

吴文福教授主持“智慧粮食基础探索”特约专栏文章之十二/“新系统”分栏文章之四

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.02.012

王桂英, 韩峰, 刘哲, 等. 农产品能源循环节能干燥工艺智能实验系统的研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 90-96.

WANG G Y, HAN F, LIU Z, et al. Research on intelligent test system for energy recycling and energy saving technology of agricultural products drying[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 90-96.

农产品能源循环节能干燥工艺 智能实验系统的研究

王桂英^{1,2}, 韩峰¹✉, 刘哲¹, 吴文福¹, 许启铿³, 岳中芬⁴, 陆必发⁵, 潘礼萍⁵

- (1. 吉林大学 生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 吉林大学 材料科学与工程学院, 吉林 长春 130022;
3. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;
4. 长春市神阳机电有限公司, 吉林 长春 130113;
5. 安徽森米诺农业科技有限公司, 安徽 芜湖 241200)

摘要: 热风干燥是大宗粮食以及农产品加工的关键环节, 当前农产品热风干燥节能工艺的研究与开发多限于实际作业跟踪和经验设计, 通过传热传质理论进行数值计算等, 都存在一定的局限性。实物模拟是一种潜在的比较有效的研究方法。在研究冷凝增效节能工艺过程中, 开发了可以模拟实际热风干燥、能源循环利用的实验系统, 具有多参数可调、图形化显示干燥状态、能耗监测等功能, 可为农产品热风干燥节能工艺的研究提供有效手段。利用该系统开展的玉米干燥实验表明, 能源循环节能干燥比普通开放式热风干燥节能 32%~56%。

关键词: 热风干燥; 节能工艺; 能源循环; 实验系统

中图分类号: S226.6 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)02-0090-07

网络首发时间: 2023-03-09 15:04:23

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230309.1126.022.html>

Research on Intelligent Test System for Energy Recycling and Saving Technology of Agricultural Products Drying

WANG Gui-ying^{1,2}, HAN Feng¹✉, LIU Zhe¹, WU Wen-fu¹, XU Qi-keng³,
YUE Zhong-fen⁴, LU Bi-fa⁵, PAN Li-ping⁵

- (1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;
4. Changchun Shenyang Mechanical & Electrical Co., Changchun, Jilin 130113, China;

收稿日期: 2022-12-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(32102034); 吉林省面向市(州)需求关键技术攻关项目(2021FGWCXNLJSSZ12); 安徽省科技重大专项(202003C08020018)

Supported by: National Natural Science Foundation of China Youth Foundation (No. 32102034); Jilin Province for the City (Prefecture) Demand Key Technology Project (No. 2021FGWCXNLJSSZ12); Major Science and Technology Project of Anhui Province (No. 202003C08020018)

作者简介: 王桂英, 女, 1975 年出生, 博士, 工程师, 研究方向为农产品清洁节能干燥技术。E-mail: guiying9602@163.com.

通讯作者: 韩峰, 男, 1978 年出生, 博士, 高级工程师, 研究方向为粮食干燥和储藏。E-mail: hanfeng@jlu.edu.cn.

5. Anhui Sunmiro Agricultural Technology Co., Wuhu, Anhui 241200, China)

Abstract: Hot air drying is the key link of bulk grain and agricultural product processing. Because of the adjustment of national environmental protection and energy utilization policies in the new era, it is required to research and develop the energy saving technology of hot air drying for agricultural product. The current research is mostly limited to practical work tracking and empirical design, and there are also numerical calculations by heat and mass transfer theory. However these approaches have some limitations. Physical simulation is an effective potential method. In the process of studying the condensation increasing efficiency and energy saving technology, this paper has developed a test system which can simulate the actual hot air drying recycling energy. It has multi-parameter adjustable, graphical display drying state, energy consumption monitoring and other functions, and it can also provide effective means to study energy saving technology of hot air drying of agricultural product. The corn drying test for this system showed that energy recycling energy-saving drying could save energy 32%~56% when compared with ordinary open hot air drying.

Key words: hot air drying; energy saving technology; energy recycling; test system

目前,我国干燥作业仍以热风干燥为主,在新时期国家倡导清洁低碳、节能环保政策的指引下,热风干燥节能工艺及装备的研发是行业技术发展的重点。近年来各国学者在节能工艺方面的研究,如尾气回收循环利用^[1-5]、变温干燥工艺^[6-10]以及间歇加热干燥工艺^[11-14]等,这些研究大多限于实际粮食干燥作业的跟踪实验和经验比较,具有费时、费力及实验周期长等缺点。还有一些是通过数值计算、仿真模拟的方法进行节能干燥工艺的研究^[15-18],主要是通过传热传质理论、能量守恒定律等,这种方法具有实验条件设置与实际有偏差等局限性。本文采用了一种新的研究方法——实物模拟法,即通过设计一种实验室规模的小型干燥实验装置,来模拟实际农产品干燥作业过程,探索节能干燥工艺的研究方法,进而开发实现这一干燥工艺的干燥装备。

本文是在研究冷凝增效、清洁节能干燥工艺^[19]过程中,研究开发了可以模拟实际热风干燥能源循环利用的智能实验系统,该实验系统是能源循环节能工艺以及水势和焓方法节能控制法优化的关键研究装备,是大型能源循环节能智能干燥机优化设计和开发的必备基础实验装备。

1 实验系统设计

1.1 实验系统设计原理

实验系统设计原理图如图 1 所示,系统工作

过程中干燥介质与被干燥物料进行湿热交换后,并不排出系统,而是充分回收,在加热、干燥、调湿、再加热之间形成闭环,也就是构成了干燥介质内循环^[20-21],外界冷空气或水作为冷流体与回收到的尾气热流体,在冷凝器内进行冷凝传热,尾气中的水蒸气冷凝析出,降低了尾气的湿度,如果用冷空气做冷流体,通过冷凝器后温度升高,升温了的冷空气回收至系统,继续补充加热后参与干燥介质循环,本实验系统采用水冷冷凝。工作过程包括物料的干燥过程和水蒸气的冷凝过程,冷凝过程为干燥过程服务。作业过程既合理利用了尾气的余热,又深度开发了冷凝潜热,达到了很大的节能目的。

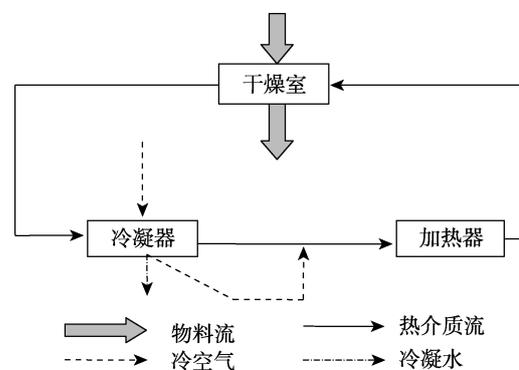


图 1 农产品干燥能源循环节能工艺
智能实验系统设计原理图

Fig.1 Design schematic diagram of intelligent test system for energy recycling and saving technology of agriculture products drying

1.2 实验系统结构

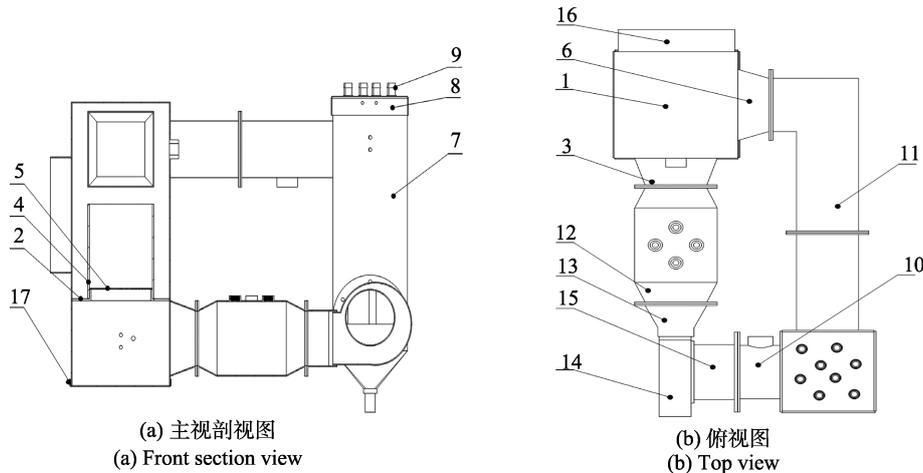
本实验系统根据一种冷凝增热粮食烘干基础实验装置 (202020658325.X) 的专利思想设计而成^[22], 主要由实验箱体、称重部件、支座、冷凝部件等组成, 实验系统外观照片如图 2, 内部结构组成如图 3。

本实验系统内部主要工作组件由干燥仓、水冷冷凝器、电加热器、风扇以及检测传感器和控制主机组成, 且这些组件位于外箱体内部, 外箱体内壁用 1 cm 厚橡塑保温棉保温。干燥仓是农产品干燥的主要部件, 里面存放被干物料; 水冷冷凝器用来冷凝从干燥仓排出的湿热尾气, 通过流过水冷板的冷水提供冷量; 电加热器是由适当功率的电加热丝提供热量, 加热流过电加热器的干燥介质; 风扇提供干燥介质在系统内循环流动的动力, 使干燥介质在系统内组成闭环, 且风扇通过电源电压调节风速并自带脉冲测速功能; 检测

传感器包括热风温度传感器、冷凝器进出口水温传感器、尾气冷凝前后温湿度传感器; 控制主机控制整个系统各部件的启停和实时监测、数据存储等。



图 2 农产品干燥能源循环节能工艺智能实验系统
Fig.2 Intelligent test system for energy recycling and saving technology of agriculture products drying



1 烘干外筒, 2 烘干内筒支撑板, 3 烘干外筒下风道, 4 烘干内筒, 5 烘干内筒底筛板, 6 上风道, 7 冷凝器, 8 冷凝器上盖, 9 水冷头, 10 冷凝器出风道, 11 冷凝器进风道, 12 加热风道, 13 风机出口风道, 14 风机, 15 风机进风口风道, 16 烘干外筒接口, 17 烘干外筒底盖

1 Drying outer cylinder, 2 Drying inner cylinder support plate, 3 Lower air duct of drying outer cylinder, 4 Drying inner cylinder, 5 Bottom sieve plate of drying inner cylinder, 6 Upper air duct, 7 Condenser, 8 Condenser top cover, 9 Water cooler, 10 Condenser exhaust air duct, 11 Condenser air inlet duct, 12 Heating duct, 13 Fan outlet duct, 14 Fan, 15 Fan inlet duct, 16 Drying outlet cylinder connection port, 17 Bottom cover of drying outer cylinder

图 3 实验系统内部结构组成图
Fig.3 Test system internal structure composition diagram

1.3 测控系统设计

控制系统是实验系统的指挥中心, 是实验系统设计的关键, 控制程序逻辑性的编写和硬件线路的安全设计是实验系统良好运行的基础。图 4 是本实验系统控制原理图。

传感器是测控系统的关键检测部件, 本实验系统干燥过程参数如热风温度 (TF1) 和冷凝介质入口、出口温度 (TJ1-TJ2) 以及干燥介质冷凝前后温度、湿度 (TH1-TH2), 干燥仓内温度、湿度 (TH3) 等基本工艺参数采用相应的 PT100 温

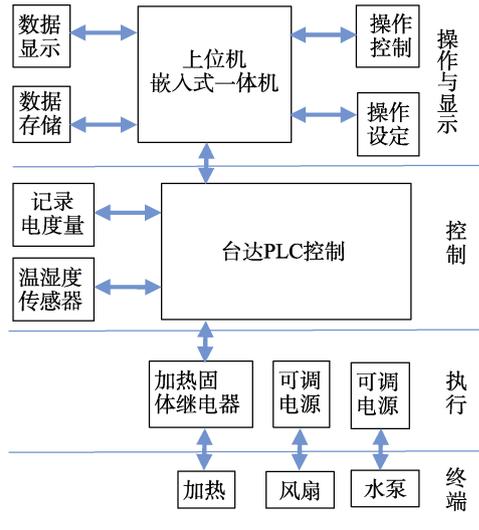


图 4 实验系统控制原理图

Fig.4 Test system control schematic diagram

度传感器和温湿度传感器检测，本实验系统传感器布置图如图 5 所示。热风温度通过温控表控制，风量通过调节风扇的电源输入电压来调节，冷流体流量通过调节水泵的输入电压来调节，通过检测系统的总重来实现实时水分的检测^[23]，系统工作过程的电能消耗通过电能表来检测。

本智能实验系统采用图形化的测控方法，并通过 LabVIEW 软件开发了可窗口显示的控制界面和干燥过程参数设置并实时显示界面，具有实时、直观的优点。操作者可以实时的观察到干燥系统的微环境状态，干燥作业过程基本参数可以按预定采集频率采集，并以 Excel 文本存储于系统中。

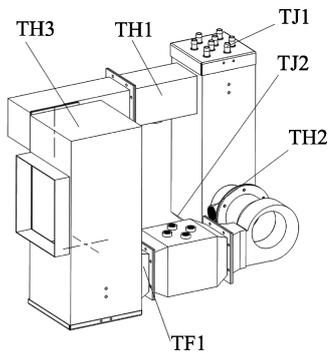


图 5 实验系统传感器布置图

Fig.5 Sensor layout of test system

2 实验系统主要部件参数

本实验系统主要组成部件和检测元件型号如表 1 和表 2。

表 1 主要部件型号及参数说明
Table 1 Models and parameters of the main components description

名称	型号	参数说明
控制主机	PPC-DL104D	10.4 寸工业一体机
铝水冷头/mm	40*240	厚度 12
风扇	BFB1012H	风量 0.712 m ³ /min, 风压 249.082 Pa, 转速 3 600 rpm
电加热丝	24v25W	—

表 2 检测元件型号及参数说明
Table 2 Detection component models and parameter description

检测参数	型号	测量范围	精度
热风温度/℃	PT100	-100~280	0.1
尾气冷凝前 后温湿度	HC2A-S	湿度范围: 0%RH~100%RH 温度范围: -50~100 ℃	±0.8%RH 0.01 ℃
水分/%	PM-8188-A	8.0~35.0	0.5
重量	YHC	30 kg	1 g
电能	DDSU666	—	0.001 kWh

3 实验系统研究案例

为了考察本实验系统的节能效果以及干燥工艺参数对干燥特性指标的影响规律，设计了玉米干燥实验。

3.1 实验目的

验证能源循环节能工艺的节能效果，研究基本工艺参数风温、风速和冷凝比对于干燥特性重要指标单位热耗量和干燥速率的影响规律。

3.2 实验方案

为了验证能源循环节能工艺的节能效果，进行干燥过程能源循环与否的对比实验，能源循环节能工艺就是将干燥室尾气回收，冷凝除湿后再加热循环利用，相反能源不循环工艺过程就是干燥室尾气不回收，直接排到周围环境。

为了考察能源循环节能干燥过程工艺参数对干燥特性指标的影响规律，根据玉米干燥品质需要，设计了六种干燥风温 30、35、40、45、50、55 ℃，五种穿过粮层风速 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m/s 和五种冷凝比 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 的玉米干燥实验。

3.3 实验结果

3.3.1 对比实验

将尾气正常排出的开放式普通热风干燥方式

与尾气充分回收的能源循环节能干燥方式通过不同温度下的玉米干燥实验进行对比研究，比较能源循环工艺的节能情况。

两种方式的单位热耗量对比如图 6。

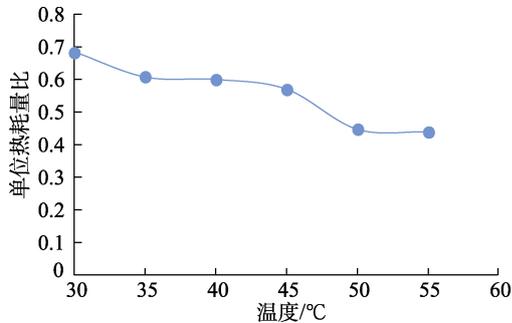


图 6 能源循环节能干燥与开放式普通热风干燥的单位热耗量比

Fig.6 Specific heat consumption ratio of energy recycling and saving drying and open ordinary hot air drying

从图 6 可见，在 30~55 °C 范围内干燥时，能源循环节能干燥的单位热耗量是开放式普通热风干燥方式的 0.68~0.44，也就是能源循环节能干燥比相同干燥工艺下开放式普通热风干燥方式节能 32%~56%，且节能效果随着干燥温度的升高而增加。

从图 7 可见，在相同温度条件下干燥，能源循环节能干燥速率要大于开放式普通热风干燥方式。这主要是受干燥介质湿度和焓值的影响，由于热能循环利用方式下尾气全部回收，冷凝过程没有将干燥介质从湿玉米中吸收的水分全部冷凝出来，即相同温度条件下，能源循环的干燥介质

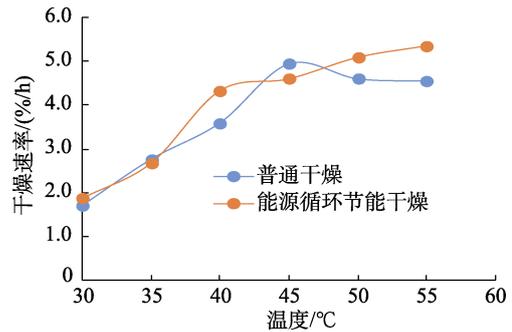


图 7 不同风温下能源循环节能干燥与开放式普通热风干燥的干燥速率比较

Fig.7 Drying rate comparison of energy recycling and saving drying and open ordinary hot air drying

比开放式普通热风干燥方式含湿量和焓值都高，也就是在一定的温度条件下，尽管能源循环节能干燥方式的干燥介质含湿量高，吸水能力差于开放式普通热风干燥方式，但是其焓值高，使得它与谷物的热交换快，促进水分蒸发，所以在一定的湿度范围内，干燥介质的焓值高对干燥有利。

3.3.2 变风温实验

从图 8 可见，能源循环节能干燥方式，在风速和冷凝比相同的情况下，随着干燥介质温度的升高，干燥速率升高而单位热耗量下降。这是因为在风速、冷凝比以及冷凝介质水温相同的条件下，干燥介质风温越高，尾气温度越高，其露点也越高，冷凝过程中越早地达到冷凝条件，发生冷凝，使回收的尾气相对湿度下降早而低，致使干燥介质吸水能力强，从而干燥速率快，干燥能耗低。

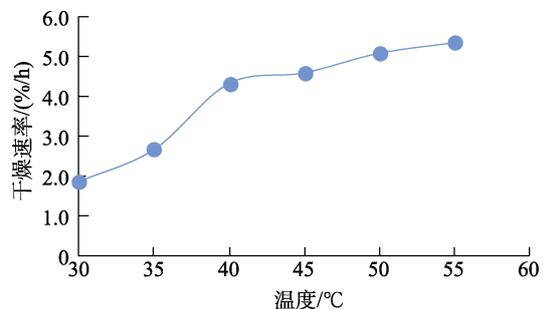
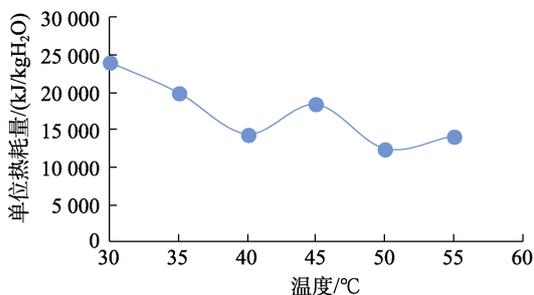


图 8 能源循环节能干燥单位热耗量和干燥速率随干燥介质温度的变化

Fig.8 The change of specific heat consumption and drying rate with the temperature of drying medium by energy recycling and saving drying

3.3.3 变风速实验

从图 9 可见，随着风速的增加，单位热耗量逐渐增加，而干燥速率先增加后减小且达到一个

稳定值，然后干燥速率不再随着风速的增加而变化。这是因为随着风速的增加，相同时间穿过粮层的风量也增加，使之达到预设风温的热耗量也

增加,但是从粮食中析出的水分却变化不大,所以干燥过程单位热耗量也增加。而且在冷凝比恒定的情况下,随着风速的增加,冷流体水的流量

也增加,冷热流体热交换量增加,热损失增加。所以干燥过程风速的选择应该足够即可,过大会造成热量的浪费。

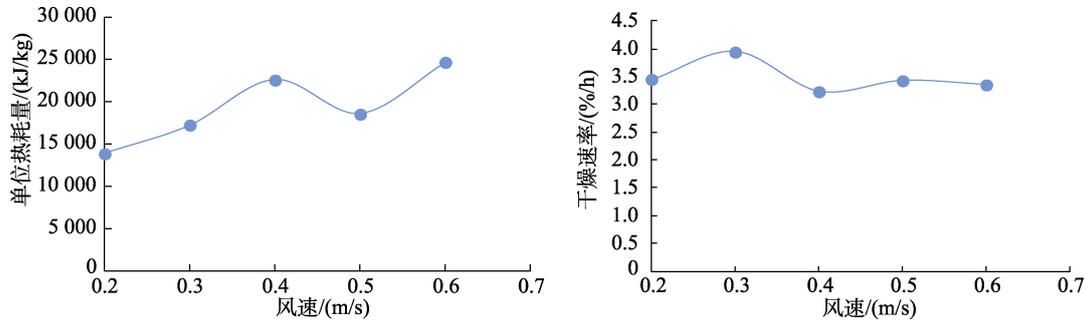


图9 能源循环节能干燥单位热耗量和干燥速率随风速的变化

Fig.9 The change of specific heat consumption and drying rate with air velocity by energy recycling and saving drying

3.3.4 变冷凝比实验

从图10可见,从单位热耗量低和干燥速率快的角度考虑,存在一个最佳冷凝比,就本实验工况,在冷凝比为1.0时单位热耗量最低,干燥速

率最快。也就是在某种工况下,需要寻求一个最佳冷凝比,既满足冷凝尾气至合适湿度以利于干燥的需要,也不要过度冷凝,造成不必要的能源浪费。

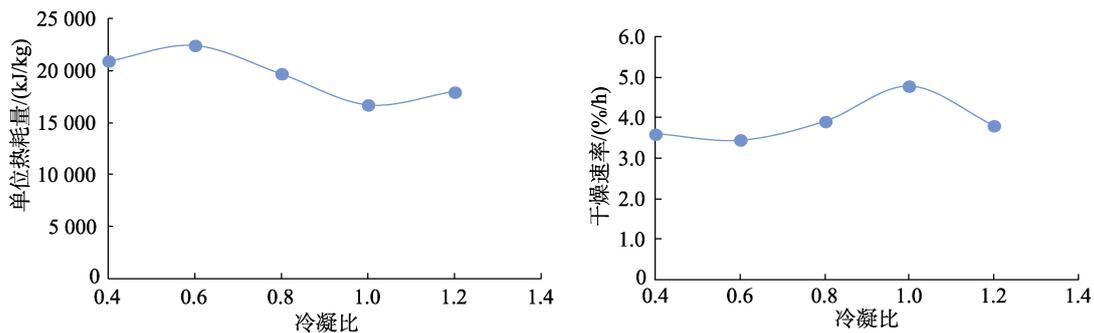


图10 能源循环节能干燥单位热耗量和干燥速率随冷凝比的变化

Fig.10 The change of specific heat consumption and drying rate with condensation ratio by energy recycling and saving drying

4 结语

本文为农产品干燥能源循环节能工艺的研究提供了一种实物模拟智能实验系统。该实验系统具有多参数可调、图形化显示干燥状态、能耗监测等功能。针对该系统的玉米干燥实验表明,能源循环节能干燥比普通开放式热风干燥节能32%~56%。本能源循环节能工艺智能实验系统可以应用于不同农产品物料循环节能干燥工艺的研究,为节能干燥装备的研制和应用提供基础数据,亦可作为大专院校相关专业实验教学和科研机构的工艺教学实验系统。

参考文献:

[1] 朱世贤,魏清勇,潘九君. 浅谈高效节能燃煤粉热风炉技术

在粮食干燥设备上的应用[J]. 现代化农业, 2012, (2): 48-49.

ZHU S X, WEI Q Y, PAN J J. Application of high efficiency and energy saving coal powder hot blast stove technology in grain drying equipment[J]. Modernized Agriculture, 2012, (2): 48-49.

[2] 李秀琴. 节能环保型粮食干燥机的设计研究[J]. 中国设备工程, 2019, (2): 198-199.

LI X Q. Design and research of energy saving and environmental protection grain dryer[J]. China plant engineering, 2019, (2): 198-199.

[3] RAFAEL P A, MAURI F, GISELE T S. Exergy analysis applied to the design of grain dryers with air flow recirculation[J]. in ASABE, 2012,12-1340983

[4] THOMAS Z, HASAN J, MARCO S. Increasing the energy efficiency of batch-type drying with partial air recirculation[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2016, 88(1-2): 208-214.

[5] 马筱春,熊毅雯. 粮食烘干机节能环保技术的推广应用[J]. 农业装备技术, 2017, 43(3): 20-21.

MA X C, XIONG Y W. Popularization and application of energy

- saving and environmental protection technology for grain dryer[J]. Agricultural equipment technology, 2017, 43(3): 20-21.
- [6] JOKINIEMI H T, AHOKAS J M. Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer[J]. Biosystems engineering, 2014, 124: 209-220.
- [7] 吴文福, 陈晓光, 宗国富, 等. 玉米变温干燥新工艺及自动控制系 统[EB/OL]. [2004-01-05]. <https://kns.cnki.net/KNS8/AdvSearch?dbcode=CFLS>.
WU W F, CHEN X G, ZHONG G F, et al. New technology and automatic control system of drying corn with variable temperature[EB/OL]. [2004-01-05]. <https://kns.cnki.net/KNS8/AdvSearch?dbcode=CFLS>.
- [8] 刘辉. 稻谷恒温与变温热风干燥工艺及过程模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
LIU H. Study on paddy drying technology under constant and varying temperature and process simulation[D]. Harbin: Northeast Agricultural university, 2020.
- [9] LI B, ZENG Z H, ZHANG X F, et al. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger[J]. applied sciences, 2021, 11(6): 2772.
- [10] 陈俊轶. 基于耦合因子的变温变湿干燥谷物品质特性及窗口控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
CHEN J Y. Research on quality characteristics and windows-control method of variable temperature and humidity grain drying process by coupling factors[D]. Changchun: Jilin university, 2021.
- [11] DEFENDI R O, PARAISO P R, JORGE L M D M. Optimization study of soybean intermittent drying in fixed-bed drying of soybean intermittent drying in fixed-bed drying technology[J]. Drying technology, 2017, 35(1): 125-137.
- [12] PEREIRA J C A, SILVA W P, GOMES J P, et al. Continuous and intermittent drying of rough rice: effects on process effective time and effective mass diffusivity[J]. agriculture, 2020, 10(7): 282.
- [13] MABASSO G A, SIQUEIRA V C, QUEQUETO W D, et al. Energy efficiency and physical integrity of maize grains subjected to continuous and intermittent drying[J]. Revista brasileira de engenharia Agricola e ambiental, 2021, 25(10): 710-716.
- [14] 陶志超. 绿豆种子的超声波—热泵联合连续及间歇干燥特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
TAO Z C. Study on the drying characteristics of continuous and intermittent ultrasonic combined heat pump drying of mung bean seeds[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [15] 韩峰, 吴文福, 刘哲, 等. 粮食连续干燥工艺及过程控制模拟实验系统[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(2): 83-89.
HAN F, WU W F, LIU Z, et al. Simulation experiment system of grain continuous drying process and process control[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(2): 83-89.
- [16] FRANCO C M R, de LIMA A G B, FARIAS V S O, et al. Modeling and experimentation of continuous and intermittent drying of rough rice grains[J]. Heat and mass transfer, 2020, 56(3): 1003-1014.
- [17] IOP. IOP Conference series-earth and environmental science[C]. Bristol: IOP publishing LTD, 2020.
- [18] PERAZZINI H, LEONEL A, PERAZZINI M T B. Energy of activation, instantaneous energy consumption, and coupled heat and mass transfer modeling in drying of sorghum grains[J]. Biosystems engineering, 2021, 210: 181-192.
- [19] 王桂英. 粮食热风干燥冷凝增效节能机理与技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
WANG G Y. Study of the energy saving mechanism and technology of hot air drying condensation increasing efficiency of grain[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [20] 吴文福等. 一种冷凝循环增热批式循环谷物干燥节能装置: 201821699473.5[P]. 2019-06-07.
WU W F, et al. Energy-saving condensing, circulating and heating batch type recirculating grain drying device: 201821699473.5[P]. 2019-06-07.
- [21] 吴文福等. 一种冷凝循环增热连续式变温谷物干燥节能装置: 201821700053.4[P]. 2019-06-14.
WU W F, et al. Condensing cycle heating continuous variable temperature grain drying energy saving device: 201821700053.4[P]. 2019-06-14.
- [22] 吴文福等. 一种冷凝增热粮食烘干基础实验装置: 202020658325.X [P]. 2020-11-27.
WU W F, et al. Condensation heating grain drying basic test device: 202020658325.X [P]. 2020-11-27.
- [23] 高鸿飞. 基于总重检测的粮食循环干燥水分在线测控系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
GAO H F. The research on on-line moisture detection and control system based on the total weight detection for grain circulate drying[D]. Changchun: Jilin University, 2014. 完
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。