

# RAP掺量对温再生沥青混合料力学性能和路用性能的影响规律研究

任瑞波,尹利洋,徐强\*,赵品晖,马世东

(山东建筑大学 交通工程学院,山东 济南 250101)

**摘要:**温再生技术是一种有效的利用沥青混合料回收料(RAP)实现再生的新技术。为改善温再生沥青路面性能,有效提高RAP的循环利用率,通过力学性能和路用性能分析考察了RAP掺量对温再生沥青混合料性能的影响规律,探讨动稳定度与重复加载蠕变试验力学参数的相关性。研究表明:随着RAP掺量的增加,温再生沥青混合料的高温稳定性、抗剪切和抗弹性变形能力提高,但低温抗裂性能、水稳定性有所下降。此外,流动数与动稳定度之间具有较好的线性相关性,可以借助流动数评价混合料的高温抗车辙能力;相同RAP掺量下,改性温再生沥青混合料的各项性能均优于普通温再生沥青混合料,当RAP掺量达70%时,混合料各项性能仍能满足规范要求,可为后期工程应用和质量控制提供依据。

**关键词:**沥青混合料回收料;温再生技术;沥青混合料;力学性能;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

## Influence of RAP Content on Mechanical Properties and Pavement Performance of Warm Recycled Asphalt Mixture

REN Ruibo, YIN Liyang, XU Qiang\*, ZHAO Pinhui, MA Shidong

(School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

**Abstract:** Warm recycling technology is an effective new technology for recycling recycled asphalt pavement (RAP). In order to improve the pavement performance of warm recycled asphalt and effectively enhance the recycling rate of RAP, the influence of RAP content on the performance of warm recycled asphalt mixture was investigated through mechanical properties and pavement performance analysis, and the correlation between dynamic stability and mechanical parameters of creep tests under repeated loading was discussed. The results show that with the increase in RAP content, the high-temperature stability, shear resistance, and elastic deformation resistance of warm recycled asphalt mixture are improved, but the low-temperature crack resistance and water stability are decreased. In addition, there is a good linear correlation between the flow number and the dynamic stability, and the flow number can be used to evaluate the high-temperature rut resistance of the mixture. Under the same RAP content, the performance of the modified warm recycled asphalt mixture is superior to that of the ordinary warm recycled asphalt mixture. When the RAP content reaches 70%, the performance of the mixture can still meet the specification requirements, which provides a basis for later engineering application and quality control.

**Keywords:** recycled asphalt pavement; warm recycling technology; asphalt mixture; mechanical property; pavement performance

收稿日期:2022-05-30(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51608511);山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2021ME189)

作者简介:任瑞波,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:rrbgq@sdjzu.edu.cn

\*通信作者:徐强,男,硕士,实验师.E-mail:306959306@qq.com

## 0 引言

随着公路运输行业的迅速发展,目前中国高速公路通车里程已居世界首位,早期修建的高速公路经过长时间的使用,部分路面出现了车辙、沉陷、拥包等病害<sup>[1]</sup>,进入了改扩建或大修阶段,产生了大量的沥青混合料回收料(Recycled Asphalt Pavement, RAP)。然而,大部分的RAP没有得到有效的利用,长期堆放不仅占用土地空间资源,还会对环境造成污染,得不偿失。基于此,路面再生技术应运而生,所谓路面再生技术,是指将废旧沥青路面经一定工序处理后,重新铺筑于路面的工艺,RAP的再生利用既能保护环境,又能节约沥青、砂石材料等不可再生资源,实现资源的绿色高值化利用。目前常见的再生技术包括厂拌热再生、就地热再生、乳化沥青及泡沫沥青厂拌冷再生、无机结合料厂拌冷再生、就地冷再生与全深式冷再生等。但以上技术在实际工程使用时存在着一定的不足,传统热再生RAP利用率不高且易发生二次老化<sup>[2-3]</sup>;冷再生技术则将沥青的铣刨料当作黑色集料来处理,依靠水泥形成结构强度,适用层位低且应用效果欠佳<sup>[4-5]</sup>。

为了解决传统热再生技术与冷再生技术的不足,研究人员尝试把两种技术相结合,充分利用各自的优势,研发出温拌再生技术。温拌再生技术不仅可以弥补以上技术的不足,还能降低混合料的拌和施工温度,提高RAP旧料的掺量,减少资源浪费,保护环境,因此受到越来越多的关注。Stimilli等<sup>[6]</sup>采用市场上常见的多种化学添加剂及有机添加剂,分别制备了25%RAP掺量的温再生沥青混合料,并对其力学性能进行测试,经统计学研究分析发现使用化学添加剂制备的温再生混合料整体性能得到了改善,而加入有机添加剂的温再生混合料变硬变脆,更容易发生开裂;Abdullah等<sup>[7]</sup>研究了纳米黏土对温再生沥青混合料路用性能的影响,结果表明:与传统温再生混合料相比,添加纳米黏土后的混合料除回弹模量值变化不显著外,在水敏感性、抗车辙和抗永久变形方面均表现出优异的性能;余晖等<sup>[8]</sup>研究了不同RAP掺量对泡沫温再生沥青混合料力学性能的影响,并通过动态模量主曲线预测了不同RAP掺量混合料在高温区域的动态模量,结果表明:提高RAP掺量可以改善混合料的动态模量值,当混合料受到的

环境温度越高,掺加RAP对提高混合料的模量越有利;Fakhri等<sup>[9]</sup>研究了在温再生沥青混合料中加入钢渣对混合料性能的影响,研究表明:钢渣的加入显著提高了混合料动态蠕变和间接拉伸试验中的循环次数,改善了中高温下的回弹模量,但混合料的温度敏感性与应力敏感性有所降低。然而,目前温再生技术尚处于起步阶段,在温再生剂开发、温拌沥青混合料性能等方面的研究成果相对较少。

为此,本文基于新旧沥青融合机理,采用试验室自主研发的性能优良、价格低廉的咪唑啉型表面活性剂型温再生剂(WRAP-adv,下文简称温再生剂),制备了温再生沥青混合料。重点考察了60%、70%、80%3种RAP掺量对沥青混合料路用性能和力学性能的影响,并探讨了普通温再生沥青混合料与改性温再生沥青混合料的性能差异,确定了在满足性能要求前提下的最大RAP掺量,有效提高了RAP的循环利用率,实现了经济效益最大化,为温再生技术的推广应用提供理论依据和技术支撑。

本文的主要技术路线如图1所示。

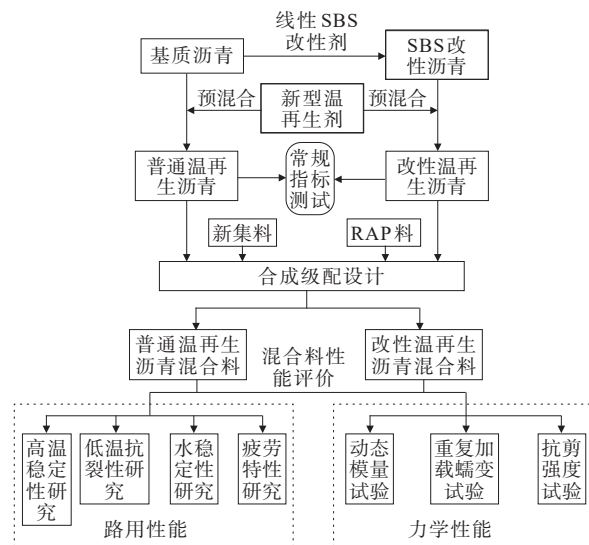


图1 技术路线图

Figure 1 Technology roadmap

## 1 材料与方法

### 1.1 原材料

#### (1) 沥青

选用齐鲁AH-70<sup>#</sup>基质沥青作为新沥青,以齐鲁AH-70<sup>#</sup>基质沥青、线性SBS改性剂为原料制备SBS改性沥青。根据《公路沥青路面施工技术规范》

(JTG F40—2004)<sup>[10]</sup>对沥青各项常规指标进行测试,试验结果如表1所示。

表1 齐鲁AH-70<sup>#</sup>基质沥青与SBS改性沥青的常规技术指标  
Table 1 Conventional technical indexes of Qilu AH-70<sup>#</sup> matrix asphalt and SBS modified asphalt

沥青类型	技术指标	单位	试验结果
基质沥青	针入度(25℃,5 s,100 g)	0.1 mm	70.5
	软化点(环球法)	℃	50.2
	延度(10℃)	cm	45.5
	135℃黏度	Pa·s	0.287
SBS改性沥青	针入度(25℃,5 s,100 g)	0.1 mm	53.5
	软化点(环球法)	℃	70.7
	延度(10℃)	cm	28.3
	135℃黏度	Pa·s	2.054

(2) RAP

试验采用的RAP来源于京台高速泰安至枣庄六标段的下面层,对回收的路面材料进行破碎、分档、抽提和筛分后,得到每档RAP的通过百分率,测量并计算沥青含量,如图2所示。

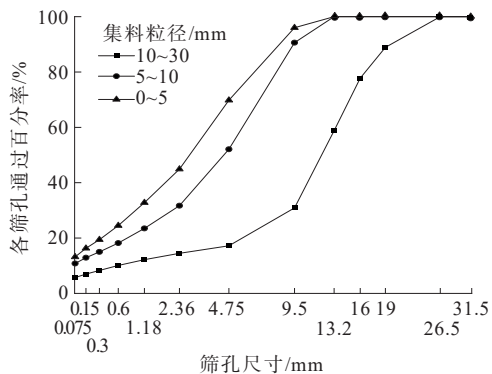


图2 3档RAP抽提后的筛分结果  
Figure 2 Screening results after three-stage RAP extraction

由图2可以看出:0~5 mm与5~10 mm粒径集料中2.36~9.5 mm的旧料较多,9.5 mm筛孔的筛分通过率达到了90%以上,且筛底所占比重较大,说明在铣刨过程中,面层的沥青混合料被铣刨刀具刨起产生了一定的破碎,从而使铣刨料细化,粉料增多。3档RAP中旧沥青的含量随着粒径的增加而逐渐减小,分别为5.6%、3.3%与3.0%,主要原因是粒径小的集料其比表面积较大,覆盖相同厚度的沥青膜时,所需的沥青较多,所以沥青的含量就较大。

同时,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规

程》(JTG E20—2011)<sup>[11]</sup>要求对抽提得到的老化沥青各项常规指标进行测试,试验结果如表2所示。

表2 抽提后老化沥青常规技术指标  
Table2 Conventional technical indexes of aged asphalt after extraction

技术指标	单位	试验结果	规范要求
针入度(25℃,5 s,100 g)	0.1 mm	22.3	≥20
软化点(环球法)	℃	65.4	实测
延度(10℃)	cm	1.18	实测
60℃动力黏度	Pa·s	0.18	实测

由表2可知:沥青路面经长时间使用后沥青性能有所下降,与新沥青相比,旧沥青的针入度明显减小,但满足《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)<sup>[12]</sup>中关于回收沥青针入度>20(0.1 mm)的要求。此外,旧沥青的软化点明显升高,60℃动力黏度与延度显著减少,低温延性已经基本丧失,极易发生脆断。

(3) 新集料

在车辆荷载作用下,由于车轮的反复作用,矿料颗粒被碾压破碎,再加上路面铣刨过程中部分集料被破碎细化,使得混合料细颗粒增多,因此在再生沥青混合料设计时需要粗细集料进行补充。选用与原RAP中矿料岩性相同的石灰岩集料,填料选用石灰岩矿粉,密度试验结果如表3所示。

表3 粗细集料密度试验结果  
Table 3 Test results of coarse and fine aggregate density

集料/mm	表观相对密度	毛体积相对密度	表观密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
20~30	2.736	2.711	—
10~20	2.744	2.708	—
5~10	2.743	2.708	—
0~5	2.709	2.638	—
矿粉	2.704	—	2.699

根据粗细集料密度试验结果,新添加的集料表观相对密度为2.709~2.744,毛体积相对密度为2.638~2.711,新加入矿粉的表观密度为2.699 g/cm<sup>3</sup>。

1.2 温再生沥青的制备及性能分析

根据前期工程验证,确定温再生剂最佳掺量为新沥青含量的10%。首先将齐鲁AH-70<sup>#</sup>基质沥青与制备的SBS改性沥青分别加热至135℃与160℃,使其具有较好的流动状态,再加入新沥青质量10%的温再生剂,保持恒温,以300 rpm速率搅拌30 min,充

分搅拌制得性能稳定的普通温再生沥青和改性温再生沥青,分别对两种温再生沥青的常规指标进行测试,结果如表4所示。

表4 温再生沥青常规技术指标  
Table 4 Conventional technical indexes of warm recycled asphalt

沥青类型	技术指标	单位	试验结果
普通温再生沥青	针入度(25℃,5 s,100 g)	0.1 mm	202.4
	软化点(环球法)	℃	37.9
	延度(10℃)	cm	>100
	135℃黏度	Pa·s	0.218
	针入度(25℃,5 s,100 g)	0.1 mm	170.3
改性温再生沥青	软化点(环球法)	℃	64.5
	延度(10℃)	cm	>100
	135℃黏度	Pa·s	1.165

1.3 沥青混合料配合比设计

选用沥青路面中面层常用的AC-20型沥青混合料,RAP掺量分别为60%、70%、80%,参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)的要求,对温再生沥青混合料进行级配设计,如图3所示。

其中,3种RAP掺量的普通温再生沥青混合料分别简写为:60%RAP-普通、70%RAP-普通、80%

RAP-普通,3种RAP掺量的改性温再生沥青混合料分别简写为:60%RAP-改性、70%RAP-改性、80%RAP-改性。

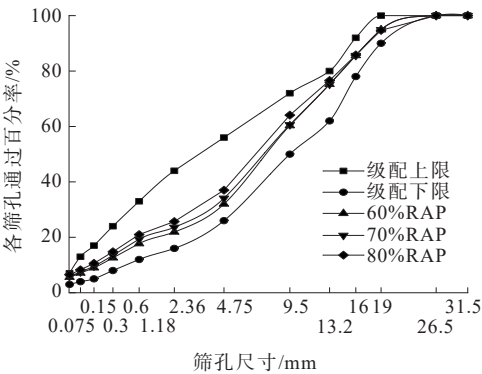


图3 温再生沥青混合料AC-20型级配曲线  
Figure 3 Gradation curve of warm recycled asphalt mixture of type AC-20

由于RAP掺量较多,混合料中老化沥青含量高,因此在配合比设计时应该适当增加新沥青的掺量,防止再生路面出现开裂现象。通过马歇尔试验,结合《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2017)<sup>[13]</sup>及以往沥青混合料设计经验,确定总沥青油石比为4.6%,设定拌和温度130℃,击实温度125℃成型试件,经检测,6种沥青混合料均满足密实沥青混合料马歇尔试验技术要求,试验结果如表5所示。

表5 不同混合料马歇尔试验结果  
Table 5 Marshall test results of different mixtures

混合料类型	RAP掺量/%	设计油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/(0.1 mm)
普通温再生沥青混合料	60	4.6	2.425	4.7	13.8	65.9	15.38	38.1
	70		2.447	4.3	13.5	68.1	18.30	33.6
	80		2.455	4.1	13.4	69.2	21.82	36.0
改性温再生沥青混合料	60	4.6	2.414	4.9	15.1	67.2	17.63	33.9
	70		2.436	4.1	14.3	71.5	21.46	34.7
	80		2.443	3.8	14.0	72.9	25.39	33.5
技术要求	—	—	—	3~5	≥12	65~75	≥8	20~40

1.4 温再生沥青混合料的力学性能评价试验

1.4.1 动态模量试验

依据NCHRP9—29的试验方法,借助SPT沥青混合料简单性能试验机对60%、70%、80%3种RAP掺量的温再生沥青混合料高温力学性能进行研究,采用动态模量试验测量温再生沥青混合料的动态模

量值,首先将切割好的直径100 mm、高150 mm的旋转压实试件分别在5℃、20℃、30℃、45℃试验温度及0.1 Hz、0.5 Hz、1 Hz、5 Hz、10 Hz、20 Hz的半正弦荷载波形加载频率下进行动态模量试验,为了减少试验误差,本研究按照温度由低到高、加载频率由大到小的顺序进行试验。



### 1.4.2 重复加载蠕变试验

采用重复加载蠕变试验对路面上相邻两次行车荷载之间的间歇期进行模拟,根据沥青混合料的蠕变过程,可以分为压密期、稳定期与塑性破坏期3个阶段<sup>[14]</sup>,重复加载蠕变试验是在选定的温度下,采用特定的轴向压力以半正弦波的加载方式对沥青混合料进行重复加载,其加载数值的大小为混合料在永久变形的稳定期与塑性破坏期交界处的荷载作用次数,即混合料的流动数。流动数越大,表明混合料在压密期与稳定期内的荷载作用次数越多,材料更不易进入塑性破坏状态,高温抗永久变形能力越强。采用与动态模量相同的试验方法制备试件,将试件在55℃烘箱中恒温6 h后转移到与烘箱温度相同的沥青混合料简单性能试验机中,采用半正弦波以700 kPa的轴向加载压力值对处理好的不同RAP掺量的试件进行加载,每个循环加载0.1 s,然后卸载0.9 s,共完成5 000次蠕变回复过程的循环;为避免试件出现偏心加载现象,选用50 kPa轴向加载压力对试件进行预加载,并记录试验结果。

### 1.4.3 抗剪性能试验

借助UTM设备,将切割好的直径150 mm、高度100 mm的旋转压实试件提前放入60℃烘箱中保温5 h,取出后在60℃恒温环境下,以1 mm/min的加载

速度对试件进行加载,压头直径选取42 mm,记录施加荷载极值 $F$ 与贯入应力 $\sigma_p$ ,并采用相同方式成型旋转压实试件,在相同养护条件、试验温度及加载方式下,以直径150 mm的压头进行无侧限抗压强度试验,计算出试件的黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 。

### 1.5 温再生沥青混合料的路用性能评价试验

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)规范要求,将6种温再生沥青混合料按规范分别成型试件,通过高温车辙试验、低温弯曲小梁试验、冻融劈裂试验,对其各自的高温稳定性、低温抗裂性能、水稳定性分别进行分析,测定相关的路用性能指标。

## 2 结果与讨论

### 2.1 RAP掺量对温再生沥青混合料力学性能的影响

#### 2.1.1 动态模量

沥青混合料作为典型的黏弹性材料,在实际使用时,处在一个动态荷载环境下,其受力状态和材料性质与室内常规试验得到的静态体系有着较大的差距。通过动态模量试验得到的动态模量值变化如图4所示。

由图4可知:在固定的加载频率下,随着RAP掺

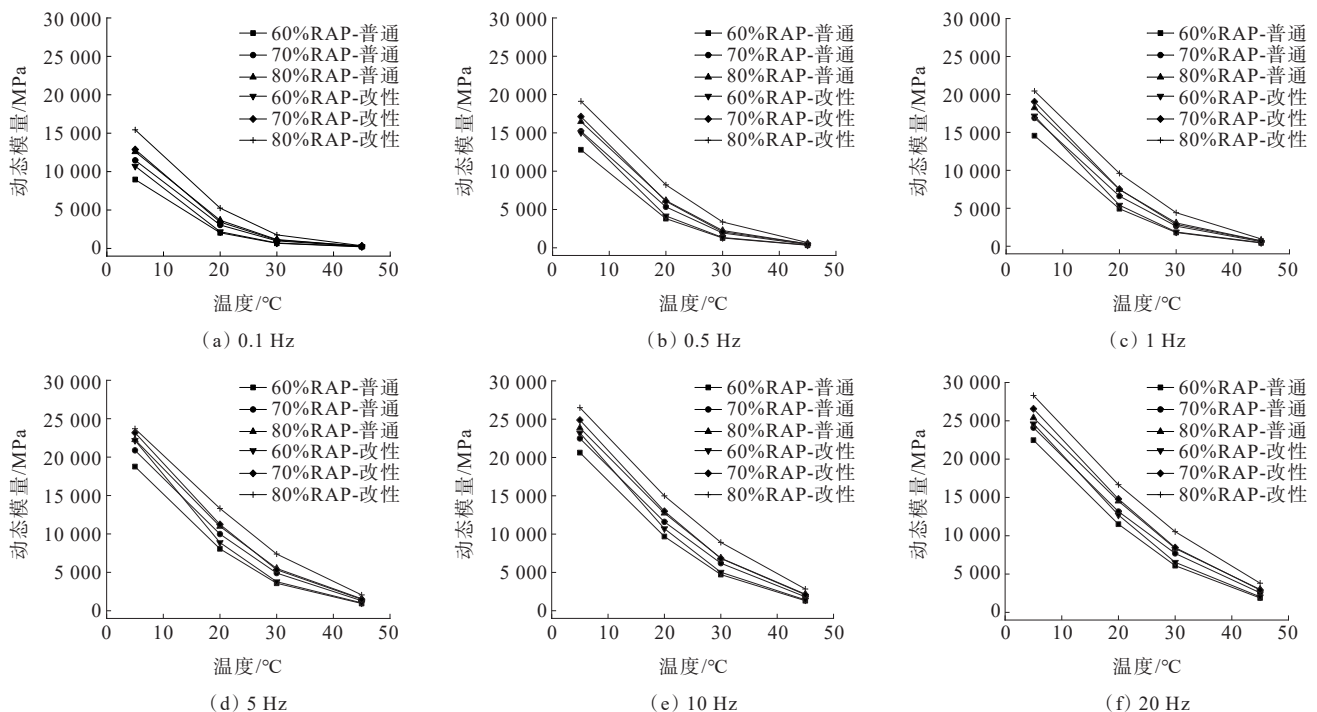


图4 温再生沥青混合料动态模量试验结果

Figure 4 Test results of dynamic modulus of warm recycled asphalt mixture

量的增加,动态模量逐渐变大,说明较高的RAP掺量下,在动态轴向荷载作用下,混合料能够更好地分散荷载作用,抵抗变形;随着温度的升高,固定加载频率下混合料的动态模量值逐渐减小,这印证了沥青混合料的黏弹特性,温度的升高导致沥青逐渐软化,弹性特征减少,荷载作用下应变增大,使得动态模量逐渐降低。在相同条件下,相同RAP掺量的改性温再生沥青混合料的动态模量明显高于普通温再生沥青混合料,这是由于SBS改性温再生沥青具有更强的黏结能力,提高了沥青与集料间的黏结力,抗变形能力增强,使得动态模量增大。当加载频率低于1 Hz时,6种混合料动态模量值相差不大,表明在较低的加载频率下,沥青混合料产生变形的时间效应没有明显的差别。

作为典型的黏弹性材料,沥青混合料在不同的温度和荷载作用频率下呈现出不同的力学特性,因此,可以借助动态模量主曲线对温再生沥青混合料在长期或高频率下的力学性质进行预测,从而节省试验时间,即混合料的时间-温度置换原理<sup>[15-17]</sup>。通常借助 Sigmoidal 函数[式(1)]与 Arrhenius 方程[式(2)]联立方程(3)来描述沥青混合料的动态模量主曲线。

$$\log|E^*| = \delta + \frac{M_{ax} - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma \log t_r}} \quad (1)$$

式中:  $|E^*|$  为动态模量(MPa);  $t_r$  为参考温度下的作用时间(s);  $M_{ax}$  为动态模量最大值的对数;  $\delta$  为动态模量最小值的对数;  $\beta$ 、 $\gamma$  为描述 Sigmoidal 函数形状的参数。

$$\log t_r = \log t - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (2)$$

式中:  $T_r$  为参考温度(K);  $T$  为试验温度(K);  $\Delta E_a$  为试验材料活化能,作为确定材料动态模量主曲线时的拟合参数。

$$\log|E^*| = \delta + \frac{M_{ax} - \delta}{1 + e^{\beta + \gamma \left[ \log t - \frac{\Delta E_a}{19.147\,14} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right]}} \quad (3)$$

如图5所示,在整个时间范围内,相同掺量下改性温再生沥青混合料的动态模量值均高于普通温再生沥青混合料,且随着RAP掺量的增加混合料的动态模量值逐渐增大。根据时温等效原理,短时间作用可表示低温状态力学响应,说明温再生沥青混合

料对低温性能有一定的不利影响,应避免使用在受低温条件影响较大的层位;长时间作用可表示为高温状态下的力学响应,说明温再生沥青混合料能提高沥青混合料抵抗高温变形类病害的能力,可推荐用于抗车辙层结构材料类型。

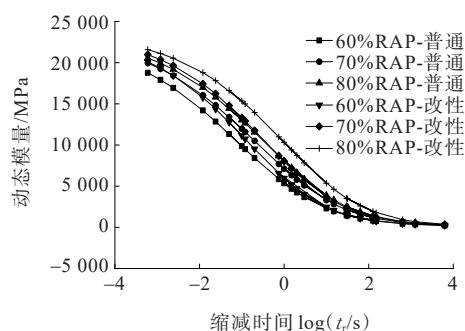


图5 温再生沥青混合料动态模量主曲线

Figure 5 Main curve of dynamic modulus of warm recycled asphalt mixture

### 2.1.2 重复加载蠕变

采用重复加载蠕变试验可以解决传统的高温车辙试验不能记录混合料随时间的变形机理,能够在一定程度上模拟路面的实际受力情况,准确地评价混合料的高温力学特性。重复加载蠕变试验得到的流动数  $F_N$  及其所对应的微应变如图6所示。

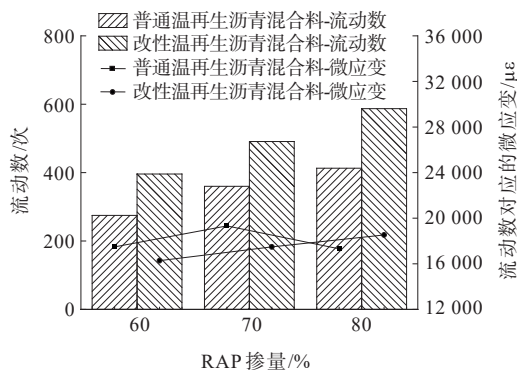


图6 温再生沥青混合料重复加载蠕变试验结果

Figure 6 Creep test results of warm recycled asphalt mixture under repeated loading

流动数  $F_N$  可以较好地反映沥青路面在实际使用过程中的高温抗车辙能力。由图6可以看出:随着RAP掺量的增加,流动数逐渐增大,表明RAP掺量的增加,有助于提高温再生沥青混合料抵抗不可恢复变形和高温下结构失稳的能力,同时使得混合料的复数剪切模量变大,重复加载形成的累计变形减小,在压密期与稳定期内的荷载作用次数增多,材

料更不易进入到塑性破坏状态,高温抗永久变形能力增强。与普通温再生沥青混合料相比,改性温再生沥青混合料的流动数显著高于普通温再生沥青混合料。

### 2.1.3 抗剪强度

目前,中国沥青路面基层主要采用半刚性基层,车辙病害主要由于面层的沥青混合料抗剪强度低,在荷载作用下产生过量的变形所导致。本研究采用单轴贯入试验对温再生沥青混合料的抗剪强度进行测定,从而对混合料的高温抗车辙性能进行表征。试验结果如图7所示。

由图7可知:随着RAP掺量的增加,温再生沥青混合料的贯入强度逐渐增大,分析原因是在相同油石比下,RAP掺量越高,混合料间的空隙率越小,混合料压实更密,骨料嵌挤状态较好,从而有效抵抗剪应力的作用,具有较好的抗剪切能力。相同RAP掺量下,改性温再生沥青混合料较普通温再生沥青混合料有着更大的贯入强度,这是由于添加SBS改性剂可以增强沥青的黏结能力,混合料抵抗骨料在荷

载作用下发生错位移动的能力增强,混合料黏聚力整体得到提高,抗剪切能力增强。

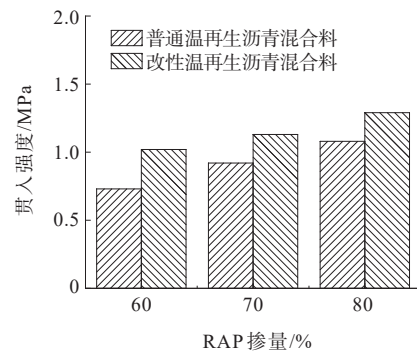


图7 温再生沥青混合料单轴贯入强度

Figure 7 Uniaxial penetration strength of warm recycled asphalt mixture

在实际应用中,采用单轴贯入试验中所测得的贯入强度值乘以强度参数后可以得到各主应力值和剪应力值,再辅以无侧限抗压试验测得的抗压强度,结合莫尔圆,可以求得混合料的黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ ,数据处理过程及结果如表6所示。

表6 温再生沥青混合料抗剪强度试验结果

Table 6 Test results of shear strength of warm recycled asphalt mixture

沥青混 合料	RAP 掺 量/%	无侧限 压力/kN	抗压强 度/MPa	拐点压 力/kN	贯入应 力/MPa	贯入强 度/MPa	主应力/ MPa	剪应力/ MPa	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)
普通 温再生	60	14.49	0.82	2.883	2.081	0.73	1.59	0.18	0.199	38.2
	70	21.91	1.24	3.626	2.618	0.92	2.00	0.23	0.338	32.7
	80	25.45	1.44	4.257	3.073	1.08	2.35	0.27	0.392	32.9
改性 温再生	60	15.90	0.90	4.020	2.902	1.02	2.22	0.25	0.197	42.7
	70	27.74	1.57	4.492	3.242	1.13	2.48	0.28	0.438	31.7
	80	27.39	1.55	5.098	3.679	1.29	2.81	0.32	0.390	36.5

由表6可以看出:RAP掺量的增加,使黏聚力逐渐增大,剪切作用下温再生沥青混合料颗粒之间产生相互滑动时需要克服的表面摩擦力增大,混合料的抗剪性能得到提升,从而改善了混合料的高温抗车辙能力。而60%RAP掺量的温再生沥青混合料内摩擦角大于更高掺量的温再生沥青混合料,说明RAP旧料与新矿料一起形成了更好的嵌锁状态,虽然黏聚力较低,但仍能表现出高于新拌沥青混合料的抗剪强度;而RAP掺量高于60%时,嵌锁状态变差,转而依靠老化沥青的黏滞性保持较好的抗剪切能力。

## 2.2 RAP掺量对温再生沥青混合料路用性能的影响

### 2.2.1 高温稳定性能

高温稳定性能指沥青路面使用时,在高温环境下抵抗车轮的反复荷载作用,其性能和结构保持相对稳定,抵抗病害产生的能力。本研究采用60℃车辙试验对不同RAP掺量的温再生沥青混合料的高温稳定性能进行研究,试验结果如图8所示。

由图8可知:随着RAP掺量的增加,温再生沥青混合料的动稳定度逐渐增大,增长幅度却逐渐减小,分析原因可能是RAP掺量的增加,相同油石比下老化沥青所占的比例逐渐增大,沥青的硬度变大,流动



性减弱,劲度增强,使混合料具有更好的高温抗车辙能力,但RAP中的集料在使用或回收过程中棱角遭到破坏,内摩擦角减小,对高温稳定性能产生不利影响,且随着RAP掺量的增加表现得愈加明显,导致增幅变缓。而添加SBS改性温再生沥青后,动稳定度仍然呈现出随RAP掺量的增加而提高的趋势,且相同RAP掺量下有着更大的动稳定度值,表明加入SBS改性剂可以提高沥青与集料间的黏结力,从而改善混合料的高温抗车辙能力。

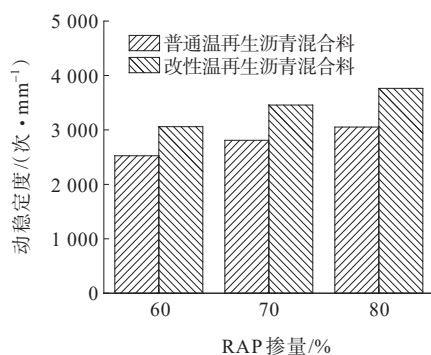


图8 温再生沥青混合料高温稳定性试验结果

Figure 8 Test results of high-temperature stability of warm recycled asphalt mixture

为进一步探究高温车辙试验与重复加载蠕变试验得到的力学参数之间的关系,对不同RAP掺量下得到的温再生混合料流动数与动稳定度值分别进行了线性相关性分析,结果如图9所示。

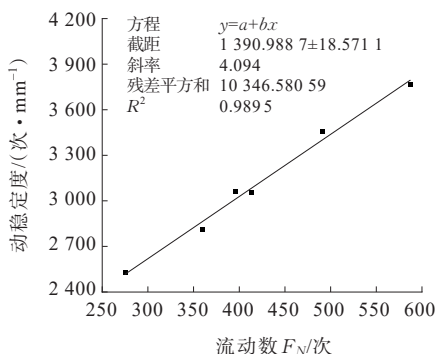


图9 温再生沥青混合料流动数与动稳定度值线性分析

Figure 9 Linear analysis of flow number and dynamic stability of warm recycled asphalt mixture

从图9可以看出:温再生沥青混合料动稳定度与流动数之间具有较好的线性相关性,相关系数达0.989 5,说明采用流动数可以准确地反映出混合料的高温抗车辙能力。

## 2.2.2 低温抗裂性能

低温抗裂性能是指沥青路面在环境温度下降时抵抗周围基层或沥青材料产生的温度应力,防止开裂的能力。本研究采用低温弯曲小梁试验对温再生沥青混合料的低温抗裂性能进行研究,将成型好的沥青混合料车辙板切割成标准小梁试件,在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、50 mm/min的加载频率下进行试验,试验结果如图10所示。

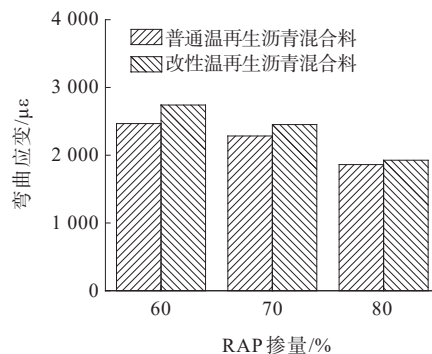


图10 温再生沥青混合料低温抗裂性试验结果

Figure 10 Test results of low-temperature crack resistance of warm recycled asphalt mixture

由图10可知:随着RAP掺量的增加,混合料的低温弯曲应变逐渐减少,表明RAP的加入使沥青混合料弹性下降,延展性降低,弯拉强度变大,低温抗裂能力减弱。相同RAP掺量下普通温再生沥青混合料的弯曲应变低于改性温再生沥青混合料,80%RAP掺量的普通温再生沥青混合料与改性温再生沥青混合料最大弯拉应变仅为1862  $\mu\epsilon$  与1926  $\mu\epsilon$ ,不满足不小于2000  $\mu\epsilon$ 的技术要求。

## 2.2.3 水稳定性

水稳定性指外部水浸入到沥青混合料内部后,混合料抵抗路面出现剥落、坑槽等一系列病害的能力。本研究采用冻融劈裂试验借助冻融劈裂强度比 $R_{TSR}$ 对温再生沥青混合料的水稳定性进行表征,进而分析恶劣环境下沥青的抗水损害能力,试验结果如图11所示。

由图11可知:随着RAP掺量的增加,温再生沥青混合料的水稳定性逐渐减弱,分析原因是RAP表面裹覆了一层老化沥青,RAP掺量越高,老化沥青的含量越大,与集料表面之间的黏附性随之减弱,抗水损害能力下降,水稳定性变差。且改性温再生沥青混合料的冻融劈裂强度比与普通温再生沥青混合



料相比略有改善,表明线性 SBS 改性剂可以改善沥青和集料之间的黏附性,提高混合料的水稳定性能。

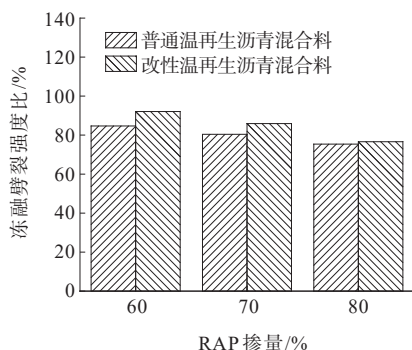


图 11 温再生沥青混合料水稳定性试验结果

Figure 11 Test results of water stability of warm recycled asphalt mixture

#### 2.2.4 汉堡车辙性能

沥青路面在实际使用时,除了受到车辆荷载的作用外,还受到雨水等环境因素的共同作用。汉堡车辙试验综合考虑了车辆的荷载作用及雨水、路面积水等环境因素对混合料性能的影响,可以更加全面地评价沥青混合料的高温稳定性和水稳定性<sup>[17-18]</sup>。试验采用 APA 汉堡车辙仪,在 50℃ 的水浴温度下,以 52 rpm 的循环速度对成型的混合料试件进行碾压,借助车辙深度对温再生沥青混合料的路用性能进行评价,试验结果如图 12 所示。

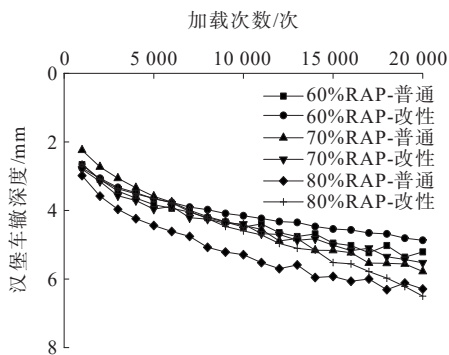


图 12 温再生沥青混合料汉堡车辙试验结果

Figure 12 Hamburg rut test results of warm recycled asphalt mixture

由图 12 可以看出:温再生沥青混合料的车辙变形随着加载次数的增加逐渐增大,但均未达到深度为 12.5 mm 的提前结束条件;3 种 RAP 掺量下混合料的车辙深度 60% RAP > 70% RAP > 80% RAP,说明公称最大粒径并不是影响车辙深度的决定性因素;

随着 RAP 掺量的增加,老化沥青的含量也就越高,其浸水状态下的抗车辙性能越弱,这与动稳定度结果大小排序不一致,说明高温和水的耦合作用对再生沥青混合料抗变形能力影响显著。当新添加沥青为 SBS 改性沥青时,温再生混合料车辙深度变小、蠕变速率也有不同程度的降低,说明改性沥青对于再生沥青混合料抵抗动水剥离与车辙变形有明显的提高作用。

### 3 结论

基于试验室自主研发的咪唑啉型表面活性剂型新型温再生剂,设计了 60%、70%、80% 共 3 种 RAP 掺量的普通温再生沥青混合料和改性温再生沥青混合料,研究 RAP 掺量对普通温再生沥青混合料与改性温再生沥青混合料力学性能和路用性能的影响,得出以下主要结论:

(1) 在油石比为 4.6% 时,随着 RAP 掺量的增加,空隙率与矿料间隙率逐渐降低,毛体积相对密度、稳定度与流值逐渐增大。

(2) 随着 RAP 掺量增加,温再生沥青混合料的动态模量值与流动数增大,高温抗永久变形能力增强,抗剪切与抗弹性变形能力明显提高。

(3) 随着 RAP 掺量增加,温再生沥青混合料的高温稳定性能得到了明显改善,但浸水状态下的抗车辙性能,低温抗裂性能、水稳定性能有所降低,当 RAP 掺量为 80% 时,水稳定性能不再满足规范要求。

(4) 研究了动稳定度与流动数的关联关系,借助方程  $y=a+bx$  对不同掺量下动稳定度与流动数进行线性拟合,结果表明:流动数与动稳定度之间相关性系数达到了 0.989 5,具有较好的线性相关性,可以借助流动数有效地评价混合料的高温抗车辙能力。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] ZHAO P H, DONG M L, YANG Y S, et al. Research on the mechanism of surfactant warm mix asphalt additive-based on molecular dynamics simulation[J]. Coatings, 2021, 11 (11): 1303.
  - [2] 吕润华, 周游佳, 陈爽, 等. 路面快速养护技术的研究现状[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 316-319.
- WO Runhua, ZHOU Youjia, CHEN Shuang, et al. Research

- status of pavement rapid maintenance technology[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(2):316-319.
- [3] PAN Y Y, SHANG Y, LIU G Q, et al. Cost-effectiveness evaluation of pavement maintenance treatments using multiple regression and life-cycle cost analysis[J]. Construction and Building Materials,2021,292:123461.
- [4] 王兆仑,宁金成,栗威.冷拌再生沥青混合料能耗与碳排放量分析[J].公路,2021,66(5):263-268.  
WANG Zhaolun, NING Jincheng, LI Wei. Analysis of energy consumption and carbon emissions of cold mix recycled asphalt mixture[J]. Highway,2021,66(5):263-268.
- [5] YAN J H, ZHU H R, ZHANG Z X, et al. The theoretical analysis of the RAP aged asphalt influence on the performance of asphalt emulsion cold recycled mixes[J]. Construction and Building Materials,2014,71:444-450.
- [6] STIMILLI A, VIRGILI A, CANESTRARI F. Warm recycling of flexible pavements: Effectiveness of warm mix asphalt additives on modified bitumen and mixture performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 911-922.
- [7] ABDULLAH M E, AHMAD ZAMHARI K, HAININ M R, et al. High temperature characteristics of warm mix asphalt mixtures with nanoclay and chemical warm mix asphalt modified binders[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 122:326-334.
- [8] 余晖,郑炳锋,黄毅,等.泡沫温拌再生沥青混合料力学性能研究[J].中外公路,2021,41(4):277-281.  
YU Hui, ZHENG Bingfeng, HUANG Yi, et al. Research on mechanical property of foamed warm mix asphalt containing RAP[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(4):277-281.
- [9] FAKHRI M, AHMADI A. Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2017, 147:630-638.
- [10] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2005.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press,2005.
- [11] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press,2011.
- [12] 交通运输部公路科学研究院.公路沥青路面再生技术规范: JTG/T 5521—2019[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for highway asphalt pavement recycling: JTG/T 5521—2019[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2017.
- [13] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.  
CCCC Road & Bridge Consultants Co.,Ltd.. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017 [S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2017.
- [14] 张争奇,罗要飞,栗培龙,等.基于重复加载蠕变试验的沥青混合料高温性能研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(4):58-64.  
ZHANG Zhengqi, LUO Yaofei, LI Peilong, et al. Study on the high-temperature performance of asphalt mixture based on repeated load creep test[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014,36(4):58-64.
- [15] HAN D, YUAN M, HU H M. Establishing prediction master curve of dynamic modulus of asphalt mixture considering randomness of aggregate morphology[J]. Construction and Building Materials,2021,294:
- [16] BAZI G, BOU ASSI T. Asphalt concrete master curve using dynamic backcalculation[J]. International Journal of Pavement Engineering,2022,23(1):95-106.
- [17] WANG W H, HUANG C W. Establishing indicators and an analytic method for moisture susceptibility and rutting resistance evaluation using a hamburg wheel tracking test [J]. Materials,2020,13(15):3269.
- [18] LARRAIN M M M, TAREFDER R A. Asphalt concrete rutting modeling using hamburg wheel tracking device (HWT D) [C]//Airfield and Highway Pavements 2019. Chicago, Illinois. Reston, VA: American Society of Civil Engineers,2019.