

文章编号:1007-9629(2024)08-0711-09

## 再生沥青混合料拉压疲劳特性及黏弹表征

李浩<sup>1,2,\*</sup>, 王选仓<sup>2</sup>, 曾国东<sup>1</sup>, 方杨<sup>1</sup>, 龙国鑫<sup>1</sup>

(1. 佛山市交通科技有限公司, 广东 佛山 528000; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 基于沥青混合料动态模量主曲线的数学特征分析, 构建了一套针对再生沥青混合料黏弹性的评价体系, 并提出了表征其黏弹行为的物性参数. 通过对比拉伸和压缩方向上的黏弹差异性, 研究了再生沥青混合料在这 2 个方向上的疲劳特性, 并建立了其疲劳性能与黏弹物性参数的关系. 结果表明: 相比新沥青混合料, 再生沥青混合料在压缩模式下“弹而不够黏弹, 但够有效黏弹”, 在拉伸模式下“弹而不黏”. 在相同加载方式下 (无论是压缩还是拉伸), 再生沥青混合料的黏弹物性参数中仅有效弹性比  $R_{eve}$  与疲劳寿命  $N_f$  的线性相关程度高; 而当加载方式不相同, 再生沥青混合料的  $R_{eve}$  与  $N_f$  无法建立线性关系.

**关键词:** 道路工程; 再生沥青混合料; 黏弹评价体系; 黏弹物性参数; 拉压疲劳; 相关性

中图分类号: U416

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.006

## Tensile and Compressive Fatigue Characteristics and Viscoelastic Characterization of Reclaimed Asphalt Mixture

LI Hao<sup>1,2,\*</sup>, WANG Xuancang<sup>2</sup>, ZENG Guodong<sup>1</sup>, FANG Yang<sup>1</sup>, LONG Guoxin<sup>1</sup>

(1. Foshan Transportation Science and Technology Co., Ltd., Foshan 528000, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Based on the mathematical characteristic analysis of the dynamic modulus principal curve of asphalt mixture, the viscoelastic evaluation system of reclaimed asphalt mixture was established, and the physical parameters of viscoelastic behavior were also proposed. The viscoelastic difference between tensile and compressive directions was compared, the fatigue characteristics of reclaimed asphalt mixture in tensile and compressive direction were studied, and the relationship between fatigue properties and viscoelastic physical properties was established. The results show that, compared with the new asphalt mixture, the reclaimed asphalt mixture is elastic rather than viscoelastic, but it is effective viscoelastic enough under compression mode, and elastic rather than viscoelastic under tensile mode. Under the same loading mode (whether compressive or tensile), only the viscoelastic physical property parameter  $R_{eve}$  has a high linear correlation with fatigue life  $N_f$ . When the loading mode is different, the linear relationship between  $R_{eve}$  and  $N_f$  can not be established.

**Key words:** road engineering; reclaimed asphalt mixture; viscoelastic evaluation system; viscoelastic physical property parameter; tensile and compressive fatigue; correlation

热拌再生沥青混合料的大量应用, 不仅符合“双碳”要求, 还可缓解石材紧缺问题, 但对其疲劳性能评价方法的选择一直备受争议<sup>[1]</sup>. 研究者通过三点弯曲、四点弯曲及间接拉伸疲劳等试验方法测试其疲

劳性能, 发现不同掺量再生沥青混合料的疲劳试验结果往往与常识不符<sup>[2-3]</sup>. 为此, 曹毅等<sup>[4]</sup>针对四点弯曲梁疲劳试验结果不一致的问题, 提出了有效的修正方法. 董玲云等<sup>[5]</sup>提出间接拉伸疲劳寿命比和疲劳

收稿日期: 2023-09-27; 修订日期: 2024-01-25

基金项目: 佛山市自筹经费类科技计划项目 (2220001005727); 高校教师特色创新研究项目 (2021JNHB02)

第一作者 (通讯作者): 李浩 (1988—), 男, 湖北荆州人, 佛山市交通科技有限公司高级工程师, 工学博士. E-mail: hao\_li\_20007@163.com

寿命损失率指标,对再生沥青混合料疲劳特性的变化规律进行了系统评价.孙雅珍等<sup>[6]</sup>基于能量原理,建立了再生沥青混合料耗散能、耗散能相对变化率与三点弯曲疲劳寿命的关系式,提出了基于耗散能相对变化率平稳值的疲劳方程. Schapery等<sup>[7]</sup>通过构建再生沥青混合料动态模量与松弛模量、蠕变模量之间的关系式,成功揭示了动态模量在探索材料黏弹性能方面的潜力.叶青<sup>[8]</sup>采用 Burgers 模型表征沥青混合料的黏弹行为,利用沥青混合料动态模量、相位角来标定 Burgers 模型,以模型参数表征沥青混合料的黏弹性,并通过灰熵分析确定了与混合料疲劳性能直接相关的黏弹参数.

为了准确评估再生沥青混合料的疲劳性能,需要超越传统的三点弯曲、四点弯曲及间接拉伸疲劳试验方法的弹性体假设.由于沥青混合料是黏弹性材料,虽然沥青混合料的动态模量与其黏弹性之间存在密切关系,但是这些关系的建立通常依赖于间接方法.为更明确地理解和区分再生沥青混合料的疲劳性能,本研究基于沥青混合料的拉伸和压缩动态模量主曲线,构建了一个针对再生沥青混合料黏弹性的评价体系.在该体系中,提出了能够表征再生

沥青混合料黏弹性行为的物性参数,并通过对比分析拉伸和压缩方向黏弹性行为的差异,研究了再生沥青混合料在这2个方向上的疲劳性能,并建立了其与物性参数之间的关系,以期为再生沥青混合料的拉压疲劳特性及表征提供科学依据和参考.

## 1 试验

### 1.1 原材料

基质沥青采用国内常用的70#道路石油沥青,其技术指标如表1所示.集料为江门市新会区石灰岩,经过热筛分后,粒径为[23,32)、[17,23)、[11,17)、[6,11)、[3.5,6)、[0,3.5) mm. 沥青混合料回收料(RAP)经破碎筛分后,得到粒径为[0,10)、[10,15)、[15,25) mm的成品料,其沥青含量(质量分数,文中涉及的含量、掺量等均为质量分数)分别为5.30%、2.53%、3.30%.RAP经抽提后得到的旧沥青的技术指标如表2所示.本研究用再生沥青混合料类型为AC-25,RAP掺量分别为0%、30%、45%和60%,对应编号R-0、R-30、R-45和R-60.需要说明的是,R-60中掺入了FBK型再生剂,其用量为RAP中沥青质量的5%.4组再生沥青混合料的技术参数如表3所示.

表1 基质沥青的技术指标

Table 1 Technical indexes of matrix asphalt

	Index	Test result	Technical requirement	Test standard
	Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	66	60-80	T 0604
	Softening point/°C	47.5	≥46	T 0606
	Ductility(10 °C)/cm	32.0	≥15	T 0605
After TFOT	Mass change/%	0.05	≤±0.8	T 0609
	Ductility(10 °C)/cm	7.5	≥6	T 0605
	15 °C ductility(15 °C)/cm	28		T 0605
	Needle penetration ratio(25 °C)/%	69	≥61	T 0604

表2 旧沥青的技术指标

Table 2 Technical index of old asphalt

	Index	Test result	Test standard
	Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	16.2	T 0604
	Softening point/°C	70.6	T 0606
	Brinell viscosity(135 °C)/(Pa·s)	2.95	T 0620

表3 AC-25型再生沥青混合料的技术参数

Table 3 Technical parameters of AC-25 reclaimed asphalt mixture

No.	Oil-stone ratio (by mass)/%	Relative density		VV/%	VMA/%	VFA/%	Marshall stability/kN	Flow value/mm
		Theoretical	Measured					
R-0	3.8	2.580	2.560	4.1	12.7	66.1	10.12	2.81
R-30	3.8	2.568	2.538	3.6	12.6	69.1	12.33	2.30
R-45	3.8	2.555	2.533	3.6	12.3	67.7	21.03	3.04
R-60	3.8	2.548	2.528	4.5	12.7	64.6	16.78	2.99

Note: VV—Void volume; VMA—Void in mineral aggregate; VFA—Void filled with asphalt.

1.2 试验方案

按照 AASHTO T378-17 (TP79) *Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester* (AMPT)和 EN 12697-26 *Bituminous Mixtures-Test Methods for Hot Mix Asphalt-Part 26:Stiffness* 分别进行动态压缩模量和动态拉伸模量试验。

为建立再生沥青混合料疲劳性能与黏弹物性参数的关系,测试了其直接压缩和直接拉伸疲劳性能。另外,由于美国公路战略研究计划(SHRP)指出四点弯曲和间接拉伸疲劳试验与沥青混合料路面受力较为相似且应用较为广泛,故本试验还补充了四点弯曲

疲劳和间接拉伸疲劳试验。4种试验方法如表4所示。

需要说明的是,现行规范暂无再生沥青混合料的单轴压缩疲劳试验方法,因此参考 EN12697-25 *Bituminous Mixtures-Test Methods-Part 25: Cyclic Compression test* 和 AASHTO TP107 *Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*,自定义了直接压缩疲劳试验方法。为了与直接拉伸疲劳试验方法进行对比,将直接压缩疲劳试验中的加载波形、频率和试验温度与直接拉伸疲劳试验保持一致,且均采用应变控制模式。当试件在疲劳过程中连续5个周期的竖向应变率均大于2.0时,即终止试验。

表4 试验方法一览表  
Table 4 List of test methods

Test method	Temperature/°C	Strain level/( $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Waveform	Test standard
Direct compression	20	100	Haversine	User-defined
Direct tension	20	100/125/150/175	Haversine	AASHTO TP107
Indirect tension	15	Variable	Intermittent haversine	EN 12697-24
Four-point bending	15	100/150/200	Haversine	AASHTO T321-07

2 黏弹性评价体系

本研究基于沥青混合料动态模量主曲线的数学特征区间和特征点描述,构建了再生沥青混合料的黏弹性评价体系,提出了表征其黏弹行为的物性参数。

2.1 动态模量主曲线

按照 AASHTO T378-17(TP79)中的动态模量  $E^*$ 主曲线构建方法,得到4组再生沥青混合料的压缩和拉伸动态模量主曲线,如图1所示。其中, $f$ 为缩减

频率。各参数拟合结果列于表5。

2.2 动态模量主曲线数学分析

研究表明,再生沥青混合料动态模量主曲线蕴含丰富的黏弹信息<sup>[8]</sup>。对其深入分析,可挖掘有效的黏弹信息。根据主曲线数学特征<sup>[9-12]</sup>,将其划分为弹性、黏弹性和黏性3个区间。

通过提取动态模量主曲线的数学特征点,提出了由各关键点信息构成的时间类、区间类及比率类3大类指标,构建了包含12个黏弹物性参数的再生沥青混合料黏弹性评价体系。

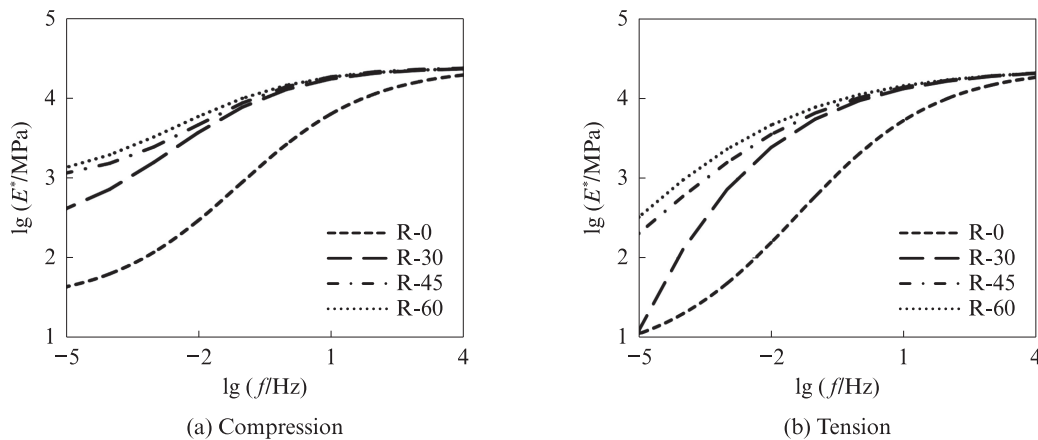


图1 再生沥青混合料的压缩和拉伸动态模量主曲线  
Fig. 1 Compressive and tensile dynamic modulus master curves of reclaimed asphalt mixtures

表5 再生沥青混合料动态模量主曲线各参数拟合结果

Table 5 Fitting results of each parameter of dynamic modulus master curves of reclaimed asphalt mixtures

Load method	No.	$\delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Compression	R-0	0.589 1	2.948 4	-1.108 0	0.675 2
	R-30	1.441 8	2.098 0	-1.881 0	0.718 9
	R-45	2.090 2	1.450 9	-1.600 5	0.799 3
	R-60	2.071 6	1.165 1	-1.729 9	0.703 7
Tension	R-0	-0.111 5	3.649 0	-1.272 6	0.639 4
	R-30	-8.611 9	12.149 4	-3.366 1	0.473 9
	R-45	-0.397 1	3.934 6	-2.267 6	0.474 1
	R-60	-1.724 1	5.261 6	-2.706 6	0.426 3

Note:  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  are all regression coefficients;  $\delta$  represents the minimum value of dynamic modulus;  $\delta + \alpha$  represents the maximum value of dynamic modulus.

时间类指标包括极限弹性时间  $t_0$ 、应力松弛起始时间  $t_{s1}$ 、最大流动时间  $t_c$  和极限劲度时间  $t_e$  这4个指标。其中  $t_0$  取固定值  $10^{-5}$  s;  $t_{s1}$  为再生沥青混合料弹性变形与延迟弹性变形的分界点;  $t_c$  为再生沥青混合料劲度变化率由快转慢的拐点;  $t_e$  为再生沥青混合料由弹性区向黏弹性区过渡的转折点, 在点  $(\lg 10^{-5}, \lg E^*)$  和点  $(\lg t_c, \lg E^*)$  处分别作主曲线的切线, 两切线交点的横坐标即为  $t_e$ 。

区间类指标包括弹性区间  $W_e$ 、黏弹性区间  $W_{ve}$ 、黏性区间  $W_{vd}$ 、黏弹前段  $W_{veq}$  及黏弹后段  $W_{veh}$  这5个指标。

比率类指标包括弹性占比  $R_e$ 、有效弹性比  $R_{eve}$  及有效黏弹比  $R_{vee}$  这3个指标。其计算式如下:

$$R_e = W_e / (W_e + W_{ve}) = (t_e - t_0) / (t_c - t_0) \quad (1)$$

$$R_{eve} = (W_e + W_{veq}) / (W_e + W_{ve}) = (t_{s1} - t_0) / (t_c - t_0) \quad (2)$$

$$R_{vee} = W_{veq} / W_{ve} = (t_{s1} - t_0) / (t_c - t_e) \quad (3)$$

再生沥青混合料动态模量主曲线区间划分如图2所示。其中,  $t_r$  为缩减时间,  $t_{s2}$  为稳定黏性时间,  $t_d$  为极限黏性时间。

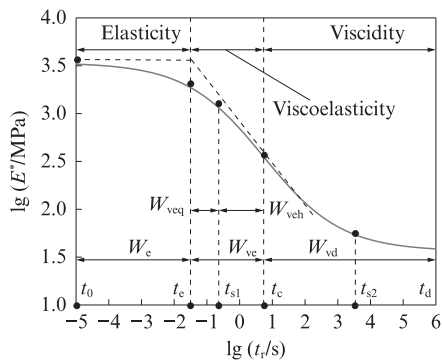


图2 再生沥青混合料动态模量主曲线区间划分  
Fig. 2 Section division of main curve of dynamic modulus of recycled asphalt mixture

对再生沥青混合料动态模量主曲线函数  $\lg E^* = f(\lg t)$  求导发现, 压缩动态模量主曲线三阶导函数存在

在2个零点, 而拉伸动态模量主曲线三阶导函数存在2个零点或1个零点两种情况。由图2可知: (1) 当动态模量主曲线三阶导函数具有2个零点且  $f'(t) < 0$  时, 主曲线单调下降; 当  $f''(t_c) = 0$  时,  $t_c$  是主曲线的凹凸拐点; 当  $f'''(t_{s1}) = 0$  和  $f'''(t_{s2}) = 0$  时,  $t_{s1}$  和  $t_{s2}$  是导函数  $f'(t)$  的拐点。 (2) 当动态模量主曲线三阶导函数仅存在1个零点且  $f'(t) < 0$ , 主曲线单调下降;  $f''(t_c) = 0$  时,  $t_c$  是主曲线的凹凸拐点。当  $f'''(t_{s1}) = 0$  时,  $t_{s1}$  是导函数  $f'(t)$  的拐点。

### 2.3 评价体系适用性分析及应用

将4组再生沥青混合料动态模量主曲线拟合时间固定为  $(10^{-5}, 10^6)$ 。在上述提出的12个指标中, 因  $t_0$  取为固定值,  $t_e$  与  $W_e$  同义,  $t_c$  与  $W_{vd}$  同义, 故将12个指标简化为9个指标。

由各指标定义可知, 时间类指标是动态模量主曲线的内核, 区间类指标是时间类指标的衍生指标, 比率类指标是区间类指标的衍生指标。时间类指标反映了再生沥青混合料的固有黏弹属性, 区间类指标和比率类指标是对固有属性的补充和延伸。通过比较不同材料的各类指标, 可区分材料的黏弹性能。由压缩和拉伸动态模量主曲线提取的9个指标取值如表6、7所示。对比表6、7可知:

(1) 压缩模式下, 4组再生沥青混合料的动态模量主曲线三阶导函数均有2个零点  $t_{s1}$  和  $t_{s2}$ , 均具有弹性、黏弹性和黏性响应。拉伸模式下, 新沥青混合料 R-0 的动态模量主曲线三阶导函数有2个零点  $t_{s1}$  和  $t_{s2}$ ; 而再生沥青混合料 R-30、R-45 和 R-60 的动态模量主曲线三阶导函数只有1个零点  $t_{s1}$ , 无  $t_{s2}$ ; R-0 具备弹性、黏弹性和黏性响应, 而 R-30、R-45 和 R-60 仅具备弹性和黏弹性响应, 无黏性响应。

(2) 压缩模式下, 相比新沥青混合料 R-0, 再生沥青混合料 R-30、R-45 和 R-60 的时间类指标 ( $t_e$ 、 $t_{s1}$ 、 $t_c$ )



整体右移,区间类指标  $W_{ve}$  减小,比率类指标  $R_e$  增大,表明其弹性区间变大,黏弹区间变小;随着RAP掺量的增加,再生沥青混合料的  $R_{eve}$  和  $R_{vee}$  增加,  $W_{veh}$  和  $W_{veq}$  先减后增,表明黏弹区间中黏弹前段和后段比例发生变化.需要说明的是,压缩模式下,再生沥青混合料的  $W_{ve}$  整体变小,但  $R_{eve}$  和  $R_{vee}$  变大,看似矛盾,实则是  $W_{veq}$  占比发生变化所致.该变化与再生沥青混合料材料组成体系的受力特征有关,混合料在压缩模式下依赖沥青和集料共同抵抗包括黏结力、矿料骨架嵌挤力等外部荷载,RAP中沥青老化变硬,沥青胶浆黏结力增加与集料嵌挤力的耦合作用,造成  $W_{ve}$  变小,  $R_{eve}$  和  $R_{vee}$  增大.综上所述,压缩模式下,相比新沥青混合料,再生沥青混合料“弹而不够黏弹,但够有效黏弹”.

(3)拉伸模式下,再生沥青混合料R-30、R-45和R-60均无黏性响应,相比新沥青混合料R-0,再生沥青混合料“弹而不黏”.再生沥青混合料在拉伸模式下主要依赖沥青胶浆与集料的黏结力抵抗外部荷载.当接近最大流动时间  $t_c$  时,在压缩模式下,再生沥青混合料强度储备充裕,可与外力抗衡;而在拉伸模式下,沥青胶浆与集料黏结力不足以抵抗外部荷载.综

上所述,再生沥青混合料由于抗力方式不同,造成在压缩和拉伸不同受力模式下的黏弹响应有较大区别.

(4)压缩模式下,R-60的时间类、区间类和比率类指标整体上介于R-30和R-45之间;拉伸模式下,R-60的时间类和比率类指标整体上介于R-30和R-45之间.这表明再生沥青混合料中加入再生剂后,其弹性和黏弹性均有所恢复.

(5)基于拉伸模式下再生沥青混合料黏弹响应特点,对R-30、R-45和R-60进行对比分析.随着RAP掺量的增加,3大类指标中除  $R_{vee}$  一直减小外,其他8个指标均表现出先减后增趋势.拉伸模式下,8个指标先减后增趋势所表达的物理意义与实际不符——当RAP掺量由30%增至45%时,再生沥青混合料弹性应该增强,黏弹性应该变差.压缩模式下,  $W_{veh}$  和  $W_{veq}$  随RAP掺量增加也未表现出单向变化的规律,表明时间类和区间类指标是中间过渡指标,只能用于再生沥青混合料黏弹性能的定性对比,当对其定量分析时还应综合考虑其路用性能.此外,随着RAP掺量的增加,  $R_{vee}$  减小,该指标在压缩模式下虽具有较好的适应性,但在拉伸模式下适应性不强.

表6 压缩动态模量主曲线各指标数值

Table 6 Index values of compressive dynamic modulus master curve

No.	Time-based indicator			Interval-type indicator			Ratio-based indicator		
	$t_c$	$t_{s1}$	$t_c$	$W_{veq}$	$W_{veh}$	$W_{ve}$	$R_e$	$R_{eve}$	$R_{vee}$
R-0	-1.291 5	-0.309 5	1.641 0	0.982	1.951	2.933	0.558	0.706	0.335
R-30	-0.179 2	0.784 6	2.616 5	0.964	1.832	2.796	0.633	0.759	0.345
R-45	-0.611 4	0.454 7	2.002 4	1.066	1.548	2.614	0.627	0.779	0.408
R-60	-0.383 7	0.696 8	2.458 3	1.081	1.762	2.842	0.619	0.764	0.380

表7 拉伸动态模量主曲线各指标数值

Table 7 Index values of tensile dynamic modulus master curve

No.	Time-based indicator			Interval-type indicator			Ratio-based indicator		
	$t_c$	$t_{s1}$	$t_c$	$W_{veq}$	$W_{veh}$	$W_{ve}$	$R_e$	$R_{eve}$	$R_{vee}$
R-0	-1.167 7	-0.069 4	1.990 0	1.098	2.060	3.158	0.548	0.705	0.348
R-30	2.807 3	4.324 0	7.103 0	1.517	2.779	4.296	0.645	0.770	0.353
R-45	0.598 9	2.005 2	4.783 0	1.406	2.778	4.184	0.572	0.716	0.336
R-60	1.710 3	3.259 8	6.349 0	1.550	3.089	4.639	0.591	0.728	0.334

### 3 疲劳寿命黏弹表征

#### 3.1 疲劳寿命结果

##### 3.1.1 直接压缩疲劳

为了能直接对比再生沥青混合料在拉伸与压缩方向上的疲劳寿命,开展直接压缩方向疲劳试验.因直接压缩疲劳试验时间过长,仅进行了应变  $\epsilon = 100 \mu\text{m}/\text{m}$  的测试,每组混合料测试3个试件,试验结

果如表8所示.由表8可知,当  $\epsilon = 100 \mu\text{m}/\text{m}$  时,4组沥青混合料的直接压缩疲劳寿命  $N_f$  由大到小排序为  $R-45 > R-60 > R-30 > R-0$ .

##### 3.1.2 直接拉伸疲劳

在直接拉伸疲劳试验中,由于再生沥青混合料R-45和R-60在  $\epsilon = 175 \mu\text{m}/\text{m}$  下只进行了少次加载周期便被拉断,考虑数据离散性和准确性的问题,补充了  $\epsilon = 75 \mu\text{m}/\text{m}$  下这2组再生沥青混合料的直接

表8 直接压缩疲劳试验结果  
Table 8 Direct compressive fatigue test results

No.	Number	$N_i$ /times	$\bar{N}_i$ /times	Standard deviation/times	Coefficient of variation/%
R-0	1	682 120	673 310	83 016	12
	2	586 240			
	3	751 570			
R-30	1	751 230	896 940	151 803	17
	2	885 420			
	3	1 054 180			
R-45	1	1 386 350	1 165 877	194 467	17
	2	1 092 530			
	3	1 018 750			
R-60	1	925 320	961 720	178 241	19
	2	804 500			
	3	1 155 360			

拉伸疲劳试验,在拟合疲劳方程时,忽略 $\epsilon = 175 \mu\text{m}/\text{m}$ 下R-45和R-60的试验结果.再生沥青混合料的直接拉伸疲劳寿命与应变关系如图3所示.由图3可见:各应变水平下,4组沥青混合料的直接拉伸疲劳寿命由大到小排序为 $R-0 > R-30 > R-60 > R-45$ ;再生沥青混合料的 $\epsilon$ 上下限不超过 $100 \mu\text{m}/\text{m}$ ,但其疲劳寿命跨越了2个数量级,表明再生沥青混合料的直接拉伸疲劳寿命对应变较为敏感.

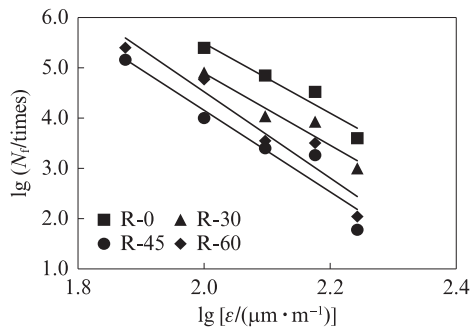


图3 再生沥青混凝土直接拉伸疲劳寿命与应变的关系  
Fig. 3 Relationship of direct tensile fatigue life vs. strain of reclaimed asphalt mixtures

### 3.1.3 间接拉伸疲劳

再生沥青混合料的间接拉伸疲劳寿命与应变关系如图4所示.由图4可见:(1)R-30、R-45和R-60的疲劳寿命曲线在R-0之上,表明再生沥青混合料的疲劳性能优于新沥青混合料.由于疲劳寿命曲线斜率的绝对值随着RAP掺量的增加而增大,可推断当 $\epsilon$ 较大时,新沥青混合料R-0的疲劳寿命将超越再生沥青混合料R-30、R-45和R-60.(2)当 $\epsilon \leq 203 \mu\text{m}/\text{m}$ 时,再生沥青混合料疲劳寿命由大到小排序为 $R-60 > R-30 > R-45$ ;当 $\epsilon > 203 \mu\text{m}/\text{m}$ 时,再生沥青混合料疲劳寿命由大到小排序为 $R-30 > R-60 > R-45$ .这表明

随着RAP掺量的增加,再生沥青混合料疲劳寿命有所减小,但添加再生剂后,R-60的疲劳寿命得到一定恢复,超越了R-45,甚至恢复到R-30水平.

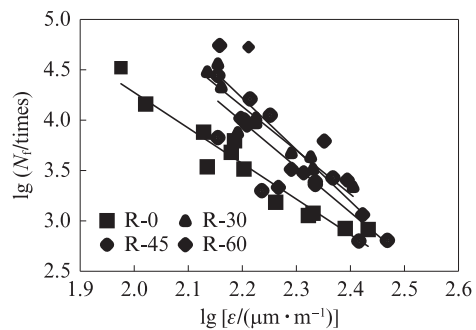


图4 再生沥青混凝土间接拉伸疲劳寿命与应变水平的关系  
Fig. 4 Relationship of indirect tensile fatigue life vs. strain level of reclaimed asphalt mixtures

### 3.1.4 四点弯曲疲劳

再生沥青混合料四点弯曲疲劳寿命与应变关系如图5所示.由图5可见,各应变下,沥青混合料四点弯曲疲劳寿命由大到小排序为 $R-0 > R-45 > R-30 > R-60$ .

### 3.1.5 拉压疲劳特性评价

$100 \mu\text{m}/\text{m}$ 应变水平下再生沥青混合料直接压缩和直接拉伸疲劳寿命对比如表9所示.由表9可见:(1)4组沥青混合料的压拉疲劳寿命比由大到小排序为 $R-45 > R-60 > R-30 > R-0$ ,且其直接压缩疲劳寿命显著大于直接拉伸疲劳寿命.(2)新沥青混合料R-0的直接压缩疲劳寿命与直接拉伸疲劳寿命在1个数量级;而3组再生沥青混合料的直接压缩疲劳寿命比直接拉伸疲劳寿命大1~2个数量级.

3种拉伸(直接拉伸、间接拉伸和四点弯曲)疲劳试验得到的再生沥青混合料疲劳寿命排序不一致,

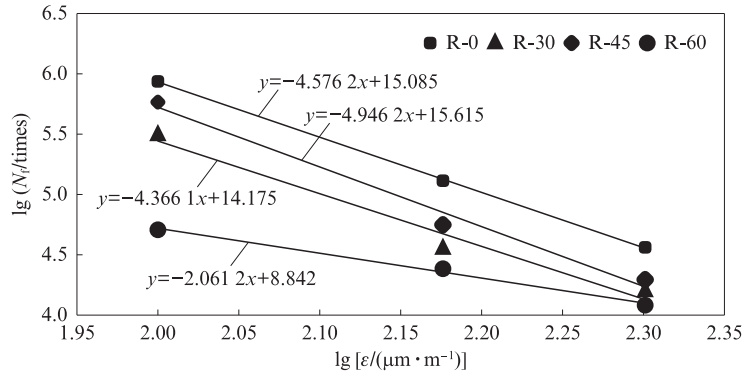


图5 再生沥青混合料四点弯曲疲劳寿命与应变关系

Fig. 5 Relationship of four-point bending fatigue life vs. strain of reclaimed asphalt mixtures

表9 再生沥青混合料直接压缩和直接拉伸疲劳寿命对比  
Table 9 Comparison of direct compression and direct tension fatigue life of reclaimed asphalt mixtures

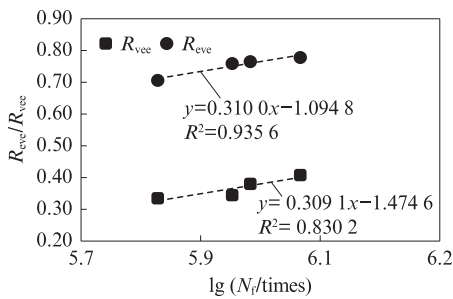
No.	N <sub>f</sub> /times		Compressive-tensile fatigue life ratio
	Direct compression	Direct tension	
R-0	673 310	249 270	3.90
R-30	896 940	80 670	11.12
R-45	1 165 880	10 010	100.90
R-60	961 720	58 680	16.40

与研究结论和工程经验不相符的试验现象为:(1)新沥青混合料R-0的疲劳寿命应最大,而间接拉伸试验结果表明R-0的疲劳寿命最小.(2)随着RAP掺量的增加,再生沥青混合料疲劳寿命应减小,而四点弯曲疲劳试验结果表明R-45的疲劳寿命>R-30的疲劳寿命.(3)添加再生剂后,再生沥青混合料的疲劳寿命

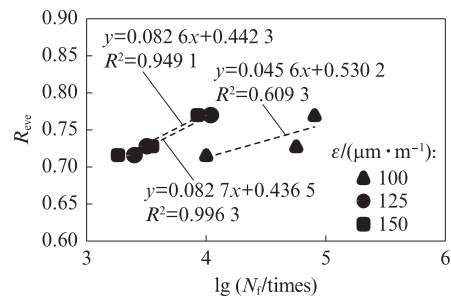
应有所提升,但3种拉伸疲劳试验方法对添加再生剂后的疲劳响应并不相同——四点弯曲疲劳试验表现出疲劳方程斜率变小;间接拉伸疲劳试验结果表现出不同应变区间疲劳寿命提升,直接拉伸疲劳试验表现出R-60疲劳寿命大于R-45.这主要归因于各试验方法的受力模式和力学理论基础的存在差异.根据现有研究结论和工程经验,直接拉伸疲劳试验得到的结论与实际相符,但缺乏深层次的机理分析和黏弹性相关分析支撑,下文将从再生沥青混合料黏弹行为方面给出解释.

### 3.2 表征方法

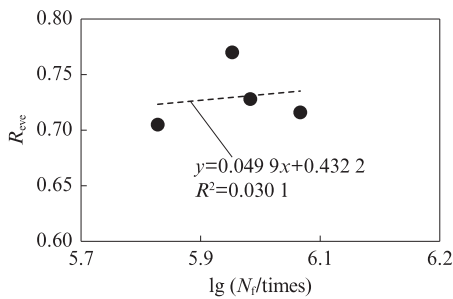
考虑到再生沥青混合料动态模量主曲线的三阶导函数零点数量有所不同,在分析拉伸模式时,仅分析R-30、R-45和R-60这3组再生沥青混凝土黏弹属性与疲劳性能的关系.图6为再生沥青混合料的黏弹



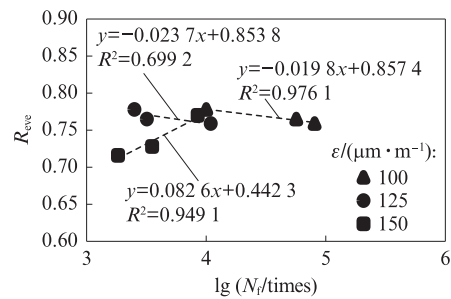
(a) Direct compressive fatigue life vs. compressive R<sub>vee</sub> or R<sub>vee</sub>



(b) Direct tensile fatigue life vs. tensile R<sub>vee</sub>



(c) Direct compressive fatigue life vs. tensile R<sub>vee</sub>



(d) Direct tensile fatigue life vs. compressive R<sub>vee</sub>

图6 再生沥青混合料黏弹物相参数与疲劳寿命关系

Fig. 6 Viscoelastic index vs. fatigue life of reclaimed asphalt mixtures

物性参数与其疲劳寿命的关系。由图6可见:在各黏弹指标中,仅有由压缩动态模量主曲线求得的 $R_{ve}$ 及 $R_{vee}$ 与直接压缩疲劳寿命有较好的线性关系,且 $R_{ve}$ 相关性高于 $R_{vee}$ (图6(a));仅有由拉伸动态模量主曲线求得的 $R_{ve}$ 与不同应变水平下直接拉伸疲劳寿命具有较好的线性关系(图6(b));直接压缩疲劳寿命与由拉伸动态模量主曲线求得的 $R_{ve}$ 不相关(图6(c)),直接拉伸疲劳寿命与由压缩动态模量主曲线求得的 $R_{vee}$ 不相关(图6(d));除 $R_{vee}$ 和 $R_{vee}$ 外,其他黏弹指标与疲劳寿命相关性低。

$R_{ve}$ 越大,再生沥青混合料的黏弹性能越好,其疲劳性能也越好。 $R_{ve}$ 与 $N_f$ 的线性关系是基于黏弹物性参数的疲劳寿命表征方法的核心,其意义在于:

(1)建立了再生沥青混合料黏弹固有属性同疲劳性能的线性关系,通过黏弹属性可预测混合料的疲劳性能,可大大降低疲劳试验量和时间;

(2)再生沥青混合料黏弹属性与疲劳寿命的线性关系建立的前提是必须同压或同拉,保证方向一致;

(3)解释了再生沥青混合料疲劳性能优劣的根源在于黏弹性能的差异,为其疲劳特性研究提供了机理支撑;

(4)针对疲劳试验方法不统一的情况,可明晰辨别不同再生沥青混合料的疲劳寿命排序,其中直接拉伸疲劳试验为有效的试验方法。

## 4 结论

(1)基于动态模量主曲线数学特征分析,构建了包含时间类等3个一级指标、黏弹比等9个二级指标的再生沥青混合料黏弹性评价体系。再生沥青混合料在压缩模式下具备弹性、黏弹性和黏性响应;在拉伸模式下只有弹性和黏弹性响应,无黏性响应。相比新沥青混合料,再生沥青混合料在压缩模式下“弹而不够黏弹,但够有效黏弹”,拉伸模式下“弹而不黏”。

(2)再生沥青混合料的压缩疲劳寿命 $N_f$ 显著大于拉伸疲劳寿命。4种受力方式下再生沥青混合料的疲劳寿命由大到小排序为:单轴压缩疲劳寿命 $>>$ 四点弯曲疲劳寿命 $>$ 单轴直接拉伸疲劳寿命 $>$ 单轴间接拉伸疲劳寿命。直接拉伸疲劳试验可以有效区分不同掺量再生沥青混合料的疲劳特性,沥青混合料的疲劳寿命由大到小排序为 $R-0>R-30>R-60>R-45$ 。

(3)提出了基于黏弹物性参数——有效弹性比 $R_{ve}$ 的再生沥青混合料疲劳寿命 $N_f$ 表征方法。在相同加载方式下,再生沥青混合料的 $R_{ve}$ 与 $N_f$ 呈线性关系;当加载方向不相同,再生沥青混合料的 $R_{ve}$ 与

$N_f$ 无法建立线性关系。

## 参考文献:

- [1] YIN P, PAN B F. Effect of RAP content on fatigue performance of hot-mixed reclaimed asphalt mixture [J]. Construction and Building Materials, 2022, 328: 127077.
- [2] 张志祥, 吴建浩. 再生沥青混合料疲劳性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 31-35.  
ZHANG Zhixiang, WU Jianhao. Experimental study on fatigue performance of reclaimed asphalt mixtures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 31-35. (in Chinese)
- [3] 黄明. 沥青混合料疲劳性能评价与对比[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 105-108.  
HUANG Ming. Evaluation and comparison of fatigue performance of asphalt mixtures [M]. Beijing: Science Press, 2016: 105-108. (in Chinese)
- [4] 曹毅, 马士宾. 热拌沥青混合料四点弯曲梁疲劳试验结果的不一致性及其修正[J]. 材料导报, 2016, 30(12): 129-133, 144.  
CAO Yi, MA Shibin. Inconsistency and correction of fatigue test results of hot mix asphalt mixtures with four-point bending beam [J]. Materials Review, 2016, 30(12): 129-133, 144. (in Chinese)
- [5] 董玲云, 何兆益, 黄刚, 等. 热再生沥青混合料的疲劳特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(4): 606-609.  
DONG Lingyun, HE Zhaoyi, HUANG Gang, et al. Fatigue characterization of hot reclaimed asphalt mixture [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(4): 606-609. (in Chinese)
- [6] 孙雅珍, 房辰泽, 王金昌, 等. 基于耗散能相对变化率平稳值的橡胶沥青混合料疲劳寿命预测方法[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(1): 108-112.  
SUN Yazhen, FANG Chenze, WANG Jinchang, et al. Fatigue life prediction method for rubberized asphalt mixtures based on the smooth value of relative rate of change of dissipated energy [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1): 108-112. (in Chinese)
- [7] SCHAPRY R A, PARK S W. Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions Part II: An approximate analytical method [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(11): 1677-1699.
- [8] 叶青. 基于黏弹性的沥青混合料疲劳性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
YE Qing. Research on fatigue performance of asphalt mixtures based on viscoelasticity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 张金喜, 姜凡, 王超, 等. 室内外老化沥青混合料动态模量评价[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 937-942.  
ZHANG Jinxi, JIANG Fan, WANG Chao, et al. Evaluation of dynamic modulus of indoor and outdoor aged asphalt mixtures [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6): 937-942. (in Chinese)
- [10] 索智, 谭祎天, 张亚, 等. 骨架密实型沥青稳定碎石混合料动态模量研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 206-213.  
SUO Zhi, TAN Yitian, ZHANG Ya, et al. Study on dynamic



- modulus of skeleton dense asphalt stabilized gravel mix [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):206-213. (in Chinese)
- [11] 卢桂林, 许新权, 唐志赟, 等. 高模量改性剂的作用机理及应用研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2):355-361.  
LU Guilin, XU Xinquan, TANG Zhiyun, et al. Research on the action mechanism and application of high modulus modifier[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):355-361. (in Chinese)
- [12] 宋小金, 曾梦澜, 樊亮. 道路沥青材料动力性质的关系[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):920-925.  
SONG Xiaojin, ZENG Menglan, FAN Liang. Relationship between dynamic properties of road asphalt materials[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):920-925. (in Chinese)

(上接第 690 页)

- and characterization of nanocontainers of corrosion inhibitor based on layered double hydroxides[J]. Applied Clay Science, 2012, 67/68:18-25.
- [16] RYU H S, SINGH J K, LEE H S, et al. An electrochemical study to evaluate the effect of calcium nitrite inhibitor to mitigate the corrosion of reinforcement in sodium chloride contaminated Ca(OH)<sub>2</sub> solution [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, 2017:6265184.
- [17] 柳俊哲, 耿俊迪, 巴明芳, 等. 亚硝酸盐对含氯盐砂浆内钢筋钝化膜组成的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(4):536-541.  
LIU Junzhe, GENG Jundi, BA Mingfang, et al. Effect of nitrite on the composition of passivation film of steel bar in chlorine-containing mortar [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4):536-541. (in Chinese)
- [18] CHOI H, INOUE M, CHOI H, et al. Physicochemical study on the strength development characteristics of cold weather concrete using a nitrite-nitrate based accelerator[J]. Materials, 2019, 12(17):2706.