

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.023

太阳能辅助热泵综合就仓干燥系统实验研究*

李海峰¹ 李勇¹ 代彦军¹ 高素芬² 魏雷³ 李宗良⁴

(1. 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240; 2. 中国储备粮管理总公司, 北京 100044;
3. 河南未来机电工程有限公司, 郑州 450001; 4. 中央储备量昆明直属库, 昆明 650100)

【摘要】 设计了一种由太阳能空气集热器、热泵和翻粮机组成的太阳能辅助热泵就仓干燥系统,用于粮食就仓干燥。对系统进行了实验研究,研究结果表明,太阳能空气集热器平均热效率达到63%,热泵性能系数达到5.4,联合系统能够提供充足、稳定的热量,并且干燥效果明显、干燥时间短、耗电量小、干燥均匀性好。应用该系统可安全、节能、有效地降低仓储玉米含水率。

关键词: 太阳能 热泵 就仓干燥 实验

中图分类号: TU249.2; S214.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0109-05

Experiment on Hybrid Solar Drying System Assisted by Heat Pump for Grain In-store Drying

Li Haifeng¹ Li Yong¹ Dai Yanjun¹ Gao Sufen² Wei Lei³ Li Zongliang⁴

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. China Grain Reserves Corporation, Beijing 100044, China 3. Henan Weilai Machines Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China 4. State Grain Reserves Kunming Depot, Kunming 650100, China)

Abstract

A hybrid solar drying system assisted by heat pump for grain in-store drying was developed. The system is composed of solar air collector, heat pump and stir machine for grain. The experimental study was conducted for maize drying. The results indicated that average thermal efficiency of the air collector is up to 63% and COP of the heat pump can reach 5.4. The combined system can supply adequate and stable thermal energy. The effect of drying is obvious. Drying time is reduced and energy consumption is low. Besides, the uniformity of moist content is improved. Utilized for maize in-store drying, the system can reduce the moisture content of maize in the granary with the characteristics of safety, energy saving and better effect.

Key words Solar energy, Heat pump, In-store drying, Experiment

引言

干燥是实现高含水率谷物安全储藏的必要手段。常规谷物干燥方式包括谷物干燥机干燥和自然通风干燥两种。前者能耗高、干燥后粮食品质低、劳动强度大;后者干燥时间长、受天气影响大、干燥均匀性差。降低干燥能耗、提高干燥效果是谷物干燥

技术的发展方向。将太阳能应用于谷物干燥领域是发展谷物干燥新技术的有益尝试^[1]。

国外对太阳能谷物干燥的研究起步较早,如今已有种类众多的太阳能谷物干燥设备和方法。从干燥规模来看,有小型太阳能谷物干燥器和大型太阳能谷物干燥仓。太阳能谷物干燥器有基于自然循环的被动式干燥装置,又有利用风机进行强迫对流的

收稿日期: 2009-08-20 修回日期: 2009-12-09

* “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD08B06-2)

作者简介: 李海峰, 硕士生, 主要从事太阳能热利用研究, E-mail: lihaifeng85@gmail.com

通讯作者: 李勇, 副教授, 主要从事太阳能热利用与太阳能空调研究, E-mail: liyo@sjtu.edu.cn

主动式干燥装置,其形式包括温室型、集热器型和混合型,种类繁多,类型各异^[2];太阳能谷物干燥仓是将收获的粮食直接放入大型仓库,用经过集热器的温热空气进行通风,干燥时间大大缩短^[3],目前在美国中西部等北美地区发展较好。国内对太阳能谷物干燥的研究应用较少。付立思等设计了一种热能辅助型太阳能箱式干燥器^[4],刘圣勇等对太阳能集热器干燥小麦和玉米进行了实验研究^[5-6]。国内也有太阳能干燥仓应用,但是这种干燥仓相对较小,其用途仅是干燥,干燥后的谷物仍需转移至其他仓储。对于干燥与储存合一的就仓干燥方式,国内尚未有太阳能应用的报道。

本文针对常规就仓干燥方式的不足以及太阳能谷物干燥的特点,研究一种新的就仓干燥工艺——太阳能辅助热泵就仓干燥,并对其进行性能测试与实仓干燥实验。

1 太阳能辅助热泵就仓干燥系统

1.1 系统构成及其工作原理

安装于中央储备粮昆明直属库的太阳能辅助热泵就仓干燥系统,由太阳能集热系统Ⅰ、热泵Ⅱ、通风地上笼系统Ⅲ组成,图1为该系统的示意图。

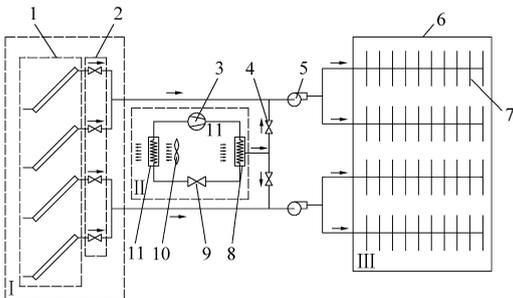


图1 太阳能辅助热泵就仓干燥系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of solar assisted heat pump drying system

1. 太阳能空气集热器 2,4. 风量调节阀 3. 压缩机 5. 离心风机 6. 粮仓 7. 通风地上笼 8. 冷凝器 9. 节流阀 10. 轴流风机 11. 蒸发器

太阳能集热系统由4台空气集热器组成,与热泵采用并联的方式连接。热泵冷凝器出口管路分成两支;4台集热器分成两组,每组集热器管路并联之后,与热泵管路分支并联进入风机。系统工作原理为:环境空气经过太阳能空气集热器和热泵被加热,由两台离心风机送入粮仓外墙底部的4个通风口,经仓房底部的通风地上笼进行空气分配,形成均匀的自下而上的气流,对仓内谷物进行干燥,吸湿后的空气由仓房上部排风口排出。为了解决垂直方向干燥的不均性,还引入了移动式翻粮机械,该机可以在粮面自动行走,于通风期间间歇使用。

太阳能空气集热器和热泵既可以单独使用又可以联合运行。当天气晴朗气温高时,单独使用太阳能集热器,热泵不开启;当多云、气温低或者夜间,开启热泵,系统处于太阳能-热泵联合运行或热泵单独运行模式。

1.2 设备参数

系统中的设备包括太阳能空气集热器、热泵、送风机以及翻粮机,各设备的相关参数见表1。

表1 系统设备相关参数

Tab.1 Related parameters of the equipments in the system

| 设备 | 参数 |
|-------|--|
| 空气集热器 | 平板式,可移动,共4台,单个集热面尺寸4 m × 6 m,空气流道深30 mm,安装倾角23.4°,总集热面积96 m ² |
| 热泵 | 工质R22,压缩机额定功率22 kW,蒸发器与冷凝器均为翅片管式,换热面积183 m ² ,蒸发器风机额定功率4 kW |
| 送风机 | 离心式风机,共2台,额定功率15 kW |
| 翻粮机 | 杆长4 m,额定功率2.2 kW |

2 就仓干燥实验测试

实验包括设备性能测试和实仓干燥测试。设备性能测试以测试集热器和热泵运行效果为目的,两者分别进行;实仓干燥测试以评估系统的干燥效果为目的。

2.1 实验条件及测试方法

实验于中央储备粮昆明直属库进行,所在地昆明(东经102.86°,北纬25.02°)地处云贵高原中部,太阳能资源丰富,全年平均日照为2 250 h左右,太阳能辐射强度年均5 461 MJ/m²。实验粮仓为中央储备粮昆明直属库的13号仓,为平房仓式,粮食品种为玉米,其相关参数见表2。

表2 实验仓相关参数

Tab.2 Related parameters of the experiment granary

| 参数 | 数值 |
|----------------|---------------------|
| 仓房尺寸/m × m × m | 37.22 × 22.86 × 7.8 |
| 粮食初始含水率/% | 12.9 |
| 装粮高度/m | 5.3 |
| 装粮量/t | 3 760 |

太阳能空气集热器与热泵的性能测试分别进行。集热器的测试在晴朗的白天进行,在一定通风量的条件下,测试集热器进出口空气的温度、管道风速以及太阳能辐射强度;热泵的测试在气温较低的白天或者夜间进行,在一定的通风量条件下,测量热

泵冷凝器进出口空气温度、管道风速、压缩机功率等。

实仓干燥测试是在一定通风参数下,开启太阳能辅助热泵加热系统,测量粮食含水率、系统总耗电量等。含水率测量采用 105℃ 标准法,将全仓分 5 层,共选取 120 个取样点。系统总耗电量由配电箱中的总表记录。干燥测试期间的固定通风参数如下:系统总风量为 34 800 m³/h,其中太阳能空气集热器承担 11 530 m³/h,热泵承担 23 270 m³/h。

测量参数及相关测量仪器见表 3。

表 3 测量参数及测量仪器

Tab.3 Measuring parameters and instrument

| 测量参数 | 测量仪器或方法 |
|--------|------------------|
| 温度 | 铂电阻 PT100 |
| 风速 | 热线风速仪 ALNOR 8585 |
| 太阳辐射强度 | 总辐射表 TBQ-2 |
| 功率 | 三相功率表 |
| 粮食含水率 | 105℃ 标准法 |

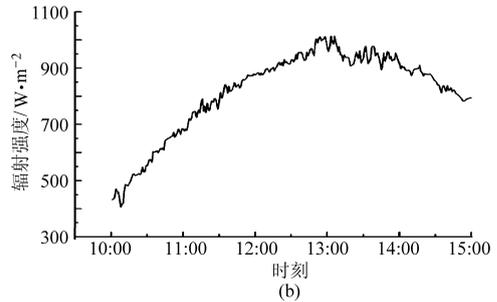
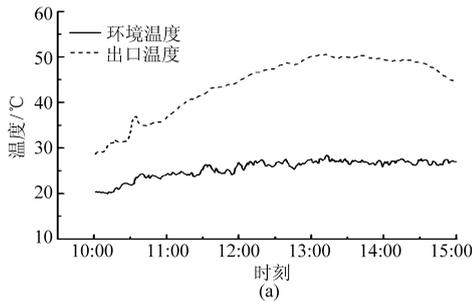


图 2 太阳能空气集热器运行参数

Fig.2 Operation parameters of solar air collector

(a) 温度 (b) 辐射强度

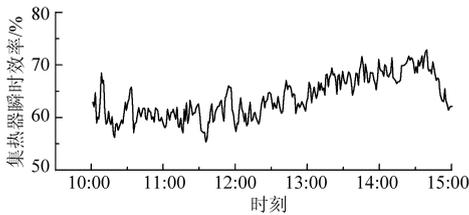


图 3 太阳能空气集热器瞬时效率

Fig.3 Transient thermal efficiency of solar air collector

从实验结果可以看出:①太阳辐射强度最大时,空气流经太阳能空气集热器的温升达到 23.8℃,太阳能空气集热器提供的最大集热量达到 15.7 kW,因此 4 台集热器最多可向系统提供 62.8 kW 热量。②太阳能空气集热器的瞬时热效率值在 56% ~ 68% 之间,经计算,该天实验期间的 5 h 内集热器平均热效率达到 63%,属于高效的空气集热器,适合在场地有限的粮库使用。

2.3 热泵性能分析

热泵性能系数(COP)是评估热泵性能的主要指

2.2 空气集热器性能分析

太阳能空气集热器性能可以用集热器热效率 η 来评估。 η 反映了集热器将太阳辐射能转化为热能的能力。瞬时热效率的定义为

$$\eta = \frac{Q_c}{AI} = \frac{c_p q_m \Delta t}{AI} \quad (1)$$

式中 Q_c ——空气在集热器中获得的热量

A ——集热器的集热面积

I ——太阳能辐射强度 c_p ——空气比热容

q_m ——空气质量流量 Δt ——空气的温升

由于场地限制,实际安装的太阳能空气集热器在 10:00 之前和 15:00 之后有部分集热面被仓房和其周边设施遮挡,故选取 10:00 ~ 15:00 之间的数据分析集热器性能。选取 2009 年 3 月 24 日对 1 号集热器的实验数据进行分析。实验当天辐射连续、稳定,辐射强度大,最高辐射强度达 1 014 W/m²。在集热器风量为 2 070 m³/h 条件下测得的空气集热器性能结果见图 2、3。

标。其定义为

$$k_{COP} = \frac{Q_{HP}}{P_{com}} = \frac{c_p q_m \Delta t}{P_{com}} \quad (2)$$

式中 Q_{HP} ——热泵加热功率

P_{com} ——压缩机耗功

选取 2009 年 4 月 10 日的实验数据进行分析。测得实验期间的冷凝器风量为 23 270 m³/h,图 4 给出了实验期间环境温度和冷凝器出口空气温度的变化,以及相应的热泵加热量。图 5 给出了热泵运行的性能系数随时间的变化。

从实验结果可以看出:①在气温条件变化的情况下,热泵能提供较稳定的加热量,因此作为就仓干燥的辅助热源,可以保证干燥过程的连续与安全。②在环境温度为 15 ~ 20℃ 时,该热泵可以提供 66 ~ 80 kW 的热量,实验期间平均加热量为 74.1 kW。③热泵性能系数介于 4.9 ~ 5.9 之间,平均值达到 5.4,表明在一定的电力投入下获得了更多的热量,提升了整个系统的节能性。

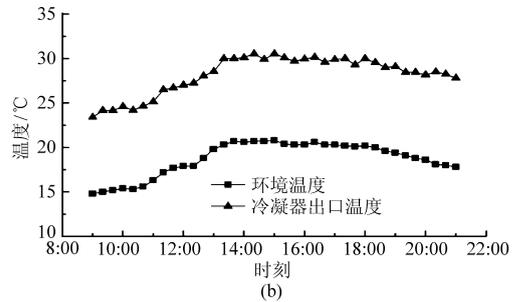
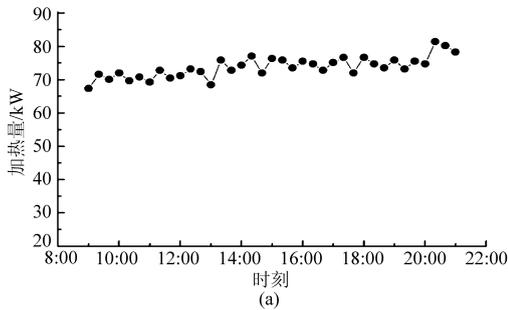


图4 热泵运行参数

Fig.4 Operation parameters of heat pump

(a) 加热量 (b) 温度

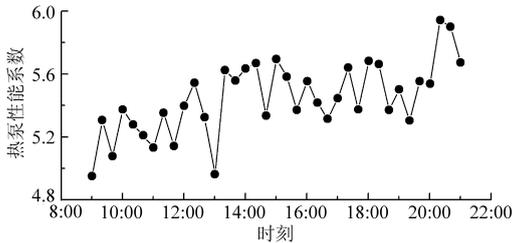


图5 热泵性能系数曲线

Fig.5 COP of the heat pump

2.4 干燥效果

实仓干燥实验于2009年4月30日~5月5日进行,有效通风时间42 h。通风干燥实验期间天气多变,因此既有集热器和热泵单独加热方式,又有二者联合加热方式。总体来看,入仓空气温度至少环境温度6℃以上。实验期间整仓平均含水率的变化见图6。

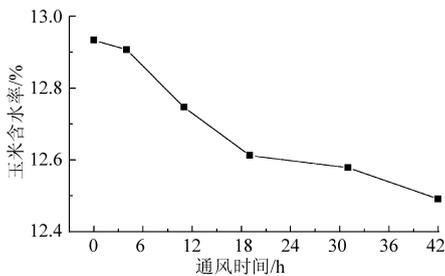


图6 玉米整仓平均含水率随干燥时间的变化

Fig.6 Variation of the average moisture content vs time

可以看出,经过42 h的通风,粮食含水率得到有效降低,整仓平均含水率降低0.4%。另外,水分均匀性改善。在全部120个样品中,实验前的最大含水率差为4.7%,实验后的最大含水率差为2.8%,样品含水率差减小。在5个取样层中,实验前层间最大含水率差为0.7%,实验后层间含水率差为0.3%,层间含水率差减少。

需要指出的是,限于实验条件,实验开始前玉米的初始含水率12.9%已低于国家对玉米要求的储藏上限13.5%,理论上已不需要进行干燥。但本次实验旨在评估太阳能辅助热泵干燥工艺的效果,重

点在于设备性能上,使用低含水率粮得到的实验结果仍能够表明本系统的运行效果。

3 太阳能辅助热泵就仓干燥优势分析

太阳能辅助热泵就仓干燥工艺是为了解决常规自然通风就仓干燥方式的不足,有别于使用谷物干燥机的方式,这两种干燥方法同属于另一类型——储藏仓和干燥仓合一的就仓干燥。太阳能辅助热泵就仓干燥工艺具有如下优势:

(1) 节能

参照《储粮机械通风技术规程》,以每吨粮食下降1%含水率的耗电量 E_w 来评价本次实验的能耗水平^[7]。 E_w 定义为

$$E_w = \frac{W}{G(M_i - M_o)} \quad (3)$$

式中 W ——系统总耗电量

G ——实验粮食总质量

M_i ——粮食初始含水率

M_o ——粮食干燥后含水率

本次实验所有用电设备的额定功率见表4。

表4 用电设备额定功率

Tab.4 Power equipments and the rated power

| 耗电设备 | 额定功率/kW |
|---------|---------|
| 送风离心风机 | 15 |
| 压缩机 | 22 |
| 蒸发器轴流风机 | 4 |
| 仓房轴流风机 | 0.55 |
| 翻粮机 | 2.2 |

实验共耗电1860 kW·h,降水幅度0.4%,据此计算得到 $E_w = 1.24 \text{ kW} \cdot \text{h} / (1\% \cdot \text{t})$,低于规程中的玉米降水通风标准 $2.0 \text{ kW} \cdot \text{h} / (1\% \cdot \text{t})$ ^[7],且低于其他常规就仓干燥实验结果^[8],节能效果明显。

(2) 干燥时间缩短

由于有太阳能空气集热器和热泵作为加热热源,在任何天气条件下均可以保证一定加热量,入仓

空气温度较环境温度高,使就仓干燥时间大大缩短。本次实验含水率下降 0.4%,实际通风时间 42 h。根据文献中自然通风就仓干燥实验结果,采用自然通风方式含水率下降 0.4% 大约需要 120 h^[8],可以看出使用该系统后干燥时间缩短 2/3。

(3) 干燥均匀性改善

本文研究的就仓干燥工艺中使用了移动式翻粮机械,使得粮仓上下部粮食得到交换,常规就仓干燥中的不均匀性现象得到较好改善。如第 2 节所述,取样点最大含水率差由 4.7% 减小到 2.8%,层间最大含水率差由 0.7% 减小到 0.3%,干燥均匀性得到较大改善。

(4) 受环境条件限制小

常规自然通风就仓干燥依赖于环境条件,环境

温度低或者湿度高的时候均不适合进行通风。太阳能辅助热泵的使用克服了这种缺陷,该加热系统在对环境空气升温的同时也降低了其相对湿度,使其适用的气候范围大大增加。

4 结束语

对太阳能辅助热泵就仓干燥系统进行了实验研究,研究结果显示,在本实验条件下,所采用的太阳能空气集热器热效率高,平均值达到 63%,天气晴朗时,集热器总加热量最高可以达到 62.8 kW,加热量充足;热泵性能系数达到 5.4,能够提供稳定的加热量,高效且节能;两者结合用于就仓干燥,干燥效果良好。干燥时间短,能耗低,干燥均匀性好,不影响粮食品质。

参 考 文 献

- 1 Wisniewski G. Market development of the solar crops drying technologies in Poland and Europe [J]. *Renewable Energy*, 1999, 16(7): 1 278 ~ 1 283.
- 2 Atul Sharma, Chen C R, Nguyen Vu Lan. Solar-energy drying systems: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6): 1 185 ~ 1 210.
- 3 代建国. 太阳能辅助热泵就仓干燥系统关键技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
Dai Jianguo. Investigation on key technology of a solar assisted heat pump in-bin grain drying system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- 4 付立思, 孙国凯, 王滨, 等. 热能辅助型太阳能箱式干燥器的设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(8): 157 ~ 158.
- 5 刘圣勇, 张百良, 袁超, 等. 采用太阳能集热器干燥玉米的研究 [J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 93 ~ 96.
Liu Shengyong, Zhang Bailiang, Yuan Chao, et al. Experimental study on drying corn using solar air collectors [J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(6): 93 ~ 96. (in Chinese)
- 6 刘圣勇, 张梅峰, 杜俊峰, 等. 太阳能集热器干燥小麦的研究 [J]. *河南农业大学学报*, 2000, 34(2): 168 ~ 171.
Liu Shengyong, Zhang Meifeng, Du Junfeng, et al. Study on drying wheat with solar air collectors [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2000, 34(2): 168 ~ 171. (in Chinese)
- 7 LS/T 1202—2002 储粮机械通风技术规程 [S].
LS/T 1202—2002 Technical regulation of aeration for grain storage [S]. (in Chinese)
- 8 刘慧, 张来林, 任立民, 等. 高分水粮机械通风就仓干燥实验 [J]. *河南工业大学学报*, 2007, 28(5): 22 ~ 25.
Liu Hui, Zhang Lailin, Ren Limin, et al. The in-store drying experiment of high moisture content by mechanical ventilation [J]. *Journal of Henan University of Technology*, 2007, 28(5): 22 ~ 25. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- 9 Cushman D W, Cheung H S. Spectrophotometric assay and properties of the angiotensin-converting enzyme of rabbit lung [J]. *Biochemical Pharmacology*, 1971, 20(7): 1 637 ~ 1 648.
- 10 Drogaris P, Le Blanc J C Y, Fitzgerald J E, et al. Enhanced protein detection using a trapping mode on a hybrid quadrupole linear ion trap (Q-trap) [J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(15): 6 300 ~ 6 309.
- 11 任露泉. 试验优化设计与分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 440 ~ 442.
- 12 Yuka K, Tadashi Y, Tomohis A K, et al. Angiotensin-1 converting enzyme (ACE) inhibitory mechanism of tripeptides containing aromatic residues [J]. *J. Biosci. Bioeng.*, 2008, 106(3): 310 ~ 312.
- 13 Cheung H S, Wang F L, Ondetti M A, et al. Binding of peptide substrates and inhibitors of angiotensin-converting enzyme. Importance of the COOH-terminal dipeptide sequence [J]. *J. Biol. Chem.*, 1980, 255(2): 401 ~ 407.