

流态化速冻装置的优化设计

金斌辉^{a,b}, 莫凡^a, 宋晓燕^a, 刘宝林^a

(上海理工大学 a.生物系统热科学研究所 b.能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 研究常见流态化速冻机的性能、冷冻效果, 以改善因冻结不均匀引起的冷量浪费现象。**方法** 采用实验与数值分析相结合的方法, 研究导流板的位置和角度对冷冻效果的影响, 找到相对最佳的设计方案, 并对优化前后的流态化速冻机进行实验验证。**结果** 导流板均匀性的最佳位置组合是导流板1在0.23 m处, 角度呈45°, 导流板2在0.095 m处, 角度呈25°。装置经优化后, 同一时间不同点的温差缩小了约50%。优化后速冻室温度降到-35 °C时需要的时间减少了约3.5 min; 冻结菇娘果的时间缩短了6.2%; 机器空载预冷的电量节约了14.2%; 菇娘果冻结所需的耗电量节约了33%。**结论** 优化后机器的气流均匀性得到了改善, 并有较好的节能效果。

关键词: 流态化; 节能; 导流板; 数值模拟; 气流均匀性

中图分类号: TS205.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)13-0117-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.13.015

Optimal Design on Fluidized Quick-freezing Device

JIN Bin-hui^{a,b}, MO Fan^a, SONG Xiao-yan^a, LIU Bao-lin^a

(a. Institute of Biothermal and Technology b. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The paper aims to improve the waste of cooling capacity and decline of freezing quality caused by uneven freezing by studying the performance and freezing effect of the common fluidization quick freezer. In this paper, combination of experiment and numerical analysis is used to optimize the energy-saving design of fluidized freezers that are common on the market. By studying the influence of the position and angle of the deflector on the freezing effect, the best design plan for the deflector is found, then fluidization quick freezer before and after optimization is verified by experiments. The position combined with the best uniformity is that the deflector 1 at 0.23 m with 45° and the deflector 2 0.095 m with 25°. The optimized machine has better cooling uniformity, and the temperature drop at different points at the same time is reduced by about 50%. The time required for the optimized machine to drop to -35 °C is about 3.5 minutes less than it for the previous machine to this temperature. Compared with the machine before optimization, the freezing time of a batch Downy Groundcherry has been shortened by 6.2%; the power consumption of no-loaded machine's temperature required for pre-cooling has been saved 14.2%; the power consumption of freezing a batch Downy Groundcherry has been saved 33%. The optimized air flow uniformity of the machine has been improved and energy saving has been achieved.

KEY WORDS: fluidized; energy saving; deflector; numerical simulation; uniformity of airflow

收稿日期: 2021-06-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0400404)

作者简介: 金斌辉 (1998—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻制冷及低温工程。

通信作者: 刘宝林 (1968—), 男, 博士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为低温生物医学。

近年来,人们对于食品品质的追求促进了食品保鲜及保存技术的研究。食品保鲜方法主要有干燥保存法、冷冻保存法、灭菌保存法、气调保鲜^[1]等。冷冻保存法具有操作简单、效果好等优点,应用较广泛。流态化技术在物料干燥^[2]、速冻等方面有着广泛应用。其中,流态化速冻因其固体颗粒分布在布风板或传动带上,受到自下而上的流体作用,因而具有较高的传热和传质效率,冷冻效果较好,可以使食品速冻后的营养价值和风味保持良好^[3-4]。由于冻结过程的不均匀性导致能耗较大,因而限制了流态化技术的发展。

国内外对于流态化技术的冷冻效果、能耗问题进行了相关研究。1945年后,出现了著名的3T概念^[5],即速冻食品在生产、储藏及流通各个环节中,时间、温度、产品耐藏性对品质的容忍度有绝对性的影响^[6]。Aworinde等^[7]研究了旋流式气体分布板对涡流效果、速冻时间的影响。Korkerd等^[8]研究了在30~120℃内,粒度分布对流化床内起始流化速度的影响。Shukrie等^[9]研究了不同布风板对流化床气流分布均匀性的影响。Saikia等^[10]研究了加压循环流化床瞬态流体力学与传热的过程。陈殿宇等^[11]研究了导流板孔隙形状对能耗的影响。朱一帆等^[12]研究了风机、导流板对能耗的影响。Alvaro等^[13]研究了气流均匀性对换热系数、冷量利用率、能耗的影响。张珍等^[14]研究了导流板对气流均匀性的影响,导流板可以避免“流沟”“边界效应”^[15]等不良流化问题的出现,避免冷量的浪费,节省能耗。梁亚星等^[16]研究了液氮喷雾式流态化速冻机风道对气流均匀性的影响。综上所述,这些研究均提出了影响气流均匀性和能耗的因素,并取得了一些成果,然而上述研究并未研究导流板的位置和角度对气流均匀性、能耗的影响。

基于此,文中以Comsol Multiphysics模拟导流板位置和角度的不同对风道均匀性的影响,并得到导流板在模拟中的最优设计方案,通过实验对比改造前后导流板的速度均匀性、温度均匀性、耗电量,以期对导流板的设计提供参考。

1 流态化速冻装置内风道的数值模拟

1.1 风道内导流板的位置和角度

1.1.1 几何模型的建立

建立几何模型,取已有流态化速冻机横截面(1:1)模型进行计算,如图1所示,冻结区AB的距离为0.4 m,BC的距离为0.3 m,风道尺寸BD的距离为0.6 m,DE的距离为0.55 m。导流板1由上下2块板组成,长度分别为0.15、0.2 m;导流板2由上下2块板组成,长度分别为0.1、0.05 m。对该几何模型做以下假设。

1) BC段为流态化速冻装置中的传送带,设为滤网边界条件。

2) 忽略实际装置导流板上方1 cm的空间。

3) 风道横截面方向在长度方向上具有一致性。

4) 四周壁面为无滑移绝热表面。

5) 稳态研究。为了更好地求得整个过程的流场均均匀性,在BC段每隔0.05 m处设置1个边界探针,共6个。在传送带上方1 cm处设置域探针。冻结段的余下空间设置1个域探针。探针设置为平均值类型,用来记录空气的平均流速。

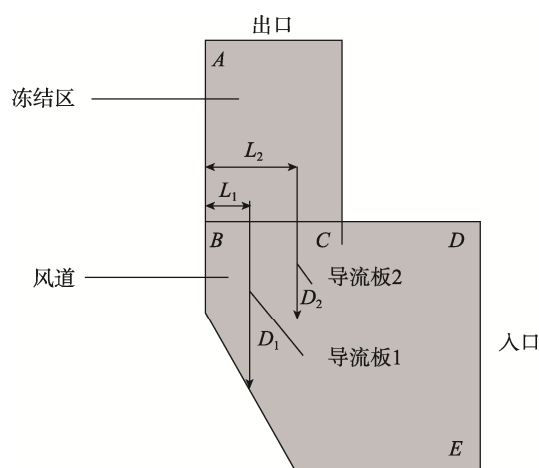


图1 速冻装置内风道计算模型

Fig.1 Schematic diagram of air duct calculation model

1.1.2 数值模拟的网格划分

利用COMSOL Multiphysics软件对模型进行网格划分。网格总单元数为23 919,壁面处采用四边形网格,总单元数为2 864,层数为5。为了防止网格数量对计算结果产生影响,进行了网格无关性验证。选取导流板1在0.1 m处的角度为15°、导流板2在0.2 m处的角度为15°的模型,根据不同的精细度划分网格,网格数量分别为12 714、19 968、23 919、28 623。计算得到的模型测点平均温度在12 714与19 968间的温差百分比为4.26%,在19 968与23 919间的温差百分比为2.93%,在23 919与28 623间的温差百分比为0.5%。当网格数量达到23 919时,继续增加网格时结果变化不大,网格平均质量为0.846。

1.1.3 数值模拟的控制方程和边界条件

气流选用RANS的 $k-\epsilon$ 模型,该模型适用于雷诺数足够大的情况。边界条件:入口边界速度为3 m/s;出口边界压力为101.3 kPa;将导流板1、2设置为内壁的边界条件;传动带设置为滤网的边界条件,滤网类型为方形网格,固体部分的阻力系数为0.47。基于以上假设,建立了数学方程,根据实际装置计算出 Re 远大于2 000,装置内的空气为湍流。装置内的空气满足Navier-Stokes方程。数值模拟过程中的控制

方程见式 (1) — (5)

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0 \tag{1}$$

$$\rho(u \cdot \nabla) u = \nabla[-pI + K] + F \tag{2}$$

$$K = (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) \tag{3}$$

$$\rho(u \cdot \nabla k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_2} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \tag{4}$$

$$\rho(u \cdot \nabla \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_1} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

式中: μ_T 为湍动黏度, $\mu_T = \rho C_u k^2 / \varepsilon$, C_u 为黏度系数, 取 $C_u = 0.09$; ρ 为密度; u 为速度; p 为压力; F 为体积力; μ 为动力黏度; ε 为湍动能耗散率; k 为湍动能; σ_1 、 σ_2 为湍动耗散率 ε 、湍动能 k 对应的普朗特数; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为模型常数。湍流模型参数: $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_1 = 1.3$, $\sigma_2 = 1$ 。

1.1.4 数值模拟的参数化组合方式

此次模拟选用参数化扫描方式, 以图 1 中 B 点为原点, 导流板 1 的初始位置 L_1 为 0.05 m, 步长为 0.02 m, 结束位置的 L_1 为 0.25 m。初始角度 D_1 为 15° , 每次变化量为 10° , 结束角度 D_1 为 75° 。导流板 2 的初始位置 L_2 为 0.075 m, 步长为 0.02 m, 结束位置 L_2 为 0.275 m。初始角度 D_2 为 15° , 每次变化量为 10° , 结束角度 D_2 为 75° 。共计 5 929 种组合方式。

1.2 结果分析与讨论

用 Matlab 对数据进行处理, 将 6 个边界探针测得的速度带入编好的 Matlab 中的最小二乘法程序。速冻室内气流均匀性较好的前 5 种方案组合见表 1。其中, 速度方差相对最小的组合方式是导流板 1 的 L_1 为 0.23 m, D_1 为 45° ; 导流板 2 的 L_2 为 0.095 m, D_2 为 25° 。

表 1 气流均匀性较好的前 5 种组合方案的各边界风速值

Tab.1 Results show that the top 5 schemes have the best air flow uniformity

编号	L_1/m	L_2/m	$D_1/(^\circ)$	$D_2/(^\circ)$	$v_1/(m \cdot s^{-1})$	$v_2/(m \cdot s^{-1})$	$v_3/(m \cdot s^{-1})$
1	0.23	0.095	45	25	5.970 1	5.766 0	5.483 8
2	0.23	0.095	55	35	5.868 2	5.556 1	5.483 7
3	0.23	0.095	55	25	5.820 5	5.728 4	5.892 8
4	0.23	0.135	55	25	5.824 5	6.025 9	5.568 9
5	0.23	0.115	55	25	5.821 8	5.989 9	5.505 4
编号	$v_4/(m \cdot s^{-1})$	$v_5/(m \cdot s^{-1})$	$v_6/(m \cdot s^{-1})$	$v_l/(m \cdot s^{-1})$	$v_r/(m \cdot s^{-1})$	$\delta^2/(m^2 \cdot s^{-2})$	
1	5.626 3	5.387 7	5.496 9	5.630 8	5.503 4	0.038 6	
2	5.930 4	5.496 9	5.427 1	5.636 1	5.503 8	0.038 8	
3	5.614 7	5.229 4	5.293 6	5.604 1	5.502 8	0.063 7	
4	5.401 0	5.345 8	5.343 3	5.592 1	5.502 0	0.066 9	
5	5.646 0	5.266 0	5.314 2	5.598 0	5.502 4	0.067 5	

注: L_1 为导流板 1 的位置; D_1 为导流板 1 的角度; L_2 为导流板 2 的位置; D_2 为导流板 2 的角度; v_1 — v_6 为 6 个边界探针的速度; v_l 为传送带上 1 cm 冻结段内的域平均速度; v_r 为剩余冻结段的域平均速度; δ^2 为速度方差。

1.2.1 导流板位置对风道气流均匀性的影响

1.2.1.1 导流板 1 的位置

选取 D_1 、 D_2 分别为 45° 和 25° 的导流板 1、2, 在导流板 2 位置 L_2 分别为 0.095、0.155、0.215、0.275 m 时, 探究导流板 1 的位置对风道气流均匀性的影响, 见图 2。由图 2 可知, 当导流板 2 的位置靠近 B、C 两侧时, 导流板 1 的位置对气流均匀性的影响较大。随着导流板 1 的右移, 风道气流均匀性先变好后变差, 且存在一个相对最佳的气流均匀性位置。

1.2.1.2 导流板 2 的位置

选取 D_1 、 D_2 分别为 45° 和 25° 的导流板 1、2, 在导流板 1 位置分别为 0.05、0.11、0.17、0.23 m 时, 探究导流板 2 位置对气流均匀性的影响, 见图 3。由图 3 可知, 随着导流板 1 的右移, 风道气流均匀性先变差再变好, 导流板 1 接近与导流板 2 重合时, 风道

气流均匀性相对最差。

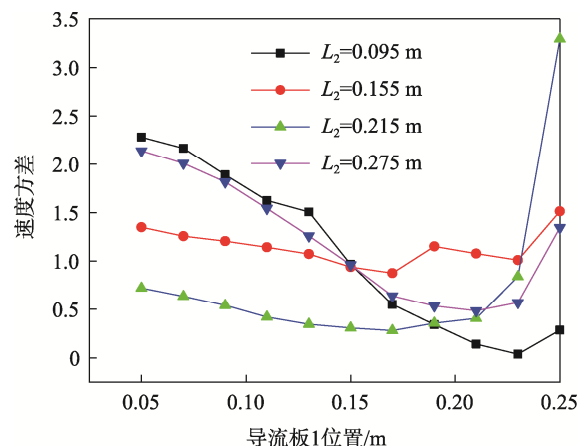


图 2 速度方差随导流板 1 位置移动的变化曲线
Fig.2 Variation curve of velocity variance with deflector 1 position movement

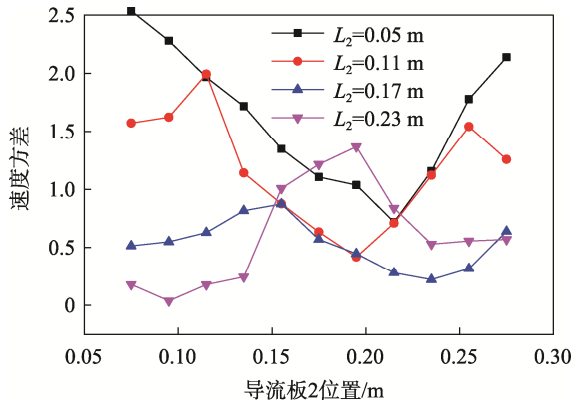


图3 速度方差随导流板2位置移动的变化曲线
Fig.3 Variation curve of velocity variance with deflector 2 position movement

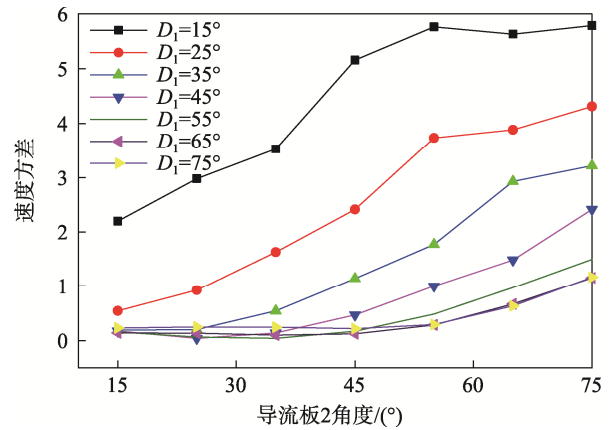


图5 速度方差随导流板2角度增大的变化曲线
Fig.5 Variation curve of velocity variance with the increase of deflector 2 angle

1.2.2 导流板的角度对风道气流均匀性的影响

1.2.2.1 导流板1的角度

选取 L_1 、 L_2 分别为 0.23 m 和 0.095 m 的导流板 1、2，在导流板 2 的角度分别为 15°、25°、35°、45°、55°、65°、75° 时，探究导流板 1 的角度对风道气流均匀性的影响，见图 4。由图 4 可知，当导流板 1 的角度小于 45° 时，风道气流均匀性随着导流板 1 角度的增加逐渐变好；当导流板 1 的角度大于 45° 时，风道气流均匀性基本不变。

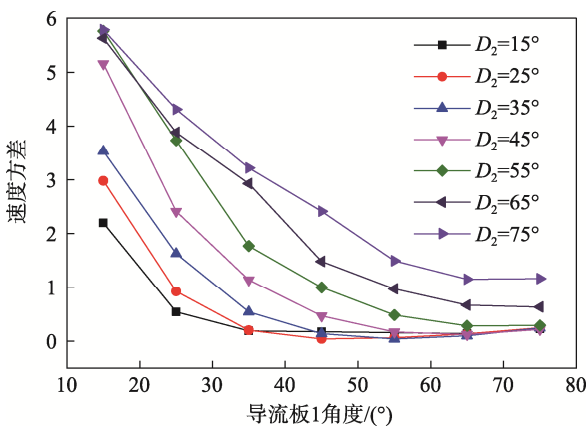


图4 速度方差随导流板1角度增大的变化曲线
Fig.4 Variation curve of velocity variance with the increase of deflector 1 angle

1.2.2.2 导流板2的角度

选取 L_1 、 L_2 分别为 0.23 m 和 0.095 m 的导流板 1、2，当导流板 1 的角度分别为 15°、25°、35°、45°、55°、65°、75° 时，探究导流板 2 的角度对风道气流均匀性的影响，见图 5。由图 5 可知，当导流板 2 的角度小于 25° 时，风道气流均匀性随着导流板 2 角度的增加缓慢变差；当导流板 2 的角度大于 25° 时，风道气流均匀性随着导流板 2 角度的增大快速变差。

2 流态化速冻装置的常态实验

改进前，导流板 1 的 L_1 为 0.1 m 时，角度呈 45°；导流板 2 的 L_2 为 0.2 m 时，角度呈 45°。根据数值模拟结果，定制导流板 1 的 L_1 为 0.23 m 时，角度呈 45°；导流板 2 的 L_2 为 0.095 m 时，角度呈 25°。测试改进前后装置的性能。

2.1 实验装置

流态化速冻装置原理见图 6，在压缩机处制冷剂经压缩后进入冷凝器冷凝，随后制冷剂通过电子膨胀阀节流，进入蒸发器吸热蒸发，再次进入压缩机内压缩，完成制冷循环。轴流风机将冷空气吹至风道，冷空气经风道后被送至传送带上方与食品颗粒进行热交换，而后冷空气从传送带上方回流至蒸发器进行热交换，完成循环。同时，速冻装置配有融霜系统，空气压缩机将压缩后的气体通过管道输送至融霜喷嘴，对蒸发器进行除霜。

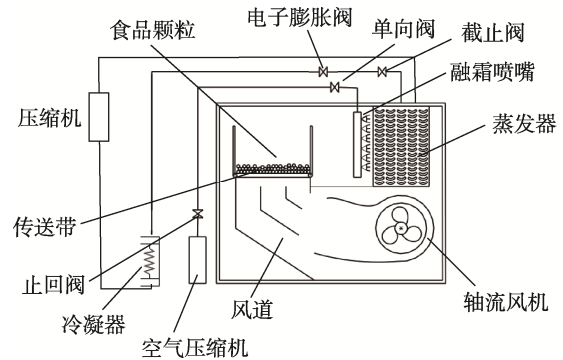


图6 流态化速冻装置原理
Fig.6 Device schematic diagram

2.2 材料与仪器

主要材料：选择市场上新鲜、直径为 18~20 mm

的姑娘果, 采自黑龙江牡丹江。

主要仪器: Testo 435-4 多功能测量仪, 德国 Testo 公司; 多路温度测试仪 AT 4208, 常州安柏精密仪器有限公司; 硅胶软管, 深圳瑞博橡胶制品有限公司; 三相电子式电能表, 浙江正泰仪器仪表有限责任公司。

2.3 实验方法

1) 温度、速度测点布置。在传送带上方 5 cm 处, 均匀布置 5 个测点, 用来测量整个冻结区的温度均匀性。测点选择方案参照 GB/T 22732—2008《食品速冻装置 流态化速冻装置》。传送带长度为 2 100 mm, 宽度为 300 mm。流态化速冻装置的结构见图 7。测点 A、E 分别距离进料口、出料口 250 mm, 中间测点 C 与测点 A、E 的距离为 800 mm, 在截面方向测点 D、B 分别与测点 C 的距离为 120 mm, 上下对称布置, 具体布置方式见图 8a。用筷子和橡胶块辅助固定热电偶, 多路温度测试仪 AT4208 的热电偶由事先打好的孔径进入, 用计算机实时记录温度。在距离进料口和出料口附近, 长度方向布置风速测量仪, 宽度方向等距截取 6 个点, 测量各点的速度, 见图 8b。实验重复 3 次, 选取 3 组位置, 分别与进料口的距离为 200、300、1 800 mm, 每个测点测 10 次。

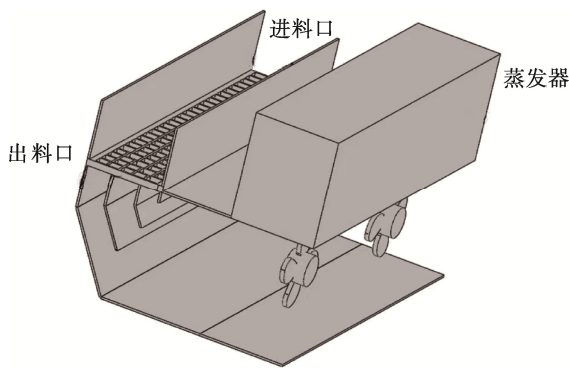


图 7 流态化速冻装置结构
Fig.7 Internal diagram of the machine

2) 冻结时间。每次称取 5 kg 姑娘果进行冻结实验, 在待冻结的姑娘果中任选 3 颗, 将热电偶插入其

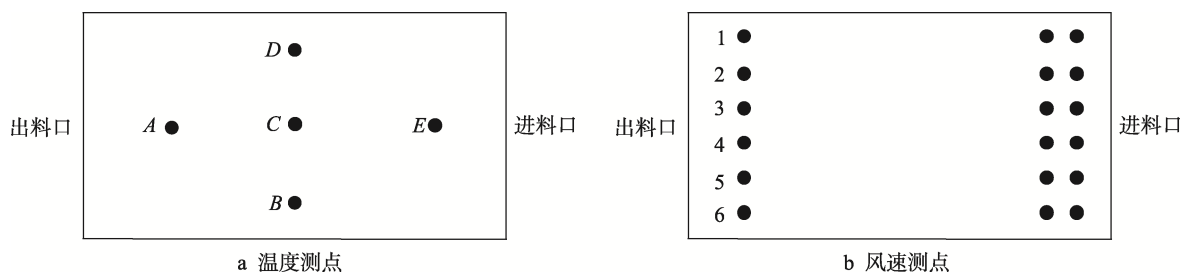


图 8 测点布置
Fig.8 Layout diagram of measuring points

中心, 记录每颗姑娘果的中心温度达到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的时间(默认此时这批姑娘果已冻结完成), 记作探针 1、探针 2、探针 3。实验重复 3 次, 取平均值。

3) 耗电量。耗电量包括空载和负载 2 个方面。空载时, 从开机到速冻室温度降到 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (达到进料标准)时所消耗的电量, 实验重复 3 次。负载时, 测量上述 3 颗姑娘果分别达到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时所耗的电量, 实验重复 3 次, 取平均值。

3 结果与分析

3.1 实验结果

速冻装置导流板优化前后的降温曲线见图 9。由图 9a 可知, 5 个点之间的温差始终较大。其中, A 点与 C 点的最大温差为 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均温差为 $0.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。A 点的温度在不断波动, 原因是距离出料口较近。当速冻室温度为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时, 开始投放物料, 投料后 E 点温度波动较大, 待姑娘果到达测点 B、C、D 时, 该测点温度整体上移, 而后温度缓缓下降。优化后的结果见图 9b, 可知 5 个点的降温曲线接近重合。其中, A 点与 C 点的最大温差为 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均温差为 $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}$, A、C 点的平均温差缩小了约 37%, 优化后机器在同一时间不同点的温差缩小了约 50%, 表明优化后机器具有较好的温度均匀性。

由表 2 可知, 与优化前相比, 优化后速度方差减小, 各组气流均匀性得到了改善。虽然实验得到的数据与模拟不完全一致, 但结果相差不大, 可见模拟数值具有一定参考性。

机器优化前后性能的对比见表 3, 可知优化后冻结时间为 6.85 min , 冻结时间缩短了 6.2%。机器速冻室温度降到 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 所需耗电量为 $6.43\text{ kW}\cdot\text{h}$, 节约了 14.2% 的电量; 5 kg 姑娘果完成冻结后所需耗电量为 $1.086\text{ kW}\cdot\text{h}$, 节约了 33% 的电量。

3.2 导流板节能机理

导流板可以增加空气的流动^[17-18], 并减少气流经钝体后的绕流^[19], 能保证速冻机内的气流均匀性。设备能耗下降有以下 2 点原因。

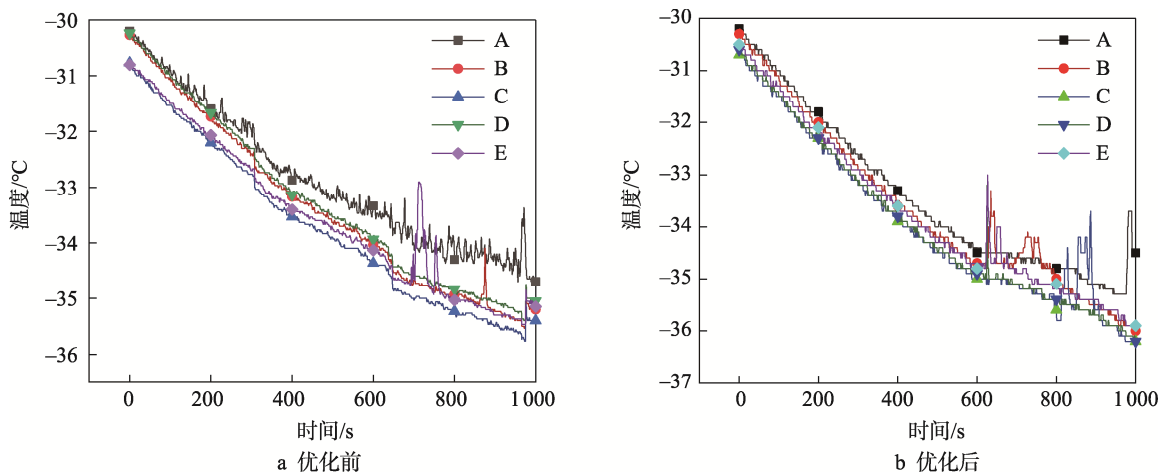


图9 装置导流板优化前后降温曲线
Fig.9 Cooling curve before and after optimization of device deflector

表2 机器各测点平均风速

Tab.2 Wind speed of each measuring point of the machine

机器状态	$v_1/(m \cdot s^{-1})$	$v_2/(m \cdot s^{-1})$	$v_3/(m \cdot s^{-1})$	$v_4/(m \cdot s^{-1})$	$v_5/(m \cdot s^{-1})$	$v_6/(m \cdot s^{-1})$	δ^2
优化前	5.798 3	5.054 0	4.628 0	4.530 9	4.672 8	4.522 8	0.204 7
优化后	5.123 6	5.078 1	5.263 1	5.336 6	5.267 5	5.234 7	0.007 8
模拟优化后	5.970 1	5.7660	5.483 8	5.626 3	5.387 7	5.496 9	0.038 6

表3 机器优化前后性能的对比

Tab.3 Performance comparison before and after machine optimization

机器状态	速度方差	冻结时间/min	空载耗电量/(kW·h)	果实冻结到-18 °C时的耗电量/(kW·h)
优化前	0.204 7	7.31	7.5	1.62
优化后	0.007 8	6.85	6.43	1.08

1) 气流均匀性的提升可以减少食品的冻结时间。良好的气流均匀性可以在较短的时间内让机器降到可投料温度,在冻结过程中充分地利用冷量,缩短食品的冻结时间,降低耗电量。同时,进料口、出料口的换气速度受到速冻机内气流均匀性的影响,当气流均匀性较好时,进料口、出料口的换气速度较小,减小了侵入空气热负荷对冻结过程的影响。

2) 蒸发器是进行热交换的主要部件,它的换热效果影响着速冻装置的能耗、气流均匀性的提升,提高了冷空气与食品颗粒的换热量,回流空气温度上升,进而增大空气与蒸发器的换热量。同时,回流空气温度上升,改善了蒸发器表面的结霜现象,减小了蒸发器与空气的换热热阻,提高了冷量利用率,降低了装置能耗。

4 结语

通过 Comsol Multiphysics 模拟不同导流板位置和角度对风道气流均匀性的影响,得到导流板 1、2 的相对最佳位置。优化后机器在同一时间不同点的温

差缩小了约 50%。且优化后速冻室的温度降到-35 °C 时所需的时间比优化前减少了约 3.5 min,冻结时间缩短了 6.2%;机器空载预冷电量节约了 14.2%;实验中菇娘果完成冻结的耗电量节约了 33%;同时,实验得出了导流板对流态化装置性能的影响,可为今后流态化速冻装置的设计提供参考。

参考文献:

[1] 王艺,张庆钢,高蕊笑,等.毛酸浆气调保鲜试验[J].食品工业,2020,41(12):149-152.
WANG Yi, ZHANG Qing-gang, GAO Rui-xiao, et al. Experimental Study on Controlled Atmosphere Storage of Physalis Pubescens[J]. The Food Industry, 2020, 41(12): 149-152.

[2] ZHU Xiang-lu, ZHANG Zhi-hang, HINDS L M, et al. Applications of Ultrasound to Enhance Fluidized Bed Drying of Ascophyllum Nodosum: Drying Kinetics and Product Quality Assessment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105298.

- [3] GUTIÉRREZ M S C, DE OLIVEIRA C M, MELO F R, et al. Limit Growth of Ice Crystals under Different Temperature Oscillations Levels in Nile Tilapia[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 37(4): 673-680.
- [4] GUO J H, XIA J, ZHANG X, et al. A Ferromagnetic Skyrmion-Based Nano-Oscillator with Modified Perpendicular Magnetic Anisotropy[J]. *Physics Letters A*, 2021, 392: 127157.
- [5] 李硕. 食品冷冻数值模拟及小龙虾超低温水介质速冻技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 1-3.
LI Shuo. Study on Food Freezing Numerical Simulation and Technique of Quick Freezing Crayfish in Ultra-Low Temperature Water[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017: 1-3.
- [6] 马千里. 不确定条件下港口冷链基础设施规模优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 23-25.
MA Qian-li. Research on Optimization of the Infrastructure Scale for Port Cold Chain System under Uncertainties[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 23-25.
- [7] AWORINDE S M, HOLLAND D J, DAVIDSON J F. Investigation of a Swirling Flow Nozzle for a Fluidised Bed Gas Distributor[J]. *Chemical Engineering Science*, 2015, 132: 22-31.
- [8] KORKERD K, SOANUCH C, PIUMSOMBOON P, et al. Effect of Particle Size Distributions on Minimum Fluidization Velocity with Varying Gas Temperature[J]. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2020, 11(11): 524-529.
- [9] SHUKRIE A, ANUAR S, ALIAS A. Heat Transfer of Alumina Sands in Fluidized Bed Combustor with Novel Circular Edge Segments Air Distributor[J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 1752-1757.
- [10] SAIKIA R, MAHANTA P, DAS H J. Transient Hydrodynamics and Heat Transfer Behaviour in a Pressurized Circulating Fluidized Bed during Abrupt Changes in Operating Pressure[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 125: 105296.
- [11] 陈殿宇, 刘宝林, 宋晓燕, 等. 流态化速冻装置布风板实验研究[J]. *轻工机械*, 2020, 38(2): 8-12.
CHEN Dian-yu, LIU Bao-lin, SONG Xiao-yan, et al. Experimental Study on Air Distribution Plate in Fluidized Quick-Freezing Device[J]. *Light Industry Machinery*, 2020, 38(2): 8-12.
- [12] 朱一帆, 谢晶. 速冻设备流场优化研究进展[J]. *食品与机械*, 2019, 35(10): 155-159.
ZHU Yi-fan, XIE Jing. Progress in Research of Flow Field Optimization in Quick Freezing Equipment[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(10): 155-159.
- [13] ALVARO A, LANOISELLÉ J L. Heat Transfer Coefficients Measurement in Industrial Freezing Equipment by Using Heat Flux Sensors[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005, 66(3): 377-386.
- [14] 张珍, 谢晶. 上下冲击式高效鼓风冻结装置速度场的数值模拟与验证[J]. *低温工程*, 2008(6): 45-50.
ZHANG Zhen, XIE Jing. Numerical Simulation and Verification on Velocity Field of Impingement Freezer[J]. *Cryogenics*, 2008(6): 45-50.
- [15] 华泽钊, 李云飞, 刘宝林. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 169-173.
HUA Ze-zhao, LI Yun-fei, LIU Bao-lin. Principle and Equipment of Food Refrigeration[M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 169—173.
- [16] 梁亚星, 陶乐仁, 郑志皋. 新型流态化食品速冻机内风道流场的数值模拟[J]. *食品与机械*, 2005, 21(2): 37-40.
LIANG Ya-xing, TAO Le-ren, ZHENG Zhi-gao. Numerical Simulation of the Air Flow Channel in LN₂-Spraying Fluidized Freezer[J]. *Food and Machinery*, 2005, 21(2): 37-40.
- [17] CHENG Qiong-yi, LI Hao, RONG Li, et al. Using CFD to Assess the Influence of Ceiling Deflector Design on Airflow Distribution in Hen House with Tunnel Ventilation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 165-174.
- [18] WU Tao, GE Zhi-hua, YANG Li-jun, et al. Flow Deflectors to Release the Negative Defect of Natural Wind on Large Scale Dry Cooling Tower[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 128: 248-269.
- [19] RAINA A, HARMAN G A, HAQ M I U. Numerical Investigation of Flow around a 3D Bluff Body Using Deflector Plate[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 131/132: 701-711.