

# 旧料掺量对温拌再生沥青混合料耐久性的影响分析

李 达<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 北京市道路工程质量监督站,北京 100076)

**摘 要:**为了研究旧料掺量对温拌再生沥青混合料耐久性的影响,采用冻融劈裂与水损坏敏感试验(MIST)研究混合料抗水损害性能,采用半圆弯曲试验研究混合料抗裂性能,采用标准贯入试验(SPT)研究混合料动态模量变化趋势。结果表明:随着回收沥青路面材料(RAP)含量的增加,水处理后沥青混合料弹性模量比逐渐提高,水对弹性模量的衰减程度影响相对较低;混合料破坏时的耗散徐变应变能  $DCSE_t$  先增加后减少,温拌再生沥青混合料中存在一个最佳的 RAP 含量;旧料的增加在一定程度上降低了沥青混合料的抗开裂能力,使混合料向脆化方向发展,当旧料掺量达到一定水平后,再生沥青混凝土的抗裂性能将不再降低;同等条件下,RAP 掺量越大,再生混合料动态模量越大,混合料表现出更多的刚性,更趋于脆性,随着试验温度的提升,温拌再生沥青混合料的动态模量更多地显现出黏弹性特征;相同 RAP 含量时,热再生沥青混合料浸水后抗变形能力、抗裂能力及动态模量均高于同等条件下的温拌再生混合料;热再生条件下能融化 RAP 料表面旧沥青的数量比温拌条件时多,使混合料更密实,其体积特征的变化带来了性能的差异。

**关键词:**道路工程;再生沥青混合料;RAP 掺量;MIST;半圆弯曲试验;SPT;耐久性

**中图分类号:**U416.26 **文献标志码:**A

## Influence of RAP content on durability of warm-mix recycled asphalt mixture

LI Da<sup>1,2</sup>

(1. School of Highways, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Beijing Road Engineering Quality Supervision Station, Beijing 100076, China)

**Abstract:** To study the effect of old material content on durability of warm-mix recycled asphalt mixture, the water resistance performance of mixtures were studied by freeze-thaw splitting test and moisture-induced sensitivity test (MIST), the anti-cracking performance of asphalt mixtures were studied by semi-circular bending test, the change trend of the dynamic modulus of the mixture. were studied by simple performance tester (SPT). The results show that, with an increase in recycled asphalt product (RAP) content, the dynamic modulus ratio of the asphalt mixture increases gradually after water treatment, the influence attenuation of water to the dynamic modulus is relatively low. The dissipated creep strain energy ( $DCSE_t$ ) of the warm-mixed asphalt first increases and then decreases. an optimum RAP content in warm mix recycled

收稿日期:2018-04-11

基金项目:中国博士后科学基金项目(2016T90058)

作者简介:李 达(1982-),男,陕西绥德人,北京市道路工程质量监督站高级工程师,长安大学工学博士研究生,

E-mail:390276876@qq.com。

asphalt mixture. There is an increase in RAP reduces the anti-cracking ability of the asphalt mixture to a certain extent and causes the mixture to develop brittleness. When the RAP content reaches a certain level, the cracking resistance performance of the recycled asphalt is no longer reduced. Under the same conditions, the greater the RAP content, the greater the dynamic modulus of the regenerated mixture, the greater the stiffness, and the more brittle the mixture. With an increase in test temperature, the dynamic modulus of the warm-mixed asphalt shows more viscoelastic characteristics. In a comparison between hot-mixed and warm-mixed asphalts with the same RAP content, the resistance to deformation, crack resistance, and dynamic modulus of the hot recycled asphalt mixture were higher than those under similar conditions. Under the condition of hot regeneration, The amount of old asphalt that RAP material is more than that of warm mix, under conditions of thermal regeneration. The higher density of the mixture and the change in volume characteristics lead to differences in performance. 4 tabs, 4 figs, 23 refs.

**Key words:** road engineering; recycled asphalt pavement; RAP content; moisture induced sensitivity test; semicircle bending test; simple performance test; durability

## 0 引言

沥青混合料作为主要的路面材料被广泛运用,然而在运输、生产、摊铺过程中能源消耗大,并带来温室气体排放等一系列环境问题。温拌再生技术通过降低混合料在拌和与施工过程中的温度来达到节能减排的效果<sup>[1]</sup>。沥青混合料再生可大致分为:现场热再生、现场冷再生、厂拌热再生和厂拌冷再生<sup>[2]</sup>。现场热再生需要昂贵的施工机械、施工费用大、施工条件相对苛刻且极易受天气影响<sup>[3]</sup>;现场冷再生与厂拌热再生一般用于路面的下层结构,回收沥青路面材料(RAP)的价值利用率不高<sup>[4]</sup>;在传统的再生技术中,RAP的掺量(质量分数,下同)一般不大于30%,掺量过高会导致再生剂用量过大,同时还会显著降低再生沥青混合料的路用性能。温拌再生沥青混合料在较低的温度下生产施工,减少了沥青的老化,同时提高了沥青混合料的和易性,使其更加密实<sup>[5]</sup>。

中国旧沥青路面的再生技术研究起步较晚,直到20世纪70年代才开始对旧沥青路面再生利用技术的可行性、经济性和实际应用进行试验研究<sup>[6]</sup>。2000年,东南大学和常州市化工研究所合作,研制出了针对高等级沥青路面的新型再生剂<sup>[7]</sup>;2003年在沪宁(上海—宁波)高速公路上海段大中修工程采用了沥青路面现场热再生技术,其旧料的利用率达到了100%<sup>[8]</sup>。《公路沥青路面再生技术规范》(JTGF41—2008)中对旧沥青混合料的回收处理及试验要求、再生混合料设计及技术要求、各种再生方法的

施工工艺及质量控制等进行了详细规定。季节等采用耗散能法分析了RAP掺量、拌和方式对热拌及温拌再生SMA沥青混合料疲劳性能的影响,发现其疲劳寿命与累积耗散能的关系不会随RAP掺量、拌和方式的变化而变化,疲劳寿命与累积耗散能在双对数坐标下,均表现出良好的线性关系<sup>[9]</sup>。杨丽英等通过沥青路面旧料分析和再生沥青混合料配合比设计,确定了温、热再生沥青混合料的配合比,并指出在矿料合成级配基本相同的条件下,可以将旧沥青混合料用量提高到45%,突破了热再生技术中旧料比例不超过30%的技术难题,并采用四点弯曲试验对再生沥青混合料进行了疲劳性能验证,发现温拌再生混合料的疲劳性能明显优于热拌再生混合料<sup>[10]</sup>。

美国最早于1915年开始对旧沥青再生技术进行研究,但是当时处于新建公路的建设高峰期,此项技术未开展深入研究<sup>[11]</sup>。直到1973年石油危机后,这项技术才重新受到人们重视<sup>[12]</sup>。美国联邦公路局和材料与试验协会等经常召开有关旧沥青路面再生利用的会议,推动了路面再生技术的发展<sup>[13]</sup>。Valdes等对RAP沥青混合料的力学性能进行了试验研究,评价了2种最大集料粒径为12和20mm的半致密混合物(分别含有40%和60%RAP,根据西班牙规范),分析了RAP变化对再生混合物的影响,然后通过测定其刚度模量、间接抗拉强度、开裂和疲劳性能,研究了其力学性能;结果表明,通过适当表征和处理RAP储存,通常可以将高回收率材料掺入沥青混合料中<sup>[14]</sup>。Zhao等通过在沥青混合

料中添加回收的再生沥青瓦(RAS),采用凝胶色谱仪(GPC)分析混合料中新沥青与再生沥青的共混效率,估计 RAS 黏结剂的共混效率,评价了团聚体粒径、RAS 掺量和混合时间对共混效率的影响;试验结果表明,大分子物质含量与沥青结合料的复合剪切模量高度相关,增加混合时间可以更好地将 RAS 与混合料进行共混,团聚体大小对共混效率没有显著影响<sup>[15]</sup>。

由于老化沥青的存在,随着再生沥青混合料中旧料比例的提高,其高温稳定性有所提高,但水稳定性和低温抗裂性以及耐久性有不同程度的降低,而且随着旧料掺量的升高,这种趋势更加明显<sup>[16]</sup>。沥青混合料的耐久性包含材料对气候变换和荷载重复作用的敏感性<sup>[17]</sup>。常用的试验方法有马歇尔残留稳定度试验<sup>[18]</sup>、冻融劈裂试验<sup>[19]</sup>、疲劳试验<sup>[20]</sup>。本文重点采用水损坏敏感试验(MIST)来评价温拌再生沥青混合料在动水压力作用下抵抗水损害的能力,该试验与传统方法相比,更能模拟实际车辆荷载作用下的路面材料实际受力状况,因而在欧美等国家得到广泛应用。采用带切口半圆弯曲试验和简单性能试验(SPT)等方法,重点分析旧料掺量对再生沥青混合料水稳定性、抗裂性能及动态模量等性能的影响。

## 1 试验材料

### 1.1 矿料

本文中拟采用的混合料级配为 AC-25,对应采用 3 种粒径  $D$  范围的石灰岩,分别为  $15\leqslant D<25$ 、 $5\leqslant D<15$  和  $0\leqslant D<5$  mm,矿粉为碱性的磨细石灰石粉。经检验,矿料的物理力学性能指标均满足相关规范要求。

### 1.2 旧料

为保证再生沥青混合料具有稳定的级配,对道路上铣刨回收的旧料,需在工厂先进行破碎处理,形成粗细 2 种规格,分别为  $15\leqslant D<25$  和  $0\leqslant D<15$  mm,经检验前者沥青含量(质量分数,下同)为 5.6%,后者沥青含量为 4.1%。经抽提后去除旧沥青,对旧矿料进行试验检测,其物理力学指标均符合相关技术要求。

### 1.3 沥青

采用的旧沥青为铣刨料经沥青分离后得到的旧沥青,为 70 号沥青,新沥青为 A-70 号沥青。旧沥青和新沥青主要技术指标如表 1 所示。

表 1 沥青的主要技术指标

Tab. 1 Main technical indexes of asphalt

试验项目	旧沥青	A-70 号道路 石油沥青	A-70 号道路 石油沥青技术要求
针入度(25 ℃,100 g, 5 s)/0.1 mm	56.8	69.0	60.0~80.0
软化点/℃	43	47	不小于 46
延度(5 cm·min <sup>-1</sup> , 15 ℃)/cm	11.7	大于 150.0	不小于 100.0
60 ℃动力黏度/(Pa·s)	455.0	192.3	不小于 180.0

回收旧沥青的针入度为 56.8(0.1 mm),15 ℃延度为 11.7 cm,呈现明显的脆性特征,说明其老化程度较大。

### 1.4 温拌剂

温拌剂为特殊的表面活性剂材料,掺量为新沥青用量的 5%,生产时与沥青同时添加至矿料进行混合料的拌和,可在低于热拌沥青温度 20 ℃~30 ℃的条件下实现良好的压实,达到目标空隙率。

## 2 混合料组成及体积特征

参考中国相关的再生沥青混合料组成设计方法<sup>[16-20]</sup>,对温拌再生沥青混合料进行了配合比设计,采用的旧料掺量分别为 15%、30%、40%、50%。新沥青的用量是参考相同矿料级配下 RAP 零掺量时的最佳沥青用量,减去旧料中的沥青量而计算得到。为比较分析,对添加 30%旧料的热再生沥青混合料和旧料零掺量的温拌沥青混合料也进行了试验研究。表 2 为各种旧料掺量下的 AC-25 沥青混合料的新沥青用量、最大理论密度及空隙率。空隙率与旧料掺量的关系见图 1。

表 2 AC-25 沥青混合料组成主要参数

Tab. 2 Main parameters of composition of AC-25 asphalt mixture

混合料类型	新沥青 用量/%	最大理论密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	空隙率/%
RAP0%,温拌	4.10	2.561	3.45
RAP15%,温拌再生	3.25	2.582	4.10
RAP30%,温拌再生	2.62	2.584	4.33
RAP40%,温拌再生	2.29	2.586	4.45
RAP50%,温拌再生	1.76	2.595	4.70
RAP30%,热拌再生	2.62	2.551	4.08

注:最大理论密度由真空法测定得到。

由表 2 可以看出,随着 RAP 掺量的增加,相应温拌再生沥青混合料空隙率也不同程度的增长,相比 0%RAP 掺量的温拌沥青混合料,其结果尤为明显。分析可知,RAP 中用于矿料裹覆的有效沥青

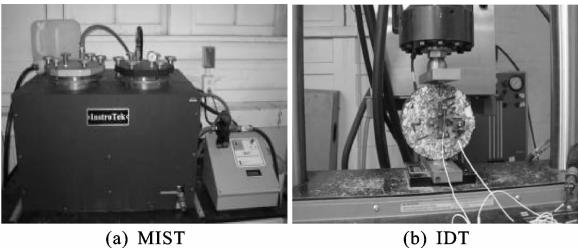


图 1 沥青路面 MIST 和 IDT  
Fig. 1 MIST and IDT of superpave

相对较少,在低 RAP 掺量情况下,其对沥青混合料的体积指标结果影响较小,当 RAP 掺量增大后,影响程度也相应增加。

当参加 30%RAP 采用热拌再生的方式成型试件,在相同新沥青掺量、同级配的情况下,其空隙率与温拌再生沥青混合料基本接近,前者为 4.08%,后者为 4.33%,因此,进一步证明温拌技术可以应用于再生沥青混合料。

传统研究认为<sup>[21-22]</sup>,沥青混合料空隙率越大,耐久性越差。但对于温拌再生沥青混合料,此规律是否适应,需进行针对性的室内试验验证。

### 3 旧料掺量对温拌再生沥青混合料耐久性的影响

#### 3.1 水损坏敏感试验

沥青混合料长期在水环境条件下会发生沥青与集料界面剥离,出现松散、表面坑槽等现象,而在交通荷载作用下,路面结构内部的水分成为有压水,以脉冲的方式在沥青混合料空隙中流动,而动水压力造成的损伤将远大于静水状态。

通常评价沥青混合料水稳定性能的方法为冻融循环法<sup>[23]</sup>,将试件在一定空隙率时进行真空饱水处理,根据 AASHTO 规范要求,经真空饱水处理的试件其饱合度应为 65%~85%。冻融循环前后的试件力学性能指标下降的比率即为评价沥青混合料水稳定性能的指标。

为了更真实模拟水对沥青混合料性能下降的影响,应用 MIST 评价动水作用下的沥青混合料的水稳定性能。该方法可以加速模拟交通荷载作用于潮湿路面的行为。当轮胎作用于潮湿路面时,轮胎与路面之间的水分受到挤压成为高压有压水,并迫使水分向路面空隙中冲刷,而当车轮驶离路面时,水分受到的压力减小,并从路面的空隙中流出。

采用 MIST 模拟了上述动水条件,对沥青混合料施加循环反复的高压力,为了加速沥青混合料的破坏过程,试验温度选择为 60℃。采用的沥青混合

料试件为直径 15.24 cm,厚度 10.16 cm。试件的目标空隙率为 7%,试件的毛体积密度采用 ASTM D2726 或 AASHTO T166 的方法测定。在循环过程中动水压力在 0~27.58 kPa 间变化,并设定循环次数为 1 000 次。试验设备见图 2。

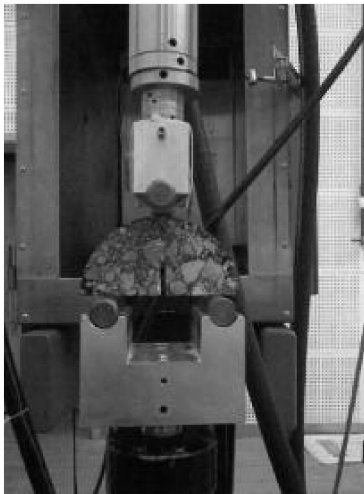


图 2 半圆弯曲试验  
Fig. 2 Semicircular bending test

采用 2 种方式处理:1 次冻融循环与 1 000 次动水冲刷循环。水处理后进行间接拉伸试验(IDT),分别计算试件的弹性模量和耗散徐变应变能(DCSE),DCSE<sub>f</sub>为试件破坏时的耗散徐变应变能,计算结果见表 3。

表 3 不同旧料掺量下的再生沥青混合料弹性模量和耗散徐变应变能

Tab. 3 Resilient modulus and DCSE of recycled asphalt mixtures with different RAP contents

旧料 掺量/%	试验条件	水处理前 弹性模量/ MPa	水处理后 弹性模量/ MPa	弹性 模量 比/%	DCSE <sub>f</sub> / (kJ·m <sup>-3</sup> )
15 (温拌再生)	冻融循环	6 747.8	5 320.3	78.8	6.2
	动水冲刷循环	8 619.8	6 810.3	79.0	5.1
30 (温拌再生)	冻融循环	7 138.9	5 744.6	80.5	7.5
	动水冲刷循环	9 772.4	7 886.5	80.7	6.3
40 (温拌再生)	冻融循环	8 899.6	7 432.0	83.5	6.8
	动水冲刷循环	9 500.1	8 891.4	93.6	4.8
30 (热再生)	冻融循环	8 800.5	7 659.6	87.0	5.0
	动水冲刷循环	9 144.4	7 825.2	85.6	4.8

经过水处理后,弹性模量变化可以表征沥青混合料在荷载作用下的抗变形能力,根据试验结果可以看出:

(1)随着 RAP 掺量的增加,水处理后沥青混合料弹性模量比逐渐提高。RAP 含量较高的情况下,再生沥青混合料的动态模量下降水平较少,即水对动态模量的衰减程度相对较低。

(2)从相同 RAP 掺量的热拌、温拌再生沥青混合料比较来看,热拌再生沥青混合料动态模量比高于温拌再生沥青混合料,说明热再生沥青混合料浸水后抗变形能力优于温拌再生沥青混合料。

(3)从 2 种不同水处理措施对沥青混合料性能衰减情况来看,1 次冻融循环对混合料造成的损伤略高于 1 000 次动水冲刷对混合料抗变形能力下降的影响。2 种不同的水处理措施均模拟了水流填充沥青混合料空隙这一过程对沥青结合料与集料黏结性能的影响,当车辆荷载行驶在有水路面上时,路表面的地表水经历瞬间压缩、瞬间释放的过程,这一过程将使沥青混合料空隙中的水经历膨胀、收缩的过程,造成水对集料、沥青界面的冲刷损伤。因此 2 种水处理措施在一定条件下可以相互等效、转化。

而根据试件破坏时的耗散徐变应变能  $DCSE_f$  结果可以看出:

(1)随着 RAP 掺量的增加,温拌再生沥青混合料的  $DCSE_f$  先增后减,说明当 RAP 掺量较低时,沥青混合料呈现较好的韧性,但当 RAP 掺量较高时,试件发生塑性破坏变形所需的临界耗散徐变应变能减小,试件发生脆性开裂的可能性提高。这与试验过程中观测到的试件破坏趋势一致。说明温拌再生沥青混合料中存在一个最佳的 RAP 掺量,旧料掺量过大将导致沥青混合料抗裂性能下降。

(2)热拌再生沥青混合料的  $DCSE_f$  略小于温拌再生沥青混合料,表明温拌再生沥青混合料发生塑性破坏所需能量要略高于热拌再生混合料,而两者数值差异并不大。因此,可以认为热拌再生沥青混合料与温拌再生沥青混合料  $DCSE_f$  基本相同。

(3)与弹性模量比相反,经 1 000 次动水冲刷后的试件  $DCSE_f$  小于 1 次冻融循环后的试件。虽然经 1 000 次动水冲刷后的试件抗变形能力略优于经 1 次冻融循环后的试件,但正因为其较好的抗变形能力,使试件在荷载作用下能集聚更多的弹性变形能;若造成破坏时的变形能相同,则经 1 000 次动水冲刷后试件储存的弹性应变能大于经 1 次冻融循环后的试件,其  $DCSE_f$  也小于 1 次冻融循环后的试件。

### 3.2 半圆弯曲切口试验

通过对半圆试件预切口,测定试件破坏过程中产生的变形能——破坏应变能,可以计算得到用于评价混合料断裂性能  $J$  的积分临界值  $J_c$ ,即

$$J_c = \left( \frac{U_1}{B_1} - \frac{U_2}{B_2} \right) \frac{1}{a_2 - a_1}$$

式中: $B_1$ 、 $B_2$  分别为试验前、后试件厚度; $a_1$ 、 $a_2$  分别为试验前、后切口深度; $U_1$ 、 $U_2$  分别为试验前、后破坏应变能。

为了达到较为理想的结果,半圆弯曲切口试验在 25 ℃室温条件下进行,以 0.5 mm/min 的速率进行加载,记录荷载由 0 增加至峰值过程的荷载-变形曲线,并根据试验结果计算试件单位厚度应变能。为了得到用于评价试件抗裂能力的  $J_c$ ,分别采用 12.5、25.4、38 mm 切口深度进行试验,如图 3 所示。

应变能越大,表明沥青混合料抗疲劳开裂的能力越强。为了减少厚度对试验结果的影响,将应变能标准化后可以得到单位厚度应变能,即试件发生破坏时外界荷载在单位长度上所做功。不同切口深度的半圆弯曲试验结果如表 4 所示。

表 4 不同切口深度单位长度应变能变化  
Tab. 4 Variations of strain energy per unit length at different depths of incisions

混合料类型	不同切口深度(mm)下的应变能/(J·m <sup>-1</sup> )		
	12.5	25.4	38
RAP0%,温拌	217	155	70
RAP15%,温拌再生	152	82	38
RAP30%,温拌再生	110	70	42
RAP40%,温拌再生	96	65	44
RAP50%,温拌再生	80	66	28
RAP30%,热拌再生	137	82	57

由表 4 可见,随着切口深度的增加,单位长度应变能随之降低。从 RAP 掺量对应变能的影响程度来看,未掺配旧料的应变能均高于相同切口深度下其他掺配旧料的混合料,旧料的增加在一定程度上降低了沥青混合料的抗开裂能力,使混合料向脆化方向发展。

不同材料变形规律趋势采用线性回归得到直线的斜率即为  $J_c$ ,用于评价沥青混合料的抗裂性能,  $J_c$  越低,表明材料脆性增大,抗裂性能降低。不同旧料掺量的再生沥青混合料  $J_c$  值如图 3 所示。

从图 3 可以看出,随着旧料掺量的增加,沥青混和料  $J_c$  显著降低,说明再生沥青混凝土的抗裂性能降低。从热拌混合料的对比情况来看,掺配 30%旧料的热拌再生沥青混凝土  $J_c$  值高于同等掺量温拌混合料,同时也略高于 15%旧料掺量的温拌再生料。由此可知,热拌再生混合料的抗裂能力高于同等条件下的温拌再生混合料。这可能是因为热拌再生沥青混合料的温度较高,因此其融化 RAP 料表面旧沥青的数量比温拌条件时多,因而使新旧沥青

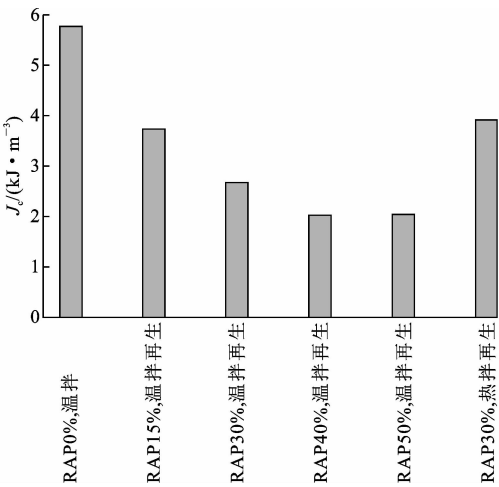


图 3 不同旧料掺量的  $J_c$  结果

Fig. 3 Results of  $J_c$  with different RAP contents

混溶均匀程度提高,同时提高了其抗裂性能。

3.3 温拌再生沥青混合料 SPT

利用 SPT 简单性能试验仪,测试温拌再生沥青

混合料的动态模量,评价其抗永久变形能力。SPT 包括 3 个沥青混合料试验:静态蠕变,重复荷载及动态模量试验。

本文采用 IPC 公司生产的 SPT 仪器,加载测试不同温度(10 ℃、25 ℃、54 ℃)条件下,25、20、10、5、2、1、0.5、0.2、0.1 Hz 加载频率条件下,温拌再生沥青混合料的动态模量。试验结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出:随着 RAP 掺量的增大,温拌再生沥青混合料的动态模量也随之增加,在低温(10 ℃)模式下,不同 RAP 掺量的再生沥青混合料之间的动态模量差较大,即同等条件下,RAP 掺量越大,再生混合料动态模量越大混合料表现出更多的刚性,更趋于脆性;随着试验温度的提升,温拌再生沥青混合料的动态模量更多的显现出黏弹性特征,随着加载频率的加大,动态模量的增长方式由直线逐渐转变为抛物线形式;试验温度的升高,RAP 掺量对温拌再生混合料动态模量的影响程度逐渐降低。

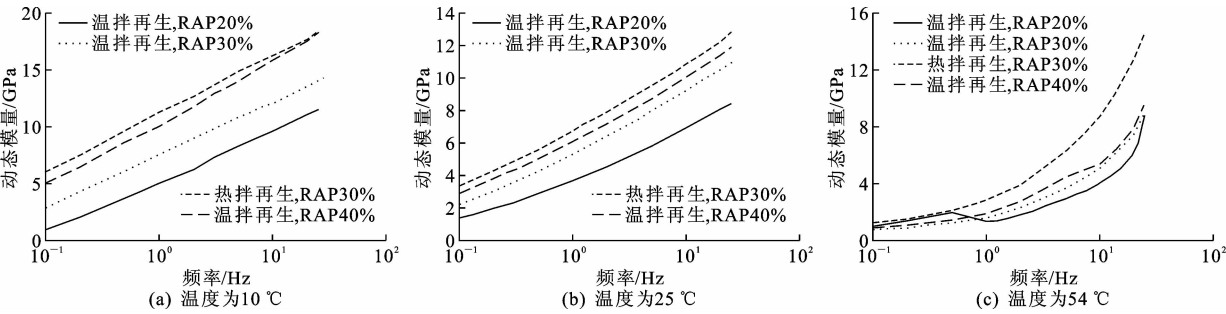


图 4 不同旧料掺量再生沥青混合料的动态模量

Fig. 4 Dynamic modulus of recycled asphalt mixtures with different RAP contents

采用热拌再生的方式,在同等 RAP 料掺量(30%)的情况下,再生沥青混合料的低温动态模量略大于温拌再生沥青混合料,高温条件下则显著高于温拌再生沥青混合料。

4 结 语

(1)旧料掺量对再生沥青混合料空隙率影响较大,相同旧料掺量的温拌和热拌再生沥青混合料的空隙率也不一样,说明旧料掺量和拌和工艺都会导致体积特征的变化,而混合料的耐久性往往与其空隙率相关性较大。

(2)冻融循环和 MIST 处理后对混合料进行的弹性模量和耗散徐变应变能试验结果表明:随着旧料掺量增加,弹性模量比增大,水损害对抗变形能力影响减小;DCSE<sub>f</sub> 先增后减,在旧料掺量较小时未影响抗裂性能,而在旧料掺量较大时抗裂能力明显下降。

(3)SPT 进一步分析了在不同温度下材料动态模量随旧料掺量变化,10 ℃和 25 ℃情况下,动态模量随掺量变化影响较显著,而在高温(54 ℃)条件下,混合料显示出黏弹性特征,旧料掺量对动态模量的影响降低。

(4)相同 RAP 掺量下,热再生沥青混合料抗变形能力和抗裂能力均优于温拌再生沥青混合料,抗水损害性能相当,说明拌和温度对再生沥青混合料性能影响较大。由于温拌剂含有表面活性剂,能提高沥青与集料的黏附作用,因此,2 种混合料对水的敏感性不显著。

(5)本研究未深入分析温拌再生沥青混合料体积特征与性能的关系;其次,旧料掺量与新沥青用量仅通过简单的总量计算来确定,而在实际生产中,需考虑旧集料中出现未完全熔融的沥青,实际新沥青用量比计算沥青用量大;另外,对于再生沥青混合料空隙率与耐久性的规律是否与传统沥青混合料相

符,需要后续研究确定。在生产实践中,需针对实际环境和交通特点,并结合旧料的特性进行温拌再生沥青混合料的组成设计,寻找最佳的旧料掺量,从而实现经济效益、环境效益与路用性能及路面耐久性的最佳平衡是下一步研究重点。

## 参考文献:

## References:

- [1] 黄明,王鹏,李彦伟,等.温拌再生沥青混合料关键技术研究及性能评价[J].公路,2012(10):162-166.  
HUANG Ming, WANG Peng, LI Yan-wei, et al. Research on key technologies and performance evaluation on recycled warm mix asphalt[J]. Highway, 2012(10):162-166.
- [2] 李庆伟,陈雄丽.热再生沥青技术在公路路面大修工程中的应用[J].城市建设理论研究,2012(8):1-12.  
LI Qing-wei, CHEN Xiong-li. Application of hot recycling asphalt technology in highway pavement overhaul engineering[J]. Theoretical Research on Urban Construction, 2012(8):1-12.
- [3] 杨媛媛.浅谈沥青路面再生技术的选择与应用[J].科技创新与应用,2015(34):237-238.  
YANG Yuan-yuan. Selection and application of asphalt pavement regeneration technology[J]. Technological Innovation and Application, 2015(34):237-238.
- [4] 陈永建.贵州山区高速公路乳化沥青冷再生混合料技术性能及施工技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.  
CHEN Yong-jian. Technical performance and construction technology of emulsified asphalt cold recycled mixture in Guizhou mountainous area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [5] 张东方.再生剂在热再生过程中的作用机理及评价方法[D].重庆:重庆交通大学,2017.  
ZHANG Dong-fang. Study on the subgrade diseases in permafrost of Qinghai-Tibet [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [6] 赵永利.沥青混合料热拌再生质量控制的若干问题[R].南京:东南大学,2014.  
ZHAO Yong-li. Some problems in quality control of hot mix recycling for asphalt pavement[R]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [7] 牟柏松.高等沥青路面再生剂的研制[J].今日科苑,2007(16):157-157.  
MOU Bai-song. Development of recycling agent for asphalt pavement [J]. Modern Science, 2007(16):157-157.
- [8] 叶志刚.沥青路面现场热再生技术[J].北方交通,2005(12):28-29.  
YE Zhi-gang. On site hot recycling technology of asphalt pavement [J]. Northern Communications, 2005(12):28-29.
- [9] 季节,索智,石越峰,等.热拌及温拌再生 SMA 沥青混合料疲劳性能分析[J].建筑材料学报,2015,18(6):1095-1098.  
JI Jie, SUO Zhi, SHI Yue-feng, et al. Analysis on fatigue behaviors of hot and warm recycled SMA asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6):1095-1098.
- [10] 杨丽英,谭忆秋,董雨明,等.热拌及温拌再生 SMA 沥青混合料疲劳性能分析[J].公路交通科技,2012,29(10):7-11.  
YANG Li-ying, TAN Yi-qiu, DONG Yu-ming, et al. Fatigue performance of warm recycled asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research, 2012, 29(10):7-11.
- [11] 朱媚媚,王军,刘云峰,等.沥青路面就地冷再生技术在公路养护大中修工程的应用[J].科技创新导报,2010(21):134-135.  
ZHU Mei-mei, WANG Jun, LIU Yun-feng, et al. Application of cold recycling technology of asphalt pavement in large and medium maintenance works of highway maintenance [J]. Science and Technology Innovation Guide, 2010(21):134-135.
- [12] 刘德旺.冷再生工艺在大修工程中的应用[J].交通世界,2005(10):74-75.  
LIU De-wang. Application of cold recycling technology in overhaul engineering [J]. Transpo World, 2005(10):74-75.
- [13] 韦琴.旧沥青路面再生利用技术研究[D].重庆:重庆大学,2006.  
WEI Qin. Recycling technology of aged asphalt pavement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [14] VALDES G, PEREZ-JIMENEZ F, MIRO R, et al. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP) [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3):1289-1297.
- [15] ZHAO S, BOWERS B, HUANG B, et al. Characterizing rheological properties of binder and blending efficiency of asphalt paving mixtures containing RAS through GPC [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(5):941-946.