

# 纤维骨架材料技术讲座

## 第 5 讲 纤维骨架材料对橡胶制品性能的影响

高称意  
(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100039)

中图分类号: TQ 330. 38<sup>+</sup>9; TQ 336. 2 文献标识码: E 文章编号: 1000-890X (2001) 07-0439-04

### 1 纤维骨架材料对轮胎性能的影响

#### 1.1 动态模量和损耗因子

在行驶运转的轮胎中, 增强帘线经受反复的拉伸、压缩、弯曲和扭转等多种应力的作用, 有些作用还是周期性的。

合成纤维帘线是高分子材料, 其力学行为属粘弹性。在线性粘弹行为范围内(帘线的应变幅度小于 1%), 轮胎的滚动阻力和燃油消耗与增强帘线的动态模量 ( $E^*$ ) 和损耗因子 ( $\tan \delta$ ) 有直接关系。

动态模量与贮存模量(或弹性模量,  $E'$ ) 和损耗模量 ( $E''$ ) 的关系如下:

$$\begin{aligned} E' &= E^* \cos \delta \\ E'' &= E^* \sin \delta \end{aligned}$$

式中  $\delta$  为滞后相角。

曾有研究认为, 与橡胶对轮胎滚动阻力的贡献相比, 增强帘线对轮胎滚动阻力的贡献较小, 只占 20%~40% 的比例。但最新的研究结果表明, 增强帘线对轮胎滚动阻力有很大的影响, 其对轮胎滚动阻力贡献的大小取决于驱动状态、充气压力、轮胎结构等因素, 因此可根据轮胎结构、最终用途及驱动状态选择适宜的增强帘线。

帘线受动态应力作用时, 损耗的能量转变为热能。帘线的损耗能量或损耗因子越大, 其动态力学性能越差, 表现为在轮胎行驶时生热多, 这显然对轮胎的性能有不利影响。

帘线的动态力学性能可采用粘弹仪进行测定。试验时, 对试样施加低频率的交变应变, 粘

弹仪即自动绘出每一周期内帘线的应力-应变曲线, 并用积分方法计算出能量损耗, 进而得出试样的动态模量和损耗因子。

帘线贮存模量的对数、损耗模量的对数及损耗因子与温度的关系分别见图 1~3。

从图 2 和 3 可以看出, 每种帘线都有一个使损耗模量和损耗因子出现峰值的温度。帘线的损耗模量和损耗因子越小, 出现峰值的温度越高, 动态力学性能越好。因此, 在进行轮胎设计时, 应避免选用峰值温度与轮胎最高使用温度接近的帘线。

#### 1.2 滞后性能

在实际使用时, 轮胎增强帘线的应变幅度大于 1%, 表现为非线性粘弹行为。为更真实地考察帘线的粘弹行为对轮胎性能的影响, 通常应进行大应变幅度的粘弹行为试验。一般采

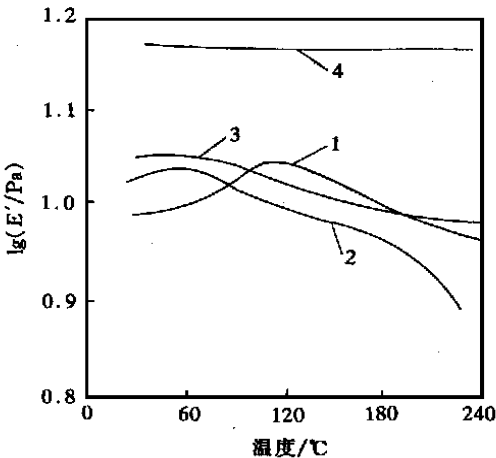


图 1 轮胎帘线贮存模量的对数与温度的关系  
1—聚酯; 2—尼龙 6; 3—尼龙 66; 4—芳纶

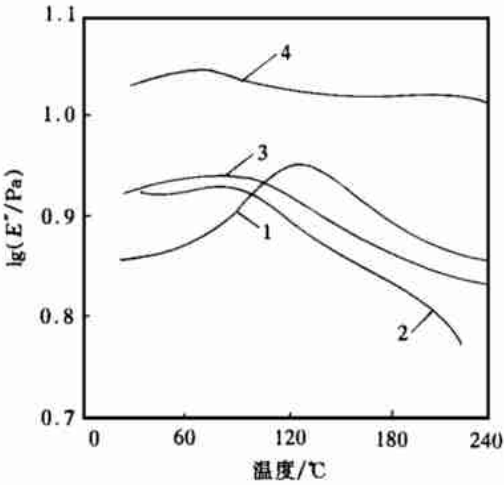


图 2 轮胎帘线损耗模量的对数与温度的关系  
注同图 1

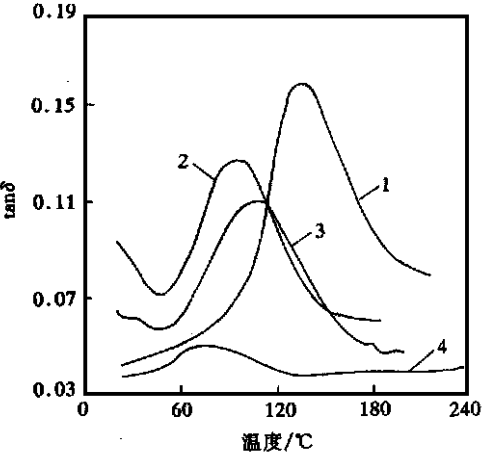


图 3 轮胎帘线损耗因子与温度的关系  
注同图 1

用两种方法: (1) 利用大应变动态粘弹仪; (2) 利用能自动控制帘线拉伸-回复操作并自动记录任意周期内拉伸和回复损耗能量的 CRE 型材料试验机。

帘线力学性能滞后性的宏观表现是生热, 生热对轮胎的耐久性有不利影响。由于应变滞后于应力, 帘线在受到周期性的拉伸-回复作用时, 其拉伸与回复曲线并不重合(理想虎克弹性材料的拉伸-回复曲线完全重合), 而是形成一个封闭的月牙状的圈形, 称之为滞后圈。

从帘线拉伸-回复试验的应力-应变曲线图上可以得出以下结论:

(1) 帘线在动态应力作用下的塑性变形。在每一周期内, 帘线回复到应力为零时, 其应变

并不为零, 此应变就是帘线产生的塑性变形。

(2) 每个拉伸-回复周期内的拉伸功和回复功在数值上等于拉伸曲线、回复曲线下方至横坐标轴所形成图形的面积, 这两个面积之差即为滞后圈的面积, 在数值上等于帘线在该周期内的损耗功。

(3) 损耗功以生热形式散发, 损耗功与拉伸-回复的变化频率之积即为单位时间的生热。

(4) 损耗功与拉伸功之比即为损耗因子。

拉伸-回复试验条件可分为在一定应力范围内和在一定应变范围内两种条件进行。在一定应力范围内, 帘线的拉伸-回复试验结果见表 1。

从表 1 可以看出, 随拉伸-回复周次的增多, 所有帘线的拉伸功、回复功和损耗功都呈递减趋势, 递减速率从大到小的顺序为: 人造丝> 聚酯和芳纶> 尼龙 6> 尼龙 66; 帘线的塑性变形呈递增趋势, 人造丝的塑性变形增大幅度最大, 而芳纶的塑性变形最大; 帘线的损耗因子呈递减趋势, 递减速率从大到小的排列顺序是: 人造丝> 芳纶> 尼龙 6> 聚酯> 尼龙 66。人造丝帘线的滞后现象最不明显, 即人造丝帘线在周期性动态应力作用下的生热最小, 而且尺寸稳定性极佳, 因此适宜制造高性能轿车子午线轮胎。

帘线定伸长拉伸-回复试验的特点是在相同应变条件下, 拉伸应力随拉伸-回复周次的增多而逐渐减小, 损耗功也越来越小, 当损耗功接近零时, 表现出类似弹性材料的行为。此时可以认为帘线永远不会被破坏。

在相同应变条件下, 尼龙帘线的拉伸应力比人造丝帘线小。随试验周次的增多, 人造丝帘线的滞后损失率始终大于尼龙帘线, 且差别趋于稳定。

可以把帘线在定应力往复拉伸试验中的应变变化理解为动态蠕变行为, 把帘线在定伸长往复拉伸试验中的应力变化理解为动态应力松弛行为。

聚酯帘线的拉伸-回复试验滞后性能表现为应变越大, 损耗因子越大, 生热速率也越大, 在 110 ~ 140 °C 内, 损耗因子及生热速率出现峰

表 1 浸渍帘线的拉伸-回复试验结果

| 拉伸<br>周次     | 回复<br>功/J | 拉伸<br>功/J | 回复<br>功/J | 损耗<br>功/J | 损耗<br>因子 | 塑性变<br>形/mm |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-------------|
| 2100/2 尼龙 66 |           |           |           |           |          |             |
| 1            | 2.006     | 1.029     | 0.977     | 0.487     | 5.5      |             |
| 2            | 1.596     | 1.033     | 0.563     | 0.353     | 6.7      |             |
| 3            | 1.529     | 1.023     | 0.506     | 0.331     | 7.5      |             |
| 10           | 1.405     | 0.997     | 0.408     | 0.290     | 9.3      |             |
| 30           | 1.370     | 0.997     | 0.373     | 0.272     | 10.3     |             |
| 50           | 1.340     | 0.982     | 0.358     | 0.267     | 10.9     |             |
| 1400/2 尼龙 6  |           |           |           |           |          |             |
| 1            | 1.293     | 0.652     | 0.641     | 0.496     | 5.2      |             |
| 2            | 0.962     | 0.633     | 0.329     | 0.342     | 6.2      |             |
| 3            | 0.936     | 0.639     | 0.297     | 0.317     | 6.7      |             |
| 10           | 0.858     | 0.615     | 0.243     | 0.283     | 8.3      |             |
| 30           | 0.823     | 0.603     | 0.220     | 0.267     | 9.3      |             |
| 50           | 0.815     | 0.603     | 0.212     | 0.260     | 10.0     |             |
| 1100/3 聚酯    |           |           |           |           |          |             |
| 1            | 0.916     | 0.440     | 0.476     | 0.520     | 1.2      |             |
| 2            | 0.710     | 0.435     | 0.275     | 0.387     | 2.2      |             |
| 3            | 0.682     | 0.440     | 0.242     | 0.352     | 2.7      |             |
| 10           | 0.597     | 0.414     | 0.183     | 0.307     | 3.8      |             |
| 30           | 0.568     | 0.405     | 0.163     | 0.287     | 5.0      |             |
| 50           | 0.550     | 0.396     | 0.154     | 0.280     | 5.4      |             |
| 1830/2 人造丝   |           |           |           |           |          |             |
| 1            | 0.697     | 0.306     | 0.391     | 0.561     | 1.0      |             |
| 2            | 0.517     | 0.301     | 0.218     | 0.422     | 2.1      |             |
| 3            | 0.469     | 0.292     | 0.177     | 0.377     | 2.8      |             |
| 10           | 0.381     | 0.260     | 0.121     | 0.318     | 4.6      |             |
| 30           | 0.338     | 0.262     | 0.076     | 0.225     | 6.1      |             |
| 50           | 0.334     | 0.271     | 0.063     | 0.189     | 6.7      |             |
| 1680/3 芳纶    |           |           |           |           |          |             |
| 1            | 1.571     | 0.806     | 0.765     | 0.487     | 1.6      |             |
| 2            | 1.163     | 0.816     | 0.347     | 0.298     | 2.0      |             |
| 3            | 1.132     | 0.835     | 0.297     | 0.262     | 2.2      |             |
| 10           | 1.044     | 0.818     | 0.226     | 0.216     | 2.7      |             |
| 30           | 0.954     | 0.765     | 0.189     | 0.198     | 3.2      |             |
| 50           | 0.959     | 0.779     | 0.180     | 0.188     | 3.3      |             |

值,应变越大,出现峰值的温度越低。高速行驶中的轮胎或承受大负荷作用的轮胎很容易达到这个温度,此时聚酯帘线的滞后现象最为严重。这就是聚酯帘线不适宜用作高速轿车轮胎或大中型载重轮胎增强材料的原因。

人造丝和芳纶帘线的损耗因子及损耗功随温度升高变化不大,因此适宜制造高性能轮胎。

轮胎胎肩部位帘线的应变幅度比胎侧和胎冠部位帘线大,因此胎肩帘线的粘弹性损失比胎侧和胎冠帘线高 10 倍。轮胎不同部位帘线的滞后损失见表 2。

轮胎在使用中的温度取决于载荷和速度,也随轮胎种类而异。载重轮胎的胎肩部位温度可达 130℃,且多层胎体轮胎由于普遍存在的超载、超速的状况,实际温度可能还要超过这个温度。载重轮胎内帘线生热对轮胎温度升高的贡献率超过 50%,轿车轮胎中这个比例稍低。

为便于比较不同帘线在轮胎内的生热,对各种帘线在 20℃下的强度以芳纶为基准进行修正,即考虑了使用不同帘线所需质量不同这个因素,计算帘线在等强力状态下的生热情况,这种数据处理方式被称为归一化处理,结论是:

(1)各种纤维材料可分为两类:结晶度较低、有明晰无定形区的柔性分子链的纤维(如尼龙和聚酯等,其滞后生热较高)和高结晶度的刚性分子链的纤维(如人造丝和芳纶等,滞后生热较低)。

(2)尼龙和聚酯的滞后损耗功(生热)与试验应力范围的关系相似,但有别于芳纶和人造丝。

表 2 轮胎不同部位帘线的滞后损失

| 部 位       | 帘线应变幅度/<br>橡胶应变幅度 | 帘线生热所<br>占比例/%       | 负荷增大的影响                     | 速度提高的影响   |
|-----------|-------------------|----------------------|-----------------------------|-----------|
| 轿车斜交轮胎胎侧  | 均很小               | 89                   | —                           | —         |
| 轻型载重轮胎胎侧  | 1/10              | ≈50                  | 帘线生热贡献率提高                   | 帘线生热贡献率提高 |
| 轿车子午线轮胎胎侧 | > 1/10            | —                    | 帘线与橡胶的应变幅度均提<br>高,帘线的生热高于橡胶 | —         |
| 轿车斜交轮胎胎冠  | 1/5               | 85(帘线生热速率<br>7 倍于橡胶) | 帘线与橡胶的应变<br>幅度均提高           | —         |
| 轻型载重轮胎胎冠  | < 1/5             | 50                   | —                           | —         |
| 轿车子午线轮胎胎冠 | 2 倍于轻型载重<br>子午线轮胎 | 10                   | 帘线、橡胶的生热<br>对负荷不敏感          | —         |

(3)人造丝的生热性比芳纶稍大,但温度依赖性远不像聚酯和尼龙帘线那样强。

(4)芳纶在任何温度下的生热都很低,只及尼龙、聚酯的 1/20~1/7。

(5)不同结构芳纶帘线的生热性能基本相同。

不同帘线在 20 和 130 ℃下的静态力学性能和相对生热见表 3。

表 3 不同帘线在 20 和 130 ℃下的静态力学性能和相对生热

| 项 目                                       | 芳纶     | 芳纶     | 尼龙 6   | 尼龙 66  | 高模低缩聚酯 | 普通聚酯   | 人造丝    |
|-------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 密度/( $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )      | 1.44   | 1.44   | 1.14   | 1.14   | 1.40   | 1.40   | 1.53   |
| 帘线结构                                      | 1680/2 | 3360/3 | 1870/2 | 1870/2 | 1670/2 | 1670/2 | 1830/2 |
| 捻度/(捻 $\cdot\text{m}^{-1}$ )              | 405    | 230    | 340    | 340    | 395    | 395    | 395    |
| 断裂强度/( $\text{cN}\cdot\text{dtex}^{-1}$ ) |        |        |        |        |        |        |        |
| 20 ℃                                      | 13.8   | 13.4   | 6.84   | 7.10   | 5.27   | 5.27   | 3.53   |
| 130 ℃                                     | 1.20   | 1.17   | 4.90   | 5.00   | 3.80   | 3.80   | 3.50   |
| 定负荷伸长率 <sup>1)</sup> /%                   | 1.2    | 1.5    | 8.0    | 7.1    | 2.7    | 2.8    | 1.35   |
| 归一化因子                                     | 1.0    | 1.03   | 2.02   | 1.94   | 2.62   | 2.62   | 3.81   |
| 相对生热 <sup>2)</sup>                        |        |        |        |        |        |        |        |
| 5%断裂强力                                    | 1.0    | 1.3    | 15     | 15     | 18     | 15     | 1.3    |
| 10%断裂强力                                   | 1.0    | 1.3    | 12     | 12     | 15     | 12     | 1.3    |
| 15%断裂强力                                   | 1.0    | 1.1    | 10     | 11     | 15     | 12     | 1.8    |
| 20%断裂强力                                   | 1.0    | 1.1    | 8      | 10     | 14     | 13     | 2.1    |
| 25%断裂强力                                   | 1.0    | 1.0    | 7.5    | 8.5    | 12.5   | 11.5   | 2.2    |

注:捻系数为 205;1)20 ℃,15%断裂强力;2)以 130 ℃,1680dtex/2 芳纶为基准。

尼龙和聚酯帘线的生热在玻璃化温度附近出现峰值,而峰值出现的温度和出现峰值的温度范围有所不同。芳纶在整个试验温度范围内的生热接近恒定,比聚酯和尼龙帘线低 1/15~1/5。人造丝的生热稍有增加。人造丝和芳纶帘线在任何温度下的损耗功变化不大,因此适宜作为高速节能轮胎的骨架材料。

1.3 耐疲劳性能

轮胎帘线的耐疲劳试验方法及装置按被测帘线的状态可分为两类:一类是被测试样为帘线,另一类是被测试样为帘线-橡胶复合材料,后者更加接近帘线的真实使用情况,能更准确地反映帘线的耐疲劳性能,通常被称为“在橡胶内”帘线疲劳试验。

纤维骨架材料的疲劳性能受捻度、浸渍材料、覆胶量及橡胶性能等因素的影响。仅靠某一种疲劳试验方法还不可能对帘线所有的疲劳应力或疲劳应变做出评价,人们发明了各种不同的纤维骨架材料疲劳性能试验机及其各自相应的试验程序。

本节介绍“在橡胶内”帘线疲劳性能试验方

法及相应的试验装置。

(1)Mallory 胶管试验

Mallory 胶管试验的试样为橡胶胶管,被测帘线沿与胶管轴平行的方向以一定的密度固定在胶管内,并与内、外层橡胶硫化为一个整体。为阻止胶管充气后周向膨胀,沿周向缠绕低变形的帘线。Mallory 胶管疲劳试验的装置如图 4 所示。

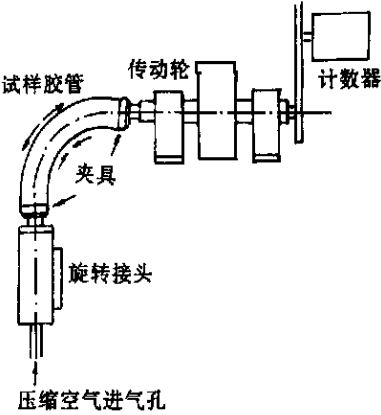


图 4 Mallory 胶管疲劳试验装置

(未完待续)