

物料盘开孔参数对干冰喷射芒果丁速冻品质的影响

宁静红, 刘茂, 宋志朋
(天津商业大学机械工程学院 天津 300134)

摘要 利用干冰喷射对芒果丁进行速冻处理,研究物料盘开孔的不同排列方式、开孔率、开孔形状和孔径对芒果丁降温速率及冻结均匀性的影响。使用 Comsol Multiphysics 模拟不同条件下芒果丁达到速冻要求时的中心温度分布和时间。结果表明,排列方式为叉排,开孔率为 42%,开孔形状为圆形,孔径为 3 mm 的物料盘速冻效果最佳。由验证试验得出芒果丁中心温度和表面温度达到速冻要求的误差分别为 5.3%和 7.5%。在冻结均匀性方面,平均温度差值的误差为 8.3%。解冻后,芒果丁的质构特性测定结果显示,硬度和咀嚼度下降幅度较大,色度、凝聚性和弹性下降幅度较小,符合速冻芒果的品质要求。研究结果为进一步开发节能、环保的干冰速冻芒果丁装置提供参考。

关键词 干冰; 速冻; 芒果; 物料盘; 模拟

文章编号 1009-7848(2024)07-0286-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.07.029

芒果享有“热带果王”的美誉^[1]。成熟的芒果营养丰富,富含蛋白质、矿物质、维生素、类胡萝卜素等多种营养成分^[2]。由于芒果含有大量的水分和糖分,因此采摘后易腐烂、变质,储存寿命相对较短^[3]。为延长芒果的保质期,保持其原有的品质属性,速冻是目前最常用的方法。

速冻是一种快速冻结的低温保鲜法,目的是将原料前处理后,在-30℃的低温下快速冻结,并使其在 30 min 内迅速通过最大冰晶生成带^[4]。我国食品速冻企业大多采用空气式冻结装置,其中流态化式、螺旋式和隧道式冻结装置应用较广^[5],然而速冻过程中容易出现产品粘连在设备上,且产品个体之间也容易粘连在一起,不利于后续的处理。近年来,随着科技发展,人们对速冻食品品质的要求越来越高,以往的冻结方式难以满足人们的需求,出现了利用液态 N₂ 或 CO₂ 直接喷淋冻结的喷淋快速冻结装置^[4],然而也存在着明显的缺陷,一是制冷剂质量在使用后会明显下降,二是制冷剂容易渗入到冻结产品中,影响产品品质。赵远恒等^[6]对比了液氮的各种速冻方式的特点,总结了液氮速冻技术在食品加工中的应用。唐君言等^[7]对比分析了食品冷冻过程的各种数值模拟技术的优缺点。成芳等^[8]从不同方面对数值模拟技术在食品

中的应用进行对比分析,为该技术在食品冷冻中的应用提供参考依据。Lemus-Mondaca 等^[9]、Choi 等^[10]、Santos 等^[11]和 Stevens 等^[12]将不同的数值方法(如有限差分、有限元和有限体积)相结合,用于预测食品的冷冻和脱水过程,增强了流体力学和传热、传质在食品速冻中的应用。谭熙耀等^[13]利用高压 CO₂ 技术速冻双孢菇,发现泄压时间会对双孢菇品质产生影响。覃海元^[14]介绍速冻芒果丁的加工工艺,并讨论如何确保速冻芒果丁的品质。樊建等^[15-16]研究了液氮速冻白灵菇和草莓,确定了喷雾式流态化液氮速冻的最佳参数。Xie 等^[17]对喷雾冷却系统进行研究,验证了喷雾冷却系统的可行性。王金锋等^[18]和汪卢等^[19]研究了喷射系统中喷嘴结构变化的影响。Li 等^[20]和 Wang 等^[21]在喷雾冷却和模拟试验方面做了许多工作。郭旭峰等^[22]研究了液氮喷淋流态化速冻系统及其冷冻性能,得出液氮速冻的主要缺点是运行成本太高。干冰喷射速冻具有速度快,能量高,无副作用等特点。干冰喷射速冻技术是一种有潜力的食品速冻技术,它的研究现状包括工艺参数优化、冻结动力学、营养品质和微生物安全等方面。未来,随着技术的不断发展和完善,干冰喷射速冻技术有望广泛应用于食品加工行业。

自然工质干冰,即固态二氧化碳,沸点为-78.5℃,升华潜热巨大,可在极短时间内带走大量的热量,从而满足食品速冻的要求。本文采用干冰对芒果进行喷射速冻,研究物料盘开孔的排列

收稿日期: 2023-07-15

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

方式、开孔率、开孔形状和孔径对芒果丁降温速率及冻结均匀性的影响。利用 Comsol 软件进行模拟,对模拟结果进行分析对比,确定速冻效果最佳的物料盘,并进行试验验证和解冻后芒果丁质构特性测定,为进一步研究干冰速冻芒果装置提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验仪器

HP-200 精密色差仪,广东三恩时科技有限公司;TA-XT2i 质构仪,上海保圣实业发展有限公司。

1.2 干冰喷射系统

干冰喷射系统示意图如图 1 所示,主要由二氧化碳气瓶、减压阀、流量调节阀、流量计、干冰喷嘴和数据采集系统组成。打开二氧化碳气瓶阀门,液体二氧化碳由气瓶流出,流经减压阀,温度急剧下降并到达气固边界,形成干冰颗粒,这可以通过

焦耳-汤姆逊膨胀效应来解释,再经流量调节阀和流量计至干冰喷嘴,干冰喷嘴连接速冻罐入口,干冰颗粒通过喷嘴进入速冻罐内,升华带走芒果丁的热量,使其冻结,产生的二氧化碳气体由速冻罐的出口排出。其中 CO₂ 由液体二氧化碳的高压储气瓶提供。储存容器的初始压力为 15.5 MPa,即 CO₂ 源与环境压力(1 atm)之间的压差足够高,足以使饱和液态 CO₂ 通过喷嘴膨胀到大气中。在 CO₂ 气瓶的出口处安装了 1 个减压阀,其入口压力范围为 0~20 MPa,出口压力范围为 0~7 MPa。减压阀用于将压力降低到 5.5 MPa。采用流量调节阀对流量进行微调,并在系统中安装了流量计,以帮助控制流量并获取质量流量数据。数据采集系统用于监控、捕获和记录所有试验信息。整个系统各组件间采用耐低温抗压二氧化碳专用软管连接,各组件及软管均做隔热处理,从而减少试验过程中的热损失^[23]。

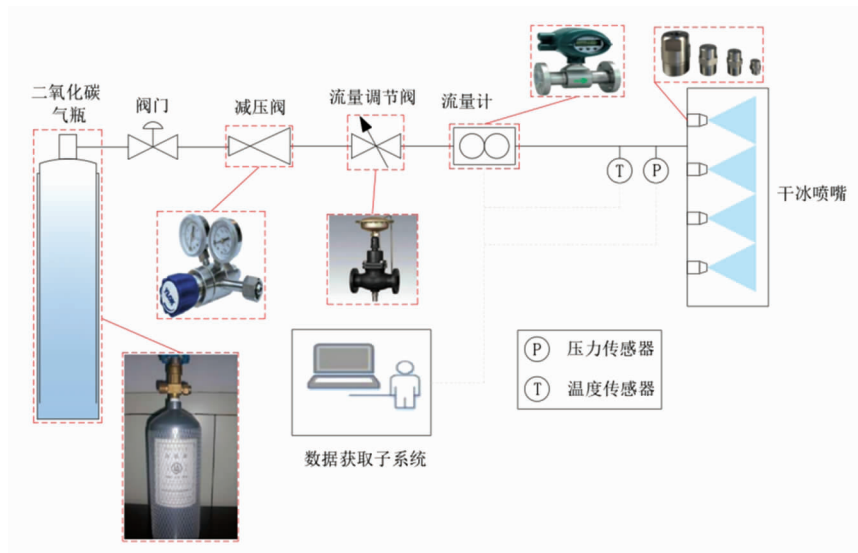


图 1 干冰喷射系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of dry ice spraying system

1.3 速冻过程数值模拟

1.3.1 物理模型 速冻罐尺寸为 260 mm×430 mm(直径×高),内部设有 4 个物料盘,每个物料盘的直径为 200 mm,厚度为 2 mm,间距为 80 mm。速冻罐左侧设有 4 个干冰入口,右侧设有 1 个 CO₂ 气体出口(如图 2 所示)。入口半径为 15 mm,出口半径为 30 mm。芒果丁尺寸为棱长 10 mm 的

正方体,每个芒果丁间距为 10 mm。模型中材料的参数及特性如表 1 所示。

利用 Comsol 软件对模型进行网格划分和物理场耦合计算。考虑到干冰颗粒接触到芒果丁时物理量的变化梯度较大,需要对芒果丁周围进行加密网格划分,网格质量均在 0.6 以上。启用 Comsol 中的瞬态求解器,计算时间设置为 120 s,

时间步长设置为 1 s,容差因子设置为 0.5,进行求解。分析网格数量对计算的影响,计算得到每套网格对应的速冻时间,如图 3 所示,当网格总数达到

450 万以上时,计算结果基本趋于稳定,本文所计算的整体网格总数在 500 万左右。

表 1 模型所选材料的参数

Table 1 Parameters of the selected materials for the model

材料/属性	恒压热容/ [J/(kg·K)]	密度/(kg/m ³)	导热系数/ [W/(m·K)]	动力黏度/(Pa·s)	比热率
干冰	770	1 562	5	5×10 ⁻⁶	1.374
气态 CO ₂	C _p (T)	Rho(Pa, T)	K(T)	eta(T)	1.3
不锈钢	475	7 850	44.5	-	-
芒果	3 770	1 210	0.56	-	-

注:表中 C_p(T)、Rho(Pa, T)、K(T)和 eta(T)均为所选材料属性的函数,无具体数值;模型的外壳和物料盘为不锈钢,模型内部干冰升华变为气态 CO₂。

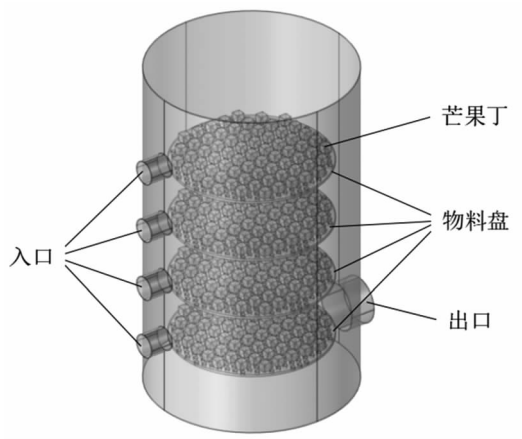


图 2 速冻罐模型

Fig.2 Mode of quick freezing tank

1.3.2 数学模型 假设流体为不可压缩流体、流体物性为常数且无内热源、黏性耗散产生的耗散热忽略不计,则该换热过程符合第 3 类边界条件^[24];干冰颗粒喷射芒果丁与物料盘为强制对流换热。

模型传热部分基于能量守恒方程^[25]:

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

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

模型流体传热部分:

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

$$\rho \nabla \cdot u = 0 \quad (4)$$

计算雷诺数,判断流动为层流还是湍流。

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (5)$$

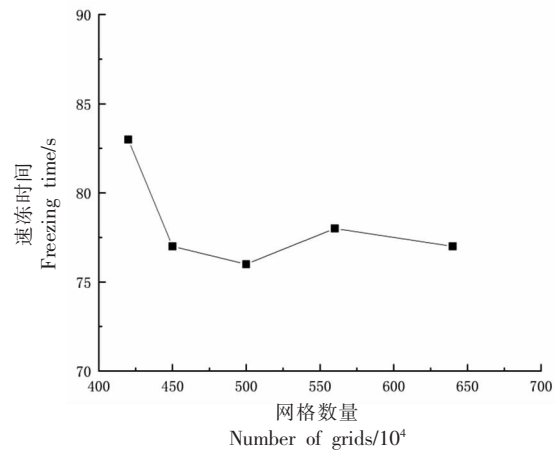


图 3 网格无关性分析

Fig.3 Grid independence analysis

通过计算可得 $Re = 1\ 859 < 2\ 000$,为层流。

相变参考方程如下:

$$\rho = \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 \quad (6)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 C_{p,1} + \theta_2 \rho_2 C_{p,2}) + L_{1-2} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (7)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{\theta_2 \rho_2 - \theta_1 \rho_1}{2 \theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2} \quad (8)$$

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (9)$$

模型相变材料参数如表 2 所示。

式(1)~式(9)中符号说明见表 3。

1.4 验证试验方法

测定解冻后芒果丁的各项指标:色度、硬度、咀嚼性、凝聚性、弹性。

使用 HP-200 精密色差仪对解冻后的芒果丁进行色度测定,记录芒果丁的 L (照度)、 a (红度)、

表 2 相变参数

Table 2 Parameters of phase change

参数名称	数值	描述
T_{pc}/K	194.65	相变起始温度
T_{del}/K	283.15	相变温度间隔
$L_{1-2}/(J/kg)$	5.736×10^{-5}	相变潜热
T_{in}/K	193.15	干冰进入初始温度
T_0/K	273.15	模型初始温度
$U_{av}/(m/s)$	0.25	干冰流速

表 3 符号说明表

Table 3 Symbol description table

符号	说明	单位	符号	说明	单位
ρ	材料的密度	kg/m^3	Q_p	干冰内能	J/kg
C_p	相变材料的比热容	$J/(kg \cdot K)$	Q_{in}	干冰动能	J/kg
T	流体温度	K	Re	雷诺数	—
t	时间	s	v	流体的流速	m/s
u	实际入口速度	m/s	d	特征长度	m
q	对流热通量	W/m^2	μ	动力黏度	$Pa \cdot s$
k	相变材料导热系数	$W/(m \cdot K)$	ρ_1, ρ_2	相变前、后两种材料的密度	kg/m^3
Q	干冰的焓	J/kg	θ_1, θ_2	2 种相变材料的体积分数	—
α_m	质量分数	—	k_1, k_2	2 种相变材料的导热系数	—

b (黄度),由于 L 值可以直接反映样品的亮度和褐变程度,因此本研究中采用色度 L 值来反映芒果丁的褐变程度。随机取 10 个芒果丁,取平均值计算。

采用 TA-XT2i 质构仪对芒果丁进行 TPA 质构测试。参数设置为:平底型探头 P/100,测试方向选择正测(表皮面接触探头),测前速度 2 mm/s,测试速度 1 mm/s,测后速度 1 mm/s,压缩率选择 20%,触发力 5 g,对芒果丁的硬度、咀嚼性、凝聚性、弹性进行测定^[2]。

2 结果与分析

2.1 模拟试验

文中模拟结果图均为速冻罐内第 2 层芒果丁。原因是当干冰喷入速冻罐后,在射流的中心有一个速度均匀的中心区域,随着流体向前运动,中心区域不断缩小,最后速度截面呈现中间大、边缘逐渐减小的分布^[26]。干冰到达速冻罐内壁后,沿着内壁向四周散开,形成贴壁射流区。干冰抵达壁面之后产生扰动,被冲击的壁面局部传热强度高,其

它区域相对较低。每层干冰的流动情况和产生的扰动各不相同,导致每层芒果块接触到的干冰量不相同,因此温度变化也不相同。每层芒果丁干冰入口轴线处降温速率较快,而冻结均匀性较差。轴线两边冻结均匀性较好,降温速率相对较慢,如表 4 所示,平均差值和时间分别代表冻结均匀性和降温速率。第 2 层相对于其它层,降温速率最慢,冻结均匀性较差,故选取第二层作为研究对象。同时也计算了速冻罐整体的降温速率,与冻结均匀性进行对比分析。

2.1.1 不同排列方式对降温速率及冻结均匀性的影响 查阅文献[27]可知,速冻芒果丁要求在 20 min 之内将其表面和中心温度分别降至 $-35\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-18\text{ }^\circ\text{C}$ 。使用 Comsol 软件进行模拟计算,物料盘的开孔形状分别为圆形、正方形、三角形,排列方式为顺排、叉排。通过对比每种开孔形状的不同排列方式模拟结果,可以发现叉排在降温速率及冻结均匀性方面均优于顺排。以开孔形状为圆形的顺排、叉排物料盘模拟结果为例,如图 4 所示,计算可得顺排的温度平均差值为 $6.7\text{ }^\circ\text{C}$,叉排为 4.8

表 4 各层轴线处和轴线两边的温度平均差值和速冻时间

Table 4 Average temperature difference and quick-freezing time at the axis of each layer and on both sides of the axis

指标	第 1 层		第 2 层		第 3 层		第 4 层	
	轴线处	轴线两边	轴线处	轴线两边	轴线处	轴线两边	轴线处	轴线两边
温度平均差值/℃	6.7	4.3	7.6	4.8	7.3	4.6	6.3	4.1
速冻时间/s	69	71	72	76	71	74	65	68

注:表中数据为排列方式叉排,开孔率 42%,开孔形状圆形,孔径 3 mm 的物料盘模拟结果。

℃,即叉排的温度分布均匀性优于顺排。降温速率可以通过芒果丁达到速冻要求的时间来反映,顺

排为 83 s,叉排为 76 s。因此,开孔的排列方式选择叉排。

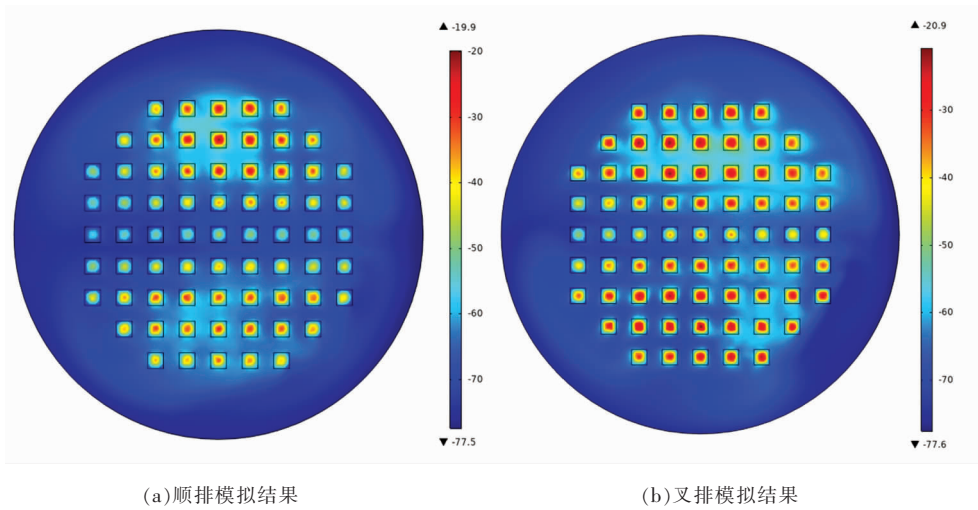
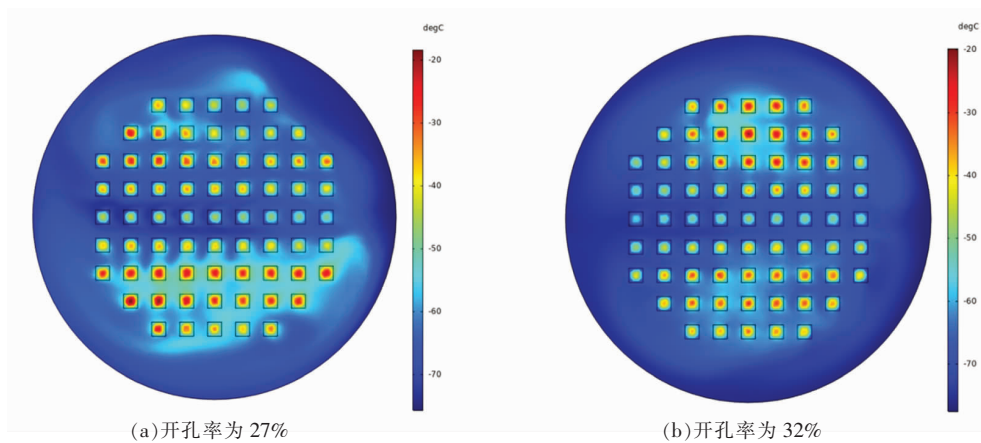


图 4 开孔形状为圆形的顺排、叉排模拟结果

Fig.4 Simulation results of arranged and cross arranged holes with circular shapes

2.1.2 不同开孔率对降温速率及冻结均匀性的影响 选用孔径为 3 mm,排列方式为叉排,开孔形状为圆形,开孔率分别为 27%,32%,37%,42%,47%的物料盘。图 5 是不同开孔率下,芒果丁达到

速冻要求时芒果丁中心温度分布,可以看出,随着开孔率的增加,其中心温度分布均匀性以开孔率为 42%最佳,向两边弱化。



(a)开孔率为 27%

(b)开孔率为 32%

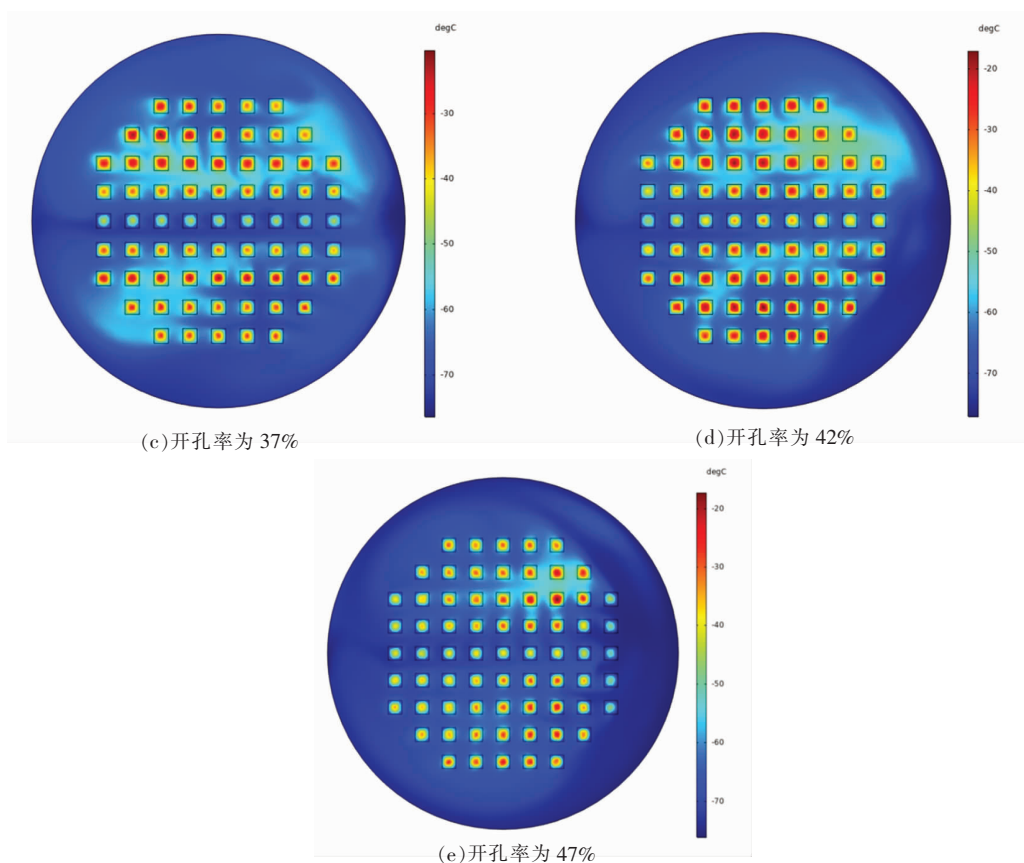


图 5 不同开孔率下芒果丁中心温度分布

Fig.5 Temperature distribution in the center of diced mango with different porosity

为了更直观的反映芒果丁中心温度分布均匀性和降温速率，求得芒果丁达到速冻要求时中心温度的平均差值和时间，如表 5 所示。不同开孔率的芒果丁中心温度极值位置不同，干冰入口轴线

和物料盘边缘处温度波动较大，这一情况符合实际试验结果。整体来看，随着开孔率的增大，达到速冻要求的时间逐渐缩短，冻结均匀性以开孔率为 42% 最佳，向两边逐渐弱化。

表 5 不同开孔率的温度平均差值和速冻时间

Table 5 Average temperature difference and quick freezing time of different opening rates

开孔率/%	27	32	37	42	47
温度平均差值/℃	9.7	8.3	6.2	4.8	7.6
速冻时间/s	93	86	80	76	71

2.1.3 不同孔径对降温速率及冻结均匀性的影响

通过模拟结算可得表 6，当开孔率和开孔形状相同时，随着孔径(R)减小，芒果丁的降温速率先变小后变大，冻结均匀性逐渐变差。在 R=1 mm 时，降温速率最大，而冻结均匀性较差；当 R=3 mm 时，冻结均匀性最好。

2.1.4 不同开孔形状对降温速率及冻结均匀性的影响

如图 6 所示，选择开孔率为 42%，半径为 3 mm 圆形，边长为 5.3 mm 正方形，边长为 8 mm 三

角形开孔形状的物料盘(开孔率、孔径面积相同、排列方式均为叉排)。

通过模拟计算得表 7，可以看出，在冻结均匀性方面，圆形最佳，正方形和三角形差异较小。在降温速率方面，正方形最快，圆形最慢。综合冻结均匀性和降温速率考虑，孔径为 3 mm，排列方式为叉排，开孔率为 42%，开孔形状为圆形的物料盘效果最佳。

表6 不同孔径的温度平均差值和速冻时间

Table 6 Average temperature difference and quick freezing time of different apertures

孔径/mm	1	2	3
温度平均差值/°C	6.6	5.7	4.8
速冻时间/s	72	79	76

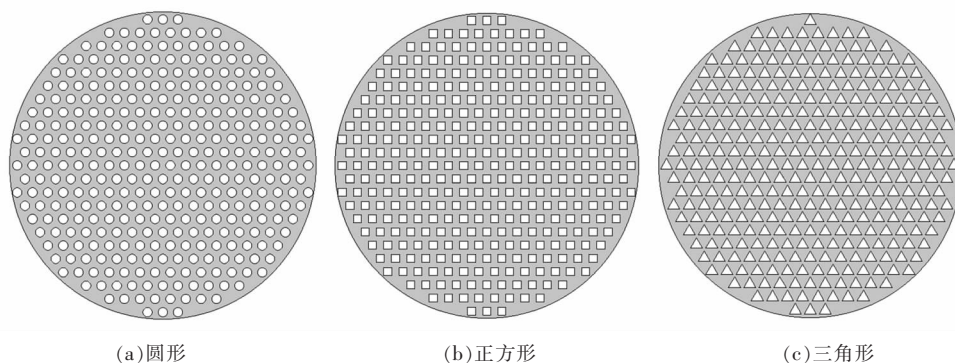


图6 不同开孔形状的物料盘

Fig.6 Material trays with different opening shapes

表7 不同开孔形状的温度平均差值和速冻时间

Table 7 Average temperature difference and quick freezing time of different opening shapes

开孔形状	圆形	正方形	三角形
温度平均差值/°C	4.8	6.7	6.4
速冻时间/s	76	70	72

2.2 验证试验

如图7和图8所示为干冰喷射速冻芒果丁的装置图和速冻罐内照片。与模拟对应,分别设置不同条件的物料盘。试验过程中,将T型热电偶分别

插入芒果丁中心和表面,并将热电偶接入横河GP10数据采集器中,温度变化及冻结温度曲线由计算机显示,并自动记录和绘制。当速冻罐内降温最慢的芒果丁达到速冻要求时试验结束。



图7 干冰喷射速冻装置

Fig.7 Dry ice spray quick freezing device

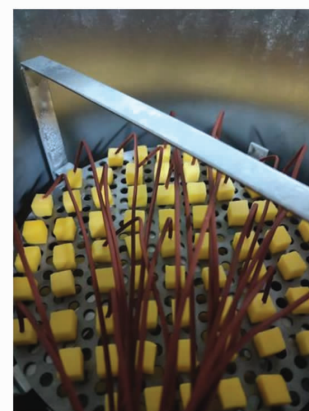


图8 速冻罐内照片

Fig.8 Photos in quick freezing tank

多组试验后,整理和分析试验数据,将试验结果与模拟结果进行比较。在冻结速率方面,如图 9 所示,图中数据是排列方式为叉排,开孔率为 42%,开孔形状为圆形,孔径为 3 mm 的物料盘的模拟与实际试验结果。在 79 s 时,芒果丁中心温度全部达到 -18°C ,与模拟结果 76 s 的误差为 5.3%。在 72 s 时,芒果丁表面温度全部达到 -35°C ,与模拟结果 67 s 的误差为 7.5%。在冻结均匀性方面,

模拟结果的平均温度差值为 4.8°C ,对应的试验结果为 5.2°C ,误差为 8.3%。产生误差的主要原因是:1) 试验时的芒果丁是手工切丁的,大小不均匀,与模拟中所设芒果丁尺寸越接近,试验结果误差越小。2) 在芒果丁中心及表面的热电偶插入位置存在操作误差,使结果存在误差。3) 物料盘搁架干扰干冰紊流,影响速冻效果。

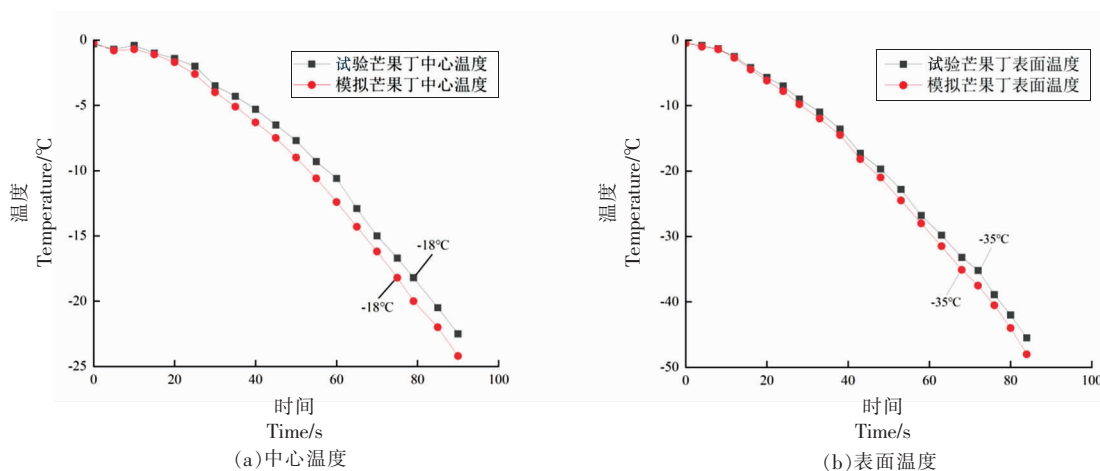


图 9 芒果丁中心及表面温度变化

Fig.9 Temperature change of diced mango center and surface

2.3 芒果丁质构特性分析

各项指标的测定结果如表 8 所示,硬度和咀嚼度下降幅度较大,色度、凝聚性和弹性下降幅度

较小。这与赵金红等^[28]对芒果冻结速率和品质的研究结果一致,可认为芒果经干冰喷射速冻-解冻后仍能保持较高的品质。

表 8 质构特性测定结果

Table 8 Determination results of texture properties

指标	色度	硬度	咀嚼性	凝聚性	弹性
速冻前	49	687	73	0.22	0.53
速冻后	46	453	33	0.17	0.46
下降百分率/%	6.12	34.06	55.79	22.73	13.21

3 结论

通过模拟和验证试验研究不同物料盘对干冰喷射速冻的影响,对解冻后的芒果丁进行质构特性测定,得出以下结论:

1) 通过设置物料盘开孔的不同排列方式、开孔率、开孔形状和孔径,可知叉排在降温速率及冻结均匀性方面均优于顺排;随着开孔率的增加,芒果丁中心温度分布均匀性以开孔率为 42%最佳向两边弱化;开孔形状为圆形的物料盘冻结均匀性

最佳,正方形的降温速率最快;随着孔径减小,芒果丁的降温速率先变小后变大,冻结均匀性逐渐变差。综合冻结均匀性和降温速率考虑,排列方式为叉排,开孔率为 42%,开孔形状为圆形,孔径为 3 mm 的物料盘速冻效果最佳。

2) 通过对比分析模拟和验证试验结果,得出芒果丁中心温度和表面温度达到速冻要求的误差分别为 5.3%和 7.5%;在冻结均匀性方面,平均温度差值的误差为 8.3%。产生误差的原因是:芒果

丁为手工切丁,大小不均匀;热电偶插入位置存在误差;物料盘搁架干扰干冰流场。

3) 质构特性测定指标包括色度、硬度、咀嚼性、凝聚性和弹性。测定结果显示硬度和咀嚼度下降幅度较大,色度、凝聚性和弹性下降幅度较小。与现有研究结果一致,符合对速冻芒果品质的要求,即干冰喷射速冻可以满足芒果的速冻需求。

参 考 文 献

- [1] ENGEL K H, TRESSL R. Studies on the volatile components of two mango varieties[J]. *J Agric Food Chem*, 1983, 31(4): 796-801.
- [2] 何全光, 黄梅华, 张娥珍, 等. 不同品种芒果丁液氮速冻-解冻后质构特性比较研究[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(7): 1365-1370.
HE Q G, HUANG M H, ZHANG E Z, et al. Comparative study on different varieties of mango pieces texture properties after liquid nitrogen quick freezing and thawing[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(7): 1365-1370.
- [3] 张瑜. 芒果玻璃态冻藏过程中品质随水状态和冰晶变化规律的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
ZHANG Y. The research of changes in quality attributes with water state and ice crystals of mango during glassy state frozen storage[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [4] 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.
- [5] 王瑞军. 水果的速冻加工技术分析[J]. *食品安全导刊*, 2016(15): 124-125.
WANG R J. Analysis of the quick freezing processing technology of fruit[J]. *China Food Safety Magazine*, 2016(15): 124-125.
- [6] 赵远恒, 郭嘉, 陈六彪, 等. 食品液氮速冻技术研究进展[J]. *制冷学报*, 2019, 40(2): 1-11.
ZHAO Y H, GUO J, CHEN L B, et al. Review of liquid nitrogen quick-freezing technology in food[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(2): 1-11.
- [7] 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.
- [8] 成芳, 杨小梅, 由昭红, 等. 食品冷冻过程的数值模拟技术[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 162-170.
CHENG F, YANG X M, YOU Z H, et al. Application of numerical simulation in the research of food freezing process[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 162-170.
- [9] LEMUS -MONDACA R A, A VEGA -GÁLVEZ, MORAGA N O. Computational simulation and developments applied to food thermal processing[J]. *Food Engineering Reviews*, 2011, 3(3/4): 121-135.
- [10] CHOI W, JUN S. Measurement of structural shrink ages of freeze dried chipping potatoes for crack modeling[J]. *Food Science & Biotechnology*, 2013, 22(4): 967-972.
- [11] SANTOS M V, LESPINARD A R. Numerical simulation of mushrooms during freezing using the FEM and an enthalpy; Kirchoff formulation[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2011, 47(12): 1671-1683.
- [12] STEVENS D, ROCCA A L, POWER H, et al. Estimating the temperature evolution of foodstuffs during freezing with a 3D meshless numerical method [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2015, 53: 46-55.
- [13] 谭熙耀, 吴继红, 廖小军, 等. 高压二氧化碳技术速冻双孢菇工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 375-380.
TAN X Y, WU J H, LIAO X J, et al. Optimization on quick freezing technology of *Agaricus bisporus* by high pressure carbon dioxide[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 375-380.
- [14] 覃海元. 速冻芒果丁生产工艺[J]. *广西热带农业*, 2008(1): 32-34.
QIN H Y. Production process of quick-frozen mango blocks[J]. *Tropical Agriculture in Guangxi*, 2008(1): 32-34.
- [15] 樊建, 赵天瑞, 覃宇悦, 等. 白灵菇液氮速冻工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2008(5): 238-240.

- FAN J, ZHAO T R, QIN Y Y, et al. Study on freezing technology of *Pleurotus ferulate varnebrodensis lenzi* by liquid nitrogen quick freezing [J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(5): 238-240.
- [16] 樊建, 赵天瑞, 曹建新, 等. 草莓液氮速冻工艺研究[J]. 制冷学报, 2008(2): 60-62.
- FAN J, ZHAO T R, CAO J X, et al. Study on strawberry freezing technique by liquid nitrogen quick freezing[J]. Journal of Refrigeration, 2008(2): 60-62.
- [17] XIE J L, TAN Y B, DUAN F, et al. Study of heat transfer enhancement for structured surfaces in spray cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 59(1/2): 464-472.
- [18] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- WANG J F, LI W J, XIE J, et al. Influence of two different nozzle forms on the flow field and heat transferring characteristics of quick freezer[J]. Food & Machinery, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [19] 汪卢, 雷泽勇, 邓健, 等. 基于 FLUENT 干冰清洗喷嘴气固两相流场仿真研究[J]. 山东化工, 2019, 48(6): 120-122, 124.
- WANG L, LEI Z Y, DENG J, et al. Simulation of gas-solid two-phase flow field in dry ice cleaning nozzles based on FLUENT [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(6): 120-122, 124.
- [20] LI J X, LI Y Z, LI E H, et al. Experimental investigation of spray-sublimation cooling system with CO₂ dry-ice particles[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174: 115285.
- [21] WANG Y, ZHOU N, YANG Z, et al. Experimental investigation of aircraft spray cooling system with different heating surfaces and different additives[J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2016, 103: 510-521.
- [22] 郭旭峰, 陶乐仁. 液氮喷淋流态化速冻系统及冷冻性能研究[J]. 工程热物理学报, 2003(3): 475-477.
- GUO X F, TAO L R. Investigation on freezing characteristic of LN₂-spraying fluidized cooling system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003 (3): 475-477.
- [23] 李全功. 高热载荷干冰升华冷却特性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- LI Q G. Research on sublimation cooling characteristics of dry-ice in high thermal flux[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.
- [24] 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.
- [25] 宁静红, 孙朝阳, 鲍春秀, 等. 高热通量芯片干冰冷却降温性能的理论分析[J]. 化工学报, 2021, 72(4): 2047-2056.
- NING J H, SUN Z Y, BAO C X, et al. Theoretical analysis on the cooling performance of high heat flux chip with dry ice[J]. CIESC Journal, 2021, 72(4): 2047-2056.
- [26] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 359-361.
- YANG S M, TAO W Q. Heat transfer[M]. 4nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 359-361.
- [27] 胡中海, 孙谦, 龙勇, 等. 水果速冻保鲜技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(2): 242-247.
- HU Z H, SUN Q, LONG Y, et al. Advances in research on technology of quick-freezing fruits [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(2): 242-247.
- [28] 赵金红, 胡锐, 刘冰, 等. 渗透脱水前处理对芒果冻结速率和品质的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 220-227.
- ZHAO J H, HU R, LIU B, et al. Effect of osmotic dehydration pre-treatment on freezing rate and quality attributes of frozen mango[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 220-227.

Effect of Hole Parameters of Material Tray on the Quick Freezing Quality of Diced Mango by Dry Ice Spraying

Ning Jinghong, Liu Mao, Song Zhipeng

(Tianjin University of Commerce, College of Mechanical Engineering, Tianjin 300134)

Abstract Dry ice spraying is used for quick freezing of diced mango, and the effects of different arrangements, hole ratios, hole shapes, and diameters of material tray holes on the cooling rate and freezing uniformity of diced mango are studied. Use Comsol Multiphysics to simulate the central temperature distribution and time required for diced mango to reach freezing requirements under different conditions. The results showed that the material tray with a fork arrangement, a hole opening rate of 42%, a circular hole shape, and a hole diameter of 3 mm had the best quick freezing effect. According to the verification experiment, the errors of the center temperature and surface temperature of diced mango reaching the requirements for quick freezing are 5.3% and 7.5%, respectively. In terms of freezing uniformity, the error of the average temperature difference is 8.3%. After thawing, the texture characteristics of diced mango were determined to show a significant decrease in hardness and chewiness, while the decrease in chromaticity, cohesiveness, and elasticity was relatively small, meeting the quality requirements of frozen mangoes. The research results provide reference for further development of energy-saving and environmentally friendly dry ice frozen diced mango equipment.

Keywords dry ice; quick freezing; mango; material tray; simulation