

高压脉冲电场共场式杀菌处理腔的仿真分析与优化

Simulation analysis and optimization of pulsed electric field co-field sterilization treatment chambers

高庆学¹ 平雪良^{1,2}

GAO Qing-xue¹ PING Xue-liang^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要: 杀菌处理腔是高压脉冲电场 (Pulsed Electric Field, PEF) 处理系统的重要组成部分, 为了开发出适合于多个处理腔串联组合使用的处理腔单元, 对椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔进行了建模, 并利用 ANSYS 软件得到处理腔内的电场分布和流体动力学特性, 然后在仿真分析的基础上, 对处理腔结构进行了优化, 提出了一种基于流体特性优化的新型共场式杀菌处理腔结构, 经验证该处理腔的性能可以满足多处理腔单元串联组合使用的要求, 为进一步优化高压脉冲电场杀菌处理腔提供了新思路。

关键词: 高压脉冲电场; 杀菌处理腔; 流体动力学; 数值模拟; 优化设计

Abstract: As an important part of the high-voltage pulsed electric field (Pulsed Electric Field, PEF) processing system, in order to develop a processing chamber unit suitable for use in combination with multiple processing chambers, we modeled the elliptical embedded type field sterilization processing chamber, and the electric field distribution and hydrodynamic characteristics of the chamber were obtained by ANSYS software. Furthermore, based on the simulation analysis, the structure of the processing chamber was optimized, and a new type of total field sterilization treatment chamber based on the optimization of fluid properties was proposed. It was proved that the performance of the processing chamber could meet the requirements of multi-processing chamber unit series combination, and this could provide some ideas for further optimizing the high-voltage PEF sterilization processing chamber.

Keywords: high-voltage pulsed electric field; sterilization chambers; hydrodynamics; numerical simulation; optimized design

PEF 杀菌处理腔结构和参数不仅会改变 PEF 杀菌处理系统的处理量, 而且会改变杀菌处理区域的电场、流场及温度场的分布, 并最终影响杀菌效果^[1]。而电场强度分布情况是物理耦合场中关键影响因素, 通过调整脉冲电源的电压可以控制处理腔内的电场强度分布, 但过高的工作电压会给操作者带来危险^[2], 有不少研究者^[3-5]采用不同的处理腔结构及参数较好地改善了处理腔内的电场强度分布。之后人们开始关注处理腔内的流体特性和温度变化, 因为物料的混合均匀程度将直接影响到整体的杀菌效果, 而温度过高则会破坏食品营养成分^[6]。共场处理室的结构虽然相对比较简单, 但在设计过程中要考虑的因素很多, 如结构尺寸、系统参数、流体特性、电场和温度场分布等都给实际设计与分析带来了许多困难^[7]。因此为了验证处理腔的可靠性, 对处理腔内的电场、流场进行仿真分析显得尤为重要。

研究^[8]表明, 椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔单元具有较合理的电场分布和流场分布。本研究将以此处理腔单元为基础, 通过确定具体的结构参数, 分别进行实验室规模、中试规模、商业化规模的处理腔结构设计和流体特性参数配置, 并在 ANSYS 软件环境下进行电场和流体动力学分析, 以验证杀菌处理腔杀菌过程中的物理场可靠性, 期待为设计适用于商业化的 PEF 处理腔单元提供一种新思路。

1 数值模拟在处理腔研究中的应用

研究^[9-10]表明, 电场强度是耦合物理场中最关键的一个影响因素, 由于不同微生物的电场抗性存在差异, 所以不同菌种的灭活需要不同的电场强度, 实际杀菌需要的电场强度为 1.5~8.0 kV/mm。对于大多数微生物而言, 增大电场强度, 可以提高 PEF 杀菌率。在匀强电场中, 提高电压可以提高电场强度, 但对电源装置的要求较高, 而且操作安全性低, 因此, 在避免出现尖峰电场的情况下, 可以设法改变处理腔

作者简介: 高庆学, 男, 江南大学在读本科生。

通信作者: 平雪良 (1962—), 男, 江南大学教授, 博士。

E-mail: ping@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2017-06-07

的结构和参数,通过施加低电压来获得较高强度的局部均匀的电场。处理腔的结构和参数不仅会改变高压电场处理系统的处理量,也会改变处理区域耦合物理场的分布,直接影响到实际的杀菌效果。另外,杀菌处理腔中流场特性也是影响系统杀菌效果和食品质量的主要因素。流体速度还会影响处理腔的温度,由于处理腔内壁处的流速较低,所以最大温度出现在内壁处^[11]。根据现有技术,处理腔内的电场分布和流体特性很难通过试验测量,对杀菌处理腔内流体动力学及电场分布进行数值模拟,以避免局部食品物料的过处理或欠处理以及介质击穿等现象,所以,数值模拟旨在直观地理解处理腔内物理场的分布情况,以优化处理腔的几何结构和参数,进而改善电场和流场分布的合理性^[12]。

在国外,为了得到处理腔内均匀分布的电场,研究人员在设计和研究处理腔时,运用了基于有限元分析的数值模拟方法,使杀菌处理腔不仅能保持电场的均匀性分布,而且能保证待处理流体物料的合理性流动,极具有工业化应用的价值。例如,Roman Buckow 等利用有限元分析的方法,在 COMSOL Multiphysics 软件环境下对一种中试规模的共场式杀菌处理腔进行了数值模拟,指出了处理腔几何结构和参数与流体速度、电场分布、温度升高及物料滞留时间之间的关系^[13];还基于仿真分析结果,讨论了共场式处理腔的几何结构对电场分布和能量利用的影响,并给出了具体的参考方程,提出了一种基于三场耦合特性优化的椭圆内嵌式共场杀菌处理腔结构^[1]。Kai Knoerzer 等^[14]在对目前大量的食品杀菌处理腔仿真研究成果总结之后,指出今后的仿真分析除了要考虑三场耦合特性之外,还要考虑到处理腔内的电化学反应,并且期待未来能开发出处理腔内电场、温度场和流场的试验测量方法和工具,以推动处理腔的研究和应用。

在中国,陈锦权^[15]较早地运用 Laplace 方程对杀菌处理腔内的电位分布进行了研究,结合粘性牛顿流体方程获取了杀菌处理腔内的电场强度及流场分布情况,设计了适用于工业化生产使用的 PEF 杀菌处理腔。前期的研究者当中,方婷等^[16-17]利用 ANSYS 软件分析了不同结构的同轴处理腔内的电场强度;金伟^[2]在 COMSOL Multiphysics 环境下对共场式杀菌处理腔中的 3 种物理场耦合特性进行了分析和优化,提出了一种具有电场、温度场及流场三场耦合特性比较好的新型共场式处理腔;解效白等^[18]则在 Maxwell 软件平台下对同轴式处理腔的电场分布进行了仿真分析,并根据仿真分析结果对处理腔设计尺寸提出了改进方案。

2 仿真分析

2.1 控制方程

描述流体运动的都是连续的偏微分方程,在大多数情况下,不可能得到其解析解,在 CFD 中,通过数值方法对这些方程进行计算近似解。常用的 CFD 软件对控制方程的离散方式包括有限元法、有限差分法以及有限体积法 3 种。目前,有限体积法是主流 CFD 软件所采用的算法,也是 Fluent 软件所采用的计算方法^[19]。

一般来说,杀菌处理腔内的流体物料可视为牛顿流体,所以在进行数值模拟时,流体动力学的控制方程主要包括连续性方程和动量方程。

伴随杀菌处理腔内的温升,物料的密度、电导率以及黏度均会发生一定的变化,所以流体的连续性方程可以定义为:

$$\frac{\partial \rho(P, T)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(P, T) \vec{v}] = 0, \quad (1)$$

式中:

ρ ——流体的密度,是压力 P (Pa) 和温度 T (°C) 的函数, kg/m^3 ;

t ——时间, s;

\vec{v} ——流速, m/s 。

本研究的 PEF 杀菌处理腔尺寸为 4~8 mm,处理量为 10~2 000 L/h,可以利用雷诺公式判断这些处理腔内流体的流动状态,雷诺方程描述:

$$Re = \rho v_0 r / \eta, \quad (2)$$

式中:

Re ——雷诺数;

ρ ——密度, kg/m^3 ;

r ——管道的半径, mm;

η ——动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

仿真所采用的处理腔内径尺寸和速度匹配之后得出的雷诺数均远远大于临界雷诺数 2 320,因此处理腔内流体物料为湍流。处于湍流状态的流体满足动量守恒方程,定义为:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}_a}{\partial t} + (\vec{v}_a \cdot \nabla) \vec{v}_a \right] = -\nabla P + \nabla \cdot [(\eta + \eta_T) \cdot \nabla \vec{v}_a] + \rho g, \quad (3)$$

式中,

\vec{v}_a ——流体平均流速, m/s ;

η_T ——流体湍流时的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

g ——重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

其中, η_T 定义为:

$$\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (4)$$

式中:

C_μ ——模型常数,取值 0.09 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

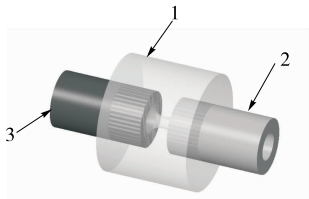
k ——湍流动能, m^2/s^2 ;

ϵ ——湍流耗散率, m^2/s^3 。

2.2 仿真分析过程

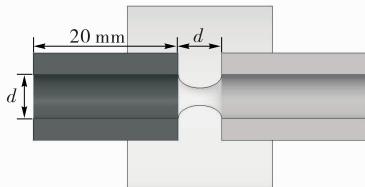
2.2.1 模型建立 在前期设计方案基础上,建立 PEF 杀菌处理腔的 3D 模型(见图 1),并导入 ANSYS Fluent 软件,经过修饰等前处理成为 ANSYS Fluent 可分析的模型。

2.2.2 网格划分 网格划分技术是获得离散方程的一个关键步骤,网格质量直接决定了 Fluent 软件的计算精度和运行效率,对于繁复的计算问题,网格划分耗时且易出错,占到整个软件使用时间的 80%。采用四面体自由网格划分工具,并在管壁处添加膨胀层,生成的网格见图 2。



1. 绝缘体隔离管 2. 金属空心管接地电极 3. 金属空心管状高压电极

(a) 处理腔三维模型



(b) 对称中心截面视图

图 1 共场式杀菌处理腔 3D 模型

Figure 1 3D model of the co-field sterilization treatment chamber

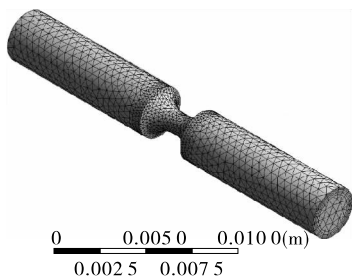


图 2 流场分析的网格划分效果(以内径 6 mm 结构为例)

Figure 2 Flow field analysis of the grid partition effect (Diameter 6 mm structure as an example)

2.2.3 分析设置与求解 根据 ANSYS Meshing 划分的网格,利用 Fluent 中的稳态求解器,选用 $k-\epsilon$ 湍流计算模型,流体材料采用质量分数为 0.2% 的 NaCl 溶液,密度 $1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$,比热容 $4\ 216\ \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,导热性系数 $0.677\ \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,动力黏度 $0.8\ \text{mPa} \cdot \text{s}$ 。流体的边界条件:入口流速为沿轴向的 V_0 ,水力直径 $0.006\ \text{m}$,初始温度 $293\ \text{K}$;出口的水力直径 $0.006\ \text{m}$,湍流强度 10%;管壁处的参数缺省。初始化流场,计算稳态过程。在计算过程中,通过设置残差曲线,监视计算结果的收敛性。

2.2.4 后处理 以处理腔内径 6 mm、入口流速 $1.55\ \text{m}/\text{s}$ 的仿真计算过程为例,正如残差曲线所示(见图 3),经过 712 步的计算,计算结果收敛。然后在 CFD-Post 组件中,通过设置视图选项、创建等值面等,得到各个处理腔内部流体的速度轮廓图、速度矢量图以及流线图。

2.3 仿真分析结果

本研究对内径尺寸(即图 1 中尺寸参数 d)为 $2\sim 14\ \text{mm}$ 的椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔作了流体动力学分析,通过对不同管道内径尺寸的处理腔施加不同的入口流速,获得了在实验室规模、中试规模以及商业规模的处理量要求下的流体特性,选取内径典型值为 $6\ \text{mm}$ 的处理腔流场分析结果作重点讨论。

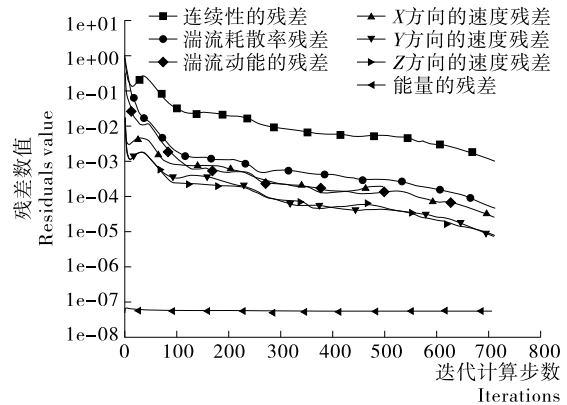


图 3 Fluent 计算过程的残差曲线

(以内径 6 mm 处理腔为例)

Figure 3 Fluent calculation process of the residual curve (6 mm diameter treatment chamber as an example)

由图 4 可以看出,在入口流速为实验室规模(处理量 $10\ \text{L}/\text{h}$ 对应的入口流速为 $0.098\ \text{m}/\text{s}$)时,处理腔内流体的低速区域在出口处电极与绝缘体交界处呈对称分布,且区域面积较小;伴随入口流速提高,低速滞留区域逐渐向一侧偏移,达到中试规模(处理量 $100\ \text{L}/\text{h}$ 要求的入口流速为 $0.982\ \text{m}/\text{s}$)时,流体在靠近出口的电极管道壁处的滞留区已经相当大;有趣的是,在中试规模向商业规模处理量过渡的流速段,滞留区域面积存在明显衰减现象;但是当流速提高到商业规模(处理量 $1\ 000\ \text{L}/\text{h}$ 要求的入口流速为 $9.824\ \text{m}/\text{s}$)时,大面积的滞留区域出现在出口处中心,这将更不利于多个处理腔串联组合使用。

根据以上分析,发现椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔单元在商业化要求下,流体特性欠佳,需对其结构进行优化以改善流体特性。

3 优化设计

3.1 结构优化方案

如图 5 所示,优化后的共场处理腔的金属空心管状高压电极、金属空心管状接地电极的内部空腔具有一定锥度,几何形状为圆台状,两者孔径较小的端面分别与绝缘体隔离管的孔两侧紧贴,圆台状空腔的大端内径为 $2\sim 14\ \text{mm}$,绝缘体隔离管的椭圆状凸起的长轴长度与此间距接近或相等。绝缘体隔离管的内部凸起仍为椭圆形。金属电极材料为不锈钢 316L,绝缘体隔离管采用聚四氟乙烯材料。

3.2 仿真分析验证

对处理腔结构优化方案进行电场强度分布的仿真分析,以金属空心管状电极大端内径为 $6\ \text{mm}$ 的处理腔为例。电场分析结果见图 6,在采用带锥度的金属电极管以后,处理腔内的电场强度分布与采用普通电极时一致:即高强度电场集中分布在椭圆状凸起处的杀菌处理区域,处理区域的电场强度平均值为 $1.557\sim 2.336\ \text{kV}/\text{mm}$,可以满足实际微生物灭活的需要;在绝缘体隔离管和金属电极交界处也不存在尖峰电场,电场整体分布较均匀合理。所以该结构具有很好的电

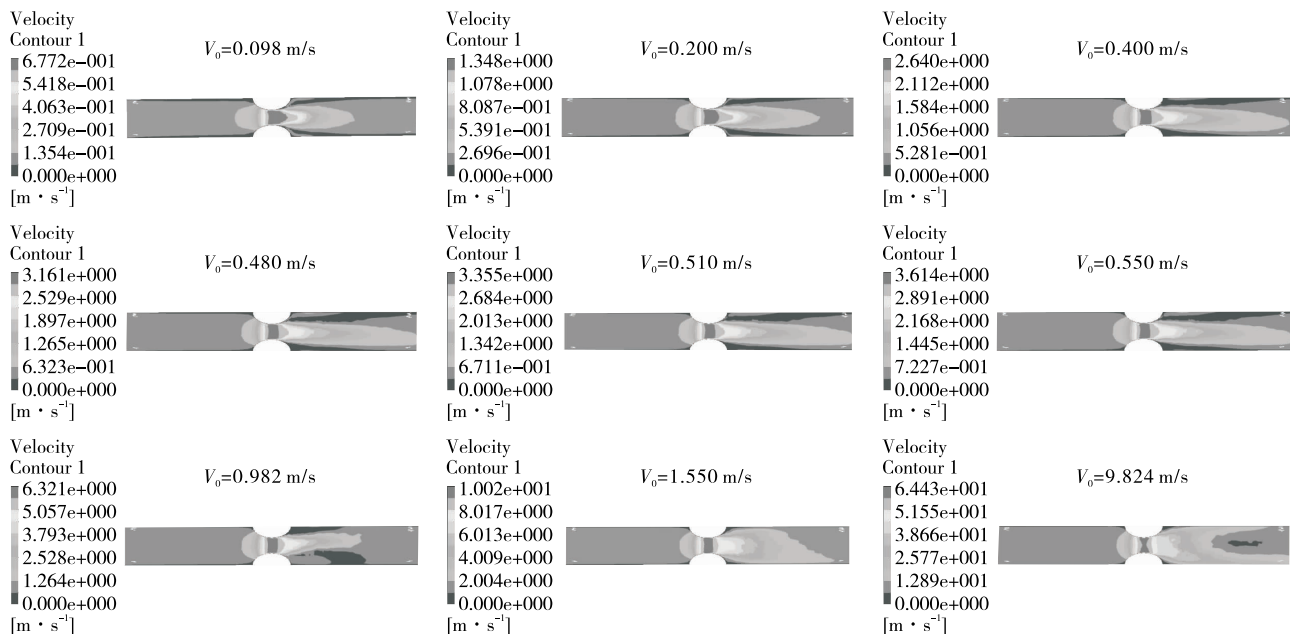
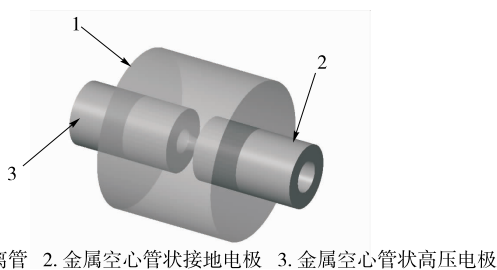
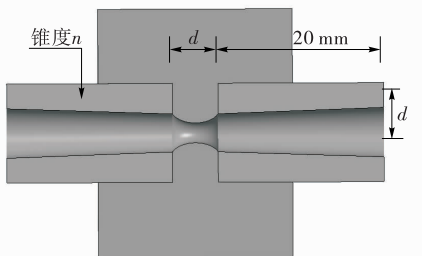


图4 内径6 mm的PEF杀菌处理腔单元的流速分布云图

Figure 4 Flow chart of flow velocity distribution of PEF sterilization chamber in 6 mm diameter



(a) 优化后处理腔三维模型



(b) 对称中心截面视图

图5 PEF杀菌处理腔单元结构优化方案

Figure 5 The structure optimization program of PEF sterilization treatment chamber unit

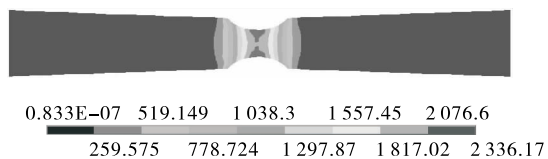


图6 优化后PEF处理腔单元的电场分布云图
(以大端内径6 mm结构为例)

Figure 6 Electric field distribution of the PEF treatment chamber unit after optimization (with large diameter 6 mm structure as an example)

场特性。同样,其他几种内径尺寸的处理腔的电场分布分析结果与此一致,获得了理想的电场分布。

由图7可知,在不同的入口流速条件下,随着流速的提高,处理腔内不存在大面积的物料滞留区域,而且随着流速进一步提高,在商业规模(即入口流速为9.824 m/s)时,流体处于明显的湍流状态,有利于物料充分混合,有利于提高杀菌处理效果。其他几种内径尺寸的处理腔在不同入口流速条件下的分析结果与此类似,都不再出现大面积的物料滞留区域,获得了良好的流体特性。

由图8可知,在不同入口流速条件下,前后两级处理腔的出口处都不存在物料滞留区域,表明该方案很好地解决了处理腔单元优化前存在的流场分布不均的问题,能满足多处理腔组合杀菌处理的需要。在入口流速为0.098~0.982 m/s时(即处理腔的处理量从实验室规模向中试规模过渡的阶段),整个处理腔内仅在靠近管壁处存在很小面积的低速区域,与原发明专利中描述的尺寸较小、流速较低的情况类似,而对PEF杀菌的实验室研究影响较小,所以该结构适用于科研。另一方面,当入口流速在0.982~9.824 m/s时(即处理量在100~1 000 L/h时),整个组合处理腔结构内的物料流速分布比较均匀,而且随着入口流速提高或者处理腔串联个数的增加,湍流现象越来越明显,甚至消除了低流速时管壁处的低速区域,这有利于物料的充分混合,使杀菌更加彻底。故该优化后的PEF杀菌处理腔详细结构方案,在不同处理量规模下具有理想的流体动力学特性。

因此,优化后的处理腔单元结构不仅能在物料处理区域获得较理想的流场、电场分布特性,而且在靠近物料出口处可以获得较均匀的流速分布,能解决普通电极内腔中随着入口流速提高或处理室尺寸增大而造成出口处流速分布不均匀的问题,有利于多处理室组合使用,以提高杀菌处理效率。

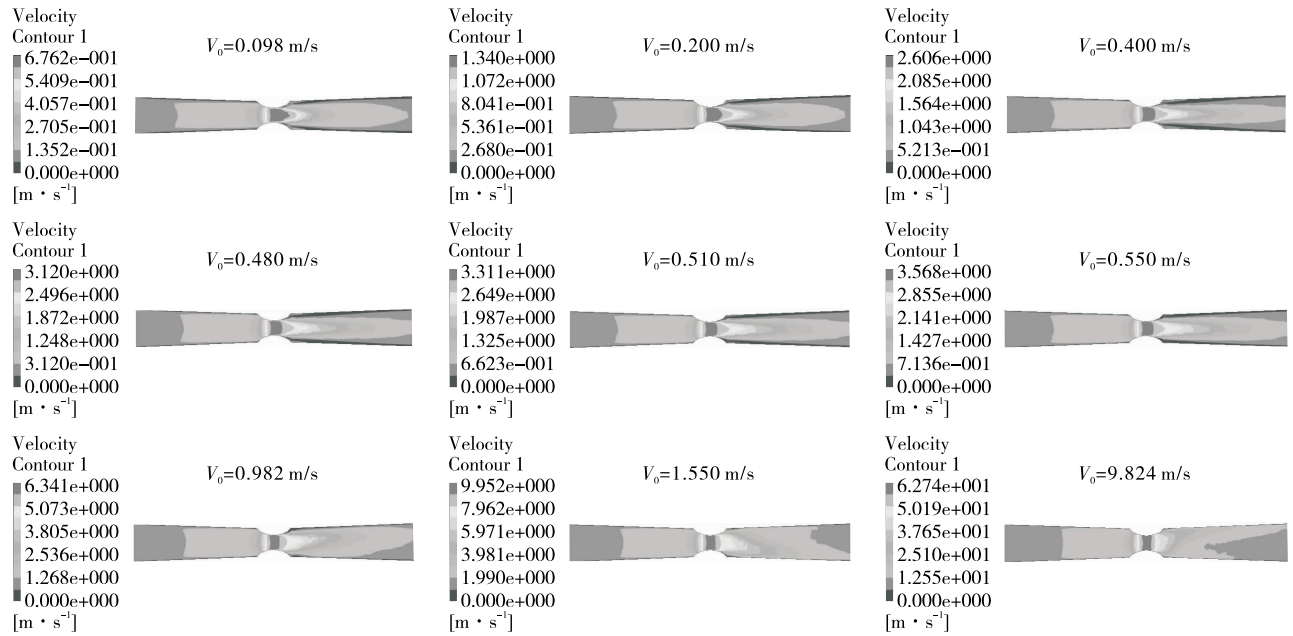


图 7 优化后 PEF 杀菌处理腔单元的流速分布云图(以大端内径 6 mm 结构为例)

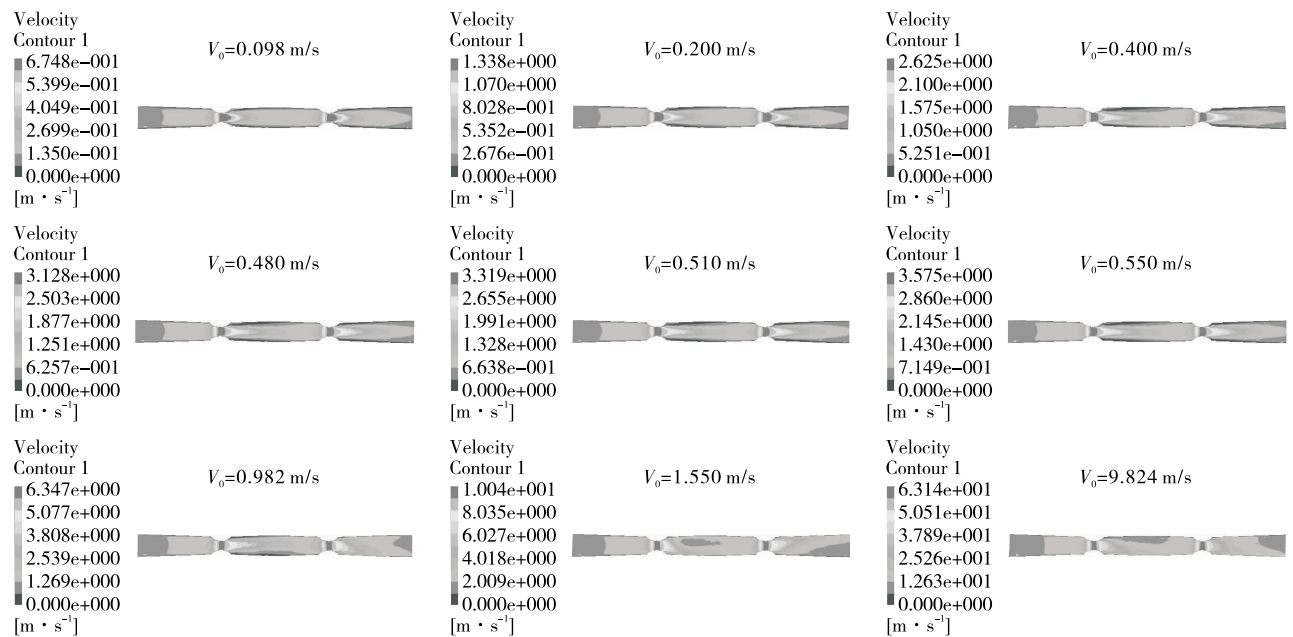
Figure 7 Flow rate distribution of the PEF treatment chamber unit after optimization
(with large diameter 6 mm structure as an example)

图 8 PEF 杀菌处理腔组合的流速分布云图

Figure 8 Flow chart of PEF sterilization chamber combination

该新型共场处理室单元的处理效率可以满足商用规模的应用要求,具有性能优良、结构紧凑、组合使用方便等优点,为高压脉冲电场杀菌的商业化应用提供了可能。

4 结论

目前,中国对 PEF 杀菌处理系统的研究和应用还未达到商业化规模的要求,而椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔的耦合场特性适合于工业应用,但是研究发现其在组合使用时流体特性欠佳。本研究建立了椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔

单元的三维模型,利用 ANSYS 软件及其子软件 ANSYS Fluent 的强大数值计算功能,对内径 2~14 mm 的椭圆内嵌式处理腔单元进行了流体动力学和电场分析;并对仿真分析结果进行了比较,总结了该种处理腔结构在商业应用规模下的优势和缺点;结合流体动力学分析结果,提出了一种结构优化方案,并进一步做了仿真分析验证。得出如下主要结论:

(1) 椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔单元在结构尺寸增大以及串并联组合后,电场强度分布比较均匀,不存在尖峰

电场,而且高强度的电场集中分布在杀菌处理区域,电场分布特性较理想。

(2) 未优化的椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔单元在结构尺寸增大和入口流速提高时,处理腔靠近出口处的金属电极管道内将出现大面积的物料滞留区,在多个处理腔组合使用时成为处理死区,造成杀菌处理不彻底。

(3) 在原有椭圆内嵌型共场式杀菌处理腔的基础上,基于流体特性优化后,提出的一种内部带有锥度的金属电极管结构不仅能使处理腔获得理想的电场强度分布,而且可以使物料出口处获得良好的流体特性,这将有利于多个处理腔的组合杀菌处理,为 PEF 杀菌处理腔的商业化提供了新思路。

参考文献

- [1] BUCKOW R, BAUMANN P, SCHROEDER S, et al. Effect of dimensions and geometry of co-field and co-linear pulsed electric field treatment chambers on electric field strength and energy utilisation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105(3): 545-556.
- [2] 胡大华. 中试规模 PEF 杀菌系统研制与实验性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 19.
- [3] BUCKOW R, BAUMANN P. Effect of dimensions and geometry of co-field and co-linear pulsed electric field treatment chambers on electric field strength and energy utilisation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 105(3): 545-556.
- [4] GERLACH D, ALLEBORN N, BAARS A, et al. Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation: A review[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(4): 408-417.
- [5] 金伟. 中试规模高压脉冲电场杀菌处理室研究与优化[D]. 无锡: 江南大学, 2013: 21-22.
- [6] 颜文旭, 张姗姗, 公群. 高压脉冲电场杀菌多物理场特性研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(2): 1-6.
- [7] 胡大华, 平雪良, 吉祥, 等. 共场处理室耦合仿真软件开发与

- 分析[J]. *食品与机械*, 2013, 29(3): 177-181.
- [8] 金伟, 平雪良, 吉祥, 等. 高压脉冲电场共场杀菌处理室性能仿真与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 39-47.
- [9] US Food and Drug Administration Center. Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies-pulsed electric fields[R]. [S. l.]: US Food and Drug Administration Center, 2000.
- [10] 黄康. 高压脉冲电场处理室内多物理场对微生物灭活作用的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 96-102.
- [11] 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 & Emerging Technologies*, 2002, 3(3): 233-245.
- [12] GERLACH D, ALLEBORN N, BAARS A, et al. Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation: A review[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(4): 408-417.
- [13] BUCKOW R, SCHROEDER S, BERRES P, et al. Simulation and evaluation of pilot-scale pulsed electric field (PEF) processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 101(1): 67-77.
- [14] KAI K, BUCKOW R, TRUJILLO F J, et al. Multiphysics Simulation of Innovative Food Processing Technologies [J]. *Food Engineering Reviews*, 2015, 7(2): 64-81.
- [15] 陈锦权. 可用于连续式高压脉冲电场设备的脉冲电场处理室: 中国, 200720006068.6[P]. 2009-06-03.
- [16] 方婷. 高压脉冲电场杀菌动力学及处理室改进研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008: 64-78.
- [17] 方婷, 魏奇, 陈锦权. 高压脉冲电场处理室的改进及其对液体食品的杀菌效果[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4): 183-188.
- [18] 解效白, 陈炜峰. 电磁脉冲高场强杀菌处理室的研制[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(26): 13 081-13 084.
- [19] 王海彦, 刘永刚. ANSYS Fluent 流体数值计算方法与实例 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 15-19.

(上接第 78 页)

结构优化设计以机架为主要研究对象。

(3) 利用有限元软件 ANSYS 的模式分析功能,分析机构振动特性的方法是可靠的、快捷的,可以利用其对机构其他零部件作进一步的模式分析,寻找整机以及其他零部件的固有频率和振型,进行结构优化设计,提高整机品质检测性能。

参考文献

- [1] 司徒达, 韩兆鹏, 刘旭明. 鲜禽蛋分级和质量控制技术的研究现状[J]. *中国家禽*, 2013, 35(8): 44-48.
- [2] 姜松, 漆虹, 王国江, 等. 禽蛋基本特性参数分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 137-141.
- [3] 孙力, 蔡健荣, 林颖, 等. 基于声学特性的禽蛋裂纹实时在线检测系统[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(5): 183-186.

- [4] 张超, 卢伟, 丁天华. 禽蛋品质无损检测的研究现状及其展望[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(18): 381-384.
- [5] 介邓飞, 王晓婧, 魏莹. 基于近红外光谱禽蛋新鲜度无损检测模型研究[J]. *食品与机械*, 2016, 32(8): 115-118.
- [6] 吴佳, 汤全武, 史崇升, 等. 马铃薯品质无损检测技术研究进展[J]. *食品与机械*, 2014, 30(3): 257-260.
- [7] 王栓巧. 基于机器视觉的种蛋品质检测系统研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009: 9.
- [8] 余坚勇, 郝利民, 钱平, 等. 基于有限元分析的浅盘食品包装容器设计[J]. *食品与机械*, 2011, 27(2): 94-97.
- [9] 李硕, 肖书浩, 刘静. 基于逆向工程和 ANSYS 的鸡蛋蛋壳受力分析[J]. *机械制造*, 2015, 53(10): 25-28.
- [10] 丁天华, 卢伟, 张超, 等. 基于 MUSIC 功率谱和 CPNN 的鸡蛋散黄无损检测方法[J]. *南京农业大学学报*, 2015, 38(6): 1 009-1 015.