

豆浆通电加热过程有限元解析与验证*

熊秀芳¹ 李星恕¹ 郭康权¹ 丰田净彦²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 神户大学自然科学研究科, 神户 657-8501)

【摘要】 在通电加热加工充填豆腐的过程中,豆浆内部的温度分布对豆腐质构均匀性有很大的影响。研究豆浆通电加热过程中内部温度的分布及变化,有利于豆腐加热凝固系统的研发。对通电加热槽内豆浆的连续通电加热过程进行有限元二维模拟,并进行了实验验证。结果表明,通电加热过程中豆浆的电导率与温度之间呈线性关系;升温速率随着温度的增加而增加;豆浆内部温度分布比较均匀,靠近加热槽壁的豆浆温度较低,且随着加热时间从 50 s 增加到 300 s,豆浆的最大温差从 3℃ 增大到 20.2℃。模拟结果和实验结果之间的均方根误差为 1.86%,利用有限元模拟很好地预测了通电加热过程中豆浆内部的温度分布和变化。

关键词: 通电加热 豆浆 有限元模拟 温度分布 电导率

中图分类号: TS214.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)12-0158-06

FEM Analysis and Validation of Ohmic Heating Process of Soymilk

Xiong Xiufang¹ Li Xingshu¹ Guo Kangquan¹ Toyoda Kiyohiko²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Graduate School of Science and Technology, Kobe University, Kobe 657-8501, Japan)

Abstract

In tofu making by ohmic heating, the textural uniformity of tofu is greatly influenced by the temperature distribution in soymilk. A 2-D static model was developed to visualize the change of temperature distribution in soymilk during ohmic heating process. Experimental validation of the temperature distribution obtained by mathematical modeling was performed by temperature measurement. Electrical conductivity of soymilk was correlated with temperature, uniform distribution of temperature can be obtained and heating rate is increased with the temperature. During ohmic heating process from 50 s to 300 s, the maximum temperature difference in soymilk greatly increased from 3℃ to 20.2℃. Root mean square error between experimental and simulated data was 1.86%, which indicated that numerical simulation was effective in predicting temperature distribution during ohmic heating process.

Key words Ohmic heating, Soymilk, Finite element simulation, Temperature distribution, Conductivity

引言

近年来,随着人们对大豆食品的营养及保健功能的认识,豆制品加工业尤其是豆腐制造业发展迅速^[1]。传统豆腐加工的工艺流程为:选豆、浸泡、磨浆、过滤、煮浆、添加凝固剂、加热凝固、挤水成形和分装。现代生产中豆浆的加热是豆腐加工的重要工

序之一。

充填豆腐是在豆浆中加入凝固剂,搅拌混合后充填至包装容器中,通过水浴加热凝固成豆腐。但水浴加热是利用热传导对豆浆进行加热,容器中豆浆内部温度分布不均匀,影响豆腐质构的均匀性。通电加热,也称为欧姆加热,是利用物料在导电时的焦耳效应在内部产生热量而达到加热的目的,具有

收稿日期: 2011-06-28 修回日期: 2011-08-03

* 国际交流合作中日据点大学项目(08080704)

作者简介: 熊秀芳,博士生,主要从事农产品贮藏与加工研究,E-mail: xiufang-xiong@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 郭康权,教授,博士生导师,主要从事植物材料压缩成型、农产资源综合利用研究,E-mail: jdkgq@nwsuaf.edu.cn

升温速率快、加热均匀、能精确控制加热温度等优点^[2],为充填豆腐加工提供了一种全新的加热方法^[3]。

豆浆温度分布的均匀性直接影响豆腐的品质^[3],在充填豆腐通电加热过程中,经常有加热槽壁附近豆浆温度过低,豆浆不能凝固的现象,因此对豆浆内部温度场的检测能为豆腐通电加热凝固系统的开发提供参考。

本文利用有限元数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 建立豆浆连续通电加热模型,充分考虑加热槽和周围环境间的热损失,研究通电加热过程中加热槽内豆浆的温度分布和变化,并进行实验验证。

1 实验材料、装置和方法

1.1 实验材料

大豆：陕豆 125；水：蒸馏水；葡萄糖酸内酯（GDL）。

1.2 实验装置

实验装置由通电加热系统和数据采集系统组成,如图 1 所示。

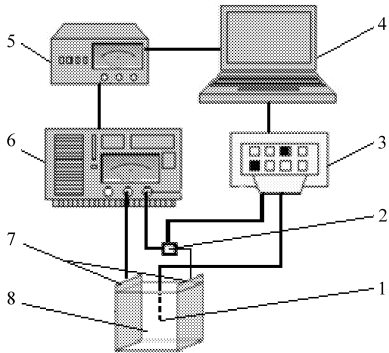


图 1 通电加热实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

1. 热电偶 2. 电流传感器 3. 数据采集器 4. 计算机 5. 信号发生器 6. 双极放大器 7. 电极 8. 加热槽

通电加热系统包括：信号发生器（WF1943 型，日本 NF 公司）、双极性放大器（HSA4012 型，日本 NF 公司）、通电加热槽和计算机等。加热槽用壁厚为 5 mm 的耐热有机玻璃制成,装入厚度为 0.5 mm 的钛钢平行电极后内部尺寸为 50 mm × 50 mm × 50 mm。槽盖也由耐热有机玻璃制成,为了防止加热槽上盖热损失,槽盖内壁贴上一层保温泡沫板。

数据采集系统包括：计算机、数据采集器（34970A 型，Agilent Technologies Inc.）、T 型热电偶和电流传感器（JCS30 型，成都晶峰电子有限公司）。数据采集器可以连续检测豆浆内部的温度并传输到计算机中储存。同时通电加热实验过程中的电流用

数据采集器实时测量并存入计算机。

1.3 实验方法

(1) 豆浆制备

精选大豆 100 g,用蒸馏水冲洗 3 次后沥干,按蒸馏水与干大豆的质量比为 6 加入 600 g 蒸馏水,在室温（25℃）下浸泡 12 h。浸泡结束后,将剩余的蒸馏水倒出、大豆沥干。磨浆时先把膨胀的大豆倒入磨浆机的料斗中,然后把剩余的蒸馏水连续均匀地添加到大豆中研磨。研磨第 1 遍时加入剩余蒸馏水的 1/2,其余 1/2 蒸馏水与第 1 遍的豆渣混合后研磨第 2 遍。把第 1 遍豆浆和第 2 遍豆浆混合后用 120 目的尼龙网过滤,得到生豆浆。用通电加热系统加热生豆浆至 95℃并保持 5 min,得到豆浆。将豆浆倒入不锈钢桶中,并把钢桶放入冰水中冷却,最后把盛有豆浆的钢桶放入 4℃的冰箱中备用。

采用直接干燥法（GB 5009. 3—2010）测得豆浆的固形物质量分数为 11.2%,豆浆的 pH 值为 6.51。

(2) 豆浆通电加热

通电加热实验前,将 99 mL 的豆浆溶液慢慢注入加热槽中,再注入 1 mL 新鲜的 GDL 溶液并搅拌均匀,最终的 GDL 质量分数为 0.25%,加热槽内豆浆液面高度为 40 mm。

通电加热时,由于加热时间短,加热槽放在保温泡沫板上,顶部槽盖内壁贴有保温泡沫板,因此槽盖对豆浆的吸热和槽底对周围环境的散热可以忽略不计,仅考虑加热槽四侧壁和底部对豆浆的吸热造成豆浆的热损失。实验时选取通过加热槽中心、且垂直于加热槽两电极的竖直平面内的 5 个点作为测试点,如图 2 所示,具体位置如表 1 所示。其中,TC3 为加热槽中心点。将 5 个顶端具有聚四氟乙烯涂层的电绝缘 T 型极细热电偶从槽盖上的 3 个螺纹孔插入,并保证热电偶线一定要垂直于槽盖。

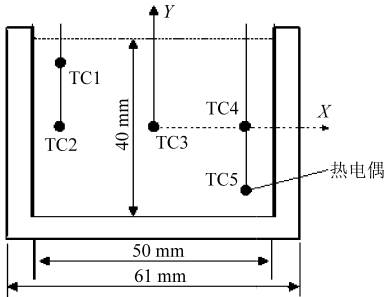


图 2 平面内 5 个热电偶位置

Fig. 2 Thermocouple locations at X - Y plane inside the heating cell

通电加热实验时,计算机控制信号发生器产生有效值 2 V、频率 1 kHz 的正弦波,产生的正弦波电信号通过双极性放大器放大,输出有效值为 50 V,频率为 1 kHz 的电压,作为通电加热的电源。电极

板之间的距离为 50 mm,加热时的电场强度为 10 V/cm。实验时,同时启动通电加热系统和数据采集系统(数据采集系统采样时间间隔 10 s),每一实验重复 3 次,取平均值。

表 1 热电偶位置

Tab. 1 Coordinates of thermocouple location mm

坐标位置	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5
X	-21.5	-21.5	0	21.5	21.5
Y	16.5	0	0	0	-16.5

2 数学模型的建立及验证

为了简化数学模型,作以下假设^[4]:① 豆浆各向同性,其热传导率、密度、比热容等物性值在研究的温度范围内为一恒值。加热过程中加热槽外壁与外部环境间的传热系数恒定。② 加热槽槽盖对豆浆的吸热和底面向外部环境的散热对豆浆温度的影响忽略不计。

2.1 控制方程

通电加热过程中豆浆内部温度由电流产生的热量和热传导综合决定,可以用经典的非稳态热传导方程表示为^[5-6]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \tag{1}$$

式中 ρ ——密度,kg/m³ t ——加热时间,s
 c_p ——比热容,J/(kg·K)
 ∇ ——拉普拉斯算子
 k ——热传导率,W/(m·K)
 T ——物料温度,K
 Q ——豆浆的内源热即电流产生的热量

内热源与电导率和通电加热电场强度的平方呈正比,即

$$Q = \sigma |\nabla V|^2 \tag{2}$$

式中 σ ——物料电导率,S/m
 $|\nabla V|$ ——电场强度
电场分布由拉普拉斯方程求解

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \tag{3}$$

式中 V ——通电电压,V

2.2 有限元解析几何模型

实验时加热槽内豆浆液面高度为 40 mm,考虑到电极和加热槽的尺寸,所以整个有限元解析域包括通电加热电极 a 和 b、加热槽 c 和豆浆溶液 d,如图 3 所示。三角形单元网格划分后的有限元网格模型的单元总数为 3 287,节点数为 1 685,具有 13 312 个自由度。

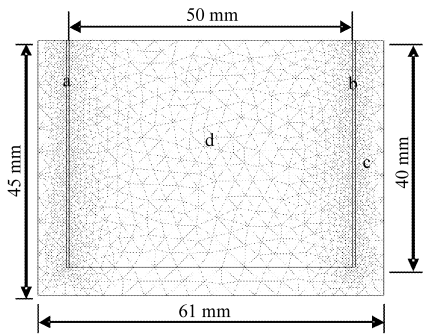


图 3 有限元解析领域及网格划分
Fig. 3 Domain of FEM analysis and grid mesh

2.3 物料特性值

计算时要用到解析领域内豆浆、钛钢电极和树脂玻璃加热槽的物性值。

- (1) 豆浆密度为 1 002 kg/m³,热传导率为 0.6 W/(m·K),比热容为 4 200 J/(kg·K)。
- (2) 树脂玻璃加热槽密度为 1 190 kg/m³,热传导率为 0.19 W/(m·K),比热容为 1 460 J/(kg·K)。
- (3) 钛钢电极密度为 4 505 kg/m³,热传导率为 21.9 W/(m·K),比热容为 522 J/(kg·K)。

2.4 豆浆的电导率

影响豆浆通电加热温度的关键物性值是电导率,而电导率为温度的函数^[7]。电导率的计算式为

$$\sigma = \frac{I}{V} \frac{L}{S} \tag{4}$$

式中 I ——电流,A
 S ——电极板与豆浆的接触面积,m²
 L ——电极间距离,m

通电加热过程中,利用电流传感器测得电流和双极性放大器输出电压求出不同温度下的电导率。图 4 为豆浆电导率随温度的变化曲线。电导率与温度呈线性关系,其关系式为

$$\sigma = 0.525 [1 + 0.018 (T - 293.15)] \quad (R = 0.999) \tag{5}$$

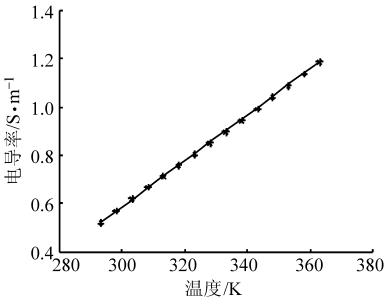


图 4 豆浆电导率随温度的变化关系
Fig. 4 Relationship between temperature and electrical conductivity of soymilk

2.5 边界条件

通电加热时,忽略加热槽垂直方向槽盖和底面

热散失,考虑加热槽水平方向与外部环境之间的热交换,其边界条件为

$$\boldsymbol{n}(k \nabla T) = h(T_{\text{inf}} - T) \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{n}$ ——温度梯度方向

h ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

T_{inf} ——环境温度

由于加热槽和周围环境之间以自然对流方式进行热交换,可以用下面的无量纲参数来求出传热系数^[5]

$$Gr = \frac{d_c \rho^2 g \beta (T_w - T_{\text{inf}})}{\mu^2} \tag{7}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \tag{8}$$

$$Ra = Gr Pr \tag{9}$$

$$Nu = 0.54 Ra^{\frac{1}{4}} \tag{10}$$

式中 Gr ——格拉斯霍夫数 Pr ——普朗特数

Ra ——瑞利数 Nu ——努塞尔特数

d_c ——加热槽特征尺寸, m

g ——重力加速度, 9.8 m/s^2

β ——体积膨胀系数, K^{-1}

T_w ——加热槽壁温度, K

μ ——粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

加热槽特征尺寸为

$$d_c = \frac{A}{P} = \frac{0.05^2}{0.05 \times 4} = 0.0125 \text{ m} \tag{11}$$

式中 A ——传热面积, m^2

P ——传热面周长, m

实验定性温度取为 40°C ,此定性温度下空气的物性值为^[8]

$$\rho_a = 1.092 \text{ kg/m}^3 \tag{12}$$

$$\beta_a = 3.20 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \tag{13}$$

$$c_{pa} = 1014 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \tag{14}$$

$$k_a = 0.0265 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \tag{15}$$

$$\mu_a = 1.9123 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \tag{16}$$

利用努塞尔特数可计算出传热系数为

$$h_a = \frac{Nu k}{d_c} \tag{17}$$

电场边界条件:模型中 a 电极加载 50 V , b 电极设置为接地;模型的其他外表面设置为绝缘。

2.6 模型验证

用热电偶在 5 个不同位置测得的温度对数学模型进行验证。测量值和模拟值之间均方根误差 (RMSE) 为

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n \left(\frac{T_e - T_s}{T_e} \right)^2}{n}} \times 100\% \tag{18}$$

式中 T_e ——测量值, K T_s ——温度模拟值, K
 N ——测量个数

用 e_{RMSE} 来评定有限元模拟的正确性。当 $e_{\text{RMSE}} < 10\%$ 时,认为数学模型是正确的^[9]。

3 结果分析与讨论

3.1 温度分布

通电加热 50、100、200、300 s 后加热槽内有限元解析的温度分布如图 5 所示。

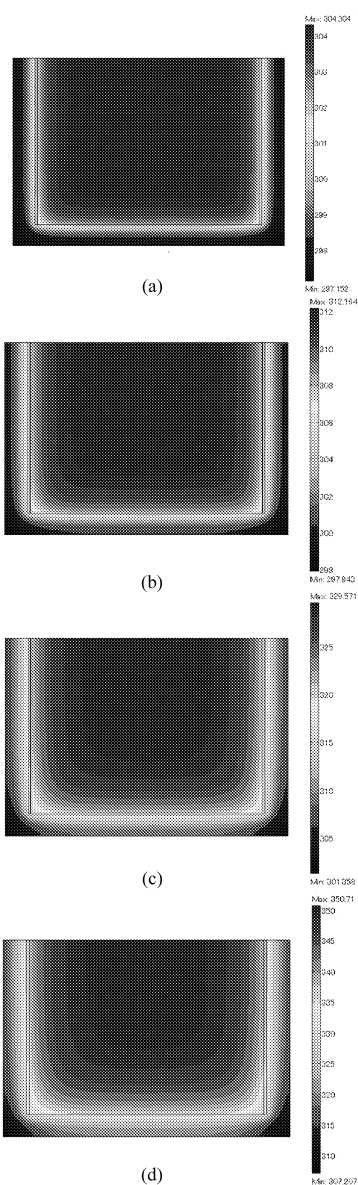


图 5 加热不同时间时解析域内温度分布
Fig.5 Temperature distribution within the computational domain
(a) 50 s (b) 100 s (c) 200 s (d) 300 s

有限元模拟时豆浆的初始温度为 297.5 K ,通电加热电场强度为 10 V/cm ,外部温度为 297.5 K ,加热槽水平方向与外部环境之间的传热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

由图 5 可以看出:①在整个加热过程中加热槽内温度分布大致以加热槽中心对称,豆浆溶液的温度随着加热时间的增加而升高,且整体分布比较均匀。②加热槽中心处温度最高,在 300 s 的加热时间内从 297.5 K 上升到 350.7 K。③靠近加热槽壁的豆浆温度较低,并且随加热时间的增加低温范围逐渐增大。这主要是由于加热槽壁对豆浆吸热造成的,且时间越长吸热越多。④加热槽内豆浆的最大温差随着加热时间的增加而增大。加热 50 s 时最大温差为 3℃;加热 100 s 时最大温差为 6℃;加热 200 s 时最大温差为 12.5℃;加热 300 s 时最大温差为 20.2℃。主要原因是随着加热温度的升高,加热槽吸收豆浆更多热量使温度升高,同时对周围环境的热散失也在增加。⑤在整个通电加热过程中,冷点一直位于加热槽的底角,这是因为底角处有壁面和底面同时吸收豆浆的热量,热损失较大。

为了说明加热槽吸热使自身温度升高对豆浆温度分布的影响,模拟了假定加热槽外壁热绝缘时通电加热 300 s 后槽内温度分布,如图 6 所示。

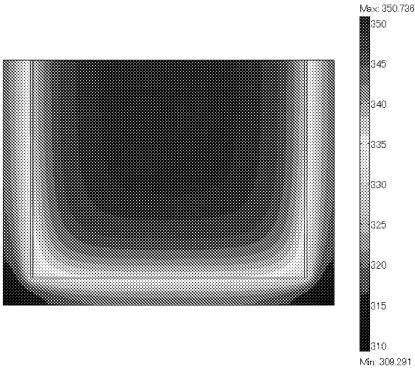


图 6 加热 300 s 时的解析域内温度分布
(热边界条件为热绝缘)

Fig. 6 Temperature distribution after 300 s ohmic heating when $h = 0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

比较图 6 和图 5d 可以看出,两种情况下加热槽内的温度分布是一致的,槽内最高温度和最低温度也几乎相等。模拟结果说明,当通电加热时间较短时,与加热槽对外部环境的散热相比,加热槽吸热使自身温度升高对豆浆的温度分布均匀性影响更大。

3.2 通电加热过程中豆浆温度的变化

为了进一步研究通电加热过程中豆浆的温度分布和升温速率的变化情况,选取加热槽 X 轴方向豆浆解析域截线,分析其上的温度分布和温度随通电时间的变化。

通电加热过程中每加热 20 s 豆浆解析域 X 轴截线温度分布如图 7 所示。

从图中可以看出:①槽内豆浆温度大于初始温度 297.5 K 时,槽壁附近温度就低于中间温度。且

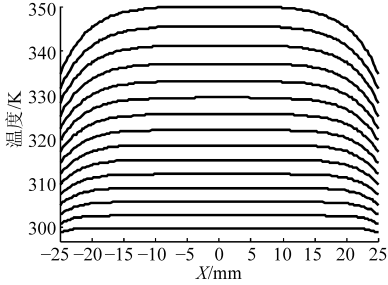


图 7 加热槽 X 轴截线温度分布

Fig. 7 Temperature distribution along the X coordinate within the soymilk domain

随着加热时间的增加,加热槽内壁附近豆浆温度与中间温度的差值越来越大,这是由于加热槽壁吸热使自己温度升高,同时向外部环境散热。②随着加热时间的增加,相邻温度分布线的间距也越来越大,即豆浆在通电加热过程中的升温速率在逐渐增大。其原因是通电加热过程中,在施加相同电压下,豆浆单位体积单位时间所产生的热量是与豆浆的电导率 σ 呈正比的。随着加热时间的增加,温度在升高,而豆浆的电导率随着温度的增加在增大,因而豆浆的升温速率是随着加热时间的增加而增加的。

3.3 实验结果和解析结果的比较

为了验证有限元模拟的准确性,本研究选取了 5 个有代表性的温度采集点(图 2),用热电偶记录其温度变化,并与解析结果进行比较。实验验证时首先将豆浆加热到 297.5 K,与有限元模拟的初始温度一致,再开始记录时间和温度。5 个点的实验值和模拟值的比较结果如图 8 所示。

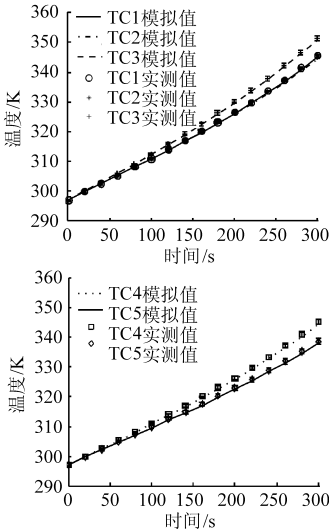


图 8 实验温度和模拟温度比较

Fig. 8 Comparison of experimental and simulated results

通电加热 300 s 后,TC1、TC2 和 TC4 的温度均为 345 K,TC3 的温度为 350 K,TC5 的温度为 340 K。TC3 温度最高是因为它处在加热槽中心位置,不与外界发生热交换。TC2、TC4 温度一致是因为其位

置对称,分别与左、右槽壁发生热交换。TC1 与 TC2、TC4 温度一致是由于加热槽顶部有保温泡沫板,与 TC2、TC4 一样,只与槽壁发生热交换,故而它们温度一致。而 TC5 处于加热槽底角处,不仅与加热槽壁发生热交换,同时加热槽底面还吸热,因此 TC5 温度最低。

由图 8 可以看出,模拟预测的温度分布趋势与实验结果基本符合,TC5 点的预测结果与实验结果相差最大,为 2.2 K,其余 4 点温差较小,均小于 2.0 K。实验结果和模拟结果间的均方根误差为 $1.86\% < 10\%$ 在允许的误差范围内,因此用有限元法模拟豆浆在通电加热过程中的温度分布和变化情况是充分有效的。

4 结论

(1) 用有限元法对通电加热过程中豆浆内部温度的分布和变化进行了模拟,在通电加热过程中其内部的温度分布比较均匀,但加热槽壁附近一直是其低温区,且随着加热时间的增加,低温区范围增加,豆浆内最大温差也会增加。

(2) 模拟结果说明,当通电加热时间较短时,与加热槽对外部环境的散热相比,加热槽的吸热对豆浆的温度分布均匀性影响更大。

(3) 对模拟结果进行了实验验证。在通电加热过程中,模拟结果和实验结果基本一致。

参 考 文 献

- 1 Berk Z. Technology of production of edible flours and protein products from soybeans [R]. FAO Agricultural Services Bulletin No. 97, Chapter 9, 1992.
- 2 周亚军,殷涌光,王淑杰,等. 食品欧姆加热技术的原理及研究进展[J]. 吉林大学学报:工学版, 2004, 34(2): 324~329.
Zhou Yajun, Yin Yongguang, Wang Shujie, et al. Mechanism and research progress of food ohmic heating technology [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2004, 34(2): 324~329. (in Chinese)
- 3 Li Xingshu. Development of tofu processing system by the application of electrical impedance spectroscopy and ohmic heating [D]. Kobe: Kobe University, 2009.
- 4 長縄明大,三保茂之,秋山美展ら. ジュール加熱現象の可視化と有限要素解析[J]. 日本食品工学会誌, 2006, 7(2): 105~111.
Naganawa A, Miho S, Akiyama Y. Validation and FEM analysis of joule heating system [J]. Journal of Japanese Society of Food Science and Technology, 2006, 7(2): 105~111. (in Japanese)
- 5 Toyoda K, Li Xingshu. Monitoring of coagulation process of soymilk by an integrated electrical sensing and control system [M]. CIGR XVIIth World Congress, Québec City, Canada, 2010: 1~10.
- 6 Jaeger H, Meneses N, Knorr D. Impact of PEF treatment inhomogeneity such as electric field distribution, flow characteristic and temperature effects on the inactivation of E. coli and milk alkaline phosphatase [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(4): 470~480.
- 7 李修渠,李里特,辰巳英三. 豆浆的导电率[J]. 中国农业大学学报, 1999, 4(2): 103~106.
Li Xiuqu, Li Lite, Eizo Tatsumi. Study on electrical conductivity of soybean milk [J]. Journal of China Agricultural University, 1999, 4(2): 103~106. (in Chinese)
- 8 Singh P, Heldman D R. Introduction to food engineering [M]. London: Academic Press, 2001: 10~128.
- 9 李法德,孙玉利,李陆星. 连续通电加热条件下豆浆的电导率[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 275~278.
Li Fade, Sun Yuli, Li Luxing. Electrical conductivity of soybean milk during cooking with continuous ohmic heating device [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 275~278. (in Chinese)

(上接第 157 页)

- 12 Williams P C, Sobering D C. Comparison of commercial near infrared transmittance and reflectance instruments for analysis of whole grains and seeds [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 1993, 1(1): 25~32.
- 13 严衍禄,赵龙莲,韩东海,等. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2005.
- 14 Norgaard L, Saudland A, Wagner J, et al. Interval partial least-squares regression (iPLS): a comparative chemometric study with an example from near-infrared spectroscopy [J]. Applied Spectroscopy, 2000, 54(3): 413~419.
- 15 邹小波,朱曾,赵杰文. 基于间隔偏最小二乘法的农产品近红外光谱谱区选择方法[J]. 现代科学仪器, 2007(1): 86~88.
Zou Xiaobo, Zhu Zeng, Zhao Jiewen. Selection of the efficient wavelength regions in agricultural product NIR spectroscopy based on interval partial least-squares (iPLS) [J]. Modern Scientific Instruments, 2007(1): 86~88. (in Chinese)
- 16 Leardi R. Application of genetic algorithm—PLS for feature selection in spectral data sets [J]. Journal of Chemometrics, 2000, 14(5~6): 643~655.