

文章编号:1671-8879(2019)06-0020-11

深度降解橡胶沥青胶浆黏弹特性试验

覃润浦^{1,2}, 胡松山^{1,2}

(1. 广西道路结构与材料重点实验室, 广西 南宁 530007; 2. 广西交通科学研究院有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要:为了对深度降解橡胶沥青胶浆体系进行黏弹特性分析并对其相态结构定量评估,采用双螺杆挤出机对传统橡胶粉进行深度降解,结合动态剪切流变学分析传统橡胶沥青胶浆与深度降解橡胶沥青胶浆特性,借鉴多分散聚合物 Han 曲线原理对橡胶沥青胶浆体系相态结构进行定量判断。通过常规检测及应变扫描、温度扫描、频率扫描等动态剪切流变试验,从黏温指数、相位角、复数模量、车辙因子和损耗因子等指标评价 2 种橡胶沥青胶浆体系黏弹特性,定性分析深度降解橡胶粉对橡胶沥青胶浆体系黏弹特性的影响,并对其相态结构性能进行研究。研究表明:采取感温指数作为橡胶沥青胶浆体系温度敏感性能的评价指标,当橡胶粉掺量(质量分数,下同)为 20%时,橡胶沥青胶浆体系确定的最佳粉胶比为 1.0;不同粉胶比条件下橡胶沥青胶浆黏弹特性区间出现平移扩张,相同粉胶比条件下,经过深度降解的橡胶沥青胶浆体系较传统橡胶沥青胶浆体系应变区间缩小;通过温度扫描及频率扫描试验得出深度降解橡胶沥青胶浆体系的黏弹特性较好;在相同温度、相同粉胶比条件下,深度降解橡胶沥青胶浆体系的复数剪切黏度较小,呈现出较好的流动特性;温度扫描条件下,当粉胶比为 1.0 时,深度降解橡胶沥青胶浆体系 Han 曲线斜率最大。

关键词:公路工程;流变学理论;深度降解橡胶粉;胶浆;双螺杆挤出机;黏温指数;黏弹特性;相态结构中图分类号:U414 文献标志码:A DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.06.003

Experimental on viscoelastic properties of highly degraded rubber modified asphalt cement

QIN Run-pu^{1,2}, HU Song-shan^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Road Structure and Materials, Nanning 530007, Guangxi, China;
2. Guangxi Transportation Research and Consulting Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: To analyze the viscoelastic characteristics and quantitatively evaluate the phase structure of the highly degraded rubber asphalt slurry system, the traditional rubber powder was deeply degraded by twin-screw extruder. Combined with dynamic shear rheology, the characteristics of traditional rubber asphalt slurry and the characteristics of deep degradation of rubber asphalt slurry were analyzed. The phase structure of rubber asphalt slurry system was quantitatively determined by reference to the principle of multi-dispersed polymer Han curve. The viscoelastic properties of two kinds of rubber asphalt slurry system were evaluated by sticky temperature index, the phase angle, complex modulus, the rut factor and loss factor index from conventional detection and conventional dynamic shear rheological tests, strain scanning,

收稿日期:2019-05-17

基金项目:广西科技重大专项(桂科 AA18242032)

作者简介:覃润浦(1972-),男,广西南宁人,教授级高级工程师,E-mail:978713382@qq.com。

temperature scanning and frequency scanning. The influence of deep degradation rubber powder on the viscoelastic properties of rubber asphalt paste was analyzed qualitatively and the phase structure performance were studied. The results show that the temperature sensitivity index is used as the evaluation index for the temperature sensitivity of rubber asphalt cement system. When the content (mass fraction, same below) of rubber powder is 20%, the optimum powder to slurry ratio of rubber asphalt mortar system is 1.0. The viscoelastic properties of rubber asphalt mastic under different powder-cement ratio conditions appear translational expansion. The strain range of rubber asphalt mastic system after deep degradation is smaller than that of traditional rubber asphalt mastic system under the same condition. Through temperature scanning and frequency scanning test, it is concluded that the deep degradation rubber asphalt mortar system has good viscoelastic property. Under the same temperature and powder to slurry ratio, the complex shear viscosity of the deep degradation rubber asphalt mortar system is small and presents good flow characteristics. When the powder to slurry ratio is 1.0, the slope of the Han curve of the deep degraded rubber asphalt mortar system is the highest under the condition of temperature scanning. 2 tabs, 16 figs, 30 refs.

Key words: road engineering; rheological theory; highly degraded crumb rubber; mucilage; twin screw extruder; sticky temperature index; viscoelastic property; phase structure

0 引言

传统橡胶沥青存在黏度大、橡胶粉掺量小等问题。橡胶粉分子量过大,在沥青中不易溶胀,沥青与胶粉、矿粉之间缺少充分的化学反应,导致橡胶粉分散于沥青中难以形成塑性网状结构。目前,解除橡胶粉交联体主要采用双螺杆挤出机物理脱硫技术或高温高速剪切胶粉达到降解作用。双螺杆挤出机是近几年较为流行的一种脱硫机械设备,通过设置温度和旋转速度等参数,可以不同程度改进胶粉的降解效果,有效避免降解程度不一造成的胶粉难以充分脱硫或脱硫程度过高带来的路用性能损失。沥青胶浆体系是以填料为分散相,分散在高稠度沥青介质中的微分散系,脱硫橡胶粉与矿粉填料、沥青三者之间形成混溶体系^[1]。目前,中国对橡胶沥青胶浆特性研究较少。

近年来,国内外学者在橡胶沥青的研发及应用等方面已开展大量的工作。Navarro等基于流变学理论,对不同橡胶粉掺量橡胶沥青结合料的黏弹特性与储存稳定性进行研究,得出胶粉掺量的增加导致橡胶沥青黏度显著增大,温度敏感性降低等结论^[2-3]。Kim等采用直接拉伸试验测定橡胶沥青结合料低温抗拉性能,指出橡胶沥青的破坏应力随着橡胶掺量的增加而增大,随橡胶颗粒粒径的增大而减小^[4]。Jeong等采用动态剪切流变试验(DSR)与色谱凝胶分析(GPC)方法,研究不同类型橡胶沥青

各项性能,并指出反应时间、反应温度及胶粉掺量均对橡胶沥青流变特性产生较大影响^[5]。Mazloom等针对废胶粉高温裂解进行研究得出,橡胶粉颗粒在热解过程中粒径不断减小并释放沥青轻质组分、橡胶油及炭黑等,在改善沥青流变特性的同时,对改性沥青低温抗裂性能有较大提高^[6-7]。彭波等应用网篮析出、黏附性、动态剪切和弯曲梁流变等试验方法,研究沥青胶浆组成、稳定性及掺量对沥青混合料的性能影响^[8]。李平等利用布氏旋转黏度计,研究不同填料类型和粉胶比的胶浆黏度,分析了矿粉对沥青胶浆黏度性能的影响^[9-10]。王恒斌等采用动态剪切流变仪对岩沥青改性沥青胶浆的高温动态流变性能进行了研究^[11]。郭利平等采用针入度和拉拔试验,研究胶粉掺量和矿粉掺量对橡胶沥青胶浆抗剪强度和黏结强度的影响规律,确定出胶粉掺量(质量分数,下同)范围宜为15%~21%^[12]。纪波印等指出胶粉在挤出机输送过程中主要依靠剪切力、螺杆中充盈程度、螺杆转速等,并详细解释胶粉脱硫过程中第1阶段脱硫工艺和第2阶段脱硫工艺的交联网络破坏效果,研究指出脱硫胶粉的相对分子质量在两阶段降解工艺下,相对分子质量得到大幅降低^[13]。叶奋等针对传统橡胶沥青掺量低的问题,采用螺杆反应挤出机对橡胶粉深度降解,指出经过双螺杆挤出机物理降解作用橡胶粉掺量高达50%^[14]。张广泰等采用废机油对胶粉进行物理溶胀,其方法可有效降低双螺杆高温条件降解产生的能量,一定

程度上降低有害气体排放量,从而实现低温挤出胶粉工艺^[15]。董瑞琨等采用扫描量热法(DSC)针对高温裂解胶粉改性沥青低温性能分析,指出与传统橡胶沥青加工工艺相比,在一定的加工时间范围内,高温脱硫裂解胶粉掺入有助于提高胶粉改性沥青的低温性能^[16]。

传统橡胶粉颗粒分子质量较大,掺量过大易造成橡胶沥青施工黏度加大、成品料质量下降等问题。杨小龙等开展了不同生产加工工艺参数条件对橡胶沥青黏度影响的研究,指出搅拌工艺速率为 2 000 r/min,反应温度为 190 ℃,最佳胶粉掺量为 20%,反应时间为 60 min^[17]。深度降解胶粉最佳掺量时性能显著优于传统胶粉,这在废旧轮胎的回收利用等方面是有利的。本文进行传统橡胶粉与深度降解胶粉在不同粉胶比下的胶浆制备。考虑到胶粉掺量过大造成不同粉胶比下的橡胶沥青胶浆体系黏稠度进一步加大,可能造成个别试验如针入度、软化点等常规检测指标失真现象,为有效对比传统胶粉与深度降解胶粉性能之间的差别,充分体现深度降解胶粉在沥青胶浆体系中的性能优势,深度降解橡胶沥青(highly degraded crumb rubber, HD CR)与传统橡胶沥青(conventional rubber asphalt, CRA)制备胶粉掺量均为 20%(外掺),加工工艺采取传统的搅拌工艺。以泰普克沥青为基质沥青,以粉胶比为 0.8、1.0、1.2 的掺量分别与深度降解胶粉和传统胶粉制备橡胶沥青胶浆。

沥青胶浆的流变特性反映出材料的黏弹行为,采用动态黏弹测试方法可以得出沥青胶浆的稳定性、黏弹性和热敏感性。有效模拟路面动荷载作用下的变形特性,是表征橡胶沥青胶浆特性的最有效手段之一^[18]。而中国缺乏深度降解橡胶沥青的胶浆特性等方面的研究。鉴于此,本文在室内制备不同粉胶比掺量橡胶沥青胶浆,在应变扫描、频率扫描、温度扫描、时间扫描以及循环荷载作用等不同加载模式下,分析深度降解橡胶沥青胶浆体系的流变特性,并对其路用性能进行合理评价。王笑风等通过电镜扫描、红外与差热分析等手段,较为系统的对胶粉-沥青两相混溶体系的改性机理进行研究,指出橡胶沥青改性作用主要源于胶粉溶胀形成网络结构和胶粉脱硫降解对沥青轻质组分的改善^[19]。胶粉-沥青-矿粉三相混合溶胀得到混溶体系,本文采用 Han 曲线对其相态结构进行定量分析,探索一种橡胶沥青改性机理综合评价方法,以期促进橡胶沥青产品升级及推广应用。

1 材料与设备

1.1 基质沥青

本文采用泰普克基质沥青进行深度降解橡胶沥青制备,该沥青各项检测指标满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求^[20]。

1.2 矿粉

矿粉采用石灰岩磨制,检测指标满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求,具体见表 1。

表 1 矿粉检测指标

Tab. 1 Mineral powder detection indexes

项目	技术要求	测试结果
表观相对密度/(t·m ⁻³)	≥2.50	2.726
含水量/%	≤1	0.4
不同粒度范围(mm) 下的通过率/%	<0.6	100
	<0.15	90~100
	<0.075	75~100
外观	无团粒结块	无团粒结块
亲水系数	<1	0.3
塑性指数	<4	1.3

1.3 试验仪器

(1) 双螺杆挤出机

双螺杆挤出机技术参数:螺杆直径 21.7 mm,槽深 3.85 mm,螺杆长径比 32~40,螺杆转速 600 r/min,主机功率 3 kW,生产能力 2~12 kg/h,如图 1 所示。



图 1 SHJ-20 双螺杆挤出机

Fig. 1 SHJ-20 twin-screw extruder

(2) 动态剪切流变仪

本文对不同粉胶比深度降解橡胶沥青胶浆体系进行循环加回载滞环试验和动态剪切流变试验,其中动态剪切流变仪器设备及试验参数设置见文献[20]。

1.4 胶粉种类

传统胶粉与利用双螺杆挤出机生产的深度降解胶粉技术指标,具体见文献[21]。

2 常规性能检测

2.1 性能比对

各橡胶沥青胶浆体系常规指标试验结果见表

2。表 2 中:HDCR-0.8 表示粉胶比 0.8 的深度降解橡胶沥青;CRA-0.8 表示粉胶比 0.8 的传统橡胶沥青;其他依次类推。不同粉胶比下的传统橡胶沥青胶浆黏度和深度降解橡胶沥青胶浆黏度对比如图 2

表 2 不同粉胶比下的橡胶沥青胶浆技术性能

Tab. 2 Rubber asphalt binder technical properties under different powder to glue ratios

胶粉类型	深度降解胶粉			传统胶粉		
胶粉编号	HDCR-0.8	HDCR-1.0	HDCR-1.2	CRA-0.8	CRA-1.0	CRA-1.2
胶粉比	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/0.1 mm		23	25		16	20
软化点/°C	76.7	81.9	86.6	70.0	72.8	76.4
延度(5 °C, 5 cm · min ⁻¹)/cm	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
弹性恢复/%	75.0	70.7	64.0	56.0	68.3	54.0

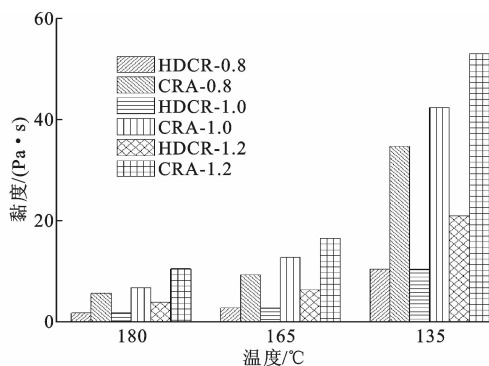


图 2 不同粉胶比下橡胶沥青胶浆黏度对比

Fig. 2 Comparisons of viscosity indexes of rubber asphalt mastic with different powder to glue ratios

2.2 胶浆制备

为定量分析橡胶沥青胶浆体系的感温特性,本文采用黏温指数 V_{TS} 表征其在路面服役温度范围内的感温特性,黏温指数越小,沥青胶结料的感温线越小,即

$$V_{TS} = \frac{\lg(\lg(10^3 \eta_1)) - \lg(\lg(10^3 \eta_2))}{\lg(T_1 + 273.13) - \lg(T_2 + 273.13)} \quad (1)$$

式中: η_1 、 η_2 分别为温度 T_1 、 T_2 的黏度。

不同制备工艺条件下的橡胶沥青胶浆体系黏温指数见图 3。由图 3 可知,掺加矿粉填料后,橡胶沥青胶浆的黏温指数绝对值变小,其感温性能一定程度被削弱。

3 DSR 试验结果与分析

3.1 线性黏弹范围的确定

复数模量、相位角、贮存弹性模量、损失弹性模量作为动态参数,均被定义在线性黏弹范围内,但沥青胶浆的线性黏弹明显有别于沥青。为了区分不同粉胶比下传统橡胶沥青胶浆体系与深度降解橡胶沥青体系的线性黏弹范围,选取粉胶比为 0.8、1.0、

所示。

由图 2 可知:深度降解橡胶沥青的黏度相对较小,有益于橡胶沥青施工的和易性,可有效解决因黏度过大导致橡胶沥青混合料不压实的质量问题。

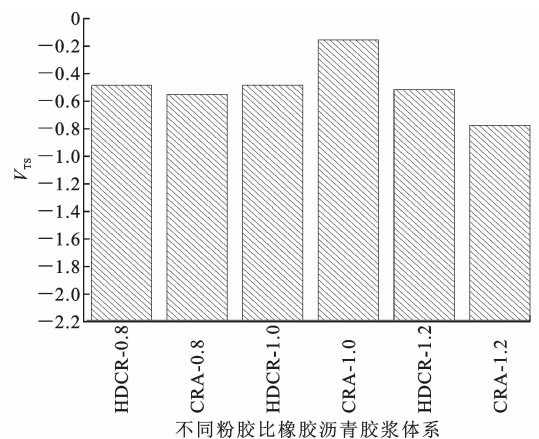


图 3 不同粉胶比下橡胶沥青胶浆黏温指数对比

Fig. 3 Comparisons of viscosity-temperature indexes of rubber asphalt mastic with different powder to glue ratios

1.2 下胶浆体系,采用常温 25 °C 进行应变扫描试验,试验应变覆盖值域为 0.01%~100%,结果如图 4 所示。

由图 4(a)可知,对于传统橡胶沥青胶浆,在同一温度应变扫描作用下,随着试验频率的增加,橡胶沥青胶浆的线性黏弹范围逐渐减小,复数剪切模量衰减加速。通过应变扫描确定橡胶沥青胶浆线性黏弹范围,即复数模量 G^* 衰减到初始值的 95% 时的应变区域范围。传统橡胶沥青(CRA)胶浆,粉胶比为 0.8 时其胶浆体系应变 ϵ 区间为 0.01%~3.3%,粉胶比为 1.0 时应变区间为 0.01%~4.1%,粉胶比为 1.2 时 ϵ 为 0.01%~5.0%。可见随着粉胶比的增大,传统橡胶沥青胶浆体系应变区间出现扩张平移现象,如图 4(a)所示。橡胶粉经过深度降解处理后(HDCR),粉胶比为 0.8 时其胶浆体系应变区间为 0.01%~1.8%,粉胶比为 1.0 时为 0.01%~2.2%,粉胶比为 1.2 时为 3.0%。同样,随着粉胶比的增加,深度降解橡胶沥青胶浆体系的应变区间

也出现扩张平移现象,如图4(b)所示。经过深度降解的橡胶沥青,其胶浆体系应变区间有所减小,说明经过深度降解的橡胶粉与沥青、矿粉等胶结料融合更加充分,性能更加稳定。

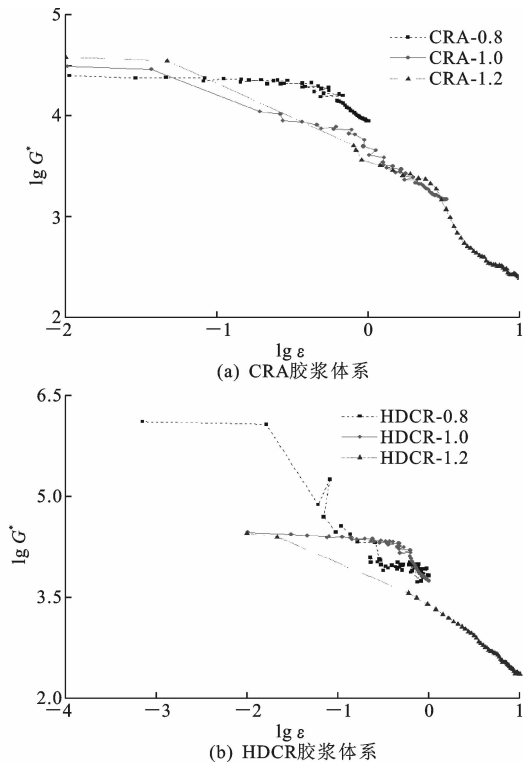


图4 复数模量与应变关系

Fig. 4 Relationships between complex modulus and strains

3.2 温度扫描对胶浆体系黏弹特性影响

深度降解橡胶沥青胶浆体系与传统橡胶沥青胶浆体系温度扫描结果如图5~图10所示,温度扫描范围 $57\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由图5可知,随着温度的增加,各粉胶比下的橡胶沥青胶浆体系的相位角不断增大。相位角越大,胶浆体系的弹性比例越高,荷载作用下胶浆体系模量的弹性成分越大,即变形可恢复的部分越大,抗永久变形能力越强。深度降解橡胶沥青胶浆体系在相同温度扫描试验条件下,随着粉胶比的增加,胶浆体系的相位角呈减小趋势,粉胶比越小其弹性性能越明显,这与深度降解后胶粉与矿粉比例的影响直接相关,胶浆体系中矿粉比例越大,胶浆体系呈现的弹性特性越弱。

传统橡胶沥青胶浆体系由于其胶粉颗粒未做深度降解处理,胶粉颗粒与沥青、矿粉等胶结料的相容性较深度降解橡胶沥青胶浆体系不充分,其相应的弹性成分比例也较深度降解橡胶沥青胶浆体系小,如图5(b)所示。说明经过深度降解处理后的胶粉颗粒能与沥青、矿粉等胶结料充分溶胀,更能充分发

挥橡胶粉较好的弹性特性优势。相对于橡胶沥青而言,研究橡胶沥青胶浆特性更能客观评价胶粉颗粒在沥青胶浆中的物理特性。

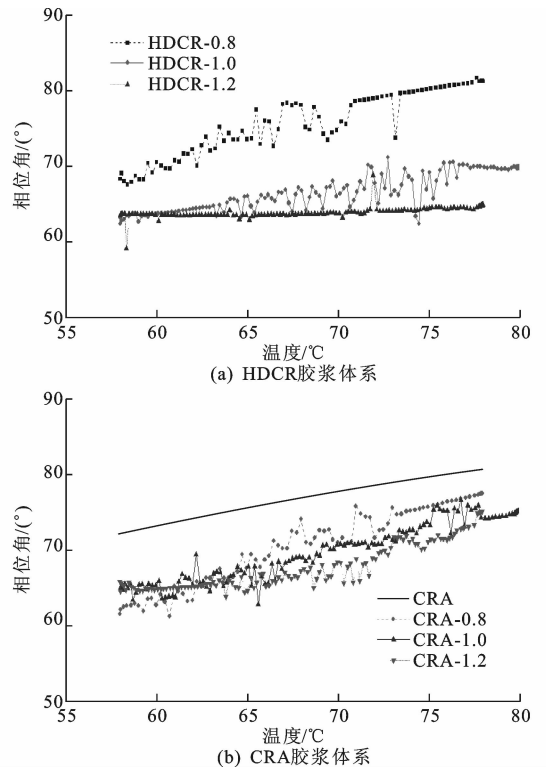


图5 相位角与温度关系

Fig. 5 Relationships between phase angles and temperatures

由图6可知,橡胶沥青胶浆体系的抗车辙能力受温度因素影响较大,随着温度的增加,橡胶沥青胶浆体系的抗车辙因子逐渐减小。相同温度条件下,传统橡胶沥青胶浆体系较橡胶沥青抗车辙能力较强,说明采用橡胶沥青胶浆体系评价胶粉颗粒在沥青、矿粉等胶结料中的性能更合适。随着粉胶比的增加,橡胶沥青胶浆体系的抗车辙能力随之增大,当粉胶比增加到一定程度时,橡胶沥青胶浆体系抗车辙因子增大不明显,当粉胶比为1.0时其抗车辙能力最佳。相对传统橡胶沥青胶浆体系,经过深度降解后的橡胶沥青胶浆体系抗车辙能力较大,说明深度降解时胶粉颗粒与沥青、矿粉等胶结料的溶胀效果更明显,胶粉颗粒的抗变形能力表现的更充分。

由图7可见,随着温度的增加,橡胶沥青胶浆体系的损耗因子逐渐减小,温度的增加影响橡胶沥青胶浆体系的热运动能力,其损耗能量也增大。相同温度条件下,随着粉胶比的增大,橡胶沥青胶浆体系的损耗因子呈减小趋势。这是由于胶粉颗粒与沥青、填料形成稳定的空间结构,粉胶比越大,胶浆体系空间结构黏结越牢固,高温条件下,其性能特征较

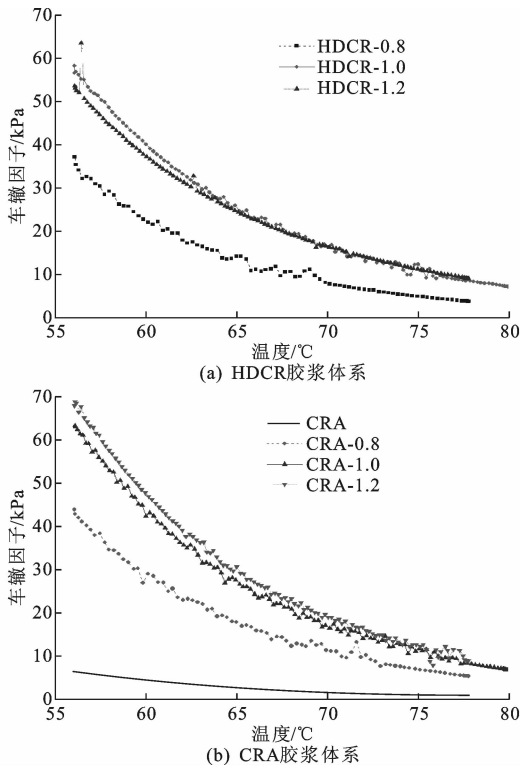


图 6 车辙因子与温度关系

Fig. 6 Relationships between rut factors and temperatures

稳定,相应的损耗能量减小。相同温度条件下,橡胶沥青较橡胶沥青胶浆体系的损耗因子大。

由图 8 可知,随着温度的增加橡胶沥青胶浆体系的复数剪切黏度逐渐减小,其流动性受温度影响较为显著。在相同温度条件下,粉胶比越大,橡胶沥青胶浆体系的复数剪切黏度越大,其流动特性就越差。在相同温度、相同粉胶比条件下,深度降解橡胶沥青胶浆体系的复数剪切黏度较小。这是由于胶粉颗粒经过深度降解处理后,其与沥青、矿粉等胶结料溶胀特性较传统橡胶沥青强,所呈现的流动特性也较好,因此深度降解橡胶沥青胶浆体系较传统橡胶沥青胶浆体系具有较好的流动性能。

3.3 频率扫描对胶浆体系黏弹特性影响

频率扫描试验可以较好模拟车辆路面行车速度,有效评价胶粉颗粒在沥青胶浆体系当中的性能。本文采用 0.1~10 Hz 模拟渠化交通低速行驶车辆,不同粉胶比下传统橡胶沥青胶浆体系与深度降解橡胶沥青胶浆体系的频率扫描试验结果见图 9~图 12。

由图 9 可知,随着频率的增大,橡胶沥青胶浆体系的复数剪切黏度呈现减小趋势,当频率增大到一定程度后趋于稳定。粉胶比为 0.8 的橡胶沥青胶浆体系复数剪切黏度受频率影响较为显著,当粉胶比

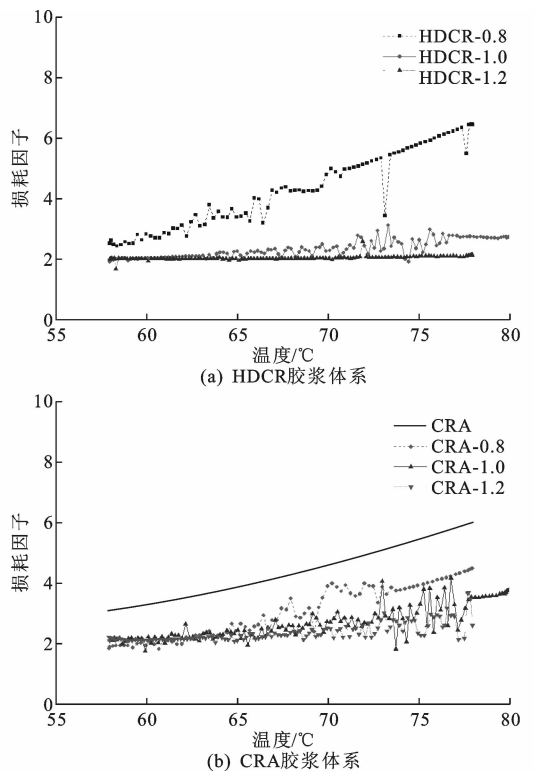


图 7 损耗因子与温度关系

Fig. 7 Relationships between loss factors and temperatures

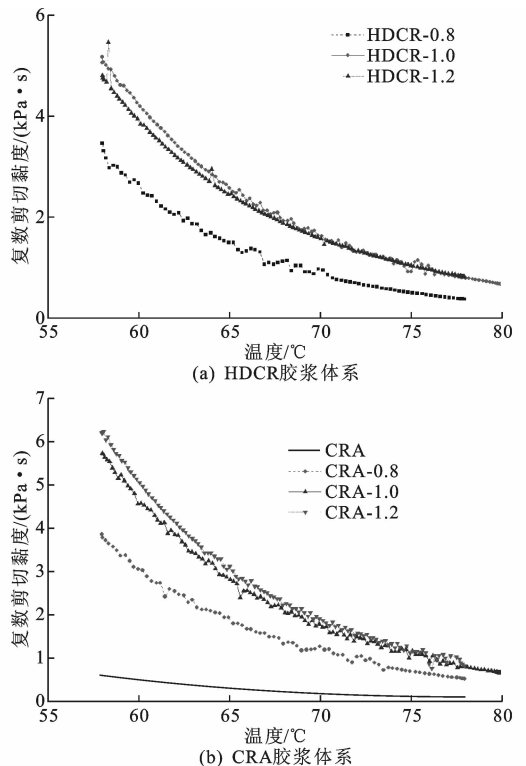
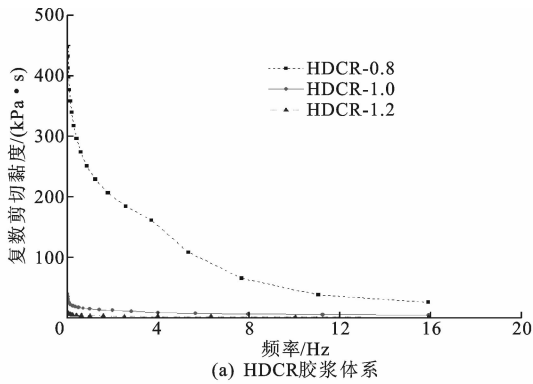


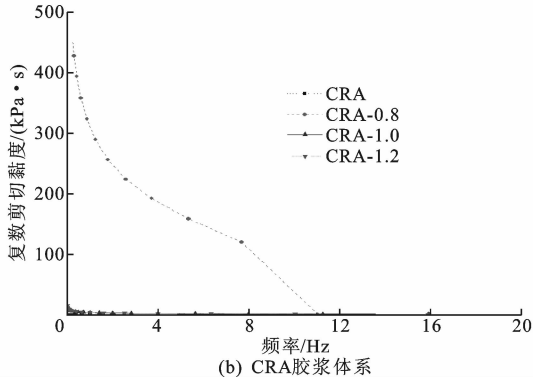
图 8 复数剪切黏度与温度关系

Fig. 8 Relationships between complex viscosities and temperatures

为 1.0 和 1.2 时,其复数剪切黏度基本一致,且受频



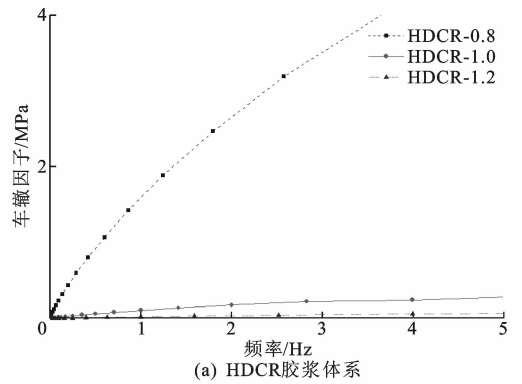
(a) HDCR胶浆体系



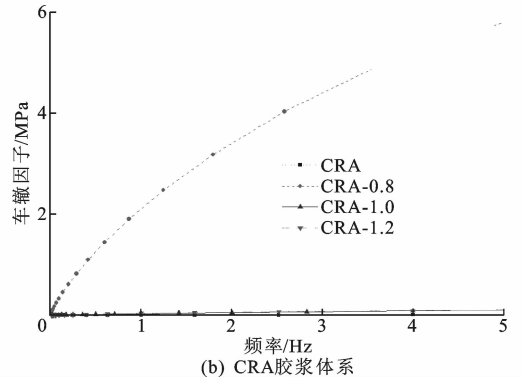
(b) CRA胶浆体系

图9 复数剪切黏度与频率关系

Fig. 9 Relationships between complex viscosities and frequencies



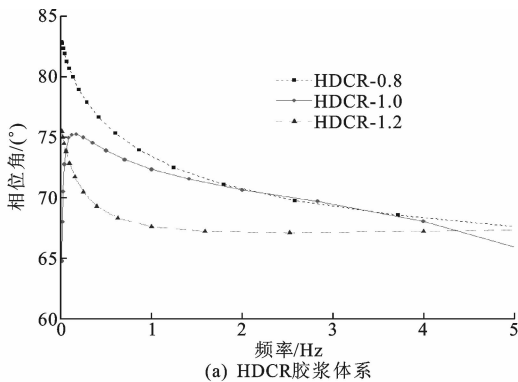
(a) HDCR胶浆体系



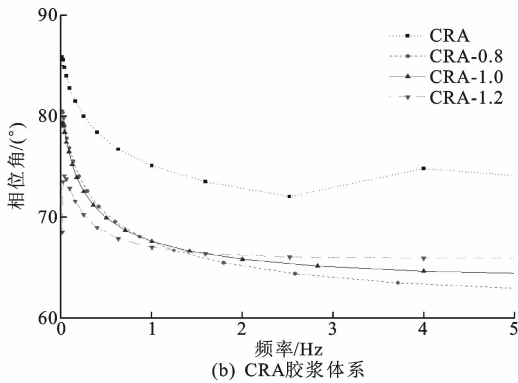
(b) CRA胶浆体系

图11 车辙因子与频率关系

Fig. 11 Relationships between rut factors and frequencies



(a) HDCR胶浆体系



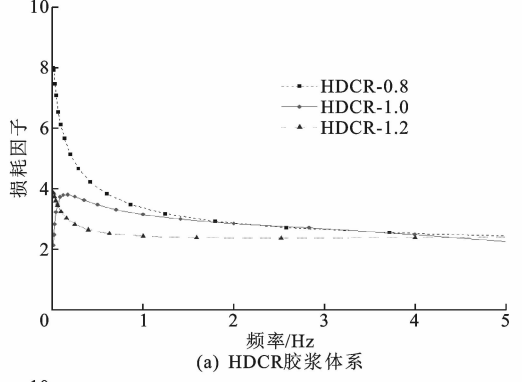
(b) CRA胶浆体系

图10 相位角与频率关系

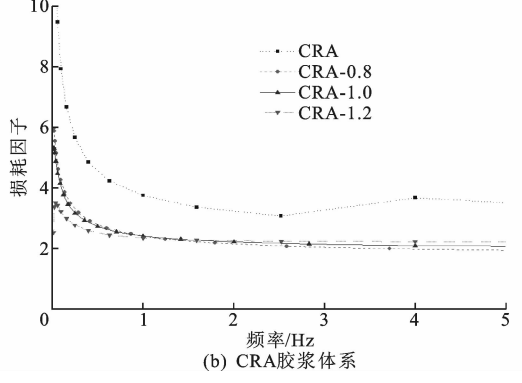
Fig. 10 Relationships between phase angles and frequencies

率扫描的影响较小。

由图10可知,随着频率的增大,橡胶沥青胶浆体系的相位角呈现减小趋势。在低频率扫描条件



(a) HDCR胶浆体系



(b) CRA胶浆体系

图12 损耗因子与频率关系

Fig. 12 Relationships between loss factors and frequencies

下,粉胶比为1.0的深度降解橡胶沥青胶浆体系的相位角呈现先增大后减小趋势。随着频率的进一步增大,在相同频率扫描作用下,粉胶比越大,橡胶沥

青胶浆体系的相位角越小,其弹性比例就越小。粉胶比的增大影响橡胶沥青胶浆体系整体结构性能,在粉胶比为 1.0 时,橡胶沥青胶浆体系的弹性比例最合理。由图 10 可见,传统橡胶沥青与其胶浆体系相比,在相同频率扫描作用下相位角较大。这是由于橡胶沥青中是胶粉颗粒与基质沥青共同作用的结果,而传统橡胶沥青胶浆体系中是胶粉颗粒、沥青和矿粉填料三者共同作用的结果,所呈现的弹性比例成分也相应减小。

由图 11 可见,随着频率的增加,橡胶沥青胶浆体系的抗车辙因子逐渐增大,粉胶比为 0.8 时,这种变化趋势对于深度降解橡胶沥青胶浆体系和传统橡胶沥青胶浆体系尤为显著。随着粉胶比的增加,橡胶沥青胶浆体系的抗车辙因子变化趋势不明显,说明频率扫描对橡胶沥青胶浆体系的抗车辙性能影响不大。

由图 12 可知,随着扫描频率的增大,橡胶沥青胶浆体系损耗因子呈现减小趋势。对于传统橡胶沥青胶浆体系而言,橡胶沥青较其胶浆体系的损耗因子大,在相同频率扫描条件下,橡胶沥青损耗能量较大,这是因为沥青与胶粉颗粒二者作用下,其胶结料空间结构尚不稳定,受频率扫描的影响也较大。

4 橡胶沥青胶浆体系相态结构

活性填料与橡胶沥青混溶形成聚合物-填料三元混溶体系,活性填料的加入对橡胶沥青胶浆体系黏弹松弛行为产生一定影响,其主要体现在相态结构。Han 曲线广泛应用于高聚物相态结构的相关研究中,该理论最早是基于均相聚合物分子黏弹性理论建立的,对于多分散聚合物其存在如下关系^[22]

$$\lg G' = x \lg G'' + (1-x) \lg (8G_N^0 / \pi^2) \quad (2)$$

式中: G' 为储存模量; G'' 为损失模量; G_N^0 为平台模量; x 为多相聚合物斜率。

式(2)说明对于多相聚合物在线性黏弹区间内,Han 曲线斜率越接近 2 则表明其越接近均相聚合物,即聚合物混体系相容性越好,这对于传统胶粉活化或改性升级具有一定的指导意义。借鉴该理论,本文从温度、频率等对传统橡胶沥青胶浆体系和深度降解橡胶沥青胶浆体系的相态结构进行研究。

4.1 温度对胶浆体系相态结构影响

基质沥青、橡胶沥青、传统橡胶沥青胶浆体系及深度降解橡胶沥青胶浆体系在温度扫描作用下,其相态结构 Han 曲线结果见图 13~图 16。由图 13

可知,基质沥青与橡胶沥青的相态结构 Han 曲线随着温度的增大均呈现增大趋势,且各 Han 曲线斜率 k 显著增大,呈现明显的温度依赖性。相对于基质沥青,橡胶沥青相态结构 Han 曲线斜率随着温度的增加持续增大,并逐渐向均相聚合物转变。这是由于胶粉颗粒的添加,橡胶沥青在高温条件下发生显著的相态变化,胶粉颗粒与基质沥青经过溶胀作用形成网络结构,并随温度变化其网络结构趋于稳定,最终向均相聚合物状态转变^[23-25]。

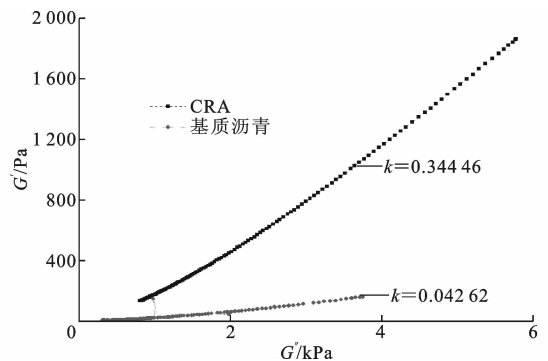
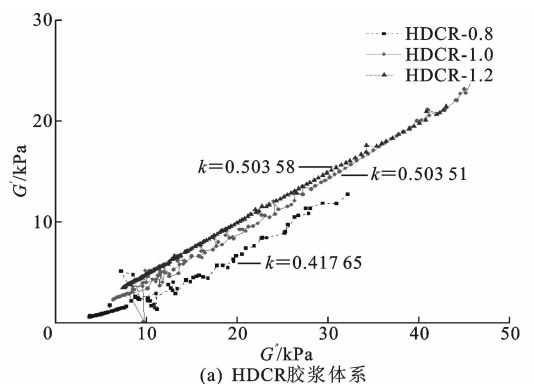
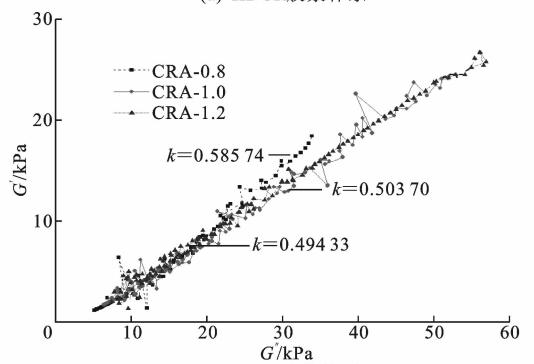


图 13 温度扫描作用下基质沥青与橡胶沥青 Han 曲线

Fig. 13 Han curves of matrix asphalt and rubber asphalt under temperature scanning



(a) HDCR 胶浆体系



(b) CRA 胶浆体系

图 14 温度扫描作用下胶浆体系 Han 曲线

Fig. 14 Han curves of mucilage system under temperature scanning

由图 14 可知,橡胶沥青胶浆体系相态结构 Han

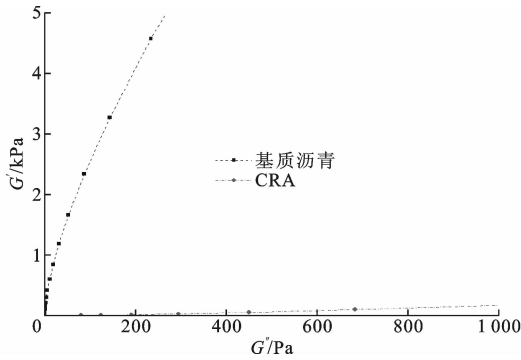
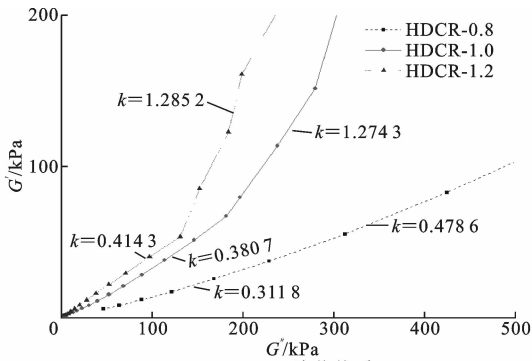
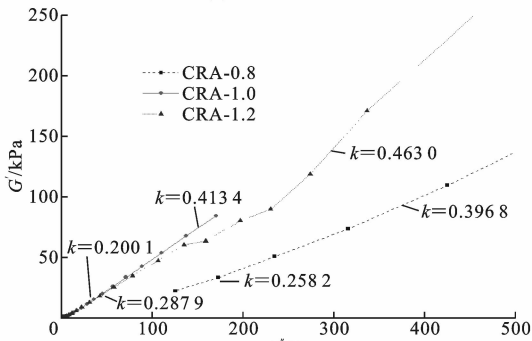


图 15 频率扫描作用下基质沥青与橡胶沥青 Han 曲线

Fig. 15 Han curves of matrix asphalt and rubber asphalt under frequency scanning



(a) HDCR 胶浆体系



(b) CRA 胶浆体系

图 16 频率扫描作用下胶浆体系 Han 曲线

Fig. 16 Han curves of mucilage system under frequency scanning

曲线随着温度的增大呈线性趋势,与基质沥青和橡胶沥青呈现的显著温度依赖性不同,橡胶沥青胶浆体系的相态结构受温度影响不大。当粉胶比为 0.8 时,深度降解橡胶沥青胶浆体系和传统橡胶沥青胶浆体系 Han 曲线斜率分别为 0.417 65 和 0.585 74;当粉胶比为 1.0 时分别为 0.530 51 和 0.503 70;当粉胶比为 1.2 时分别为 0.503 58 和 0.494 33。对于深度降解橡胶沥青胶浆体系,随着粉胶比的增加,其 Han 曲线斜率呈现先增大后减小趋势,当粉胶比为 1.0 时,Han 曲线斜率最大。说明经过深度降解处理后的胶粉颗粒,在粉胶比增大的情况下,胶粉颗

粒、沥青、矿粉三者之间的相互作用力增大,深度降解的胶粉容易形成连续的海相结构,最终导致相分离现象的发生。传统橡胶沥青胶浆体系结构 Han 曲线斜率随着粉胶比的增加逐渐减小,这是由于未经深度降解处理的胶粉颗粒与沥青自身相容性较差,在矿粉逐渐增加的情况下,胶粉颗粒、沥青与矿粉三者之间的相互作用力逐渐增大,相分离现象越来越明显^[26-27]。

4.2 频率对胶浆体系相态结构影响

为有效区分频率扫描对橡胶沥青胶浆体系相态结构的影响,本文首先对基质沥青和橡胶沥青频率扫描下的相态结构进行研究,如图 15 所示。对于基质沥青而言,随着频率的进一步增大,基质沥青 Han 曲线斜率呈减少趋势,由最初的 178.79,逐步减少为 88.409、21.059 和 6.969。橡胶沥青 Han 曲线斜率由 0.321 6 增加到 1.53。说明随着频率的增加基质沥青逐渐由原来的海相结构转变为连续相结构,对频率的敏感性较强。橡胶沥青在频率增大时逐渐接近于连续均相结构^[28-29]。

由图 16 可知,随着频率的增大,深度降解橡胶沥青胶浆体系与传统橡胶沥青胶浆体系相态结构 Han 曲线的变化趋势明显,弹性模量急剧增加。深度降解橡胶沥青胶浆体系在相同频率扫描下,Han 曲线斜率随着粉胶比的增加而增大,当频率增加到一定程度后,粉胶比为 1.0 和 1.2 的 Han 曲线斜率越接近于 2,说明深度降解胶粉颗粒与沥青、矿粉三者之间越接近于均相状态。传统橡胶沥青胶浆体系胶粉颗粒未经过深度降解处理,其与沥青、矿粉三者之间不能形成较好的空间网状结构,在频率扫描作用下其胶浆体系出现玻璃态结构,离散性也较明显,现场使用时也较容易出现离析现象^[30]。

5 结 语

(1)深度降解橡胶沥青胶浆体系结构应变扫描黏弹特性区间更为精准,橡胶沥青胶浆体系在不同粉胶比应变扫描下,其应变区间均出现平移扩张现象。

(2)经过深度降解后的胶粉颗粒与沥青、矿粉等胶结料溶胀特性增强,在温度扫描条件下该胶浆体系的复数剪切黏度小,流动性能较好。

(3)橡胶沥青胶浆体系 Han 曲线随着温度的增大呈线性,橡胶沥青胶浆体系的相态结构受温度影响不大。当粉胶比为 1.0 时,深度降解橡胶沥青胶浆体系 Han 曲线斜率达 0.53。

(4)深度降解橡胶沥青胶浆体系与传统橡胶沥青胶浆体系的相态结构对温度的依赖性较差,而对频率的依赖性较强。深度降解胶粉颗粒在一定程度上增加了与沥青、矿粉等胶结料的相容性。

(5)本文提出一种定量评价橡胶沥青胶浆体系相态结构的分析方法,但研究手段较为单一,能否准确指导传统胶粉深度降解而得到精细胶粉,尚需在工厂生产中进一步验证。因此,在解决传统胶粉储备稳定性和施工黏度等问题上还需对胶粉活化处理进行研究。

参考文献:

References:

- [1] 张宏雷. 废旧轿车轮胎在沥青中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
ZHANG Hong-lei. Study on asphalt modified with scrap passenger car tire rubber[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2011.
- [2] NAVARRO F J, PARTAL P, MARTINEZ-BOZA F, et al. Influence of crumb rubber concentration on the rheological behavior of a crumb rubber modified bitumen[J]. Energy and Fuels,2005,19(5):1984-1990.
- [3] MAMLOUK M, MOBASHER B. Crack in resistance of asphalt rubber mix versus hot-mix asphalt[J]. Road Materials and Pavement Design,2004,5(4):435-451.
- [4] KIM S, LOH S W, ZHAI H, et al. Advanced characterization of crumb rubber-modified asphalts, using protocols developed for complex binders[J]. Transportation Research Record,2001(1767):15-24.
- [5] JEONG K D, LEE S J, AMIRKHANDANIAN S N, et al. Interaction effects of crumb rubber, modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials,2010,24(5):824-831.
- [6] MAZLOOM G, FARHADI F, KHORASHEH F, et al. Kinetic modeling of pyrolysis of scrap tires[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2009,84(2):157-164.
- [7] WANG H, YOU Z, MILLS-BEALE J, et al. Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber[J]. Construction and Building Materials,2012,26(1):583-590.
- [8] 彭波,丁智勇,戴经梁. 不同类型沥青胶浆路用性能对比[J]. 交通运输工程学报,2007,7(3):61-65.
PENG Bo, DING Zhi-yong, DAI Jing-liang. Road performance comparison of different asphalt mastics[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(3):61-65.
- [9] 李平,张争奇,孙鸿伟,等. 沥青胶浆粘度特性研究[J]. 交通运输工程学报,2008,8(2):49-52,64.
LI Ping, ZHANG Zheng-qi, SUN Hong-wei, et al. Research on viscosity property of asphalt mortar[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(2):49-52,64.
- [10] 李平. 基于胶浆特性的沥青混合料设计[D]. 西安:长安大学,2007.
LI Ping. Design of hot mixture asphalt based on mortar character[D]. Xi'an:Chang'an University,2007.
- [11] 王恒斌,葛折圣. 布敦岩沥青改性沥青胶浆高温动态流变性能的试验研究[J]. 公路交通科技,2008,25(9):63-66.
WANG Heng-bin, GE Zhe-sheng. Test of dynamic rheology properties of Buton rock asphalt modified asphalt cement at high-temperature[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2008,25(9):63-66.
- [12] 郭利平,张争奇,张伟,等. 基于高温和粘结性能的橡胶沥青胶浆性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2012,34(1):46-51.
GUO Li-ping, ZHANG Zheng-qi, ZHANG Wei, et al. Study on the mucilage performance of rubber asphalt based on high temperature properties and bond behavior[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2012,34(1):46-51.
- [13] 纪波印,夏艳平,刘涌,等. 影响废旧轮胎胶粉热-机械剪切脱硫再生效果的因素[J]. 合成橡胶工业,2012,35(4):308-311.
JI Bo-yin, XIA Yan-ping, LIU Yong, et al. Influence factors of thermal-mechanical shearing devulcanization for waste tire rubber powder[J]. China Synthetic Rubber Industry,2012,35(4):308-311.
- [14] 叶奋,杨思远,吴晓羽,等. 深度降解橡胶改性沥青的流变性能[J]. 建筑材料学报,2016,19(5):945-949.
YE Fen, YANG Si-yuan, WU Xiao-yu, et al. Rheological property of highly degraded rubber modified asphalt[J]. Journal of Building Materials,2016,19(5):945-949.
- [15] 张广泰,方烁,叶奋. 双螺杆挤出胶粉改性沥青流变性能研究[J]. 中国公路学报,2019,32(5):57-63,99.
ZHANG Guang-tai, FANG Shuo, YE Fen. Rheological properties of crumb rubber-modified asphalt prepared by twin-screw extrusion[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(5):57-63,99.
- [16] 董瑞琨,戚昌鹏,郑凯军,等. 高温裂解胶粉改性沥青的低温性能试验[J]. 中国公路学报,2017,30(10):

- 32-38.
DONG Rui-kun, QI Chang-peng, ZHENG Kai-jun, et al. Test on low-temperature performance for high-temperature pyrolytic rubber modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10):32-38.
- [17] 杨小龙, 李波, 刘祥, 等. 基于生产工艺参数的橡胶沥青改性机理研究[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(4):640-645.
YANG Xiao-long, LI Bo, LIU Xiang, et al. Mechanism of modification of rubber asphalt on process parameters[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(4):640-645.
- [18] 李晓民, 张肖宁, 王绍怀. 基于动态粘弹力学学的沥青胶浆高温性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(4):11-15.
LI Xiao-min, ZHANG Xiao-ning, WANG Shao-huai. Study on high temperature performance of asphalt mastic based on dynamic viscoelastic mechanics[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(4):11-15.
- [19] 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.
- [20] 谭华, 胡松山, 刘斌清, 等. 基于流变学的复合改性橡胶沥青黏弹特性研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1):115-122.
TAN Hua, HU Song-shan, LIU Bin-qing, et al. Study on viscoelastic properties of rubber modified asphalt based on rheology[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1):115-122.
- [21] 胡松山, 谭华, 覃润浦, 等. 基于流变学的橡胶粉与基质沥青配伍性试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12):3487-3499.
HU Song-shan, TAN Hua, QIN Run-pu, et al. Compatibility test of rubber powder and matrix asphalt based on rheology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12):3487-3499.
- [22] 何立平, 魏建国, 刘乐平, 等. 基于 Han 曲线的橡胶沥青结合料相态结构研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(5):10-18, 94.
HE Li-ping, WEI Jian-guo, LIU Le-ping, et al. Study on phase structure of rubber asphalt binder based on Han curve[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(5):10-18, 94.
- [23] 刘斌清, 胡松山, 谭华, 等. 沥青四组分与橡胶沥青性能指标的相关性分析[J]. 中外公路, 2015, 35(6):321-326.
LIU Bin-qing, HU Song-shan, TAN Hua, et al. Asphalt and rubber asphalt four components performance index of correlation analysis [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(6):321-326.
- [24] 谭忆秋, 李晓琳, 吴建涛, 等. 温度及荷载频率对沥青集料交互作用能力的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3):65-72.
TAN Yi-qiu, LI Xiao-lin, WU Jian-tao, et al. Influence of temperature and loading frequency on the interaction ability of asphalt and aggregate[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3):65-72.
- [25] 谭忆秋, 郭猛, 曹丽萍. 常用改性剂对沥青粘弹特性的影响[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4):7-15.
TAN Yi-qiu, GUO Meng, CAO Li-ping. Effects of common modifiers on viscoelastic properties of asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4):7-15.
- [26] AASHTO 1991-1-1, Report on the 1990 European asphalt study tour[S].
- [27] 李晓燕, 平路, 汪海年, 等. 基于国内外试验方法的橡胶沥青性能测试[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1):10-17.
LI Xiao-yan, PING Lu, WANG Hai-nian, et al. Performance test of rubber asphalt based on domestic and abroad test methods[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1):10-17.
- [28] 于新, 孙文浩, 罗怡琳, 等. 橡胶沥青温度敏感性评价方法研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(2):266-270, 283.
YU Xin, SUN Wen-hao, LUO Yi-lin, et al. Research on the evaluation index of temperature sensitivity of CRMA[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(2):266-270, 283.
- [29] 肖飞鹏, 王涛, 王嘉宇, 等. 橡胶沥青路面降噪技术原理与研究进展[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4):73-91.
XIAO Fei-peng, WANG Tao, WANG Jia-yu, et al. Mechanism and research development of noise reduction technology of rubberized asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4):73-91.
- [30] SZYDLO A, MACKIEWICZ P. Asphalt mixes deformation sensitivity to change in rheological parameters [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(1):1-9.