

箱型微波腔体的设计及其棱角对电场分布的影响

李 涛,张 伟,陈海龙,梁 云,李庆领*

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:根据传统的理论计算,结合 Ansys 数值模拟内部电场分布,发现传统的箱型微波谐振腔设计思想不适用于设计大型微波加热装置。在此设计思想的基础上切除 8 个尖锐棱角并圆角化,模拟结果显示,谐振腔内部电场分布均匀性得到明显改善。比较一系列模拟结果,发现 200 mm 半径圆角可使电场分布效果达到最佳。

关键词:微波谐振腔;电场分布;数值模拟;圆角;硫化

中图分类号:TQ330.4+7 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2015)09-0558-04

大型轮胎硫化周期长且硫化不均匀,造成生产巨型轮胎高成本、低品质的现状。与传统硫化手段(如蒸汽硫化罐、液态盐、沸腾床、连续热空气等外加热方式)相比,微波硫化依靠激发分子转动能级跃迁产生类似摩擦的作用以获得热量,属于内加热方式,不需要热传导,只对被加热物体具有即用即热的特点,热效率高,且无温度梯度。因在工业应用中硫化周期短、占地面积小,微波硫化逐渐受到各国专家学者们的青睐。

微波加热谐振腔的三维尺寸受被处理材料的大小、形状、微波工作频率、腔中模式数及其分布等相关因素的控制。对于完全导体壁包围的完全介质构成的理想波导,只要工作频率高于工作模式下的截止频率,工作模式就能沿波导长度方向无任何损耗地传输^[1]。

陈家权等^[2]根据王绍林^[3]提供的微波设计思路设计了一种箱型多模式微波加热器,但其设计产品尺寸较小,不适用于大型轮胎硫化。闫海旭^[4]和郑月军^[5]等均通过实验将微波作为辅助硫化手段使轮胎厚制品达到较低的初温,未对其内部电场分布做相关研究。S. S. R. Geedipalli 等^[6]提出设置旋转机制可提高电场均匀性;E. P.

Dominguez-Tortajada 等^[7]提出设置多重波导或将波导设置插槽可提高电场均匀性。

本研究根据传统箱型微波加热器设计理论,结合 Ansys 软件数值模拟大型微波加热装置内部电场分布,考察箱体 8 个尖锐棱角对内部电场分布均匀性的影响,以期找出优化大型箱体微波加热设备内部电场分布的方法。

1 箱型橡胶微波加热器的设计

1.1 理论依据

假设矩形微波谐振腔的边长分别为 a, b, d , 由经典微波理论得到该谐振腔的谐振频率 f_0 和谐振波长 λ_0 , 分别为

$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (1)$$

$$\lambda_0 = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}} \quad (2)$$

式中, c 为光速; a, b, d 分别代表矩形腔在 x, y 和 z 轴上的尺寸; m, n 和 p 称为模式标号, 为正整数 $(0, 1, 2, 3, 4, \dots)$, 每一种组合称为一种工作模式, 其组合数称为模式数^[8]。

波导中, TE(电磁波模式之一)模式的两个不同的工作频率区的分界为截止频率 f_{cmn} :

$$f_{cmn} = \frac{u_p}{2} \sqrt{\left(\frac{m_1}{t}\right)^2 + \left(\frac{n_1}{s}\right)^2} \quad (3)$$

式^[8]中, t 和 s 分别为波导宽边和窄边的边长; m_1 和 n_1 分别为波导内半波在宽边和窄边上的个数。

基金项目:山东省科技发展计划项目(2012GSF11604);山东省自然科学基金资助项目(ZR2013EEL009)

作者简介:李涛(1979—),男,山东菏泽人,青岛科技大学副教授,博士,主要从事高分子材料加工过程传热机理、新能源利用技术及应用的研究。

* 通信联系人

对 $TE_{m_1 n_1}$ 模式, m_1 和 n_1 不能同时为零, 存在两个最低次模式 TE_{01} 和 TE_{10} 。若波导的工作频率小于模式的截止频率, 该模式将不能传播。

1.2 设计原则

工业允许使用的微波加热频率为 (915 ± 25) 和 $(2\,450 \pm 50)$ MHz; 谐振腔具有尽可能多的振荡模式; 损耗尽可能小, 即品质因数 Q_0 尽可能大。

1.3 设计过程

(1) 确定微波频率。与 2 450 MHz 相比, 915 MHz 微波的透射能力强, 投资成本低, 功率利用率高, 磁控管寿命长, 可达功率高并且维修较方便, 因此选用微波频率为 (915 ± 25) MHz。

(2) 根据轮胎模型设定矩形谐振腔(电壁)的尺寸。设定 b 为 1 000 mm, a 为 2 000~3 000 mm, Δa 为 100 mm, d 为 2 000~3 000 mm, Δd 为 100 mm, 依据以下公式进行编程计算选择的谐振腔尺寸组合:

$$f_0 - \Delta f \leq \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \leq f_0 + \Delta f \quad (4)$$

通过编程, 计算各腔体尺寸的模式数目, 优选结果如表 1 所示。

表 1 不同尺寸谐振腔的性能参数

尺寸 ($a \times b \times d$)	模式	$V/S^{1/3}$
	数量	(近似 $\propto Q_0$)
2 500 mm $\times$ 1 000 mm $\times$ 2 800 mm	176	0.285
2 700 mm $\times$ 1 000 mm $\times$ 2 800 mm	179	0.289
2 900 mm $\times$ 1 000 mm $\times$ 2 600 mm	172	0.289
3 000 mm $\times$ 1 000 mm $\times$ 2 500 mm	183	0.288

注: 1) 体积/表面积比。

通过比较, 2 700 mm $\times$ 1 000 mm $\times$ 2 800 mm 尺寸的模式数目较多, 品质因数相对最高。

(3) 确定波导口的位置。耦合口的相对位置如图 1 所示, 通过计算, 得到 x 为 300 mm, y 为 470 mm。

(4) 确定波导尺寸及其传播模式。根据不同微波频率下使用的波导尺寸及标准型号, 选用 BJ-9(WR-975) 型, 即耦合口尺寸为 250 mm $\times$ 125 mm。

计算波导中的传播模式时, 应首先考虑最低次模式 TE_{01} 和 TE_{10} , 二者的截止频率分别为

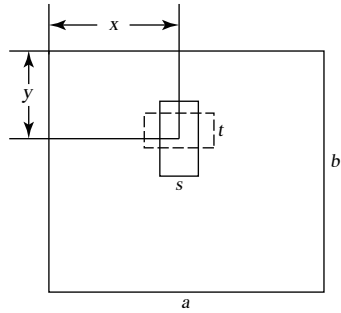


图 1 耦合口相对位置

$$TE_{01}: f_{c01} = 1\,200\text{ MHz} > 915\text{ MHz}$$

$$TE_{10}: f_{c10} = 600\text{ MHz} < 915\text{ MHz}$$

因此, TE_{10} 是波导中唯一能传播的模式。

2 传热模拟研究

2.1 数学模型

对于沿 z 方向传播的波, 谐振腔 TE_{mnp} 模式的场可以表示为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量, $\mathbf{D}$ 为电位移矢量, $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量, $\mathbf{J}$ 为传导电流密度矢量, ρ 为电荷体密度, σ 为媒质的电导率, μ 为媒质的磁导率, ϵ 为媒质的介电常数, 均采用国际单位制。

2.2 模拟条件

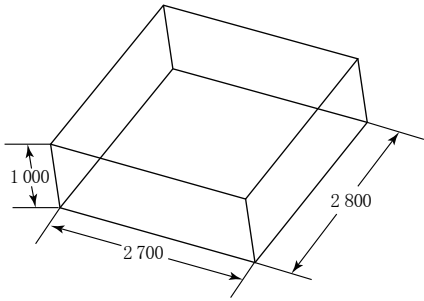
边界条件: 模拟过程中, 假定谐振腔和波导表面金属均为完美电导体。激发频率为 915 MHz, 模式为 TE_{10} , 微波输出功率为 10 kW。采用自由剖分四面体划分网格。

2.3 几何模型

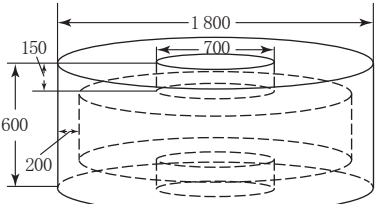
谐振腔与橡胶圈模型如图 2 所示。

2.4 电场分布模拟

2 700 mm $\times$ 1 000 mm $\times$ 2 800 mm 谐振腔不同棱角的电场分布模拟如图 3 所示。

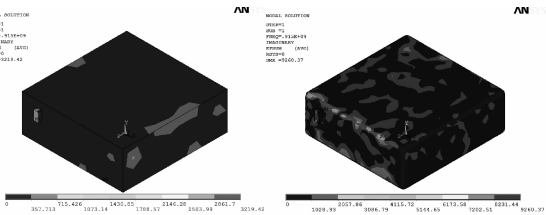


(a)谐振腔模型



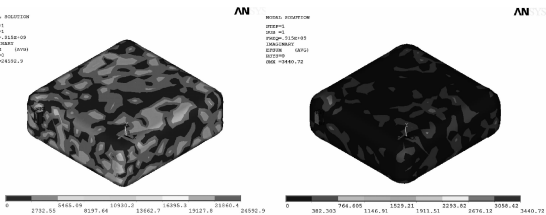
(b)橡胶圈模型

图2 谐振腔与橡胶圈模型



(a)圆角半径为 0 mm

(b)圆角半径为 100 mm



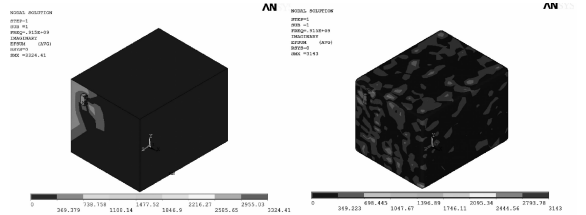
(c)圆角半径为 200 mm

(d)圆角半径为 300 mm

图3 2 700 mm×1 000 mm×2 800 mm 谐振腔
不同棱角的电场分布模拟

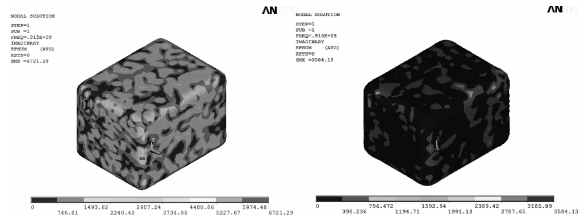
由图3可知,传统设计理论不适用于设计2 700 mm×1 000 mm×2 800 mm大型尺寸的箱型橡胶微波硫化器,且棱角对其内部电场分布影响较大,切除腔体尖锐的棱角可以改善内部电场分布的均匀性。相比其他情况,当圆角半径为200 mm时的电场分布更均匀。

按照上述传统设计理论进行重复计算模拟,2 200 mm×2 000 mm×2 800 mm和2 200 mm×2 500 mm×2 600 mm谐振腔不同棱角的电场分布模拟如图4和5所示。



(a)圆角半径为 0 mm

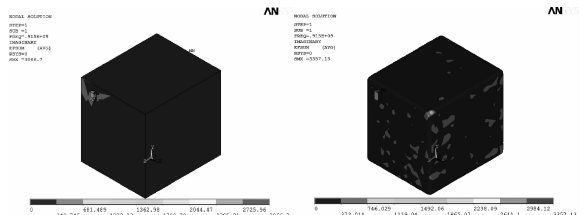
(b)圆角半径为 100 mm



(c)圆角半径为 200 mm

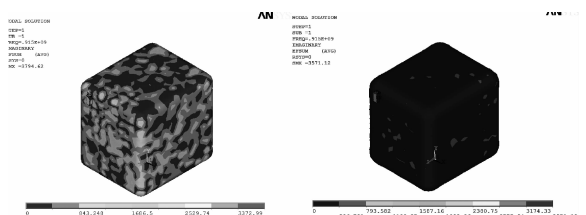
(d)圆角半径为 300 mm

图4 2 200 mm×2 000 mm×2 800 mm 谐振腔
不同棱角的电场分布模拟



(a)圆角半径为 0 mm

(b)圆角半径为 100 mm



(c)圆角半径为 200 mm

(d)圆角半径为 300 mm

图5 2 200 mm×2 500 mm×2 600 mm 谐振腔
不同棱角的电场分布模拟

对比图4和5,并结合图3模拟过程中的简单枚举,归纳推理可得到:915 MHz时,取各棱长大于 3λ 范围后,根据文献[3]矩形谐振腔设计原则设计的腔体,在圆角半径为200 mm时得到的内部电场分布均匀性明显优于其他情况。矩形谐振腔圆角半径对内部电场分布均匀性影响如图6所示。

3 结论

(1)传统的矩形谐振腔设计方法不适用于设计大型谐振腔(棱长大于 3λ),其内部电场分布极为不均匀,甚至绝大部分电场为零。

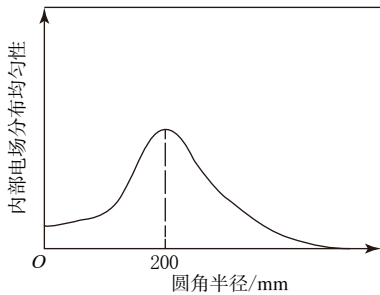


图6 矩形谐振腔圆角半径对内部电场分布均匀性影响

(2)尖锐棱角不利于谐振腔内部电场均匀性分布,将棱角切成圆角后电场分布均匀性明显改善。

(3)多次模拟试验结果表明,可以在传统方法基础上对矩形谐振腔棱角进行切圆角操作,并且棱长大于 3λ 时,优选圆角半径为 200 mm。

(4)根据多次模拟结果作出的谐振腔所切圆角半径与内部电场分布均匀性的定性图有一定参考意义。

参考文献:

- [1] Bhag S G, Hüseyin R H. 电磁场与电磁波[M]. 周克定等译. 北京:机械工业出版社,2012:336-362.
- [2] 陈家权,廖子凤,穆星宇. 箱型多模式微波加热器谐振腔的设计及电磁场分布研究[J]. 机械设计与制造,2009(10):21-23.
- [3] 王绍林. 微波加热技术的应用——干燥和杀菌[M]. 北京:机械工业出版社,2003:9-18.
- [4] 闫海旭. 微波预热在厚制品模压硫化工艺中的应用[A]. 2006年橡胶新技术交流暨信息发布会[C]. 青岛,2006:333-334.
- [5] 郑月军. 橡胶轮胎定型硫化前微波预热的技术与装备的研究[D]. 广州:华南理工大学,2005.
- [6] Geedipalli S S R, Rakesh V, Datta A K. Modeling the Heating Uniformity Contributed by a Rotating Turntable in Microwave Ovens[J]. Journal of Food Engineering,2007,82(3):359-368.
- [7] Dominguez-Tortajada E P, Plaza-Gonzalez A, Diaz-morcillo, et al. Optimization of Electric Field Uniformity in Microwave Heating Systems by Means of Multi-feeding and Genetic Algorithms[J]. Materials and Product Technology,2007,26(1-4):149-162.
- [8] 金钦汉. 微波化学[M]北京:科学出版社,1999:70-78.

收稿日期:2015-03-05

Design of Box-type Microwave Cavity and Effect of Its Edges and Corners on Distribution of Electric Field

LI Tao, ZHANG Wei, CHEN Hai-long, LIANG Yun, LI Qing-ling

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

Abstract: In this study, it was found that the traditional design of box-type microwave cavity was not suitable for the design of large microwave heating device based on the calculation using traditional theory as well as the simulation results on electrical field distribution using Ansys. In a new design, the 8 sharp corners were changed to round corners. The simulation results on the new design showed that the uniformity of electrical field inside the cavity was significantly improved. When the corner radius was 200 mm, the distribution of the electric field was the best.

Key words: microwave cavity, electric field distribution, numerical simulation, round corner, vulcanization

一种改性沥青胶及湿铺防水卷材

中图分类号:TQ336.4;TE626.8⁺6 文献标志码:D

由北京宇阳泽丽防水材料有限责任公司申请的专利(公开号 CN 103614112A, 公开日期 2014-03-05)“一种改性沥青胶及湿铺防水卷材”, 涉及的湿铺防水卷材包括强力交叉膜层、改性沥青胶层和隔离膜层。其中, 改性沥青胶包括沥青、亲水基团官能化橡胶、改性剂、增粘剂、增塑剂、抗氧剂和填充剂。该发明将改性沥青胶、强力交叉

膜和隔离膜通过压延、冷却和打卷得到湿铺防水卷材。改性沥青胶中亲水基团官能化橡胶可使沥青具有更优异的性能, 同时该成分具有亲水反应活性, 制备的改性沥青胶能够渗入混凝土表层中并发生交联反应, 产生牢固的化学结合力; 改性沥青胶可在渗透、扩散的作用下与混凝土基层形成机械嵌合力, 最终在物理和化学的共同作用下, 湿铺防水卷材与混凝土之间形成牢固的粘接。

(本刊编辑部 赵敏)