

废旧沥青混合料再生效果研究

戚俊丽¹, 姚 望¹, 王晓然¹, 韦金城², 王 静³

¹山东高速股份有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³山东大学, 山东 济南

收稿日期: 2021年9月23日; 录用日期: 2021年10月8日; 发布日期: 2021年10月26日

摘 要

沥青混合料再生利用技术能实现公路建设过程中材料的高效循环利用, 是公路建设可持续发展的大势所趋。本文采用R2、R3两种不同粘度的再生剂, 制备旧料掺量为40%的再生沥青混合料, 通过浸水马歇尔稳定度试验、车辙试验、低温弯曲试验等一系列室内试验对再生沥青混合料的水稳性能及高、低温稳定性等及两种再生剂再生效果进行了评价。试验结果表明, 两种沥青再生剂均可以显著提升废旧沥青混合料的各项性能指标。

关键词

RAP, 再生剂, 再生沥青混合料, 路用性能

Study on Regeneration Effect of Waste Asphalt Mixture

Junli Qi¹, Wang Yao¹, Xiaoran Wang¹, Jincheng Wei², Jing Wang³

¹Shandong Hi-Speed Engineering Construction Group Co., Ltd., Jinan Shandong

²Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

³Shandong University, Jinan Shandong

Received: Sep. 23rd, 2021; accepted: Oct. 8th, 2021; published: Oct. 26th, 2021

Abstract

Asphalt mixture recycling technology can realize the efficient recycling of materials in the process of highway construction, which is the general trend of sustainable development of highway construction. In this paper, the recycled asphalt mixture with 40% old material content is prepared by using two kinds of regenerants with different viscosity R2 and R3. Through a series of indoor

tests such as immersion Marshall stability test, rutting test and low-temperature bending test, the water stability, high and low-temperature stability of the recycled asphalt mixture and the regeneration effect of the two regenerants are evaluated. The test results show that both asphalt regenerants can significantly improve the performance indexes of waste asphalt mixture.

Keywords

RAP, Regenerant, Recycled Asphalt Mixture, Road Performance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

我国已经有很多高速公路达到使用寿命,并进入了一个大规模的养护维修期[1]。养护维修过程中必然会产生大量的回收沥青混合料(Reclaim Asphalt Pavement, RAP),这些废料必须进行妥善处置,若采用深埋或是集中堆放,不仅会对周围的环境造成严重的污染,占用大量土地空间,而且RAP料中含有大量无法分解的物质还会造成严重的生态环境的破坏[2][3]。此外,道路维修过程中产生的新集料开采需求也不符合绿色发展的而要求。另一方面,沥青材料是一种不可再生资源,石油沥青回收使用也会给我国带来巨大的经济与社会效益,可以有效缓解资源压力[4]。因此,对沥青混合料再生利用技术进行研究,实现材料的高效循环利用,是公路建设可持续发展的大势所趋,也是节约公路建设资源,保护生态环境的必经之路。

我国再生技术的研究起步较晚,从上世纪中期才逐渐开始。通常的再生技术是在RAP中加入轻质油分等再生剂或者高标号的新沥青制备成再生沥青混合料,然后对再生沥青混合料各方面性能进行室内研究分析[5]。但是对不同种类、不同粘度的再生剂与老化沥青如何作用的研究较少。

本文基于前期不同粘度再生剂对再生沥青效果的研究,优选出了两种不同粘度的再生剂R2、R3,选取RAP掺量为40%,制备了四种沥青混合料,通过浸水马歇尔稳定度试验、车辙试验、低温弯曲试验等一系列室内试验对再生沥青混合料的路用性能进行了研究。

2. 试验材料及方法

2.1. 材料

1) RAP料

本研究选择山东省“滨莱”高速公路铣刨产生的废旧沥青混合料进行试验研究。RAP料共按照粒径不同共分为0~5 mm、5~10 mm、10~20 mm三档。各档集料的含水率、沥青含量及各项性能指标如表1所示,级配组成如表2所示。

2) 沥青

本文研究中所用的AH-70沥青(Virgin)由华瑞道路材料公司提供,沥青的基本性能指标测试结果如表3所示。

3) 新集料与矿粉

本研究所用骨料来自济南市文祖石灰岩采石场。使用网篮法、容量瓶法及比重瓶法对本研究中所使

用的粗集料、细集料及矿粉进行了试验测试，如表 4、表 5 所示。

Table 1. Asphalt content of RAP aggregates in various grades

表 1. 各档 RAP 集料性能指标

测试指标	0~5 mm	5~10 mm	10~20 mm
沥青含量(%)	6.93	4.38	3.45
含水率(%)	0.35	0.18	0.11
表观相对密度(g/cm ³)	2.659	2.688	2.718
表干相对密度(g/cm ³)	-	2.585	2.648
毛体积相对密度(g/cm ³)	-	2.524	2.606
吸水率(%)	-	2.406	1.548

Table 2. Gradation composition of RAP aggregates in various grades

表 2. 各档回收集料级配组成

筛孔尺寸	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0~5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	94.8	69.8	52.4	37.3	28.9	21.5	13.6
5~10	100.0	100.0	100.0	100.0	96.6	54.0	28.5	18.8	13.7	11.0	8.9	6.6
10~20	100.0	97.3	91.8	78.7	41.9	24.3	16.6	11.5	7.8	5.8	4.2	3.0

Table 3. Basic performance index of matrix asphalt

表 3. 基质沥青基本性能指标

测试项目	测试结果	单位
针入度(25℃)	68.3	0.1 mm
延度(10℃)	40.1	cm
延度(15℃)	>150	cm
软化点	48.2	℃
135℃粘度	0.450	Pa·s
密度(15℃)	1.035	g/cm ³
溶解度	99.6	%

Table 4. Basic performance index of aggregates

表 4. 集料基本性能指标

测试项目	0~3 mm	3~5 mm	5~10 mm	10~20 mm
表观相对密度(g/cm ³)	2.697	2.714	2.732	2.718
表干相对密度(g/cm ³)	-	2.630	2.675	2.689
毛体积相对密度(g/cm ³)	-	2.581	2.642	2.672
吸水率(%)	0.82	1.895	1.248	0.637

Table 5. Basic performance index of mineral powder
表 5. 矿粉的基本性能指标

测试项目	技术要求	试验结果
表观密度(g/cm ³)	≥2.5	2.775
粒度范围%	<0.6 mm	100
	<0.15 mm	90~100
	<0.075 mm	75~100
外观	无团粒结块	无团粒结块

4) 再生剂

基于本课题研究的前期成果，通过实验设计确定了耐老化再生剂的合成配方为：芳烃油：增塑剂：抗老化剂 = 100:10:2。在再生剂的优化过程中，将再生剂基体油分换为芳烃油与 AH-90 基质沥青的混合物，通过调整两者的比例，配制了 5 种不同粘度的再生剂。根据前面的试验研究，选取了老化沥青低温、高温性能再生效果均较好的 R2、R3 再生剂。

2.2. 再生沥青混合料配合比设计

本文中采用“四分法”取两组集料进行筛分试验，新料与旧料的筛分试验结果如表 6 所示。根据筛分实验结果设计了三种级配，如表 7 所示。

Table 6. Screening test results of 40% rap aggregates and mineral powder
表 6. 40% RAP 各档集料和矿粉的筛分实验结果

集料类型	通过率/%													
旧料 5-10	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	96.0	15.8	1.1	0.6	0.6	0.5	0.4	0.2
旧料 0-5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.5	64.9	44.1	28.6	18.3	13.3	2.9
新料 10-20	100.0	100.0	100.0	85.5	59.7	33.7	8.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
新料 5-10	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	96.0	15.8	1.1	0.6	0.6	0.5	0.4	0.2
新料 3-5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	96.1	17.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0
新料 0-3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	73.2	50.3	33.4	24.3	13.2
矿粉	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.8	99.6	94.9	70.6

Table 7. Initial mix proportion of three groups of graded mixture
表 7. 三组级配混合料初始配合比

筛孔尺寸	级配 1	级配 2	级配 3
旧料 5~10	23.0	22.0	20.0
旧料 0~5	17.0	18.0	20.0
新料 10~20	45.0	42.0	37.0
新料 5~10	0.0	0.0	0.0
新料 2.36~5	4.0	5.0	3.0
新料 0~2.36	9.0	10.0	17.0
矿粉	2.0	3.0	3.0

依据山东省地区以往的 AC20 再生沥青混合料级配设计经验，预估沥青用量 4.1%。依据表 7 中再生沥青混合料的三种初始级配，制备再生沥青混合料，并按照标准实验方法制备马歇尔试件，测试试件的稳定度及流值等指标，对三种级配的马歇尔试验结果分析，最终确定合成级配 2 作为优选配合比，合成级配 2 级配曲线如图 1 所示。

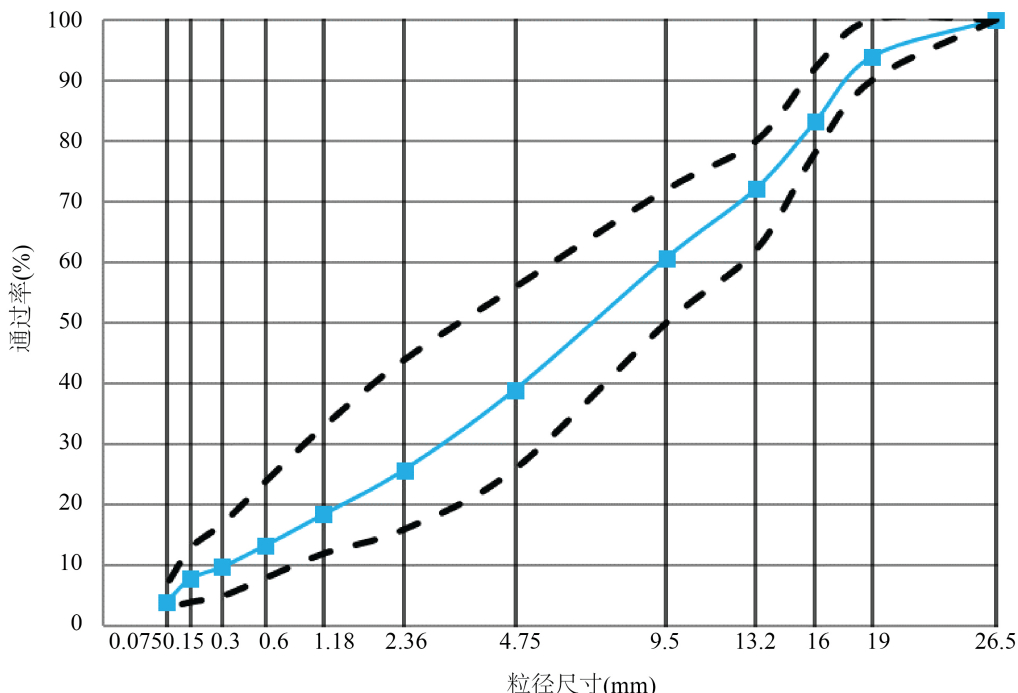


Figure 1. Grading curve of RAP40 composite grading 2
图 1. RAP40 合成级配 2 级配曲线

2.3. 再生沥青混合料路用性能试验方法

按照规范中规定的标准试验方法采用了浸水马歇尔稳定度试验、车辙试验、低温弯曲试验对再生沥青混合料的水稳性能及高、低温稳定性进行了试验分析与评价。同时又补充了 SPT 试验，对混合料的流变性能进行了分析。

3. 结果与讨论

本文对 RAP 掺量为 40%、掺加 R2、R3 型再生剂的再生沥青混合料进行路用性能试验，沥青混合料以及编号如表 8 示。

Table 8. Name and number of asphalt mixture
表 8. 沥青混合料名称及编号

编号	沥青混合料名称
R0-0	新拌基质沥青混合料
R40-0	RAP 掺量为 40%，未加再生剂的再生沥青混合料
R40-R2	RAP 掺量为 40%，加 R2 再生剂的再生沥青混合料
R40-R3	RAP 掺量为 40%，加 R3 再生剂的再生沥青混合料

3.1. 马歇尔稳定度试验

一般基质沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度(MS0)规范规定应该大于 80% [6], 由图 2 可以看出, 使用再生剂的沥青混合料的 MS0 值均能满足规范要求, 未使用再生剂的沥青混合料 R40-0 不满足要求。与 R0-0 相比, R40-R2、R40-R3 的水稳定性略有不足, 但与不使用再生剂的混合料相比, 均有了较大程度的提高。使用 R2 再生剂的再生沥青混合料 R40-R2 残留稳定度比使用 R3 再生剂的再生沥青混合料 R40-R3 大 0.6%, R2 再生剂再生效果更好。

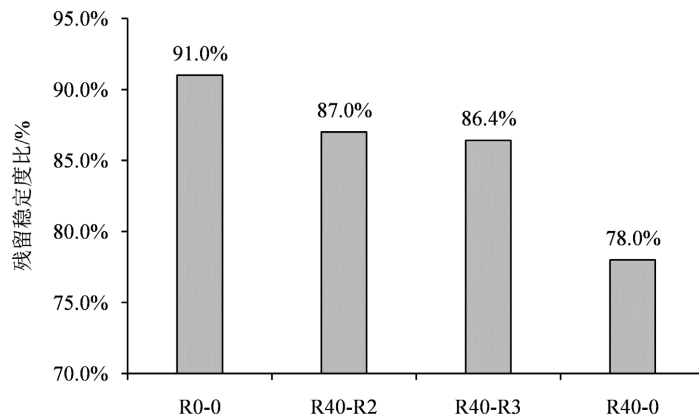


Figure 2. Marshall test results of water immersion
图 2. 浸水马歇尔试验结果

3.2. 车辙试验

从不同再生沥青混合料车辙试验位移曲线图 3 可以看出, 使用再生剂的再生沥青混合料 R40-R2、R40-R3 车辙深度与新拌基质沥青混合料 R0-0 相比, 车辙深度略大, 而与未掺加再生剂的再生混合料 R40-0 相比车辙深度明显增加, 说明添加 R2、R3 再生剂均能在一定程度上对老化沥青进行有效再生; R40-R2 车辙深度与 R40-R3 相比略大, 说明 R2 再生剂再生效果更佳。

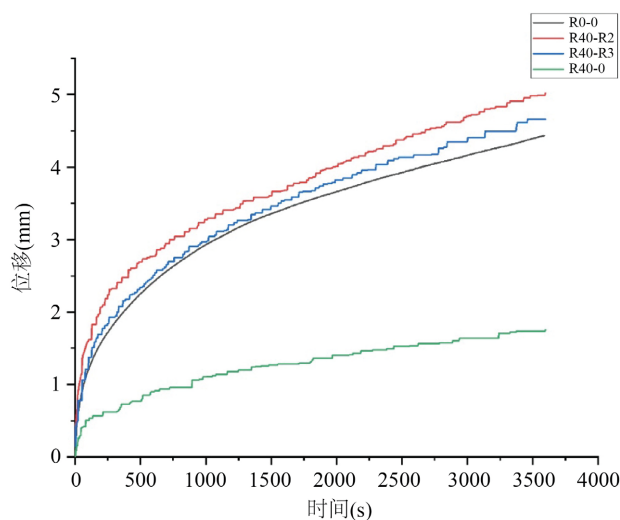


Figure 3. Rutting test displacement curves of different recycled asphalt mixtures
图 3. 不同再生沥青混合料车辙试验位移曲线

从车辙试验动稳定度结果(图 4)可以看出不同类型混合料动稳定度(DS)的数据变化情况,R40-0 的 DS 值为 2985 次/mm, DS 值过高,这种情况下抗车辙能力也很强,但其抗裂性能必然会非常差。R40-R2 与 R40-R3 两种再生沥青混合料 DS 分别为 1250 次/mm 与 1270 次/mm,与 R40-0 相比,R40-R2 与 R40-R3 的 DS 值分别降低了 58.1%与 57.5%,说明使用再生剂对废旧沥青混合料均有较好的软化再生效果,旧料掺量为 40%时粘度差异对再生剂的再生效果影响程度较小。使用 R2、R3 两种粘度不同的再生剂制备再生沥青混合料,根据车辙试验 DS 指标可知,使用 R2 的混合料 DS 值更低,说明 R2 具有更好的再生效果。

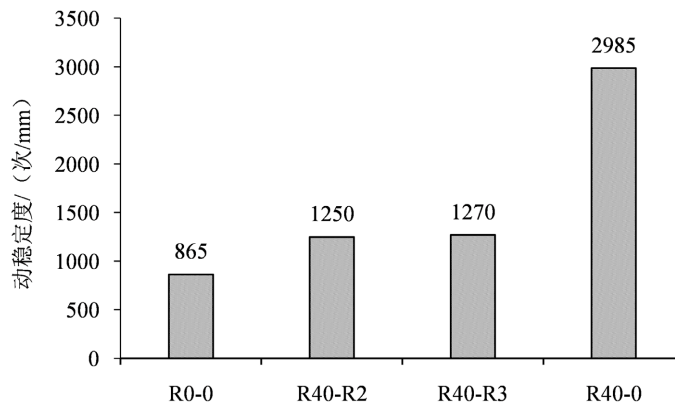


Figure 4. Dynamic stability results of rutting test
图 4. 车辙试验动稳定度结果

3.3. 低温弯曲试验

通过低温弯曲试验对再生沥青混合料的各项低温性能指标进行了测试,测试结果如表 9 所示。

Table 9. Low temperature performance index of recycled asphalt mixture
表 9. 再生沥青混合料低温性能指标

沥青混合料类型	弯拉强度/MPa	弯拉应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa
R0-0	6.12	3121.16	1589.69
R40-R2	5.68	3015.63	1621.46
R40-R3	5.91	2825.46	1578.6
R40-0	3.35	2180.62	5895.49

根据《公路沥青路面施工技术规范》,在冬冷区路面普通密级配沥青混合料的弯拉应变不宜小于 2000 [6],本文四种沥青混合料均满足规范要求。从表 9 可知,R0-0 弯拉应变为 3121.16,R40-0 弯拉应变为 2180.62,R40-R2、R40-R3 弯拉应变分别为 3015.63 与 2825.46,说明使用两种再生剂后混合料的低温性能均得到较大程度的改善,掺加 R2 再生剂的沥青混合料低温性能更好。

3.4. 动态模量试验

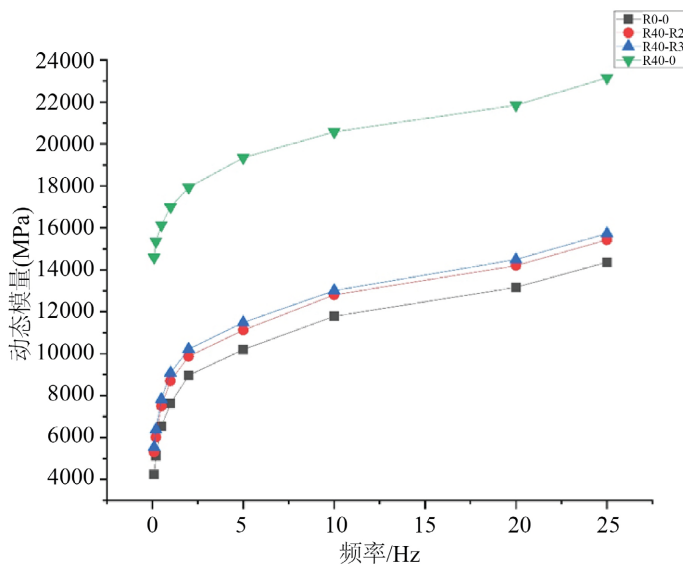
通过 SPT 试验对上述四种沥青混合料进行试验分析,各类型混合料的动态模量以及相位角如图 5、图 6 所示。

由图 5 可知,在不同的温度条件下,各类再生沥青混合料均呈现出随着频率的升高动态模量逐渐升

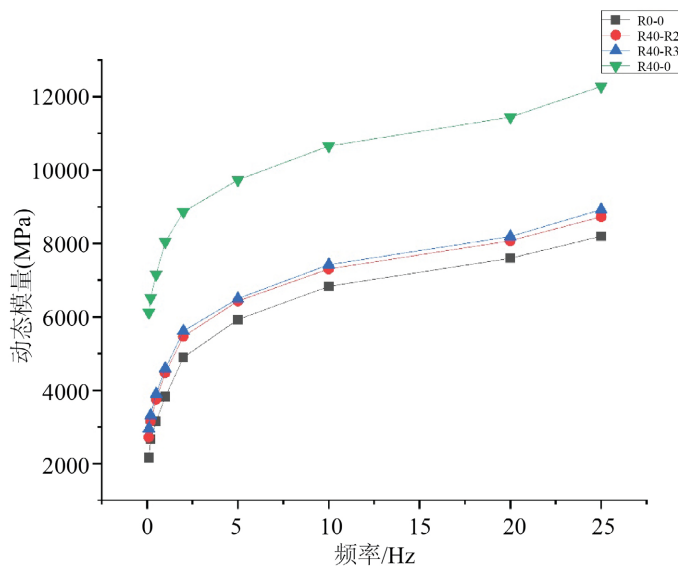
高的趋势，其中，R0-0 的动态模量最低，R40-0 最高。R40-R2 与 R40-R3 动态模量比 R40-0 低得多，接近于 R0-0 动态模量，这是因为在旧料掺量较低的情况下，老化沥青膜较薄，再生剂可以较容易的完成对内部老化沥青的再生。在旧料掺量为 40% 时，使用 R2 再生剂的混合料均要比使用 R3 再生剂的再生沥青混合料动态模量低，但是均能满足路用性能要求。

DSR 剪切流变试验中，相位角是表征沥青材料粘 - 弹特性的指标。同样，沥青混合料 SPT 试验中的相位角指标，也是用来评价沥青混合料粘 - 弹特性的指标。相位角越大，则说明沥青混合料的粘弹性越好，受到外力作用时便会产生更大的不可恢复的变形[7]。

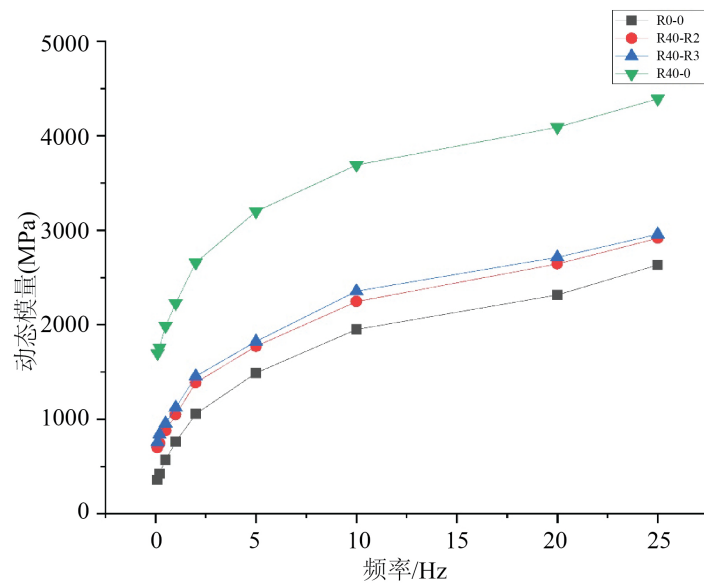
再生沥青混合料相位角变化与动态模量的变化趋势有所不同[8]。由图 6 可知，沥青混合料相位角随着试验频率的提高，呈现不同的变化规律。在 20℃ 和 35℃ 条件下，混合料相位角随着频率的增大而减小。而在 50℃ 时，混合料相位角先是随着频率增大而逐渐增大，达到最大值后随着频率的进一步增大而逐渐



(a) 20°C



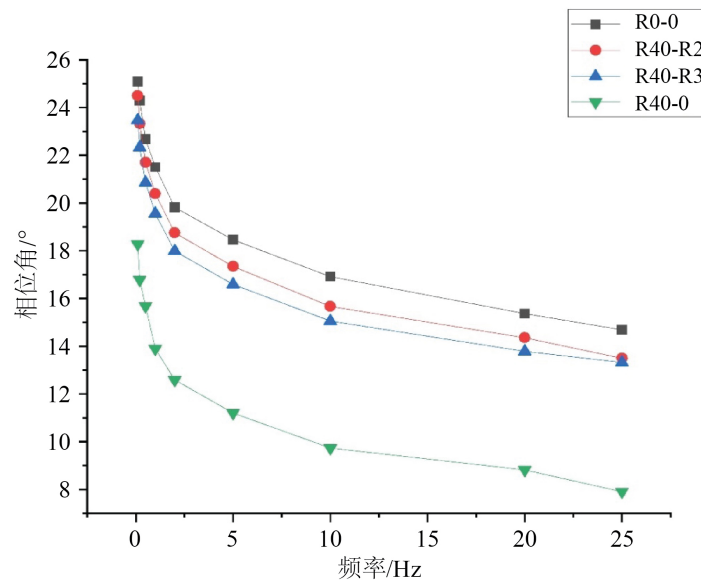
(b) 35°C



(c) 50°C

Figure 5. Dynamic modulus of asphalt mixture at different temperatures**图 5.** 不同温度下沥青混合料的动态模量

降低, 这是由于 50°C 温度较高, 混合料内再生沥青的流动性增强, 在受到外力作用时, 混合内部的集料之间相互作用。随着试验的进行, 集料之间的相互作用会逐渐趋于稳定, 因此, 在后续的试验中, 50°C 条件下混合料的相位角的变化趋势与 20°C、30°C 条件下的变化趋势相同。同时, 从图中可以看出, 在相同的频率、温度条件下, 四种沥青混合料中 R0-0 的相位角最大, 而 R40-0 的相位角最小, 掺加 R2、R3 的沥青混合料相位角介于两者之间, 且接近于 R0-0, 掺加 R2 再生剂的沥青混合料相位角比掺加 R3 再生剂的要大, 表明再生剂粘度越低则用其制备的再生沥青混合料的相位角越高。



(a) 20°C

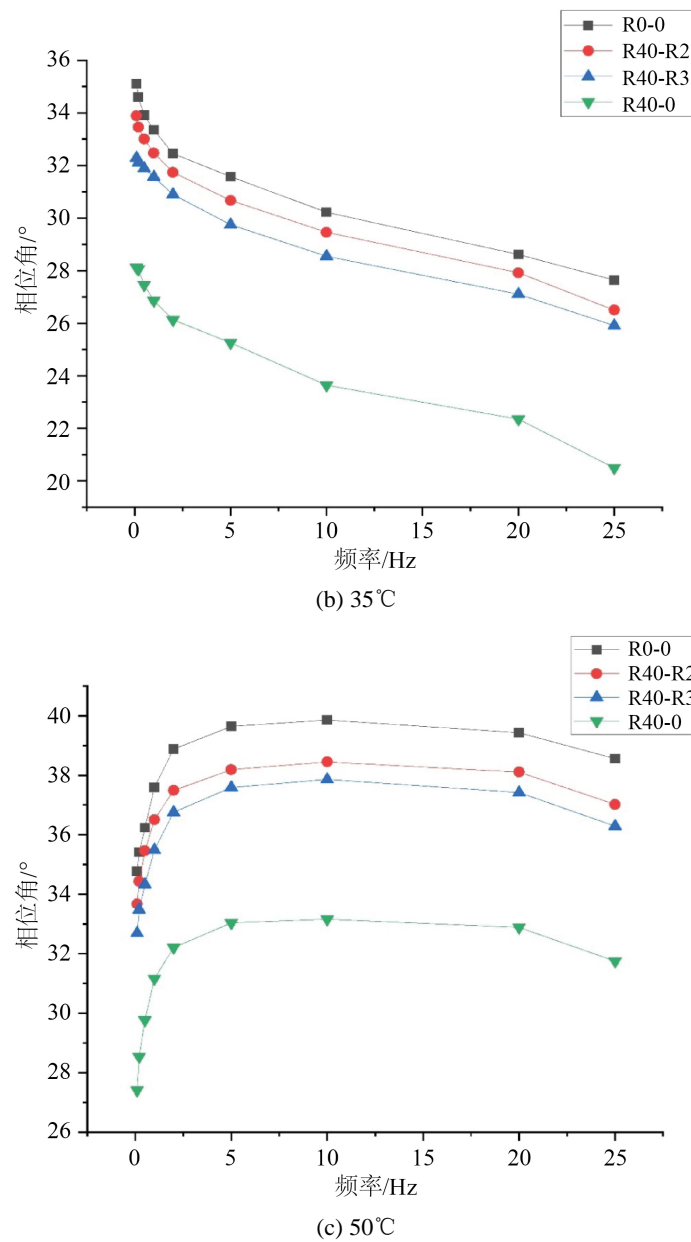


Figure 6. Phase angle of asphalt mixture at different temperatures
图 6. 不同温度下沥青混合料的相位角

4. 结论

本文基于前期研究, 选用了再生效果较好的 R2、R3 两种再生剂, 对 RAP 掺量为 40% 的废旧沥青混合料进行再生制备再生沥青混合料, 通过实验设计确定了再生沥青混合料的合成级配, 并通过车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔稳定度试验、SPT 试验评价了再生沥青混合料的路用性能。

1) 通过浸水马歇尔稳定度试验可知, 掺加再生剂的沥青混合料与未再生剂的混合料相比, 动稳定度均有了较大程度的提高。

2) 通过车辙试验动稳定度指标可得出, 旧料掺量较低时粘度差异对再生剂的再生效果影响程度较小, 表现为动稳定度相差不大。

3) 通过低温弯曲试验可知, 使用两种再生剂后混合料的低温性能均得到较大程度的改善, 在旧料掺量为 40% 时, 使用较低粘度再生剂的再生沥青混合料水稳定性较好。

4) 通过 SPT 试验可知, 再生剂粘度对再生沥青混合料动态模量及相位角变化影响明显, 再生剂粘度越低则用其制备的再生沥青混合料动态模量越低、相位角越高。

参考文献

- [1] 崔鹏. 高速公路养护中长期规划方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [2] 高艳娥. 厂拌热再生沥青混合料设计研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2008.
- [3] 刘武斌. 沥青路面翻修中厂拌热再生技术分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2013.
- [4] 王雪晨. 石油地质勘探技术的创新研究[J]. 中国石油和化工, 2016(S1): 35.
- [5] 刘珊珊. 废旧沥青路面乳化沥青冷再生技术在道路维修中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [6] JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S]. 2004.
- [7] 刘自若. 温拌再生沥青混合料路用性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [8] 李达. 旧料掺量对温拌再生沥青混合料耐久性的影响分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 25-31, 48.