

# 通电加热技术在食品工业中的应用研究进展

孙玉利, 李法德, 杨玉娥, 韩玉臻, 田富洋

(山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

**摘要:** 通电加热技术是食品工程中的一门新兴技术, 食品物料的电导率是影响通电加热的主要参数之一。该文介绍了通电加热技术的基本原理和特点, 分析了影响食品物料电导率的因素及其对通电加热的影响; 讨论了通电加热在杀菌、肉制品加工、淀粉糊化中的应用, 指出了通电加热研究中存在的问题, 并对通电加热的应用前景进行了分析。

**关键词:** 通电加热; 电导率; 影响因素; 研究进展

中图分类号: TS205

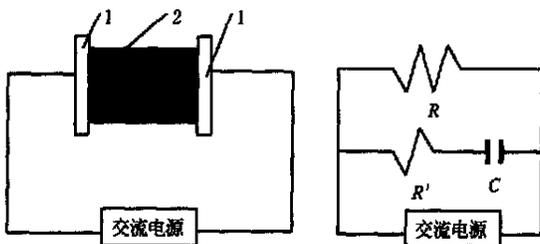
文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)06-0296-05

## 0 引言

食品物料的加热处理在食品工程单元操作中占有非常重要的地位, 它不仅直接关系到最终产品的质量, 而且还关系到加工过程中能源消耗及其制造成本的高低。在对食品物料的烫漂、浓缩(蒸发)、杀菌、蒸煮、干燥和焙烤等热处理加工过程中, 传统加热所采用的传热方式主要包括传导、对流、辐射三种以及这三种方式的不同组合。同其他单元操作一样, 随着科学技术的进步, 食品物料的热处理过程也在向着高效率、低能耗、高品位方向发展。长期以来, 虽然各国技术人员对此作了大量研究, 并取得了很多进展。但如何进一步降低能耗、提高加工品位, 仍是技术改进的焦点<sup>[1]</sup>。虽然微波加热可以实现从物料内部加热, 但由于微波透入深度的限制, 加热不均匀是微波加热的一大难题, 并且微波加热的成本较高<sup>[2]</sup>, 限制了微波加热在食品加工过程中的应用。

通电加热技术是食品工程中的一门新兴技术, 其基本原理如图 1 所示。它是在电路中把物料做为一段导体, 利用它本身在导电时所产生的热量达到加热的目的<sup>[3]</sup>。



1. 电极 2. 物料 R. 阻抗 C. 电容 R'. 相当于介电损耗的阻抗  
图 1 通电加热原理示意图

Fig 1 Diagram of the ohmic heating principle

通电加热的优点主要包括: (1) 能够精确控制产品

的加热温度, 并且加热均匀, 升温速率可以方便的进行控制(2) 由于热量是在物料内部产生的, 因此没有加热面, 这就避免了由于加热面的存在而造成的焦糊现象(3) 当电源切断后加热过程没有滞后现象, 热损失非常低等等<sup>[4]</sup>。

尽管通电加热技术起源于一个多世纪以前, 但成功的商用技术是 20 世纪 20 年代发展起来的, 主要用于牛奶的消毒。到 20 世纪 30 年代后期, 已有 50 多个装置在美国运行。但后来没有解决电极的腐蚀和没有相应的包装技术, 以及其他能源, 如石油和天然气逐渐变得便宜, 致使该技术逐渐衰退<sup>[5]</sup>。最近几年, 由于电极材料的改进, 通电加热技术重新引起了人们的兴趣, 部分研究成果已经在食品工业中得到推广和应用<sup>[6]</sup>。

## 1 食品物料的电导率

由于食品物料的电导率在通电加热过程中是决定食品物料内部产热量多少的主要因素之一<sup>[7,8]</sup>。因此, 食品物料的电导率对通电加热技术的研究与发展显得极为重要。目前的研究主要集中在食品物料的电导率方面。

### 1.1 影响食品物料电导率的因素

#### 1.1.1 温度

Sastry<sup>[6]</sup> 研究发现, 对于细胞状组织而言, 如果应用通电加热, 随着电场强度的增加, 电导率与温度越来越成线性关系。在通电加热胡萝卜组织时, 发现电压梯度较低时(20~30 V/cm), 电导率与温度成非线性关系, 而电压梯度较高时, 电导率与温度成线性关系。在足够高的电场强度下, 电导率与温度存在如下关系

$$\sigma_T = \sigma_{ref} [1 + m(T - T_{ref})] \quad (1)$$

式中  $\sigma_{ref}$  —— 参考温度  $T_{ref}$  下的电导率,  $S \cdot m^{-1}$ ;  $m$  —— 温度系数;  $T, T_{ref}$  —— 分别为温度及参考温度, ;  $\sigma_T$  —— 任意温度下的电导率,  $S \cdot m^{-1}$ 。

由式(1)可知, 在通电加热过程中, 食品的温度越高其电导率也高。

在淀粉类食品物料的电导率研究方面, Wang 和 Sastry<sup>[9]</sup> 发现在糊化温度范围内, 电导率随着温度的升高而降低, 并且其电导率曲线在 70 左右出现明显的变化, 用 DSC 测定原样液, 发现 DSC 曲线变化在位置和形状上都与电导率曲线相似。李法德<sup>[4]</sup> 研究发现, 尽

收稿日期: 2004-05-08 修订日期: 2004-10-15

基金项目: 山东省自然科学基金项目(Y2003B01); 山东农业大学博士基金项目

作者简介: 孙玉利(1970-), 男, 山东泰安人, 硕士生, 主要研究方向为通电加热在食品加工中的应用。泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018

通讯作者: 李法德, 博士, 教授, 泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018, Email: lifade@sdau.edu.cn

管在淀粉糊化以前和糊化以后, 电导率随温度的变化关系为线性关系, 但糊化前淀粉悬浊液电导率随温度的变化规律和淀粉糊化形成凝胶后电导率随温度的变化规律是不同的, 特别是电导率- 温度曲线在纵轴上的截距差异较大。

### 1. 1. 2 电压梯度

Palaniappan<sup>[8]</sup>研究了电压梯度对蔬菜组织电导率的影响, 发现施加的电压梯度越高, 电导率就越大, 电导率随温度的变化成线性关系。在低电压梯度时, 电导率随温度的变化成非线性关系, 在 60 左右电导率发生突变, 认为是由于植物细胞结构发生变化引起的。李修渠等<sup>[10]</sup>在研究豆浆的电导率时, 发现当使用 50 Hz 正弦交流电对豆浆进行通电加热时, 豆浆的电导率不受电压大小的影响。其主要原因是电压增大, 提高了带电离子的运动速度, 电流也随之增大, 但电流和电压的比值没有发生变化。

### 1. 1. 3 电解质浓度

Palaniappan<sup>[8]</sup>先将蔬菜颗粒在不同浓度的盐溶液(10%, 15%, 20%, 25%, 30%)中浸泡, 使颗粒的电解质含量增加, 然后再进行通电加热, 发现电解质含量越高的颗粒, 其电导率也越大。

### 1. 1. 4 食品的组成成分

食品中如含有像脂肪、油、空气、乙醇、骨、冰等非导电性物质时, 因为这些物质为非导电性物质, 不能被通电加热, 而是通过热传导获得热量, 很容易使食品物料中其他部分发生局部过热。Halden 等<sup>[11]</sup>研究发现富含油脂的食品的电导率与加热速率容易发生不规则变化。因此为提高加热的均一性, 应加热融化或去除食品中的非导电性物质。

### 1. 1. 5 固体颗粒

对含颗粒的液体、酱体等食品采用通电加热时, 首先应考虑颗粒的大小、形状、电导率、比热容、颗粒组成成分的均匀性等因素<sup>[12]</sup>, 同时, 含颗粒流体食品的通电加热还跟固体和液体电导率差异、颗粒与电场的方向等有关<sup>[13]</sup>。

当颗粒的电导率较低时, Palaniappan 和 Sastry<sup>[8]</sup>对番茄汁和橙汁两种含有极小但极多颗粒的流体食品进行了研究, 在这种情况下, 电导率  $\sigma$  与温度  $T$  的关系式可表示为

$$\sigma_T = \sigma_{ref} [1 + K_1(T - T_{ref})] - K_2S \quad (2)$$

式中  $\sigma_T$  —— 任意温度下的电导率,  $S \cdot m^{-1}$ ;  $\sigma_{ref}$  —— 参考温度  $T_{ref}$  时的电导率,  $S \cdot m^{-1}$ ;  $K_1, K_2$  —— 常数;  $S$  —— 固形物含量。

由式(2)可知, 对于番茄汁和橙汁来说, 其电导率随固形物含量的增加而降低。但是, 李修渠等<sup>[10]</sup>在研究豆浆的电导率时发现豆浆的电导率随固形物含量的增大而增大。Palaniappan 和 Sastry<sup>[8]</sup>研究了在磷酸钠溶液中, 对胡萝卜酱进行通电加热时, 电导率随温度的变化情况, 发现颗粒的大小影响电导率, 电导率随颗粒的增大而减小。

### 1. 1. 6 物料的组织结构

Mitchel 和 Aklonis<sup>[14]</sup>测量出具有各向异性的韭葱(Leeks)和胡萝卜(carrot)的电导率明显不同, 如表 1 所示。

Aklonis<sup>[15]</sup>研究发现对所有的具有纤维组织的食品物料, 不论物料各组分的电导率值如何, 物料的电导率在其平行于纤维方向时与垂直于纤维方向时的比值大于 1。原因是物料的纤维方向平行于电场方向时, 离子沿着纤维方向运动的阻力较小, 而物料的纤维方向垂直于电场方向时, 离子沿着纤维方向运动的阻力较大。李修渠<sup>[16]</sup>利用 50 Hz 交流电研究了猪后腿肉和肉糜的电导率随温度的变化规律, 结果显示: 当肉的纤维方向平行于电场方向时, 由于离子沿着纤维方向运动的阻力较小, 其电导率最大, 当肉的纤维方向垂直于电场方向时, 由于肌纤维膜和结缔组织膜的阻碍作用, 离子在肉内的运动阻力增大, 因此肉的电导率最低。对于肉糜, 由于纤维结构的破坏, 离子的运动阻力有所减小, 故电导率介于二者之间。

表 1 韭葱和胡萝卜的电导率比较表

Table 1 Comparison of the electrical conductivity of leeks and carrot

物料	电场方向	电导率实测值/ $mS \cdot cm^{-1}$
韭葱(茎)	垂直于茎轴	0.07
	平行于茎轴	0.32
胡萝卜	垂直于轴线	0.25
	平行于轴线	0.42

### 1. 1. 7 频率和波形

Biss 等<sup>[17]</sup>研究发现在 50 Hz 下所测得的胡萝卜的电导为  $5 \times 10^{-4} S$ , 而在 50 kHz 下测得的值为  $1.1 \times 10^{-2} S$ , 并认为这一研究发现突出了利用通电加热对食品杀菌的重要地位。Lima, Heskitt 和 Sastry<sup>[18]</sup>利用不同频率(4, 10, 25, 60 Hz)和不同波形(方波、正弦波和锯齿波)的电源对萝卜(Turnip Tissue)组织试样进行了通电加热实验, 测定了不通电源条件下萝卜的电导率随温度的变化规律。结果发现对实验所用波形来说, 4 Hz 时的电导率最大, 在频率为 10, 25, 60 Hz 时, 正弦波和锯齿波对电导率的影响不显著; 对方波来说, 频率对电导率的影响不显著; 在频率一定的情况下, 与正弦波和锯齿波相比, 方波的电导率最低; 他们认为这是由于蔬菜组织细胞结构的改变导致了这种结果并需要进一步研究。

### 1. 1. 8 加热速率

李法德等<sup>[4]</sup>研究了不同条件对豆浆电导率的影响, 发现在水浴锅中加热时, 豆浆的电导率随温度的增加而线性增加, 并且豆浆的电导率与加热速率无关。而采用固态继电器控制加热速率的大小时, 发现豆浆的电导率不仅与固形物含量和温度有关, 而且还与豆浆的加热速率有关。由于加热速率不同, 尽管豆浆的固形物含量相同, 但豆浆的电导率是不同的: 随着加热速率的增高, 豆浆的电导率增大。他们分析其原因后认为可能是固态继

电器控制电压时,电压的波形发生了变化。

### 1.1.9 其他因素

通过预处理的方法也可以改变某些食品的电导率,如淀粉的预糊化等。Li<sup>[19]</sup>在对原淀粉与预糊化淀粉的比较中发现生淀粉的电导率均高于预糊化淀粉悬浊液的电导率。这主要是因为生淀粉一般不溶于温度低于50 的水中,因此在糊化前淀粉悬浊液的黏度较低,由于预糊化淀粉悬浊液的黏度增加,阻碍了导电粒子的运动。另外,还发现预糊化淀粉的电导率与温度之间基本为线性关系,电导率在淀粉糊化温度范围内没有再出现降低现象。

## 1.2 食品的电导率对通电加热的影响

### 1.2.1 对产热量的影响

根据焦耳定律,在被加热物料内部任一点的热流密度为

$$q = \sigma(\text{grad}V)^2 \quad (3)$$

式中  $q$ ——某点处的热流密度,  $W \cdot m^{-3}$ ;  $\sigma$ ——某点处的电导率,  $S \cdot m^{-1}$ ;  $\text{grad}V$ ——某点处的电压梯度,  $V \cdot m^{-1}$ 。

由(3)式可知,在电压梯度一定的情况下,  $\sigma$  值越大,该点处的热流密度越大,所产生的热量也越大。

### 1.2.2 对加热速率的影响

物料内部任一点的加热速率为

$$\delta T / \delta t = (\text{grad}V)^2 (\sigma / \rho c_p) \quad (4)$$

式中  $\rho$ ——某点处物料的密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $c_p$ ——某点处物料的比热,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

由(4)式可知,在某点处电压、密度和比热一定的情况下,  $\sigma$  值越大该点的加热速率也越大。但不能简单的认为  $\sigma$  值越大就越有利于通电加热。食品物料中固相、液相的电导率是不同的,为获得无菌优质的产品,必须考虑由于电导率的不同而对通电加热的影响。Akwis<sup>[15]</sup>研究表明,由于受到所加电压和电流的限制,适用于通电加热的电导率要有一定的范围。如果食品物料中各成分的电导率差异太大时,要对加热速率较慢的部分物料彻底杀菌,其他部分就产生局部过热现象,从而影响产品品质。另外,Akwis<sup>[13]</sup>还研究了物料的电导率对加热速率的影响,发现对于电导率低于液体的片状固体,当其最大面垂直于电场时,加热速率高于液体,而平行于电场时,固体的加热速率低于液体;当固体电导率高于液体时,结果相反。Sastry<sup>[20]</sup>在颗粒中插入液晶片,由液晶片颜色的变化得到颗粒温度的变化,验证了固液电导率的不同以及液体黏度对加热的影响。Kim<sup>[21]</sup>等研究了固体含量在40%以上的固液混合物的连续通电加热,发现当颗粒电导率低于液体时,颗粒的加热速率却高于液体,原因是较多颗粒阻挡了电流的通路。

## 2 通电加热在食品工业中的应用

目前,通电加热主要用于液体及固液混合物的杀菌、低酸性方便肉制品、整粒草莓、鱼糜制品、豆腐等的

加工以及肉的解冻等<sup>[7]</sup>。

### 2.1 含颗粒流体食品的通电加热加工

图2所示为APV通电加热系统流程图<sup>[22]</sup>,该系统主要由3部分组成:通电加热器、保温管和冷却管。具有一定黏度、含颗粒的食品经泵进入到通电加热器中,以垂直于电场的方向流过通电加热器,物料在2min内被加热到需要的温度,在该温度保温(30~90)s,达到要求的灭菌强度,然后快速冷却、无菌包装。

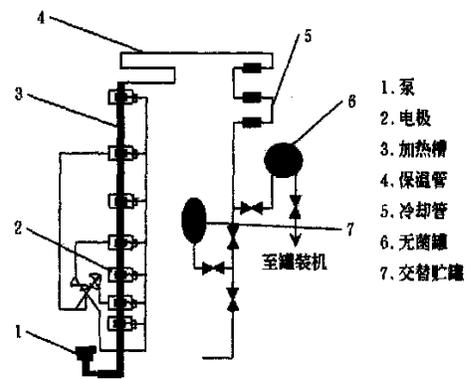


图2 APV 通电加热系统流程图

Fig 2 Flow chart of the process of ohmic heating setup

### 2.2 通电加热在肉制品加工过程中的应用

#### 2.2.1 加热

Kohn<sup>[23]</sup>(1937)设计制造了一种利用通电加热制作火腿肠的装置,利用可移动的长钉状电极直接插入到火腿肠两端使电流通过产生热量;Sturr<sup>[24]</sup>(1959)制造了一类类似的火腿肠加工装置,其中有复杂的步骤使电极与食品良好接触用来减少接触处的破坏。但这两种装置中电极与食品直接接触,对食品破坏严重,且一次只能生产2~4根火腿肠,生产效率低。对火腿肠进行连续加工的第一个试验是20世纪70年代在芬兰设计制造的,但是由于难以控制加工过程中加工条件恒定不变,没有得到广泛应用,在加工过程中对温度的控制是十分重要的,因为物料的电导率随温度的变化而变化<sup>[11]</sup>。一般来说物料的电导率随温度的升高而增大<sup>[25]</sup>。为了制造出一种高效、实用的火腿肠连续加工的通电加热装置,还需对肉的一些物理特性进行进一步的研究。自1997以来,加拿大农业和农产品研究中心对利用通电加热加工火腿肠的连续生产进行了一系列的研究:食品的电导率必须在 $0.1 \sim 10 S/m$ 才能进行良好的通电加热加工,为了保证要求的电导率,可以用食盐对食品进行处理<sup>[26]</sup>,食盐的作用不仅能改善食品的风味,延长保质期,而且适量的食盐还可能提高肉的持水力,提高产品嫩度,通过大量的实验,决定食盐添加量为4%<sup>[27]</sup>。图3为目前实用化的通电加热设备,主要用于加工鱼糜糕、汉堡包等制品<sup>[1]</sup>。

#### 2.2.2 解冻

通电加热解冻与其他解冻方法相比具有一系列的优点,能量利用率高,没用局部过热现象,对物料的形状和大小没有严格要求等。

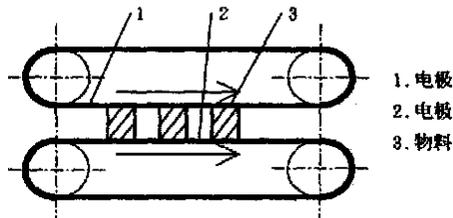


图3 目前实用化的通电加热设备

Fig. 3 Widely-applied ohmic heating setup

一般冷冻食品中并不是所有的水都形成了冰, 仍有5%~10%的水呈液体的形式存在, 由于食品在冻结时的溶质重新分布效应, 使得这部分水以较高浓度溶液的形式存在, 这为通电加热解冻提供了可能性<sup>[5]</sup>。通电加热解冻有两种方式: 一是接触式解冻, 即电极和冷物料直接接触; 二是浸泡式解冻, 即在物料和电极之间有解冻介质。

Fowler<sup>[28]</sup> (1882) 首次研制了用于加工肉和鱼的通电加热装置; Neumann<sup>[29]</sup> (1961) 制造出了用于解冻肉的通电加热装置。上述两种装置均属于直接接触式解冻, 很难保证肉和电极的良好接触, 就会出现电流集中现象, 引起电流集中处的局部过热<sup>[13]</sup>。Neveh<sup>[30]</sup> (1983) 等首次解决了电极与物料的接触问题, 对 $\Phi 17\text{ cm} \times 33\text{ cm}$ 的圆柱形肉块浸在介质中通电加热比在20℃恒温水浴中解冻速率提高了3倍, 质量没有下降, 还节约了操作成本, 减少了污水排量; 李修渠<sup>[31]</sup> (1999) 采用浸泡法对冷冻肉进行通电加热解冻, 建立了通电加热模型, 并且分析了影响肉解冻速率的因素: 浸泡介质的电导率和物料的放置位置, 并预测了冷冻肉在盐水中通电加热解冻速率要比在自来水中大, 肉的最大面平行电场的通电加热解冻速率比垂直电场大。

### 2.3 通电加热应用于淀粉糊化

对于淀粉通电加热发生糊化的研究是多种多样的。Halden等<sup>[11]</sup>研究了在淀粉悬浮液中淀粉和水的比率的问题, 认为最佳比率为1:5。有的研究集中在一些食品组分的影响上, 例如直链淀粉、蛋白质、脂类以及单甘脂等。Akwis<sup>[15]</sup>研究了放置时间和温度的影响, 而文献[6]研究了加热速率、湿度、蔗糖和NaCl对淀粉糊化的影响。Chinachoti在1990年建立了基于水、蔗糖、盐的淀粉糊化模型。动力学和糊化反应速率也有人研究, Wootton和Bamunuarchchi在1978年研究了淀粉加热时水的结合量。Halden等<sup>[11]</sup>通过研究, 报道了土豆淀粉在通电加热中的加热速率, 结果表明淀粉糊化导致加热速率变化。食品的电导率受离子量、水分流动和食品物理结构的严重影响。尽管Wei-Chi Wang<sup>[9]</sup>等提出了利用通电加热过程中淀粉悬浊液电导率的变化来测定淀粉的糊化温度, 但是, 他们并没有明确淀粉糊化温度的确定原则和方法。

在我国, 李里特教授在《食品物性学》中阐述了比较完整的通电加热理论<sup>[3]</sup>。李修渠曾对淀粉通电加热糊化做了初步尝试, 通过试验对糊化焓能量进行了分析<sup>[5]</sup>。

Li等在对淀粉进行通电加热时, 通过对电导率随温度变化的规律进行分析, 首次提出了利用 $d\sigma/dT - T$ 曲线确定淀粉糊化温度的方法<sup>[19]</sup>。为将通电加热测量淀粉糊化特性装置实用化, 从而开发出产品奠定了基础。

### 3 前景与展望

综上所述, 为将通电加热技术实用化, 目前仍有很多课题需要探索。如: 1) 加热速率的控制问题, 在加热过程中, 由于食品物料的电导率随温度发生变化, 如何按照物料的电导率调节通电条件, 控制加热速度, 是急需解决的问题。2) 频率和波形对食品物料电导率的影响机理还有待于进一步深入研究。3) 目前, 对植物性食品的电导率研究较多, 而对动物性食品的电导率研究相对较少。4) 采用固态继电器控制豆浆的加热速率的大小时, 豆浆的电导率随豆浆的加热速率而变化, 其影响机理尚不明确。5) 固形物含量对不同种类食品物料的电导率的影响机理还需进一步研究。6) 适用于通电加热的电导率要有一定的范围, 如何针对不同种类的食品物料, 使其电导率在物料内部均匀一致, 是提高加工品质的关键。7) 在用浸泡式解冻方法解冻肉时, 浸泡介质对解冻效果的影响需进一步研究。

通电加热技术在美国、英国和日本正处于推广应用以及新型设备的开发研究阶段, 在中国只处于起步阶段。但随着三峡水电站的修建, 核电站的逐渐完善和发展, 电能费用的逐渐降低以及人们对高品质食品的需求, 相信, 通电加热技术在中国未来的食品工业中会具有广阔的应用前景。

### [参 考 文 献]

- [1] 李里特 电磁处理技术与食品加工新探索(上)[J] 食品与机械, 1995, 5: 7- 9
- [2] Jones P L, Row ley A T. Dielectric Dryers in Industrial Drying of Foods[M]. Edited by Christopher G. J. Baker, Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman & Hall, 1997, 157.
- [3] 李里特 食品物性学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001年6月第一版
- [4] 李法德 食品物料通电加热及高压电场节能干燥的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2002
- [5] 李修渠 食品物料的电特性及其应用研究[D]. 中国农业大学博士学位论文, 1999
- [6] Sastry S K. Ohmic heating in Process Optimization and Minimal Process of Foods[M]. edited by R. P. Singh and F. A. R. Oliveira, Boca Raton, FL. CRC Press, Inc 1994, 17- 33
- [7] 李修渠 通电加热在食品加工中的应用[J] 食品科技, 2001, 6: 10- 12, 9
- [8] Palaniappan S, Sastry S K. Electrical conductivity of selected solid foods during ohmic heating [J] Food Processing Engineering, 1991(14): 221- 236
- [9] Wang W C, Sastry S K. Starch Gelatinization in Ohmic Heating [J] Journal of Food Engineering, 1997, 34: 25- 242

- [10] 李修渠, 李里特, 辰巳英三 豆浆的电导率[J] 中国农业大学学报, 1999, 4(2): 103- 106
- [11] Halden K, A kwis A A P, Fryer P J. Changes in the electrical conductivity of foods during ohmic heating[J] Int J Food Sci Technol, 1990, 25: 9- 25
- [12] 王维麟 电阻加热之原理及影响因子[J] 食品工业(台湾), 1999
- [13] A kwis A A P, Halden K, Fryer P J. Shape and conductivity effects in the ohmic heating of foods[J] Chemical Engineering Research and Design, 1989(67): 159- 168
- [14] Mitchell F R G, A kwis A A P. Electrical conductivity meter for food samples[J] Journal of Physics.. E: Sci Instrum, 1989, (22): 554- 556
- [15] A kwis A A P, Fryer P J. Operability of the ohmic heating process: electrical conductivity effects [J] Journal of Food Engineering, 1991, 15, 21- 48
- [16] 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.
- [17] Biss C H, Coombes S A, Skudder P J. The development and application of ohmic heating for the continuous heating of particulate foodstuffs [J] Engineering Innovation in the Food Industry (London: IChemE), 1987, 11- 20
- [18] Lima Marybeth, Heskitt B F, Sastry S K. The effect of frequency and wave form on the electrical conductivity-temperature profiles of turnip tissue[J] Journal of Food Process Engineering, 1999, 22: 41- 54
- [19] Li Fade, Li Lite, Li Zaigui, et al Detemination of Starch Gelatinization Temperature by Ohmic Heating[J] Journal of Food Engineering, 2004, 62(2): 113- 120
- [20] Sastry S K, Li Q ing Modeling the ohmic heating of foods[J] Food Processing Engineering, 1996, 50(50): 246- 248
- [21] Kim J, Choi Y M. Volidation of ohmic heating for quality enhancement of food products [J] Food Technology, 1996, 50(5): 253- 574
- [22] David L. Parro t Use of ohmic heating for aseptic processing of food particulate [J] Food Technology, 1992, 46(12): 68272
- [23] Kohn S Frankfurter cooker[P] US Patent 2083 717, 1937.
- [24] SturrM T. Frankfurter cooker[P] US Patent 2 776 358, 1957.
- [25] A kwis, A. A. P. de & Fryer, P. J. The use of direct resistance heating in the food industry [J] Journal of Food Engineering, 1990, (11): 3- 27.
- [26] [http://res2.agr.gc.ca/crda/pubs/art10\\_e.htm](http://res2.agr.gc.ca/crda/pubs/art10_e.htm). Gabriel Piete and Carole Brodeur Ohmic cooking for meat products: The heat is on! 2002
- [27] 龚院生, 卢艳杰, 牛广武, 等 肉制品加工中提高保水率的研究[J] 郑州粮食学院学报, 1995(3): 74- 78
- [28] Fowler A. Apparatus for preserving meats [P] US Patent 3062663, 1882
- [29] Neumann A E. Method of cooking meat products [P] US Patent 3009813, 1961.
- [30] Naveh D, Kopelman I J, Mizrahi S Electroconductive thawing by liquid contact [J] Journal of Food Process Engineering, 1991(14): 221- 236
- [31] 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

## Research advances of application of ohmic heating in food industry

Sun Yuli, Li Fade, Yang Yu'e, Han Yuzhen, Tian Fuyang

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

**Abstract** Ohmic heating is a new technology in food engineering. Electrical conductivity is one of the electrical properties of food. Ohmic heating is an important processing method using the electrical conductivity. The principle and characteristics of the ohmic heating were introduced in this paper. Some factors influencing the electrical conductivity of food were discussed and the effects of electrical conductivity of food on ohmic heating process were expounded. The utilizations of the ohmic heating in sterilization, meat processing and starch gelatinization were also introduced. The future studies of ohmic heating were pointed out.

**Key words:** ohmic heating; electrical conductivity; influencing factors; research advances