

干切牛肉冷冻干燥中解析干燥过程的动态模拟及优化

罗瑞明^{1,2}, 董平³, 李亚蕾¹, 周光宏²

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 南京农业大学食品科技学院, 南京 210095;
3. 宁夏工商职业技术学院, 银川 750001)

摘要: 该文通过对干切牛肉冷冻干燥中解析阶段含水率、物料温度的动态模拟及干燥速率与耗能分析, 确立干切牛肉冷冻干燥中解析干燥的优化操作条件。通过建立解析阶段中脱除水分所需干燥时间以及相应的物料表面温度、物料中心温度的数学模型, 并假设解析干燥过程中物料含水率由升华结束时的 10.0% 下降到干燥结束的 0, 以含水率变化为自变量, 模拟了物料厚度为 6、8、12、15 mm 的干切牛肉在干燥室压强 10 Pa, 加热板温度 80℃ 的操作条件下含水率、物料温度随时间的动态变化。以所建模型预测厚度 7、9、10、11、12、13、14 mm 的干切牛肉在该操作条件下含水率、物料温度的动态值及解析干燥周期。验证试验表明: 预测与实测含水率相对误差小于 10%, 物料中心温度计算值与实测值的绝对误差小于 5℃, 说明所建模型可用于模拟、预测 6~15 mm 干切牛肉冷冻干燥中解析干燥阶段的参数变化。比较不同厚度干切牛肉冷冻干燥中解析干燥阶段的干燥比耗时、干燥效率, 结果是采用 6 mm 厚度切片进行干燥, 生产单位产品耗能最低, 且生产率最大。

关键词: 冷冻干燥, 解析干燥, 优化, 干切牛肉, 动态模拟

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.049

中图分类号: S375, TQ028.6⁺73

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0271-08

罗瑞明, 董平, 李亚蕾, 等. 干切牛肉冷冻干燥中解析干燥过程的动态模拟及优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 271-278.

Luo Ruiming, Dong Ping, Li Yalei, et al. Dynamic simulation and optimization for desorption drying process during freeze drying of cooked beef slice[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 271-278. (in Chinese with English abstract)

0 引言

冻干食品生产工艺主要包括前处理、预冻、升华干燥、解析干燥和整理包装等阶段^[1]。真空冷冻干燥过程及参数的合理控制是保证冻干食品质量的关键, 也是节约冻干时间、减少能耗, 降低成本、增强市场竞争力的重要手段^[2]。由于冷冻干燥试验耗时多、成本高, 采用数学模型模拟、优化冷冻干燥过程, 可以大幅度减少试验量^[3]。

比较典型的对片状食品冷冻干燥过程质能关系进行模拟的数学模型有2类: 一类是King等提出的升华界面均匀后退模型^[4], 即URIF模型; 另一类是Litchfield等提出的升华-解析干燥模型^[5-6]。URIF模型能较好地模拟冻干中的冰晶升华过程, 升华-解析干燥模型不仅模拟冰晶升华过程, 而且模拟解析干燥阶段的蒸发干燥。但上述两类模型仅对冷冻干燥过程的质能守恒关系进行模拟, 不能预测冷冻干燥中制品含水率、物料温度随时间变化的动态值, 也未考虑操作条件的优化。

在冷冻干燥动力学研究方面, 比较典型的是Ratti等提出的集中参数测量模型, 利用可测量参数预测干燥过程中水分随时间的变化, 但模型仅对冷冻干燥过程水分变

化进行动态模拟, 未考虑温度随时间的动态变化, 也未考虑操作条件的优化^[1]。

在操作条件优化方面, 国内郭玉明、宫元娟等以正交试验结果为基础, 建立各指标与试验因子之间的回归模型, 找到了最佳工艺条件^[2,7]。但模型仅适用于某一产品在特定试验机上的优化, 且试验量大, 建模成本高。罗瑞明等建立了干切牛肉冷冻干燥周期、生产率及脱除单位水分能耗的确定型计算模型, 以模拟结果为基础, 建立干燥周期、生产率及能耗与物料厚度、干燥室压强、加热板温度之间的回归模型, 找到了最佳工艺条件。研究过程虽减少了条件摸索实验, 但仍局限于整个过程的优化, 对冷冻干燥过程中升华、解析对操作参数的动态需要缺乏预测性^[8]。

近年来, 罗瑞明等通过建立升华过程中冻结物料温度在 T_i 时冰晶以最大速率升华所允许的升华层厚度、升华时间及升华所需物料表面温度的数学模型, 预测了干切牛肉冷冻干燥升华过程中制品含水率、物料中心温度随时间发生的动态变化及升华所需物料表面温度的动态值, 通过单位产品能耗及生产率分析, 确立了升华干燥的最佳操作条件^[9]。

升华干燥结束时干切牛肉含水率在10%左右, 这是因为被干燥物质的毛细管壁和极性基团上还吸附有一部分未冻结的结合水, 必须提供足够的能量, 才能使其从吸附中解析出来^[10]。冻干制品含水率要求 $\leq 5.0\%$, 必须经过解析干燥才能达到制品含水率要求^[11]。

本文研究干切牛肉冷冻干燥中升华结束后解析阶段

收稿日期: 2009-02-03 修订日期: 2009-07-14

基金项目: 国家支撑计划 (2006BAD05A15)

作者简介: 罗瑞明 (1964—), 男, 宁夏银川人, 教授, 博士, 硕士生导师。主要从事食品加工过程模拟、控制及优化研究。银川 宁夏大学农学院, 750021。Email: ruimingluo.nx@163.com

制品含水率、物料温度随时间发生的动态变化,确立解析干燥的优化操作条件,从而完成干切牛肉冷冻干燥过程动态模拟与优化系统的构建。使系统可预测干切牛肉冷冻干燥全过程中制品含水率、物料表面及中心温度随时间变化的动态值,可预测升华、解析干燥周期及冻干周期。结合产量、能耗测定值,通过单位产品耗能及生产率分析,确立生产冻干干切牛肉的最佳操作条件,并未为数字化生产奠定理论基础。

1 模型的建立

冷冻干燥升华结束后,在解析干燥阶段,不存在已干层与冻结层共存的现象。假设某水分含量时热学参数在物料中一致,物料可作为整体研究。又假设在解析干燥中,物料水分由升华终点含水率(10%, m/m)下降到0。

解析干燥速率与结合水含量的关系如式(1)所示^[11]

$$\frac{dw}{dt} = -f_d w_i \quad (1)$$

式中: w_i ——某时刻结合水含量, f_d ——解析干燥系数(由试验曲线拟合, s^{-1}); t ——时间, s。

由热量平衡原理,热流密度 Q 与解析速率相关

$$Q = J \cdot \frac{K_1}{L} (T_{is} - T_i) = \frac{dw}{dt} \cdot \Delta H_v \quad (2)$$

式中: K_1 ——干燥物料热导率, $0.0036 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ^[12]; L ——物料厚度, m; T_{is} ——物料表面温度, K; T_i ——物料中心温度, K; ΔH_v ——液态水汽化潜热, 2687.0 kJ/kg ^[3]; J ——汽化潜热占总供热的比例系数(由试验统计确定,无量纲)。在解析阶段,外部供应的热量 Q 主要用于3部分,①作为显热升温,②作为潜热使液态水汽化,③转化为动能,用于水分子摆脱结合物的束缚,也用于水分子在多孔物料中迁移。

式(3)表达了辐射加热板温度与物料表面温度的关系^[11]

$$Q = \sigma F (T_{up}^4 - T_{is}^4) \quad (3)$$

从式(3)解得物料表面温度

$$T_{is} = (T_{up}^4 - f_d w_i \Delta H_v / \sigma F)^{1/4} \quad (4)$$

式中: σ ——黑体辐射常数, $5.67 \text{ kW/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$; F ——受辐射物的形状系数,对于片状熟牛肉 $F = 2.59 \times 10^{-11}$ ^[12]; T_{up} ——上加热板温度, K。

结合式(2)与(3)可得物料中心温度

$$T_i = T_{is} - \frac{f_d w_i \Delta H_v L}{JK_1} \quad (5)$$

解析水分 w_i 所需时间

$$t_i = w_i \left(\frac{dw}{dt} \right)^{-1} \quad (6)$$

以水分变化为自变量,采用式(6)、(4)、(5)可模拟不同厚度干切牛肉在一定压强干燥室内,并在一定加热温度下解析单位水分所需时间 t_i 、相应的表面温度 T_{is} 、物料温度 T_i 。

2 验证试验

2.1 材料与方法

2.1.1 试验材料

筛选半膜性肌、背部最长肌等部位制作的干切牛肉,含水率 48.5%~53.2%,近似取 50%。剔除熟牛肉上附着的脂肪及结缔组织,切片,长约 40~50 mm,宽约 20~30 mm,试验 1~4 厚度分别为 6、8、12、15 mm,试验 5~10 分别为 7、9、10、11、13、14 mm。将切好的物料摆放于干燥托盘中,填充系数 $\alpha=0.8$ 。

2.1.2 试验装置

本试验装置如图 1 所示,主要由制冷系统、真空系统、加热系统、称重系统、数据测量控制系统和电气控制系统组成。

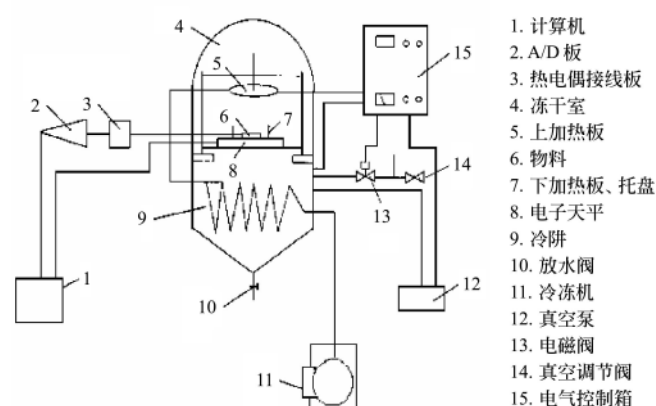


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of freeze dryer

2.1.3 操作流程

启动真空泵,抽空冷阱腔,然后开启冷冻机制冷,冻结置于下加热板上的样品。当插入物料中的温度探针输出值达到设定值($-30 \sim -24^\circ\text{C}$)后维持 1 h,结束预冻。在冻结阶段后期,使冷阱温度降到 -50°C 以下,然后开启冷阱腔与干燥室之间的真空隔膜阀,抽空冻干仓,当干燥室压强达到 10 Pa 时,启动下加热板加热丝加热,水蒸气从物料中升华出来被冷阱吸附,升华干燥开始。干燥开始时启动电子天平称重系统,当物料质量降至初始质量的 60%时,认为游离水全部升华,干燥转入解析阶段^[13]。因本文解析干燥过程温度模型是在辐射加热方式下建立的(见式(4)、(5)),为了使试验符合模型应用条件,关闭下加热板,启动上加热板辐射加热,控制温度 80°C 。当物料中心温度、表面温度重合,且天平读数在 0.5 h 内不再变化时,干燥结束。

2.1.4 物料水分测定方法

1) 物料初始含水率测定 干切牛肉在烘箱中烘烤脱水后,将干燥样品放置在 P_2O_5 中继续脱水至质量恒定^[12],物料初始含水率=[(干切牛肉初始质量- P_2O_5 脱水后干燥样品质量)/干切牛肉初始质量] $\times 100\%$ 。

2) 游离水含率测定 牛肉中所含水分包括易冻结的游离水(冰点 $-3.0 \sim -1.5^\circ\text{C}$)与不宜冻结的结合水(冰点低于 -40°C)两部分^[14],本试验设定预冻终温 $-30 \sim -24^\circ\text{C}$,

只冻结游离水，部分结合水在解析干燥中脱除。干切牛肉冷冻干燥中通过观察窗观察干燥室内冰晶变化。冻结样品初始质量减去样品冰晶完全消失时的质量，等于游离水含量^[12]。

游离水含水率=(游离水含量/样品初始质量)×100%

结合水含水率=初始含水率-游离水含水率

3) 制品在线含水率测定 干燥开始后定时启动电子天平称重系统，含水率=[(样品初始质量-样品在线称量质量)/样品初始质量]×100%。

2.2 结果与分析

2.2.1 厚度 6、8、12、15 mm 的干切牛肉冻干解析阶段含水率及温度变化模拟

1) 含水率变化模拟

以式(6)模拟切片厚度为 6、8、12、15 mm 的干切牛肉在干燥室压强 $P_s=10\text{ Pa}$ 、上加热板温度 $TUP=80^\circ\text{C}$ 条件下的冷冻干燥试验的解析阶段。图 2 比较了解析干燥各时段不同厚度干切牛肉解析干燥中物料含水率变化的模拟值与实测值。图 2a 干燥时间为 2.5 h 时，模拟含水率为 10%，实测含水率 10.5%，继续解析干燥 1.0 h，模拟含水率 0.5%，实测含水率 1.6%，绝对误差 1.1%；图

2b 中干燥时间为 4.7 h 时，模拟含水率为 10%，实测含水率 9.8%，继续解析干燥 1.9 h，模拟含水率 0.5%，实测含水率 1.6%，绝对误差 1.1%；图 2c 中干燥时间为 9.2 h 时，模拟含水率 10%，实测含水率 9.7%，继续解析干燥 3.9 h，模拟含水率 0.5%，实测含水率 1.5%，绝对误差 1.0%；图 2d 中干燥时间为 13.2 h 时，模拟含水率 10%，实测含水率 11.0%，继续解析干燥 5.7 h，模拟含水率 0.5%，实测含水率 1.6%，绝对误差 1.1%。从图 2a~d 注意到：在实测含水率 $>2.0\%$ 时，模拟含水率与实测含水率相对误差小于 10%，说明模型能很好地模拟不同厚度物料在实际解析过程中含水率的变化。当实测含水率 $<2.0\%$ 后，模拟值与实测值出现很大偏差。从图 2a~d 看到，当干燥时间分别为 3.8、7.3、14.6 与 21.2 h 时，模拟值等于 0，而实测值分别为 1.50%、1.32%、1.31% 和 1.33%。这是因为食品物料中有 2% 左右的水分子与蛋白质极性基团紧密结合、排列有序，脱除极其困难，已不符合液态水汽化的热力学规律，使模型出现偏差^[10]。实际上，1.3%~1.5% 的含水率已达到了冻干食品要求 ($<5.0\%$)^[11]。当实测含水率 $<5.0\%$ 后，冻干即可结束，模型偏差并不影响其实际工程意义。

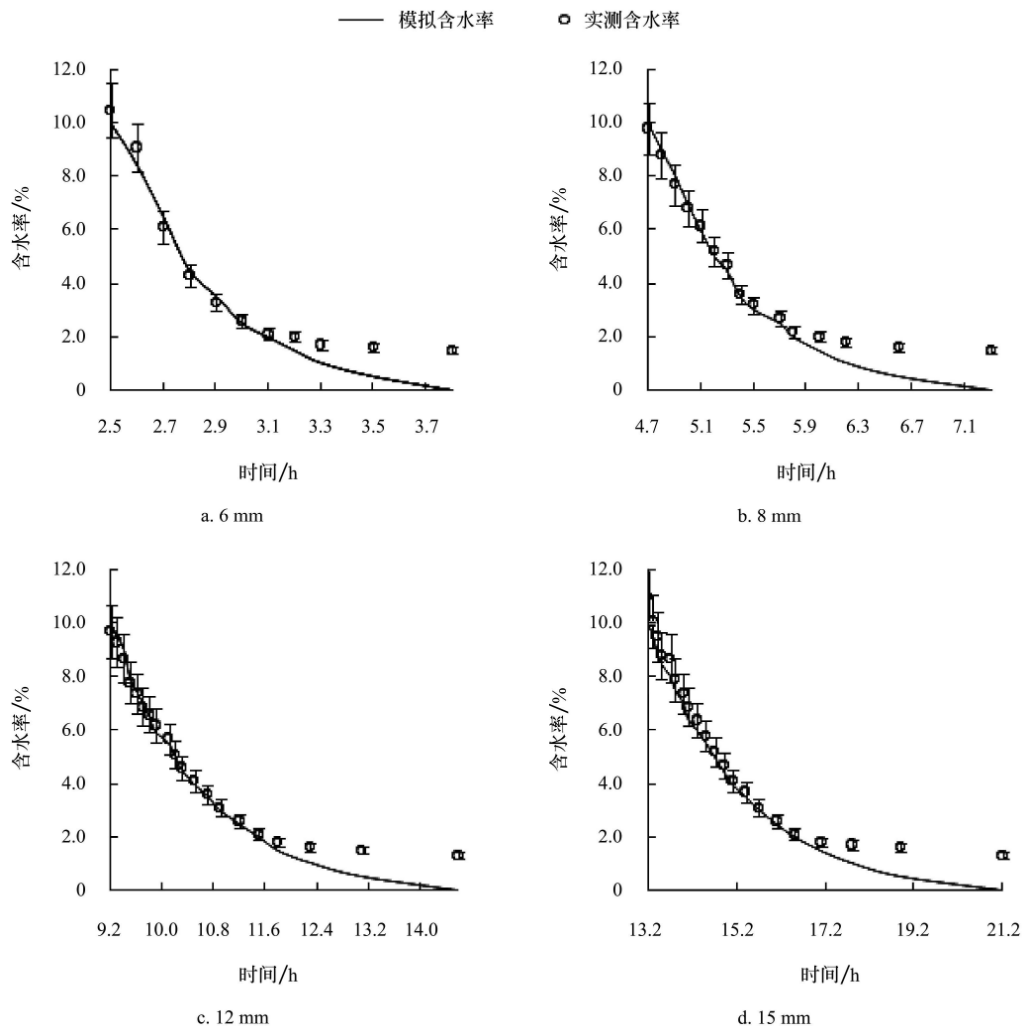


图2 厚度 6、8、12、15 mm 干切牛肉解析干燥中物料含水率模拟值与实测值比较

Fig.2 Comparisons between simulated and measured moisture ratio of sample during desorption drying of cooked beef slice in thickness of 6, 8, 12 and 15 mm

2) 温度变化模拟

解析干燥阶段的干燥是物料中的水分蒸发,而不是冰升华。这是因为干燥物质的毛细管壁和极性基团上还吸附有一部分未冻结的水分,由于这些都属于结合水,必须提供足够的能量,才能使其从吸附中解析出来,此阶段产品温度在最高允许温度下尽可能的提高。同时,为了使解析出来的水蒸气有足够的推动力逸出已干物料,必须使产品内外形成最大的压差,也就是说此干燥室必须是高真空^[11]。对于草莓、胡萝卜等果蔬物料,解析温度一般控制在30~50℃,过高的温度会破坏维生素、色素等热敏感物质,降低其食用价值,而且高温使物料崩解变性^[15-16]。对于经100℃温度热制的干切牛肉,蛋白已经变性,肉质、挥发性物质等成份不会因高温解

析而明显改变。但过高的解析温度($\geq 90^\circ\text{C}$)使制品明显变性,这是因为物料表面与中心温差过大,表层与内层热膨胀程度的不均衡所致^[11]。在预备试验中,确定80℃为最佳温度,即无明显变性产生,又能满足高速解析所需。

解析阶段因物料内不存在冻结冰,产品温度可迅速上升到最高许可温度,使结合水和吸附于干燥层中的水分子获得足够的能量,从吸附中解析出来。图3a~d为冷冻干燥中解析干燥过程物料温度 T_i 、物料表面温度 T_{is} 的模拟值与实测值的比较。可以看到,模拟值与实测值很接近,全程最大绝对误差小于5℃。说明本文建立的水分、温度模型可以较准确地模拟不同厚度的干切牛肉在解析干燥中参数变化的情况。

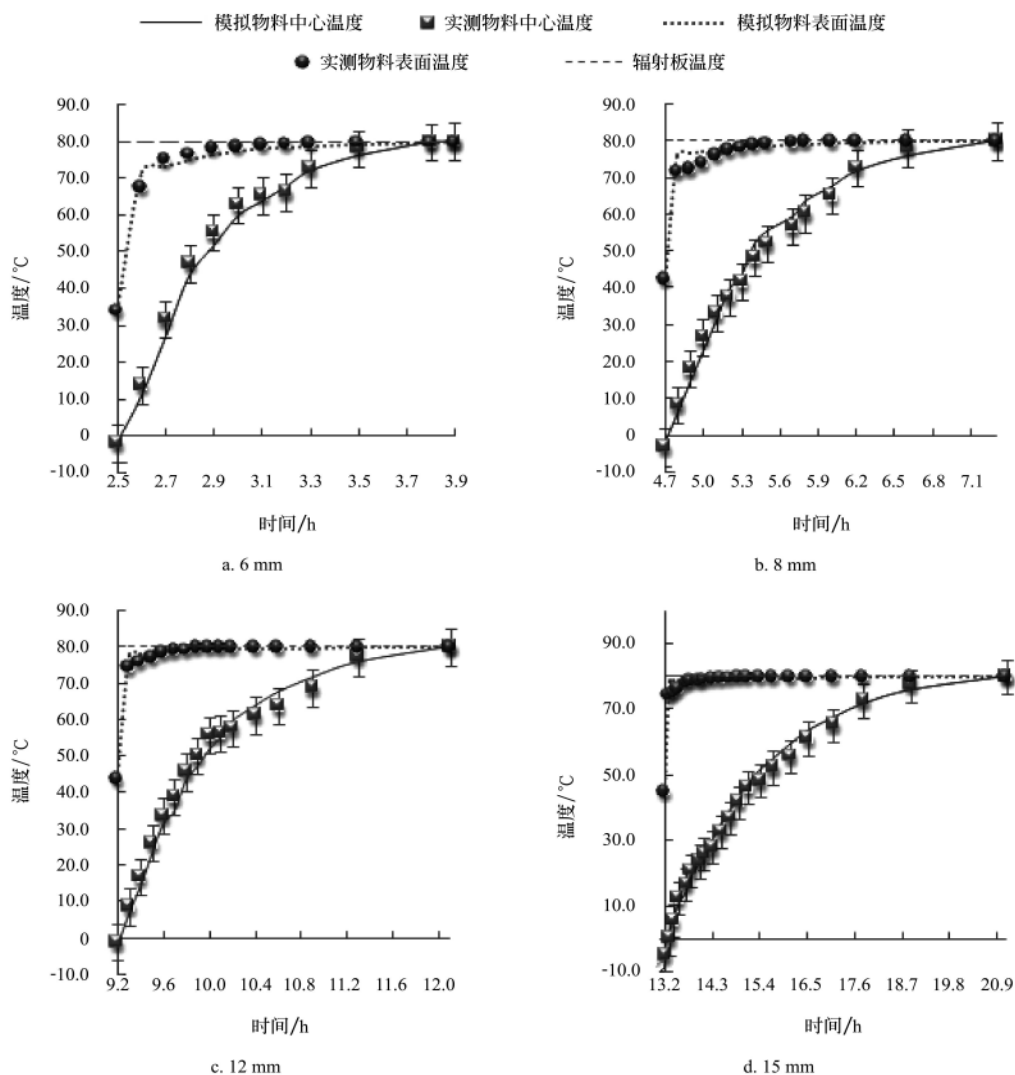


图3 厚度为6、8、12、15 mm的干切牛肉解析干燥中温度模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparisons between simulated and measured temperature of sample during desorption drying of cooked beef slice in thickness of 6, 8, 12 and 15 mm

2.2.2 厚度为7、9、10、11、13、14 mm干切牛肉解析过程含水率及温度变化预测

1) 解析干燥系数 f_d 与汽化潜热占总供热比例系数 J 随物料厚度的变化

在干燥室压强10 Pa、辐射板温度80℃的操作条件下

开展冷冻干燥试验,式(1)、(4)、(5)、(6)中解析干燥系数 f_d 与式(2)、(5)中汽化潜热占总供热比例系数 J 在物料厚度为6、8、12、15 mm时的试验拟合值分别为 7.50×10^{-4} 、 3.80×10^{-4} 、 1.86×10^{-4} 、 $1.26 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 与 4.48×10^{-3} 、 2.87×10^{-3} 、 2.06×10^{-3} 、 1.73×10^{-3} ,对其分别作图, f_d 与 J

随物料厚度的变化见图 4、5 所示。从图中看到，物料厚度为 7、9、10、11、13、14 mm 时的 f_d 与 J 值分别近似为 5.10×10^{-4} 、 3.10×10^{-4} 、 2.60×10^{-4} 、 2.18×10^{-4} 、 1.58×10^{-4} 、 $1.38 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 与 3.45×10^{-3} 、 2.61×10^{-3} 、 2.42×10^{-3} 、 2.22×10^{-3} 、 1.88×10^{-3} 、 1.77×10^{-3} 。

将以上数据代入式 (6) 与式 (4)、(5)，可计算出在干燥室压强 10 Pa、辐射板温度 80°C 的操作条件下物料厚度分别为 7、9、10、11、13、14 mm 时解析时间与物料表面温度、物料中心温度随含水率的变化值。

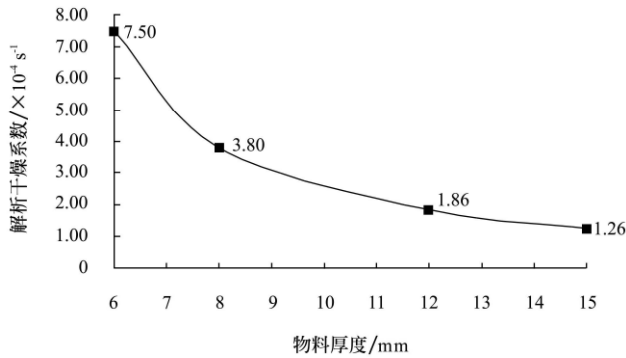


图 4 解析干燥系数 (f_d) 随物料厚度的变化

Fig.4 Changes of the coefficient of desorption drying (f_d) with different sample thickness

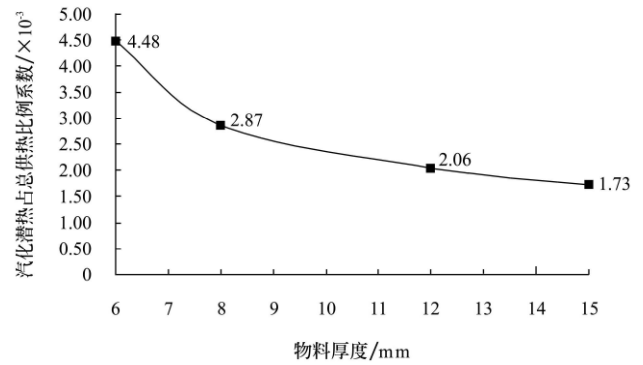


图 5 汽化潜热占总供热比例系数 (J) 随物料厚度的变化

Fig.5 Changes of the proportion coefficient of the evaporation caloric to the total quantity of heat with different sample thickness

2) 含水率变化预测的试验验证

图 6 为厚度 7、9、10、11、13、14 mm 的干切牛肉冷冻干燥中解析阶段预测与实测含水率比较。从图 6a~f 中可以看到，在预测含水率 $> 2.0\%$ 时，实测含水率与预测含水率的相对误差 $< 10\%$ ，在预测含水率 $< 2.0\%$ 时，模型出现偏差。实际上， $1.5\% \sim 1.7\%$ 的含水率已达到了冻干食品要求^[11]，模型偏差并不影响其实际工程意义。

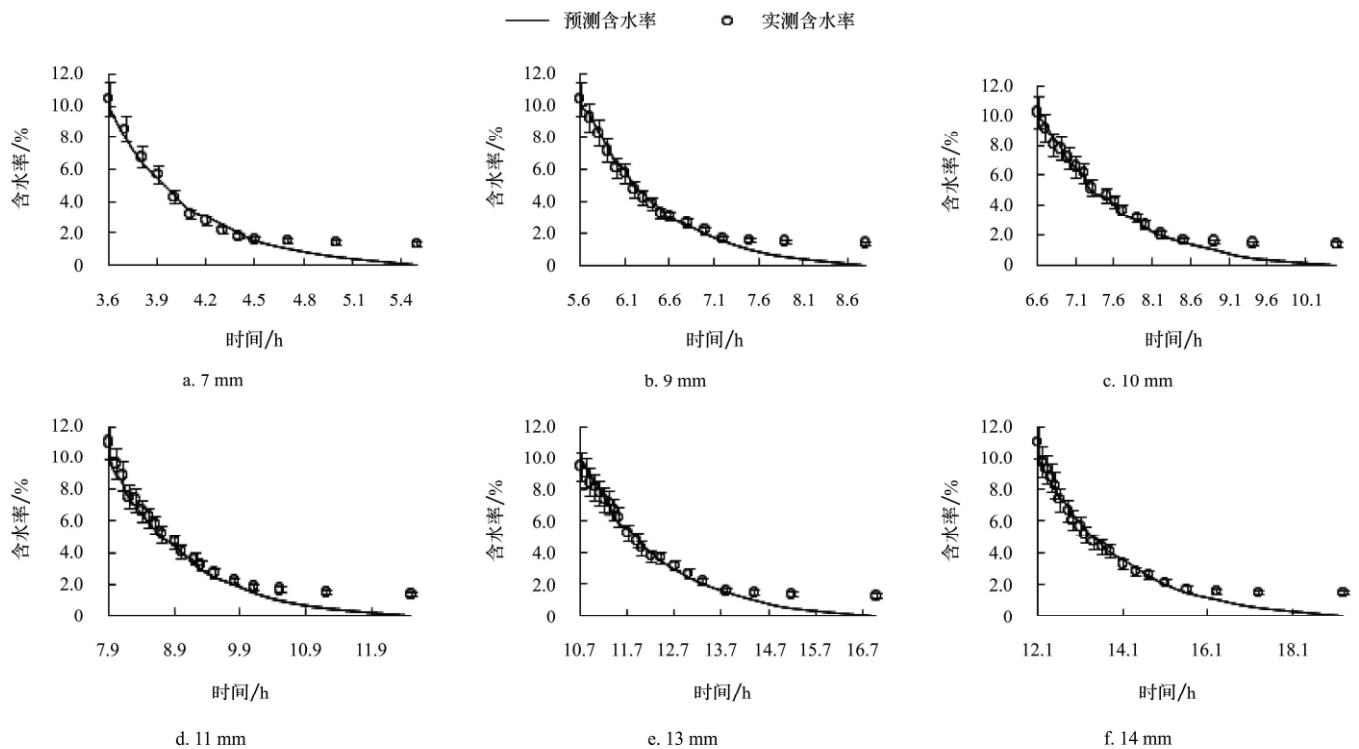


图 6 厚度 7、9、10、11、13、14 mm 干切牛肉解析干燥中含水率预测值与实测值比较

Fig.6 Comparisons between forecasted and measured moisture ratio of sample during desorption drying of cooked beef slice in thickness of 7, 9, 10, 11, 13 and 14 mm

3) 温度变化预测的试验验证

图 7a~f 为厚度 7、9、10、11、13、14 mm 干切牛肉冷冻干燥中解析干燥过程物料中心温度 T_i 、物料表面温度 T_{is} 的预测值与实测值的比较。从图中可以看到，预

测值与实测值很接近，全程最大绝对误差小于 5°C 。说明本文建立的水分、温度模型可以较准确地模拟、预测 6~15 mm 不同厚度的干切牛肉在解析干燥中温度变化的情况。

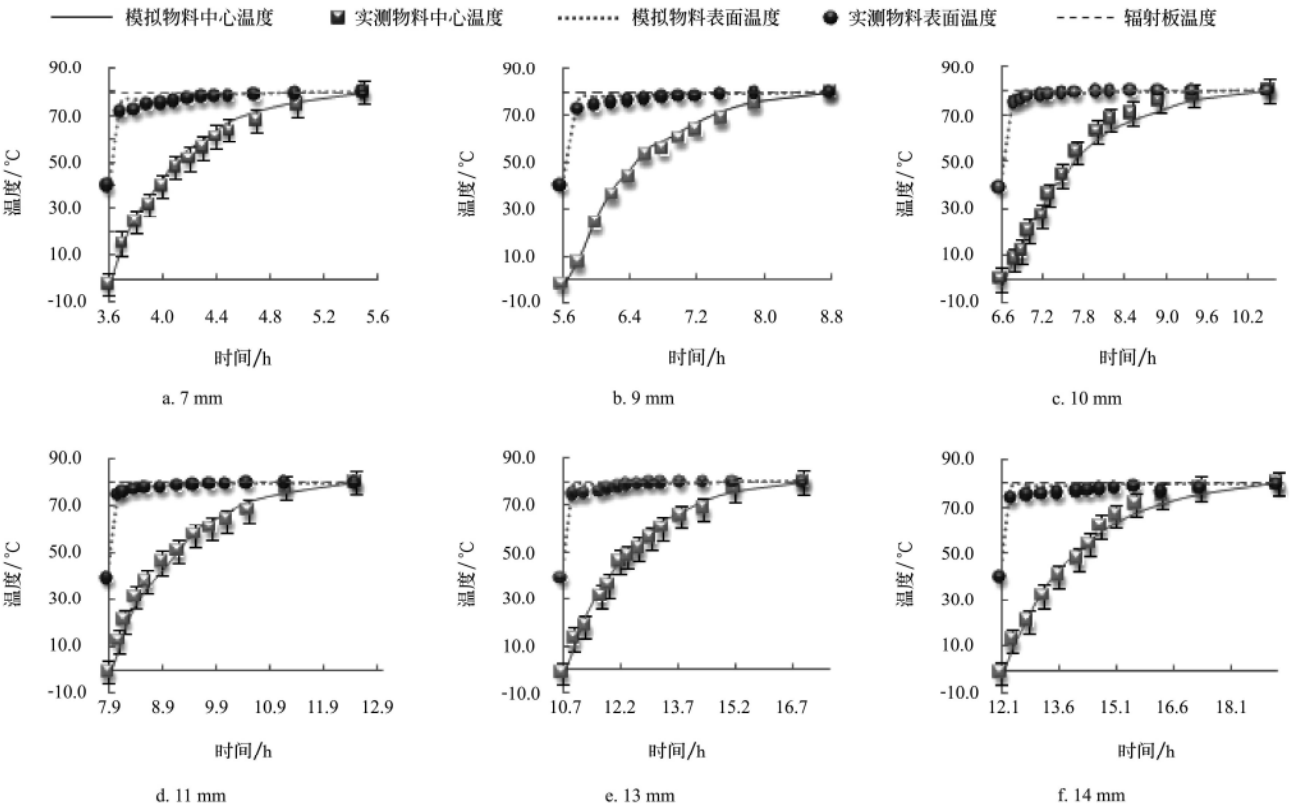


图 7 厚度 7、9、10、11、13、14 mm 干切牛肉解析干燥中温度预测值与实测值比较
Fig.7 Comparisons between forecasted and measured temperature of sample during desorption drying of cooked beef slice in thickness of 7, 9, 10, 11, 13 and 14 mm

2.2.3 干切牛肉冷冻干燥中解析干燥速率及耗能分析

在解析过程中，由冷阱、真空泵构成真空，冷阱吸附可冷凝的水蒸气，真空泵排除不可冷凝的空气等。冷阱、真空泵、加热耗能的比值大概为 2：1：1^[1]，所以缩短干燥时间，减少冷阱、真空泵工作耗能是降低冷冻干燥耗能的主要途径。从图 4、5 中看到，随着物料厚度增大，解析干燥系数 f_d 与汽化潜热占总供热比例系数 J 减小，即干燥速率下降，热效率降低。从降低解析干燥过程耗能来看，干燥速率越大，过程耗能愈低。在不同厚度物料冷冻干燥试验中，被干燥物料装填面积视为相同，物料密度、比热容等物性参数相同，不同厚度物料解析干燥时单位厚度（mm）物料的干燥比耗时 τ （ τ =干燥时间/物料厚度，h/mm）反映了采用何种厚度时单位厚度物料干燥耗时最短，即单位厚度物料干燥耗能最低^[12]。单位时间可干燥物料的厚度 η （ η =物料厚度/干燥时间，mm/h）可表示解析干燥效率^[12]。从表 1 中看到，单位厚度解析干燥耗时 τ 在物料厚度 6 mm 时最小，为 0.2 h/mm，随着物料厚度的增大， τ 增大。单位时间可干燥物料的厚度 η 在物料厚度 6 mm 时最大，为 4.5 mm/h，随着物料厚度的增大， η 减小。即采用 6 mm 物料进行干燥，生产单位产品耗能最低，且生产率最大。要说明的是单位厚度物料的干燥耗时 τ 、单位时间可干燥物料的厚度 η 仅作为衡量生产单位产品耗能及生产率水平，并不能表示解析干燥实际脱水状态，在解析干燥时，水分迁移并不像升华干燥时那样分层次进行^[15]。

表 1 物料厚度 6~15 mm 干切牛肉的解析干燥比耗时与解析干燥效率

Table 1 Comparative time-consuming and efficiency during desorption drying of cooked beef slice in thickness of 6~15 mm

物料厚度 /mm	解析干燥时间 /h	解析干燥比耗时 τ /h·mm ⁻¹	解析干燥效率 η /mm·h ⁻¹
6.0	1.3	0.2	4.5
7.0	2.0	0.3	3.6
8.0	2.6	0.3	3.0
9.0	3.2	0.4	2.8
10.0	3.8	0.4	2.6
11.0	4.6	0.4	2.4
12.0	5.4	0.4	2.2
13.0	6.3	0.5	2.1
14.0	7.2	0.5	1.9
15.0	7.9	0.5	1.9

3 结 论

本文建立的水分、温度随时间变化的模型能很好地模拟、预测厚度 6~15 mm 的干切牛肉在干燥室压强 10 Pa，加热板温度为 80℃的操作条件下的解析干燥过程。在预测含水率>2.0%时，实测与预测含水率的相对误差小于 10%，预测与实测温度绝对误差小于 5℃。随着物料厚度的增大，解析干燥系数与汽化潜热占总供热比例系数减小，即干燥速率下降，热效率降低，单位产品解析干燥耗能增大，干燥效率降低。采用 6 mm 牛肉切片厚度进行干燥，生产单位产品的耗能最低，生产率最大。

[参 考 文 献]

- [1] Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(4): 311—319.
- [2] 郭玉明, 姚智华, 崔清亮, 等. 真空冷冻干燥干燥过程参数对升华干燥能耗影响的组合试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 180—184.
Guo Yuming, Yao Zhihua, Cui Qingliang, et al. Combined experimental study on the effects of the operational parameters on energy consumption of sublimation-drying during vacuum freeze-drying[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(4): 180—184. (in Chinese with English abstract)
- [3] Boss E A, Filho R M, Coselli E. Freeze drying process: real time model and optimization[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2004, 43(12): 1475—1485.
- [4] King C J. *Freeze-Drying of Foods*[M]. Cleveland: CRC Press, 1971: 176—233.
- [5] Lichtfield R J, Liapis A I. An absorption-sublimation model for a freeze dryer[J]. *Chem Eng Sci*, 1979, 34(9): 1085—1090.
- [6] Sadikoglu H, Liapis A I. Mathematical modeling of the primary and secondary drying stages of bulk solution freeze-drying in trays: parameter estimation and model discrimination by comparison of theoretical results with experimental data[J]. *Drying Technology*, 1997, 15(3/4): 791—810.
- [7] 宫元娟, 王博, 林静, 等. 香菇冷冻干燥工艺参数的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 226—229.
Gong Yuanjuan, Wang Bo, Lin Jing, et al. Experimental study on technological parameters of freeze-drying of mushroom[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 226—229. (in Chinese with English abstract)
- [8] Luo Ruiming, Zhou Guanghong. Mathematical optimization for energy consumption during freeze-drying of cooked beef slice[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2008, 31(5): 583—601.
- [9] 罗瑞明, 周光宏, 乔晓玲. 干切牛肉冷冻干燥中高速率升华条件的动态研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2): 226—231.
Luo Ruiming, Zhou Guanghong, Qiao Xiaoling. Dynamic study on operation conditions for the higher sublimation rate during freezing drying of cooked beef slice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(2): 226—231. (in Chinese with English abstract)
- [10] Babić J, Cantalejo M J, Arroqui C. The effects of freeze-drying process parameters on Broiler chicken breast meat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(8): 1325—1334.
- [11] Georg W O. *Freeze-Drying*[M]. New York: Wiley-VCH, 1999: 58—109.
- [12] Perry H R, Green D, Maloney J O. *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 6th Edition[M]. New York: McGraw-Hill, 1992: 101—189.
- [13] Xiang J, Hey J M, Liedtke V, et al. Investigation of freeze-drying sublimation rates using a freeze-drying microbalance technique[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2004, 279(1/2): 95—105.
- [14] 周光宏. 畜产品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 32—93.
- [15] Ohkuma C, Kawai K, Viriyarattanasak C, et al. Glass transition properties of frozen and freeze-dried surimi products: effects of sugar and moisture on the glass transition temperature[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(2): 255—262.
- [16] 陈仪男. 龙眼真空冷冻干燥工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 244—248.
Chen Yinan. Optimization of vacuum freeze-drying technologies of longan fruits[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(9): 244—248. (in Chinese with English abstract)

Dynamic simulation and optimization for desorption drying process during freeze drying of cooked beef slice

Luo Ruiming^{1,2}, Dong Ping³, Li Yalei¹, Zhou Guanghong²

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

3. Ningxia College of Industry and Business, Yinchuan 750001, China)

Abstract: The dynamic change of moisture ratio and sample temperature during desorption drying in freeze drying of cooked beef slice were simulated, and the optimal operation conditions were determined through the analysis of the drying rate and energy consumption. Mathematical models were established for desorption time, sample center temperature and sample surface temperature while the moisture of sample was dehydrated during the desorption drying.

Moisture ratio was taken as independent variable. On the assumption that the moisture ratio descended from the terminal moisture ratio of sublimation drying (10.0%) to terminal moisture ratio of desorption drying (0), dynamic changes of the moisture ratio, surface and center temperatures of the samples with time during desorption drying in freeze drying experiments were simulated successfully. The experimental conditions were as follows: chamber pressure was 10 Pa, heating board temperature was 80°C, the sample thickness were 6, 8, 12 and 15 mm, respectively. Moreover, the moisture ratio, center and surface temperature changing and desorption periods of cooked beef slice in thickness of 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14 mm during desorption drying were forecasted. The validation experiments were conducted and the results showed that the comparative errors between forecasted and measured moisture ratio were lower than 10%, and absolute errors between forecasted and measured centre temperature of drying sample were lower than 5°C. It can be concluded that the predictive model can be applied to simulate and forecast the changes of operational parameters during desorption drying of cooked beef slice in thickness of 6-15 mm in freeze drying. Compared comparative time-consuming and efficiency of desorption drying, the highest productivity and the lowest energy consumption to produce a certain quantity of products are obtained when sample thickness is 6 mm.

Key words: freeze drying, desorption drying, optimization, beef slice, dynamic simulation