

## 连续通电加热条件下豆浆的电导率

李法德<sup>1</sup>, 孙玉利<sup>2</sup>, 李陆星<sup>3</sup>

(1. 山东农业大学 机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

3. 济宁职业技术学院机电工程系, 济宁 272037)

**摘要:** 利用连续式通电加热装置研究了固形物含量为 6.01% 的豆浆在流动状态下 (流量为  $(75 \pm 0.5)$  kg/h) 电导率随温度的变化规律, 并与静态通电加热进行对比。试验结果表明: 在流动状态下豆浆的电导率与温度也呈线性关系, 但相同温度下, 利用连续通电加热装置测得的流动豆浆的电导率低于利用静态通电加热装置测得的豆浆的电导率。经观察发现, 其主要原因是连续通电加热过程中, 豆浆在电极板上形成了污垢层, 增加了通电加热的电阻, 但豆浆在电极板上形成污垢层的原因有待于进一步研究。

**关键词:** 豆浆, 连续通电加热, 电导率, 污垢

**中图分类号:** TS205

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1002-6819(2008)-12-0275-04

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 with English abstract)

### 0 引言

煮浆是传统豆制品加工的主要工序之一, 目前一般采用高温水蒸气直接注入的煮浆方法, 在煮浆过程中, 豆浆的固形物含量随蒸汽注入量而变化。若采用热交换器加热, 豆浆中的蛋白质和一些矿物离子在加热过程中极易在换热器表面上形成污垢层, 这不仅减少对流传热系数、增加流动阻力与产品损失, 也增加清洗费用和环境负担<sup>[1]</sup>, 而且还会影响豆浆特有的香味。尽管人们可以通过优化设计间壁式换热器的几何形状和改进液体的流动通道来降低加热过程中换热器表面的污染程度, 但换热器表面污染与结垢仍然是使用间壁式换热器的最大制约因素<sup>[2-5]</sup>。另外, 无论采用蒸汽注入法还是采用热交换器, 都需要产生高温蒸汽的锅炉设备, 由此增加了设备投资和维护费用。因此, 开发高效、低能耗、无传热面的连续热处理新技术和设备一直是商业界和科学界最为关注的热点。由于通电加热 (Ohmic Heating) 技术具有升温速率快、加热均匀、能精确控制加热温度等特点, 被认为是食品加工操作过程中最具有发展潜力的热处理技术之一<sup>[6,7]</sup>, 它也为传统豆制品加工提供了一种全新的加热方法。

通电加热的基本原理是利用食品物料在导电时的焦耳效应在内部产生热量而达到加热目的的。物料内部的产热量和升温速率不仅与施加电压的大小等参数有关, 而且还取决于物料电导率的大小<sup>[8]</sup>。为更好地将通电加热技术应用于豆制品加工, Kim 和 Pyun 利用不同频率 (500 Hz~10 kHz) 的正弦波和方波电源, 研究了大豆中可溶性组分在通电加热过程中的扩散情况, 结果发现 1000 Hz 的正弦波电源更有利于豆浆的提取<sup>[9]</sup>。植村邦彦等发现水分含量为 49.5% 的豆酱的电导率与温度成线性关系<sup>[10]</sup>。李修渠等研究发现, 豆浆的电导率随豆浆中固形物含量的增加而线性增加, 并且不受电场强度的影响<sup>[11,12]</sup>。李法德等比较了不同加热条件 (水浴锅加热和通电加热) 对豆浆电导率的影响, 结果发现: 水浴锅加热时, 豆浆的电导率不受加热速

率的影响, 但通电加热并采用固态继电器控制加热速率时, 豆浆的电导率随加热速率的不同而不同, 并指出其原因是电源的波形发生了变化<sup>[13]</sup>。

到目前为止, 前人主要是利用静态通电加热装置研究了豆浆的电导率随温度的变化规律及影响因素<sup>[11-13]</sup>, 但没有研究豆浆在连续通电加热条件下流动过程中电导率随温度的变化规律。因此本文的目的就是利用自行设计的连续通电加热装置, 研究豆浆在流动过程中进行通电加热时电导率随温度的变化规律, 以便为该技术的应用奠定基础。

### 1 材料和方法

#### 1.1 试验装置

连续通电加热装置的加热室用聚丙烯 (PPR) 管制成, 在加热室内, 用 7 块开孔的不锈钢极板 (极板的有效面积为  $4.028 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ) 分隔形成 6 个小加热室 (如图 1 所示)。为了保证每个小加热室的负载基本相同, 加热室的长度沿物料入口方向逐渐增大。另外, 为了保证豆浆在流动过程中的湍流状态, 不锈钢极板的开孔采用错排方式。数据采集系统主要由电流传感器 (JCS30, 成都晶峰电子有限公司)、标定后的 T 型热电偶和数据采集器 (34970A Agilent Technologies, Inc.) 等组成。

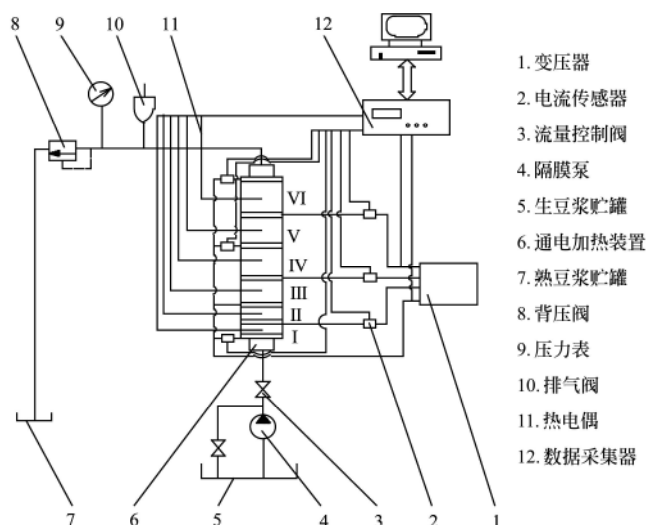


图1 连续通电加热试验装置

Fig.1 Experimental setup for continuous ohmic heating

收稿日期: 2006-03-20 修订日期: 2008-10-28

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: 李法德 (1962—), 男, 山东潍坊人, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要从事食品物料电特性、食品加工新技术方面的研究。山东省泰安市岱宗大街 61 号 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018。

Email: li\_fade@yahoo.com.cn

连续通电加热过程中, 豆浆的温度在加热室内沿加热室的长度方向是变化的。为了测量加热室内豆浆的温度变化, 在每个小加热室轴线的中点安装一个 T 型热电偶。在本研究中由于每个小加热室的长度较小 (0.05~0.122 m), 故以每个小加热室轴线中点的温度作为该加热室内豆浆的平均温度。

静态通电加热试验采用与文献[13]同样的试验装置, 并以加热槽内豆浆的平均温度作为计算温度。

## 1.2 试验方法

### 1.3.1 豆浆的制备

将除去异物和没有破碎、虫咬、变质籽粒的大豆 (济南黄大豆) 4 kg, 用自来水冲洗 3 次后沥干, 按干大豆与自来水的重量比 1:3 加入 12 kg 自来水 (20.2℃时, 电导率为 995  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), 放入容积为 40 L 的不锈钢桶中浸泡 14 h (冬季, 室温 16℃左右) 左右。浸泡结束后, 用自来水清洗三遍, 沥干, 用天平 (TC-6K,  $d=0.1\text{ g}$ , 美国双杰兄弟 (集团) 有限公司) 称量吸湿后的大豆质量 (吸水量约 1:1.3)。磨浆时, 自来水从高位槽中连续流入磨浆机 (FDM-Z 型, 上海迅帆电器厂) 的料斗中 (按浸泡前干大豆质量与自来水的重量比 1:12 加入自来水)。研磨第一遍时加入总水量的 1/2, 其余 1/2 自来水与第一遍的豆渣混合后研磨第二遍。把第一遍豆浆与第二遍豆浆混合后用 100 目的尼龙网过滤, 用塑料薄膜覆盖住盛有豆浆的塑料桶并放入 4℃的冰箱中备用。

豆浆中固形物含量采用常压干燥法 (GB/T14769-93) 测量。取 3 个试样的平均值作为豆浆的固形物含量, 本研究中豆浆的固形物含量为 6.01%。

### 1.3.2 通电加热试验

按图 1 连接试验装置, 并把每个小加热室按 Y 形接法接入经变压器输出的 50 Hz、240 V 的交流电, 此时加热室所对应的电场强度在 19.7~48 V/cm 之间。启动隔膜泵, 通过流量控制阀 3 和背压阀 8 调整系统内豆浆的流量和出口压力。待豆浆流量 ( $75 \pm 0.5\text{ kg/h}$ ) 稳定后, 启动数据采集系统, 打开电源。试验过程中的电流、电压和温度等用数据采集器采集并存入计算机, 数据采样时间间隔为 5 s。试验重复两次, 取平均值。

静态通电加热时, 把加热槽接入 50 Hz、240 V 的交流电, 此时所对应的电场强度为 12.6 V/cm, 按文献[13]试验方法中的“等电压条件下豆浆电导率的变化”进行操作, 每次试验加入加热槽豆浆的质量为 3 kg, 此时极板的有效面积为 0.016  $\text{m}^2$ 。试验重复两次, 取平均值。

根据试验过程中测得的电压和电流值, 按公式 (1) 计算豆浆的电导率:

$$\sigma = \frac{IL}{UF} \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——物料的电导率, S/m;  $L$ ——加热室内两电极之间的距离, m;  $I$ ——通电加热时的电流, A;  $U$ ——通电加热时的电压, V;  $F$ ——极板与物料之间的有效接触面积,  $\text{m}^2$ 。

在本研究中分析豆浆的电导率随温度的变化规律时, 以加热室和加热槽内豆浆的平均温度计算。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 通电加热过程中豆浆平均温度的变化

图 2 显示了静态通电加热和连续通电加热时豆浆的平均温度随时间的变化规律。从图中可以看出, 静态通电加热时, 豆浆的温度随时间呈指数变化, 这与前人的研究结果是一致的<sup>[3]</sup>。而豆浆在连续通电加热时, 尽管豆浆是流动的, 但经过较短的时间后, 每一小加热室内豆浆的平均温度基本达到稳定状态, 这一结果与作者对自来水进行连续通电加热时的结果是一致

的<sup>[6]</sup>, 并且, 整个连续通电加热系统内豆浆的温度自下而上按加热室分段均匀上升, 每经过一个加热室, 豆浆的平均温度约上升 11~14℃, 到第 VI 加热室达到所需温度 (约 98℃) 后流入熟豆浆贮罐中。从图 2 中还可以看出: 在试验条件下, 豆浆在连续通电加热装置中仅需 5 min 即可达到所要求的最终温度, 而静态通电加热装置所需的加热时间大于 8 min, 即静态通电加热时豆浆的加热速度低于连续通电加热时的加热速度, 这主要是由电场强度不同而造成的, 电场强度越大, 加热速率越高<sup>[11]</sup>。在本研究中, 静态通电加热时的场强 (12.6 V/cm) 低于连续通电加热系统中各加热室的电场强度 (19.7~48 V/cm)。

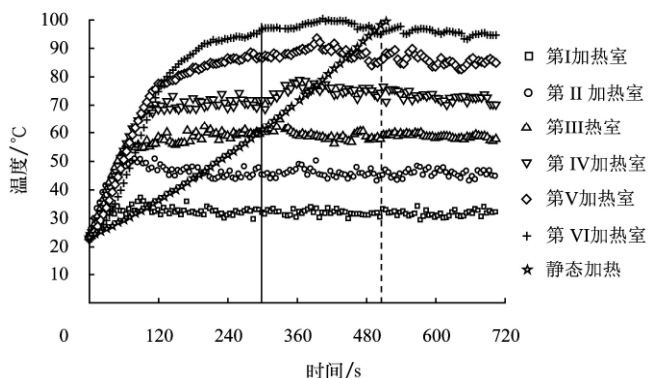


图 2 豆浆平均温度随时间的变化

Fig.2 Changes of mean temperature of soybean milk with heating time

### 3.2 豆浆电导率的变化

图 3 显示了豆浆在静态通电加热装置中进行通电加热时测得的电导率随豆浆平均温度的变化规律。从图中可以看出: 豆浆的电导率与温度呈直线关系 ( $R^2=0.998$ ), 这与前人的研究结果是一致的<sup>[10-12]</sup>, 其拟和关系式如下:

$$\sigma = 0.107 + 0.0076T \quad (2)$$

式中  $\sigma$ ——物料的电导率, S/m;  $T$ ——豆浆的平均温度, ℃。

图 3 也同时显示了相同固形物含量的豆浆在连续通电加热系统中进行通电加热时, 当系统达到稳定状态后, 豆浆的电导率随温度的变化规律。从图中可以看出, 连续通电加热条件下, 豆浆的电导率与加热温度仍然呈线性关系 ( $R^2=0.874$ ), 其拟和关系式为:

$$\sigma = 0.084 + 0.0036T \quad (3)$$

式中  $\sigma$ ——物料的电导率, S/m;  $T$ ——豆浆的平均温度, ℃。

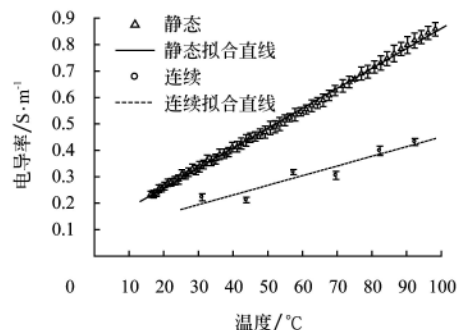


图 3 豆浆电导率随温度的变化

Fig.3 Changes of conductivity of soybean milk with temperature

然而, 从图 3 中还可以看出, 利用连续式通电加热装置和静态通电加热装置所测得的电导率随温度的变化规律是不同的, 即在相同温度下, 利用连续通电加热装置测得的电导率低于利用静态通电加热装置测得的电导率。但当利用连续通电加

热装置和静态通电加热装置分别对自来水进行通电加热时, 测得的电导率随温度的变化规律是一致的, 两者没有显著差异<sup>[14]</sup>。在本研究中, 虽然连续通电加热与静态通电加热采用的电场强度不同, 但根据前人的研究结果, 电场强度的大小对豆浆的电导率随温度的变化规律没有影响<sup>[10-12]</sup>。因此, 出现上述差异必定另有原因。

图 4 显示了第 VI 加热室上极板表面的污染情况, 从照片可以看出, 豆浆在极板的表面上形成了黏附层。但是, 在静态加热过程中, 极板上并没有形成黏附层。

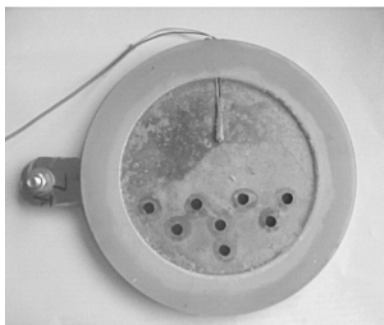


图 4 第 VI 加热室上极板表面污染  
Fig.4 Fouling occurred on the surface of electrode in the VI heating chamber

许多研究者认为由于通电加热不存在换热面而可以减轻极板的污染<sup>[15,16]</sup>, 但 Zitny 认为: 在连续式通电加热装置中, 电极附近物料的过热是引起电极污染的主要原因<sup>\*</sup>。另外, 过高的电流密度将会对通电加热产生不利影响, 如电极的腐蚀等<sup>[17]</sup>。

图 5 显示了静态和连续通电加热过程中电流随时间的变化规律。从图中可以看出, 静态通电加热时, 电流值随加热时间的增加而逐渐增加, 这是由豆浆的电导率随着温度升高而增加 (如图 3 所示) 造成的。根据静态通电加热装置极板面积的大小计算, 极板上的最大电流密度为  $259.4 \text{ A/m}^2$ 。因此, 静态通电加热时电极表面没有出现污垢层的原因, 可能是由于静态通电加热时较低的电流密度没有造成电极的温度高于电极附近豆浆的温度, 但具体原因有待于进一步研究。从图 5 中还可以看出, 接通电源后, 第 I 加热室的电流由于电场强度较大而迅速增加到最大值, 平均电流密度约为  $1241.3 \text{ A/m}^2$ , 而第 VI 加热室的电流是逐渐增加到最大值的, 其平均电流密度为  $993 \text{ A/m}^2$ 。因此, 试验条件下, 两者的平均电流均高于静态通电加热条件下极板上的最大电流密度。尽管连续通电加热条件下极板上的电流密度远小于 Stirling 建议的最大值 ( $4000 \text{ A/m}^2$ )<sup>[17]</sup>, 但仍在极板上出现了粘附现象并导致了电流的缓慢下降。

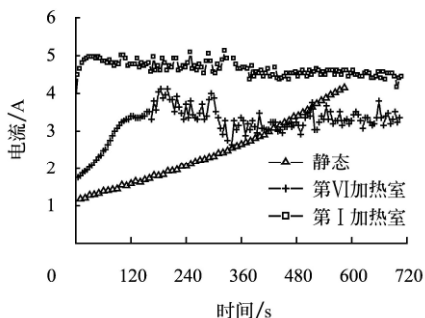


图 5 不同通电加热方式下电流随时间的变化  
Fig.5 Changes of electric current with heating time under different ohmic heating meathods

在连续通电加热过程中, 当豆浆在极板上粘附形成污垢层 (图 6a, 假设两极板表面上形成的污垢层的厚度相等) 后, 则在极板表面形成附加电阻, 其等效电路如图 6b 所示。

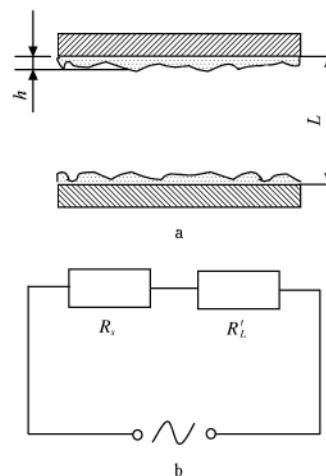


图 6 极板污垢层(a)及其等效电路(b)  
Fig.6 Burning layer of electrode and its equivalent circuit

根据欧姆定律, 电极表面没有形成污垢层时, 两电极之间的电流为:

$$I = \frac{U}{R_L} \quad (4)$$

式中  $I$ ——电流强度, A;  $U$ ——电压, V;  $R_L$ ——豆浆液柱电阻,  $\Omega$ 。

当电极表面有污垢层形成时, 两电极之间的电流为:

$$I' = \frac{U}{R_s + R'_L} \quad (5)$$

式中  $I'$ ——电流强度, A;  $U$ ——电压, V;  $R_s$ ——污垢层的电阻,  $\Omega$ ;  $R'_L$ ——豆浆液柱电阻,  $\Omega$ 。

尽管  $R'_L$  小于  $R_L$ , 但极板表面上形成的污垢层所产生的电阻  $R_s$  远大于豆浆的电阻, 所以,  $(R_s + R'_L)$  远大于  $R_L$ , 故电压相同时,  $I$  大于  $I'$ 。因此, 由公式 (1) 可知: 在极板表面上产生污垢层后测得的电导率小于静态通电加热没有产生污垢层时测得的电导率。

## 4 结 论

1) 连续通电加热时, 尽管豆浆是流动的, 但经过较短的时间后, 各加热室内豆浆的平均温度基本稳定并且沿流动方向均匀升高。

2) 连续通电加热时测得的豆浆的电导率与温度呈线性关系, 但低于同温度下利用静态通电加热装置测得的电导率。其原因是连续通电加热条件下豆浆在极板上形成了污垢层, 但形成污垢层的原因有待于进一步研究。

## 【参 考 文 献】

- [1] René F, Leuliet J C, Lalande M. Heat transfer to Newtonian and non-Newtonian food fluids in plate heat exchangers: Experimental and numerical approaches[J]. Transactions Ichem, Part C, 1991, 69: 115—126.
- [2] Belmar-Beiny M T, Gotham S M, Paterson W R, et al. The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling[J]. Journal of Food Engineering, 1993, 19: 119—139.
- [3] Changani S D, Belamar-Beiny M T, Fryer P J. Engineering and chemical factors associated with fouling and cleaning in milk processing[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, 14: 392—406.
- [4] Deplace F, Leulier J C. Modeling fouling of a plate heat exchanger with

\* <http://www.fsid.cvut.cz/en/u218/pepoles/zitny/chisA98a.pdf>

- different flow arrangements by whey proteins solutions[J]. Transactions Ichem, Part C, 1995, 73: 112—120.
- [5] Grijspeerdt K, Hazarika B, Vucinic D. Application of computational fluid dynamics to model the hydrodynamics of plate heat exchangers for milk processing[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 57(3): 237—242.
- [6] FDA. Ohmic and Inductive Heating. <http://www.cfsan.fda.gov/~comm/ift-ohm.html>.
- [7] 孙玉利, 李法德, 杨玉娥, 等. 通电加热技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 296—300.
- [8] Palaniappan S, Sastry S K. Electrical conductivity of selected solid foods during ohmic heating[J]. Journal of Food Process Engineering, 1991, 14, 221—236.
- [9] Kim J, Pyun Y. Extraction of soymilk using ohmic heating[A]. Abstract, 9<sup>th</sup> Congress of Food Science and Technology[C]. Budapest, Hungary, 1995.
- [10] 植村邦彦, 五十部诚一郎, 今井哲哉, 等. 有限要素法による通電加熱における温度分布の解析[J]. 日本食品科学工学会誌, 1996, 43(5): 510—519.
- [11] 李修渠, 李里特. 豆浆的通电加热[J]. 食品与发酵工业, 1998, 5: 37—42.
- [12] 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.
- [13] 李法德, 李里特, 辰巳英三. 不同加热条件对豆浆电导率的影响[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 107—111, 103.
- [14] 孙玉利, 李法德, 杨玉娥, 等. 液体食品连续通电加热系统的实验研究[J]. 食品工业科技, 2005, 26(2): 156—158.
- [15] de Alwis A A P, Halden K, Fryer P J. Shape and conductivity effects in the ohmic heating of foods[J]. Chemical Engineering Research & Design, 1989, 67(2): 159—168.
- [16] Fryer P J, de Alwis A A P, Koury E, et al. Ohmic processing of solid-liquid mixture: heat generation and convection effects[J]. Journal of Food Engineering, 1993, 18: 101—125.
- [17] Stiling R. Ohmic heating: a new process for food industry[J]. Power Engineering Journal, 1987, 1(6): 365—371.

## Electrical conductivity of soybean milk during cooking with continuous ohmic heating device

Li Fade<sup>1</sup>, Sun Yuli<sup>2</sup>, Li Luxing<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
3. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Jining Vocational Technology College, Jining 272037, China)

**Abstract:** The changes in the electrical conductivity of the soybean milk (6.01% the solids content) with its temperatures were investigated during cooking at the mass flow rate of  $(75 \pm 0.5)$  kg/h with a continuous ohmic heater, and compared with a batch ohmic heater. The results show that the electrical conductivity of the soybean milk during continuous ohmic heating also increases linearly with the increase of its temperature. However, the value of the electrical conductivity measured with the continuous ohmic heater was lower than that measured with the batch ohmic heater at the same temperature during ohmic heating. By the observations after the experiments, it was found that the fouling occurred on the surfaces of the electrodes mounted in the continuous ohmic heater, and caused the increase in the electrical resistance during ohmic heating, which resulted in the decrease of the electrical conductivity during continuous ohmic heating. However, the reason for fouling occurring on the electrode surface is needed to be studied further in the future.

**Key words:** soybean milk, continuous ohmic heating, electrical conductivity, fouling