

# 通电加热技术在食品中的应用研究动态

## Research progress of ohmic heating for food

王晓燕<sup>1,2,3</sup>

潘晓扬<sup>1,2,3</sup>

程裕东<sup>1,2,3</sup>

金银哲<sup>1,2,3</sup>

WANG Xiao-yan<sup>1,2,3</sup> PAN Xiao-yang<sup>1,2,3</sup> CHENG Yu-dong<sup>1,2,3</sup> JIN Yin-zhe<sup>1,2,3</sup>

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学食品热加工工程中心, 上海 201306;

3. 国家级食品科学与工程实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306)

(1. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Engineering Research Center of Food Thermal-processing Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. National Food Science and Engineering Experimental Teaching Demonstration Center

[Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China)

**摘要:**通电加热是利用食品物料本身的电阻抗来产生热量的加热技术,是一种内加热方法。与其他加热方式相比,具有加热快速、均匀的特点。文章介绍了通电加热装置的主要组成,总结了电导率的影响因素,概述了通电加热过程中食品的温度分布模拟,归纳整理出通电加热在热烫、脱水、蒸发、发酵、提取、解冻、灭菌等方面的应用,并对食品通电加热技术的应用前景进行了展望。

**关键词:**通电加热;食品;电导率;温度分布;数学模拟

**Abstract:** As an internal heating technology, ohmic heating is a method using the inherent electrical resistance of food materials to generate heat. Compared with other heating methods, ohmic heating is faster and more uniform in heating. In this review, the main components of ohmic heating equipment and its effects on electrical conductivity of food were discussed. The mathematical simulation of the temperature distribution of food during ohmic heating was also summarized. Moreover, the applications of ohmic heating for food including blanching, evaporation, dehydration, fermentation, extraction, thawing, and sterilization were classified. In addition, the research prospect of ohmic heating for food was presented.

**Keywords:** ohmic heating; food; electrical conductivity; temperature distribution; mathematical simulation

通电加热是一种新兴的电加热技术,但其概念并不陌生。早在 19 世纪时通电加热已应用于牛奶的巴氏消毒,之后在烹制香肠和防止马铃薯褐变等方面都有相关报道。但

由于加热过程中电极材料会腐蚀、电力成本高、工艺参数难以控制等<sup>[1]11-13</sup>,使得该技术仅限于食品解冻<sup>[2]</sup>。随着新电极材料的发现、加热装置的改造、控制系统的优化以及电力系统的发展等使得通电加热技术得到更广泛的应用。

通电加热(OH)是一种电流流经食品物料从而直接进行加热的加工方式。由于大多数食物含有离子物质如盐和酸,而通电加热是把食品物料当作电路中一段导体,电路中的带电粒子在电场的作用下碰撞产生动能,动能的增加表现为发热,从而使食品的温度上升,达到加热的目的<sup>[3]2</sup>。

通电加热是一种瞬时加热技术,所以食品内部没有温度梯度<sup>[3]3</sup>。通电加热的优点是加热快速、温度分布较均匀,加热时对食品的结构、营养或感官改变的较少,从而可以保证产品品质。实际和潜在的应用非常广泛,包括蒸煮、热烫、蒸发、脱水、发酵、提取、巴氏消毒、灭菌、细胞裂解等<sup>[1]11-12</sup>。

尽管通电加热技术应用广泛,具有很多优点,但在实际应用中存在局限性:①在接触式加热液态食品如乳制品时容易发生结垢和电极腐蚀,如何减少或避免对食品的污染是关键问题<sup>[4]</sup>;②在浸泡式通电加热中,浸泡介质的选定以及对物料和电极的影响缺乏充分的试验依据<sup>[5]28</sup>;③对于电导率差异性很大的固液混合物,在通电时物料之间能否加热均匀影响着加工品质<sup>[6]</sup>。本文拟综述通电加热技术在食品中的应用研究动态,为食品在通电加热过程中的工艺优化提出建议,以便将其广泛应用到食品加工中。

## 1 通电加热装置

通过改善通电加热装置可以减少容器热损失和极板污染、提高劳动生产率和能量效率、降低生产成本来实现通电加热装置的连续化和自动化。

一般,通电加热系统整体结构主要由计算机、数据采集

**基金项目:**上海高校知识服务平台(上海海洋大学)(编号:ZF1206)

**作者简介:**王晓燕,女,上海海洋大学在读硕士研究生。

**通信作者:**金银哲(1977—),男,上海海洋大学副教授、博士。

E-mail: yzjin@shou.edu.cn

**收稿日期:**2017-06-03

系统、电源、通电加热装置等组成。电压调节器提供加热所需交流电源;数据采集器根据设定的时间间隔采集物料在加热过程中的温度、电流、电压等动态信号,并输入计算机进行处理。设计合适的通电加热装置是整个通电加热系统的核心和关键。其中,通电加热装置主要由加热容器、温度监测器、电极等组成。

### 1.1 通电加热容器

加热容器一般由耐高温、耐高压、耐腐蚀、卫生、无毒、绝缘、化学稳定性好且易于加工的材料如聚丙烯、聚氯乙烯或有机玻璃等构成。容器形状一般呈方形或圆柱形,加热固体物料时会根据物料的结构和形状来确定容器尺寸,其内部尺寸结构直接影响到通电加热的效果。研究<sup>[7]</sup>表明,相比尺寸较大的加热容器,小型加热容器更有助于加热均匀。容器外包裹隔热材料来减少散热。

### 1.2 温度监测器

加热时光纤温度传感器或热电偶探针(涂有 Teflon 层的 T 型, K 型)测量端会从容器盖或容器壁上的小孔穿过监控物料内部温度。每次做平行试验时应确保温度监测器距离端面相同距离,并在同一深度测量。热电偶裹上聚四氟乙烯薄膜是为了防止电场干扰其信号传输,但热电偶不适用于高频和高压环境。光纤温度传感器灵敏度高,电绝缘性好,抗电磁干扰能力强,但使用严格,应用中受到限制。

### 1.3 电极配置

电极是构成通电加热装置的关键,也是通电加热期间热损失的潜在原因。常用的电极材料有铁、铝、铂、钛、不锈钢、石墨、金等。其中,铁电极容易钝化;铝电极在低频下发生腐蚀;铂、金电极,虽然能有效抑制电极溶解,但经济成本高;钛电极虽不易腐蚀,但在低频下会产生变色物质污染物料,加工性能较差;石墨电极具有优良的导电性和耐酸碱性能,但损耗大,一般用于废液处理;不锈钢电极价格低廉,但使用寿命短<sup>[4]</sup>。设计电极时也要注意电极厚度,Zell 等<sup>[7]</sup>发现电极越厚,热损失越大,温度升高越慢,试验表明 0.2 mm 的铝电极温度升高最快,但它具有快速冷却和电解敏感性的缺点,0.6 mm 的不锈钢也遇到了冷却问题,而 1 mm 厚的铂钛电极加热土豆泥是最合适的,因为其既耐电解又有令人满意的加热速率。对于电极表面,Stancl 等<sup>[4]</sup>研究了不锈钢电极表面的光滑程度对脱脂乳结垢的影响,发现抛光和粗糙电极表面上形成了一个薄且均匀的污垢层,深刻痕电极上形成不均匀的结垢层。对于电极形状,姜欣<sup>[136-50]</sup>发现当物料电导率均匀一致时,矩形和圆形电极的温度分布均匀;对于各部分电导率不同的物料,采用弧形电极有可能得到均匀的温度场,是因为弧形电极可以减少充填液体的使用,从而提高加热速率。对于电极数目,在连续的加热系统中,一对电极很难实现加热温度的控制,若采用多个电极加热,温度的控制就容易实现<sup>[8]</sup>。实践中,应尽可能选择合适的电极种类、形状、尺寸、厚度等以满足物料的加热需求。

合适的通电加热装置不仅可以优化通电加热工艺,控制通电加热过程,还影响着通电加热效果。影响通电加热效果的因素除了加热设备之外,还有过程参数(温度、频率、场强)

及食品的电导率等。

## 2 影响因素

影响通电加热效果最重要的因素是食品的电导率,而影响电导率的因素有温度、频率、场强、食品成分、食品相态等。

### 2.1 通电加热过程的影响因素

2.1.1 温度 电导率显著的特征是随温度的升高而增大,这是因为食品物料中的带电粒子在运动过程中会受到阻力作用,高温对离子的阻碍作用小于低温。对液体食品而言,不论采用何种加热方式,电导率与温度之间都呈现极好的线性关系<sup>[6]</sup>。

2.1.2 频率 电极在低频(如 50, 60 Hz)下容易发生腐蚀,致使一些金属离子迁移到样品中,影响样品质量。另外,低频下细胞膜的透过性对电导率的影响相对较大。当交变频率高于 5 kHz 时,电极的溶解速度减慢,但提高频率会使电力电子器件的动态损耗增多,电源效率降低。

2.1.3 场强 场强越高,所产生的温差越大,从而影响食品物料的电导率与温度的线性关系<sup>[9]</sup>。Salengke 等<sup>[10]</sup>也认为较低的场强导致加热速率较慢,从而有更多的时间缩小不同位置间的温度梯度使温度分布趋于均匀,最终间接影响导电性。

### 2.2 食品成分

通电加热技术用于食品时,电导率应控制在 0.01~10.00 S/m<sup>[11]</sup>,当食品中各成分的电导率差异较大时,其内部温度分布不均匀。若食品中含有脂肪、骨刺等绝缘体,不被电流加热,会在加热电场中形成一个阴影区,即为通电加热的冷点;由于绝缘体阻挡电流经过,致使绝缘体周围物料的电流强度增加,形成通电加热中的热点。所以,应尽量选择各成分电导率接近的或含非导电成分少的食品<sup>[5340]</sup>。此外,若食品中含有淀粉,淀粉糊化会导致样品导电性显著下降。这是因为淀粉颗粒吸水发生凝胶化,导致自由水减少;另外,由于吸水膨胀使较大的淀粉颗粒之间的距离减小,导致带电粒子的活动面积减小,其运动阻力增加,电导率减小<sup>[6]</sup>。

### 2.3 食品相态

2.3.1 液态食品 加热液态食品如乳制品时浓度越大,单位体积中的离子数目越多,电导率越大,加热速率越快。加热到一定温度时,水分蒸发,热损失增加,同时水沸腾形成的气泡是一种绝缘体,会干扰电流的流动,导致整个食品系统的电导率降低,而适当的搅拌会使加热更均匀<sup>[10]</sup>。

2.3.2 固-液混合食品 对于不均匀的材料如固-液混合物,当颗粒的浓度和电导率均低于流体时,颗粒的加热滞后于流体。然而,在颗粒浓度较高时,低导电性颗粒比周围流体加热更快。这是因为随着颗粒浓度的增加,通过流体的电流路径变得曲折和复杂,迫使更多电流流过颗粒,颗粒内聚集更高的热量,从而导致颗粒在通电加热过程中具有更大的加热速率。流体中颗粒的加热速率取决于系统中的相对电导率和相对浓度<sup>[11]</sup>。同时还要综合考虑流体中颗粒的大

小、形状、密度及介质黏度<sup>[5]5-6</sup>。

2.3.3 固态食品 对于固态食品,李修渠等<sup>[12]</sup>研究了纤维取向对电导率的影响,发现肌肉纤维平行于电场方向时的电导率高于垂直时的,而肉泥的电导率介于二者,这与肉内离子运动受到的阻力程度有关。郭文<sup>[3]20</sup>研究了电解质添加剂对电导率的影响,发现含 1%氯化钠土豆泥的电导率高于没有添加氯化钠的,可能是可电离的盐在通电加热中充当电流载体,致使电流传输能力变大,电导率值升高。Zell 等<sup>[13]</sup>也研究了盐溶液渗透对整块牛肌肉电导率的影响,认为盐渍处理的均匀程度对通电加热的均匀性影响较大,电导率值随着盐含量的增加而线性增加。

## 2.4 其他因素

预处理也可以改变某些食品的电导率,如热烫植物组织时,结构变化如细胞壁破坏,组织软化,自由水增加等影响导电性。同时,还要注意时间限制(5~6 min),若进一步加热可能导致营养损失,导电性降低。热烫整只鸡时电导率没有显著改变,是因为热烫后孔隙收缩,事实上,虽然热烫后鸡肉的离子含量增加,但由于低渗透性,总的离子迁移率可能会降低<sup>[11]</sup>。

通电加热受到多方面因素的影响,同时又会影响物料的加热质量。而物料内部是否加热均匀,是决定物料加热质量的关键,食品温度分布的不均匀会导致质量损失和安全问题。目前,为了达到均匀的加热效果,建立数值模拟对于把握通电加热的细节、控制食品物料的电导率和指导通电加热装置很有实际意义。

## 3 通电加热过程中食品的温度分布模拟

### 3.1 通电加热过程中温度分布模拟

通电加热过程中,最重要的是对物料内温度的控制。考虑到食品组分电导率的差异性和热电偶监测温度分布的局限性,寻求一种可以全面监测温度场的方法尤为必要。而数值模拟被认为是解决该问题最好的方法之一。通过数学模型的模拟分析,不仅可以很直观地了解通电加热过程中温度分布情况,而且可以缩短时间、节约成本,对实际应用的加工设计和控制具有很大的意义。

### 3.2 数值模拟方法和软件

目前,预测食品物料在通电加热中的温度分布常用的数值模拟方法有以下几种:有限差分法(Finite Difference Method, FDM)<sup>[14]</sup>、有限元法(Finite Element Method, FEM)<sup>[13]32-34</sup>、有限容积法(Finite Volume Method, FVM)<sup>[14]</sup>、边界元法(Boundary Element Method, BEM)<sup>[5]18</sup>、积分方程法(Integral Equation Method, IEM)<sup>[15]</sup>以及近几年来发展起来的有限元法和边界元法相结合的混合法<sup>[5]17</sup>。

(1) 有限元法:它是解决流体食品问题的首选。适合处理几何形状和边界条件复杂的区域,也适用于热处理参数变化的敏感性分析以及冷却过程温度分布的估计,精确度相当高,但内存和计算量巨大。

(2) 有限容积法:它是计算流体力学(Computational

Fluid Dynamics, CFD)和计算传热学(Numerical Heat Transfer, NHT)中应用最广泛的数值离散方法。可以解决流体的传热问题,应用于不规则区域,计算时间较短,但精确度不高。

(3) 有限差分法:它是液体颗粒混合物最常用的数值方法。适合几何形状简单的区域,但对变化或复杂的边界和多种介质处理存在一定的困难。

(4) 边界元法:它是继有限元法之后发展起来的新数值方法,数据准备简单,精确度较高。但对于不均匀物料等难以应用。

(5) 积分方程法:它是很多重要数学思想和概念的最初来源和模型。积分方程对于线性问题有较高的精确度,但对于一般的非线性问题还没有系统的理论。

(6) 模拟电路法:把整个加热系统看作是由一系列电阻组成的混联电路模型,计算出等效总电阻,利用欧姆定律、焦耳效应、热传导方程、能量守恒定律等来推导有关温度分布的系列方程。

基于这些模拟方法,通电加热中目前较流行的分析软件有:PHOTON<sup>[3]8</sup>、FEMAP<sup>[3]8</sup>、ANSYS<sup>[5]19-24</sup>、FULL-MAX<sup>TM</sup><sup>[15]</sup>、COMSOL Multiphysics<sup>[15]</sup>、FORTRAN<sup>[16]</sup>、CFD/FLUENT<sup>[17]</sup>、FEMLAB<sup>[18]</sup>、MATLAB/Simulink<sup>[19]38</sup>等(见表 1)。

### 3.3 数学模拟

在模拟中讨论了几何模型的网格大小、界面设置、迭代次数、时间步长、电场强度等直接或间接影响电磁场和传热的因素,提出了近似模拟温度的方法。温度分布的获得主要是通过参数更新进行预测得到的。

#### 3.3.1 模型假设

(1) 通电加热期间,物料的热传导率、密度(除溶液之外)、比热恒定不变。

(2) 加热过程中物料与容器外壁没有热交换,溶液内部没有对流传热。

3.3.2 物料的几何模型 根据食品物料建立物理模型,设定与真实容器尺寸和样品大小的几何模型。

3.3.3 初始条件、边界条件及食品的物性参数 输入初始条件如初始温度、频率、电场强度及物料的介电损耗、电导率、热导率、比热容、密度等参数;确定温度、电场等边界条件。精确的材料参数和边界条件利于提高模拟预测的准确性。

3.3.4 数学控制方程 根据能量守恒定理、欧姆定律<sup>[5]4</sup>、焦耳定律<sup>[1]25</sup>、麦克斯韦定律<sup>[3]42-43</sup>等来确定通电加热过程中的温度、电磁场以及系统内能量等随时间变化的方程。

3.3.5 模型的验证 通过对模拟结果进行实验验证,来评估数学模型的可行性和正确性。

### 3.4 通电加热在温度分布中的模拟研究

理论模型研究已经是通电加热研究的一个焦点,但严格来说,模拟研究还不能具体和准确地模拟试验过程,仍然需要进一步完善尤其是非均质物料的加热,这无疑更加加大了试验中实时测定各相物质温度分布的难度。食品通电加热

过程中温度分布的测定与模拟见表1。

表1 食品通电加热过程中温度分布的测定与模拟

Table 1 Measurement and simulation of temperature distribution of food during ohmic heating

食品	测定方法	模拟方法	模拟软件	参考文献
土豆泥	K型热电偶	有限元法	FEMAP、PHOTON	[3] <sup>44-49</sup>
猪里脊肉及盐溶液	T型热电偶	有限元法	ANSYS	[5] <sup>38</sup>
蔬菜肉汤	K型、T型热电偶	有效介质理论,积分方程法	FULLMAX <sup>TM</sup> 、COMSOL Multiphysics	[15]
圆柱形土豆	热电偶	有限元法,有限差分法	FORTTRAN 90	[16]
鸡肉面条汤和黑豆	T型热电偶	边界元法	FLUENT	[17]
土豆颗粒	光纤传感器	有限元法	FEMLAB	[18]
牛奶	K型热电偶	临界比例度法	MATLAB/Simulink	[19] <sup>36-38</sup>
冻肉块	T型热电偶	模拟回路	—	[20]
琼脂凝胶	K型热电偶	有限元法	COMSOL Multiphysics	[21]
琼脂混合液	K型热电偶	有限元法	ANSYS	[22]
蔬菜肉汤	光纤传感器	有限差分法和模拟回路	ANSYS	[23]

通电加热中,利用数值模拟技术可以再现食品物料在整个加热过程中温度等参数的变化过程。为通电加热在食品中的应用提供一定的指导,特别是对解决通电加热中的加热不均、极板污染等问题都有积极意义。

## 4 通电加热在食品中的应用现状

与传统加热方式相比,通电加热避免了被加热物料的烧焦、黏附现象的发生,有利于设备连续工作。与微波、射频、红外等技术相比,通电加热不受物料深度影响,其能量转化效率接近100%<sup>[6]</sup>,并且操作方便,即关即停,容易实现自动化。所以通电加热在食品的热烫、脱水蒸发、发酵、提取、解冻和杀菌等方面多有研究和应用。

### 4.1 热烫

通电加热技术可用于食品的烫漂,烫漂的主要目的是使酶失活或钝化,以延长食品的贮藏期。通电加热在烫漂朝鲜蓟时,过氧化物酶被灭活,V<sub>C</sub>和多酚类物质得到了较好的保留<sup>[24]</sup>。由于热烫时间缩短,蘑菇的耗水量减少,而且在相对低的温度下蘑菇就会收缩<sup>[25]</sup>。

### 4.2 脱水蒸发

通电加热还可以提高食品组织的干燥脱水和蒸发浓缩速率。甜玉米脱水前进行通电处理能够显著提高热空气的干燥速率<sup>[26]</sup>。Darvishi等<sup>[27]</sup>研究了电压梯度对番茄汁蒸发效果的影响,发现随着电压梯度的升高,番茄汁的电导率增加,蒸发时间减少,能量利用率较高,浓缩效果较好。

### 4.3 发酵

在低频下,由于电场作用,细胞膜的渗透性发生改变。电穿孔效应一方面可以促使更多的营养物质更快进入细胞内部,从而缩短发酵的滞后期;另一方面,在发酵后期,由于代谢物进到细胞内部,从而抑制发酵过程。通电加热生面团可以使酵母快速达到其最适活性温度,使用比常规打样更高的加热速率缩短滞后期进而减少打样时间<sup>[28]</sup>。

### 4.4 提取

使用通电加热可稳定米糠并改善米糠油的提取产率,结

果表明,通电加热是稳定水分和米糠混合物的有效方法(尤其是在1 Hz),通电加热米糠的脂质提取率最大可达92%,并且降低交流电频率可显著增加脂质提取率<sup>[29]</sup>。利用通电加热从橙汁废料中提取果胶,所提取的果胶具有高度的酯化度和稳定的乳化活性,且其黏度均高于常规加热提取的果胶<sup>[30]</sup>。

### 4.5 解冻

在冷冻食品物料中,仍有一部分液体水以较高浓度溶液的形式存在,这为通电加热提供了可能性。Nadide等<sup>[31]</sup>研究了盐浓度和频率对冷冻土豆泥调温处理的影响,发现当施加0.5%盐浓度和10 kHz频率时,土豆泥内有最小温差。

### 4.6 杀菌

通电加热除了具有热效应外,电流也会对微生物产生非热致死作用,从而最大限度地提高了食品在常温或冷冻流通下的安全性。Kim等<sup>[32]</sup>研究了不同电场强度对苹果汁脂肪芽孢杆菌酸性杆菌杀菌效果的影响,发现苹果汁在100℃下加热30 s能够使脂肪芽孢杆菌酸性杆菌完全失活,同时不改变商业苹果汁的质量。辣椒酱在不同电压下通电加热,其感官和营养质量均得到提高,植物细胞的灭活显示出芽孢杆菌有99.7%的降低<sup>[33]</sup>。

为了充分发挥通电加热的优势,可将通电加热与传统加热、微波加热等联合不仅提高了加热均匀性,还改善了食品的加热品质。Zell等<sup>[34]</sup>研究了单一的通电加热技术和传统蒸煮、通电加热(高温短时、低温长时)、热风联合技术对火鸡肉在其物理、化学和感官质量上的影响,发现高温短时通电联合加热的火鸡肉质感最好,风味最佳;低温长时通电加热联合技术的蒸煮损失最小。利用微波和通电联合技术加热胡萝卜汤,发现固相和液相之间没有明显的温差,减少了颗粒状食品的安全性问题<sup>[35]</sup>。Lee等<sup>[36]</sup>认为联合加热将是通电加热食品未来发展的趋势。

## 5 展望

通电加热技术因具有加热快速、均匀,能量转换率高等

优点,在食品领域有非常广阔的发展前景,但仍有很多课题需要探索如:

(1) 在接触式通电加热中为了避免出现电解、热损失和结垢问题,应开发高频通电加热设备,可以解决低频下的电极问题。

(2) 在通电加热过程中会受到食品尺寸的影响,适合大尺寸或不规则形状固体加热的整套通电加热系统还不够成熟,有待进一步改进和完善。

(3) 考虑到食品电导率的差异性和多样性,除了预处理和浸泡介质外,如何在不影响食品质量和安全的前提下保证食品电导率均匀分布是未来通电加热多种混合食品的关键。

(4) 由于在模拟通电加热过程中食品的温度分布时,忽略了各种可变因素,故应优化模型来提高模拟的准确性,同时在今后的研究中可以尝试模拟食品中的微生物分布,以便更好地了解热过程对食品品质的影响。

(5) 虽然通电温度相当温和( $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),但是由于电极与样品直接接触,该方法仍然可能导致肉颗粒中的多环芳烃形成,尽管通电加热还没有关于多环芳烃和杂环胺形成的研究,但在未来的研究中应该给予考虑。这些为通电加热技术在食品加工中的进一步应用提供了方向。

### 参考文献

[1] 姜欣. 食品体系通电加热过程温度场的模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[2] HIND A, LUC M, EUGÈNE V. Blanching of strawberries by ohmic heating: Effects on the kinetics of mass transfer during osmotic dehydration [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2010, 3: 406-414.

[3] 郭文. 通电加热过程中具有不均一电气特性的固体复合食品温度分布模型的建立[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.

[4] STANCL J, ZITNY R. Milk fouling at direct ohmic heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99(4): 437-444.

[5] 李秀芝. 固液混合物的通电加热及数值模拟[D]. 济南: 山东农业大学, 2011.

[6] 杨铭铎, 邓云. 食品的通电加热技术研究[J]. *食品科学*, 2000, 21(12): 146-155.

[7] ZELL M, MORGAN D J, CRONIN D A. Minimising heat losses during batch ohmic heating of solid food[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, 89(2): 128-134.

[8] 杨玉娥, 李法德. 猪肉在接触式通电加热和浸泡式通电加热中的电导率比较[J]. *肉类工业*, 2006(11): 14-16.

[9] TAO Qi-hua, JINDAL V K, VAN WINDEN J. Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for liquid foods[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1993, 9(3): 243-253.

[10] SALENGKE S, SASTRY S K. Experimental investigation of ohmic heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(3): 324-336.

[11] KNIRSCH M C, DOS SANTOS C A. Ohmic heating: a review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2010, 21(9): 436-441.

[12] 李修渠, 李里特, 李法德. 肉的电导率研究[J]. *肉类工业*, 2001(12): 19-21.

[13] ZELL M, LYG J G, CRONIN D A, et al. Ohmic cooking of whole beef muscle: Optimisation of meat preparation[J]. *Meat Science*, 2009, 81(4): 693-698.

[14] SINGH A, SINGH A P. Computational techniques used in heat transfer studies on canned liquid-particulate mixtures [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(1): 83-103.

[15] ZHU Song-ming, ZAREIFARD M R, CHEN Cui-ren, et al. Electrical conductivity of particle-fluid mixtures in ohmic heating: Measurement and simulation[J]. *Food Research International*, 2010, 43(6): 1 666-1 672.

[16] SALENGKE S, SASTRY S K. Models for ohmic heating of solid-liquid mixtures under worse-case Scenarios heating [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 83(3): 337-355.

[17] JUN S J, SASTRY S. Modeling and optimization of ohmic heating of foods inside a flexible package[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2005, 28(4): 417-436.

[18] YE Xiao-fei, RUAN R, CHEN P, et al. Simulation and verification of ohmic heating in static heater using MRI temperature mapping [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2004, 37(1): 49-58.

[19] 谢子明. 食品通电加热温度制系统研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2014.

[20] 李修渠, 李里特, 李法德. 通电加热解冻的模拟电路模型及实验研究[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(2): 57-60.

[21] SHIM J Y, LEE S H, JUN S J. Modeling of ohmic heating patterns of multiphase food products using computational fluid dynamics codes [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010(99): 136-141.

[22] 沈五雄, 周家华. 含绝缘体物料的欧姆加热过程模拟[J]. *食品工业科技*, 2010, 31(2): 145-148, 151.

[23] CHEN Cui-ren, ABDELRAHIM K, BECKERICH I. Sensitivity analysis of continuous ohmic heating process for multiphase foods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(2): 257-265.

[24] ICIER F. Ohmic blanching effects on drying of vegetable by-product[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2010, 33(4): 661-683.

[25] SENSOY I, SASTRY S. Ohmic blanching of mushrooms[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2004, 27(1): 1-15.

[26] WANG Wei-chi, SASTRY S. Effects of thermal and electro-thermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2000, 23(4): 299-319.

[27] DARVISHI H, HOSAINPOUR A, NARGESI F, et al. Exergy and energy analyses of liquid food in an Ohmic heating process: a case study of tomato production[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2015, 31: 73-82.

[28] TIMOTHÉE G, OLIVIER R, VANESSA J, et al. Proofing of bread dough assisted by ohmic heating[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 39: 55-62.

(上接第 89 页)

- [3] ROSTRON F. Egg handling plants; US, 2895589[P]. 1959-07-21.
- [4] READING J W. Automatic egg orientors; US, 3024889[P]. 1962-03-13.
- [5] GIBBS F P. Egg Orienting mechanism; US, 3075629[P]. 1963-01-29.
- [6] 近藤林. 鶏卵の方向を揃える装置: 日本, 特開平 9-150938[P]. 1997-06-10.
- [7] 山下刚. 卵の方向整理装置: 日本, 特開平 11-147508[P]. 1999-06-02.
- [8] 今井隆之. 鶏卵配向装置: 日本, 特開 2009-51652[P]. 2009-03-12.
- [9] 俞兆志, 林玉藤. 蛋品大小头同向调整装置: 中国, CN201020501239.4[P]. 2011-05-04.
- [10] 蒋焕煜, 徐敏雅, 应义斌, 等. 一种实现禽蛋大小头整序的自动包装设备: 中国, CN201210224686.3[P]. 2013-1-2.
- [11] JIANG Song, SUN Ke, WANG Guo-jiang, et al. Study on the

mechanical automatic orientation regulations about the axial and the turnover motions of eggs[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 133(4): 46-52.

- [12] 孙柯, 姜松, 朱红力, 等. 卵形体质量和材质对大小头自动定向运动的影响[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 72-75.
- [13] 姚俊. 禽蛋大小头自动定向中水平偏转角自适应规律研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- [14] 姜松, 姚俊, 徐斌, 等. 卵形体大小头自动定向过程中水平偏转角影响因素的研究[J]. 现代食品科技, 2015(10): 168-173.
- [15] 朱杰. 卵形体水果大小头自动定向运动规律的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016: 13-14.
- [16] 孙柯. 禽蛋大小头自动定向机理及应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- [17] 姜松, 王国江, 漆虹, 等. 禽蛋大小头自动定向排列系统设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 113-117.
- [18] 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): 137-142.

(上接第 208 页)

- [33] CASTILLO M, MARTÍNORÚE S M, TAYLORPICKARD J A, et al. Use of mannanoligosaccharides and zinc chelate as growth promoters and diarrhea preventative in weaning pigs: Effects on microbiota and gut function[J]. Journal of Animal Science, 2008, 86(1): 94-101.
- [34] 丁琳琳. 壳寡糖螯合锌对小鼠学习记忆能力影响的比较研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013: 12-32.
- [35] 王中成, 吴学壮, 崔虎, 等. 饲料添加不同水平果胶寡糖螯合锌对肉仔鸡生长性能、免疫功能和血清抗氧化功能的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(6): 1757-1764.
- [36] WANG Zhong-cheng, YU Hin-min, WU Xue-zhuang, et al. Effects of dietary zinc pectin oligosaccharides chelate supplementation on growth performance, nutrient digestibility and tissue zinc concentrations of broilers[J]. Biological Trace Element

Research, 2016, 173(2): 475-482.

- [37] 白阳. 壳聚糖和壳寡糖及其配合物对刺参生长和品质相关指标的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 28-80.
- [38] 毛跟年, 齐凤, 李丽维, 等. 甘露低聚糖锌配合物对尿素吸附的研究[J]. 陕西科技大学学报, 2009, 27(5): 62-64.
- [39] 刘广洋. 四种海藻寡糖钒配合物的制备及其生物活性的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 40-68.
- [40] LIU Yu, CHEN Guo-song, CHEN Yong, et al. Cyclodextrins as carriers for cinchona alkaloids: a pH-responsive selective binding system[J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2005, 3(14): 2519-2523.
- [41] 王秉. 环糊精金属配合物模拟多酚氧化酶及其催化性能[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2009: 39-56.
- [42] 刘志华, 纪永升, 张静, 等. 基于环糊精配体骨架化合物的铜离子电化学行为及其检测[J]. 分析测试学报, 2015, 34(8): 939-943.

(上接第 213 页)

- [29] LAKKAKULA N R, MARYBETH L, TERRY W. Rice bran stabilization and rice bran oil extraction using ohmic heating[J]. Bioresource Technology, 2004, 92(2): 157-161.
- [30] SABERIAN H, HAMIDI-ESFAHANI Z, HASSAN A G, et al. Optimization of pectin extraction from orange juice waste assisted by ohmic heating[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017, 117(6): 154-161.
- [31] NADIDE S, HOSAHALLI S R, ZHU Song-ming, et al. Ohmic tempering of frozen potato puree[J]. Food Bioprocess Technologies, 2013(6): 3200-3205.
- [32] KIM N H, RYANG J H, LEE B S, et al. Continuous ohmic heating of commercially processed apple juice using five sequential electric fields results in rapid inactivation of Alicyclobacillus acidoterrestris spores[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 246(4): 80-84.

- [33] CHO W, YOON J Y, CHUNG M. Pasteurization of fermented red pepper paste by ohmic heating[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34(4): 180-186.
- [34] ZELL M, LYNG J G, CRONIN D A, et al. Ohmic cooking of whole turkey meat: Effect of rapid ohmic heating on selected product parameters [J]. Food Chemistry, 2010, 120(3): 724-729.
- [35] NGUYEN Loc T, CHOI Won, LEE Seung Hyun, et al. Exploring the heating patterns of multiphase foods in a continuous flow, simultaneous microwave and ohmic combination heater [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(1): 65-71.
- [36] LEE Seung Hyun, CHOI Won, KIM Chong-Tai, et al. Development of a dual cylindrical microwave and ohmic combination heater for minimization of thermal lags in the processing of particulate foods[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1220-1228.