPa⁻¹。40%掺量胶粉改性沥青60 °C时的不可恢复柔量 J_{ir} 为0.004 kPa⁻¹,而88 °C时的不可恢复柔量 J_{ir} 增加至0.093 kPa⁻¹,仅增加了0.089 kPa⁻¹,其变化幅度明显小于普通橡胶沥青。30%掺量胶粉改性沥青和50%掺量胶粉改性沥青的不可恢复柔量 J_{ir} 则分别增加了0.728 kPa⁻¹和0.845 kPa⁻¹,均低于普通橡胶沥青,因此温度变化对普通橡胶沥青的高温抗车辙性能影响较大,对大掺量胶粉改性沥青的影响较小,其中40%胶粉掺量改性沥青的温度敏感性最弱,其不可恢复柔量 J_{ir} 随温度变化幅度最小。

4 结论

(1) 基于时-温等效原理测评了沥青的模量主曲线,不同沥青储能模量和损耗模量均是随着加载频率的增加而增加的。低频区内所有橡胶沥青的储能模量均高于基质沥青,且大掺量胶粉改性沥青的储能模量和复数模量要高于普通橡胶沥青,因此大掺量胶粉改性沥青高温抗车辙能力优于普通橡胶沥青。

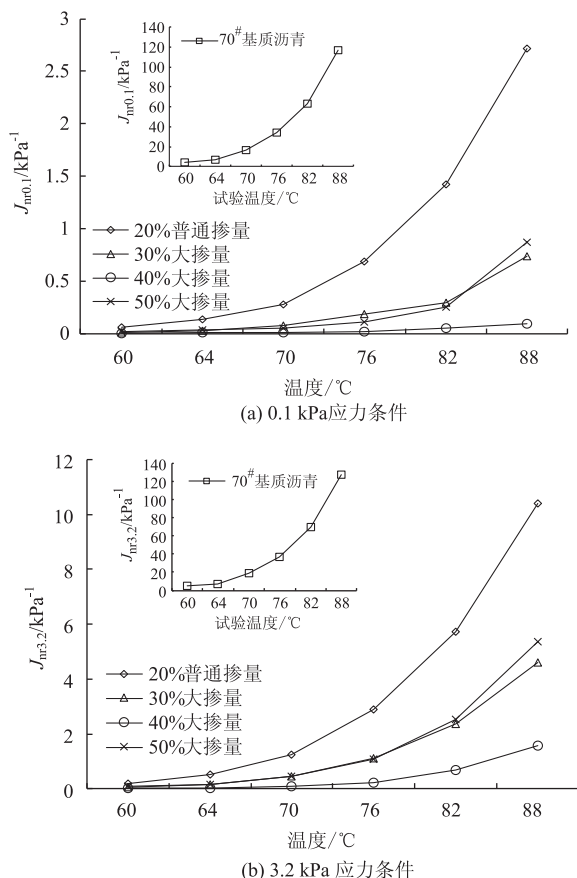


图9 不同温度下 J_{nr} 的计算结果

Fig.9 Calculation result of J_{nr} at different temperatures

(2) 高频区内基质沥青的损耗模量最大,普通橡胶沥青的损耗模量低于大掺量胶粉改性沥青,胶粉改性剂的加入提高了基质沥青的低温抗裂能力,普通橡胶沥青抗疲劳特性优于大掺量胶粉改性沥青。

(3) 同一加载频率下,大掺量胶粉改性沥青的相位角较小,其弹性行为更加显著。相比于普通橡胶沥青,大掺量胶粉改性沥青的优势主要体现在高温条件下的弹性性能。30%和50%大掺量胶粉改性沥青表现出的线黏弹特性较为接近。

(4) 相同温度和应力条件下,40%胶粉掺量的蠕变恢复率最大而不可恢复柔量值最小,具有最优的高温恢复能力和高温抗车辙能力,而30%和50%大掺量胶粉改性沥青的高温蠕变力学指标较为接近。

(5) 在不同的应力水平和温度条件下,40%胶粉掺量改性沥青的应力敏感性和温度敏感性最弱,各项高温力学指标波动幅度最小,高温稳定性较好。

参考文献:

References:

报告(2012)》[J]. 再生资源与循环经济, 2013, 6 (4): 4.

Anon. National Development and Reform Commission Issued Annual Report on Comprehensive Utilization of Resources in China (2012) [J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2013, 6 (4): 4.

[2] HUANG Y, BIRD R N, HEIDRICH O. A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2007, 52 (1): 58-73.

[3] BATAYNEH M K, MARIE I, ASI I. Promoting the Use of Crumb Rubber Concrete in Developing Countries [J]. Waste Management, 2008, 28 (11): 2171-2176.

[4] 李明亮. 废轮胎胶粉改性沥青材料的路用性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.

LI Ming-liang. Study on Road Performance of Asphalt Modified by Waste Tire Rubber Powder [D]. Da'lian: Da'lian University of Technology, 2007.

[5] 李丽丽. 高掺量橡胶沥青技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

LI Li-li. Study on Technology of High Content Rubber Asphalt [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

[6] ASTM—D6114, Standard Specification for Asphalt-rubber Binder [S].

[7] 交通部公路科学研究院. 橡胶沥青及混合料设计施工技术指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

Research Institute Highway of MOT. Guide for Design and Construction of Asphalt Rubber and Mixtures [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.

[8] 王国清. 一种废旧橡胶粉改性沥青及其制备方法: CN103881405A [P]. 2014-06-25.

WANG Guo-qing. A Waste Rubber Powder Modified Asphalt and Its Preparation Method; CN103881405A [P]. 2014-06-25.

[9] 何兆益, 危接来, 吴宏宇, 等. 废轮胎胶粉改性沥青性能研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28 (6): 1025-1027, 1059.

HE Zhao-yi, WEI Jie-lai, WU Hong-yu, et al. Performance Research on Crumb Rubber Modified Asphalt [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2009 28 (6): 1025-1027, 1059.

[10] 郭琦, 宋莉芳, 梁晓忠, 等. 废旧胶粉掺加量对基质沥青性能的影响 [J]. 公路, 2014, 59 (4): 194-197.

GUO Qi, SONG Li-fang, LIANG Xiao-zhong, et al. Influence of Waste Powder Amount to Performance of Different Grade of Asphalt [J]. Highway, 2014, 59 (4): 194-197.

[1] 佚名. 国家发展改革委发布《中国资源综合利用年度

(下转第22页)

- [15] 薛志锋. 公路工程水泥稳定碎石基层立模施工工艺应用 [J]. 山西建筑, 2017, 43 (8): 136-137.
XUE Zhi-feng. Application of Standing Mould of Cement Stabilized Macadam Base of Highway Engineering [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43 (8): 136-137.
- [16] DB 33/T 836—2011, 公路水泥稳定碎石基层振动成型法施工技术规范 [S].
DB 33/T 836—2011, Technical Specifications for Construction of Highway Cement-stabilized Macadam Base by Vibratory Forming Method [S].
- [17] 沈毅. 水泥稳定碎石路面基层边部密实度的影响分析 [J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42 (4): 19-20, 22.
SHEN Yi. Analysis on Influence of Cement-stabilized Macadam Base Edge Compactness [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2019, 42 (4): 19-20, 22.
- [18] 史小魏, 马志伟, 李洪闯. 高速公路改扩建工程新旧路面基层接缝处理施工技术研究与应用 [J]. 公路, 2021, 66 (1): 366-369.
SHI Xiao-wei, MA Zhi-wei, LI Hong-chuang. Research and Application of Construction Technology for Joint Treatment of New and Old Pavement Base in Expressway Reconstruction and Expansion Project [J]. Highway, 2021, 66 (1): 366-369.
- [19] 陈进. 公路工程水泥稳定碎石基层立模施工技术 [J]. 科学家, 2016, 4 (7): 131-132.
CHEN Jin. Formwork Erection Construction Technology of Cement Stabilized Macadam Base in Highway Engineering [J]. Scientist, 2016, 4 (7): 131-132.
- [20] 范文孝, 孙兆辉, 杜二鹏, 等. 水泥稳定碎石基层合理施工养生温度研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36 (3): 98-100.
FAN Wen-xiao, SUN Zhao-hui, DU Er-peng, et al. Research on Rational Construction Temperature of Cement-stabilized Macadam Base [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36 (3): 98-100.

(上接第14页)

- [11] 王笑风, 曹荣吉. 橡胶沥青的改性机理 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2011, 31 (2): 6-11.
WANG Xiao-feng, CAO Rong-ji. Rubber Asphalt Modification Mechanism [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2011, 31 (2): 6-11.
- [12] 赵屹峰. 大掺量橡胶沥青混合料研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
ZHAO Yi-feng. Study on Asphalt Mixture with Large Amount of Rubber [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [13] 黄卫东, 高川, 李昆. 橡胶沥青混合料疲劳性能影响因素研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (12): 1608-1614.
HUANG Wei-dong, GAO Chuan, LI Kun. Research on Influence Factors of AR Mixture Fatigue Performance [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2009, 37 (12): 1608-1614.
- [14] 王新强, 王国清, 秦禄生, 等. 橡胶沥青砂浆与混合料复合模量的关联性 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (1): 10-16.
WANG Xin-qiang, WANG Guo-qing, QIN Lu-sheng, et al. Correlation of Composite Moduli between Rubber Asphalt Mortar and Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (1): 10-16.
- [15] 祝谭雍, 程其瑜, 刘韬, 等. 基于环形加载试验的稳定型橡胶沥青热再生混合料抗裂性能研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (8): 7-14.
ZHU Tan-yong, CHENG Qi-yu, LIU Tao, et al. Study on Crack Resistance of Stable Asphalt Rubber Hot-recycled Mixture Based on Annulus Loading Test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (8): 7-14.
- [16] 李宁利, 赵新坡, 孙吉书, 等. 橡胶沥青老化机理研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (7): 18-22, 27.
LI Ning-li, ZHAO Xin-po, SUN Ji-shu, et al. Study on Aging Mechanism of Rubber-modified Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (7): 18-22, 27.
- [17] 李廷刚, 李金钟, 李伟. 橡胶沥青微观机理研究及其公路工程应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (1): 25-30.
LI Ting-gang, LI Jin-zhong, LI Wei. Micro-mechanism Study and Road Engineering Application of Rubber Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (1): 25-30.
- [18] 王云鹏, 韦大川, 李世武, 等. 橡胶粉改性沥青降噪机理及试验研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (12): 201-206.
WANG Yun-peng, WEI Da-chuan, LI Shi-wu, et al. Study on Noise Reduction Mechanism and Experiment of Rubber Powder Modified Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (12): 201-206.