

倾斜料盘式气体射流冲击干燥机设计与试验*

代建武 肖红伟 谢龙 王栋 李晓明 高振江

(中国农业大学工学院,北京 100083)

摘要:针对平板式气体射流冲击装置存在的装料量小、干燥不均匀、干燥结壳等问题,设计了一种倾斜料盘式气体射流冲击干燥机。该干燥机由倾斜料盘车、干燥室、热空气循环利用系统、干燥加湿和控制系统等组成,干燥过程中可根据不同物料的干燥特性,对料盘托架倾角、料盘距喷嘴间距、喷嘴排列间距等结构参数和干燥室内气流温度、湿度、风速等工艺参数在一定范围内进行调节。以哈密瓜片为试验物料进行了性能试验,满装载量相比传统射流冲击装置提高了1.7倍,而干燥时间缩短了11.1%,干燥机的处理能力相对于后者提高了3.65倍,单位能耗降低了67.9%,且干燥均匀系数达0.97,干燥后的成品色泽褐变及收缩程度更小。所设计干燥机提高了气体射流冲击干燥装置的装载量,确保了干燥过程的均匀性,改善了干后品质。

关键词:干燥机 气体射流冲击 倾斜料盘 结构设计 性能试验

中图分类号: S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0238-07

Design and Experiment of Tilted Tray Air-impingement Dryer

Dai Jianwu Xiao Hongwei Xie Long Wang Dong Li Xiaoming Gao Zhenjiang

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of conventional air-impingement dryer such as small loading capacity, no uniformity of drying and crustation, a tilted tray air-impingement dryer was designed. This apparatus was composed of tilted tray skip, drying chamber, hot air recycling system, humidifying system and control system. The technological and structural parameters of the dryer, for instance, drying temperature, absolute humidity, airflow velocity, inclination angle, separation distance and nozzle arrangement can be adjusted according to different material properties and products requirement. The experimental results of Hami melon slices demonstrated that the drying uniformity coefficient can reach to 0.97. The carrying capacity and the dehydration intensity of the dryer were increased by 1.7 times and 3.65 times, respectively, compared with the conventional air-impingement dryer at the same temperature. And the drying time was shortened by 11.1% at the same time. The unit energy consumption of Hami melon slices treated by tilted tray air-impingement dryer was about 67.9% lower than that by the conventional way. Both the browning degree and shrinkage level were better than that of the latter. This research improves the loading capacity and adaptability of materials, which provide significance in enlarging applied range of air-impingement technology.

Key words: Dryer Air-impingement Tilted tray Structure design Performance experiment

引言

干燥能够去除物料中多余的水分,从而抑制微

生物的活性,是食品安全贮藏的保证,同时也是农产品产地初加工的一种重要方法^[1-3]。气体射流冲击干燥技术是一种新的干燥技术,具有气流速度快、流

收稿日期:2014-11-06 修回日期:2014-11-23

*国家自然科学基金资助项目(31201436)

作者简介:代建武,博士生,主要从事农产品机械化生产技术与装备研究,E-mail: daijianwu@126.com

通讯作者:高振江,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: zjgao@cau.edu.cn

程短、气流与物料表面之间边界层非常薄、传热速率可控等特点,与传统的热风干燥技术相比具有较高的对流换热系数和干燥速度^[4]。近年来,气体射流冲击干燥技术已被应用于西洋参片^[5]、肉苁蓉片^[6]、红薯薯条^[7]、葡萄^[8-9]、杏子^[10]、哈密瓜片^[11-12]、线辣椒^[13]、板栗^[14]等多种物料的干燥加工,取得了一定的研究成果。但是,由于目前的垂直式气体射流冲击干燥装置存在以下几个突出问题,限制了该技术的大面积推广应用:①干燥腔室内仅可平铺一层物料,单位面积喷管组冲刷物料面积有限,装载量小。②喷嘴与物料的位置相对固定,料盘上不同位置的物料干燥不均匀。③缺少加湿装置和湿度控制系统,物料易结壳。因此,研究设计新的气体射流冲击干燥机以解决上述突出问题,促进该技术的推广应用已势在必行。

针对装料量不足的问题,姚雪东等^[15]设计了一种气流冲击式转筒干燥机,提高了物料的装载量,并将其应用于披碱草种子的干燥,取得了良好的效果。这种转筒式气体射流冲击干燥机仅适用于流动性较好的颗粒状物料,但对于像西洋参片、山药片等薄片状物料则无法使用。针对喷嘴与物料间的位置相对固定所造成的干燥不均匀问题,王丽红等^[16]设计了一种脉动式气体射流冲击干燥机,并将其应用于圣女果的干燥试验,解决了干燥均匀性的问题。但该机的空间利用率低,装载量与能耗匹配性有待提高。国内外学者研究发现,当气体射流冲击料盘上的物料时,随着气流喷射方向与料盘平面间角度的降低,传热系数在各点的分布对称性和滞止点的移动变化就会更加均匀^[17-20]。

温湿度一体化控制干燥技术是近些年发展起来的一种新型干燥技术,利用干燥介质在相同温度下焓值随其湿含量的增加而不断增加的特性,基于物料的状态实时控制干燥过程中不同阶段的介质温度及湿含量,并调控介质湿含量在整体干燥过程中呈阶梯性降低的规律,保持以较大焓值和较高传热效率实现农产品物料的干燥,同时避免温度对物料品质的不利影响,获得较优干燥品质^[21-24]。而且,研究表明干燥介质保持一定的相对湿度能够减少物料干燥过程中的结壳、有利于物料干后的复水^[25]。

因此,针对上述问题本文拟结合温湿度一体化控制技术,设计一种倾斜料盘式气体射流冲击干燥机,通过多层料盘倾斜的料盘结构,解决装料量小的问题;通过调节料盘托架倾角、料盘与喷嘴间距、喷嘴排列间距等结构参数实现均匀干燥;通过加湿系统和温湿度一体化控制克服干燥结壳,提高干燥品质。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

倾斜料盘式气体射流冲击干燥机主要由控制系统、离心风机、气流分配室、料盘车、加热和加湿系统等组成,总体结构如图1所示。

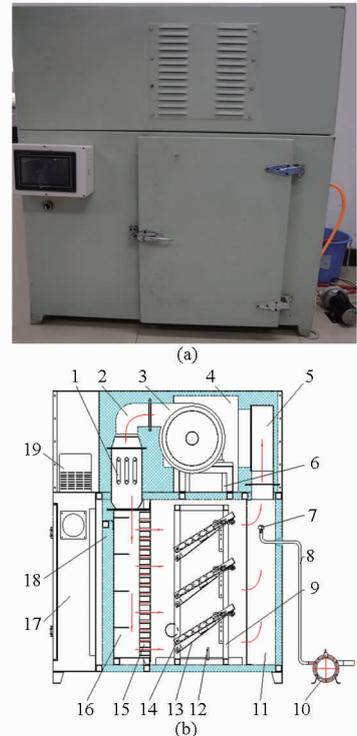


图1 倾斜料盘式气流冲击干燥机实物及结构示意图

Fig. 1 Prototype structure and schematic of tilted tray air-impingement dryer

(a) 试验装置实物图 (b) 结构示意图

1. 加热系统 2. 进风通道 3. 离心风机 4. 进气混合腔室
5. 回风通道 6. 离心风机底座 7. 喷头 8. 出水管 9. 料架
10. 水泵 11. 气流加湿腔室 12. 温湿度传感器 13. 料盘挡板
14. 料盘托架 15. 喷管组 16. 气流分配腔室 17. 控制机箱
18. 保温层 19. 变频器

干燥机作业时,可根据不同物料的干燥特性,对料盘托架倾角、料盘距喷嘴间距、喷嘴排列形式等结构参数和干燥室内气流温度、湿度、风速等工艺参数在一定范围内进行调节。料盘车采用多层料盘倾斜的排列结构,与喷管组构成了多个射流冲击单元,与传统的垂直冲击方式仅能装载一排物料相比,单位面积喷管组冲刷的物料量得到较大提高,因而得到有效冲击的床层面积和装载量也相对大幅度增加。同时在干燥过程中充分利用介质的焓值加热及均匀气流场的冲刷特性,确保了物料干燥过程的均匀性。料盘内部安装多条格栅,保证倾斜时物料不会堆积。该干燥机对物料适应性强,能够适应颗粒尺寸、形状以及密度相差较大的物料。

该干燥机因高速热气流与物料接触作用时间

短,机架、干燥室外侧、离心风机及加热装置均包裹有保温材料,且干燥室经回风管路与风机进风口相连,故可确保余热回收循环利用,降低了能耗。

当湿度传感器检测到气流湿度低于设定值下限时,控制系统启动喷头雾化加湿,直至其达到设定参数时停止。而当气流湿度超过设定值上限时,位于正压区域的排湿电磁阀打开,高湿空气自动排至干燥室外,同时在大气压的作用下,等量的低湿新鲜空气由位于负压区的进气管吸入至加热装置,确保换气后即被加热,实现干燥机的换气控湿,并为温湿度一体化控制干燥技术提供基础。倾斜料盘式气体射流冲击干燥机的主要技术参数如表1所示。

表1 主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters

参数	数值
干燥室长/mm	1 860
干燥室宽/mm	860
干燥室高/mm	925
风速调节范围/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0 ~ 25
风温调节范围/ $^{\circ}\text{C}$	室温 ~ 150
空气湿含量调节范围/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	10 ~ 200
料盘托架倾角调节范围/ $^{\circ}$	0 ~ 30
喷嘴排列间距调节范围/mm	28 ~ 56

1.2 工作原理

热空气在高压离心风机的作用下,通过出风通道将具有一定温湿度与流速的热气流输送至气流分配室,其中内置有多个喷嘴的喷管组固定于气流分配室与干燥室之间。热气流在气流分配室流场耦合作用下,经喷嘴以均匀流速水平地冲击料架上多排倾斜放置的物料。与此同时控制系统根据设定参数实时调节干燥室内的湿含量变化,确保干燥介质保持在相对较高的焓值与湿含量水平,提高传热效率并减少干燥结壳,以此实现物料的快速干燥。

2 关键部件设计

2.1 气流分配室

气流分配室主要承担着优化流场分布,平均分配喷管流速的重要作用,而不合理的结构设计会导致喷管出口的气流速度不一致,继而影响到物料在干燥过程中品质的均一性,同时还会延长整体干燥时间,增加能耗^[26]。因此,为了确保喷管出口风速上下均匀一致,本文以气体运动微分方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型为基础,使用 Fluent 6.2 软件对气流分配室进行数值模拟优化设计,在原始模型的基础上分别调整分配腔室下端间距,构造半圆柱扰流及安装多块平板扰流方式并对改进效果进行对比分

析。入口及出口边界分别选择速度入口和压力出口边界条件,固壁条件采用无滑移条件。

原始模型的分配腔室呈长方体,长、宽、高分别为 310、115、640 mm;进风端位于分配腔室正上方,入口尺寸(长×宽)为 115 mm×100 mm;喷管组采用矩阵排列方式固接于分配腔室表面,喷管直径及长度分别为 18、54 mm。喷管组共 15 排,每排 7 支喷管,标定最上端为第一排喷管,依次至最下端为第 15 排喷管。综合比较模拟结果可知,调整分配腔室下端间距的模型随着间距的不断降低,喷嘴出口的平均值从第 1 排至 15 排呈现依次增加的分布规律,气流强弱依然明显,并未很好地解决问题。构造半圆柱扰流模型的结果与圆柱半径有较大关联,出口风速的分布沿高度方向均呈跳跃变化的规律。安装多块平板扰流模型的效果最优,且平板间距 h 及第一块板与喷管轴线间距 L 分别为 160、14 mm 时,各排喷管之间气流速度差别很小,出口风速分布均匀性得到有效提高,示意图和三维结构如图 2 所示。速度偏差比 E 用来评价不同高度方向喷管气流速度的偏差程度^[27]。

$$E = \frac{|\bar{V}_L - \bar{V}_a|}{\bar{V}_a} \times 100\%$$

式中 \bar{V}_L ——各排喷管气流速度的平均值, m/s
 \bar{V}_a ——速度分布的总体均值, m/s

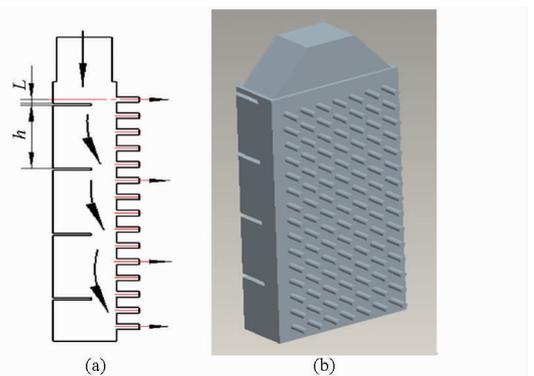


图2 气流分配室优化结构示意图及三维图

Fig.2 Physical structure of the optimum design

(a) 结构示意图 (b) 三维图

气流分配室优化结构的喷管出口风速测量结果如表 2 所示。由表 2 可知,改进后的气流分配室在不同工况下速度偏差比 E 均明显低于原始模型的 24.6%,且随着流量增加 E 呈现逐渐减小的趋势,出口风速总体分布比较均匀,解决了原始模型分布不一致的问题,并对类似于干燥机气流分配室结构的均匀性设计提供了一定的参考和借鉴。

2.2 料架与喷嘴模块

为提高干燥机的装载量,料架采用倾斜配置的多层排列结构。其中,料盘托架及料盘挡板的安装

位置分别与喷管组的对应喷嘴高度一致,共同构成了多个射流冲击单元。料盘挡板置于托架下方,其转动端经滑动件与料盘托架实现滑动连接。工作时根据干燥物料的特性,灵活调节料盘托架及挡板的倾斜角度至合适值,以此平衡局部气流冲击速度,提高物料干燥的均匀性。料盘车结构如图 3 所示。

表 2 气流分配室出口风速测量结果

Tab.2 Velocity distribution of the optimum design

工况	流量 Q /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	平均流速 \bar{V}_a /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大偏差 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度偏差 比 $E/\%$
小流量	174	3.5	0.3	8.6
设计流量	700	14.2	1.1	7.7
大流量	1043	21.5	1.5	7.3

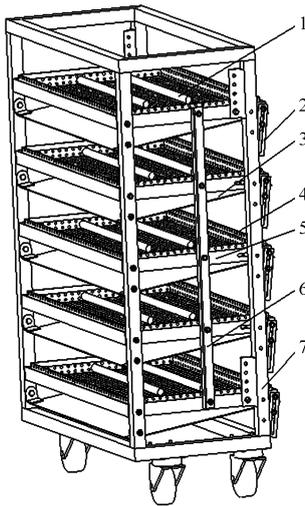


图 3 料盘车结构示意图

Fig. 3 Physical structure diagram of tilted tray skip

1. 料盘格栅
2. 滑动件
3. 料盘挡板
4. 料盘
5. 料盘托架
6. 平行四连杆连接件
7. 料架

在倾斜料盘式气体射流冲击干燥机中,喷嘴模块选择矩形排列方式,如图 4 所示。相关研究表明,在喷嘴横向间距 x_n 及纵向间距 y_n 介于 $(2 \sim 5)d$ (d 为喷嘴直径) 范围时,顺排阵列的强化换热效果好于叉排阵列方式,特别是沿阵列射流下游矩形排列的优势更为显著^[28]。因此,本文选择喷嘴间距作为结构参数进行分析研究,并确保其在上述变化范围内可调。

2.3 湿度调节系统

湿度调控是温湿度一体化控制干燥技术的基础,贯穿于整个干燥过程。湿度调节系统主要包括湿度传感器、水泵、进出水管道、过滤装置、雾化喷头及电磁阀等部件,其结构如图 1 所示。干燥前期启动水泵,水经过滤装置及进出水管道后通过喷头雾化,对干燥室内热空气进行加湿,保持一定的时间以较高焓值促进物料内部升温及水分扩散;干燥中后

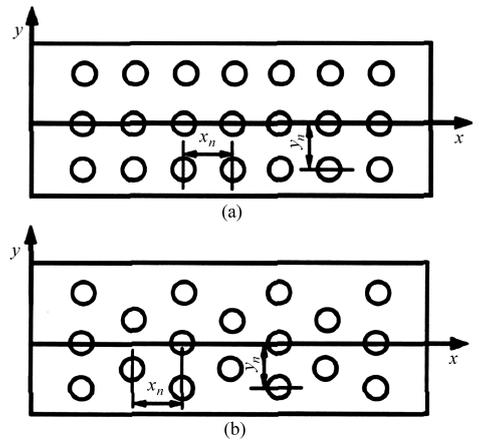


图 4 喷嘴排列方式示意图

Fig. 4 Schematic structure of jet impingement array

- (a) 顺排阵列
- (b) 叉排阵列

期依据物料状态阶梯降低干燥室内空气湿含量,开启位于正压区域的排湿电磁阀,并与进气管形成换气通道,实现快速强制排潮,从而保持合适的水蒸气分压梯度,提高物料干燥速率。

为确保雾化加湿效果,喷头安装于回风区且喷口向上,雾化粒径不超过 $50 \mu\text{m}$,以利用离心风机的二次雾化减少因水珠凝结而导致的积水。

2.4 控制系统

控制系统的作用是实现对干燥机内温湿度数据的采集、显示与控制。本系统温度调控依靠高速气流快速冲刷加热管,使得温度的调控非常灵敏,控制精度保持在 $\pm 1^\circ\text{C}$; 相对湿度的调控依靠干燥腔室及进气口的强制对流实现,控制精度为 $\pm 2.0\%$,控湿系统调节湿度至设定值耗时 3 min 内,对试验过程的影响可忽略不计。控制系统结构如图 5 所示。

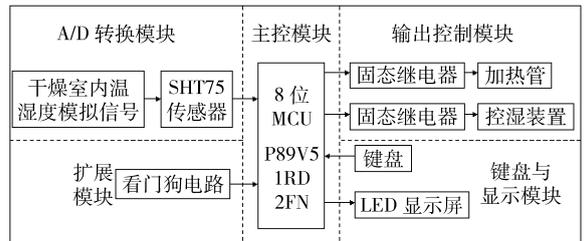


图 5 控制系统硬件结构框图

Fig. 5 Block diagram of control system

(1) 主控模块:以 P89V51RD2FN 为核心,用于完成整个系统的信号采样、数据处理及测量结果显示等任务。

(2) 扩展模块:设置外围扩展看门狗电路,负责系统中断电数据保存、看门狗、上电掉电复位及电源电压监控等功能。

(3) A/D 转换模块:选用数字式温湿度传感器 SHT75 芯片,与单片机进行数字交换。

(4) 输出控制模块:用于输出数字信号,通过控

制继电器开关来实现加热管、排湿电磁阀和水泵的通断。

(5) 键盘及显示模块:用于接收数值输入命令输入、显示数值及提示信息等。

3 性能验证试验

以哈密瓜片为试验材料进行倾斜料盘式气体射流冲击干燥机的性能验证试验,初始湿基含水率为90%。设置料盘托架倾角为10°,喷嘴间距为3倍喷嘴直径,即42 mm,喷嘴距料盘边缘距离为6倍喷嘴直径,即84 mm,风温为60°C,风速为15 m/s,相对湿度的调控等间距划分为70%、50%、30%和10%共4个干燥段,前3分段时间均设定为2 h,为确保干燥过程充分进行,将终了干燥段的时间设定为6 h。将哈密瓜去瓤去皮后切成厚度为10 mm,长约50 mm,宽约30 mm的薄片并单层平铺在倾斜的多个料盘上。单个料盘尺寸(长×宽)分别为300 mm×250 mm,该干燥机的满装载量共3 820 g。鲜品及干燥后的成品如图6所示。

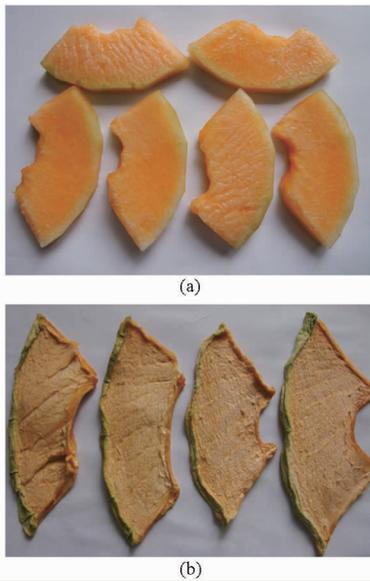


图6 哈密瓜片鲜品及成品实物图

Fig. 6 Fresh and drying product of Hami melon slices under tilted tray air-impingement drying

(a) 哈密瓜鲜品 (b) 哈密瓜干燥后的成品

用干燥机单位时间单位气体射流冲击面积的去水强度表示干燥机的处理能力^[16],其表达式为

$$D_a = \frac{md_1(x_0 - x_f)}{St_f} \quad (1)$$

式中 D_a ——去水强度, $g/(m^2 \cdot h)$
 m ——干燥机的总装料质量, g
 d_1 ——物料的干物质质量分数, %
 S ——干燥机的气体射流冲击面积, m^2
 x_0 ——初始干基含水率, %
 x_f ——终了干基含水率, %
 t_f ——干燥至终了含水率所用的时间, h

干燥机内料盘不同位置的干燥均匀性用克里斯琴森均匀系数 C_u 表示^[29]

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |M_i - \bar{M}|}{n\bar{M}} \quad (2)$$

式中 M_i ——料盘第 i 段的物料含水率, g/g
 \bar{M} ——料盘内物料的平均含水率, g/g
 n ——料盘不同位置的分段个数

本文中干燥机喷嘴模块的长、宽分别为570 mm和250 mm,计算得出喷嘴的气体射流冲击面积为0.142 5 m^2 。料盘划分为前半段和后半段,即 n 为2。在喷嘴冲击面积相同,物料特征,温度及风速一致的前提下,倾斜料盘式气体射流冲击干燥机与常规的气流垂直冲击干燥机^[30]的去水强度对比结果如表3所示。

由表3可知,倾斜式气体射流冲击干燥方式的满装载量及去水强度均大大高于常规的垂直气流冲击干燥方式,相同喷嘴面积下受到有效冲击干燥的满装载量为3 820 g,比垂直方式提高了1.7倍,而单层去水强度相对于垂直方式提高了3.65倍,且干燥时间缩短了11.1%,平均能耗相对于后者减小了67.9%。因此,与常规的气流垂直冲击干燥相比,倾斜式气体射流冲击干燥机明显提高了干燥机的处理能力,去水强度得到很大程度的提高,缩短了干燥时间,单位能耗大幅度降低,提高了气体射流冲击技术的应用范围。

哈密瓜片采用不同干燥方式的干燥曲线如图7所示。为验证倾斜料盘式气体射流冲击干燥机的均匀性,待料盘内物料的总平均含水率降至安全含水率12%^[31]时,测量并计算料盘前半部和后半部

表3 不同干燥方式的去水强度对比结果

Tab. 3 Comparison of dehydration intensity by different drying methods

干燥方式	料盘状态	物料结壳	满装载量/g	干燥耗时/h	总能耗/(kW·h)	平均能耗/(kW·h·kg ⁻¹)	去水强度/(g·m ⁻² ·h ⁻¹)	备注
倾斜式气流冲击干燥	倾斜	否	3 820	8	7.0	2.07	2 970.2	$\frac{D_{a1}}{D_{a2}} = 4.65$
垂直式气流冲击干燥	水平	是	1 401	9	8.0	6.44	638.8	

物料的含水率分别为 11.6% 和 12.4%。根据克里斯琴森均匀系数的计算公式求得 C_u 值为 0.97, 含水率偏差程度 σ^2 仅为 0.16, 说明该结构的干燥均匀性较好, 完全能够满足实际工作要求。

在色泽方面, 表 4 所述的倾斜式气流冲击干燥及常规的垂直式气流冲击干燥后的产品与鲜品的色差 ΔE 分别为 16.68 和 29.26, 明亮度 L^* 分别为 72.57 和 61.46, 蓝黄值 b^* 分别为 43.47 和 50.29, 说明倾斜冲击干燥后成品的色泽明显强于垂直冲击的传统方式, 褐变程度更小, 干后品质更优。在收缩特性方面, 2 种方式下 10 mm 厚哈密瓜片干燥后的平均厚度分别为 1.6 mm 和 1.1 mm, 表明其收缩程

度比常规方式较小, 更有利于保持哈密瓜片干燥后的体积。

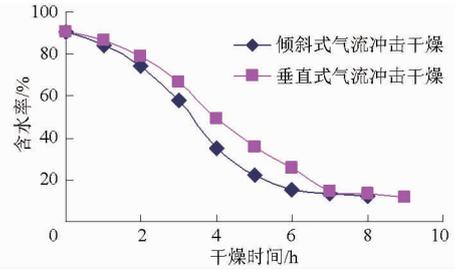


图7 哈密瓜片 60°C 下不同干燥方式的干燥曲线

Fig.7 Drying curves of Hami melon slices under different drying methods at 60°C

表 4 不同干燥方式的干后品质对比结果

Tab.4 Comparison of drying quality using different drying methods

干燥方式	干燥温度/°C	干燥风速/(m·s ⁻¹)	明亮度 L^*	红绿值 a^*	蓝黄值 b^*	色差 ΔE	厚度/mm
干燥前			87.28 ± 3.37 ^a	19.42 ± 2.23 ^a	36.52 ± 4.84 ^c	0	10 ± 0.1 ^a
倾斜冲击干燥	60	15	72.57 ± 2.57 ^b	15.74 ± 1.41 ^b	43.47 ± 0.51 ^b	16.68	1.6 ± 0.1 ^b
垂直冲击干燥	60	15	61.46 ± 0.15 ^c	19.57 ± 1.21 ^a	50.29 ± 1.32 ^a	29.26	1.1 ± 0.15 ^c

注:同一列不同小写字母(a、b、c)表示不同干燥方式差异显著($P < 0.05$)。

4 结论

(1) 针对平板式气体射流冲击装置存在的装料量小、干燥不均匀、干燥结壳等问题, 设计了一种倾斜料盘式气体射流冲击干燥机。工作时可根据不同的物料特性和产品要求灵活调整料盘托架倾角、料盘距喷嘴间距、喷嘴排列间距等结构参数和干燥室内气流温度、湿度、风速等工艺参数, 并能适应颗粒尺寸、形状以及密度相差较大的物料。

(2) 料车采用倾斜配置的多层排列结构, 较大地提高了物料装载量; 料盘托架及料盘挡板倾角灵活可调, 以此平衡局部气流冲击速度, 并结合湿热气

流的冲刷包裹特性, 改善了干燥过程的均匀性; 控制系统基于物料状态对干燥室内温度、湿度及风速实时进行调节与控制, 利用温湿度一体化控制干燥技术焓值加热的技术手段提高了传热效率, 实现了物料的快速干燥。

(3) 以哈密瓜为试验物料对所设计的干燥机进行了性能试验。结果表明: 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机与常规的气流垂直冲击干燥装置相比, 满装载量提高了 1.7 倍, 干燥时间缩短了 11.1%, 单位能耗降低了 67.9%, 干燥机的处理能力提高了 3.65 倍, 且干燥均匀系数达到 0.97, 干燥后的褐变及收缩程度更小。

参 考 文 献

- 1 朱明. 我国农产品产地初加工现状与发展路径思考[J]. 农业工程技术·农产品加工业, 2014(4): 10-12.
- 2 刘云宏, 朱文学, 刘建学. 地黄真空红外辐射干燥质热传递分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 135-140.
Liu Yunhong, Zhu Wenxue, Liu Jianxue. Mass and heat transfer analysis of vacuum infrared radiation drying on *Rehmanniae*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 135-140. (in Chinese)
- 3 王相友, 张海鹏, 张丽丽, 等. 胡萝卜切片红外干燥特性与数学模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 198-202.
Wang Xiangyou, Zhang Haipeng, Zhang Lili, et al. Infrared radiation drying characteristics and mathematical model for carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 198-202. (in Chinese)
- 4 高振江. 气体射流冲击颗粒物料干燥机理与参数试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
Gao Zhenjiang. Experimental research on mechanism and parameters of air-impingement jet drying of particulate materials[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- 5 Xiao Hongwei, Law Chunglim, Sun Dawen, et al. Color change kinetics of American ginseng (*Panax quinquefolium*) slices during air impingement drying[J]. Drying Technology, 2014, 32(4): 418-427.
- 6 杜友, 郭玉海, 崔旭盛, 等. 鲜肉苜蓿气体射流冲击干燥工艺[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 334-337.
- 7 Xiao Hongwei, Lin Hai, Yao Xuedong, et al. Effects of different pretreatments on drying kinetics and quality of sweet potato bars undergoing air impingement drying[J]. International Journal of Food Engineering, 2009, 5(5): 253-260.
- 8 Bai Junwen, Sun Dawen, Xiao Hongwei, et al. Novel high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment enhances drying kinetics and color attributes of seedless grapes[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013,

20:230-237.

- 9 Xiao Hongwei, Pang Changle, Wang Lihong, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2):233-240.
- 10 肖红伟, 张世湘, 白峻文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 318-323.
- 11 郑霞, 肖红伟, 王丽红, 等. 红外联合气体射流冲击方法缩短哈密瓜的干燥时间[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 262-269.
- 12 张茜, 肖红伟, 代建武, 等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊1): 382-388.
Zhang Qian, Xiao Hongwei, Dai Jianwu, et al. Air impingement drying characteristics and drying model of Hami melon flake[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Supp.1): 382-388. (in Chinese)
- 13 张茜, 肖红伟, 杨旭海, 等. 预处理对线辣椒气体射流冲击干燥特性和色泽的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 276-281.
- 14 娄正, 高振江, 肖红伟, 等. 板栗气体射流冲击干燥特性和工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 368-373.
Lou Zheng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Air impingement drying characteristics and process optimization of chestnut [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 368-373. (in Chinese)
- 15 姚雪东, 肖红伟, 高振江, 等. 气流冲击式转筒干燥机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(10): 67-70.
Yao Xuedong, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Design and experiment of air-impingement rotary dryer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(10): 67-70. (in Chinese)
- 16 王丽红, 高振江, 林海, 等. 脉动式气体射流冲击干燥机[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(10): 141-144.
Wang Lihong, Gao Zhenjiang, Lin Hai, et al. Pulsed air-impingement dryer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(10): 141-144. (in Chinese)
- 17 Stevens J, Webb B W. The effect of inclination on local heat transfer under an axisymmetric free liquid jet[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, 34(4-5): 1227-1236.
- 18 Beitelmal A H, Saad M A, Patel C D. The effect of inclination on the heat transfer between a flat surface and an impinging two-dimensional air jet[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, 21(2): 156-163.
- 19 Vipat O, Feng S S, Kim T, et al. Asymmetric entrainment effect on the local surface temperature of a flat plate heated by an obliquely impinging two-dimensional jet[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21-22): 5250-5257.
- 20 钱吉裕, 平丽浩, 徐德好, 等. 冲击角对射流强化换热影响的数值研究[J]. *工程热物理学报*, 2007, 28(增刊2): 65-68.
Qian Jiyu, Ping Lihao, Xu Dehao, et al. Numerical investigation of the effects of the oblique angle on the local performance of impinging jets[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(Supp.2): 65-68. (in Chinese)
- 21 熊善柏, 赵思明. 人造米高温高湿干燥研究[J]. *食品科学*, 2000, 21(8): 31-33.
Xiong Shanbo, Zhao Siming. High temperature and high humidity drying of artificially formed rice[J]. *Food Science*, 2000, 21(8): 31-33. (in Chinese)
- 22 贾磊, 孔进喜, 刘艳红, 等. 黎豆荚高温高湿干燥工艺的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(12): 251-254.
Jia Lei, Kong Jinxi, Liu Yanhong, et al. Studies on high temperature and humidity drying of velvetbean[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 33(12): 251-254. (in Chinese)
- 23 赵思明, 谭汝成, 刘友明, 等. 方便米粉高温高湿干燥数学模型研究[J]. *食品科学*, 2003, 24(7): 52-54.
Zhao Siming, Tan Rucheng, Liu Youming, et al. Mathematical modeling of instant rice noodles during the high temperature and high moisture drying process[J]. *Food Science*, 2003, 24(7): 52-54. (in Chinese)
- 24 张晓辛. 食用菌干燥技术与设备[J]. *中国食用菌*, 1993, 12(4): 42-45.
Zhang Xiaoxin. Edible fungi drying technology and equipment[J]. *Edible Fungi of China*, 1993, 12(4): 42-45. (in Chinese)
- 25 Dai Jianwu, Rao Junquan, Wang Dong, et al. Process-based drying temperature and humidity integration control enhances drying kinetics of apricot halves[J]. *Drying Technology*, 2014, 22(3): 285-298.
- 26 代建武, 肖红伟, 白峻文, 等. 气体射流冲击干燥机气流分配室流场模拟与结构优化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(3): 69-76.
Dai Jianwu, Xiao Hongwei, Bai Junwen, et al. Numerical simulation and optimum design on airflow distribution chamber of air-impingement jet dryer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(3): 69-76. (in Chinese)
- 27 雷贤良, 李会雄, 张庆, 等. 锅炉转向室烟气调节屏的调节性能与优化设计[J]. *华中科技大学学报*, 2011, 39(10):128-132.
Lei Xianliang, Li Huixiong, Zhang Qing, et al. Regulation performance and optimal design of the gas adjust-screen in boiler steering rooms[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2011, 39(10): 128-132. (in Chinese)
- 28 王磊, 张靖周, 杨卫华. 密集型阵列冲击射流换热特性实验[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(6): 1264-1269.
Wang Lei, Zhang Jingzhou, Yang Weihua. Experimental research on heat transfer characteristics of denser jet array impingement [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(6): 1264-1269. (in Chinese)
- 29 李久生, 尹剑锋, 张航, 等. 滴灌均匀系数对土壤水分和氮素分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 27-33.
Li Jiusheng, Yin Jianfeng, Zhang Hang, et al. Field evaluation of drip fertigation uniformity effects on distributions of water and nitrate in soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(12): 27-33. (in Chinese)
- 30 中国农业大学. 水平式气体射流冲击烤箱:中国, 02238211.9[P]. 2003-05-07.
China Agricultural University. Air-impingement oven in aclinic mode: China, 02238211.9[P]. 2003-05-07. (in Chinese)
- 31 王涵. 低糖哈密瓜脯的加工技术及物性研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012.
Wang Han. Study on processing technology and physical properties of low-sugar preserved Hami melon[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012. (in Chinese)