

豆浆连续通电加热中电源频率对极板黏附的影响

王冉冉¹, 王涛¹, 朱敏¹, 张世福¹, 任杰¹, 李法德^{2*}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 为解决豆浆通电加热过程中的极板污染问题, 该文研究了在豆浆的连续通电加热过程中, 电源频率对于电源极板污染的影响。试验表明, 相比于 100 Hz 的低频交流电, 频率超过 1000 Hz 的高频交流电能有效抑制电源极板污染。研究结果对于通电加热在豆浆加工的应用提供了依据, 并对富含蛋白质液体食品连续通电加热中极板污染的研究提供参考。

关键词: 极板, 污染, 腐蚀, 通电加热, 电源频率, 豆浆

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.046

中图分类号: TS203

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0287-06

王冉冉, 王涛, 朱敏, 等. 豆浆连续通电加热中电源频率对极板黏附的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 287-282.

Wang Ranran, Wang Tao, Zhu Min, et al. Effect of power supply frequency on electrode adhesion during soybean milk continuous ohmic heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 287-292. (in Chinese with English abstract)

0 引言

煮浆是豆制品加工的重要工序, 现在的煮浆方法一般是采用在豆浆中直接通入蒸汽, 该方法加热不均匀, 加热时间长, 一般为间歇加热, 若采用连续的热交换加热, 将会导致加热面的结垢。采用通电加热可解决上述问题, 通电加热是利用豆浆本身的导电特性, 当物料两端施加交变电压, 物料中有电流通过自身产热^[1-4], 该方法加热快、加热均匀并可连续操作^[5-6]。

但是, 在通电加热过程中, 虽然没有换热面存在, 极板上仍然会出现污染的现象, 这极大地影响了通电加热在豆浆加工中的应用^[7-14]。

本文通过自制的通电加热装置, 研究在豆浆连续通电加热条件下, 电源频率对于极板污染的影响, 为今后豆浆制备中通电加热技术的应用提供参考。

1 试验材料及试剂

1.1 试验装置

连续通电加热装置的结构如图 1 所示。加热室垂直放置, 豆浆由生豆浆存储罐, 利用隔膜水泵 (PLD-2202, 石家庄普兰迪机电设备有限公司) 送入加热室底部, 由加热室顶部流出, 以保证豆浆尽可能的充满加热室, 并通过压力表和流量控制阀调整加热室的压力, 加热后, 豆浆流入热豆浆存储罐。

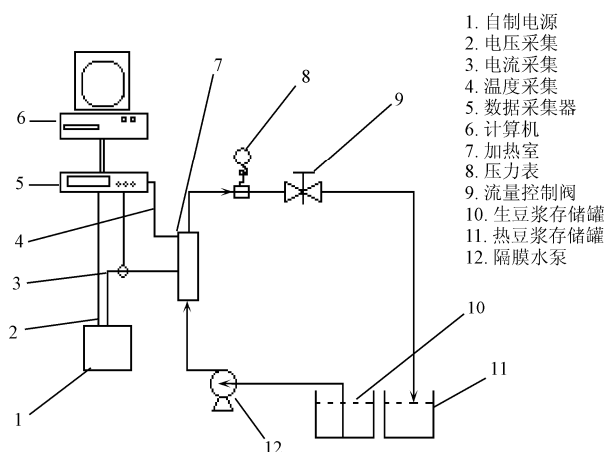


图 1 连续通电加热装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of continuous ohmic heating device

加热室用聚丙烯制成, 如图 2 所示。在加热室内, 用 2 块 304 不锈钢极板构成, 极板有效面积 0.001 m², 间距 10 mm。这样在试验过程中, 电源只提供较小的电流就可以在极板上得到较高的电流密度。数据采集系统主要由标定后的 T 型热电偶、数据采集器 (34970A 美国, 安捷伦科技有限公司) 和方波电流传感器 (自主设计制作) 等组成。电源采用双极性方波电源 (自主设计制作)。

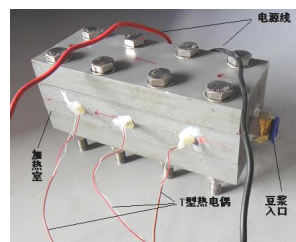


图 2 通电加热室

Fig.2 Ohmic heating chamber

收稿日期: 2011-08-11 修订日期: 2012-04-20

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金项目 (2008); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2011CM028); 国家自然科学基金资助项目 (31171759)

作者简介: 王冉冉 (1979-), 男, 山东淄博人, 博士生, 农产品加工方向。泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018. Email: wranran@163.com

通讯作者: 李法德 (1962-), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事新型农业装备、农产品加工机械的优化设计与开发。泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018. Email: li_fade@yahoo.com.cn

1.2 试验方法

1.2.1 豆浆的制备

将除去异物和没有破碎、虫咬、变质籽粒的大豆(济南黄河大豆) 1 kg, 用自来水冲洗 3 次后沥干, 按干大豆与自来水的质量比 1:3 加入 3 kg 自来水, 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 3 遍, 沥干, 用天平(TC-6K, 精度 0.1 g, 美国双杰兄弟(集团)有限公司)称量吸湿后的大豆质量(干大豆质量与吸水质量之比约为 1:1.3)。磨浆时, 自来水从高位槽中连续流入浆渣自分离磨浆机(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质量比 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。豆浆制备后, 放置于 3℃冰箱内备用, 并于 12 h 内完成试验。

豆浆中固形物质量分数采用常压干燥法^[15]测量。取 3 个试样的平均值作为豆浆的固形物质量分数, 本研究中豆浆的固形物质量分数为 6.37%。

1.2.2 通电加热试验

由于不锈钢物理稳定, 无毒无害且价格低廉, 因此成为了食品加工中最为常用的金属材料, 因此, 在本研究中使用的极板材料选用 304 不锈钢极板。取新极板清洗, 清洗时要注意保护极板的加热面, 以免造成划痕, 使得在金相显微镜观察(XJP-6/6A, 重庆光电仪器有限公司)下腐蚀状况不明显。清洗后将极板置于 90℃的干燥箱中加热 30 min, 加热后在干燥皿中放置 20 min 后放于干燥皿中备用。

按照图 1 连接装置, 并将极板平行放置于加热室中, 通过密封垫和螺栓密封好。调节泵, 使豆浆流速为 10 L/h, 同时调节流量控制阀, 保持加热室中豆浆压力为 0.1 MPa。流量稳定后, 启动数据采集系统, 打开电源。试验条件取电流密度为 5 000 A/m², 电压为 200 V, 频率范围为: 100 Hz 至 20 kHz。试验过程中的电流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。

加热完成后用普通相机拍照, 然后冲洗极板表面的污垢, 并利用软毛刷和餐洗净对极板进行进一步清洗, 利用数字干燥箱(DZF-6050 型, 上海博迅实业有限公司)对极板进行干燥, 将 100 Hz 频率下加热并形成焦糊的极板在金相显微镜(XJP-6/6A, 重庆光学仪器有限公司)下拍照。并将极板切割成 10 mm×10 mm 的方形小块, 并利用激光共聚焦扫描显微镜(LSM510 META, 德国蔡司公司)拍照。在 100 Hz 频率下进行重复试验, 得到多块形成焦糊的极板后, 将极板上形成焦糊的物质用刀片小心刮下, 并利用傅立叶变换红外分光光度计(Nicolet 380, 美国, 赛默飞世尔公司)进行红外光谱分析。

2 结果与分析

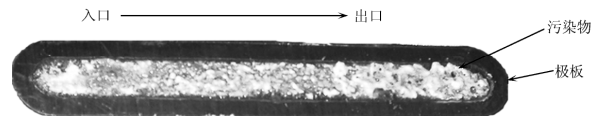
2.1 极板黏附机理分析

大豆中蛋白质质量分数约为 40%, 脂肪质量分数约为 20%, 碳水化合物质量分数约为 25%, 纤维素及灰分

质量分数等约占 5%, 水分及其他成分约占 10%, 淀粉质量分数很少^[16]。在豆浆加热的过程中, 蛋白质会因受热发生变性, 首先形成可溶性聚合物, 进而形成串状聚合物, 最后形成蛋白质的凝聚^[17-18]。

豆浆通电加热过程中, 除了热因素以外, 电场强度、pH 值、压力及豆浆固形物质量分数等也会对蛋白质变性产生影响, 在如图 1 所示通电加热系统的加热室中, 电极极板平行放置, 这些参数在加热室内部各处近似均匀分布, 因此其对蛋白质变性的影响都是相同的。

由以上理论分析, 在通电加热过程中, 由于极板的电导率远高于豆浆, 在流过电流相同的情况下, 其发热远小于豆浆, 根据传热理论, 电极附近的豆浆温度低于平均温度, 其变性和黏度应当都小于平均值。加热室内部入口温度与出口温度相差很大, 出口处的蛋白质黏度最高^[18]。根据大豆蛋白凝胶的热性质, 温度高时凝胶速度快, 出口的极板污染应当明显高于入口。但是在试验中发现, 在 200 V 的电压下, 在给豆浆通以 100 Hz 交流电 5 min 左右, 当豆浆中电流密度为 5 000 A/m²时, 极板出现了严重污染, 其原因是极板附近的豆浆黏附在极板上发生了焦糊。未清洗且黏附了白色污染的极板如图 3 所示。但同时多次试验表明, 当通电时间不大于 10 min 时, 被污染的极板其入口处和出口处的污染状况没有显著的区别。



注: 豆浆的固形物质量分数为 6.37%, 电压为 200 V, 通电 5 min 左右, 电流密度为 5 000 A/m²

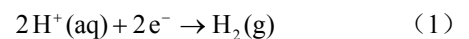
图 3 清洗前 100 Hz 频率下通电加热极板的污染
Fig.3 Electrode pollution of ohmic heating under 100 Hz frequency before being washed

在试验中, 极板采用的是 304 不锈钢, 化学牌号为 06Cr19Ni10, 它的化学成分为 C、Si、Mn、P、S、Cr、Ni、Mo, 其中 Cr 占 18.22%, Ni 占 8%, Mo 占 1.09%, 这 3 种化学成分是除铁以外含量最高的^[19]。

在极板腐蚀中, 发生的反应分为电解反应和电化学反应两种^[20-21]:

电解反应主要是水在通电过程中发生的电解。其表达式为:

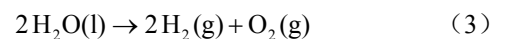
阴极电解:



阳极电解:

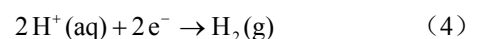


总电解反应:

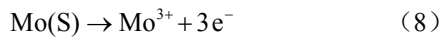
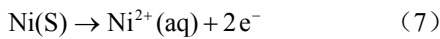
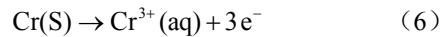
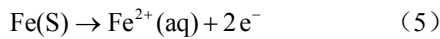


电化学反应:

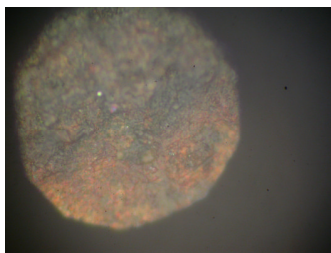
阴极发生的化学反应:



阳极发生的主要电化学反应:



由以上分析可知，电解反应最终会产生氢气和氧气，电化学反应会产生也氢气。试验中使用的 304 不锈钢具有优良的不锈耐腐蚀性能和较好的抗晶间腐蚀性，其在体积分数≤65%的沸腾温度以下的硝酸中以及在碱溶液及大部分有机酸和无机酸都具有良好的耐腐蚀能力^[19]。由图 3 可知，通电加热过程中豆浆在极板上发生了凝聚反应。并通过金相显微镜对污染的极板进行观察，其结果如图 4 所示。

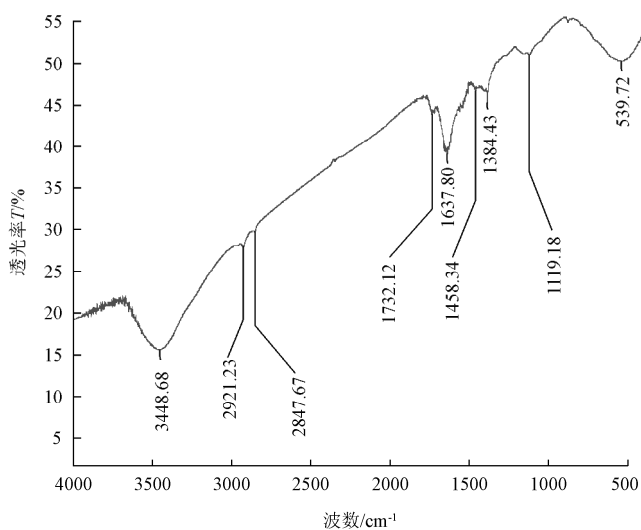


注：红色和黑色附着物为污染物，豆浆的固形物质量分数为 6.37%，电压为 200 V，通电 5 min 左右，电流密度为 5 000 A/m²

图 4 金相显微镜下观察采用 100 Hz 加热极板的污染 (清洗后, 400 倍)

Fig.4 Metallographic of electrode pollution of ohmic heating under 100 Hz frequency (after being washed, ×400 times)

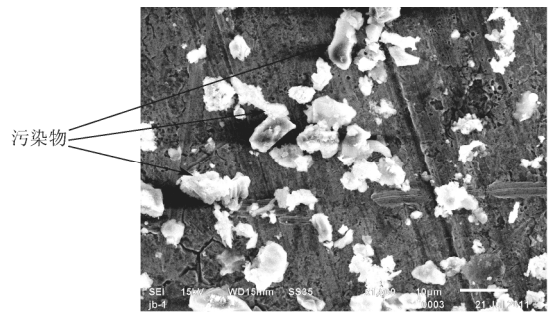
图 4 中所示红色和黑色附着物为污染物，进行红外光谱分析，得到如图 5 所示红外光谱曲线。由图 5 可知，其吸收峰主要集中在 3 348、1 637、1 119 cm⁻¹ 这 3 个点，其主要成分为有机物，无机物成分很少，说明极板在加热过程中，金属发生的电化学反应很少。



注：豆浆的固形物质量分数为 6.37%，电压为 200 V，通电 5min 左右，电流密度为 5 000 A/m²

图 5 极板清洗后附着物红外光谱曲线(采用频率 100 Hz 加热)
Fig.5 FT-IR curve of electrode attachment after being washed (heating under 100 Hz)

将形成焦糊的极板切割成 10 mm×10 mm 的方形小块，并利用激光共聚焦扫描显微镜进行了观察，其结果如图 6 所示。



注：豆浆的固形物质量分数为 6.37%，电压为 200 V，通电 5min 左右，加热频率为 100 Hz，电流密度为 5 000 A/m²

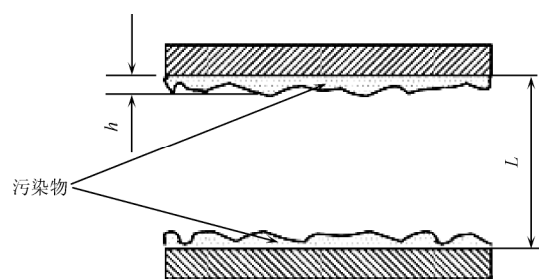
图 6 扫描电镜下观察极板污染(清洗后, 1500 倍)
Fig.6 SEM image of electrode pollution (after being washed, ×1500 times)

由图 5、6 可知，极板在通电加热过程中，发生的污染不是电化学反应和电解反应造成的，而是蛋白质等有机物在极板上发生了焦糊。

由于大豆蛋白质在凝胶过程中，催化剂的影响非常显著^[18]，因此造成极板污染的最主要原因是极板上逸出的少量 Fe²⁺、Cr³⁺、Ni²⁺、Mo³⁺等金属离子对豆浆中蛋白质的凝胶起到了催化作用，加速了大豆蛋白质的凝胶^[22]，极板的电解反应导致极板附近的 pH 值增加，从而引起了大豆蛋白质的迅速凝聚^[23]。由于极板附近的离子浓度和酸度相对较高，因此在极板周围大豆蛋白质的凝聚速度远大于其他区域。

2.2 频率对极板黏附的影响分析

豆浆中大豆蛋白质凝聚在极板上后，在极板上形成了黏附层。其等效示意图如图 7 所示。



注：L 为极板的间距，m，h 为极板上豆浆凝聚后在极板上的黏附层的厚度，m。

图 7 极板污垢层示意图
Fig.7 Schmutzband of electrode

图 7 中，L 为极板的间距，m，h 为极板上豆浆凝聚后在极板上的黏附层的厚度，m。在没有黏附时，极板之间豆浆的电阻 R_L 为

$$R_L = \rho_L \frac{L}{S} \quad (9)$$

式中，ρ_L 为豆浆的电导率，Ω·m；S 为极板的有效面积，m²。

由图 7 可知,在极板上有黏附层后,豆浆测量得到的电阻为:

$$R = R_h + R_{L-h} \quad (10)$$

式中, R_h 为黏附层电阻, Ω ; R_{L-h} 未黏附豆浆的电阻, Ω 。

其中,黏附层的电阻

$$R_h = \rho_h \frac{h}{S} \quad (11)$$

式中, ρ_h 为黏附层的电导率, $\Omega \cdot m$; h 为黏附层的厚度, m 。

未黏附豆浆的电阻:

$$R_{L-h} = \rho_L \frac{L-h}{S} \quad (12)$$

大豆蛋白在凝聚后,黏附层电阻率 ρ_h 相比豆浆的 ρ_L 有所升高,由于黏附层厚度 h 比较小,因此其电阻 R_h 很小,如公式(11)所示。未黏附豆浆的电阻 R_{L-h} 变化也很小,如公式(12)所示。豆浆测量得到的电阻 R 没有明显的变化,如公式(10)所示。

当施加电压 U 固定时,蛋白质凝聚初期的电流

$I' = \frac{U}{R_h + R_{L-h}}$, 相比没有凝聚时的电流 $I = \frac{U}{R_L}$ 并没有明显的变化。

根据黏附层得到的热量计算黏附层的温度上升。

一定时间内黏附层得到的热量 Q 为焦耳热,计算公式为:

$$Q = I'^2 R_h t \quad (13)$$

那么黏附层温度的计算由于:

$$Q = Cm\Delta T \quad (14)$$

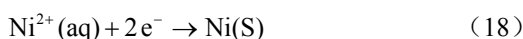
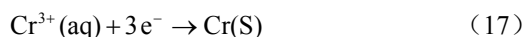
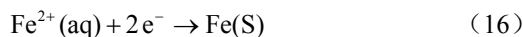
$$\Delta T = \frac{Q}{Cm} \quad (15)$$

式中: C 为黏附层的比热容, $J/kg \cdot ^\circ C$; ΔT 为温度差, $^\circ C$; m 为黏附层的质量, kg , t 为加热时间, s 。

由于黏附层的厚度 h 很小,所以,其质量 m 也很小,造成黏附层的温升 ΔT 相对较高,如前文所述,温度升高后有加剧了大豆蛋白的变性和凝聚速度,从而 h 和 ρ_h 增大,引起 Q 增加, ΔT 增加,构成正反馈,使黏附层的温度急剧上升,同时流过极板的电流 I 急剧下降^[24]。

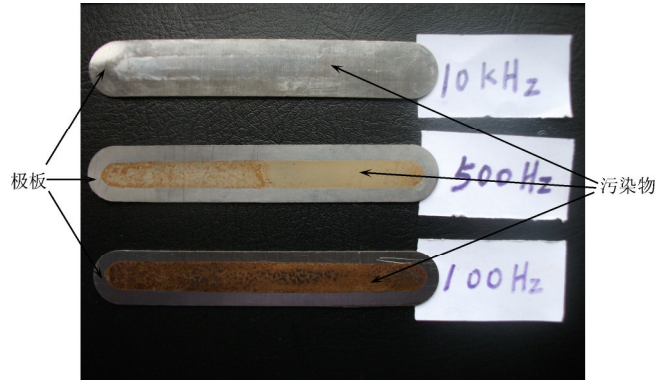
由上分析可知,如果要避免极板污染,需要降低在极板周围的大豆蛋白质凝聚速度。

通电加热过程中,极板周围大豆蛋白会发生快速的变性和凝聚,其原因在于极板周围由于电化学反应而存在的金属离子对于蛋白质变性起到了催化作用。而阳极的电化学反应如公式(5)~(8)所示,在电场反向,也就是变为阴极的时候,会发生可逆反应如公式(16)~(19)所示。



由于很多蛋白质发生的变性是可逆的变化,那么当

蛋白质在变性但是没有凝聚的时候使电场反向;或者当蛋白质没有发生变性时金属离子重新复合,那么就能够降低极板附近蛋白质的凝聚速度。也就是说,当外加电源极性变化足够快时,能够降低极板的污染程度。在电流密度为 $5000 A/m^2$ 时,将极板清洗后,选取 3 个极板污染对比如图 8 所示。

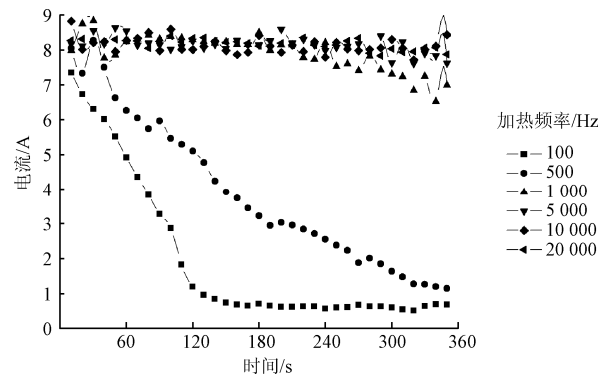


注: 豆浆的固形物质量分数 6.37%; 电压 200 V; 电流密度 $5000 A/m^2$

图 8 不同频率下极板污染情况对比(清洗后)

Fig.8 Contrast of electrode fouling with various frequency (after being washed)

本文对固形物质量分数为 6.37% 的豆浆在 200 V 的电压下进行了通电加热试验,加热频率分别为 100、500、1000、5000、10000、20000 Hz,入口温度为室温,出口温度约为 $100^\circ C$,其通过豆浆的电流曲线如图 9 所示。



注: 豆浆的固形物质量分数 6.37%; 电压 200V

图 9 不同通电加热频率下电流下降时间

Fig.9 Fall of current with time under difference ohmic heating frequency

由图 9 可知,在当前电流密度下,当频率下降时,通过豆浆的电流下降速度明显变快,表明极板的腐蚀速度增加,而频率升高到 1000 Hz 时,电流无明显下降,极板污染不明显。

3 结论

1) 豆浆在连续通电加热过程中,极板会有明显的污染,其原因是极板在通电加热过程中发生电化学反应,生成的少量金属离子加速了大豆蛋白质在极板附近的凝聚,形成了电导率较低的黏附层,黏附层的发热相对较

高而形成其在极板上的焦糊。

2) 降低豆浆通电加热极板腐蚀最简单有效的方法是提高电压频率。当豆浆固形物质量分数为 6.37% 左右时, 频率升高到 1000 Hz 时, 极板的污染明显降低。

文中提出的抑制极板腐蚀的方法在豆浆的通电加热中具有通用性, 且为其他富含蛋白质液体食品的通电加热过程中的极板污染问题提供了理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Li Fade, Li Lite, Eizo T. Effect of heating condition on electrical conductivity of soybean milk[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 107—111. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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.
Sun Yuli; Li Fade; Yang Yu'e, et al. Research advances of application of ohmic heating in food industry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(6): 296—300. (in Chinese with English abstract)
- [3] Long L, Han Z, Zhang X J, et al. Effect of different heating methods on the production of protein-lipid film[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(3): 292—297
- [4] Zareifard M R, Ramaswamy H S, Trigui M & Marcotte M. Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2003, 4(1): 45—55.
- [5] Castro I, Teixeira J A, Salengke S, et al. Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2004, 5(1): 27—36.
- [6] 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.
Li Xuqu. Use of ohmic heating in food industry[J]. Food Science and Technology, 2001(6): 10—12. (in Chinese with English abstract)
- [7] Eliot-Godéreaux S C, Zuber F, Goullieux A. Processing and stabilisation of cauliflower by ohmic heating technology [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2001, 2(4): 279—287.
- [8] Zareifard M R, Ramaswamy H S, Trigui M & Marcotte M. Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2003, 4(1): 45—55
- [9] 王冉冉, 朱敏, 李法德. 食品通电加热中极板污染问题研究进展[J]. 农业工程, 2011, 1(1): 67—71.
Wang Ranran, Zhu Min, Li Fade. Fouling and corrosion of electrode by ohmic heating in food processing[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(1): 67—71. (in Chinese with English abstract)
- [10] Bansal B, Chen X D. Effect of temperature and power frequency on milk fouling in an ohmic heater[J]. Food and Bioproducts Processing, 2006, 84(4): 286—291.
- [11] Bansal B and Chen X D. A critical review of milk fouling in heat exchangers[J]. Critical Reviews in Food Science and Food Safety, 2006, 5(2): 27—33
- [12] Marcotte M, Ramaswamy H S, Piette J P G. Ohmic heating behavior of hydrocolloid solutions[J]. Food Research International, 1998, 31(6/7): 493—502.
- [13] 李陆星, 许振珊, 李法德. 连续通电加热系统极板污染问题的试验研究[J]. 食品科技, 2010, 35(7): 153—156.
Li Luxing, Xu Zhenshan, Li Fade. Experimental study on electrode fouling in continuous ohmic heating system[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(7): 153—156. (in Chinese with English abstract)
- [14] Ayadi M A, Leuliet J C, Chopard F, et al. Continuous ohmic heating unit under whey protein fouling[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2004, 5(4): 465—473.
- [15] GB/T14769-93, 食品中水分的测定方法[S].
GB/T14769-93, Method for determination of moisture in foods[S]. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李广志, 盖钧镒, 张文明. 大豆营养成分研究现状[J]. 种子, 2003(5): 57—59.
Li Guangzhi, Gai Junyi, Zhang Wenming. Review of soybean nutrient content[J]. Seed, 2003(5): 57—59. (in Chinese with English abstract)
- [17] Nakamura T, Utsumi S, Mori, T, Network structure formation in thermally induced gelatin of glycinin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1984, 32(2): 349—352.
- [18] 刘志胜. 豆腐凝胶的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
Liu Zhisheng. Studies on Tofu-gel[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [19] 齐达, 李晶, 董力, 等. 节镍型不锈钢的耐腐蚀性能比较[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(10): 756—759.
Qi Da, Li Jing, Dong Li, et al. Comparison of corrosion resistance of nickel saving stainless steels[J]. Corrosion and Protection, 2010, 31(10): 756—759. (in Chinese with English abstract)
- [20] Stancl J, Zitny R. Milk fouling at direct ohmic heating[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(4): 437—444.
- [21] Samaranayake P and Sastry S K. Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2005, 577(1): 125—135.
- [22] Christian G K, Changani S D, Fryer P J. The effect of adding minerals on fouling from whey protein concentrate: development of a model fouling fluid for a plate heat exchanger[J]. Food and Bioproducts Processing, 2002, 80(4): 231—239.
- [23] 连喜军, 鲁晓翔, 张云涛, 等. pH 值和金属离子对大豆分离蛋白凝胶形成的影响[J]. 肉类工业, 2006(12): 32—35.
Lian Xijun, Lu Xiaoxiang, Zhang Yuntao, et al. The effect of pH and metal ions on gelatin formation of soybean protein isolate[J]. Meat Industry, 2006(12): 32—35. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 275—278. (in Chinese with English abstract)

Effect of power supply frequency on electrode adhesion during soybean milk continuous ohmic heating

Wang Ranran¹, Wang Tao¹, Zhu Min¹, Zhang Shifu¹, Ren Jie¹, Li Fade^{2*}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, 271018, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Tai'an, 271018, China)

Abstract: In order to solve the problem of electrode pollution, the effect of power supply frequency on electrode pollution during continuous ohmic heating of soybean milk was investigated. The experiments showed that the high frequency (>1 000 Hz) alternative power supply can effectively reduce the pollution of the electrode as compared to 100 Hz AC frequency. This research can provide a theoretical reference for ohmic heating application in soybean milk processing, as well as other research on ohmic heating electrode pollution of protein-rich liquid food.

Key words: electrodes, pollution, fouling, ohmic heating, power frequency, soybean milk