

子午线轮胎有限元分析

第 4 讲 帘线-橡胶复合材料

洪宗跃, 吴桂忠

(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100039)

中图分类号: U463.341⁺.6; O241.82 文献标识码: E 文章编号: 1006-8171(2006)01-0055-07

帘线-橡胶复合材料是一种较为特殊的复合材料, 在橡胶制品中有着广泛的应用, 尤其是在轮胎中起着重要的作用。橡胶起密封气体、提供轮胎与地面抓着力作用, 帘线则承担大部分负荷。二者结合构成性能优异的帘线-橡胶复合材料。子午线轮胎的材料主要有两种: 一种是纯胶料材料, 包括胎面胶、胎肩垫胶、胎侧胶、胎圈护胶、三角胶和气密层胶等; 第二种是帘线-橡胶复合材料, 包括胎体、带束层、胎圈加强层和钢丝圈等。

本讲将从帘线-橡胶复合材料的组分——橡胶和帘线出发, 用弹性力学的观点和方法, 研究帘线-橡胶复合材料的力学性能, 表述帘线-橡胶复合材料的工程常数, 最后推导出材料常数的计算公式。

1 橡胶的力学性能

1.1 橡胶的应力-应变关系

纯橡胶是无法使用的, 为了获得良好的力学性能, 需要在纯胶中加入各种填充材料, 并配以适当的硫化体系进行硫化。硫化胶的力学性能是时间和温度的函数, 其静态模量-时间形变曲线呈现出明显的 3 种形态: 玻璃态、高弹态和粘流态。在此所讨论的橡胶力学性能均为硫化胶在高弹态下所表现出来的力学性能。

橡胶材料是一种大变形、不可压缩超弹性的材料, 橡胶力学中通常选择 100%~500% 变形范围内的定伸模量或定伸应力等指标作为研究对象。但在实际应用中, 轮胎橡胶的变形受帘线的约束, 其应变小于 10%, 因此在帘线-橡胶复合材

料结构分析中使用的是橡胶的初始模量(变形小于 10%)。

在此前提下, 弹性模量与应变近似呈线性关系, 不考虑橡胶在加工时的定向及部分结晶, 橡胶的各向异性将消失。因此, 根据弹性理论, 可对橡胶做如下假设: 连续性、小应变、线弹性、均匀性、各向同性和无初应力。将橡胶简化为线弹性的各向同性材料可以满足求解的需要。

1.2 橡胶的弹性常数

橡胶材料是一种双模量材料, 具有不可压缩性, 假设在小应变范围内是线弹性。由于炭黑以及各种配合剂在橡胶中可以充分混合, 橡胶可以视为均质的; 不考虑胶料在加工时(压延、挤出)的定向及部分结晶, 其各向异性消失; 橡胶的粘弹性暂不考虑, 这样可将硫化胶看作是线弹性、均质、各向同性的不可压缩的工程材料。

橡胶弹性具有低模量、大变形、外力去掉后迅速恢复但恢复不完全的特点。由热力学第一定律和第二定律可知, 橡胶的弹性来自熵的变化, 在小变形时, 橡胶体积的稍微膨胀虽然引起内能变化, 但数值很小, 接近理想状态, 而熵的变化非常大, 因此橡胶的弹性是熵弹性。

1940 年, Mooney 通过大量试验研究得到橡胶弹性力学的表达式。Mooney 得到的半经验公式解决了非线性弹性理论中最难的问题之一, 给出了弹性势函数的具体形式, 同时试验证实了橡胶是不可压缩的材料。正是在这个基础上, 从 1948 年起, Rivlin 用半逆法获得了一系列简单而重要问题(圆柱体扭转、立方体弯曲等)的精确解,

用这些结果预测橡胶制品的性能,精度可达百分之几。

对于线弹性、均质、各向同性的不可压缩材料,其弹性性质可以用两个独立的弹性常数:杨氏模量(E_r)和泊松比(μ_r)来表征。在小变形、小应变的条件下, E_r 可由应力-应变曲线的线性部分得到,即直线的斜率。

对于橡胶类不可压缩材料,通常认为其泊松比为0.5,为了避免计算刚度矩阵出现的奇异性,一般采用0.49。因此,对不可压缩的各向同性材料来说,只有一个独立的弹性常数 E_r 。

剪切弹性模量(G)可根据弹性理论得到

$$G = \frac{E_r}{2(1 + \mu_r)}$$

也可以引入橡胶体积弹性模量(K_r)来表示橡胶的弹性:

$$E_r = 2G(1 + \mu_r) = 3K_r(1 - 2\mu_r)$$

当 $\mu_r = 0.5$ 时, $E_r = 3G$, $K_r \rightarrow \infty$ 。

弹性模量可由试验测得。影响弹性模量的因素很多,其中试验温度、形变速率和硫化胶组分是主要因素。

橡胶具有双模量特性,在应变相同的条件下,拉伸过程与压缩过程具有不同的模量,一般来说,拉伸弹性模量小于压缩弹性模量。

1.3 Mooney 和 Ogden 模型

橡胶是一种非线性、不可压缩或近似不可压缩的超弹性材料,承载时可产生很大的变形。对于超弹性材料,本构关系通常是以应变不变量或基本伸长率表示的应变能密度得到。常用的这种函数有 Mooney 模型和 Ogden 模型等。

Mooney 模型:

$$W = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} C_{mn} (I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n$$

式中, C_{mn} 为常数,且 $C_{00} = 0$, I_1 和 I_2 为 Cauchy-Green 变形张量 C_{ij} 的第1和第2不变量。

Ogden 模型:

$$W = \sum_n \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3)$$

式中, λ_1 , λ_2 和 λ_3 为3个基本伸长率。

第二类 Piola-Kirchhoff 应力张量 S_{ij} 为

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}}$$

刚度张量 D_{ijkl} 推导公式为

$$D_{ijkl} = \frac{\partial^2 W}{\partial E_{ij} \partial E_{kl}} = \frac{4 \partial^2 W}{\partial C_{ij} \partial C_{kl}}$$

常用的 Mooney 模型有下述几种。

Neo-Hookean 模型:

$$W = C_{10} (I_1 - 1)$$

Mooney-Rivlin 模型:

$$W = C_{10} (I_1 - 1) + C_{01} (I_2 - 1)$$

Yoech 模型:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{30} (I_1 - 3)^3$$

Mooney 模型的三次式:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + C_{11} (I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{20} (I_1 - 3)^2 + C_{02} (I_2 - 3)^2$$

2 帘线的力学性能

2.1 帘线的应力-应变关系

帘线是由单丝按一定工艺要求捻制而成,是承受载荷的主体。为了提高帘线的性能,制造帘线时必须加捻,这相当于给帘线施加一个初始应力。如果将帘线看作圆柱体,则帘线之间有空隙,也就是说材料分布不均匀。高分子材料帘线(锦纶、聚酯、芳纶)具有粘弹性。

纤维类帘线具有明显的应力-应变曲线非线性性质。帘线的应力-应变性能与橡胶不同,而与金属材料的应力-应变性能相似。纤维帘线的应力-应变性能对湿度、帘线结构、捻度和拉伸速率很敏感,这对试验技术提出了严格的要求。帘线的应力-应变曲线总体上呈非线性,但如果只考虑帘线在小应变时的情况,可以简化非线性特点,近似认为是线弹性关系。

只考虑帘线在小应变时的情况,钢丝帘线在被破断前可以简化非线性特点,其应力-应变基本上呈线性关系。

2.2 帘线的弹性常数

轮胎中的帘线可认为是具有5个独立弹性常数的横观各向同性材料,即在垂直于帘线方向的平面内呈各向同性,但实际上只有单丝才能满足这种假设。轮胎用钢丝帘线通常是加捻的,在单丝和股之间有空隙,因此不能像橡胶那样认为是匀质的各向同性材料。

在实际计算中,只需要帘线的纵向弹性模量、

泊松比和剪切模量,而忽略横向弹性模量和泊松比,因为帘线-橡胶复合材料体系的多数性能受这两个因素的影响较小。另外,帘线的粘弹性、股数和捻度等因素对帘线的弹性常数都有显著影响。如纤维加捻成帘线时,在某些场合,帘线的拉伸弹性模量会降低 $1/3$,而典型胎体帘线的拉伸弹性模量会降低 $1/2$ 。

帘线拉伸弹性模量(E_c)与捻度(T_n)之间的关系为

$$E_c = \frac{E_f}{1 + 4\pi^2 R^2 T_n^2}$$

式中, E_f 为单丝弹性模量, R 为帘线当量半径。

压缩条件下帘线泊松比(μ_c)与捻度的关系为

$$\mu_c = \frac{1}{4\pi^2 R^2 T_n^2}$$

拉伸条件下帘线泊松比与捻度的关系式比较复杂,这里不便给出。

轮胎使用加捻帘线是因为帘线加捻后可以提高轮胎使用状态下的疲劳寿命,而且也有利于帘线与橡胶的粘合。

3 帘线-橡胶复合材料的力学性能

3.1 帘线-橡胶复合材料的简化模型

轮胎用帘线-橡胶复合材料的性能不同于刚性复合材料,其特点如下:①帘线是由许多细丝和纱线合股加捻组成的,而不是直棒;②帘线在复合材料中的体积分数很小,但其对轮胎力学性能的影响却很大;③帘线的模量大大高于橡胶的模量,两者间的刚度比相差约 $3\sim 4$ 个数量级;④帘线直径存在着较大的尺寸不均匀性。

为了便于分析研究,建立适合的帘线-橡胶复合材料的简化模型是必要的。目前,帘线-橡胶复合材料的细观力学理论是在刚性复合材料细观力学理论上发展起来的,其目的是希望用组分材料(帘线和橡胶)的弹性模量来预测复合材料的弹性模量、刚度或柔度。Walter 和 Patel 综述和发展了这一领域的理论研究,提出了单层板的偏轴力学性能和层合板力学性能的近似计算公式。由于帘线-橡胶复合材料的组分材料具有大刚度比特性,加上橡胶的不可压缩性假设,使其力学性能的近似计算公式得以大大简化,为实际应用提

供了方便。

建立帘线-橡胶复合材料简化模型的前提是做如下基本假设:单层板是宏观均匀、线弹性、宏观正交各向异性、无初应力;帘线是均匀、线弹性、各向异性、规则排列、完全成一条线;橡胶是均匀、线弹性、各向同性。此外,还要假设帘线与橡胶的粘合是完好的。

事实上,忽略其粘弹性,帘线-橡胶复合材料可认为是两种线性材料的组合,其中橡胶是均匀、各向同性的材料;帘线是横观各向同性的圆柱体材料。因此,帘线-橡胶复合材料可认为是线弹性、相均匀、正交各向异性的材料。简化后的帘线-橡胶复合材料简单层板如图 1 所示,用“1”标记单层板的纵向(帘线方向),“2”标记单层板的横向(垂直于帘线方向),“3”标记垂直于层板方向,从而构成材料主轴坐标系。用 5 个弹性常数才能确定单层帘线-橡胶复合体系的力学性能,这 5 个弹性常数是纵向杨氏模量(E_1)、横向杨氏模量(E_2)、面内剪切模量(G_{12})、主泊松比(μ_{12})和次泊松比(μ_{21}),其中只有 4 个常数是独立的。如同任何一种各向同性材料一样,这 5 个常数与整个帘布层的厚度尺寸有关。可以设想,这种复合材料的弹性常数主要取决于帘线和橡胶的力学性能以及各自所占的体积分数。这些弹性常数可以通过试验直接测得(压延帘布层),也可以根据帘线和橡胶各自的力学性能通过一系列理论公式计算得到。

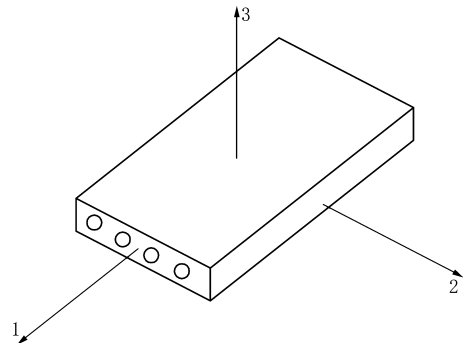


图 1 单层帘线增强橡胶复合材料主轴坐标系

关于帘线-橡胶复合材料的细观力学理论,比较为大家所公认的主要有以下 5 个公式。

(1) Hermans 公式

Hermans 采用弹性力学求解独立模型精确

解的方法对复合材料的细观力学性能进行了研究,采用独立圆柱模型得到弹性力学的精确解。

$$E_1 = E_c \phi_c$$

$$E_2 = \frac{2E_r(1 + \phi_c)}{(1 - \phi_c)(1 + \mu_r)[1 + (1 - 2\mu_r)(1 + \phi_r)]}$$

$$\mu_{12} = \mu_r(1 - \phi_c) + \mu_c \phi_c$$

$$\mu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \mu_{12}$$

$$G_{12} = \frac{G_r(1 + \phi_c)}{1 - \phi_c}$$

式中, ϕ_c 和 ϕ_r 分别为帘线和橡胶的体积分数, E_c 和 μ_c 为帘线的纵向弹性常数, E_r , μ_r 和 G_r 为橡胶的各向同性常数。帘线体积分数按下式计算:

$$\phi_c = \frac{\pi N d^2}{4h}$$

$$\phi_r = 1 - \phi_c$$

$$N = \frac{N_0 R_0}{R_j}$$

式中 N ——帘线密度;

d ——帘线直径;

h ——单层板厚度;

N_0 ——初始帘线密度;

R_0 ——轮辋半径;

R_j ——节点半径。

Hermans 的工作引入了一些新的常数,并得到了一组公式,只是这些公式比较复杂,使用起来不是很方便。

(2) Gough-Tangorra 公式

Gough 和 Tangorra 以帘线-橡胶复合材料为研究对象,取一长方形试样并做如下假设:

①试样的长边保持线性和平行,从局部看是无限大的区域;

②橡胶和帘线是均匀的,因此整体应变与局部应变是一致的;

③帘线方向的应力对应于帘线弹性模量,但是帘线与部分橡胶一样承担剪切和横向应力;

④虽然考虑了帘线和橡胶在两个主方向截面的面积,帘线的有限厚度并不影响应力计算。

考虑帘线与橡胶的相互作用并利用材料力学的方法推导出压延帘布弹性常数的近似表达式:

$$E_1 = E_r(1 - \phi_c) + E_c \phi_c$$

$$E_2 = \frac{E_r(1 - \phi_c)}{1 - \mu_r^2} = \frac{4}{3} E_r(1 - \phi_c)$$

$$\mu_{12} = \mu_r = 0.5$$

$$\mu_{21} = \frac{2E_r(1 - \phi_c)}{E_r(1 - \phi_c) + 3E_c \phi_c} = \frac{E_2}{E_1} \mu_{12}$$

$$G_{12} = G_r(1 - \phi_c)$$

(3) Halpin-Tsai 公式

为了建立比采用简单单向复合物原理更精确的弹性常数的表达式,需要使用比材料力学更为先进的概念(如弹性理论)。Halpin-Tsai 公式是半经验性公式,但是建立在较复杂的微观力学分析基础上。如果用这些方程式预测的单丝、单层复合物的力学性能的数值与实测值相当符合,则可以将试验所测的弹性常数代入方程式中,以预测叠层的性能。Halpin-Tsai 公式实质上是证明了 Hermans 解可以进行简化,并提出了其简化解。此公式可以应用于任何几何形状的纤维。

$$E_1 = E_r(1 - \phi_c) + E_c \phi_c$$

$$E_2 = \frac{E_r(1 - 2\phi_c)}{1 - \phi_c}$$

$$\mu_{12} = \mu_c \phi_c + \mu_r(1 - \phi_c)$$

$$\mu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \mu_{12}$$

$$G_{12} = \frac{G_c + G_r + (G_c - G_r)\phi_c G_r}{G_c + G_r - (G_c - G_r)\phi_c}$$

(4) 赤坂-平野公式

赤坂隆和平野正在 1972 年提出了一套非常简单的计算公式,假设帘线和橡胶在横断面上均以矩形截面相互间隔。

$$E_1 = E_c \phi_c$$

$$E_2 = \frac{E_r}{(1 - \phi_c)(1 - \mu_r^2)} = \frac{4E_r}{3(1 - \phi_c)}$$

$$\mu_{12} = \mu_r = 0.5$$

$$\mu_{21} = 0$$

$$G_{12} = \frac{G_r}{\phi_r} = \frac{1 - \mu_r}{2} E_2 = \frac{E_2}{4}$$

(5) Tabaddor 公式

Tabaddor 对帘线-橡胶复合材料力学性能的有关概念及边界效应对其力学性能的影响进行了详细的研究和分析,并对平板模型中代表体积单元的一维、二维和三维近似情况进行计算,推导出一系列近似公式:

$$E_1 = E_r(1 - \phi_c) + E_c \phi_c \approx E_c \phi_c$$

$$E_2 = \frac{E_c E_r}{E_c \phi_r + E_r \phi_c} \approx \frac{E_r}{1 - \phi_c}$$

$$\mu_{12} = \mu_c \phi_c + \mu_r (1 - \phi_c)$$

$$\mu_{21} = \frac{E_2}{E_1} \mu_{12}$$

$$G_{12} = \frac{G_c G_r}{G_c \phi_r + G_r \phi_c}$$

3.2 帘线-橡胶复合材料的弹性常数

轮胎中的帘线-橡胶复合材料实质上是由作为增强相的帘线在基体相橡胶中排列组成的刚柔相辅的复合材料,呈现明显的各向异性。子午线轮胎胎体帘线径向分布,带束层帘线斜向排列,通常将这种材料看作正交各向异性材料和各向异性材料。轮胎中的帘线-橡胶复合材料其纤维(单丝)方向与主轴方向不一致,即是所谓的偏轴性能,如图 2 所示。

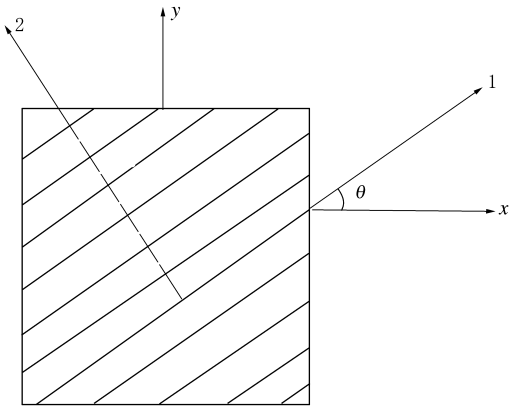


图 2 偏轴坐标与主轴的关系

对于纤维(单丝)方向与主轴方向一致的正交各向异性单层板,虎克定律为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

式中 σ_1, σ_2 ——分别为 1 和 2 轴的轴向应力;
 τ_{12} ——1 和 2 轴平面内的剪切应力;
 ϵ_1, ϵ_2 ——分别为 1 和 2 轴的轴向应变;
 γ_{12} ——1 和 2 轴平面内的剪切应变;
 S ——柔量。

柔量与工程常数的关系为

$$\begin{aligned} S_{11} &= 1/E_1 \\ S_{12} &= \mu_{12}/E_1 \\ S_{22} &= 1/E_2 \\ S_{66} &= 1/G_{12} \end{aligned}$$

对于偏轴性能,虎克定律为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

式中偏轴转换柔量矩阵 $\bar{S}_{ij}$ 为

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta$$

$$\bar{S}_{12} = S_{11} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{12} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta$$

$$\bar{S}_{66} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)$$

偏轴复合材料工程常数的表达式如下:

$$E_x = 1/\bar{S}_{11}$$

$$E_y = 1/\bar{S}_{22}$$

$$G_{xy} = 1/\bar{S}_{66}$$

$$\mu_{xy} = -E_y \bar{S}_{12}$$

将 $\bar{S}_{ij}$ 和偏轴复合材料工程常数的表达式代入 Gough-Tangorra 公式,可以得到偏轴性能的 Gough-Tangorra 公式:

$$E_x = \frac{G_r (1 - \phi_c) [E_c \phi_c + 3G_r (1 - \phi_c)]}{E_c \phi_c \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{4} E_c \phi_c \sin^4 \theta + G_r (1 - \phi_c)}$$

$$G_{xy} = \frac{G_r (1 - \phi_c) [E_c \phi_c + 3G_r (1 - \phi_c)]}{3E_c \phi_c (1 - 3\sin^2 \theta \cos^2 \theta) + G_r (1 - \phi_c)}$$

$$\mu_{xy} = \frac{3E_c \phi_c \sin^2 \theta \cos^2 \theta + 2G_r (1 - \phi_c)}{4E_c \phi_c \sin^2 \theta \cos^2 \theta + E_c \phi_c \sin^4 \theta + 4G_r (1 - \phi_c)}$$

通常将单层帘线-橡胶复合材料模拟为横观各向同性材料,采用 Halpin-Tsai 公式确定材料主轴坐标系中的弹性常数。

如图 1 所示,取 1 方向为单层板的横向,3 方向为单层板的纵向,1-2 平面为横观各向同性平面,于是 Halpin-Tsai 公式变为

$$E_3 = E_r (1 - \phi_c) + E_c \phi_c$$

$$E_1 = \frac{E_r (1 - 2\phi_c)}{1 - \phi_c}$$

$$\mu_{31} = \mu_c \phi_c + \mu_r (1 - \phi_c)$$

$$\mu_{13} = \frac{E_3}{E_1} \mu_{31}$$

$$G_{31} = \frac{G_c + G_r + (G_c - G_r) \phi_c G_r}{G_c + G_r - (G_c - G_r) \phi_c}$$

由该组公式可以确定 4 个独立参数。由于是横观各向同性材料,有 $E_2 = E_1, \mu_{32} = \mu_{31}, G_{23} = G_{31}$, 而 $\mu_{23} = \mu_{32} E_3 / E_2$, 这样就确定了 7 个材料参数, 还有 μ_{12} 和 G_{12} 两个参数, 这里 μ_{12} 取 $0.3 \sim 0.5$, 由 $G_{12} = \frac{E_1}{2(1+\mu_{12})}$ 确定出 $G_{12}, \mu_{21} = \mu_{12}$ 。

当实际坐标系和材料主轴方向并不统一时, 假设 (x, y, z) 和 $(1, 2, 3)$ 坐标系间向量的转换关系为

$$\begin{bmatrix} \nu_x \\ \nu_y \\ \nu_z \end{bmatrix} = [L] \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}, \quad [L] = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix}$$

$$[T]_\sigma = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2m_1n_1 & 2n_1l_1 & 2l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 & 2l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 & 2l_3m_3 \\ l_2l_3 & m_2m_3 & n_2n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 & l_2m_3 + l_3m_2 \\ l_3l_1 & m_3m_1 & n_3n_1 & m_3n_1 + m_1n_3 & n_3l_1 + n_1l_3 & l_3m_1 + l_1m_3 \\ l_1l_2 & m_1m_2 & n_1n_2 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 & l_1m_2 + l_2m_1 \end{bmatrix}$$

$$[T]_\epsilon = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & m_1n_1 & n_1l_1 & l_1m_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & m_2n_2 & n_2l_2 & l_2m_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & m_3n_3 & n_3l_3 & l_3m_3 \\ 2l_2l_3 & 2m_2m_3 & 2n_2n_3 & m_2n_3 + m_3n_2 & n_2l_3 + n_3l_2 & l_2m_3 + l_3m_2 \\ 2l_3l_1 & 2m_3m_1 & 2n_3n_1 & m_3n_1 + m_1n_3 & n_3l_1 + n_1l_3 & l_3m_1 + l_1m_3 \\ 2l_1l_2 & 2m_1m_2 & 2n_1n_2 & m_1n_2 + m_2n_1 & n_1l_2 + n_2l_1 & l_1m_2 + l_2m_1 \end{bmatrix}$$

应力-应变关系为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [C] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [S] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

对于正交各向异性材料, 柔度矩阵可以用工程常数表示为

则有

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]_\sigma \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]_\epsilon \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{21}}{E_2} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

弹性系数转轴公式为

$$[S]_{x,y,z} = [T]_\epsilon [S]_{1,2,3} [T]_\epsilon^T$$

材料主轴坐标系中的横观各向同性材料的柔度矩阵为

$$[S]_{1,2,3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{12}}{E_1} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{13}}{E_1} & -\frac{\mu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

这里先考虑 (x, y, z) 为 $(1, 2, 3)$ 坐标系绕 2 方向转动 θ 角,则有

$$[l] = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}$$

由上述转轴公式即可得到 $[S]_{x,y,z}$,从而可以

得到非主轴坐标系中各向异性材料的材料参数。考虑帘线角度,可按照转角矩阵和柔度矩阵的转轴公式进行转换。子午线轮胎 0° 带束层($\theta=0^\circ$)、胎体($\theta=90^\circ$)和钢丝圈($\theta=0^\circ$)转轴后仍为正交各向异性材料,而带束层和胎圈加强层转轴后为各向异性材料。

同时,正交各向异性材料应满足下述不等式

$$E_1, E_2, E_3, G_{23}, G_{31}, G_{12} > 0$$

$$|\mu_{21}| < (E_2/E_1)^{1/2}$$

$$|\mu_{12}| < (E_1/E_2)^{1/2}$$

$$|\mu_{32}| < (E_3/E_2)^{1/2}$$

$$|\mu_{23}| < (E_2/E_3)^{1/2}$$

$$|\mu_{13}| < (E_1/E_3)^{1/2}$$

$$|\mu_{31}| < (E_3/E_1)^{1/2}$$

$$\mu_{21}\mu_{32}\mu_{13} < \frac{1 - \mu_{21}^2(E_1/E_2)}{2} -$$

$$\frac{\mu_{32}^2(E_2/E_3) + \mu_{21}^2(E_3/E_1)}{2} < 1/2$$

阳谷华泰在北京钓鱼台召开新闻发布会

中图分类号:F27;TQ330.38 文献标识码:D

2005 年 12 月 9 日,国内著名的橡胶助剂生产企业——山东阳谷华泰化工有限公司(以下简称阳谷华泰),在北京钓鱼台国宾馆召开主题为“携手同行,共铸辉煌”的新闻发布会。

国家科技部、中国橡胶工业协会及橡胶助剂专业委员会、山东省聊城市和阳谷县的有关领导,国内多家大型轮胎企业、橡胶制品企业和经销商的代表以及中央电视台、人民日报、科技日报、光明日报、经济日报、中国化工报、轮胎工业、橡胶工业等媒体的记者出席了新闻发布会。阳谷华泰总裁王传华在会上介绍了企业的发展情况。

为满足国内外市场的需求,阳谷华泰防焦剂 CTP 的生产能力不断刷新,产品远销韩国、印度、马来西亚、印度尼西亚、泰国、中东、西欧、北美等国家和地区,至 2005 年,防焦剂 CTP 的产销量达到 5 000 t,居世界第一位。其环保型促进剂 NS 的年生产能力达到 6 000 t,使阳谷华泰成为目前全国最大的促进剂 NS 生产商。“阳谷华泰”品牌已经成为国内外客户认可的橡胶助剂著名品牌。

防焦剂 CTP 是目前橡胶行业公认的最有效、

最可靠的防止橡胶在加工过程发生早期交联的助剂。早期其生产技术只被美国、日本等国家的几家大型橡胶助剂生产巨头所拥有,20 世纪八九十年代,随着子午线轮胎生产技术的引进和新型橡胶加工机械及新技术的发展而引入国内,并逐渐成为轮胎生产配方和其它橡胶制品配方中十分重要的加工助剂。阳谷华泰是国内最大的防焦剂 CTP 生产厂家。这些年,阳谷华泰人以山东人特有的执着与真诚,将防焦剂 CTP 的生产技术和生产能力推向了一个又一个新的高度。目前,阳谷华泰的防焦剂 CTP 已稳定占据国内 70% 的市场份额,并有约 35% 出口韩国、印度、北美、东南亚等国家和地区。2005 年阳谷华泰的销售额达 4.3 亿元。

促进剂 NS 是目前世界上发展最快的橡胶促进剂之一。由于可以取代有致癌嫌疑的促进剂 NOBS,其也成为国家有关主管部门大力推荐的环保型橡胶助剂产品。2003 年,阳谷华泰敏锐地捕捉到国内外橡胶助剂市场的这一重大机遇,在不到两年的时间内,高起点、高速度地完善了一条年产 6 000 t 促进剂 NS 的生产线,成为目前国内最大的 NS 生产企业。

作为国内著名的橡胶助剂专业生产企业和橡