

文章编号:1673-1689(2009)06-0748-05

超声波对毛豆浸渍冷冻过程的影响

许韩山¹, 张 愨^{*1}, 孙金才²

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 浙江海通食品有限公司, 浙江 慈溪 315300)

摘要: 研究超声波功率、超声波作用时间、超声波脉冲值对提高毛豆仁浸渍冷冻速率的影响。通过响应面分析可知在载冷剂温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下超声波辅助浸渍冷冻的最佳工艺参数:超声波功率为58 W,超声波作用模式为50%,超声波作用时间为0.7 min,解冻后毛豆仁质构(硬度)和持水力分别为 6.05 kg/cm^2 和92%。

关键词: 浸渍冷冻;超声波;冷冻速率;毛豆

中图分类号:S 643

文献标识码:A

Effect of Power Ultrasound during Immersion Freezing on Edamame

XU Han-shan¹, ZHANG Min^{*1}, SUN Jin-cai²

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Zhejiang Haitong Food Company, Cixi 315300, China)

Abstract: The effect of power ultrasound on freezing rate was influenced by ultrasound power, exposure time and the ultrasound pulsed to which ultrasound was applied. The response surface analysis was showed that the texture and the water-holding power of edamame after thawing was 6.05 kg/cm^2 , 92% when 58 W ultrasound power was applied for 0.7 min, 50% pulsed at the coolant temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: immersion freezing, power ultrasound, freezing rate, edamame

将超声波技术结合食品的冻结工艺,由于超声波的物理效应^[1](空穴效应)不仅产生大量的气泡可以促进冰晶的生成,提高食品的过冷点,对于较大的冰晶体还有破碎的作用;而且超声波空穴效应产生强烈的搅动及微气化现象可以加速冻结食品的传质、传热系数。冻结速度快,形成的冰晶尺寸小、分布均匀,避免了冻结食品组织变化的不可逆性^[2-12]。对植物细胞的损伤较小,可以获得更好的速冻品质。

作者主要研究在毛豆仁最大冰晶形成阶段下施加不同的超声波功率、脉冲形式(脉冲值)及超声波作用时间对毛豆仁冷冻速率及其品质的影响。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

采用台湾292或75品种的白毛毛豆为原料,豆类饱满,肉质鲜嫩。不可使用有病虫害及污染的原料。试验所用其它分析试剂均为分析纯。

收稿日期:2008-07-24

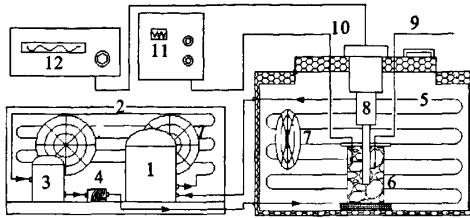
基金项目:国家自然科学基金项目(20776062)。

* 通讯作者:张 愨(1962-),男,浙江平湖人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事农产品贮藏加工研究。Email: min@jiangnan.edu.cn

1.2 主要仪器和设备

JY98-3D 超声波细胞破碎仪;宁波新芝公司产品;TDL-60B 台式离心机;上海安亭科学仪器厂产品;铠式热电偶;宁波奥琪自动化仪表设备有限公司产品;温度数字记录仪;浙江联泰仪表有限公司产品;T 型物性测定仪 A-XT2i;英国 Stable. Micro System 公司产品;鼓风速冻机;无锡市企虹制冷有限公司产品。

主体装置如图 1 所示,主要由控温系统、超声波发生装置、冷却系统 3 部分组成。



1. 压缩罐;2. 冷凝管;3. 贮液罐(制冷剂);4. 压力阀;5. 蒸发器;6. 贮载制冷剂反应罐;7. 风机;8. 超声波换能器;9. 外设热电偶;10. 内置热电偶;11. 温度控制器;12. 超声波发生器

图 1 实验装置简图

Fig. 1 Experimental device simple chart

1.3 实验方法

1.3.1 冻结温度曲线的测定 取大小均匀单个毛豆仁(重约 1 g),经漂烫后冷冻。把数字温度计的探针插入毛豆仁中央,记录温度随时间的变化情况^[2]。每个处理做 3 个重复。

1.3.2 力学特性(硬度)测定 用质构仪的 P 0.5 圆柱形测试探头,操作模式为压力测定,测试前速度为 5 mm/s,测试速度 2 mm/s,测试后速度 5 mm/s,感应力 10 g,压缩距离为 5 mm。

1.3.3 持水力 实验中采用离心分离质量法,即将解冻后毛豆,称取 2 g 左右的样品,放在 50 目铜网上,铜网制成帽状,扎在离心管上,以 4 000 r/min 离心 20 min,然后称重,根据离心前后样品质量计算持水力。

2 结果与讨论

2.1 超声波对毛豆仁冻结曲线的影响

图 2~4 显示在毛豆仁冷冻相变过程中施加超声波作用,对毛豆仁冻结曲线的影响;除考查因素外其它工艺参数为:冷冻介质温度 -20 °C、超声波功率 80 W、超声波作用时间 1 min、超声波脉冲值 40%。

考查不同超声波功率下毛豆仁冷冻时间的变化,图 2 所示。施加功率为 120 W 和 160 W 的超声

波作用,毛豆仁样品中心温度下降速率要大于功率为 40 W 和 80 W 超声波作用下的处理样。但经 40 W 和 80 W 超声波作用后毛豆仁达到冷冻终温 -18 °C 所经历时间却小于 120 W 和 160 W 的处理样。其中 160 W 处理水平冷冻终止时间甚至长于普通浸渍冷冻所需时间。原因可能是由于在毛豆仁冻结相变结束后,大功率超声波产生热能不能被及时除去而被样品或载剂吸收。从而不利于冻结毛豆仁第三阶段降温。综上分析可知在浸渍冷冻毛豆仁相变过程施加功率为 80 W 和 40 W 超声波,毛豆仁冷冻时间有明显缩短。

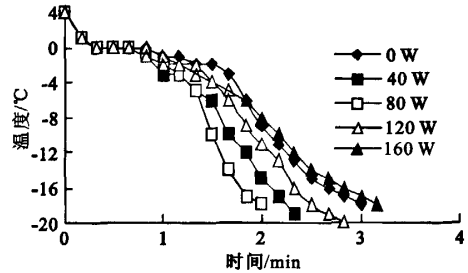


图 2 超声波功率对毛豆冻结曲线图的影响

Fig. 2 Effect of ultrasonic power levels on temperature versus time curves for edamame

图 3 和图 4 分别为超声波作用时间和超声波脉冲值对毛豆仁冻结曲线的影响。图 3 为不同超声波作用时间后毛豆仁冷冻时间的变化曲线图。超声波作用 0.5 min 对毛豆仁冻结过程产生影响,超声波作用 0.5 min 的处理样快速越过最大冰晶形成带,冰晶小且在组织中分布更加均匀;冻结时间短。当超声波作用时间延长至 1.0、1.5、2.0 min 时,毛豆仁中心温度从 -1~-5 °C 的降温速率明显快于不施加超声波作用的冻结样品。当超声波作用时间为 1.5、2.0 min 时,通过最大冰晶形成带的时间虽短,但超声波作用产生过多热导致热量积累;毛豆仁自由水相变结束后,其冻结速率反不及超声波作用时间为 0.5、1.0 min 的处理样。因此,超声波作用时间为 0.5、1.0 min 处理样的冷冻速率提高效果最明显。最快达到毛豆仁冻结温度 -18 °C。根据上述分析结果,超声波作用时间为 0.5 min 和 1.0 min 对提高毛豆仁冷冻速率较为合适。

超声波脉冲值越大空穴效应越明显,但超声波所产生的热能也越大^[17]。连续性超声波作用(即脉冲值为 100%)产生大量热;阻碍冰晶形成;延缓了毛豆仁冷冻过程。图 4 为考查不同超声波脉冲值作用下毛豆仁冷冻时间变化曲线图。从图 4 显示当超声波脉冲值增大至 40% 和 60% 时,毛豆仁中心温度从 -1~-5 °C 的冷冻阶段降温速率明显快于

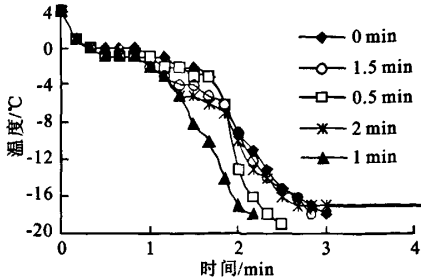


图3 超声波作用时间对毛豆冻结曲线图的影响
Fig.3 Effect of ultrasonic exposure time on temperature versus time curves for edamame

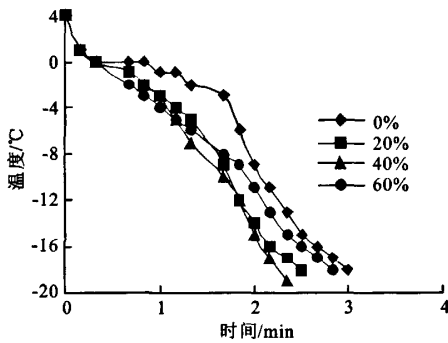


图4 超声波脉冲值对毛豆冻结曲线图的影响
Fig.4 Effect of ultrasonic pulsed on temperature time curves for edamame

0%和20%处理水平。较实验所设脉冲值中脉冲值为60%超声波产生空穴效应最强,传热传质系数提高程度最大;表现在冻结曲线为越过最大冰晶形成带所用时间最短。但超声波脉冲值为60%处理水平由于超声波产生热效应最明显。由于热量累积过快过高不能及时转移而减缓了毛豆仁冷冻速率,表现在毛豆仁的冻结曲线上为在后续冷冻阶段曲线较缓。60%处理水平在毛豆仁冰晶相变结束后的冻结曲线离毛豆仁普通浸渍冻结曲线相当接近。

2.2 超声波对冻结毛豆仁品质的影响

在冷冻相变过程中施加不同超声波功率、超声波作用时间、超声波脉冲值对毛豆仁持水力及质构(硬度)变化影响,如图5~7所示。这3种影响超声波强度的因素对解冻后毛豆仁的质构(硬度)和持水力变化趋势大致相同,均表现为“先升后降”的趋势。图5~7除考查的因素外,其固定参数为超声波功率80 W、作用时间为1 min、载冷剂温度-20 °C、超声波脉冲值40%。

当超声波功率为40 W时,毛豆仁解冻后硬度和持水力均有提高(如图5)。超声波功率为40,80 W时,与鲜样对比,毛豆仁的硬度下降幅度为33.0%、30.0%,而其持水力下降幅度12.6%、

11.4%。当超声波功率为120,160 W处理条件下,毛豆仁硬度下降幅度分别为36.7%、40.9%,而其持水力下降幅度14.9%、19.2%;不施加超声波作用的处理样硬度和持水力的下降幅度分别为38.9%和16.5%,两者持平。超声波功率为40 W和80 W时速冻毛豆仁的解冻后质构和持水力均较不施加超声波作用的处理样硬度均有明显的提高。

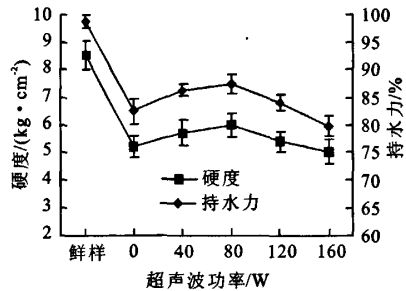


图5 超声波功率对毛豆仁解冻后硬度和持水力的影响

Fig.5 Effect of different ultrasonic power levels on the texture and the water-holding power of Edamame after thawing

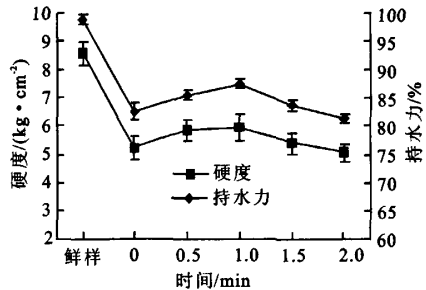


图6 超声波作用时间对毛豆仁解冻后硬度和持水力的影响

Fig.6 Effect of different ultrasonic time levels on the texture and The water-holding power of Edamame after thawing

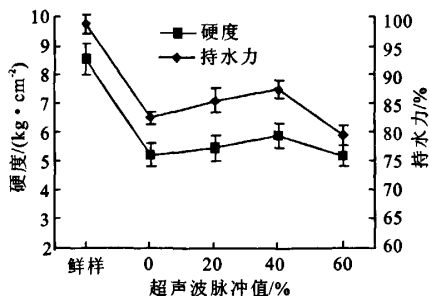


图7 超声波脉冲值对毛豆仁解冻后硬度和持水力的影响

Fig.7 Effect of different ultrasonic pulsed levels on the texture and the water-holding power of edamame after thawing

超声波处理 0.5 min 的速冻毛豆仁解冻后质构和持水力与不施加超声波作用的冷冻毛豆仁解冻后质构与持水力有递增,随着超声波作用时间延长至 1, 1.5 min 时,先缓慢增加后缓降(见图 4~9);以鲜样为基准,毛豆仁的硬度下降幅度分别为 31.7%、30.4% 和 36.9%,而其持水力下降幅度 13.3%、11.4% 和 15.2%。而在超声波处理时间为 2 min 时,解冻毛豆仁的硬度下降幅度 40.8% 和持水力下降幅度 17.6% 基本与对照样无显著差异。

从图 7 显示与不施加超声波作用的速冻毛豆仁相比,脉冲值 40% 超声波辅助速冻处理后毛豆仁解冻后质构(硬度)和持水力分别较鲜样下降幅度为 30.9%、11.4%。脉冲值 20% 和 60% 的毛豆仁解冻后质构(硬度)分别较鲜样下降幅度 36.0% 和 39.5%,持水力下降幅度为 13.3% 和 19.5%。

2.3 响应面分析结果

应用响应面分析方法^[18],通过中心优化组合设计,选取因素超声波功率 X_1 为 40, 80, 120 W(-1, 0, 1)、超声波脉冲值 X_2 为 40%, 50%, 60%(-1, 0, 1) 和超声波作用时间 X_3 为 0.6, 0.8, 1 min(-1, 0, 1) 作为优化因子,选择速冻果蔬的持水力 Y_1 (WHC) 和质构 Y_2 为优化指标。结果见表 1。建立解冻后毛豆仁质构及持水力的数学回归模型。

表 1 中心组合设计表及其结果

Tab. 1 Design of the central composite experiment and its result

试验号	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
1	-1	-1	0	0.874	5 915
2	-1	1	0	0.883	6 108
3	1	-1	0	0.897	5 588
4	1	1	0	0.804	5 241
5	0	-1	-1	0.871	5 713
6	0	-1	1	0.900	5 849
7	0	1	-1	0.864	5 661
8	0	1	1	0.820	5 347
9	-1	0	-1	0.870	5 925
10	1	0	-1	0.840	5 463
11	-1	0	1	0.827	5 778
12	1	0	1	0.785	5 357
13	0	0	0	0.930	5.928
14	0	0	0	0.890	5 987
15	0	0	0	0.950	5 899

表 2 二次回归模型的方差分析

Tab. 2 Equation quadratic regression model analysis of variance

回归项	自由度	Y_1 方程平方和	R^2	Y_2 方程平方和
一次项	3	0.002 650	0.140 7	625 385
平方项	3	0.012 548	0.666 0	198 868
交互项	3	0.001 875	0.099 5	124 161
总回归	9	0.017 073	0.906 2	948 414
总误差	5	0.001 767		369 460
总和	14	0.018 840		985 360

采用 SAS 中 RSREG 程序对响应值与各因素进行回归拟合后,得到回归方程分别为:

$$Y_1 = 0.93 - 0.010X_1 - 0.015X_2 + 0.0025X_3 - 0.028X_1^2 - 0.0175X_1X_2 - 0.028X_2^2 + 0.0025X_1X_3 - 0.013X_2X_3 - 0.048X_3$$

$$Y_2 = 5938.3 - 259.6X_1 - 88.7X_2 - 53.9X_3 - 118.4X_1^2 - 135.1X_2X_1 - 107.0X_2^2 + 10.2X_3X_1 - 112.6X_3X_2 - 188.9X_3^2$$

响应面分析结果: Y_1 方程中平方项 X_{12} 、 X_2^2 、 X_3^2 和总回归显著。 Y_2 方程中 X_1 和 X_3^2 为极显著, X_2 、 X_1^2 、 X_1X_2 和 X_3X_2 显著。 Y_1 和 Y_2 方程的复相关系数 $R_{12} = 0.9062$, $R_2^2 = 0.9625$, 说明 Y_1 、 Y_2 响应值的变化分别有 90.62% 和 96.25% 来源于所选变量。经 F 检验 Y_1 回归方程平方项的影响是显著的; Y_2 回归方程一次项和交互项的影响是极显著的; 平方项的影响是显著的。

通过响应面分析可以找出最佳试验参数。经过软件 SAS 的优化,最大持水力和压力时最佳试验参数为:超声波功率 58 W, 超声波脉冲值 50%, 超声波时间 0.7 min。此时持水力为 92%, 硬度为 6.05 kg/cm²。质构的硬度为 5.997 kg/cm², 与软件优化结果基本相符。

3 结 语

超声波功率、超声波作用模式和超声波作用时间对毛豆仁冻结时间及品质影响显著。

参考文献(References):

- [1] Thompson L H, Doraiswamy L K. Sonochemistry: science and engineering[J]. *Industry Engineering and Chemistry Research*, 1999, 38: 1215-1249.
- [2] 华泽钊, 李云飞, 刘宝林. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [3] Bing Li, Da-Wen Sun. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing of potatoes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55: 277-282.
- [4] Bing Li, Da-Wen Sun. Microstructural change of potato tissues frozen by ultrasound-assisted immersion freezing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 57: 337-345.
- [5] Ngapo T M, Babare I H, Reynolds J, et al. Freezing rate and frozen storage effects on the ultrastructure of samples of pork [J]. *Meat Science*, 1999, 53: 159-168.
- [6] Liyun Zheng, Da-Wen Sun. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes-a review[J]. *Trends in Food Science & Technology* 2006, 17: 16-23.
- [7] Chow R, Blindt R, Chivers R, et al. A study on the primary and secondary nucleation of ice by power ultrasound[J]. *Ultrasonics*, 2005, 43: 227-230.
- [8] Sastry S K, Shen G Q, Blaisdell J L. Effect of ultrasonic vibration on fluid-to-particle convective heat transfer coefficients [J]. *Journal of Food Science*, 1989, 54: 229-230.
- [9] Tsutomu Hozumi, Akio Saito, Seiji Okawa, et al. Freezing phenomena of supercooled water under impacts of ultrasonic waves[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25: 948-953.
- [10] Delgado A E, Da-Wen Sun. Heat and mass transfer models for predicting freezing process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 47: 157-174.
- [11] LI Hong, LI Hai-rong, GAO Zhi-chao, et al. The application of power ultrasound to reaction crystallization[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2006, 13: 359-363.
- [12] 谢晶, 韩志, 孙大文. 超声波技术在食品冻结过程中的应用[J]. *渔业现代化*, 2006, (5): 41-44.
XIE Jing, HAN Zhi, SUN Da-wen. The application of ultrasound in the food freezing [J]. *Fishery Modernization*, 2006, 5: 41-44. (in Chinese)
- [13] 吴有炜. 试验设计与数据处理[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2002.

(责任编辑: 朱明)