

茄子冷冻过程热湿迁移数值模拟研究

陈天及, 龚璐洁, 谢 堃
(上海海洋大学, 上海 201306)

摘 要:利用数值模拟预测茄子冷冻过程的温、湿度场。模型中考虑了茄子内部的多孔结构, 采用变物性参数模拟不同冻结速度和不同厚度下茄子冷冻过程的温度变化及湿迁移情况, 模拟结果与实验吻合较好。计算结果表明, 茄子在冻结过程中其内部水分向冻结表面迁移现象明显, 其水分迁移主要发生在冻结前, 且冻结速度越低、茄子厚度越大, 其水分迁移量越大。其他条件相同, 茄子冻结完成后中心水分迁移量在风温 -20°C 下的比风温 -40°C 下的大 2.7%, 厚度 60mm 的比厚度 30mm 的大 5.64%。

关键词:冻结, 多孔介质, 数值模拟, 水分迁移, 茄子

Numerical simulation on heat and moisture movement of eggplant during freezing

CHEN Tian-ji, GONG Lu-jie, XIE Kun

(Shang Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A numerical simulation was carried to predict the temperature variation and moisture distribution during the freezing of eggplant. The eggplant was considered as porous material in the model. The moisture transportation and change in local temperature of the sample were predicted throughout the freezing process and variable thermo physical properties were adopted in the prediction. The model was validated by experiments and the results of the model showed good agreement with experimental data. The calculated results showed that, the water movement towards freezing front during freezing process was apparent. The water movement occurred before the completion of freezing, and the lower the freezing speed and the greater the thickness, the larger the water amount moved. The water amount moved out of the bottom part at the air temperature of -20°C was 2.7% more than that at the air temperature of -40°C , and was 5.64% larger with the thickness of 60mm than that with the thickness of 30mm under the same other conditions.

Key words: freezing; porous media; numerical simulation; water movement; eggplant

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2010)10-0344-04

目前, 对食品的冷加工已经非常普遍, 同时对冷冻食品的品种和品质也提出了更高的要求。在冷加工中, 食品中的水分对食品冻后质量有着很大影响。通过模拟计算能够反映食品在冷冻过程中内部热湿迁移的趋势与规律, 早期对食品冷冻的模拟大多假设食品热物性在冻结过程中为常数, 而实际上食品的热物性在冷冻后较大的变化, 特别是含水量高的食品。近年的一些研究则采用冷冻前后两个物性对食品冷冻过程进行模拟, 而实际上食品的热物性随着冷冻的进行随时发生着变化。另一方面, 食品在冷冻过程中内部的水分迁移也会对食品品质产生影响。随着冷冻的进行, 食品内部的水分迁移使水分的分布不均匀, 这会影响冷冻食品的贮藏品质, 同时还会影响食品加工工艺过程的进行。如在进行冻干加工时, 若能了解水分迁移特性便能改进加工工

艺。因此本文以茄子为含湿多孔介质^[1-2] 食品的实验对象, 采用随温度变化的热物性对食品冷冻过程的温度场和水分迁移情况进行模拟和实验, 来验证非饱和含湿多孔介质食品冷冻过程中的热湿迁移规律。茄子的果实为浆果, 其胎座特别发达, 是幼嫩的海绵组织。在热传导过程中有其独特性, 一般的常物性数值模拟的方法不能很好地对其冷冻过程进行较深入的研究。本文引入多孔介质结构对茄子冷冻过程中的变物性、非稳态进行数值模拟研究, 通过模拟能反应出在冷冻过程中, 茄子内部各个位置的温度变化以及湿迁移情况。

1 茄子冷冻过程传热传质模型

1.1 物理模型

将茄子果肉切割成厚度为的矩形试件, 其物理模型如图 1 所示。并将茄子试件放入带有风机循环的低温冷冻箱中进行冻结实验。茄子果肉为含湿多孔结构, 假设其内部物质由连续的骨架结构与孔道构成, 孔道中含有液态水以及气态水, 其中液态水又可分为自由水和结合水。自由水在介质内部为分散

收稿日期: 2009-10-09

作者简介: 陈天及 (1946-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事食品加工贮藏过程的冷冻冷藏工艺和传热传质过程的研究。

项,由于结合水含量非常少,在此予以忽略。并且通道中的液态水和气态水均能在介质内部自由迁移。同时也假设试件的初始状态温度与质量分布均匀,介质连续且含湿非饱和状态。

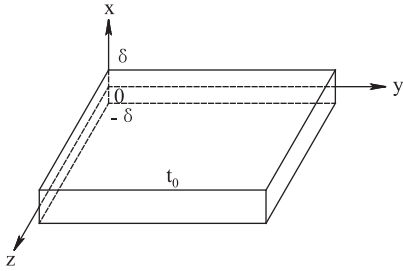


图1 物理模型

1.2 茄子冻结过程的数学模型

由于茄子果肉厚度较薄,可将其作为一无限大平板处理。试件上下两侧与温度为 t_s 的冷空气接触,其内部介质将产生热湿迁移,根据对称性只需解决一侧的传热传质即可。冻结面从表面 ($X = \delta$) 向中心 ($X = 0$) 移动。

1.2.1 热平衡方程 结合茄子内部结构特点,茄子冻结过程为一维非稳态变物性的问题,茄子的物性比热容 C_p 和导热系数 λ 是与温度有关的函数。根据导热方程,茄子内部热平衡方程可表示为:

$$\rho C_{\text{Peff}}(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left[\lambda_{\text{eff}}(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right] \quad \text{式(1)}$$

式中: ρ - 茄子密度 (kg/m^3), 取 $534.4 \text{kg}/\text{m}^3$; C_{Peff} - 有效比热容 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$); λ_{eff} - 有效导热系数 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)。

本文根据茄子的结构特点,其有效比热容按下式计算:

$$C_{\text{Peff}} = M_s C_{p_s} + M_w C_{p_w} + M_i C_{p_i} \quad \text{式(2)}$$

式中: C_{p_s} 、 C_{p_w} 、 C_{p_i} 分别为茄肉部分干物质、水分和冰的比热容 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$); M_s 、 M_w 、 M_i 分别为茄肉部分干物质、水和冰的质量含量 (kg/kg 干物质)。

在冷却阶段,冰的含量为零;在冷冻阶段,冰的含量随冻结温度的变化,以式(3)计算。

$$M_i(T) = M \left(1 - \frac{T_f - 273.15}{T - 273.15} \right) \quad \text{式(3)}$$

式中: M - 总含水量 (kg/kg 干物质); T_f - 冻结温度 (K)。

水分的含量变化以式(4)计算;当茄子内所有水分相变成为冰时,水的含量为零。

$$M_w(T) = M - M_i(T) \quad \text{式(4)}$$

考虑茄子在冻结过程中其导热系数随温度变化,参照有关文献描述的多孔介质导热系数的构成方式,选择茄子在冻结过程中的有效导热系数由下式计算:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_c \frac{2\lambda_c + \lambda_d - 2\varepsilon_d(\lambda_c - \lambda_d)}{2\lambda_c + \lambda_d + \varepsilon_d(\lambda_c - \lambda_d)} \quad \text{式(5)}$$

式中: λ_c 为连续相热导率; λ_d 为分散相热导率。在这里,冻结前连续相为干物质,分散相为水;冻结后连续相为干物质和冰,分散相为水; ε_d 为分散相的体积占有率,由下式计算:

$$\varepsilon_d = \frac{\rho \cdot \chi_d}{\rho_d} \quad \text{式(6)}$$

式中: χ_d - 分散项的质量百分数; ρ_d - 分散相密度。

1.2.2 质平衡方程 根据质传递理论,茄子冻结及内部水分的湿迁移过程质平衡方程可表示为:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D(T) \frac{\partial^2 M}{\partial X^2} - \frac{\partial M_i(T)}{\partial t} \quad \text{式(7)}$$

式中: M - 水分的质量含量 (kg 水/ kg 干物质); D - 质扩散系数 (m^2/s); M_i - 冰的质量含量 (kg 冰/ kg 干物质)。

当 $T < T_f$ 时,冰的质量含量 M_i 由式(3)计算;

当 $T \geq T_f$ 时, $M_i(T) = 0$ 。

质扩散系数参照文献[11]的经验公式,由式(8)计算:

$$D(T) = 1.801 \times 10^{-4} \times \exp\left(\frac{-23.02}{RT}\right) \quad \text{式(8)}$$

1.2.3 边界条件 热边界为第二类边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \left(\frac{\delta}{2}, t \right) = h_a(T_s - T_a) \quad \text{式(9)}$$

式中: T_s - 风温 (K); T_a - 茄子表面温度 (K); h_a - 表面对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$),其数值由经验取 $14.88 \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ 。

中心绝热条件:

$$\frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad \text{式(10)}$$

质边界条件:

$$-D(T) \rho \frac{\partial W}{\partial X} \left(\frac{\delta}{2}, t \right) = W_s - W_a \quad \text{式(11)}$$

式中: W_s - 空气中水分的含湿量 (kg 水/ kg 干空气); W_a - 茄子表面水分的饱和含湿量 (kg 水/ kg 干物质)。

中心绝湿条件:

$$\frac{\partial W}{\partial X} = 0 \quad \text{式(12)}$$

1.2.4 方程求解 在每一特定时刻,对方程(1)和(7)进行离散求解,分别令 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, $\alpha = \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2}$,

$\beta = \frac{D \Delta t}{(\Delta x)^2}$ 。方程(1)、(7)的离散形式可表示为:

$$T_i^n = -\alpha T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2\alpha) T_{i+1}^{n+1} - \alpha T_{i+1}^{n+1} \quad \text{式(13)}$$

$$M_i^n = -\beta M_{i-1}^{n+1} + (1 + 2\beta) M_{i+1}^{n+1} - \beta M_{i+1}^{n+1} \quad \text{式(14)}$$

式(13)、式(14)的每个时间层都能求解得到 T 和 M 。需要注意的是,每个时间层茄子的物性:比热容和导热系数都要根据这一时刻的温度重新计算后再代入求解。本文利用 Excel 的公式编辑功能进行求解^[6-7]。

茄子冷冻的温度曲线可分为三个阶段:冷却阶段、冻结阶段和再降温阶段。求解中对茄子通过冻结阶段所需时间采用下式确定:

$$t = \frac{\rho L}{T_f - T_s} \left(\frac{\delta}{2h_a} + \frac{\delta^2}{8\lambda} \right) \quad \text{式(15)}$$

式中: L - 茄子的冻结潜热 kJ/kg ,其数值根据实验取 $342.1 \text{kJ}/\text{kg}$ 。

2 实验方法

实验选用矮型紫茄作为实验对象。相比细长型的,矮型紫茄直径较大,易于根据需要获得一定面积与厚度的试件。

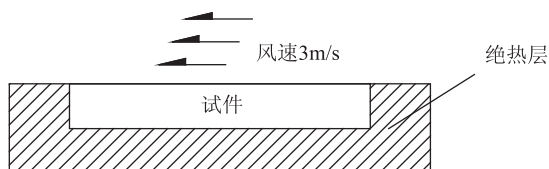


图2 试件隔热方式

实验前将茄子去皮,切成长宽为 25mm × 25mm 以及不同厚度的块状进行冷冻实验。将其四周及底部用绝热材料包裹,在实验试件的底部与表面埋置热电偶。将茄子四周及底部包隔热,放入带有风机的低温箱中,并使箱内的风能从试件表面平行掠过(即实验试件的顶部),见图 2。

待冷冻完成,立即称量其冻后质量。然后将茄子自上而下平均分成三份,分别称量上部、中部、下部的质量,考察其内部水分迁移量。

在风速 3m/s 下分别对厚度为 30、40、50、60mm 的茄子在 -20、-30、-40℃ 风温下进行冷冻实验。

3 模拟计算结果及分析

3.1 模拟计算与实验结果比较

在风温 -40℃ 条件下对厚度 $\delta = 50\text{mm}$, 初始温度 $t_0 = 15^\circ\text{C}$, 初始含水量 $M = 95\%$ 的茄子进行模拟计算及实验研究。

茄子冷冻过程其表面和内部温度随时间的变化曲线如图 3。由图可见,模拟值与实验值吻合较好。

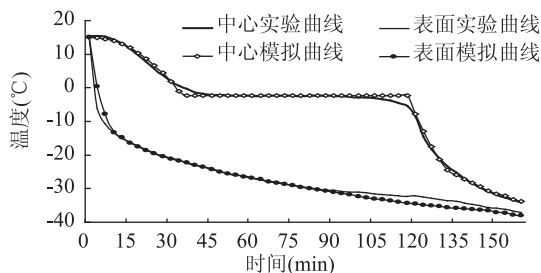


图3 厚度 50mm 茄子冷冻过程温度变化曲线

茄子内部含水量变化及水分分布模拟和实验结果见图 4。由图可见,茄子表面和中心的含水量在初始状态均为 95%,且在冷冻开始阶段,即茄子温度逐渐下降的冷却阶段,表面和中心的含水量变化不大,稍有下降。随后表面的水分被低温箱内较干燥的冷风带走,表面含水量逐渐下降。同时随着表面温度的降低和水分的逐渐冻结,其茄子内部孔隙中的水分分压力也逐渐降低。靠近中心的水分将向表面方向移动。

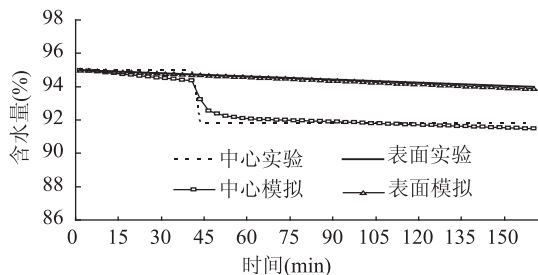


图4 厚度 50mm 茄子冷冻过程含水量变化

从图 4 可见,虽然茄子表面由于冷风吹过其水分蒸发量较大,但由于中心水分在冻结前(大约冻结

35~45min 时)迁移量较大,最终中心的含水量小于表面。模拟计算表明,茄子中心水分的迁移是主要发生在茄子中心区域水分冻结前的 5~10min 内。由于实验中只能测得初始及冻结完成状态的含水量,无法获得含水量变化情况。冻结终了茄子表面与中心含水量的模拟与实验误差分别在 2% 和 1% 以内。

3.2 不同冻结速度茄子内部热湿迁移计算结果分析

厚度为 50mm 茄子在不同冻结速度(即不同风温)下的温度变化与水分分布关系如图 5、图 6 所示。从图中可见,同一厚度的茄子,风温越低其冻结速度越快,完成冻结所需时间越短。在 -20、-30、-40℃ 三个风温下,中心温度达到 -10℃ 分别需要 252、171、123min。由于茄子在风温 -20℃ 下冻结时间最长,水分能够迁移的时间也最长,相反地 -40℃ 下冻结时间最短,水分能够迁移的时间也最短。表 1 为厚度为 50mm 的茄子不同冻结速度下完成冻结后各部分含水量。在初始含水量均为 95% 的条件下, -20℃ 风温下冻结的茄子冻结完成后中心迁移量比 -40℃ 风温下大 2.7%。即随着风温的上升,茄子冻结所需时间越长,中心水分迁移量越大。

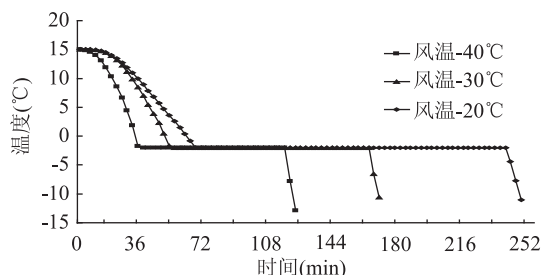


图5 厚度 50mm 的茄子在不同风温下温度变化曲线

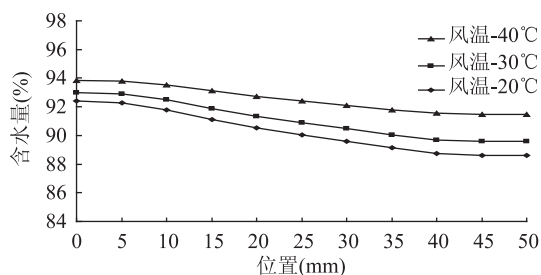


图6 不同风温下茄子内部含水量分布

表1 不同风温茄子冷冻后各部分含水(冰)量

风温(℃)	含水(冰)量(湿基,%)		
	上部	中部	下部
-20	92.40	90.04	88.77
-30	92.98	90.88	89.57
-40	93.86	92.40	91.47

注:茄子厚度 50mm, 初始含水量 95%。

3.3 不同厚度下的冻结时间及内部水分迁移计算结果分析

茄子厚度与冻结时间、水分分布关系如图 7 所示。从图 7 中可见,茄子的中心温度通过冻结区域所需时间随厚度增加而增加,厚度分别为 30、40、50mm 的茄子在风温 -20℃ 下完成冻结分别需要 56.6、107.7、179.2min。

表 2 为不同厚度茄子冷冻后各部分含水量。(下转第 351 页)

无脱落,粘膜下层未见炎细胞浸润,肌层结构完好。
2.3.5.6 睾丸、卵巢检查 雄性成年鼠睾丸曲细精管对照组和高剂量组间比较未见明显差异。雌性成年鼠卵巢内可见不同发育阶段的卵泡及排卵后形成的黄体或白体,对照组和高剂量组间比较未见明显的病理差异。

以上组织病理学检查结果均在正常范围内,高剂量组与空白对照组比较未见明显生物学差异,提示实验样品对肝、肾、脾、胃、十二指肠、卵巢、睾丸无明显损伤作用。

3 结论

研究表明,野生藜蒿提取物小鼠经口 $LD_{50} > 20.0g/kg \cdot bw$,属实际无毒;对基因、体细胞及生殖细胞无明显致突作用;受试物分别按 5、2.5、1.25g/kg $\cdot bw$ 的剂量喂养大鼠 30d,结果显示:实验期间动物未出现拒食现象,动物生长活物正常,被长浓密有光泽。各剂量组动物体重、食物利用率、主要脏器比与

对照组比较差异无显著性($P > 0.05$)。对照组和各剂量组的白细胞计数及其分类、红细胞计数、血红蛋白及各项生化指标(谷丙转氨酶、谷草转氨酶、尿素氮、肌酐、胆固醇、甘油三脂、血糖、总蛋白、白蛋白)均在正常值范围内。大体解剖及组织学检查未发现该受试物对各剂量组被检动物的受检脏器产生有意义的病理变化。根据实验结果,判定鄱阳湖野生藜蒿为安全性食品,该野生藜蒿提取物具有良好的食用安全性。

参考文献

- [1] 杨振国,陈彬,杨艺青.江西藜蒿的开发利用[J].中国野生植物资源,1995(1):61-62.
- [2] 丁利君,吴振辉,等.金银花中黄酮类物质最佳提取工艺的研究[J].食品科学,2002,23(2):62-65.
- [3] 范青生,胡居吾.保健食品注册申报实用指南[M].中国轻工业出版社,2006:195-201.

(上接第 346 页)

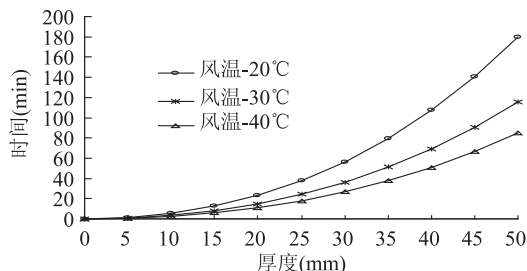


图7 不同厚度下茄子的冻结时间

见,60mm 厚的茄子冻结后其表面与中心含水量相差最大,其中心水分迁移量比相同条件下 30mm 厚的茄子要高 5.64%。

表2 不同厚度茄子冷冻后各部分含水(冰)量

厚度(mm)	含水(冰)量(湿基,%)		
	上部	中部	下部
30	93.62	93.00	92.82
40	93.03	91.73	90.80
50	92.40	90.04	88.77
60	91.80	88.43	87.18

注:冷冻风温-20℃,初始含水量 95%。

4 结论

4.1 采用变物性模型对茄子冷冻过程进行模拟计算,计算得到茄子温度和水分分布曲线与实验吻合度较好,得到了茄子冷冻过程不同条件下的温湿度迁移规律。

4.2 模拟和实验结果表明,茄子在冻结过程中其内部水分向冻结表面迁移现象明显,其中心水分迁移主要发生在冻结前的 5~10min 内。

4.3 计算结果表明,不同冻结速度下,茄子的冷冻时间随着风温下降而缩短,茄子的迁移量随风温上升而增大,冻结速度越慢其水分迁移量越大。在初始含水量均为 95% 的条件下,-20℃ 风温下冻结的茄子冻结完成后中心水分迁移量比-40℃ 风温下大 2.7%。

4.4 计算结果表明,厚度越大的茄子冻结了其内部水分分布均匀性越差,其中心水分迁移量越大。厚度 60mm 的茄子在相同条件下,中心水分迁移量比厚度 30mm 的茄子大 5.64%。

参考文献

- [1] 刘伟,等.多孔介质传热传质理论与应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] 林瑞泰.多孔介质传热传质引论[M].北京:科学出版社,1995.
- [3] 杨世铭,等.传热学[M].第四版.北京:高等教育出版社,2006.
- [4] Hamadami N, et al. Simulation of coupled heat and mass transfer during freezing of a porous humid matrix [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27: 595-603.
- [5] William H P, et al. C 数值算法[M].第二版.北京:电子工业出版社,2004.
- [6] 郑宁,等.用 Excel 快速求解一维非稳态对流扩散方程[J].西安科技大学学报,2006,26(2):6.
- [7] 戴卫国,等.Excel 软件在求解偏微分方程数值解中的应用[J].重庆工业高等专科学校学报,2003,18(2):5.
- [8] R Paul Singh. Hand book of food engineering [M]. New York: Marcel Dekker, 1992.
- [9] 刘相东,杨彬彬.多孔介质干燥理论的回顾与展望[J].中国农业大学学报,2005,10(4):81-92.
- [10] F Plourde, M Prat. Pore network simulations of drying of capillary porous media. Influence of thermal gradients [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 1293-1307.
- [11] Hamadami N, et al. Transport properties of a high porosity model food at above and sub-freezing temperature. Part 2: evaluation of the effective moisture diffusivity from drying data [J]. J Food Engng, 2004, 62: 3853-92.