

# 牛肉冷冻干燥过程优化及最佳工艺条件的确立

罗瑞明<sup>1,2</sup>, 周光宏<sup>1</sup>, 白杰<sup>1,2</sup>, 刘姗姗<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095; 2. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 对熟牛肉进行冷冻干燥实验, 确定了熟牛肉片冻干工艺条件。计算了冻结终点温度、冻结时间, 建立了熟牛肉片冻干的传热传质模型, 由模型计算出理论干燥时间, 并与实验值进行了比较。探讨了原料、预冻速率、干燥室压强、升华温度、捕水器温度、压强对制品品质及干燥时间的影响。熟牛肉的冻干工艺条件为: 预冻时间 3h, 预冻终点温度  $-24^{\circ}\text{C}$ , 干燥室真空度 60Pa, 捕水器压强 45Pa, 温度  $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$ , 干燥时间 4h。

**关键词:** 牛肉; 冷冻干燥; 过程优化; 工艺

## Establishing of Optimal Technological Conditions for Freeze-drying Process of Beef

LUO Rui-ming<sup>1,2</sup>, ZHOU Guang-hong<sup>1</sup>, BAI Jie<sup>1,2</sup>, LIU Shan-shan<sup>2</sup>

(1. Food Science and Technology College of Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2. Agricultural College of Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** The freeze-drying process of cooked beef was studied in the paper, and the freeze-drying technology for cooked beef slice was obtained. The freezing time and terminal freezing temperature were calculated. The model of heat-transfer and mass-transfer was established, and the academic drying time was calculated through the model. The comparison between calculation and experiment values was discussed. The effects of the raw materials, freezing rate, pressure of drying room, sublimation temperature, the temperature and pressure of catching water machine on the quality of the products were discussed. The optimum freeze-drying technology of cooked beef was: freeze time 3h, terminal freezing temperature  $-24^{\circ}\text{C}$ , pressure of drying room 60 Pa, temperature and pressure of catching water machines  $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$  and 45Pa, respectively and freeze-drying time 4h.

**Key words:** beef; freeze-drying optimization of process; technology

中图分类号 TS275

文献标识码 A

文章编号 1002-6630(2005)11-0163-06

食品冷冻干燥法是一种特殊形式的食品真空干燥法。冷冻干燥还有多种其他的叫法, 如真空冷冻干燥、升华干燥、冷冻升华干燥等, 它是先将物料冻结到冰点以下使水分变成固态的冰, 然后在较高的真空度下使冰不经液态直接转化为水蒸气而除去, 从而获得干燥的制品。水的相平衡关系是研究和分析含水食品冷冻干燥的基础, 从水的相平衡图及三相点示意图上可以得知, 当压力大于 610.5Pa 时, 从固态冰开始等压加热升温的结果必然要经过液态才能达到气态, 而当冰周围的蒸汽压低于 610.5Pa 时, 固态冰加热升温可以直接升华为水蒸气, 这就是冷冻干燥的基本原理。冻干食品具有以下特点<sup>[1]</sup>: a. 冻干食品由于脱水比较彻底, 因而不加任

何防腐剂也可安全地贮存较长时间, 并且运输方便。b. 由于物料在升华脱水前先经冻结形成稳定的固体骨架, 所以水分升华汽化后, 固体骨架基本维持不变, 故干制品不失原有的固体结构, 保持新鲜食品的形态, 且多孔结构的制品具有理想的速溶性和快速复水性。c. 由于物料中水分在预冻以后以冰晶的形态存在, 原来溶于水中的无机盐之类的溶解物质被均匀地分配在物料之中, 冰晶升华时, 溶于水中的溶解物质就地析出, 避免了一般干燥方法中因物料内部水分向表面迁移, 所携带的无机盐在表面析出而造成表面硬化的现象, 因此, 冻干食品无表面硬化的问题。d. 冷冻干燥在低温、高真空度下进行, 避免了加工时食品中的热敏性成分被破

收稿日期: 2004-10-14

作者简介: 罗瑞明(1964-), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向为食品科学。

坏、易氧化成分被氧化的现象,所以冻干食品最大限度的保持了食品的营养成分及生理活性成分。e. 由于低温下各种化学反应的速率较低,故冷冻干燥时由于色素分解造成的褪色、酶和氨基酸所引起的褐变现象几乎不发生,所以冻干食品不需添加任何色素其色泽依然鲜艳如初、风味不变。f. 冻干食品容易吸湿潮解,故对包装材料要求高;此外,多孔疏松结构使得冻干食品在输送、销售途中极易破碎、粉末化,因此,应采用具有一定保护作用的包装材料或包装形式。g. 冻干食品的生产成本较高,以高耗能为代价,限制了其发展。本课题通过对生产过程的数学优化降低了生产过程的耗能。

冻干熟牛肉目前多用于登山、航海、探险、军队野战等特殊场合中,而且它也是宇航员在太空中的食品。本文采用五香牛肉冻干,而五香牛肉中所含多种营养成分<sup>[2]</sup>,其食部100g含水分51.8g、蛋白质31.1g、脂肪8.0g、碳水化合物6.5g、热量929kJ、钾104mg、钙17mg、铁5.0mg、锌9.67mg、VE总量1.41mg、核黄素0.10mg,冻干五香牛肉与其它冻干食品一样营养损失少,保持原有牛肉的风味和营养价值,并且其富含蛋白质及一些微量元素是很好的方便食品。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 实验材料

采用半膜性肌、背部长肌等部位制作的五香牛肉。

#### 1.1.2 试验仪器与设备

ZLG—0.3型冻干试验机 宁夏永康技术工程有限公司制造,天平,奥柯玛牌电冰柜。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 工艺流程

五香牛肉筛选整理→切片→预冻→升华干燥→解吸干燥→包装→成品

#### 1.2.2 操作说明

a. 筛选半膜性肌、背部最长肌等部位制作的五香牛肉,剔除熟牛肉上附着的脂肪及结缔组织,切片厚度5mm,长宽约为3.5~2cm。将切好的物料摆放于干燥托盘中,并将探头放于物料中心。

b. 打开压缩机对干燥仓搁板制冷,约10min后板温达-15℃,此时将料盘放入干燥仓置于搁板上预冷,约1.5h后料温降到-20℃左右,继续冷冻0.5h后结束冻结。

c. 此时开真空泵对捕水器和干燥仓抽空。试验中先对捕水器抽空,这样就可以维持干燥室真空度比捕水器真空度略低。通电对搁板加热,设置搁板极限温度为55℃,捕水器温度在-40~-50℃。

d. 当仪表显示料温接近加热搁板设定极限温度时,可认为到达干燥终点。打开干燥仓排空阀门放空,取出牛肉片用包装袋封口包装。

### 1.2.3 检测方法

a. 共晶点检测方法<sup>[3]</sup> 电阻法 b. 共熔点检测方法<sup>[3]</sup> 电阻法; c. 制品水分测定方法<sup>[4]</sup> 卡尔费休法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 冻结终点温度计算与冻结时间确定

#### 2.1.1 冻结终点温度计算

由水分冻结率公式<sup>[5]</sup>

$$1 - \frac{t_f}{t} = \frac{\omega}{1 + \frac{a}{b \lg[t + (1 - t_f)]}} \quad \text{式(1)}$$

式(1)中 $\omega$ -温度 $t$ 时的食品水分冻结率(%); $t$ -食品的温度(℃); $t_f$ -食品开始冻结时的温度(℃); $t$ 与 $t_f$ 都取绝对值,两式中前者是一种很粗略的估算办法,后者是根据实验数据得出的经验公式,现以后者计算,其中 $a$ 、 $b$ 是常数值,取决于食品物料,对于肉类其分别为1.105和0.31<sup>[6]</sup>,牛肉的冻结点温度为-1.7℃,当水分冻结率达到90%时即可结束冻结,所以根据水分冻结率公式计算出冻结的终点温度,即得式(2)

$$0.90 = \frac{1.105}{1 + \frac{0.31}{\lg t (1 - 1.7)}} \quad \text{式(2)}$$

代入计算, $t=23.6$ ,即冻结的终点温度为-23.6℃,可近似为-24℃。

#### 2.1.2 冻结时间确定

根据Plank式修正后的公式(3)

$$t = \frac{C_{\mu} - 1}{r_f} \left[ \frac{C_f}{f} - 2 \right] + \frac{0.008}{f} \left[ \frac{P X}{k} - \frac{R X^2}{k} \right] \quad \text{式(3)}$$

式中, $C_{\mu}$ -未冻结食品的比热容,kJ/kg℃; $\theta_f$ -食品的冻结温度,℃; $\theta_1$ -食品的初始温度,℃; $\theta_2$ -食品冻结终了温度,℃; $\omega$ -水分含量; $r_f$ -冻结潜热,kJ/kg; $C_f$ -冻结食品的比热容,kJ/kg℃; $\rho$ -食品的密度,kg/m<sup>3</sup>; $\theta$ -冷却介质温度,℃; $P$ 和 $R$ -食品形状系数; $X$ -对平板状食品表示厚度、对圆柱或球状食品表示直径,m; $k$ -食品表面的传热系数,W/m<sup>2</sup>℃; $\lambda$ -食品的热导率,W/m℃<sup>[5]</sup>。

由五香牛肉成分知 $\omega=0.518$ ,冻干机性能参数知 $\theta=-40$ ℃,瘦牛肉的物理及热物性为 $C_{\mu}=3.5$ kJ/kg℃, $\theta_1=+10$ ℃, $\theta_f=-1.7$ ℃, $r_f=332.7$ kJ/kg, $C_f=2.05$ kJ/kg℃, $\theta_2=-24$ ℃, $\rho=1050$ kg/m<sup>3</sup>, $k=30$ W/m<sup>2</sup>℃, $\lambda=1.1$ W/m℃<sup>[7]</sup>。由牛肉块的尺寸,长为20mm宽为5mm,算出块状系数 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 即 $\beta_1=20\text{mm}/5\text{mm}=4$ , $\beta_2=35\text{mm}/5\text{mm}=7$ ,根据 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 从块状食品的 $P-R$ 图<sup>[5]</sup>中查得 $P=0.36$ , $R=0.0985$ ,代入公式,求得 $t=11325.477\text{s}=3.15\text{h}$ 。

通过表 1 所列五批试验, 预冻时间确定为 3 h。

表 1 预冻时间对制品片形的影响  
Table 1 The effect of freezing time on product shape

	第一批	第二批	第三批	第四批	第五批
预冻时间(h)	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
变形程度	变形	轻度变形	不变形	不变形	不变形

实验中料温、板温如表 2 所示:

表 2 实验中料温、板温  
Table 2 The temperatures of materials and shelf board

时间(h)	料温(°C)	板温(°C)
0	开始进料	-15
1	-16.3	-30.5
2	-27	-38.5
3	-23.6	-15

## 2.2 牛肉冻干传热传质模型的建立及干燥时间的确定

### 2.2.1 牛肉冻干传热传质模型的建立<sup>[8]</sup>

ZLG—0.3 型冻干试验机的结构为上层物料只有上层搁板对其加热, 而下层物料除吸收下层搁板的热量外, 上层搁板的热量也对其辐射, 所以将加热方式认为是混合加热, 牛肉的传热方式也认为是辐射 + 传导方式, 其模型如图 3 所示。

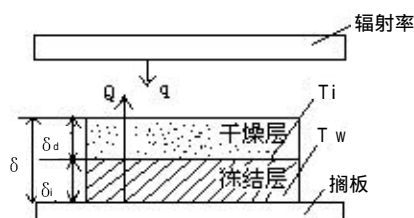


图 1 牛肉传热传质物理模型  
Fig.1 The model of beef heat an mass transfer

冻干和一般干燥过程一样, 是传热和传质同时进行, 存在着传热和传质的推动力及阻力。本试验牛肉干燥过程中, 冰晶升华及解吸热几乎全部来自于加热搁板, 其热量是由冻结层向升华界面传递, 而水分由升华界面通过已干层向干燥室空间逸出, 然后进入捕水器冷凝去除。忽略上层搁板辐射热, 忽略端效应, 在这种情况下, 任何时刻的热通量可表示为:

$$Q = \frac{i}{\delta_i} A (T_w - T_i) \quad \text{式(7)}$$

式中  $Q$ —热通量,  $W/m^2$ ;  $\delta_i$ —冻结层厚度,  $m$ ;  $\lambda_i$ —冻结层导热系数,  $W/m \cdot ^\circ C$ ;  $T_w$ —冻结层底面温度,  $^\circ C$ ;  $T_i$ —升华界面温度,  $^\circ C$ ;  $A$ —升华面积,  $m^2$ 。

水分升华速率可表示为:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{k_d}{\delta_d} \cdot A \cdot (P_i - P_f) = A \cdot \rho_a \cdot (C_0 - C_f) \frac{d\delta_d}{dt} \quad \text{式(8)}$$

式中  $\delta_d$ —已干层厚度,  $m$ ;  $C_0$ —物料初始湿度, %;  $C_f$ —干物料湿度, %;  $P_i$ —冻结层蒸汽压,  $Pa$ ;  $P_f$ —干燥层蒸汽压,  $Pa$ ;  $\rho_a$ —已干层密度,  $kg/m^3$ ;  $k_d$ —已干层水汽透过系数。

由式(8)得:

$$\delta_d \frac{d\delta_d}{dt} = \frac{k_d P_i}{a C_0} \frac{P_f}{C_f} \quad \text{式(9)}$$

式中  $L_s$ —冰升华潜热,  $J/kg$ 。

假设传热全部用于升华, 则有

$$Q = \frac{dw}{dt} L_s \quad \text{式(10)}$$

将式(8)代入式(10)得

$$Q = \frac{k_d}{d} A \frac{P_i}{P_f} \frac{P_f}{L_s} \quad \text{式(11)}$$

由式(7)和式(11)联解得

$$\frac{P_i}{P_f} \frac{P_f}{L_s} \frac{T_w - T_i}{k_d L_s} \frac{d\delta_d}{dt} = \frac{dw}{dt} \quad \text{式(12)}$$

将式(12)代入式(9)得

$$\delta_d \frac{d\delta_d}{dt} = \frac{T_w - T_i}{a C_0} \frac{P_i}{C_f} \frac{dw}{L_s} \quad \text{式(13)}$$

因为代入上式, 则有

$$\delta_d \frac{d\delta_d}{dt} = \frac{T_w - T_i}{a C_0} \frac{P_i}{C_f} \frac{dw}{L_s} \quad \text{式(14)}$$

式中  $\delta$ —物料总厚度,  $m$ 。

其中  $T_i$  是  $\delta_i$  的函数,  $T_i = f(\delta_i)$ , 边界条件为:

$t=0, \delta_i = \delta, T_i = T_{i0}$ ;

$t=t_d, \delta_i = 0, T_i = T_w$

式中  $T_{i0}$ —物料预冻终点温度,  $^\circ C$ 。

函数式应由大量实验得出。根据边界条件, 可近似定义

$$T_i = \frac{1}{2} (T_w + T_{i0})$$

将上式代入式(14)并积分

$$\int_0^{t_d} \delta_d \frac{d\delta_d}{dt} dt = \int_0^{t_d} \frac{T_w - T_i}{a C_0} \frac{P_i}{C_f} \frac{dw}{L_s} dt \quad \text{式(15)}$$

整理得

$$t_d \frac{L_s^2}{2} \frac{a C_0}{T_w - T_i} \frac{C_r}{T_i} = \frac{L_s^2}{i} \frac{a C_0}{T_w - T_{i0}} \frac{C_r}{T_{i0}} \quad \text{式(16)}$$

从式(16)可见, 干燥时间的长短取决于料层的厚度、已干层的密度、湿物料与干物料湿度差、冰的升华潜热、冻结层的导热系数以及冻结层底面与升华界面的温差, 这与实际情况是相符合的。

### 2.2.2 牛肉冻干时间的确定

由文献[7]得,  $L_s=2.8 \times 10^6 J/kg$ ,  $\delta=0.005m$ ,  $\rho_a=300kg/m^3$ ,  $C_0=51.8\%$ ,  $C_f=2\%$ ,  $\lambda_i=0.006W/m \cdot ^\circ C$ ,  $T_w=-5^\circ C$ ,  $T_{i0}=-24^\circ C$ , 代入式(16)计算得出  $t_d$  约为 3.5h。原工艺规程中干燥时间为 5h, 通过如表 2 所示五批试验, 干燥时间确定为 4h, 测得制品水分为 3.80。

实验中干燥仓、捕水器温度、压强如表 3 所示: 料温、板温随时间的变化如图 2 所示。

表3 干燥时间对制品水分的影响

Table 3 The effect of drying time on products

	第一批	第二批	第三批	第四批	第五批
干燥时间(h)	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
制品水分(%)	7.85	5.60	3.85	3.80	3.80

表4 牛肉冻干中干燥仓、捕水器温度、压强变化情况

Table 4 The change of temperature and pressure in drying room and catching water machine in process of beef freeze-drying

时间(h)	料温(°C)	板温(°C)	捕水器温度(°C)	捕水器压强(Pa)	干燥室压强(Pa)
0	开始进料	-15			
1	-16.3	-30.5			
2	-27	-38.5			
3	-23.6	-15	-41	45	60
4	-17	-10.2	-42	46	56
5	-6	-1	-42	44	49
6	-1	20	-42	46	50
7	21	35	-42	49	56
8	40	46	-42	55	58
9	50	51	-42	58	60
10	54	55	-42	58	60

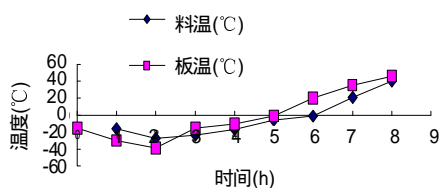


图4 冻干曲线

Fig.4 Freeze drying curve

在这里需注明本模型计算忽略了水汽由干燥室至捕水器的传质阻力、物料的端效应,取物料预冻终点温度为理论计算值,并且假设搁板提供的热量全部用于升华,这在实际操作中事实上是不可能的<sup>[9]</sup>。因此,理论计算值比实际干燥时间短0.5h。

## 2.3 影响冻干速率的因素

### 2.3.1 干燥室压强对冻干速率的影响

升华干燥时,原料为冻结的物料,当冰开始升华时,升华界面首先是在冻结物的表面,随后向物料内部推进,形成一个多孔的干燥壳层。而内部冰升华所需要的潜热有时需要通过干燥层向内传递,有时热量从升华界面的背面经过冻结层向升华界面传递。冰升华的蒸气都是通过干燥层向外传递的,即传热、传质同时进行,并决定着干物料的干燥速率。干燥室内压力高低影响到传热和传质的速率,就传质而言,压力越低越好,而对于传热,压力越高越好<sup>[9]</sup>。

传热过程中已干燥层中的传热为控制传热速率阶段,其传热速率 $Q$ 可表示为式(4)<sup>[10]</sup>:

$$Q = h(T_e - T_s) \left| \frac{1}{d} \left( T_e - T_f \right) \right| \quad \text{式(4)}$$

式中 $Q$ -热流密度,  $W/m^2$ ;  $h$ -已干层表面传热系数,  $W/m^2K$ ;  $T_e$ -外部气体温度,  $K$ ;  $T_s$ -已干层表面温度,  $K$ ;  $\lambda$ -干燥层导热系数,  $W/MK$ ;  $\Delta d$ -已干层厚度,  $m$ ;  $T_f$ -升华界面温度,  $K$ 。其中已干层的导热系数取决于干物料的性质、操作压力、气体成分等。传质速率受两个阶段的速率影响即纯冰的升华速率和水蒸气的传输速率,纯冰的升华速率 $G_s$ ,  $kg/(sm^2)$ 可用Kundsen方程表示式(5)<sup>[10]</sup>:

$$G_s = P_s \left| \frac{M}{2RT} \right|^{1/2} \quad \text{式(5)}$$

式中,  $P_s$ -冰升华界面温度 $T$ 时的饱和蒸气压,  $kPa$ ;  $M$ -水蒸气的摩尔质量,  $kg \cdot kmol$ ;  $R$ -气体常数,  $kJ \cdot kmol \cdot K$ ;  $T$ -冰的绝对温度,  $K$ 。

水蒸气的传输速率 $G_s$ 可表示为式(6)<sup>[10]</sup>:

$$G_s = \frac{A(p_s - p_n)}{R_d + R_s + \frac{p_n}{k_1}} \quad \text{式(6)}$$

式中,  $A$ -升华面积,  $m^2$ ;  $p_s$ ,  $p_n$ -升华界面和水汽凝结器的压力,  $Pa$ ;  $R_d$ ,  $R_s$ -干燥层的阻力和干燥层表面到水汽凝结器之间的空间的阻力,  $Pa \cdot m^2 \cdot S/kg$ ;  $k_1$ -由升华物质的分子量决定的常数,  $kg/(Pa \cdot m^2 \cdot S)$ 。

由式(6)传质速率公式可以看出,传质速率的大小主要由升华界面与干燥层表面的温度和压力所决定,要提高干燥层中水蒸气的逸出速率,一是提高升华界面的温度,使界面水蒸气压增大;二是提高干燥室的真空度降低干燥层表面的蒸汽压。又由于对流和传导的传热效应均随干燥室内的压力增大而增大,随压力的减小而减小,所以要提高升华界面的温度,就要强化传热过程,则要提高干燥室内的压力,但这样又会导致物料外表面水蒸气分压增大,使传质推动力减小,对传质不利。而降低物料表面的水蒸气压,则意味着在更高的真空度下降低了干燥程度,这对传热不利,使得升华界面温度降低,对应的水蒸气压也低,从而降低传质速率。只有同时提高传热、传质速率,才能取得更快的干燥速率,为解决此矛盾可以采用压力循环过程。

而采用不同加热方式其干燥室压力有所不同,纯辐射加热时,存在一最佳干燥室压强,使干燥时间最短。如图1所示<sup>[11]</sup>,为不同辐射加热条件下干燥时间随升华压力的变化,在各种辐射加热温度下,升华压力在0.8~1.0mmHg范围时干燥时间最短,即牛肉在辐射加热条件下的最佳升华压力为0.8~1.0mmHg(107~133Pa)。混合加热时,压强增大,干燥时间延长,这是因为混合加热时,干燥所需的热量主要是从物料底部冰层传导给升华界面的,从物料表面接受的辐射热比例减少,所以提高压强对改善传热的效果不明显,而引起的传质推动力的增大不利于水蒸气的逸出,因此,采用混合加

热时维持系统在可达到的最低压强对于干燥过程更为有利。试验中所使用的 ZLG—0.3 型冻干试验机其加热方式为混合加热。

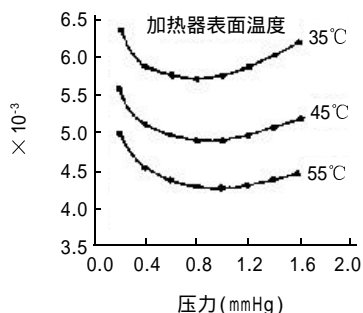


图5 辐射加热条件下干燥时间随升华压力的变化

Fig.5 The change of drying time with sublimation pressure on panel heating

### 2.3.2 捕水器温度对牛肉冻干速率的影响

ZLG—0.3 型冻干试验机, 其捕水器设计在真空泵和干燥室的管路中间, 捕水器和干燥室之间有蝶阀, 预冻过程结束后, 压缩机仅对捕水器制冷, 之后真空升华干燥开始。从理论上讲, 捕水器温度越低蒸汽压越低; 干燥室与捕水器温度差越大, 则其蒸汽压差越大, 冰晶升华速率越快<sup>[12]</sup>。图2中<sup>[12]</sup>可以看出, 当捕水器温度低于 $-50^{\circ}\text{C}$ 后, 其对冻干时间的影响趋缓, 再降低温度不但浪费能源, 难以操作, 事实上也无必要。所以本试验中将捕水器温度维持在 $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$ 。

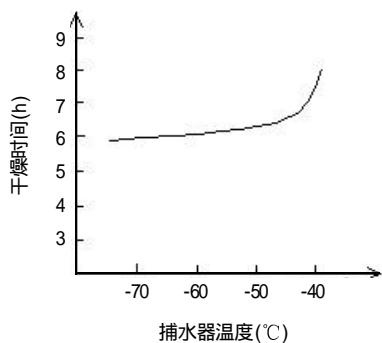


图6 捕水器温度与干燥时间关系

Fig.6 The relationship between drying time and the temperature of catching-water machine

## 2.4 冻干牛肉品质的影响因素

### 2.4.1 原料的筛选对冻干牛肉品质的影响

原料的筛选对冻干牛肉的质量非常重要, 牛肉的内在品质及感官质量因牛的品种、性别和营养状况不同而有相当大的差别, 同一头牛的不同部位经冻干处理后, 其产品品质差异也较大, 所以要对原料进行筛选。

a. 品种的影响: 将不同品种的幼小、未阉公牛肉熟制品冻干, 在 $30^{\circ}\text{C}$ 下贮存3w后复水, 纯种冻干牛肉的

嫩度不如杂交种, 而且随着贮存期延长纯种冻干牛肉的质量, 尤其是复水能力有急剧变化的趋势。

b. 肌肉块的影响: 同时研究比较三种冻干肌肉块(半膜性肌、背部最长肌、岗上肌)在贮存1年内的质量变化, 三者之间存在着显著差异, 背部最长肌的嫩度不够, 而半膜性肌的复水性略差。

c. 动物种类: 阉公牛比未阉公牛肉嫩, 随着其年龄的增大嫩度减小。冻干牛犊肉最嫩、易成粉状且色泽相当淡, 冻干牛犊肉和小肥未阉公牛肉汁液多, 而冻干阉公牛肉、牛犊肉和小肥未阉公牛肉的复水能力较好。

d. 脂肪含量: 对不同脂肪含量的冻干牛肉的感官质量及贮存1年后的感官质量进行比较, 对脱水后包装前接触氧与不接触氧两种情况加以对照, 肌肉中脂肪含量为4%的冻干牛肉在嫩度和汁液方面优于脂肪含量为18%的冻干牛肉, 而且前者的表面色泽明显地浅。另一方面, 脂肪含量高, 贮存时变质快, 在包装前与氧接触则更为敏感。

熟牛肉在冻干前的烹煮过程中已经发生了热变性, 水分含量也有一定程度的降低, 保水能力也有一定程度的下降, 所以熟牛肉对脱水不像生牛肉那样敏感<sup>[5]</sup>。本试验中采用的是熟牛肉的半膜性肌和背部最长肌等部位。

### 2.4.2 切片对冻干的影响

切片厚度与切片方向直接影响着干燥速率和产品质量。当切片厚度超过2cm以及切片方向与肌纤维夹角小于 $45^{\circ}$ 时, 不但干燥速率缓慢, 冻干产品的复水也较困难。减薄物料的厚度可降低热、质传递通过干燥层的阻力, 提高干燥速率<sup>[5]</sup>。

### 2.4.3 冷冻速率对冻干牛肉品质的影响

预冻是先对湿牛肉片在短时间内将其温度降至共晶点以下, 使其中水分全部冻结成冰晶, 从而保证升华干燥后的牛肉片具有良好的形态、质构和复水性。冷冻速率高将导致细胞间小冰晶的形成甚至细胞内冰晶的形成, 这将影响制品的干燥速率以及产品的多孔性及复水能力。过高的冷冻速率导致牛肉的复水能力显著降低, 无论是复水前还是复水后产品的色泽都更加苍白失去牛肉本身的原有色泽<sup>[14]</sup>。但与生牛肉冻干不同的是, 在一个相当宽的范围内冷冻速率似乎对熟牛肉的脱水速率或复水能力没有任何影响, 而在贮藏时, 冷冻速率愈慢的冻干熟牛肉其质量下降得愈快。冷冻速率的快慢对干燥时间也有一定影响, 速冻产生的冰晶较小, 缓冻产生的冰晶较大, 大的冰晶有利于升华, 小的冰晶溶解快, 冰晶越小, 干燥后越能反映出产品原来的结构形状和性能, 所以应综合考虑牛肉的共晶点选择最优的冷冻速率, 既能缩短干燥时间又能保证冻干牛肉的品质<sup>[5]</sup>。试验中先对搁板制冷至 $-15^{\circ}\text{C}$ 后入料, 约1.5h后料温降至 $-20^{\circ}\text{C}$ , 继续冷冻0.5h后, 可认为达到牛肉

的共晶点温度以下,此时显示料温为 $-27^{\circ}\text{C}$ 。

#### 2.4.4 升华温度对冻干牛肉品质的影响

升华干燥所需的潜热由热源通过外界传热过程传递到被干物料的表面,而对搁板加热必须保证物料温度低于共熔点温度使物料不融化,温度太低对干燥速率的提高不利<sup>[9]</sup>。当外部气体温度升高时,干燥层表面温度也随之升高。因此可通过提高气体温度来提高干燥速率,但受到下列条件的限制:a)产品冻结部分的温度低于产品共熔点温度;b)产品干燥层的温度必须低于崩解温度或允许的最高温度;c)最高搁板温度。升高气体温度当受到干燥层所能承受的最高温度的限制时,为了提高干燥速率,必须提高干燥层的导热系数;当受到冻结层的融化温度限制时,为了提高干燥速率,就必须提高干燥层的平均有效扩散系数。而干燥层的导热系数和扩散系数都与压力有关<sup>[9]</sup>。试验中搁板极限温度 $55^{\circ}\text{C}$ ,升华干燥过程中牛肉的表面温度最高不要超过 $40^{\circ}\text{C}$ ,以防蛋白质热变性影响制品的复水性。

### 3 结 论

本课题通过冷冻真空升华干燥生产过程的数学优化,确立了冷冻真空升华干燥五香牛肉干的生产工艺规程。建立了预冷及干燥过程的数学模型,为实现冷冻真空升华干燥五香牛肉干的程控自动化生产奠定了理论基础。五香牛肉的冻干工艺条件为:预冻时间3h,预冻终点温度 $-24^{\circ}\text{C}$ ,干燥室真空度60Pa,捕水器真空度45Pa,捕水器温度 $-40\sim-50^{\circ}\text{C}$ ,干燥时间4h。冻干熟牛肉外观,其色泽与冻干前无差别呈暗红色,表面呈焦状使制品赋有特殊风味。在 $20^{\circ}\text{C}$ 的常温水中使冻干熟牛肉复水,约1min左右制品恢复至冻干前鲜熟牛肉的状态,复水后制品具有较好的品质并且口味与冻干前

一致。

#### 参考文献:

- [1] 余善明,白杰,马国庆.果蔬保鲜与冷冻干燥技术[M].黑龙江科学技术出版社,1999.421-427.
- [2] 食物营养成分表(北京地区)[M].轻工业出版社,1990.54-56.
- [3] 程远霞,陈素芝,谢秀英.食品共晶点和共熔点的试验研究[J].淮海工学院学报,2001,(12):44-46.
- [4] 徐桂花.食品分析[M].宁夏人民出版社,2000.49-53.
- [5] 冯志哲.食品冷藏学[M].中国轻工业出版社,2001.67-72.
- [6] 高福成.冻干食品[M].中国轻工业出版社,1998.77-86.
- [7] 李云飞,葛克山.食品工程原理[M].中国农业大学出版社,2002.845-850.
- [8] 无锡轻院,天津轻院合编.食品工程原理[M].轻工业出版社,1985.443-450.
- [9] Sui Lin. Thermal condition of freeze-drying processing in a porous medium with predetermine rate of drying Int[J]. J Refrig, 1995, 18(3): 161-167.
- [10] 齐锡岭,杜小泽,李惟毅.真空冷冻干燥非稳态热质传递模型的应用.高校化学工程学报,1997,11(2):201-205.
- [11] 江家伍,徐伟君.提高真空冷冻干燥速率的研究[J].包装与食品机械,2002,20:2.
- [12] Krokage MK. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 35: 369-380.
- [13] Sheng TR, Peck RE. Rates for freeze drying [A]. AIChE Symp Series[C]. New York, American Institute of Chemical Engineering, 1997, 124.
- [14] 张晋陆.冷冻干燥法生产牛肉丁的研究.中国畜产与食品,1998,5(5):198-200.



## 美国推出新型配方水果保护膜

近日,美国科学家用新型配方的虫胶和蔗糖酯,研制出一种新型水果保护膜。蔗糖酯是一种将蔗糖与酯及酸混合为一体的复合物。

这种生物控制保护膜可以通过促使有利细菌在水果表面自然生长保持水果质量。这项研究是使水果种植者减少依赖化学剂来延缓水果收获后腐烂的部分。

据报道,有关人员还进行了重新配方的虫胶和蔗糖酯保护膜减少由于乙醇的增加而引起异味的实验。对葡萄柚的初步实验表明,重新配方的虫胶和蔗糖酯保护膜比普通化学剂更能允许氧气和二氧化碳气进行交换,从而防止水果异味的产生。在这方面,蔗糖酯保护膜的作用更加明显。