

文章编号:0253 – 4339(2017) 02 – 0109 – 05
doi:10. 3969/j. issn. 0253 – 4339. 2017. 02. 109

接触式超声波辅助平板冷冻对胡萝卜冷冻速率的影响

周新丽 滕 芸 戴 澄

(上海理工大学医疗器械与食品学院 上海 200093)

摘 要 超声波可以促进晶核形成,缩短冻结时间并且获得较高的冻结品质,但该技术目前多用于液态样品或浸渍冷冻过程,在固体果蔬样品平板冷冻过程中的应用未见报道。本文设计制作了一种接触式超声波辅助冷冻平板,用于固体果蔬的冷冻过程,并进行了三组实验:1)在 -1 ℃施加 10 s 不同功率(0 W,122.6 W,178.7 W,229.8 W)的超声波;2)在 -1 ℃施加 178.7 W 超声波,作用 0 s,5 s,10 s,15 s;3)在不同阶段(预冷段,相变段,终了段)施加 178.7 W 的超声波 10 s。分别研究了超声波的作用功率、作用时间、作用阶段等参数对胡萝卜冷冻速率的影响,结果表明:在相变阶段作用 178.7 W 的超声波 10 s,能显著降低样品通过最大冰晶生成段的时间 t_{cf} 和总冻结时间 t_{tf} ,提高样品的冷冻速率。

关键词 超声波;平板冷冻;冷冻速率;胡萝卜

中图分类号:TS205.7;TS255.3

文献标识码:A

Influence of Contact Ultrasound Assisted Vibrating Plate on the Freezing Rate of Carrot

Zhou Xinli Teng Yun Dai Cheng

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract Ultrasound can promote the formation of crystal nucleus, shorten the freezing time and get a higher quality freeze, but the technology is currently used for the liquid samples or immersion freezing process, and solid samples were barely taken into account. In this paper, the contact ultrasonic assisted vibrating plate was designed and set up, which is used for the freezing process of solid fruits and vegetables. The effects of ultrasound power, exposure time and phase stage on the freezing rate of the carrot were investigated. The experiments are divided into three groups: 1) applying ultrasound with different powers (0 W,122.6 W,178.7 W,229.8 W) for 10 s at -1 ℃; 2) applying 178.7 W ultrasound at -1 ℃ for 0 s,5 s,10 s,15 s respectively; 3) applying 178.7 W ultrasound for 10 s during different phase stages. The results showed that the optimum condition is applying 178.7 W ultrasound for 10 s during transition phase, which can significantly reduce the t_{cf} (characteristic freezing times) and t_{tf} (total freezing times) and increase the freezing rate of samples.

Keywords ultrasound; plate freezing; freeze rate; carrot

冷冻是能够保持食物感官特性和营养价值的一种广泛应用的保鲜方法^[1]。冻结速率是影响速冻食品质量的一个重要参数,因为它决定了冰晶的尺寸类型,细胞脱水和组织结构的损伤程度。快速冻结容易产生颗粒较多尺寸较小的细晶,均匀地分布在细胞内部和外部,细胞损伤小,冻结食品品质好;而缓慢的冻结则产生大颗粒的冰晶,绝大部分分布在细胞的外部区域,细胞损伤大,冻结食品品质有所降低^[2-4]。

功率超声波可以作为辅助手段用于许多食品加工的单元化操作中,因其独特的热效应、机械效应和空化效应而在功能活性成分提取、食品杀菌与保鲜、

食品结晶与冻结、食品干燥等方面有着越来越广泛的应用^[5-7]。已有实验证明,超声波辅助冻结能够控制结晶,提高冷冻速率和冷冻食品的质量^[8]。L. Bing 等^[9]在超声波辅助浸渍冷冻马铃薯的研究中,比较不同的功率水平、处理时间和冷冻阶段对冻结速率的影响。P. Comandini 等^[10]通过研究功率超声对马铃薯浸渍冷冻参数的影响,发现在冻结过程中,预期的成核和冻结时间的减少可能会对冷冻食品的性能造成很大的影响。S. Q. Hu 等^[11]探讨了超声波对冷冻面团冻结过程中冷冻速率的影响,表明超声功率从 280 W 增加到 360 W 时,在冻结过程的相变阶段,冻

结速率和冻结时间缩短超过 11%。L. Bing 等^[12-14]分别在马铃薯^[12], 苹果^[13], 西兰花^[14]等的研究中也得出: 利用功率超声波能有效促进浸渍冷冻水果和蔬菜的冻结速率。

在超声波辅助冷冻的研究中, 超声波的作用方式大致分为两种: 一种是通过超声波水浴向样品传递超声波, 即浸渍冷冻; 另一种是样品本身即为液体。这是由于液体与声波间的声阻抗很低, 十分利于超声波的传播。而声能在食品组织中的传播效率并不高, 所以辅助成核的实验对象很少为固体样品。但在食品加工过程中, 很多冷冻过程是通过冷板来实现的, 因此用液体作为超声波的传播环境显然是不现实的。因此, 本文设计并制作了一种接触式超声波辅助冷冻平板, 用于固体果蔬的冷冻过程, 探索不同的超声波辅助冷冻的条件(作用功率、作用时间、作用阶段)对胡萝卜冷冻速率的影响, 优化接触式超声波辅助平板冷冻工艺参数, 为超声波辅助平板冷冻过程提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

厚 5 mm, 直径 33 mm 圆柱状新鲜胡萝卜切片, 放入冰箱待用。

1.2 实验设备

超声波辅助成核由自制的超声波平板实现, 如图 1 所示。设备由一个功率可调式超声波发生器 (THD-2010A, TAIHEDA)、4 个超声波振子以及一个不锈钢平板(长宽 20 mm, 厚度 2 mm) 组成。超声振子被均匀地固定在不锈钢平板上。通过发生器可在 0 ~ 240 W 范围内调节超声波平板的输出功率。

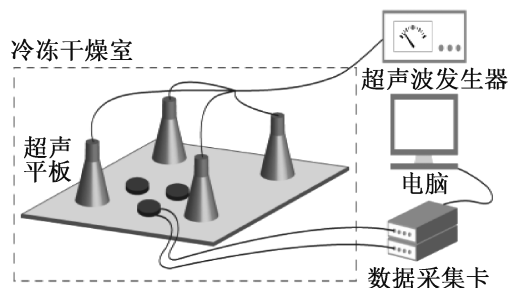


图 1 超声波平板设备图

Fig. 1 Experimental equipment for ultrasound-assisted freezing

1.3 实验方法

实验开始前, 先将超声波平板放置于冷冻干燥机内的冷板上提前预冷 2 h, 预冷温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。预冷结束后, 从冰箱取出三片胡萝卜片, 于几何中心插入

一根 T 型热电偶, 并同时置于冻干机内的超声波平板上。注意每次放置样品于平板上的位置尽量保持一致, 以保证每次实验样品所吸收的声能一致。温度采集卡每 0.5 s 采集一次数据。

当样品温度降至实验温度时向样品施加指定参数的超声波。随后, 胡萝卜样品继续冷冻至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验结束后, 保存温度数据, 取出实验样品, 进行下一组参数的实验。为了研究超声波作用的最佳参数, 实验测试了不同超声波功率、作用时间以及作用阶段对胡萝卜平板冷冻速率的影响。具体实验参数如下:

1) 超声波功率: 0 W, 122.6 W, 178.7 W, 229.8 W。超声波作用时间固定为 10 s, 作用温度 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$;

2) 超声波作用时间: 0 s, 5 s, 10 s, 15 s。超声波功率固定为 178.7 W, 作用温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3) 超声波作用阶段: 预冷段($4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), 相变段($-1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -7\text{ }^{\circ}\text{C}$), 终了段($-7\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$), 超声波作用功率和时间分别为 178.7 W 和 10 s。

相同参数下的平行实验至少重复 3 次以上, 利用绘图分析软件 (Origin 8.0) 取平行实验的平均值绘制冻结曲线。冻结速率的比较参照 T. M. Ngapo 等^[15]的方法, 将样品通过 $-1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度段的时间 t_{cf} 作为比较冷冻效率的特征参数, 因为大部分的冰晶在该温度段形成。同时样品从初始温度 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降温至 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的总耗时 t_{tf} 也被用来比较各实验组样品间的冻结速率。

2 结果与讨论

2.1 超声波作用功率对冷冻速率的影响

图 2 所示为胡萝卜样品在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 施加 10 s 不同功率 (0 W, 122.6 W, 178.7 W, 229.8 W) 的超声波后的冻结曲线。结合表 1 可得, 在 122.6 W 超声波作用下的冻结曲线和空白样品的冻结曲线基本重合, 超声组和空白组的 t_{cf} 分别为 149 s 和 145 s。当超声强度提升至 178.7 W 时, 样品的冻结速率有了显著提升 ($P < 0.05$), t_{cf} 缩减至 79 s, 而总冻结时间 t_{tf} 从空白组的 587 s 降低至 488 s。当进一步提升超声波功率至 229.8 W 时, 该组样品的冻结曲线开始呈现了与其他三组样品不同的趋势。由图可知, 在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度段, 229.8 W 的冻结曲线几乎与 178.7 W 完全重合, 但从 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始, 229.8 W 的冻结曲线的斜率开始逐渐平缓, 且这种平缓趋势的保持时间比任何一组的冻结曲线都要长, 相对应该曲线的 t_{cf} 和 t_{tf} 也是四组样品中最久的, 分别是 199 s 和 684.5 s。

空化气泡强烈震荡而产生的微射流 (micro streaming) 能显著提高传热传质速率^[16-18]。而具体

表现在超声波辅助冷冻方面,微射流可以降低冰晶与周边液体间的传热传质阻力,从而提升冻结速率^[19]。另外,瞬时空化气泡的内爆能够打破冰晶/液体界面间的热与速度边界层,降低传热阻力并在爆点周围产生剧烈的搅动^[20]。所以在 178.7 W 超声波的作用下,能够显著降低样品通过最大冰晶生成段的时间 t_{cf} ($-1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -7\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

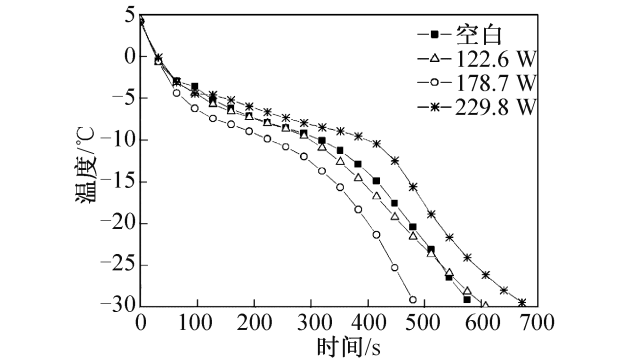


图 2 不同超声波功率对胡萝卜平板冷冻速率的影响

Fig.2 The effect of ultrasound power on plate freezing rate of carrot

表 1 不同超声波功率下胡萝卜样品的冻结时间

Tab.1 The freezing time of carrot samples under different ultrasound power

超声波功率/W	0	122.6	178.7	229.8
t_{cf}/s	149	145	79	199
t_{tf}/s	587	611.5	488	684.5

在该实验条件下,122.6 W 的超声强度不足以在样品中产生空化效应,即没有对冻结过程产生任何影响。而 229.8 W 超声波作用下的冻结曲线可明显看出 t_{cf} 和 t_{tf} 都远高于对照组,说明该功率下的超声波在样品中产生了额外的热量,延缓了冻结过程。

2.2 超声波作用时间对冷冻速率的影响

图 3 所示为在不同超声波作用时间下(0 s,5 s,10 s,15 s)胡萝卜样品的冻结曲线。其中作用温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$,超声功率为 178.7 W。如图所示,5 s 超声作用下的冻结曲线与空白曲线几乎重合,由表 2 定量可知,该组样品的 t_{cf} 为 137 s,相较于空白组 149 s 提升 12 s,说明 5 s 超声波的施加对样品的冻结过程稍有改善。而在 10 s 超声波作用下的样品其 t_{cf} 下降至 79 s,相较于对照组降低 53%,同时总冻结时间相较于对照组缩短了 99 s。当进一步提升超声波作用时间至 15 s 后,该组样品的冻结曲线比其他组平缓,其中 t_{cf} 值几乎与对照组相同为 146 s,总冻结时间 t_{tf} 为

672.5 s,比对照组增加 85.5 s。

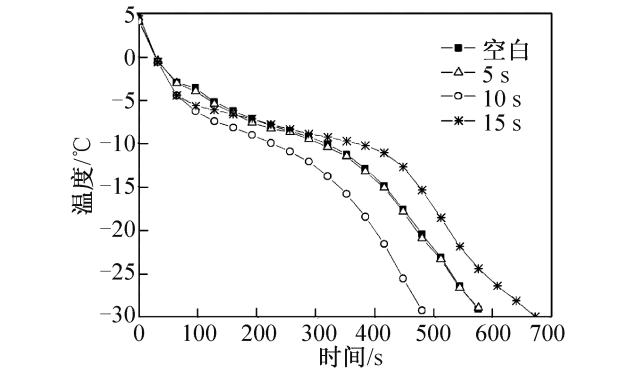


图 3 不同超声波作用时间对胡萝卜平板冷冻速率的影响

Fig.3 The effect of ultrasonic exposure time on plate freezing rate of carrot

表 2 不同超声波作用时间下胡萝卜样品的冻结时间

Tab.2 The freezing time of carrot under different ultrasonic exposure time

超声波作用时间/s	0	5	10	15
t_{cf}/s	149	137	79	146
t_{tf}/s	587	601	488	672.5

进一步对比这两组样品的 t_{cf} 时可知,5 s 超声波的作用能够缩减样品通过最大冰晶成核带的时间,而当作用时间延长至 10 s 时,效果更为显著。这是由于超声波作用时间越长,由空化效应在样品中产生搅动的时间也越长,促进换热的效果也就越持久^[21]。但过长时间的超声波如同功率过高的超声波一样,会在传播介质中产生额外的热量,若这些热量不能及时被冷源带走,多余的热量就会延缓冻结过程。因此在 15 s 超声波作用下的样品一方面由于空化效应提高了样品与冷源间的换热系数,但另一方面,长时间超声产生的多余的热量抵消了超声空化提升换热效率的作用,所以 15 s 超声作用下样品的 t_{cf} 值与对照组十分接近。

2.3 超声波作用阶段对冷冻速率的影响

图 4 所示为在不同阶段(预冷段,相变段,终了段)作用超声波对胡萝卜冻结过程的影响。当 10 s,178.7 W 超声波作用于冻结初始段时($4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)由图可知该组样品初始冻结速率是四组中最快的并且最先达到冻结温度,但相比于对照曲线, t_{cf} 由 149 s 延长至 171 s。由表 3 可知,当超声波作用于相变段($-1\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -7\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,无论是 t_{cf} 还是 t_{tf} 都大幅降低,冻结速率得到显著改善。而当超声波作用于冻结终了段时, $-7\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度段的降温速率有所提

升,但总冻结时间变化不大。

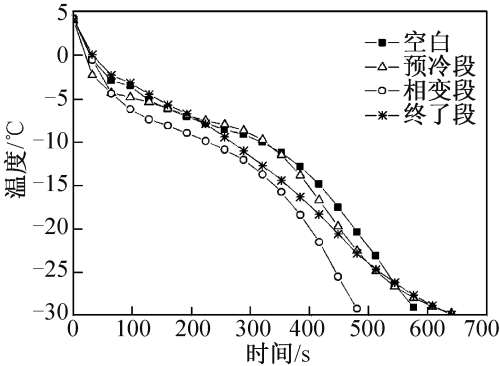


图 4 不同超声波作用阶段对胡萝卜平板冷冻速率的影响
Fig. 4 The effect of ultrasonic phase stage on plate freezing rate of carrot

表 3 不同超声波作用阶段下胡萝卜样品冻结时间
Tab. 3 The freezing time of carrot samples under different ultrasonic phase stage

超声波作用阶段	空白	预冷段	相变段	終了段
t_{cf}/s	149	171	79	153
t_{tf}/s	587	649	488	640.5

在预冷段由于水分还没有发生相变,因此该阶段只有显热被释放,而超声波的施加能够增加样品与冷板间的导热系数,提高显热的释放速度。虽然样品前期的冻结速率有所提升,但 t_{cf} 和 t_{tf} 没有得到改善,因此在预冷段施加超声波不能有效改善冻结工艺。而在相变阶段,水被冻结成冰的过程中,将有大量潜热需要被移除并且大部分冰晶将在该阶段生成,因此样品中冰晶生成的大小以及数量取决于通过该冻结阶段的时间。而越快通过该冻结阶段,被冻样品的最终质量越好^[22]。因此在该阶段施加超声波的作用,一方面由于超声振动,提高了样品与制冷介质的对流传热系数,加快了相变潜热的移除;另一方面,超声波在液体介质中产生的空化效应能有效提高冰晶的成核率,降低晶核的大小以及加快冰晶的成长速度。而当超声波作用于終了段时,虽然能够提升后期产品的降温速率,但从实验结果来看没有改善总冻结时间,因此对改善产品冻结过程的意义不大。

3 结论

本文设计了一种接触式超声波辅助平板冷冻法,并将其应用于胡萝卜的冷冻过程。分别研究了超声波的作用功率、作用时间、作用阶段等参数对胡萝卜冷冻速率的影响,结果表明:178.7 W 的超声波于相

变阶段作用 10 s,能够有效降低样品通过最大冰晶生成段的时间 t_{cf} 和总冻结时间 t_{tf} 。实验过程中,空化效应最为显著,它能够有效促进空化气泡的产生和微射流的发生。空化气泡可以作为冰核,增加冰晶的成核速率;微射流可以降低冰晶与周边液体间的传热传质阻力,提升冻结速率。因此,该接触式超声波辅助平板冷冻法能够有效提高固体样品的冷冻速率。

参考文献

[1] Xu Y X, Sismour E, Pao S, et al. Textural and microbiological qualities of vegetable soybean (edamame) affected by blanching and storage conditions[J]. Journal of Food Processing & Technology, 2012.

[2] Delgado A E, Zheng L Y, Sun D W, et al. Influence of ultrasound on freezing rate of immersion-frozen apples. [J]. Food & Bioprocess Technology, 2009, 2(3):263-270.

[3] Holzwarth M, Korhummel S, Carle R, et al. Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on color, polyphenol and ascorbic acid retention in strawberries (Fragaria × ananassa, Duch.) [J]. Food Research International, 2012, 48(1):241-248.

[4] Yu S, Ma Y, Zheng X, et al. Impacts of low and ultra-low temperature freezing on retrogradation properties of rice amylopectin during storage[J]. Food & Bioprocess Technology, 2012, 5(1):391-400.

[5] Chemat F, Zill-e-Huma, Khan M K. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4):813-835.

[6] Cárcel J A, Bon J, Sanjuán N, et al. New food drying technologies - use of ultrasound[J]. Food Science & Technology International, 2003, 9(3):215-221.

[7] Fuente-Blanco S D L, Sarabia R F D, Acosta-Aparicio V M, et al. Food drying process by power ultrasound[J]. Ultrasonics, 2006, 44 (Suppl. 1):e523-e527.

[8] Otero L, Martino M, Zaritzky N, et al. Preservation of microstructure in peach and mango during high-pressure-shift freezing[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(3):466-470.

[9] Bing L, Sun D W. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing of potatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 55(3):277-282.

[10] Comandini P, Blanda G, Soto-Caballero M C, et al. Effects of power ultrasound on immersion freezing parameters of potatoes[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 18:120-125.

[11] Hu S Q, Liu G, Li L, et al. An improvement in the im-

- mersion freezing process for frozen dough via ultrasound irradiation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(1):22-28.
- [12] Bing L, Sun D W. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing of potatoes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(3):277-282.
- [13] Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(4):311-319.
- [14] Xin Y, Zhang M, Adhikari B. The effects of ultrasound-assisted freezing on the freezing time and quality of broccoli (*Brassicaoleracea*, L. var. *botrytis*, L.) during immersion freezing[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 41(5):82-91.
- [15] 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(3):159-168.
- [16] Singh B P. Ultrasonically assisted rapid solid-liquid separation of fine clean coal particles[J]. *Minerals Engineering*, 1999, 12(4):437-443.
- [17] Simal S, Benedito J, Sánchez E S, et al. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration[J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 36(3):323-336.
- [18] Dale Ensminger, Battelle. Acoustic and electroacoustic methods of dewatering and drying[J]. *Drying Technology*, 1988, 6(3):473-499.
- [19] Zheng L, Sun D W. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes—a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2006, 17(1):16-23.
- [20] Legay M, Gondrexon N, Person S L, et al. Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances [J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011(1).
- [21] Bing L, Sun D W. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing of potatoes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(3):277-282.
- [22] Brennan J G, Butters J R, Cowell N D, et al. Food engineering operations [J]. *Food Engineering Operations*, 1976.

通信作者简介

周新丽,女,博士,副教授,上海理工大学医疗器械与食品学院,13817547878,E-mail:zjulily@163.com。研究方向:食品冷冻冷藏与冷冻干燥。

About the corresponding author

Zhou Xinli, female, Ph. D., associate professor, School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 13817547878, E-mail: zjulily@163.com. Research fields: food refrigeration and freeze-drying.