

干切牛肉升华干燥系数及升华预测模型拓展研究

Sublimation drying coefficient and expand study of sublimation forecasting model during freezing drying of cooked beef slice

孔令圆 李亚蕾 罗瑞明

KONG Ling-yuan LI Ya-lei LUO Rui-ming

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

摘要:采用单因素试验法,研究升华干燥系数同预冻方式、预冻终温、加热温度、物料厚度、干燥室压强之间的关系。以游离水升华完全为前提,在慢速预冻、预冻终温 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、加热温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,分别测定不同厚度和压强时物料的升华干燥系数,试验结果用软件 Origin 9.0 非线性曲面拟合得出升华干燥系数模型,并用 VB 语言建立升华干燥系数查询数据库,以拓展已建立的关于干切牛肉冷冻干燥高速率升华过程中制品含水率、物料中心温度和升华所需物料表面温度的动态预测模型的适用性。验证实验表明:拓展后的预测模型物料中心温度预测值和实测值绝对误差 $<5\text{ }^{\circ}\text{C}$,含水率预测值和实测值相对误差在 10% 以内,预测模型拓展后可用于预测干燥室压强 $20\sim 120\text{ Pa}$,物料厚度 $6\sim 30\text{ mm}$ 的干切牛肉在冷冻升华干燥过程中物料的中心温度和含水率。

关键词:干切牛肉;冷冻干燥;升华干燥系数;预测模型

Abstract: The relationship are discussed, between the sublimation drying coefficient and the mode of pre freezing, pre-freezing temperature, material thickness, heating temperature, pressure of drying chamber. Tests were performed using single factor test method. The sublimation drying coefficient of materials was measured with different thickness and pressure under heating temperature $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, using slow pre-freezing method in the temperature $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ on the premise that free water sublimation entirely. The results were fitting by software Origin 9.0 and established sublimation drying coefficient query database using VB language. Therefore, the sublimation drying coefficient database of cooked beef slice was set up on the heating temperature $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ and extended the drying dynamic prediction model of sublimation. The results of verification tests showed that the absolute error of material center temperature between predicted value and measured value less than $5\text{ }^{\circ}\text{C}$; The relative error of moisture ratio

between predicted value and measured value within 10% . The expanded prediction model could be used to predict the material center temperature and moisture content during drying freeze-dried cooked beef slice within chamber pressure $20\sim 120\text{ Pa}$ and material thickness $6\sim 30\text{ mm}$.

Keywords: cooked beef slice; freezing drying; sublimation drying coefficient; forecasting model

冷冻干燥是近年来被广泛应用的物料干燥方式,相比于其他干燥方法,冷冻干燥能防止高温和氧气对食品外观及成分的损害和氧化,最大限度地保持原料的食用品质^[1-3]。冻干干切牛肉复水后依然具有牛肉原有的风味和营养价值,在航空航天、攀岩、野战等特殊场合中有着重要应用。但高能耗使冷冻干燥的成本大大提高,阻碍了冷冻干燥的应用^[4]。研究^[5]发现升华干燥过程能耗占冷冻干燥总能耗的一半左右。

国外已有冷冻干燥节能和动态控制、预测方面的研究。Pisano 等^[6]针对流体提出两种算法的预测模型与 Antonello A 等^[7]对加热温度、气相流体力学及分布均匀性等参数建立的动态预测模型,这两个模型虽然可以预测冰晶的变化,但更多地是从流体力学的角度对冷冻干燥过程参数进行动态预测,不适用于片状冷冻品。而对于片状冷冻干燥过程质能关系的模拟,较典型的数学模型首推 Litchfield 等^[8-9]提出的升华一解析模型,该模型将冷冻干燥全过程的质能守恒关系较为形象准确地进行了模拟,但不能对制品的温度和含水率进行模拟。

中国关于冷冻干燥的研究主要集中于工艺优化方面^[10-13]。罗瑞明等^[2]曾建立了干切牛肉冷冻干燥高速率升华条件的动态预测模型,虽可以预测冷冻干燥过程中物料的中心温度和含水率,但仅适用于压力为 10 Pa ,物料厚度为 $6\sim 15\text{ mm}$ 的条件。本研究在前人研究的基础上,为适应大生产需求拓宽了试验压力控制范围和物料厚度,拟通过测定干切牛肉在压力 $20\sim 120\text{ Pa}$,物料厚度 $6\sim 30\text{ mm}$ 时的升华

基金项目:国家自然科学基金地区基金项目(编号:31160328)

作者简介:孔令圆,女,宁夏大学在读硕士研究生。

通讯作者:李亚蕾(1966-),女,宁夏大学农学院教授,硕士。

E-mail: yaleili.cn@163.com

收稿日期:2015-10-12

干燥系数,建立相应数据库,以期为拓展前期建立的动态预测模型的适用性提供参数源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选取肉膜包裹的腱子肉中筋较少的部分制作成的干切牛肉,剔除熟牛肉上附着的脂肪及结缔组织,切成长50 mm,宽40 mm,厚度6~30 mm的块状,试验前测得含水率为48.6%~53.4%,近似取50%。切好的牛肉摆放在托盘中备用,填充系数为 $\alpha=0.8$ 。

1.2 试验装置

真空冻干试验机:JDG-0.2改进型,中科院兰州近代物理研究所。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。

1.3 试验方法

1.3.1 升华干燥系数的测定方法 升华干燥系数也称干燥因素,是指没有被凝结的水分子立即从界面除去的概率,其值以同等升华条件下冰与物料在升华过程中平均失重比率的比值来确定。

(1) 预冻:开启试验机,启动机器控制软件,开启冷阱降低仓内温度,冷阱温度降至试验所需温度时,将样品和相应游离水质量的纯水放置搁板上进行预冻。当插入物料中心的温度探针输出值达到设定值,再冻结1 h结束预冻。

(2) 升华干燥:预冻结束后,将托盘移至加热板下方,开启真空泵,待干燥仓达到设定干燥室压强时,开启热板加热并计时,通过干燥仓玻璃观察冰升华情况,分别记录冰消失时间和物料温度到达熔点 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[14]的时间,升华干燥系数按式(1)计算:

$$f_s = \frac{t_s}{t_0} \quad (1)$$

式中:

f_s ——升华干燥系数;

t_s ——冰消失时间,s;

t_0 ——物料到达熔点时间,s。

1.3.2 升华干燥系数的影响因素 试验选取升华干燥系数为评价指标,研究预冻方式、预冻终温、加热温度、干燥室压强、物料厚度对升华干燥系数的影响。

(1) 预冻方式:在预冻终温 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$,干燥室压强20 Pa,上加热板温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,分别考察不同物料厚度(6,12,18,24,30 mm)和预冻方式(慢速预冻:于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与搁板一同缓慢降温至共晶点 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$,再快速降温至预冻终温;快速预冻: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下迅速降温至预冻终温)对升华干燥系数的影响。

(2) 预冻终温:物料的预冻终温影响物料中水分冻结率,应选取低于物料共晶点 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜^[15]。干切牛肉的共晶点为 $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此试验选取 $-22,-24,-26,-28,-30,-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为预冻终温考察点。在慢速预冻,干燥室压强20 Pa,上加热板温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,分别考察不同物料厚度(6,18,30 mm)和预冻终温对升华干燥系数的影响,并通过测定升华结束时干切牛肉剩余含水率分析其影响原因。

(3) 加热温度:在预冻终温 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,慢速预冻,干燥室压强20 Pa的条件下,分别考察不同物料厚度(6,18,30 mm)和上加热板温度(0,20,40,60,80 $^{\circ}\text{C}$)对升华干燥系数的影响,并通过干燥时间的对比分析其影响原因。

(4) 干燥室压强和物料厚度:在预冻终温 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,慢速预冻,上加热板温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,分别考察不同物料厚度(6,18,30 mm)和干燥室压强(20,40,60,80,100,120 Pa)对升华干燥系数的影响。

1.3.3 升华干燥系数数据库的建立 以前面的研究结果为基础,确定在固定试验条件:慢速预冻,预冻终温 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,上加热板温度(T_b) $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,分别测定干燥室压强(p_s)20~120 Pa(步长为10),物料厚度(L)6~30 mm(步长为2)时的升华干燥系数(f_s)值。将试验结果以矩阵工作表形式进行记录和保存,用软件Origin 9.0对试验结果进行非线性曲面拟合,得到 f_s 关于 p_s 和 L 的拟合曲面模型,拟合出的模型用VB语言编入软件。

1.3.4 模型验证实验实施方法

(1) 高速率升华条件动态模型^[2]:物料温度为 T_i 时冰晶以最大速率升华所允许的升华层厚度:

$$\delta_{is} = \frac{\lambda_d(T_0 - T_i) \sqrt{T_i}}{f_s K_0 (p_i - p_s) \Delta H_s} \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi MR}} \quad (3)$$

式中:

δ_{is} ——以最大速率升华所允许的升华层厚度,m;

λ_d ——已干层导热系数,W/(m·K);

T_0 ——物料熔点温度,K;

T_i ——物料中心温度,K;

p_i ——物料冻结层表面的饱和蒸汽压,Pa;

p_s ——干燥室压强,Pa;

K_0 ——简化系数;

M ——气体分子的分子量;

R ——通用气体常数,kJ/(mol·K);

ΔH_s ——冰的升华潜热,2 790 kJ/kg。

物料温度 T_i 时的已干层厚度:

$$\delta_d = \sum \delta_{is} \quad (4)$$

式中:

δ_d ——已干层厚度,m。

物料温度 T_i 时的升华时间:

$$t_i = \frac{\omega_i \sqrt{T_i}}{f_s K_0 (p_i - p_s)} \quad (5)$$

$$\omega_i = A \delta_i \mu \quad (6)$$

式中:

t_i ——升华时间,s;

f_s ——升华干燥系数;

ω_i ——升华水分质量,g;

A ——升华面积,m²;

μ ——游离水含率,%。

升华干燥时间:

$$t_d = \sum t_i \quad (7)$$

式中:

t_d —— 升华干燥时间, s。

升华所需物料表面温度:

$$T_{is} = T_0 + \frac{(\sum \delta_i)^2 \rho (c_{i-1} - c_i) \Delta H_s}{2\lambda_d \sum t_i} \quad (8)$$

$$c_i = c_0 (1 - d_i) \quad (9)$$

$$d_i = \frac{\sum \delta_i}{\delta_{total}} \quad (10)$$

式中:

T_{is} —— 升华所需物料表面温度, K;

ρ —— 已干层物料密度, 测定值 500 kg/m^3 ;

c_i —— 物料温度 T_i 时的含水率, %;

c_0 —— 物料初始含水率, %;

d_i —— 干燥率, %;

δ_{total} —— 物料总厚度, m。

(2) 速率升华条件动态模型修正: 将物料表面温度预测式(3)修正为:

$$T_{is} = T_0 + \frac{(\sum \delta_i)^2 \rho (c_0 - c_i) \Delta H_s}{2\lambda_d \sum t_i} \quad (11)$$

式中:

c_0 —— 物料初始含水率, % (测定为 50%);

含水率的表达:

$$c_i = c_f (1 - d_i) + c_c \quad (12)$$

式中:

c_f —— 初始游离含水率, % (测定为 40%);

c_c —— 初始结合水含水率, % (测定为 10%)。

(3) 验证实验: 分别选取模型适用范围 2 个端点和中间 3 点为试验对象逆向对应为实验条件, 即厚度 6, 18, 30 mm 的物料分别在干燥室压强 20, 70, 120 Pa 下进行 5 组平行试验, 取平均值同预测值进行比较。

由 1.3.3 建立的升华干燥系数数据库查得 6, 18, 30 mm 分别在干燥室压强 120, 70, 20 Pa 条件下的 f_s 值为 0.534 1, 0.514 0, 0.493 9。试验采用慢速预冻、预冻终温为 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$, 加热板温度采用变温控制, 以式(8)中 $\sum t_i$ 时所需的物料表面温度 T_{is} 为加热板温度控制值进行升华干燥试验, 记录物料温度和含水率的变化情况, 当物料温度上升至熔点 $-3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 物重约为初始重量的 60%, 认为游离水全部升华, 升华干燥结束。

1.4 物料含水率的测定

初始含水率、在线含水率由物料初始质量与测定时质量之差同初始质量的比值确定; 剩余含水率按式(13)计算:

$$w_x = \frac{m_x - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (13)$$

式中:

w_x —— 剩余含水率, %;

m_0 —— 样品初始质量, g;

m_x —— 升华干燥结束时样品质量, g;

m_1 —— 样品经 P_2O_5 脱水后质量, g。

2 结果与分析

2.1 预冻方式的影响

由图 1 可知, 慢速预冻物料升华干燥系数比快速预冻升华干燥系数大。这是因为快速预冻物料冰晶小, 升华后物料内部的空隙小, 不利于水蒸气的逸出, 使传质速率降低; 相比之下慢速预冻物料冰晶大, 升华后物料内部空隙大, 利于水蒸气的逸出从而提高了传质速率^[16], 后续试验全部采取慢速预冻方式进行。

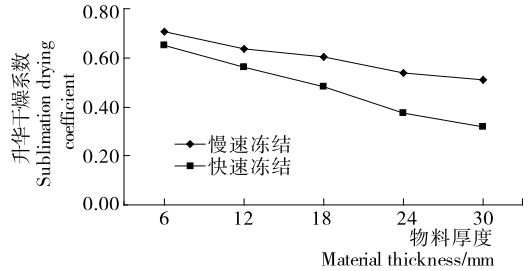


图 1 预冻方式对升华干燥系数的影响

Figure 1 The effect of pre-freezing mode on sublimation drying coefficient

2.2 预冻终温的影响

由图 2 可知, 升华干燥系数随着物料厚度的增加受预冻终温的影响增大; 而由图 3 可知, 当预冻终温较低时, 物料中心温度到达熔点 $-3 \text{ }^\circ\text{C}$, 但物料含水率仍大于 10%, 游离水并未完全除去。这是因为预冻终温过高时, 物料制品冻结不完全, 在升华过程中温度上升过快, 在游离水尚未升华完全时温度就上升到熔点。预冻温度较高不仅会使物料中的游离水升华不完全, 甚至使制品发生塌陷、鼓泡等现象, 严重影

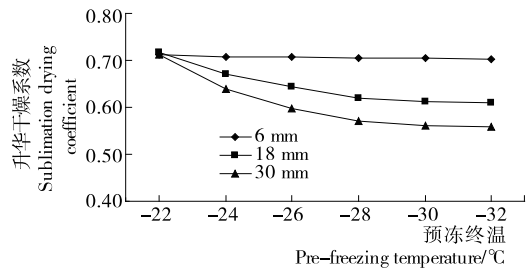


图 2 预冻终温对升华干燥系数的影响

Figure 2 The effect of pre-freezing temperature on sublimation drying coefficient

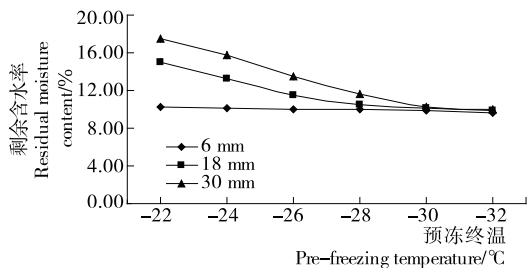


图 3 预冻终温对剩余含水率的影响

Figure 3 The effect of pre-freezing temperature on residual moisture content

响物料品质。从试验结果来看,只有物料预冻终温在-30℃以下,才能够保证所有试验厚度的物料都完全冻结,游离水升华完全,因此后续试验预冻终温均选取-30℃。

2.3 加热温度的影响

加热温度对升华干燥速率的影响较大。冻结层温度越高,冰的饱和蒸气压越高,传质驱动力越大,传质速率越快。干切牛肉冷冻干燥升华过程属于典型的传质控制过程,必须在尽量提高干燥速率的前提下,使升华界面温度接近共熔点但必须低于共熔点温度。测得升华干燥系数与加热温度的关系曲线见图4。

由图4可知,升华干燥系数随加热温度的提高而增大,物料越厚增大幅度越大。这是因为加热温度越低,物料中水分越难集聚到足够的升华能量,越难突破已干层的阻碍,升华干燥时间也越长,从而增大了升华干燥系数。由图5可知,物料的升华干燥时间受加热温度的影响较冰的更大,说明较高加热温度可以供给足够的热量,有利于物料中水蒸气突破已干层。

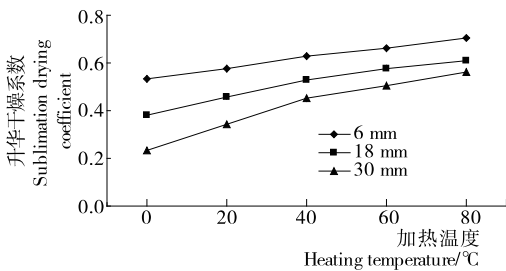


图4 加热温度对升华干燥系数的影响

Figure 4 The effect of heating temperature on sublimation drying coefficient

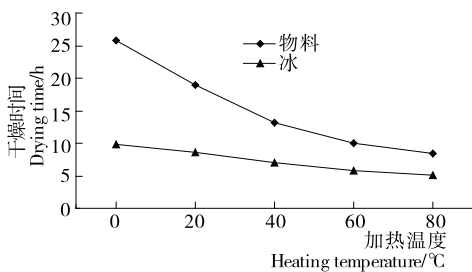


图5 18 mm厚物料及对应质量游离水的冰的升华时间

Figure 5 The sublimation drying time of 18 mm thick material and the ice of free water

2.4 压强和物料厚度的影响

由图6可知,在干燥室压强低于80 Pa时升华干燥系数受干燥室压强影响较大,高于80 Pa后,升华干燥系数受干燥室压强的影响逐渐减小;整体来说,升华干燥系数随干燥室压强的增大而减小。这是因为干燥室压强降低,可以增加水蒸气的有效扩散系数,加快了水蒸气的排出。

综合图1、2、4和6可以看出,物料越厚升华干燥系数越小。这是因为对于冰,忽略界面反射等影响因素,水分子升华后就可以被立即除去,而干切牛肉水分升华后,还要经过已干层,会减缓水分子的除去速率,且越厚的物料水分子升华

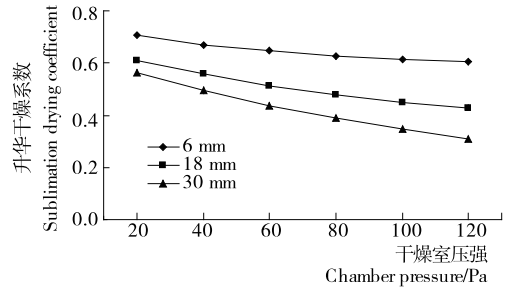


图6 物料厚度和压强对升华干燥系数的影响

Figure 6 The effect of material thickness and pressure on sublimation drying coefficient

所受到的阻碍越多,升华干燥系数也就越小。

2.5 升华干燥数据库的建立

用软件 Origin 9.0 对试验结果用非线性曲面拟合,得到升华干燥系数关于干燥室压强和物料厚度的拟合曲面模型:

$$f_s = 0.8094 - 0.01068L - 0.00194p_s + 1.7319 \times 10^{-4}L^2 + 9.1491 \times 10^{-6}p_s^2 - 6.1037 \times 10^{-5} \times L \times p_s \quad (14)$$

模型拟合情况方差分析表见表1。由表1可知,模型拟合较好,可用于预测物料厚度6~30 mm,干燥室压强20~120 Pa的干切牛肉的升华干燥系数。

表1 模型 f_s 方差分析表

Table 1 Analysis of variance of regression model f_s

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值
回归	6	39.033 3	6.505 5	765 463.695 4	0.000 1
剩余	137	0.001 2 8.498 8E-6			
未修正总量	143	39.034 4			
修正总量	142	1.218 4			
R^2		0.999 0			

将拟合模型用 VB 语言写入程序,通过输入干燥室压强和物料厚度,可查询对应的升华干燥系数数值,用于升华干燥的相关研究和预测。

2.6 模型拓展验证实验

试验得到的不同厚度、不同干燥室压强的干切牛肉升华干燥过程加热板温度控制值、物料中心温度预测值和实测值随时间的变化曲线见图7,物料含水率变化预测值和实测值的比较见图8。

由图7可知,料温的动态预测值和实测值变化趋势基本相同,且误差绝对值小于5℃。由图8可知,物料含水率的预测值和实测值相对误差较小(<10%),没有发生原来较厚物料预测值不准确的情况。但物料越厚,含水率和温度的预测值误差越大,这是因为预测模型忽略了横向传热,当物料足够厚时(如30 mm),横向传热会越来越明显,必要时需要加以考虑。可见,对不同厚度物料在不同干燥室压强条件下进行冷冻干燥试验需查找对应的升华干燥系数再进行预测,才能更准确地模拟物料温度和含水率的动态变化值,实现了模型的拓展,可为以后冷冻干燥工作提供参考。但要想更加精确地模拟物料温度和含水率的变化还需对模型进行进一步的优化,如将横向传热列入考虑范围。

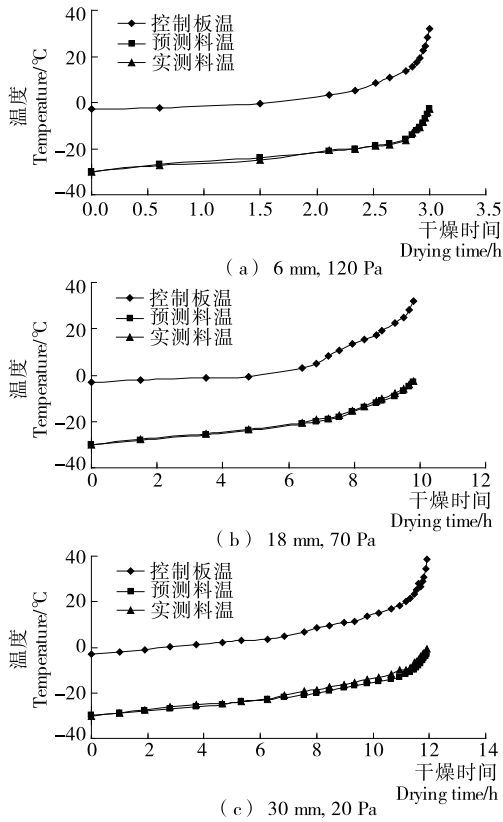


图 7 不同厚度和压强干切牛肉升华干燥温度控制值及物料中心温度预测和实测值

Figure 7 The temperature control values and comparison between prediction and the measured value of material center temperature

3 结论

(1) 对升华干燥系数的影响因素研究表明,预冻方式、预冻终温、加热板温度、物料厚度和干燥室压强都对升华干燥系数有显著影响。采用预冻终温 -30°C 慢速预冻方式对物料进行预冻是保证物料游离水升华完全的条件,上加热板温度 80°C 时不同压强和厚度物料的升华干燥系数最大(即干燥速率最大)。

(2) 在慢速预冻、预冻终温 -30°C 、上加热板温度 80°C 条件下,测定了升华干燥系数随干燥室压强和物料厚度的变化情况,试验结果用软件 Origin 9.0 进行非线性曲面拟合,拟合结果较好,可用于预测;用 VB 语言建立升华干燥系数数据库。

(3) 验证实验表明,通过查询建立的数据库,修正后的动态预测模型适用性得到较好地拓展,增大了模型的适用范围,但当物料厚度较大时预测值偏差较大应将横向传热列入考虑范围。

参考文献

[1] 崔宏博. 两种南美白对虾产品工艺和贮藏稳定性的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 3.
 [2] 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.

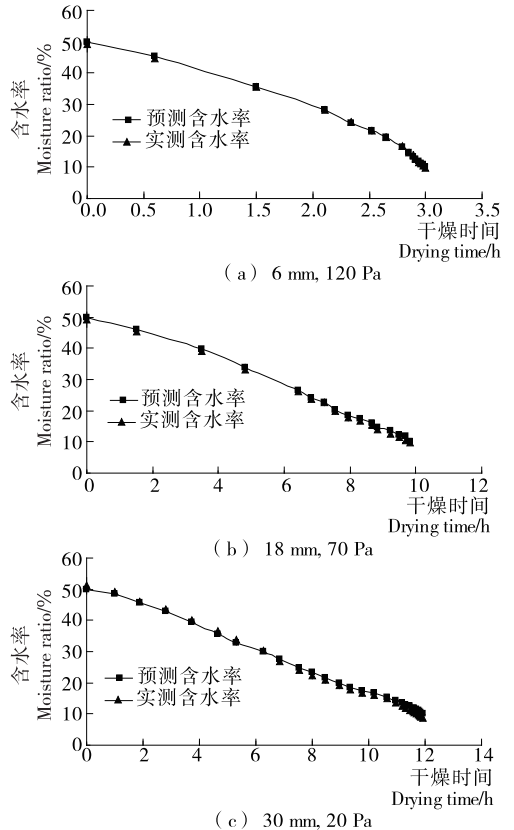


图 8 不同厚度和压强干切牛肉升华干燥中物料含水率预测值和实测值

Figure 8 The prediction value and measured value of material moisture ratio

[3] 朱红英, 初众, 吴桂苹, 等. 青胡椒真空冷冻干燥工艺研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 213-216.
 [4] 胡俊, 蒲彪, 何锦风. 真空冷冻干燥过程中节能措施探讨[J]. 食品与机械, 2007, 23(2): 122-125.
 [5] 罗瑞明, 周光宏. 牛肉冷冻干燥过程优化及最佳工艺条件的确立[J]. 食品科学, 2005, 26(11): 163-168.
 [6] Pisano R, Fissore D, Barresi A A. Freeze-drying cycle optimization using model predictive control techniques[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(12): 7 363-7 379.
 [7] Antonello A Barresi, Roberto Pisano, Valeria Rasetto, et al. Model-based monitoring and control of industrial freeze-drying processes: effect of batch nonuniformity[J]. Drying Technology, 2010, 28(5): 577-590.
 [8] Lichtfield R J, Liapis A I. An absorption - sublimation model for a freeze dryer[J]. Chem. Eng. Sci., 1979, 34(9): 1 085-1 090.
 [9] 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): 791-810.
 [10] 李敏, 关志强, 蒋小强, 等. 变温变压的优化组合对扇贝真空冷冻干燥过程影响的实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(4): 357-361.

(下转第 90 页)

表 1 减速箱规格型号

Table 1 Specifications and model of gearbox

减速箱形式	减速比	输出轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	允许力矩/ ($N \cdot m$)
4GN 25K	6	6~60	3.94

用高精度螺旋斜齿啮齿传动,提高了齿轮抗冲击能力和耐磨性能,增加啮合长度,有效降低传动噪音,提高工作稳定性。

2.4 链轮链条机构设计

链轮链条是本设计采用较多的机构^[6],取传递功率 $P=25\text{ W}$,主动链轮的最高转速 $n_1=60\text{ r/min}$,传动比 $i=1.36$,载荷平稳,两链轮中心距最高取 $a=400\text{ mm}$,中心距可调,工况为滴油供油,主动链轮孔径为 12 mm ,选择单排链条,则其额定功率按式(1)计算:

$$P_0 = \frac{K_A P}{K_2 K_L K_n} \quad (1)$$

式中:

P_0 ——单排链条额定功率, W;

P ——链轮链条传递功率, W;

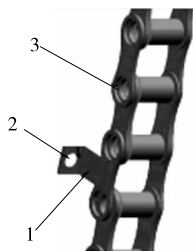
K_A ——工作情况系数,取 1.0;

K_2 ——小链轮齿数系数,取 0.74;

K_L ——链长系数,取 0.90;

K_n ——多排链排数系数,取 1.0。

由式(1)求得, $P_0 \approx 37.5\text{ W}$;根据 $n_1=60\text{ r/min}$,考虑到整体结构的尺寸以及市场供应情况,选取 TG127 链轮,节距 12.7 mm 。链条节数与链条长度可根据需要截取,传动松紧程度可用张紧轮调节。设计中将多节链条上留有供与食物抓手固定的连接片和安装孔(见图 4),这样可以简化整体结构。



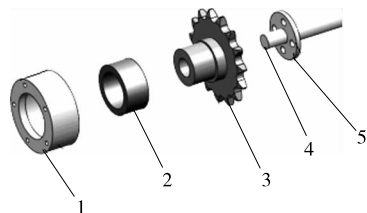
1. 抓手连接片 2. 抓手安装孔 3. 链条

图 4 食物抓手连接片

Figure 4 Connector of claw structure for catching fried food

2.5 主动轴联轴器设计

为了使主动轴结构简单,方便制造,设计主动轴结构见图 5^[7]。主动轴与连接端盖通过焊接连接,连接端盖通过 4 个螺钉与主动轴链轮连接,将从减速箱传递的转动传到主动轴链轮上。考虑到整体机构都是坐落在两边的侧板上,为了整体结构的紧凑以及传动的平稳性要求,主运动的传递支承采用卸荷机构设计。轴承套固定在支撑板上,滑动轴承与轴承套采用过盈配合,主动轴与链轮通过端盖连接,链轮轴颈与滑动轴承采用间隙配合,链轮轴颈尺寸为 24.3 mm ,滑



1. 轴承套 2. 滑动轴承 3. 链轮 4. 主动轴 5. 端盖

图 5 主动轴联轴器

Figure 5 Driving shaft coupler

动轴承基本额定负荷为 $17\ 900\text{ N}$ 。

3 结论

由于多功能自动油炸机是以现有市场上销售的电炸锅为基础,辅以可靠控制的温控器,可以有效节省人力;采用油水分离设计技术使油温稳定,无变色变焦现象,可以提高炸制食物的质量,降低油品消耗,增加油品的反复使用次数;机械抓手易于更换,可以炸制诸如油条、麻花、麻团、馓子、油果等大小形状各异的食物,设备利用率高;各零部件取材容易,加工难度小,一般小型企业即可生产,一部分外购标准件采购也很方便,具有很好的开发前景。

参考文献

- [1] 孙大鹏. 一种连续油炸机: 中国, ZL 201210395623.4 [P]. 2012-10-17.
- [2] 郑立平. 油炸机: 中国, ZL 201230519136.5 [P]. 2012-10-29.
- [3] 蒋乐书. 煎炸油循环净化食品油炸机[J]. 食品与机械, 2005, 21(2): 49-50.
- [4] 秦曾煌. 电工学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 220-222.
- [5] 安进. 油水混合式油炸机结构的优化设计[J]. 食品与机械, 2008, 24(6): 96-97.
- [6] 范顺成. 机械设计基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 111-122.
- [7] 成大先. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2010: 99-102.

(上接第 15 页)

- [11] 郭向明, 崔清亮, 李斐, 等. 基于响应面的黄花菜冷冻干燥工艺参数优化[J]. 农机化研究, 2013(12): 120-124.
- [12] 张光杰, 付亮, 李园园. 二次回归正交设计优化鸡蛋壳制备柠檬酸——苹果酸钙工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2014(1): 111-115.
- [13] 姚智华, 张华, 易克传. 胡萝卜冷冻干燥能耗和生产率的多目标优化[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 213-215.
- [14] 罗瑞明. 畜产品冷冻干燥工艺优化及产品复水性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007: 51-80.
- [15] 宋凯, 徐仰丽, 郭远明, 等. 真空冷冻干燥技术在食品加工应用中的关键问题[J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 232-235.
- [16] 刘利娟, 郭玉明. 关于农产品冷冻干燥加工能耗影响因素的研究[J]. 金陵科技学院学报, 2009, 25(2): 10-14.