

橡胶微波加热硫化的有限元分析

李 涛, 杨广志, 陈海龙, 李庆领*

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:运用有限单元法求解 Maxwell 方程和传热方程, 并采用 ANSYS 有限元软件计算和分析橡胶传统的热量由外向内传递的加热过程和微波加热过程。结果表明:微波加热硫化橡胶加热时间短, 效率高; 橡胶内的电场强度分布、焦耳热密度分布和温度分布都不均匀; 随着微波加热时间的延长, 胶料内的温度提高, 但处于较高硫化温度的胶料范围几乎无变化。

关键词:橡胶; 硫化; 微波加热; 温度分布; 数值模拟

中图分类号: TQ330.6⁺7; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2013)01-0042-05

硫化是橡胶制品加工过程的最重要工序, 其目的是使橡胶制品各部位的物理性能达到最佳。由于橡胶是热的不良导体, 传热速度慢, 在传统热量由外向内传递的加热过程中, 通常内部达到正硫化时, 外部往往早已过硫化。随着我国工业化进程的发展, 橡胶制品的用量逐年上升, 急需提高橡胶制品的生产效率和质量, 加之节约能源也是企业关心的焦点, 尤其是在我们这样一个能源紧缺的国家, 节能成为不可或缺的时代主题。因此寻求一种新型加热方式尤为重要。

目前, 在我国及日本和美国等国家均可生产微波连续硫化装置, 利用此硫化装置可以生产汽车用密封胶条和加工夹有金属骨架的橡胶挤出制品等相关产品。1985 年题名为《翻新汽车轮胎方法》的美国专利^[1]中介绍了一种利用微波对翻新轮胎胎面进行硫化的方法, 该方法中微波发生器位于预硫化胎面上方, 向外释放微波, 胶合层或连接层中含有作为微波反射器的微波反射材料, 防止胎体加热硫化。1997 年题名为《用微波能生产充气轮胎的方法》的美国专利^[2]中, 介绍了一种微波硫化机模型, 此硫化机模型是在胶囊中充入高压氮气, 利用微波能量对胎坯进行加热, 从而完成轮胎的定型硫化。唐伟强等^[3]对橡胶轮胎胎坯硫

化前微波预热进行了试验研究, 通过微波预热的轮胎胎坯达到一定的起始温度, 可以提高硫化效率。

微波加热不同于一般的外部热源由表及里的传导式加热, 而是材料在电磁场中由于介质内部的功率损耗而引起的体积加热^[4], 因此研究微波在橡胶中的加热效应具有重要的意义。

1 橡胶传统加热的模拟

橡胶传统加热的物理模型如图 1 所示。

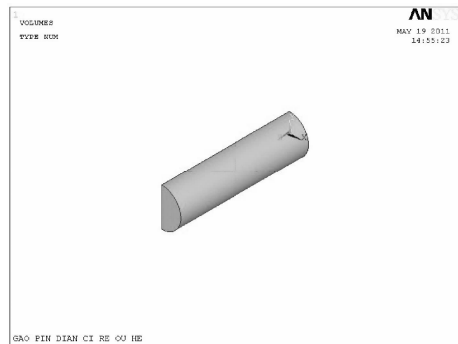


图 1 传统加热的物理模型

本次模拟采用半圆柱形橡胶, 橡胶类型为某规格轮胎胎冠胶 (HTME), 胶料长度为 200 mm, 半径为 30 mm, 设定胶料热导率为 $0.25 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, 密度为 $1.120 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 橡胶比热容随温度的变化如表 1 所示。

对圆柱形橡胶的圆柱面及两侧面施加 180°C 的温度载荷, 胶料的初始温度为 30°C 。分别进行

基金项目:山东省科技发展计划项目 (2012GSF11604)

作者简介:李涛 (1979—), 男, 山东菏泽人, 青岛科技大学讲师, 主要从事橡胶轮胎硫化传热及工艺优化的研究。

* 通信联系人

表 1 胶料比热容随温度的变化情况

温度/℃	比热容 / [J · (kg · ℃) ⁻¹]	温度/℃	比热容 / [J · (kg · ℃) ⁻¹]
30	1 620	130	2 270
40	1 720	140	2 310
50	1 790	150	2 330
60	1 880	160	2 330
70	1 970	170	2 320
80	2 050	180	2 200
90	2 140	190	2 210
100	2 180	200	2 330
110	2 190	210	2 400
120	2 230	220	2 450

4 次加热模拟,加热时间分别为 120,240,360 和 480 s。

利用传统加热方式即热量由外向内的传热方式加热胶料时,4 种情况下胶料内的温度分布如图 2 所示,内部最低温度分别为 30.001,30.285,32.382 和 37.116 ℃。

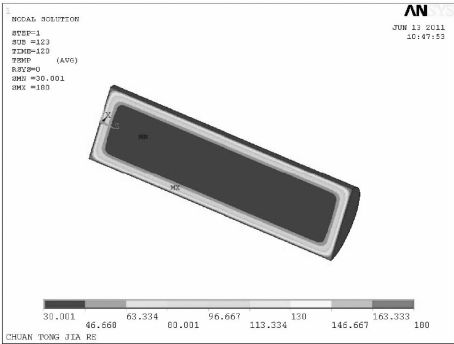
从图 2 可以看出,随着加热时间的延长,温度较高区域的范围不断增大,胶料中间最低温度范围不断缩小,虽然胶料中的最低温度随加热时间的延长而提高,但胶料中间部位温度最低区域范围仍较大,并且温度接近 30 ℃,由此可以看出,传统的热量由外向内的加热方式加热时间长,效率低。

2 微波加热的计算模型

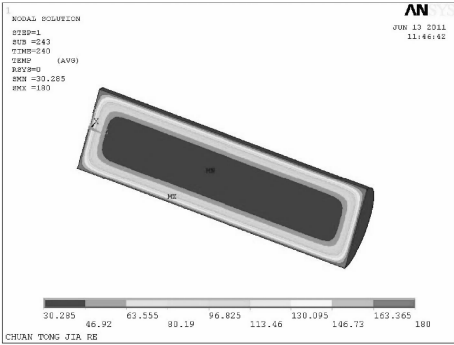
微波是指波长在 1~1 000 mm、对应频率为 0.3~300 GHz、能在发射和接收过程中实际应用波导和谐振腔技术的电磁波。本研究微波加热的频率为 2 450 MHz,功率为 10 kW,模拟采用与传统加热硫化相同的半圆柱形物理模型(见图 1),且采用相同的胎面胶(HTME),胶料几何及性能参数不变,设定胶料的相对介电常数为 3。

本研究用三维有限单元法计算加热腔内的高频电磁场及其与温度场的耦合场。微波对物质的加热实质上是一种电磁场能量在传播过程中的损耗过程。由于电磁波是以光速在介质中传播,因此微波加热对于加热介质具有内部加热的特点。如果介质有足够大的介电损耗,微波加热的速度比常规的热量由外向内传导的方法快很多倍。

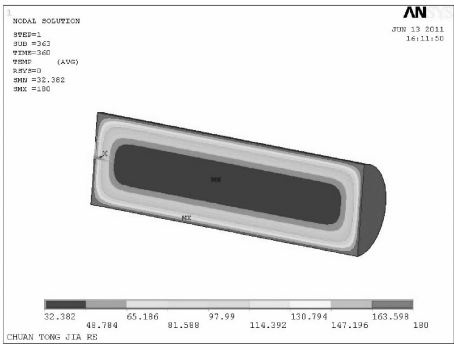
因此,在微波加热过程中,微波损耗作为内



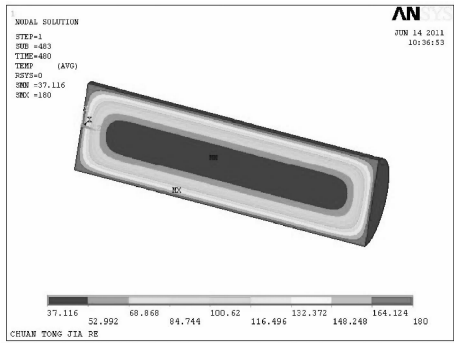
(a)加热 120 s



(b)加热 240 s



(c)加热 360 s



(d)加热 480 s

图 2 传统不同加热时间胶料的温度分布

热源,建立橡胶加热的数学模型要解决3个问题^[5-6]:

(1) 求解 Maxwell 方程得到加热模型内的电磁场分布;

(2) 建立并求解传热方程;

(3) Maxwell 方程与传热方程耦合求解,最终得到微波加热模型内的温度分布。

微波加热的数学模型为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\nu \frac{\partial A_z}{\partial z}) = -J_z + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k \frac{\partial T}{\partial z}) = -q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

$$q = \frac{P}{S} = \frac{I^2 R}{S} = J_z^2 S R \quad (3)$$

式中, ν 为磁导率, A_z 为矢量磁位, J_z 为电流密度, σ 为电导率, t 为时间, k 为热导率, T 为温度, q 为热流密度, ρ 为密度, c 为比热容, P 为功率, S 为面积, I 为电流, R 为电阻。

微波加热的过程由两个性质不同的物理过程组成。一是微波能在加热模型内的传播过程,在传播过程中由于橡胶的损耗,一部分微波能量转化为热能;二是传热过程,由于模型内的电场分布不均匀性,橡胶内部的温度分布也是不均匀的,各部分橡胶之间存在热传导的过程。微波加热橡胶的数学模型分别对两个过程进行求解,由电场的分布得到加热过程中损耗功率的分布,将损耗功率的分布作为内热源代入到传热方程中求解传热方程来得到模型内的温度分布。在加热过程中由于介质的介电参数和热学参数都与温度有密切关系,温度的分布又用来更新介质的介电参数和热学参数,介电参数的改变又反过来影响电场的分布,因此整个加热过程求解是 Maxwell 方程与传热方程的交替数值求解的过程^[7]。

整个程序的计算流程如图3所示,首先对加热模型进行建模,接着对物理模型进行网格划分,然后求物理模型中的电磁场分布,当电场(或磁场)的幅度达到稳定值时,计算平均损耗功率,代入传热方程中求温度分布,根据温度分布值更新

电磁参数和热学参数,再计算电磁场分布,如此循环,直至达到预定的加热时间。

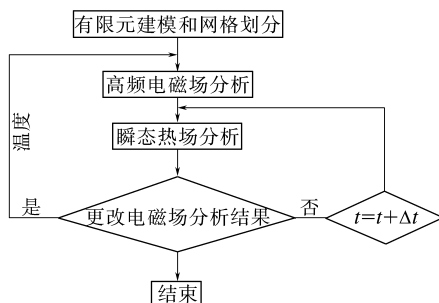


图3 计算流程

3 微波加热的计算结果

本研究运用 ANSYS 有限元分析软件对加热模型内的高频电磁场及其与温度场的耦合场进行分析计算。计算功率为 10 kW,波导模型中传播的是 TE₁₁ 模,频率为 2 450 MHz,加热前橡胶的初始温度为 30 ℃,加热时间分别为 30,60,90 和 100 s。由于只是加热时间不同,因此 4 种情况下橡胶内的电场强度分布相同,焦耳热密度分布也相同。

橡胶模型内的电场强度分布如图4所示。从图4可以看出,橡胶模型内电场强度的分布是不均匀的,可见橡胶模型内电磁波传播不均匀。

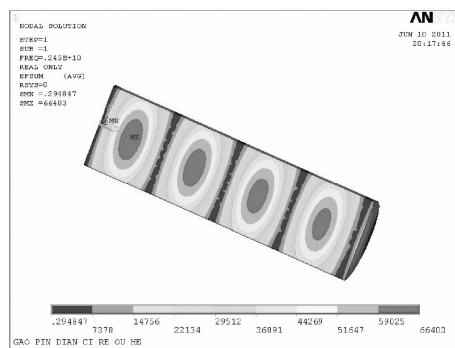


图4 电场强度分布

橡胶模型内的焦耳热密度分布如图5所示。从图5可以看出,橡胶模型内焦耳热密度分布不均匀,这也是由于微波不均匀性传播造成的。

4种情况下橡胶模型内的温度分布如图6所示。从图6可以看出,由于加热中电磁场分布不均匀导致焦耳热密度分布不均匀,从而造成温度分布不均匀,温度分布与焦耳热密度分布的规律

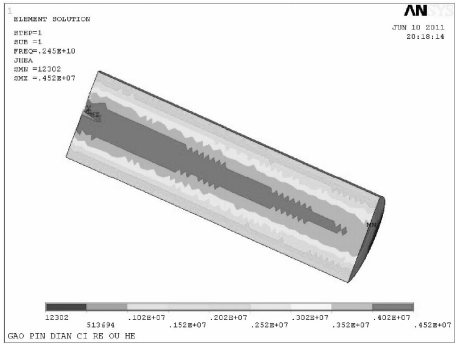


图 5 焦耳热密度分布

相同,即焦耳热密度大处温度高。

微波功率为 10 kW 时,4 种情况下胶料最低温度分别为 31.365,33.626,37.362 和 38.834 ℃,最高温度分别为 92.828,145.378,195.719 和 211.973 ℃,变化趋势如图 7 所示。

4 结论

采用有限元方法求解 Maxwell 方程和传热方程,得到橡胶内的电场强度分布、焦耳热密度分布和温度分布,从而得出以下结论。

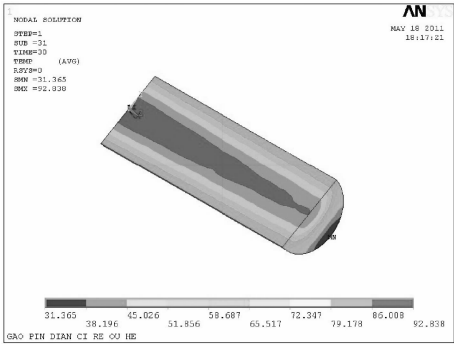
(1)橡胶内部电场强度分布不均匀,导致焦耳热密度分布不均匀,从而造成橡胶内部的温度分布不均匀。但温度分布与焦耳热密度分布规律相同。

(2)微波功率为 10 kW 时,胶料内部温度随加热时间的延长而提高,但由于温度分布不均匀,导致高温胶料范围较小,只有一部分胶料处于较高的硫化温度下,并且随加热时间的延长,处于较高硫化温度下的胶料范围无明显变化。

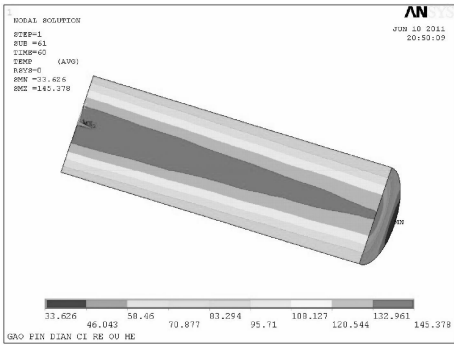
(3)数值模拟结果表明,微波加热橡胶内外同时升温,内部升温快,加热效率高,而传统加热方式加热时间长,效率低。微波加热技术应用于橡胶厚制品的硫化,可缩短硫化时间,提高橡胶厚制品的硫化效率。

参考文献:

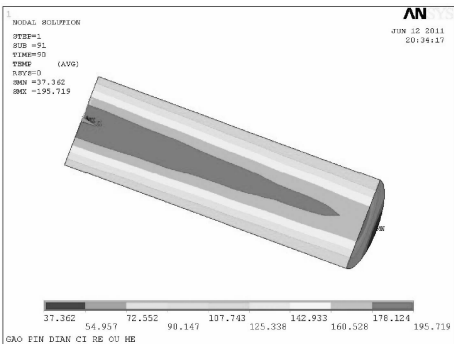
[1] Berggren B, Gripenholt N. Method for Retreading Vehicle Tires[P]. US:USP 4559093,1985-12-17.
[2] Unseld K, Gerresheim M. Method for the Manufacture of Pneumatic Vehicle Tires Using Microwave Energy[P]. US: USP 5665298,1997-09-09.



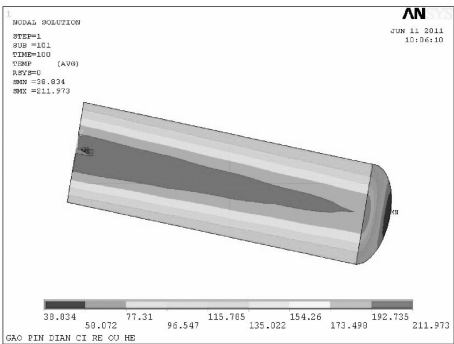
(a)加热 30 s



(b)加热 60 s



(c)加热 90 s



(d)加热 100 s

图 6 微波不同加热时间胶料的温度分布

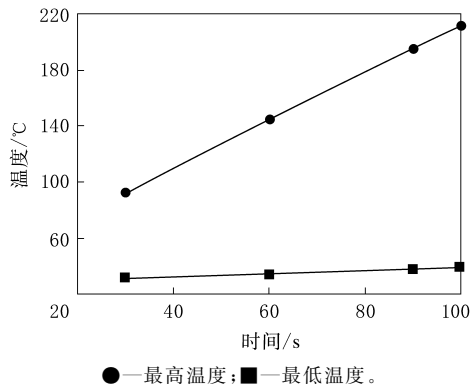


图7 胶料温度随时间的变化曲线

- [3] 唐伟强,郑月军,张海,等. 橡胶轮胎胎坯硫化前微波预热的研究[J]. 特种橡胶制品,2005,26(4):56-58.
- [4] 刘欣,王永周,陈美,等. 微波在橡胶工业中的应用[J]. 特种橡胶制品,2009,30(4):60-63.
- [5] 范寿康,卢春兰,李平辉. 微波技术与微波电路[M]. 北京:机械工业出版社,2003:50-70.
- [6] 唐兴伦,范群波,张朝晖,等. Ansys 工程应用教程——热与电磁学篇[M]. 北京:中国铁道出版社,2002:41-55.
- [7] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京:清华大学出版社,2005:240-270.

收稿日期:2012-07-21

Finite Element Analysis of Rubber Curing Process with Microwave Heating

LI Tao, YANG Guang-zhi, CHEN Hai-long, LI Qing-ling

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Finite element method was used to solve Maxwell equations and heat transfer equation, and ANSYS finite element software was used to calculate and analyze the process of conventional heating in which heat transferred from outside to inside, and microwave heating process of rubber. The results showed that the time of microwave heating was shorter and the efficiency was higher. By using microwave heating, the distributions of electric field strength, Joule heat density and temperature were uneven. With heating time extending, the temperature of rubber increased, while the range of rubber which was at high curing temperature was almost unchanged.

Key words: rubber; vulcanization; microwave heating; temperature distribution; numerical simulation

德国可丹卡公司设立上海代表处

中图分类号:F276.7 文献标志码:D

2012年12月7日,德国可丹卡有限公司上海代表处揭幕仪式在上海举行。

可丹卡公司生产工业人造丝,是全球领先的轮胎和橡胶制品生产商的长期供应商。过去20年,中国已发展成为主要汽车和工业市场之一,因此可丹卡计划通过在本地提供所有必需的技术和商务服务来支持其现有的全球客户在中国取得进一步的成长。

此外,可丹卡看到了中国轮胎和机械橡胶制品应用市场领军者开发新产品的潜能,并特别针对中国轮胎市场,与进入中国20年的贝卡尔特公司建立了合作关系。在超高性能轮胎、跑气保

用轮胎和高端汽车领域,中国是一个迅速成长的市场,可丹卡有信心向中国的汽车和工业客户推荐高性能增强材料人造丝,并为客户实现全球扩张而使中国成为世界最大的汽车市场之一提供服务。

可丹卡公司以商品名 CORDENKA® 销售工业人造丝。总部、纱线生产厂和加工厂均在德国 Obernburg, 其他生产加工区位于德国 Mühlhausen 和波兰 Gorzow。CORDENKA® 人造丝基于自然资源纤维素,其最优异的特性使其成为高性能轮胎、胶管和复合制品的增强材料。可丹卡的加工厂拥有现代化的最新的加捻、织造和浸胶工艺,可以加工 CORDENKA® 帘线和帘布。

(本刊编辑部 黄丽萍)