

# 泡沫温拌再生沥青混合料力学性能研究

余晖<sup>1</sup>, 郑炳锋<sup>2</sup>, 黄毅<sup>2</sup>, 朱富万<sup>2</sup>

(1. 江苏省扬州市公路管理处, 江苏 扬州 225000; 2. 苏交科集团股份有限公司)

**摘要:**为了研究不同掺量废旧沥青混合料 RAP 对泡沫温拌再生沥青混合料力学性能的影响,分别对 0%、20%、30% RAP 掺量的混合料进行动态模量试验。采用 Sigmoid 函数拟合得到参考温度  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的动态模量主曲线,并基于缩减频率  $f_r$  对沥青混合料的服役温度进行划分,最后预测得到不同 RAP 掺量混合料在高温区域的动态模量。试验结果表明:提高 RAP 掺量能提高混合料的动态模量,尤其在低频高温区内。而在高频低温区,不同 RAP 掺量主曲线相差不大。当泡沫温拌再生沥青混合料的温度为  $55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,预估得到不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料动态模量。当混合料受到的影响温度越高,掺加 RAP 对提高混合料的模量越有利。

**关键词:** 泡沫温拌; 动态模量; 再生沥青混合料; 主曲线

## 1 引言

20 世纪末建成通车的公路,已经陆续进入改扩建及大中修阶段,大量的废旧沥青混合料 RAP (Reclaimed Asphalt Mixture) 因此产生。为了实现绿色公路的建设,高效地利用 RAP 已成为大势所趋。当采用热再生技术对 RAP 进行利用时,需要对 RAP 料进行二次加热,然而由于加热温度过高可能导致沥青老化程度加剧,并排放大量废气。相比于传统的热再生方式,采用温拌技术再生利用 RAP 具有一定的优势。在温拌再生混合料搅拌过程中,拌和温度低于传统的热拌再生混合料,使得沥青在搅拌过程中受到老化的程度更低,有利于弥补加热 RAP 带来的沥青过度老化的问题。泡沫温拌技术通过在高温沥青中注入  $1\%\sim 4\%$  的水,使得沥青体积快速膨胀,降低胶结料的黏度,改善混合料的和易性,从而实现拌和以及压实温度的降低。目前,关于泡沫温拌再生沥青混合料的研究主要集中在 RAP 掺量对路用性能的影响方面,而有关 RAP 掺量对泡沫温拌再生沥青混合料力学性能影响的研究相对较少。

根据美国力学—经验路面设计指南 MEPDG (Mechanistic—Empirical Pavement Design Guide),

动态模量  $E^*$  是经验—力学设计方法中最基本且重要的参数之一。动态模量不仅可以反映沥青路面在行驶荷载作用下的力学特性,还可以用于沥青路面结构设计以及沥青路面黏弹性分析。

该文在泡沫温拌 SBS 改性沥青混合料 SUP-20 中分别掺入 0%、20% 和 30% 的 RAP,对不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料进行动态模量试验,并根据时间—温度置换原理,利用非线性最小二乘法拟合得到动态模量的主曲线,分析 RAP 掺量对混合料力学性能的影响。

## 2 试验材料及试验方法

不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料 SUP-20 经过室内试验确定的设计级配如表 1 所示,其中 20% RAP 中包含 13.1% 的粗铣刨料和 6.9% 的细铣刨料,30% RAP 中包含 19.5% 的粗铣刨料和 10.5% 的细铣刨料。通过膨胀率和半衰期测试确定 SBS 改性沥青的最佳发泡条件为:沥青加热温度  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,用水量 2.5%。

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中“沥青混合料单轴压缩动态模量试验”(T0738)所述的试验方法,对不同 RAP 掺量的泡沫温

表 1 不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料级配

RAP 掺量/%	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										
	26.5	19.5	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
0	100	97.7	83.0	63.7	37.4	24.7	17.7	10.2	6.1	4.4	3.6
20	100	97.6	82.6	63.8	38.2	24.1	17.4	10.6	6.8	5.0	4.0
30	100	97.6	82.4	63.7	38.1	23.4	16.9	10.6	7.0	5.3	4.2

表 2 不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料各项体积指标

RAP 掺量/%	空隙率 VV/%	矿料间隙率 VMA/%	饱和度 VFA/%	粉胶比 DP	初始次数 压实度/%	最大次数 压实度/%
0	4.0	13.0	69.0	1.12	84.3	97.5
20	4.0	13.0	69.4	1.06	84.3	97.1
30	4.0	13.0	69.4	1.12	84.4	97.0

拌再生沥青混合料进行测试。由于沥青混合料是一种黏弹性材料,混合料的性质在很大程度上受到试验温度和加载频率的影响。因此,该文中动态模量试验采用的试验温度为 5、20、35、50 °C,加载频率为 0.1、0.5、1、5、10、25 Hz。在试验过程中,试件的应变控制为 85~115  $\mu\epsilon$ 。动态模量试验是无损测试,因此,采用同一个试件在所有的温度和频率条件下进行测试,每组 4 个平行试件。由于沥青混合料的空隙率对动态模量的试验结果有明显的影响,对于不同 RAP 掺量混合料的空隙率控制为 4.0%±0.5%。

沥青混合料试件在受到正弦分布的荷载作用下,会产生相应的应变,如图 1 所示。试件受到的应力峰值和产生的应变峰值的比值就是动态模量  $E^*$ ,见式(1):

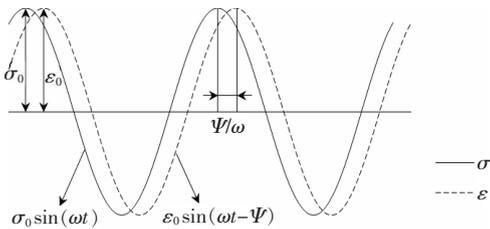


图 1 动态模量加载示意图

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (1)$$

式中: $\sigma_0$  为应力振幅(MPa); $\epsilon_0$  为应变振幅(mm/mm)。

试验中,因为环境箱控温范围的限制,无法进行 5~50 °C 测试温度以外的温度控制。为了能够比较沥青混合料在高、低温区的动态模量,通过建立主曲线的方法得以实现。主曲线的构建是利用时间-温度置换原理对沥青混合料在不同温度和加载频率下得到的动态模量进行平移,得到一条平滑的曲线。拟合动态模

量的主曲线见式(2):

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log f_r}} \quad (2)$$

式中: $E^*$  为动态模量(MPa); $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  均为回归系数,其中  $\delta$  为  $\log(E^*)$  的最小值; $\delta + \alpha$  为  $\log(E^*)$  的最大值; $\beta$  和  $\gamma$  为 S 曲线的图形参数; $f_r$  为参考温度下的缩减频率(Hz)。

不同温度和加载频率可以通过转化因子  $a(T)$  进行转化:

$$a(T) = \frac{f_r}{f} \quad (3)$$

式中: $a(T)$  为给定温度下的转化因子; $f_r$  为参考温度下的缩减频率(Hz); $f$  为给定温度下的频率(Hz)。

对式(3)两边取对数,得到:

$$\log[a(T)] = \log f_r - \log f \quad (4)$$

可以利用二次多项式形式的温度函数表示转化因子  $a(T)$ ,见式(5):

$$\log[a(T)] = aT^2 + bT + c \quad (5)$$

当给定温度  $T$  和选取的参考温度  $T_r$  相等,此时, $a(T_r) = 1, \log[a(T_r)] = 0$ 。代入式(5)中,可以得到:

$$c = -aT_r^2 - bT_r \quad (6)$$

### 3 试验结果与分析

将 RAP 掺量分别为 0%、20%、30% 的泡沫温拌再生沥青混合料的动态模量结果的平均值列于图 2 中。

由图 2 可以看出:在同一频率下,随着测试温度的升高,混合料的动态模量不断减小。这是由于沥青胶结料是一种黏弹性材料,随着温度升高,沥青逐渐软

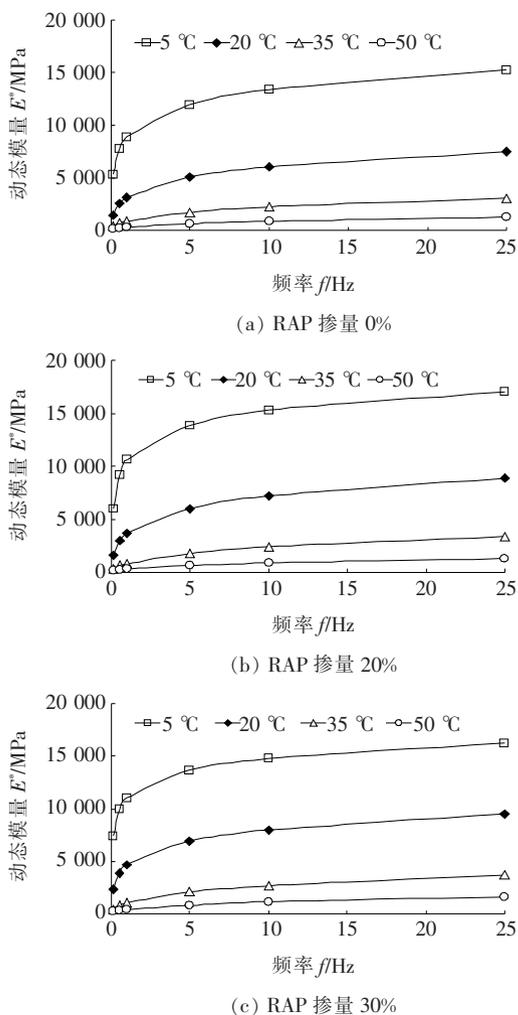


图2 不同RAP掺量的泡沫温拌再生沥青混合料动态模量

化,混合料的弹性特征减小,在荷载作用下应变逐渐增大,导致动态模量逐渐降低。在同一温度下,随着测试频率的增加,混合料的动态模量不断增加。根据时间-温度置换原理,高频荷载对应的是低温作用,低频荷载对应的是高温作用。因此,随着荷载频率的增加,可以理解为在相同的测试频率下,试验温度升高,因此,混合料的动态模量随之减小。

将掺有20%RAP和0%RAP的动态模量比值绘于图3(a)中,将掺有30%RAP和0%RAP的动态模量比值绘于图3(b)中。掺有20%RAP的动态模量和0%RAP的动态模量的比值在0.88~1.20之间变动,平均增加了7.2%。掺有30%RAP的动态模量和0%RAP的动态模量的比值在1.06~1.61内变动,平均增加了25.3%。

由图3可以看出:加入不同掺量RAP后,动态模量均有所增长。这是由于RAP中集料表面裹覆的老化沥青具有更大的劲度。在铣刨料、新集料和新沥青

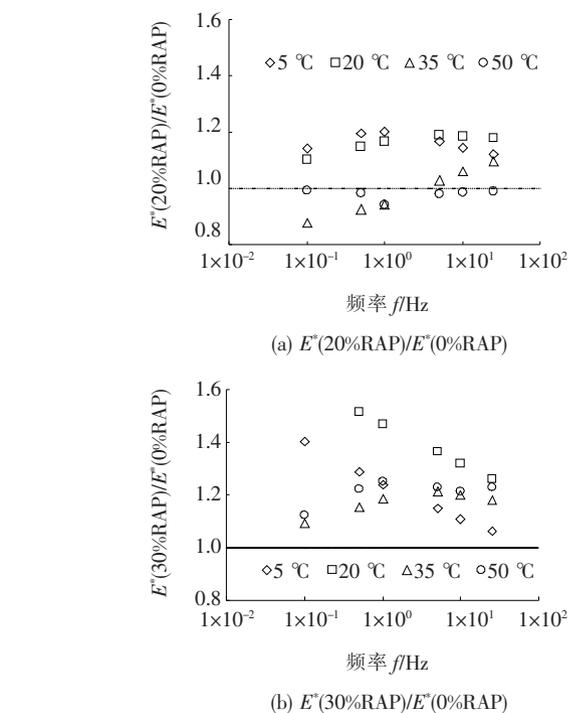


图3 不同RAP掺量的泡沫温拌再生沥青混合料动态模量比值

搅拌以及拌和后对松铺混合料进行短期老化的过程中,旧沥青混合料表面裹覆的老化沥青和新沥青相互移转,使得成型后混合料的动态模量增加。

该文选取参考温度  $T_r = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ,利用非线性最小二乘法,根据式(2)、(4)、(5)对不同温度、频率下的动态模量进行主曲线拟合,得到主曲线的回归系数  $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,以及转化因子  $a(T)$  中的二次多项式的系数  $a$ 、 $b$ ,利用式(6)计算得到系数  $c$ ,将拟合出的回归系数列于表3、4中。动态模量主曲线绘于图4中。图4中:建立动态模量主曲线,选取参考温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,利用时间-温度置换原理对沥青混合料在不同温度(5、35、50 $^\circ\text{C}$ )和加载频率下得到的动态模量进行平移,得到一条平滑的曲线。图4中的黑色实心的4类图例(菱形、正方形、三角形、圆形)分别代表5、20(保持不动)、35、50 $^\circ\text{C}$ 条件下的动态模量平移后的数值;黑色空心的4类图例(菱形、正方形、三角形、圆形)分别代表5、20、35、50 $^\circ\text{C}$ 条件下的平移之前的动态模量。

分别采用相关系数  $R^2$  和预测值与实测值标准偏差的比值  $Se/S_y$  来表征 Sigmoid 函数对主曲线的拟合程度。 $R^2$  越接近1且  $Se/S_y$  越接近0表明拟合越好。由表3可以看出:不同RAP掺量混合料拟合出的动态模量主曲线的相关系数  $R^2$  均大于0.995,且  $Se/S_y$  均小于0.06。表明利用 Sigmoid 函数对不同RAP掺量的泡沫温拌再生沥青混合料动态模量主曲线的拟

合是适用的,且精确度很高。

构建主曲线的目的就是利用主曲线函数对混合料在低温区、中温区、高温区的动态模量的大小进行比较,进而对混合料的高、低温性能进行预估。A. S. M. A. Rahman 等选取参考温度  $T_r = 70^\circ\text{F}$ (即  $21.1^\circ\text{C}$ ) 构建主曲线,并通过动态模量主曲线的缩减频率  $f_r$  来划分沥青混合料的服役温度。但由于不同混合料的动态模量试验结果不同,拟合出来的主曲线和转化因子不同,进而根据混合料的服役温度所转化得到的缩减频率就不同。该文选取  $5^\circ\text{C}$  以下为混合料低温区,  $5\sim 50^\circ\text{C}$  为混合料的中温区,  $50^\circ\text{C}$  以上为混合料的高温区。此外,选取指定频率  $f = 10\text{ Hz}$  来表征高速行驶的车辆荷载对混合料的作用频率。利用拟合得到的参考温度  $T_r = 20^\circ\text{C}$  下的主曲线和转化因子  $a(T)$ ,将混合料的服役温度用缩减频率  $f_r$  来表示,将计算结果列于表 5。

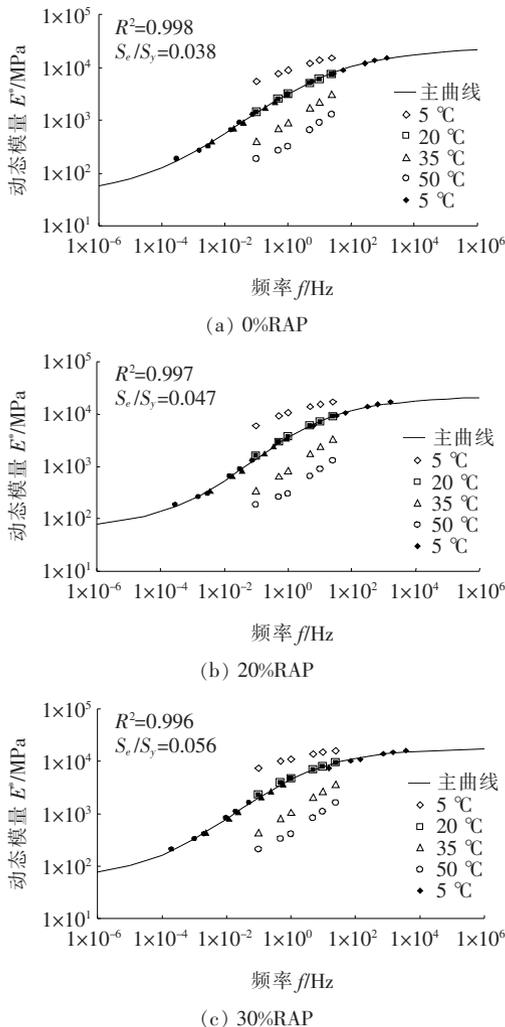


图 4 泡沫温拌再生沥青混合料主曲线构建

表 3 动态模量主曲线回归系数及相关系数

RAP 掺量/%	$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$R^2$	$Se/S_y$
0	1.557 5	2.815 3	-0.793 9	-0.552 8	0.998	0.038
20	1.817 0	2.504 8	-0.814 5	-0.689 7	0.997	0.047
30	1.738 3	2.508 9	-1.158 3	-0.654 0	0.996	0.056

表 4 转化因子  $a(T)$  二次多项式回归系数

RAP 掺量/%	$a$	$b$	$c$
0	0.000 7	-0.134 4	2.399 1
20	0.000 8	-0.140 3	2.484 6
30	0.001 2	-0.175 3	3.017 0

表 5 不同 RAP 掺量的混合料服役温度对应的缩减频率(指定频率  $f = 10\text{ Hz}$ )

RAP 掺量/%	与下列服役温度( $^\circ\text{C}$ )相对应的缩减频率 $f_r/\text{Hz}$			
	-5	5	50	70
0	$1.23 \times 10^4$	$5.55 \times 10^2$	$2.69 \times 10^{-2}$	$2.64 \times 10^{-3}$
20	$1.61 \times 10^4$	$6.35 \times 10^2$	$2.95 \times 10^{-2}$	$3.83 \times 10^{-3}$
30	$8.38 \times 10^4$	$1.48 \times 10^3$	$1.79 \times 10^{-2}$	$4.23 \times 10^{-3}$

由表 5 可知:当混合料的服役温度为  $-5\sim 5^\circ\text{C}$  时,主曲线上的缩减频率  $f_r$  为  $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4\text{ Hz}$ 。当混合料的服役温度为  $50\sim 70^\circ\text{C}$  的高温范围内,所对应的主曲线上的缩减频率为  $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-2}\text{ Hz}$ 。因此,在图 5 中绘出不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料主曲线,并根据缩减频率  $f_r$  将主曲线划分为低频高温区、中频中温区以及高频低温区。

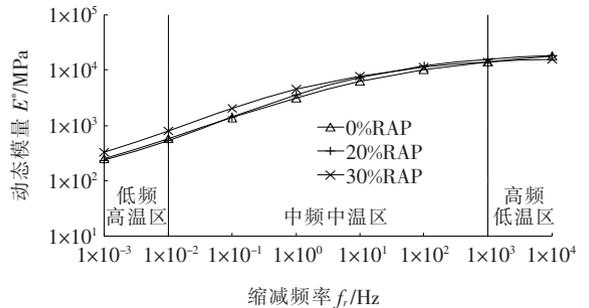


图 5 不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料服役温度区间

由图 5 可以看出:在高频低温区域内,RAP 掺量为  $0\%$ 、 $20\%$  和  $30\%$  主曲线相差不大。随着缩减频率  $f_r$  的逐渐减少,即随着温度不断的增加, $30\%$  RAP 掺量的动态模量明显高于  $20\%$  RAP 和  $0\%$  RAP。在低频高温区,这一现象尤其明显。由此可见:提高 RAP 掺量能够有效提高泡沫温拌再生沥青混合料在低频高

温区的动态模量,这有助于混合料在高温荷载作用下提高混合料抵抗车辙变形的能力。

为了进一步量化分析不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料在高温区的动态模量,分别计算指定温度  $T(55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C})$  下对应的缩减频率  $f_r$  和动态模量,将计算结果列于表 6 中。

表 6 基于主曲线方程的混合料在指定温度  $T(55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C})$  和指定频率  $f=10\text{ Hz}$  下的动态模量

RAP 掺量/%	指定温度 $T/^{\circ}\text{C}$	$\log[a(T)]$	缩减频率 $f_r/\text{Hz}$	动态模量/MPa
0	55	-2.875	$1.332\times 10^{-2}$	624
	60	-3.145	$7.163\times 10^{-3}$	493
	65	-3.379	$4.174\times 10^{-3}$	404
	70	-3.579	$2.637\times 10^{-3}$	343
20	55	-2.812	$1.542\times 10^{-2}$	633
	60	-3.053	$8.843\times 10^{-3}$	505
	65	-3.255	$5.560\times 10^{-3}$	422
	70	-3.416	$3.834\times 10^{-3}$	368
30	55	-2.995	$1.013\times 10^{-2}$	797
	60	-3.181	$6.592\times 10^{-3}$	669
	65	-3.308	$4.926\times 10^{-3}$	596
	70	-3.374	$4.227\times 10^{-3}$	561

当  $T=55\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,30%RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料动态模量预测值为 797 MPa,比 0%RAP 和 20%RAP 分别提高了 27.7%和 25.9%。当  $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,掺 30%RAP 的泡沫温拌再生沥青混合料动态模量为 561 MPa,比 0%RAP 和 20%RAP 分别提高了 63.6%和 52.3%。因此,在高温范围内,当混合料受到的温度越高,掺加 RAP 对提高混合料模量越有利。

## 4 结论

对不同掺量 RAP 的泡沫温拌再生沥青混合料进行动态模量试验,通过 Sigmoid 函数对混合料的主曲线进行拟合,得到以下结论:

(1) 随着温度升高,混合料的动态模量不断减小,随着测试频率的增加,混合料的动态模量不断增加,这与 RAP 掺量无关。在不同温度、不同频率下,20%RAP 和 30%RAP 的动态模量平均值分别比 0%RAP 增长了 7.2%和 25.3%。

(2) 采用 Sigmoid 函数能够精确拟合不同 RAP 掺量的泡沫温拌再生沥青混合料的主曲线,其相关系数  $R^2$  均大于 0.995,且  $Se/Sy$  均小于 0.06。

(3) 基于缩减频率  $f_r$  对沥青混合料的服役温度进行划分,当选定参考温度  $T_r=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加载频率  $f=10\text{ Hz}$  时,混合料低温区( $-5\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )对应的缩减频率  $f_r$  为  $1\times 10^3\sim 1\times 10^4\text{ Hz}$ ,在此区域内,不同 RAP 掺量的混合料在低温区的动态模量相差不大。高温区( $50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )对应的缩减频率  $f_r$  为  $1\times 10^{-3}\sim 1\times 10^{-2}\text{ Hz}$ ,30%RAP 掺量能够显著提高泡沫温拌再生沥青混合料在低频高温区的动态模量。

(4) 通过主曲线预测不同 RAP 掺量混合料在高温区的动态模量,结果表明:当  $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,掺入 30%RAP 的泡沫温拌再生沥青混合料动态模量比 0%RAP 和 20%RAP 分别提高了 63.6%和 52.3%。当混合料受到的温度越高,掺加 RAP 对提高混合料模量越有利。

## 参考文献:

- [1] 季节,索智,许鹰,等. SMA 温拌再生沥青混合料性能试验[J]. 中国公路学报,2013(5).
- [2] 赵宾,申爱琴,郭寅川. 基于发泡机种类的泡沫沥青及其混合料性能研究[J]. 中外公路,2018(2).
- [3] 黄康旭,梁星敏,徐波. RAP 掺量对泡沫温拌再生沥青混合料路用性能的影响[J]. 材料科学与工程学报,2016(5).
- [4] 臧芝树,赵宾,申爱琴. 半温拌泡沫沥青混合料水稳定性及压实特性研究[J]. 中外公路,2019(1).
- [5] 张智. 高 RAP 掺量 SBS 改性沥青泡沫温拌再生混合料配合比设计及耐久性能评价[J]. 公路工程,2016(6).
- [6] Georgouli, Konstantina, Plati, Christina, Loizos, Andreas. Assessment of Dynamic Modulus Prediction Models in Fatigue Cracking Estimation[J]. Materials & Structures, 2016,49(12):5 007-5 019.
- [7] Thomas Bennert. Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt [R],2009.
- [8] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [9] 张奎,刘玉,樊伟民. 沥青混合料动态模量影响因素试验研究[J]. 现代交通技术,2015(1).
- [10] Rahman A S M A, Rafiqul A, Tarefder. Dynamic Modulus and Phase Angle of Warm-Mix Versus Hot-Mix Asphalt Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016,126:434-441.