

文章编号:1671-8879(2017)02-0026-09

废旧胶粉的反应与交联作用对 橡胶沥青黏度的影响

李 波¹, 李 鹏¹, 张新雨², 曹 贵³, 杨小龙¹

(1. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省交通科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃路桥建设集团有限公司 甘肃省道面工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730030)

摘 要:以布氏旋转黏度为指标,研究了废旧胶粉掺量、粒径、制备工艺等特性对橡胶沥青以及滤除胶粉后改性沥青黏度的影响,并采用凝胶色谱试验分析了沥青大分子(LMS)的变化,在此基础上,探讨了胶粉与沥青的反应作用(IE)与胶粉颗粒在沥青中的交联作用(PE)对橡胶沥青黏度的影响机理。研究表明:随着胶粉掺量的增加,橡胶沥青的黏度、胶粉与沥青的反应作用及未反应胶粉的交联作用、LMS 含量也逐渐增大,滤除未反应胶粉颗粒后的改性沥青黏度增长并不明显;常温胶粉改性沥青的黏度、胶粉与沥青的反应作用和未反应胶粉的交联作用明显高于冷冻胶粉改性沥青的黏度,而 80 目或高掺量冷冻胶粉改性沥青过滤沥青的黏度大于常温胶粉改性沥青过滤沥青的黏度,不同生产工艺胶粉改性沥青的 LMS 含量没有明显变化规律;40 目的废旧胶粉改性沥青的黏度和未反应胶粉的交联作用较 30 目和 80 目大,而 80 目常温胶粉改性沥青中胶粉与沥青的反应作用最大,增加冷冻胶粉的细度对于增加滤除未反应胶粉颗粒后改性沥青的黏度更有效,胶粉粒径越小,橡胶沥青 LMS 含量越大;橡胶沥青的 LMS 与黏度有较为显著的相关性,与其 IE 有一定的相关性,而与 PE 的相关性较差。废旧胶粉特性对橡胶沥青的黏度影响显著,合理地选择废旧胶粉参数有助于制备高性能的橡胶沥青。

关键词:道路工程;橡胶沥青;废旧胶粉;布氏旋转黏度;凝胶色谱;反应作用;交联作用

中图分类号:U414

文献标志码:A

Interaction and particle effect of crumb rubber characteristics on Brookfield viscosity of rubber asphalt binder

LI Bo¹, LI Peng¹, ZHANG Xin-yu², CAO Gui³, YANG Xiao-long¹

(1. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Gansu Provincial Transportation Research Institute Co. Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Pavement Engineering and Research Center in Gansu Province, Gansu Road and Bridge Construction Group Co. Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: Effect of crumb rubber modifier (CRM) characteristics on rubber asphalt and rubber asphalt binder filtered rubber powder was studied based on Brookfield viscosity. These

收稿日期:2016-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51408287,51668038);甘肃省杰出青年基金项目(1606RJDA318);

甘肃省自然科学基金项目(1506RJZA064);兰州交通大学优秀科研团队项目(201606)

作者简介:李 波(1981-),男,宁夏中卫人,副教授,工学博士,E-mail:libolzjtu@hotmail.com。

characteristics include content, particle size and production method. Large molecular sizes (LMS) of asphalt were analyzed by high pressure-gel permeation chromatographic experiment. Based on this, the influence mechanism of the interaction effect (IE) and the particle effect (PE) on Brookfield viscosity was discussed. The results show that the viscosity, IE, PE and LMS increase as the crumb rubber content increase for rubber asphalt binder, which is not obvious for asphalt binder filtered rubber particle size. The viscosity, IE, PE of ambient rubber asphalt binder are obviously larger than that of cryogenic CRM binders. The viscosity of cryogenic asphalt binder filtered rubber particle size is larger than that of ambient asphalt binder filtered rubber particle size when particle size is 80 mesh or high content. The LMS change rule is not obvious for ambient and cryogenic rubber asphalt binders. The viscosity and PE of 40 mesh rubber asphalt are larger than that of 30 and 80 mesh asphalt, and the IE of 80 mesh rubber asphalt is the highest. It is more effective to reduce particle size for the viscosity of cryogenic asphalt binder filtered rubber particle size. The smaller the particle size of rubber, the larger the LMS of rubber asphalt. LMS has a significant correlation with viscosity and certain relevance with IE, but it is poor for PE. There is a significant influence of crumb rubber modifier characteristics on rubber asphalt binder. Reasonable rubber characteristic is helpful to produce high efficiency rubber asphalt binder. 5 tabs, 11 figs, 30 refs.

Key words: road engineering; rubber asphalt; crumb rubber; Brookfield viscosity; high pressure-gel permeation chromatographic; interaction effect; particle effect

0 引言

废旧橡胶轮胎是固体有机废弃物的主要来源。采用废轮胎胶粉作为改性剂用于工程建设是非常好的轮胎回收利用方式,其中,以废旧轮胎胶粉作为改性剂制备橡胶沥青,可显著提高沥青性能,改善路面抗车辙、反射裂缝、水稳定性和疲劳开裂等性能^[1-5]。废旧胶粉作为制备橡胶沥青的主要原材料之一,其技术特性对橡胶沥青具有重要影响^[6-9]。

目前胶粉生产工艺主要包括常温法与冷冻法,而这2种生产工艺的胶粉对改性沥青性能的影响也不相同。Shen等通过试验证明常温法生产的胶粉表面积是冷冻法生产胶粉表面积的2倍,且橡胶沥青黏度与胶粉表面积具有良好的相关性^[10];廖明义等指出常温法生产的胶粉更容易降解,达到稳定分散所需要的时间较短,冷冻法生产的胶粉最难降解,难以制备稳定分散的改性沥青^[11];何兆益等研究发现,斜交胎胶粉的改性效果优于子午胎胶粉^[12];Memon采用 H_2O_2 氧化胶粉改性沥青,发现氧化胶粉改性沥青的稳定性和流变性能有所提高^[13];Shatanawi等指出用 FeSO_4 作催化剂制备的氧化废胶粉改性沥青具有更优异的性能^[14]。除胶粉生产工艺外,胶粉的掺量和目数对橡胶沥青的性能影响也非常显著。Jeong等的研究表明废旧胶粉掺入导致

橡胶沥青的大分子比例增加,从而显著影响了沥青的黏度和车辙因子^[15];Hossain等认为增加废旧胶粉用量可以改善橡胶沥青的抗水损坏能力^[16];Kim等发现高掺量的废旧胶粉有助于改善高温抗变形能力和低温弹性^[17];罗要飞等推荐常规试验条件下常温法胶粉掺量为20%,目数在20~60时,胶粉改性沥青性能较好^[18];胡苗等认为在橡胶粉掺量达到一定量后,掺量和目数对橡胶沥青中分散介质黏度的提高不再显著^[19];曹荣吉等发现20目胶粉优于40目及60目胶粉,其最佳掺量为18%^[20];徐鸥明等发现40目橡胶粉吸附和溶胀效果最好,制成的橡胶沥青胶浆的车辙因子最大,60目次之,20目最小^[21];杨永顺等认为采用粒度为80目、掺量为15%的橡胶粉制备橡胶沥青,其性能最优^[22];何立平等推荐胶粉最佳掺量为20%~25%^[23]。总体来看,中国目前的研究一致认为,常温胶粉较冷冻胶粉更有利于橡胶沥青的性能改善;但关于废旧胶粉的最佳掺量和目数对橡胶沥青的影响尚无统一认识。同时,中国针对胶粉改性沥青的很多结论均是基于针入度、软化点、延度等现行规范指标得到的,而这些指标对橡胶沥青的适用性仍是值得探讨的问题。

综上所述,胶粉的生产工艺、粒径大小、表面积和掺量是影响橡胶沥青反应的主要因素,这些因素最终也决定着橡胶沥青的路用性能。但是,中国相

关研究中并没有完全考虑胶粉的这些特性对橡胶沥青性能的内在影响。为此,本文以黏度为指标,研究胶粉特性对橡胶沥青黏度以及滤除胶粉后改性沥青黏度的影响,在此基础上,探讨胶粉与沥青的反应作用和未反应胶粉的交联作用对橡胶沥青黏度的影响,对于全面了解废旧胶粉改性沥青的生产机理及其影响因素,促进该技术的应用推广具有重要的理论意义和应用价值。

1 原材料

本文选用甘肃路桥建设集团有限公司提供的SK90[#]基质沥青,其主要技术指标见表1。

表 1 基质沥青主要技术指标

Tab. 1 Main technical parameters of base asphalt

针入度(25℃, 100 g,5 s)/ 0.1 mm	延度(15℃, 5 cm·min ⁻¹) /cm	软化 点/℃	RTFOT(163℃,85 min)		
			质量损 失/%	针入度 比/%	25℃延 度/cm
92.2	>100	46.2	0.07	70	9.0

本文采用2种不同生产工艺(常温法与冷冻法)的橡胶粉,其物理化学指标见表2、表3。同时,为了研究胶粉颗粒对沥青性能的影响,将含有一定级配的橡胶粉分别过30、40、80目的胶粉筛后备用,其中30目是20~30目之间的筛余量,40目是30~40目之间的筛余量,80目是40~80目之间的筛余量。

表 2 路用橡胶粉的物理技术指标

Tab. 2 Physical technical parameters of CRM

试验项目	体积密度/ (kg·m ⁻³)	水分/%	金属含量/%	纤维含量/%
技术标准	260.0~460.0	<1	<0.030	<1.000
常温法	305.6	0	0.011	0.076
冷冻法	299.6	0	0.011	0.074

注:技术标准为《硫化橡胶》(GB/T 19208—2008),下同。

表 3 路用橡胶粉的化学技术指标

Tab. 3 Chemical technical parameters of CRM

试验项目	灰分/%	加热减 量/%	丙酮抽 出物/%	碳黑含 量/%	橡胶烃 含量/%
技术标准	≤8.0	≤1.00	≤22.0	≥28	≥42
常温法	7.5	0.75	7.6	29	50
冷冻法	7.4	0.76	7.5	31	52

2 研究方案

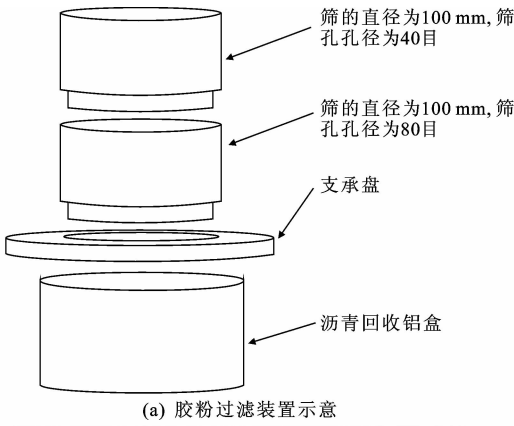
2.1 橡胶沥青的制备工艺

将基质沥青加热至完全流动状态,倒入反应罐500 g,在150℃恒温条件下保温60 min左右,然后快速将反应罐中沥青加热反应温度调至190℃。同

时,将反应罐置于恒温磁力加热搅拌器中,缓慢加入橡胶粉,注意搅拌器搅拌速率的调节必须由慢到快逐渐增加至试验规定的反应速率2 000 r/min,橡胶粉与沥青搅拌60 min后,倒入沥青存放铝盒并密封,冷却至室温,并放置约24 h后进行其性能的测试。

2.2 橡胶沥青胶粉过滤试验

将橡胶沥青样品在163℃的条件下恒温加热60 min左右,并充分搅拌均匀,然后称取200 g左右的橡胶沥青倒入沥青筛进行过滤,分2层过滤,上层为40目,下层为80目,其过滤装置如图1所示,整个过程在150℃的恒温烘箱中进行,过滤时间为1 h左右。过滤完成后对液相沥青进行黏度测试。



(a) 胶粉过滤装置示意



(b) 胶粉过滤装置实物

图 1 橡胶沥青胶粉过滤装置

Fig. 1 Rubber asphalt binder draining setup

2.3 橡胶沥青黏度测试

为了使基质沥青、橡胶沥青、过滤沥青的黏度测试扭矩保持在10%~98%之间^[24],本文中基质沥青与滤除胶粉的液体沥青(过滤沥青)的黏度分析以135℃布氏黏度为主,黏度测试时采用21[#]转子,沥青质量为8.5 g,转速为20 r/min;橡胶沥青的黏度测试温度为180℃,测试时采用27[#]转子,沥青质量为12.5 g,转速为20 r/min。

2.4 IE、PE 对橡胶沥青性能的影响评价方法

根据文献[25]的研究结果,橡胶沥青的力学特性主要受沥青与胶粉的反应作用(interaction effect, IE)以及胶粉颗粒在沥青中的交联作用(particle effect, PE)的影响。IE 是过滤沥青相对于基质沥青性能的改变,即胶粉与沥青反应作用对沥青性能的影响;PE 是橡胶沥青相对于过滤沥青性能的改变,即橡胶沥青中胶粉颗粒的交联作用对沥青性能的影响。

采用式(1)、式(2)分别计算黏度中 IE 和 PE 的大小,以研究 IE 和 PE 对橡胶沥青黏度影响的内在规律与机理

$$I_{IE} = \frac{V_d - V_b}{V_b} \tag{1}$$

$$I_{PE} = \frac{V_r - V_d}{V_b} \tag{2}$$

式中: I_{IE} 为沥青与胶粉反应作用对黏度的影响; I_{PE} 为胶粉颗粒在沥青中的交联作用对黏度的影响; V_d 为过滤沥青的黏度; V_b 为基质沥青的黏度; V_r 为橡胶沥青的黏度。

2.5 凝胶色谱试验

凝胶色谱(GPC)试验采用 Waters 410 示差折射率检测器,2 根色谱柱被用来分离沥青胶结料分子成分。测试时色谱柱保持 35 ℃ 的恒定温度,流动相为四氢呋喃(THF),流速为 1.0 mL/min,试样溶液浓度为 2.0 mg/mL。当沥青完全溶于 THF 后,将溶液过 0.45 μm 筛进行过滤。GPC 进样量为 50 μL,每组测试时长约为 30 min。将测试得到的信号曲线分为 3 部分:大粒径分子 LMS(1~5 等分)、中粒径分子(6~9 等分)和小粒径分子(10~13 等分)。已有研究表明,LMS 与沥青特性具有较好的相关性,故在本文中只考虑 LMS 的变化[26]。

3 结果与讨论

3.1 橡胶沥青的黏度

橡胶沥青的黏度如图 2 所示,其中,10%常温表示常温法胶粉掺量 10%;其他以此类推。

从图 2 可以看出,在基质沥青中掺加常温法与冷冻法废旧胶粉改性沥青的 180 ℃黏度呈现了相似的变化规律,即随着胶粉掺量的增加,橡胶沥青的黏度也逐渐增大,特别是胶粉掺量增加至 20%时橡胶沥青黏度增长非常显著。这主要是因为随着胶粉掺量的增加,胶粉颗粒在液体沥青中逐渐从游离相向连续相转变,胶粉颗粒间的交联逐渐增加,连续相的

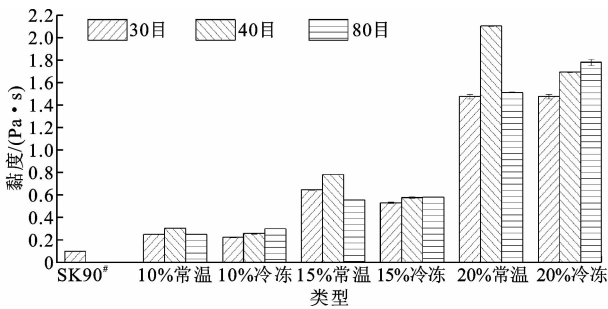


图 2 橡胶沥青的黏度

Fig. 2 Viscosity of rubber asphalt binders

分子力也逐渐增大,所以增加胶粉掺量会增大橡胶沥青的黏度[27]。但是,胶粉生产工艺不同,对橡胶沥青黏度的影响也不同。首先,常温胶粉改性沥青的黏度要明显高于冷冻胶粉改性沥青的黏度。这主要是由于冷冻胶粉颗粒表面光滑,其比表面积较常温胶粉低,表面光滑的橡胶粉颗粒与沥青反应较差[28]。与此同时,对于常温胶粉改性沥青,相同掺量 40 目的胶粉改性沥青的黏度较 30 目和 80 目大,且这种规律随着胶粉掺量的增加变得更加明显。对于冷冻法废旧胶粉,其改性沥青的黏度随着胶粉目数的增大而增大。这主要是因为胶粉越细,比表面积越大,越容易吸附沥青中的轻质组分,溶胀也越充分,对改善胶体结构有利,因而胶粉从 30 目增大到 40 目后,橡胶沥青黏度显著提高。但是当常温胶粉越细时,表面能也越高,越容易聚集成团,不容易分散均匀,反而会影响其空间网状结构的形成,因此,80 目常温胶粉制成的橡胶沥青黏度比 40 目反而略微降低。

采用最小显著性差异法(LSD)检验胶粉的工艺方式、目数、掺量等试验因素对橡胶沥青黏度的影响,结果见表 4。LSD 结果表明,废旧胶粉特性对橡胶沥青黏度有显著性影响。在同种条件下,常温胶粉改性沥青的黏度明显高于冷冻胶粉改性沥青;胶粉掺量越大,橡胶沥青黏度越大;此外,胶粉目数对沥青黏度也有显著性影响,40 目胶粉对沥青黏度影响最大,其性能也最好,80 目胶粉次之,30 目胶粉改性沥青性能最差。

表 4 橡胶沥青 LSD 方差分析结果

Tab. 4 Results of ANOVA of rubber asphalt by LSD test

胶粉类型	LSD 分组	掺量/%	LSD 分组	目数	LSD 分组
常温	A	20	A	40	A
冷冻	B	15	B	80	B
		10	C	30	C

注:A-显著影响;B-有影响;C-影响较小,下同。

3.2 过滤沥青的黏度

对橡胶沥青经过胶粉过滤后的液体沥青进行黏度(135℃)测试,结果如图3所示。可以看出,所有过滤沥青的黏度都比基质沥青的黏度有不同程度的增大,这主要是由于橡胶粉与沥青的反应作用造成的,即橡胶颗粒吸收部分沥青中的油分而改变沥青性能,同时伴随着 CRM 的脱硫与降解作用,增加了橡胶沥青的黏度^[29]。此外,常温法与冷冻法工艺的 30 目或低掺量(10%)废旧胶粉的橡胶沥青过滤沥青的黏度变化基本相当。但是 80 目或高掺量冷冻胶粉改性沥青过滤沥青的黏度大于常温胶粉改性沥青过滤沥青的黏度。

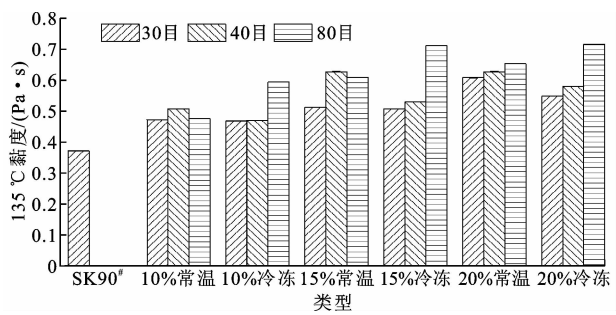


图3 过滤橡胶颗粒后橡胶沥青的黏度
Fig.3 Viscosity of rubber asphalt binders
filtered rubber particle size

对于常温胶粉改性沥青过滤沥青,其黏度随着胶粉掺量的增加而增加,但是,掺量 15%与 20%的 40 目常温胶粉改性沥青过滤沥青的黏度基本相当,80 目常温胶粉改性沥青过滤沥青黏度的增幅也不明显。这主要是由于较大掺量的胶粉吸收了沥青中有限的轻质油分,随着沥青轻质组分含量的逐渐降低,过滤沥青的黏度趋于稳定。此外,相同掺量的 40 目常温胶粉改性沥青的黏度并没有比 30 目和 80 目大很多。对于 30 目和 40 目冷冻胶粉,其改性沥青过滤沥青的黏度也会随掺量增加而增加,但是增幅并不显著,此外,相同掺量的 30 目和 40 目冷冻胶粉改性沥青过滤沥青的黏度也基本相当。而 80 目冷冻胶粉改性沥青过滤沥青的黏度较相同掺量 30 目与 40 目同工艺胶粉改性沥青过滤沥青的黏度大很多,掺量 15%与 20%的 80 目冷冻胶粉改性沥青过滤沥青的黏度相当,且比掺量 10%的 80 目冷冻胶粉改性沥青过滤沥青的黏度大。即增加冷冻胶粉的细度对于改善橡胶沥青过滤沥青的黏度比增加掺量更加有效。

胶粉的工艺方式、目数、掺量对橡胶沥青过滤沥青黏度影响的 LSD 分析结果见表 5。由表 5 可以看

表 5 过滤橡胶沥青 LSD 方差分析结果
Tab.5 Results of ANOVA of rubber asphalt filtered by LSD test

胶粉类型	LSD 分组	掺量/%	LSD 分组	目数	LSD 分组
常温	A	20	A	80	A
冷冻	B	15	A	40	B
		10	B	30	C

出,胶粉生产工艺对过滤沥青产生显著性影响,常温胶粉比冷冻胶粉对过滤沥青黏度的影响更显著;掺量为 15%与 20%的胶粉对过滤沥青黏度的影响相似,其影响要远大于掺量 10%的胶粉;80 目胶粉的影响远高于其他目数胶粉,40 目胶粉次之,30 目胶粉最小。

3.3 IE 对橡胶沥青黏度的影响

依据上述方法,计算橡胶沥青中 IE 对橡胶沥青黏度的影响,结果如图 4 所示。

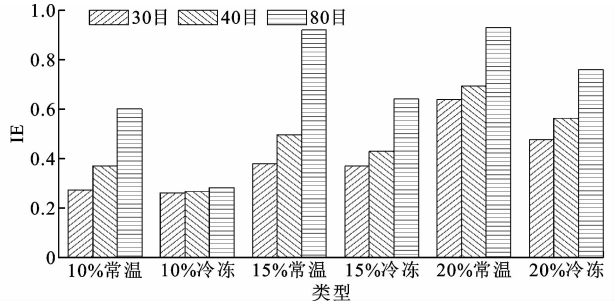


图4 橡胶沥青的 IE 结果
Fig.4 IE results of rubber asphalt binders

从图 4 可以看出,常温胶粉改性沥青的 IE 高于冷冻胶粉改性沥青的 IE,主要是因为常温胶粉比表面积越大时,与沥青的反应也越剧烈,对橡胶沥青的黏度影响也越大。随着胶粉目数的增加,相同掺量的常温胶粉改性沥青的 IE 越大,其中,80 目常温胶粉的 IE 远大于 40 目与 30 目胶粉改性沥青的 IE,40 目常温胶粉改性沥青的 IE 略大于 30 目常温胶粉改性沥青的 IE。相同掺量的冷冻胶粉改性沥青的 IE 也随着胶粉目数的增加而增大,但胶粉掺量为 10%时,增幅并不明显;而掺量为 15%与 20%时,其 IE 随目数的变化规律与常温法相同。随着胶粉掺量的增加,常温法与冷冻法胶粉改性沥青的 IE 都在增加,但是其变化规律与黏度的增长规律显著不同,尤其是胶粉掺量从 15%增加至 20%时,橡胶沥青的黏度变化很大,但是其对应的 IE 增加却并不显著,这也表明胶粉掺量增加至 15%后,橡胶沥青中的 IE 对其黏度的贡献变小。总体来看,增大胶粉目数和掺量,增加了单位体积内沥青与废旧胶粉的反应机会,有利于橡胶沥青黏度的增加。

在此基础上,通过对所有橡胶沥青样品黏度

(180 ℃)和 IE 进行线性回归分析,其拟合曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,IE 与橡胶沥青黏度的相关性较差, $R^2=0.3444$, R^2 为判定系数。再次说明 IE 对橡胶沥青黏度贡献较小。

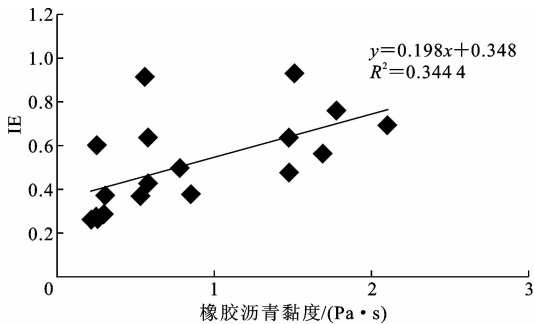


图 5 橡胶沥青黏度(180 ℃)与 IE 的关系曲线
Fig. 5 Relationship between viscosity (180 ℃) and IE

3.4 PE 对橡胶沥青黏度的影响

图 6 所示为所有橡胶沥青样品 PE 测试值。可以看出,掺量 10% 的 3 种目数的沥青及掺量 15% 的 80 目废旧胶粉改性沥青的黏度并没有其过滤沥青的黏度大,这也反映出胶粉掺量较小时,橡胶沥青的黏度主要由胶粉与沥青的反应作用贡献,而溶胀的胶粉颗粒的交联作用对橡胶沥青黏度的贡献较少。掺量增加至 15% 后,橡胶沥青黏度开始大于过滤改性沥青的黏度,当胶粉掺量增加至 20% 后,废旧胶粉颗粒吸收沥青油分溶胀导致橡胶沥青黏度增大的趋势更加明显,这也主要是由于胶粉颗粒间的交联逐渐增加以及连续相的分子力逐渐增大所致。同时,常温胶粉改性沥青的 PE 显著大于冷冻胶粉改性沥青的 PE;40 目胶粉改性沥青的 PE 也大于 30 目与 80 目胶粉改性沥青的 PE,其作用机理与第 3.3 节橡胶沥青黏度变化机理相同。

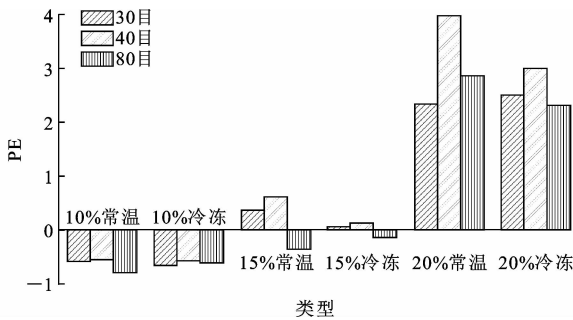


图 6 橡胶沥青的 PE 结果
Fig. 6 PE results of rubber asphalt binders

在此基础上,通过对所有橡胶沥青样品黏度(180 ℃)和 PE 进行线性回归分析,其拟合曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看出,橡胶沥青黏度随 PE 的增加而增加,二者具有较为显著的相关性,其 $R^2 =$

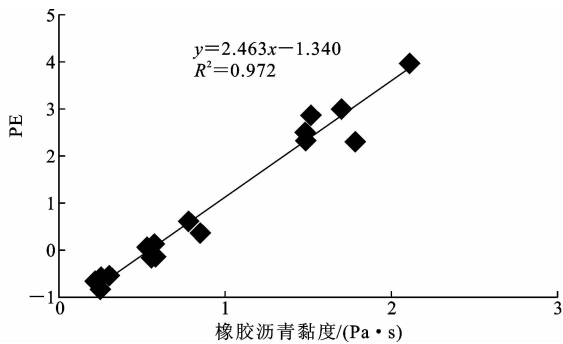


图 7 橡胶沥青黏度(180 ℃)与 PE 的关系
Fig. 7 Relationship between viscosity (180 ℃) and PE of rubber asphalt binders

0.972。由此表明,橡胶沥青的黏度主要取决于橡胶颗粒吸收沥青中轻质油分后的溶胀和交联作用。

3.5 橡胶沥青中的 LMS

图 8 为橡胶沥青的 LMS 含量(质量分数,下同),从图 8 可以看出,与基质沥青相比,橡胶沥青中 LMS 含量明显增大,这主要是由于橡胶沥青中胶粉吸收沥青油分从而使其大分子比例增加^[30]。胶粉掺量对 LMS 含量影响显著,掺量越高,LMS 含量越大,但当掺量达到 20% 时,橡胶沥青的 LMS 含量基本保持稳定,证明此时橡胶沥青中胶粉已达到饱和或过饱和状态,因此,橡胶沥青在生产时胶粉掺量不应超过 20%;对于不同粒径的胶粉,粒径越小,橡胶沥青 LMS 含量越大,究其原因,主要是由于胶粉颗粒粒径越小,其比表面积越大,使得胶粉与沥青反应也就越充分。对于不同生产工艺的胶粉改性沥青,相同条件下其 LMS 含量没有明显变化规律。

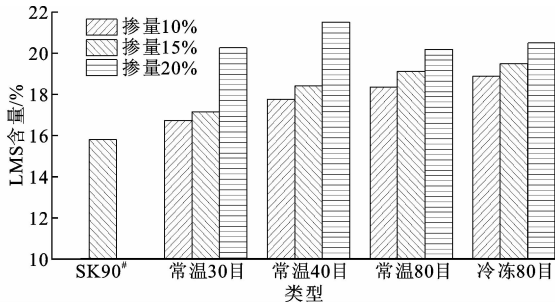


图 8 橡胶沥青的 LMS 含量
Fig. 8 Contents of LMS of rubber asphalt binders

3.6 橡胶沥青中的 LMS 与 PE 和 IE 的相关性

为研究橡胶沥青中 LMS 对橡胶沥青性能的影响,对 LMS 与橡胶沥青黏度、橡胶沥青中胶粉与沥青的反应作用(IE)和胶粉颗粒对橡胶沥青的交联作用(PE)进行线性拟合,其结果如下页图 9~图 11 所示。可以看出,LMS 含量与橡胶沥青黏度有一定的相关性,其 $R^2=0.722$,具体表现为当 LMS 增大

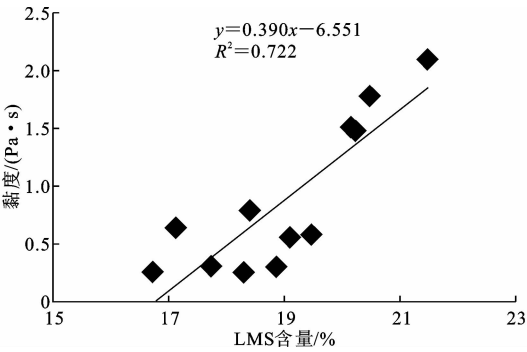


图9 橡胶沥青 LMS 含量与黏度的关系

Fig. 9 Relationship between viscosity (180 ℃) and LMS of rubber asphalt binders

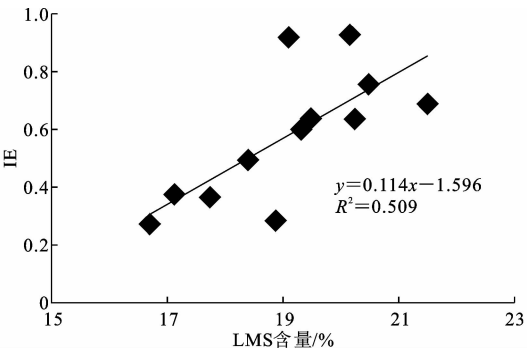


图10 橡胶沥青 LMS 含量与 IE 的关系

Fig. 10 Relationship between viscosity (180 ℃) and IE of rubber asphalt binders

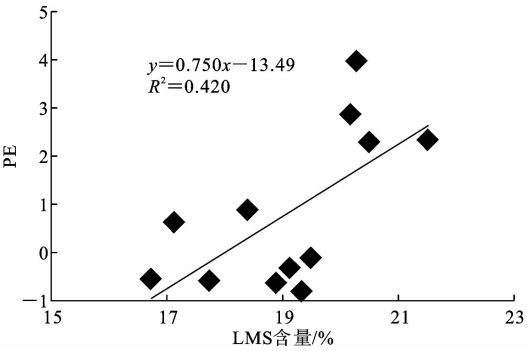


图11 橡胶沥青 LMS 值与 PE 的关系

Fig. 11 Relationship between viscosity (180 ℃) and PE of rubber asphalt binders

时,橡胶沥青黏度呈逐渐递增趋势。同时,橡胶沥青 LMS 与其 IE 有一定的相关性,LMS 与 PE 的相关性较差。即胶粉与沥青的反应作用对 LMS 有显著性作用,胶粉吸收沥青中小分子物质越多,改性沥青的 LMS 含量越大。因此,LMS 含量与 IE 呈正相关性,即 IE 越大,LMS 含量越大。而橡胶沥青进行 GPC 测试时滤除胶粉颗粒,因此,胶粉颗粒的交联作用(PE)对 LMS 含量的影响较小。

4 结 语

(1)随着胶粉掺量的增加,橡胶沥青的黏度也逐渐增大;常温胶粉改性沥青的黏度要明显高于冷冻胶粉改性沥青的黏度;相同掺量时 40 目的胶粉改性沥青的黏度较 30 目和 80 目大,且这种规律随着胶粉掺量的增加变得更加明显。

(2)滤除未反应胶粉颗粒后改性沥青的黏度比基质沥青的黏度有不同程度的增大。常温法与冷冻法工艺的 30 目或低掺量(10%)废旧胶粉的橡胶沥青过滤沥青的黏度变化基本相当。但是 80 目或高掺量冷冻胶粉改性沥青过滤沥青的黏度大于常温胶粉改性沥青过滤沥青的黏度。对于常温胶粉改性沥青过滤沥青,其黏度随着胶粉掺量的增加而增加,过滤沥青黏度的增幅并不明显。增加冷冻胶粉的细度对于改善橡胶沥青过滤沥青的黏度比增加掺量更加有效。

(3)常温胶粉改性沥青中胶粉与沥青的反应作用 IE 高于使用冷冻胶粉改性橡胶沥青的 IE;随着胶粉目数的增加,相同掺量常温胶粉改性沥青的 IE 增大,其中,80 目常温胶粉改性沥青的 IE 要远大于 40 目与 30 目胶粉改性沥青的 IE;随着胶粉掺量的增加,常温法与冷冻法胶粉改性沥青的 IE 都在增加,尤其是胶粉掺量从 15%增加至 20%时,橡胶沥青的黏度变化很大;废旧胶粉与沥青的反应作用与橡胶沥青黏度的相关性较差。

(4)胶粉掺量较小时,橡胶沥青的黏度主要由胶粉与沥青的反应贡献,而溶胀的胶粉颗粒对橡胶沥青黏度的贡献较少;常温胶粉改性沥青的交联作用 PE 显著大于冷冻胶粉改性沥青;40 目胶粉改性沥青的交联作用也大于 30 目与 80 目胶粉的交联作用;废旧胶粉的颗粒交联作用 PE 与橡胶沥青的黏度有较为显著的相关性。

(5)胶粉掺量对沥青大分子 LMS 含量影响显著,掺量越高,LMS 含量越大,但当掺量达到 20%时,橡胶沥青的 LMS 含量基本保持稳定;胶粉粒径越小,橡胶沥青 LMS 含量越大;相同条件下,不同生产工艺胶粉改性沥青的 LMS 含量没有明显变化规律。橡胶沥青的 LMS 含量与黏度有较为显著的相关性,与其 IE 有一定的相关性,但是 LMS 含量与 PE 的相关性较差。

(6)本文中的胶粉与沥青样本均为甘肃省常用类型,建议扩展样本类型与数量,以全面掌握废旧胶粉的反应与交联作用对橡胶沥青黏度的影响规律。

参考文献:

References:

- [1] PRESTI D L. Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures;a literature review[J]. Construction and Building Materials,2013,49:863-881.
- [2] 黄 明,汪 翔,黄卫东. 橡胶沥青混合料疲劳性能的自愈合影响因素分析[J]. 中国公路学报,2013,26(4):16-22.
HUANG Ming, WANG Xiang, HUANG Wei-dong. Analysis of influencing factors for self-healing of fatigue performance of asphalt rubber mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4):16-22.
- [3] 刘子兴,常立峰. 橡胶沥青性能试验及影响因素分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(3):59-62.
LIU Zi-xing, CHANG Li-feng. Performance experiment and analysis of influential factors for rubber asphalt[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(3):59-62.
- [4] 黄 明,汪 翔,黄卫东. 橡胶沥青混合料疲劳性能的自愈合影响因素分析[J]. 中国公路学报,2013,26(4):16-22.
HUANG Ming, WANG Xiang, HUANG Wei-dong. Analysis of influencing factors for self-healing of fatigue performance of asphalt rubber mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4):16-22.
- [5] 王慧民. 应力吸收层橡胶沥青混合料的路用性能[J]. 筑路机械与施工机械化,2012,29(4):64-65.
WANG Hui-min. Road performance of rubber asphalt mixture of stress absorbing layers[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2012, 29(4):64-65.
- [6] CONG P L, XUN P J, XING M L, et al. Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:632-641.
- [7] 石 鑫. 新型橡胶沥青应力吸收层设计研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2011,28(10):54-56.
SHI Xin. Study on design of new rubber asphalt stress absorbing layer[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10):54-56.
- [8] LI B, SHEN J N, XIE Z X. Influence of trans-polyoctenamer on rheological properties of rubberised asphalt binders after short term aging procedures[J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S5):39-41.
- [9] 刘立方,刘占良. 基于室内试验的橡胶沥青 SMA 混合料的技术性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(3):57-59.
LIU Li-fang, LIU Zhan-liang. Research on technical characteristics of asphalt rubber SMA mixture based on laboratory test[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2016, 33(3):57-59.
- [10] SHEN J N, AMIRKHANIAN S, XIAO F P, et al. Surface area of crumb rubber modifier and its influence on high-temperature viscosity of CRM binders [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2009, 10(5):375-381.
- [11] 廖明义,李 雪. 废橡胶粉改性沥青稳定性及其影响因素[J]. 石油化工高等学校学报, 2004, 17(4):38-41, 49.
LIAO Ming-yi, LI Xue. The stability of crumb rubber modified asphalt and the factors of the effect on stability[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2004, 17(4):38-41, 49.
- [12] 何兆益,危接来,吴宏宇,等. 废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, 2009, 28(6):1025-1027, 1059.
- [13] MEMON G M. Activated method for treating rubber particles;US,5927620[P]. 1990-07-27.
- [14] SHATANAWI K M, BIRO S, NASER M, et al. Improving the rheological properties of crumb modified binder using hydrogen peroxide[J]. Road Materials & Pavement Design, 2013, 14(3):723-734.
- [15] JEONG K D, LEE S J, AMIRKHANIAN S N, et al. Interaction effects of crumb rubber modified asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(5):824-831.
- [16] HOSSAIN Z, BAIRGI B, BELSHE M. Investigation of moisture damage resistance of GTR-modified asphalt binder by static contact angle measurements[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95:45-53.
- [17] KIM H S, LEE S J, AMIRKHANIAN S N. Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2010, 14(6):839-843.
- [18] 罗要飞,李志宏,张 苛. 目数对橡胶沥青性能的影响

- [J]. 石油沥青, 2013, 27(1): 1-5.
- LUO Yao-fei, LI Zhi-hong, ZHANG Ke. Influence of mesh on performance of rubber modified asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2013, 27(1): 1-5.
- [19] 胡 苗, 弥海晨, 张 磊. 橡胶粉掺量和目数对橡胶沥青粘度的影响机理研究[J]. 石油沥青, 2011, 25(1): 41-43.
- HU Miao, MI Hai-chen, ZHANG Lei. Mechanism study of impaction of rubber powder content and the mesh on rubber modified asphalt viscosity[J]. Petroleum Asphalt, 2011, 25(1): 41-43.
- [20] 曹荣吉, 陈荣生. 橡胶沥青工艺参数对其性能影响的试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(2): 269-273.
- CAO Rong-ji, CHEN Rong-sheng. Laboratory study on process parameters of asphalt rubber and their effects on performance[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(2): 269-273.
- [21] 徐鸥明, 韩 森, 牛冬瑜, 等. 橡胶沥青胶浆车辙因子特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(11): 49-52.
- XU Ou-ming, HAN Sen, NIU Dong-yu, et al. Investigation of the rutting resistance parameter of rubber modified asphalt binder mortar[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(11): 49-52.
- [22] 杨永顺, 曹卫东, 李英勇, 等. 橡胶沥青制备工艺及其性能的研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38(5): 10-13.
- YANG Yong-shun, CAO Wei-dong, LI Ying-yong, et al. Preparation process and performance of asphalt-rubber[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(5): 10-13.
- [23] 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 Li-ping, SHEN Ai-qin, XIE Cheng, et al. Orthogonal test for rubber asphalt properties[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(1): 7-12.
- [24] 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.
- [25] PUTMAN B J, AMIRKHANDIAN S N. Characterization of the interaction effect of crumb rubber modified binders using HP-GPC[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(2): 153-159.
- [26] SHEN J N, AMIRKHANDIAN S N, LEE S J. HP-GPC characterization of rejuvenated aged CRM binders [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(6): 515-522.
- [27] 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.
- [28] SHEN J N, AMIRKHANDIAN S N, XIAO F P, et al. Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 304-310.
- [29] 汪水银, 郭朝阳, 彭 锋. 废胎胶粉沥青的改性机理[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4): 34-38.
- WANG Shui-yin, GUO Chao-yang, PENG Feng. Research on modified mechanism of asphalt with crumb tire rubber[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(4): 34-38.
- [30] GHAVIBAZOO A, ABDELRAHMAN M, RAGAB M. Changes in composition and molecular structure of asphalt in mixing with crumb rubber modifier [J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4): 906-919.