

温度及频率对轮胎橡胶材料生热率的影响

何燕¹, 刘丽¹, 马连湘¹, 孙效俭²

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 山东海化股份有限公司 天祥化工厂, 山东 寿光 262737)

摘要:研究子午线轮胎用10种胶料的生热特性。通过试验测定10个部位胶料的动态力学特性值, 分别得到其生热率-温度和生热率-频率变化曲线; 然后进行二元回归分析, 得到各胶料生热率随温度和频率变化的关系式。所得关系式可用于轮胎温度场滞后热源的定量分析。

关键词:轮胎; 胶料; 生热率; 温度; 频率; 二元线性回归

中图分类号: TQ330.7; U463.341

文献标识码: B

文章编号: 1006-8171(2006)06-0323-06

轮胎生热是由胶料的重复变形引起的。由于轮胎结构的复杂性, 不同部位胶料产生的热量不同, 为了使轮胎断面温度分布合理, 各部位所用胶料的力学性能应有所不同。研究轮胎各部位胶料的生热特性, 在温度场分析中, 可以用有限元法将其离散到各个节点上计算得到整个轮胎断面的温度场分布, 为轮胎结构和配方设计提供依据。本工作对子午线轮胎各部位胶料的生热率与温度和频率的关系进行研究。

1 轮胎滞后生热机理

由于粘性阻力的存在, 负荷下运转的轮胎胶料和帘布层受力产生的是粘弹性变形。弹性变形在周期运转下可以恢复, 但粘性变形不能恢复, 它被吸收而转变成热, 成为轮胎温度升高的滞后热源。滞后热源引起的温度升高将导致硫化胶化学和物理性能下降, 严重时还会引起轮胎爆破。由于橡胶材料动态力学性能呈现非线性和粘弹性, 人们只能用近似的方法来确定这种热源^[1~4]。

滞后热源与材料的种类、材料所受的周期性应力的大小和频率以及材料所处的温度环境等因素有关。

根据轮胎滞后生热数学模型, 得到每个滚动周期轮胎所产生的热量(Q)如下^[5]:

$$Q = \pi \epsilon_0^2 E' \tan \delta \quad (1)$$

式中, ϵ_0 为应变振幅, E' 为储存弹性模量, $\tan \delta$ 为

损耗因子。

由轮胎的滚动速度(v)和轮胎直径(D)可确定轮胎的滚动周期(t)

$$t = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{3.6\pi D}{v} \quad (2)$$

则单位面积、单位时间内胶料的生热率(Q')可表示为:

$$Q' = Qf = \frac{Q}{t} = \frac{E' \epsilon_0^2 v \tan \delta}{3.6D} = \pi f E' \epsilon_0^2 \tan \delta \quad (3)$$

式中, f 为频率。

本工作进行的胶料生热率研究是根据轮胎的实际运动状况确定轮胎行驶的频率范围, 用动态分析方法确定各种动态特性值, 然后求得生热率。

2 实验

2.1 胶料

试验用胶料为子午线轮胎的胎体帘布层胶、胎面基部胶、钢丝带束层胶、锦纶冠带层胶、胎侧胶、胎圈护胶、胎面胶、气密层胶、钢丝包胶和三角胶。胶料完全按相应标准经混炼和硫化而成。

2.2 试样制备

将10种胶料裁剪成哑铃状试样, 每种胶料做3个平行试验, 取平均值。试样尺寸为2 mm×10 mm×4 mm。

2.3 试验仪器

胶料的动态力学特性值用德国耐驰公司生

产的DMA242型测试仪进行测试^[5]。试验温度为-20~+100℃;频率为5,10,16.6,25和33.3 Hz;应变振幅为6%;加热速率为3℃·min⁻¹。

3 结果与讨论

3.1 生热率计算

将试验测得的各种胶料动态力学特性值代入式(3)计算得到 Q' 。由于篇幅关系,在此仅列出5种胶料 Q' 随温度(θ)和 f 变化的曲线。

(1)胎体帘布层胶

胎体帘布层胶的 Q' - θ 和 Q' - f 曲线分别如图1和2所示。

由图1可以看出,在试验频率下,胎体帘布层胶的生热率随温度升高呈逐渐下降趋势,且当温度低于0℃时,生热率随温度的变化较明显,而当温度高于0℃时,生热率随温度的变化逐渐趋于平缓;频率越高,生热率随温度的变化趋势越明显。

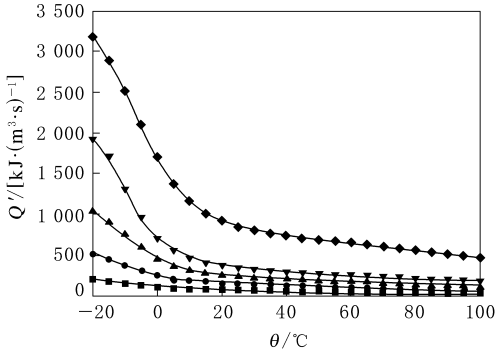


图1 胎体帘布层胶的 Q' - θ 曲线

频率(Hz): ■—5; ●—10; ▲—16.6; ▼—25; ◆—33.3。

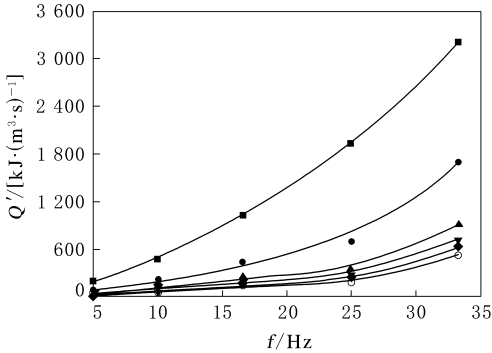


图2 胎体帘布层胶的 Q' - f 曲线

温度(℃): ■—-20; ●—0; ▲—20; ▼—40; ◆—60; ○—80。

由图2可以看出,在同一温度下,胎体帘布层胶的生热率随着频率的增大而逐渐增大,且低温时生热率随频率的增大幅度大于高温时。在轮胎行驶温度范围(0~80℃)内,当轮胎的行驶频率在5~25 Hz时,胎体帘布层胶的生热率与频率基本呈线性关系,但当频率大于25 Hz后,生热率随频率的增大急剧增加;低于0℃时,生热率随频率的增加呈现一种曲线变化关系。

(2)钢丝带束层胶

钢丝带束层胶的 Q' - θ 和 Q' - f 曲线分别如图3和4所示。

由图3可以看出,温度低于-10℃时钢丝带束层胶的生热率随温度的升高呈增大趋势,而当温度高于-10℃时钢丝带束层胶的生热率随温度的升高而减小,在-20~0℃之间出现一个生热率峰值,且频率越大,峰越明显,这可能与钢丝带束层胶的配方有关。

由图4可以看出,钢丝带束层胶生热率随频率的变化趋势与胎体帘布层胶相同。

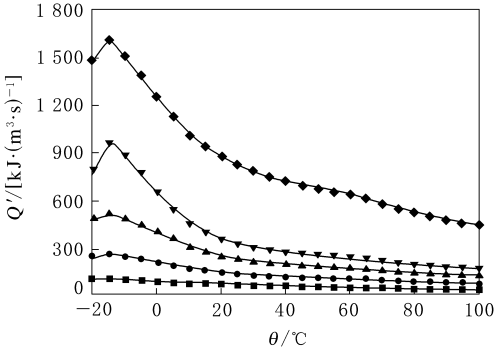


图3 钢丝带束层胶的 Q' - θ 曲线

注同图1。

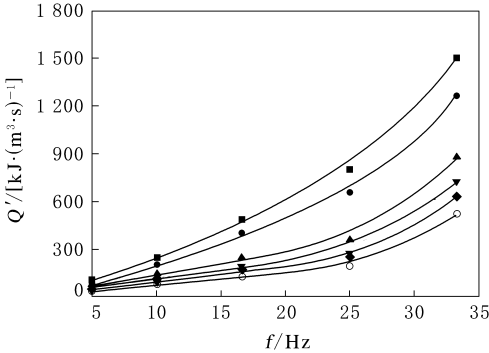


图4 钢丝带束层胶的 Q' - f 曲线

注同图2。

(3)胎圈护胶

胎圈护胶的 $Q'-\theta$ 和 $Q'-f$ 曲线分别如图 5 和 6 所示。

从图 5 可以看出,在测试温度范围内,胎圈护胶生热率在频率为 5,10 和 16.6 Hz 时随温度升高基本没有变化;频率为 25 和 33.3 Hz 时,温度低于 60 $^{\circ}\text{C}$,生热率随温度升高也基本保持不变,温度高于 60 $^{\circ}\text{C}$,生热率则随温度的升高呈下降趋势。

由图 6 可以看出,随着频率的增大,胎圈护胶生热率明显增大。

(4)气密层胶

气密层胶的 $Q'-\theta$ 和 $Q'-f$ 曲线分别如图 7 和 8 所示。

由图 7 可见,气密层胶生热率随温度的变化趋势与钢丝带束层胶基本一致,只是生热率峰值向高温方向移动,约在 0 $^{\circ}\text{C}$,这与其配方有关。

由图 8 可见,随频率的增大,各温度下气密层胶的生热率均增大;在 0~80 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,温度

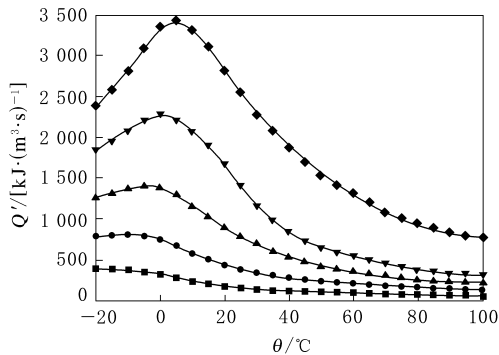


图 7 气密层胶的 $Q'-\theta$ 曲线
注同图 1。

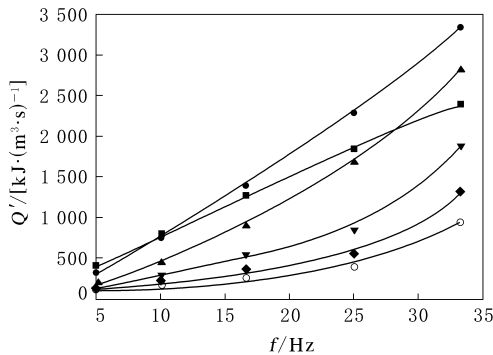


图 8 气密层胶的 $Q'-f$ 曲线
注同图 2。

越高,生热率随频率增大的幅度越小,而在 -20 $^{\circ}\text{C}$ 时,生热率随频率增大的幅度也较小。

(5)三角胶

三角胶的 $Q'-\theta$ 和 $Q'-f$ 曲线分别如图 9 和 10 所示。

由图 9 可以看出,在测试温度范围内,频率越大,三角胶生热率随温度的变化幅度越大,频率为 33.3 Hz 时出现明显的谷值和峰值;温度高于 80 $^{\circ}\text{C}$ 时,各频率下生热率均随温度的升高呈下降趋势。

由图 10 可以看出,三角胶生热率随频率的增大而明显增大。

此外,胎面基部胶和胎侧胶生热率随温度和频率的变化趋势与胎体帘布层胶基本相同。锦纶冠带层胶生热率随温度和频率的变化趋势与钢丝带束层胶基本一致,只是生热率随温度的变化更明显。胎面胶生热率随温度和频率的变化趋势与锦纶冠带层胶基本一致。钢丝包胶生热率随温度和频率的变化趋势与气密层胶基本相同。

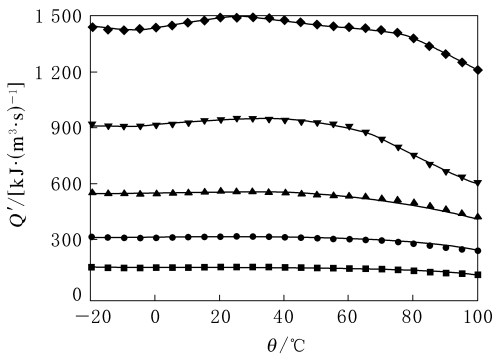


图 5 胎圈护胶的 $Q'-\theta$ 曲线
注同图 1。

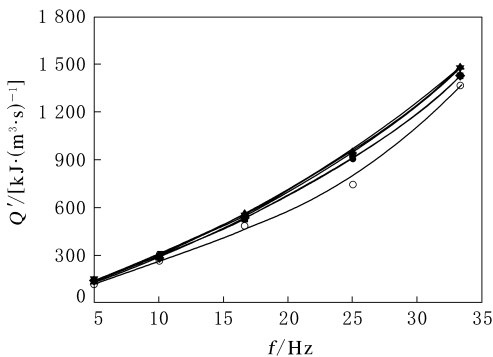


图 6 胎圈护胶的 $Q'-f$ 曲线
注同图 2。

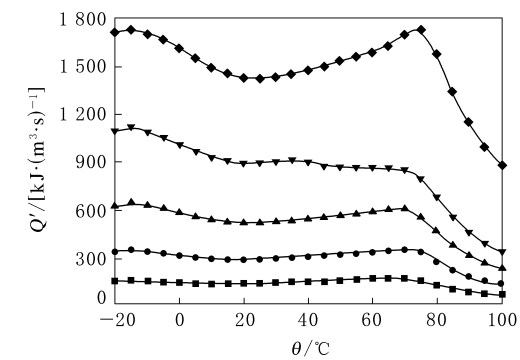


图 9 三角胶的 Q' - θ 曲线
注同图 1。

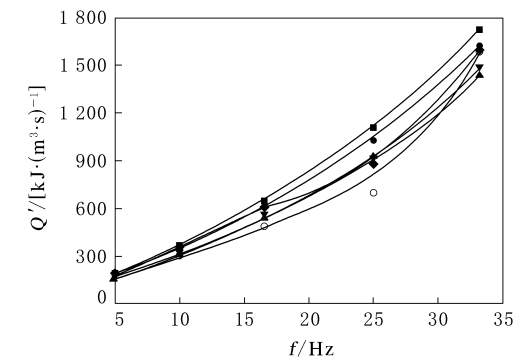


图 10 三角胶的 Q' - f 曲线
注同图 2。

3.2 回归分析

为了简化分析过程,对轮胎用各种胶料的生热率随温度和频率的变化关系进行二元回归分析,用于轮胎温度场滞后热源的定量分析。

在不同的频率下将每种胶料的生热率与温度的关系进行单元多项式拟合,得到如下方程:

$$Q' = A + \sum_{j=1}^n B_j \theta^j \tag{4}$$

式中, A 和 B_j 为待定因数, j 为多项式次数。
求得不同频率的 A 和 B_j 后,分别将它们与频率进行线性多项式拟合,将结果代入式(4),即可得到生热率与温度和频率的双元多项式。

在此以胎体帘布层胶为例进行回归分析。根据最小二乘法,将图 1 和 2 中所示的胎体帘布层胶数据对温度进行单元三次线性回归,回归结果如表 1 所示。

分别将表 1 中的待定因数对频率进行多项式回归后得到如下方程式:

$$A = -218\,826.943\,27 + 84\,085.610\,39f - 4\,298.091\,67f^2 + 106.117\,45f^3 \tag{5a}$$

$$B_1 = -1\,718.410\,71 + 138.941\,23f - 89.518\,85f^2 + 1.098\,6f^3 \tag{5b}$$

表 1 胎体帘布层胶生热率随温度变化的三次回归结果

项 目	频率/Hz				
	5	10	16.6	25	33.3
A	$0.117\,047 \times 10^6$	$0.270\,916 \times 10^6$	$0.507\,472 \times 10^6$	$0.839\,971 \times 10^6$	$1.737\,070 \times 10^6$
B_1	$-3\,027.003\,67$	$-8\,459.369\,73$	$-18\,756.940\,32$	$-37\,181.392\,7$	$-55\,756.477\,57$
B_2	$52.290\,36$	$149.737\,27$	$340.055\,21$	$707.788\,47$	$926.019\,15$
B_3	$-0.303\,90$	$-0.859\,94$	$-1.944\,10$	$-4.116\,72$	$-5.040\,14$
相关因数 R	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99

$$B_2 = 104.975\,17 - 24.617\,38f + 3.304\,17f^2 - 0.054\,74f^3 \tag{5c}$$

$$104.975\,17\theta^2 + 1\,718.410\,71\theta + 218\,826.943\,27 \tag{6}$$

$$B_3 = -0.795\,23 + 0.195\,26f - 0.023\,02f^2 + 3.997\,76 \times 10^{-4}f^3 \tag{5d}$$

将式(5a)~(5d)代入式(4),得到胎体帘布层胶生热率随温度和频率的变化关系式:

$$Q' = (3.997\,76 \times 10^{-4} \theta^3 - 0.054\,74 \theta^2 + 1.098\,6 \theta + 106.117\,45) f^3 - (0.023\,02 \theta^3 - 3.304\,17 \theta^2 + 89.518\,85 \theta + 4\,298.091\,67) f^2 + (0.195\,26 \theta^3 - 24.617\,38 \theta^2 + 138.941\,23 \theta + 84\,085.610\,39) f - (0.795\,23 \theta^3 -$$

其它部位胶料的回归分析方法与胎体帘布层胶相同,各部位胶料生热率随温度和频率的变化关系式如下。

①胎面基部胶

$$Q' = (-1.796\,64 \times 10^{-4} \theta^3 + 0.033\,98 \theta^2 - 2.269\,37 \theta + 112.182\,06) f^3 + (0.007\,2 \theta^3 - 1.370\,19 \theta^2 + 93.393\,04 \theta - 4\,917.673\,92) f^2 - (0.152\,6 \theta^3 - 27.847\,52 \theta^2 + 1\,754.020\,59 \theta - 82\,072.326\,27) f + (0.450\,85 \theta^3 -$$

$$83.126\ 18\theta^2 + 5\ 209.550\ 48\theta - 225\ 463.304\ 84) \quad (7)$$

②钢丝带束层胶

$$Q' = (1.273\ 43 \times 10^{-4}\theta^3 - 0.026\ 55\theta^2 + 1.200\ 6\theta + 65.218\ 23)f^3 - (0.007\ 1\theta^3 - 1.467\ 85\theta^2 + 71.050\ 53\theta + 2\ 623.419\ 97)f^2 + (0.082\ 31\theta^3 - 15.868\ 15\theta^2 + 561.967\ 74\theta + 55\ 581.478\ 38)f - (0.306\ 95\theta^3 - 58.386\ 57\theta^2 + 2\ 338.493\ 2\theta + 133\ 321.853\ 33) \quad (8)$$

③锦纶冠带层胶

$$Q' = (1.725\ 29 \times 10^{-5}\theta^3 - 0.003\ 26\theta^2 + 0.158\ 29\theta)f^4 - (0.001\ 26\theta^3 - 0.226\ 86\theta^2 + 10.449\ 33\theta - 54.042\ 37)f^3 + (0.029\ 42\theta^3 - 5.027\ 32\theta^2 + 214.209\ 99\theta - 2\ 085.689\ 34)f^2 - (0.261\ 89\theta^3 - 43.172\ 29\theta^2 + 1\ 885.216\ 41\theta - 49\ 996.210\ 7)f - (0.687\ 45\theta^3 + 113.089\ 49\theta^2 - 4\ 674.282\ 78\theta + 104\ 594.770\ 34) \quad (9)$$

④胎侧胶

$$Q' = (-1.313\ 55 \times 10^{-4}\theta^3 + 0.025\ 33\theta^2 - 1.740\ 8\theta + 88.584\ 88)f^3 + (0.005\ 31\theta^3 - 1.035\ 13\theta^2 + 72.892\ 09\theta - 3\ 909.616\ 86)f^2 - (0.101\ 73\theta^3 - 19.252\ 12\theta^2 + 1\ 285.663\ 96\theta - 63\ 733.211\ 55)f + (0.305\ 2\theta^3 - 57.421\ 99\theta^2 + 3\ 767.230\ 01\theta - 176\ 338.985\ 04) \quad (10)$$

⑤胎圈护胶

$$Q' = (5.895\ 67 \times 10^{-6}\theta^3 + 4.692\ 05\theta^2 - 0.029\ 35\theta)f^4 - (3.619\ 87 \times 10^{-4}\theta^3 + 0.032\ 84\theta^2 - 1.984\ 43\theta + 19.474\ 11)f^3 + (0.006\ 92\theta^3 + 0.735\ 56\theta^2 - 41.674\ 17\theta - 361.590\ 45)f^2 - (0.061\ 32\theta^3 + 5.947\ 05\theta^2 - 338.720\ 37\theta - 34\ 489.944\ 52)f + (0.122\ 72\theta^3 + 15.402\ 48\theta^2 - 787.946\ 28\theta - 12\ 858.626\ 22) \quad (11)$$

⑥胎面胶

$$Q' = (-3.560\ 07 \times 10^{-5}\theta^3 + 0.004\ 27\theta^2)f^4 + (0.002\ 3\theta^3 - 0.272\ 6\theta^2 - 0.227\ 32\theta + 13.595\ 88)f^3 - (0.047\ 15\theta^3 - 5.524\ 52\theta^2 - 5.909\ 66\theta - 428.074\ 43)f^2 + (0.299\ 23\theta^3 -$$

$$32.011\ 22\theta^2 - 813.414\ 19\theta + 39\ 908.158\ 58)f - (0.806\ 92\theta^3 - 88.847\ 42\theta^2 - 1\ 254.131\ 1\theta - 6\ 490.835\ 05) \quad (12)$$

⑦气密层胶

$$Q' = (5.103\ 53 \times 10^{-9}\theta^5 - 6.071\ 43 \times 10^{-8}\theta^4 - 1.064\ 88 \times 10^{-4}\theta^3 + 0.005\ 29\theta^2 + 0.134\ 67\theta)f^4 - (2.892\ 03 \times 10^{-7}\theta^5 + 3.647\ 85 \times 10^{-7}\theta^4 - 0.006\ 58\theta^3 + 0.309\ 28\theta^2 + 8.401\ 4\theta)f^3 + (1.526\ 29 \times 10^{-6}\theta^5 + 7.846\ 64 \times 10^{-4}\theta^4 - 0.156\ 79\theta^3 + 4.420\ 26\theta^2 + 232.877\ 25\theta + 973.055\ 99)f^2 + (6.897\ 67 \times 10^{-5}\theta^5 - 0.025\ 45\theta^4 + 2.685\ 87\theta^3 - 58.811\ 84\theta^2 - 3\ 367.818\ 72\theta + 66\ 463.149\ 55)f - (6.930\ 1 \times 10^{-5}\theta^5 - 0.042\ 17\theta^4 + 5.59\theta^3 - 173.019\ 03\theta^2 - 4\ 838.191\ 33\theta + 33\ 205.947\ 6) \quad (13)$$

⑧钢丝包胶

$$Q' = (7.897\ 14 \times 10^{-9}\theta^5 - 2.182\ 3 \times 10^{-6}\theta^4 + 1.674\ 75 \times 10^{-4}\theta^3 - 0.002\ 16\theta^2 - 0.040\ 49\theta)f^4 - (6.326\ 08 \times 10^{-7}\theta^5 - 1.653\ 51 \times 10^{-4}\theta^4 + 0.012\ 19\theta^3 - 0.151\ 69\theta^2 - 3.270\ 84\theta)f^3 + (1.650\ 66 \times 10^{-5}\theta^5 - 0.004\ 18\theta^4 + 0.308\ 37\theta^3 + 4.701\ 64\theta^2 - 61.706\ 79\theta + 972.241\ 21)f^2 - (1.069\ 82 \times 10^{-4}\theta^5 - 0.027\ 26\theta^4 + 2.004\ 24\theta^3 - 31.947\ 13\theta^2 + 166.267\ 92\theta + 35\ 455.830\ 84)f + (3.576\ 22 \times 10^{-4}\theta^5 - 0.087\ 72\theta^4 + 6.278\ 32\theta^3 - 96.316\ 49\theta^2 - 809.040\ 49\theta + 35\ 530.461\ 69) \quad (14)$$

⑨三角胶

$$Q' = (4.259\ 02 \times 10^{-10}\theta^6 - 9.080\ 17 \times 10^{-8}\theta^5 + 4.955\ 99 \times 10^{-6}\theta^4 + 2.233\ 87 \times 10^{-5}\theta^3 - 0.003\ 44\theta^2 + 8.908\ 87 \times 10^{-4}\theta)f^4 - (2.763\ 72\theta^6 - 5.787\ 16 \times 10^{-6}\theta^5 + 3.039\ 53 \times 10^{-4}\theta^4 + 0.002\ 09\theta^3 - 0.218\ 26\theta^2 - 0.369\ 12\theta)f^3 + (5.793\ 37 \times 10^{-7}\theta^6 - 1.191\ 99 \times 10^{-4}\theta^5 + 0.006\theta^4 + 0.057\ 04\theta^3 - 4.438\ 91\theta^2 - 20.740\ 07\theta + 884.526\ 05)f^2 - (4.099\ 69 \times 10^{-6}\theta^6 - 8.482\ 43 \times 10^{-4}\theta^5 +$$

$$0.043\ 78\theta^4 + 0.286\ 46\theta^3 - 30.122\ 58\theta^2 + 14.733\ 63\theta - 17\ 537.651\ 33)f + (1.295\ 97 \times 10^{-5}\theta^6 - 0.002\ 67\theta^5 + 0.141\ 22\theta^4 + 0.230\ 09\theta^3 - 72.404\ 54\theta^2 + 81.875\ 12\theta + 48\ 608.209\ 01) \quad (15)$$

4 结语

测试了子午线轮胎 10 种常用胶料在不同温度和频率下的生热率,并得到生热率方程。生热率方程式可用于轮胎温度场分析中滞后热源的定量计算,简化分析过程。

不同胶料的生热率随温度和频率的变化趋势不同,这与胶料的配方有关。因此在轮胎温度场的分析中,需根据不同轮胎胶料的生产配方确定

其生热率,并以数学函数库的形式用于计算。

参考文献:

- [1] Medalia A I. Heat generation in elastomer compounds; causes and effects[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1991, 64 (3): 481-492.
- [2] Mouri H. Predication of heat generation of tires by yielding experiment[J]. Rubber Word, 1996, 214(6): 24-28.
- [3] Chakraborty S K, Mukherjee D P. Study of heat build up of a cured tire using a goodrich flexometer[J]. Rubber World, 1987, 196(7): 30-34.
- [4] 马连湘. 滚动轮胎温度场的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [5] 何 燕, 马连湘, 黄素逸, 等. 轮胎橡胶材料生热率的测定及分析[J]. 橡胶工业, 2004, 51(1): 53-55.

收稿日期: 2006-01-07

Dependence of heat build-up of tire on temperature and frequency

HE Yan¹, LIU Li¹, MA Lian-xiang¹, SUN Xiao-jian²

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. Shandong Haihua Co., Ltd, Shouguang 262737, China)

Abstract: The heat build-up of 10 rubber compounds in a radial tire was investigated. The curves of heat build-up vs temperature or frequency for 10 compounds were respectively obtained by measuring the dynamic mechanical properties; and then the dual regression analysis was made to obtain the equations for the dependence of heat build-up of 10 compounds on temperature and frequency. The obtained equations could be used to quantitatively analyze the hysteresis heat source of tire temperature field.

Keywords: tire; compound; heat build-up; temperature; frequency; dual regression

神马橡胶轮胎公司着力打造 大型农业轮胎生产基地

中图分类号: TQ336.1; U463.341⁺.59 文献标识码: D

中国神马集团橡胶轮胎有限责任公司是神马集团的全资子公司, 产品覆盖载重轮胎、农业轮胎、工程机械轮胎和工业车辆轮胎等多个系列, 品种规格达 130 多个。

近年来, 该公司在集团的大力支持下, 瞄准发展方向, 调整产品结构, 着力打造大型农业轮胎重要生产基地。该公司产品定位为以大型农业轮胎为主导产品, 以大带小, 通过大型农业轮胎、无内胎轮胎等特种轮胎带动其它产品的生产。发展目标为 2006 年大型农业轮胎的年生产能力达到 30

万条, 成为全国大型农业轮胎生产基地之一。

为形成规模优势, 神马集团 2005 年投入 2 000 多万元进行 12 万套大型农业轮胎项目建设, 并于 2006 年 2 月顺利建成投产。2006 年 3 月, 30 万条轮胎技改项目通过专家论证, 重点发展大型农业轮胎和工程机械轮胎, 总投资 1 亿元, 建成后年新增销售收入将达 5 亿多元、利润 3 000 万元。技改项目分步实施, 一期工程 15 万套大型农业轮胎项目将于近期开工建设, 预计 2006 年年底以前建成投产, 届时将初步形成年产 30 万套大型农业轮胎规模。

(中国神马集团橡胶轮胎有限责任公司

董国辉供稿)