

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.040

基于喷气增焐技术的谷物干燥机热泵装置设计与试验

於海明¹ 刘浩鲁² 张正伟¹ 张大成¹ 王 俊¹ 陈坤杰¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 为拓展热泵的使用范围,提高热泵系统的适用范围和年利用率,设计了带喷气增焐装置的空气源热泵机组,通过3组不同功率热泵间的有机组合,提高了热泵系统在低温环境下的能效比。试验结果显示,当环境温度为 -5°C 时,采用喷气增焐可使热泵机组送风温度、制热系数分别由 40°C 、2.21提高到 45°C 、2.33。证实了喷气增焐技术的有效性,热泵干燥系统可满足循环式谷物干燥机在不同环境条件下的作业要求。

关键词: 循环式谷物干燥机; 喷气增焐; 空气源热泵; 热回收装置

中图分类号: S226.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0363-07

OSID:



Design and Test of Grain Dryer Heat Pump Based on Vapor Injection Technology

YU Haiming¹ LIU Haolu² ZHANG Zhengwei¹ ZHANG Dacheng¹ WANG Jun¹ CHEN Kunjie¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to expand the working range of heat pump and improve the applicable range and annual utilization rate of heat pump system, an air source heat pump unit with vapor injection technology was designed. The heat recovery device was used to recover the waste heat from the dryer exhaust gas to preheat the fresh air. The heat pump unit consisted of three sets of heat pumps with different powers. The heat pump unit's start-stop combination adapted to different process requirements and environmental conditions, heat pump can improve the annual energy efficiency ratio by this way, and the enhanced vapor injection technology improved the performance of the heat pump system in low temperature environment. The designed heat pump unit was tested. When the ambient temperature was -5°C , the air supply temperature of the heat pump was 40°C and the COP of the heat pump was 2.21, the air supply temperature of the heat pump used enhanced vapor injection was 45°C and the COP of the heat pump used enhanced vapor injection was 2.33. The experimental results showed that the validity of vapor injection technology and the designed heat pump can meet the operating requirements of recirculation drier under different environmental conditions. This study was of great practical significance for the development of green and energy-saving drying process equipment system. The results showed that the heat pump dryer can be applied to rice and wheat drying operations in the Jianghuai region.

Key words: recirculating grain dryer; enhanced vapor injection; air source heat pump; heat recovery unit

0 引言

近年来,农村劳动力转移和政府的土地流转政策,使农业规模经营发展迅速,人工晾晒干燥粮食已经无法满足需要,迫切需要推广机械化干燥^[1-4]。

传统机械化粮食干燥一般采用热风干燥的方式,以燃烧化石燃料作为热源,但这种方式造成环境污染,且不可持续。为寻求新的粮食干燥途径,研究人员尝试了微波干燥^[5-6]、红外线热辐射干燥^[7]和真空干燥^[8-9]等干燥方式,取得了显著的效果,但由于成

收稿日期: 2019-09-20 修回日期: 2019-10-14

基金项目: 江苏省苏北科技专项(BN2016050)

作者简介: 於海明(1974—),男,副教授,主要从事农业工程研究,E-mail: yuhaiming@njau.edu.cn

通信作者: 陈坤杰(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工、检测及其智能化装备研究,E-mail: kunjiechen@njau.edu.cn

本和工艺问题,短期内投入到粮食干燥实际生产中存在较大困难。热泵是将中低温热能转化为中高温热能的装置,其特点是用少量高品位能源制取大量中高温热能^[10]。热泵干燥具有能量利用率高、干燥温度低和易于控制的特点,其在木材、谷物和农副产品干燥中得到广泛应用^[11]。

近年来,热泵干燥研究的主要方向包括:废热的回收利用、相变材料、控制方法和干燥工艺优化^[12]。文献[13]进行了杏鲍菇热泵干燥试验,为转轮除湿热泵干燥设备的设计及干燥工艺优化提供参考。文献[14]用太阳能集热器作为热泵的热源,设计了一种太阳能集热器,为热泵蒸发器供热。文献[15]研究了热泵干燥过程中马铃薯切片内部水分的迁移规律。文献[16]开发了太阳能集热与热泵联合干燥的茶叶干燥新方法。文献[17]研究了南美白对虾热泵干燥过程中因出现物理、化学反应而导致虾肉品质下降的原因。许多研究着力于提高传统热泵系统的性能,比如提高压缩机性能、使用新的热泵工质或是采用多级压缩^[18-20]。文献[21]回顾了提高热泵性能的方法,并综述了特定行业中热泵系统的新应用。热泵干燥和常规干燥均属于热风干燥,目前国内对热泵粮食干燥的研究体现出用热泵机组作为传统干燥器热源的技术优势。文献[22]利用热泵干燥机对稻谷进行干燥,稻谷干燥品质较好。文献[23]在热泵蒸发器两侧设计一套分离式热管换热器,对环境空气进行预冷却和预加热,在不增加能耗的前提下,提高了热泵除湿系统的除湿量和干燥空气的温度。在我国南方,水稻和小麦等谷物的干燥主要利用循环式谷物干燥机^[24],其干燥效果好,且自动化程度高,但目前仍以燃烧化石能源为主。市场上现存的热泵干燥机存在以下问题:温度和制热量的调节范围较小,不能满足环境条件和生产工艺的变化,导致制热量过剩或不足,降低了全年能效比;低温环境下供热温度较低,系统能效比较低;排出废气中的余热不能很好地利用。

为解决上述问题,本文根据实际生产需求,设计一种多台热泵机组构成的干燥机热源。通过热泵机组的启停组合调节供风温度和制热量,为解决低温环境下送风温度和系统能效比低的问题,热泵采用喷气增焓技术,利用热回收装置吸收干燥机的废气余热,用以预热新空气。

1 热泵干燥系统与干燥机结构

循环式谷物干燥机主要用于干燥稻谷,由于稻谷的热敏性决定了要采用低温多风和较长缓苏期的干燥工艺。粮食经入粮提升机提升至谷仓顶部入

机,谷仓顶部的甩盘通过旋转使入机粮尽量均匀分布;在谷仓中,缓苏段位于上部,用于谷物缓苏,干燥段位于下部,用于谷物的热风干燥,入机粮流经缓苏段和干燥段后下落至干燥机底部,拨粮轮和下螺旋输送机将谷物输送至提升机入口,由提升机提升至谷仓顶部再次进入谷仓,如此循环干燥。谷物经过干燥段后用粮食水分仪检测谷物含水率,达到目标含水率后结束循环,将粮食排出谷仓,干燥结束。作业流程如图1所示。

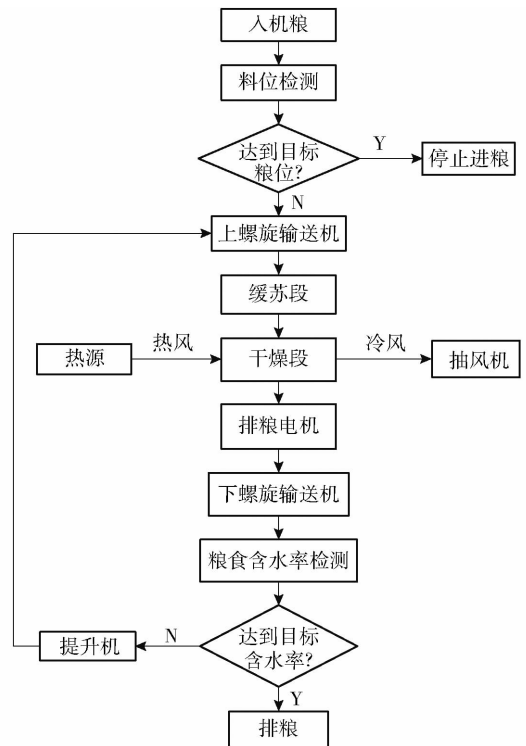


图1 循环式谷物干燥机作业流程图

Fig. 1 Flow chart of circulation cereal dryer operating

江苏省粮食种植模式为夏季小麦和冬季水稻两季轮作,循环式谷物干燥机的作业对象也主要针对小麦和稻谷。但小麦和稻谷的收获季节不同,干燥机作业的环境条件有较大差异,同时干燥工艺也有所区别,所需供风温度范围也有所区别,因此要求热泵系统制热量的调节范围较广,为此设计中选用了3台功率不同的压缩机,通过热泵机组的启停组合适应不同的制热量需求。3组热泵的冷凝器串联,逐级增温,蒸发器并联,增加空气流量,更易吸收环境中的低温热能。

粮食收获后,需要及时干燥,因此在夜间低温环境下也需要运行。热泵系统运行时,制冷剂的蒸发温度受环境温度影响,在低温环境下,蒸发温度和蒸发压力会降低,此时要获得较高的冷凝温度,压缩比就要增大,导致压缩机效率下降,排气温度过高,影响压缩机安全运行,同时蒸发温度过低时会出现结霜现象,影响热泵系统正常运行,为解决这一问题,

设计中热泵机组采用了喷气增焓技术。

根据文献[25]的研究,干燥机排到环境中的废气中含有大量的可利用热能,但由于废气中含有大量的灰尘、稻壳等杂质,如果直接利用热泵的蒸发器回收这部分热能,杂质会覆盖在蒸发器表面,影响换热,所以利用外购的热回收装置吸收余热并预热新风。热泵干燥机的整机结构如图 2 所示,图中经济器是个换热器,通过制冷剂自身节流蒸发吸收热量从而使另一部分制冷剂得到过冷。

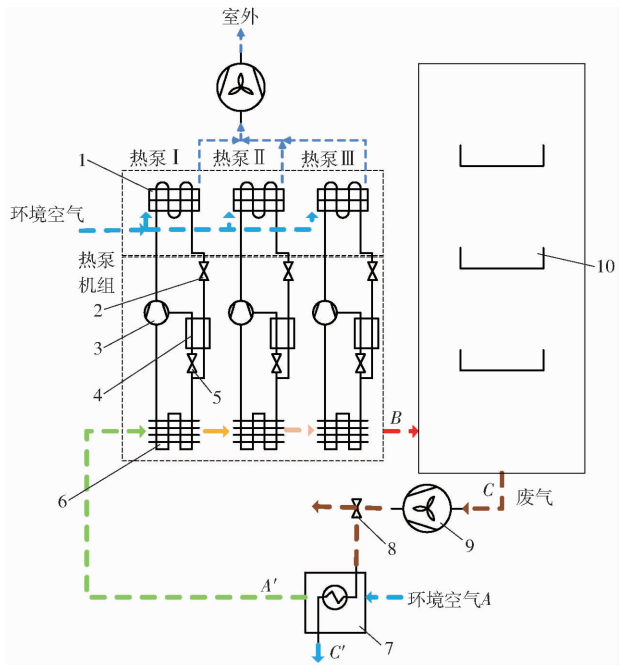


图 2 热泵干燥机整机结构图

Fig. 2 Structure diagram of heat pump dryer

1. 蒸发器 2. 膨胀阀 3. 压缩机 4. 经济器 5. 喷气增焓阀
6. 冷凝器 7. 热回收装置 8. 分流阀 9. 风机 10. 干燥机

2 热泵机组工作原理

传统热泵机组在低温环境下运行稳定性较差,粮食的热泵干燥机需要在低温环境下运行。以南京市为例,在水稻收获的 11 月,夜间的极端低温可达 -5°C ,此时热泵系统很难达到所需的冷凝温度,为此采用喷气增焓系统提高应对低温环境的能力。

图 3(图中 h 表示焓值, p 表示压强)为采用喷气增焓技术的热泵循环压焓图,设计中的喷气增焓系统为一次节流系统,增加了一路喷射以及经济器的共同作用。主路的工作过程为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 1$,辅路的工作过程为 $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 3$,其中点 3 为点 2 与点 9 的混合点,冷凝器出来的液体制冷剂在点 5 分两路,辅路热泵工质经喷气增焓阀节流至中间压力,到达状态点 8,随后流入经济器,到达状态点 9,经补气口进入压缩机中,主路则直接进入经济器,与中间压力的制冷剂进行换热,被进一

步冷却后到达状态点 6,再经过主回路膨胀阀节流,到达状态点 7,然后进入蒸发器吸热到达状态点 1,经压缩机压缩后到达状态点 2,随后与中间压力的制冷剂混合到达状态点 3,被压缩机压缩后进入冷凝器。由此可见,喷气增焓系统可以通过降低压缩机的压缩比和排气温度的办法,在低温条件下获得较高冷凝温度,满足设计需求。

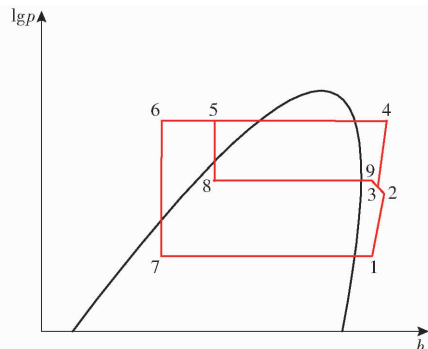


图 3 喷气增焓压焓图

Fig. 3 Pressure-enthalpy diagram of heat pump with enhanced vapor injection device

3 干燥空气热分析

图 4(图中 d 表示空气绝对湿度)所示为流经干燥机空气的湿焓图。其中没有热回收装置的粮食热泵干燥机内的空气流动为 $A-B-C$,其中 A 表示环境空气的状态, B 表示经过热泵冷凝器加热后的热空气状态, C 表示流经干燥仓后的空气状态。此时热泵的制热量 Q 为

$$Q = \rho u_0 (h_B - h_A) \quad (1)$$

式中 ρ ——空气密度,取 1.2 kg/m^3

u_0 ——流动速度, m/s

h_B ——经过热泵冷凝器加热后的热空气焓值, kJ/kg

h_A ——环境空气焓值, kJ/kg

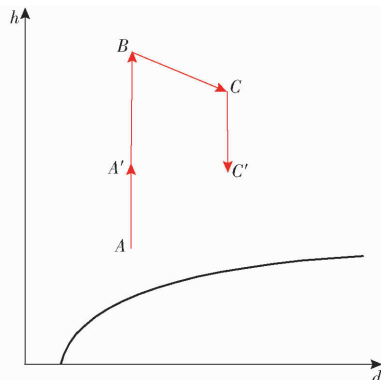


图 4 干燥空气湿焓图

Fig. 4 Humidity-enthalpy chart of drying air

加有热回收装置的粮食热泵干燥机内的空气流动为 $A-A'-B-C-C'$,其中 $A-A'$ 表示环境空气流

经热回收装置, $C - C'$ 表示废气流经热回收装置。此时热泵的制热量为

$$Q = \rho u_0 (h_B - h_{A'}) \quad (2)$$

式中 $h_{A'}$ ——环境空气经过热回收装置预热后的焓值, kJ/kg

所以使用热回收装置后节约的制热量为

$$\Delta Q = \rho u_0 (h_{A'} - h_A) = \rho u_0 (h_C - h_{C'}) \quad (3)$$

$$h = c_p T + r_s d \quad (4)$$

$$c_p = 1.01 + 1.84d \quad (5)$$

式中 c_p ——空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

T ——空气温度, K

r_s ——水的气化潜热, kJ/kg

h_C ——经过干燥机后废气焓值, kJ/kg

$h_{C'}$ ——经过热回收装置后废气焓值, kJ/kg

根据上述方法, 分析计算逐级流经热回收装置和各级冷凝器的空气状态, 如表 1 所示。通过计算可知在环境温度为 5°C 的低温下, 理论上热泵机组的送风温度可达 65°C , 设计采用的技术方案和手段可以达到目标, 具有可行性。

4 热泵装置关键部件设计

4.1 热泵制热量与压缩机选型

热泵制热量计算公式为

$$Q = \rho c_p q (T_2 - T_1) \quad (6)$$

表 2 热泵干燥条件分析

Tab. 2 Heat pump drying condition analysis

谷物种类	热风温度/ $^\circ\text{C}$	月份	高低温	环境温度/ $^\circ\text{C}$	平均温度/ $^\circ\text{C}$	空气密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	制热量/ kW
小麦	65	6	日均低温	21	43.0	1.117	55.0
			日均高温	29	47.0	1.103	44.6
稻谷	50	10	日均低温	13	31.5	1.159	48.0
			日均高温	22	36.0	1.142	36.0
		11	日均低温	7	28.5	1.171	56.5
			日均高温	16	33.0	1.222	46.6

表 3 热泵配置

Tab. 3 Heat pump configuration

热泵机组	压缩机型号	额定功率/ kW	热泵工质	冷凝器面积/ m^2	蒸发器面积/ m^2
热泵 I	YW205A1 - V100	5.97	R22	54.0	118.6
热泵 II	YW245A1 - V100	6.71	R22	58.4	112.0
热泵 III	YW180J1 - V100	6.71	R134a	54.0	60.0

4.2 换热器设计

蒸发器和冷凝器采用翅片管式结构, 翅片管式冷凝器结构示意图如图 5 所示。

换热面积计算公式为

$$F = \frac{Q_C}{k \Delta T} \quad (8)$$

表 1 空气状态参数

Tab. 1 Air status parameters

阶段	干球温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/%	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	焓值/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
环境空气	5	90.00	1.263 9	17.353 7
经过热回收装置	10	64.00	1.241 6	22.441 1
经过第 1 级冷凝器	30	18.50	1.159 7	42.741 7
经过第 2 级冷凝器	50	6.35	1.087 9	63.027 6
经过第 3 级冷凝器	65	3.13	1.037 9	78.249 6

式中 q ——通风量, m^3/s

T_2 ——热风温度, K

T_1 ——环境温度, K

热泵压缩机功率计算公式为

$$W = \frac{Q}{C_{OP}} \quad (7)$$

式中 W ——热泵压缩机功率, kW

C_{OP} ——热泵制热系数

小麦干燥作业的时间段集中在 6 月, 环境条件参照南京市 6 月的平均温度, 稻谷干燥作业集中于 10 月和 11 月, 环境条件参照南京市 10 月和 11 月的平均温度, 如表 2 所示。

根据计算, 热泵机组的制热量不大于 60 kW 。根据制热量, 热泵压缩机选择英华特生产的热泵专用压缩机, 压缩机等热泵主要设备参数如表 3 所示。

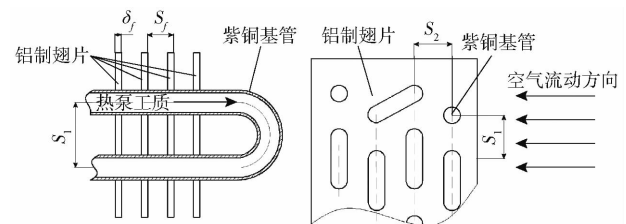


图 5 翅片管式换热器结构示意图

Fig. 5 Schematic of finned tube heat exchanger

$$\Delta T = \left| \frac{T_{air,out} - T_{air,in}}{\ln \frac{T - T_{air,in}}{T - T_{air,out}}} \right| \quad (9)$$

式中 F ——换热面积, m^2

Q_C ——传热量, kW

k ——传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

ΔT ——对数平均温差, K

$T_{\text{air, in}}$ ——空气进风侧温度, K

$T_{\text{air, out}}$ ——空气出风侧温度, K

4.3 热泵装置结构

热泵装置的系统流程图如图 6 所示。

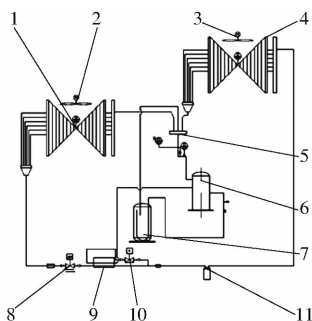


图 6 热泵装置系统流程图

Fig. 6 Flow chart of heat pump system

1. 蒸发器 2. 蒸发器风机 3. 冷凝器风机 4. 冷凝器 5. 四通换向阀 6. 压缩机 7. 气液分离器 8. 膨胀阀 9. 经济器 10. 喷气增焓阀 11. 储液器

5 热泵装置性能试验

5.1 试验仪器

试验仪器设备主要有热泵型循环式谷物干燥机(图 7)、PT100 型温度传感器(深圳 RBD 公司)、EE65 型风速传感器(E + E ELEKTRONIK 公司)和 DTS634 型电能表(正泰公司)。

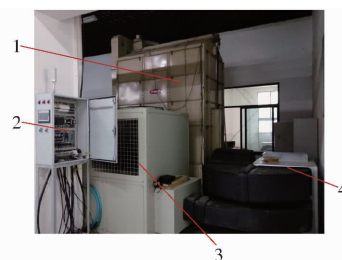


图 7 热泵型循环式谷物干燥机实物图

Fig. 7 Heat pump type circulating grain dryer

1. 干燥机 2. 控制柜 3. 热泵机组 4. 热回收装置

5.2 试验方法

2018 年 2—6 月在江苏省南京市浦口区利用本文设计制造的热泵干燥机进行对比试验,比较传统热泵机组与采用喷气增焓系统的热泵机组性能区别:不同环境温度下的最高供风温度、制热量、电能消耗和热泵制热系数(COP)。试验中,温度由温度传感器测得,风速由风速传感器测得,热泵制热量按照式(6)计算,电功由电能表测得,热泵制热系数按照式(7)计算。试验时,在不同环境温度条件下,分别开启和关闭热泵机组的喷气增焓阀,利用上述的仪器和方法进行测试和计算。

5.3 试验结果与分析

试验结果如表 4 所示。由表中数据可知,在能够保证供风温度的前提下,当环境温度大于 5°C 时,关闭喷气增焓系统的 COP 更高,更加节能,当环境温度小于 0°C 时,开启喷气增焓系统的 COP 更高,且

表 4 热泵性能试验结果

Tab. 4 Effect of enhanced vapor injection device

环境温度/ $^\circ\text{C}$	关闭喷气增焓阀				开启喷气增焓阀			
	供风温度/ $^\circ\text{C}$	制热量/ kW	电能消耗/ kW	COP	供风温度/ $^\circ\text{C}$	制热量/ kW	电能消耗/ kW	COP
30	69	42.9	11.2	3.82	71	45.0	12.0	3.74
25	68	47.2	12.5	3.79	70	49.4	13.4	3.68
20	67	53.3	14.3	3.73	69	55.5	15.3	3.62
15	65	56.7	15.4	3.67	67	58.9	16.8	3.51
10	60	58.5	16.7	3.50	63	60.1	17.7	3.39
5	53	56.2	16.6	3.38	57	60.9	18.7	3.26
0	47	56.9	22.7	2.51	49	59.3	24.6	2.41
-5	40	54.5	24.7	2.21	45	60.6	26.0	2.33
-10	32	50.9	26.6	1.91	39	59.3	28.1	2.11

能获得更高的供风温度。

试验结果表明,在低温环境下,开启喷气增焓阀的热泵可以有效提高供风温度、制热量和系统能效比,解决稻谷干燥晚期由于低温环境造成的供风温度过低进而降低稻谷干燥作业效率的问题,同时提高了系统的能效比。设计的热泵机组可以满足江淮地区绝大部分情况下的稻麦干燥作业,实现了设计目标。

6 结论

(1)根据实际生产需要,设计了 3 级热泵供热系统,通过调节热泵机组启停适应环境温度和供风温度的变化要求,提高热泵系统的全年能效比。

(2)热泵机组中采用了带经济器的一次节流的喷气增焓系统,提高了热泵在寒冷条件下的制热能力和能效比。对设计的热泵机组进行了测试,结果

表明,当环境温度为 -5°C 时,未开启喷气增焓回路时,热泵机组供风温度为 40°C ,热泵装置的制热系数为2.21,开启喷气增焓回路时,热泵机组的供风

温度为 45°C ,热泵装置的制热系数为2.33。因此采用喷气增焓技术可以有效提高热泵机组的送风温度、制热系数和运行稳定性。

参 考 文 献

- [1] 熊瑞,朱文学,张棋. 小型水稻干燥机现状与发展趋势[J]. 食品研究与开发,2016,37(12):215-219.
XIONG Rui, ZHU Wenxue, ZHANG Qi. The recent development of small paddy dryer[J]. Food Research and Development, 2016,37(12):215-219. (in Chinese)
- [2] 黄小丽,肖波,王振华,等. 过热蒸汽干燥稻米力学特性试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):199-203.
HUANG Xiaoli, XIAO Bo, WANG Zhenhua, et al. Mechanical characteristics of rice dried with superheated steam[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(2):199-203. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140233&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.033. (in Chinese)
- [3] 李长友,方壮东. 高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(5):179-184.
LI Changyou, FANG Zhuangdong. Analytical models of multistage counter flow drying and tempering process of grain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(5):179-184. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140528&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.028. (in Chinese)
- [4] 李长友,张焯,麦智炜. 高湿粮食贮藏干燥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):231-235.
LI Changyou, ZHANG Ye, MAI Zhiwei. Design and experiment of dryer for high moisture grain storage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):231-235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140437&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.037. (in Chinese)
- [5] 张习军,熊善柏,赵思明. 微波处理对稻谷品质的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(1):224-229.
ZHANG Xijun, XIONG Shanbai, ZHAO Siming. Effect of microwave on paddy quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009,42(1):224-229. (in Chinese)
- [6] 董铁有,朱文学,木村俊范,等. 糙米的厚层微波干燥[J]. 农业工程学报,2003,19(2):160-162.
DONG Tiejou, ZHU Wenxue, TOSHINORI K, et al. Microwave drying of thick layer brown rice[J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(2):160-162. (in Chinese)
- [7] NARET M, ADISAK N, THANID M, et al. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2007,78(4):1248-1258.
- [8] 徐泽敏,谢修鸿,牟莉. 稻谷真空干燥工艺参数对糙米爆腰增率的影响[J]. 农机化研究,2019,41(4):186-189.
XU Zemin, XIE Xiuhong, MOU Li. Effects of technical parameters on the crackle ratio increment of brown rice in paddy rice vacuum drying[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(4):186-189. (in Chinese)
- [9] 马培勇,张静,邢献军,等. 稻谷真空干燥动力学实验研究[J]. 真空科学与技术学报,2017,37(12):1146-1152.
MA Peiyong, ZHANG Jing, XING Xianjun, et al. Experimental study on drying kinetics of rice in vacuum[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017,37(12):1146-1152. (in Chinese)
- [10] 陈东. 热泵技术手册[M]. 北京:化学工业出版社,2012.
- [11] 李骅,尹文庆. 热泵技术在农业中的应用前景分析[J]. 江西农业学报,2006,18(4):151-152.
LI Hua, YIN Wenqing. Applications of heat pump techniques in agriculture[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2006,18(4):151-152. (in Chinese)
- [12] TSOTSAS E, MUJUMDAR A S. Modern drying technology: energy savings [M]. Weinheim: Wiley-VCH Press, 2011.
- [13] 王教领,宋卫东,金诚谦,等. 杏鲍菇转轮除湿热泵干燥系统结构设计及工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2019,35(4):273-280.
WANG Jiaoling, SONG Weidong, JIN Chengqian, et al. Structural design and process parameter optimization of heat pump drying system of wheel dehumidification for *Pleurotus eryngii* [J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(4):273-280. (in Chinese)
- [14] GEORGIEV A. Testing solar collectors as an energy source for a heat pump[J]. Renewable Energy, 2008,33(4):832-838.
- [15] 朱文学,尤泰斐,白喜婷,等. 基于低场核磁的马铃薯切片干燥过程水分迁移规律研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):364-370.
ZHU Wenxue, YOU Taifei, BAI Xiting, et al. Analysis of moisture transfer of potato slices during drying using low-field NMR [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):364-370. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181243&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.043. (in Chinese)
- [16] 明廷玉,李保国. 太阳能与热泵联合干燥茶叶的应用研究[J]. 太阳能学报,2017,38(10):2730-2736.
MING Tingyu, LI Baoguo. Application research of combined drying tea with solar energy and heat pump system[J]. Acta

- Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(10):2730-2736. (in Chinese)
- [17] 石启龙,赵亚,魏彦君. 热泵干燥南美白对虾品质特性与玻璃化转变关系研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):297-302. SHI Qilong, ZHAO Ya, WEI Yanjun. Relationship between quality change and glass transition during heat pump drying of *Penaeus vannamei* meat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):297-302. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170139&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.039. (in Chinese)
- [18] AYNUR T N, HWANG Y H, RADERMACHER R. Field performance measurements of a heat pump desiccant unit in heating and humidification mode[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(5):678-683.
- [19] GOH L J, OTHMAN M Y, MAT S, et al. Review of heat pump systems for drying application[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9):4788-4796.
- [20] JIE J, HE H F, CHOW T T, et al. Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(5):1365-1373.
- [21] CHUA K J, CHOU S K, YANG W M. Advances in heat pump systems: a review [J]. Applied Energy, 2010, 87(12):3611-3624.
- [22] 陈明,龚丽,赵锡和,等. 热泵干燥机干燥稻谷的试验研究[J]. 现代农业装备, 2004(4):62-64.
- [23] 罗乔军,张进疆,吴耀森,等. 稻谷热管辅助热泵除湿干燥技术[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊):247-251. LUO Qiaojun, ZHANG Jinjiang, WU Yaosen, et al. Rice drying using heat pump dehumidifying system with heat pipe[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.):247-251. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.040. (in Chinese)
- [24] 陈怡群,常春,胡志超,等. 循环式谷物干燥机干燥过程的模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):255-259. CHEN Yiqun, CHANG Chun, HU Zhichao, et al. Simulation and analysis of drying process for recirculating grain dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):255-259. (in Chinese)
- [25] 李长友. 粮食热风干燥系统 评价理论研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12):1-6. LI Changyou. Exergy evaluation theory of hot air drying system for grains[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12):1-6. (in Chinese)