文章编号：0253-4339(2012)01-0065-04
doi：10.3969/j.issn. 0253-4339. 2012. 01. 065

卷心菜真空冷却过程的CFD传热传质模拟

王雪芹 刘宝林 闫静文

（上海理工大学 低温生物与食品冷冻研究所 上海 200093）

摘 要 有效的真空预冷模拟能减少实验投入，缩短试验周期，具有重要的理论意义和现实意义。综合考虑了非稳态传热和质量守恒,建立了球形果蔬真空冷却的温度和质量数学模型，并以卷心菜为例进行了模拟和实验。实验结果表明，模拟数据与实验数据较吻合,温度误差在4%以内,质量损失误差在6.5%以内，说明该数学模型可用来模拟真空冷却过程，对实际应用具有一定的指导意义。

关键词 热工学；真空冷却；传热传质；CFD模拟；卷心菜

中图分类号：TB61+1; TS205.7 **文献标识码**：A

CFD Simulation of Heat and Mass Transfer during Vacuum Cooling Process for Cabbage

Wang Xueqin Liu Baolin Yan Jingwen

(Institute of Cryobiology and Food Freezing, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract Effective vacuum cooling simulation has the advantage of low cost and short period, and therefore is important in theory and application. Based on the theories of unsteady heat transfer and mass conservation, a mathematical model developed by CFD software is used to predict the variation process of temperature and mass during vacuum cooling for cabbage. The simulative result matches well with the experimental data. The error between simulation and test result is no more than 4 percent for temperature, and no more than 6.5 percent for weight. So the mathematical model can benefit for the practical application of vacuum cooling.

Keywords Pyrology; Vacuum cooling; Heat and mass transfer; CFD simulation; Cabbage

抽真空是食品冷却的关键技术，直接影响冷却速度[1-3]。真空条件可加快水分的蒸发，材料自身潜热可随水蒸气释放体外，从而达到降温目的[4-6]。目前的研究大多集中在实际应用，缺乏对真空冷却机理的研究，结果是造成材料的浪费、能耗增加，同时冷却食品的质量也不是最佳。以前的数学模型只能预测真空冷却过程产品温度的变化，对冷却过程中水分含量的变化，模型中没有考虑[7-9]。从目前可以查阅的文献看，Houska等[10-11]对液体的真空冷却建立了数学模型，可以预测真空冷却过程中液体压力、温度和收缩性的变化。Sun等[10-11]建立了真空冷却的非稳态模型，通过CFD软件对多孔食品的真空冷却进行了数值模拟，预测了这些食品在真空冷却过程中的热质交换。陈雪梅[12]等建立了多孔柱状蔬菜真空冷却传热传质模型，预测了柱状蔬菜冷却速度和质量损失程度。李云飞等[13]从基本理论和定义出发，建立和描述了球形果蔬在真空冷却过程中的传热传质的数学模型，通过数值求解得到过程参数随时间变化的曲线，其主要考虑了蒸发引起的传热和传质，而未考虑对流和辐射对换热的影响，这里同时考虑了蒸发、对流和辐射对换热的影响。

1 传热传质模型的建立

真空冷却分为两个阶段进行：第一阶段，真空室压力从大气压减小到2000Pa左右，这个阶段的冷却效果不明显，产品温度保持不变。第二阶段，真空室压力降低到蔬菜表面温度对应的饱和压力，蔬菜中的水分蒸发，温度降低。所以，主要的传热传质发生在第二阶段，这里主要建立了球形果蔬在

基金项目：国家高技术研究发展计划(863计划，2008AA100803)；新世纪优秀人才支持计划(07-0559)资助项目。(The project was supported by National High-Tech R&D Program of China(863 Program, 2008AA100803) and program for New Century Excellent Talents in University(No.07-0559).)

收稿日期：2011年5月12日

该阶段的传热传质模型。

1.1 传热模型的建立

为了简化计算，在建立模型时做如下假设：

1)产品为球形，径向传热率占主导地位；2)在初始阶段，产品的温度和水分是均匀的；3)产品的热物性不变；4)传热是非稳态的。

1.1.1 空气传输模型

能量方程（根据能量守恒定律）

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla\cdot(\vec{v}(\rho E+p))=\nabla\cdot(\lambda\nabla T) \tag{1}$$

水分传输方程

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\vec{v}Y)=-\nabla\cdot\overrightarrow{J_{\mathrm{w}}} \tag{2}$$

1.1.2 蔬菜瞬态热量传递模型

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{q_V}{\rho c} \tag{3}$$

$$q_V=-1000h_{\mathrm{fg}}\frac{\mathrm{d}m}{V\mathrm{d}t} \tag{4}$$

1.1.3 传质模型

$$\frac{\partial(\rho_f W)}{\partial t}=\nabla(\rho_f D_f\nabla W) \tag{5}$$

$$D_f=4.67\times10^{-5}\exp\left(-\frac{3757.26}{T}\right) \tag{6}$$

1.2 初始条件和边界条件

$$T=T_0,\qquad (t=0,r=r)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}=0,\qquad (t\neq0,r=0)$$

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial r}=q_{\mathrm{evap}}+q_{\mathrm{conv}}+q_{\mathrm{rad}}$$

$$q_{\mathrm{evap}}=\rho D\frac{Y_{\mathrm{s}}-Y_{\mathrm{c}}}{d_{\mathrm{s}}}\Delta H_{\mathrm{vap}}$$

$$q_{\mathrm{conv}}=h(T_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{a}})$$

对空气

$$q_{\mathrm{conv}}=\lambda\frac{T_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{c}}}{d_{\mathrm{s}}}$$ （与上式等同）

$$q_{\mathrm{rad}}=\sigma\varepsilon_{\mathrm{r}}(T_{\mathrm{s}}^4-T_{\mathrm{a}}^4)$$

$$Y=Y_0,\qquad (t=0)$$

$$W=W_0,\qquad (t=0)$$

$$J_{\mathrm{w}}=\rho D\frac{(Y_{\mathrm{s}}-Y_{\mathrm{c}})}{d_{\mathrm{s}}}$$

$$P=P_0\exp\left(-\frac{S_{\mathrm{e}}}{V}t\right),\qquad (t\neq0)$$

表1 模型中的参数

Tab.1 Datas used in model

参数名		数值
t	时间	s
S_{e}	真空泵有效抽速	0.002 m³/s
V	真空室容积	0.15 m³
D	扩散系数	2×10^{-5} m²/s

1.3 果蔬的热物性参数

果蔬的导热系数按照Sweat[14]在1995年提出的公式计算：

$$\lambda=0.58w_{\mathrm{w}}+0.155w_{\mathrm{p}}+0.25w_{\mathrm{c}}+0.16w_{\mathrm{f}}+0.135w_{\mathrm{a}}$$

式中：w_{w}、w_{p}、w_{c}、w_{f}、w_{a}分别代表果蔬中水分、蛋白质、碳水化合物、脂肪和灰分的质量分数。

果蔬的比热容也按照Sweat[14]提出的公式：

$$c_p=1.381+2.93w_{\mathrm{w}}$$

2 模拟结果和讨论

表2 初始和边界条件

Tab.2 The initial and boundary conditions

重量/kg	1.5
真空室空气温度/℃	24
空气相对湿度/%	85
卷心菜起始温度/℃	24
卷心菜含水率/%	90
起始压力/Pa	101325
终止压力/Pa	650

基于上述数学模型，应用CFD软件(Fluent)进行了模拟计算。 由于球形的对称性，取四分之一的球体进行模拟，用不规则网格进行划分，沿X轴和Y轴网格间距均为2mm。迭代计算的时间步长取与实验数据采集的时间间隔一致，为5s。模拟的起始温度取与实验相同，为24℃。代入上述初始和边界条件，真空冷却实验过程中的压力数据做成曲线，分数段拟和成二次方程，编写udf作为压力边界条件。

为了验证模型的正确性，对卷心菜进行了实验。实验装置：VCE-15真空预冷机，上海锦立新能源公司研发生产，计算机可以显示质量和温度。实验状况如下：将1.5kg卷心菜在环境中放置4h，

使温度达到一致24℃时进行实验。真空冷却室的容积为0.15m^3，真空泵的抽速为7.2m^3/hr，将热电偶分别布置于卷心菜表面和垂直轴线的中心位置一距离卷心菜表面50mm。初始压力为101325Pa，将卷心菜置于真空冷却室内的电子秤上，开启制冷机，待盘管温度降至-5℃以下，开启真空泵抽真空预冷，当真空冷却室压力为650Pa，关闭真空泵，随后关掉制冷机。

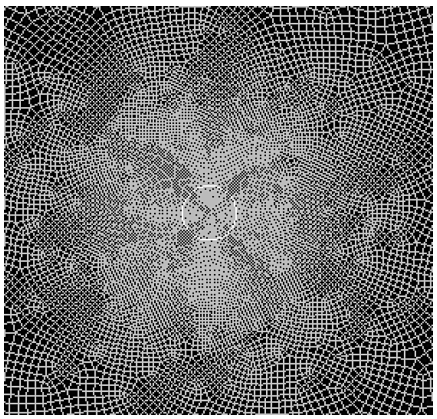

图1 网格图
Fig.1 Grid drawing

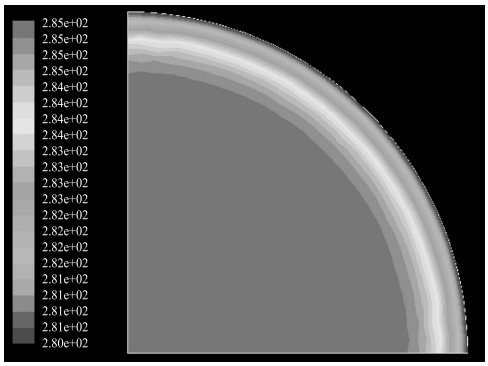

图2 冷却300s时卷心菜内部温度
Fig.2 Internal temperature profile at time 300s

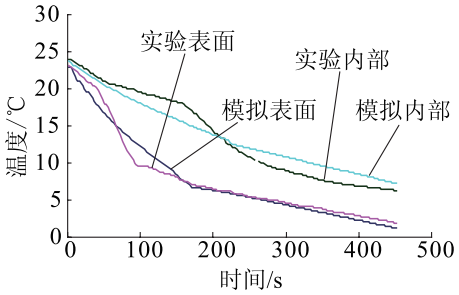

图3 卷心菜内部温度和表面温度的数值模拟结果同实验数据的对比
Fig.3 Internal and surface temperature profile of cabbage in simulation and test

图2为真空冷却冷却时间300s时卷心菜内部温度的分布。图3为真空冷却过程中卷心菜的内部温度和表面温度的数值模拟结果同实验数据的对比。可以看出，在冷却过程的初始阶段，卷心菜的温度降低速率比较快，冷却后期温度降低比较慢。这是因为随着冷却的进行，产品温度降低，表面温度对应的饱和蒸汽压降低，表面和内部的压力差降低，因此质量传递速率降低，使温度降低速率减慢。在450s的时间内，数值模拟的表面温度从23℃降至1.2℃，内部温度从23.9℃降至7.3℃；而实验数据中相应的表面温度降至1.9℃，内部温度降至6.4℃。数值模拟结果和试验结果比较吻合。

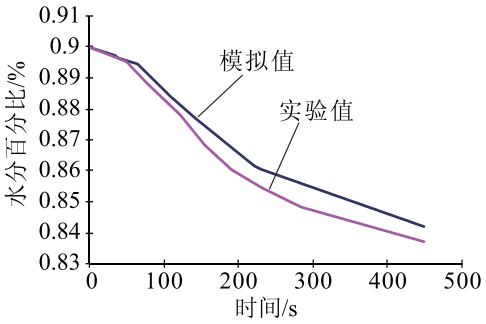

图4 真空冷却过程中卷心菜含水量百分比的数值模拟结果同实验数据的对比
Fig.4 Water concentration profile of cabbage in simulation and test

真空冷却过程中卷心菜内的水分蒸发带走热量而使得温度降低，因此卷心菜的质量会减少。数值模拟结果表明真空冷却过程中的质量损失为6.5%，而相应的实验数据的质量损失为6.9%，两者间的误差为5.8%。由图中可以看出，在真空冷却初始阶段，模拟和实验数据相差不大；而实验后期两者的偏差增大，这是由于随着水分的蒸发，卷心菜内部的空隙加大，使得水分传输加快、蒸发速率加快，而模型中未考虑内部空隙变化对蒸发速率的影响。

3 结论

建立了真空冷却过程中球形果蔬的非稳态传热传质模型，同时考虑了蒸发、对流和辐射等对温降的影响，并应用CFD软件进行了模拟计算。以卷心菜为例进行了实验验证，实验数据与模拟数值较吻合，说明建立的模型基本准确，能够用来预测真空冷却过程中的温度变化和质量损失。

本文受上海市重点学科建设项目（S30503）资助。
（The project was supported by Shanghai Leading Accdemic Discipline project（No.S30503）.）

符号说明

T：开尔文温度，K

λ：产品的导热系数，J/(m•K•s)

P：压力，Pa

σ：斯蒂芬－波尔兹曼常数，5.7×10^{-8}W/(m^2•K^4)

ε_r：发射率，%

q_v：产品单位体积水分蒸发吸收的热量，kJ/(m^3•s)

$\frac{dm}{dt}$：kg/(m^2•s)

D：扩散系数，m^2/s

h_{fg}：水蒸气的蒸发潜热，kJ/kg

d_s：体网格的间距，mm

下标

f：实验物品卷心菜

c_p：被冷却产品的比热容，J/(kg•K)

v：水蒸气

Y：空气中水的含量，%；

s：表面

r：半径方向，mm

c：体网格中心

W：蔬菜水分含量，%

a：空气

参考文献

[1] 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.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].Trans. Chin. Soc. Agric. Mach., 2007, 38(5): 118-121.)

[2] Dosta I M, Kyhos K, Houska M, et al. Vacuum cooling of solid Food[J].Czech Journal of Food Science, 1999, 17(3): 103-112.

[3] Noble R. A review of vacuum cooling of mushroom [J]. Mushroom Journal, 1985, 149:168-170.

[4] 贺素艳,王德昌,马永志. 真空预冷实验装置计算机检测系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 111-113. (He Suyan, Wang Dechang, Ma Yongzhi. Esteblishment of the System of Microcomputer Monitoring and Measurement of Vacuum Precooling Equipment[J].Trans.Chin.Soc. Agric. Mach.,2009,40(10):111-113.)

[5] McDonald K, Sun D W. Vacuum cooling technology for the food processing industry. A review[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(2):55-65.

[6] Ozturk H M, Ozturk H K. Effect of pressure on vacuum cooling of iceberg lettuce [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(3):402-410.

[7] 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 CSAE,2005,21(1):142-145.

[8] 金听祥,张海川,成剑,等.真空冷却技术的应用与研究进展[J].农业工程学报,2008,24(增刊1):234-238.(Jin Tingxiang, Zhang Haichuan, Cheng Jian, et al. Review of Vacuum Cooling Process[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(extra edition1):234-238.)

[9] 金听祥,李改莲,徐烈,等.真空冷却过程的机理分析[J]. 真空与低温,2005,11(2):116-120. (Jin Tingxiang, Li Gailian, Xu Lie, et al. Analysis on the Mechanism Vacuum Cooling Process[J]. Vacuum and Cryogenics,2005,11(2):116-120.)

[10] Da-Wen Sun, Zehua Hu. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process[J]. International Journal of Refrigeration, 2003,26: 19-27.

[11] Da-Wen Sun, Zehua Hu. CFD predicting the effects of various parameters on core temperature and weight loss profiles of cooked meat during vacuum cooling[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 34:111-127.

[12] 陈雪梅,韩厚德,阚安康.多孔蔬菜在真空冷却过程中热质流失的研究[J].安徽农学通报,2011,17(05):143-145. (Study on Mass and Heat Loss of Porous Vegetables durring Vacuum Cooling[J]. Anhui Agri Sci Bull.2011,17(05):143-145.)

[13] 贺素艳,李云飞.果蔬真空预冷过程中热质传递的理论分析[J]. 真空与低温, 2003, 9(3): 29-34.

[14] Sweat V E. Thermal properties of foods[M]// M A Rao, S S H Rizil. Engineering Properties of Foods. New York: Marcel Dekker, Inc., 1986, 49-87.

作者简介

王雪芹，女(1977－)，博士生，低温生物与食品冷冻研究所，上海市军工路516号上海理工大学，200093，18616332712，E-mail：smy7711@163.com。研究方向: 真空预冷实验研究及传热传质模拟。现在进行的研究项目有: 上海市重点学科建设项目(S30503)；教育部新世纪优秀人才计划(07-0559)；上海高校东方学者计划。

About the author

Wang Xueqin(1977－), female, Ph.D., Institute of Cryobiology and Food Freezing, University of Shanghai for Science and Technology, 516#, Jungong Road, Shanghai, China, 200093, 18616332712, E-mail: smy7711@163.com. Research fields: Test research on vacuum cooling and heat and mass transfer simulation. The author takes on key project supported by Shanghai city(S30503); Program supported by Ministry of Education of China(07-0559) Program of east scholar in Shanghai university.