

多出口扇形喷嘴干冰喷射速冻蓝莓特性研究

宁静红 宋志朋 杨鑫 任子亮 王暖厚 包翔

(天津商业大学机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 为提高干冰微粒速冻蓝莓的喷嘴雾化特性, 优化设计一种多出口扇形喷嘴, 喷射出扇形干冰微粒射流, 更均匀更快速地冻结蓝莓。建立多出口扇形喷嘴的物理模型及蓝莓速冻干冰射流流场计算模型。基于 Fluent 软件, 采用气固两相动力学模型 DPS、Realizable、 $k-\varepsilon$ 湍流模型对多出口扇形喷嘴干冰微粒喷射速冻蓝莓的过程进行数值模拟研究。探究了扇形喷嘴出口不同 V 形切槽角 (60° 、 70° 、 80° 、 90°) 在相同的入口流量和出口孔径下, 对干冰微粒在速冻腔内的流场分布、蓝莓的冻结速率和冻结均匀性等参数的影响。结果表明: 随着 V 形切槽角的增加, 扇形冲击射流宽度降低, 冲击射流核心区域内的流速增加。当多出口扇形喷嘴出口 V 形切槽角为 70° 时, 相比 60° 、 80° 、 90° 速冻腔内整盘蓝莓的冻结完成时间分布最集中, 整体的冻结速度快, 流场最均匀, 为此喷嘴模型 (入口孔径 30 mm, 入口流速 0.25 m/s, 出口为圆周布置的孔径 5.2 mm $\times$ 6 (6 个孔径为 5.2 mm 的出口) 和中心布置的孔径 2 mm $\times$ 4 的组合) 最优出口参数。随后对模拟仿真最优结果进行实验测试, 可得整盘蓝莓完成速冻的时间为 119 s, 冻结速率为 0.50 cm/min, 实验与模拟降温曲线误差为 4.3%。对速冻后蓝莓的花青素含量、可溶性固形物质量分数以及失水率等进行测试, 结果表明干冰速冻后蓝莓在贮藏期间的感官品质保持较好, 优于速冻蓝莓标准。

关键词: 速冻蓝莓; 扇形喷嘴; 干冰微粒; 喷射; 模拟

中图分类号: TB61

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0392-09

OSID:



Characteristics of Dry Ice Jet Quick-frozen Blueberries with Multi-outlet Fan-shaped Nozzle

NING Jinghong SONG Zhipeng YANG Xin REN Ziliang WANG Nuanhou BAO Xiang

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: In order to improve the atomization characteristics of quick-frozen blueberries, a fan-shaped nozzle with multi-outlet was designed and optimized. It can spray a fan-shaped dry ice particle jet, which can ultimately freeze blueberries more evenly and quickly. A physical model of a multi-outlet fan-shaped nozzle and a computational model of the dry ice jet flow field for quick-frozen blueberries were established. Using Fluent software and the gas-solid two-phase dynamics model DPS, Realizable, $k-\varepsilon$ turbulence model, a numerical simulation study was conducted on the process of quick-freezing blueberries by using a multi-outlet fan-shaped nozzle for dry ice particle spraying. The different V-shaped groove angles (60° , 70° , 80° and 90°) at the outlet of the fan-shaped nozzle were investigated, the effects of different angles on the flow field distribution of dry ice particles in quick-freezing chamber, as well as the freezing rate of blueberry and the freezing uniformity were studied under the same inlet flow rate and outlet aperture. The results showed that as the angle of the V-shaped groove was increased, the width of the fan-shaped impinging jet was decreased, and the flow velocity in the core region of the impinging jet was increased. When the V-shaped groove angle of the multi-outlet fan-shaped nozzle outlet was 70° , compared with 60° , 80° , and 90° , the freezing completion time distribution of the whole plate of blueberries in the quick-freezing chamber was the most concentrated, the overall freezing speed was fast, and the flow field was the most uniform. Therefore, it was the optimal outlet parameter for this nozzle model (inlet diameter of 30 mm, inlet velocity of 0.25 m/s, outlet was a combination of circularly arranged diameter of 5.2 mm $\times$ 6 (there were six outlets with a hole diameter of 5.2 mm) and centrally arranged diameter of 2 mm $\times$ 4). The optimal result of the simulation was then tested experimentally. The

收稿日期: 2023-07-31 修回日期: 2023-10-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52376069)和天津市大学生创新训练计划项目(202310069078)

作者简介: 宁静红(1964—), 女, 教授, 主要从事制冷系统节能与优化研究, E-mail: ningjinghong@126.com

results showed that the whole plate of blueberries completed quick-freezing in 119 s, with a freezing rate of 0.50 cm/min. The error between the experimental and simulated cooling curves was 4.3%. Tests were conducted on anthocyanins content, soluble solids, mass fraction, and water loss rate of frozen blueberries after quick freezing. The results showed that the sensory quality of dry ice quick-frozen blueberries during storage was better than that of national standard quick-frozen blueberries.

Key words: quick-frozen blueberries; fan-shaped nozzle; dry ice particles; jet; simulate

0 引言

蓝莓在采摘后会迅速变质^[1],为了保持蓝莓的营养和口感,速冻是一种很好的保存方式。当蓝莓的温度降低到初始冰点时,就会发生冰的成核,高过冷度与高成核速率相关,并因此导致大量小冰晶产生。要达到较高的过冷度需要较大的降温速率。现有的冷冻介质主要有冷空气、液氮^[2]、氯化钙等盐溶液^[3]和二氧化碳^[4-5],在满足较大降温速率的同时也要防止冻结速率过快而将蓝莓冻裂,更要考虑装置的成本。

蓝莓的干冰喷射速冻^[6]是一种比较新颖的方式, -78.5℃干冰微粒冲击蓝莓表面吸收热量,并升华膨胀导致低温气态二氧化碳在蓝莓表面的加速流动,能达到较大降温速率。文献[7-9]采用液氮流态化方式速冻蓝莓,结果显示解冻后蓝莓的理化性质优于普通的机械冷冻。文献[10]创新性采用干冰喷射和 CaCl₂溶液的方式来速冻草莓,速冻后的理化性质测试结果验证了方案可行性。

喷嘴对干冰微粒的形成过程影响显著,Laval型喷嘴是目前干冰喷射使用最多的喷嘴类型^[11],该型喷嘴有收敛段和发散段,提供了最大的射流加速度,为了获得最佳的加速效果和微粒的均匀分布,圆形喷嘴形状、阵列布置更好^[12]。文献[13]通过激光衍射法(氦氖激光器)测量干冰微粒的尺寸,结果显示,从喷嘴喷出的初级干冰微粒的质量中位径约为 1 μm,其在喷射流中先增长,然后由于升华作用而变小。喷嘴的几何形状、结构参数对射流出口流场的轮廓形状和粒径^[14]的影响较大^[15],扇形喷嘴出口的高速喷射流与周围空气混合并扩散,产生类似扇形的喷雾区域,能够更好地分散干冰射流的流量,喷雾更均匀,接触水果范围更广,喷雾微粒会不断地沉积在被冷冻的水果表面,并逐渐形成冷冻层,可以实现较高的冷冻速率。文献[16]进行了扇形喷嘴雾化特性问题的数值模拟研究,验证了数值计算对喷嘴内部流动描述的准确性。文献[17]对高压下扇形喷嘴的雾化特性进行了仿真和实验验证,获得了提升喷嘴的喷射角和射流流量的最优参数。

干冰微粒冲击射流速冻果品过程中,涉及到

气固两相流、升华相变、冲击射流等多个基础问题,这些问题耦合在一起,亟需进行系统研究,发展出一套完整的理论体系,从而指导干冰喷射速冻水果系统的进一步优化。干冰喷射速冻水果系统中,关于喷嘴的参数和速冻间的几何布置对速冻过程传热传质^[18]的影响研究较少,如喷嘴的进出口角度和形状。

本文利用 CFD(计算流体力学)^[19]对干冰微粒射流速冻蓝莓的过程进行数值模拟,分析扇形喷嘴出口切槽角度对蓝莓速冻过程的影响,此外,对干冰喷射速冻蓝莓过程进行实验测试,并通过实验与数值模拟结果比较,对数值方法的准确性进行验证。并对速冻前后蓝莓的维生素 C 含量、花青素含量、可溶性固形物质量分数以及失水率、色差进行测定,以期为后续的干冰速冻装置设计提供参考。

1 数值模拟

1.1 蓝莓物性

以纯度 99.9% 的二氧化碳气瓶作为喷射源,温度为 -75℃的干冰微粒和二氧化碳气体为冷冻介质。速冻腔体的封套结构由钢化玻璃和隔热材料组成,为了方便可视化实验,选择钢化玻璃。蓝莓购自上海市青浦现代农业园,其大小均匀,表面无破损。蓝莓质量为 12~14 g,半径为 (1.0 ± 0.05) cm。蓝莓速冻完成放入冰柜贮藏 3 d 后于 4℃恒温恒湿箱中低温冷藏解冻,解冻后进行蓝莓品质指标的测定^[20-21]。采用 2,6-二氯酚酚滴定方法测定速冻前后果品中维生素 C 含量(质量比);可溶性固形物质量分数采用 PLA-BXIACID5 型糖度仪测定(日本 ATAG 公司);每组随机抽取 20 颗蓝莓果实打浆,每组取 2.0 g,采用紫外分光光度计法测定;测量提取液在波长 600 nm 和 530 nm 处的吸光度,以吸光度之差表征花青素质量分数,每组实验样品测量 5 次,结果取平均值;失水率测定采用干燥法:将蓝莓放入干燥箱中,在一定温度下干燥一段时间,然后测量蓝莓质量的变化。根据失去的质量,计算蓝莓中含水率。经查阅文献[3,6,8],蓝莓、干冰、钢材热物性参数如表 1 所示。

表 1 模型材料参数

Tab.1 Material parameters of model

参数	干冰	CO ₂	钢材	蓝莓
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	770	$C_p(T_1)$	871	$C_p(T_2)$
密度/(kg·m ⁻³)	110	1.787 8	2 719	800
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	5	0.014 5	202.4	$\lambda(T)$
黏度/(Pa·s)	5×10^{-6}	1.37×10^{-5}		

注： $C_p(T_1)$ 为 Fluent 软件内置 CO₂ 分段多项式， $C_p(T_2)$ 为图 1a 的函数拟合表达式 $459.913\ 258 + 1.864\ 879\ 96T - 0.002\ 129\ 215\ 19T^2 + 1.224\ 880\ 04 \times 10^{-6}T^3$ ， $\lambda(T)$ 为图 1b 的函数拟合表达式 $-0.001\ 324\ 726\ 16 + 4.139\ 569\ 23 \times 10^{-6}T + 6.708\ 890\ 81 \times 10^{-8}T^2 - 2.110\ 831\ 53 \times 10^{-11}T^3$ 。

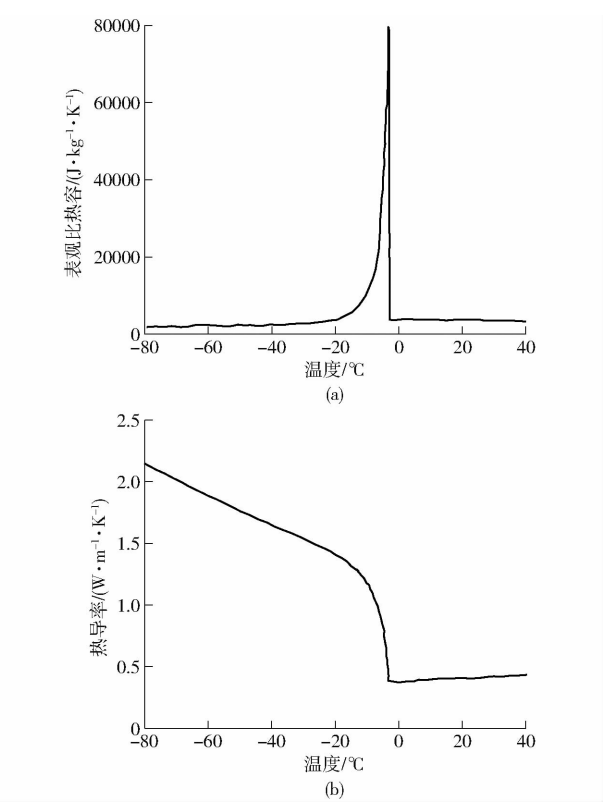


图 1 蓝莓热物性参数随温度的变化曲线
Fig.1 Variations of blueberry thermophysical parameters with temperature

1.2 物理模型

干冰喷雾速冻腔体尺寸:450 mm × 450 mm × 150 mm,将喷嘴布置在蓝莓的正上方,设置喷射高度 120 mm,干冰射流从喷嘴入口流入,速冻腔下部的出口流出。食品级不锈钢置物板厚度 2 mm,半径

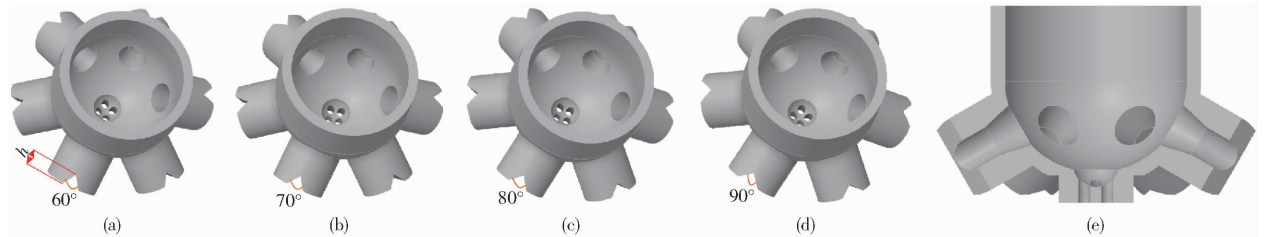


图 3 多出口扇形喷嘴模型
Fig.3 Multi-outlet fan-shaped nozzle models

为 175 mm;蓝莓间距为 10 mm,蓝莓按照 1、6、12、18、24、30 绕中心 6 圈的方式,摆放 91 颗。

喷嘴与蓝莓的结构布置见图 2。喷嘴中心剖面图见图 3e。喷嘴入口孔径为 30 mm,圆周布置的 6 个出口的中心线分别与喷嘴入口中心线呈倾斜角 60°阵列布置,直径为 5.2 mm,每个出口内部为收缩段和直通段,此外,入口轴线中心位置布置 4 个直通型出口,直径为 2 mm。在预模拟中,倾斜角 30°和 45°为圆周阵列喷嘴的出口布置方式无法将射流冲击核心区域干冰微粒完全覆盖到整盘蓝莓表面,故本次选用倾角 60°布置出口方向。将蓝莓组织分为表层和中心层结构,蓝莓表皮和内部组织分层明显,热物性不断变化,将蓝莓物理模型设置成双层结构,每层蓝莓热物性一致。轴线中心位置出口的孔径小于倾斜角 60°圆周出口的孔径,以调整各出口干冰喷雾射流流量和压力的均匀性。

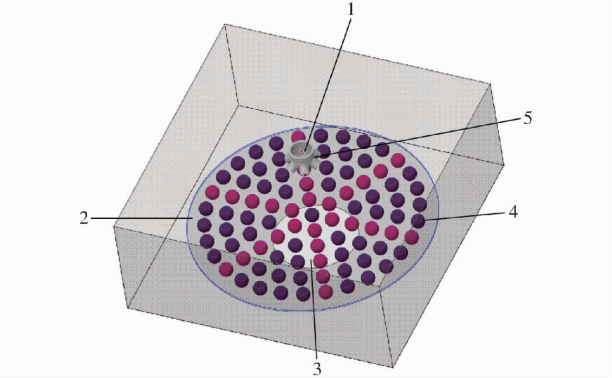


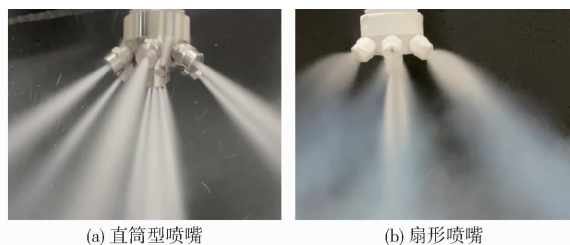
图 2 速冻腔体、喷嘴与蓝莓的结构布置
Fig.2 Arrangement of quick-freezing cavity, nozzles and blueberries

1. 入口 2. 置物板 3. 出口 4. 蓝莓 5. 扇形喷嘴

圆周布置出口采用收缩型孔口,干冰射流在喷嘴收缩段内膨胀加速,在直通段时达到最高速度,导致微粒间更容易相互碰撞,干冰微粒之间的碰撞激发出更多的冰雾,形成不同的尺寸分布,小的干冰微粒沉积在管壁上,形成了一个沉积层,因静电吸引力和范德华力等而团聚,微粒的团聚过程取决于干冰喷射的温度和速度,团聚的干冰微粒通过干冰射流摩擦阻力从沉积层被夹带至喷射流中。压力降低会导致液态二氧化碳部分蒸发成气态。

并以气泡的形式释放出来,气泡破裂时会引起流场中的涡旋形成、湍流强化以及压力脉动,破裂时所产生的冲击波和高速流动会夹带更多沉积层中的干冰微粒至射流中,从而增大喷嘴出口射流中干冰体积分数。

微粒速度随射流压力的增大而线性增大,在扇形喷嘴的出口切槽角方向会有较大的压降幅度,产生较大的扩散速度,射流随着与喷嘴距离的增加而膨胀成扇形区域,此过程中微粒从中心区域移动到湍流射流边缘,干冰射流与速冻腔内空气边界产生摩擦,微粒流动逐渐被减速。喷嘴切槽角方向压降也按照相对切深 h (图 3) 由小到大的顺序由大到小分布。射流经过截面积变化的区域时,由于速度和压力的变化,会形成旋转的射流。相对切深越大,旋转射流的强度越大,射流在出口处的速度和压力变化也越剧烈。本文共设计了 4 种不同的扇形喷嘴切槽角度,分别为 60° 、 70° 、 80° 、 90° ,如图 3 所示。图 4 为两种类型喷嘴的干冰射流廓形。



(a) 直筒型喷嘴 (b) 扇形喷嘴

图 4 干冰微粒喷射效果

Fig. 4 Dry ice particle jet effects

采用 ANSYS Fluent 对所有研究条件下的几何模型进行网格划分,如图 5a 所示,全局网格生成采用非结构化网格,在喷嘴壁面添加边界层。在网格划分过程中,对所有模型分别划分了多组不同数量的网格单元,分析网格数量对计算的影响,给定多出口扇形喷嘴入口速度 0.25 m/s ,选定一个出口的速度进行监测,瞬态计算迭代 200 步,计算得到每套网格对应的出口速度见图 5b,当计算的出口速度稳定时,表明计算结果与网格数量无关。可看出网格数量区间在 3.5×10^5 及以上时有稳定的趋势,为满足计算精度要求,最终选定网格数量为 4.0×10^5 。网格质量为 0.7。

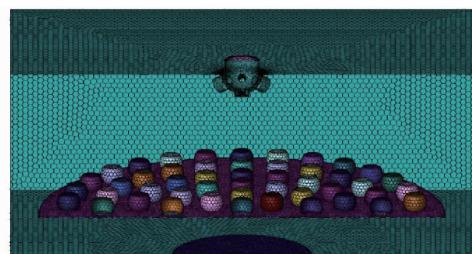
1.3 数学模型

气相流动质量控制方程微分守恒形式为^[22]

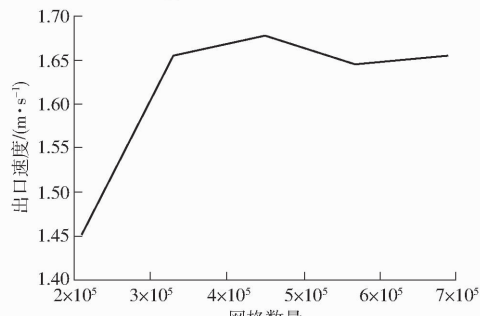
$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 U) = 0 \quad (1)$$

式中 $\frac{\partial \rho_1}{\partial t}$ ——气相密度变化率,简化为非压缩性气体为 0

$\nabla \cdot (\rho_1 U)$ ——气相质量流密度分散程度



(a) 计算区域网格划分



(b) 出口速度

图 5 模型网格

Fig. 5 Model grid

ρ_1 ——气相密度, kg/m^3

U ——气相速度, m/s

t ——时间, s

气相动量控制方程为

$$\frac{\partial (\rho_1 U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 U) = -\nabla P + \nabla \cdot \phi + S_M \quad (2)$$

其中 $\phi = \mu \left[\nabla \cdot U + (\nabla \cdot U)^T - \frac{2}{3} \delta (\nabla \cdot U) I \right] \quad (3)$

式中 S_M ——气相动量源项

ϕ ——与应力变化率相关的应力张量

P ——气相所受体积力

μ ——流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

I, δ ——单位张量

固相颗粒流动求解采用 Lagrange 方程,在 Lagrange 坐标系中计算,可由牛顿第二定律得到颗粒的动量微分方程,求解该方程得到颗粒相在流场中的运动轨迹

$$\frac{dv}{dt} = \sum F + g \quad (4)$$

式中 $\sum F$ ——颗粒相总受力加速度, m/s^2

g ——重力加速度, m/s^2

v ——颗粒速度, m/s

当干冰微粒温度大于相变临界温度时,干冰微粒转化为气体二氧化碳,干冰微粒相变速率

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{\alpha_s \rho_s}{\Delta} \frac{T_s - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (5)$$

式中 α_s ——干冰体积分数, %

m ——干冰质量, kg

ρ_s ——干冰密度, kg/m^3

T_s ——干冰微粒温度,K
 T_{sat} ——相变临界温度,取 194.65 K
 Δ ——每个网格流动的时间步长,s
当干冰微粒温度小于临界相变温度时

$$\frac{dm}{dt}=\frac{\alpha_s\rho_s}{\Delta}\frac{T_s-T_{sat}}{T_{sat}}$$

(6)

当干冰微粒温度大于相变临界温度时,进行升华相变过程,干冰微粒相转变为气体二氧化碳,干冰相传热源项计算公式为

$$Q=h\frac{dm}{dt}$$

(7)

式中 Q ——蓝莓表面换热热流密度,W/m²
 h ——干冰升华潜热,kJ/kg
干冰升华喷雾冷冻的换热系数计算公式为

$$h_{HTC}=\frac{q}{T_{sur}-T_c}$$

(8)

式中 T_{sur} ——蓝莓表面温度,K
 T_c ——出口干冰射流温度,K
 q ——热流密度,W/m²
 h_{HTC} ——换热系数,W/(m²·K)

在蓝莓冻结过程中,水分包含可冻结水、不可冻结水和冰,总含水率计算公式为

$$\chi_\beta=\chi_{\beta\beta}+\chi_{u_\beta}+\chi_\sigma$$

(9)

其中 $\chi_{u_\beta}=0.25\chi_\alpha=0.25(1-\chi_\beta)=$
 $0.25(1-90.7\%)=2.3\%$

(10)

式中 χ_β ——总含水率,%
 $\chi_{\beta\beta}$ ——可冻结水含水率,%
 χ_σ ——冰质量分数,%
 χ_α ——固体基质质量分数,%

水的潜热随温度变化可以表达为

$$\Delta H_0=334.2+2.12T+0.004\,2T^2$$

(11)

式中 ΔH_0 ——水的潜热,kJ/kg

蓝莓内部传热过程符合三维非稳态、无内热源、变物性的导热数学模型,建立该过程导热微分方程

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

(12)

式中 ρ ——蓝莓密度,kg/m³
 τ ——冻结时间,s
 x,y,z ——笛卡尔坐标系中的 3 个坐标轴方向

1.4 计算模型、边界和初始条件

采用 ANSYS Fluent 软件,使用离散微粒模拟(DPS)对固体微粒的行为进行建模,结合固体微粒对气流的影响,采用微粒轨道力学模型作为气固两

相动力学模型^[23],用连续性介质描述气体,用离散性介质描述固体微粒。采用 Euler 方法求解。利用欧拉多相流模型并嵌入 UDF 进行编译,以此来模拟干冰微粒升华相变过程。采用融化凝固模型、双层薄壳传热模型。计算中连续相湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 、Realizable、SWF(标准壁面函数)。入口设置为速度入口,出口为压力出口,根据环境压力,将出口设定为 105 Pa 的静压。将蓝莓表面定义为无滑移壁面,按第三类边界条件定义,利用系统耦合来模拟流动传热过程。喷嘴和腔体所有壁面定义为绝热无滑移壁面。时间设置为 200 s,时间步长设置为 1 s,容差因子设置为 0.5,采用瞬态求解器求解。CO₂ 的标准状态焓输入值为零,干冰的标准状态焓输入值为 -2.524×10^{-7} J/(kg·mol),蓝莓初始化为 1℃。该计算考虑了干冰的质量流量、升华干冰的比重以及喷嘴出口微粒的尺寸分布,使得喷嘴内部的速度和压力分布趋于均匀^[24]。

1.5 喷嘴出口 V 形切槽角度对速冻特性影响的模拟结果

喷嘴入口流速为 0.25 m/s、入口孔径为 30 mm,出口孔径组合为圆周孔径 5.2 mm×6(6 个孔径为 5.2 mm 的出口)和中心孔径 2.0 mm×4(4 个孔径为 2.0 mm 的出口),设置切槽角为 60°、70°、80°、90°进行数值模拟。图 6a 为置物板中心第 1 颗蓝莓中间切面温度分布图。由图 6b 可看出,喷射出的干冰微粒能够全部覆盖到整盘蓝莓区域,到达蓝莓表面的干冰固相质量分数约为 40%。图 7 和图 8 分别显示速冻腔中心切面速度和冻结完成蓝莓的表面温度,图 9 表示冻结完成时间分布。

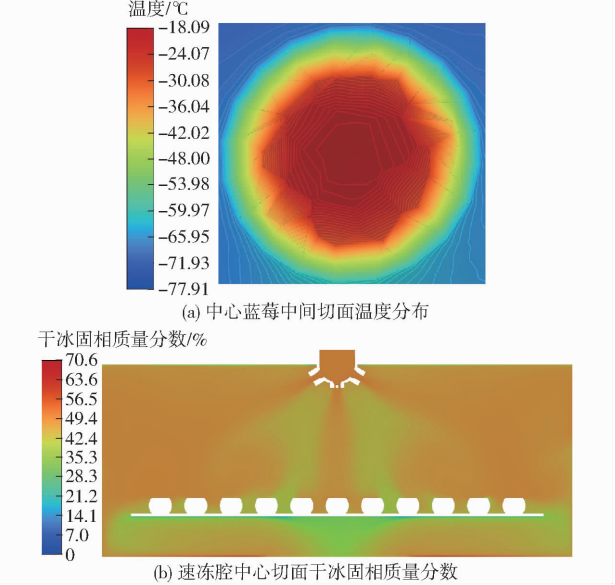


图 6 切面蓝莓温度及干冰固相质量分数
Fig. 6 Temperature and dry ice solid phase fraction diagrams of blueberry section

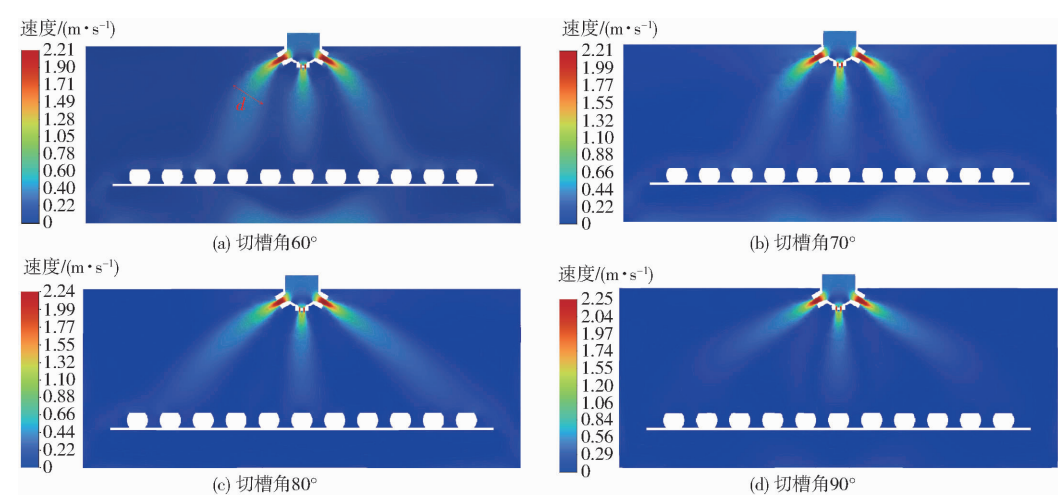


图 7 速冻腔中心切面速度云图

Fig. 7 Velocity cloud diagrams of center section of quick-freezing chamber

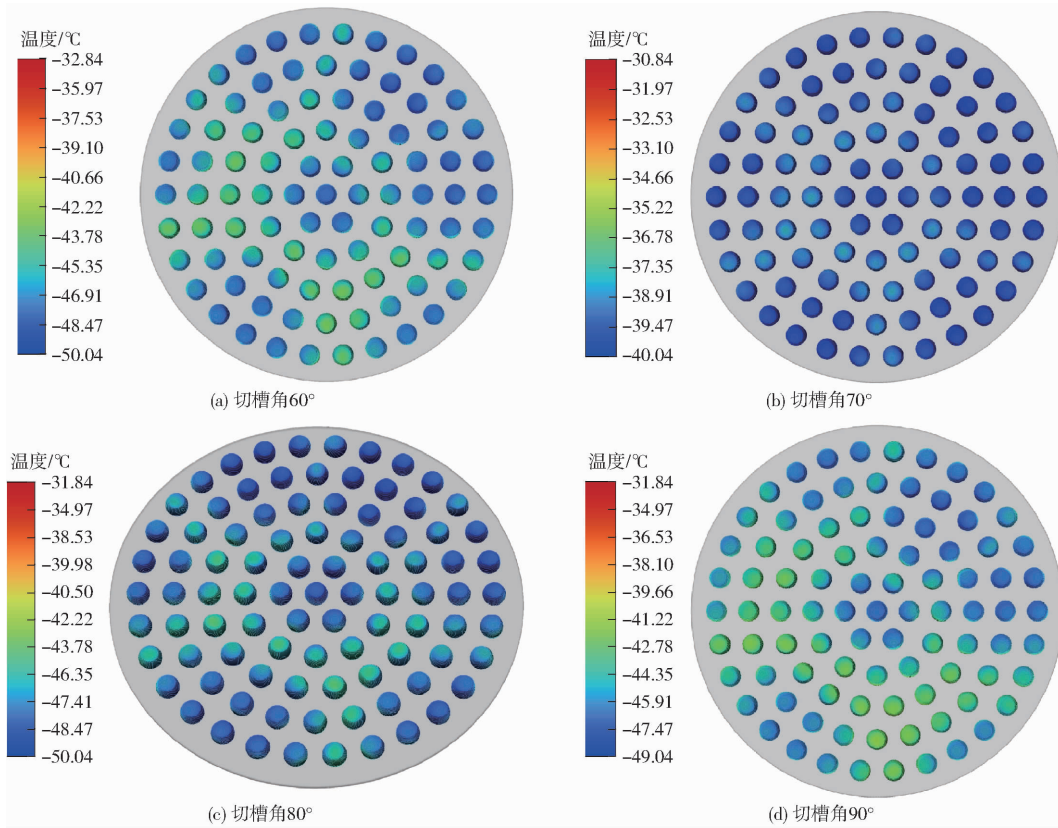


图 8 蓝莓表面温度

Fig. 8 Blueberry surface temperature maps

由图 7 可看出,随着 V 形切槽角从 60° 增加到 90° ,干冰微粒冲击射流核心区域内的流速逐渐增加,扇形冲击射流扩散宽度逐渐减小(干冰射流宽度为对应圆形置物板径向方向的分布范围,见图 7a 的 d (红色字体绘出))。因为在相同的流量时,喷嘴出口冲击射流宽度的增加意味着射流速度的衰减。当切槽角为 80° 、 90° 时,干冰微粒射流有着较大的冲击速度,结合图 9b 中较为分散的冻结时间分布,分析得出由于较大的流速导致到达蓝莓表面的干冰微粒较多地分布在置物板的边缘位置,外围摆放蓝

莓对比获得干冰量较少的中间区域蓝莓,出现降温速率差异,导致整体冻结完成的时间较长。当切槽角为 60° 、 70° 时,喷嘴出口端有着较大的相对切深(相对切深与切槽角度成反比),干冰射流在喷嘴的出口切槽方向会有较大的压降幅度,扇形射流宽度较大,射流速度减小,在喷嘴圆周布置的 6 个出口竖直切面上,能够将干冰微粒均匀地覆盖到对应方向上的蓝莓表面,故由图 8b 可看出,圆周布置的 6 个出口所对应方向放置的蓝莓相比其他蓝莓表面温度更低。如图 8a 所示,当切槽角为 60° 时,扇形干冰

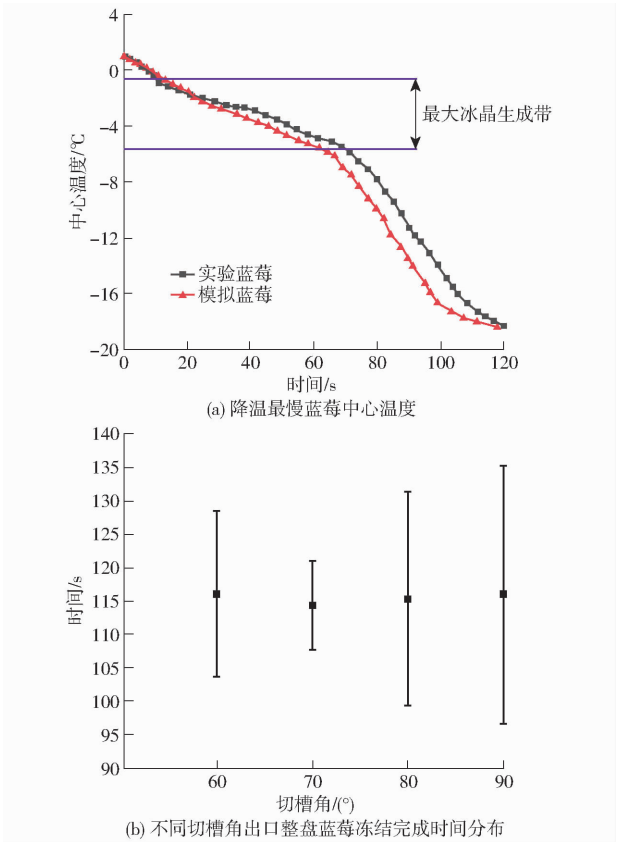


图9 降温最慢蓝莓中心温度随时间变化与整盘蓝莓冻结时间分布

Fig.9 Temperature of the slowest cooling blueberry core changes with time and freezing time distribution of whole plate of blueberries

微粒射流有着最大的宽度、适中的速度和最小的射流厚度(射流厚度为对应圆形置物板圆周方向上的分布范围)。厚度过小不利于干冰微粒在置物板圆周方向上的均匀分布,导致到达蓝莓表面的干冰微粒较多地分布在扇形喷嘴圆周各出口对应置物板径向方向放置的一排蓝莓上,会产生冻结完成时间的不均匀分布。切槽角为70°的模型有着较大的扇形射流宽度和更大的厚度,能达到最均匀的冷冻效果,见图8b和图9b。则当切槽角为70°时,降温速率最快的蓝莓用时107 s完成冻结,最慢的用时120 s,蓝莓表面温度分布最均匀,整体冻结速率最快,为0.50 cm/min。70°为此模型最优的多出口扇形喷嘴V形切槽角度。

2 实验验证

2.1 速冻蓝莓实验

对于干冰喷射速冻蓝莓过程进行了实验测试,实验系统如图10所示,液态二氧化碳从气瓶流出经过减压阀和流量调节阀,压力的降低导致温度迅速降低,到达气固两相区,在常温(25℃)和常压(0.1 MPa)下形成干冰微粒,干冰喷雾冲击至蓝莓

表面,吸收蓝莓的热量并升华成二氧化碳气体从出口流出,使蓝莓冻结。在开始时,蓝莓的温度由于其小尺寸和低热阻而迅速下降,导致蓝莓表层迅速冻结,形成一层冰晶,随着时间的推移,内部温度趋于均匀。实验之前进行预实验,以调试设备和确定正确的测量方法。系统组件由内径为15 mm的橡胶软管连接,为减少设备和环境之间的热传递,在管道上包裹保温棉。插入T型热电偶至蓝莓的中心,并与MX100型数据采集器连接,温度记录间隔设置为每1 s采集一次(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)。当中心温度降低到-18℃时,停止测量。在干冰喷射流量为1.05 L/min下,整理出所有蓝莓冻结完成的温度和时间分布,统计冻结速度最快的单个蓝莓和冻结速度最慢的单个蓝莓之间的中心温度差。接入热电偶的蓝莓样本用深色标出,如图11a所示。

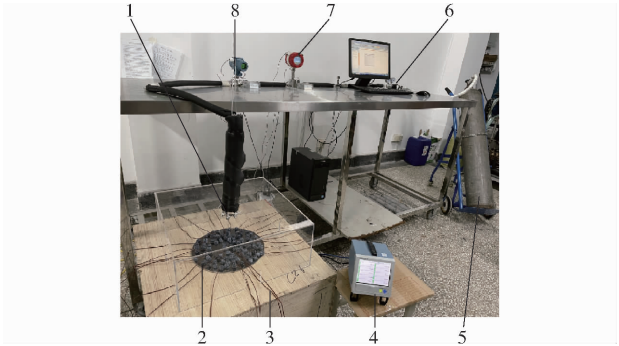


图10 实验系统图
Fig.10 Experimental system diagram

- 1. 多出口扇形喷嘴 2. 蓝莓 3. 温度传感器 4. 数据采集器
- 5. 二氧化碳气瓶 6. 减压阀 7. 流量调节阀 8. 流量计

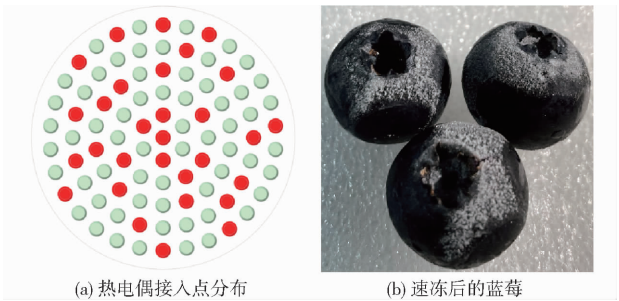


图11 蓝莓测点布置与速冻结果图

Fig.11 Blueberry measuring point layout and quick-freezing results

选定出口切槽角为70°的多出口阵列扇形喷嘴,经过5次实验可得:干冰微粒出口温度最低为-74℃,降温最慢蓝莓中心温度到达-18℃的平均时间为119 s,降温最快蓝莓中心温度到达-18℃的平均时间为102 s。冻结速率为0.50 cm/min,图12为5组实验结束时,热电偶测得的蓝莓中心温度分布图,冻结完成时蓝莓的中心温度最低至-23.7℃。

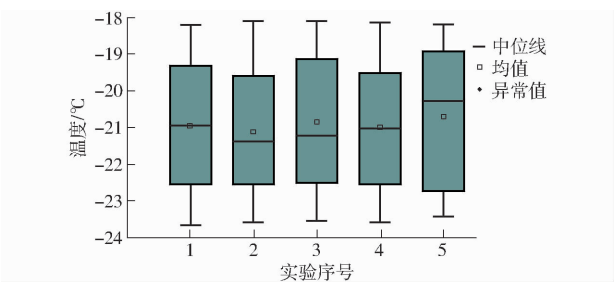


图 12 实验结束时蓝莓温度分布图

Fig. 12 Temperature distribution map of blueberries at end of experiment

实验时蓝莓的降温过程对比数值模拟降温过程如图 9a 所示。此品种蓝莓的最大冰晶生成带温度区间在 $-5.5\sim-0.5^{\circ}\text{C}$ 。将实验和模拟中测量的所有温度代入误差公式,获得误差结果为 4.3%。分别使

用多出口直筒型喷嘴和出口切槽角为 70° 的多出口扇形喷嘴进行干冰喷雾速冻蓝莓的对比实验。将液态二氧化碳罐放在电子秤上,在实验开始和结束时,记录液态二氧化碳罐的质量,这样可测得每组实验蓝莓所消耗的液态二氧化碳量,同时测得每组实验蓝莓的降温时间。结果表明:扇形喷嘴对干冰微粒的雾化效果好,速冻更加均匀,整体冻结速率较快,采用扇形喷嘴相比直筒型喷嘴,每组速冻蓝莓实验可节省液态二氧化碳 0.09 kg。

2.2 贮藏期间蓝莓感官品质的测定结果

蓝莓理化性质测试结果见表 2,表明干冰微粒喷射速冻后蓝莓综合品质优于 CXS 103-1981 速冻蓝莓标准(2019 版),并且优于普通速冻方法速冻蓝莓的效果。

表 2 速冻前后蓝莓理化性质					
Tab. 2 Physicochemical properties of blueberries before and after quick freezing					
指标	维生素 C 含量/ ($\text{mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}$)	花青素含量/ ($\text{mg}\cdot(100\text{ g})^{-1}$)	可溶性固形物 质量分数/%	失水率/%	色差 ΔE
新鲜蓝莓	16.56	30.0	15.24	0	0
干冰速冻后	16.33	27.8	14.40	1.5	1.2
干冰速冻差值	-0.23	-2.2	-0.84	1.5	1.2
-40℃ 冷冻处理后差值	-8.00	-16.0	-8.70	13.0	8.0
标准值				<20.0	<25.0

3 结论

(1)数值模拟结果表明:随着扇形喷嘴 V 形切槽角从 60° 增加到 90° ,干冰微粒冲击射流核心区域内的流速逐渐增加,干冰微粒射流的扇形喷射角逐渐减小。当切槽角为 80° 、 90° 时,较大的喷射速度导致干冰微粒在置物板的中心与边缘分布的不均匀;当切槽角为 60° 时,由于扇形射流在置物板径向上分布集中,导致在圆周方向上干冰微粒分布的不均匀;当切槽角为 70° 时,降温速率最快的蓝莓用时 107 s 完成冻结,最慢的用时 120 s,整盘蓝莓表面温度分布最均匀,蓝莓冻结完成的平均时间短,整体冻结速率快,为最优的多出口扇形喷嘴 V 形切槽角度。

(2)对多出口扇形喷嘴干冰微粒喷射速冻蓝莓进行了实验测试,可得降温最慢时蓝莓中心温度到达 -18°C 的平均时间为 119 s,降温最快时蓝莓中心温度到达 -18°C 的平均时间为 102 s,冻结速率为 $0.50\text{ cm}/\text{min}$ 。对比数值模拟结果,误差为 4.3%。并对比直筒型喷嘴进行干冰喷射速冻实验,当选用扇形喷嘴且出口切槽角为 70° 时,干冰微粒流体喷射雾化效果更好,蓝莓降温更加均匀,平均每次冻结可节省二氧化碳用量 0.09 kg。

(3)测试速冻前后蓝莓维生素 C 含量、花青素含量、可溶性固形物质量分数、失水率和色差等指标,获得干冰微粒喷雾蓝莓速冻前后相关品质改变优于速冻蓝莓标准且优于普通速冻方法速冻蓝莓的效果,可以最大程度地保留蓝莓营养品质。

参 考 文 献

[1] ZHANG L, YAN Z N, HANSON E J, et al. Efficacy of chlorine dioxide gas and freezing rate on the microbiological quality of frozen blueberries[J]. Food Control, 2015, 47: 114-119.

[2] 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, 2019,30(2): 11-13.

ZHAO Yuanheng, GUO Jia, CHEN Liubiao, et al. Research progress of food liquid nitrogen quick freezing technology[J]. Journal of Refrigeration, 2019,30(2): 11-13. (in Chinese)

[3] 宁静红,贾永勤,宋志朋,等. 几何布置对 CaCl_2 溶液中草莓流态化速冻过程的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(12): 202-208.

NING Jinghong, JIA Yongqin, SONG Zhipeng, et al. Effects of geometric layout on strawberry fluidized quick-freezing process in CaCl_2 solution[J]. Food and Fermentation Industry, 2023, 49(12): 202-208. (in Chinese)

- [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 Jiawei, ZHENG Mingyuan, WANG Yu, et al. Analysis of the status quo of quick-freezing technology, equipment and quality control of fruits and vegetables[J]. Freshness Preservation and Processing, 2019, 19(3): 154 – 161. (in Chinese)
- [5] 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 Xiyao, WU Jihong, LIAO Xiaojun, et al. Process optimization of quick-freezing *Agaricus bisporus* by high-pressure carbon dioxide technology[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 375 – 380. (in Chinese)
- [6] ZHAO Y F, NING J H, SUN Z Y. Establishment and experimental verification of temperature prediction model for quick-frozen strawberry jetted with dry ice[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(9): 175 – 181.
- [7] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云, 等. 蓝莓液氮式流态化速冻工艺研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 217 – 222.
ZHANG Qinggang, TAO Leren, DENG Yun, et al. Research on liquid nitrogen fluidized quick-freezing process of blueberries [J]. Food Industry Science and Technology, 2014, 35(16): 217 – 222. (in Chinese)
- [8] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云, 等. 蓝莓流态化速冻工艺及贮藏品质变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 171 – 176.
ZHANG Qinggang, TAO Leren, DENG Yun, et al. Fluidized quick-freezing technology and storage quality change law of blueberry[J]. Food and Fermentation Industry, 2013, 39(12): 171 – 176. (in Chinese)
- [9] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云, 等. 蓝莓不同冻结方式下工艺特性及贮藏品质的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 348 – 351, 361.
ZHANG Qinggang, TAO Leren, DENG Yun, et al. Research on technological characteristics and storage quality of blueberries under different freezing methods[J]. Food Industry Science and Technology, 2015, 36(4): 348 – 351, 361. (in Chinese)
- [10] 宁静红, 宋志朋, 任子亮, 等. 干冰喷雾速冻蓝莓的多孔阵列喷嘴研究[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 285 – 292.
NING Jinghong, SONG Zhipeng, REN Ziliang, et al. Study on porous array nozzles for dry ice spray quick freezing blueberries [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(15): 285 – 292. (in Chinese)
- [11] XU Z, GUO Y, DING S, et al. Freezing by immersion in liquid CO₂ at variable pressure: response surface analysis of the application to carrot slices freezing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 22: 167 – 174.
- [12] 王为术, 任坤朋, 牛靖尊, 等. 阵列喷嘴干冰喷雾冷却特性数值研究[J]. 低温与超导, 2022, 50(4): 58 – 64, 94.
WANG Weishu, REN Kunpeng, NIU Jingzun, et al. Numerical study on cooling characteristics of dry ice spray with array nozzles[J]. Low Temperature and Superconductivity, 2022, 50(4): 58 – 64, 94. (in Chinese)
- [13] LIU Y H, CALVERT G, HARE C, et al. Size measurement of dry ice particles produced from liquid carbon dioxide[J]. Journal of Aerosol Science, 2012, 48: 1 – 9.
- [14] 彭燕祥, 张华, 何贵成. 基于最大熵原理的喷雾液滴粒径分布预测研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 217 – 226.
PENG Yanxiang, ZHANG Hua, HE Guicheng. Prediction of spray droplet size distribution based on maximum entropy principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 217 – 226. (in Chinese)
- [15] NARSAIAH K, BEDI V, GHODKI B M, et al. Heat transfer modeling of shrimp in tunnel type individual quick freezing system[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(11): e13838.
- [16] 蒋小平, 王帅, 陈建华, 等. 喷射参数对扇形喷嘴雾化特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 1065 – 1071.
JIANG Xiaoping, WANG Shuai, CHEN Jianhua, et al. Analysis of influencing factors on atomization characteristics of fan-shaped nozzle[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2022, 40(10): 1065 – 1071. (in Chinese)
- [17] 梁博健, 高殿荣. 高压扇形喷嘴结构参数的优化[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 69 – 75.
LIANG Bojian, GAO Dianrong. Optimization of structural parameters of fan-shaped high-pressure nozzle [J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2020, 38(1): 69 – 75. (in Chinese)
- [18] YANG D H, LI X Y, ZHAO Y F, et al. Osmotic dehydration kinetics of fresh and frozen blueberries considering volume shrinkage in a novel ternary solution[J]. Food Science and Technology, 2021, 41(3): 790 – 798.
- [19] 高雄发, 郜聪, 张德胜, 等. 基于 CFD – DEM 的旋流泵混合颗粒固液两相流研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 163 – 170, 248.
GAO Xiongfa, GAO Cong, ZHANG Desheng, et al. Solid – liquid two-phase flow of mixed particles in vortex pump based on CFD – DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 163 – 170, 248. (in Chinese)
- [20] CHENG L N, WU W J, AN K J, et al. Advantages of liquid nitrogen quick freezing combine gradient slow thawing for quality preserving of blueberry[J]. Crystals, 2020, 10(5): 368 – 370.
- [21] ARTEAGA H, ROBLETO-MARTINEZ E, SILVA A C D, et al. Postharvest freezing process assessment of the blueberry structure in three acts: bioimpedance, color, and granulometry analysis[J]. LWT, 2021, 151: 112237.
- [22] 周友行, 李昱泽, 朱文牧. 康达效应下射流喷嘴的结构选型及优化设计[J]. 机械设计, 2022, 39(增刊 1): 38 – 43.
ZHOU Youxing, LI Yuze, ZHU Wenmu. Structural selection and optimal design of jet nozzles under Coanda effect[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(Supp. 1): 38 – 43. (in Chinese)
- [23] DZIDO A, KRAWCZYK P, KURKUS-GRUSZECKA M. Numerical analysis of dry ice blasting convergent-divergent supersonic nozzle[J]. Energies, 2019, 12(24): 4787.
- [24] REIS L B, GIORIA R. Optimization of liquid jet ejector geometry and its impact on flow fields [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 194: 117132.