

# 脉动式气体射流冲击干燥机<sup>\*</sup>

王丽红<sup>1,2</sup> 高振江<sup>1</sup> 林海<sup>2</sup> 肖红伟<sup>1</sup> 张茜<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

**【摘要】** 为解决气体射流冲击干燥机装载量低、喷嘴直径与喷嘴出口形状更换困难等问题,设计了一种脉动式气体射流冲击干燥机。该干燥机可根据不同物料调整风温、风速、料架转速及喷嘴直径与出口形状。干燥过程中物料受脉动高速热气流的冲击,有利于物料内部水分向外迁移。以加工番茄为例进行了干燥机的性能验证试验,结果表明:脉动式气体射流冲击干燥与气体射流冲击干燥相比装载量和去水强度得到了较大的提高。

**关键词:** 脉动 气体射流冲击 干燥机 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(2011)10-0141-04

## Pulsed Air-impingement Dryer

Wang Lihong<sup>1,2</sup> Gao Zhenjiang<sup>1</sup> Lin Hai<sup>2</sup> Xiao Hongwei<sup>1</sup> Zhang Qian<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

### Abstract

A pulsed air-impingement dryer was designed with large processing capacity, convenient to replace the size and shape of the nozzle exit compared to conventional air-impingement dryer. The machine could adjust air temperature, wind speed, rotary speed of material shelf, nozzle diameter and structure according to different materials properties. Material was received the pulsed impact of high-speed hot air, which contributed to outward migration of moisture within the material. Tomato was adopted to test the performance of pulsed air-impingement dryer. The results showed that the dehydration intensity and processing capacity of pulsed air-impingement dryer was improved than the conventional air-impingement dryer.

**Key words** Pulse, Air-impingement, Dryer, Structure design, Performance experiment

### 引言

气体射流冲击技术是将具有一定压力的加热气体,经一定形状的喷嘴喷出,并直接冲击物料表面的一种干燥方法。气体射流冲击干燥技术与传统热风干燥技术相比,干燥效率较高<sup>[1]</sup>。在农产品加工领域,气体射流冲击干燥技术已经被应用于胡萝卜丁、无核紫葡萄、牧草种子、杏干等物料的干燥,取得了十分显著的效果<sup>[2-10]</sup>。但这种方法由于干燥过程中物料相对于喷嘴位置固定,容易造成干燥不均匀。同时,研究发现喷

嘴直径与喷嘴出口形状是影响气流喷射传热的主要因素之一<sup>[1]</sup>,而传统的干燥机一旦投入使用其喷嘴直径与喷嘴出口形状则无法改变或难以更换。

针对上述问题,本文设计脉动式气体射流冲击干燥机。该干燥机喷嘴采用组合式设计,只需拆卸一个紧固螺母就可实现喷嘴出风口大小与形状的改变。同时,在干燥过程中物料受到脉动高速热气流的冲击,不仅有助于物料内部水分向外迁移,又消除传统气体射流冲击干燥技术中物料与喷嘴位置相对固定而造成的干燥不均匀现象。

收稿日期: 2010-12-21 修回日期: 2011-01-14

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA100406)和北京市科技计划资助项目(Z101105053710002)

作者简介: 王丽红,博士生,石河子大学副教授,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: wlh\_shz@163.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

## 1 整体结构与工作原理

### 1.1 整体结构

脉动式气体射流冲击干燥机主要由控制系统、离心风机、加热系统、气流分配室、干燥室、喷嘴模块、料架、机架等组成,如图1所示。

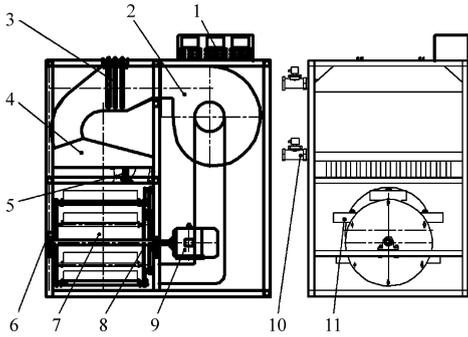


图1 脉动式气体射流冲击干燥机示意图

Fig.1 Schematic of pulsed air-impingement dryer

1. 控制系统 2. 离心风机 3. 加热系统 4. 气流分配室  
5. 喷嘴模块 6. 机架 7. 干燥室 8. 料架 9. 电动机 10. 排湿口  
11. 料盘

干燥室、离心风机、进回风管路、干燥机箱体均采用了保温处理,且干燥室底部经回风管路及风机进口相连,实现了余热的回收利用,降低了能耗。

控制系统能根据需要对干燥室的温度、湿度、风速以及料架转速进行调节与控制。

该干燥机可通过调整风温、风速、料架转速以及喷嘴的直径和结构形式用于不同物料的干燥。

脉动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
外形尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	1 150×820×1 650
干燥室尺寸(长×宽×高)/mm×mm×mm	600×500×750
风速调节范围/ $m \cdot s^{-1}$	0~30
风温调节范围/ $^{\circ}C$	20~150
风温控制精度/ $^{\circ}C$	$\pm 0.5$
喷嘴直径调节范围/mm	$\leq 22$
料架转速调节范围/ $r \cdot min^{-1}$	0~15

### 1.2 工作原理

气流经离心风机离心加速后被送至加热管表面,进行热量交换。装有多个喷嘴模块的固定板位于气流分配室与干燥室之间,加热后的气流经风道送至气流分配室,并被均匀地分配到与之相通各个喷嘴,气流经喷嘴自上而下送入干燥室。干燥室内料盘绕料架轴匀速旋转且始终垂直于气流方向。

当料盘转至最上方时物料受到的气流冲击最大,随着料架旋转,物料受到的气流冲击逐渐减小,直到最小值;随着料架继续旋转,物料受到的气流冲击逐渐增大;当料盘转至最上方时,物料受到的气流冲击又成为最大。如此循环,实现了物料的脉动式干燥。

干燥室内仍具有较高温度的气体经回风管道送至风机,实现余热的回收利用。

当湿度传感器检测到气流湿度超过设定值时,进气孔和排气孔通过电磁阀自动打开进行换气排湿。

## 2 主要工作部件设计

### 2.1 料架

为确保料盘转动过程中不会倾翻,料架采用平行四杆机构,其原理如图2所示。图中,主辐条与偏心辐条平行且相等,二者与连杆、机架组成平行四杆机构。

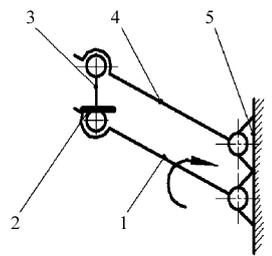


图2 料架工作原理图

Fig.2 Schematic of working principle

主辐条与偏心辐条均进行机构放大,用圆盘代替,主辐条替换为主动盘,偏心辐条替换为从动盘,则料架结构如图3所示。

料盘刚性装卡在料盘固定架上,拐臂与料盘固定架刚性连接。轴为主动圆盘的回转轴,且二者为刚性连接。从动圆盘绕偏心凸轮板上3个轴承所形成的圆心转动,其回转中心与主动圆盘回转中心的距离与拐臂两端铰接轴间的距离相等。拐臂两端分别与主动圆盘、从动圆盘铰接,这样由主动圆盘、拐臂、从动圆盘及机架组成了平行四杆机构。工作时主动圆盘回转中心与从动圆盘回转中心固定不动,当轴带动主动圆盘转动时拐臂始终与主动圆盘回转中心和从动圆盘回转中心的连线平行,从而保证固定于拐

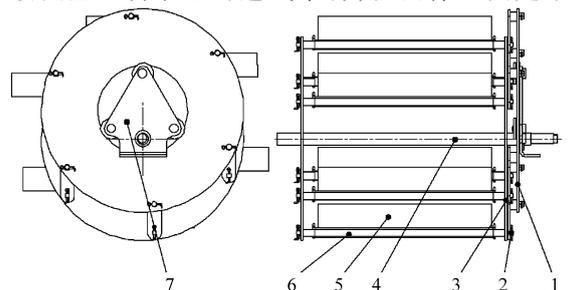


图3 料架结构图

Fig.3 Structure sketch of materiel shelf

1. 从动圆盘 2. 拐臂 3. 主动圆盘 4. 轴 5. 料盘 6. 料盘固定架 7. 偏心凸轮板

臂上的料盘固定架始终处于水平状态而不会翻转。

## 2.2 喷嘴模块

为适应不同物料的干燥,干燥机的喷嘴采用组合式设计,由射流管、喷嘴、密封圈、紧固螺母和固定板组成。喷嘴模块结构如图 4 所示。

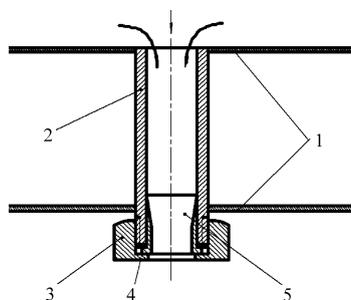


图 4 喷嘴模块结构图

Fig. 4 Structure sketch of nozzle module

1. 固定板 2. 射流管 3. 紧固螺母 4. 密封圈 5. 喷嘴

射流管嵌装于固定板上,射流管的出风口处设有喷嘴,喷嘴为内壁带弧面的漏斗状结构,喷嘴与射流管间隙配合,用紧固螺母将喷嘴固定在射流管上。

因此,只要保证喷嘴外径与射流管内径尺寸相等,喷嘴出风口大小与形状可以为一系列值。只需拆卸紧固螺母就可进行喷嘴出风口大小与形状的改变。

## 2.3 控制系统设计

控制系统用于干燥机内温、湿度数据的采集、显示与控制。控制系统如图 5 所示。

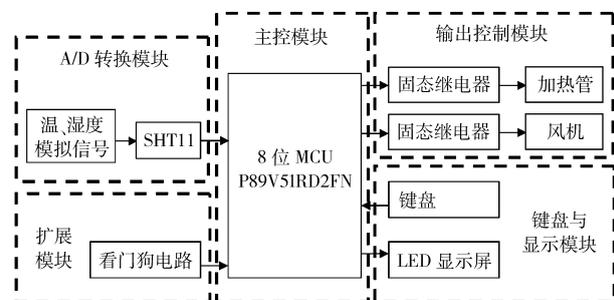


图 5 控制系统图

Fig. 5 Principle schematic of control system

(1) 主控模块 以 NXP 公司生产的 P89V51RD2FN 为核心,完成信号采样、数据处理及测量结果显示等任务。

(2) 扩展模块 以美国 Xicor 公司生产的 X5045 为核心的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功能。

(3) A/D 转换模块 选用盛世瑞恩公司生产的 SHT11 型数字式温、湿度传感器芯片,可直接与单片机进行数字交换。

(4) 输出控制模块 输出数字信号,通过控制继电器开关来实现加热管和风机电源的通断。

(5) 键盘及显示模块 采用由广州周立功单片机发展有限公司设计的 ZLG7289B 型专用数码管显示驱动及键盘扫描管理芯片驱动两片 8 位共阴极数码管,同时扫描管理 8 只按键。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

以加工番茄为例进行脉动式气体射流冲击干燥机的性能验证试验。选取喷嘴直径为 22 mm,料架转速为 9 r/min,料盘为带孔的不锈钢盘,风温为 75℃,风速为 14 m/s,加工番茄沿长轴方向一分为二,单层无重叠剖面向上平放在料盘上。

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,其表达式为

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

式中  $D_a$ ——单位气体射流冲击面积的去水强度,  $g/(m^2 \cdot h)$

$m$ ——干燥机的总装料量,  $g$

$d$ ——物料的干物质含量,  $g/g$

$S$ ——干燥机的射流冲击面积,  $m^2$

$x_0$ ——初始干基含水率,  $g/g$

$x_f$ ——终了干基含水率,  $g/g$

$t_f$ ——干燥至终了含水率所用的时间,  $h$

首先将摆满番茄的 2 个料盘置于料架最高处 (2 个料盘面积之和与射流板面积相当),料架不转 (即气体射流冲击干燥),当湿基含水率降至 11%<sup>[11]</sup>时停止试验;然后将重新摆满番茄的 6 个料盘置于干燥室内,使其绕料架轴作匀速转动 (即脉动式气体射流冲击干燥),当湿基含水率降至 11% 时停止试验。2 种情况的去水强度如表 2 所示。

表 2 去水强度对照

Tab. 2 Comparison of dehydration intensity

料盘状态	装载量/g	干燥耗时/h	去水强度/ $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	备注
2 盘置顶	1 768	10	444. 652	$\frac{d(x_0 - x_f)}{S} = 2. 515$
6 盘旋转	5 302	12	1 111. 211	

由表 2 可知,当 2 个料盘静止于料架最高处时干燥时间短,但装载量和去水强度较低;当 6 个料盘在干燥室内绕料架轴作匀速转动时,干燥时间虽然延长,但装载量和去水强度大大提高。因此,脉动式气体射流冲击干燥与气体射流冲击干燥相比,提高了干燥机的处理能力,降低了能耗。

干燥至安全含水率 11% 时,表 2 所述 2 种状态色差  $\Delta E$  分别为 5. 18 和 5. 16。这说明脉动式气体

射流冲击干燥与气体射流冲击干燥相比,色泽相差不大。

为验证脉动式气体射流冲击干燥的均匀性,首先将摆满番茄的料盘置于干燥室内静止不动,测量每片番茄的干基含水率,求得变异系数为 0.186;然后将重新摆满番茄的料盘置于干燥室内,使其绕料架轴作匀速转动,测量每片番茄的干基含水率,求得变异系数为 0.149。这说明,脉动式气体射流冲击干燥与气体射流冲击干燥相比干燥更加均匀。

## 4 结 论

(1) 设计了一种脉动式气体射流冲击干燥机,

工作时可根据不同的物料特性和要求来调整风温、风速、料架转速以及喷嘴直径与形状。

(2) 喷嘴模块采用了组合设计,更换喷嘴出风口大小与形状方便快捷。料架设计采用了平行四杆机构以确保料盘在工作过程中运转平稳而不会倾翻。控制系统能根据需要对干燥室的温度、湿度、风速以及料架转速进行调节与控制。

(3) 以加工番茄为试验物料对设计的干燥机进行了性能试验。结果表明:脉动式气体射流冲击干燥与气体射流冲击干燥相比,提高了干燥机的处理能力,降低了能耗。

## 参 考 文 献

- 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)
- Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, Lin Hai, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes[J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33(5):899~918.
- 杨文侠,高振江,谭红梅,等. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄及品质分析[J]. 农业工程学报,2009,25(4):237~242.  
Yang Wenxia, Gao Zhenjiang, Tan Hongmei, et al. Drying *Monukka* grapes with air-impingement jet technique and quality analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4):237~242. (in Chinese)
- 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)
- 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.  
Xiao Hongwei, Zhang Shixiang, Bai Junwen, et al. Air impingement drying characteristics of apricot[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(7):318~323. (in Chinese)
- 中国农业大学. 气体射流冲击海参干燥方法与装置:中国,200710176389.5[P]. 2007-10-26.  
China Agricultural University. Air impingement drying equipment and method of sea cucumber:China, 200710176389.5[P]. 2007-10-26. (in Chinese)
- 中国农业大学. 一种杏干的加工方法:中国,200710063255.2[P]. 2007-01-11.  
China Agricultural University. A processing method of apricot: China, 200710063255.2[P]. 2007-01-11. (in Chinese)
- 杜志龙. 气体射流冲击果蔬烫漂机干燥试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.  
Du Zhilong. Experimental study of blanching and drying infruits and vegetables on the air-jet impingement oven [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 杨文侠. 无核紫葡萄气体射流冲击干燥及干燥品质研究[D]. 北京:中国农业大学,2009.  
Yang Wenxia. Air-jet impingement drying characteristics and quality attributes of *Monukka* grape [D]. Beijing: China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 姚雪东. 气流冲击式转筒干燥机干燥试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2009.  
Yao Xuedong. Experimental study on drying of air-jet impingement rotary dryer[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- Doymaz I. Air-drying characteristics of tomatoes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4):1291~1297.