

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170381

超声波作用下液滴的冷却冻结规律

高蓬辉¹, 张梦¹, 杜玉吉^{1,2}, 程博¹, 张东海¹, 周国庆¹(¹中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; ²中节能城市节能研究院有限公司, 江苏 常州 213001)

摘要: 超声波液体辅助冻结在食品、海水淡化及冰蓄冷等方面的应用得到了广泛关注。结合声场理论, 在对液滴界面处热质传递分析的基础上, 建立了超声波作用下的液滴冷却冻结数学模型, 讨论了不同超声波频率、强度及作用时间对液滴界面处热质传递的影响, 得到了超声波作用下液滴的冷却冻结规律。结果表明: 超声波作用下界面处的传质系数随着超声波强度的增加而增大, 但随超声波频率的增加而减小; 在液滴冷却冻结过程中, 质量传递与热量传递的方向相同, 液滴的冷却冻结在超声波作用下得到了强化。在超声波频率为 20000 Hz (强度为 400 W·m⁻²), 经过相同的时间 (60 s), 超声波作用下的液滴温度比无超声作用的温度低 2.0~2.5℃。研究将有助于深入理解超声波辅助冷却冻结机理, 并为其工程应用提供了指导和参考。

关键词: 超声波; 冻结; 传质; 相变; 溶液

中图分类号: TB 66

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 11—4095—10

Cooling and freezing law for liquid drop in ultrasound wave

GAO Penghui¹, ZHANG Meng¹, DU Yuji^{1,2}, CHENG Bo¹, ZHANG Donghai¹, ZHOU Guoqing¹(¹School of Architecture and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

²China Energy Conservation and Environmental Protection City Energy Conservation Company Limited,
Changzhou 213001, Jiangsu, China)

Abstract: The application of ultrasound to liquid freezing got much attention over the last few years and its potential seems very promising. In order to make clear droplet freezing assisted by ultrasound, the heat and mass transfer characteristic was studied based on ultrasound theory, penetration theory of mass transfer and energy conservation. The ultrasound frequency, ultrasound intensity and operation time were studied in the process of the liquid drop freezing. The results showed that ultrasound could accelerate mass transfer and make droplet rapidly cooling. In the effect of ultrasound, the bubble size in the droplet was decreased with ultrasound frequency, and the bubble number in the droplet was increased with ultrasound frequency. Mass transfer coefficient of droplet was increased with ultrasound intensity and reduced with ultrasound frequency. For the mass transfer and heat transfer, the direction were same in the droplet freezing process, the heat transfer was strengthened by mass transfer in the droplet freezing process. Comparing with no ultrasound, droplet temperature with ultrasound (ultrasound frequency 20000 Hz and ultrasound intensity 400 W·m⁻²) was lower 2.0—2.5℃ after the same time (60 s). Hence the ultrasound helps to cool and freeze droplet. This study is favor to understanding the freezing by ultrasound and its application.

Key words: ultrasound; freezing; mass transfer; phase transformation; liquid

2017-04-10 收到初稿, 2017-07-06 收到修改稿。

联系人及第一作者: 高蓬辉 (1979—), 男, 博士。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51106176); 中国矿业大学学科前沿专项项目 (2015XKQY16)。

Received date: 2017-04-10.

Corresponding author: GAO Penghui, gaopenghui2004@126.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51106176) and the Subject Front Research of China University of Mining and Technology (2015XKQY16).

引 言

超声波辅助液体冻结具有促进液相冻结、控制液相晶体生长速度的作用^[1-2],并逐渐在食品工业、制冰及医学领域中得到了广泛应用^[3-5]。超声波分为两种,一种为高频低能的诊断超声波($100 \times 10^4 \sim 3000 \times 10^4$ Hz);另一种为低频高能的功率超声波($2 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4$ Hz),用于强化溶液结晶。超声波强化液相结晶主要是通过超声波在液相中引起的机械空化效应产生作用,并影响冰晶的成核和发展。

近年来对超声波作用下液体冻结的研究受到了广泛的关注。余德洋等^[6-8]通过超声结晶实验分析了超声波作用下的液体结晶成核,明确超声空化效应是影响溶液结晶的主要因素。文献[9-12]中利用低温电镜等手段分析了超声波作用参数对冰晶尺寸、冻干速率以及溶液强化冻结的影响,分析表明超声波能够有效强化晶核的生成,对溶液的冻结过程起到促进作用。王全海^[13]、Saclier 等^[14]和 Jordens 等^[15]从水的结晶理论出发研究了超声波对结晶成核及过程的影响,结果表明超声波具有细化晶粒的作用和促进晶核生成的作用。Inada 等^[1]、Gondrexon 等^[16]和 Wohlgemuth 等^[17]进一步通过实验观察研究了超声波作用下水冻结的过程,表明超声振动是影响冻结相变的主要因素,但没有进行相关的理论分析。Fen 等^[18]对除气水和未除气水在超声波作用下的冷冻过程进行了研究,结果表明未除气水在超声波作用下冰晶更易生成。同时,文献[19-22]中分析研究了超声波作用下冰晶成核温度对冰晶的一次成核、二次成核以及冻结的影响,以实现冻结状态的控制。对于冻结过程,如何通过加载超声波实现对冰体生成速度和结构的控制,成为制冰、冷冻法海水淡化及食品工业中所关注的问题之一。上述对超声波作用下溶液冻结的研究,明确了空化效应对溶液冻结的效果和作用,但未揭示超声波对溶液冻结的内部作用机制,未从冻结自身所必须满足的能量角度对冻结过程进行分析讨论。

本研究将在声场理论的基础上,结合超声波在溶液内的空化效应,通过对液滴冻结过程中热质传递的分析,在能量平衡的基础上建立超声波作用下液滴冷却冻结的数学模型,并由此讨论不同超声波频率、强度及作用时间对液滴冷却冻结的影响,为深入理解超声波辅助冷却冻结机理及工程应用提供理论基础和指导。

1 超声波作用下的液滴冻结过程及数学模型

1.1 声场作用下的传质过程

在超声波作用下,液滴内部由于空化效应将产生大量的气泡,而气泡在液滴表面处溢出将有助于界面处的热质传递过程,从而影响液滴的冻结过程。在液滴冻结过程中,热量传递的方向为从液滴内部向液滴外部;传质的方向为由内到外,两者方向一致,传质强化了传热,将有助于液滴的冻结。超声波作用下液滴内气泡的溢出见图 1。

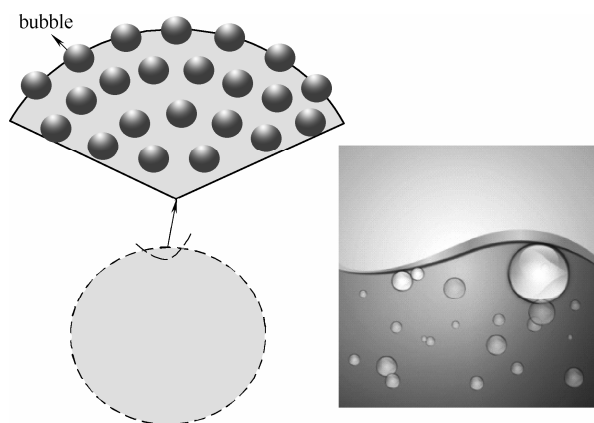


图 1 液滴内气泡的溢出

Fig.1 Bubbles escaping from liquid surface

空化效应是由于声波在液相中传播时产生正负压交替变化,而介质中的裂隙由此产生,当压力为正时,迅速合并湮没;压力为负时,迅速膨胀^[23]。在分析液滴冻结过程中,认为气泡为球形且分布均匀。

超声波作用在液相上的压力变化为

$$p_a = p_A \sin \omega t \quad (1)$$

超声波角频率 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ 。

超声波强度为

$$I = \frac{p_A^2}{2\rho c} = \frac{P}{S'} \quad (2)$$

超声波作用下液体内在空化效应作用下产生气泡的最大和最小半径分别为 $R_{\max}$ 与 $R_{\min}$ ^[14], $R_{\max}$ 可由式(3)获得

$$\omega^2 \rho R_{\max}^2 = 3\gamma \left(p_A - \frac{2\sigma}{R_{\max}} \right) \quad (3)$$

$R_{\min}$ 可由式(4)获得

$$R_{\min}^3 + \frac{2\sigma}{p_h} R_{\min}^2 - \frac{32\sigma^3}{27p_h(p_h - p_A)} = 0 \quad (4)$$

超声波空化效应产生的气泡数为^[24]

$$n = \frac{1}{2} Af \left(\frac{1}{R_{\min}^2} - \frac{1}{R_{\max}^2} \right) \quad (5)$$

式中, A 是常数 (10^{-10})。

考虑到所有气泡溢出是不可能的, 令 φ 为界面处气泡的溢出率, 因此在液体界面处溢出的气泡数为

$$N = \frac{1}{2} Af \varphi \left(\frac{1}{R_{\min}^2} - \frac{1}{R_{\max}^2} \right) \quad (6)$$

当一个气泡离开液体表面时, 所引起的表面更新面积为

$$\Delta S = \pi \bar{R}^2 = \pi \left(\frac{R_{\min} + R_{\max}}{2} \right)^2 \quad (7)$$

由式(6)、式(7), 可得总的表面更新面积为

$$S_N = N \Delta S = \frac{1}{2} A \varphi \pi f \left(\frac{1}{R_{\min}^2} - \frac{1}{R_{\max}^2} \right) \left(\frac{R_{\min} + R_{\max}}{2} \right)^2 \quad (8)$$

根据 Fick 定律, 液滴界面处的质量传递满足

$$\begin{aligned} m_A &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \sqrt{\frac{D}{\pi \tau}} (C_w - C_{Af}) d\tau \\ &= 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \tau}} (C_w - C_{Af}) = h_{ms} (C_w - C_{Af}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, C_w 为界面处的水蒸气浓度; C_{Af} 为计算位置处的水蒸气浓度。

根据表面更新理论及文献[25-26]中对传质系数的计算, 可得液滴表面对流传质系数为

$$h_{ms} = 2 \sqrt{\frac{Df}{\pi}} \quad (10)$$

在式(9)、式(10)中, 超声波作用下可以认为 $\tau_c = 1/f$ 。

球状液滴表面的对流传质系数为^[27]

$$h_m = \frac{(2 + 0.6 \times Sc^{1/3} \times Re^{1/2}) D}{2R_L} \quad (11)$$

因此, 液滴表面的对流传质系数可以认为由两部分组成: 一部分为气泡溢出引起的部分, 可以采用式(10)进行计算; 其他部分采用式(11)计算。总的液滴表面的对流传质系数为

$$H_m = h_{ms} \phi + h_m (1 - \phi) \quad (12)$$

式中, ϕ 为液滴表面更新比例, $\phi = S_N / S_L$, S_L 为液滴外表面, $S_L = 4\pi R_L^2$ 。

1.2 声场作用下的液滴冻结模型

液滴与周围环境的对流传热系数为^[27-28]

$$h = \frac{(2 + 0.6 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3}) \lambda}{2R_L} \quad (13)$$

超声波在介质中传播时存在热效应, 可表示为^[29]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\alpha I}{\rho c_p} \quad (14)$$

式中, α 为吸声系数, $\alpha = 0.26f^{1.1}$ 。

超声波作用下液滴冻结过程物理模型见图 2, 液滴初始半径为 R_0 , 随着液滴的冻结过程的进行, 液滴半径逐渐缩小至 R_f 。超声波作用下液滴的冻结过程从液滴外部逐渐向内部冻结, 超声波热效应产生的热量为 $\frac{dV_f}{dt} c_s \rho_s \frac{dT}{dt}$, 这一过程的能量平衡方程为

$$\frac{dV_f}{dt} \rho_s L_f + \frac{dV_f}{dt} \rho_s c_s \frac{dT}{dt} = h(T_d - T_a) + L_c H_m (\rho_{vas} - \rho_{va}) \quad (15)$$

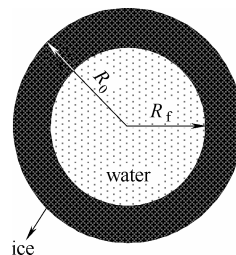


图 2 超声波作用下液滴冻结物理模型

Fig.2 Physical model of droplet freezing

2 超声波对液滴冻结模拟结果及分析

为了揭示超声波对液滴冻结过程的影响, 先后分别对不同频率、强度的超声波作用下, 液滴内气泡数、气泡半径、液滴表面更新比、液滴冻结半径等的变化规律进行了分析研究。在分析计算过程中主要计算参数见表 1。

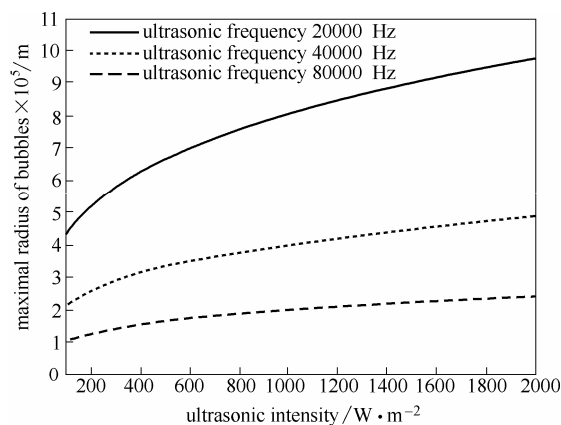
表 1 计算中的主要参数

Table 1 Main parameters in calculation

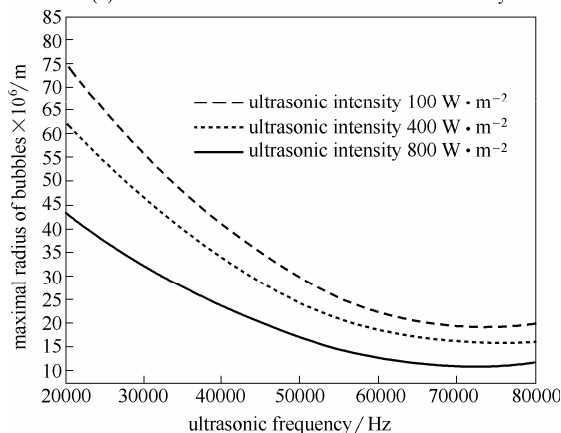
Parameter	Value
ambient temperature, $T_a/^\circ\text{C}$	-10
overflow rate, ϕ	0.1
thermal conductivity (water), $\lambda/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.55
air velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.08
hydrostatic pressure, p_0/Pa	1.0×10^5
initial droplet temperature, $T_d/^\circ\text{C}$	10
molecular diffusion coefficient, $D/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	0.000022
droplet radius /m	0.004

超声波强度和频率对液滴内气泡最大半径的影响见图 3。图 3(a)、(b)表明在一定的超声波频率下, 液滴内在超声波作用下产生的气泡最大半径随着超声波强度的增大而增大; 气泡最大半径在相同的超声波强度下, 随着超声波频率的增强而减小。原因为超声波强度有利于气泡的生成发展, 而超声

波频率的增大将导致作用在液滴内的压力发生较快的变化, 导致气泡更加剧烈地相互碰撞湮没, 从而使气泡半径减小。因此在超声波辅助冻结中, 为了强化界面处的传质进而促进冻结, 应选择低频高强度的超声波。



(a) bubble radius variation with ultrasound intensity



(b) bubble radius variation with ultrasound frequency

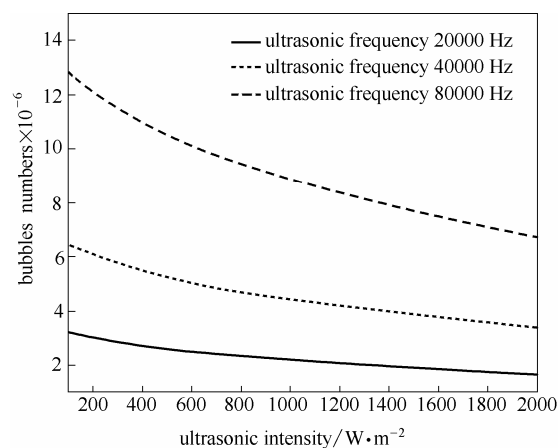
图 3 不同超声波强度和频率下液滴内气泡的最大半径

Fig.3 Maximal bubbles radius in different ultrasound intensity and ultrasound frequency

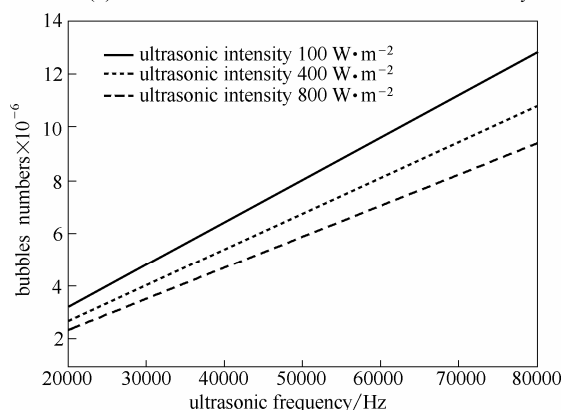
不同超声波强度和频率对液滴内气泡数的影响见图 4。从图 4(a)可以看出在一定的超声波频率下, 随着超声波强度的增加, 液滴内产生的气泡数在下降; 而在一定的超声波强度下, 随着超声波频率的增加, 气泡数在增加。因为在一定的超声波频率下, 高强度超声波强化了气泡的碰撞湮没, 从而使气泡数下降; 而超声波强度一定时, 高频超声波导致压力发生较快的变化, 从而使液滴内气泡数增加。

图 5 给出了不同超声波频率和强度下, 液滴表面更新率的变化规律。从图 5 可以看出, 在一定的超声波频率下, 随着超声波强度的增大, 液滴表面更新率逐渐增加; 当超声波频率增大时, 表面更新

率下降。总体来说, 液滴表面更新率与液滴内气泡数的多少相关, 气泡数越多, 液滴表面更新率越大; 气泡数越少, 液滴表面更新率越小。



(a) bubble numbers variation with ultrasound intensity



(b) bubble numbers variation with ultrasound frequency

图 4 不同超声波强度和频率对液滴内气泡数的影响

Fig.4 Bubbles numbers in different ultrasound intensity and ultrasound frequency

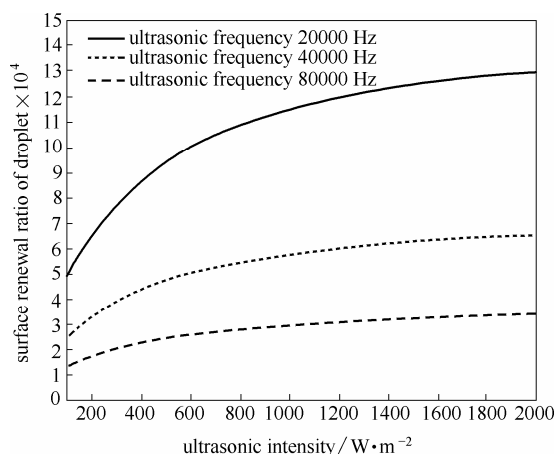


图 5 不同超声波强度对液滴表面更新率的影响

Fig.5 Variation of surface renewal ratio in different ultrasound intensity

图 6 给出了超声波对液滴表面传质系数的影响。从图中可以发现, 超声波作用下液滴表面的传质得到了强化, 当超声波频率为 20000 Hz、强度为 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 液滴表面对流传质系数为 $0.0122 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 比无超声波作用时液滴表面对流传质系数要大。原因在于超声波能够强化液滴表面气泡的脱离, 从而促进液滴表面的传质, 使得液滴表面的传质系数增加。

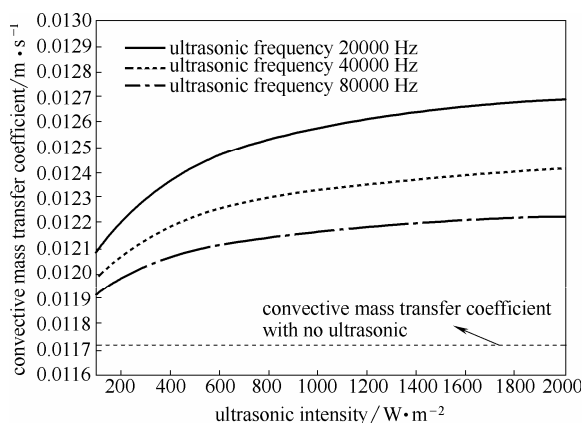


图 6 超声波对液滴表面传质系数的影响

Fig.6 Variation of convective mass transfer coefficient in different ultrasonic intensity

为了反映出超声波导致的传质引起的传热占全部传热量的份额, 引入 $\psi = q_m / (q_h + q_m)$ 表示。

图 7 给出了由超声波引起的传质而导致的传热量占总传热量的比例, 从图中可以看出, 当超声波频率为 20000 Hz、超声波强度为 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, $\psi = 0.1695$; 当超声波频率为 80000 Hz、超声波强度为 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, $\psi = 0.1645$ 。表明超声波引起的质扩散导致的传热量占总传热量的 16% 左右, 说明在液滴冻结过程中加载超声波将有助于液滴的冻结。

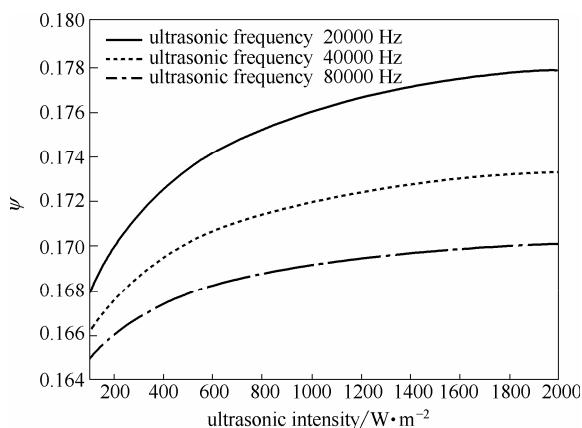


图 7 超声波引起的传质导致的传热量占全部传热量的份额

Fig.7 Proportion between heat quantity by mass transfer and total heat

从图 8 可以看出超声波作用下液滴的温度比无超声波作用下的液滴温度下降得快, 说明超声波作用强化了液滴表面的传质, 由于传质与传热同向, 传质强化了传热, 因此超声波作用下液滴的温度下降速度要比无超声波时快。

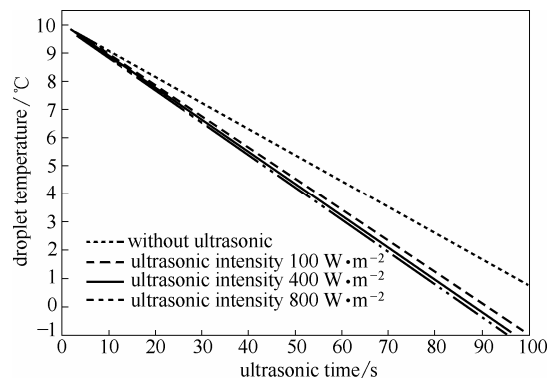


图 8 超声波与无超声波作用下液滴的温度变化规律

Fig.8 Variation of droplet temperature in effect of ultrasonic and un-ultrasonic

当液滴的半径为 0.004 m 、液滴初始温度为 10°C 、超声波频率为 20000 Hz 时, 图 8 给出超声波和无超声波作用下液滴的温度变化规律; 当超声波(超声波强度为 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 作用时间为 30 s 时液滴的温度比无超声波作用的液滴温度低约 1.0°C , 当超声波(超声波强度为 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 作用时间为 60 s 时液滴的温度比无超声波作用低 1.9°C , 当超声波作用时间为 90 s 时液滴的温度比无超声波作用低 2.5°C 。

图 9 给出了超声波频率为 20000 Hz、超声波强度为 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 不同大小液滴在超声波作用下的温度变化规律。从图 9 可以看出, 液滴半径为 0.01 m 经过 200 s 后, 温度从 10°C 下降至 0.4°C ; 液滴半

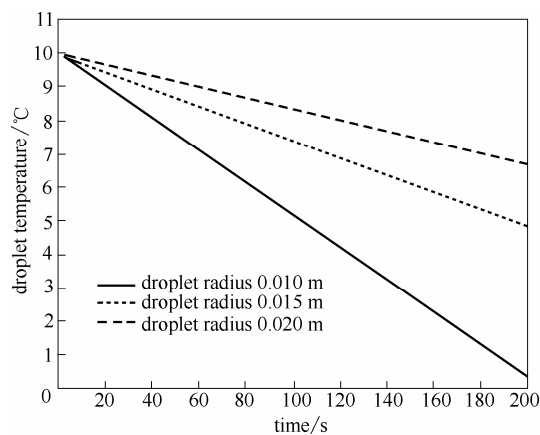


图 9 超声波作用下液滴温度的变化规律

Fig.9 Variation of droplet temperature with time

径为 0.015 m 时, 温度从 10℃ 下降至 5.1℃; 液滴半径为 0.02 m 时, 温度从 10℃ 下降至 7.2℃。说明在相同的超声波作用下, 液滴半径越小, 越有利于液滴的快速降温冻结。

超声波作用下液滴的冻结过程是从液滴外表逐渐向里发展, 直至完全冻结。图 10 给出了当超声波频率为 20000 Hz、超声波强度为 $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、液滴外气流速度为 $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 在液滴冻结过程中液滴内部液固界面的渐变规律。从图 10 可以看出, 随着液滴半径的减小, 冻结时间也减小。液滴半径为 0.01 m, 液固界面经过 50 s 可以发展至液滴中心位置; 液滴半径为 0.015 m, 液固界面经过 220 s 可以发展至液滴中心位置; 液滴半径为 0.02 m, 需要经过 630 s 液固界面可以发展至液滴中心位置。

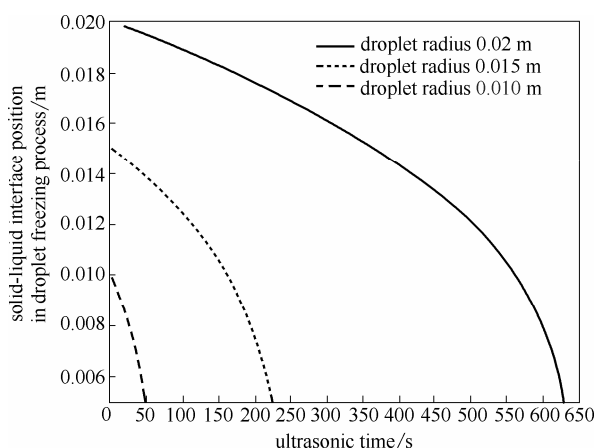


图 10 不同大小液滴在冻结过程中液固界面的渐变规律

Fig.10 Solid-liquid interface position in droplet freezing process for different droplet radius

图 11 给出了当超声波频率为 20000 Hz、超声波强度 $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、液滴半径为 0.02 m 时, 液滴冻结过程中液滴内液固界面的渐变规律。从图 11 中可以发现, 外部气流速度为 $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 液固界面经过 200 s 可以发展至液滴中心位置; 外部气流速度为 $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 液固界面需经过 600 s 才可以发展至液滴中心位置。说明增加外部气流速度可以强化液滴的冻结过程。

在液滴半径为 0.02 m, 当超声波频率为 20000 Hz、液滴外部气流速度为 $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 不同超声波强度下, 液滴内部液固界面的渐变规律见图 12。从图可以看出, 不同超声波强度下, 液滴内液固界面的渐变曲线非常接近, 表明在超声波辅助冻结工程应用中, 应采取低强度超声波。

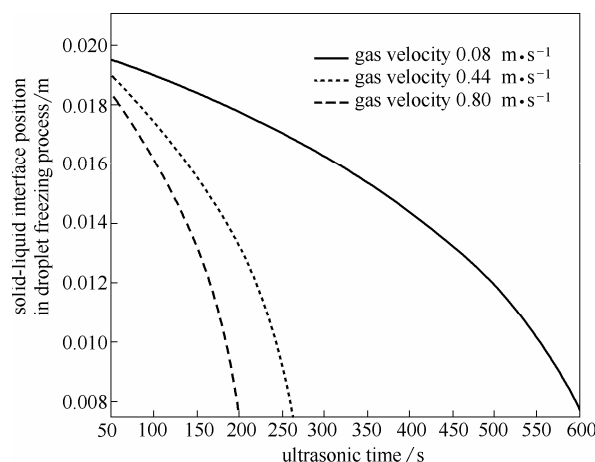


图 11 不同外部气流速度对液滴冻结过程中液固界面的影响

Fig.11 Solid-liquid interface position in droplet freezing process for different gas velocity

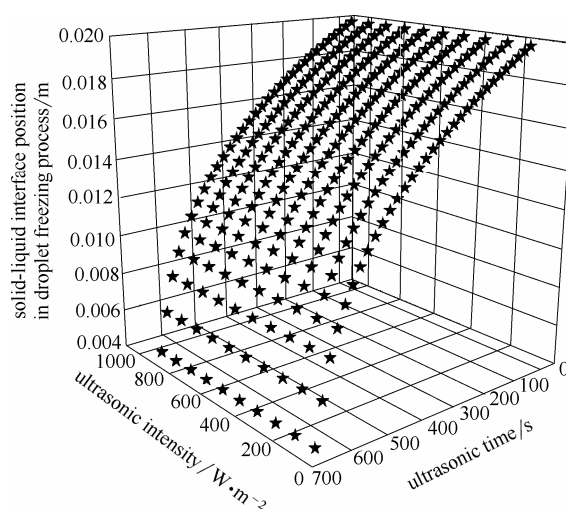


图 12 不同超声波强度对液滴冻结过程中液固界面的影响

Fig.12 Solid-liquid interface position in droplet freezing process for different ultrasonic intensity

3 超声波作用下的液滴冻结实验

超声波作用下液滴的冻结实验系统, 见图 13。实验系统中: 恒温恒湿箱(1)尺寸为 $300 \text{ mm}\times 300 \text{ mm}\times 400 \text{ mm}$, 液滴被置于热电偶(4)上, 通过热电偶(4)可以获得液滴的温度变化。液滴的状态可以通过高度摄像机(7)和电子显微镜(8)进行观察。温度传感器(2)用来测量恒温恒湿箱(1)中的温度, 不同频率和强度的超声波由超声波发生器(11)来提供。

实验过程中, 液滴半径大小为 $0.01\sim 0.02 \text{ m}$, 恒温恒湿箱中环境温度为 -10.0°C , 考虑到液滴温度的测量是在恒温恒湿箱中进行, 实验过程中由于液滴初始温度为 10.0°C , 液滴与恒温恒湿箱体环境之

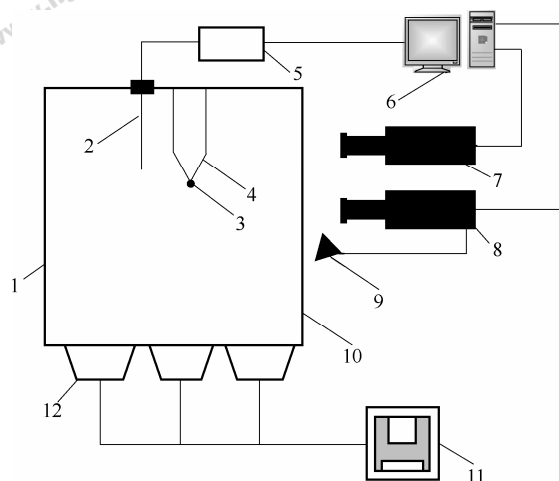


图 13 超声波作用下的液滴冻结实验系统

Fig.13 Droplet freezing system by ultrasound

1—constant temperature and humidity box; 2—temperature sensor;
3—droplet; 4—thermocouple; 5—transmitter; 6—computer; 7—high-speed
camera; 8—electron microscope; 9—light source; 10—glass; 11—ultrasonic
generator; 12—ultrasonic vibrator

表 2 主要测试仪器参数

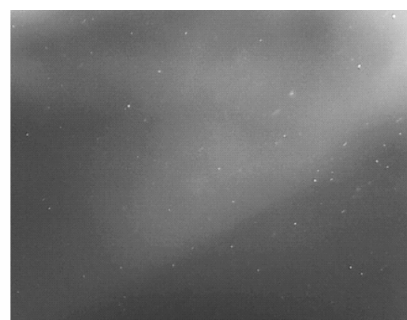
Table 2 Technical specification of instrumentations & devices used in experiment system

Experimental instrument	Measuring range	Test accuracy
constant temperature and humidity unit /TLL-100	-40—100℃	±0.5℃
thermocouple /WRC	-40—350℃	±1.0℃
temperature sensor /TH200	-40—180℃	±0.2℃
high-speed camera /FASTCAM	15000 frame·s ⁻¹	
electron microscope /SK2700	5×10 ⁵ pixels, magnified 2000 times	
ultrasonic generator	ultrasonic intensity 0—6000 W·m ⁻² , ultrasonic frequency 20—100 kHz	

间存在温差传热, 进而引起周围空气的微运动, 因此针对实验工况的理论分析中将液滴周围的气流速度选取为 0.005 m·s⁻¹。实验过程中, 液滴周围超声波强度通过 TD-YP0511C 进行测量, 实验过程中的主要测试仪器参数见表 2。

对超声波和无超声波作用下液体中的气泡进行了观测, 见图 14。从图 14 可以看出, 在超声波和无超声波作用下液体的状态是不同的, 超声波作用下液体中产生的气泡数明显多于无超声波作用的。原因在于超声波空化效应有助于液体中气泡的生成。

为了理解超声波作用下的冻结机理, 利用放大倍数 300 倍的显微镜对超声波频率为 20000 Hz 和无



(a) state without ultrasound



(b) state with ultrasound(ultrasound frequency 20000 Hz)

Fig.14 超声波和无超声波作用下液体中的气泡

Fig.14 Bubbles in liquid without ultrasound and with ultrasound

超声波作用时液滴的冻结进行了对比观测, 见图 15、图 16。从图 15、图 16 的对比来看, 超声波作用下能够明显观测到液体中的气泡, 而无超声波作用的液滴内气泡较少 (较为平静)。在此过程中, 液滴外表面处的传质与液滴的传热方向一致 (均为由内到外), 因此传质强化了传热, 有利于液滴的冷却冻结。

为了验证超声波冻结理论模型的正确性, 选取液滴温度的变化来反映超声波作用下液滴的冻结过程, 对超声波作用下液滴 (液滴半径分别为 0.01 和 0.015 m) 冻结过程中的温度变化进行了理论和实验对比, 并给出了无超声波作用时液滴的温度变化见图 17。从图 17 可以看出, 理论曲线与实验测量值吻合, 当液滴半径为 0.01 m 时, 理论值和实验值的平均误差为 18.3%; 与无超声波作用的液滴温度变化相比, 超声波能够明显加快液滴的冷却冷冻冻结, 在此过程中当时间为 160 s 时, 超声波作用下的液滴温度 (实验值) 比无超声波作用下的液滴温度 (实验值) 低 3.13℃; 当液滴半径为 0.015 m 时, 理论值和实验值的平均误差为 10.2%; 在此过程中当时间为 160 s 时, 超声波作用下的液滴温度 (实验值) 比无超声波作用下的液滴温度 (实验值) 低 1.65℃。这一对比表明了超声波作用下的热质传递及冻结模

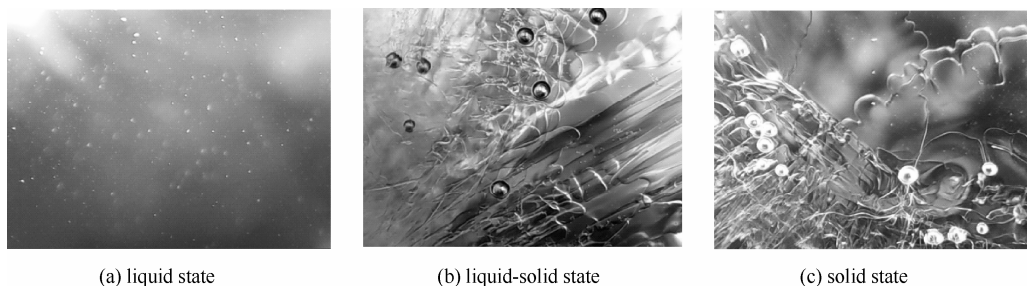


图 15 超声波作用下液滴的冻结状态

Fig.15 State variation in freezing process with ultrasound

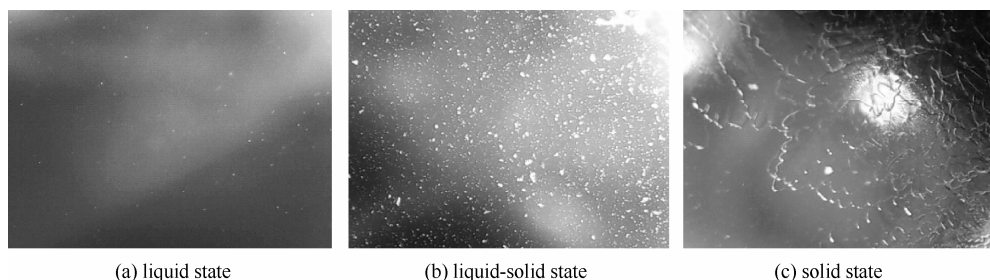


图 16 无超声波作用下液滴的冻结状态

Fig.16 State variation in freezing process without ultrasound

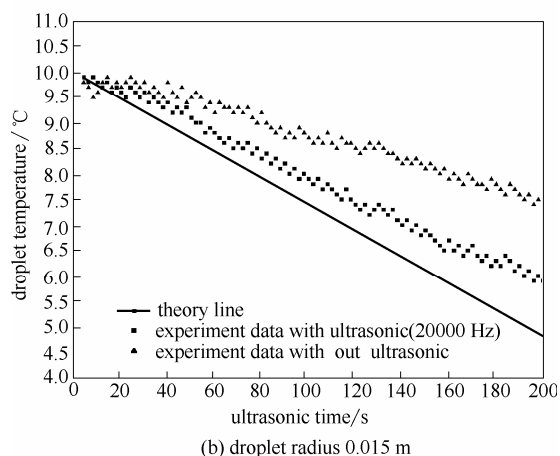
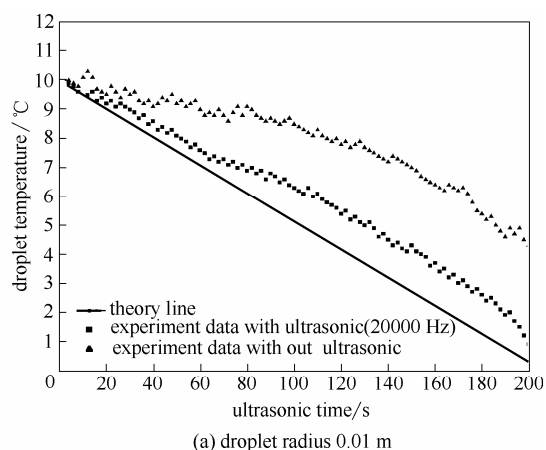


图 17 超声波作用下液滴温度的变化

Fig.17 Variation of droplet temperature with time in ultrasound intensity $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

型的正确性, 可以利用该模型来对超声波作用下的液体冻结相关工程应用进行分析与指导。

4 结 论

结合声场理论, 在对超声波作用下液滴冷却冻结过程中界面处热质传递分析的基础上, 建立了超声波作用液滴的冷却冻结模型, 通过分析得到了超声波作用下液滴的冷却冻结规律, 结论如下。

(1) 超声波空化效应有助于溶液界面处的传质, 由于在冷却冻结过程中与传热方向一致, 强化了传热从而有利于液滴的冷却冻结;

(2) 超声波作用下液滴界面处的传质系数随着超声波强度的增加而增大, 但随超声波频率的增加而减小;

(3) 由超声波导致的传质引起的传热占总传热量份额为 15%~18%。当超声波频率为 20000 Hz、超声波强度为 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 超声波引起的强化传热效果为 $\psi=0.1695$;

(4) 当超声波频率为 20000 Hz、超声波强度为 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 经过相同的时间 (60 s 后), 超声波作用下液滴的温度比无超声作用液滴的温度低约 $2.0 \sim 2.5^\circ\text{C}$;

(5) 相同频率超声波下, 超声波强度对液滴冷却冻结的影响不明显; 与高频超声波相比, 低频超声波更有利于溶液液滴的冷却冻结。

符 号 说 明

C_{Af} ——计算位置处的水蒸气浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 C_w ——界面处的水蒸气浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 c ——声波速率, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 D ——分子扩散系数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
 f ——超声波频率, Hz
 I ——超声波强度, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
 L_e ——蒸发潜热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
 L_f ——凝固潜热, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
 n ——气泡数
 P ——超声波功率, W
 p_A ——超声波压力 (振幅), Pa
 p_a ——超声波作用在液相上的压力, Pa
 p_h ——流体静压, Pa
 R ——半径, m
 S' ——超声波作用面积, m^2
 S_L ——液滴外表面, m^2
 T ——温度, K
 T_a ——环境温度, K
 T_d ——液滴的温度, K
 t ——超声波作用时间, s
 λ ——热导率, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 ν ——运动黏度, $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$
 ρ ——密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 ρ_{va} ——周围环境水蒸气浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 ρ_{vas} ——液滴表面水蒸气浓度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 σ ——表面张力, $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
 τ_c ——暴露时间, s
 φ ——界面处气泡的溢速率
 ϕ ——液滴表面更新比例
 ω ——超声波角频率, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

下角标

L ——液滴
 max ——最大
 min ——最小

References

- [1] INADA T, ZHANG X, YABE A, *et al.* Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration (I): Control of freezing temperature[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, **44**(23): 4523-4531.
- [2] KIANI H, ZHANG Z H, DELGADO A, *et al.* Ultrasound assisted nucleation of some liquid and solid model foods during freezing[J]. Food Research International, 2011, **44**(9): 2915-2921.
- [3] OLMO A, BAENA R, RISCO R. Use of a droplet nucleation analyzer in the study of water freezing kinetics under the influence of ultrasound waves[J]. International Journal of Refrigeration, 2008, **31**(2): 262-269.
- [4] KIANI H, ZHANG Z H, SUN D W. Effect of ultrasound irradiation on ice crystal size distribution in frozen agargel samples[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, **18**(2): 126-131.
- [5] AMIRA J H, ROMAN P, PIERRE L. Ultrasonically triggered freezing of aqueous solutions: influence of initial oxygen content on ice crystals' size distribution[J]. Journal of Crystal Growth, 2014, **402**(9): 78-82.
- [6] YU D Y, LIU B L, WANG B C. The effect of ultrasonic waves on the nucleation of pure water and degassed water[J]. Ultrason Sonochem, 2012, **19**(3): 459-463.
- [7] 余德洋, 刘宝林, 王伯春. 超声场中声压与空化对冰晶分裂的影响[J]. 制冷学报, 2011, **32**(6): 30-34.
YU D Y, LIU B L, WANG B C. The effect of acoustic pressure and cavitation on the secondary nucleation of ice[J]. Journal of Refrigeration, 2011, **32**(6): 30-34.
- [8] 余德洋. 超声波强化溶液冻结的机理研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2012.
YU D Y. The study on the mechanism of enhancement of solution crystallization by power ultrasound[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2012.
- [9] 周新丽, 腾芸, 戴澄. 超声波平板冷冻提高胡萝卜冻干速率[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(1): 256-261.
ZHOU X L, TENG Y, DAI C. Contact ultrasound freezing improving freeze drying rate of carrot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(1): 256-261.
- [10] XU B G, ZHANG M, BHANDARI B, *et al.* Influence of power ultrasound on ice nucleation of radish cylinders during ultrasound-assisted immersion freezing[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, **46**(1): 1-8.
- [11] GIELEN B, KUSTERS P, JORDENS J, *et al.* Energy efficient crystallization of paracetamol using pulsed ultrasound[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2017, **114**(1): 55-66.
- [12] LOUHI-KULTANEN M, KARJALAINEN M, RANTANEN J, *et al.* Crystallization of glycine with ultrasound[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2006, **320**(1): 23-29.
- [13] 王全海. 过冷水动态结晶的超声机理研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
WANG Q H. The study on the mechanism of enhancement of supercooled water crystallization by power ultrasound[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.
- [14] SACLIER M, PECZALSKI R, ANDRIEU J. A theoretical model for ice primary nucleation induced by acoustic cavitation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, **17**(17): 98-105.
- [15] JORDENS J, GIELEN B, BRAEKEN L, *et al.* Determination of the effect of the ultrasonic frequency on the cooling crystallization of paracetamol[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2014, **84**(84): 38-44.
- [16] GONDREXON N, CHEZE L, JIN Y, *et al.* Intensification of heat and mass transfer by ultrasound: application to heat exchangers and membrane separation processes[J]. Ultrasonic Sonochemistry, 2015, **25**(1): 40-50.
- [17] WOHLGEMUTH K, KORDYLLA A, RUETHER F, *et al.* Experimental study of the effect of bubbles on nucleation during batch cooling crystallization[J]. Chemical Engineering Science, 2009, **64**(19): 4155-4163.

- [18] FEN H, SUN D W, GAO W H, *et al.* Effects of pre-existing bubbles on ice nucleation and crystallization during ultrasound-assisted freezing of water and sucrose solution[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, **20**(4): 161-166.
- [19] MORRIS G J, ACTON E. Controlled ice nucleation in cryopreservation - a review[J]. *Cryobiology*, 2013, **66**(2): 85-92.
- [20] GEIDOBLE R, WINTER G. Controlled ice nucleation in the field of freeze drying: fundamentals and technology review[J]. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 2013, **85**(2): 214-222.
- [21] PETZOLD G, AGUILERA J M. Ice morphology: fundamentals and technological applications in foods[J]. *Food Biophysics*, 2009, **4**(4): 378-396.
- [22] SEARLES J A, CARPENTER J F, RANDOLPH T W. The ice nucleation temperature determines the primary drying rate of lyophilization for samples frozen on a temperature-controlled shelf[J]. *Pharmaceutical Sciences*, 2001, **90**(7): 860-871.
- [23] ZHENG L Y, SUN D W. Innovative applications of power ultrasound during food freezing process-a review[J]. *Trends in Food Science and Technology*, 2006, **17**(1): 16-23.
- [24] WALTON A J, REYNOLDS G T. Sonoluminescence[J]. *Advance in Physics*, 1984, **33**(6): 595-660.
- [25] 高蓬辉, 纪邵斌, 衡文佳, 等. 湿度差驱动下溶液蒸发冷冻过程中冰体的发展规律[J]. *化工学报*, 2013, **64**(8): 2820-2826.
GAO P H, JI S B, HENG W J, *et al.* Icing evolution in process of liquor evaporation-refrigeration driven by humidity difference[J]. *CIESC Journal*, 2013, **64**(8): 2820-2826.
- [26] 高蓬辉, 衡文佳, 周兴业, 等. 临界条件(0℃)下溶液蒸发冷冻过程中的传质规律[J]. *化工学报*, 2013, **64**(9): 3206-3212.
GAO P H, HENG W J, ZHOU X Y, *et al.* Mass transfer of liquor in evaporation-refrigeration process under critical condition[J]. *CIESC Journal*, 2013, **64**(9): 3206-3212.
- [27] SPENGLER J D, GOKHALE N R. Freezing of freely suspended, supercooled water drops in a large vertical wind tunnel[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, **11**(11): 1101-1107.
- [28] HINDMARSH J P, RUSSELL A B, CHEN X D. Experimental and numerical analysis of the temperature transition of a suspended freezing water droplet[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, **46**(7): 1199-1213.
- [29] MASON T J, LORIMER P J. *Sonochemistry: Theory, Application and Uses of Ultrasonic in Chemistry*[M]. New York: Ellis Horwood Press, 1988: 96-132.