

基于三场耦合的脉冲电场杀菌系统的工作过程仿真

吉祥¹, 平雪良^{*1}, 金伟¹, 赵伟²

(1.江南大学 机械工程学院,江苏 无锡 214122;2.江南大学 食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要: 脉冲电场(Pulsed Electric Field, PEF)杀菌是将脉冲电压施加到处理室的两极,产生电场对食品物料进行杀菌的过程,在整个过程中,处理室中的电场强度与温度分布是影响系统杀菌效果以及食品质量的两个关键因素。作者在建立同场处理室的三维模型的基础上,根据电场、流场、温度场理论,建立了脉冲电场杀菌系统三场耦合的数学模型,模拟在脉冲电压 V 、脉宽 τ 、频率 f 、流速 v 和温度 T 等条件下,NaCl溶液的流体特性、温度分布以及处理室中的电场分布,得出了同场处理室几何尺寸与温度和电场分布的关系,为优化处理室结构,改善杀菌效果提供重要依据。

关键词: 脉冲电场;温度分布;流体;处理室;三场耦合

中图分类号:TS203 文献标志码:A 文章编号:1673—1689(2012)09—0957—06

Simulation of Pulsed Electric Field Sterilization System Working Process Based on Three Coupled Fields

Ji Xiang¹, PING Xue-liang^{*1}, JIN Wei¹, ZHAO Wei²

(1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Pulsed electric field (PEF) for food sterilization is a process that pulsed voltage is applied to the food product, which is placed between or passed through two electrodes of the treatment chamber. During the process, the electric field strength and the temperature distribution in the treatment chamber are the two key factors affecting the system efficacy and food quality. This paper first developed a 3D model of the co-field treatment chamber, based on which developed a mathematical model of the three coupled fields according to the theory of the electric field, flow field and temperature field, and simulated the flow properties, temperature distribution of the liquid (NaCl solution) and electric field distribution in the treatment chamber under the conditions of pulse voltage V , pulse length τ , frequency f , flow rate v and temperature T . The simulation obtained the relationship between the geometry of the co-field treatment chamber and the temperature, electric field distribution. It also provides an important basis for optimizing the

收稿日期: 2011-09-21

基金项目: 江苏省科技创新计划项目(BY201020)。

*通信作者: 平雪良(1962—),男,江苏常熟人,工学博士,教授,硕士研究生导师,主要从事CAD/CAM与机电一体化技术方面的研究。

E-mail:pings@jiangnan.edu.cn

treatment structure and improving the sterilization effect.

Keywords: beer foam proteins, SDS-PAGE, LC-MS/MS, circular dichroism, secondary structure

脉冲电场(Pulsed Electric Field, PEF)处理技术是一种非热力性食品保藏技术,这种技术是将待杀菌液态物料采用泵送等方式流经设置有高强脉冲电场的处理室,微生物在极短时间内受强电场力作用后,细胞结构破坏,菌体死亡。该技术受到很高的评价,因为它具有不必通过加热就可以延长食品的货架期,并且食品的口感和营养价值不受损害,另外还能把食品中的微生物控制在安全范围内,具有广阔的应用前景^[1-4]。

在 PEF 处理过程中,电场强度和温度分布被认为是影响杀菌效果的最重要的因素。大量实验证明,电场强度越高,电场分布越均匀,杀菌效果越明显。但由于考虑到设备成本和安全的因素,电场的大小一般在 15~80 kV/cm^[5-6];而 PEF 处理虽然被认为是一种非热杀菌技术,但在工作中由于电流流过液态物料产生电阻热,温度升高是必然的,温度升高会使物料的流体特性会发生变化(粘度、密度、热容、电导率等),并且对食品的风味有着较大影响,相反却在一定程度上可以增强杀菌效果。因此,在 PEF 系统中,经常会采用冷却装置来控制温度的升高^[1]。

在以往的 PEF 工作过程仿真中,大多数只是对处理室中的电场分布进行模拟,而并没有考虑其中的流体以及温度分布,这对于处理室的结构优化是不利的^[7-9]。作者建立了同场处理室的三维模型以及工作过程的数学模型,利用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合软件将电场、流场、温度场三场耦合,模拟处理室中电场分布、物料的流体特性以及温度分布,以便改进处理室结构,推动 PEF 技术的发展^[10-11]。

1 PEF 系统装置

研究所用 PEF 系统为实验室规模连续 PEF 处理设备:OSU-4L,美国俄亥俄州立大学制造。该设备由高压脉冲发生系统,高压脉冲处理室、示波器、蠕动泵、冷却水浴、物料贮罐组成,其中高压脉冲发生系统和处理室是设备的关键^[12-13]。

高压脉冲发生系统能产生杀菌效果较好的双

极方波脉冲,脉宽为 1~10 μs ,频率为 1~2 000 Hz,最大电场强度为 50 kV/cm。

处理室是电场分布、物料处理的关键部位,OSU-4L 系统采用的是同场式连续处理室,处理室个数为 4 个或 6 个。图 1 是其中两个处理室的三维模型图,为了便于模拟分析,该模型在结构上做了部分简化,主要包括管道、电极、绝缘板三部分组成,处理区域的极板间距为 2.92 mm,直径为 2.3 mm,单个处理室体积为 12.1 mm³。

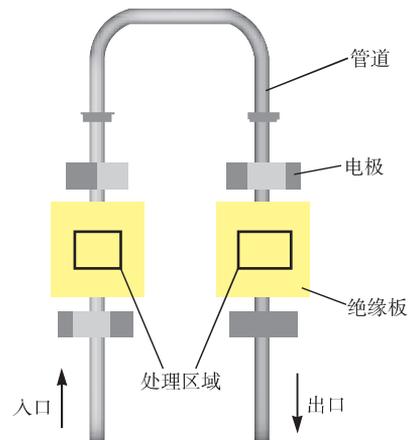


图 1 同场处理室三维模型

Fig.1 3D model of the co-field treatment chamber

2 理论与数值方法

2.1 控制方程

在 PEF 处理过程中,处理室中主要存在着 3 种物理场,电场、流场和温度场,将三场耦合到一起,应用到的控制方程有电荷守恒方程、流体的连续性方程、动量守恒方程以及能量守恒方程。

2.1.1 电场 根据电荷守恒方程,电场的控制方程为:

$$\nabla \cdot [\sigma(T) \cdot \nabla \cdot V - J] = 0 \quad (1)$$

其中: $\sigma(T)$ 为物料的电导率随温度的函数, V 为电位, J 为电流密度。

假设脉冲电场不会产生变化的磁场,电场强度可以用电位的函数来表示:

$$E = -\nabla V \quad (2)$$

其中: E 为电场强度。

2.1.2 流场 处理室中的物料作为牛顿流体,主要满足连续性方程和动量守恒方程,并且随着温度的升高和压力的存在,物料的密度和黏度都会发生变化,因此连续性方程可表示为:

$$\frac{\partial \rho(p, T)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(p, T)\mathbf{v}] \quad (3)$$

其中: p 为压力, T 为温度, ρ 为流体密度,是压力和温度的函数, t 为时间, \mathbf{v} 为流速。

OSU-4L 系统是实验室规模的系统,处理量较小,为了区分处理室中的流体是层流还是湍流,可以用雷诺数公式进行判断:

$$Re = \rho \mathbf{v} d / \eta \quad (4)$$

其中: d 为管道内径, η 为黏度。本研究所取流体流速 $\mathbf{v}=0.029\ 2\ \text{m/s}$,管道内径 $d=2.3\ \text{mm}$,得出 $Re=67.16$,远小于 2 000,所以处理室中的流体状态为层流,层流的动量守恒方程:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla P + \nabla [\eta(T) (\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T)] + \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

其中: P 为压强, \mathbf{g} 为重力加速度。

2.1.3 温度场 温度升高是由于电流流过液态物料产生电阻热所造成的,能量守恒方程:

$$\rho(p, T) C_p(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = Q + \nabla \cdot [k(T) \cdot \nabla T] \quad (6)$$

其中: $C_p(T)$ 为常压热容,是温度的函数; $k(T)$ 为热导率,也是温度的函数; Q 为热源,能用电导率与电场强度的函数表示:

$$Q = \sigma(T) \cdot E^2 \quad (7)$$

2.2 边界条件

对于电场、流场、温度场,每个物理场都存在着一系列的边界方程,比如处理室的入口、出口边界、流体与固体的接触面边界、固体与固体之间的边界以及处理室与外部空气的接触边界等,表 1~3 分别列出了这 3 种物理场的边界条件。

表 1 电场边界条件

Tab.1 Electric field boundary conditions

边界	电极正极	电极负极	其余导电面
边界条件	电位	接地	内部电流流向
电压 V_0/V	$10.5e^3$		
法向电流密度 $J/(A/m^2)$			0

表 2 流场边界条件

Tab.2 Flow field boundary conditions

边界	流体入口	流体出口	流固接触面
边界类型	入口	出口	壁面
边界条件	速度	压力	无滑动
流速 $v_0/(m/s)$	0.029 2		
压强 P_0/P_a		101 325	

表 3 温度场边界条件

Tab.3 Temperature field boundary conditions

边界	流体入口	流体出口	流固接触面	外部空气接触面
边界类型	入口	出口		
边界条件	温度	对流量	连续	热通量
温度 T_0/K	298.15			
向内热通量 $q_0/(W/m^2)$				0
热传系数 $h/(W/(m^2 \cdot K))$				5
外部温度 T_{inf}/K				298.15

2.3 材料属性与参数设置

2.3.1 材料属性 处理室中的电极与连接管道均采用的是不锈钢($k=44.5\ \text{W/(m} \cdot \text{K)}$, $\rho=7\ 850\ \text{kg/m}^3$, $C_p=475\ \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$),绝缘板的材料是聚四氟乙烯($k=0.24\ \text{W/(m} \cdot \text{K)}$, $\rho=2\ 200\ \text{kg/m}^3$, $C_p=1\ 050\ \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$),物料采用的是 $0.2\ \text{g/dL}$ 的 NaCl 溶液,由于浓度较低,溶液的密度、黏度、热导率、热容均与水相似,都是温度的函数,具体参数参考 COMSOL Multiphysics 材料库中水的属性,而溶液的电导率作为处理过程中的重要属性,受温度的影响较大,可以由公式得出:

$$\sigma(T) = \sigma(T_0) / [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (8)$$

$T_0=298.15\ \text{K}$,是物料的初始温度, $\sigma(298.15)=0.42\ \text{S/m}$, $\alpha=0.002\ 14\ (1/\text{K})$,是温度系数。

2.3.2 参数设置 仿真所采用的 PEF 系统的参数见表 4。

2.4 网格划分与求解

图 2 所示的是处理室三维模型。用 COMSOL Multiphysics 自带的自由网格划分工具对其进行网格划分,并在处理区域细化网格,网格类型为自由四面体,包含 271 481 个单元,1 095 490 个自由度,见图 2。

表 4 脉冲电场系统参数

Tab.4 Pulsed electric field system parameters

波形	电压/kV	脉宽/ μ s	频率/Hz	处理室参数	流速/(m/s)	温度/K
方波	10.5	2	100	同场式, 间距 2.92 mm, 直径 2.3 mm	0.029 2	298.15

求解采用稳态求解器、对电场、流场、温度场耦合求解, 耗时 85 min, 求解完成。

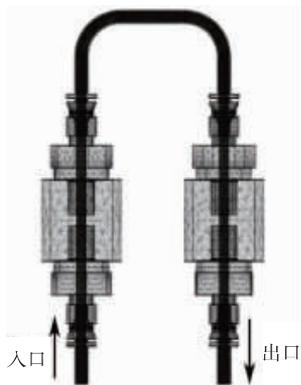


图 2 同场处理室有限元网格模型

Fig.2 Mesh model of the co-field treatment chamber

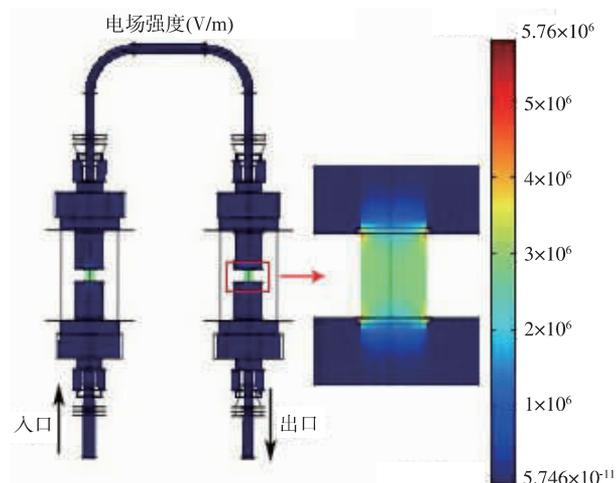


图 3 同场处理室的电场分布图

Fig.3 Electric field distribution of the co-field treatment chamber

3 结果与分析

在 COMSOL Multiphysics 求解之后, 便可以得出: 在脉冲电压 $V=10.5$ kV, 脉宽 $\tau=2 \mu$ s, 频率 $f=100$ Hz, 流速 $v=0.029 2$ m/s 和初始温度 $T_0=298.15$ K 的条件下, 处理室的电场分布、NaCl 溶液的流体特性和温度分布。

3.1 电场分布

图 3 所示为同场处理室的电场分布图。从图 3 可以看出, 电场分布并不均匀, 由于边缘效应, 在电极附近存在着尖峰电场, 最高达到 57.6 kV/cm, 并且在轴向两端电场呈抛物线分布; 图 4 清楚地表示了电场在轴向的分布规律, 虚线是电场强度沿处理室中心轴线的变化曲线图, 中间高, 两端低, 最低只有 20 kV/cm, 最高也不超过 30 kV/cm。根据电场计算公式 $E=V/d$ ($V=10.5$ kV, $d=2.92$ mm), 得出电场强度为 36 kV, 略高于实际电场强度, 直线则表示离绝缘体 0.1 mm 处轴线方向电场的分布曲线图。可以看出, 绝缘体边缘场强比中心处要高, 并且在电极附近, 电场会发生陡升, 产生尖峰电场。在设计处理室时应尽量避免尖角的产生, 防止场强过高, 带来安全隐患。

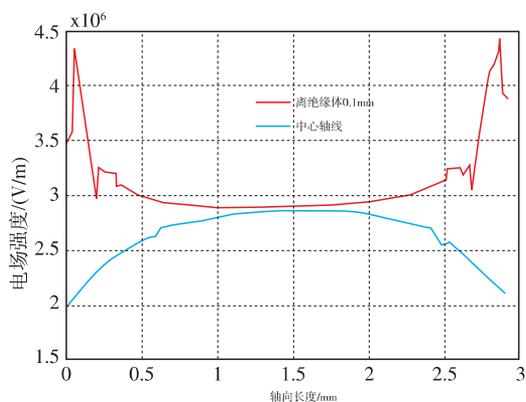


图 4 同场处理室轴线方向电场分布曲线图

Fig.4 Axial electric field distribution in the co-field treatment chamber

3.2 流体特性

流体的特性是 PEF 系统处理过程中的一个重要因素, 它不但决定了物料在处理室的停留时间, 即处理时间, 也决定了温度的分布。因为流速不同, 处理时间就不同, 温升也就不会一样, 从而影响杀菌效果。图 5 所示是 NaCl 溶液的速度分布图, 入口速度是 $0.029 2$ m/s, 从图 5 可以看出, 流体基本满足层流的特点, 中间快, 边上慢, 在贴近边界的地方速度接近于 0 , 而中间最高流速却达到 $0.061 1$ m/s, 这种径向流速的不均匀导致部分物料过处理, 而部

分却处理不完全,极大的影响了系统的杀菌效果。

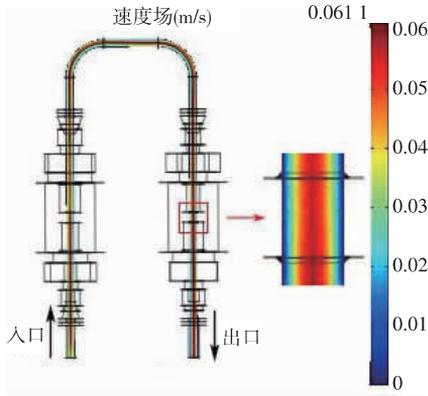


图5 NaCl 溶液速度分布图

Fig.5 Velocity distribution of the NaCl solution

3.3 温度分布

温度被认为是在 PEF 杀菌中起着第二重要作用的因素(第一重要因素为电场强度),从控制方程(6)~(7)可知,温度的增加受所有变量的影响,包括系统参数(电场强度、脉宽、频率)和流体特性(密度、电导率、黏度、热容、流速)等。图 6 所示为当电压 $V=10.5$ kV, 频率 $f=100$ Hz, 脉宽 $\tau=2 \mu s$, 入口流速 $v=0.0292$ m/s 时,NaCl 溶液以及处理室的温度分布图。可以看出,由于受层流影响,物料在边界层流速很慢,导致边界层的温度比中心处要高很多。图 7 中, a1、a2、b1、b2 分别表示物料在左右两个处理室进出口径向的温度变化曲线图,当物料经过左边处理室的处理之后,中间部分的温度从原来的 26°C 上升到 35°C , 升幅不到 10°C , 而边界层的温度升幅却接近 40°C , 右边处理室的温度涨幅也基本一样, a2 到 b1 的曲线变化是两个处理室的过渡阶段,在这个过程中,没有了外部热源,只是内部的能量传递,使得温度变化比较大的出口物料在流到第二个处理室时,温度再次变得平稳,而为了防止温升过高,在这段区域中,经常会装有冷却装置,通过高热导率的不锈钢管道来对物料进行冷却。

4 结语

电场分布和温度分布的均匀性是检验处理室好坏的重要标准,从仿真中可以看出,OSU-4L 的处

理室电场分布并不均匀,电极附近存在较大的尖峰电场,并且温升变化也比较大,边界层的温升远高于中间层,这对 PEF 系统的杀菌效果是非常不利。

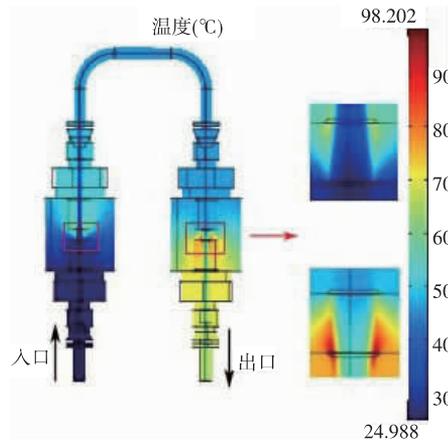


图6 处理室及物料温度分布图

Fig.6 Temperature distribution of the treatment chamber and food product

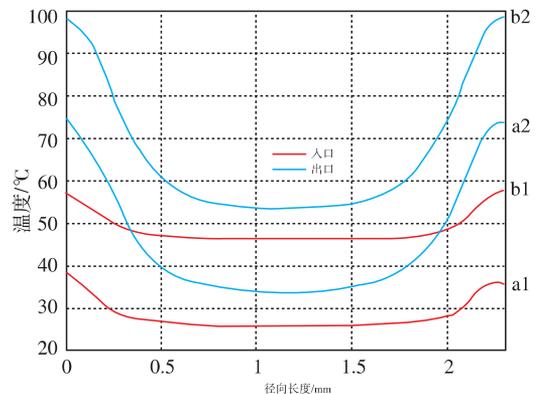


图7 物料在处理室进出口直径方向的温度变化曲线图

Fig.7 Radial temperature distribution of the food product in the import and export of the treatment chamber

结合仿真结果,对于增强杀菌效果,改进处理室结构主要提出两种设想:1)提高流体流速,使流体处于湍流状态,提高边界流速,减少边界的处理时间,使温度分布更加均匀;2)对处理室进行参数化建模,合理设计多种尺寸参数,以电场分布和温度分布的均匀度为优化标准,改进处理室结构。

参考文献:

- [1] 曾新安,陈勇.脉冲电场非热杀菌技术[M].北京:中国轻工业出版社,2005.
- [2] 廖小军,蔡同一.高压脉冲电场系统设计及其杀菌灭酶效果与对苹果汁品质影响研究[D].北京:中国农业大学,2004.
- [3] 殷涌光,闫琳娜.用高压脉冲电场对桃汁非热杀菌的研究[J].农业机械学报,2006,8(37):89-93.
YIN Yong-guang,YAN Lin-na. Study on non-thermal sterilization of peach juice by high intensity pulsed electric field[J]. **Journal of Agricultural Machinery**,2006,8(37):89-93. (in Chinese)
- [4] Zhang QingHua,Gustova V,Barbosa C,et al,Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization[J]. **Journal of Food Engineering**,1995,25(2):261-281.
- [5] Min S,Evrendilek G A,Zhang H Q. Pulsed electric fields:processing system,microbial and enzyme inhibition,and shelf life extension of foods[J]. **IEEE Transactions on Plasma Science**,2007,35(1):59-73.
- [6] Beveridge J R,MacGregor S J,Anderson J G,et al. The influence of pulse duration on the inactivation of bacteria using monopolar and bipolar profile pulsed electric fields[J]. **IEEE Transactions on Plasma Science**,2005,33(4):1287-1293.
- [7] Misaki T,Tsuboi H,Itaka K,et al.Computation of three-dimensional electric field problems by a surface charge method and its application to optimum insulator design[J]. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**,1982,101(3):627-634.
- [8] QIN B,ZHANG Q,Barbosa-Cánovas G V,et al. Pulsed electric field treatment chamber design for liquid food pasteurization using a finite element method[J]. **Transaction of the ASAE**,1995,38:557-565.
- [9] E Puértolas,N López,G Saldaña,et al. Evaluation of phenolic extraction during fermentation of red grapes treated by a continuous pulsed electric fields process at pilot-plant scale[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,98:120-125.
- [10] D Gerlach,N Alleborn,A Baars,et al. Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation:A review [J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2008,9:408-417.
- [11] Roman Buckow,Stefanie Schroeder,Paul Berres,et al. Simulation and evaluation of pilot-scale pulsed electric field (PEF) processing[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,101:67-77.
- [12] 平雪良,刘翠. 高压脉冲电场静态处理室的研制[J]. 食品与生物技术学报,2010,29(2):193-196.
PING Xue-liang,LIU Cui. Developing on the static chamber of high-voltage pulsed electric field[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**,2010,29(2):193-196. (in Chinese)
- [13] 赵武奇,殷涌光,关伟,等.高压脉冲电场杀菌系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2002,33(3):67-69.
ZHAO Wu-qi,YIN Yong-guang,GUAN Wei,et al. Experimental study on a food pasteurization system by using a high voltage pulsed field[J]. **Journal of Agricultural Machinery**,2002,33(3):67-69. (in Chinese)