

高压脉冲电场杀菌多物理场特性研究

A performance study of multilevel physical field on pulsed electric fields

颜文旭 张姗姗 公群

YAN Wen-xu ZHANG Shan-shan GONG Qun

(江南大学轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry Ministry of Education,
Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要: 高压脉冲电场(pulsed electric fields, PEF)杀菌技术是当今备受关注的非热杀菌技术之一。处理室作为高压脉冲电场的重要组成部分,其主要功能是利用强电场力作用,在食品物料通过处理室时,使其中微生物的细胞结构在极短时间内遭到破坏,菌体死亡,从而达到杀菌效果。处理室中电场强度和温度分布是影响系统杀菌效果和食品质量的主要因素,通过对处理室内流体动力学与电场和温度场的耦合数值模拟对其进行有效解析。数值模拟的主要目的是优化处理室的几何结构,进而改善电场强度和温度分布的均匀性,从而避免局部食品物料的过处理、欠处理以及介质击穿等现象。文章总结数值模拟方法在高压脉冲电场性能研究中的应用,重点分析说明数值模拟方法在处理室内流体动力学、电场强度和温度场等方面的研究,并对该方法在高压脉冲电场应用中的进一步研究进行展望。

关键词: 数值模拟; 高压脉冲电场; 处理室

Abstract: Pulsed electric field sterilization technology is one of the main concerned non-thermal sterilization technologies. One of its key components is treatment chamber, when the food material went the treatment chamber, in a very short period of time microorganisms endured strong electric field force, the cell structure was destructed, so the cell died. The electric field strength and the temperature distribution in the treatment chamber is the main factor of affecting the system bactericidal effect and food quality, the numerical simulation of the fluid dynamics coupled with the electric and thermal field inside the treatment chamber can provide detailed analysis. The main purpose of the numerical simulation is optimizing the geometry of the treatment chamber, thereby improving the uniformity of the electric field intensity and the temperature distribution, so avoiding the phenomenon such as localized over-processed or less processing and die-

lectric breakdown. This article reviews numerical investigations performed on the pulsed electric field process and presents numerical results of a treatment chamber optimization and the solution of coupled fluid dynamical, electrical and thermal problems.

Keywords: numerical simulation; PEF; treatment chamber

高压脉冲电场杀菌广泛应用于食品工业等领域,作为当前研究最为热门的非热杀菌技术之一,它是以较高的电场强度(10~50 kV/cm),较短的脉冲宽度(0~100 μ s)和较高的脉冲频率(0~2 000 Hz)对液体物料进行处理,微生物在极短的时间内受到高强电场的作用,细胞结构遭到不可逆破坏,菌体死亡。PEF 杀菌通常在常温常压下进行,处理时间极短,食品物料几乎没有温升,可以很好地保持食品的原汁原味以及营养价值。PEF 杀菌能有效降低食品物料中的微生物,特别是对液体食品物料的连续处理尤为成功^[1]。然而,PEF 杀菌并未得到大规模商业化应用,还需要国内外专家学者对 PEF 杀菌理论和设备等做进一步深入研究。

当 PEF 试验设备本身干扰试验过程或者试验耗时且昂贵时,数值模拟方法可以代替试验或者与试验相互补充。而且数值模拟可以用来研究 PEF 的详细处理过程,以及在特定参数范围内对处理过程进行优化。数值模拟的基础是描述所研究问题的控制方程,这些方程通常是偏微分方程,除少数特殊情况外,无法解析求解。为了得到近似解,使用离散化方法用代数方程组近似偏微分方程,然后在计算机上求解。

有报道^[2],最初为了使用数值模拟方法分析 PEF 处理过程,有人从数学模型入手,如定义控制方程和边界条件等。到目前,使用数值模拟方法研究 PEF 处理过程方面的报道还相当有限。一方面是不考虑流场、温度场分布时,对处理室内电场进行仿真^[3],目的是改善有效处理区域的电场分布均匀性,有效避免过处理和介质击穿,电场分布不均可能由于处理室电极和绝缘体的几何结构或者液体食品物料中

基金项目: 中央高校基本科研计划项目(编号:JUSRP51406A)

作者简介: 颜文旭(1971—),男,江南大学副教授,博士。

E-mail: ywx03@163.com

收稿日期: 2015-12-01

含有气泡或其他介电杂质^[4]；另一方面是考虑数值模拟电场、流场和温度场耦合问题^[2,5]，目的是研究电场对液体物料的欧姆加热和由热传导与热转移引起的热传递之间的关系。局部温度过高，食品质量会遭到破坏；而处理室内温度太低，PEF 杀菌效率将受到影响。因此，处理室内电场和温度的详细分布对 PEF 的高效利用是十分必要的。

为了凸显 PEF 非热杀菌的优点，应控制处理室内各个位置的温度。本试验运用数值模拟方法总结和拓展分析面向食品 PEF 杀菌处理过程，对电场强度和温度分布进行深入研究。

1 PEF 杀菌过程中多物理场研究

1.1 控制方程

杀菌过程中，高压脉冲发生器提供的电能及食品物流经处理室时的动能会相互转化，转换过程涉及处理室内的电场、流场、温度场之间的能量交换。为了完整地模拟 PEF 杀菌过程，利用偏微分方程将电场、流场、温度场进行耦合仿真求解，建立三物理场模型时所涉及的控制方程主要有电荷守恒方程、流体连续性方程、动量守恒和能量守恒方程等^[6]。

处理室中的流动食品物料视为牛顿流体，满足连续性方程和动量守恒方程，随着处理室内温度的升高，液态食品物料的密度、电导率、黏度将发生变化。因此连续性方程定义如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \tag{1}$$

式中：

ρ ——食品物料密度，kg/m³；

t ——时间，s；

$\mathbf{V}$ ——速度矢量，m/s；

∇ ——微分运算符。

假设处理室中液体不可压缩且密度不受温度影响，式(1)可以近似简化为无散度速度场：

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \tag{2}$$

动量守恒方程为：

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \{ \mu(T) [\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T] \} \tag{3}$$

式中：

p ——压力，Pa；

μ ——动态黏度，Pa·s；

T ——温度，K。

电流流过食品物料时产生电阻热导致温度升高，耦合电场强度的能量守恒方程表示如下^[7]：

$$\rho C_p(T) \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla T) \right] = \nabla [k(T) \nabla T] + \sigma(T) E^2 \tag{4}$$

式中：

E ——电场强度，V/m；

C_p ——常压热容，J/K；

k ——热导率，W/(m·K)；

σ ——电导率，S/m。

式(4)的末项表示电能向热能(焦耳热)的转换。假设脉冲电场不产生随时间变化的磁场，可得 $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ 。因此，电场强度矢量 $\mathbf{E}$ 可以写成电势 ϕ 的梯度：

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi \tag{5}$$

根据电荷守恒定律，电场的控制方程定义如下：

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot [\sigma(T) \cdot \nabla \cdot \phi] \tag{6}$$

式中：

$\mathbf{J}$ ——电流密度，A/m²。

式(2)~(6)是一系列耦合微分方程，在指定边界条件下将电场、流场、温度场进行耦合仿真求解。

1.2 边界条件

为求解控制方程式(2)~(6)，设置共场型处理室^[8](见图1)内电场、流场、温度场一系列边界条件，该结构中，高压电极与接地电极被绝缘体隔开。对于该轴对称结构，由圆柱坐标解决^[9]对称问题，而且假设方位角 φ 无变化，即 $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ 。因此，三维模拟由二维代替，大大节约运算时间。处理室的中轴线表示对称线($r=0$)。

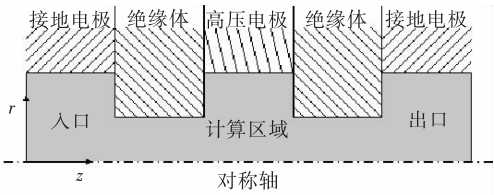


图1 共场型处理室边界条件几何解析图

Figure 1 Geometry of a co-linear treatment chamber to explain the boundary conditions

1.2.1 流场 规定高压电极、接地电极和绝缘体的边界均无滑动且不可渗透，比如 $\mathbf{V} = 0$ ^[10]。流体出口边界条件为： $n \cdot \nabla \mathbf{V} = 0$ ，其中 n 为边界的单位法向量。流体出口边界条件通常选择在对上游没有影响的位置。用雷诺数公式判断处理室内流体是层流还是湍流。

$$Re = \rho \bar{\omega} 2R / \mu \tag{7}$$

$$\bar{\omega} = \dot{Q} / (\pi R^2) \tag{8}$$

式中：

Re ——雷诺数；

R ——高压电极的内径，m；

$\bar{\omega}$ ——管道截面的平均流体流速，m/s；

$\dot{Q}$ ——体积流量，m³。

假设处理室内流体为层流，而当雷诺数 Re 低于临界值 2 100 时，层流向湍流状态转变。层流状态时流体入口的狄利克雷边界条件可以定义为：

$$w(r) = 2 \bar{w} [1 - (r/R)^2] \text{ 和 } u = 0。$$

对称边界条件在处理室的中心线($r=0$)处为 $u=0$ 和

$\frac{\partial w}{\partial r} = 0$ 。如果处理室中流体为湍流状态时控制方程则不同，

将引进湍流模型。

1.2.2 温度场 通常流体入口温度场边界规定为恒定值 T_{in} , 其对称边界液体流出口绝热边界条件为 $n \cdot \nabla T = 0$ 。绝缘体相对电极的电导率较低, 所以绝缘体边界为绝热边界。规定电极边界条件是上述的绝缘边界条件或热流边界条件:

$$n \cdot k \nabla T = \alpha(T - T_{ref}) \tag{9}$$

式中:

α ——热传递系数, K^{-1} ;

T_{ref} ——参考温度, K 。

1.2.3 电场 为求解式(6)中电势, 定义高压电极 $\phi = \phi_0(t)$, 接地电极 $\phi = 0$ 。由于电场是脉动的且每个脉冲传递的电势的波动是时变的(指数脉冲), 通常定义高压电极的边界条件是时间的函数。引入 $\phi = \phi_0(t)$ 必须以数值的形式表示, 问题是脉宽和脉冲处于关闭状态的时间差别太大。目前, 电场耦合流场的定义是不变电势为边界条件。为了将稳定的加热状态与脉动的参数相关联, 能量方程(式(4))需乘以因数 $(f_\tau)^{[12]}$ 。其余边界条件, 规定电势的零度梯度垂直于边界, 即 $n \cdot \nabla \phi = 0$ 。

1.3 流体特性

在合适的计算网格条件下求解控制方程之前, 须通过试验等方法得到流体食物料的属性。式(2)~(6)控制方程包括流体密度 ρ , 动态黏度 μ , 热导率 k , 比热容 C_p , 电导率 σ 等属性。当处理室中流体特性随温度变化较小时, 可以忽略其随温度的变化简化控制方程和数值解。例如, 水的密度和比热容在 $20 \sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 时变化很小, 因此可认为恒定不变。相反, 随温度的升高黏度明显下降, 大大改变流场特性。相比较更重要的是电导率与温度的关系, 因为 σ 直接决定处理参数。主要是电导率的变化影响处理室的电阻, 从而影响电场强度的分布和能量输入。然而, 处理室内的温度分布很难由试验获得。后面将介绍数值模拟温度分布。因此, 如果没有数值模拟, 温度将无法准确测量, 相应的处理室内的流体特性也不容易获得。由上述讨论可得, 数值模型中电导率会随温度的变化而变化。

1.4 数值解析

控制方程和边界条件确定之后, 1.2.1 和 1.2.2 等实际问题需数值算法实现。商业软件中, 用户通常可以从预定义的库中选择目标方程式。利用软件自带的网格划分工具进行网格划分, 处理室内的各种物理模型需映射到网格中。网格中方程的离散化由软件自动完成。通常离散化方法包括有限差分、有限体积或者有限元方法^[13-14]。最后选择哪种解决方案由代数方程组描述的具体问题来决定。数值结果解出所有离散点处的各变量的分布, 接下来是后处理。

许多商业软件包可用于 PEF 杀菌处理的数值模拟, 主要用于求解电场强度分布或者耦合微分方程解决不同的物理问题^[15-16]。例如 Maxwell 2D(Ansoft), ANSYS, Multiphysics 等软件包。本研究采用 ANSYS 进行仿真。

1.5 后处理

数值数据可视化的标准方法是绘制各变量的等值线(等高线), 例如图 4(a)所示的有效网格区域电势分布。还可以计算基于计算变量的其他工程量的分布, 比如作为电势梯度的电场强度分布。下一部分介绍在规定的网格区域后处理计算电场强度的标准偏差。

再如, 通过对电极电流密度 $J = \sigma E$ 进行积分得到流过处理室的电流 I , 即:

$$I = \int_{A_{Elec}} J \cdot n dA \tag{10}$$

式中:

n ——高压电极边界的法向量;

A_{Elec} ——电极边界区域。

电流 I 可以用来进一步计算比能输入 W , 通过电场强度引入到处理室。

$$W = f \frac{1}{m} \phi_0 I_\tau \tag{11}$$

式中:

$\dot{m}$ ——质量流量, kg/h 。

2 电场仿真

本节讨论不考虑处理室中食品物料的流动特性和温度分布时, 只对处理室内电场分布仿真。即不考虑电导率、介电常数等受温度影响的电特性的变化。数值模拟方法获得处理室内详细的电场分布避免局部电场强度增强。Qin 等^[17]首先将有限元分析方法用于同轴型处理室内电场分布的研究优化电极的几何结构, 减少电场的局部增强。Gongora-Nieto 等^[4]研究了液态食品中气泡对于同轴型处理室内部场强分布的影响。结果表明, 在气泡内部产生的场强大约是食品所承受的电场强度的两倍, 气泡的出现会引起气泡周围的场强明显降低, 影响处理区域内电场强度分布的均匀性。Toepfl 等^[3]对于同轴型处理室中被处理液体细胞的大小、方向, 以及细胞聚集或者出现绝缘颗粒等进行研究, 发现较小的细胞更容易改变电场强度的分布, 外加电场强度为 12.5 kV/cm 情况下, 上述两种情况均未到达发生电穿孔现象的临界场强。

处理室内电场数值模拟的另一应用是根据不同目的优化处理室(平行板型、同轴型、共场型)几何结构。处理室几何结构的合理设计非常重要, 因为其内部均匀电场是充分处理液体的保证。单一的电场模拟计算工作量小, 使用数值模拟方法进行几何结构优化十分合适, 几何结构优化可以从参数研究或者算法优化等方面进行。

Misaki 等^[18]开发了一种自动优化处理室绝缘体结构的数值算法, 目的是降低处理室中绝缘体表面局部场强峰值。扩充电场求解器, 从初始配置的绝缘体结构开始, 基于修正原则改变局部绝缘体结构直到绝缘体表面场强达到参考值。因此, 降低有效处理区域内的局部最大场强可以优化处理室几何结构。Qin 等^[17]为了改善绝缘体表面电场强度的均匀

性以降低介质击穿的可能性,运用类似的数值模拟方法对平行板型和同轴型处理室几何结构进行优化。并且处理室几何结构的理论优化成功得到高压脉冲微生物杀菌实验的验证。

Lindgren 等^[2]将数值模拟应用到同场型处理室进行电场强度均匀度优化,并且为测量均匀度,计算如图 2 所示的绝缘体间距中电场强度的相对标准差 E_{SD} 。如果 E_{SD} 在给定的参数范围内,即可得到改进的设计。如式(12)所示,标准偏差作为目标函数^[19]:

$$E_{SD} = \sqrt{\frac{1}{V} \sum_{\text{gap } i=1}^N (E_i - E_{\text{avg}})^2 \delta V_i} \quad (12)$$

其中,绝缘体间距中所有 N 个计算网格中电场强度元 E_i 和体积元 δV_i ,所以总体积和总的平均场强分别为:

$$V_{\text{gap}} = \sum_{i=1}^N \delta V_i \quad (13)$$

$$E_{\text{avg}} = \frac{1}{V} \sum_{\text{gap } i=1}^N E_i \delta V_i \quad (14)$$

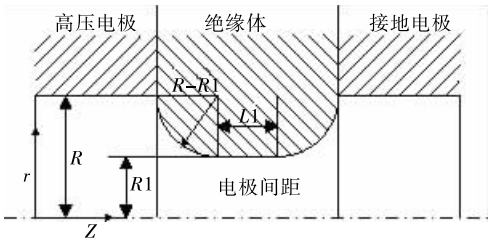


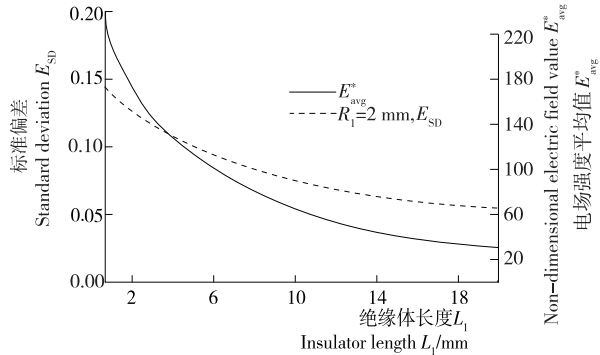
图 2 对称轴上半部分同场处理室草图

Figure 2 The sketch of a co-linear treatment chamber which only the upper half of the axisymmetric configuration

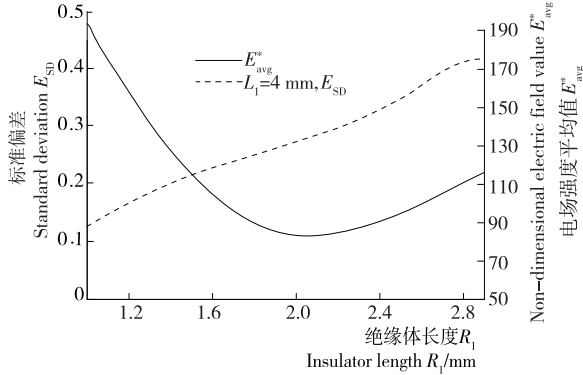
如图 2 所示几何参数分别为绝缘体长度 L_1 和绝缘体内径 R_1 ,绝缘体边缘呈圆角,为了避免尖角处场强峰值过高,圆角半径为 $R - R_1$, R 为高压电极内径。这里 $R = 3 \text{ mm}$, $1 \text{ mm} \leq L_1 \leq 20 \text{ mm}$, $0.1 \text{ mm} \leq R_1 \leq 2 \text{ mm}$ 。

假设流体的电导率是恒定不变的,则电势的控制方程(6)可简化为拉普拉斯方程 $\nabla^2 \phi = 0$ 。考虑能否进一步简化,控制方程中的电势以及边界条件与外加电势 ϕ_0 和特征长度 lc 按比例缩放。因此,定义高压电极的电势 $\phi^* = 1$,其中上标 * 代表无量纲的量。标准的电场强度 E^* 作为仿真结果很容易根据 $E = E^* \cdot \phi_0 / lc$ 得到。对于选定的微生物可以计算其临界场强 E_{crit} ,绝缘体间隙中期望得到尽可能均匀的值。为特定几何模型得到该仿真值,设置 $E_{\text{crit}} = E_{\text{avg}}$ 。外加电势由 $\phi_0 = E_{\text{crit}} \cdot lc / E_{\text{avg}}^*$ 决定,其中, E_{avg}^* 是实际几何结构仿真得到的电场强度的平均值。由图 3 可知,随着 E_{SD} 的增加,电场强度的均匀性得到改善。随着 L_1 的增加,电场分布越来越均匀,但是平均场强降低。为了获得临界场强 E_{crit} 必须增加电势和绝缘体长度 L_1 。随着绝缘体半径的变化, E_{SD} 取得最小值时 $R_1 = 2.2 \text{ mm}$ 。在此几何结构下,为达到 $E_{\text{crit}} = E_{\text{avg}}$ 所需的电势 $\phi_0 = E_{\text{crit}} \cdot lc / E_{\text{avg}}^* = (30 \text{ kV/cm}) \cdot 1 \text{ m} / 138 \approx 22 \text{ kV}$,其中 E_{avg}^* 由图 3(b) ($R_1 = 2.2 \text{ mm}$) 获得, $lc = 1 \text{ m}$ 经过比例换算可得。

图 4 描述了 $R_1 = 2.2 \text{ mm}$, $L_1 = 4 \text{ mm}$ 时最优几何结构的



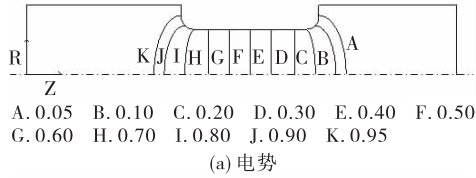
(a) 不同绝缘体长度 L_1



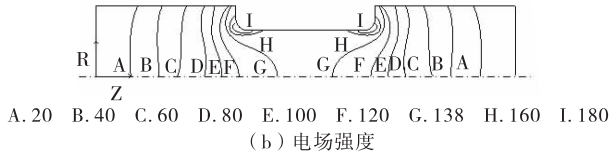
(b) 不同绝缘体半径 R_1

图 3 通过减小绝缘体间距的标准偏差 E_{SD} 来优化电场强度均匀性的参数研究结果

Figure 3 Results of parametric studies to optimize the uniformity of the electric field strength by minimizing its standard deviation E_{SD} in the insulator gap



(a) 电势



(b) 电场强度

图 4 $R_1 = 2.2 \text{ mm}$, $L_1 = 4 \text{ mm}$ 时最优几何结构的电势 ϕ^* 和电场强度 E^* 的等高线

Figure 4 $R_1 = 2.2 \text{ mm}$, $L_1 = 4 \text{ mm}$, contour lines of the electric potential ϕ^* and the electrical field strength E^* of the optimized geometry

电势 ϕ^* 和电场强度 E^* 的等高线。图 4(b) 显示绝缘体间距中很大区域电场强度 E^* 接近 E_{avg}^* ($R_1 = 2.2 \text{ mm}$) = 138。 E^* 的最大值点在绝缘体表面。

3 流场、电场、温度场三场耦合仿真

试验测量处理室内温度的分布十分困难,而且处理室内温度的详细分布对高压脉冲电场技术的可靠、高效应用十分有利。数值研究可以对有效处理区域内温度分布进行预测。

仿真要求对电场、流场、温度场控制方程(式(2)~(6))的联合求解,边界条件如 1.2 所示,处理过程和计算量与电场仿真相比更复杂。

Fiala 等^[5]提出了处理室内流场、温度场、电场的数值计算仿真模型。目的是确定欧姆加热对处理室内温度分布的影响,并比较仿真结果与试验结果。同场处理室中食品物料电导率随温度变化而变化,Fiala 等^[5]将能量方程(如方程(4))乘以系数($f\tau$),仿真优化直至稳定状态而不是对脉动的电场做仿真,结果处理室中的热损耗与脉动电场情况下相当。在 $\tau=2.3\text{ }\mu\text{s}$, $\dot{m}=3.61\text{ L/h}$, $\phi_0=5.2\text{ kV}$ 和 8.48 kV 状态下,温升的数值模拟值与试验结果基本一致。Lindgren 等^[1]用同样的数值模拟方法对 4 种不同的同场处理室结构进行仿真比较温升。作为对 Fiala 等^[5]数值模型的扩展,Lindgren^[2]将所有受温度影响的流体特性考虑在内,对不同设计的处理室内局部温度进行比较,得强烈温升出现在绝缘体表面附近,引入处理室循环冷却装置。

Toepfl 等^[3]对同场处理室进行了数值模拟和试验研究,该轴对称处理室绝缘体结构见图 1、2,食品物料从左侧流入,高压电极内径为 $R=3\text{ mm}$,绝缘体结构的内径和长度分别为 $R_1=2\text{ mm}$, $L_1=2\text{ mm}$ 。绝缘体由左侧绝缘体 A 和右侧绝缘体 B 组成。NaCl 溶液作为试验用流体物料。电导率与温度变化呈线性关系。数值模型中回归曲线为 $\sigma(T)=0.011T+0.222$,Heinz 等^[20]得到的橙汁的数据十分相似。数值模拟过程中流体黏度 μ 和热导率 k 都随温度的变化而变化。各参数状态见表 1,3 种情况下脉冲频率分别为 $20,50,70\text{ s}^{-1}$,脉宽 τ 均为 $3\text{ }\mu\text{s}$,电势 $\phi_0=15\text{ kV}$, $\dot{m}=5.2\text{ kg/h}$,初始温度 $T_{\text{in}}=29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 3 种不同情况下的参数值

Table 1 Parameters of the three different cases I-III					
频率/ s^{-1}	$\tau/\mu\text{s}$	ϕ_0/kV	$\dot{m}/(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	$T_{\text{in}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{exp}}/^{\circ}\text{C}$
20	3	15	5.2	29.5	35.2
50	3	15	5.2	29.5	45.9
70	3	15	5.2	29.5	54.1

流体到达绝缘体 B 时温度 $T>T_{\text{in}}=29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与绝缘体表面流体温度相比,处理室中心附近能检测到中等温度温升,与 Fiala^[5]和 Lindgren^[1]等所得结果相似。图 5(a),给出了第一种情况下沿处理室中心线($r=0$)温度分布示意图,其中绝缘体 A($z=10\sim14\text{ mm}$)和绝缘体 B($z=49\sim53\text{ mm}$)温升分别为 1.5 K 。相反,绝缘体 B 右侧(图 5(b))温升高达 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。径向温度梯度高是因为流体在处理室腔体壁停留的时间大于在处理室腔体中心停留的时间。流体在处理室腔体壁处速度低,所以与处理室腔体中央的高速流体相比该处流体经受更多的脉冲。此外,绝缘体后面的再循环区域阻止绝缘体表面的对流热传递。结果绝缘体背后存在高温区域,与再循环区域尺寸增加时结果一致(与图 5(a)和(b)相比)。由于以上讨论的温升分布不均匀,影响电导率的分布,与图 4(b)恒定 σ 值时均匀电场分布相比较,如图 5(c)所示电场分布不均匀。

图 6(a)比较了 3 种情况下沿处理室中心线的温度分布。如预期随着频率 f 的增加,绝缘体间距区间($z=10\sim14\text{ mm}$ 和 $z=49\sim53\text{ mm}$)流体温升增加。绝缘体 A 和绝缘体 B 的

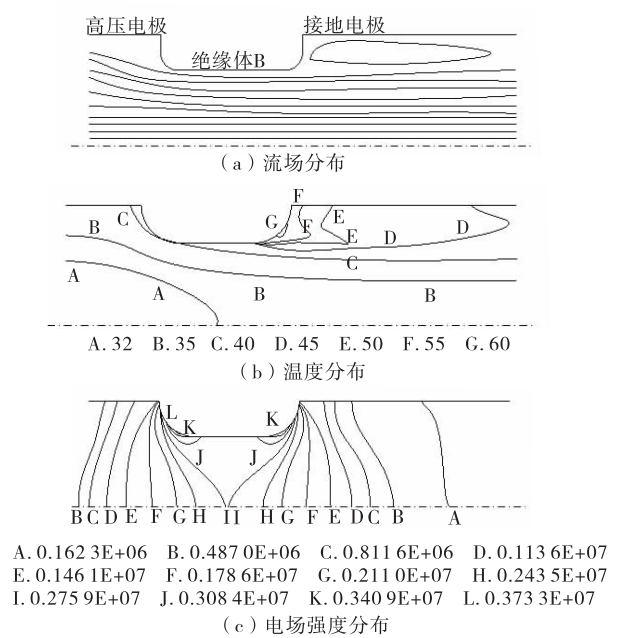


图 5 高压脉冲电场处理室多物理场特性等高线分布图(仅轴对称处理室上半部分)

Figure 5 Contour lines of the performance of multilevel physical field on pulsed electric fields (only the upper half of the ax symmetric chamber)

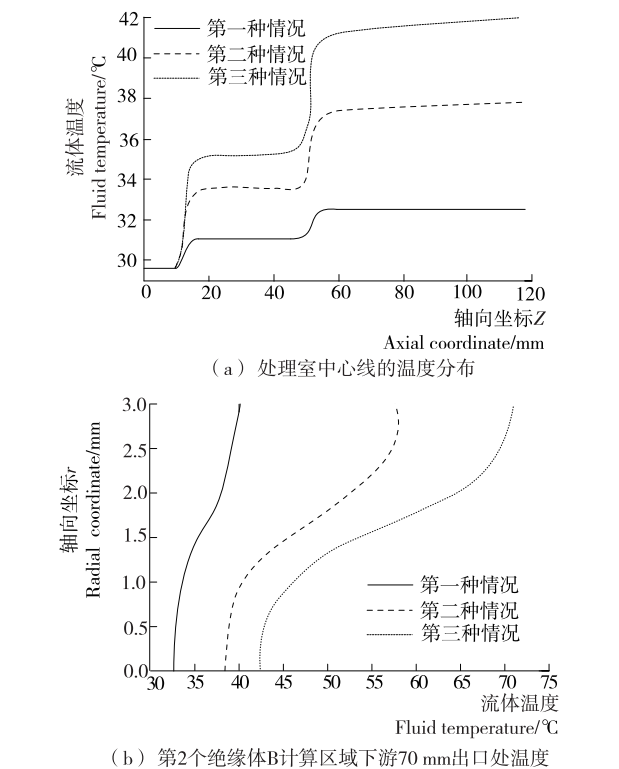


图 6 处理室温度分布

Figure 6 Temperature distributions of the treatment chamber for the three different cases as given in table 1

温升在 3 种情况下相同,导致温度分布呈阶梯状。可得间距区内温度略有增加,由于径向热流由腔体壁高温区域流向流场中心区域。计算区域的出口处,绝缘体 B 下游 7 cm($z=124$ cm)处,仍然存在径向温度极不均匀分布,见图 6(b)。此处, $r=0$ 表示管道中心,管道半径为 $r=R=3$ mm。

在与数值模拟预测同样的状态下进行试验(见表 1),与图 6(b)相同,在同一轴向位置用光纤传感器测量流体温度。3 种情况下的出口温度 T_{exp} 分别为 35.2,45.9,54.1 $^{\circ}\text{C}$,见表 1。试验数据均在数值模拟所得数据(见图 6(b))范围内。

由于第 2 种和第 3 种情况下的频率高于第 1 种情况,在绝缘体右侧温度高达 100 $^{\circ}\text{C}$,数值模拟条件下是可行的,但在试验条件下,室温 100 $^{\circ}\text{C}$ 液体沸腾。Fiala 等^[5] 在 $f\tau=380\times10^{-6}$, $\dot{m}=3.61$ L/h, $\phi_0=5.2$ 和 8.48 kV 条件下试验,得到最高温度达 90 $^{\circ}\text{C}$, $p=0.1$ MPa,接近液体沸腾的温度。目前的数值模型无法处理相变,但是流场中的温度值可以人为的限制在 100 $^{\circ}\text{C}$ 之内。高温对食品物料的质量有负面影响,可以通过改善处理室几何结构设计或者在电极间加装冷却系统来降低处理室内的温升。

4 总结与展望

文章总结了数值模拟方法应用于液态食品杀菌的 PEF 研究及其新成果。数值模拟方法研究 PEF 处理过程的优势在于可得到处理室内电场和温度场的详细分布情况。数值模拟方法的主要目的是优化处理室电极几何结构,进而改善处理室内电场分布的均匀度,避免局部场强过高以及温度分布不均。流场、电场、温度场的耦合仿真数值模型为研究有效处理区域中温度分布提供了重要依据。虽然近几十年来脉冲电场处理技术已经得到了很大的发展,但要达到规模的商业化应用还有不少问题需要利用数值模拟方法来继续研究,比如关键控制参数的最优化,处理室设计统一化、扩大处理容量以及处理室系统设计、评价等。

参考文献

[1] 何进武,黄惠华. 食品高压脉冲电场杀菌技术[J]. 食品与机械, 2007, 23(4): 155-158.

[2] Lindgren M, Aronsson K, Galt S, et al. Simulation of the temperature increase in pulsed electric field (PEF) continuous flow treatment chambers [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 26(3): 233-245.

[3] Toepfl S, Heinz V, Knorr D. High intensity pulsed electric fields applied for food preservation [J]. Chemical Engineering and Processing, 2007, 3(46): 537-546.

[4] G3ngora-Nieto M, Pedrow P D, Swanson B G, et al. Impact of air bubbles in a dielectric liquid when subject to high field strengths [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2003, 5(4): 57-67.

[5] Fiala A, Wouters P C, Bosch E van den, et al. Coupled electrical-fluid model of pulsed electric field treatment in a model food system [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2011, 6(2): 229-238.

[6] Chen Xiao-dong. Modeling thermal processing using computa-

tional fluid dynamics [C]// Thermal food processing / Food science and technology. Dalian: Thermal Food Processing, 2006: 133-151.

[7] Kowalczyk W, Hartmann C, Delgado A. Modeling and numerical simulation of convection driven high pressure induced phase changes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 47(5): 1 079-1 089.

[8] 胡大华,平雪良. 高压脉冲电场同轴与共场杀菌处理室性能实验研究[J]. 食品工业科技, 2013, 18(8): 119-126.

[9] Meneses Nicolas, Jaeger Henry, Knorr Dietrich. pH-changes during pulsed electric field treatments - Numerical simulation and in situ impact on polyphenoloxidase inactivation [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(4): 499-504.

[10] Meneses Nicolas, Jaeger Henry, Knorr Dietrich. Minimization of thermal impact by application of electrode cooling in a Co-linear PEF treatment chamber [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(8): 536-543.

[11] 陈梅英,高明才,龚雪梅,等. 高压脉冲杀菌集成冷冻浓缩加工果汁的工艺[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 237-241.

[12] Mahnic-Kalamiza Samo, Vorobiev Eugene, Miklavcic Damijan. Electroporation in food processing and biorefinery [J]. Journal of Membrane Biology, 2014, 247(12): 1 279-1 304.

[13] Schrive L, Lumia G, Pujol F. Liquid food pasteurization by pulsed electric fields: dimensionless analysis via Sherwood number for a comprehensive understanding [J]. European Food Research and Technology, 2014, 239(4): 707-718.

[14] 韩露,尉晓玮,张贵宾. 有限元等数值模拟方法在我国岩石圈构造研究中的应用与发展[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 953-960.

[15] Huang Kang, Jiang Ting-ting, Wang Wen. A comparison of pulsed electric field resistance for three microorganisms with different biological factors in grape juice via numerical simulation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(7): 1 981-1 995.

[16] 王博. 基于 CFD 方法的先进旋翼气动特性数值模拟及优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012: 49-79.

[17] Qin B, Shynkaryk Mykola, Sastry Sudhir K. Pulsed electric field treatment chamber design for liquid food pasteurization using a finite element method [J]. Journal of Engineering, 2012, 110(3): 448-456.

[18] 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.

[19] Gianpiero Pataro, Giorgio Donsi. Effect of electric and flow parameters on PEF treatment efficiency [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(3): 79-88.

[20] Heinz V, Toepfl S, Knorr D. Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric fields treatment [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 15(4): 167-175.