

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.06.021

闫俊海, 高龙, 刘寅, 等. 低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统及特性分析[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(6): 169-175.

YAN J H, GAO L, LIU Y, et al. The characteristic analysis of multifunctional grain storage system with low temperature drying, refrigeration and humidification[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(6): 169-175.

# 低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统及特性分析

闫俊海, 高龙, 刘寅, 孟照峰, 王顺, 吴飞骏, 谢亚琦, 张士雯

(中原工学院 能源与环境学院, 河南 郑州 450007)

**摘要:** 干燥是粮食行业的主要耗能环节, 目前粮食干燥多采用烘干机或烘干塔, 热损失大、能耗高, 有些以煤炭作为热源, 环境污染严重。另外, 粮食长期储藏过程中易发生霉变和虫害, 同时长期储藏会导致粮食水分过低影响粮食加工品质。实现粮食高品质、低能耗干燥及长期安全储藏和保证出库粮食的品质具有重大意义, 因此提出了一种低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统, 并基于该系统开发了具有低温干燥模式、低温冷藏模式和加湿调质模式的设备, 可实现“一站式”储粮, 使储粮全程自动化控制。通过实验测试, 结果表明, 三种工作模式下, 机组出风参数均满足设计要求。对玉米和萝卜进行了初步干燥实验, 玉米的平均干燥速度约 1.1%/h、萝卜干燥平均干燥速度 2.9%/h 左右。通过对系统进行能耗分析可知, 本机组与烘干机相比可节能 19.4% 左右, 与冷凝去湿干燥机相比可节能 51.7% 左右。该设备的驱动能源为电能, 环境友好, 便于实现粮库的智能化建设, 市场应用前景广阔。

**关键词:** 粮食; 低温干燥; 低温冷藏; 加湿; 溶液除湿

中图分类号: S375; TU111.4+3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)06-0169-07

## The Characteristic Analysis of Multifunctional Grain Storage System with Low Temperature Drying, Refrigeration and Humidification

YAN Jun-hai, GAO Long, LIU Yin, MENG Zhao-feng, WANG Shun,  
WU Fei-jun, XIE Ya-qi, ZHANG Shi-wen(School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology,  
Zhengzhou, Henan 450007, China)

**Abstract:** Drying is the main energy consumption in the grain industry. At present, most grain drying are using machines or drying towers, but its heat loss and energy consumption is large. Some of dryers use coal as heat source and cause serious environmental pollution. In addition, the long-term storage of grain is prone to mildew and insect pests. At the same time, long-term storage of grain will lead to low water content of grain and affect the processing quality of grain. Therefore, it's significant to realize the high-quality-low-energy

收稿日期: 2022-07-09

基金项目: 中原工学院青年骨干教师资助计划(2018XQG05、2020XQG05); “智汇郑州·1125 聚才计划”创新创业领军团队

Supported by: Funding Program for Key Young Teachers of Zhongyuan University of Technology (No. 2018XQG05, 2020XQG05); “Zhihui Zhengzhou 1125 Talent Plan” Innovation and Entrepreneurship Leading Team

作者简介: 闫俊海, 男, 1980 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为热泵干燥及蓄能技术。E-mail: 532464038@qq.com.

consumption drying and long-term safe storage of grain to ensure the quality of exported grain. A multifunctional grain storage system with low temperature drying, refrigeration, and humidification was proposed. The equipment was developed according to the system. It had three functions such as low temperature drying mode, low temperature storage mode, and humidification mode. The equipment can realize “one-stop” grain storage and automatic control of the whole process of grain storage. The experimental results showed the air parameters of unit outlet met the design requirements in the three working modes. The average drying rates of corn and radish were about 1.1%/h and 2.9%/h, respectively. In addition, the unit can save about 19.4% of energy compared with the dryer, and 51.7% of energy compared with the condensing and dehumidifying dryer through the energy consumption analysis of the system. The driving energy of this equipment was electric, so it was eco-friendly and easy to realize the intelligent construction of granary, coming with a prospect of broad application.

**Key words:** grain; low temperature drying; low temperature storage; humidification; liquid dehumidification

我国每年粮食因霉变及虫害损失巨大<sup>[1]</sup>。为了保证粮食的安全储藏，必须对其进行适度的干燥处理，目前粮食产后的机械干燥方法主要有常压热风干燥、热泵干燥、冷凝法除湿干燥等<sup>[2]</sup>。热风干燥是传统的干燥技术，也是目前应用最为广泛的粮食干燥方法之一，烘干机<sup>[3-5]</sup>就是其中一种，其热源大部分采用煤炭，也有少部分利用生物秸秆、稻壳及燃油等，能耗高，对环境有较大污染。热泵干燥技术<sup>[6-9]</sup>，当前在英国、德国等发达国家已在谷物干燥中得到了广泛应用，而国内也已广泛应用于谷物、果蔬、水产品等物料加工过程。冷凝法除湿干燥技术<sup>[10-12]</sup>，属于低温慢速干燥范畴，虽然也能满足粮食的干燥要求，但是设备运行成本较高，存在着高湿、大风量情况下效率低，运行中排水不便等问题。低温慢速干燥<sup>[13-16]</sup>相比于高温干燥的烘干机，虽然干燥耗时较长，但粮食干燥后的品质较高，目前国内外均对该技术开展了广泛研究。溶液除湿相比于冷凝法去湿，除湿能力强，可精准调温调湿，系统节能更显著，近年来已有学者对溶液除湿机组在粮库中应用进行了研究<sup>[17-20]</sup>，但主要集中在理论研究方面。

粮食完成干燥后，进入储藏阶段。低温储粮技术<sup>[21-22]</sup>是目前发展起来的一种常见的生态储粮模式，其将平均粮温控制在 15 °C（最高不超过 20 °C）以下，避免了常规储粮模式使用化学农药治理霉菌及害虫的生长，因此大大降低了粮食化学药剂残留，提高粮食品质。另外，低温储粮可降低粮食呼吸量，减缓粮食的新陈代谢，延

长储藏时间，也减少或避免粮食储藏过程中的倒仓，节省人力和物力，低温储粮是绿色储粮的首选方法。

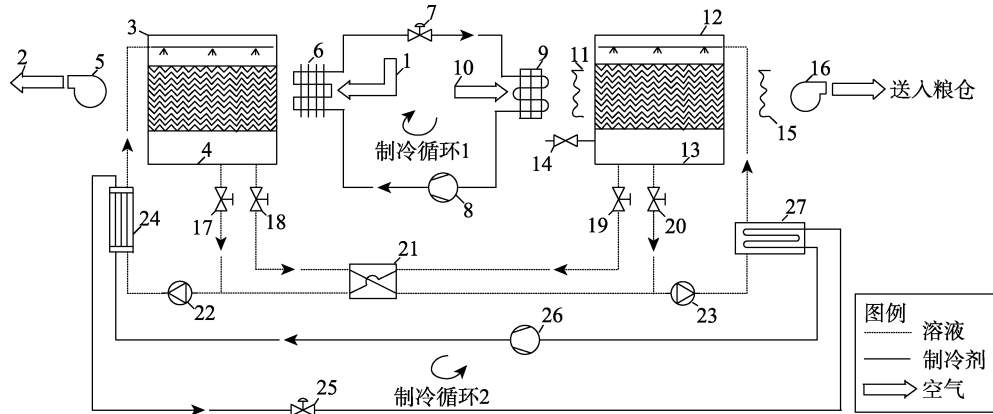
随着粮食储存时间的延长，水分会散失，水分过低，会带来粮食的外观质量下降；粮食食用品质下降；粮食的机械加工特性受到影响；粮食损耗严重，企业的经济效益会受到影响等问题。

“加湿调质”是指经过选择或控制的高湿空气通入粮堆，利用粮粒吸附解析特性，增大粮食水分含量的通风方式。加湿的方式常见的有：直接喷干蒸汽、喷雾蒸发、红外线加湿、湿膜加湿等。湿膜加湿的加湿效率较高，并且对加湿的空气有清洁效果，能耗较低，是常用的一种加湿方式<sup>[23-24]</sup>。

结合以上背景，本项目围绕溶液除湿方式，提出了低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统，该系统可实现粮食低温干燥、低温冷藏和加湿调质三种功能，根据国内外文献及市场调研，目前市场上还未见到类似设备。该系统以电能驱动，环境友好，而溶液循环又利用冷凝废热作为驱动能源，系统整体节能效果显著。因此，无论从储粮品质优势、节能减排和经济效益来考虑，该设备都具有广阔的市场应用价值。

## 1 系统设计及工作原理

本设计基于溶液除湿和热泵技术构建了低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统，该系统包括通风系统、溶液除湿循环、制冷循环，制冷循环又分为制冷循环 1 和制冷循环 2 两部分，系统原理图如图 1 所示。



1. 环境空气 2. 环境空气 3. 再生器 4. 储液箱 15. 风机 16. 空气冷凝器 7. 膨胀阀 18. 压缩机 19. 空气蒸发器 10. 空气 11. 电加热器 12. 除湿器 13. 储液箱 24. 水阀 15. 电加热器 2 16. 风机 2. 17. 流量调节阀 18. 流量调节阀 2 19. 流量调节阀 3 20. 流量调节阀 4 21. 溶液与溶液换热器 22. 溶液泵 1 23. 溶液泵 2 24. 溶液冷凝器 25. 膨胀阀 2 26. 压缩机 2 27. 溶液蒸发器

Note: 1. Ambient air 2. Ambient air 3. Regenerator 4. Liquid storage tank 1 5. Fan 1 6. Air condenser 7. Expansion valve 1 8. Compressor 1 9. Air evaporator 10. Air 11. Electric heater 1 12. Dehumidifier 13. Liquid storage tank 2 14. Water valve 15. Electric heater 2 16. Fan 2 17. Flow regulating valve 1 18. Flow regulating valve 2 19. Flow regulating valve 3 20. Flow regulating valve 4 21. Solution-solution heat exchanger 22. Solution pump 1 23. Solution pump 2 24. Solution condenser 25. Expansion valve 2 26. Compressor 2 27. Solution evaporator

图 1 低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of multi-functional grain storage system of low temperature drying, refrigeration and humidification conditioning

低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统有三种运行模式，即低温干燥模式、低温冷藏模式和加湿调质模式，其工作过程如下。

### 1.1 低温干燥模式

通风系统。除湿侧，空气流经蒸发器与低温制冷剂换热被冷却除湿后，进入溶液除湿器与低温溶液进行热、质交换，空气被再次除湿，获得的低温低湿空气经过电加热器，机组出口空气参数控制在  $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度控制在 70% 以下<sup>[25]</sup>（空气相对湿度可根据粮食种类，在保证粮食品质下，尽可能采用较低值提高粮食干燥速度，本机组采用的溶液除湿系统可精确控制空气的相对湿度大小）。机组出口空气由风机送入进风管道，经进风管道进入粮仓的环形地笼风网，低温干燥空气穿过分风地笼细开孔进入粮层，对于高大平房仓可采用地上笼通风与立体插管相结合的通风方式，空气向上移动穿过粮层吸收粮食水分后通过仓上排气孔排入大气或通过回风管道再次回到机组（视环境空气参数而定）。再生侧，环境空气进入空气冷凝器与高温制冷剂换热升温后，流经再生器与稀溶液进行热、质交换空气被加湿，通过风机排入环境空气中。

溶液除湿循环。浓溶液在溶液除湿器中吸收

空气水分后成为稀溶液，然后分为两路，一路稀溶液通过热交换器与来自再生溶液箱的一路浓溶液换热升温，然后与来自再生溶液箱中另一路浓溶液混合，经溶液泵进入冷凝器加热，再送入再生器与热空气进行热、质交换变为浓溶液。溶液除湿器中另一路稀溶液，与来自再生器的另一路经热交换器换热冷却的浓溶液按一定比例混合，经溶液泵进入蒸发器与制冷剂换热冷却，然后进溶液除湿器再一次对空气除湿，从而完成了一个循环。

制冷循环。该循环分为制冷循环 1 和制冷循环 2 两个循环系统。制冷循环 1，从压缩机排出的高温高压制冷剂气体，进冷凝器与环境空气换热凝结成高压液体，再经膨胀阀节流降压，变成低温低压湿蒸汽，进入蒸发器与空气换热变为低温低压气体回到压缩机从而完成一个制冷循环。制冷循环 2，从压缩机排出的高温高压制冷剂气体，进冷凝器与稀溶液换热凝结成高压液体，再经膨胀阀节流降压，变成低温低压湿蒸汽，进入蒸发器与除湿溶液换热变为低温低压气体回到压缩机，从而完成一个循环。制冷循环的冷量用来冷却空气和溶液，提高溶液除湿效率，而冷凝热用作溶液除湿循环的驱动能源，用来加热空气和溶液。

### 1.2 低温冷藏模式

低温冷藏模式，系统仅运行制冷循环 1 风机 5 和风机 16，溶液除湿循环和制冷循环 2 不运行。空气流经除湿器进入蒸发器与低温制冷剂换热冷却，获得的低温空气通过电加热器进入风机，然后送入粮仓，进入粮仓的空气参数温度控制在 $(10 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度控制在 70%~80% [25]。

### 1.3 加湿调质模式

根据实验 [8]，当空气相对湿度不大于 96% 时，风道壁干燥，符合安全储粮要求。当储粮需要加湿调质时，关闭再生器下部储液箱上两路阀门，启动再生侧溶液循环泵，将除湿器下部储液箱的溶液全部抽吸到再生器下部的储液箱，然后关闭再生溶液泵，关闭除湿器下部储液箱上进入热交换器这一管路上的阀门，此时除湿器下部储液箱溶液已排空，然后开启储液箱上的水阀进行充水，充水完毕后，关闭水阀，启动除湿器侧风机、除湿侧循环泵，空气流经除湿器与水进行热、质交换，空气湿度被加湿到 95% 以下，获得的高湿空气送入粮仓实现对低水分粮食的加湿调质。

## 2 机组设计性能测试

为了验证机组的低温干燥、冷藏和加湿的性能，本文在不同室外空气状况下对机组各运行模式下的性能进行了实验测试。在此基础上，为了进一步验证低温干燥的效果，选取新收获的玉米和萝卜进行了干燥实验，实验装置如图 2 所示。



图 2 低温干燥冷藏调湿多功能储粮设备实验台  
Fig.2 Experimental bench of multi-functional grain storage equipment for low temperature drying, refrigeration and humidification

### 2.1 低温干燥性能测试

为了验证低温干燥模式下机组除湿侧的出风

参数能否满足设计要求，本文对不同工况下机组的出风参数进行了测试，实验结果如图 3 所示。图中每个数字代表一种工况与带上标的数字工况相对应。从图 3 可以看出，在不同工况下，入口空气经过机组处理后，机组除湿侧出口空气温度均在 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ，相对湿度在 32% 以下，满足机组设计要求。

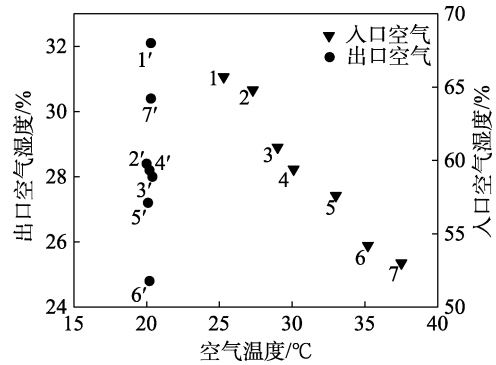


图 3 低温干燥模式机组除湿侧进、出口空气参数  
Fig.3 Variation of air parameters at inlet and outlet of dehumidification side of unit in low-temperature drying mode

### 2.2 低温冷藏性能测试

粮食干燥结束后，机组直接切换为低温冷藏模式。为了验证机组低温冷藏模式下的性能，对不同工况下机组的出风参数进行了实验研究，其结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，不同工况下，入口空气经机组蒸发器冷却后，空气温度均在 $(10 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ，空气相对湿度在 70%~80% 之间，满足机组设计要求。

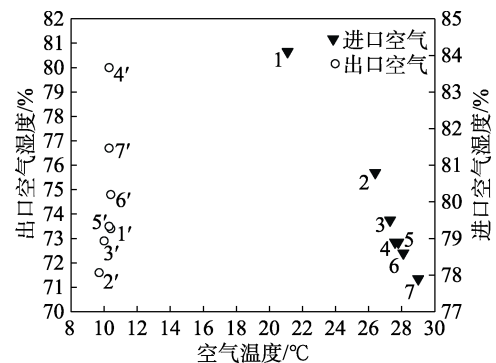


图 4 低温冷藏模式机组除湿侧进口、出口空气参数  
Fig.4 Variation of air parameters at inlet and outlet of dehumidification side of unit in cold storage mode

### 2.3 加湿性能测试

粮食过分干燥不仅会影响粮食品质，也减少

了粮食企业的经济效益,可通过高湿空气对粮食进行加湿调质。本机组通过湿膜对入口空气进行加湿,为验证机组加湿性能,对不同工况下,机组出口空气参数进行了测试,实验结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,不同工况下,入口空气参数经机组加湿后,空气相对湿度在 95% 左右,满足机组设计要求。

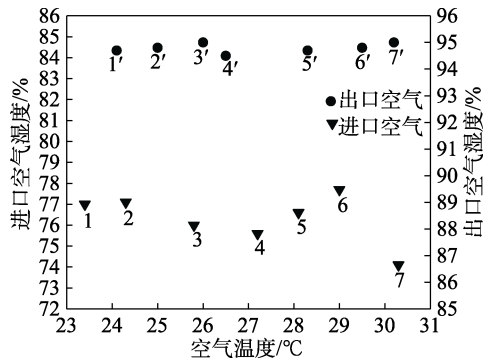


图 5 加湿调质模式机组除湿侧进口、出口空气参数

Fig.5 Variation of air parameters at inlet and outlet of dehumidification side of unit in humidification and conditioning mode

## 2.4 物料干燥初步测试

为了进一步验证机组的性能,对玉米和萝卜进行了干燥测试。实验结果如图 6 所示。从图中可以看出萝卜在前 12 小时内干燥速率大,然后逐渐平缓并趋于稳定。玉米在整个干燥过程中干燥速率相对稳定。在此干燥过程中,玉米平均干燥速度为 1.1%/h、萝卜干燥平均干燥速度为 2.9%/h。

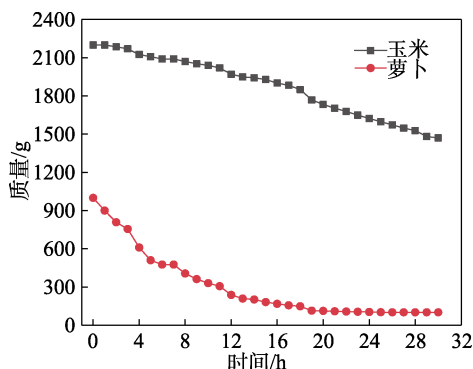


图 6 低温干燥模式下玉米萝卜质量随时间的变化

Fig.6 Changes of corn radish quality over time in low-temperature drying mode

## 3 系统能耗分析

粮食干燥过程中的热量消耗,主要可分为三

个部分:粮食内部水分蒸发需要的热量、升温需要的热量和干燥过程中干燥器的热损失。

粮食水分蒸发需要的热量设为  $Q_1$ :

$$Q_1 = (m_1 w_1 - m_2 w_2) \times \gamma \quad (1)$$

式中:

$m_1$ ——干燥前粮食质量, kg

$m_2$ ——干燥后粮食质量, kg

$\gamma$ ——水的气化潜热, 2 500 kJ/kg

$w_1$ ——干燥前粮食水分

$w_2$ ——干燥后粮食水分

粮食升温需要的热量设为  $Q_2$ :

$$Q_2 = m_1 c (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中:

$c$ ——粮食的比热容, kJ/(kg·K)

$t_1$ ——干燥前粮食温度, °C

$t_2$ ——预热后的温度, °C。

在整个干燥过程中,假定损失的热量占总干燥热量的 10%,则干燥过程的热损失  $Q_3$  为:

$$Q_3 = (Q_1 + Q_2) \times 10\% \quad (3)$$

则粮食干燥需要的热量为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (4)$$

机组单位耗能除水量定义为 DPC:

$$DPC = \frac{m_1 - m_2}{W} = \frac{m_1 (w_1 - w_2)}{(1 - w_2)} \times \frac{1}{W} \quad (5)$$

式中:

$W$ ——标准煤耗量, kg (标煤)

设备节能率  $E$  为:

$$E = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

$N_1$ ——干燥设备 1 的能耗, kJ

$N_2$ ——干燥设备 2 的能耗, kJ

本文以 110 t 小麦为例,设定干燥前含水率为 25%,干燥后含水率为 13%,将本机组与烘干机 and 冷凝去湿干燥机进行了对比分析。为了便于比较,各机组单位能耗除水量,机组能耗均折算为标准煤消耗量。本机组和冷凝法去湿干燥机以进口空气温度 30.9 °C、相对湿度 76%,机组出口空气温度 20 °C,相对湿度 43%,对应的本机组运行能耗为 37.2 kW,冷凝去湿干燥机制冷性



能系数 COP 取 3.4 进行计算。煤发电的一次能源转换效率按 40% 计算, 新设计机组的低温干燥粮食降水速率取 0.11%/h<sup>[13]</sup>。

通过分析计算, 不同机组单位能耗除水量如图 7 所示。从图 7 可以看出, 本机组相比于烘干机和冷凝法去湿干燥机, 其单位能耗除水量 DPC 最大, 约为 12.2 kg (水)/kg (标煤)。冷凝法去湿干燥机单位能耗除水量 DPC 最小, 约为 5.9 kg (水)/kg (标煤)。从各机组单位能耗除水量大小可以看出, 在相同粮食干燥条件下, 本机组的需要的能耗最小, 烘干机的能耗小于冷凝法去湿干燥机的能耗。

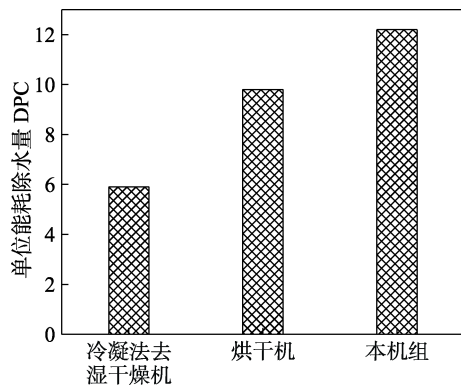


图 7 不同机组单位能耗除水量比较

Fig.7 Comparison of water removal per unit energy consumption of different units

为了进一步分析机组的能效特点, 本文对本机组与市场广泛使用的烘干机及冷凝去湿干燥机的能耗进行了对比分析, 机组的节能率比较结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, 本机组与烘干机相比节能率约为 19.4%, 与冷凝法去湿干燥机相比可节能约 51.7%, 节能效果明显。

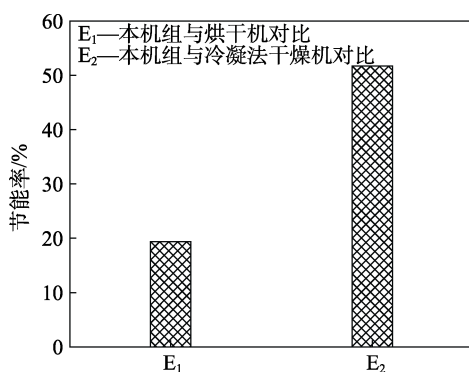


图 8 机组节能率比较

Fig.8 Comparison of energy saving rate of different units

## 4 结论

本文提出了一种低温干燥冷藏调湿多功能储粮系统, 该系统具有低温慢速干燥功能、低温储藏功能和加湿调质功能, 并基于该系统开发了设备。通过实验和性能分析可知: (1) 通过实验测试了机组在低温干燥模式、低温冷藏工作模式和加湿调质模式, 不同进风工况下, 机组除湿侧出口空气参数均满足了设计要求。(2) 选择了玉米和萝卜片进行了初步干燥实验, 结果表明, 玉米的平均干燥速度为 1.1%/h、萝卜干燥平均干燥速度为 2.9%/h。(3) 本机组相比于烘干机和冷凝去湿干燥机, 单位能耗除水量最大约 12.2 kg (水)/kg (标煤) 左右。(4) 本机组与烘干机相比可节能 19.4% 左右, 与冷凝去湿干燥机相比可节能 51.7% 左右。

本设备能够实现“一站式”储粮, 粮食干燥完成后能够直接转入低温冷藏模式, 粮食出库时, 设备可切换到加湿调质工作模式, 对粮食进行加湿, 提高了粮食后期加工品质及粮食企业效益。另外, 本设备的驱动能源为电能, 对环境无污染, 充分利用冷凝废热作为溶液除湿的驱动能源, 系统节能效果显著。因此, 该设备市场应用潜力巨大。

## 参考文献:

- [1] 毕文雅, 张来林, 郭桂霞. 我国粮食干燥的现状与发展方向[J]. 粮食与饲料工业, 2016(7): 12-15.  
BI W Y, ZHANG L L, GUO G X. Current situation and development direction of grain drying in china[J]. Cereal & Feed Industry, 2016(7): 12-15.
- [2] 任广跃, 张忠杰, 朱文学, 等. 粮食干燥技术的应用及发展趋势[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(2): 124-127.  
REN G Y, ZHANG Z J, ZHU W X, et al. Application and development trend of grain drying technique[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(2): 124-127.
- [3] 顾广东, 曹磊, 刘超, 等. 粮食就仓干燥技术研究与应用[J]. 粮食与饲料工业, 2021, (3): 10-15.  
GU G D, CAO L, LIU C, et al. Research and application of grain storage drying technology[J]. Cereal & Feed Industry, 2021, (3): 10-15.
- [4] 段谟泽, 徐诚, 谢亚春. 浅谈粮食烘干机的分类和选型[J]. 现代食品, 2021, 27(18): 14-15.  
DUAN M Z, XU C, XIE Y C. Classification and selection of grain dryer[J]. Modern Food, 2021, 27(18): 14-15.
- [5] 尹协镇, 李海兵. 粮食烘干塔除尘装置中离心式除尘器的优

- 化[J]. 粮食与饲料工业, 2014, 12(10): 16-18.
- YIN X Z, LI H B. Optimization of centrifugal dust collector in dust removal unit of grain drying tower[J]. Cereal & Feed Industry, 2014, 12 (10): 16-18.
- [6] 陈坤杰, 左毅, 李和清, 等. 热泵式低温循环谷物机控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 316-323.
- CHEN K J, ZUO Y, LI H Q et al. Design and experiment of heat pump low-temperature circulating grain dryer control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 316-323.
- [7] 裘骏凯, 龚泽颖, 许鹏程, 等. 粮食干燥环流热泵除湿供热系统的工程设计要点浅析[J]. 粮食与食品工业, 2022, 29(2): 5-8.
- QIU J K, GONG Z Y, XU P C, et al. Analysis of engineering design essentials of grain drying circulation heat pump dehumidification heating system[J]. Cereal & Food Industry, 2022, 29(2): 5-8.
- [8] 黄毅成, 於海明, 繆磊, 等. 热泵干燥技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2020, 10(6): 61-65.
- HUANG Y C, YU H M, MIU L, et al. Research status and development trend of heat pump drying technology[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(6): 61-65.
- [9] ZHOU X, LIU L, FU P, et al. Effects of infrared radiation drying and heat pump drying combined with heat pump drying combined with tempering on the quality of long-grain paddy rice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2008, 53(11): 2448-2456.
- [10] 张馨予, 段洁利, 吕恩利, 等. 仓储除湿技术研究进展[J]. 现代农业装备, 2015, (4): 39-43.
- ZHANG X Y, DUAN J L, LV E L, et al. Progress on storage dehumidification technologies[J]. Modern Agricultural Equipments, 2015, (4): 39-43.
- [11] 李再贵. 日本粮食通风除湿干燥设施的发展特点[C]. 北京: 2002 农业工程青年科技论坛论文集, 中国农业工程学会, 2003, 66-68.
- LI Z G. Development characteristics of ventilation, dehumidification and drying facilities for grain in Japan[C]. Beijing: Proceedings of 2002 Agricultural Engineering Youth Science and Technology Forum, Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 66-68.
- [12] 岳治强. 利用冷凝热的冷冻除湿在种质库中的应用[J]. 冷藏技术, 2017, 40(2): 30-32.
- YUE Z Q. Application of refrigeration dehumidifying using condensing heat in germplasm repository[J]. Cold Storage Technic, 2017, 40(2): 30-32.
- [13] 章慧全. 低温慢速粮食通风干燥技术及其应用[J]. 农业科技与装备, 2010, (1): 49-51.
- ZHANG H Q. Ventilation and drying techniques for grains with low temperature and slow speed and their applications[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2010, (1): 49-51.
- [14] 赵思孟. 粮食低温慢速通风干燥[J]. 农业科技与装备, 2010, (1): 49-51.
- ZHAO S M. Ventilation and drying techniques for grains with low temperature and slow speed and their applications[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2010, (1): 49-51.
- [15] 仲立新. 稻谷就仓低温通风干燥系统设计[J]. 粮油食品科技, 2010, 18(3): 1-3.
- ZHONG L X. Design of in-store low-temperature ventilating & drying system for paddy[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2010, 18(3): 1-3.
- [16] 王鑫, 苏宏凯, 唐有为, 等. 溶液除湿机组在高温高湿储粮区低温粮库中的应用[J]. 科技创新与应用, 2018, (26): 179-180.
- WANG X, SU H K, TANG Y W, et al. Application of solution dehumidifier in low temperature grain depot in high temperature and high humidity grain storage area[J]. Technology Innovation and Application, 2018, (26): 179-180.
- [17] 熊慧灵, 刘何清, 李永存. 太阳能-溶液-热泵干燥系统节能分析[J]. 建筑节能, 2015(5): 56-60.
- XIONG H L, LIU H Q, LI Y C. Annlysis on energy saving of solar-solution-heat pump drying system[J]. Building Energy Efficiency, 2015(5): 56-60.
- [18] 彭冬根, 聂江涛, 孙万富. 热泵驱动的溶液除湿在谷物就仓干燥中的应用[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 67-76.
- PENG D G, NIE J T, SUN W F. Application of grain in-bin drying based on liquid desiccant dehumidification driven by heat pump[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(6): 67-76.
- [19] 彭冬根, 聂江涛, 陈文华. 基于分层模型的溶液除湿谷物就仓干燥系统性能及能耗[J]. 农业工程, 2021, 37(14): 274-282.
- PENG D G, NIE J T, CHEN W H. Performance and energy consumption of liquid desiccant dehumidification grain in-bin drying system via layered model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 274-282.
- [20] 程志伟. 粮食低温储藏技术分析[J]. 现代食品, 2015, 12(24): 79-80.
- CHENG Z W. Analysis of grain storage technology at low temperature[J]. Grain Distribution Technology, 2015, 12(24): 79-80.
- [21] 符云辉, 王南, 王建闯. 低温储藏高水分稻谷与常规储藏安全水分稻谷效果对比初研[J]. 粮食问题研究, 2021, (5): 46-54.
- FU Y H, WANG N, WANG J C. Reliminary study on effect comparison between low temperature storage of high moisture rice and conventional storage of safe moisture rice[J]. Grain Issues Research, 2021, (5): 46-54.
- [22] 黄秋菊, 刘乃玲. 粮食调质中加湿器的选择[J]. 粮食加工, 2006, 31(5): 47-50.
- HUANG Q J, LIU N L. Choice of humidifier in grain humidification [J]. Grain Processing, 2006, 31(5): 47-50.
- [23] 张来林. 储粮机械通风技术[M]. 郑州大学出版社, 2013: 204-208.
- ZHANG L L. Mechanical ventilation technology for grain storage [M]. Zhengzhou University Press, 2013: 204-208.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 粮油储藏技术规范: GB/T 29890—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Technical specification for grain and oil storage: GB/T 29890—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. ㊞