

Research on Design and Performance of Asphalt Rejuvenator Material Based on Compositional Fusion Theory

Changjun Sun^{1*}, Hongyin Li², Fei Wang², Peizhao Li¹, Linping Su¹

¹Shandong University, Jinan Shandong

²Qilu Transportation Development Group, Jinan Shandong

Email: *changjunsun2015@163.com

Received: Aug. 23rd, 2019; accepted: Sep. 10th, 2019; published: Sep. 17th, 2019

Abstract

In this paper, a kind of asphalt rejuvenator RA with good regeneration and aging resistance was studied, and RB and RC were selected for comparison. The amount of antiaging agent and plasticizer was determined by experimental design and analysis. According to the three indexes of recycled asphalt and viscosity test, the optimum content of recycled asphalt is 6%. Through dynamic shear rheological test analysis, the results show that three different kinds of regeneration agents can restore the rheological property of aging asphalt, the complex modulus G^* of recycled asphalt A1 and phase Angle θ can be close to the level of 70# virgin asphalt. It is found that regenerated asphalt A1 can obtain higher creep recovery rate through repeated creep test analysis of multi-stage stress. The results of low temperature bending creep test show that the self-developed rejuvenator RA can restore the low temperature cracking resistance of aged asphalt. Through the analysis of quality loss, residual penetration ratio and softening point increment of regenerated asphalt, regenerated asphalt A1 has better aging resistance.

Keywords

Asphalt, Aging, Rejuvenator, Regenerated Asphalt, Rheological Properties

基于组分调和理论的沥青再生剂材料设计与性能研究

孙昌军^{1*}, 李洪印², 王 飞², 李沛钊¹, 苏林萍¹

¹山东大学, 山东 济南

*通讯作者。

²齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南
Email: changjunsun2015@163.com

收稿日期: 2019年8月23日; 录用日期: 2019年9月10日; 发布日期: 2019年9月17日

摘要

本文研究一种再生及抗老化能力优良的废旧沥青再生剂RA, 并选取RB、RC两种市售再生剂进行对比。再生剂RA以芳烃油为基础油分, 经试验设计分析确定了抗老化剂与增塑剂掺量。依据再生沥青三大指标及粘度试验, 确定了再生剂最佳掺量为6%。通过动态剪切流变试验分析, 结果显示三种不同种类再生剂均能恢复老化沥青的流变性能, 再生沥青A1的复数模量 G^* 与相位角 θ 可以接近70#基质沥青的水平; 通过多级应力重复蠕变试验分析发现再生沥青A1可以获得更高的蠕变恢复率。低温弯曲蠕变试验结果发现自主研发的再生剂RA可以较好的恢复老化沥青的低温抗裂性能。经过对再生沥青质量损失、残留针入度比以及软化点增值的分析, 再生沥青A1具有更好的抗老化性能。

关键词

沥青, 老化, 再生剂, 再生沥青, 流变性能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沥青路面养护是提高沥青路面使用年限的重要方法[1]。根据国家 2018 年交通运输行业发展统计公报, 我国每年将有 470 万公里的高速公路需要养护维修, 约占我国高速公路总里程的 97%。沥青路面养护过程中每年产生的废旧沥青混合料粗略估算约 1.8 亿吨, 而且这个数字还将以每年 15% 的速度增长[2][3]。大量废旧沥青路面铣刨料的堆存, 不仅会占用大量的土地空间资源, 也需要耗费大量的人力物力[4]。对其进行回收利用, 不仅可以减少沥青、集料等不可再生资源的使用, 降低综合工程成本, 还可以减少能源消耗和温室气体排放, 具有明显的经济效益和社会效益[5]。在废旧沥青混合料回收利用过程中, 再生剂的使用对废旧沥青混合料再生效果影响显著是再生利用的关键环节。对老化沥青的再生, 主要是通过加入一定量的低粘度再生剂或新沥青, 使老化沥青的胶体结构得到恢复, 同时恢复老化沥青的粘度和流变性能[6]。

目前, 再生剂主要以粘度低富含芳香分的轻质油、生物油、废旧机油等为基体, 添加其他改善再生剂及沥青性能的添加剂按照一定的制备工艺进行制备。周艺等选用糠醛抽出油、环氧大豆油、松节油及石油树脂为原料制备一种基础再生剂, 并通过红外光谱试验及沥青混合料试验对再生剂的分子结构及沥青混合料的高低温性能、水稳定性能进行了分析[7]。唐伯明等以生物油为再生剂, 分析比较了基质沥青与生物油再生沥青胶结料的流变性质与化学特性。认为生物油改善了老化沥青的路用性能及化学特性是一种较有潜力的再生剂[8]。况栋梁以含有极性环氧基团的化学油分及油浆为原材料制备了渗透型再生剂, 通过测试再生沥青和再生沥青混合料路用性能评价了再生剂的再生性能[9]。综上, 目前对于再生剂的研制多以再生沥青路用性能为主要评价指标, 但是, 在道路服役过程中受气候环境变化以及车辆荷载影响,

导致再生沥青混合料的老化速度快于普通沥青混合料,导致再生沥青路面的耐久性能不足[10] [11]。因此,提高再生沥青的抗老化性能是研发废旧沥青路面再生剂的重要方向。

本文拟采用富含芳香烃的芳烃油作为基础油分补充老化沥青中缺失分子量小的轻组分,加入增塑剂改善其流变性能。在此基础上再加入抗老化剂以提高再生沥青的抗二次老化能力,制备出一种再生效果优良、抗老化性能好的再生剂。通过抗老化试验、沥青流变性能试验对再生剂的基本性能指标及再生剂的再生效果进行了分析研究。

2. 试验材料与方案设计

2.1. 试验材料

2.1.1. 芳烃油

芳烃油也称芳香烃是一种深色粘稠液体,是指分子中含有苯环结构的碳氢化合物,它是石油化工的基本产品和基础原料之一,也可以从废汽车轮胎中通过高温热解过程进行回收。芳烃油凭借良好的相容性、耐高温和低挥发等特点可以补充老化沥青中缺失的轻质组分,对其产生一定的稀释作用。他可以有效软化沥青,降低沥青大分子含量提高沥青延展性[12]。文中所采用的芳烃油 X 是由山东孚润达化工有限公司生产,具体参数如表 1 所示。

2.1.2. 增塑剂

增塑剂是一种在橡胶制备工业上被广泛应用的高分子材料助剂。将其应用在老化沥青再生过程中,它可以降低老化沥青的玻璃化转变温度与粘度,提高再生沥青的延展性能。根据沥青胶体结构理论,沥青是由两性沥青质型网状分子结构组成的。在温度升高时,将增塑剂加入老化沥青中,一方面可以使沥青大分子与增塑剂中分子很好的互溶并不相排斥,促进沥青质大分子间或链段间的运动,塑性增强。另一方面,增塑剂非极性烷基夹在沥青大分子链间,把沥青大分子的极性基遮蔽起来,也减小了老化沥青分子链间的作用力。本文所用的增塑剂具体参数如表 2 所示。

2.1.3. 抗老化剂

沥青老化主要是热氧老化和光氧老化,在高温及光照作用下,轻质组分发生连锁氧化反应向沥青质胶质转化。再生剂的作用则补充老化沥青中缺失的轻质组分。为防止在拌和过程中再生剂中的轻质组分受高温影响严重散失,从而导致再生沥青混合料的路用性能变差,这就要求再生剂具有优良的抗老化能力。本文在所研发的再生剂中优选了一种层状硅酸盐抗老化剂 Z,抗老化剂所具有片层结构可以与沥青形成插层结构,分散在沥青中的抗老化剂分子能有效的阻隔水分、有机溶剂等液体也可以阻隔氧气、二氧化碳等在沥青及沥青混合料中的渗透与扩散,使沥青的连锁氧化反应难以形成。从而提高沥青与沥青混合料的耐久性、抗老化性能。

Table 1. Basic performance index of aromatic oil

表 1. 芳烃油基本性能指标

测试项目	测试方法	测试结果	单位
外观	目测	墨绿色液体	N/A
运动粘度	GB/T 265-ASTM D445	20	100℃mm ² /s
闪点	GB/T 3536-2008	226	℃
水分	GB/T 11133	无	%
密度	GB/T 1884-2000	1.015	g/cm ³
灰分	GB/T 508	0.01	%

Table 2. Basic performance index of plasticizer
表 2. 增塑剂基本性能指标

测试项目	测试方法	测试结果	单位
外观	目测	无色油状液体	N/A
水中溶解度	ASTM D1064-05	0.04%	%
闪点	GB/T 1671-2008	210	°C
酸值	GB/T 1668-2008	0.054	mgKOH/g
密度	GB/T 13531 (25°C)	1.045	g/cm ³
沸点	N/A	340	°C
熔点	N/A	-35	°C

2.1.4. 沥青

本文试验中采用的沥青为由华瑞道路材料有限公司提供的齐鲁 70#基质沥青，再生试验中所用老化沥青是按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG D50-2011)通过薄膜烘箱加热试验(TFOT)制得。两种沥青的基本性能指标如表 3 所示，老化沥青性能指标显示，沥青老化程度较低，文中将老化试验制得的老化沥青作为短期老化沥青进行再生试验。

Table 3. Basic performance index of matrix asphalt
表 3. 基质沥青基本性能指标

沥青类型	基质沥青	TFOT
针入度(25°C)/0.1mm	68.3	49.4
延度(10°C)/cm	40.1	10.4
延度(15°C)/cm	大于 150	64.8
软化点/°C	48.2	53.9
135°C粘度/Pa·s	0.450	0.630

2.1.5. 再生剂

文中使用了 RA、RB、RC 三种再生剂，其中 RA 型沥青再生剂是本文中所述自主研发再生剂，再生剂 RB 和再生剂 RC 为市售常用的两种再生剂，作为对照对 RA 型再生剂的再生性能及抗老化性能进行评价。

2.2. 实验方案

本研究分两个阶段进行，如图 1 所示。第一阶段涉及到再生剂的制备及其再生剂最佳掺量的确定，第二阶段设计到再生沥青的制备以及再生沥青流变性能的试验测试。

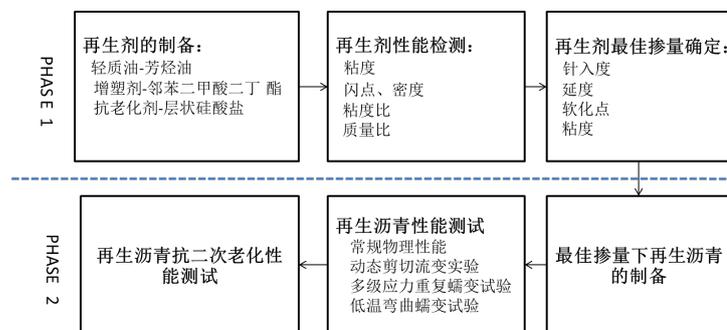


Figure 1. Experiment design
图 1. 实验设计

3. 再生剂的研发与性能分析

3.1. 增塑剂掺量的确定

以芳烃油为前驱体,将增塑剂按照芳烃油质量分数的6%、8%、10%、12%四个掺量加入芳烃油制备四种不同的再生剂。以芳烃油和加入增塑剂的芳烃油为再生剂按10%的掺量制得五种再生沥青 RA0、RA6、RA8、RA10、RA12,对五种再生沥青的基本性能指标进行测试,分析增塑剂对老化沥青的影响。根据表4中数据分析,当增塑剂的掺量为10%时再生沥青的10℃延度恢复到了基质沥青的标准,其他常规性能指标也均能恢复因此,确定10%作为增塑剂的最佳掺量。

Table 4. Performance indexes of recycled asphalt with different plasticizer dosage

表 4. 不同增塑剂掺量下再生沥青性能指标

试验指标	基质沥青	老化沥青	RA0	RA6	RA8	RA10	RA12
针入度(25℃, 0.1 mm)	68.3	28.5	52.4	59.6	63.3	69.3	74.1
软化点(℃)	48.2	58.5	52.1	50.9	49.5	48.3	47.6
10℃延度(10℃, cm)	40.1	0	2.8	9.1	20.1	40.9	66.3
15℃延度(15℃, cm)	大于 150	7.3	92.1	大于 150	大于 150	大于 150	大于 150

3.2. 抗老化剂掺量的确定

按增塑剂掺量10%制备再生剂作为前驱体,然后将抗老化剂按照芳烃油质量分数的0%、1%、2%、3%、4%掺入再生剂中得到五种不同抗老化剂掺量的再生剂样品,将五种样品加入老化沥青中制备出五种不同的再生沥青,然后将五种不同的再生沥青放入薄膜烘箱老化5h,测试二次老化后沥青的性能指标,试验结果如图2所示。结果表明,在一定的掺量范围内,抗老化剂能改善再生沥青的抗老化性能,但抗老化剂对再生沥青的改善效果是有限度的,当达到了2%以后,提高抗老化的掺量不但不会提高改善效果,反而会因为固体粉末的过量掺入对再生剂的改善效果产生负面影响。因此,选择临界值2%作为抗老化剂的最佳掺量。

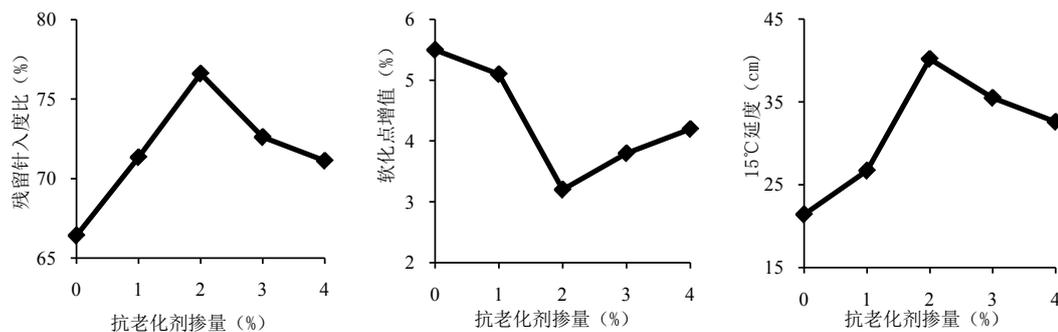


Figure 2. The optimum dosage of anti-aging agent was determined

图 2. 抗老化剂的最佳掺量确定

3.3. 再生剂制备工艺与性能测试

再生剂制备工艺的关键问题是将不同的组分分散均匀,并且在分散过程中不会导致各组分的散失以及老化。通过多次试验探索确定沥青再生剂的制备工艺如下:

将增塑剂加入芳烃油中在常温环境下搅拌90s至混合均匀制得再生剂前驱体,将再生剂前驱体加热

至 90℃ 到 110℃ 加入抗老化剂低速剪切 15 min 至形成均匀液体, 制得 RA 耐老化沥青再生剂。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011) 规定的方法, 通过克利夫兰开口杯法、运动粘度试验、薄膜烘箱老化试验对 A 型沥青再生剂的各项指标进行了性能测试, 测试结果如表 5 所示。

Table 5. Basic performance index of RA-type Rejuvenator

表 5. RA 型沥青再生剂基本性能指标

测试项目	测试方法	再生剂标准	测试结果	单位
外观	目测	/	粘稠状液体	N/A
60℃ 粘度	JTG E20-2011 T0619	实测	123	Pa·S
闪点	JTG E20-2011 T0611	≥220	240	℃
密度	GB/T 1884-2000	实测	1.01	g/cm ³
薄膜烘箱试验前后粘度比	JTG E20-2011 T0619	≤3	2.5	%
薄膜烘箱试验前后质量比	JTG E20-2011 T0610	≤3, ≥-3	0.7	%

由表 5 可以看出, 再生剂的各项性能指标均满足《公路沥青路面再生技术规范》要求且具有以下显著特点: 粘度低, 可以有效的软化沥青, 提高再生效果。闪点高, 有效保证了施工的安全性。耐老化性能较好, 能够提高再生路面的耐老化性能。

3.4. 再生剂最佳掺量的确定

将本文所制备的沥青 RA 型再生剂按老化沥青 4%、6%、8% 的质量分数加入制备老化沥青中, 搅拌均匀使老化沥青充分再生以后对三种再生沥青进行流变性能分析, 据此分析再生剂对老化沥青的影响并确定沥青再生剂的最佳掺量。三种再生沥青的常规性能指标结果如表 6 所示。

Table 6. Performance indexes of recycled asphalt with different dosage of regenerator

表 6. 不同再生剂掺量下的再生沥青性能指标

测试指标	基质沥青	老化沥青	再生剂掺量		
			4%	6%	8%
针入度(25℃, 0.1 mm)	68.3	49.4	62.7	69.1	72.6
软化点(℃)	48.2	53.9	49.5	48.3	47.3
10℃ 延度(cm)	40.1	10.4	35.8	44.7	52.6
15℃ 延度(cm)	大于 150	64.8	大于 150	大于 150	大于 150
135℃ 粘度(Pa·S)	450	630	520	445	355
70℃ 车辙因子(KPa)	0.8789	1.623	1.1268	0.7617	0.5824
-12℃ 劲度模量(MPa)	51.3	79	65.3	50.6	43.8

由表 6 可以看出, 随着再生剂的掺量提高老化沥青的性能逐步得到了改善, 再生沥青的针入度和延度不断提高, 软化点逐渐下降, 再生剂的用量达到一定比例以后, 再生沥青的各项指标均能恢复到基质沥青的水平。掺入再生剂后, 老化沥青的 10℃ 延度有了显著的提高。随着再生剂掺量的提高, 再生沥青的延度也不断提高, 劲度模量不断减小, 说明再生沥青的低温变形能力越来越强。当再生剂掺量为 6% 时, 再生沥青各项性能基本达到了 70# 基质沥青的水平, 因此确定老化沥青的最佳掺量为 6%。

4. 再生沥青流变性能分析

4.1. 动态剪切流变性能

在 46℃ 至 82℃ 下进行温度扫描，扫描频率为 10 rad/s。图 3 及图 4 是基质沥青、老化沥青及三种再生沥青的复数模量 G^* 和相位角 θ 随温度变化的曲线。从图中可以看出，随着温度的升高，复数模量减小，相位角逐渐增大。在相同温度下，老化沥青的复模量最高。当再生剂加入后，复数模量降低并与基质沥青的模量相近。三种再生沥青的复数模量曲线几乎重合，表明其再生效果相似。在相位角曲线上，老化沥青的相位角值最低，与复数模量结果相反。通过使用再生剂，相位角值增加，基本达到与基质沥青相同的水平。温度扫描结果表明，本研究开发的再生剂能够软化并对老化沥青进行再生，并获得与两种市售再生剂相似的流变性能。

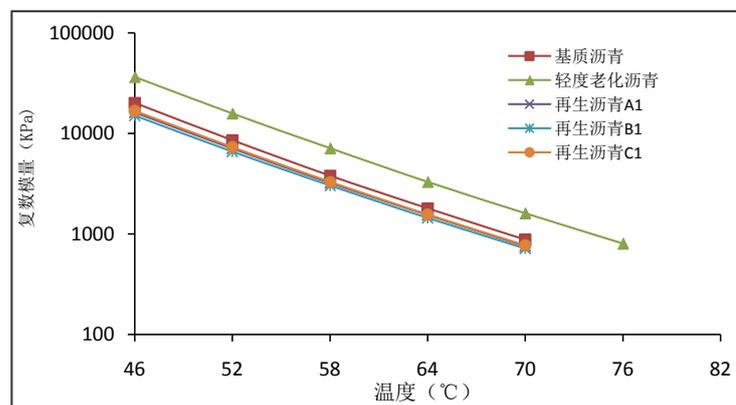


Figure 3. Effect of regeneration agent on complex modulus of aged asphalt
图 3. 再生剂对老化沥青复数模量影响

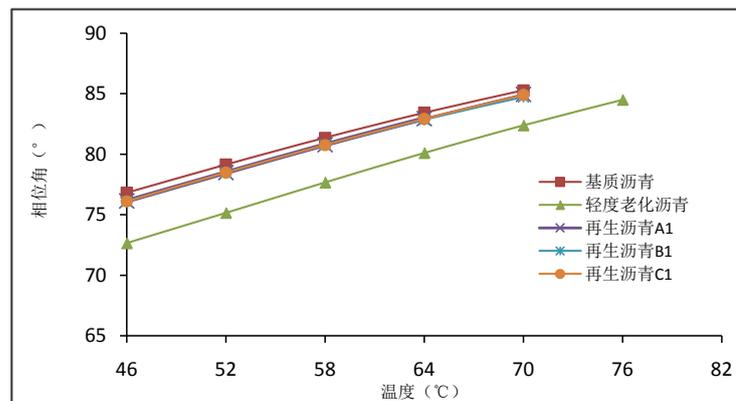


Figure 4. Effect of regeneration agent on phase Angle of aged asphalt
图 4. 再生剂对老化沥青相位角影响

图 5 是基质沥青、老化沥青及三种再生沥青的车辙因子 $G^*/\sin\theta$ 随温度变化的曲线。车辙因子是表征沥青高温性能的重要指标，其超过 1 KPa 表明其抗车辙能力强。如图 5 所示，老化沥青车辙因子最高，与软化点结果一致。在加入三种不同的再生剂后，三种再生沥青的车辙因子值基本相同，与老化沥青相比均有所降低，表明再生剂的加入在一定程度上成功的恢复了老化沥青的性能。与基质沥青相比，三种再生沥青的车辙因子均略低于基质沥青的水平，表明高温抗车辙能力与基质沥青相比仍略有不足。

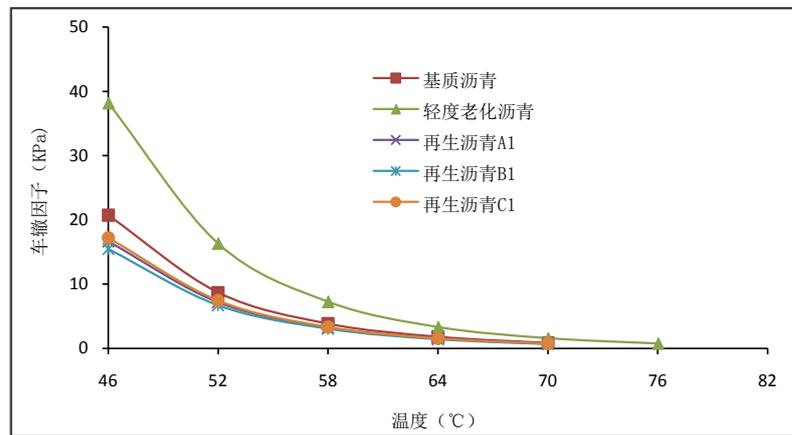


Figure 5. Effect of regeneration agent on rutting factor of aging asphalt
图 5. 再生剂对老化沥青车辙因子影响

4.2. 多级应力重复蠕变恢复性能

不可恢复蠕变柔量作为反映沥青材料高温反复加载下抵抗变形的一种方法已得到广泛的应用。本研究中分别在 0.1 kPa 和 3.2 kPa 两种应力水平下，采用多级应力重复蠕变试验对基质沥青、老化沥青和再生沥青的蠕变柔度和弹性响应进行了评价，试验温度为 60°C。五种沥青样品的不可恢复蠕变柔量和蠕变回复率如图 6 及图 7 所示。图 6 显示，与基质沥青相比老化沥青的不可恢复蠕变柔量要明显低，但是掺入再生剂以后不可恢复蠕变柔量得到提高并超过了基质沥青的值。说明沥青在老化后具有了更好的抗变形能力，抗车辙能力提高。三种再生沥青的不可恢复蠕变柔量相当并均略超过基质沥青的水平，说明三种再生剂对老化沥青均有一定的再生效果。同时也表明再生剂的加入对再生沥青的抗车辙性能有潜在的负面影响[13]。

从图 7 进一步说明老化与再生过程对沥青蠕变回复的影响。对于同一种再生剂，在较低的应力作用对应着更高的蠕变回复率。老化沥青的蠕变回复率远高于及基质沥青，加入再生剂以后，老化沥青的蠕变回复率明显下降。三种再生沥青中，再生沥青 A1 蠕变回复率最高，说明再生剂 RA 更有益于提高沥青的疲劳性能。

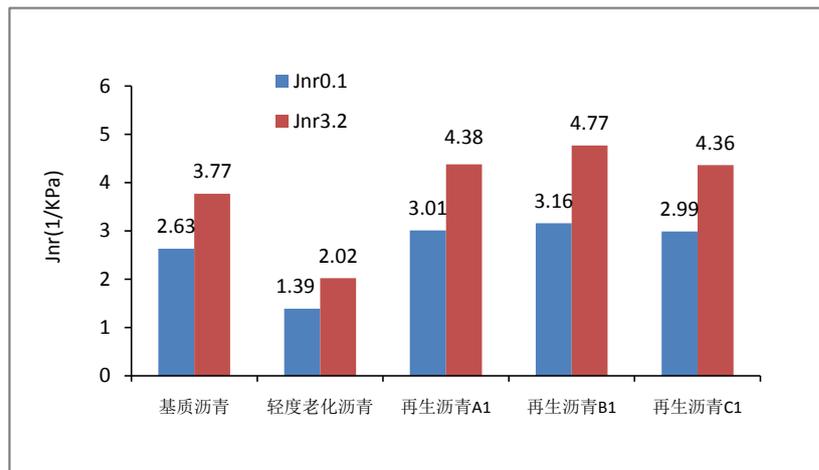


Figure 6. Effect of regeneration agent on unrecoverable creep flexibility of aged asphalt
图 6. 再生剂对老化沥青不可恢复蠕变柔量的影响

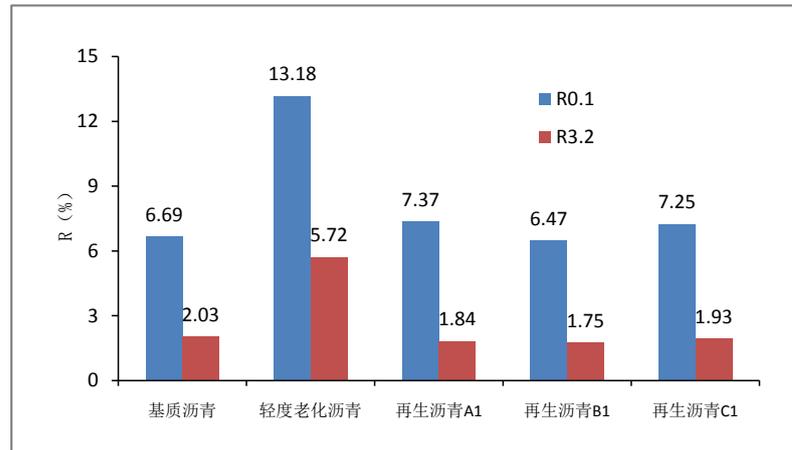


Figure 7. Effect of regeneration agent on creep recovery rate of aged asphalt
图 7. 再生剂对老化沥青蠕变回复率的影响

4.3. 低温弯曲蠕变性能

在 -12°C 和 -18°C 进行低温弯曲蠕变试验,评价再生剂对老化沥青低温性能的影响,基质沥青、老化沥青及三种再生沥青的劲度模量及 m 值随温度变化的曲线如图 8、图 9 所示。劲度模量较小、 m 值较高的沥青材料具有较好的低温性能。如图 8 所示,老化沥青劲度模量较高,低温性能较差,易发生开裂。随着再生剂的加入,沥青的劲度模量降低甚至低于基质沥青水平在加入三种再生剂后,老化沥青的 -18°C 低温劲度模量分别降低了 37.6%、34.1%和 27.8%。 m 值呈现相反的趋势,随着再生剂的加入,老化沥青 m 值分别提高了 15.9%、11.2%和 9.1%。这表明再生剂能提高沥青的柔韧性,并能获得较好的低温性能。

美国的 SHRP 规范中劲度模量的规定值是小于 300 MPa, m 值的规定值是大于 0.3。图 8 中,随着温度的降低,沥青的劲度模量逐渐升高,越来越趋近于临界值 300 Mpa。直线升高趋势越缓慢,沥青就能在更低的温度达到临界值,说明沥青的低温抗裂性能越好。三种再生沥青劲度模量的斜率 k 由大到小分别是 A1、B1、C1。随着温度的降低,沥青的 m 值逐渐降低,向临界值 0.3 趋近,直线斜率越小,降低趋势越缓慢,沥青达到临界值的温度就越低,说明沥青的低温抗裂性越好。三种再生沥青 m 值的斜率 k 由小到大分别是 A1、B1、C1。说明三种再生沥青的低温抗裂性能由好到差分别是 A1、B1、C1。

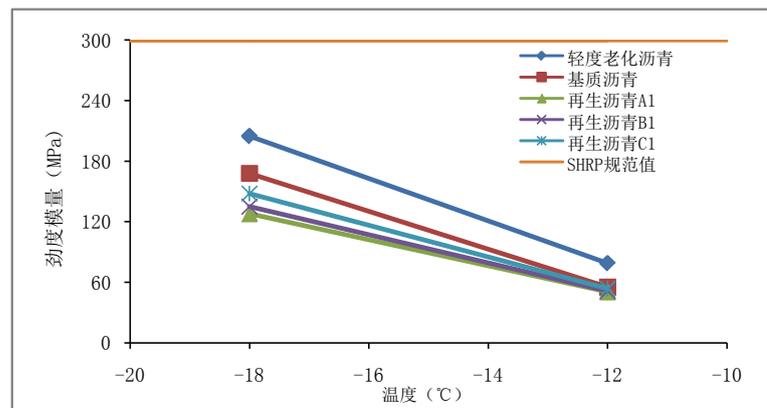


Figure 8. Effect of rejuvenator on stiffness modulus of aged asphalt
图 8. 再生剂对老化沥青劲度模量影响

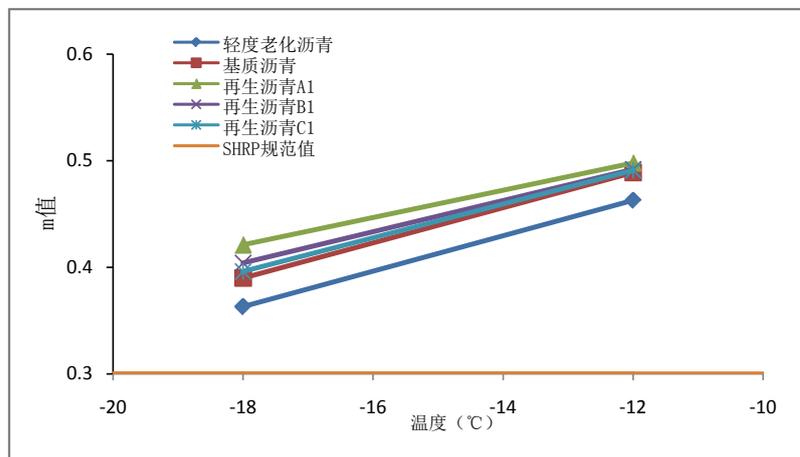


Figure 9. Effect of rejuvenator on m of aged asphalt
图 9. 再生剂对老化沥青 m 值影响

4.4. 抗老化性能

三种再生沥青在薄膜烘箱试验后各项指标变化如表 7 所示。由表中可以看出，三种再生沥青在二次老化后针入度和延度明显降低、软化点显著提高，但三种再生沥青的变化幅度不同。其中再生沥青 A1 的变化幅度显低于再生沥青 B1 和 C1，说明对于再生老化沥青得到的再生沥青来看，A1 的抗老化性能要远强于 B1 和 C1，也间接说明了 A 型沥青再生剂的抗老化性能较强。这是由于层状硅酸盐可以稳定沥青和再生剂中的轻质组分，提高了再生剂与再生沥青的热稳定性[14]。表明 RA 型沥青再生剂掺入的层状硅酸盐类型的抗老化剂具有优良的抗老化能力。

Table 7. Three kinds of recycled asphalt aging resistance indexes
表 7. 三种再生沥青抗老化指标

测试指标	再生沥青 A1	再生沥青 B1	再生沥青 C1
25°C 针入度(0.1 mm)	62.4	62.8	63.1
软化点(°C)	49.6	49.3	49.1
15°C 延度(cm)	大于 150	大于 150	大于 150
TFOF 后			
质量损失(%)	0.51	0.53	0.53
残留针入度比(%)	76.60	71.34	66.40
软化点增值(°C)	3.2	5.1	5.5
15°C 延度(cm)	40.2	26.7	21.4

5. 结论

1) 通过实验设计，确定了再生剂配方及最佳用量。再生剂 RA 的配方为：以芳烃油为基体材料，增塑剂掺量为芳烃油的质量分数的 10%，抗老化剂为芳烃油质量分数的 2%。当老化沥青性能恢复到基质沥青水平时，确定的再生剂最佳掺量为 6%。

2) 对再生沥青流变性能实验结果显示，再生沥青的常规物理性能、高温性能、低温性能、疲劳性能均能满足路用性能要求，表明 RA 再生剂具有良好的再生性能。

3) 再生剂及再生沥青抗老化试验结果显示, 再生剂薄膜烘箱试验前后粘度比为 2.5%, 薄膜烘箱试验前后质量比为 0.7%; 经薄膜烘箱老化试验以后, 再生沥青质量损失为 0.51%, 残留针入度比为 76.6%, 软化点增值为 3.2%, 相比于其他两种再生沥青, 抗老化性能为最优。

参考文献

- [1] 陈虎. 增溶剂对再生沥青混合料路用性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(9): 19-23.
- [2] 交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[R]. 2019-01-10.
- [3] 李永睿. 旧沥青路面就地冷再生技术在农村公路改造中的应用[J]. 价值工程, 2016, 35(13): 158-160.
- [4] 孟华君. 长沙市政厂拌热再生沥青混合料, 试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [5] 丁湛. 废橡胶再利用的沥青混合料再生剂的开发及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
- [6] 于腾海. 一种耐老化沥青再生剂研发及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [7] 周艺, 何纯, 等. 基础再生剂的制备与性能评价[J]. 公路, 2019, 64(5): 236-242.
- [8] 唐伯明, 曹芯芯, 朱洪洲, 曹雪娟. 生物油再生沥青胶结料路用性能分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 207-214.
- [9] 况栋梁. 渗透性再生剂研发及再生沥青混合料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2018.
- [10] 陈娟玲. 沥青路面热再生技术在海南东线高速公路上的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2014.
- [11] 丁湛. 废橡胶再利用的沥青混合料再生剂的开发及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
- [12] 彭齐腾. 就地热再生沥青再生剂研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [13] Hongguang, J., Jizhe, Z., Changjun, S., *et al.* (2018) Experimental Assessment on Engineering Properties of Aged Bitumen Incorporating a Developed Rejuvenator. *Construction and Building Materials*, **179**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.211>
- [14] Varaus, M., Koudelka, T. and Sperka, P. (2017) Rejuvenator Influence on Aged Binder Material Properties. *Key Engineering Materials*, **730**, 380-388. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.730.380>