

引用格式:张鹏,尹振羽.废旧轮胎再生橡胶粉对沥青物理性能及流变性能的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(2):57-64.

ZHANG Peng, YIN Zhenyu. Effect of waste tyre recycled rubber powder on physical and rheology properties of asphalt[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(2): 57-64.

废旧轮胎再生橡胶粉对沥青物理性能及流变性能的影响

张 鹏¹, 尹振羽²

(1. 平顶山市凯达工程监理处, 河南 平顶山 467000; 2. 河南城建学院, 河南 平顶山 467001)

摘 要:将废旧轮胎再生橡胶粉用作沥青改性剂,具有经济和技术可行性。拟定 5%、10%、15%、20% 和 25% 5 个橡胶粉掺量,选用道路工程常用的 70 号沥青,采用熔融共混的方法制备橡胶粉改性沥青。采用传统方法对橡胶粉改性沥青的物理性能进行研究,同时采用动态剪切流变仪和弯曲梁流变仪分别对橡胶粉改性沥青的高温 and 低温流变性能进行研究,评价橡胶粉及其掺量对 70 号沥青路用性能的影响。结果表明,随着橡胶粉掺量的增大,基质沥青的针入度显著降低,软化点增大,粘度增大,延度整体呈减小趋势;离析软化点先增大后减小,胶粉掺量为 15% 时,软化点差值最大。动态剪切流变仪试验结果表明,橡胶粉能够显著提高 70 号沥青的抗车辙性能,且橡胶粉掺量越大,改善效果越显著。弯曲梁流变仪试验结果显示,随着橡胶粉掺量的增大,橡胶粉改性沥青的劲度模量(S)和蠕变速率(m)均减小。5% 和 10% 掺量橡胶粉使得 70 号基质沥青的 PG 低温等级提高了一个等级,15%、20% 和 25% 掺量橡胶粉对 70 号基质沥青的 PG 低温等级没有影响。

关键词:废旧轮胎再生橡胶粉;动态剪切流变仪;弯曲梁流变仪;物理性能;流变性能;沥青

中图分类号: TU414

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2019)02-0057-08

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.02.007

Effect of waste tyre recycled rubber powder on physical and rheology properties of asphalt

ZHANG Peng¹, YIN Zhenyu²

(1. Pingdingshan Kaida Engineering Supervision Office, Pingdingshan, Henan 467000, China;

2. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, Henan 467001, China)

Abstract: Applying the waste tyre recycled rubber powder in the modifier of asphalt is feasible both economically and technically. Five rubber powder dosages, namely 5%, 10%, 15%, 20% and 25%, and No. 70 asphalt, which is commonly used in road engineering, were selected to prepare the modified asphalt by using the melt blending method. The traditional method was used to study the physical properties of the rubber powder modified asphalt. The dynamic shear rheometer and the bending beam rheometer were adopted to study the high and low temperature rheological properties of the rubber powder modified asphalt. The results show that with the increase of rubber powder content, the needle penetration of the matrix asphalt decreases noticeably; the softening point and viscosity increase; and the overall ductility shows a trend of decrease. The segregation softening point increases first but decreases later, and the softening point difference is the largest when the rubber powder content is 15%. The experimental results of the dynamic shear rheometer show that the rubber powder can significantly improve the anti-rutting performance of the

收稿日期: 2018-03-23

基金项目: 西部交通建设科技项目(200131822342)

作者简介: 张 鹏(1977—),男,河南鲁山人,高级工程师,主要从事道路沥青性能与路桥工程研究. E-mail: zhangpe77@163.com

matrix asphalt, and the bigger the rubber powder dosage is, the better the improvement effects are. The experimental results of the bending beam rheometer show that with the increase of rubber powder dosage, both the stiffness modulus (S value) and creep rate (m value) of the rubber powder modified asphalt decrease. The rubber powder dosages of 5% and 10% improve the PG low temperature of the matrix asphalt by a grade while the dosages of 15%, 20% and 25% have no effect on the PG low temperature grade.

Key words: waste tyre recycled rubber powder; dynamic shear rheometer; bending beam rheometer; physical property; rheological property; asphalt

随着汽车保有量的快速增长,由此产生的废旧轮胎存量也在快速递增。目前,全球每年产生废旧轮胎 2 000 万 t,大量废弃轮胎的堆积对环境造成严重污染,因此对废弃轮胎的处置工作变得尤为艰巨。橡胶沥青具有突出的抗反射裂缝、吸收噪音和环保性能,在美国亚利桑那州、加利福尼亚州等地得到广泛应用^[1]。文献[1]研究表明,橡胶沥青混合料具有良好的高温性能,甚至超过了相同油石比条件下的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物改性沥青混合料。文献[2]认为,橡胶粉剂掺量对沥青的路用性能有显著影响,增加胶粉掺量能有效提高其高温性能,但同时降低其低温性能与弹性恢复能力。文献[3-4]认为橡胶沥青的粘度随着胶粉掺量的增大而增大,在确保施工可行性的前提下应尽可能增大胶粉掺量。橡胶粉主要由合成橡胶、天然橡胶、炭黑等组成,还含有防老化剂包括抗氧化剂、热稳定剂、变价金属抑制剂、紫外吸收剂等^[5],防老化剂能够有效改善沥青混合料的抗老化性能^[6]。同时文献[7]认为橡胶改性沥青混合料能够使路面结构层厚度降低约 30%,道路服务寿命延长一倍。将废旧轮胎研磨生产橡胶粉应用于道路沥青的改性不仅具有经济可行性及环保效益,同时能够有效改善沥青及其混合料的路用性能。因此,对废旧轮胎再生循环使用是处置废弃轮胎的有效途径。

本研究拟定 5%、10%、15%、20% 和 25% 5 种橡胶粉掺量水平,选用道路工程常用的 70 号沥青,采用熔融共混的方法制备橡胶粉改性沥青。首先采用传统试验方法,对橡胶改性沥青的三大指标、粘度和弹性恢复等物理性能进行研究;同时采用动态剪切流变仪和弯曲梁流变仪分别对橡胶粉改性沥青的高温(31℃~82℃)和低温(-18℃和-12℃)流变性能进行研究,评价橡胶粉及其掺量对 70 号沥青路用性能的影响。

1 橡胶与沥青的相互作用

橡胶与沥青的混溶一般认为是物理共混,橡胶粉分散于沥青中,对沥青中的芳香组分具有吸收作用,吸收芳香组分后橡胶粉产生溶胀,有效粒径增大(增大幅度具有一定的温度依赖性)^[8]。胶粉颗粒发生物理溶胀反应,表面与基质沥青形成凝胶体,彼此相连形成似网状结构^[3]。与沥青共混前,橡胶粉界面清晰,表面分布有较多开口孔隙;共混后橡胶粉表面变得模糊,表面孔隙部分消失^[9]。芳香组分比例的降低使得橡胶改性沥青的粘度增大,而为了能够满足生产储存及施工过程泵送的需求,应保证工作温度下橡胶改性沥青粘度不至于过大,一般可采用添加油分(如芳香化合物或环烷油)等来软化沥青,降低沥青的粘度及改善改性沥青的低温性能。当橡胶改性沥青的粘度趋于稳定时,橡胶粉对沥青中油分的吸收基本结束。共混过程橡胶粉可能分解、溶解或分子量降低,从而导致橡胶改性沥青粘度的降低。文献[10-11]采用扫描电镜对橡胶改性沥青的微观形貌进行分析,发现高温条件下橡胶粉与沥青共混后,橡胶颗粒首先发生物理溶胀,随后颗粒表面与沥青产生化学反应生成凝胶体,将橡胶粉颗粒中心串联为网络状结构,起到加筋补强效果。

影响橡胶与沥青相互作用的因素较多,如沥青中芳香组分的比例、沥青的温度和粘度,橡胶粉的生产工艺(环境或低温研磨)、胶粉粒径、胶粉的比表面积和化学组成^[12-14]。其中橡胶粉的比表面积是影响橡胶粉与沥青相互作用的最重要因素^[8]。橡胶粉的最大粒径为 0.15 mm 时,对密级配沥青混合料的改性效果最好;橡胶粉的最大粒径为 0.60 mm 时,则对开级配沥青混合料的改性效果最好^[15]。在不考虑橡胶粉种类的前提下,随着橡胶粉粒径的增大,沥青混合料的回弹模量降低、疲劳寿命增大^[16]。常温研磨橡胶粉的改性效果优于低温研磨橡胶粉^[17],原因可能是常温研磨橡胶粉具有更大的比表面积以及不规则的形状^[16]。橡胶改性沥青的粘度随着橡胶粉掺量的增大而增大,有可能影响橡胶改性沥青的施工性能,因此橡胶粉的掺量一般不

超过基质沥青质量的 20%^[18]。

2 原材料及改性沥青的制备

2.1 原材料

2.1.1 沥青

沥青为壳牌 70 号道路石油沥青,其指标检测结果见表 1。沥青的 PG 等级为 PG64-22,PG 为 Performance Grade 的缩写,表示沥青胶结料高温性能能够满足 30 年沥青路面 7 天最高温度均值不大于 64℃,以及最低温度不低於-22℃的服役条件。

表 1 AH-70 沥青技术指标

Tab. 1 Technical parameters of AH-70 asphalt

检验项目	试验结果	技术要求	试验方法
25℃针入度/(0.1 mm)	69.4	60~80	T0604—2011
软化点(环与球法)/℃	47.2	≥46	T0606—2011
60℃动力粘度/(Pa·s)	213	≥180	T0620—2011
原样沥青			
10℃延度/cm	45	≥15	T0605—2011
闪点/℃	304	≥260	T0611—2011
溶解度/%	99.6	≥99.5	T0607—2011
15℃相对密度	1.019	实测	T0603—2011
质量变化/%	-0.19	±0.8	T0610—2011
薄膜烘箱老化后			
25℃残留针入度比/%	65.1	≥61	T0604—2011
10℃残留延度/cm	10	≥6	T0605—2011

2.1.2 橡胶粉

橡胶粉为常温研磨法生产的橡胶粉,粒度分布范围为 0~0.6 mm,其粒度分析及技术指标检测结果分别见表 2 和表 3。

表 2 橡胶粉粒度分析试验结果

Tab. 2 Results of particle size analysis of rubber powder

筛孔尺寸/mm	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	98.6	27.2	11.2	0.3

表 3 橡胶粉的技术指标试验结果

Tab. 3 Results of technical parameters of rubber powder

技术指标	试验结果	技术指标	试验结果
相对密度	1.047	炭黑质量分数/%	32.03
含水量/%	0.53	丙酮抽出物/%	5.66
纤维质量分数/%	0.01	金属含量/%	0.02
灰分/%	5.44	橡胶烃含量/%	56.26

2.2 橡胶改性沥青的制备

首先将基质沥青加热至 165℃,保证沥青处于流动状态;然后将拟定掺量的橡胶粉加入沥青,将温度升高并稳定至 180℃,采用高速剪切仪以 2 000 r/min 搅拌剪切 20 min;随后调整转速为 5 000 r/min,搅拌剪切 1.5 h;最后采用 100 r/min 的转速搅拌 15 min,以消除剪切过程中残留的空气。

3 橡胶粉改性沥青性能研究

3.1 橡胶粉对沥青物理性能的影响

3.1.1 三大指标

沥青的针入度、软化点和延度试验分别依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0604—2011、T0606—2011 和 T0605—2011 的方法进行。针入度试验温度为 25 ℃；延度试验温度为 5 ℃，拉伸速度为 5 cm/min。不同橡胶粉掺量的改性沥青的三大指标试验结果见图 1。

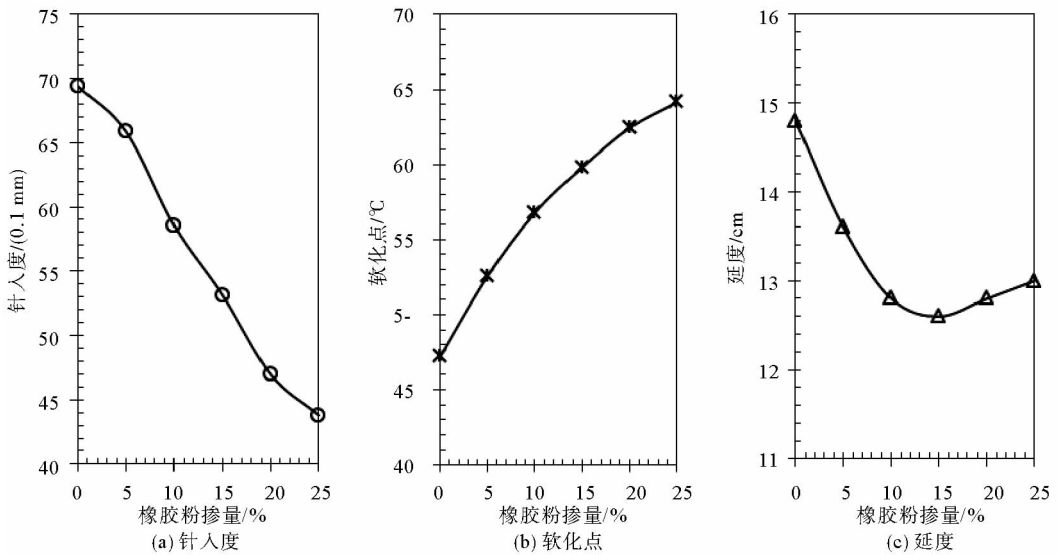


图 1 不同橡胶粉掺量的改性沥青的三大指标试验结果

Fig. 1 Results of three indexes of modified asphalt with different dosages of rubber powder

沥青的针入度能够反映沥青稠度，沥青针入度越小，则沥青越硬、稠度越大。由图 1 可知，随着橡胶粉掺量的增大，基质沥青的针入度显著降低。表明添加橡胶粉后，沥青的稠度增大，沥青趋于硬化。橡胶粉掺量为 5%~20% 时，针入度降低速率较快，20% 掺量时，橡胶粉改性沥青针入度下降至基质沥青的 67.6%；掺量大于 20% 后，针入度降低速率有所减小。沥青软化点反映沥青的高温性能，软化点高表明沥青的高温稳定性好。添加橡胶粉后，基质沥青的软化点增大；但随着橡胶粉掺量的增大，橡胶粉改性沥青软化点的增长速率减小，表明随着橡胶粉掺量的增大，软化点对胶粉掺量的敏感度降低。延度在一定程度上反映沥青的低温性能，沥青的延度越大，低温性能越好。随着橡胶粉掺量的增大，橡胶粉改性沥青的延度整体呈减小趋势。橡胶粉掺量低于 15% 时，随着胶粉掺量的增大延度逐渐减小；橡胶粉掺量大于 15% 后，随着橡胶粉掺量的增大，沥青的延度反而有小幅增大，可能是由于胶粉掺量较大时，胶粉溶胀和部分溶解形成的丝状网络结构提高了沥青的延展性，减小了胶粉对沥青延度的衰减幅度。

图 1 橡胶粉改性沥青物理性能试验结果表明，添加橡胶粉后，沥青趋于硬化。原因是：一方面橡胶粉与沥青共混后，其表面微观空隙能够吸收沥青中的软沥青组分，沥青中沥青质组分含量相对增大，使得沥青凝胶化程度增加；另一方面，橡胶粉与沥青高温搅拌剪切过程，胶粉溶胀、部分溶解，溶胀胶团在沥青中随机分散形成丝状网络，提高了沥青的力学性能。

3.1.2 粘度

不同橡胶粉掺量的橡胶粉改性沥青粘度的试验结果见图 2。由图 2 可知，在不同温度下，随着橡胶粉掺量的增大，改性沥青的粘度均增大。且当胶粉掺量大于 20% 后，粘度增长趋于平缓。

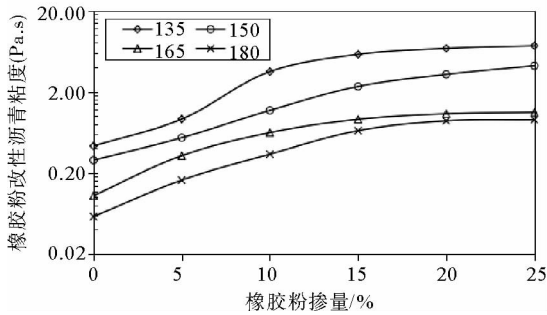


图2 橡胶粉掺量对橡胶粉改性沥青粘度的影响

Fig. 2 Effect of rubber powder content on the viscosity of rubber powder modified asphalt

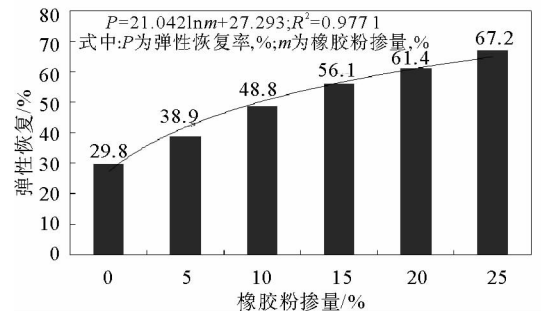


图3 橡胶粉掺量对橡胶粉改性沥青弹性恢复的影响

Fig. 3 Effect of rubber powder content on the elastic recovery of rubber powder modified asphalt

3.1.3 弹性恢复

沥青的弹性恢复是反映沥青在受到外力作用后恢复至原状态的能力,其能力的好坏直接影响沥青的高温性能、低温性能、疲劳性与耐久性。弹性恢复试验依据公路工程沥青及沥青混合料试验规程(T0662—2000)的方法进行,试验温度为 25°C ,不同橡胶粉掺量的改性沥青弹性恢复试验结果见图3。由图可知,橡胶粉掺量由5%增大至25%时,弹性恢复百分比由38.9%增大至67.2%,橡胶改性沥青的弹性恢复百分比随着橡胶粉掺量的增大而逐步增大。随着橡胶粉掺量的增大,橡胶粉掺量对改性沥青弹性恢复的影响减小,橡胶粉掺量与橡胶粉改性沥青的弹性恢复成对数关系,对数模型拟合相关系数 $R^2=0.9771$,相关性显著。

3.1.4 储存稳定性

保证改性剂与沥青具有良好的存储稳定性是保证良好改性效果的关键,采用改性离析试验评价橡胶粉改性沥青的储存稳定性。离析软化点差值小,表明改性沥青具有好的存储稳定性,反之储存稳定性较差。不同橡胶粉掺量的改性沥青软化点差值见图4。由图4知,上部软化点均大于下部软化点,原因是原样橡胶粉同基质沥青的密度相差不大,密度比约为1.027,胶粉与沥青共混后,吸收沥青的软沥青组分,体积膨胀密度降低,密度小于基质沥青的密度^[5],经历48 h的 163°C 高温储存后,橡胶粉颗粒上浮,使得上部沥青胶粉含量大于下部沥青。随着橡胶粉掺量的增大,改性沥青的离析软化点先增大后减小,胶粉掺量为15%时,离析软化点最大,达 10.6°C 。原因可能是当胶粉掺量小于15%时,此时胶粉含量相对较低,橡胶粉分散于沥青中,对沥青中的芳香组分具有吸收作用,吸收芳香组分后橡胶粉产生溶胀,密度减小,随着胶粉掺量的增大,胶粉离析加剧,导致软化点差值增大;当胶粉掺量大于15%时,胶粉掺量较大,仅有部分胶粉能够充分溶胀,胶粉与沥青的密度差减小,因此储存稳定性有所恢复。据此建议,橡胶粉掺量应避免在15%左右。

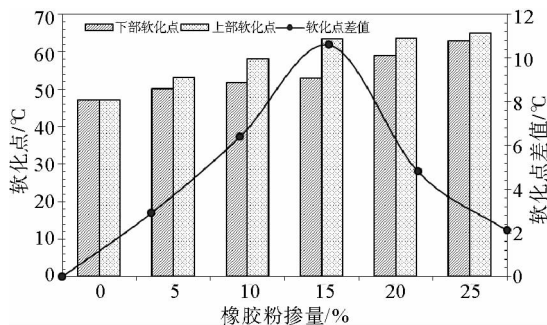


图4 橡胶粉掺量对橡胶粉改性沥青存储稳定性的影响

Fig. 4 Effect of rubber powder content on the restore stability of rubber powder modified asphalt

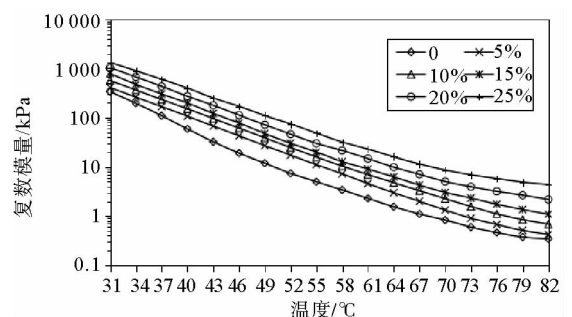


图5 橡胶粉掺量对橡胶粉改性沥青复数模量的影响

Fig. 5 Effect of rubber powder content on the complex modulus of rubber powder modified asphalt

3.2 橡胶粉对沥青流变性能的影响

3.2.1 动态剪切流变仪高温扫描

沥青为粘弹性材料,其粘弹性行为具有温度和时间依赖性。采用动态剪切流变仪测试橡胶粉改性沥青的复数剪切模量(G^*)和相位角(δ)两个指标, G^* 表示沥青材料在重复剪切变形时总阻力值; δ 则反映了 G^* 中损耗弹性模量与储存弹性模量的比例关系,是应变相对于应力的滞后程度指标。橡胶粉改性沥青复数模量的试验结果见图5。

由图5知,在31~82℃温度范围内,随着温度的升高,橡胶粉改性沥青的 G^* 单调减小。在同一温度条件下,随着橡胶粉掺量的增大,70号沥青的 G^* 逐渐增大,橡胶粉对70号基质沥青具有硬化效果。原因是橡胶粉的加入,使得沥青中轻组分含量减小,沥青质含量增大,沥青变得更加黏稠,其复数剪切模量增大。复数剪切模量在一定程度上反映了沥青抵抗重复剪切变形的能力,其高温条件下模量值越大,沥青的刚度越大,有利于沥青的高温稳定性。

31~82℃范围内,不同橡胶粉掺量改性沥青的相位角如图6所示。由图6知,随着温度的升高,沥青的相位角单调增大,温度为82℃时,基质沥青的相位角接近90°。随着温度的升高,橡胶粉改性沥青的相位角并未出现类似聚合物改性沥青的相分离过程,表明在31~82℃温度范围橡胶粉同沥青界面接触良好。在同一温度条件下,随着橡胶粉掺量的增大,沥青的相位角显著减小;橡胶粉掺量为10%~20%时,橡胶粉掺量对沥青相位角的影响十分显著,相位角的降低速率较大。相位角反映了沥青的粘弹性能,其值越大,沥青弹性越小,粘性成分多。相位角的减小,表明弹性增强粘性减弱。

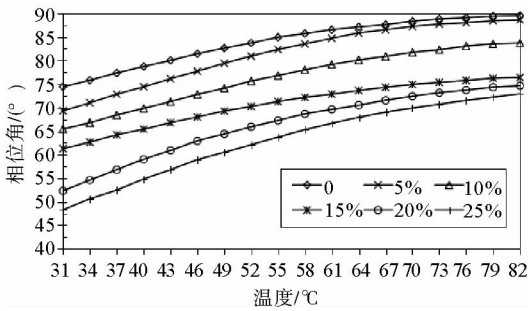


图6 橡胶粉掺量对橡胶粉改性沥青相位角的影响
Fig. 6 Effect of rubber powder content on the phase angle of rubber powder modified asphalt

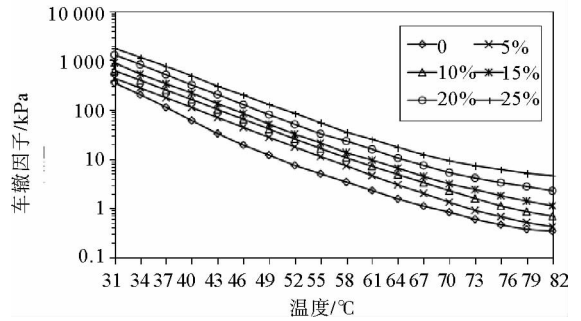


图7 橡胶粉掺量对橡胶粉改性沥青车辙因子的影响
Fig. 7 Effect of rubber powder content on the rutting parameter of rubber powder modified asphalt

图7为橡胶粉改性沥青的车辙因子,随着橡胶粉掺量的增大,沥青的车辙因子显著增大。相对于基质沥青,橡胶粉掺量由5%提高至25%时,64℃温度条件下,橡胶粉改性沥青的车辙因子分别增长约1倍和10倍。表明橡胶粉能够显著提高70号沥青的抗车辙性能,且橡胶粉掺量越大,抗车辙性能提高越显著。

3.2.2 弯曲梁流变仪试验

对经短期热氧老化和长期热氧老化后的橡胶粉改性沥青进行弯曲梁流变仪试验,测试不同掺量的橡胶粉改性沥青在低温条件下的劲度模量(S)和蠕变速率(m)。由于基质沥青的PG等级为PG64-22,故弯曲梁流变仪试验温度选取-12℃和-18℃。-12℃和-18℃温度条件下橡胶粉改性沥青的弯曲梁流变仪试验结果分别见图8和图9。在-12℃温度条件下,随着橡胶粉掺量的增大,橡胶粉改性沥青的 S 值和 m 值均减小。相对于70号基质沥青,橡胶粉掺量为5%和25%时, S 值分别降低13.2%和65.7%, m 值分别降低4.1%和15.1%。但橡胶粉掺量为25%时, m 值仍满足不小于0.3的要求。

在-18℃温度条件下,橡胶粉对70号基质沥青 S 值和 m 值的影响趋势与-12℃温度条件相同,随橡胶粉掺量的增大,橡胶粉改性沥青的 S 值和 m 值均减小。对于70号基质沥青, S 值已不满足小于300 MPa的要求;而5%和10%掺量橡胶粉改性沥青的 S 值和 m 值均满足要求;橡胶粉掺量大于10%后, S 值虽然满足小于300 MPa的要求,但 m 值已不满足不小于0.3的要求。因此,5%和10%掺量橡胶粉使得70号基质

沥青的 PG 低温等级改善了一个等级,15%、20%和 25%掺量橡胶粉对 70 号基质沥青的 PG 低温等级没有影响。

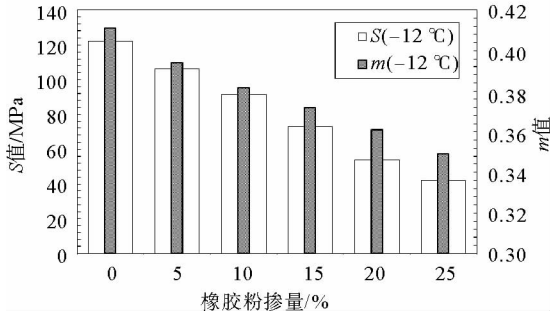


图 8 不同橡胶粉掺量的橡胶粉改性沥青弯曲梁流变仪试验结果(-12 °C)

Fig. 8 Results of bending beam rheometer test of different dosages of rubber powder modified asphalt (-12 °C)

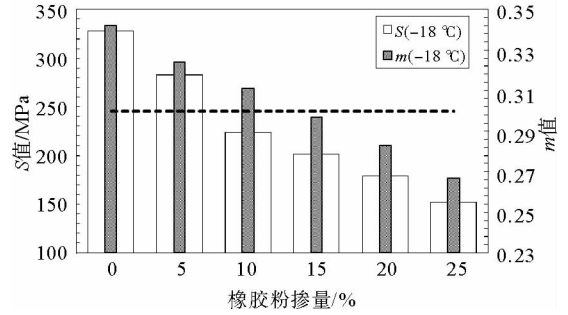


图 9 不同橡胶粉掺量的橡胶粉改性沥青弯曲梁流变仪试验结果(-18 °C)

Fig. 9 Results of bending beam rheometer test of different dosages of rubber powder modified asphalt (-18 °C)

4 结论

1) 随着橡胶粉掺量的增大,基质沥青的针入度显著降低,软化点增大,延度整体呈减小趋势;随着橡胶粉掺量的增大,改性沥青的粘度均增大。物理性能试验结果表明,添加橡胶粉后,沥青趋于硬化。

2) 离析试验结果表明,橡胶粉改性沥青的上部软化点均大于下部软化点,随着橡胶粉掺量的增大,改性沥青的离析软化点先增大后减小,胶粉掺量为 15%时,离析软化点最大,达 10.6 °C。建议橡胶粉掺量应避免在 15%左右。

3) 随着橡胶粉掺量的增大,70 号沥青的 G^* 逐渐增大,沥青的相位角显著减小;沥青的车辙因子显著增大。相对于基质沥青,橡胶粉掺量由 5%提高至 25%时,64 °C 温度条件下橡胶粉改性沥青的车辙因子分别增长约 1 倍和 10 倍。表明橡胶粉能够显著提高 70 号沥青的抗车辙性能,且橡胶粉掺量越大,抗车辙性能提高越显著。

4) 弯曲梁流变仪试验结果表明,在 -12 °C 和 -18 °C 温度条件下,随着橡胶粉掺量的增大,橡胶粉改性沥青的 S 值和 m 值均减小。5%和 10%掺量橡胶粉使得 70 号基质沥青的 PG 低温等级改善了一个等级,15%、20%和 25%掺量橡胶粉对 70 号基质沥青的 PG 低温等级没有影响。

参考文献:

- [1]王伟. 橡胶沥青混合料高温性能研究[D]. 上海:同济大学,2008:28-32.
- [2]何立平,申爱琴,谢成,等. 橡胶沥青结合料性能正交试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014,34(1):7-12.
HE Liping, SHEN Aiqin, XIE Cheng, et al. Orthogonal test for rubber asphalt properties[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(1): 7-12.
- [3]LI T G, LI J Z, LI W. Micro-mechanism study and road engineering application of asphalt rubber[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 361-363: 1817-1824.
- [4]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 Xiaolong, 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.
- [5]王强,袁野,欧阳春发,等. 废旧橡胶改性沥青的老化研究现状[J]. 高分子通报,2015(6):19-28.
WANG Qiang, YUAN Ye, OUYANG Chunfa, et al. Research on aging of waste rubber modified asphalt[J]. Polymer Bulletin, 2015(6): 19-28.
- [6]印佳,毛雨璐,李金亮,等. 橡胶沥青紫外老化过程的探索[J]. 合成材料老化与应用,2010,39(3):18-22.
YIN Jia, MAO Yujun, LI Jinliang, et al. Investigation on the ultraviolet aging of asphalt rubber[J]. Synthetic Materials Ag-

- ing & Application, 2010, 39(3): 18-22.
- [7] 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(10/11): 1446-1451.
- [8] NAVARRO F J, PARTAL P, MARTINEZ-BOZA F, et al. Thermo-rheological behaviour and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens[J]. Fuel, 2004, 83(14): 2041-2049.
- [9] XIANG L, CHENG J, QUE G. Microstructure and performance of crumb rubber modified asphalt[J]. Construction & Building Materials, 2009, 23(12): 3586-3590.
- [10] 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 Tinggang, LI Jinzhong, 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.
- [11] 朱浩然, 蔡海泉, 李峰, 等. 活性橡胶沥青胶结料微观结构分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 35-39.
ZHU Haoran, CAI Haiquan, LI Feng, et al. Microstructure analysis of the reacted and activated rubber asphalt binder[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2016, 35(4): 35-39.
- [12] AL-MANSOB R A, ISMAIL A, YUSOFF N M, et al. Rheological characteristics of unaged and aged epoxidised natural rubber modified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2016, 102(1): 190-199.
- [13] 李波, 王静, 曹贵, 等. 废旧胶粉特性对橡胶沥青高温性能的影响机理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(2): 347-355.
LI Bo, WANG Jing, CAO Gui, et al. Influence mechanism of crumb rubber characteristics on high-temperature performance for rubber modified asphalt binder[J]. Journal of Basic Science & Engineering, 2017, 25(2): 347-355.
- [14] 程培峰, 李艺铭, 李吉庭, 等. 橡胶沥青老化性能的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(3): 144-147.
CHENG Peifeng, LI Yiming, LI Jiting, et al. Experimental research on aging properties of rubber asphalt[J]. New Building Materials, 2017, 44(3): 144-147.
- [15] WONG C C, WONG W. Effect of crumb rubber modifiers on high temperature susceptibility of wearing course mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(8): 1741-1745.
- [16] XIAO F, AMIRKHANIAN S N, SHEN J, et al. Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1028-1034.
- [17] KÖK B V, ÇOLAK H. Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(8): 3204-3212.
- [18] DANTAS-NETO S A, FARIAS M M, PAIS J C, et al. Dense graded hot mixes using asphalt-rubber binders with high rubber contents[J]. Road Materials & Pavement Design, 2006, 7(1): 29-46.

(责任编辑:吕海亮)

(上接第 48 页)

- [8] JASSON PE, WIDMALM G. Welan gum(S-130) contains repeating units with randomly distributed L-mannose and L-rhamnosyl terminal groups as determined by FABMS[J]. Carbohydrate Research, 1994, 256(2): 327-330.
- [9] MWN H, MORRIS E R. Solubility, solution rheology and salt-induced gelation of Welan polysaccharide in organic solvents [J]. Carbohydrate Polymers, 1995, 27(1): 23-36.
- [10] LI H, JIAO X, SUN Y W, et al. The preparation and characterization of a novel sphingon WL from marine *Sphingomonas* sp. WG[J/OL]. Scientific Reports, 2016, 6: 37899.
- [11] LI H, FENG Z M, SUN Y J, et al. Draft genome sequence of *Sphingomonas* sp. WG, a Weilan gum-producing strain [J/OL]. Genome Announcements, 2016, 4(1): e01709-15.
- [12] LOPES L, MILAS M, RINAUDO M. Influence of the method of purification on some solution properties of Weilan gum [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 1994, 16(5): 253-258.
- [13] 刘莎. 微生物多糖的制备和应用研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2010: 3-5.
- [14] 周浩然. 微生物多糖威兰胶生产工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 9-15.
- [15] 陈芳. 威兰胶生产工艺初探及流变特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007: 15-27.

(责任编辑:吕海亮)