

轮胎硫化过程的数值模拟

赵树高, 张 萍, 邓 涛, 苏秀平

(青岛化工学院 高分子科学与工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要:介绍了利用有限元法对轮胎硫化过程进行数值模拟的基本原理和方法, 并采用 MARC 有限元分析软件分析了半钢子午线轮胎 175/70R13 在硫化过程中各部位的受热历程, 计算结果与轮胎硫化实时测温结果相当吻合。同时给出了轮胎硫化过程中不同时刻的温度场分布云图, 可以看出轮胎各部位的硫化历程差别较大, 胎冠和胎肩的升温速度小于胎侧和胎圈, 胎肩、胎冠及胎趾的降温速度缓慢。

关键词:轮胎; 硫化; 有限元; 温度场

中图分类号: TQ330.6⁺7; TQ336.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2001)10-0617-06

恰如其分的硫化程度是橡胶制品获得最佳使用性能的基本保障。要做到这一点, 就必须洞察橡胶制品真实的硫化历程, 科学地制定相应的硫化条件并通过有效的技术措施加以实施。由于橡胶是热的不良导体, 轮胎又是一类几何结构和材料组成十分复杂的厚制品, 硫化期间各个部位的温度(θ)不仅是空间(x, y, z)的函数, 也是时间(t)的函数, 即 $\theta = f(x, y, z, t)$ 。显然在这样一种非稳态过程中, 轮胎各部位受热历程势必会出现较大差别, 这种差别常常导致硫化不均而对最终产品的质量造成重大损害。目前, 橡胶工程领域主要依据硫化仪测定的硫化历程并结合实际经验来制定产品的硫化条件, 有时辅以硫化过程中的多点测温加以校正。这种方法着眼于局部橡胶材料的硫化特性而难以准确反映制品整体的平衡硫化规律, 对于像轮胎这样的复杂厚制品则显然偏差太大。为实现轮胎的平衡硫化, 人们曾在橡胶配方设计和硫化工艺各个方面作出了不懈的努力, 但至今尚未有重大突破。近年来, 计算机技术的发展为深入探测和分析橡胶制品的硫化规律奠定了良好的基础。

本工作利用有限元分析技术并借助于计算机对轮胎硫化过程进行大规模数值模拟, 通过求得温度场来揭示并科学地描述轮胎硫化过程的整体变化规律, 为进一步探讨优化轮胎硫化工艺、提高产品质量、降低能耗、提高生产效率, 最终实现轮胎硫化过程智能化奠定基础。

1 实验

1.1 主要原材料

半钢子午线轮胎 175/70R13 各部位的混炼胶及挂胶帘线, 主要有硫化胶囊、内衬层胶、胎体层和胎体层胶、带束层和带束层胶、冠带层和冠带层胶、胎冠基部胶、胎面胶, 青岛橡胶集团有限责任公司提供。

1.2 主要仪器与设备

HEWLETT PACKARD 计算机, CPU Pentium II 350; 内存 384 MB; 硬盘 12.8G; 通用有限元分析软件、MARC7.2/MEN-TAT3.2, 美国惠普公司产品。TC-32 导热因数测定仪, 日本京都电子工业株式会社 kyoto 电子制造公司产品。EK-2000P 型无转子硫化仪, 台湾育肯工业股份有限公司产品。FLUKE 智能数据采集仪, 美国产品。DSC204/1/F, 德国 Netzsch 公司产品。

1.3 硫化测温试验

为了验证计算机模拟的准确性, 在半钢子午线轮胎 175/70R13 的硫化期间进行了测温

基金项目: 山东省自然科学基金重点资助项目(Z99F05)

作者简介: 赵树高(1949-), 男, 山东沂南人, 青岛化工学院高分子科学与工程学院教授, 工学博士, 主要从事橡胶工程领域的科研与教学工作。

试验。测温埋线选择比较重要而又具有代表性的9个部位,如图1所示。

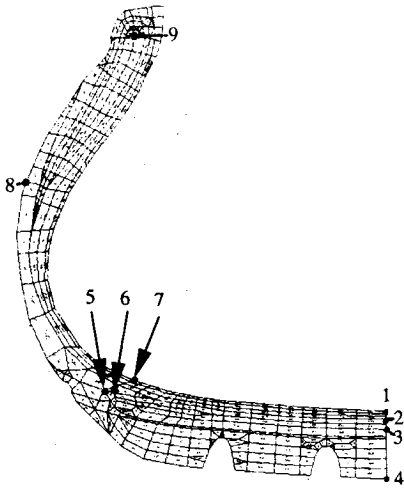


图1 测温部位分布

- 1—胶囊与内衬层之间;2—带束层与胎体层之间;
3—带束层与冠带层之间;4—胎面与模型之间;
5,6—胎侧翼胶与冠带层之间;7—胶囊与内
衬层之间(胎肩部);8—胎侧与模型之
间;9—三角胶与钢丝圈之间

2 硫化过程的有限元模型建立

2.1 边界条件的建立

(1)模型与热板接触处导热热阻可忽略不计,故此处简化为第1类边界条件,即:

$$\theta_1 = \theta(x_i, t) = 165\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

(2)胶囊与过热水之间通过对流换热,由于橡胶的导热因数很小,传热的主要热阻是橡胶的导热热阻,故此处也可简化为第1类边界条件^[1,2],即:

$$\theta_2 = \theta(x_i, t) = 180\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

(3)模型与外界空气之间通过对流换热,因模型外表面覆有绝热保温材料,此换热可忽略不计,故此边界可作为绝热边界处理。

(4)轮胎出模后与空气之间通过自然对流换热和辐射换热,可表示为:

$$\bar{q}_2 = h(\theta_{T_2} - \theta_{\infty_2}) \quad (3)$$

$$\bar{q}_3 = \sigma\epsilon(\theta_{T_2}^4 - \theta_{\infty_2}^4) \quad (4)$$

式中 h ——表面对流换热因数;

θ_{T_2} ——表面温度;

θ_{∞_2} ——外界环境介质温度;

σ ——Stefan-Boltzmann 常数;

ϵ ——轮胎表面的热辐射率。

对流换热因数 h 是一个与换热物体材料组成、表面状况、形状和环境条件有关的复杂参数, Schlänger^[3], Sae-oui P 和 Browne^[4] 等详细讨论了橡胶材料与空气之间自然对流换热因数的获取方法及数值范围。在综合考虑各种因素的基础上,分别选取了相应的胎冠和胎圈部位表面和内腔处的 h 值。

热辐射率 ϵ 也是一个与材料组成、表面状况等有关的参数,根据 Browne 的研究结果^[5],对橡胶材料来说, ϵ 通常在 0.94 附近波动且波动幅度很小,一般取 0.94 就足够精确。

2.2 初始条件的建立

由于启模后至装胎坯需要一定的时间,模具的初始温度总是低于热板温度,在此模具初始温度为 80℃,轮胎初始温度为 25℃,胶囊初始温度为 100℃。初始温度场只对开始很短一段时间的热传导有影响。

2.3 几何模型的建立

有限元法是将连续区域离散化后在每一个局部单元中应用变分计算或加权余量计算,因此必须首先在模型上划分网格。由于轮胎结构及材料分布的复杂性,在 MARC 软件中自动生成网格极其困难,必须采取合适的技术措施来建立几何模型。

本试验采用有限元分析软件 MARC7.2/MENTAT3.2 分析了半钢子午线轮胎 175/70R13 的硫化工艺过程。由于对称性分析时只取模具的 1/4 作为研究对象,其结构如图 2 所示,离散后的模具和轮胎有限元网格如图 3 所示。

2.4 材料模型的建立

首先测定轮胎和模具各部位不同材料的热传导因数、比热容和密度,再将结果分别施加在已划分好网格的轮胎各单元上,即形成轮胎有限元分析的材料模型,如图 4 所示。

3 结果与讨论

根据以上测得的材料参数、建立的各有关

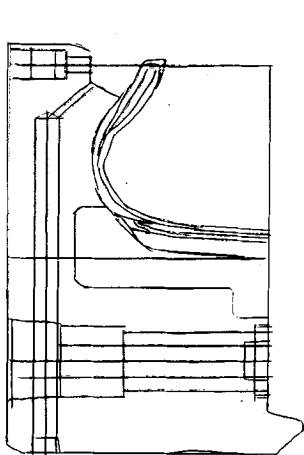
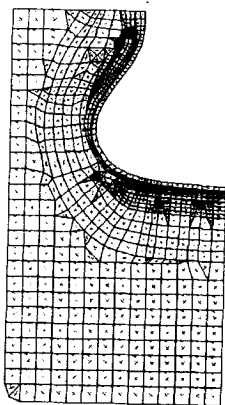
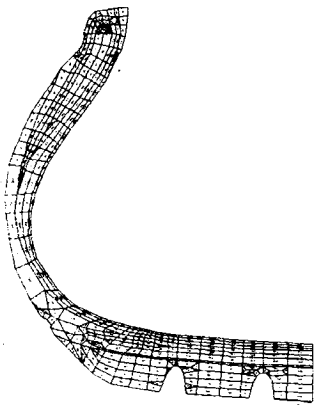


图 2 硫化模具结构



(a) 模具



(b) 轮胎

图 3 模具和轮胎的有限元网格

模型及设定的边界条件,将网格划分好后施加各材料参数和边界条件进行非线性、瞬态热传导分析,结果如图 5~9 所示。

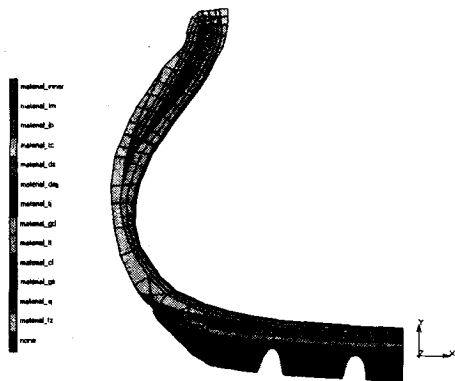
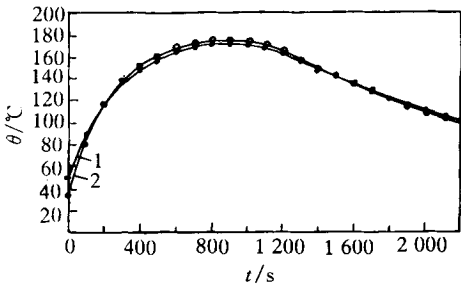
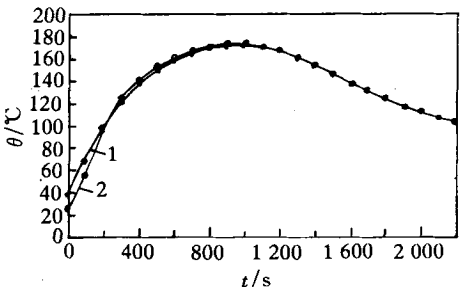


图 4 有限元分析的材料模型



(a)带束层与胎体层之间



(b)带束层与冠带层之间

图 5 带束层两侧(胎冠部)两个测温点的温度随时间变化曲线

1—计算值;2—测量值

图 5 为胎冠部带束层处两个测温点的升温历程。由图 5 可见,测量值与计算值在 600 s 之后,也就是在正硫化阶段相当吻合,最大误差仅为 1.5%。硫化初始时刻计算值较测量值偏大,主要是因为模拟时所给初始条件与实际情况有一定的差别。例如,合模后热板温度不能立即达到 165 ℃,而且温度会有一定程度的波

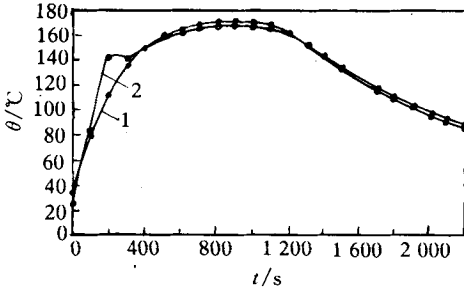
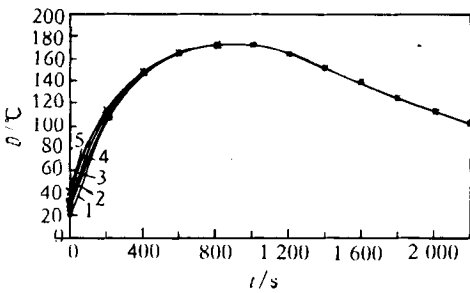
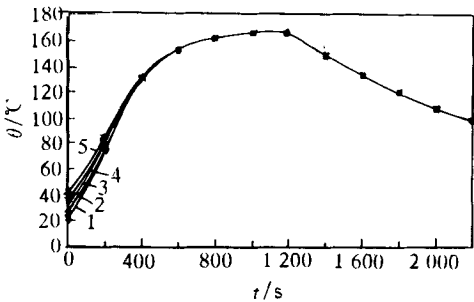


图6 胎肩部位温度随时间变化曲线
注同图5



(a)胎体层



(b)胎面胶

图7 轮胎初始条件对温度场的影响
1—20℃;2—25℃;3—30℃;
4—35℃;5—40℃

动等。但这些因素所产生的影响均会在很短的时间内消失。

图6为胎肩部位一个测温点的升温历程。由图6可见,测量值在开始一段时间内有一些波动,这很可能是由于胎肩部位厚度较大,传热不够稳定,同时合模时胎肩部位受力弯曲变形而使得埋设在该处的热电偶位置发生了移动,导致测温点不够精确。在测量值稳定下来之后,测量值与计算值在正硫化阶段吻合较好,最

大误差不超过1.18%。

将其它部位的测量值与计算值进行对比,结果同样表明,测量值与计算值相当吻合,只有在升温开始阶段稍有差别。

为了分析初始条件对计算结果的影响,本工作在硫化时间不变的前提下,设定一系列轮胎的初始温度,作出不同初始条件下几个节点温度随时间变化的曲线,如图7所示。从图7可以看出,初始条件对轮胎硫化程度的数值模拟分析无多大影响。

为了更直观地描述轮胎硫化过程中不同时刻各部位的温度分布情况,本试验作出了轮胎硫化升温过程中的温度场分布云图,如图8所示。从图8可以看出,相对于其它部位而言,胎侧部位升温速度较快,而胎冠和胎肩部位升温速度较慢,这是因为胎侧部位较薄而胎冠和胎肩部位较厚。另外从图8还可以看出,轮胎花纹对花纹沟附近区域的温升历程和温度分布有明显的

影响。图9为冷却阶段6和18min的温度场分布云图。由图9可见,在冷却阶段,热量从轮胎内外表面向外界散发,由于橡胶材料的导温因数很小,使得轮胎内部温度下降很慢,特别是胎冠、胎肩等较厚部位,因而这些部位的后硫化效应不容忽视。

对比图8和9描述的升温 and 降温过程中6min时的温度场分布云图,可以看到胎趾部位的升温速度虽然很快,但启模后的降温速度却较慢,这显然是由于在升温和降温两个过程中该处的传热方式不同造成的。

4 结论

根据轮胎硫化的具体情况,采用瞬态、非线性热传导分析方法,求出了轮胎硫化过程中不同时刻、任意部位的温度场分布情况,计算结果与硫化实时测温结果相当吻合,从而证明所建有限元模型和所用计算方法是正确的。对所得温度场进行分析发现,轮胎各部位的硫化历程差别悬殊,胎肩、胎冠等部位由于距离热源较远,而且厚度又大,升温速率明显小于胎侧和胎圈。在降温阶段,由于橡胶材料的导温因数小,

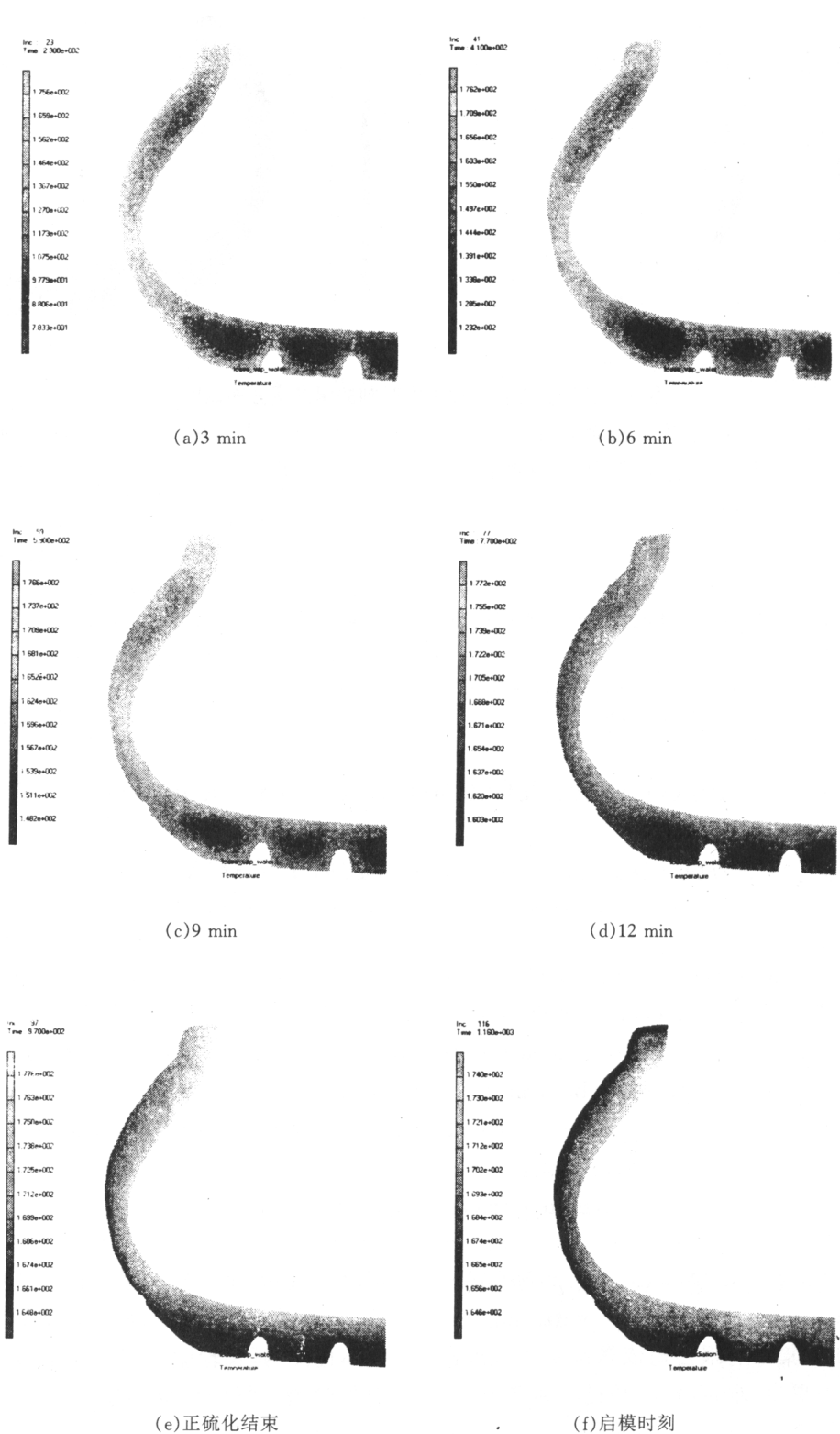


图 8 轮胎在硫化加热不同时刻的温度场分布云图

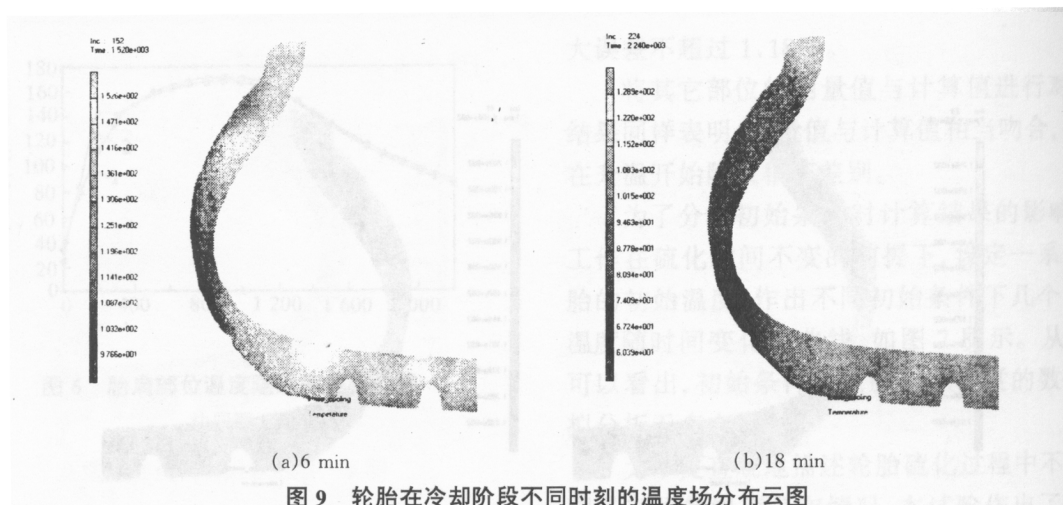


图9 轮胎在冷却阶段不同时刻的温度场分布云图

在厚度较大的胎肩、胎冠及对流换热因数较小的胎趾部位,温度下降得很缓慢,因而这些部位的后硫化效应不容忽视。

参考文献:

- [1] 孔祥歆. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 1998. 5.
- [2] 佚名. 用模拟矩形法计算橡胶制品的温度场和硫化程度[J]. 陈根度译. 橡胶译丛, 1994(3): 26.

- [3] Schlanger H P. A one-dimensional numerical model of heat transfer in the press of tire vulcanization[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1983, 56(2): 304.
- [4] Browne A L, Wickcliffe L E. Parametric study of convective heat transfer coefficients at the tire surface[J]. Tire Science and Technology, 1980, 8(3-4): 37-67.
- [5] Browne A L, Wickcliffe L E. Rubber emissivity and the thermal state of tires[J]. Tire Science and Technology, 1979, 7(3-4): 71-89.

第11届全国轮胎技术研讨会论文

Numerical model of tire vulcanization process

ZHAO Shu-gao, ZHANG Ping, DENG Tao, SU Xiu-ping

(Qingdao Institute of Chemical Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: The principle and method for numerical model of tire vulcanization process with FEM was described. The heating history in different parts of steel-belted tire 175/70R13 was analysed with MARC FEA software, and the calculated results agreed well with the temperatures measured in real time during vulcanization of tire. The temperature profiles at different times during vulcanization were also given, from which it could be seen that the vulcanization processes at different parts of tire were quite different.

Keywords: tire; vulcanization; finite element; temperature profile

川橡集团有限公司第一条 IIR 内胎问世

中图分类号: TQ333.6; TQ336.1⁺1 文献标识码: D

四川川橡集团有限公司依靠自身技术和装备力量,自力更生,艰苦奋斗,经过不懈努力,于2001年7月25日生产出川橡历史上第一条 IIR 内胎。经检测,该 IIR 内胎的各项性能指

标均达到国内先进水平。IIR 内胎的研制成功,将有效地提高公司所生产的天府牌轮胎的整体性能,延长轮胎的使用寿命;有助于树立天府牌轮胎良好的市场形象,从而提高产品的市场竞争力。

(四川川橡集团有限公司 张志汤供稿)