

包装机械

基于感应加热的食品纸盒包装机封口温度场研究

王孟萍, 石秀东, 黄巧, 王斌, 许金州

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 研究仿真和试验验证实际工况下的温度分布满足封合要求。**方法** 利用 Comsol 软件对食品纸盒包装机热封机构进行建模, 并对模型进行电磁场和温度场计算仿真与分析, 模拟出电磁场中磁通分布与温度场中温度分布, 分析得出其之间关系。以及进行食品纸盒包装机高频热封试验验证。**结果** 当在相同热封时间下, 电流值越大, 热封温度越高, 同时热封封合宽度也越宽; 在相同电流值下, 热封时间越长, 结果亦是, 但没改变电流参数显著。实际工况为 $I=5.5\text{ A}$, $t=0.3\text{ s}$, 能达到良好封合要求。**结论** 封合温度在封合区域呈对称性, 参数中改变电流值比改变热封时间值对热封温度影响大。

关键词: 感应加热; 包装机; 电磁场; 温度场

中图分类号: TB486; TS206.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)07-0130-05

Temperature Field of the Sealing of Food Carton Packaging Machine Based on Induction Heating

WANG Meng-ping, SHI Xiu-dong, HUANG Qiao, WANG Bin, XU Jin-zhou
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to study simulations and experiments to verify that the temperature distribution under the actual working conditions meets the requirements of sealing. Modeling of the heat sealing mechanism of food carton packaging machine was done with the Comsol software, and the electromagnetic field and temperature field of the model were calculated, simulated and analyzed, so as to simulate the magnetic flux distribution in the electromagnetic field and the temperature distribution in the temperature field, and to figure out their relationship through analysis. Moreover, the high-frequency heat sealing test for food carton packaging machine was verified. At the same heat sealing time, the greater the current value, the higher the heat sealing temperature and the wider the heat sealing width. At the same current value, the longer the heat sealing time, the higher the heat sealing temperature and the wider the heat sealing width; but the effect was not as significant as for the change in the current value. When the working conditions were: $I=5.5\text{ A}$, $t=0.3\text{ s}$, it could meet the requirements of good sealing. The sealing temperature is symmetrical in the sealing area. Compared to the change in the heat sealing time, the change in the current value among the parameters has a greater impact on the heat sealing temperature.

KEY WORDS: induction heating; packaging machine; electromagnetic field; temperature field

食品纸铝塑盒包装材料在包装市场占有主要份额, 其在运输使用过程中, 破损泄漏处大部分都在热封封口处, 因此热封是包装机生产中的重要环节。设计具有特定的工艺参数且经过优化专用的热封机构具有重要意义。目前国内外关于热封技术方面的研究

中, Hansson Lennart 等针对链板传动式热封进行了研究^[1]; Tsujii Tetsuya 针对热封影响因素中的温度进行了研究^[2]; Enokizono M. 等利用数值模拟的方法对高频感应加热过程中材料特性的变化进行了研究^[3]; 乔峰丽等利用仿真模拟的方法对热封机构的进行了动

收稿日期: 2016-10-18

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAF12B00)

作者简介: 王孟萍 (1991—), 女, 江南大学硕士生, 主攻现代机械设计与制造。

通讯作者: 石秀东 (1965—), 男, 博士, 江南大学副教授、硕导, 主要研究方向为食品机械动态设计。

态特性的研究^[4];李雷等利用 Ansys 仿真模拟 3D 热封机构进行了研究^[5]。而目前现阶段对于利用高频感应加热技术的食品纸铝塑盒热封问题,尚缺乏针对性的研究与试验验证。文中在感应加热理论的基础上,在多物理场有限元分析软件 Comsol 中进行热封模型建模,并对其进行电磁场和温度场计算与分析,得出食品纸铝塑盒热封最佳温度,最后试验对比验证,验证实际工况参数是否满足良好封合要求。

1 高频感应加热问题

在高频热封装置中,由高频感应发生器激励出高频电流通过由高磁导率的铁磁材料包裹的 2 根平行铜芯所组成的感应线圈,以形成闭合磁通。具有 7 层结构 (PE/纸/EAA/PE/AL/EAA/PE) 的食品纸铝塑包装材料虽然结构复杂,但其中,只有铝箔 (Al) 层和最内层的聚乙烯 (PE) 层与高频感应加热封合有关^[6]。由于高频热封是瞬间加热,包装材料封合区不会长时间持续保持高温,再者包装材料封合区域尺寸较小。因此不能采用传统验证温度的红外相机拍摄方法进行温度分布验证^[7],所以,对高频热封机构建模、仿真,得到温度场以及试验验证是相关技术研究的重要参考。

2 高频感应加热封合过程与建模

在食品纸盒包装机感应加热过程中 (见图 1),驱动轴带动凸轮旋转,热封摆臂按照凸轮型线的规律实现上下摆动,再带动各部分零件运动,最终按规划完成在一定时长 (实际工况的加热时间为 0.3 s) 的热封作用下实现包装盒的封口。由于在此机构中,产生的磁通方向与食品纸铝塑复合包装材料的平面垂直,故感应涡流分布与包装材料平面平行。则观察包装材料平面垂直方向的截面温度即可。在 Comsol 中建立的物理模型见图 2。

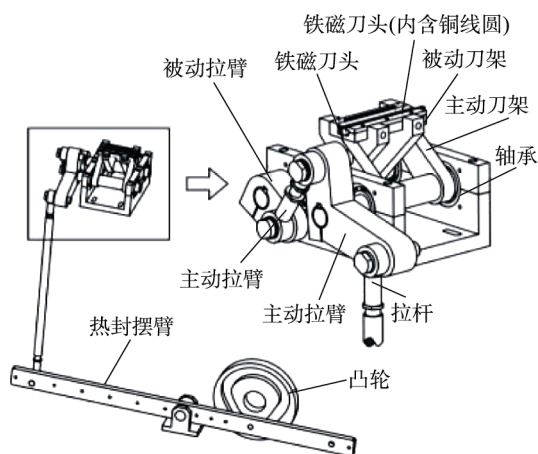


图 1 热封机构

Fig.1 Sealing mechanism

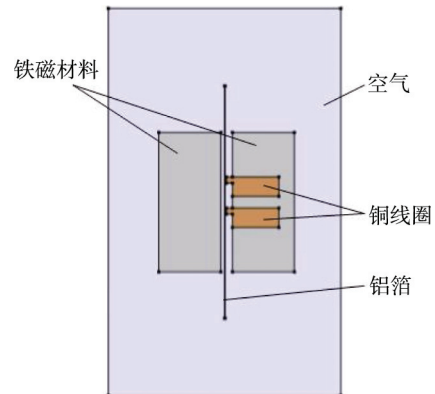


图 2 热封机构二维模型

Fig.2 Two dimensional model of heat sealing mechanism

3 高频感应加热边界条件

3.1 电磁场方程

电磁场分析的范围包括铁磁材料制成的刀头、高频电流的铜芯线圈以及产生感应涡流效应的复合材料纸盒中的铝箔。在带材涡流场中,由麦克斯韦 (Maxwell) 方程组中引入矢量磁位移 $\mathbf{A}$ 后,导出电磁场的控制方程为:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \frac{1}{\mu} (\nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) = \mathbf{J}_s \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = 0 \quad (2)$$

式中: $\sigma \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)$ 为铝箔层中的电流密度;

$\mathbf{J}_s$ 为电流源区域内的电流密度^[7]。

3.2 电磁场边界条件

高频电磁感应加热封口装置的结构是关于 x - z 和 y - z 面对称的^[8],而文中只需研究包装材料平面垂直方向的截面 (x - y 面) 即可。在 x - y 平面中:

$$\mathbf{A}_z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{A}_x}{\partial x} = \frac{\partial \mathbf{A}_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

3.3 温度场方程

高频电磁感应加热的时间很短,而且食品纸铝塑盒包装材料初始表面温度一般为室温,所以假设:食品纸铝塑盒包装材料与周围环境不存在热量交换。在高频电磁感应加热过程中,包装材料的温度场是一个内部热源,而内部热源就是铝箔层。由能量守恒定律知,在单位时间内,热传导过程中单元体所产生的焦耳热为:

$$Q_1 = \int_S \lambda_m (\nabla T) \cdot \mathbf{n} dS \quad (5)$$

式中: λ_m 为材料铝的热导率; S 为单元体的表面积; $\mathbf{n}$ 为导体表面的法向方向。由式(5)以及高斯散度定理,得到包装材料中温度场的微分方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_s}{\lambda_m} = \frac{\rho c}{\lambda_m} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为材料比热容。

3.4 温度场边界条件

在食品纸铝塑盒包装材料中,每一层材料已经胶结良好,因此焦耳热和温度在包装材料的交界面上满足连续性条件^[10]:

$$T_1 = T_2 \quad (7)$$

$$\left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} \right)_1 = \left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} \right)_2 \quad (8)$$

包装材料边界不存在热量交换,则得:

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Omega} = 0 \quad (9)$$

式中: Ω 为包装材料边界。

4 高频感应加热封合仿真

在食品纸盒包装机感应加热热封时,包装材料温度因自身涡流损耗产生焦耳热而逐渐升高,就导致铝箔的电阻率和磁导率受影响发生的变化,同时这些参数的变化又会带动包装材料温度的变化,所以高频感应加热热封是一个多物理场耦合的过程^[11]。Comsol是多物理场耦合仿真软件,选择相应的物理场接口(感应加热),直接模拟出电磁场和温度场,一次求解,省略中间换算,减少运算误差,更加接近生产实际工况^[12]。在仿真计算中,分析步长为 0.01 s,频率为 666 kHz。

在 Comsol 中,选择感应加热物理场,研究类型为频域-瞬态。基于上述的工况和式(3)~(4), (7)~(9),分别建立物理模型、边界条件和设置仿真模拟。在网格划分时,由于铝箔尺寸较小以及其自身的集肤效应

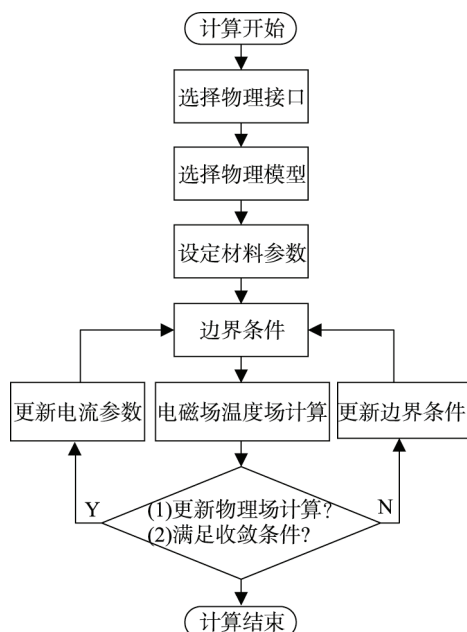


图3 Comsol 有限元分析过程

Fig.3 The finite element analysis process of Comsol

的影响,所以划分网格见图4。按照生产实际的典型工况设定参数为:电流 5.5 A,频率 666 kHz,感应加热封合时间 0.3 s。仿真计算得到整体模型以及研究铝箔表面的磁通密度分布和温度分布。

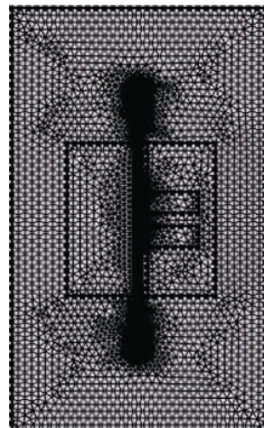


图4 Comsol 有限元分析模型的网格划分
Fig.4 Mesh generation for finite element analysis model of Comsol

4.1 电磁场和温度场分布

由实验数据可知,包装材料铝箔中存在感应涡流,且磁通密度在中心位置最大,边缘处较小。对比磁通密度分布数据与温度分布数据可知,温度场的温度与电磁场的磁通密度密切,分布基本一致。在此次研究中的封合材料 PE 层的熔点为 90~110 °C。由于铝箔通过热传导原理将热量传递到 PE,所以将封合温度定为 90 °C(即 363 K)。

影响高频感应加热的因素有:电流参数、热封时间、压力、线圈的几何尺寸关系等。而在生产实际中,高频热封机构和包装材料确定后,这样温度场的分布只和电流参数、热封时间有关。根据生产实际,热封时间 t_a 为 0.3, 0.5 s, I_e 为 4.5, 5.5, 6.5 A, f_0 为 666 kHz 是常用的工艺参数,因此对这些参数进行模拟。

由图5可知,封合温度在封合区域呈对称性分布。通过仿真可得出改变高频电源的电流值比改变封合

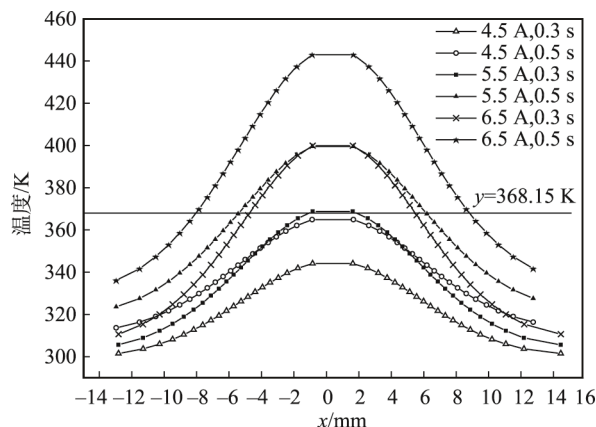


图5 铝箔层 x 方向的温度分布

Fig.5 The temperature distribution on the x direction in the Al

时间值对热封温度影响大。在封合时间相同的条件下, 电流值越大, 热封温度越高, 同时热封纸铝塑包装材料的封合宽度也越宽; 在相同电流值下, 热封时间越长, 结果亦是, 但没改变电流参数显著。由于要达到良好的热封封合, 其封合宽度至少要符合 2 mm, 当电流值为 5.5 A, 0.3 s 时, 满足其需求。热封条件为 6.5 A, 0.5 s 时, 会造成资源浪费, 还有可能造成包装材料过熔现象, 外层皱缩现象等^[12], 需进一步进行试验验证。

5 试验验证

试验材料。由合作企业提供食品纸铝塑食品包装材料; 热封试样尺寸为长 120 mm, 宽 60 mm; 热封强度试样尺寸为展开长度 100 mm, 宽 15 mm。

试验仪器。高频热封试验机: GH2 型, 中国, 无锡百会源科技有限公司。电子材料试验机: LRX-PLUS 型, 英国, LLOYD 公司。

热封强度试验。根据 QB/T 2358—1998《塑料薄膜包装袋热合强度试验方法》^[14]将电子材料试验机的拉伸速率设置为 300 mm/min。每种工况重复 3 次。此次试验在相同外界条件下, 只考虑电流和时间影响因素。如图 6 所示, 当工况是 $I=5.5$ A, $t=0.3$ s 时, 在计算机中的显示热封强度为 24.1 N/15 mm。不仅符合相关标准中对于热封层为 PE 的包装材料的封口强度要求(大于 15 N/15 mm), 还符合复合包装袋在一般应用中封口强度大于 22.6 N/mm 的要求^[15]。而当 $I=6.5$ A, $t=0.5$ s 时, 在试验过程中明显有烧焦刺鼻的味道, 其原因是温度过高, 已经破坏了纸铝塑复合材料层, 其中 PE 层过熔, 冷却后重新形成 PE 层。从侧面验证了温度场的与仿真模拟中的结果基本一致。

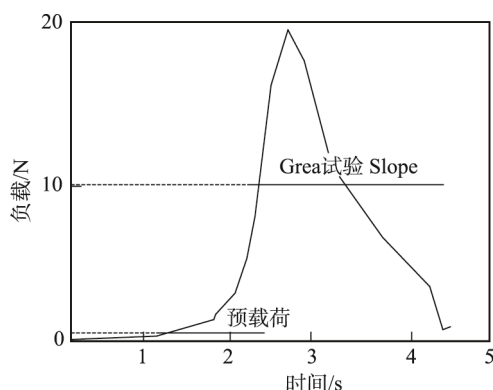


图6 载荷施加分布
Fig.6 Distribution map of load

6 结语

基于感应加热理论和实际生产环境建立计算模型。通过在 Comsol 模拟软件中进行电磁场和温度场

仿真计算, 得到了模拟工况条件下的感应加热的包装材料中磁通量和温度分布。以及相关试验验证得到以下结论: 当工况 $I=5.5$ A, $t=0.3$ s, 能达到良好封合要求; 在包装材料中, 温度与磁通密度的分布一致, 均沿热封中心向两侧均匀递减; 仿真模拟和试验验证的结果对高频热封机构的设计和优化提供了参考。

参考文献:

- [1] HANSSON L, DUNGE F. Packaging Unit for Continuously Producing Sealed Packages, Containing Pourable Food Products, From a Tube of Packaging Material: European Patent, EP0887263B1[P]. 1998-12-30.
- [2] TETSUYA T, ISHIYAKU U S, MACHIKO M, et al. The Effect of Heat Sealing Temperature on the Properties of OPP or CPP Heat Seal I Mechanical Properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 87(3): 753—760.
- [3] ENOKIZONO M, TANABE H. Numerical Analysis of High-frequency Induction Heating Including Temperature Dependence of Material Characteristics[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(4): 2438—2444.
- [4] 乔峰丽, 苗鸿宾. 包装机横封机构仿真研究[J]. 包装工程, 2008, 29(1): 75—77.
QIAO Feng-li, MIAO Hong-bin. Traverse Seal Mechanism of Packaging Machine Simulation[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(1): 75—77.
- [5] 李雷. 高速包装机感应加热封合问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
LI Lei. Research on the Induction Heating Sealing of High Speed Packaging Machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2011.
- [6] 薛兵财. 双道无菌砖包设备动态性能研究及结构优化[D]. 江苏: 江南大学, 2014.
XUE Bing-cai. Dynamic Performance Research and Structure Optimization of Double Channel Aseptic Brick Packaging Equipment[D]. Jiangsu: Jiangnan University, 2014.
- [7] 杨晓光, 汪友华. 横向磁通感应加热装置中线圈形状对涡流及温度分布的影响[J]. 金属热处理, 2003, 28(7): 49—54.
YANG Xiao-guang, WANG You-hua. The Effect of Coil Geometry on the Distributions of Eddy Current and Temperature in Transverse Flux Induction Heating Equipment[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(7): 49—54.
- [8] 姜士林, 赵长汉. 感应加热原理与应用[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1993.
JIANG Shi-lin, ZHAO Chang-han. Principle and Application of Induction Heating[M]. Tianjin: Tianjin science and Technology Translation Publishing Company, 1993.

- [9] 董梦翔. 横向磁通感应加热装置的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
DONG Meng-xiang. Study on the Transverse Flux Induction Heating Device[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [10] CALLEBAUT J. Induction Heating[DB/OL]. (2007-02-06)[2010-05-23]. <http://www.leonardo-energy.org/webfm/send/181>.
- [11] 杨晓光, 汪友华, 颜威利. 神经网络预测应用于横向磁通感应加热中涡流场与温度场的有限元分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 119—123.
YANG Xiao-guang, WANG You-hua, YAN Wei-li. Neural Network Prediction Applied to the Finite Element Analysis of Eddy Current and Temperature Field in TFIH[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 119—123.
- [12] 张玉宝, 李强. 基于 COMSOL Multiphysics 的 MEMS 建模及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
ZHANG Yu-bao, LI Qiang. MEMS Modeling and Application Based on Multiphysics COMSOL[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [13] 陆佳平, 刘天植. 软包装热封工艺参数的确定[J]. 出口商品包装, 2005(7): 65—67.
LU Jia-ping, LIU Tian-zhi. Determination of Process Parameters of Soft Package Heat Sealing[J]. Export Packaging, 2005(7): 65—67.
- [14] QB/T 2358—1998, 塑料薄膜包装袋热合强度试验方法[S].
QB/T 2358—1998, Test Method for Heat Sealing Strength Plastic Film Packing Bag[S].
- [15] 李晓燕, 孙智慧. 包装机中塑料薄膜常热式热封参数的实验研究[J]. 包装工程, 2003, 24(6): 32—34.
LI Xiao-yan, SUN Zhi-hui. Experimental Study on the Heat Sealing Parameters of Plastic Film in Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(6): 32—34.