

测试·分析

胎面胶动态能量损耗的测试方法及其与 损耗因子相关性的研究

王宝金,常双凯,张琳,周宏斌
(怡维怡橡胶研究院有限公司,山东 青岛 266045)

摘要:采用旋转流变仪、橡胶加工分析仪、压缩生热试验机、回弹仪测试胎面胶的动态能量损耗,针对应变、应力、能量3个因素建立了各测试方法的简应变/应力-时间数学模型,探讨胎面胶的动态能量损耗与损耗因子($\tan\delta$)的相关性。结果表明:旋转流变仪和橡胶加工分析仪都是恒定应变测试,二者测试的胎面胶的 $\tan\delta$ 相关性较好;压缩生热试验机是恒定应力测试,测试的胎面胶的动态能量损耗与 $\tan\delta$ 成正比、与模量成反比;回弹仪是接近恒定能量测试,测试的胎面胶的动态能量损耗与 $\tan\delta$ 成正比;轮胎的滚动阻力指数与胎面胶的 $\tan\delta$ 线性相关性较好。

关键词:胎面胶;动态能量损耗;旋转流变仪;橡胶加工分析仪;压缩生热试验机;回弹仪;损耗因子;滚动阻力
中图分类号: TQ330.7
文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2021)12-0937-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.12.0937



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

一般认为汽车的能量损失很大部分源自于轮胎的滚动阻力,轮胎的滚动阻力降低10%,则汽车的燃油消耗就降低1%~2%^[1]。作为轮胎最大组成部分的胎面,其滚动阻力约占整个轮胎滚动阻力的50%。轮胎每运转1圈,就承受1次变形,胶料中填料之间以及填料与橡胶之间内摩擦作用产生的滞后损失主要以热能形式被耗散,并由此转化为轮胎的滚动阻力^[2]。另外,作为热的不良导体,轮胎的滞后损失产生的热能易在内部蓄积,导致轮胎的运行温度过高,致使轮胎出现脱层、爆裂等现象,缩短轮胎的使用寿命^[3]。因此准确测定胎面滚动过程中的动态能量损耗就成为轮胎质量控制的重要一环。

本工作采用旋转流变仪、橡胶加工分析仪、压缩生热试验机、回弹仪测试胎面胶的动态能量损耗,针对应变、应力、能量3个因素对测试方法进行的研究,并建立简应变/应力-时间数学模型,探讨胎面胶的动态能量损耗和轮胎的滚动阻力与损耗因子($\tan\delta$)的相关性。

1 实验

1.1 主要原材料

不同配方胎面胶。

1.2 主要仪器和设备

TA-ARES-G2型旋转流变仪,美国TA仪器公司产品;RPA2000橡胶加工分析仪(RPA),美国阿尔法科技有限公司产品;FT-1260型压缩生热试验机,日本上岛制作所株式会社产品;STL-TB/PCRR 2-Pos型滚动阻力试验机,美国标准测试实验室提供;GT-7042-RE型回弹仪,中国台湾高铁科技股份有限公司产品。

1.3 性能测试

胶料各项性能测试按照相应国家标准进行。

2 正弦条件下能量损耗的数学计算原理

对于正弦动态加载条件下,单位体积橡胶的能量损耗值,即滞后能(ΔE)可根据式(1)计算^[4]。

$$\Delta E = \int_0^{2\pi/\omega} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0307104)

作者简介:王宝金(1983—),男,山东青岛人,怡维怡橡胶研究院有限公司工程师,硕士,主要从事橡胶配方及加工工艺研究。

E-mail: wangbj@everi.com.cn

引用本文:王宝金,常双凯,张琳,等.胎面胶动态能量损耗的测试方法及其与损耗因子相关性的研究[J].橡胶工业,2021,68(12):937-941.

Citation: WANG Baojin, CHANG Shuangkai, ZHANG Lin, et al. Study on test method of dynamic energy loss of tread compound and its correlation with loss factor[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(12): 937-941.

式中, ω 为角频率, σ 为剪切应力, ε 为剪切应变。

经过积分计算得到式(2)。

$$\Delta E = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \delta \quad (2)$$

式中, σ_0 为剪切应力峰值, ε_0 为剪切应变峰值, δ 为相位角, $\sin \delta$ 为应力与应变之间的相位差。

可以看出, ΔE 与 σ_0 , ε_0 以及 $\sin \delta$ 成正比。当 δ 较小时, $\sin \delta \approx \tan \delta$, 因此 ΔE 还可以表示为式(3)。

$$\Delta E \approx \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \tan \delta \quad (3)$$

实验室测试橡胶试样动态能量损耗的仪器很多, 如旋转流变仪、RPA、压缩生热试验机、回弹仪、动态热机械分析仪等; 应变形式有拉伸、剪切、压缩等; 测试输入方式主要有恒定应变输入、恒定应力输入、恒定能量输入, 这3种输入方式分别指在一个应变周期 (2π) 中试样的 ε_0 恒定、 σ_0 恒定、能量峰值恒定。以剪切应变为例, G^* 为胶料剪切模量, 在恒定应变条件下, $\sigma_0 = \varepsilon_0 G^*$ ^[5], 可以得到

$$\Delta E = \pi \varepsilon_0^2 G^* \tan \delta \quad (4)$$

在恒定应力条件下, $\varepsilon_0 = \sigma_0 / G^*$, 可以得到

$$\Delta E = \pi \sigma_0^2 (1/G^*) \tan \delta \quad (5)$$

在恒定能量条件下, 输入能量 (E) = $\pi \sigma_0 \varepsilon_0$, 可以得到

$$\Delta E = E \tan \delta \quad (6)$$

3 结果与讨论

3.1 旋转流变仪与RPA测试的胎面胶的 $\tan \delta$ 关系

旋转流变仪与RPA是以剪切应变为主要应变方式的两种仪器, 可以测试不同温度、频率、应变下胎面胶的动态能量损耗, 并得到 $\tan \delta$ 和模量等。

在频率为10 Hz、温度为60 °C条件下, 应变对时间进行3个周期的扫描。在这3个周期中, 试样被迫以正弦时间曲线进行剪切应变, RPA的应变振幅为20%、旋转流变仪的应变振幅为12%。RPA和旋转流变仪的应变-时间数学模型见图1。

旋转流变仪的应变-时间曲线见图2。

根据图2可知, 旋转流变仪测试的 $\tan \delta @ 12\%$ 是试样在设定的应变12%下, 10个周期测试值的平均值, 在每个测试周期 (2π) 中设定的应变峰值是恒定的, 因此这是一个恒定应变的测试周期。RPA与流变仪的测试过程一致。

本工作针对不同胎面胶, 分别采用旋转流变仪和RPA测试其 $\tan \delta$ 。旋转流变仪测试条件为: 温

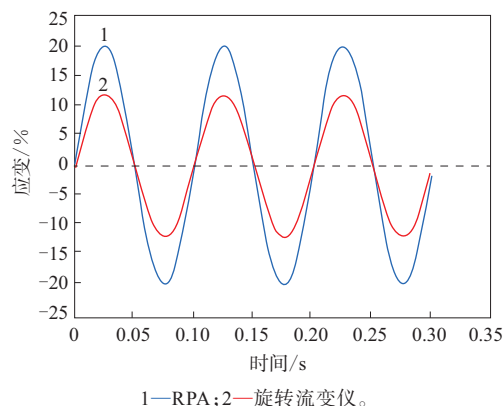


图1 RPA和旋转流变仪的应变-时间数学模型

Fig.1 Strain-time mathematical models of RPA and rotary rheometer

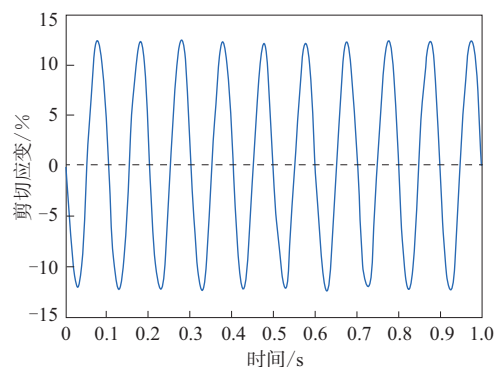


图2 旋转流变仪的应变-时间曲线

Fig.2 Strain-time curve of rotary rheometer

度为60 °C, 频率为10 Hz, 应变扫描; RPA测试条件为: 终炼胶于模腔内在150 °C × 30 min条件下无应变硫化, 然后冷却到60 °C, 在频率10 Hz下进行应变扫描。

旋转流变仪和RPA都选取应变5%下胎面胶的 $\tan \delta$ 进行对比, 见图3。从图3可见, 两种方法测试

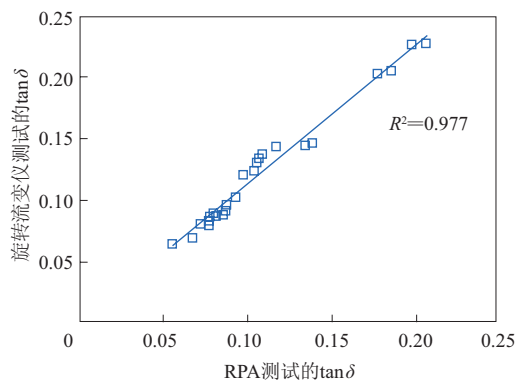


图3 旋转流变仪与RPA测试的胎面胶的 $\tan \delta$ 相关性

Fig.3 Correlation of $\tan \delta$ of tread compound of tested by rotary rheometer and RPA

的胎面胶的 $\tan\delta$ 相关因数(R^2)为0.977, 旋转流变仪测试的 $\tan\delta$ 稍大于RPA测试的 $\tan\delta$ 。

3.2 胎面胶的压缩生热与 $\tan\delta$ 的关系

FT-1260型压缩生热试验机是以恒定应力测定(采用各种负荷方式、大范围测定条件)为主,也可以采用恒定应变的方式进行测试。常用测试条件为:环境温度 55 °C, 静压力 100 N, 动压力 700 N, 频率 10 Hz。这是一个恒定应力的测试过程, 本工作采用此条件。

压缩生热试验机测试的数学模型选用3个周期作为示例, 见图4。

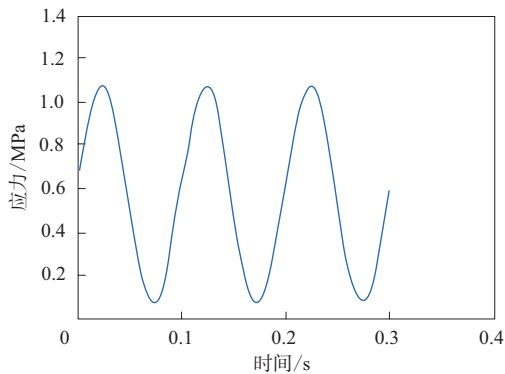


图4 压缩生热试验机的数学模型

Fig. 4 Mathematical model of compression heat build-up testing machine

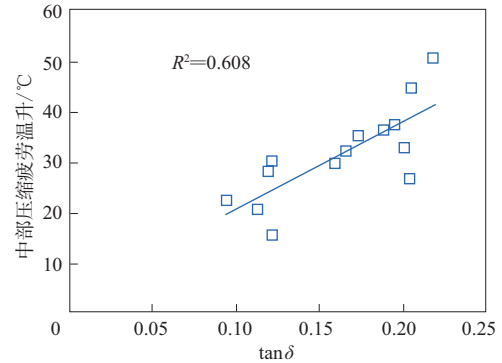
由图4可知, 该数学模型曲线的纵坐标没有经过零点, 以应力的极大值与极小值作为双振幅振动的峰值。

考察14个胎面胶的中部压缩疲劳温升(表征动态能量损耗)与 $\tan\delta$ (60 °C, 10 Hz, $\tan\delta@max$)的相关性, 见图5 ($\tan\delta@max$ 为 $\tan\delta$ 最大值, E^* 为压缩模量)。

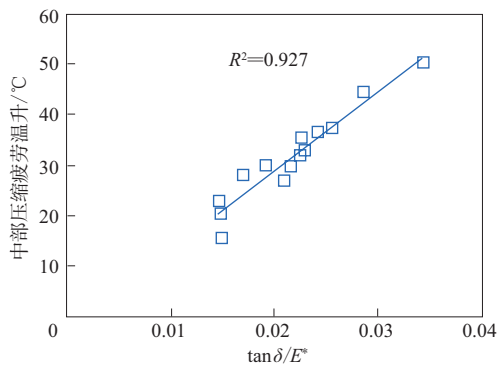
由图5(a)可知, 胎面胶的中部压缩疲劳温升与 $\tan\delta$ 相关性不好; 由图5(b)可知, 胎面胶的中部压缩疲劳温升与 $\tan\delta/E^*$ 呈线性相关, R^2 达到0.927。说明在恒定应力测试条件下, 胎面胶的动态能量损耗与 $\tan\delta$ 和 $(1/E^*)$ 成正比。根据式(5), 橡胶的 ΔE 与 $(1/G^*)$ 和 $\tan\delta$ 成正比, 说明理论数据与实际测试数据吻合。其中, E^* 和 G^* 分别为压缩复合模量和剪切复合模量, 都代表样品的刚性, 可以视为相同。

3.3 胎面胶的回弹性与 $\tan\delta$ 的关系

如橡胶试样受到冲击(即对其输入能量), 当试样恢复到原始状态时, 则会释放出一部分能量,



(a) 温升- $\tan\delta$



(b) 温升- $\tan\delta/E^*$

图5 胎面胶的压缩生热与动态能量损耗的相关性

Fig. 5 Correlation between compression heat build-ups and dynamic energy losses of tread compound

另一部分不能恢复的能量以热的形式消耗于试样中。释放能与输入能之比, 即摆锤冲击前后位能之比, 称为回弹性。回弹性测定方法有多种, 以摆锤冲击弹性的测试较简便有效^[6]。

摆锤式回弹锤头以一定的速度敲击在橡胶试样上, 然后又以稍小的速度反弹回来, 其应力-时间数学模型如图6所示。

为与旋转流变仪、RPA、压缩生热试验机进行比

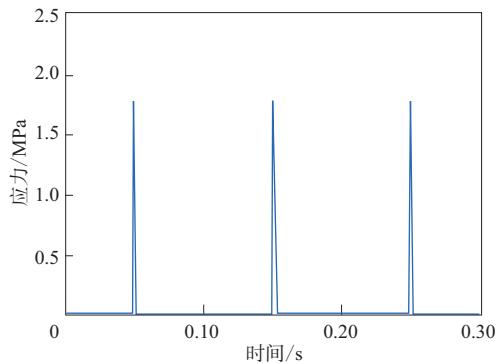


图6 摆锤式回弹性锤头的应力-时间数学模型

Fig. 6 Stress-time mathematical model of pendulum resilience hammer head

较,摆锤式回弹锤头的频率仍设为10 Hz(实际人工测试时,摆锤式回弹性测试频率无法达到10 Hz)。在每个测试周期中,橡胶回弹性测试的摆锤高度是恒定的,其势能也恒定,所以摆锤敲击在橡胶试样上时传递给试样的能量是恒定的,在试样模量接近的条件下,这是一个接近恒定能量的测试过程。

胎面胶的回弹损失率与 $\tan\delta$ (60 °C, 10 Hz, $\tan\delta@max$) 的相关性见图7。

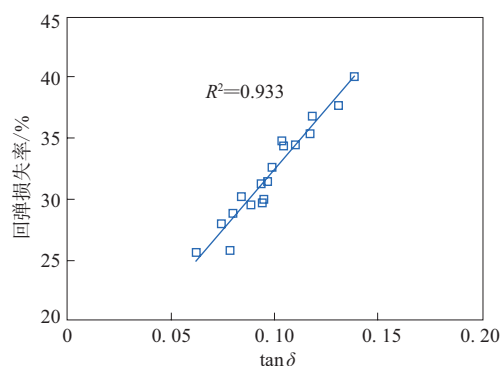


图7 胎面胶的回弹损失率与 $\tan\delta$ 的相关性

Fig. 7 Correlation between rebound loss rates and $\tan\delta$ of tread compound

从图7可以看出,胎面胶的回弹损失率与 $\tan\delta$ 呈很强的正比关系,因此当测试能量恒定时,回弹损失率(表征能量损耗)仅与 $\tan\delta$ 有关。根据式(6),当输入的能量恒定时($E = \pi\sigma_0\varepsilon_0$ 恒定),橡胶的 ΔE 与 $\tan\delta$ 成正比,说明理论数据与实际测试数据吻合。

3.4 胎面胶的滚动阻力与 $\tan\delta$ 的关系

轮胎在运行期间,胎面胶每个橡胶单元与地面的接触情况都不一样,为了简化,仅以胎面上的一个橡胶单元作为考察对象来进行分析,这个橡胶单元在接地时发生复杂的拉伸、剪切、压缩、扭曲变形。以轮胎在频率为10 Hz稳态滚动时运行3个周期为例,其数学模型见图8。轮胎在滚动过程中,其橡胶单元应力以如图8所示的脉冲形式变化^[7],与回弹性的测试过程类似。

胎面胶的变形可援引王梦蛟的论述^[4]:近似为恒定应变(弯曲)和恒定应力(压缩)条件;既然在这两个条件下胎面胶的滞后损失的几何平均值与 $\tan\delta$ 近似成正比,那么胎面的滞后损失也大体上与 $\tan\delta$ 成正比。S. W. HONG^[8]制备了不同 $\tan\delta$ 胎面胶的195/75R14试验轮胎。结果表明,胎面胶在75 °C时的 $\tan\delta$ 与滚动阻力成正比。A. Y. C. LOU^[9]研

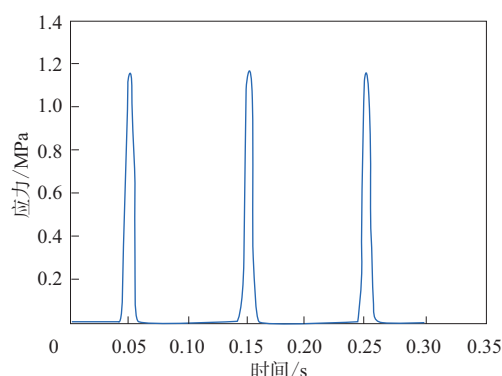


图8 胎面胶单元的应力-时间数学模型

Fig. 8 Stress-time mathematical model of tread compound element

究表明,在流变仪上,通过正弦应变循环获得的胎面胶的粘弹性指数与滚动阻力之间也有很好的相关性。S. FUTAMURA等^[10-11]研究表明,轿车轮胎的滚动阻力系数与胎面胶的 $\tan\delta$ 相关性较好。

由于轮胎运行过程中胎面胶的变形极复杂,因此胎面胶的滚动阻力与 $\tan\delta$ 的相关性只能根据试验数据进行验证。在滚动阻力试验机上测试与12R22.5试验轮胎相同规格、相同花纹的轮胎,轮胎的滚动阻力指数与胎面胶的 $\tan\delta$ (60 °C, 10 Hz, $\tan\delta@max$) 的相关性见图9。

从图9可见,轮胎的滚动阻力指数与胎面胶的 $\tan\delta$ 线性相关性较高。值得注意的是,当胎面胶的 $\tan\delta$ 相近时,轮胎的滚动阻力指数与胎面胶的 $\tan\delta$ 相关性不大,这与试验测试误差等因素有关。

4 结论

(1)在胎面胶性能的测试方法中,旋转流变仪和RPA都是恒定应变测试,二者测试的胎面胶的 $\tan\delta$ 的相关性较好。

(2)压缩生热试验机是恒定应力测试,测试的胎面胶的动态能量损耗与 $\tan\delta$ 和 $(1/E^*)$ 成正比。

(3)回弹仪是恒定能量测试,测试的胎面胶的动态能量损耗与 $\tan\delta$ 成正比。

(4)轮胎的滚动阻力与胎面胶的 $\tan\delta$ 线性相关性较好。

参考文献:

- [1] 那洪东. 降低轮胎滚动阻力的材料和技术[J]. 世界橡胶工业, 2006, 33 (7): 22-26.
- NA H D. Materials and techniques for reducing tire rolling resistance[J]. World Rubber Industry, 2006, 33 (7): 22-26.
- [2] 颜晋钧,陈宏. 胎面胶对轮胎滚动阻力的影响[J]. 轮胎工业, 2007,

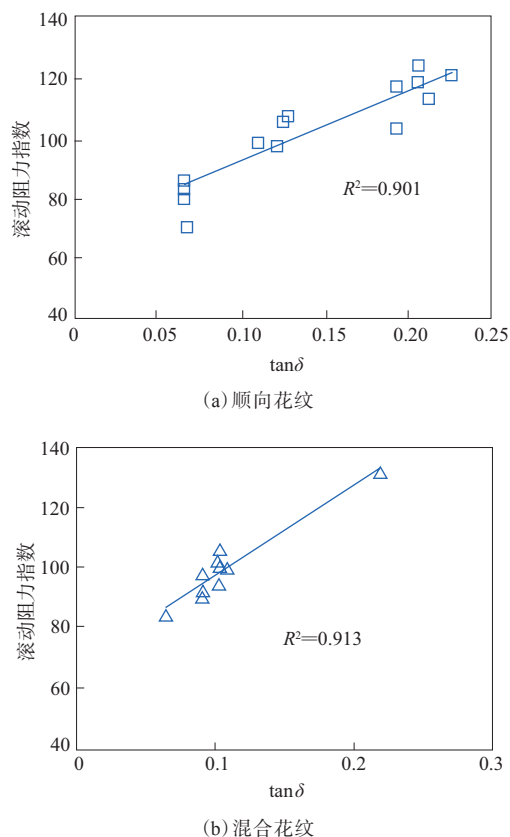


图9 轮胎的滚动阻力指数与胎面胶的 $\tan \delta$ 的相关性

Fig.9 Correlation between rolling resistance index of tire and $\tan \delta$ of tread compound

27 (1) : 11-14.

YAN J J, CHEN H. Influence of tread compound on rolling resistance of tire[J]. Tire Industry, 2007, 27 (1) : 11-14.

- [3] 孙砚田. 轮胎滚动阻力分析及其性能优化方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [4] 王梦蛟. 聚合物-填料和填料-填料相互作用对填充硫化胶动态力学性能的影响[J]. 轮胎工业, 2000, 20 (10) : 601-610.
WANG M J. Effect of polymer-filler and filler-filler interaction on dynamic mechanical properties of filled vulcanizates[J]. Tire Industry, 2000, 20 (10) : 601-610.
- [5] 孙崇志. 高性能轮胎胎面用橡胶复合材料组成、微观结构与性能间关系的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [6] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会橡胶物理和化学试验方法标准化分技术委员会. 硫化橡胶回弹性的测定: GB/T 1681—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [7] 晋琪. 轮胎滚动阻力及稳态滚动温度场的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [8] HONG S W. 用动态粘弹性预测轮胎使用性能[J]. 吴秀兰, 译. 轮胎工业, 1996, 16 (1) : 17-22.
HONG S W. Prediction of tire performance using dynamic viscoelastic properties[J]. Translated by WU X L. Tire Industry, 1996, 16 (1) : 17-22.
- [9] LOU A Y C. Relationship of tire rolling resistance to the viscoelastic properties of the tread rubber[J]. Tire Science & Technology, 1978, 6 (3) : 176-188.
- [10] FUTAMURA S, GOLDSTEIN A A. Prediction and simulation of tire performance characteristics based on deformation index concept[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2015 (15) : 84853.
- [11] 汪艳萍, 张树勇, 卫忠玲. 硫化天然橡胶动态力学性能研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2010, 29 (2) : 119-124.
WANG Y P, ZHANG S Y, WEI Z L. Investigation of dynamic mechanical properties for vulcanized natural rubber[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 29 (2) : 119-124.

收稿日期: 2021-06-13

Study on Test Method of Dynamic Energy Loss of Tread Compound and Its Correlation with Loss Factor

WANG Baojin, CHANG Shuangkai, ZHANG Lin, ZHOU Hongbin

(EVE Rubber Research Institute Co., Ltd, Qingdao 266045, China)

Abstract: The dynamic energy loss of tread compound was measured by rotary rheometer, rubber processing analyzer, compression heat build-up tester and rebound instrument. Based on the three factors of strain, stress and energy, a simple mathematical strain/stress-time model of each test method was established, and the relevance of dynamic energy loss and loss factor ($\tan \delta$) of tread compound was discussed. The results showed that, both rotary rheometer and rubber processing analyzer provided constant strain tests, and the $\tan \delta$ of the tread compound measured by these two methods had a good correlation. The compression heat build-up tester provided a constant stress test. Under this condition, the dynamic energy loss of the tread compound was proportional to $\tan \delta$ and inversely proportional to modulus. The rebound instrument provided a near constant energy test, and the dynamic energy loss of the tread compound was proportional to $\tan \delta$. In addition, the rolling resistance index of the tire showed a good linear correlation with the $\tan \delta$ of the tread compound.

Key words: tread compound; dynamic energy loss; rotary rheometer; rubber processing analyzer; compression heat build-up tester; rebound instrument; loss factor; rolling resistance