

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.02.022

王延坤, 陈鹏泉, 朱文学, 等. 大中型粮食烘干设备研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(2): 171-177.

WANG Y K, CHEN P X, ZHU W X, et al. Research progress on large and medium-sized grain drying equipment[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(2): 171-177.

大中型粮食烘干设备研究进展

王延坤, 陈鹏泉, 朱文学✉, 蒋萌蒙, 朱玉格, 靳英哲, 王晓弯

(河南工业大学 粮食和物资储备学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 随着农业科技的进步, 粮食烘干设备在粮食加工过程中得到广泛应用。而关于粮食烘干的研究大多集中在工艺优化上, 对于粮食烘干设备的研究较少, 导致新型工艺技术难以应用, 粮食烘干设备的进步受到制约。目前应用于粮食烘干的有热风、热泵、远红外、太阳能、真空、微波以及联合干燥设备, 本文从工作原理、干燥效率、干后品质、能源消耗、发展趋势等方面对以上粮食干燥技术及其设备进行综述, 介绍了节能环保、智能调控的新型干燥设备的研究现状, 分析了各种大中型粮食烘干设备及技术存在的问题, 并对粮食烘干设备的发展趋势提出建议, 以期为粮食烘干产业健康发展提供参考。

关键词: 粮食; 干燥技术; 烘干设备; 联合干燥; 热泵; 远红外; 太阳能; 真空; 微波

中图分类号: S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2024)02-0171-07

网络首发时间: 2024-02-26 17:53:33

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240226.1418.014>

Research Progress on Large and Medium-sized Grain Drying Equipment

WANG Yan-kun, CHEN Peng-xiao, ZHU Wen-xue✉,
JIANG Meng-meng, ZHU Yu-ge, JIN Ying-zhe, WANG Xiao-wan
(College of Grain and Material Reserve, Henan University of Technology,
Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Grain drying equipment is an important equipment in Chinese agricultural production process, which can significantly improve the quality of grain processing after harvest and reduce the loss rate of mildew and germination during grain storage. At present, the mechanical drying rate of grain in China was only about 30%, and its overall penetration rate still had a great opportunity to improve. The market for grain dryers has great potential for development, and under the encouragement of national policies, the research on the technology, technology and applicability of dryers has been also constantly improved. In recent years, most research on grain drying has focused on process optimization, while there has been less research on

收稿日期: 2023-09-06

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)基金(222102110367); 河南省高等学校重点科研项目计划(21A550003); 河南工业大学高层次人才基金(2020BS002; 2020BS009); 郑州市创新领军团队项目

Supported by: Special Fund for Key Research and Development and Promotion in Henan Province (No.222102110367); Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province (No.21A550003); High-level Talent Fund of Henan University of Technology (No.2020BS002; 2020BS009); Zhengzhou Innovation Leading Team Project

作者简介: 王延坤, 男, 2000年出生, 在读硕士生, 研究方向为粮食通风与干燥。E-mail: wyk12313@163.com

通讯作者: 朱文学, 男, 1967年出生, 博士, 教授, 研究方向为农产品加工与贮藏、粮油干燥贮藏。E-mail: zwx@haut.edu.cn

grain drying equipment, which has made it difficult to apply excellent process technology and restricted the progress of grain drying equipment. This paper summarized the latest large and medium-sized grain drying equipment and the existing main problems, and put forward some suggestions, which could provide a reference for the research and development of grain drying technology and equipment.

Key words: grain; drying technology; drying equipment; combined drying; heat pump; far infrared; solar; vacuum; microwave

我国是粮食生产大国, 2022 年粮食总产量 68 653 万 t, 而我国每年受霉变因素造成的粮食损失率约为 8%, 每年损失约 5 000 万 t^[1]。因此, 为了保证长期储存, 需要在粮食收获后尽快烘干, 使湿基含水量达到 14% 左右。传统自然晾晒耗时长效率低, 且受限于气候因素和场地。粮食烘干机为粮食的干燥提供了一种替代传统晾晒干燥的方法。粮食烘干机具有初始和维护成本低、干燥速度快、品质高、时间短等优点。粮食烘干机能够用于小麦、玉米、稻谷以及作物种子的烘干^[2], 消耗的能源为煤炭、柴油、天然气、生物质、电能、太阳能等。烘干机的机型有厢式干燥机、塔式烘干机、移动式烘干机、转筒式烘干机等。根据不同的干燥技术可分为热风式烘干机、空气源热泵烘干机、远红外烘干机、微波烘干机、真空烘干机、太阳能热泵烘干机等。根据粮食籽粒与气流的相对运动方向, 烘干机可分为横流、混流、顺流、逆流及顺逆流、混逆流、顺混流等形式^[3]。根据干燥温度的不同可分为低温、常温和高温烘干机。根据对粮食供热方式不同可分为对流式、传导式和辐射式烘干机。大中型烘干机是按照日处理量以及烘干机的干燥能力来定义的, 每日处理量 100~500 t 定义为中型烘干机, 500 t 及以上的烘干机归类为大型烘干机。

我国粮食烘干机行业相较欧美日本等发达国家起步较晚, 从上世纪全进口引进, 到如今的同步发展, 我国目前烘干机技术和装备总体水平已经不亚于国外, 但是粮食机械烘干率仍远低于发达国家, 欧美及日本等发达国家在上世纪就已完成粮食烘干机机械化, 粮食机械烘干率更是达到了 95%, 我国起步较晚, 目前粮食机械烘干率只有 30%。粮食不同于经济类作物, 需求量大且稳定, 随着我国土地经营方式的变化, 种粮专业户、农业合作社等产粮大户成为粮食烘干机的主要用户

群体。今年河南大降雨对小麦收获产生了不利的影 响, 以及多个地方政府及国家政策对粮食烘干机购置补贴的支持, 进而反应粮食烘干机机械化的重要性。本文介绍了粮食的各种干燥技术和相应的烘干设备, 进行总结和分析。

1 大中型粮食单一技术干燥设备

1.1 热风式粮食烘干机

粮食烘干塔是用来烘干大批量谷物的烘干设备, 采用立式结构设计, 节省土建资源。粮食烘干塔采用热风干燥技术, 利用热风炉加热空气, 以热空气作为干燥介质, 与粮食颗粒接触换热达到干燥, 使粮食的水分达到安全储藏水平。此类烘干机消耗燃料为煤炭、柴油、煤油、天然气、生物质(秸秆等农林废弃物)等, 热源设备是热风炉。粮食烘干塔具有使用范围广、投资成本低、消耗低、简单易操作、处理量大、高自动化、燃料选择性多等直观且实际的优点, 缺点是干燥品质较差、不够绿色环保、能源利用率和转化率较低、设备和技术落后。

如图 1 所示, 粮食作物通过提升机从机顶输入塔体, 依次经过储粮段、干燥段、缓苏段、冷却段、卸粮段, 再由底部的螺旋输送机送至提升机再次重复烘干, 粮食在塔内做循环往复移动直至水分达到安全标准。整个生产流程包括湿粮接收、输送、烘干、温湿度监测、电气控制、废气处理。热风通过风道由进气角状盒进入到烘干塔内, 粮食在重力作用下沿角状盒外部空间呈 S 形由上向下流动^[4], 优秀的角状盒设计可以使热风得到更充分的利用。夏朝勇^[5]通过对粮食烘干塔的干燥段建立模型, 以不同的角状盒大小和进口风速对干燥段内温度场和速度场进行分析, 为烘干段中角状盒的设计提供了依据。刘卫东等^[6]在粮食进入烘干段前增加调质段, 设计热水热风炉

以产出调质段需要的水，对粮食进行干燥前处理，提前使颗粒中的水分扩散至粮食颗粒表面，节约能源而且减少粮食颗粒的爆腰率。

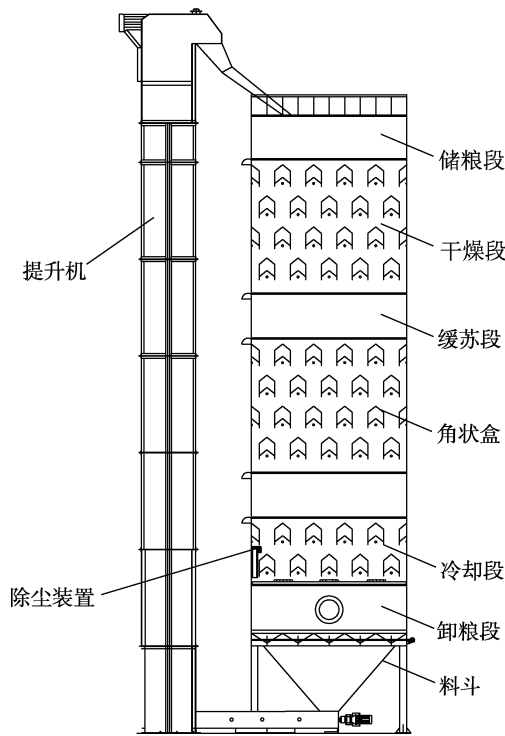


图 1 粮食烘干塔示意图

Fig.1 The schematic diagram of grain drying tower

粮食烘干塔智能化控制系统能精确智能的自动化控制烘干过程，通过对粮食干燥过程中的温湿度、水分变化、出机含水率等参数的把控，保证干燥过程的稳定性，提高干燥效率和品质。白喜婷等^[7]设计了一套粮食烘干机水分测量系统，该系统可以在干燥过程中全程测量粮食水分，并精确显示出粮食干燥进程中水分含量的变化。谢辉煌等^[8]通过神经网络（LSTM）算法建立了烘干塔出机水分预测模型，优化后证明可用于预测烘干机出机含水率。

1.2 空气源热泵粮食烘干机

空气源热泵粮食烘干机是新一代环保节能产品，热泵机组根据逆卡诺循环原理^[9]，用电能驱动系统运转，通过换热器吸收空气中能量后输出高温热风，1 份电能输入，可获得 3~4 份热量用于粮食烘干，高效节能且零污染排放。张进疆等^[10]通过对比不同干燥机对稻谷的干燥实验研究得出：燃油干燥机平均每吨干燥费用 184.1 元，CO₂

排放量 68.40 kg/t；生物质燃料干燥机平均每吨干燥费用 55.4 元，CO₂ 排放量 146.30 kg/t；热泵干燥机每吨干燥费用 58.8 元，CO₂ 间接排放量 50.19 kg/t；热泵干燥的爆腰率和均匀度均低于其它设备，空气源热泵干燥机使用的电能是一种清洁无污染可远程输送的能源，烘干过程绿色环保。

热泵出风温度会受环境温度的影响，能效比（COP）随环境温度的降低明显下降，对于一些在严寒地区的用户来说，热泵的干燥性能会降低。刘紫薇等^[11]研发了一套粮食烘干机变频式热泵系统，该系统有四台普通压缩机和一台变频压缩机组成，在低温下（0~5℃）稻谷干燥的平均性能系数提高了 16.5%，平均单位能耗除湿量提高了 34.4%，出风温度比普通定频热泵系统提高大约 32%，在低温环境能够高效运行。孙椰望等^[12]优化了大型热泵粮食烘干塔的结构强度和结构稳定性，实现了烘干塔在风力 8 级的台风环境下正常作业。

热泵技术在干燥领域有发展空间和潜力。热泵干燥设备能够提高粮食干燥品质，无污染排放，在市场竞争能力越来越强，热泵干燥设备现已经列入了我国产地初加工补助设施和农机补贴的目录。

1.3 太阳能粮食烘干机

太阳能是一种绿色、可再生的清洁能源，在煤炭、燃油、天然气等化工资源逐渐紧缺的背景下，新能源技术在干燥领域进入研发阶段。而且太阳能作为干燥热源有较高的能效系数。粮食通过两种方式吸收太阳的热量：一种是在温室内直接吸收；第二种是通过太阳能集热器吸收热量传递给空气，加热后的空气与物料进行对流换热达到干燥的目的。太阳能干燥系统主要有三种类型：间接干燥、直接干燥和混合干燥^[13]。目前已有的太阳能干燥技术：太阳能隧道干燥、太阳能温室干燥、太阳能联合热泵干燥、太阳能流化床干燥、太阳能储存干燥和太阳能光伏温室干燥。刘绍东^[14]发明了一种太阳能粮食干燥装置，利用太阳能将水加热后通过铜板将热量传递给待干燥的粮食，干燥更加均匀，干燥品质更高。许刚^[15]发明了一种太阳能双仓粮食烘干系统，干燥仓呈环状，烘

干循环系统包括并联的太阳能集热烘干系统和清洁能源烘干系统,从主粮仓到过渡粮仓循环烘干,降低能耗,提高烘干效率。

1.4 远红外粮食烘干机

红外干燥是以热辐射的形式进行热传递,干燥机制与热风干燥不同。热风干燥通过对流传热,由外而内传递热量,而红外干燥热量由内向外传导,当电磁波照射到粮食籽粒表面时,会导致其内部分子间摩擦而产生热量,粮食籽粒内部快速升温,内部温度高于表面温度,在温度差作用下,水分由内而外传递出来,从而完成干燥过程^[16]。远红外干燥速度快,能耗低,能有效杀灭粮食中的虫卵和霉菌,提高产品质量。

单一远红外干燥热源材料为陶瓷、硅碳棒、碳化硅板等,属于高温辐射源,特点是温度高、辐照时间短、瞬时强度大,导致粮食产生爆腰率高等品质问题。以石墨烯加热板为热源的低温远红外烘干设备,其红外发射体与粮食颗粒充分接触,从粮食籽粒内部和表面同时开始加热,能有效减少粮食因外层失水过快而造成的爆腰和龟裂等缺陷,保持粮食籽粒的完整性,粮食干燥品质好、效率高,干燥成本低,比传统热风烘干机节能 30%左右,且无明火和烟气排放^[17]。Du 等^[18]通过石墨烯远红外粮食干燥实验,研究不同因素对大米干燥时间和应力开裂指数的影响,获得石墨烯远红外干燥最佳工艺组合,得到更优的干燥品质和更高的干燥效率。颜建春^[19]发明了一种基于石墨烯远红外和空气对流耦合的粮食干燥系统,每级干燥模块均包括缓苏段、出风段、石墨烯远红外加热段和进风段,热风 and 远红外两种技术的联合使粮食的干燥速率得到提高。

远红外干燥技术是一项节能高效且投资小的技术,在粮食谷物干燥领域处于初步发展阶段。在粮食烘干机的市场下,石墨烯远红外干燥技术可应用于环保型烘干机的研发及清洁热源的使用,不仅可以实现粮食的绿色烘干,而且可以提高干燥品质、效率,降低生产成本。

1.5 真空粮食烘干机

真空干燥技术是将物料放在密闭空间中,将

空间中的空气抽出形成真空,同时对物料加热,使物料中的水分受到压力差和浓度差后向表面迁移,扩散至真空环境中,最终被真空泵抽出。目前常见的真空干燥设备有:真空干燥箱、连续真空干燥设备等。

真空低温干燥技术在粮食干燥行业的应用处于起步阶段。“远弘干燥”研制的粮食真空低温烘干机,把真空低温干燥技术应用到粮食干燥,抽去烘干室的内部空气达到真空负压状态,粮食籽粒内水分在负压状态下溶点沸点都随着真空度的提高而降低,真空导热散热装置实现高效能供热,辅以冷凝器、真空泵抽湿排气,降低烘干室内的水汽含量,使得粮食内水分获得足够的动能脱离籽粒,从而达到干燥的效果;解决了高温干燥时导致的粮食裂纹、破损的问题,保持粮食原有理化特性和营养成分;导热工质使用可以循环的水,能耗比传统热风干燥设备低 30%~60%,干燥过程不会产生废气废液,节能环保。

程长青等^[20]对水稻真空低温烘干机设备和工艺流程进行优化,增大真空干燥仓的有效容积以提高物料的导热、换热速度,增大粮食的干燥速率。程长青^[21]研发了一种连续性真空低温玉米烘塔(如图 2 所示),物料能够充分预热、连续进出料及均匀排粮,处理量 100~1 000 t/d,烘干效率高;在低温真空状态下对玉米进行干燥,不会造成玉米种皮裂纹及玉米粒破碎,提高粮食干燥品质;可在线检测物料水分和温湿度,对烘干全程监测控制。

1.6 微波粮食烘干机

微波干燥是一种新型的干燥技术,其原理是通过高频振荡的电磁波穿透粮食,微波被待干燥的粮食吸收后,将其所携带的能量在内部转化为热能,从而对粮食进行脱水干燥,且其热传导方向与水分扩散方向相同,因此具有升温快、干燥均匀及效率高等特点^[22]。微波干燥技术由于能实现精准的自动化控制,其研究及应用在粮食干燥领域逐渐发展。颜建春^[23]将微波干燥技术应用于流化床,发明一种基于微波加热的振动流化床粮食循环干燥机,微波发射装置向干燥室输出微波,使粮食被迅速加热并使其内部的水分迁移至表

面, 再通过热风与被干燥物料接触, 快速带走物料表面的水分, 提高干燥速率。黄汉英^[24]发明了一种粮食微波流态化联合干燥设备, 使粮食籽粒受热均匀, 干燥效率高, 干燥均匀, 具有杀虫、抑菌的功能, 适用于稻谷、小麦、玉米等流动性好的粮食。

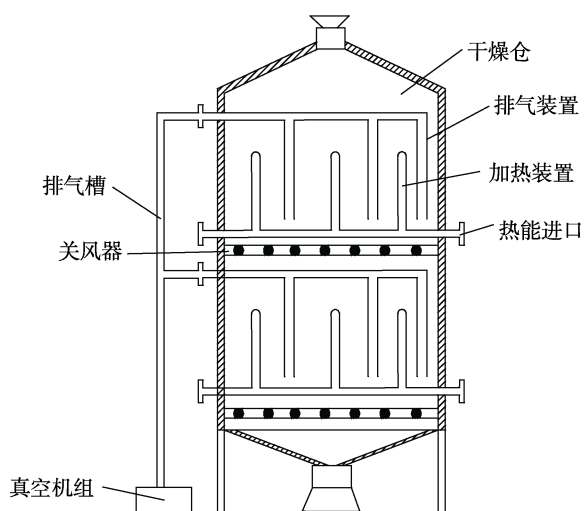


图 2 真空烘干塔示意图^[21]

Fig.2 The schematic diagram of vacuum grain drying tower^[21]

微波干燥在粮食干燥领域已有起步的基础研究, 但是微波干燥技术投资成本大、能耗高、易过度干燥等缺陷也限制其大规模推广应用。

2 粮食联合技术干燥设备

单一烘干技术都有其各自的优缺点, 在应用过程中都存在瓶颈问题。热风烘干机技术简单成熟, 烘干效率高, 但是污染排放高, 干燥品质较差; 空气源热泵烘干机节能环保, 技术应用待进一步推广; 太阳能烘干机过于依赖气候, 实用性差; 远红外烘干机成本低, 干燥效率高, 但是干燥过程不稳定, 粮食颗粒易出现爆腰的情况; 微波烘干机投资成本高, 多用于辅助干燥; 真空烘干机干燥品质良好, 但成本高, 烘干效率低, 不易推广。为实现高质、高效、节能的干燥效果, 可将两种或多种干燥技术进行结合使用, 实现不同干燥技术之间的优势互补, 即联合技术干燥设备。

2.1 太阳能联合热泵干燥设备

单一太阳能干燥设备用于粮食干燥经常会受限于天气、温度等环境条件, 但是太阳能联合热

泵干燥设备能够弥补不足。太阳能联合热泵干燥设备通过太阳能发电用于热泵运行, 而热泵可以弥补太阳能在夜间无法运行的缺点。丁德强等^[25]实验得出太阳能热泵联合干燥系统中平均 COP 为 6.18, 而热泵单独干燥平均 COP 为 3.05, 热风干燥平均 COP 只有为 1.1。在热泵的加持下, 该设备在低温或者无光照的环境下仍可以进行干燥作业, 具有节能、减排和提高干燥品质的优点。谈文松^[26]设计了一套由光伏发电系统供电的太阳能热泵粮食干燥设备, 热泵所需电能全部来自光伏发电系统白天所发的电量, 在最优的天气条件下, 设备的 COP 能够达到 2.4, 节能高效。王双凤^[27]建立了太阳能联合热泵整仓粮食静态干燥系统, 该系统弥补了太阳能受气候影响的缺点, 可以根据实际天气情况来进行最优化的配置, 实现系统最小的能耗。

2.2 热风联合红外干燥设备

热风干燥与其它干燥技术联合, 可以弥补其干燥品质差的缺点。目前远红外热风联合干燥技术用于粮食烘干较多, 兼顾高效和节能, 发挥两种干燥方式的优势, 提高干燥品质和效率。汪喜波^[28]设计了一种远红外热风联合粮食干燥设备, 并模拟了干燥过程中的热质传递过程, 结果显示实验数据与模拟结果吻合良好, 进一步证明了红外热风联合干燥技术是能够提高干燥效果的技术。王润发^[29]研发了一套远红外热风联合干燥设备, 热风技术采用逆混流引风, 使粮食受风更加均匀, 该设备较传统的热风干燥温度降低 11 °C, 实现粮食低温循环干燥, 提高了粮食的干燥品质和干燥速率。刘春山^[30]设计了一套远红外换热管对流组合谷物干燥设备, 采用的红外热源分别为碳化硅 (SIC) 板式远红外辐射器和喷涂红外材料的不锈钢换热管, 通过不同的粮食装载量测量表观风速, 得出了烘干机最优的粮食装载量, 发挥了热风干燥成本低和远红外干燥效率高的特点。

3 粮食烘干设备发展建议

(1) 加大对粮食烘干模拟实验系统的研究, 模拟现场烘干作业过程, 进行干燥特性实验。通过软件建立烘干机的简化模型, 建立数学模型,

仿真分析粮食参数的变化规律, 研究粮食籽粒的品质变化规律、设备的干燥能耗规律, 为烘干设备的进一步优化开发提供依据和参考。

(2) 相关部门应加大资金投入、大力扶持粮食烘干设备及技术研发创新项目, 扶持新型标准化粮食干燥技术装备的推广应用。

(3) 有针对性地根据不同粮食籽粒的自身特点及品质要求确定干燥工艺, 加大对干燥专用设备的探索及研发, 提升干燥效率和品质, 实现节能降耗和绿色环保。

(4) 着重研究联合干燥技术及其装备, 通过将多种新型干燥技术的优化互补和重组来实现高效、环保、高质的干燥目标。

(5) 粮食烘干机的控制系统要向着智能化的方向发展, 实现粮食烘干过程的运行监测、数据分析、动态调整。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 2023 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 12-10.
National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of China in 2023[M]. Beijing: China Statistics Publishing House, 2023: 12-10.
- [2] 林立. 粮食机械化烘干发展情况综述[J]. 农机质量与监督, 2021(2): 32-33.
LIN L. Summary of development of mechanized drying of grain[J]. Agricultural Machinery Quality & Supervision, 2021(2): 32-33.
- [3] 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(18): 14-15.
DUAN M Z, XU C, XIE Y C. Discussion on classification and selection of grain dryers[J]. Modern Food, 2021(18): 14-15.
- [4] 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.
- [5] 夏朝勇, 王江月, 孙慧男. 粮食烘干机干燥段流场数值模拟分析与优化[J]. 现代食品, 2022, 28(18): 16-20.
XIA C Y, WANG J Y, SUN H N. Numerical simulation analysis and optimization of flow field in drying section of grain dryer[J]. Modern Food, 2022, 28(18): 16-20.
- [6] 刘卫东, 王深研. 热水热风炉粮食烘干机结构设计及工艺分析[J]. 现代化农业, 2018(5): 71-72.
LIU W D, WANG S Y. Structural design and process analysis of grain dryer with hot water hot blast stove[J]. Modern Agriculture, 2018(5): 71-72.
- [7] 白喜婷, 朱文学, 孙国峰, 等. 粮食烘干机水分测量系统的设计[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(4): 57-60.
BAI X T, ZHU W X, SUN G F, et al. Design of moisture measurement system for grain dryer[J]. Packaging and Food Machinery, 2020, 38(4): 57-60.
- [8] 谢辉煌, 金毅, 张忠杰, 等. 基于 LSTM 网络的粮食干燥机水分预测与优化[J]. 中国粮油学报, 2023: 1-14.
XIE H H, JIN YI, ZHANG Z J, et al. Prediction and optimization of grain dryer outlet moisture content based on LSTM[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2023: 1-14.
- [9] 李广伟, 孙玉田, 孙健超, 等. 空气源热泵机组在粮食烘干领域的应用[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(3): 55-57.
LI G W, SUN Y T, SUN J C, et al. Application of air source heat pump unit in grain drying field[J]. Grain and Food Industry, 2020, 27(3): 55-57.
- [10] 张进疆, 刘清化, 吴耀森, 等. 稻谷热泵干燥技术与装备[J]. 现代农业装备, 2012(7): 39-43.
ZHANG J J, LIU Q H, WU Y S, et al. Technology and equipment of rice heat pump drying[J]. Modern Agricultural Equipments, 2012(7): 39-43.
- [11] 刘紫薇, 贲宗友, 杨浩勇, 等. 粮食烘干机变频式热泵系统的开发及实验研究[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(6): 1286-1294.
LIU Z W, BEN Z Y, YANG H Y, et al. Development and experimental study on variable frequency heat pump system of grain dryer[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022, 45(6): 1286-1294.
- [12] 孙椰望, 王冠斌, 杨秋娟, 等. 大型热泵粮食烘干塔结构特性分析[J]. 农业工程, 2020, 10(3): 59-62.
SUN Y W, WANG G B, YANG Q J, et al. Structural characteristics analysis of large heat pump grain drying tower[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(3): 59-62.
- [13] 张肖肖, 王广润, 蒋斌, 等. 温室型太阳能装置在农产品干燥中的应用[J]. 中国果菜, 2022, 42(8): 18-24.
ZHANG X X, WANG G R, JIANG B, et al. Application of greenhouse solar energy device in drying agricultural products [J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(8): 18-24.
- [14] 刘绍东. 一种太阳能粮食干燥装置: CN214339810U[P]. 2021-10-08.
LIU S D. A solar grain drying device: CN214339810U[P]. 2021-10-08.
- [15] 许刚. 低碳高效太阳能双仓粮食烘干的热风循环系统: CN216953946U[P]. 2022-07-12.
XU G. Low-carbon and high-efficiency solar hot air circulation system for grain drying: CN216953946U[P]. 2022-07-12.
- [16] 黄盛杰, 吴煜, 沈健民. 粮食干燥设备发展趋势——从热风干燥到石墨烯远红外辐射[J]. 江苏农机化, 2021(1): 33-36.
HUANG S J, WU Y, SHEN J M. Development trend of grain

- drying equipment—from hot air drying to graphene far-infrared radiation[J]. *Jiangsu Agricultural Mechanization*, 2021(1): 33-36.
- [17] 杜元杰, 谢焕雄, 魏海, 等. 远红外粮食烘干设备发展现状[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(11): 107-117.
DU Y J, XIE H X, WEI H, et al. Development status of far-infrared grain drying equipment[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(11): 107-117.
- [18] DU Y J, YAN J C, WEI H, et al. Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 43: 102780.
- [19] 颜建春. 一种基于石墨烯远红外和空气对流耦合的粮食干燥系统: CN115435575A[P]. 2022-12-06.
YAN J C. A grain drying system based on graphene far infrared and air convection coupling: CN115435575A[P]. 2022-12-06.
- [20] 程长青, 郭银浦, 王淑君. 水稻真空低温烘干机的创新研发及性能介绍[J]. *新农业*, 2015(18): 46-47.
CHENG C Q, GUO Y P, WANG S J. Innovative research and development and performance introduction of vacuum low temperature dryer for rice[J]. *New Agriculture*, 2015(18): 46-47.
- [21] 程长青, 侯云鹏. 连续性真空低温玉米烘干塔的研发及性能介绍[J]. *新农业*, 2015(22): 47-50.
CHENG C Q, HOU Y P. Development and performance introduction of continuous vacuum low temperature corn drying tower[J]. *New Agriculture*, 2015(22): 47-50.
- [22] 姚渠, 尹君, 李瑞敏, 等. 我国粮食干燥技术发展现状与趋势[J]. *粮食加工*, 2022, 47(3): 77-79.
YAO Q, YIN J, LI R M, et al. Development status and trend of grain drying technology in China[J]. *Grain Processing*, 2022, 47(3): 77-79.
- [23] 颜建春. 基于微波加热的振动流化床粮食循环干燥机: CN114739122A[P]. 2022-07-12.
YAN J C. Vibrating fluidized bed grain circulating dryer based on microwave heating: CN114739122A[P]. 2022-07-12.
- [24] 黄汉英. 一种粮食微波流态化联合干燥设备、干燥方法及应用: CN105928323B[P]. 2018-10-16.
HUANG H Y. A combined drying equipment, drying method and application of microwave fluidization for grain: CN105928323B[P]. 2018-10-16.
- [25] 丁德强. 太阳能/热泵联合干燥粮食系统及传热传质的研究[D]. 山东建筑大学, 2011.
DING D Q. Study on solar energy/heat pump combined grain drying system and its heat and mass transfer[D]. Shandong Jianzhu University, 2011.
- [26] 谈文松. 太阳能—热泵联合干燥小麦的系统研究与设计[D]. 山东农业大学, 2016.
TAN W S. System research and design of wheat drying with solar energy and heat pump[D]. Shandong Agricultural University, 2016.
- [27] 王双凤. 太阳能联合热泵整仓粮食静态干燥实验研究[D]. 山东建筑大学, 2012.
WANG S F. Experimental study on static drying of grain in whole warehouse by solar energy combined with heat pump[D]. Shandong Jianzhu University, 2012.
- [28] 汪喜波, 胡琼, 肖波, 等. 稻谷红外辐射与对流联合干燥过程的模型模拟[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 145-151.
WANG X B, HU Q, XIAO B, et al. Model simulation of combined drying process of infrared radiation and convection of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 145-151.
- [29] 王润发. 粮食红外线辅助热风干燥工艺系统设计[D]. 华南农业大学, 2016.
WANG R F. Design of infrared assisted hot air drying process system for grain[D]. South China Agricultural University, 2016.
- [30] 刘春山, 陈思羽, 吴文福, 等. 远红外对流组合谷物干燥机风速测量实验研究[J]. *中国科技信息*, 2019(19): 88-89.
LIU C S, CHEN S Y, WU W F, et al. Experimental study on wind speed measurement of far infrared convection combined grain dryer[J]. *China Science and Technology Information*, 2019(19): 88-89. 完