

子午线轮胎结构温度场分布的 三维有限元分析

李丽娟¹, 苏秀平²

(1. 广东工业大学, 广东 广州 510500; 2. 青岛化工学院, 山东 青岛 266042)

摘要:介绍了子午线轮胎结构温度场的有限元分析方法,并分析了 9.00R20 子午线轮胎在特定条件下的温度场分布,给出了轮胎温度场分布图和温度分布曲线。采用该分析方法可以预测轮胎在工作状态下的温度场,了解轮胎使用时内部的生热情况及可能的破坏行为,以便对轮胎结构及配方进行优化。

关键词:子午线轮胎;有限元分析;温度场

中图分类号:TQ336.1 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-8171(2000)12-0716-05

近年来,随着我国高速公路的迅速发展和路面条件的不断改善,对轮胎高速性能的要求日益苛刻,轮胎生热已成为影响轮胎使用性能及寿命的最主要问题。

无论是轮胎制造商还是轮胎用户都一直希望能对轮胎温度场分布进行模拟计算,以了解轮胎使用时内部的生热情况及可能的破坏行为,有限元分析法的应用和发展使这种模拟计算成为可能。

采用有限元法可以比较精确地预测轮胎在特定条件下的温度场分布,为轮胎的研究、开发及使用提供可靠的依据,特别是轮胎设计及开发人员,能够在设计之初根据预测的温度场对轮胎结构及配方进行优化,从而大大降低轮胎的开发费用,缩短开发时间。

1 轮胎结构温度场分析的数学描述

1.1 微分方程

轮胎中的橡胶材料或橡胶-帘线复合材料都表现出典型的粘弹性特性,在使用过程中不可避免会产生滞后损失而生热^[1,2],因此轮胎

温度场问题可视为有内热源的热传导问题,其热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial X_i}(\lambda_{ij} \frac{\partial \theta}{\partial X_j}) + Q - \rho C \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中 θ ——温度;

Q ——单位体积的热生成率;

ρ ——密度;

C ——比热容;

t ——时间;

λ_{ij} ——材料在指定方向上的热传导率张量分量。

对于各向同性材料,热传导率在各个方向上保持同一常数。

1.2 边界条件

轮胎温度场的边界条件有 3 类:

(1) 轮胎内外表面与空气的对流换热,可表示为:

$$\bar{q}_1 = h(\theta_r - \theta_\infty) \quad (2)$$

式中 h ——换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$;

θ_r ——表面温度;

θ_∞ ——外界环境介质温度。

(2) 内外表面与空气间的热辐射,可表示为:

$$\bar{q}_2 = \sigma(\theta_r^4 - \theta_\infty^4) \quad (3)$$

式中 σ ——Stefan-Boltzmann 常数;

ε ——辐射效率。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59603001);广东省高教厅“人才引进”基金资助项目(990002)

作者简介:李丽娟(1966-),女,山西霍州县人,广东工业大学教授,博士,主要从事工程力学、应用力学方面的教学与科研工作。

(3) 胎圈与轮辋、胎面与地面间的接触传热,可表示为:

$$\bar{q}_3 = h(\theta_n - \theta_e) \quad (4)$$

式中 θ_n 和 θ_e 为两接触边界的温度。

1.3 有限元方程离散

用有限元将轮胎离散后,每个单元内的温度分布可近似表示为^[3]:

$$\theta(X_i, t) = \sum_{i=1}^n N_i(X_i) \theta_i(t) = N^0 \theta \quad (5)$$

式中 N_i ——有限元插值形函数;

θ_i ——有限元法求解中节点温度;

N ——温度在单元内变化的插值函数;

θ ——依赖时间的单元温度向量。

在求解过程中,对于一维的时间域,采用后差分格式离散。

2 计算实例

2.1 轮胎几何模型

对 9.00R20 子午线轮胎在速度为 96.6 km h⁻¹、内压为 0.6 MPa、载荷为 6.8 kN 条件下的温度场分布进行分析。考虑到轮胎结构及材料分布,单元类型分别采用 6 节点和 8 节点块单元,轮辋则用 4 节点壳单元离散,如图 1 和 2 所示。

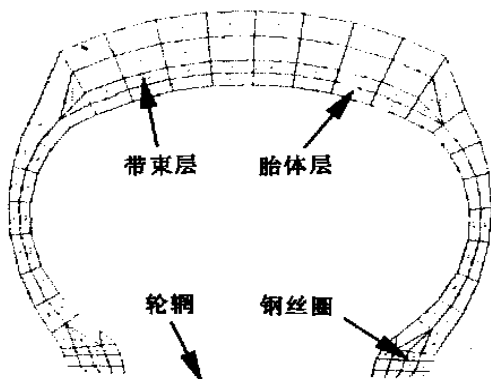


图1 轮胎断面有限元网格

2.2 材料模型

橡胶的热力学参数可从文献[1,4~7]中得到。橡胶-帘线复合材料的性能参数则根据纤维增强复合材料的混合律得出,即

$$C = C_f V_f + C_m V_m; K = K_f V_f + K_m V_m \quad (6)$$

式中 C ——比热容;



图2 轮胎三维有限元模型

K ——热传导率;

f ——纤维;

m ——基体;

V_f ——纤维的体积比;

V_m ——基体的体积比。

2.3 边界条件

边界条件考虑轮胎与周围空气及内腔空气的对流换热、轮胎内外表面的热辐射、轮胎与轮辋间的接触换热及轮辋与空气的对流换热等几种热交换边界条件。

轮胎、轮辋与空气间的对流换热系数可近似求出^[4]:

$$h_t = 2.2 V^{0.84}; h_B = 0.4 h_t; h_C = h_B$$

式中 V ——轮胎滚动速度, km h⁻¹;

t ——胎面部;

B ——胎圈部;

C ——轮胎内腔部。

轮辋与空气的换热系数等于 h_B 。轮胎外胎侧部的换热系数 h_S 在 h_t 与 h_B 间呈线性变化。

计算轮胎内外表面的热辐射时,常数 σ 取为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 轮胎各部位的热辐射率 ε 取 0.94^[8]。

轮胎与轮辋间的接触换热用热-耦合分析方法来完成,接触边界定义如图 3 所示,其中轮辋采用刚性可传热单元类型。接触热阻取为 $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

3 结果与讨论

给定工况下轮胎整体温度场分布如图 4 所

示。胎体层从胎冠中心到胎圈部位的温度分布曲线如图5所示。

从图4和5可以看出,在轮胎胎肩处有一个明显的高温区,这是由于胎肩部生热量大,而

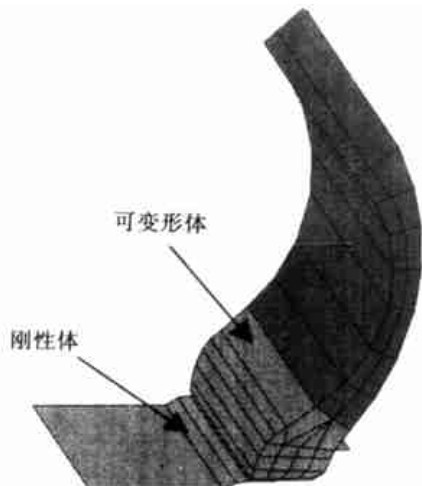


图3 轮胎与轮辋的接触模型

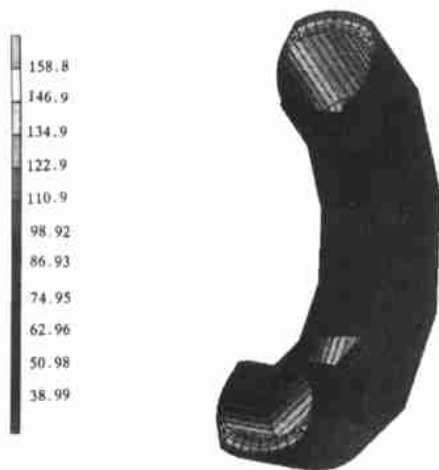


图4 轮胎整体温度场分布

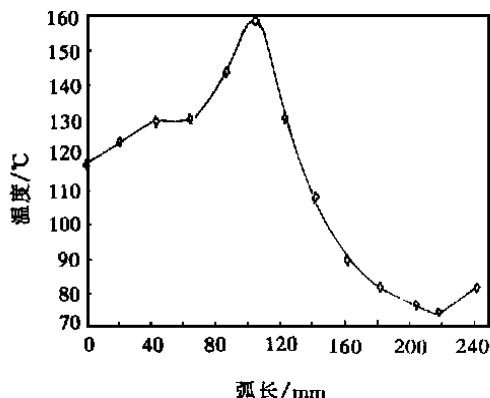


图5 轮胎胎体层温度分布曲线

橡胶层又比较厚,热量不易散发的缘故。胎圈部位温度略有升高,这是由于胎圈部位结构复杂,内部生热较多的缘故。

胎冠中部的温度分布曲线如图6所示。

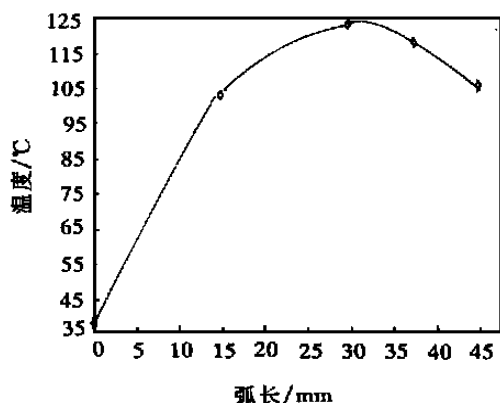


图6 胎冠中部温度分布曲线

从图6可以看出,在带束层和胎面胶界面处温度较高,这是由于帘布层生热较多,而橡胶材料的导热性又比较差,从而在该部位有较多的热量累积。

轮胎内外表面从胎冠中部到胎圈部位的温度分布和热流曲线分别如图7和8所示,其中热流曲线负值表示热量从轮胎向空气流出。

从图7和8可以看出,接近胎圈部位的对流换热比较困难,由于空气温度的升高而使热量由内腔流向了轮胎,胎圈部位的生热大部分由轮辋带走。

带束层中各个节点温度随时间变化曲线如图9所示。

从图9可以看出,经过一段时间后,轮胎的生热和散热达到了动态平衡,温度场趋于稳定。

4 结语

在子午线轮胎结构温度场分布的三维有限元分析中,未考虑轮胎与地面间、轮胎与轮辋间的摩擦生热以及轮胎花纹沟对温度场的影响,这些都将对分析结果的精度产生一定的影响。

在今后进一步的分析中应充分考虑以下几个问题:

(1) 轮胎几何模型的精确建立,考虑花纹沟的影响。

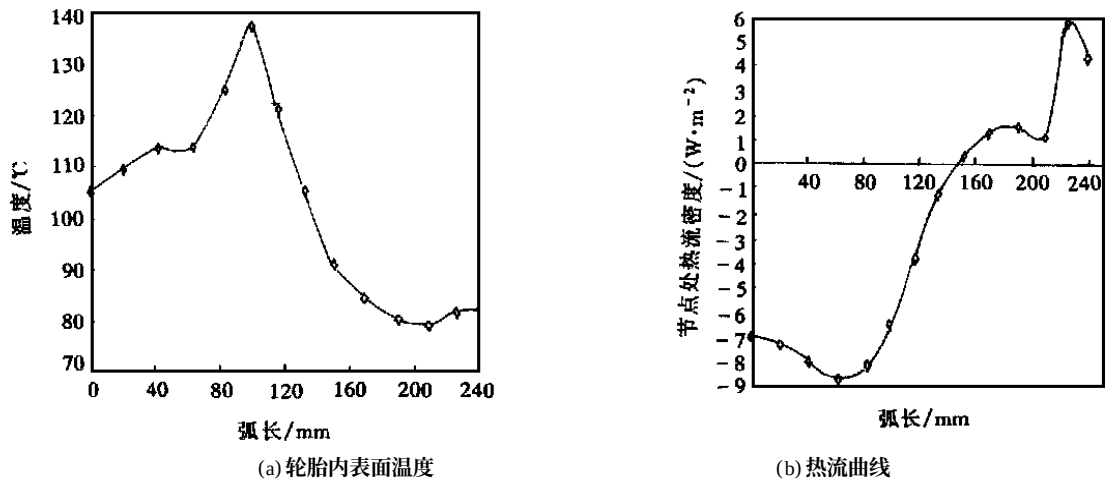


图 7 轮胎内表面温度及热流曲线

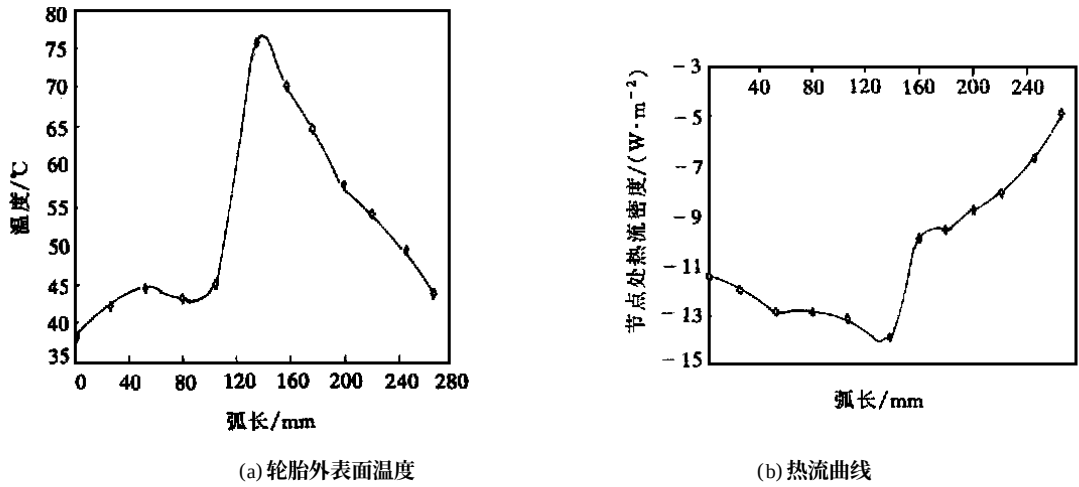
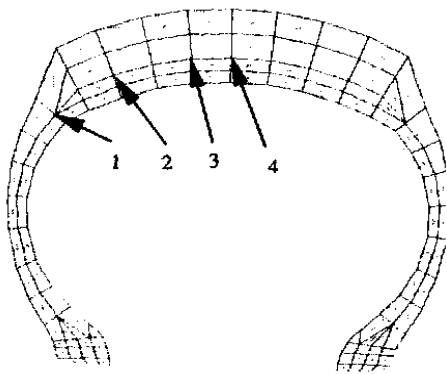
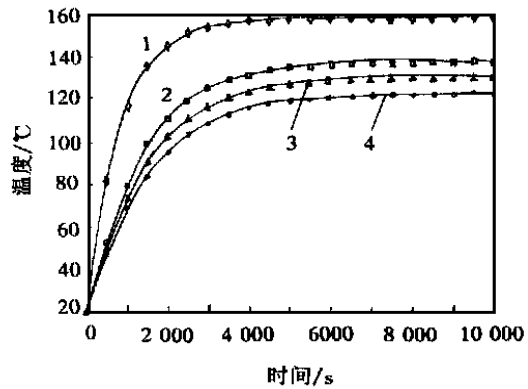


图 8 轮胎外表面温度及热流曲线



(a) 轮胎带束层中各节点位置



(b) 节点温度随时间的变化曲线

图 9 轮胎带束层各节点温度随时间变化曲线

(2) 考虑温度对轮胎材料的比热容、导热系数及热辐射率的影响,即考虑材料的非线性问题。

(3) 应用热-力耦合的分析方法,考虑热生成率与温度、应变幅间的关系,即考虑摩擦生热的影响。

参考文献:

- [1] Kainradl P, Kaufmann G. Heat generation in pneumatic tires [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1976, 49: 823-861.
- [2] Beringer C W, Kwon Y D, Prevorsek D C. Sensitivity of temperature rise on a rolling tire to the viscoelastic properties of the tire components[J]. Tire Science and Technology, 1987, 15(2): 123-133.
- [3] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 30-82.
- [4] Clark J D, Schuring D J. Load, speed and inflation pressure effects on rolling loss distribution in automobile tires[J]. Tire Science and Technology, 1988, 16(2): 78-95.
- [5] Thomas F R. Heat buildup of dynamically loaded engineered elastomeric components[J]. Elastomerics, 1989, 45(2): 22-35.
- [6] 张士齐. 轮胎力学与热学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988. 280-316.
- [7] 于清溪. 橡胶原材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996. 22-186.
- [8] Browne A L, Wickliffe L E. Rubber emissivity and the thermal state of tires[J]. Tire Science and Technology, 1979, 7(3-4): 71-89.

收稿日期: 2000-07-13

3D FEA for temperature profile in radial tire structure

LI Li-juan¹, SU Xiu-ping²

(1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510500, China; 2. Qingdao Institute of Chemical Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The FEA for the temperature field in radial tire structure is described, the temperature field distribution in 9.00R20 tire under certain conditions is analysed with the FEA method and the temperature profile and curve of the tire structure are given. The temperature field, the heat generation and the possible failure of the tire in operation can be predicted in order to optimize the tire structure and formulation.

Keywords: radial tire; FEA; temperature field