

基于液态空气喷雾速冻鲜枣片的数值分析

宁静红¹, 贾永勤¹, 王润霞¹, 杨挺然¹, 张子扬¹, 尤利超²

(¹天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134

²天津天商酷凌科技有限公司 天津 300134)

摘要 为拓展食品速冻方式,提出液态空气喷雾速冻鲜枣片的方法。利用数值仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立液态空气喷雾速冻罐模型,对鲜枣片速冻过程的速度场、温度场进行模拟,使用域探针及边界探针获取鲜枣片不同时刻的温度变化。对比不同液态空气喷入速度(0.02,0.04,0.06,0.08,0.1,0.2 m/s)下的速冻效果,得出鲜枣片达到速冻要求的时间随流速的增大而减少,流速为 0.06 m/s 时冻结速率较快,冷能利用充分。建立了(右下、右上、正上、左上、左下)5 种出口位置的速冻罐模型,结果表明,出口位于左上的模型能够更高效实现鲜枣片速冻,鲜枣片温度分布更均匀。对比分析液态空气喷雾速冻与现有低温液氮隧道式速冻,结果液态空气喷雾速冻达到速冻要求的时间更短,在传热与节能方面具有突出优势。

关键词 液态空气; 喷雾; 模型; 鲜枣片; 速冻; 模拟; 传热

文章编号 1009-7848(2023)06-0258-09 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2023.06.026

深冷速冻技术能使食品迅速冻结,在较短时间内通过最大冰晶生成带,在组织中形成细小而均匀的冰晶体,从而减少对食品组织结构的机械损伤^[1]。国内外许多研究者对食品冻结过程进行了大量研究^[2-8],获得各种速冻技术^[9-16]。王喜芳等^[17]对液氮喷雾速冻过程进行分析,得出喷雾速冻能够充分利用液氮的显热和潜热,使传热效率达到最高。Crowe 等^[18]提出离散相模型用来模拟液体雾化喷淋。Jeng 等^[19]、Schmehl 等^[20]对喷嘴的雾化特性进行模拟研究,验证了喷雾冷却的可行性。吴炜俊等^[21]通过对比液氮喷雾速冻、传统冰柜冻结和浸渍冷冻对荔枝品质的影响,得出喷雾速冻传热速度快,形成的冰晶细小且分布均匀,对冻结荔枝的保护效果更好。宁静红等^[4]研究了干冰喷射进出口位置对草莓速冻过程的影响,对速冻装置进行优化,形成良好的流动与传热协同效果。

为满足速冻食品工业的发展,需对食品速冻装置不断创新。液态空气常压下沸点为 $-192\text{ }^{\circ}\text{C}$,是能与食品直接接触的理想制冷剂之一。雾化后的液态空气无论在传热效率还是制冷温度上都具有突出优势,能达成食品的超低温深冷速冻。近年

来,国内外研究人员对于液化空气储能系统(LAES)^[22-24]进行了深入研究,他们认为空气能量密度高、储能周期长,可用作储能介质,并且利用空气作为介质,回收液化天然气(LNG)余能,可以有效储存低温能量。利用液态空气速冻食品,可能成为该领域的研究热点。

作为我国传统的果品之一,红枣产量占全世界的 95% 以上,味美香甜,是补气生血的佳品^[25]。鲜食红枣水分含量高,极易腐烂,贮藏期短^[26]。利用深冷速冻技术冻结鲜枣,细胞内、外的水分能同时形成大量细小且分布均匀的晶核,对其细胞膜和细胞壁不会造成挤压^[27]。鲜枣在速冻过程中组织结构被破坏不多,解冻后仍可复原,从而保留鲜枣的营养成分和风味。

本文提出液态空气喷雾速冻鲜枣片的方法,设计速冻罐。利用仿真软件 COMSOL Multiphysics 模拟速冻过程中速冻罐腔体内部的温度场、速度场。根据数值模拟结果对液态空气喷雾速冻鲜枣片的冻结特性进行分析,优化速冻参数,为进一步开发液态空气速冻食品提供参考。

1 模型建立

1.1 物理模型

根据现有速冻装置,设计速冻罐物理模型,如图 1 所示。腔体为直径 260 mm,高度 430 mm 的圆筒。左侧设置 4 个直径 30 mm 圆柱形低温液态空

收稿日期: 2022-06-29

基金项目: 天津市大学生创新训练计划项目(202110069071)

第一作者: 宁静红,女,博士,教授

E-mail: ningjinghong@126.com

气喷入口。随着液态空气喷射至腔体内部,腔体压力越来越大,为维持速冻过程的正常运转,需在罐壁设置一个排气口,直径 40 mm。速冻罐腔体内部放置 4 层相距 80 mm 的置物板,其直径和厚度分别为 200 mm 和 3 mm。每层置物板上方摆放 19 个鲜枣片,鲜枣片形状为内径 6 mm、外径 30 mm 的

空心圆柱,每两个鲜枣片距离 10 mm。

图 2 为速冻罐模型网格划分,划分方式采用物理场控制,平均单元质量为 0.732,共生成 87 万个网格。经网格无关性检验,满足计算精度要求。

表 1 模型所选材料参数

Table 1 The selected material parameters of the model

属性	液态空气	空气	钢材	鲜枣片
恒压热容/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	2.775	$C_p(T)$	0.502	3.09
导热系数/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0.042	$k(T)$	16.27	0.49
密度/ $kg \cdot m^{-3}$	477.5	$\rho(pA, T)$	8030	981
动力黏度/ $Pa \cdot s$	2.56×10^{-5}	$\eta(T)$		
比热率	3.41	1.4		

注:表中 $C_p(T)$ 、 $K(T)$ 、 $Rho(Pa, T)$ 和 $\eta(T)$ 均为所选材料属性的函数,无具体数值;模型的外壳和置物板为不锈钢,模型内部空气发生由液态到气态的相变。

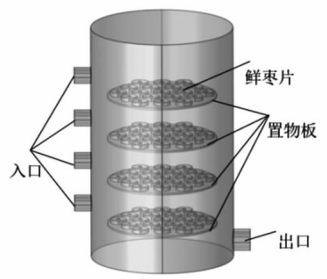


图 1 速冻罐物理模型

Fig.1 Physical model of quick-freezing tank



图 2 速冻罐模型网格划分

Fig.2 Mesh division of quick-freezing tank model

1.2 数学模型

为简化实际问题,对液态空气在腔体内的喷雾冷却过程进行假设:1)速冻腔内流体为牛顿流体且不可压缩;2)固体壁面满足无滑移边界条件;3)液态空气经喷嘴雾化后均为液相;4)忽略速冻罐内的热辐射能量。

经以上假设,在瞬态研究中,流固传热基于能量守恒方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla_r + \nabla q = Q \quad (1)$$

$$q = -k \nabla_r \quad (2)$$

流体传热方程如下:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla_r + \nabla q = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (3)$$

$$q = -k \nabla_r \quad (4)$$

固体内部传热方程如下:

$$\rho_2 C_{p2} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_2 C_{p2} u \cdot \nabla_r + \nabla q = Q + Q_{ted} \quad (5)$$

$$q = -\lambda \nabla_r \quad (6)$$

式中: ρ ——材料的密度, kg/m^3 ; C_p ——相变材料的比热容, $J/(kg \cdot K)$; T ——流体温度, K ; t ——时间, s ; u ——实际入口速度, m/s ; q ——对流热通量, W/m^2 ; k ——相变材料导热系数, $W/(m \cdot K)$; Q ——液态空气的焓, J/kg ; Q_p ——液态空气内能, J/kg ; Q_{vd} ——液态空气动能, J/kg ; Q_{ted} ——热弹性阻尼, J/kg ; λ ——鲜枣片的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

相变模型方程如下:

$$\rho = \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 \quad (7)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2}) + L_{1-2} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (8)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{\theta_2 \rho_2 - \theta_1 \rho_1}{\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2} \quad (9)$$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (10)$$

$$\theta_1 + \theta_2 = 1 \quad (11)$$

式中： ρ_1, ρ_2 分别为发生相变前后两种材料的密度， kg/m^3 ； θ_1, θ_2 分别为2种相变材料的体积分数； k_1, k_2 分别为2种相变材料的导热系数； α_m 为质量分数。

经雾化的液态空气液滴喷射到腔体后呈现的流动方式是湍流运动，遵循湍流方程^[28]。雾化喷射流动方向不唯一，Realizable $k-\varepsilon$ 模型是最合适的湍流模型。

影响低温介质与食品传热效率的主要因素有传热系数、接触面积及温差。液态空气喷雾与鲜枣片之间的传热速率通过以下关系式计算：

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (12)$$

与鲜枣片接触的液滴可近似看成一个球状几何体，每个液滴的有效传热面积低于球表面积的一半，通过以下经验公式计算：

$$A = 1.5\pi \cdot r^2 \quad (13)$$

式中： h ——总传热系数， $\text{W}/(\text{m}^2/\text{K})$ ； A ——鲜枣片表面与液滴有效传热面积， m^2 ； ΔT ——液滴与

鲜枣片表面温度差， K ； r ——液滴半径， m 。

2 速冻过程及模拟结果分析

2.1 液态空气喷雾速冻过程

图3显示液态空气喷雾速冻流程，主要由液态空气储罐、压力指示器、安全阀、流量控制阀、流量计、喷嘴、速冻罐组成。液态空气从低温储罐流出，经阀门至喷嘴，雾化后喷入速冻罐。液态空气经过喷嘴雾化成粒径极小的液滴，与鲜枣片表面直接接触，通过增大与腔体内鲜枣片的接触面积，增强传热速率，使液滴在腔体内迅速蒸发，实现对鲜枣片的速冻。

采用液态空气喷雾速冻鲜枣片的方式，速冻罐内的温度场、速度场是评价速冻性能的重要指标。对于雾化喷淋降温，喷雾的参数会影响雾滴的蒸发速率以及速冻罐腔体内部温度场的均匀性^[29]。某些参数(如喷射速度、喷雾锥角等)在试验条件下很难控制，参数间相互影响，导致很难通过试验测定所有的工况。因此通过数值模拟求解液态空气喷雾速冻鲜枣片非稳态过程，能够有效控制速冻参数，保证鲜枣片的冻结质量并合理控制液态空气消耗量。

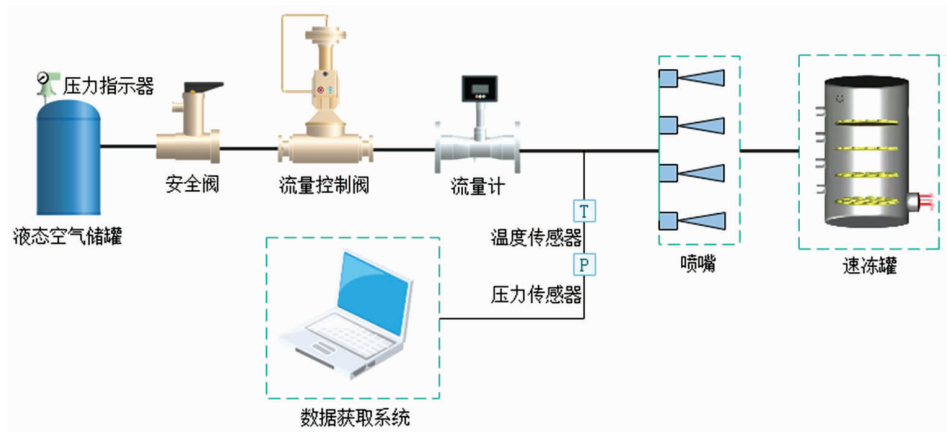


图3 液态空气喷雾速冻流程

Fig.3 Liquid air spray freezing process

将食品预冷能够有效减少速冻时间，大幅降低能源消耗。速冻过程要求在20 min内将果蔬核心温度降至 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下，表面温度降至 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下^[30]。液态空气温度过低会导致鲜枣片低温断裂，温度太高会降低冻结速率，且压力过大不易控制^[2]。本文采用 $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 液态空气喷雾速冻方式，将鲜食

红枣去核后切片，厚度7 mm，在 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下预冷后放入速冻罐进行低温速冻。速冻过程相关参数见表2。

2.2 入口速度对速冻时间及冻结均匀性的影响

设置0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2 m/s 6个入口速度。模拟完成后，对图4所示的鲜枣片内部

表 2 速冻过程相关参数

Table 2 Parameters related to quick freezing process

参数	数值	描述
T_{pc}/K	153.15	相变起始温度
T_{del}/K	283.15	相变温度间隔
$L_{1-2}/kJ \cdot kg^{-1}$	140.6	相变潜热
T_{in}/K	153.15	液态空气入口温度
T_0/K	278.15	鲜枣片模型初始温度
T_{amb}/K	293.15	环境温度

温度分布及图 5 所示的表面温度分布, 获得达到速冻要求的时间, 并观察鲜枣片冻结的均匀性。对照图 6 所示的液相分数图, 得到降温过程中出口处液相占比。由表 3 计算结果分析得出, 随着入口

流速的增加, 鲜枣片达到速冻要求的时间逐渐减少。这是因为入口流速影响液态空气在速冻腔体内的扰动, 流速越大, 扰动越剧烈, 传热速率越快。相反, 流速大会导致出口处液相分数递增, 冷量利用不充分。当流速为 0.02 m/s 时, 降温速度相对较慢, 鲜枣片温度分布不均匀; 当流速超过 0.1 m/s 后, 由于液态空气流量过量, 出口处有大量液态积压。对比 0.04, 0.06, 0.08 m/s 流速下鲜枣片冻结效果, 流速 0.06 m/s 相较于 0.04 m/s, 在出口液相分数基本一致的情况下, 降温时间明显减少, 温度分布相对均匀; 相较于 0.08 m/s 在降温时间相差不大的情况下, 出口处液相分数明显更少。综上所述, 入口速度为 0.06 m/s 时, 速冻效果最佳。

表 3 不同入口速度的计算数据

Table 3 Calculated data for different inlet velocities

入口速度/ $m \cdot s^{-1}$	枣片最高温度降至 -18 °C 的时间/s	枣片表面温度降至 -35 °C 的时间/s	时间差值/s	出口液相分数
0.02	397	298	99	0.16
0.04	262	182	80	0.20
0.06	198	128	70	0.22
0.08	169	100	69	0.27
0.1	142	82	60	0.31
0.2	97	45	52	0.37

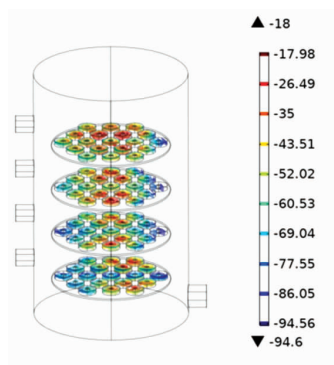


图 4 鲜枣片内部温度分布

Fig.4 Internal temperature distribution of fresh jujube slices

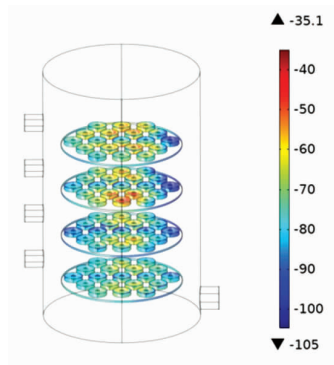


图 5 鲜枣片表面温度分布

Fig.5 Surface temperature distribution of fresh jujube slices

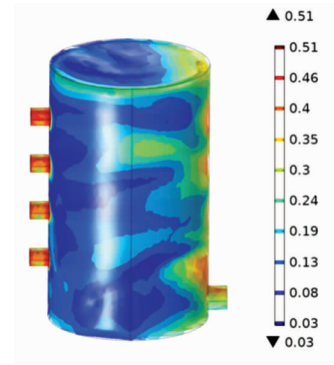


图 6 速冻罐内液相分数

Fig.6 Liquid fraction in quick-frozen tank

注: 图 4、5、6 中的结果以液态空气入口流速 0.06 m/s 为例。

2.3 出口位置对速冻时间及冻结均匀性的影响

以液态空气喷入速度 0.06 m/s 为例, 如图 7 所示, 设置 5 种出口位置的速冻罐模型。由表 4 的

模拟结果可看出, 出口位置的改变对鲜枣片冻结速率的影响较小。对照图 8 所示速冻腔内流体流线分布, 模型(c)由于出口在正上方, 最上方入口

喷入的液态空气流体一部分未经循环直接从出口流出,导致出口处液相分数增多,换热不充分;模

型(e)的流场较为混乱,流体流动阻力大,流速小,影响传热效果。

表 4 不同出口位置的计算数据

Table 4 Calculated data for different exit positions

出口位置	枣片最高温度降至 -18℃的时间/s	枣片表面温度降至 -35℃的时间/s	时间差值/s	出口液相分数
a	198	128	70	0.22
b	207	137	70	0.24
c	214	132	82	0.33
d	202	137	65	0.25
e	211	125	86	0.31

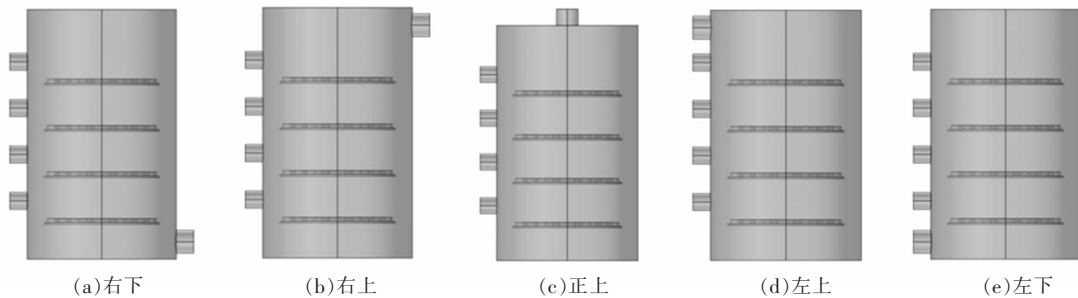


图 7 不同出口位置的速冻罐模型

Fig.7 Models of quick-freeze tanks at different outlet positions

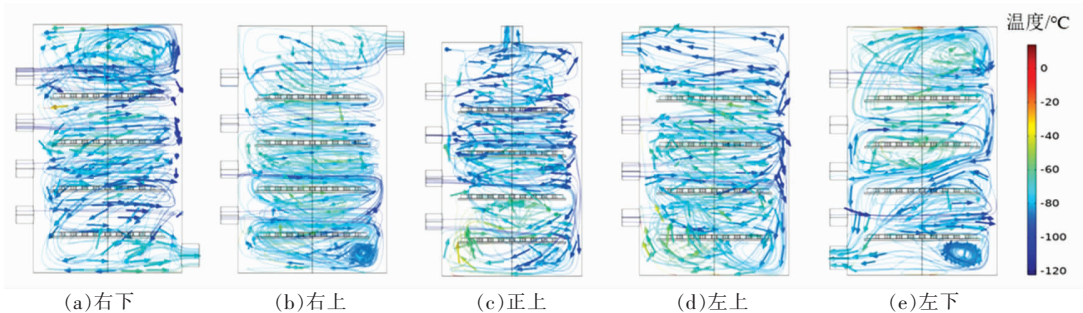


图 8 达到速冻要求时 5 种模型腔体内流线分布

Fig.8 Streamline distribution in the cavity of the five models meets the requirements of quick freezing

对比如图 9 所示(a)、(b)、(d) 3 种模型内自下而上 4 层鲜枣片中心截面温度变化曲线,可以看出,(a)、(b)两种模型 4 层鲜枣片降温时间相差较大。这是因为出口位于入口对侧,腔体内流体流动循环少,离出口越近的置物板上鲜枣片降温速率越快。而(d)模型出口与入口在同一侧,速冻过程中流体流动循环多,形成良好的流动传热协同效果,液态空气喷雾与鲜枣片充分均匀接触,4 层鲜枣片降温速率基本一致。综上所述,模型(d)在

速冻时间及冻结均匀性两方面更优于另外 4 种。

3 液态空气喷雾速冻与液氮低温冷冻机速冻方式比较

将液态空气喷雾速冻鲜枣片与文献[2]中液氮冷冻机速冻鲜枣相比较,两种方式下鲜枣温度和装置内空气温度随时间变化曲线如图 10 所示。液氮冷冻机采用长度为 4 米的-120℃液氮隧道式速冻,冻品为红枣整果,环境温度 20℃,对鲜枣不进

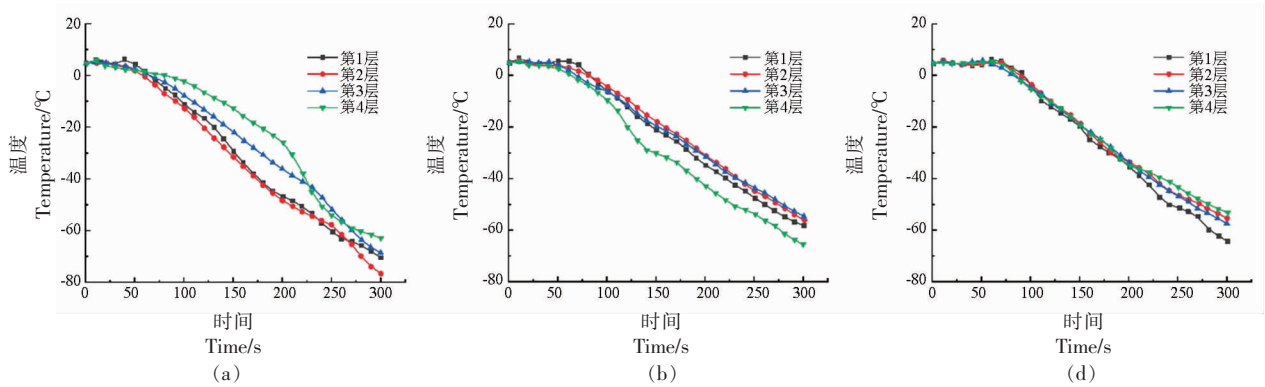


图 9 3 种模型每层鲜枣片中心截面温度随时间的变化

Fig.9 The central section temperature of fresh jujube slices in each layer of the three models changed with time

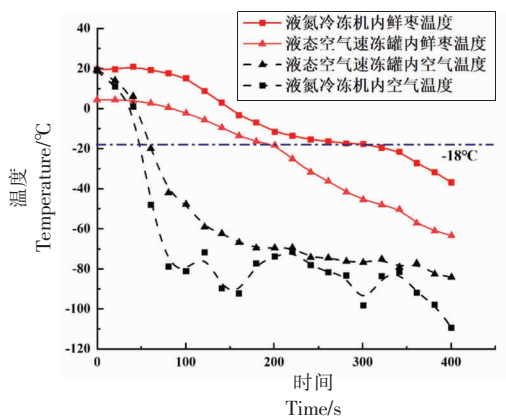


图 10 两种方式下鲜枣温度和装置内空气温度随时间的变化

Fig.10 The temperature of fresh jujube and the air temperature in the device changed with time

行预冷。

对照两种方式的鲜枣降温曲线, 液态空气喷雾速冻达到完全冻结的时间比液氮冷冻机速冻少 100 s 左右, 降温速率更快。这是因为鲜枣经切片后, 体积减小, 传热速率提高; 鲜枣片经 5 °C 预冷后送入速冻罐内, 有效减少了鲜枣片通过最大冰晶带的时间; 液态空气经雾化后增大了与腔体内鲜枣片的接触面积, 从而增强传热速率, 使得液滴在腔体内迅速蒸发, 实现对鲜枣片的快速冻结。

对照两种方式速冻腔体内空气温度变化曲线, 液态空气喷雾速冻方式曲线平滑, 整体温度高于液氮速冻。其原因是液态空气喷雾流量较小, 雾

化后与鲜枣片充分接触, 换热更充分。而采用液氮隧道式速冻, 液氮流量大, 冷能利用不充分, 造成部分能源的浪费。较之液氮隧道式速冻方式, 液态空气喷雾速冻鲜枣片不论在传热还是节能上都具有明显优势。

4 结论

通过数值模拟的方式研究液态空气喷雾速冻鲜枣片过程的流动传热特性。在速冻模型的设计中, 改变液态空气入口流速和速冻罐出口位置得到冻结过程最合理的设计参数, 为工程提供参考。主要结论如下:

1) 对比 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1, 0.2 m/s 6 个入口速度下鲜枣片的降温特性, 其冻结速度随入口速度的增大而逐渐提高, 而出口处的液相分数会递增, 冻结均匀性也会受到影响。流速为 0.06 m/s 时速冻罐出口液相分数较低, 温度分布均匀, 可快速实现鲜枣片速冻。

2) 获取最佳流速后, 分别设置 5 种出口的速冻罐模型。经计算分析, 出口位置的变化对鲜枣片冻结时间的影响较小。模型 (d) 相对与其它模型, 鲜枣片表面温度降至 -35 °C 的时间与内部温度达到 -18 °C 的时间相隔最少, 换热更充分, 4 层鲜枣片温度分布更均匀。

3) 较之液氮隧道式速冻, 液态空气喷雾速冻鲜枣片达到速冻要求的时间更短, 既能有效提高冻结速率, 又能充分利用冷能, 减少能源的浪费。

参 考 文 献

- [1] 于海杰, 姚文秋. 果蔬速冻保鲜贮藏技术[J]. 黑龙江农业科学, 2010, 33(7): 132-135.
YU H J, YAO W Q. Quick-frozen preservation technology of fruits and vegetables[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2010, 33(7): 132-135.
- [2] ALHAMDAN A, HASSAN B, ALKAHTANI H, et al. Cryogenic freezing of fresh date fruits for quality preservation during frozen storage[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2018, 17(1): 9-16.
- [3] LIANG D, LIN F, YANG G, et al. Advantages of immersion freezing for quality preservation of litchi fruit during frozen storage[J]. Lwt - Food Science and Technology, 2015, 60(2): 948-956.
- [4] 宁静红, 赵延峰, 孙朝阳, 等. 干冰喷射进出口位置对草莓速冻过程的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 187-192.
NING J H, ZHAO Y F, SUN Z Y, et al. Influence of inlet and outlet position of dry ice spray on strawberry quick-freezing process[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 187-192.
- [5] 康三江, 张海燕, 宋娟. 速冻乌龙头芽加工工艺优化及品质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 220-227.
KANG S J, ZHANG H Y, SONG J. Processing technology optimization and quality analysis of frozen *Aralia Chinensis* L.-Bud[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 220-227.
- [6] 吴炜俊, 程丽娜, 徐玉娟, 等. 液氮喷雾速冻在杨梅品质保鲜上的优势[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 140-146, 330.
WU W J, CHENG L N, XU Y J, et al. Advantages of liquid nitrogen spraying quick-freezing on the quality preservation of bayberry[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 140-146, 330.
- [7] 吴嗣圣, 陈姗姗, 余铭. 冻结方式和冻藏条件对冻藏水蜜桃果浆品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(1): 99-104.
WU S S, CHEN S S, YU M. Effect of freezing method and freezing storage condition on quality of frozen honey peach pulp[J]. Storage and Process, 2021, 21(1): 99-104.
- [8] 杨瑾莉, 罗司嘉, 丁皓玥, 等. 液氮速冻对火龙果块微生物和品质的影响研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(3): 91-101.
YANG J L, LUO S J, DING H Y, et al. Effect of liquid nitrogen quick-freezing on biochemical activity and quality of pitaya blocks[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(3): 91-101.
- [9] 贾世亮, 丁娇娇, 杨月, 等. 水产品速冻保鲜技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(11): 324-331.
JIA S L, DING J J, YANG Y, et al. Research advances in quick-freezing preservation technologies of aquatic products[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(11): 324-331.
- [10] 卢蕊, 苑征. 速冻食品发展研究现状[J]. 食品安全导刊, 2021, 15(10): 60-61.
LU R, YUAN Z. Development and research status of quick-frozen food[J]. Food Safety Guide, 2021, 15(10): 60-61.
- [11] 王广夫, 赵楠, 李琛. 速冻设备内部流场优化[J]. 机电设备, 2020, 37(6): 79-84.
WANG G F, ZHAO N, LI C. Progress in flow field optimization of quick-freezing equipment[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2020, 37(6): 79-84.
- [12] 宋佳玮, 郑明媛, 王宇, 等. 果蔬速冻技术、设备和质量控制现状分析[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(3): 154-161.
SONG J W, ZHENG M Y, WANG Y, et al. The current situation analysis of quick freezing technique, equipment and quality control for fruits and vegetables in China[J]. Storage and Process, 2019, 19(3): 154-161.
- [13] 李德志. 速冻果蔬加工技术[J]. 农村实用技术, 2017, 20(8): 51.
LI D Z. Quick frozen fruit and vegetable processing technology[J]. Shiyong Jishu, 2017, 20(8): 51.
- [14] 宋居易, 陈惠, 郝德荣, 等. 我国速冻果蔬产业发展存在的问题与对策[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(8): 116-117, 133.
SONG J Y, CHEN H, HAO D R, et al. Problems and countermeasures of quick-frozen fruit and vegetable industry development in China[J]. Anhui Agri Sci Bull, 2016, 22(8): 116-117, 133.
- [15] 王志伟. 果蔬加工技术现状与发展探讨[J]. 现代农业研究, 2021, 27(6): 135-136.
WANG Z W. Present situation and development of

- fruit and vegetable processing technology [J]. *Modern Agriculture Research*, 2021, 27(6): 135–136.
- [16] 张雅丽, 刘帮迪, 周新群, 等. 果蔬制品冻藏技术研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(10): 113–118. ZHANG Y L, LIU B D, ZHOU X Q, et al. Research review of frozen storage technology on fruits and vegetables [J]. *Storage and Process*, 2021, 21(10): 113–118.
- [17] 王喜芳, 李保国, 朱珩. 草莓液氮速冻特性及营养品质的研究[J]. *包装工程*, 2018, 39(23): 62–68. WANG X F, LI B G, ZHU Y. Quick-frozen characteristics and nutritional quality of strawberries in LN₂-spraying freezer [J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(23): 62–68.
- [18] CROWE C T, SMOOT L D. Multicomponent conservation equations [M]. *New York: Pulverized-Coal Combustion and Gasification*, 1979: 415–433.
- [19] JENG S, JOG M, BENJAMIN M. Computational and experimental study of liquid sheet emanating from simplex fuel nozzle [J]. *Aiaa Journal*, 2012, 36(2): 201–208.
- [20] SCHMEHL R, WILLMANN M, WITTIG S, et al. CFD analysis of spray propagation and evaporation including wall film formation and s-pray/film interactions [J]. *International Journal of Heat & Fluid Flow*, 1999, 20(5): 520–529.
- [21] 吴炜俊, 程丽娜, 徐玉娟, 等. 液氮喷雾速冻及梯度解冻在荔枝品质保鲜上的优势[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(3): 105–114. WU W J, CHENG L N, XU Y J, et al. Advantages of liquid nitrogen spray quick freezing and gradient thawing on the quality preservation of litchi [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(3): 105–114.
- [22] PENG X, SHE X, NIE B, et al. Liquid air energy storage with lng cold recovery for air liquefaction improvement [J]. *Energy Procedia*, 2019, 158(10): 4759–4764.
- [23] ZHANG T, CHEN L, ZHANG X, et al. Thermodynamic analysis of a novel hybrid liquid air energy storage system based on the utilization of lng cold energy [J]. *Energy*, 2018, 155(5): 641–650.
- [24] 汪慧, 苏苗印. 液化空气储能技术应用现状和展望 [J]. *中外能源*, 2021, 26(2): 90–95. WANG H, SU M Y. Application status and prospect of air liquefaction energy storage technology [J]. *Sinoglobal Energy*, 2021, 26(2): 90–95.
- [25] 段江莲, 王向东, 徐建国. 梨枣的真空冻干工艺研究 [J]. *食品科技*, 2006(6): 50–52. DUAN J L, WANG X D, XU J G. Study of technology on vacuum freeze-dry pear Chinese date [J]. *Food Science and Technology*, 2006(6): 50–52.
- [26] 曹有福, 李树君, 赵凤敏, 等. 红枣冻干工艺参数的优化 [J]. *农产品加工(学刊)*, 2009, 5(10): 64–67. CAO Y F, LI S J, ZHAO F M, et al. Optimization of processing parameter for lyophilized Chinese date [J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2009, 5(10): 64–67.
- [27] 魏婷, 高彩凤, 沈静, 等. 真空冷冻干燥过程中鲜食枣营养品质的变化研究 [J]. *现代食品科技*, 2017, 33(5): 161–167. WEI T, GAO C F, SHEN J, et al. Changes in nutritional properties of jujube fruits during different stages of vacuum freeze-drying [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 33(5): 161–167.
- [28] 李天友. 压力式喷嘴雾化特性实验研究及喷雾干燥热质传递特性数值模拟 [D]. 成都: 四川大学, 2006. LI T Y. Experimental study on atomization characteristics of pressure nozzle and numerical simulation on heat and mass transfer characteristics of spray drying [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [29] 罗文煌. 液氮速冻机温度场模拟及枸杞和冬虫夏草的液氮速冻研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019. LUO W H. Simulation of temperature field of liquid nitrogen freezer and study on liquid nitrogen freezing of wolfberry and cordyceps [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [30] 宁静红, 赵延峰, 孙朝阳. 草莓干冰喷射速冻过程的数值模拟与优化 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(1): 306–314. NING J H, ZHAO Y F, SUN Z Y. Numerical simulation and optimization of quick freezing process of strawberry by dry ice spray [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(1): 306–314.

Numerical Analysis of Quick-frozen Jujube Slices Based on Liquid Air Spray

Ning Jinghong¹, Jia Yongqin¹, Wang Runxia¹, Yang Tingran¹, Zhang Ziyang¹, You Lichao²
(¹Tianjin University of Commerce, Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin 300134
²Tianjin Tianshang Cooling Technology Co., Ltd., Tianjin 300134)

Abstract In order to expand the quick-frozen method of food, the method of quick freezing fresh jujube slices by liquid air spray was proposed. The model of liquid air spray quick freezing tank was established by COMSOL Multiphysics. The velocity field and temperature field of fresh jujube slices were simulated, and the temperature changes of fresh jujube slices at different times were obtained by field probes and boundary probes during the quick freezing process. By comparing the quick freezing effects of different liquid air injection speeds (0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1 and 0.2 m/s), it is concluded that the time of fresh jujube slices to meet the quick freezing requirements decreases with the increase of flow rate. When the flow rate is 0.06 m/s, the freezing rate is faster and the cold energy is used more fully. The quick freezing tank models with five outlet positions (lower right, upper right, directly above, upper left and lower left) were established. The results show that the model with the outlet in the upper left can realize the quick freezing of fresh jujube slices more efficiently and the temperature distribution of fresh jujube slices is more uniform. Compared with the existing cryogenic liquid nitrogen tunnel quick freezing, the liquid air spray quick freezing has a shorter time to meet the requirements of quick freezing, and has outstanding advantages in heat transfer and energy saving.

Keywords liquid air; spray; model; jujube slices; quick-frozen; simulation; heat transfer