

文章编号: 1674-5566(2020)04-0602-09

DOI:10.12024/jsou.20191102844

不同送风和载物方式作用下冲击式速冻设备中虾仁冻结过程的比较

舒志涛^{1,2,3}, 谢晶^{1,2,3}, 杨大章^{1,2,3}, 陈聪^{1,2,3}

(1. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306)

摘要:以明虾虾仁为研究对象,利用数值模拟结合实验验证的方法,研究两种送风方式(单侧送风和双侧送风)和两种载物方式(板带载物和网带载物)对虾仁冻结过程的影响,找到使虾仁冻结时间最短的送风和载物方式。研究发现:对于虾仁冻结来说,采用双侧送风+网带载物可以使虾仁表面流场流速更大,有利于提高换热效率,减少虾仁冻结时间,相对于其他送风方式和载物方式来说可缩短虾仁冻结时间的 14%~25%;双侧送风有助于低速侧形成提高虾仁下表面流速的涡流,而网带载物可以避免在虾仁下侧面与网带交界处以及虾仁头部形成射流“真空区”,上述均有助于提高虾仁表面风速,缩短虾仁冻结时长;但是冻结速度越快,虾仁冻结均匀性则越差。在本次实验中,虾仁内外最大温差出现在实验组 D(双侧送风+网带载物),最大温差可达 13.02℃。

关键词:冻结食品;冲击式速冻技术;数值模拟;冻结速度

中图分类号: S 983; TS 205.7 **文献标志码:** A

速冻食品最早起源于 20 世纪 60 年代的美国,因为具有安全、方便、卫生和贮藏时间长等优点,受到了人们的广泛关注。现在,随着人们生活节奏的不断加快,消费者对速冻食品的需求量越来越大,对速冻食品品质的要求也越来越高^[1-2],在这样的市场背景推动下,商家对速冻技术和设备的要求也在不断提高。如何加快冻结速度、提高冻品质量和产量成为目前研究的焦点。

冲击式速冻技术利用高速低温的射流冲击食品表面,加快了食品冻结速度,减小了食品冻结过程中的干耗,是目前最先进的速冻技术之一^[3-4]。但高速的射流也使得冲击式速冻设备换热区内的流场均匀性大大下降,提高了横流方向风速,对换热效率和速冻设备能效比(COP)产生不利影响^[5]。VINZE 等^[6]研究了不同喷嘴形状对冲击射流换热强度的影响,研究发现圆形喷嘴喷出的冲击射流换热强度高于方形和三角形喷嘴。

GU 等^[7]对比了不同入口压力对板带表面换热强度的影响,发现随着入口压力的不断增加,板带表面的平均努塞尔数明显增加,换热强度提高。WAE-HAYEE 等^[8]对比了喷嘴排布对冲击射流阵列流动和换热特性的影响,研究发现在 5 000~13 400 雷诺数内,喷嘴线性排布的板带表面平均努塞尔数比交错排布高出约 13%~20%。

综上所述,以往的研究通过改变喷嘴结构、喷嘴排布和设备入口压力等因素研究冲击式速冻技术对设备板带换热情况的影响,进而对设备的结构以及运行条件进行优化,但未对设备的送风方式(单侧送风和双侧送风)和载物方式(板带载物和网带载物)这两个因素进行研究,并且也未通过设备内食品的冻结过程来对其进行研究。因此,本文利用数值模拟结合实验验证的方法研究不同送风方式和载物方式对虾仁冻结效果的影响,以获得更好的送风方式和载物方式。

收稿日期: 2019-11-05 修回日期: 2020-01-16

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(2018YFD0400605);上海市科委公共服务平台建设项目(17DZ2293400)

作者简介: 舒志涛(1995—),男,硕士研究生,研究方向为冷冻冷藏。E-mail:434608560@qq.com

通信作者: 谢晶, E-mail:jxie@shou.edu.cn

1 数值模拟

1.1 物理模型

选用个体较大的明虾虾仁为研究对象^[9]。对明虾进行去头、去皮、去虾线处理后,剔除个体较大或较小的虾仁(图 1),对剩余虾仁进行结构参数的测量,取平均值后,利用 CAD 绘图软件对明虾虾仁进行建模,见图 2。



图 1 新鲜明虾虾仁实物图

Fig.1 Physical picture of fresh shrimp

本次实验只考虑不同的送风方式和载物方式对虾仁冻结过程的影响,不考虑速冻机内部运

转情况,故只对单个虾仁在冲击式速冻设备中的冻结区域进行建模。对两种不同送风方式和两种不同载物方式进行搭配,设计了(A)单侧送风+板带载物、(B)单侧送风+网带载物、(C)双侧送风+板带载物和(D)双侧送风+网带载物等 4 个实验组模型,后文将以 A、B、C、D 代指 4 个实验组,对模型进行合理简化见图 3。

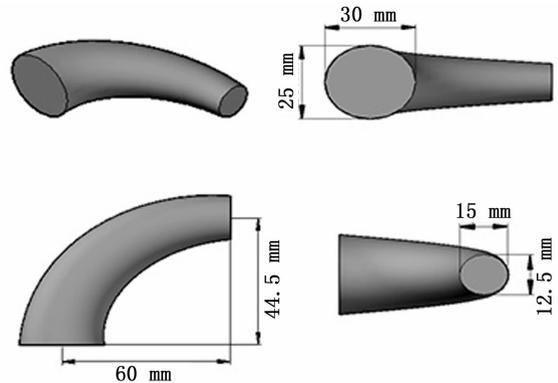


图 2 虾仁模型及结构参数

Fig.2 Shelled shrimp model and structural parameters

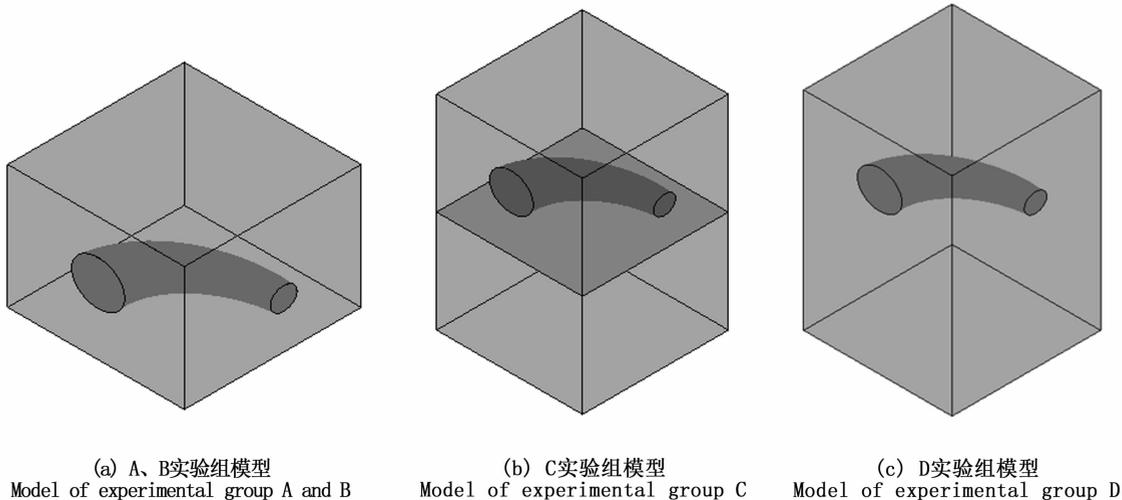


图 3 各实验组模型

Fig.3 Models of experimental groups

根据生产实际情况对模型结构尺寸进行设计,模型上表面为射流喷嘴出口,即模型送风口,大小为 100 mm × 100 mm,距离载物台 70 mm,四周为出风口。在单侧送风时,板带和网带的设计区别仅仅体现在数值模拟的边界条件设置上,因此 A 和 B 两个实验组模型一样,但实验组 A 的模型下表面为板带,实验组 B 的模型下表面为出风口。双侧送风的模型上下表面均为送风口。

1.2 数学模型

假设虾仁各向同性,质地均匀,内部传热情况仅考虑导热,模型内的空气流体为不可压缩流体。基于上述假设,在笛卡尔坐标系中建立虾仁冻结过程的三维非稳态、无内热源、变物性的导热数学模型,其导热微分方程^[10]如下:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) +$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1)$$

式中： ρ 为虾仁密度， kg/m^3 ； C_p 为虾仁比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； T 为虾仁各点温度， $^\circ\text{C}$ ； τ 为冻结时间， s ； λ 为虾仁导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

虾仁表面与模型内部冷空气进行强制对流换热，即为第 3 类边界条件：

$$-\lambda(\frac{\partial T}{\partial n})_w = h(T) \cdot (T_{\text{shrimp}} - T_{\text{cold}}) \quad (2)$$

式中： n 为虾仁表面外法线方向； h 为虾仁表面对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ； T_{shrimp} 为虾仁表面温度， $^\circ\text{C}$ ； T_{cold} 为送风温度， $^\circ\text{C}$ 。

1.3 边界条件及物性参数

利用 Gambit 软件对模型中虾仁各壁面进行耦合^[11]，选择 Tet/Hybrid 混合网格形式对模型进行网格划分，虾仁区域的网格大小为 1 mm，空气流体区域的网格大小为 2.5 mm。利用 Ansys Fluent 15.0 软件对各个实验组模型进行数值模拟计算。根据前一阶段的现场测试和生产实际对该模型模拟过程的边界条件进行设置：

(1) 送风口为 Velocity-inlet，A、B、C、D 等 4 个实验组上侧送风风速均为 15 m/s，C、D 2 个实验组下侧送风风速均为 2 m/s，送风温度 -30°C ；

(2) 出口为 Outflow，由软件自行计算出风口风速和出风温度；

(3) 虾仁初始温度为 15°C ，虾仁表面为耦合面，Thermal Conditions 选择 Coupled 耦合计算，由软件自行计算出虾仁表面与冷空气换热量；

(4) 板带为 Wall，初始温度 -30°C ；

(5) 网带为多孔状结构，对流体的运动影响可忽略不计，因此可看作同出风口一样设置为 Outflow。

由于虾仁在冻结过程中会发生相变，相变过程对虾仁的导热系数和比热容等热物性参数影响较大，为保证数值模拟的准确性，冻结前后的热物性差异不能忽略，呈线性变化趋势^[12]，即：

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_{\text{solid}} & (T \leq T_{\text{solid}}) \\ \lambda_{\text{solid}} + \frac{(\lambda_{\text{liquid}} - \lambda_{\text{solid}})(T - T_{\text{solid}})}{(T_{\text{liquid}} - T_{\text{solid}})} & (T_{\text{solid}} < T \leq T_{\text{liquid}}) \\ \lambda_{\text{liquid}} & (T > T_{\text{solid}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： λ_{solid} 为虾仁冻结后的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ； λ_{liquid} 为虾仁冻结前的导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ； T_{solid} 为虾仁相变结束的温度， $^\circ\text{C}$ ； T_{liquid} 为虾仁相变初始的温度， $^\circ\text{C}$ 。

设置虾仁密度为 $1085 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，密度保持恒定不变，潜热为 $262.6 \text{ kJ}/\text{kg}$ ，冻结点为 -3°C ^[13]，选用 Solidification & Melting 模型结合能量方程对相变换热进行计算。 $C_{p, \text{liquid}}$ 为虾仁冻结前的比热容， $C_{p, \text{solid}}$ 为虾仁冻结后的比热容，冻结点前后比热容的变化也由选用的 Solidification & Melting 模型自行计算，具体参数如表 1^[13] 所示。为保证模拟的准确性，先对各个实验组进行流场数值模拟，待流场模拟计算收敛后，启动 Ansys Fluent 15.0 软件中“Energy”能量方程进行流场换热模拟计算^[14]。

表 1 虾仁热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of shrimp

参数 Parameters	数值 Numerical value	参数 Parameters	数值 Numerical value
$\lambda_{\text{solid}}/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})]$	1.62	$\lambda_{\text{liquid}}/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})]$	0.53
$C_{p, \text{solid}}/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	1 820	$C_{p, \text{liquid}}/[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$	3 450
$T_{\text{solid}}/\text{K}$	265.15	$T_{\text{liquid}}/\text{K}$	275.15

2 实验验证

2.1 实验设备

设计并制作上下冲击式速冻实验台，如图 4 所示。该实验台置于温度为 -30°C 的大型冷库内以获得低温气流，然后通过上下两侧的离心风机向静压箱内送风，通过静压箱底部的圆形孔板

形成冲击射流，喷射到冻品表面。离心风机的运行与否决定了设备的送风方式。上下冲击式实验台的载物台为可拆卸式，便于更换载物用的板带和网带；静压箱为可活动式，便于调整送风口和载物台之间的距离。利用 FLUKE-F2640 多点温度采集仪对虾仁进行实时测温。

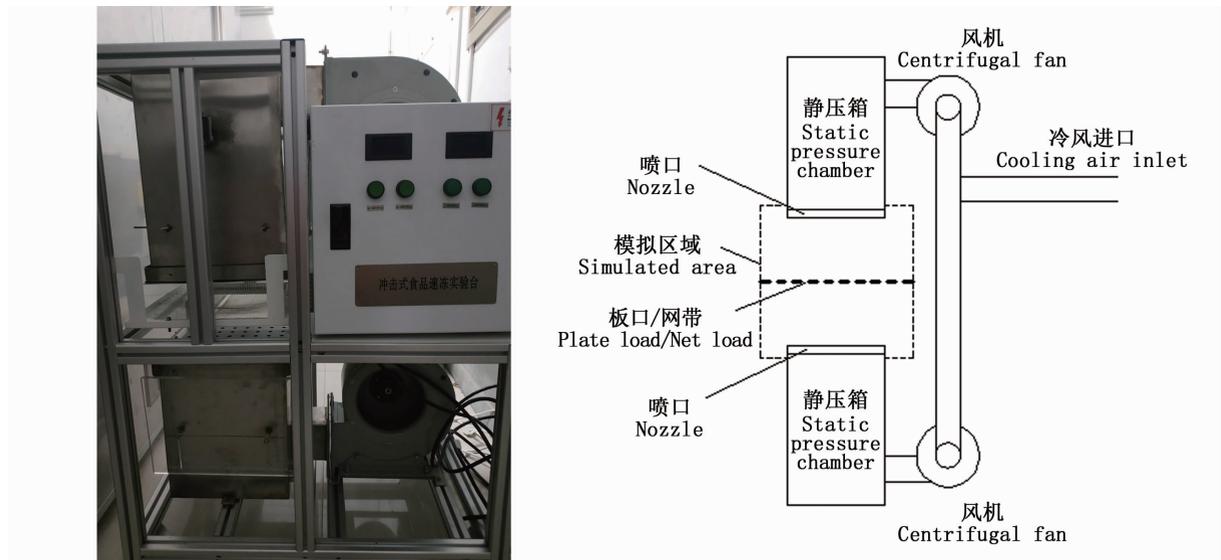


图 4 上下冲击式速冻实验台

Fig. 4 Up-and-down impingement quick-freezing test bench

2.2 实验验证

(1) 调整上下静压箱与载物台之间的距离至 70 mm, 将板带安装于载物台上, 运行上侧离心风机并调整风机功率, 使得送风速度为 15 m/s;

(2) 将热电偶插入虾仁中心, 由 FLUKE-F2640 多点温度采集仪对虾仁中心温度进行数据采集;

(3) 待冷库温度降到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 快速将虾仁放置于上下冲击式实验台板带中心, 开始冷却、冻结, 待虾仁中心温度降到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 取出虾仁, 保存数据;

(4) 更换网带或开启下侧离心风机, 重复 (1) ~ (4) 步骤, 对 A、B、C、D 等 4 个实验组依次进行实验, 每个实验组进行 3 次平行实验, 取平均值, 并对实验数据进行方差分析, 以保证实验数据准确。将实验结果与模拟结果进行对比, 计算相对误差, 验证模拟准确性。

3 结果与讨论

3.1 数值模拟的准确性

对 A、B、C、D 等 4 个实验组数值模拟的结果和实验中 FLUKE-F2640 多点温度采集仪采集到的数据进行对比, 验证模拟结果中虾仁冻结时长和冻结过程的准确性, 如图 5、表 2 所示。

表 2 中冻结时间 τ 为虾仁中心温度从初始温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的所用时长。对比发现: 各个实验组虾仁冻结时间的模拟值与实验值的

相对误差均在 0 ~ 10%, 相对误差较小^[15]; 且从图 5 可以看出, 通过数值模拟得到的虾仁冻结过程曲线与实验中 FLUKE-F2640 测温仪记录得到的虾仁冻结过程曲线相吻合, 可以证明本实验的数值模拟的模型与方法准确性高, 模拟数据可信。

3.2 不同送风方式和载物方式对虾仁冻结过程的影响

在验证数值模拟模型和方法正确的基础上, 进一步开展模拟研究。从图 6 可以看出, 采用双侧送风 + 网带载物的 D 组, 虾仁冻结时长最短, 与 A、B、C 等 3 个实验组相比, 分别缩短了虾仁冻结时长的 25.1%、14.5% 和 16.8%。

根据送风方式的不同, 将实验组 A、C 和实验组 B、D 分别进行对比, 可发现采用双侧送风方式的实验组 C 和 D 虾仁冻结时长均比采用单侧送风方式的实验组 A 和 B 短。实验组 C 比实验组 A 虾仁冻结时长缩短 9.95%, 这是因为实验组 C 中的虾仁与板带直接接触, 虾仁内一部分热量通过热传导的形式传到板带, 而下侧的冲击射流冲击板带下表面, 与板带进行强制对流换热, 加快了板带的降温, 相比于实验组 A 来说, 提高了虾仁与板带之间的温差, 虾仁与板带之间的导热系数增加, 冻结速率加快。实验组 D 比实验组 B 虾仁冻结时长缩短 14.5% 则是因为风速较小的下侧冲击射流与风速较大的上侧冲击射流相对冲击, 在虾仁下侧流场形成了有助于提高虾仁下表面

流速的涡流,如图 7 d 所示,该涡流的形成加快了虾仁表面对流换热强度,虾仁冻结时长减小。从

虾仁冻结时长的缩短程度可以看出,当载物方式采用网带载物时,双侧送风的有利影响更大。

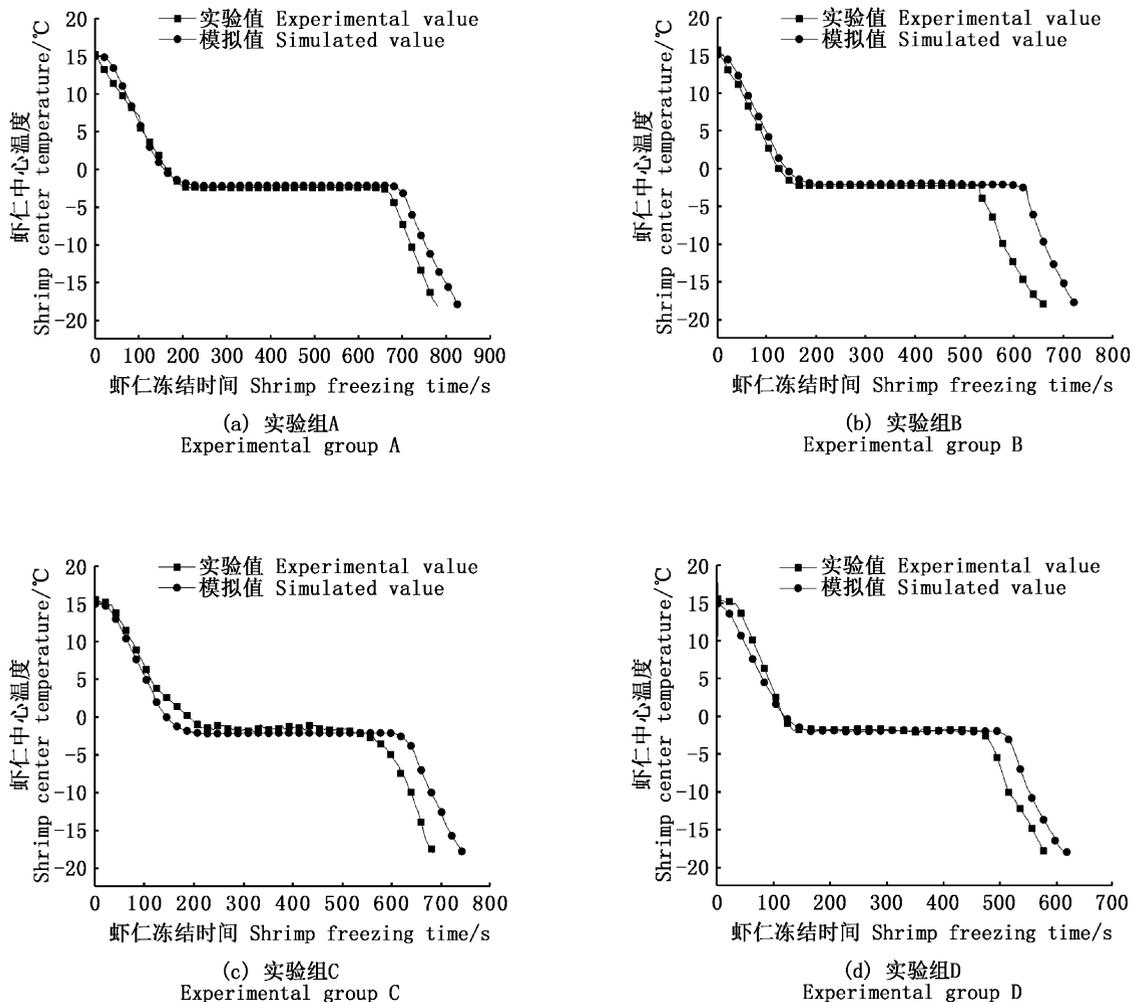


图 5 各实验组虾仁中心温度实验值与模拟值对比图

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated values of central temperature of shrimps

表 2 虾仁冻结时间的模拟值与实验值

Tab. 2 Simulated and experimental values of freezing time of shrimp

实验组 Experimental group	虾仁冻结时间 Shrimp freezing time/s		相对误差 Relative error/%
	模拟值 Simulated value	实验值 Experimental value	
A	824	779 ± 16.37	5.78
B	722	660 ± 11.36	9.39
C	742	684 ± 12.12	8.48
D	617	580 ± 9.17	6.38

根据载物方式的不同,将实验组 A、B 和实验组 C、D 分别进行对比,发现采用网带载物的实验组 B 和 D 虾仁冻结时长比采用板带载物的实验组 A 和 C 更短,冻结效率更高。实验组 B 比实验

组 A 虾仁冻结时长缩短 12.4%,这是因为实验组 A(图 7a)下表面为板带,上侧冲击射流向下冲击时,在气压的作用下会向四周压力较低的区域流动(即模型出风处),导致冲向虾仁的射流流速降

低,并且在虾仁表面与板带交界处以及虾仁头部都会形成射流“真空区”,虾仁表面流速明显降低,虾仁冻结时长较大。实验组 B(图 7b)下表面为网带,由于网带为多孔结构,可近似看作出风口,此时上冲击射流向下冲击时不会向四周流动,冲向虾仁的射流流速大,并且由于下表面类似出风口,因此也不会形成射流“真空区”,虾仁表面流速大,换热强度大,虾仁冻结时长小。实验组 D 比实验组 C 虾仁冻结时长缩短 16.8% 则说明在相同风速且两侧风速相差较大的情况下,上下冲击式速冻设备选用网带载物会更有利于虾仁的冻结。

- 单侧送风+板带载物 Unilateral air supply+Plate load (A)
- 单侧送风+网带载物 Unilateral air supply+Net load (B)
- ▲ 双侧送风+板带载物 Bilateral air supply+Plate load (C)
- ▼ 双侧送风+网带载物 Bilateral air supply+Net load (D)

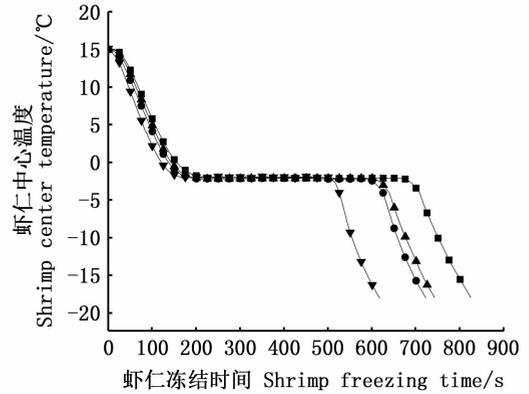


图 6 虾仁冻结过程数值模拟结果
Fig.6 Numerical simulation of freezing process of shrimp

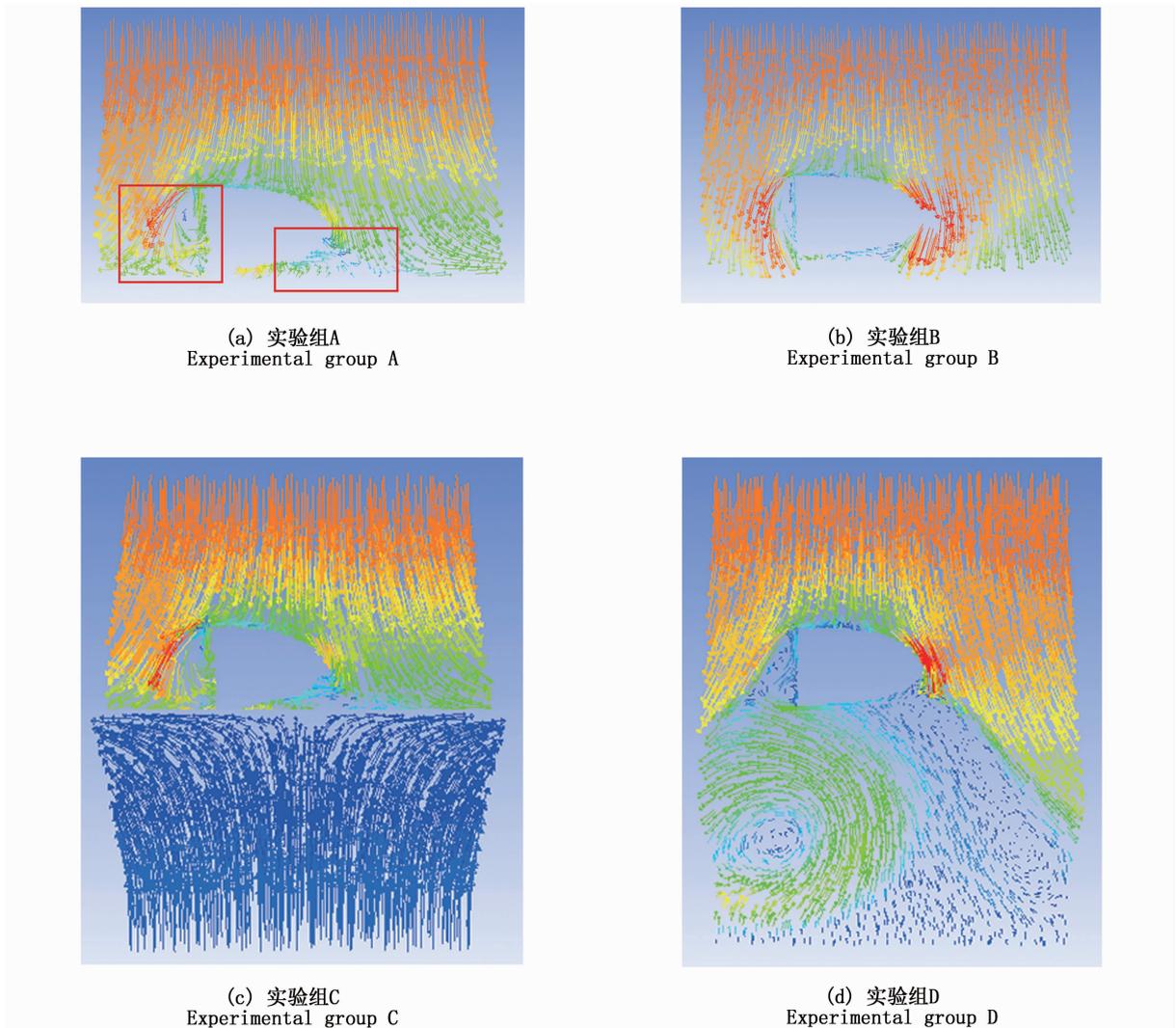


图 7 各实验组横截面风速矢量图
Fig.7 Air speed vector diagram on the cross section of each experimental group

综上所述,在送风温度和风速相同的情况下,双侧送风和网带载物这两因素均有利于提高虾仁冻结效率,缩短虾仁冻结时长。实验组 D 采用双侧送风 + 网带载物,虾仁冻结时长最短为 617 s,相对于 A、B、C 等 3 个实验组缩短虾仁冻结时间的 14% ~ 25%,冲击式速冻设备换热区流场的均匀性更好,提高了换热效率,降低设备能耗。

3.3 不同送风方式和载物方式对虾仁冻结均匀性的影响

在虾仁冻结过程中,虾仁表面与冷空气进行强制对流换热,由虾仁表面最先开始降温,而虾仁内部热量则以导热的形式传递至虾仁表面,导致虾仁中心温度与虾仁表面温度产生温差,温差反映了虾仁冻结的均匀性。

从图 8 可以看出,虾仁表面与虾仁中心温差在冻结过程开始阶段处于上升趋势,通过计算发现该阶段虾仁冻结时的毕渥数 $Bi > 40$,此时虾仁表面的对流换热强度远大于虾仁内部的导热,虾仁表面降温更快,因此温差逐渐变大。但当虾仁表面降温至虾仁冻结点附近时,由于存在相变潜热,虾仁表面温度变化速率减缓,与虾仁中心点的温差不断减小。当虾仁表面结束相变阶段进入过冷阶段时虾仁的中心依然处于相变阶段,

存在潜热,温度变化不明显,此时温差再一次不断增大。当虾仁内部结束相变阶段时,此时虾仁冻结时的毕渥数 $Bi < 1$,虾仁表面的对流换热强度小于虾仁内部的导热,虾仁中心温度下降速率加快,温差再次减小。为直观表现虾仁内部温差变化,以实验组 A 为例,利用 Tecplot 软件分别对其 50 s、200 s 和 760 s 时刻的虾仁模拟结果进行处理,得到冻结过程中各个阶段虾仁横截面温度云图,如图 9 所示。

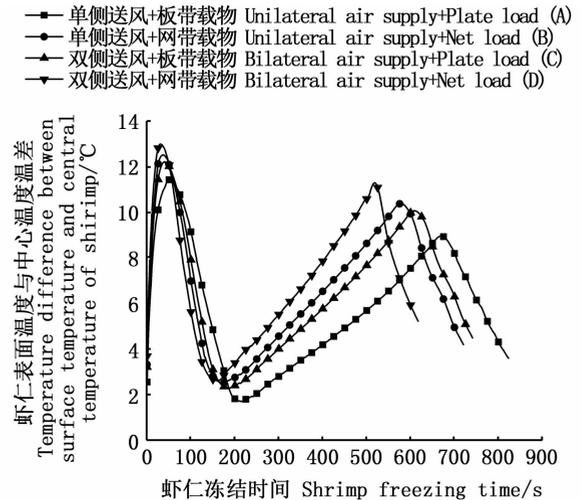


图 8 虾仁冻结过程各时刻温差数值模拟结果
Fig. 8 Temperature difference of shrimp during freezing

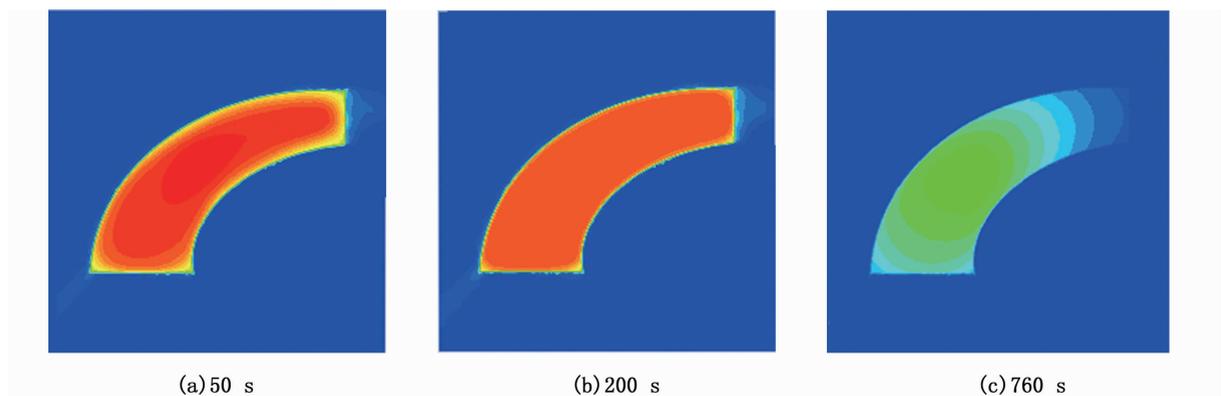


图 9 各时刻虾仁截面温度云图
Fig. 9 Temperature cloud of shrimp cross section at each time

由图 8 可以看出,冻结时长越短的实验组,其在虾仁冻结过程的各个阶段温差较大,虾仁冻结均匀性较差。在本次实验中,虾仁内外最大温差出现在实验组 D 冻结过程开始后的第 31 秒,最大温差可达 13.02 °C。各个实验组虾仁表面

结束预冷阶段的时长均为虾仁中心结束预冷阶段时长的 20% 左右,这也证明了虾仁表面与冷空气间的强制对流换热强度远远大于虾仁内部的导热。

4 结论

本文以单个明虾虾仁的冻结过程为研究对象,通过数值模拟结合实验验证的方法研究了冲击式速冻设备中不同送风方式和载物方式对虾仁冻结过程的影响。从虾仁冻结时间和冻结均匀性两个角度进行分析,得出以下结论:

(1)对于虾仁冻结来说,采用双侧送风+网带载物可以使虾仁表面流场流速更大,有利于提高换热效率,减少虾仁冻结时间,相对于其他送风方式和载物方式来说可缩短虾仁冻结时间14%~25%。

(2)在相同载物方式下双侧送风有助于在送风弱侧处形成提高虾仁表面流速的涡流,对虾仁冻结过程的影响优于单侧送风;网带载物可以避免在虾仁周围形成射流“真空区”,对虾仁冻结过程的影响优于板带载物。

(3)在虾仁冻结过程中,虾仁表面与内部的温差先变大再变小,待虾仁表面温度下降至冻结点以下时,温差再次增大,直至虾仁整体进入过冷阶段。

(4)冻结速度越快的实验组,虾仁冻结均匀性越差。在本次实验中,虾仁内外最大温差出现在实验组D,最大温差可达13.02℃。

参考文献:

- [1] 唐君言,邵双全,徐洪波,等. 食品速冻方法与模拟技术研究进展[J]. 制冷学报, 2018, 39(6): 1-9.
TANG J Y, SHAO S Q, XU H B, et al. Progress in research on the food quick-freezing method and simulation technology [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(6): 1-9.
- [2] 许子雄,李保国,罗权权. 速冻食品中冰晶的研究进展[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(2): 63-67.
XU Z X, LI B G, LUO Q Q. Progress in research of ice crystals in fast frozen food [J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(2): 63-67.
- [3] SUNDSTEN S, ANDERSSON A, TORNERBERG E. The effect of the freezing rate on the quality of hamburger[C]// Rapid Cooling of Food, Meeting of IIR Commission C2. Bristol, 2001: 181-186.
- [4] MARAZANI T, MADYIRA D M, AKINLABI E T. Investigation of the parameters governing the performance of jet impingement quick food freezing and cooling systems - A review[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 8: 754-760.
- [5] ZAREKAR S, BÜCK A, JACOB M, et al. Numerical study of the hydrodynamics of fluidized beds operated under sub-atmospheric pressure [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 372: 1134-1153.
- [6] VINZE R, CHANDEL S, LIMAYE M D, et al. Influence of jet temperature and nozzle shape on the heat transfer distribution between a smooth plate and impinging air jets [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 99: 136-151.
- [7] GU H W, WANG J F, XIE J. Influence of different inlet pressures on the flow field and heat transfer characteristics of impinging jets [C]//2018 International Conference on New Energy and Future Energy System. Shanghai, China: IOP Publishing, 2018, 188: 012085.
- [8] WAE-HAYEE M, TEKASAKUL P, NUNTADUSIT C. Influence of nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets [J]. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2013, 35(2): 203-212.
- [9] 周强,刘蒙佳,丁立云,等. 处理方式及解冻方法对明虾品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 54(3): 143-151.
ZHOU Q, LIU M J, DING L Y, et al. Effects of thawing methods and processing conditions on the thawing quality of prawns[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2018, 54(3): 143-151.
- [10] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2006: 5-41.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 5-41.
- [11] 李杰,谢晶. 鼓风冻结虾仁时间的数值模拟及实验验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 248-252.
- [12] 万金庆,岳占凯,厉建国,等. 马铃薯泥鼓风冷冻数值模拟与实验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 298-304.
WANG J Q, YUE Z K, LI J G, et al. Numerical analysis and test on characteristics of temperature decreasing of mashed potatoes [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 298-304.
- [13] 唐婉,谢晶,王金锋,等. 虾仁热物性的计算及冻结时间的数值模拟[J]. 食品与机械, 2018, 34(2): 106-110.
TANG W, XIE J, WANG J F, et al. Thermal physical property calculation and freezing time numerical simulation of shrimp[J]. Food & Machinery, 2018, 34(2): 106-110.
- [14] FERREIRA S R, ROJAS L O A. Freezing times using time derivative of temperature on surface of foods [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 98: 436-443.
- [15] 杨小梅. 对虾冷冻过程的温度分析及其数值模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2014: 50-55.
YANG X M. Temperature analysis and numerical simulation of shrimp freezing process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 50-55.

Comparison of freezing processes of shrimp in impingement quick-freezing equipment in different air supply and load modes

SHU Zhitao^{1,2,3}, XIE Jing^{1,2,3}, YANG Dazhang^{1,2,3}, CHEN Cong^{1,2,3}

(1. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The impingement quick-freezing equipment has higher freezing speed and lower dry loss, but its high speed impinging jet also makes the flow field in the heat transfer zone of the equipment uneven and the energy efficiency of the equipment relatively low. This paper took shrimps as the research object, using the method of numerical simulation combined with experimental verification. The effects of two air supply modes (unilateral air supply and bilateral air supply) and two load modes (plate load and net load) on the freezing process of shrimps were studied, and the air supply and load mode which made the shrimp freezing process shortest was found. It was found that for shrimp freezing, the flow field velocity on the surface of shrimp can be increased by bilateral air supply and net belt load, which was beneficial to improve the heat transfer efficiency and reduce the freezing time of shrimp. Compared with other air supply and loading methods, the freezing time of shrimp can be shortened by 14% to 25%. The bilateral air supply was helpful to form an eddy current to increase the flow velocity on the lower surface of shrimp at the weak side of the air supply. The net load can avoid the formation of jet "vacuum area" at the junction between the lower side of the shrimp and the net belt and the head of the shrimp. Both of them are helpful to increase the surface air speed of shrimp and shorten the freezing time of shrimp. The faster the freezing speed, the worse the freezing uniformity of shrimp. In this experiment, the maximum temperature difference between inside and outside shrimp appeared in experimental group D (bilateral air supply + net load), and the maximum temperature difference was 13.02 °C.

Key words: frozen food; impingement quick-freezing technology; numerical simulation; freezing rate