

香菇冷冻干燥工艺参数的试验研究

宫元娟, 王 博, 林 静, 李成华, 赵青松

(沈阳农业大学农业工程学院, 沈阳 110161)

摘 要: 确定了最优的香菇冷冻干燥工艺参数, 以提高冻干效率和冻干香菇品质。通过单因素试验以及 4 因素 5 水平的二次回归正交试验, 研究了冻干室压力、加热板温度、预冻降温速度和物料厚度等因素对冻干时间、干燥前后物料体积收缩率及复水比等几个指标的影响, 建立了各指标与试验因子之间的回归数学模型, 最后利用多目标非线性优化理论与方法, 在保证香菇干燥品质的情况下, 得到了香菇(厚度 6~10 mm)冷冻干燥的最优工艺参数, 干燥室压力 111 Pa, 加热板温度 42.5℃, 降温速率-0.29℃/min。

关键词: 香菇; 冷冻干燥; 工艺参数; 试验研究

中图分类号: S375

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0226-04

0 引 言

香菇是国际第二大商品菇, 富含蛋白质、抗坏血酸和多种氨基酸。鲜香菇质地细嫩, 采收后鲜度迅速下降, 从而会引起开伞、菌褶褐变、菇体萎缩等, 影响风味和商品价值。故香菇不易贮存, 若将其干燥则其附加值倍增。

真空冷冻干燥(简称冻干)是物料脱水干燥的一种新的工艺措施, 通过对鲜物料预先冻结, 并在冻结状态下, 将物料的水分从固态直接升华为气态, 达到去除水分的目的。冻干一般可分为预冻、升华、解析 3 个过程。其中升华和解析过程是在真空条件下进行的。与其它干燥方法(自然风干、晒干、热风干燥、远红外干燥等)加工的脱水食品相比, 有如下特点: 真空冷冻干燥特别适用于热敏性高和极易氧化的食品干燥, 可以保留新鲜食品的色、香、味及营养成分。保持原有的固体骨架结构和形态, 可以加工成极细的粉状。具有比较理想的速溶性和快速复水性, 比其他干燥方法生产的食品更接近新鲜食品。避免了一般干燥方法中因物料内部水分向表面迁移而将无机盐和营养携带到物料表面而造成表面硬化和营养损失等现象。冻干食品采用真空或充氮包装和闭光保存, 可保持 5 年不变质。

目前, 冻干食品在欧美日等市场迅速流行, 世界上已有较大规模的真空冷冻干燥食品企业 130 多家。美国和日本市场上出售的脱水食品中, 冻干食品已占了 40% 以上。国际市场上真空冷冻干燥食品价格是热风干燥食品的 46 倍, 是速冻食品价格的 78 倍, 但因经济效益十分可观, 市场占有率还在逐年递增。我国的冻干行业规模小, 用于食品加工的冻干面积不超过 5 000 m²。

1 香菇冷冻干燥工艺参数的试验

1.1 试验设备

冻干机: 北京博医康技术公司, FD-5 型真空冷冻干

燥机。用于物料的预冻及冷冻干燥。

真空干燥机: 上海精宏实验设备有限公司, DZF-6090 型真空干燥机。用于测量物料的含水率。

冷冻箱: 新飞电器有限公司, BC/BD-98 型冷冻箱。用于临时存放已冷冻的物料。

电子天平: 北京塞多利斯天平有限公司, 精度 0.001 g。用于测量物料质量。

WYK-303B2 型自流稳压电源: 扬州金通电子有限公司, 用来测量物料的共晶点温度。

UNT-TUT56 型数字万用表: 用来测量物料的共晶点温度。

热电偶温度计: 北京博医康技术公司, 用来测量物料共晶点温度。

1.2 试验中衡量物料干燥品质指标及其影响因子

1) 复水比

$$r = \frac{m_a}{m} \quad (1)$$

式中 r ——复水比; m ——干物料质量; m_a ——复水后物料质量。

2) 体积收缩率

$$\delta = \frac{V_o - V_i}{V_o} \times 100\% \quad (2)$$

式中 δ ——体积收缩率; V_o ——鲜物料体积; V_i ——干燥后物料体积。

根据冻干工艺确定实验研究真空室压力、加热板温度、预冻降温速度以及物料厚度等因素对干物料的品质指标(复水比与体积收缩率)及干燥时间的影响。

1.3 香菇共晶点温度的测定

不同物料的共晶点温度不同。根据阿伦纽斯(S. A. Arrhenius)的溶解电离学说, 共晶点温度的测量原理如图 1, 测试结果, 香菇的共晶点温度是-13~-12℃。

1.4 单因素试验与分析

1.4.1 压力对干燥速度的影响

将切片(厚度 6 mm)的香菇以-0.6℃/min 的降温速率快速冷冻到-40℃后, 放入真空室进行干燥, 真空室内的绝对压力分别为 108.4、66.23、6 Pa。加热板温度为 35℃, 冷阱温度-60℃。在干燥过程中测定物料的品质

收稿日期: 2002-07-17 修订日期: 2003-06-18

作者简介: 宫元娟(1963-), 女, 硕士, 副教授, 沈阳市东陵路 120 号沈阳农业大学农业工程学院, 110161。Email: yuangong@163.com

量变化以及物料内部和介质的温度。压力对物料干燥速率的影响如图 2。随着真空室内压力的降低, 香菇的质量变化曲线越来越平缓, 即其斜率越来越小, 干燥速度降低。真空室内的绝对压力与物料的干燥速度成相反的变化趋势。这可以解释为, 由于真空室内压力的降低使得真空室与冷凝器之间的压差减小, 限制了水分的传递过程。所以为了减小物料的干燥时间, 应适当的增大压强, 但又不能太高, 压力太高, 物料会起气泡、坍塌, 而达不到真空冷冻干燥的工艺要求。

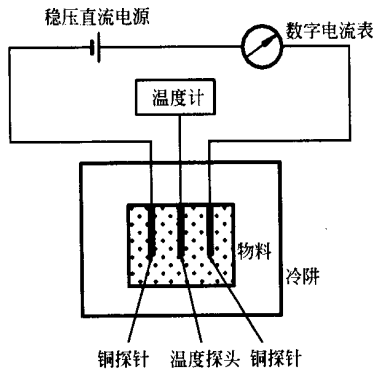


图 1 共晶点温度测量原理图

Fig 1 Measuring theory of temperature of contemporary crystallization point

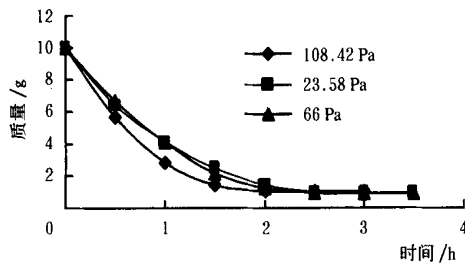


图 2 压力对干燥速度的影响

Fig 2 Effect of pressure on drying velocity

1.4.2 加热板温度对干燥速度的影响

将切片(厚度 6 mm)的香菇以 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率快速冷冻到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 放入真空室干燥, 真空室内的绝对压力为 66 Pa, 加热板温度分别为 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷阱温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在干燥过程中测定物料的质量变化以及物料内部和介质的温度。不同加热温度对物料的干燥速度有着明显的影响, 见图 3, 随着加热板加热温度的升高, 物料的干燥速度也随之升高, 但不能为了提高干燥速度而使加热温度太高。温度过高会使物料中心温度超过物料共晶点温度, 物料不能实现升华干燥。

1.4.3 降温速度对干燥速度的影响

将切片(厚度 6mm)的香菇分别以 $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速度冷冻到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 放入干燥室进行干燥, 真空室内的绝对压力为 66 Pa, 加热板温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷阱温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在干燥过程中测定物料的质量变化以及物料内部和介质的温度。不同的降温速度对物料的干燥速率的影响如图 4。随着降温速度的降低, 物料的干燥速度加快。这是因为, 较低的

降温速率导致大冰晶的形成, 物料结构敞开, 而较敞开的结构有助于干燥后期水分向物料外的传递。

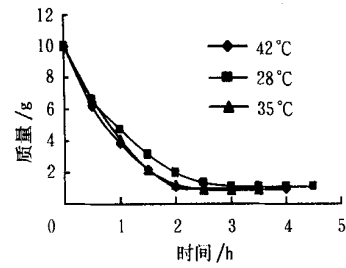


图 3 温度对干燥速率的影响

Fig 3 Effect of temperature on drying velocity

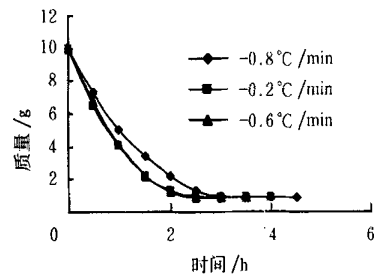


图 4 降温速率对干燥速率的影响

Fig 4 Effect of velocity of decreasing temperature on drying velocity

1.4.4 物料厚度对干燥速率的影响

将香菇切成其厚度分别 10 mm、6 mm、2 mm, 以 $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的降温速率快速冷冻到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后, 放入真空室干燥, 真空室内的绝对压力为 66 Pa, 加热板温度为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷阱温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测定物料的质量变化以及物料内部和介质的温度。物料厚度对干燥速率的影响如图 5, 物料越厚, 干燥速度越低; 反之则越高。这是因为, 物料层的厚度越大, 其传热传质的阻力越大, 物料内部的水分就越难向外传递, 所以干燥速度也就越低。

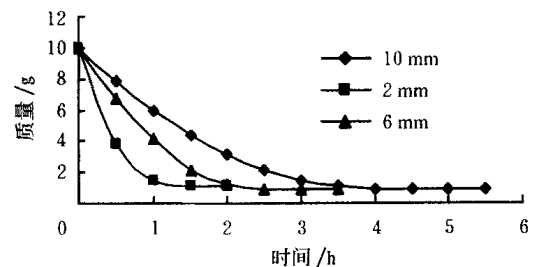


图 5 物料厚度对干燥速度的影响

Fig 5 Effect of thickness of material on drying velocity

1.5 香菇冻干试验的二次回归正交设计

由上述的单因素试验以及研究表明, 冻干室压力、加热板温度、预冻降温速度和物料厚度均对冻干时间、物料复水比及体积收缩率有较大影响, 是影响各试验指标的主要因素。为了得到各指标与各个因素之间的量化关系和数学模型, 考虑到各因素之间的交互作用, 并尽量减少试验次数, 采用适合于一般生产过程分析的四因子二次回归正交试验设计。将各因素按其水平及取值范围进行编码, 得其因素水平表, 如表 1 所示。

表 1 因素水平表

Table 1 Levels and factors of the orthogonal experiment

因素	压力 /Pa	加热温度 /	降温速度 / · min ⁻¹	物料厚度 /mm
编码代号	x_1	x_2	x_3	x_4
基准水平(0)	66	35	0.53	6
变化区间(Δ)	30	5	0.2	3
上水平(+1)	96	40	0.73	9
下水平(-1)	36	30	0.33	3
上星号臂(+1.414)	108.42	42.07	0.81	10.2
下星号臂(-1.414)	23.58	27.93	0.25	1.8

根据 4 因素 5 水平正交试验设计, 安排了 25 次试验, 利用计算机求解出回归数学模型。

$$\hat{y}_1 = 2.172 - 0.1395x_1 - 0.0583x_2 + 0.1142x_3 + 0.6556x_4 - 0.2625x_1x_2 - 0.05x_1x_3 + 0.1x_1x_4 + 0.05x_2x_3 - 0.125x_2x_4 + 0.1875x_3x_4 - 0.43(x_1^2 - 0.8) + 0.145(x_2^2 - 0.8) + 0.045(x_3^2 - 0.8) - 0.155(x_4^2 - 0.8) \quad (3)$$

$$\hat{y}_2 = 41.3936 - 1.0978x_1 - 0.1514x_2 - 0.0387x_3 -$$

$$2.7772x_4 + 4.3313x_1x_2 + 0.83x_1x_3 - 0.9763x_1x_4 + 0.595x_2x_3 + 1.8338x_2x_4 - 1.1325x_3x_4 - 4.834(x_1^2 - 0.8) - 4.1115(x_2^2 - 0.8) - 4.944(x_3^2 - 0.8) - 4.3965(x_4^2 - 0.8) \quad (4)$$

$$\hat{y}_3 = 5.4108 - 0.4066x_1 + 0.0192x_2 + 0.5604x_3 + 0.8001x_4 - 0.8381x_1x_2 - 0.0981x_3x_4 - 0.1481x_1x_3 + 0.5056x_1x_4 - 0.2244x_2x_3 + 0.2744x_2x_4 + 1.4018(x_1^2 - 0.8) + 0.8093(x_2^2 - 0.8) + 0.9518(x_3^2 - 0.8) + 1.0043(x_4^2 - 0.8) \quad (5)$$

式中 \hat{y}_1 ——干燥时间, h; \hat{y}_2 ——体积收缩率, %; \hat{y}_3 ——复水比。

利用计算机对各因子与回归数学模型的拟和情况进行分析, 从而得到方差分析表(干燥时间指标, 其余指标值略)。如表 2 所示。

表 2 干燥时间指标方差分析表

Table 2 Variance analysis of the indexes of drying time

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	显著性检验	显著性
回归	13.3237	14	0.95169	3.51599	$F > F_{0.05}(14, 10) = 2.256$	显著
剩余	2.70674	10	0.27067			
总计	16.0304	24				

方差分析得出, 各指标回归方程在各自的因子水平上是显著的, 试验数据与回归数学模型拟合性好。

1.6 交互作用效应分析

从试验分析的结果可以看出: 对于干燥时间、体积收缩率以及复水比这几个指标, 干燥室压力 x_1 、加热板温度 x_2 两因素之间的交互作用对他们影响显著。因此需考察交互作用的效应。现以 x_1 、 x_2 交互作用对干燥时间的影响为例, 分析交互作用。通过绘制二次曲面图来分析交互作用对指标值的影响。对于回归数学模型(3), 只考虑 x_1 与 x_2 两因素对干燥时间的影响, 所以把其余因子规定在 0 水平上, 即 $x_3 = x_4 = 0$, 则(1)式可化为

$$\hat{y}_1 = 2.172 - 0.1395x_1 - 0.0583x_2 - 0.43(x_1^2 - 0.8) + 0.145(x_2^2 - 0.8) \quad (6)$$

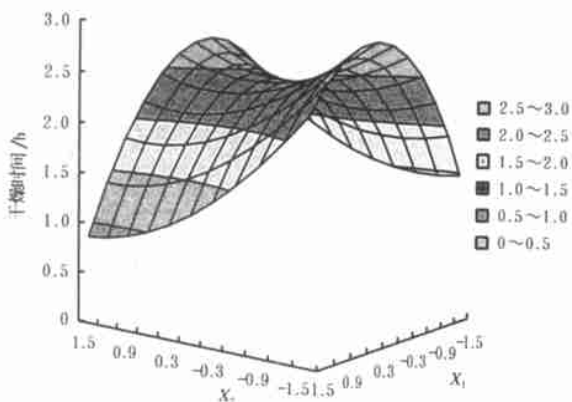


图 6 x_1x_2 交互作用对干燥时间的影响
Fig 6 Effect of x_1x_2 interaction on drying time

二次曲面图如图 6 所示。从图可以看出, 当加热板温度编码值为 1.5, 干燥室压力为 1.5 时, 干燥时间最短, 这与单因素试验中的分析结果相同。另外, 当干燥室压力较高或较低时, 物料的干燥时间明显缩短。当加热板温度取一定值时, 在 $[-1.5, 0]$ 区域内, 干燥时间随着干燥室压力的增大而增大; 在 $[0, 1.5]$ 区域内, 干燥时间随着干燥室压力的增大而减小。故生产中在满足冷冻干燥的条件下, 可以取较大的干燥室压力, 以节省成本, 且能获得较短的干燥时间。

2 工艺参数的优化与分析

由试验结果分别建立了干燥室压力、加热板温度、冷冻降温速率、物料厚度及它们之间的交互作用等因素同干燥时间、干燥前后体积收缩率、复水比各指标之间的回归模型, 并通过 F 检验, 各指标置信度均达到了 90% 以上, 数学模型如式(3)、(4)及(5)所示。为了得到香菇冷冻干燥的最优工艺参数, 利用多目标非线性优化理论与方法, 对所得的回归模型进行优化分析。

2.1 目标函数的确定

干燥时间及干燥前后体积收缩率在各自对应的约束条件下应达到最小值, 复水比应达到最大值。即满足 $\min \hat{y}_1, \min \hat{y}_2, \max \hat{y}_3$, 为多目标决策问题。

2.2 约束条件

干燥时间、干燥前后体收缩率、复水比各指标的值均应大于零, 其对应的试验因素编码值限制在试验设计的范围内取值。

$$\begin{cases} \gamma_j & 0 \\ -1.5 & x_i & 1.5 \end{cases} \quad (j = 1, 2, 3 \quad i = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

及非线性优化方法, 根据实际香菇的厚度 6~ 10 mm, 利用计算机规划求解分析方法, 对模型进行优化求解, 得出不同厚度的香菇冻干的最佳工艺参数见表 3。

2.3 优化分析及结果

根据已建立的回归数学模型, 利用多目标决策理论

表 3 香菇冷冻干燥最优工艺参数的优化结果

Table 3 Optimized results of the optimal technological parameters of freeze-drying mushroom

香菇厚度 /mm	优化参数							指标值		
	因素编码值			因素实际值				干燥时间 /h	体积收缩 率(100%)	复水比
	x_1	x_2	x_3	x_1/Pa	$x_2/$	$x_3/-$	$\cdot \text{min}^{-1}$			
6	1.5	1.5	- 1.2	111	42.5	-	0.23	0.89	33	6.1
9	1.5	1.5	- 1.5	111	42.5	-	0.29	1.01	25	9.8
10.5	1.5	1.5	- 1.5	111	42.5	-	0.29	1.05	20	12.0

3 结 论

1) 对香菇进行真空冷冻干燥, 确定了最佳工艺参数, 对提高冻干效率和冻干香菇品质提供了理论依据。

2) 根据阿伦纽斯(S. A. Arrhenius)的溶解电离学说, 测定香菇共晶点温度是 12~ 13 。

3) 通过单因素试验与分析, 确定了影响香菇冷冻干燥的因素是冻干室压力、加热板温度、预冻降温速度和物料厚度。

4) 通过 4 因素 5 水平的二次回归正交试验, 研究了冻干室压力、加热板温度、预冻降温速度和物料厚度等因素对冻干时间、干燥前后物料体积收缩率及复水比几个指标的影响; 建立了各指标与试验因子之间回归的数学模型; 利用二元函数曲面对影响各个指标的主要因子交互作用进行了分析; 最后利用多目标非线性优化理论与方法, 在保证香菇干燥品质情况下, 得到了香菇(厚度 6~ 10 mm)冷冻干燥的最优工艺参数, 干燥室压力 111 Pa, 加热板温度 42.5 , 降温速率- 0.29 /min。

[参 考 文 献]

[1] 张兆祥, 等. 真空冷冻干燥与气调保鲜[M]. 第 1 版. 北京:

中国民航出版社, 1996. 7.

[2] 张 愨. 特种蔬菜储藏与复水学专论[M]. 第 1 版. 北京: 中国轻工业出版社, 1990. 3.

[3] 王继先, 等. 真空冷冻干燥工艺及其在农产品加工中的应用[J]. 包装与食品机械, 2001, 19(2): 26~ 28.

[4] 石小琼, 等. 真空预冷技术在芋冷藏保鲜上的应用研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 86~ 90.

[5] 石小琼, 等. 芋冷藏升华干燥最佳工艺研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 112~ 117.

[6] 李云飞, 等. 奶牛初乳冻干时间组合设计试验研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2): 78~ 81.

[7] 邱 凌, 等. 魔芋冷冻干燥特性与工艺参数的研究[J]. 农业机械学报, 1995, 26(4): 100~ 104.

[8] 丁正斌, 等. 冷冻干燥工艺简介[J]. 真空与低温, 1996, 2(1): 52~ 57.

[9] Moreira R, et al. Shrinkage of apple slices during drying by warm air convection and freeze drying[A]. Drying'98 Proceedings of the 11th International Drying symposium (DS'98)[C]. 1998, B: 1108~ 1114.

[10] Farkas B E, Singh R P. Physical properties of air-dried and freeze-dried Chicken[J]. Journal of Food Science, 1991, 56(3): 611~ 615.

Experimental study on technological parameters of freeze-drying of mushroom

Gong Yuanjuan, Wang Bo, Lin Jing, Li Chenghua, Zhao Qingsong

(Agricultural Engineering College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: The purpose of this paper is to determine the most efficient freeze-drying technological parameters of mushroom in order to improve its efficiency and quality. The relationship between the drying time, ratio of volume shrinkage, ratio of water absorption, as well as the drying pressure of drying chamber, temperature of the board, the velocity of decreasing temperature during the process of freezing, the material thickness through the two orthogonal experiments with four factors and five levels and single factor experiment, and the mathematical models were established to describe the parameters. At last the optimal combination of the parameters for the freeze-drying technology of mushroom was obtained through optimized theory in many targets and in nonlinear method. They are as follows: under ensuring quality, the drying pressure of drying chamber is 111 Pa, the temperature of the board is 42.5 , the velocity of decreasing temperature during freezing is - 0.29 /min, and material thickness is 6~ 10 mm.

Key words: mushroom; freeze-drying; technological parameter; experimental study