

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.024

食品冷却抽真空过程流场影响参数分析*

韩志^{1,2} 谢晶² 潘迎捷²

(1. 浙江海洋学院船舶与建筑工程学院, 舟山 316004; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

【摘要】 建立了描述食品冷却抽真空过程的传热、传质模型,采用计算流体力学进行了非稳态模拟,实验表明模型与实际吻合较好。在此基础上,对影响流场的参数:真空泵抽速、容器自由容积、是否放置隔板进行了模拟研究。研究表明:真空泵抽速越大,真空室内的极限压力越小,真空室的最低温度越低,达到最低温度所消耗的时间越长;自由容积不影响真空室的极限压力,自由容积越大,真空室的最低温度越高,达到最低温度所消耗的时间越短;放置隔板对流场平均温度和极限压力的影响,可以等效为自由容积的减小。

关键词: 真空泵 传热传质 流场 数值模拟 极限压力

中图分类号: TB752 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0118-04

Parameters Analysis on Flow Performance in Food Vacuumizing Process

Han Zhi^{1,2} Xie Jing² Pan Yingjie²

(1. School of Naval Architecture and Civil Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316004, China

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

Abstract

A mathematical model was developed for the heat and mass transfer in vacuumizing process. Computational fluid dynamics technology was employed for simulation based on the unsteady model. The simulation results fitted experimental data well. After that, several parameters (pumping speed, free volume, and clapboard etc.) which would affect the flow field were analyzed. The higher the pumping speed is, the lower the pressure limitation is, the lower the minimum air temperature of vacuum chamber is and the more time spent in reaching minimum temperature. The free volume did not affect pressure limitation of the vacuum chamber. The greater the free volume is, the higher the minimum air temperature of vacuum chamber is and the less time spent in reaching minimum temperature. Referring to the pressure limitation and the average temperature of the flow field, the placement of clapboard can be equivalent to the reduction of free volume.

Key words Vacuum pump, Heat and mass transfer, Flow field, Numerical simulation, Pressure limitation

引言

抽真空是食品真空冷却的关键技术,直接影响冷却速度^[1~3]。抽真空过程中,影响压力变化的因素较多,建立数学模型有利于研究不同参数对抽真空过程流场的影响。Houska M等^[4]建立了真空冷

却过程中液体气化过程的数学模型,为研究抽真空过程奠定了理论基础。金听祥等^[5]建立了抽真空过程中压力变化的数学模型,通过 Matlab 6.1 软件进行数值求解,模拟压力值与实验测得压力值的最大偏差在 200 Pa 以内。但是该方法没有考虑真空室的泄漏,在低压阶段偏差较大。贺素艳等^[6]建立

收稿日期:2009-07-27 修回日期:2009-10-16

* 2009年上海市优秀学科带头人计划资助项目(09XD1402000)和上海市教育委员会重点学科建设资助项目(J50704)

作者简介:韩志,讲师,上海海洋大学博士生,主要从事食品工程的数值模拟研究,E-mail: hanzhi@188.com

通讯作者:谢晶,教授,博士生导师,主要从事食品冷冻冷藏技术与设备研究,E-mail: jxie@shou.edu.cn

了食品真空冷却中传热、传质的数学模型,采用 Gauss-Seidel 迭代法进行求解,压力变化的计算结果与实验值吻合较好。但是,该方法无法给出整个容器内流场物理量的详细信息。

本文在考虑密闭容器的泄漏以及容器内壁和空气对流换热的前提下,建立描述抽真空过程的真空环境模型,基于 Fluent 软件对流场进行数值模拟,并对模拟结果进行实验验证。在此基础上,对影响流场的参数(真空泵抽气速度、容器自由容积、放置隔板)进行模拟研究,以期为进一步研究食品真空冷却过程以及抽真空设备的设计提供理论依据。

1 真空环境模型

真空实验装置主要由真空室和真空泵组成,该真空室的截面如图 1 所示。在建立模型时,考虑到装置的对称性,将真空室简化为二维流场处理,并作如下假设:忽略辐射换热;真空泵效率保持不变;在负压状况下,真空室的泄漏量保持不变。

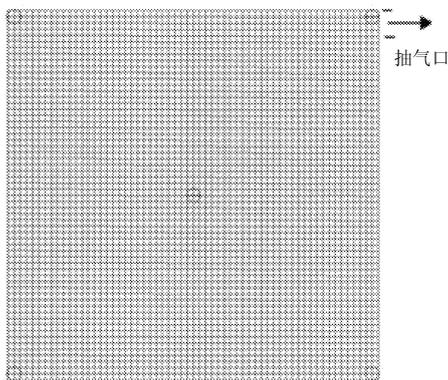


图 1 真空室截面图及网格划分

Fig. 1 Sketch map of vacuum chamber and grid display

流体流动满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。在直角坐标系下,真空室内气体流场可用通用微分方程描述为^[7]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(D\text{grad}\varphi) + S \quad (1)$$

式中 φ ——通用变量 D ——扩散系数

S ——与 φ 相对应的广义源项(不稳定相、对流项、扩散相和源项)

ρ ——密度 u ——速度 t ——时间

真空室内气体流动为非稳态紊流。真空环境的压力受真空泵的抽速和效率、真空室的自由容积和泄漏量等因素的影响。当真空室压力接近极限压力时,真空室压力变化量约为零。从上述分析并参考已有的研究^[5],可知真空室的压力随时间的变化关系为

$$\frac{dp_{vc}}{dt} = \frac{-\eta s_0(p_{vc} - p_j)}{V_{zy}} \quad (2)$$

式中 p_{vc} ——真空室压力,Pa

η ——与真空泵效率有关的比例常数

s_0 ——真空泵名义抽速, m^3/s

p_j ——极限压力,Pa

V_{zy} ——真空室的自由容积, m^3

当真空室的压力降到极限压力时,此时抽走的气体质量与渗入的气体质量相等,其计算公式为

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = s\rho = \frac{sp_j M}{RT_j} \quad (3)$$

式中 \dot{m}_{in} ——外界渗入真空室的质量流量, kg/s

\dot{m}_{out} ——真空泵排除空气的质量流量, kg/s

s ——真空泵的实际抽速, m^3/s

M ——空气的摩尔质量, g/mol

R ——气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$

T_j ——极限压力时真空室温度,K

利用分离变量法,并基于本实验装置采集的数据,对式(2)和式(3)进行求解可得

$$p_{vc} = 101\,038.32 \exp \left[\frac{-0.693\,2s_0 t}{V_{zy}} + \frac{1.875}{s_0} \right] \quad (4)$$

由于真空泵的抽气,空气和真空室内壁产生强制对流换热,视为第三类边界条件,换热量为

$$Q = h(T_b - T)$$

式中 h ——对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

T_b ——真空室内壁温度

T ——真空室内空气温度

本过程中气体的流速和压力是影响对流换热系数 h 的主要因素。压力越大,平均速度越大。通过分析实验过程及数据并参考已有的研究^[8],得对流换热系数 h 的计算公式为

$$h(t) = 480 \left(\frac{p_{vc}}{p_{atm}} \right)^{1.6} \quad (5)$$

式中 p_{atm} ——外界环境的大气压力,Pa

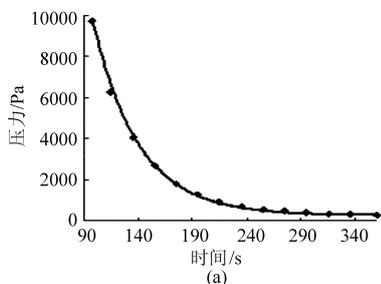
真空室和空气的初始温度设为 28.50°C ,真空室内初始压力为 $101\,325\text{ Pa}$ 。

2 数值模拟及实验验证

研究采用 Gambit 前处理软件进行建模及计算区域网格划分(图 1)。将网格文件读入 Fluent 软件,根据上述的边界条件和初始条件情况进行设置,其中压力出口和对流换热系数采用用户自定义函数(UDF)编程,选择标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型求解,采用差分控制容积法对控制方程进行离散。应用 SIMPLE 算法求解压力速度耦合关系。此外,方程收敛精度都为 10^{-3} 。

为了验证模拟的准确性,进行验证实验。采用的实验仪器为:单级旋片真空泵(LEYBOLD Sogevac SV25 型),铜-康铜热电偶(T 型,精度 0.5 级),多点

温度采集器(FLUKE 2640 NetDAQ型),电容式薄膜真空计(ZDM-1型,精度0.5级,测量范围:10 Pa~10 kPa)。真空泵的名义抽速为25 m³/h,真空室自由容积为0.20 m³。图2给出了压力和温度的实验



值与模拟值的对比情况。压力在10 000~270.14 Pa的降压过程中最大偏差为190 Pa,压力偏差率最大为5.23%,温度最大偏差为0.48℃。实验验证表明模型与实际吻合较好。

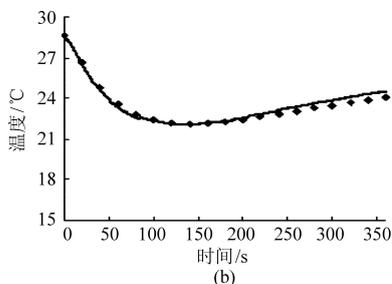


图2 真空室压力(10 000 Pa范围内)和空气温度的模拟值与实验值的比较

Fig. 2 Comparison of simulated temperature and pressure profile with the experimental data

3 不同参数对流场的影响

3.1 真空泵抽气速度

真空泵是真空室内流场的直接驱动设备,本文分别模拟了25 m³/h和30 m³/h两种抽速下的流场。

真空泵的效率随流量的变化而变化,为了简化研究,假定在上述两个抽速情况下,两者的效率相同。不同抽速下运行100 s和500 s后真空室的等压线如图3所示。

开始时,抽速对压力下速度影响很大,100 s

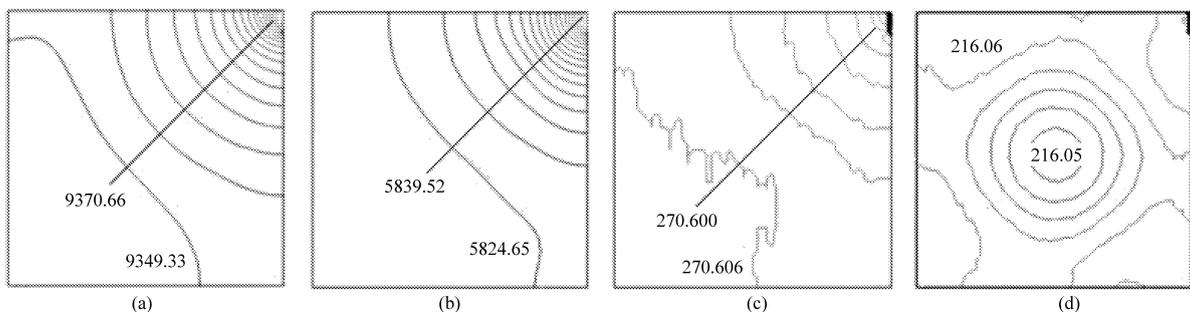


图3 不同抽气速度工况下,100 s和500 s时的真空室压力场(单位:Pa)

Fig. 3 Air pressure field in vacuum chamber of vacuumizing 100 s and 500 s with different velocities

(a) 25 m³/h, 100 s (b) 30 m³/h, 100 s (c) 25 m³/h, 500 s (d) 30 m³/h, 500 s

时,二者相差约为3 528 Pa,随着抽真空的进行,压力差逐渐减小,500 s时压力差约为54 Pa。可以判定,随着抽真空的进行,压力场呈现均匀化趋势。同时,结合模拟数据,可以得知:抽速分别为25 m³/h和30 m³/h的情况下,500 s时,压力变化量已经很小,可知极限压力分别约为270 Pa和216 Pa,由此可以看出:真空泵抽速越大,真空室内的极限压力越小。

真空室达到的最低面积加权平均温度为21.55℃和18.52℃,对应的时间是120 s和220 s。其中,面积加权平均温度定义式为

$$T_{pj} = \frac{1}{S_0} \int T dS_0 = \frac{1}{S_0} \sum_{i=1}^n T_i S_i \quad (6)$$

式中 S_0 ——真空室界面的面积,m²

S_i ——真空室界面被分割后第*i*块的面积,m²

T_i ——第*i*块面上的温度值,℃

由此可以看出,抽速越大,真空室的最低温度越

低,达到最低温度所消耗的时间也越长。

3.2 自由容积

分别模拟自由容积0.16 m³和0.20 m³时的流场,模拟结果如图4所示。

同时,结合模拟数据,可以得到:抽速25 m³/h和30 m³/h时,极限压力都约为270 Pa,真空室达到的最低面积平均温度为22.09℃和18.20℃,对应的时间分别为140 s和200 s。

由此可以看出,开始时自由容积对压力下速度的影响很大,100 s时相差约为3 445 Pa,随着抽真空的继续进行,400 s时压力趋于一致。此时,二者都接近其极限压力270 Pa,可知:自由容积不影响真空室的极限压力;温度对比上可以看到,自由容积越小,真空室的最低温度越低,达到最低温度所消耗的时间也越长。

3.3 放置隔板

以上数值是真空室内没有物品时的情况,但实

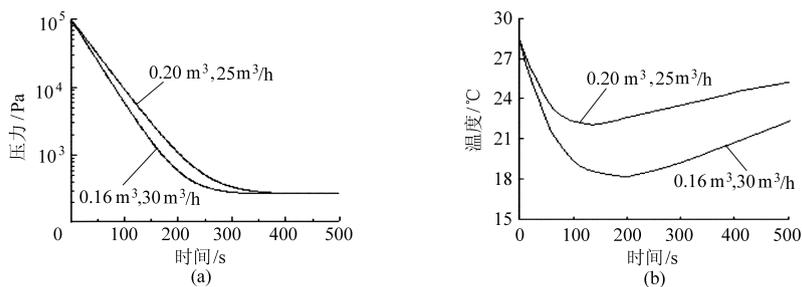


图4 不同自由容积抽气时真空室的压力和温度对比

Fig. 4 Pressure and area-weighted average temperature in vacuum chamber of vacuumizing with different cubage

际真空室内是要放置物品的,为了说明问题,在真空室内放置两块隔板(隔板内不含水分,即不考虑低压下水分气化造成的影响),截面尺寸为 $0.1\text{ m} \times 0.3\text{ m}$,间距 0.2 m ,第1个距立壁 0.1 m 。

有隔板时,真空室内空气的速度矢量图和等温线,如图5所示。隔板存在对室内流场产生巨大的影响。中心区漩涡上移,流场内漩涡数量增多,整个

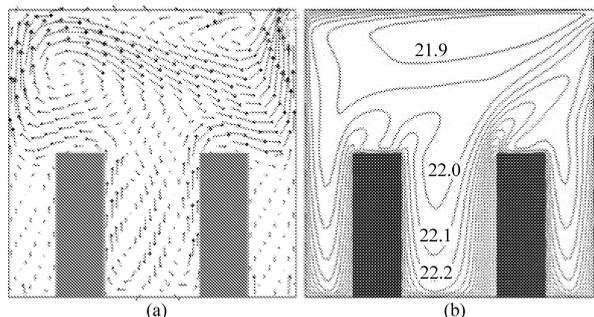


图5 有隔板时真空室的速度矢量图和温度场

Fig. 5 Flow field and isotherm in vacuum chamber with clapboards

(a) 速度矢量图 (b) 等温线(单位:°C)

流场呈现紊乱趋势,均匀性变差。可以看出,隔板的存在主要是改变了流场的气流分布,使得速度场、温度场和压力场的分布随之产生变化。同时,结合模拟结果数据发现,面积平均温度和极限压力与自由容积 0.16 m^3 时的情况一致,因此,对流场的面积平均温度和极限压力而言,放置隔板可以等效为自由容积的减小。

4 结论

(1) 本文所建模型可以有效预测密闭容器抽真空过程中空气压力、温度和速度等流场参数的变化。

(2) 抽速越大,真空室内极限压力越小,真空室最低温度越低,达到最低温度所用时间越长。

(3) 真空泵的自由容积不影响真空室的极限压力;自由容积越大,真空室的最低温度越高,达到最低温度所消耗的时间越短。

(4) 放置隔板对流场的面积平均温度和极限压力的影响可以等效为自由容积的减小。

参 考 文 献

- 谢晶, 韩志, 潘迎捷, 等. 自动补气阀对卷心菜真空冷却过程的影响[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 118~121.
Xie Jing, Han Zhi, Pan Yingjie, et al. Influence of automatic air compensating valve on process of cabbage vacuum cooling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 118~121. (in Chinese)
- Dostal M, Kyhos K, Houska M, et al. Vacuum cooling of solid foods[J]. Czech Journal of Food Science, 1999, 17(3): 103~112.
- Noble R. A review of vacuum cooling of mushrooms[J]. Mushroom Journal, 1985, 149: 168~170.
- Houska M, Podlucky S, Zitny R, et al. Mathematical model of the vacuum cooling of liquids[J]. Journal of Food Engineering, 1996, 29(3~4): 339~348.
- 金听祥, 朱鸿梅, 肖尤明, 等. 熟肉真空冷却过程的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 142~145.
Jin Tingxiang, Zhu Hongmei, Xiao Youming, et al. Numerical simulation during vacuum cooling of cooked meat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(1): 142~145. (in Chinese)
- 贺素艳, 李云飞. 球形食品真空冷却过程中参数分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 205~208.
He Suyan, Li Yunfei. Parametric analysis of spherical foods during vacuum cooling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 205~208. (in Chinese)
- 谢晶, 瞿晓华, 徐世琼. 冷藏库内气体流场数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 11~16.
Xie Jing, Qu Xiaohua, Xu Shiqiong. Numerical simulation and verification of airflow in cold store [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2): 11~16. (in Chinese)
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 162~168.
- 刘芬, 张爱萍, 刘东红. 真空预冷处理对青花菜贮藏期间生理活性的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 106~110.
Liu Fen, Zhang Aiping, Liu Donghong. Effect of vacuum pre-cooling on physiological activities of broccoli during storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 106~110. (in Chinese)