

引用本文格式 徐创军. 粮食干燥绿色低碳技术现状与展望[J]. 农业工程, 2024, 14(2): 94-101. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.02.016. XU Chuangjun. Research status and prospect on green and low-carbon technology of grain drying[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(2): 94-101.

粮食干燥绿色低碳技术现状与展望

徐创军

(内蒙古河套灌区水利发展中心乌拉特分中心, 内蒙古 巴彦淖尔 014400)

摘要: 粮食干燥是保障国家粮食安全的重要生产环节, 但干燥低碳减排技术处于落后状态。基于粮食机械化干燥技术现状, 分别从干燥系统供热方式、干燥工艺设计和干燥控制技术3个方面分析了粮食干燥高能耗的主要原因, 重点比较了机械化干燥工艺与节能改进方法; 梳理干燥理论与智能调控研发历程, 讨论粮食干燥智能化技术特征和进展, 分析了粮食干燥智能化存在信息感知困难、算法精度差、控制策略单一等问题; 提出了粮食干燥理论研究范式创新、干燥装备设计与工艺优化、干燥智能控制方法体系构建等产业发展建议, 为粮食干燥节能减排技术创新及产业高质量发展提供借鉴。

关键词: 粮食干燥; 绿色低碳; 智能化; 粮食安全

中图分类号: S226 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2024)02-0094-08

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.02.016

Research Status and Prospect on Green and Low-carbon Technology of Grain Drying

XU Chuangjun

(Ulat Branch Center, Inner Mongolia Hetao Irrigation District Water Conservancy Development Center,
Bayannur Inner Mongolia 014400, China)

Abstract: Grain drying is a critical element in production chain and plays a key role in ensuring national food security. However, progress of drying industry toward high-quality development is hampered by outdated drying techniques that lack effective measures for carbon reduction and emissions. Starting from current status of mechanized grain drying technology, main reasons for high energy consumption in grain drying were analyzed from perspectives of heating methods in drying systems, drying process design, and drying control technology. The focus was on comparing mechanized drying technology with energy-saving improvement methods. Research and development process of drying theory and intelligent regulation was reviewed, characteristics and progress of intelligent technology for grain drying were discussed, and problems of information perception difficulties, poor algorithm accuracy, and single control strategy in intelligent grain drying were analyzed. Suggestions for future development of industry, including innovative research paradigms in grain drying theory, design and process optimization of drying equipment, and construction of an intelligent control method system for drying, have been proposed, providing reference for innovation of new technologies for energy conservation and emission reduction in grain drying and high-quality development of industry.

Keywords: grain drying, green and low-carbon, intelligent, food security

0 引言

粮食安全是国家安全的重要基础, 始终是社会稳定、经济发展、国家自立的重要基石。目前我国粮食生产中机械化烘干技术水平相对薄弱、能耗高、作业率较低, 全国平均机械化烘干作业率不足20%。烘干后的粮食品质下降等问题仍比较突出^[1]。在国家“双碳”战略目标下, 粮食烘干行业也面临着低碳转型和

技术升级的迫切需求, 粮食绿色干燥是实现减损增效的重要途径。本研究梳理了粮食干燥领域绿色保质干燥技术进展, 以期促进粮食烘干低碳技术的推广应用。

1 粮食机械化干燥技术现状

粮食干燥过程的能耗水平一直是困扰行业高质量发展的瓶颈问题, 现有的粮食干燥机械在作业过程中

其能耗均已超过相关标准，主要有3个方面的原因^[2]。一是干燥机供热方式与低碳技术不匹配，不同热源为干燥系统提供能量的方式、热效率、余热回收等差异显著，对节能减排技术要求也有明显不同。二是干燥工艺与绿色保质干燥目标不符，粮食干燥技术和参数的优化方面仍有较大提升空间。三是粮食干燥机械与品质调控难协同，急需解决的是干燥机结构优化设计、智能控制方法和精准调控之间的协同关系，保障粮食干燥中水分均匀、节能减排、品质提高等。

1.1 干燥机供热方式与低碳技术

热风干燥仍是当前粮食干燥产业最常用的烘干供热方式，通常由热风炉、换热器等组成热风供热系统。无论是燃煤、燃气、燃油或者生物质热风炉，在干燥机烟道废气温度均达到110~130℃，如不设置余热回收装置，不但会导致较高的热能损失，废气排放也居高不下。采用烟囱废气热管回收技术可回收5%~10%的余热，用于暂存仓的粮食预热升温。烟气从燃烧室回收利用技术，通过对部分烟气的分流再次燃烧，对提高充分燃烧和提升热量利用有一定地的作用^[3]。潘保利^[4]研究了全钢风冷式节能热风炉废气回收技术，具有低温废气、冷却废气余热和热风炉烟气余热回收利用功能，其配套的全钢风冷结构热风炉换热效率在80%以上。热风干燥多用于多级连续干燥或循环干燥机中，低温高湿的废气回收价值低但含量高，而高温低湿度废气利用价值大，因此在余热回收技术研发上同时要结合干燥工艺和干燥参数等因素开展协同耦合技术创新。生物质热风炉燃料以秸秆压块、稻壳为主，属于零排放供热方式，是干燥领域重要的低碳技术手段。影响生物质热风炉热效率的关键包括燃料输送和充分燃烧技术、热交换和热风问题稳定控制等，未燃尽的生物质燃料中的坚壳和芒尖会对换热器管壁产生冲刷磨损。大量研究和产品开发集中在热风炉内进风口设计、碰撞式沉降室、反烧式热风炉和悬浮式热风炉等，这些设计均在一定程度上增强了稻壳充分燃烧程度，提高了热转化效率，减少了换热器等烟管的磨损^[5-7]。

红外干燥技术有烘干速率快、耗能低和品质保持好的特点。红外线作为一种电磁波，有一定的穿透性，能够通过辐射传递能量。远红外线作用于被干燥物料时，物料内的一部分固有频率与辐射频率一致的分子和原子产生强烈的共振，从而将辐射的能量吸收，分子运动加剧，物料温度迅速上升，辐射能量直接转化为热量，促进水分蒸发，从而实现快速干燥。因此，能引起水分子和粮食分子共振吸收的那部分红外辐射能决定了红外干燥的效果。用于粮食干燥的红外发射器主要采用燃油/气型，少量运用电加热红外发射器，

电加热红外转换效率(78%~85%)明显高于燃油/气型红外发射器(40%~46%)^[8]。采用红外干燥谷物品质高，脱水率高且爆腰率低。大量研究围绕红外干燥对物料内部水分迁移规律和组分影响展开，提出了改进红外发射装置加热均匀性、温度稳定性等技术，并开展了红外联合热风、红外联合热泵等用于解决快速集热导致的热敏性组分破坏等问题^[9-10]。红外技术是未来高效低碳干燥的潜力技术，但用于粮食干燥仍有大量机理机制问题需要深入研究解决，也需要解决好干燥热能转化与粮食品质保持间的协调匹配关系。

热泵干燥技术是一种通过消耗少量低品位热能来制取大量高品位热能的高效制热系统。热泵干燥技术正在逐步替代以煤炭燃烧方式供热的干燥技术，成为未来主要的高质量低碳干燥手段。热泵粮食干燥行业标准单位能耗3200kJ/kg，约为现有燃油、燃煤型干燥实际能耗的55%~60%，与现有燃油、燃煤干燥技术相比节能效果显著^[11]。热泵干燥技术在果蔬、中药材的应用十分广泛，但在粮食领域应用仍面临一些问题，如热泵干燥的低温性能差，尤其当环境温度<10℃时，热泵能效比明显降低。受到工质技术限制和换热器阻力影响，热泵干燥技术干燥时长会增加1~2倍^[12]。吴炜等^[13]评价了稻谷烘干过程中排风热回收应用于热泵干燥系统的可行性，半开式系统整体性能优于开式系统。在热泵干燥机结构改进方面也有较多研究，如设计多组热泵循环并联系统、设计转换机构加强新风和回风等。从干燥经济性角度研究表明，热泵干燥经济效率是燃油干燥方式的2.5~3.0倍，品质优于传统干燥方式。变频式压缩机研制和回热技术应用在解决环境变化下压缩机能效比下降和降低干燥能耗方面均有明显的优势^[14]。另外，为了解决热泵干燥初期湿度过高排湿不足等问题，有研究提出了采用组合式热泵干燥技术，如太阳能-热泵、热泵-微波和热泵-红外技术等有效解决了热泵和其他干燥技术的优劣，将是未来热泵干燥用于粮食产业的一个重要方向^[15-16]。

太阳能干燥技术具有绿色、清洁的特点，是人类利用太阳能应用最广泛的一种形式，正朝着提高系统热效率、降低系统成本的方向发展。大量研究多集中在光热转换效率、集热器结构优化等方面，其中集热器的集热板形状、位置及介质流入方式等结构参数均会对集热热效率产生重要的影响，增强流体扰动、降低传热边界层厚度、增加流体换热面积和减少流动死角等耦合技术可以优化设计高效集热器^[17]。在光热转化方面，目前还存在太阳能集热器温升与其辐射强度关系及传热传质机理不清等问题，应进一步加强集热器热量收集与太阳辐射强度关系的量化研究，建立热质传递机理模型，阐明太阳能干燥集热效率提升机制，

从而指导太阳能干燥过程中热量与质量的迁移规律。

1.2 干燥工艺对干燥目标的影响

粮食干燥主要分为连续式和批次式干燥方式，基本干燥工艺包括顺流、逆流、横流、混流和静置层干燥等。从工艺角度来看，目前主要的粮食干燥系统工艺存在以下3个问题。一是能量利用工艺问题。燃烧器或供热装置产生的高温介质与外界空气混合形成热风时，产生较大的熵增，因此在进入干燥层之前即出现大量能量贬值。二是粮食单一流动原理，使得热风温度始终保持一致，与科学烘干工艺并不相符。三是干燥系统的能量匹配不合理，没有充分体现干燥系压差焓、环境介质中的客观焓对高湿粮食的作用和影响。

影响干燥效率的是干燥工艺参数，针对不同粮食作物和干燥设备系统开展干燥特性、干燥动力学和干燥模型研究。深入开展粮食干燥工艺与参数优化研究可以有效地解析干燥中粮食水分迁移规律和品质形成机理，大量的研究以现有干燥设备为对象，研究手段停留在干燥流程改进、温度风速调整及干燥效率测定上，其谷物干燥水分迁移规律、干燥均匀性、缓苏与爆腰等基础理论研究仍有提升的空间，特别是如何定量建立干燥特性模型和品质量化关系成为优化调控干燥工艺的关键，也将指导干燥机热量利用和绿色节能技术的应用。本研究梳理了近年来开展粮食干燥工艺

研究的结果比较分析，如表1所示。

1.3 干燥设备与控制技术

目前我国烘干机市场保有量14.42万台(套)，但粮食烘干机械化水平却不足20%。大部分粮食干燥机设备技术陈旧，难以满足我国粮食安全保障和农业强国建设要求，急需大力发展新型高效绿色粮食干燥机，并提升干燥机自动化、智能化控制水平。

李呈林等^[24]研制了一种新型混流式循环谷物干燥机，作业时干燥机内部湿粮不断循环受热，为减少正压热风造成灰尘从设备缝隙溢出，在排湿风道设置了轴流风机，及时排出灰尘和杂质，优化了产品性能。同时设计缓苏段大截面、框架式叠加结构，在线水分检测仪实时检测粮食水分。张海洋等^[25]设计了一款功能完善、实用性强的5HSZ-C-50型连续式粮食干燥机电气控制系统，为获取科学检测数据设置温湿度传感器安装和固定于干燥机不同位置，利用运动控制器，向通风机施加一定的风力，从而实现对接龙转速、运行速度已产出到位信号等信息的自动检测和控制。赵海瑞^[26]研制了一种粮食干燥环流型除湿供热热泵系统，可实现将进风除湿冷却再加热，提供的干燥热空气用于循环式粮食干燥机的粮食水分蒸发，其实际运行时性能系数COP≥5.0。该机组采用压缩机+卸载+环流风机变频调速技术，风温波动小，谷物烘干品质有保证。梁凯等^[1]研制的气吸循环式粮食干燥机将原有提升机

表1 不同粮食干燥工艺与节能减排性能分析

Tab. 1 Analysis of different grain drying processes and performance of energy saving and emission reduction

干燥工艺	工艺特点	研究结论	绿色发展方向
多段变温缓苏 ^[18]	综合考虑粮食品质、干燥能耗、环保、粮食用途及成本等因素；根据水分去除机理和粮食受热等分为若干段不同温度干燥粮食；缓苏为了减少粮食干燥爆腰	以稻谷为例，其干燥含水率均匀度较高99.6%，能有效缩短干燥时间，干燥速率0.036%/min，缓苏工艺对爆腰率有显著降低的效果	多段变温和缓苏工艺有效减少干燥能耗，对干燥产物品质保持较好，其对温度稳定调节和水分、品质的在线检测技术要求较高
顺逆流组合干燥 ^[19-20]	将顺流与逆流干燥技术组合，并采用其独特的通风节布风结构，适合于干燥低温高水分粮食	顺逆流干燥技术比顺流干燥技术加逆流冷却工艺的能耗率低5%，比逆流干燥技术的能耗率低8%；建立回归分析模型预测出机水分，减少能源消耗	最大限度地进行水分与热量的转移，烘干废气温度40℃，冷却段由于粮温热量也可使得空气温度达到35℃，可以采取余热回收方式将两种空气重新收集送入换热器中达到节能效果
顺混流组合干燥 ^[21]	将顺流与混流干燥技术组合，并采用其独特的通风节布风结构及密布角状管的一种组合干燥技术和设备，适合于干燥低温高水分粮食，尤其适合于低温高水分粮食的节能保质干燥	以HSHT15型顺混流干燥机为例，具有热效率高、节能明显、烘后粮食品质好、烘后粮食干燥不均匀度1.6%、破碎率增值1%和裂纹率增值3.0%	选择余热回收技术，收集顺流段烘干废气，混流段的干燥效率较高，整体顺混流系统热量利用率较高
逆顺流组合干燥 ^[22]	将逆流与顺流干燥技术组合，并采用均匀布风技术，实行多段、变温和缓苏干燥，适合于稻谷、油料等非耐热物料的保质节能干燥	以HNST500环保型连续式逆顺流高水分稻谷保质干燥机为例，逆流和顺流交替进行，每一级逆流和顺流干燥后设置一级缓苏，干燥缓苏级数随降水幅度的增大而增加	采用废气回收装置，循环利用干燥段和冷却段废气，控制废气出口风速来减少废气排放带出的粉尘
高低温组合干燥 ^[23]	粮食先经高温连续干燥，当水分降到17%~18%时，将粮食转移到通风干燥仓内，采用就仓干燥技术，低温大风量通风干燥去除剩余的水分	高低温组合干燥技术和设备具有能耗低、干燥后粮食品质好的优点，但是要配置大容量的通风干燥仓，占地面积大	热量利用率较高，但缺少余热回收装置和机构，对于就仓干燥来说干燥均匀性和品质保持都有一定的技术难度

搅轮创新为气吸提升粮食，经检测粮食破损率 $\leq 0.1\%$ ；设计了有氧干燥全覆盖干燥结构，实现高效脱水幅度 $0.6\% \sim 2.5\%$ ；发明了粮食流量自动控制系统，使大小颗粒都可实现循环提升作业。黄超等^[27]针对混流式谷物干燥机存在干燥不均匀、品质差问题，基于CFD数值模拟技术仿真分析了角状盒结构，提出了新的挡板高度优化值和开孔设计方案。

农业农村部规划设计研究院^[28]研制的太阳能高效集热器和产业型太阳能集热系统，攻克了多通风双换热太阳能高效集热技术难关，提出了太阳能集热器混联式集热方法，创建了3串3并的模块化集热设计方案，解决了太阳能供热不稳定、干燥能耗高、热风控制不均匀和温湿度控制难等难题。山东沃普农业装备科技有限公司研发制造的5HYWP-8310型移动式粮食烘干机采取逆风混流式新理念，热利用率高、降水效果显著增加^[29]。中农集团农业装备有限公司研制的5HPY-35小型移动式烘干机采用多层加热的燃烧烟气能量梯度利用两级热交换系统，提高了燃烧能量利用效率，降低了烘干能耗，与行业标准相比烘干能耗降低15%以上，操作稳定，技术熟化度较高^[30]。

2 智能化粮食干燥技术

2.1 发展特征

我国粮食干燥机产业发展经历了从无到有，粮食机械化烘干为我国粮食产业发展贡献了巨大力量，提供了重要支撑。但是随着我国农业产业和粮食产业逐步进入高质量发展，目前的粮食烘干机技术水平已经无法满足国家粮食安全战略的发展需求，人们对于粮食安全和质量的要求不断提升，这对粮食机械化干燥技术水平提出了更高要求，解决粮食干燥中控制精度低、稳定性差、检测技术落后及控制参数优化水平不足等问题愈加紧迫。

随着信息化大数据技术的快速发展，农业与粮食生产机械装备技术创新进入以智能化为核心的发展阶段，学科交叉融合正在引发以绿色、智能、泛在为特征的群体性技术突破，装备技术发展已经从机械替代人畜力的机械化阶段、以电控技术为基础实现的自动化阶段，进入以信息技术为核心的智能化新阶段，并向以人工智能技术为核心的自主智能方向发展，同时加速现代农业向智能化生产方式转变。

粮食干燥过程具有典型的多参数多物理场耦合、强非线性、大迟滞的非稳态传热传质特点，给干燥量化模型建立和智能控制系统应用带来了巨大的困难^[31]。传热传质理论研究是热风干燥的理论基础，工程实践中更多借助试验结果或经验数据实施，但智能化控制和智能算法的应用离不开基础理论的创新与可应用量

化干燥模型及大数据信息获取，目前主要的模型有薄层干燥、深床干燥和实物干燥模型方法，其中薄层干燥是基础试验方法，用来获得数据并建立模型；深层干燥和实物干燥主要用于理论和模型验证。

2.2 发展现状

美国Page教授在1949年开展了玉米薄层干燥试验，并得出了著名的Page模型方程，目前仍广泛应用^[32]。1967年，Thompson提出了模拟干燥过程的平衡模型^[33]。随着数值模拟技术和软件的开发，大量研究人员开展了各类薄层干燥试验仿真和数值模拟研究，建立了更为复杂多指标的干燥模型。传统经验和半经验干燥模型都需要进行大量假设，包括忽略干燥中物料收缩、单粒粮内部温度梯度和水分梯度等，这就使得构建的模型无法准确用于控制干燥工艺过程^[34-35]。之后模型预测控制采用了多步预测、滚动优化、反馈校正等策略，降低了模型精度需求，比较好地改善了控制效果及鲁棒性^[36]。随着国内外研究人员大量投入模型的建立与算法开发，近年来人工智能控制技术以其非线性契合性、控制简便等性能优势，被认为是突破粮食干燥基础理论研究瓶颈的方法，目前常用的人工智能算法包括人工神经网络、模糊逻辑和支持向量机等^[37]。各种人工智能控制算法各有优劣，但都需要依赖大量数据，并从中提取特征进行分析预测，实际应用中会因数据获取不全面、数据可用性差及数据冗余等问题导致结果出现偏差，无法获得最优预测结果。本研究梳理了近年来基于人工智能的粮食智能控制算法，如表2所示。

2.3 干燥技术与低碳发展

粮食干燥过程中信息精准感知是智能干燥的根本基础，也是现代粮食干燥生产智能决策的重要前提。目前的大量研究仍停留在温度、含水率和排粮速度调控等主要参数的关联度建立方面，对于粮食干燥过程中粮情的信息，如粮温、实时含水率、粮食流动状态和粮食品质特征等信息的精准感知仍存在困难，一些适用于粮食干燥环节的专用传感器和分析检测设备短缺，获取的粮情信息常常忽略粮食品质变化等关键指标，尤其要兼顾不同作物干燥过程的生物、物理、化学特性，干燥过程中品质变化形成的物质基础，必须开展基于农业生物特性的农业信息学交叉研究，从而揭示基础原理，厘清粮食干燥终了和过程状态规律的精准把握^[47]。

从粮食干燥系统来看，燃料能耗成本占运行总成本的80%以上，开发智能粮食干燥系统能够基于大量数据信息构建更优的人工智能算法，建立真正具有智能反馈机制的自适应工艺调控策略，获得系统工艺运行优化参数，自动调控干燥机始终处于最优工作状态，

表 2 基于人工智能的粮食干燥控制算法分析
Tab. 2 Analysis of grain drying control algorithm based on artificial intelligence

对象类型	运用算法和控制器	性能分析
稻谷干燥 ^[38]	长短期记忆神经网络 (LSTM) 和模型预测控制 (MPC) 耦合控制器	与常规 PID 控制器相比, LSTM-MPC 控制器响应速度提升 15%~30%, 干燥后出机水分控制精度提升 0.2% 以上, 具有更强的鲁棒性
稻谷干燥 ^[39]	优化长短期记忆神经网络 (LSTM)	与 BP、ELMAN、NAEX 等算法及普通 LSTM 网络进行比较, 结果发现优化的 LSTM 模型可以更好地预测稻谷出机水分, 平均绝对误差 0.12%
玉米干燥 ^[40]	极限学习机 (ELM)	构建了出机水分含量预测模型, 水分含量预测误差 0.281 1%~0.382 1%, 未出现过拟合情况
玉米干燥 ^[41]	BP 神经网络	建立出机含水率预测模型, 模型预测排粮电机转速误差 -5~5 r/min, 相关系数 0.984 19, 可以有效预测排粮电机转速和出机玉米含水率
玉米干燥 ^[42]	BP 神经网络	快速准确地建立模型描述排粮频率变化规律, 模型相关系数 0.949 1, 用于自动控制排粮频率来控制干燥机内粮食流量, 进而控制粮食含水率及过度干燥问题
SHNH-15 型连续式粮食干燥机 ^[43]	8-11-1 的 BP 神经网络	模型决定系数 0.998, 绝对误差 ±0.1, 解决了建立被控对象模型难度大问题, 可为智能控制应用提供基础
多筒式烘干机 ^[44]	BP 神经网络模型的 Sigmoid 函数	模拟生物神经元, 实现非线性数据处理, 增强神经网络的非线性映射能力, 开发了智能预测控制系统软件, 系统提高了整体粮食烘干塔干燥处理效率
智能模拟系统 ^[45]	包括在线水分、温度、视频监控系统和计算机模拟控制与管理系统	软件主要用于预测干燥机干燥粮食的效果, 分析粮食干燥过程, 辅助优化最佳干燥参数, 建立对应的干燥控制程序
物联网监控系统 ^[46]	粮食烘干储藏一体化物联网	实现了粮食干燥、粮仓环节的关键参数实时远程监测、报警及关键设备自动控制功能, 为粮食高效节能烘干提供了新思路, 有广阔的应用前景

有利于实现干燥机系统的节能减排和成本有效降低。

汪麻宇^[48]提出了基于仿生监测原理的循环式干燥机作业量控制与系统构建。其创新性地提出了利用仿生学理论获取干燥机作业过程粮情信息, 结合物联网技术和算法构建, 实现了数据实时监测和干燥机性能监测。突破粮食干燥理论创新, 建立粮情精准感知数据普适模型, 注重粮食品质在线检测与反馈, 加强微观层面的粮食干燥结构和组分转化规律认知, 进而建立具备自主决策能力的智能化粮食干燥智能大模型才能从根本上解决粮食烘干领域高排放和高能耗问题。

3 粮食干燥绿色低碳技术展望

3.1 多因子胁迫下粮食干燥理论研究范式创新

粮食干燥领域研究相比于果蔬类物料的干燥技术与理论研究相对滞后, 果蔬类农产品对品质要求较高, 引导干燥基础理论和基础科学问题的探讨也更为深入。粮食干燥产业面临高质量低碳发展需求, 因此围绕粮食谷物干燥理论及多因子胁迫场模型的研究显得迫在眉睫, 也为探明粮食干燥过程中“黑箱”反应特点和规律提供理论基础。

随着研究人员对干燥反应器的多因子胁迫耦合作用的深入理解, 谷物在多场协同作用下的理论研究和基础科学问题探究, 不能仅仅停留在工艺优化和干燥产物的品质评价方面, 更多地应该完善不同解析尺度下, 微观层面的组分干燥动力学模型、自由能变化、空间构象和反应特性。同时创新研究手段, 突破属于

基于经验和实验科学与归纳分析阶段的第一或第二科研范式, 通过构建过程中多能量场分子尺度的水分迁移、反应分子对接及品质调控物质基础解析提供科学表征的可行性, 使得干燥过程的热质传递、次生代谢产物转化积累、反应描述和构象变化等机制的精准解释进入了更高阶的“计算科学”范式。

3.2 多场协同粮食干燥装备设计与工艺优化

粮食干燥系统简单来说是一个输入湿粮、介质和能量, 排出湿空气和干粮的复杂传热、传质系统。粮食干燥系统视为多场协同反应器, 环境、粮食物性、工艺和结构设计等因素均会影响干燥过程中的能量使用效果, 其本质原因在于所含的烟不同。干燥工艺系统的设计一般需要遵循工艺系统能够满足粮食对物性特征和干燥特性的要求, 以及实际应用场景。高湿粮食贮藏干燥过程主要分为粮食路线和气流路线, 干燥机用于精准调控的方式也主要以粮食和气体为核心, 目前专用的粮情信息获取和气流均匀分布调控装置还有缺陷, 特别是专业的粮情信息传感器等大多依赖进口, 在线水分监测和粮食品质监测设备监测精度和速度都还有较大提升空间。系统气流路线的调控直接影响热风及排风能量的利用和损失的计算, 更与粮食均匀干燥和稳定降水密切相关, 目前的气流路线调控方法和设备相对单一, 完全创新的研究和技术亟待在实际生产中进行验证, 专用设备的研发也进入了快车道。

干燥机供热系统的研究也得到了研究人员和实际

生产者的广泛关注,热源的选择和节能环保将是未来粮食干燥行业发展的重要方向。太阳能、热泵、高效介电干燥等技术的快速发展将为粮食干燥节能减排提供更多有效路径。同时,从能源高效利用的角度出发,研究人员也应更多地关注热量多等级利用技术的研发,将更多工业低品位热量通过高效收集转化技术提升为高品质热量,用于粮食干燥这类高耗能行业,也将是未来产业升级的重要突破口。

3.3 多信息耦合粮食干燥智能控制方法构建

智能装备是指通过设计和智能技术创新,具有智能硬件设备或软硬件集成系统,可全部或部分替代人或辅助人高效、便捷、安全和可靠地完成特定复杂的生产作业目标任务,实现生产全过程的数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理的现代化作业装备,具有人与机、机与物之间交互性特点,是技术进步和生产方式转变的核心内容。与发达国家相比,我国粮食产业机械化整体发展水平相差较大,智能装备研发应用整体水平偏低,很多环节和装备的智能化水平还处于空白阶段,在部分指标预测和干燥控制方法领域开展了智能化算法的构建和验证研究,距离实际应用和生产水平提升仍有距离,特别是关键核心部件和高端智能装备高度依赖进口,小型化智能干燥机和专用干燥设备严重缺乏。

智能干燥作业装备应用场景相对封闭,但其系统的复杂度和多元化程度均较高,这对智能干燥装备和控制算法研究提出了更高的要求。目前以粮食干燥为对象的智能化信息化工艺机械融合的研发机制尚未确立,以信息技术为基础的全面自动化技术模式和高度智能化的干燥装备配置系统尚未形成,这对于智能干燥控制算法和方法的基础研究提出了迫切要求。

以提高干燥机感知力、执行力、脑智力为核心,持续加强新型智能干燥装备关键核心技术攻关,重点加强粮食-能量-多场信息快速获取技术,以及粮情专用传感器、物理场精细调控、无人自主作业系统和多部件协同智能控制等前沿性关键技术研究,以核心干燥基础理论构建指导动态智能品质调控策略构建,进而指导智能干燥系统的能量高效利用,达到绿色节能干燥技术水平的显著提升。

4 结束语

本文综述了粮食干燥技术发展现状及围绕节能减排干燥开展的大量研究。整体来看,其工艺技术种类较多,但缺乏统一的理论基础和标准依据。目前的粮食干燥机节能减排技术主要依赖于在现有烘干机和工艺流程基础上的结构优化和控制方法改进,节能减排效果具有局限性,甚至会增加干燥机实际应用场景下

的参数调控难度和制造工艺难度。随着计算机和信息技术的高速发展,干燥技术应回归干燥理论创新与干燥基础研究的突破,以及粮食干燥领域科研范式与学科交叉创新的变革,建立更具普适性的干燥理论模型、精准的人工智能算法和基于品质保持和优化的粮食干燥智能调控技术等将是根本上实现节能减排的关键。

参考文献

- [1] 梁凯,梁皓,邢福国,等. “气吸循环式粮食干燥机”粮食保质减损、增产增效探索研究[J]. 河北农机, 2023(14): 12-14.
- [2] 宋波,许建伟,袁焯. 粮食干燥机节能减排现存问题及完善措施[J]. 中国新技术新产品, 2019(14): 57-58.
- [3] 李贺新,王洋,吴文福,等. 粮食干燥节能减排技术研究现状与展望[J]. 农业与技术, 2014, 34(4): 212, 214.
- [4] 潘保利. 连续式粮食干燥机节能减排技术的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学. 2018.
PAN Baoli. Research on energy saving and emission reduction technology of continuous grain dryer[D]. Harbin: Northeast Agricultural University. 2018.
- [5] 肖彦民,贾煜,陈敬举,等. 稻壳循环流化床热风炉的炉膛结构设计[J]. 粮食流通技术, 2014(4): 22-24.
XIAO Yanmin, JIA Yu, CHEN Jingju, et al. The structural design of husk circulating fluidized bed hot blast stove[J]. Grain Distribution Technology, 2014(4): 22-24.
- [6] 尹思万,尹晓慧. 5LWD-180型燃稻壳反烧热风炉[J]. 现代化农业, 2009(5): 38-39.
- [7] 毕顺林,路少昆. 5LXZR旋浮式稻壳热风炉[J]. 现代化农业, 2011(12): 46-47.
- [8] SAKARE P, PRASAD N, THOMBARE N, et al. Infrared drying of food materials: recent advances[J]. Food Engineering Reviews, 2020, 12(3): 381-398.
- [9] 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 Xibo, HU Qiong, XIAO Bo, et al. Modeling simulation of combined convective and infrared radiation in rice drying process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 145-151.
- [10] 严薇. 红外辐射对储藏稻谷脂质代谢的影响研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2020.
YAN Wei. Study on the effect of infrared radiation on lipid metabolism of stored rice[D] Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2020.
- [11] 王珏,徐嘉良. 热泵技术可补粮食干燥高能耗短板[J]. 农机市场, 2022(6): 27-28.
- [12] 黄毅成,於海明,缪磊,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 Yicheng, YU Haiming, MIAO Lei, et al. Research status and development trend of heat pump drying technology[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(6): 61-65.
- [13] 吴炜,倪美琴,江莹莹,等. 基于排风热回收的空气源热泵粮食干燥系统运行特性的研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(1): 46-

- 52.
- WU Wei, NI Meiqin, JIANG Yingying, et al. Study on operation characteristics of air source heat pump grain drying system based on exhaust heat recovery[J]. *Renewable Energy Resources*, 2023, 41(1): 46-52.
- [14] 郭仁宁, 任常在, 冯新伟. 变频回热式热泵烤烟房的研究[J]. *黑龙江农业科学*, 2012(3): 139-142.
- GUO Renning, REN Changzai, FENG Xinwei. Research on frequency conversion regenerative heat pump cured tobacco room[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2012(3): 139-142.
- [15] 闫素英, 赵龙, 王群. 太阳能热泵联合系统的枸杞干燥特性与能耗分析[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(12): 106-112.
- YAN Suying, ZHAO Long, WANG Qun. Drying characteristics and energy consumption analysis of solar heat pump combined system of wolfberry[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(12): 106-112.
- [16] 杨博, 王未君, 李文林. 热泵-微波联合干燥技术研究进展[J]. *食品工业*, 2022, 43(7): 202-206.
- YANG Bo, WANG Weijun, LI Wenlin. The research progress of heat pump-microwave combined drying technology[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(7): 202-206.
- [17] 李爱民, 余琼粉, 李明, 等. 太阳能干燥装置的结构研究进展及其应用[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(4): 9-18.
- LI Aimin, YU Qiongfeng, LI Ming, et al. Research progress on the structure of solar dryer and its applications[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2023, 43(4): 9-18.
- [18] 刘春山, 陈思羽, 肖世伟, 等. 稻谷变温均质干燥装置工艺优化与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(S1): 366-372.
- LIU Chunshan, CHEN Siyu, XIAO Shiwei, et al. Process research and performance verification of variable temperature homogeneous drying device for paddy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(S1): 366-372.
- [19] 罗栋, 孙慧男, 夏朝勇. 我国顺逆流连续式烘干机的发展现状[J]. *现代食品*, 2021(8): 23-24, 29.
- LUO Dong, SUN Huinan, XIAO Zhaoyong. The development status of counter-concurrent flow continuous dryer in China[J]. *Modern Food*, 2021(8): 23-24, 29.
- [20] 王赫. 回归分析在顺逆流粮食干燥机干燥过程建模中的应用[J]. *现代食品*, 2022, 28(16): 5-8, 13.
- WANG He. Application of regression analysis in modeling drying process of counter and current grain dryer[J]. *Modern Food*, 2022, 28(16): 5-8, 13.
- [21] 李杰, 邸坤, 马云霞. 顺混流粮食干燥机的开发设计和实际应用[J]. *粮食仓储科技通讯*, 2006(1): 45-46.
- [22] 邸坤. HNST500 环保型连续式逆顺流稻谷保质干燥机的研发[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(1): 75-78, 89.
- DI Kun. Research on HHNST500 environmental-production continuous counter-concurrent flow quality preservation paddy dryer[J]. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)*, 2012, 33(1): 75-78, 89.
- [23] 邸坤, 李杰. 中国粮食干燥节能减排新技术和新设备[J]. *粮食与饲料工业*, 2011(12): 16-21.
- DI Kun, LI Jie. New technology and equipment of energy saving and emission reduction on grain drying system in China[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2011(12): 16-21.
- [24] 李呈林, 孙东旺, 何立其. 一种新型混流式循环谷物干燥机的研制[J]. *农业技术与装备*, 2021(10): 12-14.
- LI Chenglin, SUN Dongwang, HE Liqi. Development of a new type of mixed flow circulation grain dryer[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2021(10): 12-14.
- [25] 张海洋, 马迎强, 高海燕. 中国南车神阳 5HSZ-C-50 小型连续性粮食干燥机电气控制系统的改造[J]. *大众标准化*, 2021(18): 238-240.
- [26] 赵海瑞. 粮食干燥环流除湿供热热泵系统的研究与应用[J]. *粮食与食品工业*, 2021, 28(4): 56-58, 61.
- ZHAO Hairui. Research and application of circulatory dehumidification heat pump system for grain drying[J]. *Cereal & Food Industry*, 2021, 28(4): 56-58, 61.
- [27] 黄超, 张晓波, 甘华胜, 等. 角状盒结构优化数值模拟及试验分析[J]. *包装与食品机械*, 2023, 41(5): 23-29.
- HUANG Chao, ZHANG Xiaobo, GAN Huasheng, et al. Numerical simulation and experimental analysis of corner box structure optimization[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2023, 41(5): 23-29.
- [28] 农业部规划设计研究院. 太阳能双循环农产品干燥设备及其在干燥农产品中的应用: CN201510609677.X[P]. 2015-12-02.
- [29] 张伟. 5HYWP-8310 型移动式粮食烘干机的性能及特点[J]. *当代农机*, 2022(2): 21.
- [30] 顾旭彪, 刘军民, 唐竹, 等. 5HPY-35 小型移动式烘干机[R]. 北京: 中农集团农业装备有限公司, 2021-08-13.
- [31] 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 Feng, WU Wenfu, LIU Zhe, 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.
- [32] PAGE G E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers[M]. *Weat Lafayette: Purdue University*, 1949.
- [33] THOMPSON T L, PEART R M, FOSTER G H. Mathematical simulation of corn drying a new model[J]. *Transaction of the ASAE*, 1968, 11(4): 582-586.
- [34] WONGWISES S. Development of mathematical models for predicting the thin layer drying rate of long grain rough rice[J]. *Drying Technology*, 1989, 32(17): 22-28.
- [35] KUCUK H, MIDILLI A, KILIC A, et al. A review on thin-layer drying-curve equations[J]. *Drying Technology*, 2014, 32(7): 757-773.
- [36] JANG J S R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1993, 23(3): 665-685.
- [37] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1993, 1(2): 146-155.
- [38] 金毅, 谢辉煌, 尹君, 等. 基于 LSTM-MPC 的粮食干燥机智能控制方法研究[J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(5): 25-34.
- JIN Yi, XIE Huihuang, YIN Jun, et al. Research on intelligent control method of grain drying based on LSTM-MPC[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2023, 31(5): 25-34.

- [39] 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, 38(11): 196-204.
XIE Huihuang, JIN Yi, ZHANG Zhongjie, et al. Prediction and optimization of grain dryer outlet moisture content based on LSTM[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(11): 196-204.
- [40] 邢思敏, 高香兰, 林子木, 等. 基于极限学习机的玉米干燥系统出机水分含量预测模型[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(5): 619-626.
XING Simin, GAO Xianglan, LIN Zimu, et al. A model for predicting the outgoing moisture content of corn drying system based on extreme learning machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(5): 619-626.
- [41] 雷得超, 付彦涛, 金厚熙, 等. BP 神经网络在玉米干燥含水率预测中的研究[J]. 粮食加工, 2022, 47(4): 45-47.
LEI Dechao, FU Yantao, JIN Houxi, et al. Study on prediction of corn drying moisture content based on BP neural network[J]. Grain Processing, 2022, 47(4): 45-47.
- [42] 王赫. BP 神经网络在粮食干燥预测模型中的应用[J]. 粮食加工, 2022, 47(1): 74-76.
WANG He. Application of BP neural network in grain drying prediction model[J]. Grain Processing, 2022, 47(1): 74-76.
- [43] 钟嘉豪, 李长友, 黄嘉禧, 等. 基于 BP 神经网络的 5HNH-15 干燥机出粮水分研究[J]. 农机化研究, 2023, 4: 1-7, 14.
ZHONG Jiahao, LI Changyou, HUANG Jiayi, et al. Research on grain moisture of 5HNH-15 dryer based on BP neural network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 4: 1-7, 14.
- [44] 王雪. 节能高效的多筒式农产品烘干机的设计研究[J]. 南方农机, 2022, 53(8): 75-77.
- [45] 孙钰涵, 周钰, 莫云浪. 粮食干燥机智能模拟控制系统的研究初探[J]. 现代化农业, 2019(12): 60-61.
- [46] 钱生越, 张旭东, 孔爱民, 等. 粮食烘干储藏一体化物联网监控系统初探[J]. 农业开发与装备, 2023(2): 20-23.
- [47] 吴海华, 吴尘萱, 刘小虎, 等. 新时代农业装备攻关创新路径研究[J]. 农业工程, 2023, 13(3): 5-9.
WU Haihua, WU Chenxuan, LIU Xiaohu, et al. Research on innovation path of agricultural equipment in new era[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(3): 5-9.
- [48] 汪麻宇. 循环式干燥机作业量仿生监测原理及系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
WANG Xiuyu. Research on the principle and system of biomimetic monitoring for the operating capacity of a circulating dryer[D]. Changchun: Jilin University, 2023.