

送风参数对马铃薯泥冷冻特性的影响

Influence of air supply parameters on the freezing process of mashed potatoes

岳占凯 万金庆 厉建国

YUE Zhan-kai WAN Jin-qing LI Jian-guo

(上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:利用 Fluent 软件建立马铃薯泥三维鼓风冷冻数值模型,研究冷冻时间对送风温度和速度的敏感程度,分析不同位置马铃薯泥冷冻条件和冷冻时间的不均匀度随送风参数的变化规律。结果表明,送风温度的改变对冷冻时间的影响比送风速度大。送风温度不变,随着送风速度的增大,马铃薯泥周围风速的不均匀度逐渐增大,温度的不均匀度逐渐减小,冷冻时间的不均匀度和中心温度的不均匀度随送风速度的增加呈现先减小后增大的趋势,送风速度为 6 m/s 时,二者最小。同一送风速度条件下,送风温度越低,马铃薯泥周围温度的不均匀度越小,中心温度的不均匀度越大。经验证,模拟结果与实验结果吻合较好,冷冻时间相对误差为 3.27%,温度的平均绝对误差为 0.79 K,均方根误差为 2.11 K。

关键词:送风参数;冷冻时间;不均匀度;数值模拟

Abstract: In order to investigate the sensitivity of freezing time to air temperature and velocity, and analyze the variation of the freezing conditions and freezing time of mashed potatoes in different locations, a three-dimensional unsteady numerical model was established. According to the thermo-physical properties of mashed potatoes, the process of the temperature decreasing during freezing was simulated by Fluent. The unevenness of freezing conditions and time was obtained under different air velocity-inlet and temperature-inlet. The results showed that the change in the percentage of air temperature-inlet had a greater effect on freezing time than air velocity-inlet. With the increase of the air velocity-inlet, the unevenness of the air velocity around the mashed potatoes increased, and meanwhile the unevenness of the air temperature around the mashed potatoes decreased. The variation coefficient of temperature among mashed potatoes and the unevenness of freezing time firstly increased and then

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(编号: 2012AA092301)

作者简介: 岳占凯,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者: 万金庆(1964—)男,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jqwan@shou.edu.cn

收稿日期: 2017-09-23

decreased with the increase of air velocity-inlet, and they were minimum when the air velocity-inlet was 6 m/s. Under the same air velocity-inlet, the in-homogeneity of the temperature around the mashed potatoes is inversely proportional to the air temperature-inlet. The experimental result showed that the simulation data was in good agreement with the experimental data. The relative error of freezing time was 3.27%, and the average absolute error of temperature was 0.79 K, with the root mean square error of 2.11 K. These results reviewed some characteristics of the freezing process of mashed potatoes without packages in an air blast freezer, which could provide a reference value for the optimization of the equipment and technologies for the freezing of foodstuffs.

Keywords: air supply parameters; freezing time; unevenness; numerical simulation

冷冻可以很好地保持食品的品质和营养成分,是目前最有效的食品保存方法之一^[1]。冷冻食品的质量跟食品的冷冻速度密切相关。冷冻时间是食品冷冻工艺参数中最直观易测的一项,也是最为重要的一项。准确掌握食品冷冻时间,对提高冷冻食品生产效率、保证冻品质量、节约设备能耗具有重要意义^[2-3]。在鼓风式食品冷冻中,影响食品降温特性的外部因素有食品外部空气温度、流速、紊流强度等参数。食品周围空气的温度决定了食品与外部空气之间的对流换热温差,空气流速和紊流强度等参数影响了食品与外部空气之间的对流换热系数。在冷冻过程中不同位置空气参数的差异,直接导致了不同位置食品降温特性的不同。

对于食品鼓风冷冻过程的模拟,研究者们^[4-6]进行了大量研究,而且通过实验进行了验证。数值模拟方法在解决气流组织的设计问题方面优势明显,近年来在冷库研究中的应用越来越多^[7-9]。这些研究以冷库内气流组织为对象,研究了不同条件下的流场和温度场分布情况。关于流场和温度场的不均匀性导致不同位置食品冷冻过程的差异性未见研究。

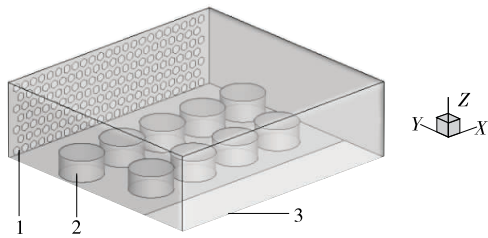
食品的鼓风冷冻过程受到周围空气的流场、温度场等因素的影响。因此,有必要研究空气参数的分布对食品鼓风冷

冻过程的影响。本试验通过建立无包装圆柱状马铃薯泥鼓风冷冻三维数值模型,模拟计算在不同送风参数下不同位置马铃薯泥的冷冻条件和冷冻时间,分析送风参数对冷冻时间的影响。使用不均匀度来评价马铃薯泥冷冻过程的差异性,分析冷冻条件的不均匀度对冷冻过程的影响。最后,通过实验验证模型的准确性,以期对相关研究提供参考。

1 模型与方法

1.1 物理模型

以马铃薯泥在小型鼓风速冻机(Pr.c-15 型,西安市安庆集团有限公司)中的冷冻过程为研究对象(图 1),研究马铃薯泥在鼓风冷冻过程中的降温特性。速冻机内部尺寸(长×宽×高)为 600 mm×555 mm×180 mm。马铃薯泥制作为高 50 mm,直径 100 mm 的短圆柱,第一排均匀布置 5 个,间距 20 mm,靠近送风口;第二排均匀布置 4 个,间距 25 mm,靠近回风口。两排相距 65 mm。送风口均流板半径 10 mm,回风口尺寸(长×宽)600 mm×125 mm。



1. 均流板送风口 2. 马铃薯泥 3. 回风口

图 1 食品与厢体三维模型

Figure 1 Sketch map of food and freezing room

1.2 数学模型

为简化计算,对模型做如下假设:马铃薯泥质地均匀,初始温度一致;马铃薯泥表面只考虑与空气的对流换热,忽略表面水分蒸发对换热的影响;马铃薯泥内部只考虑导热;速冻机厢体绝热,密封性良好;厢体内空气为牛顿流体,符合 Boussinesq 假设。

1.2.1 传热微分方程及边界条件 马铃薯泥降温过程在直角坐标系下的数学模型为^{[10]42}:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [k(T)\nabla T], \quad (1)$$

式中:

T —— 马铃薯泥温度, K;

t —— 时间, s;

C_p —— 马铃薯泥比热容, kJ/(kg·K);

k —— 马铃薯泥导热率, W/(m·K);

ρ —— 马铃薯泥密度, kg/m³。

马铃薯泥的顶面和侧面与空气发生强制对流换热,作为第三类边界条件处理^{[10]45}:

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w = h(T)(T_w - T_{ext}), \quad (2)$$

式中:

w —— 边界符号;

n —— 马铃薯泥表面外法线方向;

h —— 马铃薯泥表面对流换热系数, W/(m²·K);

T_w —— 马铃薯泥表面温度, K;

T_{ext} —— 冷风温度, K。

将发生对流换热的马铃薯泥表面设为流固耦合面,耦合面的对流换热系数由 Fluent 软件自行计算。

在冷冻过程中,托盘温度近似等于送风空气温度,马铃薯泥底面与托盘直接接触,满足界面连续条件,即温度和热流密度分别相等^{[10]45}:

$$T_I = T_{II}, \quad (3)$$

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right)_I = \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right)_{II}, \quad (4)$$

式中:

λ —— 导热系数, W/(m·K);

n —— 物体表面外法线方向;

T_I —— 马铃薯泥底面温度, K;

T_{II} —— 托盘温度, K。

初始条件 $T = T_0$, T_0 为马铃薯泥初始温度,取 290 K。

1.2.2 送、回风口条件和壁面条件 送风口设为 Velocity-inlet,采用湍流强度和水利直径定义湍流,风速为 2,4,6,8,10 m/s,温度为 248.15,243.15,238.15,233.15 K。回风口设为 Outflow。厢体壁面为绝热条件。

1.3 马铃薯泥热物性参数

食品在冷冻过程中的热物性参数会在相变前后发生很大的变化。因此,将马铃薯泥的导热系数和比热容做分段线性处理^{[11]48}:

$$k(T) = \begin{cases} k_s & (T \leq T_s) \\ k_s + \frac{(k_l - k_s)(T - T_s)}{T_l - T_s} & (T_s < T \leq T_l) \\ k_l & (T > T_l) \end{cases}, \quad (5)$$

式中:

T_s —— 马铃薯泥相变结束温度, K;

T_l —— 马铃薯泥初始冻结温度, K;

k_s —— 马铃薯泥冻结后导热系数, W/(m·K);

k_l —— 马铃薯泥冻结前导热系数, W/(m·K)。

$$C_p(T) = \begin{cases} C_s & (T \leq T_s) \\ C_s + \frac{(C_{\max} - C_s)(T - T_s)}{T_{\max} - T_s} & (T_s < T \leq T_{\max}) \\ C_l + \frac{(C_{\max} - C_l)(T_l - T)}{T_l - T_{\max}} & (T_{\max} < T \leq T_l) \\ C_l & (T > T_l) \end{cases}, \quad (6)$$

式中:

C_s —— 马铃薯泥冻结后比热容, kJ/(kg·K);

$C_{\max}$ —— 马铃薯泥冻结过程中最大比热容, kJ/(kg·K);

C_l —— 马铃薯泥冻结前比热容, kJ/(kg·K);

$T_{\max}$ —— 马铃薯泥冻结过程中最大比热容对应的温度, K。

马铃薯泥的密度由排水法测得 1 018 kg/m³,在整个冷冻过程中假定不变。式(5)、(6)中的相关参数值见表 1^{[11]53}。

1.4 模型求解

采用 SST $k-\omega$ 紊流模型^[12],基于压力的瞬态求解器,压

表 1 马铃薯泥相关物性参数值
Table 1 Thermal physical parameters of mashed potato

$T_s/$ K	$T_{\max}/$ K	$T_t/$ K	$k_s/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$C_s/$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$C_{\max}/$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$C_t/$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$k_t/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
268.15	271.65	272.65	1.80	1.85	180.00	3.50	0.35

力速度耦合方法选用 SIMPLE 算法。时间步长设为 5 s,能量方程收敛精度为 10^{-6} ,其余方程收敛精度为 10^{-3} 。马铃薯泥的初始温度设为 290 K,以所有马铃薯泥热中心温度降到 255.15 K 作为冷冻结束的标志。

2 模拟结果与分析

2.1 送风参数对冷冻时间的影响

在鼓风冷冻方式中,送风速度和温度是影响冷冻时间的 2 项关键因素。在送风速度分别为 2,4,6,8,10 m/s,送风温度分别为 248.15,243.15,238.15,233.15 K 时,马铃薯泥的冷冻时间见图 2。

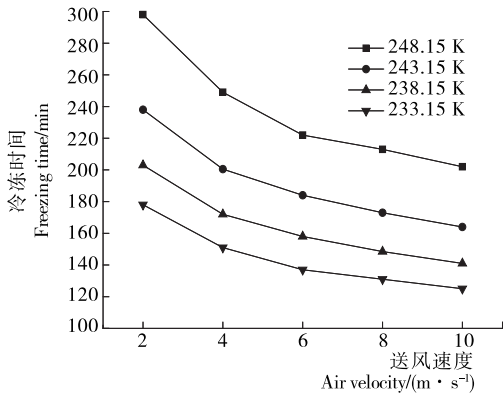


图 2 不同送风参数条件下的冷冻时间
Figure 2 Freezing time under different air supply parameters

由图 2 可知,在 4 个不同送风温度下,马铃薯泥的冷冻时间随送风速度的增加而减小,在风速增大到 6 m/s 以后,冷冻时间减小的速度放缓。送风温度越低,冷冻时间随送风速度的增加而减小的幅度越小。

以 6 m/s、243.15 K 为基准,计算送风速度和温度的变化对冷冻时间的影响,见图 3。在送风速度和温度的可变范围内,温度的改变对冷冻时间的影响更大(曲线 A 簇),而且曲线斜率变化不大;风速的改变对冷冻时间的影响呈现逐渐减小的趋势(曲线 B 簇),随着风速的增大,曲线趋于平缓。

在送风速度为 6 m/s 时,取 $Z=25\text{ mm}$ 截面流场速度分布云图,见图 4。由于两排马铃薯泥距离送风口的距离不同以及第 1 排马铃薯泥的遮挡作用,使得第 2 排马铃薯泥的冷冻条件(周围空气的温度和速度)比第 1 排差,导致第 1 排马铃薯泥先于第 2 排马铃薯泥完成冷冻过程^[13]。将两排马铃薯泥的平均冷冻时间加以比较,见图 5。两排马铃薯泥平均冷冻时间的差值随风速的增加而减小,风速超过 6 m/s 以后,两排马铃薯泥的冷冻时间差值基本不再变化;在同一风速条件下,送风温度越低,两排马铃薯泥的冷冻时间相差越小。

2.2 冷冻过程的不均匀度分析

为了定量评价冷冻条件空间分布的均匀性,建立马铃薯

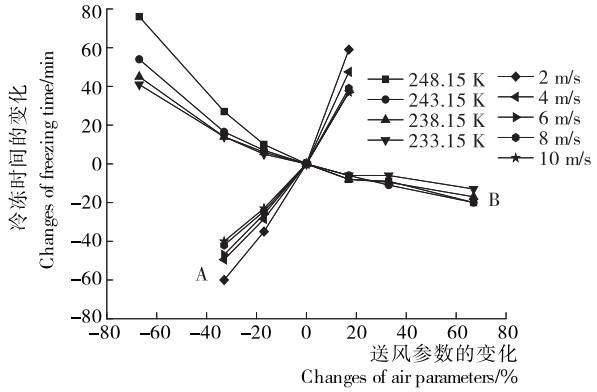


图 3 送风参数对冷冻时间的影响
Figure 3 Effects of changes of air supply parameters on freezing time

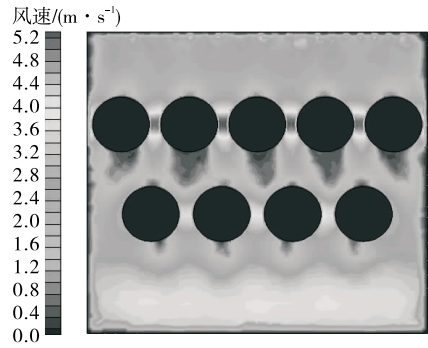


图 4 送风速度为 6 m/s 时 $Z=25\text{ mm}$ 截面流场速度云图
Figure 4 Velocity contour in container at air supply velocity of 6 m/s

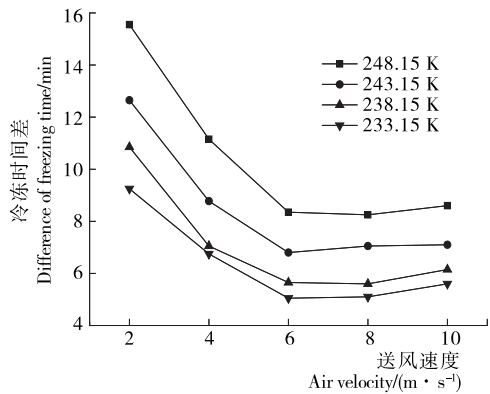


图 5 两排马铃薯泥平均冷冻时间差值
Figure 5 Freezing time difference between front and rear
泥冷冻过程指标空间分布的不均匀度作为评定标准^[14]:

$$\varphi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \right)^2}, \quad (7)$$

式中:
 φ ——食品冷冻过程指标空间分布的不均匀度;

n ——所有食品的个数；
 x ——任意位置食品的相关参数；
 $\bar{x}$ ——所有食品该参数的平均值。

参数 x 可以是食品的冷冻条件,也可以是食品的冷冻质量指标(冷冻时间或冷冻速率)。冷冻过程的某参数不均匀度越大,说明该参数的空间分布越不均匀。

在模拟得到的空气流场和温度场中,计算每个马铃薯泥单体外部空间距离其表面 10 mm 处的平均温度和风速,作为流经马铃薯泥的主流温度和速度,得到每个马铃薯泥单体的冷冻条件。在不同送风温度和速度条件下,马铃薯泥冷冻条件的不均匀度见图 6。由于风速的不均匀度与送风温度无关,所以送风速度一定时,不同送风温度下的风速的不均匀度相同,即图 6 中虚线表示 4 个送风温度所对应的风速的不均匀度。马铃薯泥周围风速的不均匀度要远远大于周围温度的不均匀度。随着送风速度的增大,马铃薯泥周围风速的不均匀度从 2.42% 增大到 2.79%,分布越来越不均匀。马铃薯泥周围温度的不均匀度随送风速度的增大逐渐减小。在

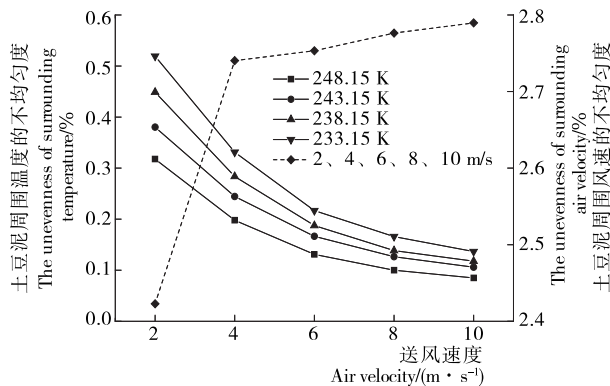


图 6 送风参数不均匀度

Figure 6 Effects of air supply parameters on the unevenness of freezing condition distribution

同一送风速度下,送风温度越低,马铃薯泥周围温度的不均匀度越小。

不同位置的马铃薯泥热中心温度达到 255.15 K 所用的时间并不相等,在不同送风参数条件下马铃薯泥冷冻时间的不均匀度见图 7。随着送风速度的增加,冷冻时间的不均匀度呈现先减小后增大的趋势,送风速度为 6 m/s 时,冷冻时间的不均匀度最小。在同一送风速度条件下,冷冻时间的不均匀度与送风温度没有明显联系。

整体冷冻结束时,每个马铃薯泥的热中心温度不相等(图 8),其温度的不均匀度随送风参数的变化见图 9。与冷冻时间的不均匀度类似,冷冻结束时的温度的不均匀度随着送风速度的增加呈现先减小后增大的趋势,送风速度为 6 m/s 时,温度的不均匀度最小,即所有马铃薯泥之间热中心温度差距最小。在同一送风速度下,送风温度越低,温度的不均匀度越大。送风温度为 248.15, 243.15 K 时,温度的不均匀度随送风速度的增大其变化幅度较为平缓,而 238.15, 233.15 K 的不均匀度随送风速度的增大其变化幅度较大。

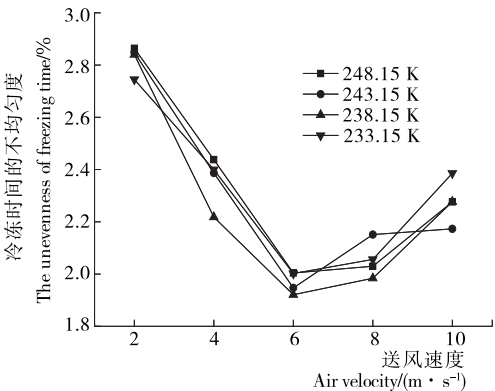


图 7 冷冻时间不均匀度

Figure 7 Effects of air supply parameters on the unevenness of freezing time

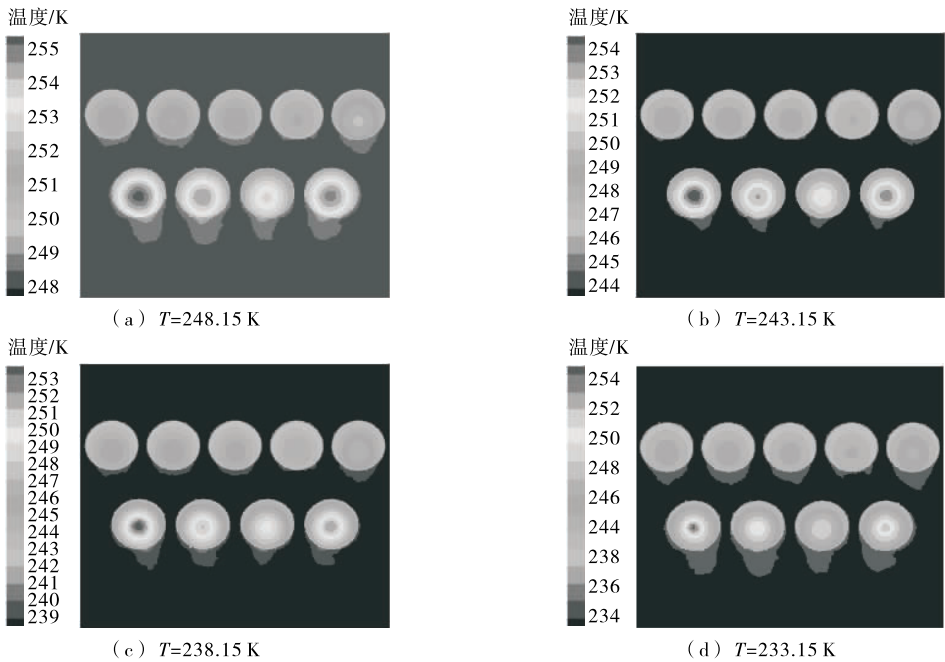


图 8 整体冷冻结束时不同送风温度对应的温度云图(送风速度均为 6 m/s)

Figure 8 Temperature contour in container at different air supply temperatures (air supply velocity is 6 m/s)

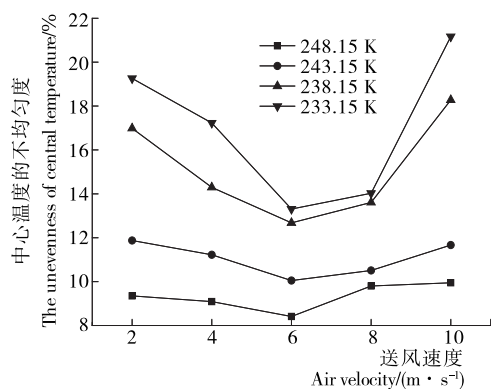


图9 冷冻结束时中心温度不均匀度

Figure 9 Effects of air supply parameters on the unevenness of central temperature

3 模型的实验验证

将送风速度为4 m/s,送风温度为243.15 K的模拟结果与实验结果进行对比,验证模型的准确性。温度采集使用Agilent 34972A型数据采集仪,T型铜—康铜热电偶(外径1 mm,精度 ± 0.3 °C)。试验材料为自制马铃薯泥,热电偶插在马铃薯泥几何中心。厢体预冷到243.15 K,维持30 min后放入马铃薯泥,每隔10 s采集一次温度数据。以冷冻时间最长的马铃薯泥几何中心温度作冷冻曲线,模拟结果与实验结果的对比见图10。冷冻时间的模拟值为207 min,实验值为214 min,相对误差为3.27%。温度的平均绝对误差为0.79 K,均方根误差为2.11 K。结果证明,该模型具有一定的准确性。

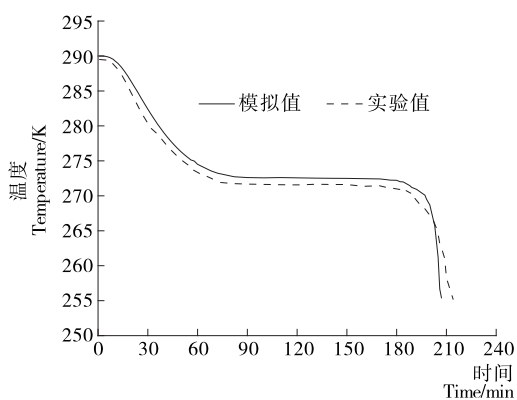


图10 冷冻速度最慢的马铃薯泥实验值与模拟值的降温曲线

Figure 10 Comparison of experimental and simulated values of mashed potatoes with the slowest freezing speed

4 结论

通过建立马铃薯泥鼓风冷冻三维数值模型,研究送风参数对马铃薯泥冷冻过程中降温特性的影响,得出结论如下:

(1) 在本试验的送风温度和速度条件下,送风温度的改变对冷冻时间的影响大于送风速度的。

(2) 在送风速度不变的情况下,送风温度越低,马铃薯泥整体冷冻时间越短,两排冷冻时间相差越小,马铃薯泥周

围温度的空间分布越均匀,但是冷冻结束时中心温度不均匀度越大。

(3) 在送风温度不变的情况下,送风速度越大,整体冷冻时间越短,马铃薯泥周围风速的不均匀度越高,温度的不均匀度越低。送风速度低于6 m/s时,马铃薯泥前后排冷冻时间的差值随风速的增加而减小,超过6 m/s后,差值变化很小。冷冻时间的不均匀度和中心温度的不均匀度均随送风速度的增加呈现先减小后增大的趋势,送风速度为6 m/s时,二者最小。

(4) 模拟结果与实验结果吻合较好。冷冻时间相对误差为3.27%,温度的平均绝对误差为0.79 K,均方根误差为2.11 K。

本试验只分析了送风温度和速度对冷冻时间和温度场不均匀度的影响,考虑到实际生产过程的经济性,后续将研究不同温度和速度组合对制冷系统能耗的影响。

参考文献

- [1] 华泽钊, 李云飞. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 104-122.
- [2] ERDOGU F. Fundamental of heat transfer in food processing [M]//Mathematical modeling of food processing. Boca Raton: CRC Press/Taylor and Francis Group, 2010: 69-88.
- [3] CAMPANONE L A, SALVADORI V O, MASCHERONI R H. Food freezing with simultaneous surface dehydration: approximate prediction of freezing time[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(6): 1 205-1 213.
- [4] HUAN Zhong-jie, HE Shao-shu, MA Yi-tai. Numerical simulation and analysis for quick-frozen food processing[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60(3): 267-273.
- [5] PHAM Q T, TRUJILLO F J, MCPHAIL N. Finite element model for beef chilling using CFD-generated heat transfer coefficients[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(1): 102-113.
- [6] 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.
- [7] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 280-289.
- [8] 刘永娟. 货物不同摆放形式下冷库内气流组织的模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011: 14-36.
- [9] 胡佐新, 黄爽, 高欣, 等. 不同出风方式对冷库温度分布的影响[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2016, 33(1): 39-41.
- [10] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 41-45.
- [11] STEVEN 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.
- [12] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 基于CFD数值模拟的冷藏车节能组合方式比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 55-62.
- [13] 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): 289-304.
- [14] 彭园园, 宋健斐, 朱廷钰, 等. 大型烟气脱硫塔配置旋风分离器的流场模拟[J]. 化学工程, 2010, 38(1): 38-41.