

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.044

冲孔网板双循环穿流热风干燥试验台设计*

杜志龙 赵存洋 叶金鹏 王际春 孙 姗

(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

【摘要】 根据果蔬干燥特性和穿流带式干燥的原理及特点,在分析穿流干燥工艺的基础上,建立双循环穿流干燥试验台。该试验台为上下穿流循环系统,各系统均可独立运行,穿流风速 0 ~ 10 m/s,温度 30 ~ 150℃,相对湿度 0 ~ 100%,可实现自动进风和排湿、能耗显示、各参数显示及记录等功能。在该试验台进行了红辣椒干燥试验,研究了前期干燥温度、后期干燥温度和铺料厚度因素对干燥单位能耗的影响,得出前期干燥温度 70℃ (20 min) + 60℃ (40 min),后期干燥温度 55℃,铺料厚度 14 cm 的干燥工艺可获得最少单位能耗。

关键词: 带式干燥机 试验台 设计

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0218-04

Design of Double Cross-flow Drying Test Bed

Du Zhilong Zhao Cunyang Ye Jinpeng Wang Jichun Sun Shan

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

According to the principles and characteristics of drying and cross-flow belt drying machine, the double cross-flow drying test bed was designed. The test bed mainly consists of the upper circulatory system and the lower circulatory system, and every system can be operated independently with cross-flow wind speed of 0 ~ 10 m/s, temperature range of 30 ~ 150℃, humidity range of 0 ~ 100%, maximum thickness of 600 mm etc. The system can achieve automatic moisture exhaust, the show of energy consumption, all parameters display and record function etc. By the drying experiment of red peppers in the test bed, the effects of pre-drying temperature, post-drying temperature, thickness of red peppers on the impact of energy consumption were investigated. Furthermore the dry parameters of minimum consumption were obtained, at pre-drying temperature 70℃ (20 min dried) + 60℃ (40 min dried), post-drying temperature 55℃, thickness of red peppers 14 cm.

Key words Belt drying machine, Test bed, Design

引言

目前国内市场上脱水蔬菜产品中的 90% 采用热风干燥技术进行脱水。在国内果蔬干燥加工中,采用热风干燥技术主要有隧道干燥机、箱式干燥机和带式干燥机等,其中以带式干燥机的应用最为广泛^[1~4]。与国外带式干燥机相比,在生产能力、能耗、产品生产成本等方面存在较大差距。主要有以下原因:①带式干燥机结构设计不同,输送带国内采

用网带式,而国外以冲孔链板为主。②干燥工艺及控制方式不同,国内干燥工艺以经验为主,仅有温度、湿度和压力等参数的自动显示,对应各干燥参数控制靠人工经验操作完成,而排湿则以全排或以经验部分排湿,经验式的干燥工艺及控制方式,使得干燥机不能发挥应有干燥能力;国外干燥工艺均通过具体的试验获得,而干燥参数及排湿量的自动控制则以干燥特征曲线为依据,各个干燥室参数单独控制,保证干燥机在低能耗、高干燥速率条件下运行。

收稿日期: 2012-07-07 修回日期: 2012-08-06

* 农业科技成果转化资金资助项目(2011GB27010001)

作者简介: 杜志龙,高级工程师,主要从事农产品加工及食品工程研究, E-mail: duzhilong_caams@163.com

本文在现有带式干燥机设计的基础和经验上,参考国外干燥技术及设备,设计冲孔网板双循环穿流干燥试验台,并进行干燥工艺及设备参数研究。

1 试验台设计

1.1 设计原则

双循环穿流干燥试验台主要用于热风节能干燥试验研究,通过改变干燥室内温度、湿度、风速、风向和物料铺料厚度等影响因素,模拟多级带式干燥机连续式生产过程,能够实现物料干燥试验和能耗测试要求,试验台控制系统实现干燥过程中各参数的控制、采集和显示,最终寻求不同物料最佳干燥工艺参数和干燥设备优化方案^[5~7]。

为了能够对分级带式干燥机作业过程及相应的干燥试验进行系统研究,试验台设计遵照以下原则:

(1)结构方面采用插入式离心风机、冲孔铺料板和布风板等,实现穿流干燥试验台的双循环方式。同时,可进行不同结构因素(如孔板形式及孔隙率,布风板位置等)对干燥性能影响的试验研究^[8]。

(2)干燥试验台作业时,能够根据不同物料的特性,实现热风温度、湿度、风机转速、换向时间间隔和铺料厚度(最大 600 mm)等工艺参数在一定范围内的改变或调节,以满足不同物料对工艺参数的需要。

(3)干燥试验台运行平稳,控制系统简单、实用、可靠,应能够对温度、湿度实时监控和数据采集,能耗计量,保证试验的顺利进行。

1.2 主要结构

根据上述设计原则,设计了一套热风干燥试验台,试验台主体结构如图 1 所示,主要包括:机架、左、右循环风机,左、右进风排潮口,左、右电加热管,上、下布风板。

试验台尺寸为 2 169 mm × 815 mm × 2 418 mm,箱体包括支架、门、插入式离心风机、电加热管、电动排风蝶阀、保温板等,干燥室尺寸为 600 mm × 660 mm × 600 mm。在干燥室门上装有玻璃窗,便于观察物料变化状况。试验台分为两个循环,左循环和右循环,采用左、右各一个插入式离心风机,相比普通风机避免了暴露在外面风道,减少了能耗损失。左、右循环风向切换采用手动方式,在干燥室上端和下端各有一个小门,切换风向时只需调整左、右循环挡板即可实现。铺料板采用不锈钢冲孔板,可根据不同物料特性更换不同形式铺料板,实现铺料板孔形式、孔大小和孔隙率等参数变化。

1.3 双循环原理

如图 2a 所示,当取掉左循环挡板,只留右循环

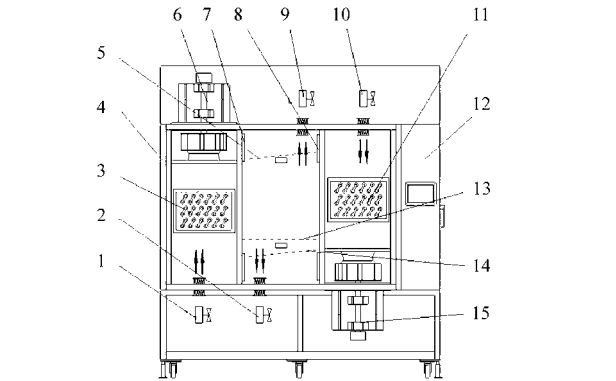


图 1 干燥试验台结构示意图

Fig. 1 Drying test mechanism

1. 左进风口 2. 左排潮口 3. 左电加热管 4. 机架 5. 上布风板 6. 左循环风机 7. 左循环挡板 8. 右循环挡板 9. 右排潮口 10. 右进风口 11. 右电加热管 12. 电控柜 13. 铺料板 14. 下布风板 15. 右循环风机

挡板起阻风作用时,右侧风机和加热管被隔离,左侧形成一个完整的左循环部分(即实现上进风循环)。当左插入式离心风机运行时,干燥介质从下端被向上吸入,通过加热管加热后,再经过上布风板均匀分风后进入干燥室,穿过物料及铺料板后进入下干燥室,部分湿热废气通过左排潮口排出,大部分热风继续在左循环风路中循环,同时从左循环风路下端的左进风口补充新风维持整个系统内风压平衡。

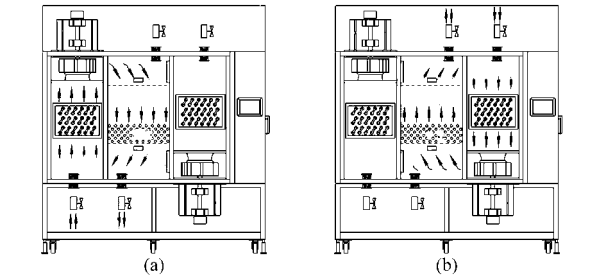


图 2 左、右循环风路示意图

Fig. 2 Double cross-flow mechanism

(a) 左循环 (b) 右循环

如图 2b 所示,当取掉右循环挡板,只留左循环挡板起阻风作用时,左侧风机和加热管被隔离,右侧形成一个完整的右循环部分(即实现下进风循环)。当右插入式离心风机运行时,干燥介质通过加热管加热后,从上端被向下吸入,再经过下布风板均匀分风后进入干燥室,穿过铺料板接触物料后进入上干燥室,部分湿热废气通过右排潮口排出,大部分热风继续在右循环风路中循环,同时从右循环风路上端的右进风口补充新风维持整个系统内风压平衡。

双循环穿流干燥试验台的风速控制通过变频器控制的插入式离心风机转速来实现,通过铺料板孔的风速为 0 ~ 10 m/s;温度控制通过功率调节器控制电加热管功率实现,温湿度传感器采用 ROTRONIC

高温型温度探头和北京罗卓尼克公司的 K20 式温湿度变送器,试验台温度控制范围 30 ~ 150℃,相对湿度控制范围 0 ~ 100%;进风口和排潮口的开度通过电动调节阀实现。试验台基于 PLC 开发了一套智能控制系统,该系统可以实现手动/自动切换,手动方式便于设备调试,自动方式可以方便操作。在单循环方式下还可以进行分阶段自动控制。通过触摸屏可视化界面,实现温度、湿度、风速监控设置及趋势图数据下载功能。

2 应用

2.1 原料选择

试验材料选用辣椒,品种为“红美人”,产地广州市,采购地点北京市清河小营农贸市场,含水率 84% ~ 88%,试验前首先将鲜辣椒洗净沥干,切成 1.5 cm 长段,均匀地装在 4 个载料盒中,盒尺寸为 300 mm × 320 mm × 150 mm。

2.2 试验方法

温度对辣椒色素的稳定性有影响^[9~12],但辣椒色素在 20 ~ 90℃ 相对稳定。温度越高,色素损失越多,当超过 100℃ 时,色素极不稳定。因此取 50 ~ 70℃ 作为试验区间,将物料干燥至含水率 30% (半干状态便于贮藏),采用变温干燥,减少高温段对辣椒色素的损失,为提高各阶段热风利用率采用变铺料厚度方法。通过预试验,在干燥温度 50℃,铺料厚度 10 cm 时,将鲜辣椒干燥至含水率 30% 大约需要 6 h,根据以往经验先将试验分为 3 个试验阶段,前 1 h 为前期干燥,随后 2 h 为中期干燥,剩余干燥时间为后期干燥,其中中期干燥阶段铺料厚度为前期的 2 倍,后期铺料厚度为前期的 4 倍。在干燥过程中通过叠加载料盒中物料来增加铺料厚度,空挡处采用挡风铁板遮盖。干燥过程中通风速度为 4 m/s(过铺料板孔风速),换向间隔为 0.5 h,通过正交试验设计安排试验工艺,试验分析介质预热干燥温度、后期干燥温度、初始铺料厚度对单位除湿量能耗的影响。

2.3 评价指标

单位除湿量能耗计算公式为

$$G = \frac{W}{M_1 - M_2}$$

式中 G ——单位除湿量能耗, kW · h/kg
 W ——干燥耗电量, kW · h
 M_1 ——干燥前物料的质量, kg
 M_2 ——干燥后物料的质量, kg

2.4 试验安排

由于长时高温会造成辣椒红素损失,温度过低

会造成干燥时间过长不适用于工业化生产,因此本文选取 50 ~ 70℃ 作为试验温度区间,如表 1 进行干燥温度单因素试验。结果表明:长时间高温会使红色素产生较大损失,但前期选择高温使物料预热时间减短。为了研究各个温度段干燥温度的合理搭配,选定前期干燥 70℃ (20 min) + 60℃ (40 min)、60℃、50℃ 3 个水平值,后期干燥温度为 60℃、55℃、50℃ 3 个水平值。

表 1 辣椒干燥温度单因素试验
Tab.1 Single factor experiments of pepper drying temperature

温度/℃	颜色变化
70	前 30 min 变色不明显,30 min 后变橙色,干燥后颜色暗红,略微发黑,呈半透明状
60	前 1 h 变色不明显,1 h 后变橙色,干燥后颜色暗红
50	整个过程变色不明显,色泽鲜亮

在干燥温度 50℃ 下对不同铺料厚度进行了单因素试验,结果如表 2 所示:当初始铺料厚度为 18 cm 时,均匀性差且干燥时间过长,同时考虑到后期铺料厚度翻倍会影响干燥均匀性,同时延长干燥时间,因此选定初始铺料厚度 10 cm、12 cm、14 cm 3 个水平值。

表 2 辣椒干燥铺料厚度单因素试验
Tab.2 Single factor experiments of pepper thickness

铺料厚度/cm	均匀度	干燥时间/h
10	整体均匀性好	6.0
14	均匀性较好	7.5
18	均匀性差	8.5

由上述两个单因素试验,最终确定辣椒干燥各因素及水平如表 3 所示,试验采用正交试验设计 $L_9(3^4)$,在恒定的风速 4 m/s、切段长度 1.5 cm 和换风间隔 0.5 h 的条件下,进行以下试验,具体试验安排如表 4 所示。

表 3 辣椒干燥因素水平
Tab.3 Factors and levels of pepper drying

水平	因素		
	前期干燥温度 /℃	后期干燥 温度/℃	初始铺料 厚度/cm
1	70(20 min) + 60(40 min)	60	14
2	60	55	12
3	50	50	10

试验结果汇总如表 4 所示。

由表 4 可知,通过 K 值分析认为最佳反应条件为 $A_1 B_2 C_1$,即前期干燥温度 70℃ (20 min) + 60℃

表 4 正交试验安排与结果

Tab.4 Orthogonal experiment arrangement and experimental data

试验序号	A	B	C	单位除湿量能耗 /kW·h·kg ⁻¹
1	1	1	1	1.604
2	1	2	2	1.558
3	1	3	3	1.582
4	2	1	3	1.859
5	2	2	1	1.633
6	2	3	2	1.726
7	3	1	2	2.159
8	3	2	3	1.857
9	3	3	1	1.817
K ₁	4.744	5.622	5.054	
K ₂	5.218	5.048	5.443	
K ₃	5.833	5.125	5.298	
R	0.363	0.191	0.129	
最优条件	A ₁	B ₂	C ₁	

(40 min),后期干燥温度 55℃,铺料厚度 14 cm。
通过对极差 R 分析认为,以上因子对辣椒干燥

能耗的影响程度,从大到小依次为:前期干燥温度、后期干燥温度、铺料厚度。

3 结论

(1)从结构来讲,试验台采用双循环风路设计,实现了对物料换向进风;采用可更换冲孔铺料板,针对物料特性和铺料板孔隙率及孔大小进行试验研究。

(2)从控制系统方面,基于 PLC 开发了一套智能控制系统,该系统可以实现手动/自动切换,手动方式便于设备调试,自动方式方便操作。在单循环方式下还可以进行分阶段自动控制。通过触摸屏可视化界面,实现温度、湿度、风速监控设置及趋势图数据下载功能。

(3)以辣椒为研究对象,采用自制的干燥试验台进行干燥工艺研究,恒定的风速 4 m/s、切段长度 1.5 cm 和换风间隔 0.5 h 的条件下,研究不同辣椒前期干燥温度组合、后期干燥温度和初始铺料厚度对单位能耗的影响。研究表明:采用前期干燥温度组合 70℃(20 min)+60℃(40 min),后期干燥温度 55℃,铺料厚度 14 cm 的工艺可获得最少单位能耗。

参 考 文 献

1 门艳忠,刘建国. 国内外果蔬干燥技术及设备发展概述[J]. 现代化农业,1998(10):38~39.
Men Yanzhong, Liu Jianguo. Domestic survey on the development trend of drying technology and equipment for fruits and vegetables at home and abroad[J]. Modernizing Agriculture, 1998(10):38~39. (in Chinese)

2 陈震,李长友,徐风英. 我国果蔬烘干装备技术的发展现状与对策[J]. 农机化研究,2010(5):204~205.
Chen Zhen, Li Changyou, Xu Fengyin. Development status and strategy of equipment and technology for fruit and vegetable drying in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(5):204~205. (in Chinese)

3 杜志龙. 气体射流冲击果蔬烫漂及干燥试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.
Du Zhilong. Experimental study of blanching and drying in fruits and vegetables on the air-jet impingement oven[D]. Beijing: China Agricultural University,2007. (in Chinese)

4 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,1998:130~135.

5 常剑,尤长静,杨德勇,等. 多层带式干燥机干燥过程优化[J]. 农业机械学报,2012,43(8):148~154.
Chang Jian, You Changjing, Yang Deyong, et al. Optimization of drying process for multilayer belt dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(8):148~154. (in Chinese)

6 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)

7 杨世昆,杜建强. 太阳能草捆干燥设备设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(4):81~86.
Yang Shikun, Du Jianqiang. Design and experiment of bale drying machinery using solar energy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(4):81~86. (in Chinese)

8 黄绍祥. 应用 Fluent 软件模拟布风装置中的气流分布[J]. 企业科技与发展,2008(14):70~73.
Huang Shaoxiang. The simulation of airflow distribution in the distributor by Fluent software[J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2008(14):70~73. (in Chinese)

9 陶莎,杨建华,薛文通. 辣椒红色素的研究进展[J]. 食品工业科技,2008,29(8):307~309.
Tao Sha, Yang Jianhua, Xue Wentong. Research progress on capsicum red pigment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008,29(8):307~309. (in Chinese)

(下转第 230 页)

3 结 论

- (1)装有蜂窝结构空气集热器的太阳能饲草干燥设备,生产率有了显著提高,改进后的空气集热器集热效率明显提升,改进效果良好。
- (2)在普通平板太阳能集热器的集热板和透明盖板之间,插置一个设计适当的蜂窝结构,则在 60 ~

120℃ 的运行温度范围内能显著提高集热器的集热性能,即使 60℃ 以下的运行温度,其效率也有所提高。有蜂窝的集热器对流热损失小,即使在寒冷多风的季节或地区,也比普通平板集热器运行好。

(3)为使蜂窝集热器效率高、成本低,蜂窝结构太阳能集热器的最佳运行温度($t_1 - t_2$) 范围是 60 ~ 100℃ 。

参 考 文 献

1 董宽虎,沈益新. 饲草生产学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

2 杨世昆,苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社,2009.

3 杨世昆,刘贵林,贾红燕,等. 梯形板式太阳能空气集热器:中国,ZL200520104433.8 [P]. 2005-08-12.

4 袁卫星,袁修干,杨春信,等. 蜂窝平板太阳能集热器研制及闷晒性能实验[J]. 北京航空航天大学学报,1997,23(5): 627 ~ 631.

Yuan Weixing, Yuan Xiugan, Yang Chunxin, et al. Honeycombed plate solar collector and the development of sunning performance experiment[J]. Journal of Beihang University,1997,23(5):627 ~ 631. (in Chinese)

5 叶宏,葛新石,庄双勇,等. 带透明蜂窝的太阳空气加热器的实验研究[J]. 太阳能学报,2003,24(1):27 ~ 31.

Ye Hong, Ge Xinshi, Zhuang Shuangyong, et al. Experimental investigation on solar air heaters with honeycomb panel [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2003,24(1):27 ~ 31. (in Chinese)

6 杨世昆,刘贵林,杜建强,等. 太阳能草捆干燥设备:中国,ZL200710300870.0 [P]. 2007-12-29.

7 何月娥,杨孝文,张梧邨. 农机试验设计[M]. 北京:机械工业出版社,1986.

8 罗运俊,何梓年,王长贵. 太阳能利用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

9 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京:化学工业出版社,1998.

10 高彩霞,王培. 收获期和干燥方法对苜蓿干草质量的影响[J]. 草地学报,1997,5(2):113 ~ 116.

Gao Caixia, Wang Pei. Effect of various harvest time and drying methods on nutritive value of alfalfa hay[J]. Acta Agrestia Sinica,1997,5(2):113 ~ 116. (in Chinese)

11 赛义夫 A A M [沙特阿拉伯]. 太阳能工程[M]. 北京:科学出版社,1984.

12 Ong K S. Thermal performance of solar air heaters;mathematical model and solution procedure[J]. Solar Energy, 1995, 55(2):93 ~ 110.

13 Grupp M, Beergler H, Jeanpierre Bertrand, et al. “Convective” flat plate collectors and their applications[J]. Solar Energy, 1995, 55(3):195 ~ 208.

14 James A, Stewart R. Moisture migration during storage of preserved, high moisture grains[J]. Transactions of the ASAE, 1975,18(2):387 ~ 393, 400.

15 Arum S,Mujumdar. Drying technology in agriculture and food sciences[M]. New York:Science Publishers, Inc. ,2000:191 ~ 211.

16 Shahab Sokhansank,Patil F T. Kinetics of dehydration of green alfalfa[J]. Drying Technology,1996,14(5):1 197 ~ 1 234.

(上接第 221 页)

10 张建军,王海霞,马永昌,等. 辣椒热风干燥特性的研究[J]. 农业工程学报, 2008,24(3):298 ~ 301.

Zhang Jianjun, Wang Haixia, Ma Yongchang, et al. Study on the optimization extraction technology of almond oil by supercritical CO₂ method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008,24(3):298 ~ 301. (in Chinese)

11 丁筑红,韩江雪,谭书明,等. 辣椒色素单体组分的分离及其热稳定性研究[J]. 贵州农业科学, 2010,38(4):187 ~ 190.

Ding Zhuhong, Han Jiangxue, Tan Shuming, et al. Study on isolation for monomer components of capsochrome (paprika pigment) and their thermostability[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010,38(4):187 ~ 190. (in Chinese)

12 李利华. 陕西凤翔辣椒红色素的色度稳定性研究[J]. 陕西理工学院学报:自然科学版, 2008,24(4):57 ~ 60.

Li Lihua. Studies of the stabilities of capsorubin pigment's chroma[J]. Journal of Shaanxi Institute of Technology:Natural Science Edition, 2008,24(4):57 ~ 60. (in Chinese)