

热泵除湿与热风联合干制金针菇的研究*

叶盛英 李远志 罗树灿

(华南农业大学食品科学系,广州,510642)

摘要 在热泵除湿与热风干制试验台上,采用了二次正交旋转回归方法,对金针菇进行了干制试验研究.探讨了平均风速、热泵除湿与热风调换时物料含水率、热风温度对脱水速率、能耗和干制品的复水比的影响规律,提出了最优干制工艺参数.

关键词 金针菇;热泵除湿与热风联合干制;优化参数

中图分类号 TS 205.1

金针菇不仅味道鲜美,而且含丰富的营养与药用成分,其中担子菌多糖,能提高机体免疫功能而达到防治肿瘤效果,列入重要的强身抗癌食品,其系列产品有鲜菇、干菇与罐头.金针菇属于低温型的菇类,是在自然气温降到 25℃时开始生产,季节性强,产期集中,采用良好的干制加工工艺获得金针菇干制品,不仅可缓和产销矛盾,同时也能提高产品的经济效益.对食用菌干制品,要求具有香味,这种香味物质(环状含硫化合物)在干制过程中由香菇酸在酶作用下在温度 50℃以上才易产生(杨荣良,1989).

热泵除湿原理及其优点已有资料(张心耳等,1988;陈照传,1987)论述.用以 CHF_2Cl 为热媒的压缩式热泵除湿系统,在其热一侧的温度为 50℃以下,技术上是过关的.但把这一技术用于 50℃以上时,热媒的冷凝温度接近临界温度,潜热减少,致热系数大幅度下降,热媒、润滑油的热稳定性和压缩机的耐压强度等成为问题.因此,为了进一步提高金针菇干制品质量、生产率和节省能源,作者提出热泵除湿与热风联合干制金针菇工艺.

本研究目的是:通过二次正交旋转组合设计,探求平均风速、热泵除湿与热风调换时物料含水率、热风温度等 3 个因素对脱水速率、单位能耗和复水比的影响规律,并提出最优干制工艺参数.

1 试验研究方法

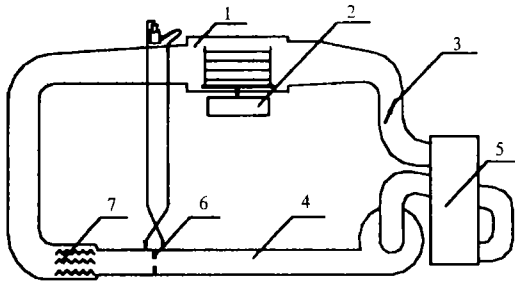
1.1 试验设备、材料

热泵除湿与热风联合干制金针菇的试验台,如图 1,由风机、电加热器、热泵除湿系统、电子秤、控温仪及功率计等组成.表 1 为试验台的设备主要特性.

鲜金针菇为试验材料,菌盖乳白色, $d = 3.5 \sim 5.5 \text{ mm}$,菌柄淡黄色, $d = 2.9 \sim 4.0 \text{ mm}$, $l_{\text{柄}} = 26.4 \sim 31.2 \text{ mm}$.装入塑料袋内,置于冰箱待用.

1998-10-22 收稿 叶盛英,男,37岁,副教授,硕士

* 广东省科委重点科研(粤科农字[1997]90号)资助项目



1—干燥室,2—电子秤,3—风量调节器,4—风道,
5—热泵抽湿系统,6—孔板压差计,7—电加热器

图1 试验台示意图

1.2 试验方案及方法

用二次正交旋转回归试验设计作试验方案,选取热泵除湿与热风调换时物料含水率 Z_1 、热风温度 Z_2 、物料室的平均风速 Z_3 3 个因素,根据 3 因素二次正交旋转回归试验设计(高允彦,1988)安排,试验总数为 23 次,设计水平见表 2。

对每次试验,先开风机和热泵除湿设备,调节风速,再将装有 104 g 的试样的物料架放入干燥室,试样初始湿基含水率平均为 88%,用电子秤计量失质量。待物料干至热风调换时物料含水率(以下除注明外,物料含水率均为湿基含水率)时,开启电加热器,以设定热风温度进行干制,直至物料含水率为 12%。

1.3 测试指标

脱水速率(Y_1)(%·h⁻¹)、单位能耗(Y_2)(kW·h/%)和复水比(Y_3)作测试指标。

复水比测定方法是,将干制的金针菇试样放入 15 倍试样质量的水中,在 20 °C 条件下,30 min 后捞起试样,自然沥水 5 min,称取沥干质量。本文的复水比值为 3 次重复试验的平均值。

2 数据处理与分析

2.1 回归方程及参数分析

2.1.1 回归方程 对试验数据进行回归分析,并剔除影响不显著因素后,得以下方程组:

$$\begin{cases} Y_1 = -125.14 + 0.259Z_1 + 3.562Z_2 + 24.93Z_3 - 3.61 \times 10^{-2}Z_2^2, \\ Y_2 = 1.98 + 7.16 \times 10^{-2}Z_1 - 0.178Z_2 + 2.28Z_3 - 4.06 \times 10^{-2}Z_1Z_3 + 1.78 \times 10^{-3}Z_2^2, \\ Y_3 = 17.67 - 0.273Z_1 - 0.131Z_2 - 2.52Z_3 - 5.92 \times 10^{-2}Z_1Z_3 + 2.74 \times 10^{-3}Z_1Z_2 + 1.41 \times 10^{-3}Z_2^2 + 1.71Z_3^2. \end{cases} \quad (1)$$

其中, Y_1 和 Y_3 在 $\alpha = 0.05$ 水平上显著; Y_2 在 $\alpha = 0.10$ 水平上显著。

2.1.2 单因素与因素交互作用分析 对式(1),固定其它因素为零水平,观察单一因素的影响,如图 2 所示。随着 Z_1 的增大,脱水速率越快,单位能耗越少,呈线性关系,而复水比先逐渐减少至最低点后再增大。 Z_2 对脱水速率、单位能耗有最佳范围,而复水比随着 Z_2 增大开始下降,但当 Z_2 超过 46.5 °C 时,随着 Z_2 增大复水比亦随之提高。 Z_3 对各项指标均有较大的影响,除复水比指标外,加大风速可以改善各项指标, Z_3 对复水比影响关系为开口向上的二次抛物线。

表1 试验台的设备主要特性

设备名称	特性
干燥室	截面积 0.15 m × 0.20 m
送风机	380 V, 0.75 kW, 风量 273 m ³ /h
加热器	380 V, 100 kW × 3
热泵抽湿系统	热媒: CHF ₂ Cl; 平均 Cop: 3.1
热泵压缩机	220 V, 0.477 kW
热泵蒸发器	229 mm × 185 mm × 20 mm, 1 列 6 段
热泵冷凝器	300 mm × 230 mm × 30.5 mm, 2 列 6 段

表2 试验设计水平

编码值	因素		
	Z_1 /%	Z_2 /°C	Z_3 /(m·s ⁻¹)
上星号臂 ($r = 1.682$)	83.30	65	2.4
上水平 (1)	77.5	59	2.2
零水平 (0)	69	50	1.9
下水平 (-1)	60.5	41	1.6
下星号臂 ($-r = -1.682$)	54.70	35	1.4

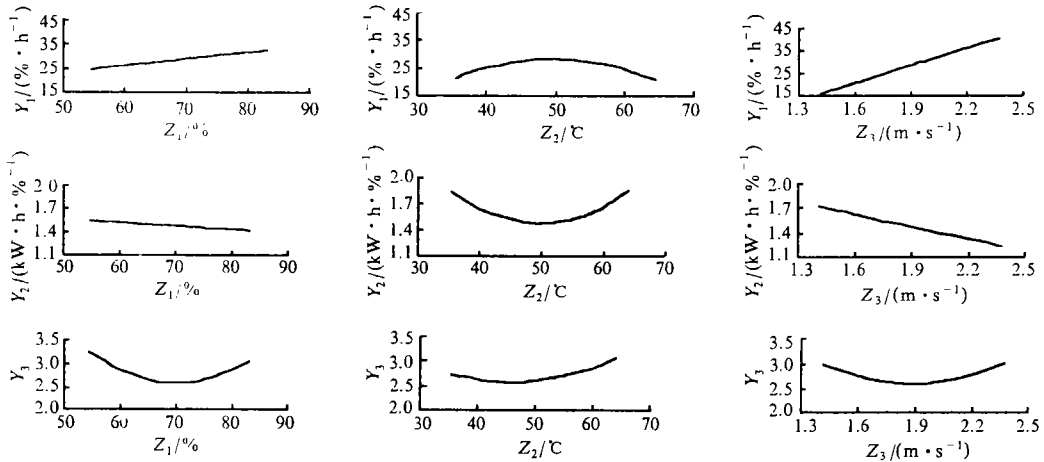


图2 单一因素影响的关系

由式(1): Z_1 、 Z_2 、 Z_3 3个因素对 Y_1 没交互作用. 单位能耗 Y_2 和复水比 Y_3 有风温 Z_2 、风速 Z_3 的交互项, 为观察交互影响, 固定 Z_1 为零水平, 由式(1)得 Z_2 、 Z_3 对 Y_2 和 Y_3 的交互作用图, 如图2、3所示, 从图看到, Z_2 、 Z_3 对 Y_2 和 Y_3 有较强烈的交互影响, 因此, 风温、风速应合理搭配.

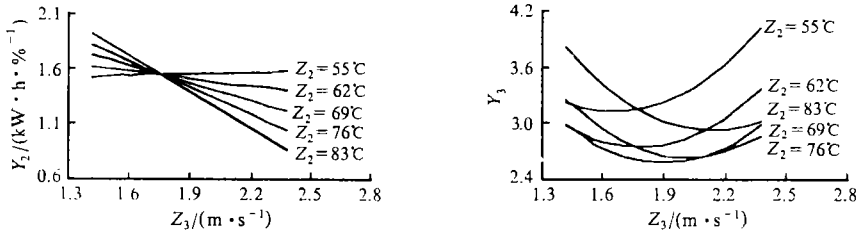


图3 风温、风速对 Y_2 、 Y_3 交互作用

2.2 综合优化工艺的确定

综合考虑脱水速率、单位能耗和复水比3指标, 采用评价函数法将3指标转化为单目标优化问题. 脱水速率、复水比在优化时尽量取最大值; 单位能耗在优化时尽量取最小值. 为平衡各指标的量级和量纲, 先采用线性型功效系数法(魏权龄等, 1984)进行规范化, 再用线性加权法, 构造评价函数, 即:

$$\max \omega [F(Y)] = \omega_1 \times \left(\frac{Y_1 - Y_{1\min}}{Y_{1\max} - Y_{1\min}} \right) + \omega_2 \left[1 - \left(\frac{Y_2 - Y_{2\min}}{Y_{2\max} - Y_{2\min}} \right) \right] + \omega_3 \left(\frac{Y_3 - Y_{3\min}}{Y_{\max} - Y_{3\min}} \right), \quad (2)$$

约束条件: $54.65 \leq Z_1 \leq 83.35$, $35.7 \leq Z_2 \leq 64.4$, $1.42 \leq Z_3 \leq 2.38$.

式中: ω_1 、 ω_2 和 ω_3 分别为 Y_1 、 Y_2 和 Y_3 的加权系数, 满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$. 本文用模糊数学的模糊优先比相似选择方法(张跃等, 1992)选出 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 , 求得综合优化工艺参数.

由2.1.2内容 & 单目标优化结果, 确定固定样本, 即目标值为:

$$A = \{Y_1, Y_2, Y_3\} = \{38, 1.05, 4\}.$$

把式(1)各指标的最大、小值及设定7组权值 Q_i 代入式(2),用随机搜索优化方法(孙德敏,1991),借助计算机进行式(2)的7次优化,得到相应的优化结果,作为相似因素,见表3. 比较任意2组权值的优化结果与目标值的相似程度,通过计算它们与目标值的海明(Hamming)距离,建立相似优先比,由此得出 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 3指标的各自模糊相关矩阵,再用 λ 截矩阵,得到各组权值的序号,各因素序号相加,数值见表4.

由表4, Q_2 序号和最小,即该组优化值与固定样本最相似. 因此,用 Q_2 所对应的权值来构造式(2),此时,最优参数为 $Z_1 = 54.65\%$, $Z_2 = 52.7^\circ\text{C}$, $Z_3 = 2.32 \text{ m/s}$.

根据最优参数,进行试验验证,结果如表5,试验验证与优化值接近,干制品有香味. 因此,上述优化结果正确.

表3 设定7组权组及相似因素

$Q_i: (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$	相似因素		
	Y_1	Y_2	Y_3
$Q_0: (0.35, 0.2, 0.45)$	34.63	1.57	3.93
$Q_1: (0.45, 0.35, 0.2)$	42.07	0.94	2.95
$Q_2: (0.2, 0.35, 0.45)$	34.42	1.58	3.95
$Q_3: (0.3, 0.15, 0.55)$	33.38	1.63	4.01
$Q_4: (0.15, 0.3, 0.55)$	32.89	1.65	4.04
$Q_5: (0.4, 0.3, 0.3)$	42.01	0.94	2.96
$Q_6: (0.25, 0.25, 0.5)$	34.15	1.59	3.97
A: 固定样本	38	1.05	4

表4 各组权值的序号与序号和

Q_i	序号与序号和			
	Y_1	Y_2	Y_3	序号和
Q_0	1	3	5	9
Q_1	5	1	7	13
Q_2	2	2	4	8
Q_3	6	5	1	12
Q_4	7	6	3	16
Q_5	4	1	6	11
Q_6	3	4	2	9

表5 试验值与预测值比较

指标	试验值	预测值
Y_1	35.01	34.42
Y_2	1.53	1.582
Y_3	4.01	3.947

3 结论

(1)在本试验条件下,得到热泵除湿与热风调换时物料含水率、热风温度、平均风速影响脱水速率、单位能耗和复水比的规律与回归方程.

(2)综合考虑脱水速率、单位能耗和复水比的最优干制工艺参数组合是热泵除湿与热风调换时物料含水率为 54.65% 、热风温度 52.7°C 、平均风速 2.32 m/s .

致谢 华南农业大学食品系学生麦华文、招贻畴参加部分试验工作,特此致谢!

参 考 文 献

孙德敏. 1991. 工程最优化方法及应用. 合肥: 中国科学技术出版, 194~197
 陈照传. 1988. 浅谈运用冷冻除湿原理实现干燥的前景. 广东农机, (3): 19~21
 张心耳, 张安殊, 杨金铭, 等. 1988. 热泵厢式干燥装置. 化工装备技术, (8): 25~28
 张跃, 邹寿平, 宿芬. 1992. 模糊数学方法及其应用. 北京: 煤炭工业出版社, 227~230
 杨荣良. 1989. 香菇烘烤原理与技术. 中国食用菌, (3): 40~41
 高允彦. 1988. 正交及回归试验设计方法. 北京: 冶金工业出版社, 165~173
 魏权龄, 王日爽, 徐兵, 等. 1984. 数学规划与优化设计. 北京: 国防工业出版社, 483~484

(下转第116页)

参 考 文 献

曾文才. 1994. 矩阵可对角化的充要条件及其相似变换矩阵的构造. 华南农业大学学报, 15(3):145~150

The Construction of Similarity Inverse Transformation Matrices of a Diagonalizable Matrix

Zeng Wencai

(College of Science, South China Agric. Univ. , Guangzhou, 510642)

Abstract This paper proves and provides a new method for constructing the similarity inverse transformation matrices of diagonalization matrix.

Key words eigenvalues; eigenvectors; similarity inverse transformation matrices; diagonalization

【责任编辑 张 砾】

(上接第 107 页)

Study on the Heat Pump Dehumidifying and Thermal Airflow Drying *Flammulina velutipes*

Ye Shengying Li Yuanzhi Luo Shucan

(Dept. of Food Science, South China Agric. Univ. , Guangzhou, 510642)

Abstract Heat pump dehumidifying and thermal airflow drying equipment were used to carry out drying tests on *Flammulina velutipes* by means of quadratic cross rotary regression design. The pattern of the effect of (1) mean airflow velocity, (2) material water content at the change over point from heat pump dehumidifying to thermal airflow drying and (3) temperature of thermal airflow on dehydration rate, energy consumption and rehydration rate of dried product was probed. The optimum parameters for this drying process were provided.

Key words *Flammulina velutipes*; heat pump dehumidifying and thermal airflow drying; optimum parameters

【责任编辑 李 玲】