

应用理论

用动态粘弹性能预测轮胎使用性能

S. W. Hong 著 吴秀兰译 黄小安校

为了满足汽车生产者和各部门对高性能轮胎的各项要求,轮胎制造业的竞争愈来愈激烈。这些要求包括提高轮胎的安全性、降低滚动阻力(节省燃料)、改善操纵性和乘坐舒适性、延长使用寿命。安全性主要要求轮胎具有更好的湿滑/牵引性、耐久性以及更长的使用寿命(提高胎面耐磨性)。此外,废轮胎会引起环保问题,因而生产者和消费者都对“绿色轮胎”非常感兴趣。

为满足这些技术要求,橡胶生产者开发出特种聚合物,包括改善湿牵引性而保持低滚动阻力的高乙烯基含量的顺丁橡胶(BR)和丁苯橡胶。为降低滚动阻力和提高耐磨性开发出溶聚丁苯橡胶(S-SBR)和化学改性溶聚丁苯橡胶。通过研制焦烧安全性良好、可加速硫化而不返原的新型促进剂,橡胶助剂生产者不断努力开发稳定的硫化体系。另外,为消除促进剂中的亚硝胺,有利于环保的橡胶化学助剂已问世。为延长轮胎使用寿命,试验了许多新型抗氧化剂和抗臭氧剂,以改善老化性能。炭黑和其它填充剂生产者也努力开发出性能得到改善的补强材料,以提高耐磨性并降低滚动阻力。

所有这些新进展都离不开全面的轮胎试验。然而,现场实际试验很昂贵,且评价周期很长。另一方面,诸如耐磨性、操纵性、乘坐舒适性、滚动阻力、干/湿滑牵引性、冰牵引性、生热及耐久性等轮胎使用性能,可用动态粘弹性能预测,而无需长时间的轮胎试验。商业化生产之前的最终优化评价仍需现场实际评价,然而,使用动态粘弹性能预测可以减少为获得最佳性能而进行现场实际评价所需轮胎

的数量。

本文将讨论粘弹理论和粘弹性能与轮胎使用性能的关系,并将这些性能与实际轮胎试验结果进行比较。

1 理论和应用

1.1 弹性特性

硫化橡胶或其它固态聚合物的粘弹性有两个突出的特性:一个是弹性特性,另一个是粘性特性。弹性理论研究的是应力与应变成正比而与应变率无关的理想弹性体的机械性能。该理论与描述虎克定律的下述公式相符:

$$S_E = K\gamma \quad (1)$$

式中 S_E ——应力;

K ——虎克定律弹性常数;

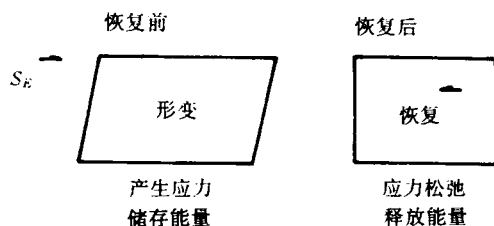
γ ——应变。

在轮胎中,弹性特性有助于:

(1) 轮胎承受周期性形变后保持形状;

(2) 储存和释放周期性形变中输入的能量,降低滚动阻力,进而提高燃油经济效率。

轮胎中硫化橡胶的弹性特性与诸如降低生热、改善屈挠龟裂性,以及储存能量和释放能量使轮胎恢复原形等关键轮胎使用特性有很大的关系。为了更清楚地解释弹性特性,作下面示意:



1.2 粘性特性

流体力学中的粘性特性理论研究的是应力与应变率成正比而与应变本身无关的理想粘性流体。该粘性理论与下面描述牛顿定律的公式相符：

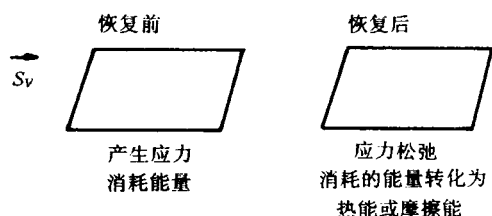
$$S_v = \mu \frac{d\gamma}{dt} \quad (2)$$

式中 S_v ——应力；

μ ——粘度或粘性常数；

$\frac{d\gamma}{dt}$ ——应变率。

在粘性行为中，输入某物体的能量引起物体形变，形变的物体不恢复原状。因此，输入的能量化为热能或摩擦能而消散。为了更好地说明粘性特性，作下面示意：



在轮胎中，粘性特性有助于：

(1) 消除噪声和振动；

(2) 提供转弯时防滑，以及制动时将动能传给制动闸所要求的摩擦力。

在选定的适当条件下，任何理想固体都会偏离虎克定律，任何理想液体也都会偏离牛顿定律。这可能是由于应力不完全与应变或应变率成正比所致。因此，用粘弹性能来表征应力与应变和应变率的关系。Voigt 和 Maxwell 认为，弹性特性和粘性特性既可以用串联的方法，也可以用并联的方法结合起来。

1.3 粘弹性能的重要参数

为了引进使用粘弹性能预测轮胎使用性能的基本参数，必须建立硫化橡胶和聚合特性的基本模型。在复数变量理论框架内，建立粘弹弹性体振动应力和应变的响应的基本概念最为方便。本研究将试图定义一些有用的

参数来描述粘弹弹性体对振动负荷模型的响应，进而说明 Voigt 和 Maxwell 模型的关系。弹性特性和粘性特性可以串联或并联起来以建立有用的模型。应力可按矢量规律分解成两部分，一部分与应变同相，另一部分与应变率相位差成 90° ；如用应力除以应变，可将模量分成同相(实数的)和不同相(虚数的)两部分。

复数应变 γ^* 和复数应力 S^* 标以米字号，并按指数形式定义为：

$$\gamma^* = \gamma_0 [\cos(\omega t) + i \sin(\omega t)] = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$S^* = S_0 [\cos(\omega t + \delta) + i \sin(\omega t + \delta)] = S_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (4)$$

式中 $S_0 = |S^*|$ ；

$\gamma_0 = |\gamma^*|$ ；

ω ——角频率，与圆频率 f 的关系为

$$\omega = 2\pi f。$$

对于粘弹弹性体，存在一相位角 δ (介于 0° 到 90° 之间)，见图 1。

复数应变 γ^* 和复数应力 S^* 有实数部分 (γ' , S') 和虚数部分 (γ'' , S'')，按分部形式定义为：

$$\gamma^* = \gamma' + i\gamma'' \quad (5)$$

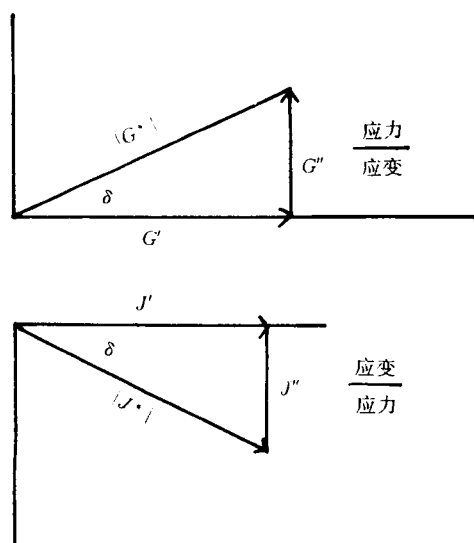


图 1 按正弦规律分解的模量和柔量矢量

$$S^* = S' + iS'' \quad (6)$$

式中 $\gamma' = \gamma_0 \cos \omega t$;

$$\gamma'' = \gamma_0 \sin \omega t$$

$$S' = S_0 \cos(\omega t + \delta);$$

$$S'' = S_0 \sin(\omega t + \delta)。$$

复数模量 G^* 定义为:

$$\begin{aligned} G^* &= \frac{S^*}{\gamma^*} = \frac{S_0 e^{i\omega t} e^{i\delta}}{\gamma_0 e^{i\omega t}} \\ &= \frac{S_0 e^{i\delta}}{\gamma_0} = \frac{S_0}{\gamma_0} \cos \delta + i \frac{S_0}{\gamma_0} \sin \delta \end{aligned} \quad (7)$$

按分部形式:

$$G^* = G' + iG'' \quad (8)$$

式中 $G' = \frac{S_0}{\gamma_0} \cos \delta$;

$$G'' = \frac{S_0}{\gamma_0} \sin \delta。$$

因为 G' 与 γ^* 和 S^* 的实数部分同相,故它与弹性和能量储存相关,因此, G' 被称为动态模量或储存模量或弹性模量。另一方面,分量 G'' 与 γ^* 和 S^* 的实数部分有 90° 的相位差,故它与粘性能量耗散相关,因此, G'' 被称为损耗模量或粘性模量。

另一个重要参数是所谓的损耗因数或损耗角正切,即 $\tan \delta$, 定义为:

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (9)$$

如果实验数据以 $|G^*|$ 和角度 δ 的形式给出,则模量的各部分可按下述各式计算:

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (10)$$

$$G' = |G^*| \cos \delta$$

$$G'' = |G^*| \sin \delta$$

G 被称作剪切模量,然而,类似的伸长模量 E^* 的公式可表述为:

$$E^* = E' + iE'' \quad (11)$$

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

另一个重要参数是柔量。柔量的定义是 $1/G^*$ (模量倒数)。

复数柔量 J^* 为:

$$J^* = \frac{1}{G^*} = J' - iJ'' \quad (12)$$

式中实数部分 J' 为与应力比同相的应变率。

$$J' = \frac{G'}{|G^*|^2} = \frac{G'}{G'^2 + G''^2} \quad (13)$$

式中 J' —— 储存柔量。

虚数部分 J'' 为与应力比有 90° 相位差的应变率。

$$J'' = \frac{G''}{|G^*|^2} = \frac{G''}{G'^2 + G''^2} \quad (14)$$

式中 J'' —— 损耗柔量。

在本文中, G' , G'' , G^* 和 J'' 将用来预测轮胎使用性能。

2 结果与讨论

2.1 滚动阻力

几位科学家在此之前已将滚动阻力与 $50-100^\circ\text{C}$ 温度下的 $\tan \delta$ 联系起来了^[1-3]。从理论上讲,如果粘性模量比弹性模量小, $\tan \delta$ 值则较小,因而耗散能(即转化成摩擦或热能的能量)就较小。损耗能愈小,滚动阻力愈低。

为找到滚动阻力与 75°C 温度下 $\tan \delta$ 值的关系,制备了胎面胶 $\tan \delta$ 值不同的 P195/75R14 规格试验胎。评价用所有试验胎的结构和硫化条件都相同。在 67 英寸转鼓上用标准方法测量滚动阻力。由于滚动阻力绝对值或实测值的置信度问题,本文采用滚动阻力相对值。计算了基于 75°C 温度, $\tan \delta$ 值为 0.18 的乳聚丁苯橡胶 (E-SBR)/BR 胎面的所有轮胎的滚动阻力相对值。计算结果与 75°C 温度下的 $\tan \delta$ 值的关系曲线示于图 2。结果清楚地表明,胎面胶 75°C 温度下的 $\tan \delta$ 值与滚动阻力成正比。在本研究中, 75°C 温度下的 $\tan \delta$ 值愈小,所得滚动阻力愈低。

2.2 湿滑牵引性能和湿操纵性能

轮胎在 75°C 温度下滚动变形频率约为 $10-100\text{Hz}$ 。然而,由于路面的不平整,轮胎滑动中决定抗湿滑性的胎面表面在室温下的微观变形频率约为 10^5-10^6Hz 。在如此高的频率下不可能测量实际粘弹性能。用在较低频率下的测量值计算的高频粘弹性能结果示

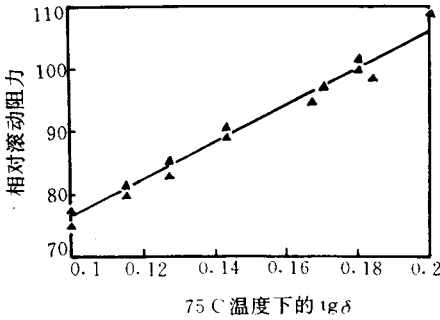


图2 滚动阻力与 $\text{tg}\delta$ 的关系

于图3。图3表明,在0℃温度、 10^2Hz 频率下测得的损耗因数 $\text{tg}\delta$ 值与在室温、 10^6Hz 频率下的计算值相关联。因此,可以用0℃温度下的损耗模量 G'' 或在0℃温度、约10— 10^2Hz 频率下的 $\text{tg}\delta$ 预测湿滑牵引性。

预测湿牵引性能的另一种方法是测量0℃温度下的回弹值。0℃温度下的 $\text{tg}\delta$ 和损耗模量 G'' 与0℃温度下的回弹性相关,而100℃温度下的 $\text{tg}\delta$ 与100℃温度下的Bashore回弹值相关性密切。因此,轮胎配方人员用100℃温度下的回弹性预测滚动阻力,用0℃温度下的回弹性预测湿牵引性能。

用具有不同 $\text{tg}\delta$ 值(0℃温度时)的胎面胶制成P175/70R14规格轮胎。用ASTM湿牵引方法测量装车后轮胎的实际湿牵引性能,结果示于图4。湿牵引性与0℃温度下的回弹性的关系则示于图5。轮胎的湿牵引性能直接与湿操纵性能相关。为改进湿牵引和

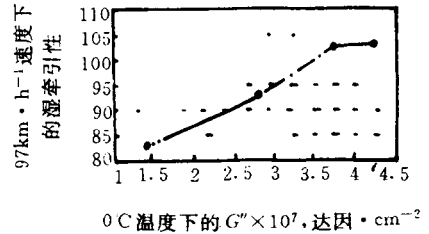
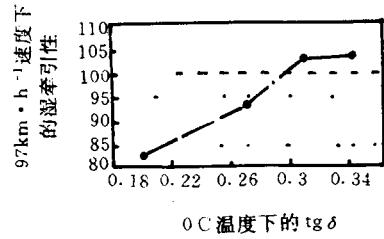


图4 湿牵引性能与0℃温度下的 $\text{tg}\delta$ 和 G'' 的关系

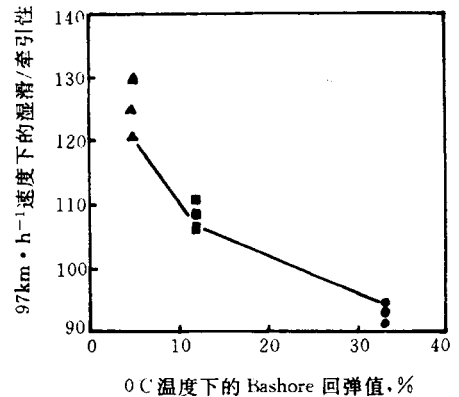


图5 湿滑牵引性能与0℃温度下的Bashore回弹值的关系

▲—5%; ■—12%; ●—33%

湿操纵性能,应提高0℃温度下的 $\text{tg}\delta$ 值或0℃温度下的损耗模量 G'' ,以使湿条件下产生摩擦作用的耗散能增大。

2.3 干牵引性能

干路面条件下的摩擦力约为湿路面条件下的3倍。因此,预测结果的差异较小,给配方人员带来困难。以前,0℃温度下的Bashore回弹值用于预测干牵引性能,见图6。Futamura^[3]撰文指出损耗柔量与干牵引性能的相关性很好。用 $\text{tg}\delta$ 值不同的胎面胶

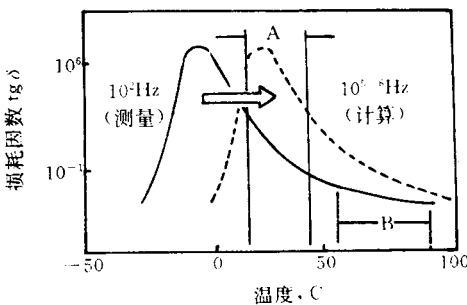


图3 $\text{tg}\delta$ 在 10^6Hz 频率下的计算值和在 10^2Hz 频率下的测量值与温度的关系

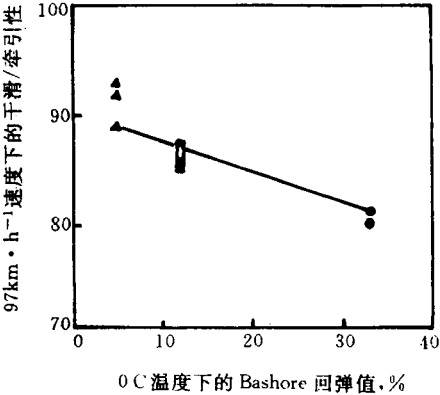


图 6 干滑牵引性能与 0 °C 温度下 B Shore 回弹值的关系
图注同图 5

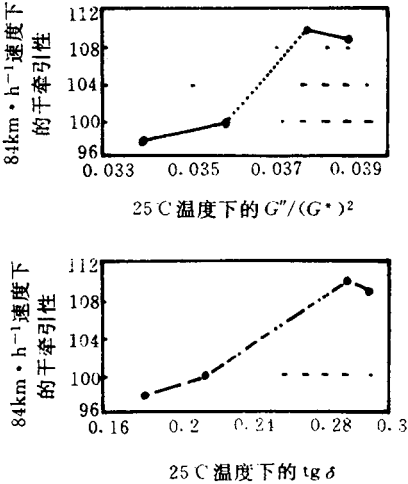


图 7 干牵引性能与 25 °C 温度下损耗柔量 和 $\text{tg}\delta$ 的关系

制备 P175/70R14 规格轮胎。在 $84\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 下测量这 4 组轮胎的干牵引性能。然而, 60°C 温度下在干路面上滑动时胎面表面的微观形变频率约为 $10^5\text{--}10^6\text{Hz}$ 。同样, 在这么高的频率下无法测量实际粘弹性能。高频率下的粘弹性能可从 10^2Hz 低频率下的测量值计算而得。图 3 表明, 在室温、 10^2Hz 频率下的 $\text{tg}\delta$ 值与 60°C 温度、约 $10^5\text{--}10^6\text{Hz}$ 频率下的 $\text{tg}\delta$ 值相关。因此, 可用室温下的 $\text{tg}\delta$ 或损耗柔量

预测干牵引性能, 结果示于图 7。 $\text{tg}\delta$ 或损耗柔量愈大, 干牵引性能愈好。

2.4 干燥操纵性能和乘坐舒适性

在 80 年代末, 美国轮胎市场开始向欧洲风格的低断面轮胎, 即所谓的高性能轮胎或旅游轮胎方向发展。这些高性能轮胎必须具备更优异的耐热性、耐久性、耐氧化龟裂性, 同时为满足高速安全性要求还必须具有更好的抗滑牵引性及操纵性。为改善操纵性, 应提高子午线轮胎胎面的刚性, 以增大转弯系数。有两个方法可提高胎面胶刚性。一是减小钢丝带束层的角度, 但这有可能大大降低乘坐舒适性; 二是提高胎面胶的动态模量或邵尔 A 型硬度, 从而增大轮胎转弯系数。本文仅从胎面胶角度进行讨论, 以改进轮胎的操纵性和乘坐舒适性。要提高轮胎的转弯系数, 必须增大胶料在室温下的动态模量或复数模量。转弯系数的增大可改善轮胎的操纵性。然而, 要改善乘坐舒适性, 应降低室温下的动态模量或复数模量。因此, 同时改善操纵性和乘坐舒适性是不可能的。轮胎配方人员和工程师们总是试图对各种专用车辆轮胎的使用性能进行优化。

2.5 冰雪路面牵引性能

雪地轮胎已采用天然橡胶和玻璃化转变温度很低的 BR 并用配方, 以获得低温 (0°C 温度以下) 下的低动态模量。有些轮胎公司用海绵胶胎面来降低 0°C 温度下轮胎的动态模量或复数模量。Futamura^[3]曾采用英国便携式滑动试验仪在实验室中将轮胎置于冰室内研究冰雪路面牵引性能与动态柔量 ($1/G'$) 的关系。他发现, 冰面牵引性能随聚合物类型 (T_g) 和炭黑用量不同而不同。事实上, 炭黑用量的影响与聚合物类型一样大。低 T_g 聚合物与较低用量炭黑相结合可降低动态模量。冰面牵引性能取决于较低温度下胎面胶刚性。冰面牵引性能与动态柔量的关系示于图 8。

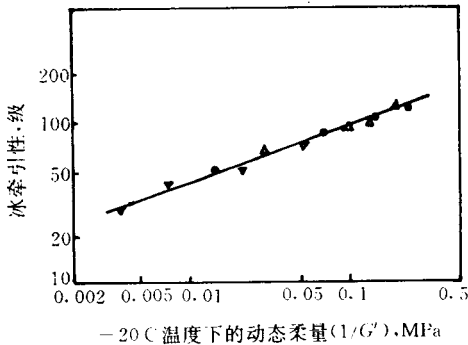


图 8 实验室冰面牵引性能与
动态柔量的关系

2.6 耐久性(生热性)

轮胎的耐久性与轮胎的结构、均匀性、帘布和胶料的粘合性能、胶料的物理性能和滞后作用有关。本文仅讨论胶料的滞后作用。轮胎破坏通常发生在温度较高的部位,如带束层边缘脱层或胎侧较低部位(胎圈三角胶)。因此,采用滞后作用小的胶料,降低轮胎在行驶中的生热量是至关重要的。如果在约 50—100℃温度下胶料的 $\text{tg } \delta$ 值较小,则在逐步加速(SUS)和逐步加载(SUL)试验中轮胎的耐久性将得以改善。

2.7 胎面磨耗

已有数篇论文^[1,4]研究了胎面耐磨性。可从几个方面改善胎面耐磨性。最重要的是所用聚合物的种类。聚合物的玻璃化转变温度是预测磨耗的关键参数(见图 9)。另外,聚合物的分子量也是一个重要参数。炭黑生产部门试图通过提供高结构和小粒子炭黑(表面积较大)来改善胎面耐磨性。轮胎设计人员试图从轮胎结构设计上改善胎面耐磨性。显然,低温破坏能与粘弹性能的相关性很好。因此,为增大低温(0℃温度下)破坏能,应降低动态模量或复数模量。该理论与诸如可提高耐磨性的 BR 等低 T_g 聚合物的应用相符。

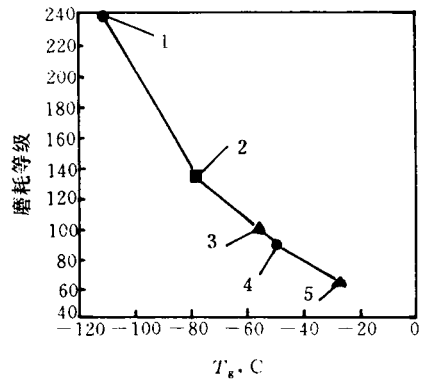


图 9 磨耗等级与 T_g 的关系

1—BR; 2—60E-SBR1500/40BR; 3—E-SBR1500
(苯乙烯含量 23.5%); 4—S-SBR(苯乙烯含量
25%); 5—E-SBR1516(苯乙烯含量 40%)

3 结论

研究结论示于附表。

附表 研究结论

轮胎使用性能	实验室粘弹性能 预测参数	参数的 期望 方向
湿牵引性能	0℃温度下的 G'' 或 $\text{tg } \delta$	高
湿操纵性能	0℃温度下的 G'' 或 $\text{tg } \delta$	高
干牵引性能	室温下的 J'' 或 $\text{tg } \delta$	高
干操纵性能	室温下的 G''	高
滚动阻力	75℃温度下的 $\text{tg } \delta$	低
生热和高速性	75℃温度下的 $\text{tg } \delta$	低
冰雪地面牵引性能	-25℃温度下的 G'' 或 G'	低
转弯系数	室温下的 G'' 或 G'	高
胎面寿命	聚合物的 T_g	低
	-32℃温度下的 G'' 或 G'	低
乘坐舒适性	室温下的 G'' 或 G'	低

参考文献(略)

译自“1994 年国际橡胶会议论文
文集”,第 4 册,P18—33