

# 轮胎硫化过程的有限元分析

闫相桥,童 剑

(哈尔滨工业大学 复合材料研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**开发了能够较准确地数值模拟轮胎硫化过程的有限元分析软件。该软件考虑了轮胎材料的非均质性、橡胶基复合材料传热性能的各向异性、轮胎硫化时橡胶材料伴有的反应生热以及轮胎硫化的实际加温历程。对某载重子午线轮胎的硫化过程进行的仿真计算得到的数值表明该有限元数值仿真软件有效、可靠。

**关键词:**轮胎;硫化;有限元分析

**中图分类号:**TQ336.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8171(2002)05-0259-09

轮胎是由橡胶材料和橡胶基复合材料构成的非均质结构体,各种材料的传热特性一般都不相同,尤其是橡胶基复合材料传热性能的各向异性、轮胎硫化时橡胶材料伴有的反应生热以及轮胎结构复杂的形状导致难以准确地确定轮胎各部位的硫化程度。目前国内一般通过在轮胎不同部位埋置热电偶来进行轮胎硫化过程中若干时间点的温度测量,得到一个大致温度-时间曲线来估算各部位的硫化程度<sup>[1,2]</sup>。这样做费时费力,成本高,而且结果非常粗糙,不足以成为对硫化轮胎的性能进行评价的基础。

目前我国载重轮胎存在内部硫化程度严重不均现象<sup>[1]</sup>,它严重影响了轮胎的使用性能,如耐磨性能,同时造成了能量、人工及设备的极大浪费。出现这个问题的原因有两个方面:目前我国轮胎的硫化普遍采用“等温(外温)硫化”技术,由于载重轮胎是一个(变厚度的)厚橡胶制品,橡胶材料又是热的不良导体,轮胎内的任何一个质点都同时受热传导和反应热的影响而经历复杂的温度-时间过程。橡胶制品内部的硫化实际上是不等温硫化,在任何特定的时刻,都存在橡胶制品内部的温度分布曲线,导致各处的硫化程度不同;

在轮胎硫化时间的选取上,目前我国大多数轮胎厂没有考虑后硫化效应。橡胶是热的不良导体,

轮胎内部胶料在启模后降温缓慢,存在相当大的后硫化效应。就轮胎受热最低部位——内层和胎圈来说,后硫化效应约占30%左右。随胶料配方、轮胎规格及硫化工艺的不同,后硫化效应所占比例也不同。轮胎的总硫化效应应为机内正硫化效应和后硫化效应之和。因此,将后硫化效应计入总的等效硫化时间对减少过硫和提高硫化均匀性非常重要。

随着计算机科学和数值计算技术的飞速发展,有限元分析技术在复杂工程结构中的应用越来越显示出巨大的作用。轮胎的分析方法也从简易的模型分析向数值模拟发展。在已经成功地将有限元分析技术应用于轮胎结构分析<sup>[3,4]</sup>及轮胎结构参数优化之后<sup>[5-7]</sup>,本工作尝试将有限元分析技术应用于轮胎硫化过程的数值仿真。

## 1 轮胎硫化过程数值模拟的理论基础

### 1.1 轮胎硫化设备结构图

硫化是轮胎制造过程的最后一道工序,是一个极其重要的阶段。这一过程赋予了橡胶各种宝贵的物理性能,使其成为一种具有一定强度同时具有非常好的弹性及耐磨性的材料,从而满足各种工程上的应用。从微观来看,硫化是指橡胶的线形大分子链通过化学交联而构成三维网状结构的化学反应。

图1为轮胎硫化设备结构示意图。轮胎的外表面与金属模具接触,在连续的生产过程中模具的温度变化很小,轮胎的内表面与胶囊接触,胶囊内

作者简介:闫相桥(1959-),男,河北东光县人,哈尔滨工业大学教授,工学博士,现主要从事轮胎有限元分析技术及其应用的研究工作。

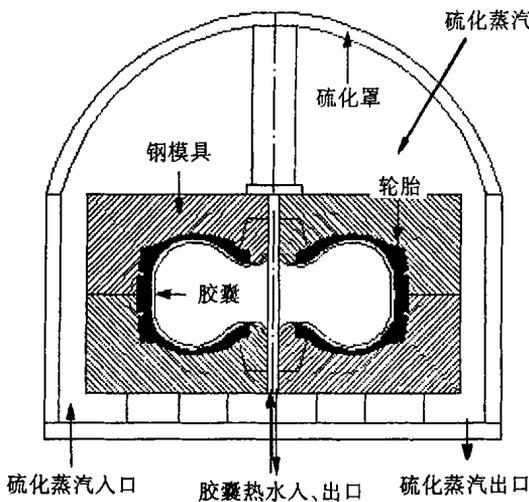


图1 轮胎硫化设备结构示意图

充注加压的过热水。

### 1.2 胶料硫化历程

在硫化过程中,胶料的各种性能随硫化时间而变化。轮胎工业一般利用硫化仪测定的胶料转矩随硫化时间的变化曲线(硫化历程图,见图2)来度量胶料性能随硫化时间的变化。

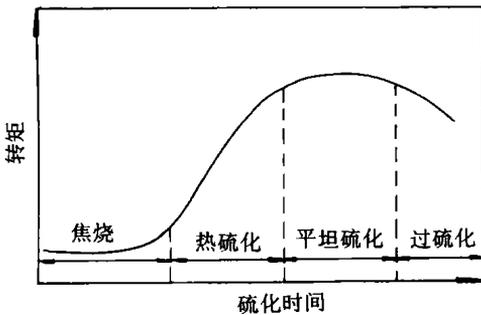


图2 胶料硫化历程示意图

### 1.3 胶料硫化程度的描述

轮胎硫化传热过程如下:轮胎在加热加压的

$$X(t) = \begin{cases} 0 & t < t_i \\ \frac{1 - \exp\left\{-\frac{t}{t_i} k_0 \exp\left[-\frac{E}{RT(t)}\right] dt\right\}}{1 + \exp\left\{-\frac{t}{t_i} k_0 \exp\left[-\frac{E}{RT(t)}\right] dt\right\}} & t \geq t_i \end{cases} \quad (5)$$

式(5)可用来确定硫化程度。

### 1.4 胶料物理性能参数的确定

一些随温度或硫化程度变化的物理性能参数

条件下进行硫化,经过诱导期,达到硫化温度,开始硫化反应,这是一个吸热过程。反应时胶料的密度、比热容、导热系数等与传热有关的物理性能参数随胶料的硫化程度和温度发生变化。硫化程度是时间和温度的函数,当胶料达到正硫化时应控制外界条件使反应终止。对轮胎这样由各种橡胶材料及橡胶基复合材料构成的非均质复杂结构来说,一般不可能使所有的部位同时达到正硫化。我们利用有限元分析技术来数值模拟轮胎硫化过程的目的就在于此。

本工作采用的硫化模型如下<sup>[8]</sup>:

$$\frac{dX}{dt} = kX^{1/2}(1 - X) \quad (t \geq t_i) \quad (1)$$

$$k = k_0 \exp(-E/RT) \quad (2)$$

式中  $t$ ——硫化时间,s;

$t_i$ ——诱导期,s;

$E$ ——活化能  $J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;

$X$ ——硫化程度;

$k$ ——硫化反应速率常数;

$k_0$ ——硫化反应速率常数频率因子;

$T$ ——硫化温度,K;

$R$ ——气体常数,  $8.314 J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

诱导期  $t_i$  由下式确定:

$$t_{i0} = \int_0^{t_i} \exp\left[-\frac{E_i}{RT(t)}\right] dt \quad (3)$$

式中  $t_{i0}$ ——诱导期常数,s;

$E_i$ ——诱导期活化能  $J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

由硫化生热引起的内部热源密度  $Q$  为:

$$Q = (-H) \frac{dX}{dt} \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为材料密度,  $H$  为硫化热焓。

式(1)积分得到:

的变化公式如下<sup>[8]</sup>:

$$\ln(T) = a + bT \quad (6)$$

$$\ln(X) = (1 - X)_u + X_c \quad (7)$$

$$C(T, X) = (1 - X) C_u(T) + X C_c(T) \quad (8)$$

$$C_u(T) = a_u + b_u T \quad (9)$$

$$C_c(T) = a_c + b_c T \quad (10)$$

式中  $\lambda$  ——导热系数;

$a, b$  ——与材料传热性质有关的常数;

$\rho_u, \rho_c$  ——分别为未硫化胶和硫化胶的密度;

$C$  ——材料比热容;

$C_u, C_c$  ——分别为未硫化胶和硫化胶的比热容;

$a_u, b_u$  ——与未硫化胶比热容有关的常数;

$a_c, b_c$  ——与硫化胶比热容有关的常数。

这些常数通过试验来确定<sup>[8]</sup>。

### 1.5 轴对称问题热传导方程

在这里,我们把轮胎硫化作为轴对称问题来处理。一般用热流密度  $q_r$  和  $q_z$  来表示有内热源的轴对称问题的非稳态热传导微分方程<sup>[9]</sup>:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (q_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q_r) - Q = 0 \quad (11)$$

方程(11)的边界条件如下:

$$T(r, z) = f_a(r, z, t) \quad r, z \in \Gamma_1 \quad (12)$$

$$q_r n_r + q_z n_z = -q_a(r, z, t) \quad r, z \in \Gamma_2 \quad (13)$$

$$q_r n_r + q_z n_z = h(T - T_a) \quad r, z \in \Gamma_3 \quad (14)$$

式中,  $\Gamma_1, \Gamma_2$  和  $\Gamma_3$  分别为第 1、第 2 和第 3 类边界条件,  $f_a(r, z, t)$  为已知边界的温度函数,  $q_a(r, z, t)$  为已知边界的热流密度函数(这里约定流进所研究物体热流密度函数为正),  $n_z$  和  $n_r$  为边界的外法线方向的余弦,  $h$  为边界界面膜传热系数,  $T_a$  是环境温度。

### 1.6 导热系数的坐标转换

橡胶基复合材料在宏观上通常可以看作是正交各向异性材料。一般正交各向异性材料的传热性能呈明显的方向性。这种材料的导热系数  $\lambda_{ij}$  在空间形成一个椭球<sup>[9]</sup>, 该椭球的 3 个主轴方向  $x_1, x_2, x_3$  称为材料的传热主轴, 用  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  表示 3 个主轴方向上的导热系数, 称为材料的主导热系数。在实际应用中, 由于物体形状的复杂性,

$\lambda_{ij}$  一般是随着物体位置不同而变化的, 因此需要对导热系数进行坐标变换, 即由材料主方向上的主导热系数确定任意方向上的导热系数。

热流密度是矢量, 可用  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  和  $\lambda_4$  方向的热流密度表示  $q_r$  和  $z$  方向的热流密度  $q_r, q_\theta$  和  $q_z$ :

$$\begin{Bmatrix} q_r \\ q_\theta \\ q_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

式中,  $l_i, m_i$  和  $n_i$  是相应的方向余弦。

由傅立叶热传导定律可知:

$$-\begin{Bmatrix} q_r \\ q_\theta \\ q_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial \theta} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

温度梯度也是矢量, 因此可用  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  和  $\lambda_4$  方向的温度梯度表示  $\frac{\partial T}{\partial r}, \frac{\partial T}{\partial \theta}$  和  $\frac{\partial T}{\partial z}$  方向的温度梯度:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial \theta} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (17)$$

把上述三式联立起来可得到用  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  和  $\lambda_4$  方向的温度梯度和主导热系数  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  表示的  $q_r$  和  $z$  方向热流密度的表达式:

$$-\begin{Bmatrix} q_r \\ q_\theta \\ q_z \end{Bmatrix} = [n]^{-1} [l] \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} = [l^{-}] \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial r} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

式中,  $[l^{-}]$  称为整体坐标导热系数矩阵:

$$[l^{-}] = [n]^{-1} [l] \quad (19)$$

$[n]$  称为转换矩阵:

$$[n] = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$[l]$  称为主导热系数矩阵:

$$[l] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(19)即为从主导热系数到坐标轴方向上的导热系数的转换公式。在实际有限元分析中,对整个结构有一个整体坐标系,每个单元有一个材料坐标系,可称为局部坐标系。在材料坐标系里,材料特性都是主方向上的,利用公式(19)就可以实现从局部坐标系到整体坐标系的转换。材料坐标系与结构坐标系的示意图见图3。

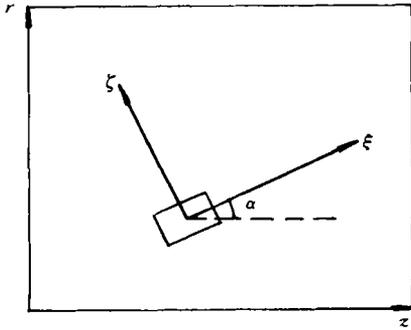


图3 材料坐标系与结构坐标系示意

对于本工作所研究的一个轴对称问题,导热系数的转换公式(19)可退化为:

$$\begin{bmatrix} \bar{z}z & \bar{z}r \\ \bar{r}z & \bar{r}r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{bmatrix} \quad (22)$$

在应用中我们设:

$$\bar{z}z = A, \bar{z}r = B, \bar{r}z = C, \bar{r}r = D \quad (23)$$

### 2 轮胎硫化分析的有限元列式

我们采用加权余量法<sup>[10]</sup>来建立轮胎硫化分析的有限元列式。

设近似温度场函数  $\bar{T}(r, z, t)$  [下面为了书写方便仍记作  $T(r, z, t)$ ] 已满足  $\Gamma_1$  边界上的强制边界条件。将  $T$  代入式(11)~(14)中,分别产生余量如下:

$$\begin{cases} R = Cr \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(rq_r) + \frac{\partial}{\partial z}(rq_z) - rQ \\ R_1 = 0 \\ R_2 = -(q_r n_r + q_z n_z) - q_a(r, z, t) \\ R_3 = h(T - T_a) - (q_r n_r + q_z n_z) \end{cases} \quad (24)$$

于是由加权余量法可得下列方程:

$$R \int_{\Omega} u d\Omega + R_2 \int_{\Gamma_2} v d\Gamma + R_3 \int_{\Gamma_3} w d\Gamma = 0 \quad (25)$$

式中,  $u, v$  和  $w$  分别为域  $\Omega$  内和边界  $\Gamma_2$  和  $\Gamma_3$  上的权函数。

固温边界条件  $\Gamma_1$  可以这样处理:正如上面所述,在  $\Gamma_1$  边界上边界条件被强制满足,因此余量为零,或者利用第三类边界条件通过令边界界面膜传热系数  $h$  趋于无穷大来实现。这样在由加权余量法所得到的方程中就不会出现第一类边界条件,见式(24)。

按照有限元法,将空间域  $\Omega$  离散为有限个单元,在每个单元内的温度  $T$  可由单元的节点温度  $T_i$  插值近似得到:

$$T = \sum_{i=1}^{n^e} N_i(r, z) T_i = N^e T^e \quad (26)$$

其中

$$N = [N_1, N_2, \dots, N_{n^e}] \quad (27)$$

$$T^e = [T_1, T_2, \dots, T_{n^e}]^T \quad (28)$$

式中,  $n^e$  为单元的节点数;  $N_i(r, z)$  是单元的温度插值函数。

在此,在域  $\Omega$  内按照伽辽金法选择权函数:

$$u = N_i \quad (29)$$

而在边界上选取:

$$w = v = ru = rN_i \quad (30)$$

其中,  $r$  为每质点处的  $r$  方向坐标。

将式(29)和(30)代入方程(25)得:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} [ \frac{\partial}{\partial r}(rq_r) + \frac{\partial}{\partial z}(rq_z) - rQ + Cr \frac{\partial T}{\partial t} ] N_i d\Omega + \\ & \int_{\Gamma_3} [ h(T - T_a) - (q_r n_r + q_z n_z) ] rN_i d\Gamma + \\ & - \int_{\Gamma_2} (q_r n_r + q_z n_z + q_a) rN_i d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (31)$$

由格林积分公式可知:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} [ N_i \frac{\partial}{\partial r}(rq_r) + N_i \frac{\partial}{\partial z}(rq_z) ] d\Omega = \\ & \int_{\Omega} [ \frac{\partial}{\partial r}(N_i rq_r) + \frac{\partial}{\partial z}(N_i rq_z) ] d\Omega - \\ & \int_{\Omega} [ \frac{\partial N_i}{\partial r}(rq_r) + \frac{\partial N_i}{\partial z}(rq_z) ] d\Omega = \\ & (N_i rq_r n_r + N_i rq_z n_z) d\Gamma - \int_{\Omega} [ \frac{\partial N_i}{\partial r}(rq_r) + \end{aligned}$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial z} (r q_z) J d \quad (32)$$

将式(32)代入方程(31)得:

$$\begin{aligned} & - l \frac{\partial N_i}{\partial r} (r q_r) + \frac{\partial N_i}{\partial z} (r q_z) J d + (Cr \frac{\partial T}{\partial t} - \\ & r Q) N_i d + h (T - T_a) r N_i d - \\ & q_{ar} N_i d = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

根据局部坐标系和整体坐标系之间的导热系数变换关系可得:

$$\begin{cases} - q_r = B \frac{\partial T}{\partial z} + D \frac{\partial T}{\partial r} \\ - q_z = A \frac{\partial T}{\partial z} + B \frac{\partial T}{\partial r} \end{cases} \quad (34)$$

同时设:

$$\begin{aligned} K_{ij}^e = & \int r \frac{\partial N_i}{\partial r} (B \frac{\partial N_j}{\partial z} + D \frac{\partial N_j}{\partial r}) + \\ & r \frac{\partial N_i}{\partial z} (A \frac{\partial N_j}{\partial z} + B \frac{\partial N_j}{\partial r}) J d \end{aligned} \quad (35)$$

$$H_{ij}^e = \int h r N_i N_j d \quad (36)$$

$$P_{Qi}^e = \int Q r N_i d \quad (37)$$

$$P_{Hi}^e = \int h T_a r N_i d \quad (38)$$

$$P_{qi}^e = \int q_{ar} N_i d \quad (39)$$

$$C_{ij}^e = \int Cr N_i N_j d \quad (40)$$

则方程(33)可写成:

$$F \dot{T} + K T = P \quad (41)$$

式中,  $K$ ,  $P$  和  $F$  分别称为热传导刚度矩阵、温度载荷向量和比热容矩阵,其表达式为:

$$K_{ij} = \sum_e K_{ij}^e + \sum_e H_{ij}^e \quad (42)$$

$$P_i = \sum_e P_{Qi}^e + \sum_e P_{Hi}^e + \sum_e P_{qi}^e \quad (43)$$

$$C_{ij} = \sum_e C_{ij}^e \quad (44)$$

这里,  $\sum_e$  表示对所有单元求和。

### 3 算例

利用开发的轮胎硫化过程的有限元分析软件对某一型号的载重子午线轮胎的硫化过程进行了

数值模拟。图 4 示出的是轮胎截面几何及材料分布图,图 5 示出的是有限元网格图,轮胎硫化加温历程见图 6。

#### 3.1 轮胎硫化温度分布图

图 7 所示为轮胎硫化加温阶段温度场随时间的变化规律。由图 7 可以明显看出,边界部位的单元因靠近热源而升温较快;胎肩和下三角胶处厚的部位升温较慢,而且滞后时间明显。这正好说明了橡胶的导热不良性。图 8 所示为轮胎硫化降温阶段的温度分布。轮胎内部胶囊先通冷水降温,几分钟后启模。在 2 820 s 的温度场分布图中,开始温度较低的胎肩和下三角胶成为温度最



图 4 轮胎截面几何及材料分布



图 5 有限元网格

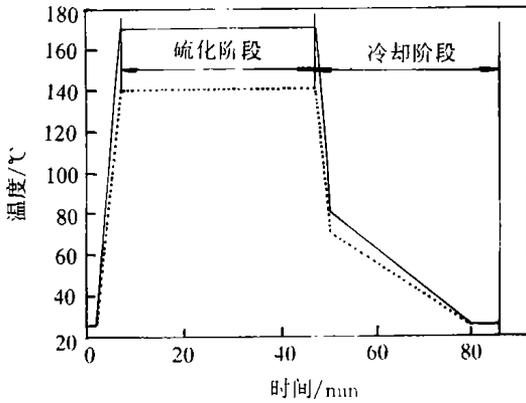


图6 轮胎硫化加温历程

高的部位,说明此时这些厚部位的硫化反应仍在进行,还有硫化反应热释放出来,这些部位的温度能继续升高,而且成为新的热源,把热传给周围的单元,因此考虑后硫化效应很有必要,利用余热进行硫化可以节省能源,提高经济效益。

### 3.2 轮胎硫化程度分布图

图9所示为轮胎硫化加温阶段轮胎内部硫化程度分布。由图9可以看出,该轮胎较厚部位的硫化程度随轮胎硫化历程增长很缓慢,而较薄的

胎侧很快就达到正硫化了。图10所示为轮胎硫化后在空气中冷却过程的轮胎内部硫化程度分布。由图10可以看出,轮胎较厚部位的后硫化效应很明显,但该轮胎较厚部位(胎肩)仍没有达到完全硫化。

### 3.3 材料开始硫化和达到正硫化时的时间分布图

一般来说,轮胎进行硫化时,胶料开始硫化反应需要达到一定的温度,不同胶料需要达到的温度不同,轮胎各部位开始硫化的时间也不同。图11示出的是轮胎内部各部位开始硫化反应的时间分布。由图11可以看出,温度先升高的单元先开始硫化。图12示出的是轮胎内部各部位达到正硫化时的时间分布。由图12可以明显看出,较薄的部位、温度较高的地方先达到正硫化。

### 3.4 轮胎内部典型点的温度曲线图和硫化程度曲线图

在这里选取典型点胎肩点*a*、胎侧点*b*和胎圈点*c*为考查对象,它们的位置如图13所示。胎肩点*a*的温度( )和硫化程度随轮胎硫化时间

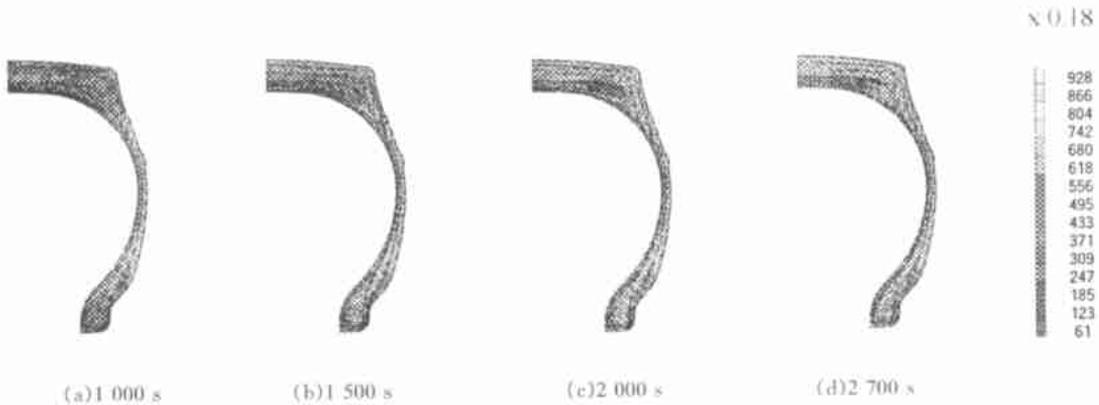


图7 轮胎硫化加温阶段各部位温度变化情况

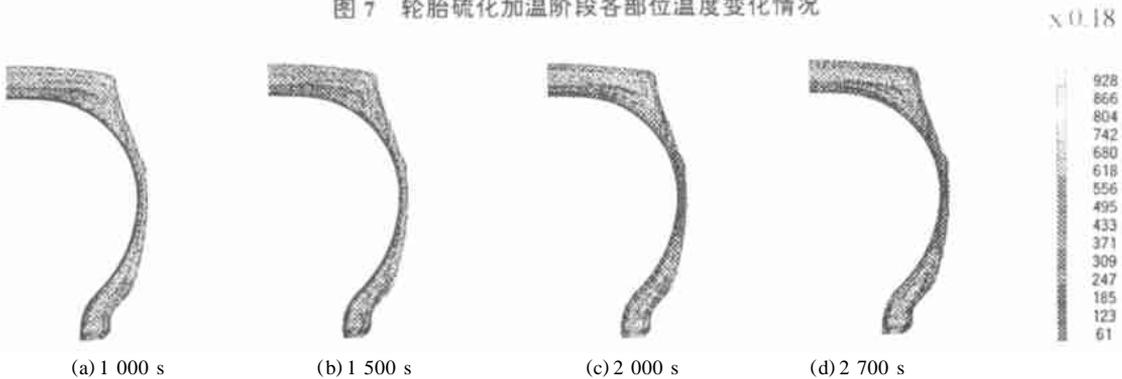


图9 轮胎硫化加温阶段各部位硫化程度变化情况

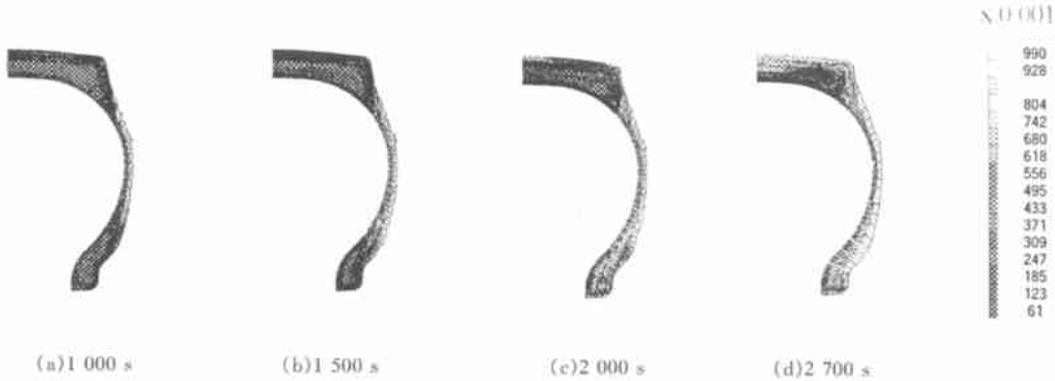


图 9 轮胎硫化加温阶段各部位硫化程度变化情况

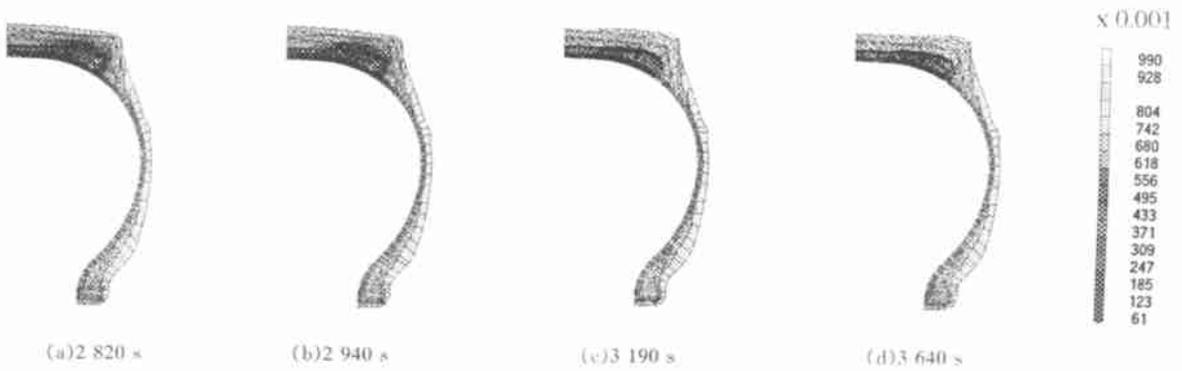


图 10 轮胎硫化冷却阶段各部位硫化程度变化情况

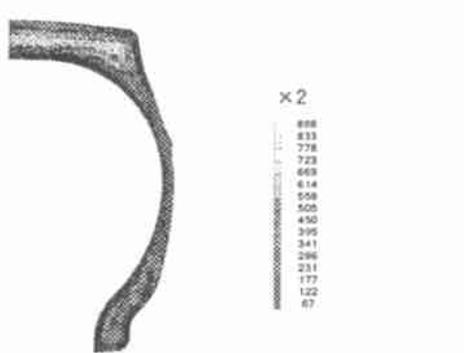


图 11 材料开始硫化时的时间分布



图 12 材料达到正硫化时的时间分布

( $t$ ) 的变化曲线如图 14 和 15 所示。胎侧点  $b$  的和硫化程度随  $t$  的变化曲线如图 16 和 17 所示。胎圈点  $c$  的和硫化程度随  $t$  的变化曲线如图 18 和 19 所示。

由图 14 ~ 19 可以看出,胎肩点  $a$  处由于很厚,在轮胎硫化加温阶段温度上升比较缓慢,在轮胎硫化冷却阶段降温也比较缓慢,而且该点没有硫化完全,硫化程度在 65 % 左右。这与实际情形相吻合。由于没有硫化完全,在轮胎启模后,硫化

反应仍在进行,仍有反应热放出,因此  $-t$  曲线在上在相应于启模的位置温度稍微下降后又有一小段上升曲线,然后继续下降,其变化趋势很合理。

胎侧点  $b$  处较薄,在轮胎硫化加温阶段温度上升很快,在轮胎硫化冷却阶段降温也很快。同胎肩点  $a$  相比,胎侧点  $b$  在较短的时间内就能完成硫化。

胎圈点  $c$  处也很厚,其和硫化程度随  $t$  的变化曲线与胎肩点  $a$  大致相同。

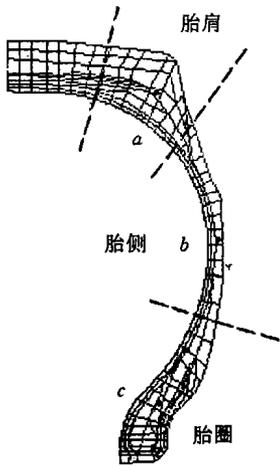


图13 考查点位置示意

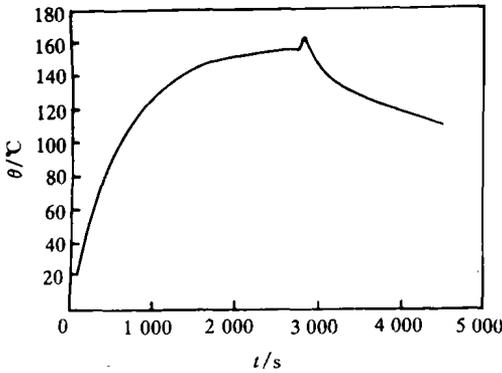


图14 胎肩点 a 的  $\theta-t$  关系曲线

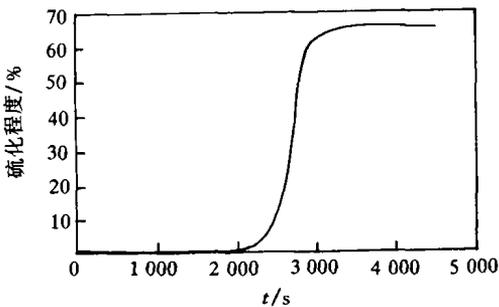


图15 胎肩点 a 的硫化程度-t 关系曲线

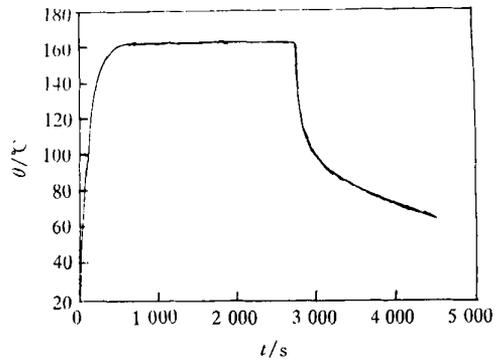


图16 胎侧点 b 的  $\theta-t$  关系曲线

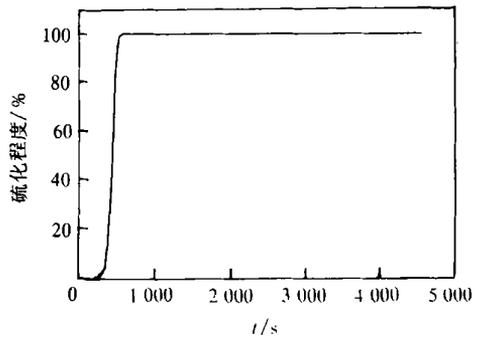


图17 胎侧点 b 的硫化程度-t 关系曲线

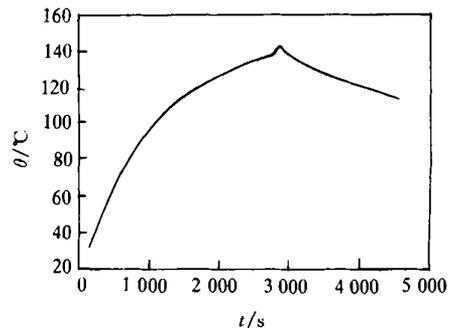


图18 胎圈点 c 的  $\theta-t$  关系曲线

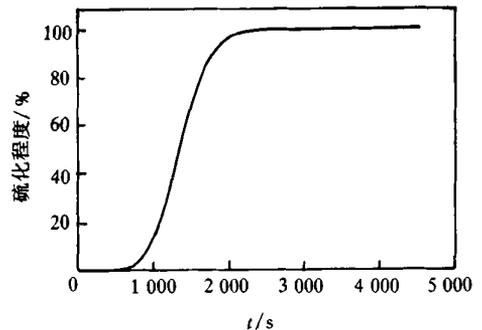


图19 胎圈点 c 的硫化程度-t 关系曲线

#### 4 结语

本工作把轮胎硫化作为轴对称问题处理,开发了一个能够比较准确地数值模拟轮胎硫化过程的有限元分析软件。该软件考虑了轮胎材料的非均质性、橡胶基复合材料传热性能的各向异性、轮胎硫化时橡胶材料伴有的反应生热以及轮胎硫化

的实际加温历程。

用所开发的轮胎硫化过程有限元分析软件对某载重子午线轮胎的硫化过程进行了仿真计算,得到一系列数值计算结果。结果表明,其所揭示的规律符合实际,说明所开发的轮胎硫化过程有限元数值仿真软件有效、可靠。

借助于有限元分析技术数值模拟轮胎硫化过程中的温度场(包括正硫化和后硫化)随时间的变化规律,并以此来推算轮胎内部材料的硫化程度场,进而推算轮胎内部的材料性能场对进行科学化和数字化轮胎设计具有重要的理论意义,对改进硫化工艺和橡胶配方设计、缩短硫化时间具有重要的实际意义。

#### 参考文献:

- [1] 傅彦杰. 轮胎硫化测温[J]. 轮胎工业, 1999, 19(12): 744-747.  
 [2] 于泳, 武玺, 闫三防, 等. 硫化测温技术的应用[J]. 轮胎

- 工业, 2000, 20(11): 678-681.  
 [3] 闫相桥, 乌大琨, 王友善, 等. 轮胎-地面静态接触的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2000, 20(9): 527-533.  
 [4] 闫相桥. 轮胎有限元分析技术及其在轮胎结构优选中的应用[J]. 固体力学学报, 2001, 22(2): 150-164.  
 [5] 闫相桥, 王友善, 乌大琨, 等. 轮胎结构有限元分析技术应用于轮胎结构优选. . 胎体反包高度的优选[J]. 轮胎工业, 2000, 20(5): 270-275.  
 [6] 闫相桥, 乌大琨, 王友善, 等. 轮胎结构有限元分析技术应用于轮胎结构优选. . 带束层宽度的优选[J]. 轮胎工业, 2000, 20(6): 337-344.  
 [7] 闫相桥, 王友善, 乌大琨, 等. 子午线轮胎带束层中应力的有限元分析[J]. 轮胎工业, 2000, 20(8): 463-467.  
 [8] Toth W J, Chang J P, Zanichelli C. Finite element evaluation of the state of cure in a tire [J]. Tire Science and Technology, 1991, 19(4): 178-212.  
 [9] Eckert E R G, Drake R M. Analysis of heat and mass transfer [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1972. 1-49.  
 [10] 监凯维奇 O C. 有限元法[M]. 尹泽勇, 江伯南译. 北京: 科学出版社, 1985. 335-337.

收稿日期: 2001-12-20

## Analysis of tire curing process with FEA

YAN Xiang-qiao, TONG Jian

(Haerbin University of Technology, Haerbin 150001, China)

**Abstract:** A FEA software for digital-simulating the tire curing process correctly has been developed. Many factors are considered in the software, such as the non-consistency of tire materials, the anisotropy of heat conductivity in rubber composite, the accompanying reactive heat build-up of rubber during tire vulcanization and the real temperature rising history of tire during vulcanization. It is confirmed by the results from the simulating calculation for the curing process of a truck radial tire that the digital simulation FEA software is effective and reliable.

**Key words:** tire; vulcanization; FEA

### 山东玲珑橡胶有限公司通过 QS 9000 和 VDA 6.1 质量体系认证

中图分类号: TQ330 文献标识码: D

2002年1月14~18日,上海莱茵公司两名专家依据 QS 9000 和 VDA 6.1 质量体系标准对山东玲珑橡胶有限公司涉及生产控制全过程的 22 个要素实施了认证审核和管理审核,对涉及要素的各个部门和生产车间进行了验证。最终该公司顺利通过 QS 9000 和 VDA 6.1 质量体系审核,

这是该公司继 1997 年通过 ISO 9000 质量体系认证和轮胎产品双认证、1998 年通过美国 DOT 认证、1999 年通过欧洲 ECE 标准认证之后获得的又一通往国际汽车配套市场的通行证,标志着该公司在产品质量管理方面上了一个新台阶,步入了制度化、规范化、程序化发展的轨道。

(山东玲珑橡胶有限公司 刘纯宝  
冯雪波供稿)