

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.01.003

橡胶沥青混合料的动态弯拉模量研究

周梓豪¹, 刘朝晖², 王旭东³, 张晨晨³

(1. 长沙市规划设计院, 湖南 长沙 410005; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

3. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 为了研究沥青混合料的模量特性, 应用 UTM 材料试验机分别采用四点弯曲和梯形梁两种试验方法测试采用 70# 基质沥青和橡胶沥青两种不同沥青的混合料动态弯拉模量和相位角, 根据时温等效原理计算主曲线移位因子并绘制动态模量主曲线和相位角主曲线, 分析橡胶沥青混合料的动态黏弹特性; 对比分析两种动态弯拉模量试验方法对沥青混合料动态弯拉模量和相位角的影响。结果表明: 沥青混合料动态弯拉模量受温度和荷载频率影响较大, 随着温度升高而显著减小, 同时随着频率增大而增大; 高温时, 橡胶沥青混合料的动态模量显著大于 70# 基质沥青混合料, 拥有更好的高温性能; 橡胶沥青混合料受频率 (温度) 影响较小, 温度敏感性更好; 两种试验方法得到的主曲线在低温阶段趋势一致, 在高温阶段有所差别, 梯形梁试验最低频率为 10 Hz, 而四点弯曲试验的最低频率为 0.1 Hz, 拟合得到的主曲线高温阶段形状更加完整, 能更有效地反映混合料高温时的动态力学性能。

关键词: 道路工程; 动态模量; 四点弯曲试验; 橡胶沥青; 梯形梁试验; 主曲线; 相位角

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2019) 01-0016-06

Study on Dynamic Flexural Modulus of Rubber Asphalt Mixture

ZHOU Zi-hao¹, LIU Zhao-hui², WANG Xu-dong³, ZHANG Chen-chen³

(1. Changsha Planning & Design Institute, Changsha Hunan 410005, China;

2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410114, China;

3. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing, 100088, China)

Abstract: In order to study the modulus characteristics of asphalt mixture, the dynamic bending moduli and phase angles of the mixtures of matrix asphalt No. 70 and rubber asphalt are tested by UTM material testing machine using 4-point bending and trapezoidal beam test methods. According to the time-temperature equivalent principle, the shift factor of the master curve is calculated and the master curves of dynamic modulus and phase angle are drawn to analyse the dynamic viscoelasticity of rubber asphalt mixture. The influences of the 2 dynamic bending modulus test methods on the dynamic bending modulus and phase angle of asphalt mixture are compared and analyzed. The result shows that (1) the dynamic bending modulus of asphalt mixture is greatly affected by temperature and load frequency, it decreases with the increase of temperature, and increases with the increase of frequency; (2) at high temperatures, the dynamic modulus of rubber asphalt mixture is significantly greater than that of matrix asphalt mixture No. 70, with better high temperature performance; (3) the rubber asphalt mixture is less affected by frequency (temperature) and has better temperature sensitivity; (4) the master curves obtained by the 2 test methods have the same trend in the low temperature stage and different in the high temperature stage, the lowest frequency of the trapezoidal beam test is 10 Hz, while the lowest frequency of the 4-point bending test is 0.1 Hz. The shape of the master curve obtained by fitting is more complete in the high temperature stage, which can more

收稿日期: 2017-06-22

作者简介: 周梓豪 (1992-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生. (770551845@qq.com)

effectively reflect the dynamic mechanical property of the mixture at high temperature.

Key words: road engineering; dynamic modulus; 4-point bending test; rubber asphalt; trapezoid beam test; master curve; phase angle

0 引言

橡胶沥青是一种以胶粉为改性剂对基质沥青进行改性的沥青材料, 能较好地改善基质沥青疲劳性能、抗老化性能、温度敏感性能及高温稳定性能, 同时由于橡胶沥青较好的弹性能力, 使其具有较好的低温抗裂性能。橡胶沥青的推广和使用, 不但可以提高沥青混合料的路用性能, 还可以消解大量橡胶废弃物, 实现资源综合利用, 保护环境^[1-3]。

沥青混合料是一种典型的多相复合黏弹材料, 动态模量是表征其黏弹性质的重要指标之一。相对于传统的静态模量, 动态模量更加符合沥青路面荷载响应情况^[4-5]。国外设计规范已经将材料的动态压缩模量作为重要的材料特性参数使用^[6], 国内也开展了大量相关工作。然而对于主要受弯拉作用的下面层结构而言, 使用动态弯拉模量作为结构设计参数更为合理^[7-10]。

本研究采用 2 种弯曲应力试验方法: 四点弯曲试验方法与欧洲梯形梁试验方法。通过温度和频率扫描, 测试橡胶沥青混合料动态模量, 根据时温等效原理得到主曲线, 并与基质 70# 沥青进行对比。

1 弯拉模式动态模量试验

国内外大量研究表明, 沥青混凝土面层底部是一个车轮荷载竖向压缩下产生纵向和横向拉伸结合的应力状态。因此, 对于沥青路面下面层材料弯拉试验模式比压缩试验模式更符合路面结构实际应力状态。国外室内弯拉试验主要有梯形梁两点弯曲试验和长方体中梁三点或四点弯曲试验。两种试验方法采用不同的加载方式。四点弯曲试验中试件两端固定中部加载, 试件在荷载作用下跨中段为纯弯曲应力状态, 试件内部产生弯拉应力。试件中部弯拉的模式可以避免弯曲应力最大处由于材料不均或局部缺陷而导致试验结果产生偏差^[11-12]。

梯形梁试验参照欧洲设计规范, 试验过程中试件底部固定, 顶部受到水平力作用, 属于静定的悬臂结构。试件在荷载作用下受到弯拉剪切复合作用, 产生弯矩和剪切力, 能有效地模拟路面车辆行驶过程中对路面的荷载情况。由于沥青混合料的抗剪强度远远大于其抗弯强度, 因此主要考虑弯矩作

用^[13-14]。梯形梁试验采用变截面的梯形梁试件进行试验, 相比矩形等截面的试件, 梯形梁试件切割过程繁琐, 但是梯形梁比矩形梁受力更为合理。运用力学原理对试件的内部应力进行分析可以发现, 采用梯形梁试件进行试验可以避免试件破坏截面与底面重合, 当发生强度或者疲劳破坏时便于判别。此外, 越往上弯矩越小, 采用截面往上逐渐变小的梯形梁试件可使试件内部应力分布更加合理。梯形梁试验与四点弯曲试验应力图如图 1 所示。

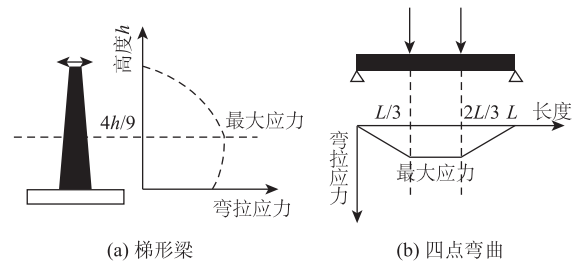


图 1 弯曲动态模量应力图

Fig. 1 Bending dynamic modulus stress diagram

应力应变计算公式如表 1 所示。

表 1 应力应变计算公式

Tab. 1 Stress and strain calculation formulas

	四点弯曲试验	梯形梁试验
最大拉应力	$\sigma_0 = \frac{0.375P}{wn^2}$	$\sigma_0 = \frac{8P}{3bh}$
最大拉应变	$\varepsilon_0 = \frac{12\delta h}{3L^2 - 4l^2}$	$\varepsilon_0 = \frac{\delta (A - a)^2}{8ah \left[\frac{(a - A)(3A - a)}{2A^2} + \ln \frac{A}{a} \right]}$

式中, σ_0 为最大拉应力; P 为荷载; w 为试件平均宽度; n 为平均宽度; ε_0 为最大拉应变; δ 为梁的最大挠度; L 为外夹具间距; l 为内夹具间距; h 为试件高度; A 为梯形梁下底宽; a 为梯形梁上底宽。

1.1 试验材料

以 70# 沥青为基质沥青, 掺入 22% 质量百分数的橡胶粉制成橡胶沥青。为方便表述以 AR22 代指橡胶沥青, AC25 - AR22 代指橡胶沥青混合料。两种沥青的主要指标均满足规范要求。

通过表 2 沥青指标对比可以发现, 加入橡胶粉后沥青针入度下降, 软化点增加, 同时具备较好的弹性恢复能力和较大的黏度。这说明加入胶粉后沥青的高温性能得到明显改善。

表 2 沥青技术指标
Tab. 2 Asphalt technical indicators

	70 [#] 沥青	AR22 (橡胶) 沥青	试验方法
25 ℃ 针入度/(0.1 mm)	68.6	65.7	T 0604—2011
软化点/℃	49.1	57.8	T 0606—2011
延度/cm	>100 (15 ℃)	65.7 (5 ℃)	T 0605—2011
弹性恢复/%		73.1	T 0662—2011
黏度/(Pa · s ⁻¹)	0.495 8 (135 ℃)	3.24 (175 ℃)	T 0625—2011

表 3 沥青混合料级配
Tab. 3 Asphalt mixture gradation

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	矿粉
通过率/%	100.0	77.9	68.5	56.8	42.8	25.9	18.5	12.9	10.4	8.2	6.6	5.0	—
筛余/%	0.0	22.1	9.4	11.8	13.9	17.0	7.3	5.7	2.4	2.2	1.6	1.5	5.0

2 弯曲试验

四点弯曲试验采用 UTM 多功能材料试验系统、沥青混合料小梁四点弯曲试验装置进行试验。试验装置采用空气驱动应变控制模式,施加动态正弦荷载。梯形梁试验采用法国 M2F 梯形梁试验设备进行试验,试验装置通过电机驱动,采用控制模式,施加动态正弦荷载。在低温和高温时,沥青混合料表现出更多的弹性,材料刚度较大,累计变形较小。所以试验顺序从低温到高温,频率从高频到低频。试验参数如表 4 所示。

表 4 弯曲动态模量试验参数

Tab. 4 Bending dynamic modulus test parameters

试验方法	温度/℃	频率/Hz	应变水平/ $\mu\epsilon$
四点弯曲试验	0, 10, 20,	15, 10, 5, 1,	30, 60, 90,
	30, 40	0.5, 0.1	120, 150
梯形梁试验	0, 10, 20,	40, 35, 30, 25,	30, 60, 90,
	30, 40	20, 15, 10	120, 150

2.1 弯曲试验结果分析

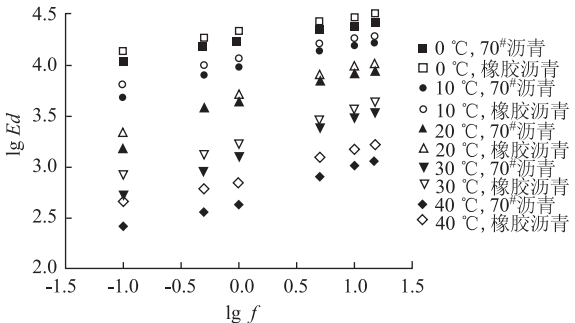
通过温度和频率扫描,得到不同温度和频率条件下橡胶沥青混合料和 70[#]沥青混合料动态弯曲模量,试验结果如图 2 所示。

根据两种试验方法得到的试验结果可以看出:橡胶沥青混合料动态弯拉模量在不同温度和频率条件下均大于 70[#]沥青混合料,且随着温度升高这种差别愈加明显。随着温度升高,两种沥青混合料的动态弯拉模量都明显减小,高温时的模量比低温时减小了 2 个数量级,表明沥青混合料的动态力学性能受温度影响较大。在同一温度条件下,频率对动态

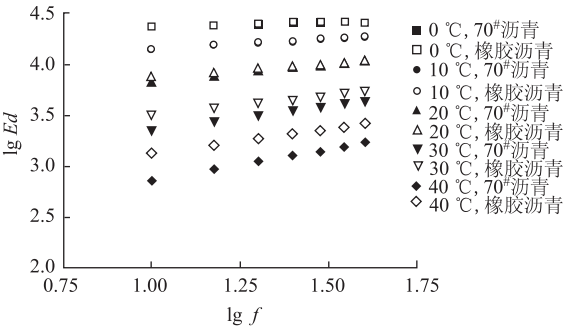
经配合比设计,70[#]沥青混合料最佳油石比为 4.07%,橡胶沥青混合料最佳油石比为 5.59%,两种混合料采用同一种级配,如表 3 所示。

1.2 试件成型

采用轮碾设备成型尺寸长为 430 mm,宽 300 mm,高 80 mm 车辙板,采用法国 Vectra 生产的激光定位切割机,将试件切割成所需的中梁和梯形梁。中梁尺寸:长 380 mm,宽 65 mm,高 50 mm;梯形梁尺寸:上底 25 mm,下底 56 mm,高 250 mm,厚 25 mm。



(a) 四点弯曲动态模量



(b) 梯形梁动态模量

图 2 弯曲动态模量试验结果

Fig. 2 Bending dynamic modulus test result

模量也有显著影响,随着频率增加沥青混合料动态模量也随之增大,但是不同温度条件下这种趋势并不相同。0 ℃时的模量曲线比其他温度条件下模量曲线更加平缓,说明低温状态下频率对模量的影响比常温状态下要小,即频率对动态模量的影响与温度状况有关。

2.2 动态模量主曲线

对于黏弹性材料,某温度-频率条件下的动态

模量可以通过不同的温度-频率组合得到相同的值, 这就是黏弹性材料的时温等效原理。根据时温等效原理, 可将不同温度和频率组合下的动态模量曲线平移形成一条在某一参考温度下的光滑曲线, 即主曲线。通过主曲线可以测得不同温度或频率下的黏弹性能进行比较和换算, 从而得到更大范围内的黏弹性能而不必进行大量试验。

国内外大量研究表明, 沥青混合料动态模量主曲线可用 S 形曲线的 Sigmoidal 数学模型来表示^[15-16]:

$$\lg(E) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \lg f}}, \quad (1)$$

式中, E 为沥青混合料动态模量; f 为荷载频率; δ 为动态模量极小值的对数; $\delta + \alpha$ 为动态模量极大值的对数; β , γ 为 Sigmoidal 模型形状参数。

研究黏弹性力学行为的时间温度换算时通常采用频率的对数坐标, 不同温度的动态模量曲线具有相同的几何形状, 选择其中一个温度作为基准温度, 本研究为 20 °C, 将其他各温度下的曲线沿水平方向左右移动一定距离 $\lg \alpha_T$, 与基准温度下的动态模量曲线部分重合, 即可得到参考温度下的主曲线, 通常称位移量 $\lg \alpha_T$ 为该温度相当于基本温度的移位因子。移位因子与温度有关, 目前通常利用 WLF 公式拟合求得^[17-18]。

$$\lg \alpha_T = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}, \quad (2)$$

式中, $\lg \alpha_T$ 为移位因子; T 为试验温度; T_0 为基准温度; C_1 , C_2 为材料参数, 根据非线性最小二乘法求得。

利用 Sigmoidal 模型和 WLF 方程, 通过将非线性最小二乘法求得两种沥青混合料各温度向基准温度 20 °C 平移时的移位因子, 如表 5 所示。

表 5 主曲线移位因子

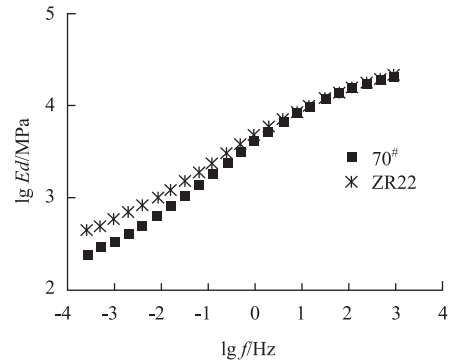
Tab. 5 Shift factor of master curve

试验方法	混合料类型	温度/°C				
		0	10	20	30	40
四点弯曲	AC25-70 [#]	2.717 1	1.456 7	0	-1.394 9	-2.532 3
	AC25-AR22	2.667 3	1.344 2	0	-1.321 0	-2.528 5
梯形梁	AC25-70 [#]	3.048 4	1.474 8	0	-1.078 1	-1.917 2
	AC25-AR22	2.942 5	1.322 0	0	-1.001 7	-1.819 8

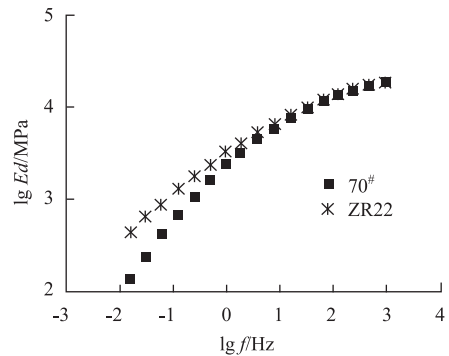
移位因子是温度的函数, 可以反映材料性能对温度的敏感性。从表 5 分析可以得出, 四点弯曲和梯形梁试验中各温度向基准温度平移时, 采用了橡胶沥青的混合料移位因子均小于采用 70[#] 沥青的混合

料。表明橡胶粉能改善沥青混合料的温度敏感性。

将两种沥青混合料各温度下的模量曲线向基准温度平移后得到的主曲线如图 3 所示, 主曲线参数如表 6 所示。主曲线连续光滑, 可以很好拟合试验数据。



(a) 四点弯曲动态模量主曲线



(b) 梯形梁动态模量主曲线

图 3 动态模量主曲线

Fig. 3 Master curve of dynamic modulus

表 6 主曲线参数

Tab. 6 Parameters of master curve

	混合料类型	δ	α	β	γ
四点弯曲	AC25-70 [#]	2.003 1	2.528 7	-0.550 3	-0.632 3
	AC25-AR22	2.213 0	2.422 5	-0.425 8	-0.556 4
梯形梁	AC25-70 [#]	-0.107 8	4.491 2	-1.264 8	-0.670 4
	AC25-AR22	-0.105 5	4.550 5	-1.338 9	-0.549 1

从图中可以看出, 两种试验方法得到的沥青混合料弯拉动态模量主曲线有所差别, 但是趋势一致。总体而言, 主曲线呈“S”形状, 动态模量随着频率的增加不断增大; 在低频和高温阶段, 主曲线趋势平缓, 即在低温和高温状态下沥青混合料的模量较为稳定而在常温状态下沥青混合料的模量受温度影响显著。不同的沥青混合料通过两种试验方法得到的模量主曲线也具有相同的趋势。在高频(低温)阶段, 橡胶沥青混合料与 70[#] 沥青混合料主曲线基本重合, 动态模量值相近; 而在低频(高温)阶段, 橡胶沥青混合料动态模量明显大于 70[#] 沥青模量。说明加入橡胶

粉后沥青混合料具有更好的高温抗变形能力。

2.3 相位角主曲线

根据动态模量主曲线的移位因子可以用于相位角主曲线的绘制。这不仅简化了数据处理过程,而且避免了相位角试验数据相对离散而造成的曲线拟合困难。以 20 °C 为基准温度,对各温度下的相位角曲线进行平移,得到相位角的主曲线,见图 4。

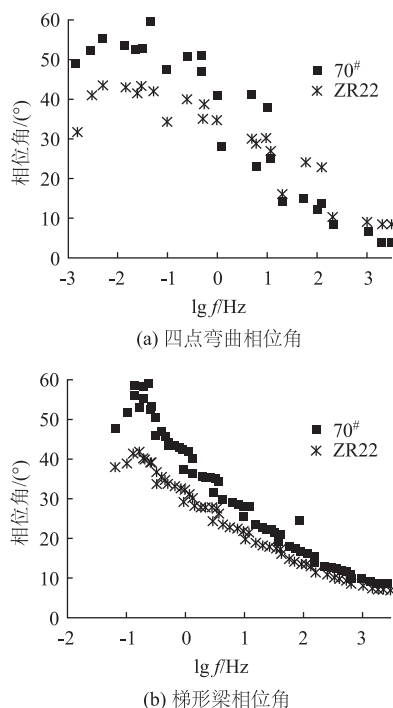


图 4 相位角主曲线

Fig. 4 Master curve of phase angle

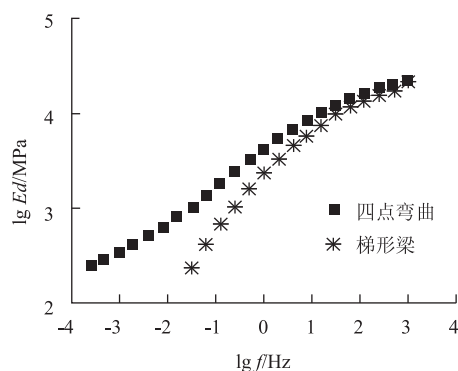
从图中可以看出,四点弯曲试验和梯形梁试验的相位角都随着频率不断减小而表现出先增大后减小的趋势。相位角可以表征材料的黏弹性能。相位角增大,表明混合料黏性部分增加,弹性部分减小;相位角减小,表明混合料黏性部分减小,弹性部分增加。根据两种混合料相位角主曲线对比可以发现,在低频(高温)段橡胶沥青混合料的相位角明显小于 70# 沥青混合料的相位角;而在高频(低温)阶段,橡胶沥青混合料相位角大于 70# 沥青混合料的相位角。说明采用橡胶沥青的混合料在高频(低温)阶段表现出较大的黏性,在低频(高温)阶段表现出较大的弹性,即橡胶沥青混合料在低温阶段具有较好的温度应力松弛能力,抵抗低温开裂;在高温阶段具有具备较好的变形恢复能力,抵抗高温永久变形。

3 梯形梁与四点弯曲试验对比分析

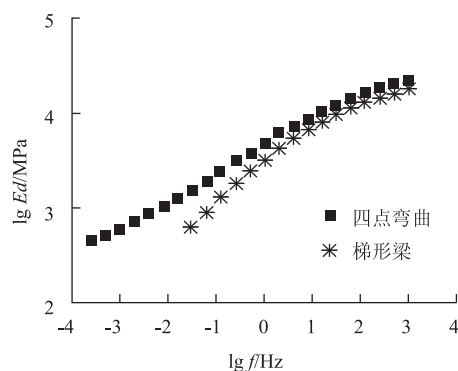
梯形梁试验和四点弯拉试验都通过荷载对试件

施加弯拉作用,但是由于试验设备的差异拟合得到的主曲线也存在差别。

由图 5 可以看出两种试验模式下动态模量主曲线随频率变化的趋势基本相同,但也存在较为明显的差别。在高频(低温)阶段梯形梁动态模量主曲线和四点弯曲动态模量主曲线基本重合,主曲线极大值也相差不大,这表明在高频(低温)阶段两者相关性良好。随着频率降低,梯形梁主曲线的下降速率更快,梯形梁主曲线低于四点弯曲主曲线,尤其在低频(高温)阶段,梯形梁动态模量值与四点弯曲动态模量值相差很大,且梯形梁主曲线极小值明显小于四点弯曲主曲线极小值。这主要是因为梯形梁试验的最低频率为 10 Hz,而四点弯曲试验的最低频率为 0.1 Hz,因此相比之下四点弯曲试验得到的数据能延伸到较低的温度状态,拟合得到的主曲线形状更加完整。



(a) AC25-70 动态模量主曲线



(b) AC25-橡胶沥青动态模量主曲线

图 5 动态模量主曲线

Fig. 5 Master curve of dynamic modulus

4 结论

本研究通过两种弯拉模式沥青混合料动态模量试验,分析了掺入橡胶粉前后沥青混合料的动态力

学性能。得到以下主要结论:

(1) 沥青混合料动态弯拉模量受温度和频率影响,随着温度升高而显著减小,同时随着频率增大而增大。

(2) 两种试验方法得到的主曲线有所差别,主要表现在低频高温阶段。梯形梁试验最低频率为10 Hz,而四点弯曲试验的最低频率为0.1 Hz,拟合后得到的主曲线形状更加完整,能更有效地反映混合料高温时的动态力学性能。

(3) 橡胶沥青混合料在低频(高温)阶段动态弯拉模量明显大于70#沥青混合料,且受频率(温度)影响较小;此外,高温时橡胶沥青混合料表现出更多的弹性。加入胶粉后改善了沥青的高温性能,进而改善了沥青混合料的高温性能。

参考文献:

References:

- [1] 杨志峰,李美江,王旭东. 废旧橡胶粉在道路工程中应用的历史和现状 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (7): 19-22.
YANG Zhi-feng, LI Mei-jiang, WANG Xu-dong. The History and Status Quo of Rubber Powder Used in Roadbuilding [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (7): 19-22.
- [2] 王旭东,李美江,路凯冀,等. 橡胶沥青及混凝土应用成套技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
WANG Xu-dong, LI Mei-jiang, LU Kai-ji, et al. The Applied Technology of the Crumb Rubber in the Asphalt and Mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [3] 李廷刚,李金钟,李伟. 橡胶沥青微观机理研究及其公路工程应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (1): 25-30.
LI Ting-gang, LI Jin-zhong, LI Wei. Micro-mechanism Study and Road Engineering Application of Rubber Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (1): 25-30.
- [4] 王旭东,沙爱民,许志鸿. 沥青路面材料动力特性与动态参数 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
WANG Xu-dong, SHA Ai-min, XU Zhi-hong. Dynamic Property and Parameters of Asphalt Pavement Materials [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [5] 罗桑,钱振东, HARVEY J. 环氧沥青混合料动态模量及其主曲线研究 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (6): 16-20.
LUO Sang, QIAN Zhen-dong, HARVEY J. Research on Dynamic Modulus for Epoxy Asphalt Mixtures and Its Master Curve [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (6): 16-20.
- [6] 沈金安. 国外沥青路面设计方法总汇 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
SHEN Jin-an. Summary of Abroad Asphalt Pavement Design Methods [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [7] 詹小丽. 基于DMA方法对沥青粘弹性能的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
ZHAN Xiao-li. Research on Viscoelastic Properties of Asphalt Using DMA [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [8] 韦金城,崔世萍,胡家波,等. 沥青混合料动态模量试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2008, 11 (6): 657-661.
WEI Jin-cheng, CUI Shi-ping, HU Jia-bo, et al. Research on Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11 (6): 657-661.
- [9] 魏道新. 多轮荷载作用下的沥青道面结构响应敏感性分析 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (12): 21-26.
WEI Dao-xin. Sensitivity Analysis of Asphalt Pavement Structure Responses under Multi-wheel Loads [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (12): 21-26.
- [10] 李强,李国芬,王宏畅. 受力模式对沥青混合料动态模量的影响 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17 (5): 816-822.
LI Qiang, LI Guo-fen, WANG Hong-chang. Effects of Loading Modes on Dynamic Moduli of Asphalt Mixtures [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (5): 816-822.
- [11] 姚波,程刚,王晓. 基于弯拉试验模式的环氧沥青混合料动态模量 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41 (3): 597-600.
YAO Bo, CHENG Gang, WANG Xiao. Dynamic Modulus of Epoxy Asphalt Mixture Based on Bending Test Model [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41 (3): 597-600.
- [12] 宋鑫,钱振东,王江洋. 沥青混合料四点弯曲动态模量试验研究 [J]. 石油沥青, 2011, 25 (2): 17-21.
SONG Xin, QIAN Zhen-dong, WANG Jiang-yang. Research on Four-point Bending Dynamic Modulus Test of Asphalt Mixtures [J]. Petroleum Asphalt, 2011, 25 (2): 17-21.

- 量与渗透系数关系试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (11): 1-7.
- YANG Jin-bing, CHEN Xing-zhang, WANG Hui, et al. An Experimental Study of Relationship between Fine Grain Content and Permeability Coefficient of Debris Flow Deposits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (11): 1-7.
- [13] 洪宝宁, 化君晖, 刘鑫, 等. 高液限土路堤填筑的双指标控制方法研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (增1): 255-262.
- HONG Bao-ning, HUA Jun-hui, LIU Xing, et al. Research on Quality Control Method with Two Indices for Embankment Filled with High Liquid Limit Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (S1): 255-262.
- [14] 张国炳, 余概宁. 高液限土的改良技术研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (11): 71-74.
- ZHANG Guo-bing, YU Gai-ning. Study on Study on Improvement of High Liquid Limit Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (11): 71-74.
- [15] 朱青青, 苗强强, 陈正汉, 等. 考虑基质势影响的非饱和土水分运移规律测试系统研制 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (增2): 240-244.
- ZHU Qing-qing, MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, et al. Development of Test System for Unsaturated Soil Water Movement Law Considering Influence of Matrix Potential [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (S2): 240-244.
- [15] 董金梅, 朱华, 边疆, 等. 高分子材料改性粉土力学特性试验研究及机制探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 32 (增2): 4326-4333.
- DONG Jin-mei, ZHU Hua, BIAN Jiang, et al. Experimental Research on Mechanics Characteristics and Mechanism of Silty Soil Modified by Polymer Material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 32 (S2): 4326-4333.
- [17] 王改玲, 王青杵, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (1): 1-5.
- WANG Gai-ling, WANG Qing-chu, SHI Sheng-xin. Rainfall Characters and Its Effect on Loess Slope Land Erosion in Northern Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (1): 1-5.
- [18] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (3): 851-855.
- TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (3): 851-855.

(上接第21页)

- [13] 黄优. 沥青混合料梯形梁动态模量试验研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- HUANG You. Laboratory Study of Dynamic Modulus of Trapezoid Beam Asphalt Mixture [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [14] 李本亮, 黄卫东, 孟会林, 等. 沥青混合料二点梯形梁与四点小梁疲劳试验方法对比 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36 (1): 46-51.
- LI Ben-liang, HUANG Wei-dong, MENG Hui-lin, et al. Comparison of 2PB and 4PB Beam Fatigue Test Methods of HMA [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2017, 36 (1): 46-51.
- [15] 赵延庆, 吴剑, 文健. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析 [J]. 公路, 2006 (8): 163-166.
- ZHAO Yan-qing, WU Jian, WEN Jian. Determination and Analysis of Dynamic Modulus of Asphalt Mixture and Its Master Curve [J]. Highway, 2006 (8): 163-166.
- [16] PELLINEN T K, WITCZAK M W, BONAQUIST R F. Asphalt Mix Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-linear Least Squares Optimization [J]. Engineering Mechanics Division Conference, 2003, 123: 83-101.
- [17] 马林, 张肖宁. 间接拉伸与单轴压缩模式沥青混合料动态模量比较分析 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (10): 11-17, 21.
- MA Lin, ZHANG Xiao-ning. Comparison of HMA Dynamic Moduli between Indirect Tension and Uniaxial Compression Test Modes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (10): 11-17, 21.
- [18] 姚奇. 沥青混合料动态模量测试方法与预估模型研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- YAO Ke. Research on Test Method and Predicting Model of Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.