

协同加热除湿烘干机设计及其香菇 烘干性能的测试

Design of drying machine with co-heating and dehumidification and
testing of its drying performance on shiitake mushrooms

鲍煌杰 郭文文 李国能 石宇鑫 张梦婕

BAO Huangjie GUO Wenwen LI Guoneng SHI Yuxin ZHANG Mengjie

(浙江科技学院机械与能源学院, 浙江 杭州 310023)

(School of Machinery and Energy, Zhejiang University of Science and Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

摘要:目的:提高香菇干燥效率、减少烘干耗电量。方法:设计了一种新型协同加热除湿烘干机,该烘干机以半导体制冷片为主要部件,其热端为热源加热空气用于烘干香菇,冷端为冷源用于冷凝水蒸气除水,整体采用封闭式设计;采用该设备测试了不同干燥温度(55,65 ℃)和样品质量(200,400 g)下的香菇烘干速率,并采用 9 种薄层数学干燥模型对干燥速率进行动力学模拟。结果:Midilli 模型比其他模型能更好地预测干燥效果。温度越高,香菇颜色变化越大,收缩率越高。该烘干机的综合能效比达到 1.96,烘干香菇的耗电量为 81.21 MJ/kg。结论:采用试验机烘干的香菇水分含量、颜色变化等指标均符合国家标准,且与传统电加热烘干机比较,其节能效果显著。

关键词:协同加热除湿;节能减排;半导体制冷;香菇;干燥模型

Abstract: Objective: In order to improve the mushroom drying efficiency and reduce the power consumption, a new type of co-heating and dehumidification drying machine was designed and built. Methods: The drying machine was a closed system, which took the semiconductor refrigeration piece as the main component, with its hot end as heat source for air pre-heating and its cold end as the cold source for water vapor condensation. On the device, the mushroom drying rate at different drying temperatures (55 and 65 ℃) and sample mass (200 and 400 g)

were tested. Results: Nine thin layer mathematical drying models were used to simulate the drying rate, which revealed that the Midilli model had a better predict effect than the others. In addition, it was found that the higher drying temperature resulted in a greater color change and a higher shrinkage rate. The comprehensive energy efficiency ratio of the drying machine was 1.96, and the power consumption of drying mushroom was 81.21 MJ/kg. Conclusion: In the experiment, the indexes such as moisture content and color change of dried mushroom met the national standards, and the energy-saving effect was remarkable compared with the traditional electric heating drying machine.

Keywords: co-heating and dehumidification; energy saving and emission reduction; semiconductor refrigeration; mushroom; drying model

香菇是高蛋白、低脂营养食物,但新鲜香菇不易贮藏,采摘后通常需要晾干。传统香菇烘干设备依赖于木柴、汽油、电阻丝等热源,被加热的空气流经物料带走水蒸气,达到干燥的目的。这种方式多用于大批量烘干加工如大型农场等,能源消耗大,并产生大量烟气,污染环境,且在干燥过程中有害物质容易进入,影响香菇品质。此外,传统的香菇干燥室存在热不均匀的问题,因此在干燥过程中需要上下翻转香菇,浪费时间和精力,使干燥工艺效率低下。

除了传统的干燥室外,还有电加热烘干和热泵烘干,电加热式烘干机的工作原理是用通电的电阻丝加热空气,热空气使得待烘干的物品所含水分快速蒸发,而含较多水蒸气的热空气直接排出体系。电加热干燥是将电能直接转化为热量,能耗大,运行成本高^[1]。热泵干燥是通过传递环境或其他废热中的热量对物料进行烘干,节能高

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51906220);浙江省自然科学基金重点项(编号:LZ21E060001)

作者简介:鲍煌杰,男,浙江科技学院在读硕士研究生。

通信作者:郭文文(1988—),女,浙江科技学院副教授,博士。

E-mail: 115030@zust.edu.cn

收稿日期:2023-04-08 **改回日期:**2023-10-10

效且对环境更友好。但现有的热泵烘干技术存在智能调节性较差、温湿度波动较大、系统运行效率低、运行寿命短等问题,因此热泵烘房难以推广应用。

蔡有杰等^[2]设计了一种顺流式玉米烘干塔温度控制系统,采用多传感器均匀布点检测与模糊控制技术,可以有效保证粮食的烘干温度保持在设定的安全温度范围内;吕磊等^[3]利用自制的旋风式油菜籽烘干机进行干燥试验,研究了旋风式干燥方式下油菜籽的最佳干燥工艺参数为干燥温度 85 ℃、气流速度 19 m/s、分级器内孔直径 136 mm;安兆元等^[4]以 $k-\epsilon$ 湍流模型作为模拟分析的理论模型,采用 Fluent 应用软件对烘干室进行模拟仿真运算,使烘干室的热空气利用效率提高、各出口处风速均匀。

传统电加热烘干箱的主要缺点是直接将湿热空气排出系统,造成很大的能量损失。研究拟设计一款以半导体制冷片为核心部件的干燥箱,通过测定香菇每小时质量的减少以获得香菇的烘干速率,并采用薄层数学干燥模型对干燥速率进行动力学模拟,通过分光光度计测量对比烘干前后色度的变化,计算香菇的烘干能耗,并与文献进行对比,以此来综合评价试验机的合理性,以期在设计制作高效节能型香菇烘干机提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验原料

新鲜香菇:冬菇,选取相同品种且大小、颜色相近的香菇,香菇平均直径约为 4.5 cm,将新鲜香菇用清水洗净滤干,市售。

1.2 烘干设备设计

1.2.1 设备整体设计 选取合适的冷热源是改善传统烘干箱的关键。半导体制冷片通电后热电制冷可用于预热线空气从而用于香菇烘干,而热电制冷的冷端则可用于湿空气的冷凝。热电制冷制热相互依存共生,所以能够实现热量的回收,提高整个系统的能效^[5]。设计中烘干箱采用一种简单的回型封闭式循环结构(见图 1)便于回收热量,并设计了水回路和风回路两部分。外形上以风回路为主体,其前部为主要工作区域,设单开门,顶部安装冷热源单元,冷热源单元风道出口为集水处,设置集水箱。水回路部分位于箱体中间,设水泵及水箱,水泵引水至冷热源单元的热端,回收后进入箱体底部的散热器,最终回到水箱中完成循环。

新型的协同加热除湿烘干机系统如图 2 所示。通过换热器将冷热源单元热电效应产生的热量传至箱体下方空气加热机组,加热后的干燥热空气经循环风机均匀进入工作区域,在穿过物料层时进行热质交换,此时热空气相对湿度升高,变为潮湿的热空气,实现对物料的烘干。而后湿热的空气从工作区域上方的回风道进入冷凝机组

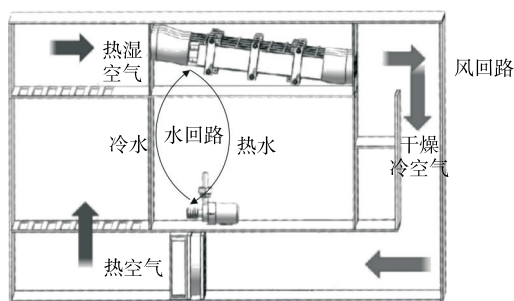


图 1 回型循环结构干燥箱简图

Figure 1 Simple diagram of loop structure drying machine

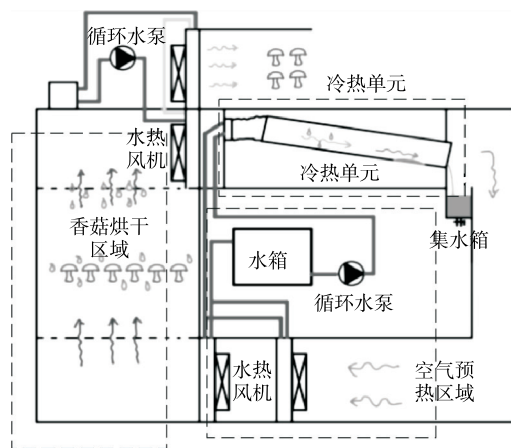


图 2 协同加热除湿烘干机系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of co-heating and dehumidification drying machine

再进行质热交换,变成相对冷空气,其中的水分凝结收集于水箱。冷空气于箱体下方空气加热机组加热为热空气,箱内较干燥的热空气的相对湿度降低,经循环风机均匀进入物料区域烘干物料,重复上述过程。与普通电热烘干机相比,烘干冷凝同时进行,且不用额外的能耗,对环境的湿污染和热污染显著降低。

1.2.2 关键设备——冷热单元设计 以半导体制冷片为冷热源,半导体制冷片的两面分别为冷源和热源(图 3)。冷源连接冷风道,为使含水较多的热空气在风道内冷凝出水,需设计较小的空气入口和较长的流道。试验采用两片一侧含有圆柱形肋片的散热板组成冷凝风道,半导体制冷片涂抹硅脂后均匀排布于散热板另一侧;热源处采用水冷头完全覆盖在涂抹硅脂的半导体制冷片热侧进行水冷散热。每组冷热源由两片散热板、两组半导体制冷片和两个水冷头组成,并使用螺柱紧固缝隙处做密封处理。

冷热源单元中采用的半导体制冷片型号为 TEPI-126T200,制冷片尺寸为 40 mm×40 mm×3 mm,半导体热电偶对的材料为 BiTe,热面温度最高可达 120 ℃,为取

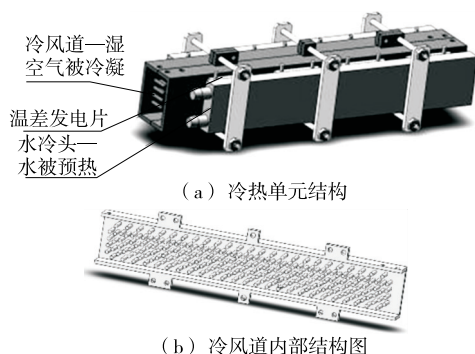


图 3 冷热单元结构简图

Figure 3 Heating & cooling units structure

得足够的热量并兼顾整体体积,取 32 片半导体制冷片,每 4 片一组串联,8 组半导体制冷片并联接入电源并排布于冷风道两侧。水冷头为网购预制的铝质水冷头,尺寸为 $40\text{ mm} \times 240\text{ mm} \times 12\text{ mm}$;冷风道由两片翅片式换热器组成,其内部布有直径 3 mm 的肋柱,冷风道尺寸为 $272\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 。

1.2.2 设备组装 试验选择亚克力板搭建试验设备,按照设计思路将半导体制冷片、水冷头、风机、循环水泵、水箱等各装置组装完成,冷热源单元的进风口使用软管与箱体连接,出风口直接卡在箱体上并使用玻璃胶进行密封;换热器与箱体通过预制孔用螺栓连接;水管在通过箱体时采用船板宝塔接头,能够使水管连接稳定。

1.3 烘干试验

每次干燥试验时,选取同批次含水量一致的新鲜香菇为研究对象,将洗净后的样品称重,分别称取等质量的两等份每份 200 g,记为 m_1 、 m_2 。取质量为 m_1 的香菇置于实验室干燥箱中,温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$,每隔 30 min 称重,直至连续两次干燥试样质量不再减少。取质量为 m_2 的香菇置于试验机工作区域中,分 3 层均匀分布在托盘上,首先打开循环水泵和散热风机,再打开冷热源单元,试验环境为恒压,干燥温度分别为 55 、 $65\text{ }^\circ\text{C}$ (干燥温度通过制冷片加热电压调节)。在冷凝通风口处用风速测量仪测量干燥室的干燥风速为 2.2 m/s 左右。当样品含水率处于恒定时,停止干燥,试验过程中每隔 30 min 称重。将干燥后的样品于室温下冷却 15 min 后,立即装入真空密封袋供后续分析。更换香菇批次,选择质量为 400 g 的香菇样品,重复上述试验步骤。所有试验均重复 3 次,并取平均值。

1.4 指标测定

1.4.1 含水率 按 NY 5095—2002 执行。干燥过程中,干燥空气的相对湿度持续波动,因此将水分比简化为 M_t/M_{in} 。定义的湿度比为:

$$MR = M_t / M_{in}, \quad (1)$$

式中:

MR ——湿度;

M_{in} ——初始含水量, kg/kg ;

M_t —— t 时刻的水分含量, kg/kg 。

1.4.2 干燥曲线的数学模型 采用非线性回归—最小二乘法对烘干过程数据进行分析,采用 9 个薄层干燥模型用于拟合试验数据,检验试验值与模型计算值的拟合程度,模型方程见表 1。采用 3 个标准评价各模型的拟合适用性,即相关系数 (R^2)、简化卡方 (χ^2) 和均方根误差 (RMSE)。模型的 R^2 越大,而 χ^2 和 RMSE 越小,表示此数学模型与试验数据的拟合度越高。 χ^2 和 RMSE 定义为:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pred},i})^2, \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{\text{exp},i} - MR_{\text{pred},i})^2 \right]^{0.5}, \quad (3)$$

式中:

$MR_{\text{exp},i}$ ——试验湿度比;

$MR_{\text{pred},i}$ ——预测湿度比;

N ——试验数据点数;

n ——模型中的参数值。

表 1 薄层干燥模型

Table 1 Thin layer drying models

模型名称	模型
Modified page ^[6]	$MR = \exp[-(kt)^n]$
Henderson and Pabis ^[7]	$MR = a \exp(-kt)$
Logarithmic ^[8]	$MR = a \exp(-kt) + c$
Two-term model ^[9]	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
Approximation of diffusion ^[10]	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kbt)$
Wang and Singh ^[11]	$MR = 1 + at + bt^2$
Simplified Fick's diffusion ^[12]	$MR = a \exp[-c(t/L^2)]$
Modified Page equation-II ^[12]	$MR = \exp[-c(t/L^2)^n]$
Midilli ^[13]	$MR = a \exp[-k(t^n)] + bt$

1.4.3 设备能耗计算

$$E = W \times t, \quad (4)$$

$$W = W_p + W_{\text{pump}} + W_{\text{fan}}, \quad (5)$$

$$q = E/m, \quad (6)$$

式中:

E ——设备工作过程中所耗能量, kJ ;

t ——设备试验过程中的总时长, s ;

W ——整套设备的工作功率, W ;

W_p ——半导体制冷片的总功率, W ;

W_{pump} ——水泵的总功率, W ;

W_{fan} ——风机的总功率, W ;

q ——单位质量香菇烘干能耗, kJ/kg ;

m ——样品香菇质量, kg 。

1.4.4 能效比计算

$$\eta = Q_t / E, \quad (7)$$

$$Q_t = Q_h + Q_c, \quad (8)$$

$$Q_c = c_p \times m_a \times (T_{c1} - T_{c2}), \quad (9)$$

$$Q_h = c_p \times m_a \times (T_{h2} - T_{h1}), \quad (10)$$

式中:

η ——协同加热除湿烘干机能效比;

m_a ——循环空气质量流量, kg/s;

c_p ——循环空气定压比热容, kJ/(kg·°C);

Q_h ——循环空气从协同加热除湿烘干机热侧所获得的热量, W;

Q_c ——循环空气从协同加热除湿烘干机冷侧所获得的冷量, W;

Q_t ——循环空气从协同加热除湿烘干机中获得的总能量, W;

T_{c1} ——协同加热除湿烘干机冷侧进口温度, °C;

T_{c2} ——协同加热除湿烘干机冷侧出口温度, °C;

T_{h1} ——协同加热除湿烘干机热侧进口温度, °C;

T_{h2} ——协同加热除湿烘干机热侧出口温度, °C。

1.4.5 颜色测定 用 NR60CP⁺ 色差仪测定香菇干燥前后的颜色值(L 、 a 、 b 值)^[14]。每个样品不同位置至少测定 5 次, 并按式(11)、式(12)计算总颜色退化(ΔE)。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}, \quad (11)$$

$$\Delta L = L - L_0, \Delta a = a - a_0, \Delta b = b - b_0. \quad (12)$$

1.4.6 收缩率 采用排体积法^[15], 并按式(13)计算香菇收缩率。

$$R = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \times 100\%, \quad (13)$$

式中:

R ——收缩率, %;

V_0 、 V_t ——香菇初始体积和干燥 t 时刻的香菇体积, cm³。

1.4.7 数据处理 采用 OriginPro 2022 SR1 软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 干燥曲线

烘干温度会影响香菇烘干速率、色度及营养成分等。一般工业上的香菇干燥温度为 65 °C, 因此试验机的干燥温度为 65 °C, 同时对比了低温度(55 °C)下的烘干速率。由图 4 可知, 当样品质量为 200 g 时, 随着干燥温度从 55 °C 增加到 65 °C, 烘干时间减少。当干燥温度为 65 °C 时, 烘干时间为 10 h; 当样品质量为 400 g, 干燥温度为 55 °C 时, 烘干时间则延长至 16 h。当干燥温度为 65 °C 时, 香菇质量为 200, 400 g 的最大烘干效率分别为 0.45, 0.52 g/min; 当干燥温度为 55 °C 时, 香菇质量为 200,

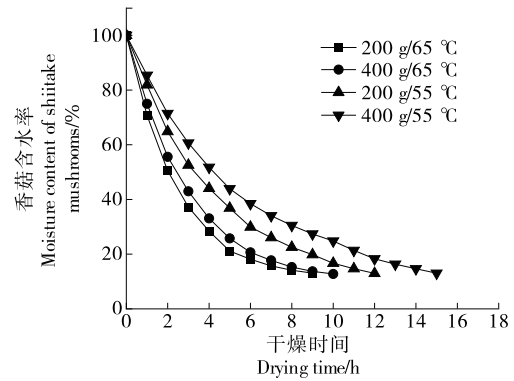


图 4 香菇烘干含水量变化趋势

Figure 4 The variation trend of mushroom water content with time

400 g 的最大烘干效率分别为 0.24, 0.34 g/min。说明干燥温度和烘干样品质量对烘干速率均有影响, 在初始样品质量相同的情况下, 烘干温度越高, 烘干时间越短; 在烘干温度相同的情况下, 样品质量越大, 烘干时间越长。每种情况的初始干燥速率均较高, 且当含水量逐渐减少时干燥速率减慢。

65 °C 下 200 g 香菇干燥前 3 h 内试样湿基含水率下降了 51%, 10 h 内达到最低湿基含水率 12.54%; 65 °C 下 400 g 香菇干燥前 4 h 内试样湿基含水率下降了 58%, 11 h 内达到最低湿基含水率(12.76%), 干燥效果明显。根据 NY 5095—2002, 干香菇的含水率标准为 <13%, 试验所得香菇试样含水率符合国家标准, 说明其烘干效果明显, 且样品无异味、形状规则整齐, 褶皱清晰, 符合市场销售的要求。

2.2 干燥特性

采用 9 个薄层动力学模型对不同温度和质量香菇烘干动力学数据进行统计分析, 结果见表 2。由表 2 可知, 9 种模型中 Midilli 模型具有较高的 R^2 值和较低的 χ^2 值。Midilli 模型的最高相关系数达 0.999 91, 最低相关系数为 0.998 96, 最低均方根误差为 1.0×10^{-5} , 说明该模型的拟合程度较高, 能准确描述烘干过程的水分变化。

采用 Midilli 模型拟合的香菇烘干动力学模型为:

$$MR = a \exp[-k(t^n)] + bt, \quad (14)$$

$$t = 55 \text{ °C}, m = 200 \text{ g}, MR = 1.0037 \exp[-0.2252(t^{0.9714})] + 0.0045t, \quad (15)$$

$$t = 65 \text{ °C}, m = 200 \text{ g}, MR = 1.0004 \exp[-0.3635(t^{0.9840})] + 0.0098t, \quad (16)$$

$$t = 55 \text{ °C}, m = 400 \text{ g}, MR = 1.0063 \exp[-0.1851(t^{0.9291})] + 0.0024t, \quad (17)$$

$$t = 65 \text{ °C}, m = 400 \text{ g}, MR = 1.0004 \exp[-0.3026(t^{1.0034})] + 0.0081t, \quad (18)$$

式中:

t ——干燥时间；

MR ——样品湿度比。

2.3 产品特性分析

由表 3 可知,干燥温度和样品质量对香菇颜色降解

有显著影响。在较高温度下干燥,比在较低温度下干燥能产生更大程度的香菇颜色变化,是因为在较高温度下香菇的酶促褐变反应加快。色差表示样品与新鲜蘑菇颜色相比的整体颜色变化程度。质量好的脱水香菇应该有

表 2 不同温度和样品质量下香菇烘干的薄层干燥模型拟合结果

Table 2 The fitting results of mushroom thin layer drying models under different temperatures and masses

模型名称	$T/^{\circ}\text{C}$	m/g	常数	R^2	χ^2	RMSE
Modified page	55	200	$k=0.196\ 1, n=0.891\ 9$	0.998\ 27	0.000\ 14	0.001\ 57
	65	200	$k=0.310\ 8, n=0.792\ 8$	0.993\ 29	0.000\ 60	0.005\ 40
	55	400	$k=0.151\ 7, n=0.885\ 8$	0.998\ 42	0.000\ 12	0.001\ 65
	65	400	$k=0.268\ 4, n=0.858\ 6$	0.996\ 51	0.000\ 32	0.002\ 85
Henderson and Pabis	55	200	$a=0.976\ 5, k=0.189\ 1$	0.994\ 62	0.000\ 44	0.004\ 88
	65	200	$a=0.959\ 4, k=0.285\ 2$	0.979\ 90	0.001\ 80	0.016\ 19
	55	400	$a=0.971\ 0, k=0.145\ 4$	0.994\ 33	0.000\ 42	0.005\ 94
	65	400	$a=0.972\ 3, k=0.255\ 1$	0.990\ 48	0.000\ 86	0.007\ 78
Logarithmic	55	200	$a=0.920\ 9, k=0.236\ 4, c=0.081\ 3$	0.999\ 53	0.000\ 04	0.000\ 43
	65	200	$a=0.897\ 3, k=0.406\ 6, c=0.105\ 6$	0.999\ 75	0.000\ 03	0.000\ 20
	55	400	$a=0.915\ 2, k=0.182\ 3, c=0.082\ 9$	0.998\ 85	0.000\ 09	0.001\ 20
	65	400	$a=0.913\ 1, k=0.334\ 3, c=0.090\ 3$	0.999\ 80	0.000\ 02	0.000\ 16
Two-term model	55	200	$a=0.225\ 3, k_0=0.067\ 3, b=0.779\ 5, k_1=0.268\ 4$	0.999\ 60	0.000\ 04	0.000\ 36
	65	200	$a=0.061\ 1, k_0=-0.055\ 1, b=0.939\ 4, k_1=0.381\ 5$	0.999\ 87	0.000\ 02	0.000\ 11
	55	400	$a=0.589\ 1, k_0=0.101\ 0, b=0.417\ 7, k_1=0.297\ 6$	0.999\ 38	0.000\ 05	0.000\ 65
	65	400	$a=0.034\ 7, k_0=-0.089\ 4, b=0.966\ 2, k_1=0.309\ 9$	0.999\ 91	0.000\ 01	0.000\ 07
Approximation of diffusion	55	200	$a=1.548\ 5, k=0.194\ 2, b=1.000\ 0$	0.993\ 56	0.000\ 05	0.005\ 85
	65	200	$a=1.548\ 5, k=0.298\ 9, b=1.000\ 6$	0.977\ 14	0.002\ 05	0.018\ 42
	55	400	$a=1.548\ 5, k=0.150\ 5, b=1.000\ 0$	0.992\ 68	0.000\ 55	0.007\ 67
	65	400	$a=1.548\ 5, k=0.263\ 1, b=1.000\ 0$	0.989\ 11	0.000\ 99	0.008\ 90
Wang and Singh	55	200	$a=-0.166\ 3, b=0.008\ 1$	0.986\ 98	0.001\ 07	0.011\ 82
	65	200	$a=-0.239\ 2, b=0.015\ 8$	0.968\ 16	0.002\ 85	0.025\ 66
	55	400	$a=-0.129\ 8, b=0.005\ 0$	0.983\ 87	0.001\ 21	0.016\ 90
	65	400	$a=-0.219\ 1, b=0.013\ 7$	0.984\ 04	0.001\ 45	0.013\ 04
Simplified Fick's diffusion	55	200	$a=0.976\ 5, c=0.099\ 1, l=0.725\ 3$	0.994\ 61	0.000\ 49	0.004\ 89
	65	200	$a=0.959\ 4, c=0.015\ 4, l=0.232\ 1$	0.979\ 90	0.002\ 02	0.016\ 19
	55	400	$a=0.971\ 0, c=0.140\ 0, l=0.982\ 4$	0.994\ 32	0.000\ 46	0.005\ 95
	65	400	$a=0.972\ 2, c=0.016\ 2, l=0.251\ 8$	0.990\ 48	0.000\ 97	0.007\ 78
Modified Page equation-II	55	200	$c=0.161\ 3, l=-0.812\ 4, n=0.892\ 2$	0.998\ 27	0.000\ 16	0.001\ 57
	65	200	$c=0.296\ 4, l=-0.833\ 4, n=0.793\ 2$	0.993\ 29	0.000\ 68	0.005\ 40
	55	400	$c=0.254\ 1, l=-1.184\ 9, n=0.886\ 0$	0.998\ 42	0.000\ 13	0.001\ 65
	65	400	$c=0.296\ 3, l=-0.950\ 7, n=0.858\ 8$	0.996\ 51	0.000\ 36	0.002\ 85
Midilli	55	200	$a=1.003\ 7, k=0.225\ 2, n=0.971\ 4, b=0.004\ 5$	0.999\ 45	0.000\ 06	0.000\ 50
	65	200	$a=1.000\ 4, k=0.363\ 5, n=0.984\ 0, b=0.009\ 8$	0.999\ 85	0.000\ 02	0.000\ 12
	55	400	$a=1.006\ 3, k=0.185\ 1, n=0.929\ 1, b=0.002\ 4$	0.998\ 96	0.000\ 09	0.001\ 09
	65	400	$a=1.000\ 4, k=0.302\ 6, n=1.003\ 4, b=0.008\ 1$	0.999\ 91	0.000\ 01	0.000\ 07

表 3 经 4 种干燥条件下香菇的颜色特征
Table 3 Color characteristics of *Lentinus edodes* under 4 drying conditions

样品类别	ΔL	Δa	Δb	ΔE	香菇收缩率/%
55 ℃/200 g	10.50	1.70	1.17	10.70	66.67
55 ℃/400 g	9.38	3.82	3.25	10.64	61.91
65 ℃/200 g	12.38	5.36	10.22	16.92	78.57
65 ℃/400 g	14.14	3.54	6.76	16.07	75.11

一个较小的 ΔE 值,试验烘干的香菇菇形完整,色差与新鲜香菇相差较小,符合 GB/T 38581—2020 标准。

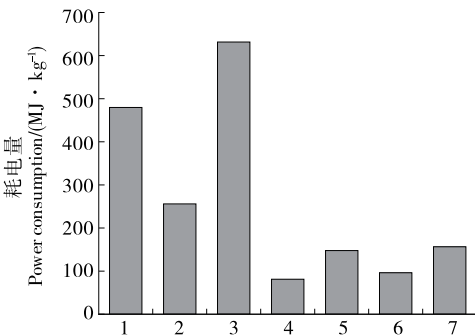
65 ℃/200 g 下香菇收缩率最高,为 78.57%;其次是 65 ℃/400 g 的;55 ℃/400 g 下香菇收缩率为 61.91%,为 4 种条件下最低的;其次是 55 ℃/200 g 的,其收缩率为 66.67%。食物干燥是涉及食物内部的质量、热量和动量运输相关的复杂过程,65 ℃/200 g 下的收缩率高可以解释为试验提供了较高的干燥温度,较高的干燥温度给产品更多的水分收缩,且在质量不同的情况下,样品质量少使得香菇表面与热空气接触面积更加充分。55 ℃试验期间,温度的降低可以抑制干燥收缩。总体而言,65 ℃的香菇收缩率显著大于 55 ℃的。

2.4 能耗分析

香菇烘干过程的耗电量会影响香菇生产成本。就试验设备而言,设定半导体制冷片输入电压 72 V,此时烘干温度为 65 ℃。其他各设备功率为:水泵 5 个,总功率为 25 W;半导体制冷片 32 片,总功率为 731.5 W;大功率风机 4 个,总功率为 48 W;小功率风机 4 个,总功率 15.84 W,所有设备总功率为 820.34 W。当烘干样品质量为 200 g 时,经试验香菇在 10 h 内能达到最低烘干标准,烘干香菇耗电量为 147.67 MJ/kg;当烘干香菇质量为 400 g 时,耗电量为 81.21 MJ/kg;当烘干样品香菇质量为 200 g,烘干温度为 55 ℃时,耗电量为 156.41 MJ/kg;当烘干香菇质量为 400 g 时,耗电量为 96.26 MJ/kg。

Hossein 等^[16]采用脉冲电场预处理时耗电量最低,为(255.89±11.57) MJ/kg,高于试验机烘干香菇的耗电量(见图 5),表明试验设备具有较好的节能效果。

试验机中肋片采用铝制品,其导热性能良好,接触处采用导热硅脂进行填补,减小了传热损耗,提高了设备的响应速度,在设备冷热回路中均设有温度测量点,便于对设备运行时进行温度监控。当半导体电压为 72 V 时,整个设备总输入功率为 820.34 W,此时,热侧入口温度为 30.2 ℃,热侧出口温度为 66.5 ℃;冷侧入口温度为 60.0 ℃,冷侧出口温度为 32.2 ℃。进入干燥区的风速为 0.3 m/s,截面积为 0.064 m²,进入冷凝区的风速为



1. 热风干燥 US 30 min 2. 热风干燥 PEF-Zp 为 0.6 3. 热风干燥 CB 4. 试验设备 400 g/65 ℃ 5. 试验设备 200 g/65 ℃ 6. 试验设备 400 g/55 ℃ 7. 试验设备 200 g/55 ℃

图 5 试验机烘干香菇和热风干燥^[16]香菇的耗电量对比
Figure 5 Power consumption comparison of drying mushroom by the designed drying machine and hot air drying technology in the literature

4.62 m/s,截面积为 0.004 16 m²,根据式(7)计算得 $\eta = 1.96$ 。

试验产品基于半导体制冷片、合理的冷热传递方式和合理的空气流道,使其在工作稳态时,半导体制冷片热端产生的热量用于使循环空气升温,随着干燥温度的升高,空气的绝对湿度不变,相对湿度降低,使循环空气变为高温干燥空气用于烘干,而半导体制冷片冷端产生的冷量通过肋片传递给经过烘干物后相对湿度上升后的湿润循环空气,使其温度下降,随着相对湿度的升高,水分冷凝并通过水槽排出。试验合理应用了半导体制冷片冷热侧的能量,节能效果突出。

3 结论

研究设计了一种协同加热除湿烘干机,并对香菇的干燥效果和干燥性能进行了测试。结果表明,随着干燥温度的升高和样品质量的降低,香菇的烘干时间缩短,当干燥温度为 65 ℃时,香菇质量为 200,400 g 的最大烘干效率分别为 0.45,0.52 g/min;采用 9 个薄层干燥模型用于拟合香菇干燥速率,其中 Midilli 模型能较好地预测香菇的薄层干燥特性,其最高相关系数达 0.999 91,最低相关系数为 0.998 96;香菇的颜色降解随干燥温度的升高而增加;香菇的收缩率随干燥温度的升高而增加。试验机在干燥过程中香菇受热均匀,协同烘干技术是一种接近自然干燥的温和干燥方法,能有效减少香菇热变性和变色;试验产品利用半导体制冷片热端产生的热量用于使循环空气升温,用于烘干香菇;而半导体制冷片冷端产生的冷量通过肋片传递给经过烘干物后相对湿度上升后的湿润循环空气,使其温度下降,结构设计合理,达到较高的能效比 1.96,烘干香菇耗电量为 81.21 MJ/kg,节能效

果突出。但试验未能深入研究试验机风道结构对香菇烘干速率和能耗的影响,后续将采用数值模拟对风道结构进行模拟及优化,以进一步降低流道压损达到节能的效果。

参考文献

- [1] LIU Y, ZHAO K, JIU M, et al. Design and drying technology research of heat pump lentinula edodes drying room[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 983-988.
- [2] 蔡有杰, 吴志东, 王雪峰, 等. 顺流式玉米烘干塔温度控制系统开发与改进[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 85-89.
CAI Y J, WU Z D, WANG X F, et al. Development and improvement of temperature control system for smooth-current corn drying tower[J]. Food & Machinery, 2017, 33(2): 85-89.
- [3] 吕磊, 吴明亮, Cedric, 等. 基于旋风式烘干机的油菜籽干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 109-113.
LU L, WU M L, Cedric, et al. Optimization of rapeseed drying process based on the cyclone dryer[J]. Food & Machinery, 2017, 33(5): 109-113.
- [4] 安兆元, 师占群. 新型粉丝烘干室流场模拟与结构优化[J]. 食品与机械, 2022, 38(2): 68-73.
AN Z Y, SHI Z Q. Flow field simulation and structure optimization of the new fan drying chamber[J]. Food & Machinery, 2022, 38(2): 68-73.
- [5] 刘兴龙, 马雪峰. 半导体制冷技术及应用路径研究[J]. 信息记录材料, 2021, 22(4): 131-132.
LIU X L, MA X F. Research on semiconductor refrigeration technology and application path [J]. Information Recording Materials, 2021, 22(4): 131-132.
- [6] HACIHAFIZOGLU O, CIHAN A, KAHVECI K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice [J]. Food and Bioproducts Processing, 2008, 86: 268-275.
- [7] NOURHENE B, MOHAMMED B K, NABILA K. Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves[J]. Food and Bioproducts Processing, 2008, 86: 176-184.
- [8] SHIBY V K, MISHRA H N. Thin layer modelling of recirculatory convective air drying of curd (Indian yoghurt) [J]. Food and Bioproducts Processing, 2007, 85(C3): 193-201.
- [9] HENDERSON S M. Progress in developing the thin layer drying equation[J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17: 1 167-1 168.
- [10] YALDIZ O, ERTEKIN C. Thin layer solar drying of some vegetables[J]. Drying Technology, 2001, 19(3): 583-596.
- [11] WANG C Y, SINGH R P. Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying [J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 1978, 11: 668-672.
- [12] DIAMANTE L M, MUNRO P A. Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices[J]. International Journal of Food Science and Technology, 1991, 26: 99.
- [13] MIDILLI A, KUCUK H, YAPAR Z. A new model for single-layer drying[J]. Drying Technology, 2002, 20(7): 1 503-1 513.
- [14] 沈超怡, 吴清燕, 饶景珊, 等. 等离子水处理对马铃薯杀菌保鲜效果的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(19): 9-15.
SHEN C Y, WU Q Y, RAO J S, et al. Effect of plasma water treatment on sterilization and preservation of potato[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 9-15.
- [15] WANG H, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (Lentinus edodes) [J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1 791-1 802.
- [16] HOSSEIN M B, HAMDAMI N, TORABI P, et al. Impact of different pretreatments on drying kinetics and quality of button mushroom slices dried by hot-air or electrohydrodynamic drying [J]. LWT, 2022, 155: 112894.

欢迎订阅《粮食与食品工业》

- CNKI 中国期刊全文数据库收录期刊
- 万方数据中国数字化期刊群收录期刊
- 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊
- 中文科技期刊数据库收录期刊

《粮食与食品工业》杂志是集粮油基础理论、实际应用于一体的综合科技期刊,已成为米、面、油、食品、淀粉及深加工、仓储、检化验等行业发布新技术、新产品、新成果信息的良好载体,工程技术人员交流技术、切磋技艺的合适平台,是中国粮油学会食品分会、油脂分会和发酵面食分会会刊。主要设置专题综述、粮油工程、食品科技、生物工程、粮食流通技术、粮油建筑工程、粮油装备与自动控制、粮油市场、发酵面食、标准与检测、信息传递等栏目。国内外公开发行,双月 15 日出版,大 16K 本。

订阅方法:

- 邮发代号:28-197,全国各邮局(所)均可订阅,每期定价 8 元,全年定价 48 元。
- 现金订阅:直接通过邮局汇款至《粮食与食品工业》编辑部订阅,全年定价 60 元(包括平邮邮费),本处常年办理订阅业务。
- 银行汇款:

帐户:无锡中粮工程科技有限公司 开户行:江苏银行无锡城郊支行
帐号:881010188900000277

联系方式:

地址:无锡市惠河路 186 号 《粮食与食品工业》编辑部
邮编:214035 电话:0510-85867384,85867515-660
传真:0510-85867384 E-mail:lsyspgy@126.com

欢迎订阅

敬请赐稿

欢迎刊登广告