

湿式微波杀菌装置设计与试验*

陆建辉 洪 丽

(中国海洋大学工程学院, 青岛 266100)

摘要: 湿式微波杀菌是一项全新的技术。以电磁和传热耦合方程为理论基础,对处于水浴加热的 2 450 MHz 微波单模谐振腔,建立三维非稳态有源加热数学模型,采用有限元方法,求解谐振腔的电磁场分布和食品样品的温度场分布,确定角锥喇叭最佳尺寸为 283.92 mm × 136.50 mm × 109.20 mm、谐振腔高度为 75 mm。将计算结果及分析用于指导微波杀菌装置的设计,研制出一套两腔湿式微波杀菌装置。该装置试验结果显示模拟食品的温度在 2 min 内从 50℃ 升至 142℃,且其热型稳定、温度分布比较均匀。通过工艺试验表明湿式微波杀菌满足巴氏杀菌设计要求,验证了该湿式微波杀菌装置的有效性和合理性。

关键词: 湿式微波杀菌 谐振腔设计 试验

中图分类号: TS205; TS972.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0240-05

Design and Experiment of Wet-type Microwave Sterilization Device

Lu Jianhui Hong Li

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Wet-type microwave sterilization is a newly developed technology. A 3-D unsteady active heating mathematical model of hot water and microwave sterilization in a single mode system at the frequency of 2 450 MHz was established based on the coupled equations of electromagnetic heating and heat transfer. The distribution of electromagnetic field in microwave cavity and heating pattern in food sample were obtained by using finite element method and the good results were used to guide the design of microwave sterilization equipment. It was determined that the optimum size of pyramidal horn was 283.92 mm × 136.50 mm × 109.20 mm and the height of cavity was 75 mm. A two-cavity microwave sterilization system was developed. Experimental results demonstrated the temperature of package food rose from 50℃ to 142℃ in just 2 min. Furthermore, it showed that the heating pattern in food was stable and the temperature distribution was more uniform owing to water circulation which reduced the edge overheating effect. In addition, this study confirmed that it not only effectively met the requirements of pasteurization process but also verified the effectiveness and rationality of the designed device.

Key words: Wet-type microwave sterilization Resonant cavity design Experiment

引言

在食品工业中,应用传统热力杀菌达到商业无菌时,食品的营养成分和风味都遭到显著的破坏。微波杀菌是一种高温短时的热力杀菌方法,可大大缩短加热时间,改善食品品质,延长食品的货架期^[1-3]。然而,完全利用微波进行杀菌有很多困难

需要克服,其中关键是解决微波加热温度场分布不均匀问题。文献[4-8]报道,通过合理设计微波单模谐振腔,并在微波杀菌过程中加入循环水,可以有效改善微波加热的均匀性。

最新研发的微波杀菌技术是在加压热水系统中,用频率为 915 MHz 的微波加热食品,在 5~8 min 内可有效地杀灭食品中的病原体 and 有害微生物。处

理后食品品质远高于传统安全生产加工的即食食品^[9-11]。经该技术加工的低酸性、耐储存的食品已经通过美国食品和药物管理局的严格审查。目前,该技术已应用于工业中。

本文提出湿式微波杀菌装置设计方案,通过谐振腔内电磁分析和热力分析,获得微波杀菌谐振腔设计参数,研制一套湿式微波杀菌装置,通过试验验证该装置的杀菌效果。

1 湿式微波杀菌装置设计

湿式微波杀菌装置设计应满足食品杀菌的工艺要求,使食品在杀菌过程中能够迅速升温、均匀受热、强化保温和迅速冷却,实现最佳杀菌效果。

该装置主要由微波发生器、微波单模谐振腔、水循环系统和电动机传动装置组成。2 台微波发生器通过功率分配器分别向 4 个介质耦合窗传输频率为 (2450 ± 50) MHz、功率为 $0 \sim 10$ kW 的微波。微波采用标准矩形波导 BJ22、TE₁₀ 单模^[12] 传输。水循环系统由预热罐、热水罐、冷水罐和控制装置组成,提供预热、加热、保持和冷却等工况下所需的循环水,缓解微波加热“尖角集中”,同时提供杀菌工艺所需的压力,防止食品受热后膨胀破袋。电动机传动装置运载食物在水中低速运动,依次经历预热、加热、保温、冷却 4 个阶段。

根据上述要求,结合装置小型化特点,湿式微波杀菌装置系统构成如图 1 所示,微波输入与谐振腔设计如图 2 所示。

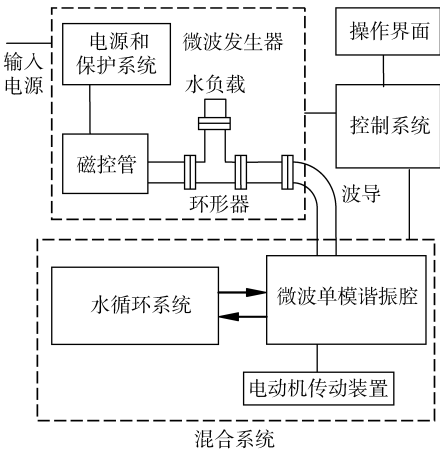


图 1 微波杀菌装置构成框图

2 谐振腔设计计算

影响电磁分布的因素有系统基本物理参数,微波谐振腔运行频率、形状和尺寸,食品在谐振腔中的位置,食品的介电常数等^[13]。谐振腔的设计是影响谐振腔电磁场分布和食品温度场分布的关键。本文

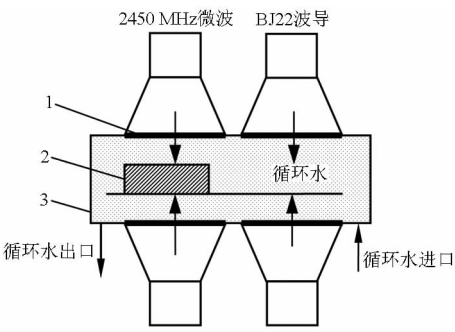


图 2 微波输入端与单模谐振腔结构图

Fig. 2 Structure of microwave generator and single-mode resonant cavity

1. 介质耦合窗 2. 样品 3. 微波谐振腔

建立电磁和传热的数学模型,分析湿式微波杀菌谐振腔的电磁分布和食品的热型,并根据计算结果修正谐振腔设计参数,实现微波对食品的最佳加热效果。

2.1 三维非稳态有源加热数学模型

为合理建立湿式微波杀菌数学模型,分析电磁场和温度场的耦合问题,对系统作以下 5 点简化和假设:①为合理分析谐振腔中电磁场和温度场的分布,同时避免 2 组谐振腔建模导致计算量大、运算时间长的问题,选 1 组谐振腔进行分析。②对于 TE₁₀ 单模谐振腔,微波主要在谐振腔内的水中,谐振腔壁面的金属导体对电磁场的影响忽略不计,将壁面看作理想边界。③由于食品质量小、黏度大,忽略其流动性,只考虑食品内部导热和食品与循环水的对流换热,并把食品表面看作理想传导边界。④模型中涉及到的介质作线性、各向同性和无色散假设。⑤谐振腔内循环水运动对电磁场和温度场的影响,换算成水和食品对流换热系数 $h = 220 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

湿式微波加热模型是三维非稳态有源加热数学模型,包括电磁场波动方程和传热微分方程,以及获得定解的初始条件和边界条件。

2.1.1 微波加热数学模型

微波加热的数学模型为

$$\nabla \times \mu_y^{-1} (\nabla \times E) - \kappa_0^2 \left(\epsilon_y - \frac{j\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0 \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + P \quad (2)$$

式中 μ_y ——相对导磁系数
 E ——电场强度, V/m
 κ_0 ——电位移场中折射率的虚部, C/m²
 ϵ_y ——相对介电常数
 ϵ_0 ——真空中介电常数, F/m
 ω ——微波角频率, rad/s
 σ ——导电率, S/m

ρ ——材料密度, kg/m^3
 C_p ——常压热容, J/K
 t ——时间, s T ——温度, K
 k ——导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
 u ——速度, m/s ∇ ——梯度
 P ——单位体积微波耗散功率

式(1)为麦克斯韦方程推导而来的电波动方程,描述谐振腔中电场的分布规律,式(2)为传热微分方程,描述谐振腔中温度场的分布规律。

2.1.2 电磁热源和对流边界热源

电磁和传热耦合作用引起温度的升高。由 Poynting 理论^[14-15]可知,电磁场中单位面积的瞬时功率流密度矢量等于电场强度 E 与磁场强度 H 叉乘的矢量

$$P = E \times H$$

考虑体积单元,假设单元中电场分布均匀,单位体积的耗散功率为

$$P = 2\pi f \epsilon''_e |E|^2 \tag{3}$$

式中 f ——频率, Hz

ϵ''_e ——有效损失因子

假设微波的耗散功率为内热源,可将微波耗散功率加到传热微分式(2)中。

食品表面与循环水存在对流换热。假设食品表面为对流边界热源,则

$$-n(-k \nabla T_f) = h(T_{ext} - T_f) \tag{4}$$

式中 n ——食品表面法线矢量

h ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

T_{ext} ——水温度, K

T_f ——食品表面温度, K

2.1.3 初始条件

湿式微波加热模型的初始条件为:系统压力 0.3 MPa,食品温度 323.15 K,循环水温度 398.15 K。

2.2 仿真建模

采用有限元法求解湿式微波杀菌的数学模型,具体步骤为:①进行微波谐振腔的参数化建模。②设置相应的参数。③选择微波加热模型,设定边界条件和初始条件。④依据 Nyquist 准则进行网格剖分。⑤选择 GMRES 瞬态求解器求解。

2.3 结果及讨论

在设计尺寸下,当上下溃口入射波相位差 0° 时,微波谐振腔、矩形波导和角锥喇叭内电场的分布如图 3 所示。

从图 3a、3b 电场分布可知,微波通过波导和角锥喇叭进入谐振腔,在传播方向上发生衰减,与对置溃口的入射波叠加生成驻波,形成稳定的电场。影响电场分布的主要因素有:波导高度、角锥喇叭尺寸

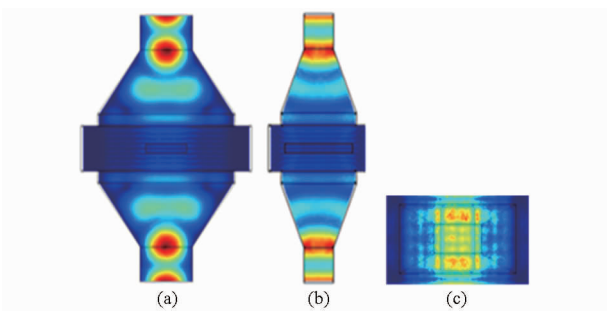


图 3 谐振腔的电场分布

Fig. 3 Electric field distribution

(a) $X-Z$ 平面 (b) $Y-Z$ 平面 (c) $X-Y$ 平面

和谐振腔高度。

波导高度影响入射波的相位差。上下溃口入射波的相位差不同,将形成不同的电场。仿真分析表明,相位差为 0° 和 180° 时,谐振腔内电磁分布相对均匀。图 3c 为谐振腔中间截面的电场分布,食品样品的电场分布比较均匀,冷热点温差小。

角锥喇叭尺寸影响电磁波的能量范围。角锥喇叭越长,能量波及范围越大,能量分布越均匀。当角锥喇叭长度大于 3 倍的波导长度时,角锥喇叭内电场将分裂成 2 个小电场,破坏能量分布的均匀性。因此,设计角锥喇叭时,其长度应小于 3 倍的波导长度。当保持角锥喇叭长度不变、宽度增大时,电场趋向谐振腔中心,从而导致能量集中。对 2 450 MHz 微波,通过迭代分析,得出谐振腔上角锥喇叭的最佳尺寸为 283.92 mm $\times$ 136.50 mm $\times$ 109.20 mm。

谐振腔高度取决于微波在水和食品中的穿透深度。当微波频率一定,微波的穿透深度与水 and 食品的介电特性有关。为了改善微波加热效果,同时考虑设备制造等因素,确定谐振腔高度为 75 mm。

微波加热 180 s 的食品中间截面 $X-Y$ 平面温度分布如图 4 所示。

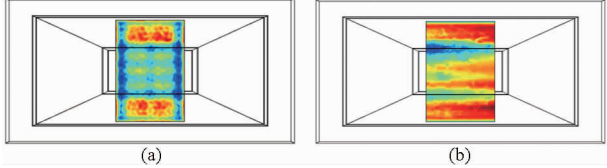


图 4 食品 $X-Y$ 平面温度分布

Fig. 4 $X-Y$ plane temperature distribution

(a) 静止状态 (b) 运动状态

图 4 表明,在微波照射下,食品的运动有利于提高温度场的均匀性。因此,合理设定传送带的速度能够改善微波杀菌效果。

综上所述,根据建立的模型,分析谐振腔内电磁场和食品温度场的分布规律,证明采用合适的设计参数可以得到较均匀的温度场,为谐振腔系统的设计提供重要依据。

2.4 谐振腔腔体设计

微波谐振腔由 3 部分组成:腔体门、介质耦合窗以及腔体^[16-17]。通过 UG NX 数值仿真,得到谐振腔设计结果,如图 5 所示。

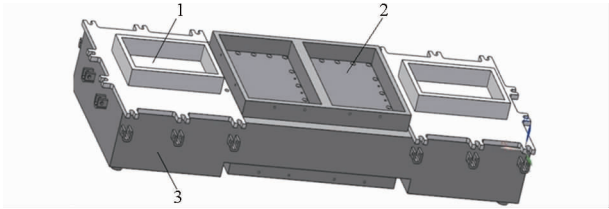


图 5 谐振腔三维模型
Fig. 5 3-D model of resonant cavity
1. 腔体门 2. 介质耦合窗 3. 腔体

3 模拟食品微波杀菌试验

试验目的:通过模拟食品(鳕鱼糜)的温度变化曲线和温度场的分析,判断设计装置能否达到工艺要求。试验装置:湿式微波杀菌装置,如图 6 所示。

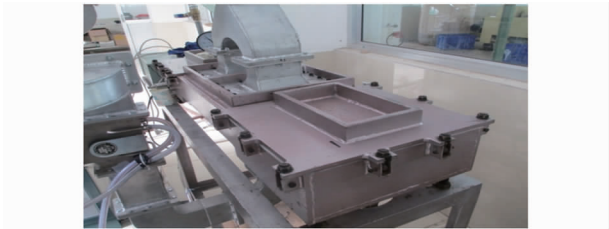


图 6 湿式微波杀菌装置
Fig. 6 Device of wet-type microwave sterilization

模拟食品制备:为使食品杀菌处理后具有相同的温度分布,要求模拟食品的介电特性与鳕鱼糜的相同。食品样品大小为 84 mm × 127 mm × 16 mm;模拟食品的配方为:15% 浓缩乳清蛋白、19% 分离乳清蛋白、1% D-核糖、2% NaCl 和 63% 超纯水,以上均为质量分数。

试验过程:将 TrackSense Pro 无线数据记录系统温度传感器植入模拟食品后对其进行真空塑封,并固定在谐振腔内传送带上;设置控制系统参数:系统压力 0.3 MPa,循环水为预热(50℃、25 min),加热(125℃、2 min),保温(125℃、5 min),冷却(20℃、7 min)。试验结果如图 7 所示。

从图 7 可知,12:00—12:18 为预热阶段,模拟食品缓慢升温,经过 18 min 预热,测试点温度达到 51℃。12:18—12:20 为微波加热阶段,模拟食品温度在 2 min 内迅速升温至 142℃。12:20—12:25 为

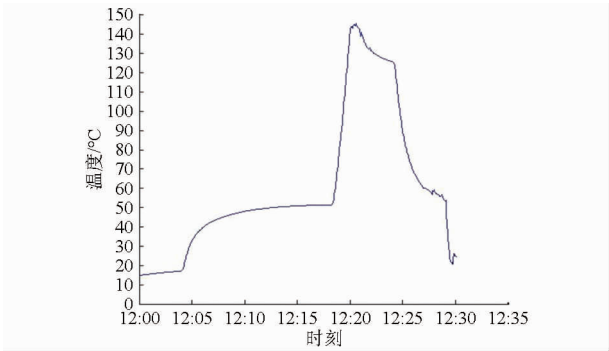


图 7 模拟食品内部温度变化曲线
Fig. 7 Changing curves of temperature in sample

保温阶段,在 12:20 关闭微波后由于存储微波能的作用,温度在短时间内略有上升,当微波能完全释放后温度下降至循环水温 125℃。12:25 开始模拟食品迅速冷却至室温。该曲线清晰地反映了预热、快速升温、保温和冷却 4 个阶段,与鳕鱼糜的杀菌工艺吻合。

通过对试验样品的剖切分析,定性判断样品中温度场的均匀性^[18]。如图 8 所示,加热后样品的剖切面色差较小,说明模拟食品的热型稳定、温度分布比较均匀。

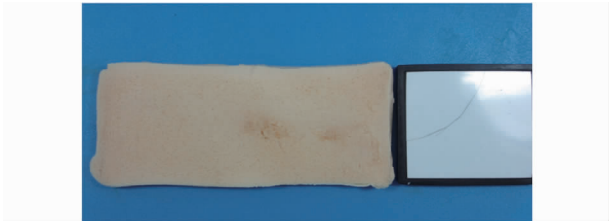


图 8 模拟食品温度剖切面
Fig. 8 Temperature profile of sample

食品中存在热点温度过高的现象,可以通过对微波源功率以及加热时间等参数进行调整,这一问题将在后续研究工作完善解决。

4 结束语

湿式微波杀菌是一项全新的技术,具有改善食品品质、延长食品货架期等优点。以电磁和传热耦合方程为理论基础,建立三维非稳态有源加热数学模型,采用有限元方法求解,得到谐振腔内电磁分布规律和温度分布规律,结果分析用于指导谐振腔的设计。在巴氏杀菌条件下开展试验研究,获得了微波杀菌装置的杀菌工艺参数。试验表明,所研制的微波杀菌装置能有效地达到食品巴氏杀菌工艺要求,验证了设计装置的有效性和合理性。

参 考 文 献

1 李清明,谭兴和,何煜波,等. 微波杀菌技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2003(10): 86-89.
2 樊伟伟,黄惠华. 微波杀菌技术在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2007, 23(1): 143-147.

- Fan Weiwei, Huang Huihua. Application of microwave sterilization in food industry[J]. Food and Machinery, 2007, 23(1): 143 – 147. (in Chinese)
- 3 Sun Ting, Tang Juming, Joseph R. Antioxidant activity and quality of asparagus affected by microwave-circulated water combination and conventional sterilization [J]. Food Chemistry, 2007, 100(2): 813 – 819.
- 4 王弘. 微波杀菌机理研究的现状[J]. 中国食品工业, 2000(4): 36.
- 5 丛海花. 水产品微波辅助杀菌过程中关键问题的解决及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Cong Haihua. Solution of critical issues for microwave-assist sterilization and application to aquatic products [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- 6 Ram Bhuwan Pandit, Juming Tang, Frank Liu. A computer vision method to locate cold spots in foods in microwave sterilization processes [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(12): 3667 – 3676.
- 7 Pandit R B. Development of a novel approach to determine heating pattern using computer vision and chemical marker (M-2) yield [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 522 – 528.
- 8 Wåling-Raaholt B, Ohlsson T. Improving the heating uniformity in microwave processing [M] // Schubert H, Regier M. The Microwave Processing of Foods. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2005: 292 – 316.
- 9 Chen Hao, Tang Juming, Liu Fang. Coupled simulation of an electromagnetic heating process using the finite difference time domain method [J]. Journal of Microwave Power & Electromagnetic Energy, 2007, 41(3): 50 – 68.
- 10 Chen Hao, Tang Juming, Liu Fang. Simulation model for moving food packages in microwave heating processes using conformal FDTD method [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(3): 294 – 305.
- 11 Tang Zhongwei, Galina Mikhaylenko, Liu Fang. Microwave sterilization of sliced beef in gravy in 7-oz trays [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 375 – 383.
- 12 Resurreccion Jr F P. Development of a computer simulation model for processing food in a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(4): 406 – 416.
- 13 Tang J, Liu F, Pathak S K. Apparatus and method for heating objects with microwaves: US, 7119313[P]. 2005-06-16.
- 14 Salvi D, Boldor D, Aita G M, et al. COMSOL multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(3): 422 – 429.
- 15 Resurreccion Jr F P, Tang J, Pedrow P. Development of a computer simulation model for processing food in a microwave assisted thermal sterilization (MATS) system [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 118(4): 406 – 416.
- 16 朱睿. 海产品湿式微波杀菌设备及其技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Zhu Rui. Seafood processing wet-type microwave sterilization equipment and its technical research [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)
- 17 朱睿, 陆建辉, 杨雷. 湿式微波杀菌试验装置谐振腔设计[J]. 机械, 2013(12): 64 – 66.
- Zhu Rui, Lu Jianhui, Yang Lei. Design of the resonant cavity for wet-type microwave sterilization device [J]. Machinery, 2013(12): 64 – 66. (in Chinese)
- 18 Pandit R B, Tang J, Mikhaylenko G. Kinetics of chemical marker M-2 formation in mashed potato—a tool to locate cold spots under microwave sterilization [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 353 – 361.

(上接第 227 页)

- 11 Neal A Rakow, Avijit Sen, Michael C Janzen, et al. Molecular recognition and discrimination of amines with a colorimetric array [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2005, 44(29): 4528 – 4532.
- 12 Hou Changjun, Dong Jiale, Zhang Guoping, et al. Colorimetric artificial tongue for protein identification [J]. Biosens Bioelectron, 2011, 26(10): 3981 – 3986.
- 13 Li Junjie, Hou Changjun, Huo Danqun, et al. Development of a colorimetric sensor array for the discrimination of aldehydes [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 196: 10 – 17.
- 14 黄星奕, 周芳, 蒋飞燕. 基于嗅觉可视化技术的猪肉新鲜度等级评判[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 142 – 145.
- Huang Xingyi, Zhou Fang, Jiang Feiyan. Evaluation of pork freshness using olfaction visualization on detection technique [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 142 – 145. (in Chinese)
- 15 Lim Sung H, Mix Samantha, Xu Zeyu, et al. Colorimetric sensor array allows fast detection and simultaneous identification of sepsis-causing bacteria in spiked blood culture [J]. Journal of Clinical Microbiology, 2014, 52(2): 592 – 598.
- 16 赵杰文, 管彬彬, 林颢, 等. 基于嗅觉可视技术的食醋气味表征和区分[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 188 – 192.
- Zhao Jiewen, Guan Binbin, Lin Hao, et al. Characterization and discrimination of vinegar flavor based on olfaction visualization technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 188 – 192. (in Chinese)
- 17 李丹亚. 镇江香醋生产过程中风味物质和功能因子的变化规律[D]. 无锡: 江南大学, 2008.