

分类号: O441.4

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110161



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 小麦微波真空干燥工艺与装置优化

论 文 作 者 郑乐

校 内 导 师 孙铜生 教授

校 外 导 师 周文建 研究员

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 现代机械设计理论及方法

论文提交日期: 2025 年 5 月 28 日

分类号：O441.4

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110161

小麦微波真空干燥工艺与装置优化

Optimization of Wheat Microwave Vacuum Drying Process and Device

学生姓名： 郑乐
指导教师： 孙铜生 教授
校外教师： 周文建 研究员
专 业： 机械
研究方向： 现代机械设计理论及方法

论文答辩日期：2025 年 5 月 15 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：郑东

日期：2025 年 5 月 16 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

郑乐

指导教师签名：

孙钢生

日期：2025 年 5 月 16 日

日期：2025 年 5 月 17 日

小麦微波真空干燥工艺与装置优化

摘要

小麦作为全球最重要的粮食作物之一，其产量和质量对全球粮食安全与经济稳定具有重要影响。小麦收获时的高含水率使其在储存过程中极易发生霉变、发芽和品质劣变，造成显著的经济损失。干燥是小麦产后加工的关键环节，其主要目标是将小麦水分含量降至安全储存标准（12%-14%），同时最大限度地保持其营养品质和加工特性。传统干燥方式存在干燥时间长、干燥效率低、干燥质量差等缺点。微波干燥作为一种优秀的干燥方式具有高效、节能的特点，应用真空技术能够实现低温干燥，得到更高质量的干燥产品。

本文围绕小麦微波真空干燥技术，从干燥方式对比、理论模型推导、工艺参数优化、缓苏工艺优化以及干燥装置设计等方面进行系统的研究，旨在全面提升小麦干燥效率与产品质量。研究内容分为五部分，具体如下：

(1)小麦不同干燥方式的干燥特性分析

对比了小麦在热风干燥、微波干燥及微波真空干燥三种不同干燥方式下的干燥特性。定量分析了干燥速率、水分活度、色泽度及温度分布均匀性等关键参数，研究了不同干燥方式对小麦品质的影响机制。实验结果表明：相较于传统热风干燥和微波干燥，微波真空干燥的干燥效率最高、水分活度最低(0.557)、色差最小($\Delta E=1.67$)、温度分布的均匀性最好，是一种兼具高效性和高品质的干燥方式。

(2)小麦微波干燥多物理场理论与模型

通过分析电磁波传递与吸收、热传导、水分迁移理论，建立了小麦一维扩散理论模型并仿真求解获得水分随时间的变化规律，结合实验数据验证了经验模型对干燥过程的拟合程度。研究结果表明：一维扩散模型能够较好地描述小麦在微波真空干燥过程中的水分迁移规律，经验模型的拟合分析发现 Page 方程对干燥过程的适应更好。

(3)小麦微波真空干燥最优工艺分析

通过单因素实验结果明确了干燥温度、真空度和微波功率对小麦干燥速率的影响规律，其中干燥温度的影响最为显著，真空度次之，微波功率的影响相对较小，为微波干燥工艺的优化提供依据。实验确定了最佳工艺参数组合（干燥温度 50 °C、微波功率 200 W、真空度 -0.085 MPa），该组合可以实现较高干燥速率和产品质量。研究了水分扩散系数与工艺参数间的变化规律，真空压力与水分扩散系数呈负相关，干燥温度和微波功率则与之呈正相关。通过数学模型对水分扩散系数的拟合发现，采用有理数函数模型对水分扩散系数进行拟合，模型拟合度达到 94%以上。

(4)小麦微波干燥缓苏工艺分析

在常规干燥工艺基础上，针对单次干燥时长、缓苏时长及缓苏次数三个关键参数，对小麦缓苏干燥工艺进行优化。以最终含水率和爆腰率为优化目标，采用了 NSGA2 算法进行多目标寻优。研究结果表明：当单次干燥时长为 35 min、缓苏时长为 50 min、缓苏次数为 3 次时，可获得最佳的干燥效率；当单次干燥时长为 15 min、缓苏时长为 30 min、缓苏次数为 2 次时，则可实现最低的爆腰率。上述优化结果与基于响应面分析法对正交实验数据的分析结果具有一致性。

(5)微波真空干燥装置设计与优化

基于实验过程中发现的问题，优化了微波真空干燥装置。整体结构主要由水汽处理系统、温度控制系统、干燥腔体和加热托盘等组成。温控系统采用 PLC 控制，使用增量式 PID 算法实现，通过实时采集温度信号并动态调节微波发射器的功率输出，实现了干燥过程的恒温控制。针对干燥装置内部水汽积聚问题，设计了一套水汽收集与排出集成装置。采用带有冷凝水循环功能的 V 型顶棚结构，可有效吸附并冷凝装置内的水蒸气；通过 U 型管结构，利用液面高度差原理将冷凝水排出装置外部。通过具有辅助加热功能的托盘解决了干燥介质表面易产生水汽的现象。

综上所述，本研究通过系统探究小麦微波真空干燥技术，揭示了不同干燥方式对小麦品质的影响机制，建立了多物理场耦合理论模型，优化了干燥工艺参数与缓苏策略，并优化了干燥装置，为小麦高效低损干燥提供了理论依据与技术支持。

关键词：小麦，微波干燥，含水率，水分活度，爆腰率

OPTIMIZATION OF WHEAT MICROWAVE VACUUM DRYING PROCESS AND DEVICE

ABSTRACT

As one of the most important food crops in the world, the yield and quality of wheat have an important impact on global food security and economic stability. The high moisture content of wheat at harvest makes it highly susceptible to mildew, germination and quality deterioration during storage, resulting in significant economic losses. Drying is a key part of post-harvest processing of wheat, with the main goal of reducing the moisture content of wheat to the safe storage standard (12%-14%) while maximizing the preservation of its nutritional quality and processing characteristics. The traditional drying method has the disadvantages of long drying time, low drying efficiency and poor drying quality. As an excellent drying method, microwave drying has the characteristics of high efficiency and energy saving, and the application of vacuum technology can achieve low-temperature drying and obtain higher quality dried products.

In this paper, we systematically studied the microwave vacuum drying technology of wheat from the aspects of comparison of drying methods, theoretical model derivation, optimization of process parameters, optimization of drying process and design of drying device, aiming to

comprehensively improve the drying efficiency and product quality of wheat. The research is divided into five parts, as follows:

(1) Analysis of drying characteristics of wheat with different drying methods

The drying characteristics of wheat under three different drying methods, namely hot air drying, microwave drying and microwave vacuum drying, were compared. The key parameters such as drying rate, water activity, color and luster, and temperature uniformity were quantitatively analyzed, and the influence mechanism of different drying methods on wheat quality was studied. The experimental results show that compared with the traditional hot air drying and microwave drying, microwave vacuum drying has the highest drying efficiency, the lowest water activity (0.557), the smallest color difference ($\Delta E=1.67$), and the best uniformity of temperature distribution, which is a drying method with both high efficiency and high quality.

(2) Multiphysics theory and model of wheat microwave drying

A one-dimensional diffusion theoretical model of wheat was established, and MATLAB was used to simulate the process of moisture over time. Combined with the experimental data, the degree of fitting of the empirical model to the drying process is verified. The results show that the one-dimensional diffusion model can better describe the water migration law of wheat during microwave vacuum drying. The fitting analysis of the empirical model showed that the Page equation was better adapted to the drying process.

(3) Analysis of the optimal process of wheat microwave vacuum drying

The effects of drying temperature, vacuum degree and microwave power on wheat drying rate were clarified through single factor

experimental results, among which the influence of drying temperature was the most significant, followed by vacuum degree, and the influence of microwave power was relatively small, which provided a basis for the optimization of microwave drying process. The experiment determined that the optimal combination of process parameters (drying temperature 50 °C, microwave power 200 W, vacuum degree -0.085 MPa) could achieve a high drying rate and product quality. The variation law between the water diffusion coefficient and the process parameters was studied, and the vacuum pressure was negatively correlated with the water diffusion coefficient, while the drying temperature and microwave power were positively correlated with it. Through the fitting of the water diffusion coefficient by the mathematical model, it is found that the rational number function model is used to fit the water diffusion coefficient, and the model fitting degree reaches more than 94%.

(4) Analysis of wheat microwave drying process

On the basis of the conventional drying process, the drying process of wheat was optimized according to three key parameters: single drying time, slow su duration and slow su times. Taking the final moisture content and waist burst rate as the optimization goals, the NSGA2 algorithm was used for multi-objective optimization. The results show that the best drying efficiency can be obtained when the single drying time is 35 min, the slow suing time is 50 min, and the slow suing time is 3 times. When the single drying time is 15 min, the slow suing time is 30 min, and the retarding time is 2 times, the lowest burst rate can be achieved. The above optimization results are consistent with the analysis results of orthogonal experimental data based on response surface analysis.

(5) Design and optimization of microwave vacuum drying device

Based on the problems found in the experimental process, a set of

PLC control system was designed. The system adopts an incremental PID algorithm to realize the constant temperature control of the drying process by collecting the temperature signal in real time and dynamically adjusting the power output of the microwave transmitter. In order to solve the problem of water vapor accumulation in the drying device, an integrated water vapor collection and discharge device was designed. Among them, the water vapor collection device adopts a V-shaped roof structure with condensate circulation function, which can effectively adsorb and condense the water vapor in the device; The water vapor exhaust device uses the U-shaped pipe structure to discharge the condensate out of the outside of the device by using the principle of liquid level height difference, and at the same time ensures the sealing performance of the device. The tray with auxiliary heating function solves the phenomenon that water vapor is easy to be generated on the surface of the drying medium.

In summary, this study systematically explored the microwave vacuum drying technology of wheat, revealed the influence mechanism of different drying methods on wheat quality, established a multi-physics coupling theoretical model, optimized the drying process parameters and slowing strategy, and optimized the drying device, which provided a theoretical basis and technical support for efficient and low-loss drying of wheat.

KEY WORDS: wheat, microwave drying, moisture content, water activity, waist bursting rate

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 干燥技术研究现状	2
1.2.1 干燥工艺研究现状	2
1.2.2 算法应用研究现状	3
1.2.3 干燥设备研究现状	3
1.3 研究内容及目标	4
第 2 章 不同干燥方式对小麦干燥特性影响分析	6
2.1 材料与方法	6
2.1.1 实验材料	6
2.1.2 实验设备	6
2.1.3 干燥特性指标	8
2.1.4 实验流程	10
2.2 不同干燥方式对小麦干燥特性影响分析	11
2.2.1 小麦干燥速率	11
2.2.2 小麦水分活度变化	12
2.2.3 小麦色泽变化	13
2.2.4 小麦干燥后表面温度分布	15
2.2.5 小麦温度均匀度分析	16
2.3 干燥方式评价	17
2.4 本章小结	18
第 3 章 小麦微波干燥理论与模型	19
3.1 小麦微波干燥多物理场理论	19
3.1.1 电磁场的传播与吸收	19
3.1.2 热传导方程	20

3.1.3 水分迁移与蒸发方程	21
3.2 小麦微波干燥理论模型	22
3.2.1 一维扩散模型概述	22
3.2.2 扩散的物理基础	22
3.2.3 扩散模型的推导	23
3.2.4 小麦一维扩散干燥模型的建立与验证	25
3.3 小麦干燥经验模型	26
3.3.1 薄层干燥模型	27
3.3.2 经验模型拟合与验证	27
3.4 本章小结	30
第 4 章 小麦微波真空干燥工艺分析与优化	31
4.1 材料与设备	31
4.1.1 实验材料	31
4.1.2 实验设备	31
4.2 实验方法	32
4.2.1 干燥实验方法	32
4.2.2 水分扩散系数测定	33
4.2.3 实验干燥模型	33
4.3 小麦微波真空干燥特性分析	34
4.3.1 干燥温度对小麦干燥的影响	34
4.3.2 微波功率对小麦微波干燥的影响	35
4.3.3 真空度对小麦微波干燥的影响	36
4.4 小麦水分扩散系数拟合分析	37
4.4.1 模型选用与拟合	38
4.4.2 工艺参数对水分扩散系数的影响	39
4.5 小麦干燥工艺优化	40
4.6 本章小结	41
第 5 章 小麦微波真空干燥缓苏工艺优化	42
5.1 材料与方法	42

5.1.1 实验材料	42
5.1.2 实验设备	42
5.1.3 实验评价指标	43
5.1.4 实验设计	43
5.1.4 分析方法	44
5.2 微波功率和真空度对小麦干燥过程的影响	45
5.2.1 微波功率小麦含水率的影响	45
5.2.2 真空度对小麦含水率的影响	45
5.2.3 功率和真空度对小麦爆腰率的影响	46
5.3 正交实验结果分析	47
5.4 NSGA2 算法寻优求解	48
5.4.1 NSGA2 遗传算法	48
5.4.2 改进初始种群生成方式	48
5.4.3 改进拥挤度计算	49
5.4.4 算法模型	49
5.4.5 算法寻优	50
5.5 结果与分析	51
5.5.1 单次干燥时长与缓苏时长对干燥结果的影响	51
5.5.2 单次干燥时长与缓苏次对干燥结果的影响	52
5.5.3 单次干燥时长与缓苏次对干燥结果的影响	54
5.6 本章小结	55
第 6 章 微波真空干燥装置优化	56
6.1 整体结构设计	56
6.2 主要结构设计	57
6.3 控制系统设计	60
6.3.1 系统组成	60
6.3.2 系统控制实现	60
6.3.3 干燥控制 PID 算法模型	62
6.3.4 PID 干燥温度控制	63

6.3.5 PID 控制器校正与优化.....	64
6.3.6 增量式 PID 控制算法.....	65
6.3.7 PID 算法温度控制 MATLAB 仿真	66
6.4 装置工作方式	67
6.5 本章小结	68
第 7 章 总结与展望	69
7.1 总结	69
7.2 展望	70
参考文献	71
攻读硕士期间获得的科研成果	79
致谢	80

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

小麦作为全球最重要的粮食作物之一，其产量和质量对全球粮食安全与经济稳定具有重要影响^[1]。据联合国粮农组织（FAO）统计，2022 年全球小麦产量达 7.8 亿吨，占全球谷物总产量的 30%以上，为全球超过 35%的人口提供了主要热量来源^[2-4]。然而，小麦收获时的高含水率（通常为 20%-25%）使其在储存过程中极易发生霉变、发芽和品质劣变，造成显著的经济损失。研究表明，全球每年因储存不当导致的小麦损失高达 10%-15%，这对粮食安全构成了严重威胁。

干燥是小麦产后加工的关键环节，其主要目标是将小麦水分含量降至安全储存标准（12%-14%），同时最大限度地保持其营养品质和加工特性^[5-7]。传统干燥方法主要包括热风干燥和自然干燥^[8-13]。热风干燥通过控制空气温度（50-60 °C）和流速（0.5-1.5 m/s）来实现水分去除，但其能量利用率较低，通常仅有 30%-40%的热能用于水分蒸发，其余能量以废气形式散失。此外，热风干燥的均匀性较差，由于热风与物料的接触不均匀，导致小麦内部水分分布不一致，影响其储存稳定性。干燥时间较长也是热风干燥的一个显著缺点，通常需要数小时甚至更长时间才能达到安全水分含量，增加了能耗和成本。高温环境还容易导致小麦中蛋白质变性、淀粉糊化以及维生素等热敏性成分的显著损失，进而影响其营养价值和加工性能。自然干燥则完全依赖环境条件，干燥效率低、周期长且易受天气影响，局限性更为明显。

近年来，随着干燥理论和技术的发展，新型干燥技术逐渐成为研究热点。微波干燥利用 2450 MHz 或 915 MHz 的电磁波使物料内部极性分子产生偶极旋转，实现由内而外的快速均匀加热；真空干燥则通过降低系统压力（5-30 KPa）来降低水的沸点，促进水分蒸发并抑制氧化反应。研究表明，与传统热风干燥相比，微波真空干燥可缩短干燥时间 40%-60%，降低能耗 30%-50%，同时能更好地保留小麦中

的蛋白质、维生素等热敏性营养成分^[14-19]。此外，真空环境可有效抑制霉菌生长和酶活性，进一步延长小麦的储存期。

尽管如此，现有研究仍存在一些亟待解决的问题。首先，微波场与物料相互作用的机制尚不明确，导致干燥过程中易出现局部过热和干燥不均匀现象。其次，真空环境下微波干燥过程中的传热传质机制研究不足，缺乏可靠的数学模型指导工艺优化。最后，针对小麦干燥特性的专用微波真空干燥装置研究不足，现有设备存在能效利用率低、连续化生产能力差、智能化控制水平较低等问题，限制了该技术的规模化应用。

因此，深入研究小麦微波真空干燥过程中的水分迁移规律、湿热传递机制及品质变化特性，并开发高效、节能、智能化的专用干燥装置，对于优化干燥工艺参数、提高干燥效率、降低能耗成本、提升品质具有重要的理论意义和应用价值^[20-21]。同时，该研究也将为其他谷物干燥工艺的创新提供理论参考和技术支撑，对保障粮食安全、提高农产品附加值具有重要意义。

1.2 干燥技术研究现状

1.2.1 干燥工艺研究现状

国内外学者针对干燥工艺优化问题开展了系统的研究，主要集中于工艺参数优化、组合干燥技术及品质保护三个方面。在传统热风干燥方面，Chen PX 等^[22]通过建立温度梯度与风速分布的精准调控模型，实现了干燥效率与蛋白质保留率的协同优化。Chauhan A 等^[23]创新性地提出了微波分段干燥动力学模型，有效解决了介电材料干燥过程中的局部过热效应。真空干燥技术因其低压环境下的分阶段控温特性，在欧美有机食品加工领域表现出卓越的营养成分保留效能^[24]。组合干燥技术的协同效应也是当前研究热点，Izli G 等^[25]和 Zhang ZL 等^[26]分别构建了微波-热风与红外-热风的多场耦合模型，通过能量传递机制的优化显著提升了干燥速率及产品均匀性。国内学者则重点研究了微波/红外与热风的协同作用机理，其工业化应用研究证实了该技术可有效抑制品质劣变。太阳能辅助干燥及热泵技术在国内的工程化应用，为清洁能源在干燥领域的能效转化提供了实证案例。在干燥工艺优化方面，Wang H 等^[27]基于多物理场耦合模型对麦麸微波干燥过程进行了数值优化；Taghinezhad E 等^[28]创新性地将光谱特征分析与干燥品质评价体系相结合；Alam

MH 等^[29]和 Tang XX 等^[30]则运用响应面分析法建立了工艺参数与品质指标的映射关系；邹佳池等^[31]和肖曼玉等^[32]通过多模态干燥耦合实验揭示了不同干燥方式对产品品质的影响机制。目前，干燥工艺研究主要基于品质分析，通过数值模型优化工艺参数。数值模型能够有效分析干燥特性变化规律，是工艺优化的重要方法。

1.2.2 算法应用研究现状

智能算法与物联网（IoT）技术的协同应用显著提升了干燥过程的精准控制水平。国外研究方面，Abbaspour-Gilandeh Y 等^[33]基于人工神经网络（ANN）构建了干燥曲线动态优化模型，有效提高了批次间产品品质的一致性；结合 IoT 技术的实时监测系统通过温湿度参数的动态调控，进一步实现了能耗的优化^[34]。国内学者则通过多传感器信息融合技术，集成 ANN 与模糊控制算法，开发了干燥参数自适应优化系统。在过程建模领域，计算流体力学（CFD）模拟技术已成为重要研究工具。An JY 等^[35]通过气流场仿真分析提出了阶段化干燥策略，显著改善了物料水分去除的均匀性。国内研究学者将数学建模与 CFD 流场分析相结合，并整合 ANN 算法构建了干燥速率与品质参数的预测模型，为智能控制系统提供了关键数据支持^[36-38]。在智能优化算法应用方面，吴绍锋等^[39]和高若婉等^[40]采用遗传算法实现了干燥工艺参数的全局优化；Iheonye AC 等^[41]开发了基于双通道深度学习架构的流化床干燥实时视觉监测系统，实现了产品色泽变化的精准控制。Chokphoemphun S 等^[42]和吴庭等^[43]建立的神经网络模型可精确预测干燥介质水分动态变化。Yang J 等^[44]提出的改进 ICEEMDAN 算法与 TCN-BiGRU 模型相结合的检测方法，实现了玉米含水率的快速测定。智能算法与物联网技术的发展，在干燥过程分析与控制方法引入算法研究越来越多，本文采用数学模型拟合与 NSGA-II 多目标优化算法分析对小麦常规干燥工艺参数和缓苏工艺参数进行优化分析，为实现小麦干燥的高速、高效、高品质提供理论和实践基础。

1.2.3 干燥设备研究现状

设备研发聚焦于能效提升与结构优化。国外研究通过 CFD 模拟改进干燥室气流组织，如优化进风布局以增强热质传递效率^[45]。国内学者致力于集成新型能源技术，如太阳能-热泵复合干燥系统，并引入废热回收装置降低能耗^[46-47]。在杀菌功能扩展方面，红外与紫外技术的应用有效延长了储存期^[48-52]。此外，基于数值模

拟的干燥设备设计（如分层送风结构）在国内取得进展，但智能化设备的规模化应用仍存在提升空间^[53-58]。本文针对干燥过程的水汽处理和干燥介质与托盘温差较大问题进行装置结构优化，避免水汽问题影响产品品质。

1.3 研究内容及目标

本研究为后续小麦微波干燥工艺和设备改进提供理论依据。研究技术路线如图 1-1 所示。

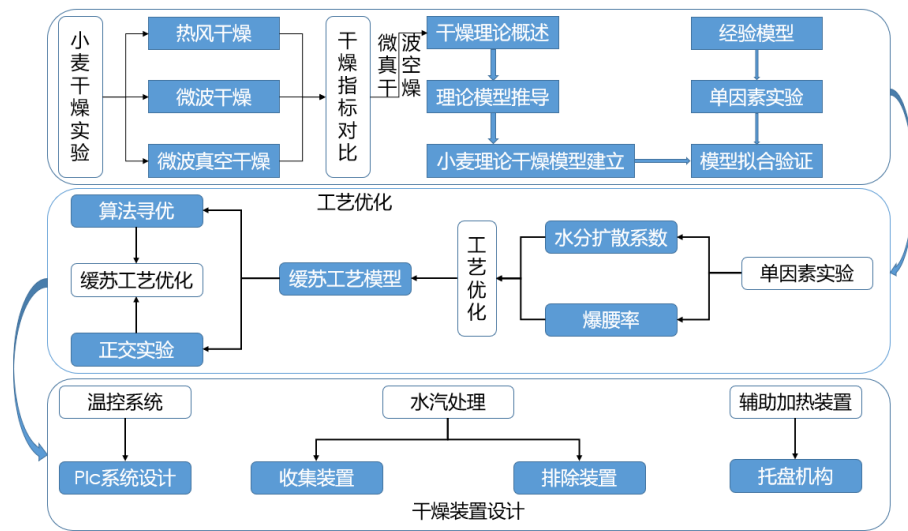


图 1-1 研究技术路线

研究主要内容及目标如下：

(1) 小麦不同干燥方式的干燥特性分析

对比小麦在热风干燥、微波干燥及微波真空干燥三种不同干燥方式下的干燥特性。定量分析了干燥速率、水分活度、色泽度及温度分布均匀性等关键参数，研究了三种干燥方式对小麦干燥特性的影响机制。实验结果表明：与传统热风干燥和微波干燥相比，微波真空干燥在干燥效率与品质保持方面均展现出显著优势。该干燥方式不仅实现了更快的干燥速率，同时有效维持了小麦的水分活度和色泽特性，且温度分布更为均匀。

(2) 小麦微波真空干燥最优工艺分析

进行了不同工艺参数组合的小麦微波真空干燥试验，记录了试验结果，利用数学模型进行拟合分析。对比了水分扩散系数和爆腰率，筛选出最佳工艺参数组合。为小麦微波真空干燥工业化提供理论基础。

(3) 小麦微波干燥缓苏工艺分析

基于微波真空干燥设备参数工艺优化结果，以单次干燥时长、缓苏时长及缓苏次数为变量，对小麦缓苏干燥动力学过程进行优化。建立了最终含水率与爆腰率双目标优化模型，采用了第二代非支配排序遗传算法（NSGA-II）进行多目标 Pareto 前沿求解。通过三因素三水平正交试验结果，结合响应面分析法对正交试验数据进行曲面回归建模，构建了微波真空干燥条件下小麦缓苏工艺参数的优化决策模型。确定最优工艺参数组合。

(4) 微波真空干燥装置设计与优化

基于实验过程中发现的问题，优化了微波真空干燥装置。整体结构主要由水汽处理系统、温度控制系统、干燥腔体和加热托盘等组成，主要改进包括以下几个方面：设计了带有顶棚结构的水汽收集装置，通过优化冷凝与收集机制，降低了干燥装置内的水汽积聚，从而提升了干燥效率；采用可编程逻辑控制器（PLC）控制系统，结合温度传感器实时采集物料温度数据，并基于预设温度设定值，通过闭环反馈机制与 PID 控制算法动态调节功率输出，实现了干燥过程的恒温控制，确保干燥环境的稳定性与产品质量；基于液面压力差原理，设计排水系统，实现水汽的自动排放；采用特殊材料与结构设计，研制了具有微波吸收与热转化功能的托盘装置，有效提高了微波能量的利用效率，避免能量浪费，为装置的整体能效优化提供关键技术支持。这些改进解决了干燥过程产生的水汽问题，提升了干燥效率和产品质量以及能量利用率为微波真空干燥技术的工业化应用奠定基础。

第 2 章 不同干燥方式对小麦干燥特性影响分析

在小麦储存和加工过程中，干燥作为关键工艺环节，对小麦的品质、储存稳定性及最终产品的经济价值具有决定性影响。干燥的核心目标是降低小麦水分含量至适宜储存水平，同时最大限度地保持其色泽、温度分布均匀性及水分活度等关键特性^[59-62]。不同干燥方法在效率、能耗、品质保持及操作成本等方面存在显著差异，这使得干燥方式的选择成为小麦加工中的重要课题。传统热风干燥因其设备简便、应用广泛而成为主流方法，但其高温条件可能导致小麦色泽劣化、温度分布不均及水分活度控制不精准等问题。随着现代食品加工技术的进步，微波真空干燥、冷冻干燥等新型干燥方法逐渐应用于小麦加工领域，这些方法在色泽保持、温度分布均匀性及水分活度调控方面展现出显著优势。本章旨在系统分析不同干燥方式对小麦色泽、温度分布及水分活度的影响特性，以为小麦干燥工艺的优化提供理论依据和实践指导。

2.1 材料与方法

2.1.1 实验材料

干燥实验所用小麦品种为济麦 22。挑选颗粒均匀、饱满、无霉变和机械损伤的小麦籽粒进行干燥实验。参照 GB5009.3-2016 测定小麦的初始含水量，由于所购小麦经过干燥处理需要进行人工加湿^[63]。对小麦进行复水处理以达到需求的含水率 25%。

试验试剂为氯化钠溶液。

2.1.2 实验设备

本次实验具体使用了 RWBZ-08S 型微波真空干燥箱(南京苏恩瑞干燥设备有限公司)、M1-211A 型美的家用微波炉、DHG 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)、水分活度仪(南京群联机电科技有限公司)、WR-10 基础款色差仪(深圳市威福光电科技有限公司)、Ti32 型热成像仪(美国 Fluke 公司)、电容式谷物水

分测量仪（上海青浦绿洲检测仪器有限公司）等实验仪器。

(1) RWBZ-08S 微波真空干燥箱

RWBZ-08S 微波真空干燥箱为整个实验基础，设备采用井口微波发射管，设备可靠性与实用性极高，非触式红外测温可精确控制被处理物料温度，保证干燥产品品质^[64]。设备主要由微波发射源、真空加热腔体、旋转托盘、真空控制与测量系统和温度控制系统组合而成。实物图如图 2-1 所示。



图 2-1 RWBZ-08S 微波真空干燥箱

(2) 水分活度仪

水分活度是食品科学领域中的重要参数，它反映了微生物可利用的有效水分含量及其繁殖能力，直接影响食品的保鲜效果^[65]。通过水分活度仪测定食品的水分活度，可以帮助科研人员选择合适的包装方式和储藏条件，从而有效延缓食品腐败过程，显著延长食品、粮食、果蔬的保质期^[66]。所用的水分活度仪如图 2-2 所示。



图 2-2 水分活度仪

水分活度具有明显的温度依赖性。为确保实验数据的准确性和仪器的正常运行，实验前必须使用标准物质进行校验。具体校准方法应严格参照水分活度仪操作

手册执行。根据手册要求，以 3:2 的质量比精确配制 NaCl 与纯净水的标准溶液进行测试,测定样品的活度值后,与标准值进行比对,并依据环境温度进行自动校准,确保仪器读数始终处于正确的定值范围内^[52]。

(3)色差仪

WR-10 基础款色差仪是一款专为精确颜色质量控制和科学分析而研制的便携式测量设备,其广泛应用覆盖食品、纺织、塑料、涂料及印刷等多个工业领域。操作界面直观和测量精度高。WR-10 基础款色差仪采用国际标准的 8°/d 测量几何结构(漫射照明,8°接收角),能够准确测量包括 L^* (亮度)、 a^* (红绿值)、 b^* (黄蓝值) 在内的关键颜色参数。实物图如图 2-3 所示。



图 2-3 WR-10 基础款色差仪

(4)红外热成像仪

本次使用的设备热成像仪借助 320x240 传感器实现可见光图像和红外图像自动对准,对焦手柄可手动调焦,以能够快速找到目标,形成清晰的图像。通过热灵敏度 (NETD)能够识别微小的温度差异,热灵敏度可达到 0.045 °C,测温范围为-20—600 °C。红外热成像仪如图 2-4 所示。



图 2-4 红外热成像仪

2.1.3 干燥特性指标

(1)含水率

新鲜采收的蔬菜及农产品若未能及时降至安全水分阈值,极易发生品质劣化,从而丧失长期贮藏价值。水分作为农产品干燥过程中的核心控制指标,其含量直接

影响产品的贮藏稳定性及使用性能。通常，物料含水率的表征方式可分为干基含水率与湿基含水率两种。其中，干基含水率以物料绝干质量为基准进行计算，虽具有明确的物理意义，但在多组实验数据的纵向对比中存在局限性。因此，本研究采用湿基含水率作为评价指标，该方法有利于实验数据的标准化处理与对比分析^[67-71]，公式为：

$$M_s = \frac{m_t - m'}{m_t} \quad (2-1)$$

式中， M_s 为湿基含水率； m_t 为干燥时间 t 时刻干燥样品的质量； m' 为该样品烘干后的质量。

(2)水分活度

水分活度是表征食品体系中水分状态的关键参数之一。与仅反映水分总量的含水率不同，水分活度能够准确表征水分在食品体系中的存在形态及其可利用性，具体反映了食品中游离水被微生物利用的程度。这一参数是决定食品腐败速率、品质稳定性和安全性的核心因素。在食品贮藏过程中，通过有效调控水分活度，可以显著抑制微生物的生长繁殖，延缓食品腐败进程，从而确保产品质量并延长货架期，因此，水分活度作为评价食品品质的重要指标，在食品贮藏与加工领域具有重要的理论价值和实践意义^[72-73]。

使用 AW-2 型水分活度仪进行三次测量，取平均值作为实验结果数据。

(3)色泽度

色泽度直接影响谷物的外观质量。干燥过程中如果温度过高或干燥时间过长，可能导致谷物变色或产生过焦现象，这会影响其外观，进而降低市场接受度。例如，玉米、稻谷等谷物如果过度干燥，容易出现褐变现象，这不仅影响色泽，还可能影响营养成分。

样品的色泽参数使用 WR-10 基础款色差仪测量，色泽参数的评价指标有 4 项，分别为红绿度 a^* 、黄蓝度 b^* 、亮度 L^* 、色差度 ΔE 。其中红绿度 a^* 、黄蓝度 b^* 、亮度 L^* 、色差度 ΔE 可以直接从色差仪中读取得到。

(4)温度分布

温度分布在谷物干燥中的均匀性直接关系到干燥质量的好坏。理想的温度分布应能够确保谷物各部分水分均匀蒸发，避免过度干燥或未干透的情况，保障谷物的外观、营养价值和储存稳定性。控制温度分布是优化干燥过程、提高干燥效率、

确保产品质量的关键因素之一。

1)小麦干燥后温度测量,本次使用的设备热成像仪借助 320x240 传感器实现可见光图像和红外图像自动对准,对焦手柄可手动调焦,以能够快速找到目标,形成清晰的图像,通过热灵敏度(NETD)能够识别微小的温度差异,热灵敏度可达到 0.045°C ,测温范围为 $-20\text{—}600^{\circ}\text{C}$ ^[52]。以小麦铺设中心为起点,上下左右间隔 1 厘米处各设置一个测温点如图 2-5 所示。

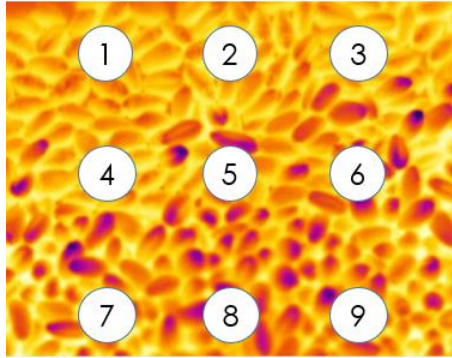


图 2-5 小麦干燥温度取样

2)温度分布均匀度计算,通过温度均匀度来评价三种干燥方式干燥一定时间后的温度分布均匀性,均匀度的值越小说明该干燥方式的均匀性越好。小麦干燥后温度分布的均匀度计算公式为:

$$v = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (2-3)$$

式中, v 是温度分布均匀度; N 是温度测量时取样点数, T_i 为第 i 个取样点温度; $\bar{T}$ 是取样范围内小麦的平均温度。

2.1.4 实验流程

(1)样品预处理

- 1)对小麦进行复水处理,保证小麦含水率均匀且与新鲜小麦一致;
- 2)取样测定初始水分含量、色泽、温度分布及水分活度,作为对照组数据。

(2)干燥处理

对小麦进行热风干燥、微波干燥与微波真空干燥,定时取样测量含水率,记录干燥时间及温度分布。

(3)干燥特性检测

使用色差计测定干燥后小麦的 L^* 、 a^* 、 b^* 值,计算色差 (ΔE)。使用红外热成

像仪拍摄干燥过程中小麦样品的温度分布图，分析均匀性。使用水分活度测定仪测定干燥后小麦的水分活度 (A_w)。实验流程如图 2-6 所示。

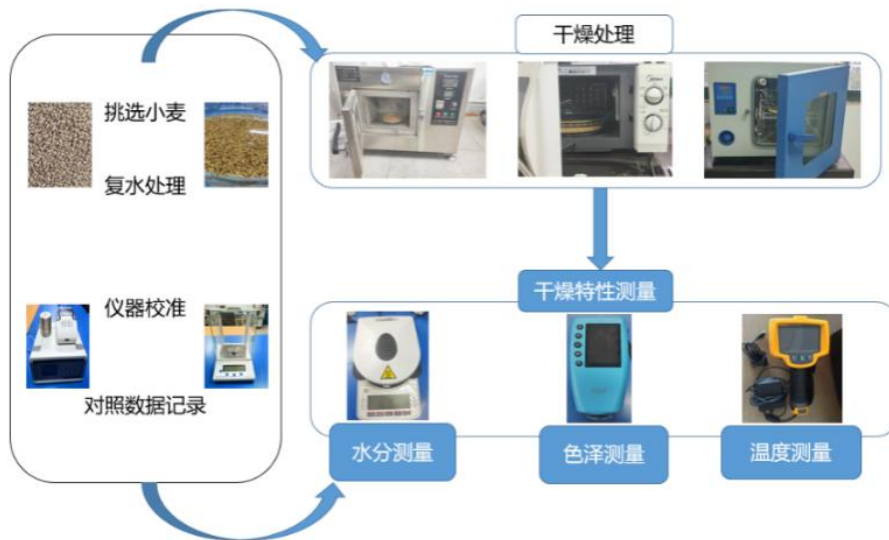


图 2-6 实验流程图

2.2 不同干燥方式对小麦干燥特性影响分析

2.2.1 小麦干燥速率

三种干燥方式下微波真空干燥的干燥速率最快，微波干燥次之，热风干燥最慢。小麦干燥过程含水率变化结果如图 2-7 所示。

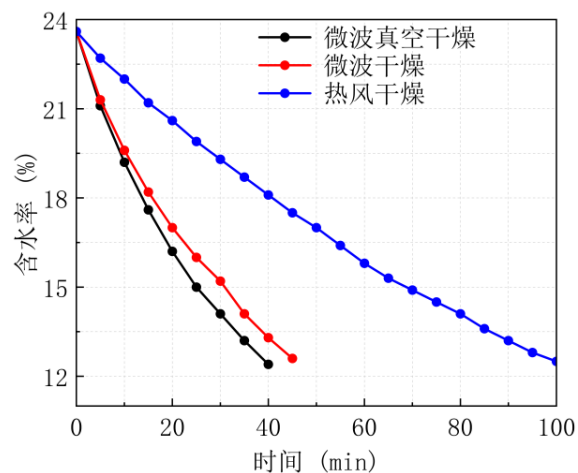


图 2-7 小麦含水率变化

热风干燥通过热空气对流加热小麦表面，热量从表面向内部传递，水分从内部迁移至表面并蒸发。在图 2-7 中热风干燥初期干燥速率较快，因为小麦表面水分蒸发迅速；在干燥中期，干燥速率逐渐下降，因内部水分迁移速度较慢，成为限制因

素；在干燥后期，干燥速率显著降低，接近平衡含水率时，水分蒸发速度极慢。微波干燥利用微波能量直接作用于小麦内部水分子，使水分子振动产生热量，水分从内部向外蒸发。干燥初期时小麦干燥速率极快，因微波能量直接加热内部水分，水分蒸发迅速。在干燥中期的干燥速率仍然较高。后期的干燥速率下降，但仍高于热风干燥，因微波能量可直接作用于剩余水分。微波功率越高，干燥速率越快，需要避免物料堆积不均匀导致的局部过热。

2.2.2 小麦水分活度变化

三种干燥方式干燥过程水分活度变化如表 2-1 所示。热风干燥通过热空气对流加热小麦，水分从表面逐渐蒸发，内部水分迁移较慢。0-10 min：水分活度从 0.895 降至 0.872，水分活度下降幅度较小，表明表面水分蒸发效果有限；10-40 min：水分活度从 0.872 降至 0.826，水分活度下降速度逐渐减缓，因内部水分迁移成为限制因素；40-100 min：水分活度从 0.872 降至 0.693，下降速度进一步减缓。热风干燥的水分活度下降随水分降低下降速度逐渐变缓，主要由于这种干燥方式去除水分由表面开始，在干燥后期水分变少且从内部向外迁移困难。微波干燥初期（0-10 min）：水分活度快速下降，微波是一种高频电磁波，能够直接作用于物料内部的水分子，使其快速振荡并产生热量。因此，物料内部温度迅速上升，水分蒸发速度加快；中期（10-30 min）：水分活度继续快速下降，随着干燥的进行，物料内部形成一定的温度梯度和湿度梯度，促进水分从内部向表面的迁移。这种迁移效率较高，使得水分活度继续快速下降；后期（30-45 min）：水分活度下降速度减缓，物料中的水分主要是与物料紧密结合的结合水，这部分水分难以蒸发，导致水分活度下降速度减缓。微波真空干燥结合微波加热和真空环境，水分蒸发温度降低，干燥速率快且均匀。0-10 min：水分活度从 0.895 降至 0.823，下降幅度较小，因真空环境下水分蒸发温度较低，初期干燥速率较慢；10-30 min：水分活度从 0.823 降至 0.621，下降速度加快，真空环境促进水分迁移；30-40 min：水分活度从 0.621 降至 0.557，下降速度减缓，但仍保持较高效率。微波真空干燥能够使小麦的水分活度降至最低（通常低于 0.6），干燥效果最佳，适合高品质需求和长期储存。微波干燥的水分活度降低效果较好（通常为 0.6-0.7），适合中等品质需求和中期储存。热风干燥的水分活度降低效果一般（通常为 0.7-0.8），适合对品质要求不高的场景和短期储存。

以水分活度降低效果为主要目标，微波真空干燥是最佳选择。

表 2-1 干燥方式对小麦水分活度的影响

干燥时间(min)	干燥方式		
	热风干燥	微波干燥	微波真空干燥
0	0.895	0.895	0.895
10	0.872	0.828	0.823
20	0.859	0.761	0.735
30	0.837	0.703	0.621
40	0.826	0.677	0.557
45	-	0.64	-
50	0.808	-	-
60	0.785	-	-
70	0.767	-	-
80	0.745	-	-
90	0.721	-	-
100	0.693	-	-

2.2.3 小麦色泽变化

不同干燥方式对小麦红绿度、黄蓝度、亮度、色差度影响如表 2-2 所示。干燥过程小麦色泽会有不同程度的变化。色泽是评价谷物干燥质量的重要指标之一。干燥会使小麦偏黄、偏暗，其中微波干燥变化最大热风干燥次之，微波真空干燥变化最小。

表 2-2 干燥方式对小麦色泽影响

干燥方式	色差	干燥时间 (min)								
		0	5	10	15	20	25	30	35	40
微波真空干燥	a^*	0	0.23	0.45	0.38	0.32	0.63	0.47	0.55	0.72
	b^*	0	0.18	0.28	0.39	0.56	0.64	0.78	0.89	1.01
	$ L^* $	0	0.13	0.2	0.31	0.47	0.65	0.77	0.95	1.12
	ΔE	0	0.32	0.57	0.63	0.8	1.11	1.19	1.41	1.67
微波干燥	a^*	0	0.25	0.43	0.31	0.37	0.73	0.52	0.64	0.7
	b^*	0	0.19	0.28	0.37	0.57	0.66	0.8	0.93	1.21
	$ L^* $	0	0.22	0.33	0.66	0.72	0.94	1.14	1.39	1.63
	ΔE	0	0.37	0.6	0.81	0.96	1.36	1.48	1.77	2.14
热风干燥	a^*	0	0.72	1.35	0.91	0.77	1.22	1.41	0.86	0.99
	b^*	0	0.27	0.52	0.73	0.91	1.13	1.42	1.55	1.61
	$ L^* $	0	0.17	0.39	0.53	0.86	1.02	1.22	1.31	1.44
	ΔE	0	0.78	1.5	1.28	1.5	1.96	2.34	2.18	2.41

(1)不同干燥方式对小麦红绿度的影响

小麦三种干燥方式干燥 40 min 后红绿度变化曲线如图 2-8 所示。在图 2-8 中小麦的红绿度随时间的变化无明显规律。微波干燥过程中，表面和内部水分的蒸发速率不一致，可能导致小麦表面较快干燥，从而影响颜色的均匀性，因此微波干燥会使小麦红绿度波动较大。微波真空干燥均匀性好，干燥温度较低，干燥速率相对平稳，因此微波真空干燥后的小麦红绿度波动较小。热风干燥对小麦色泽的影响主要是长时间干燥使小麦处于较高温度导致小麦发生褐变。

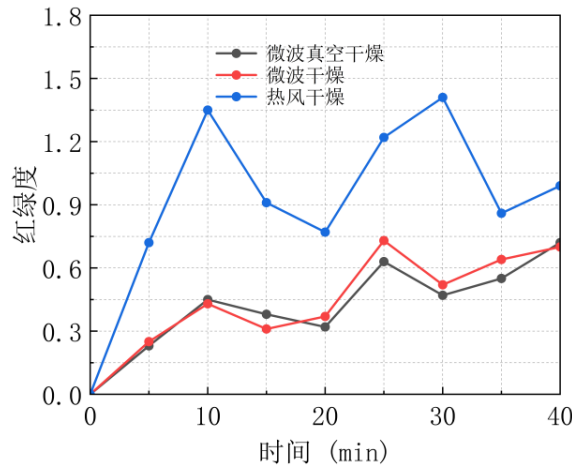


图 2-8 干燥方式对小麦红绿度的影响

(2)不同干燥方式对小麦黄蓝度和亮度的影响

三种干燥方式下小麦的黄蓝度和亮度随时间变化如图 2-9 所示，小麦的黄蓝度和亮度与初始色泽变化都随时间加剧。

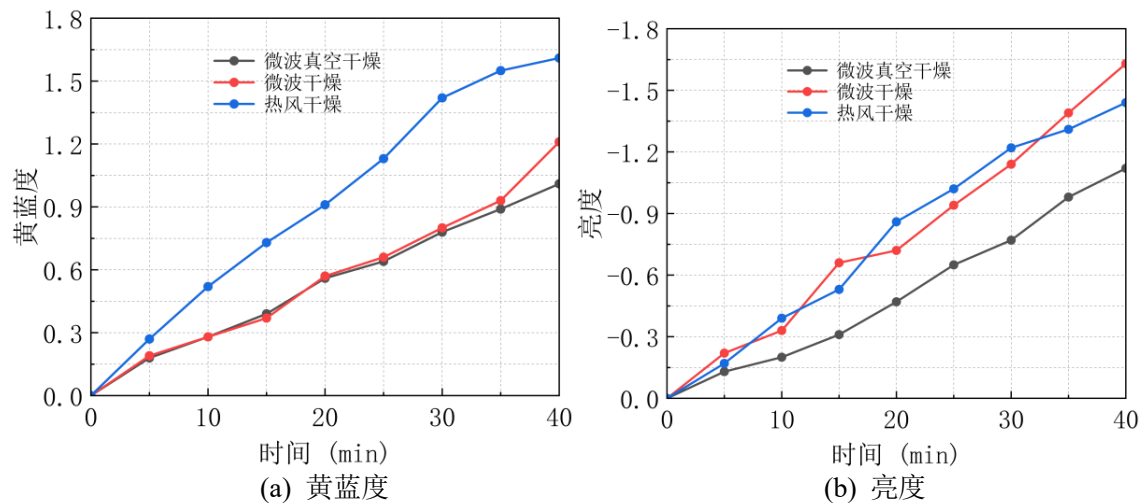


图 2-9 干燥方式对小麦黄蓝度和亮度的影响

图 2-9(a)中，热风干燥方式下小麦的黄蓝度颜色变化最大，是由于热风干燥主要由表面对流交换进行干燥的方式持续的热暴露会促进酶促褐变反应，使小麦颜色偏暗或发黄。微波和微波真空干燥是微波能量直接作用于小麦内部的水分子，使

其快速振动并产生热量，从而加速水分的蒸发和迁移，对表面黄蓝度变化影响较小。

在图 2-9(b)中，微波真空干燥由于在低温、低氧的真空环境下进行，显著减少褐变反应的发生，使得小麦的原始色泽得到更好保留，其亮度降低最小。微波干燥的干燥效率高，水分含量低导致整体色泽偏暗，与热风干燥亮度变化接近。

2.2.4 小麦干燥后表面温度分布

热风干燥温度分布如图 2-10 所示，热风流动不均匀会导致小麦表面温度分布存在差异。小麦温度分布会呈现热风入口附近的区域温度较高，而边缘区域温度较低，导致局部过热。小麦堆放也会造成温度分布有所差别。在堆积紧密的地方小麦温度会出现温度差较大现象，在堆积均匀、疏松的地方温度则较为平均。过于紧密则会阻碍热风流动，导致表面温度分布不均匀，均匀、疏松的堆放方式有利于热风均匀渗透，改善表面温度分布的均匀性。在温度分布范围上均低于设定的 55℃。

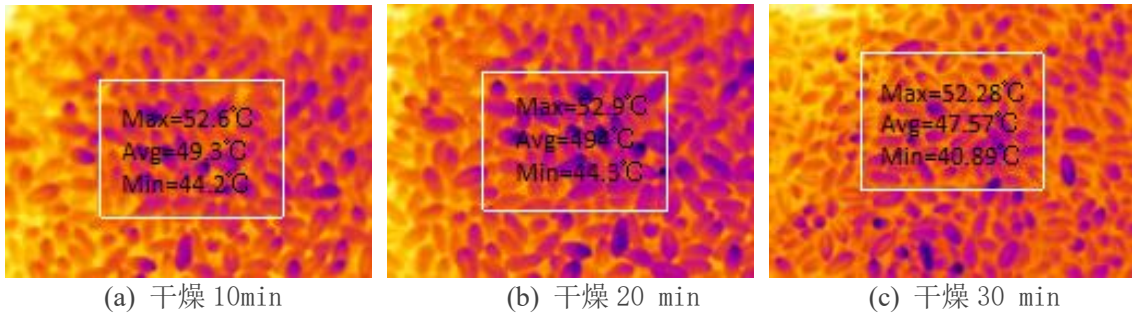


图 2-10 热风干燥过程温度分布图

微波干燥过程小麦温度分布图如图 2-11 所示。小麦内部水分分布不均匀会导致微波能量吸收不均匀。与热风干燥不同的是，微波干燥中堆积密集的区域水分较多会导致该区域温度偏高，造成局部过热。堆积疏松的区域水分较少，吸收的能量相对较少则温度偏低。由于微波能量直接作用在水分子上，能量损失小，反应剧烈且没有限制，在干燥过程中平均温度为 70℃ 以上。

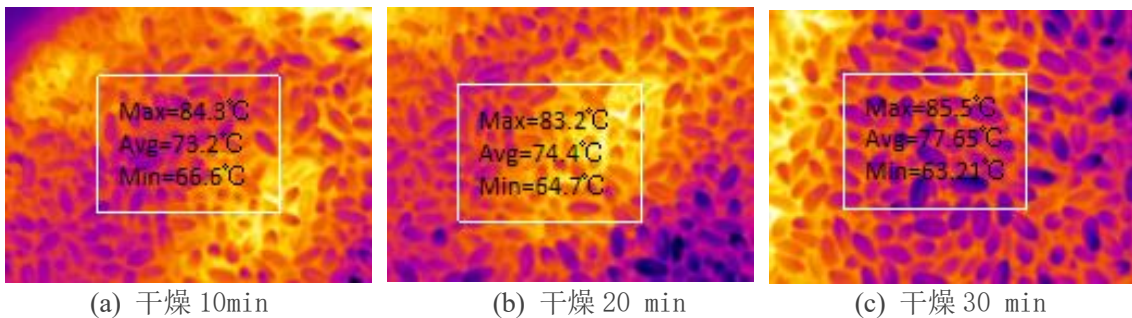


图 2-11 微波干燥过程温度分布图

微波真空干燥过程小麦温度分布图如图 2-12 所示。在微波真空干燥过程中，

温度分布是一个关键因素，直接影响干燥效率、品质均匀性以及最终产品的质量。微波真空干燥结合微波加热和真空环境的优势，能够在较低温度下实现快速干燥，但其温度分布特性与传统的热风干燥或普通微波干燥有所不同。真空环境下水的沸点降低，水分在较低温度下即可蒸发，减少高温对小麦品质的破坏，同时温度分布相对均匀^[74]。与普通微波干燥相比，微波真空干燥的局部热点现象较少，因为真空环境促进水分的快速蒸发和扩散。随着干燥过程的进行，小麦内部水分逐渐减少，微波能量的吸收效率降低，温度分布可能发生变化。真空度越高，水的沸点越低，水分蒸发速度越快，温度分布更加均匀，但过高的真空度可能增加设备能耗。

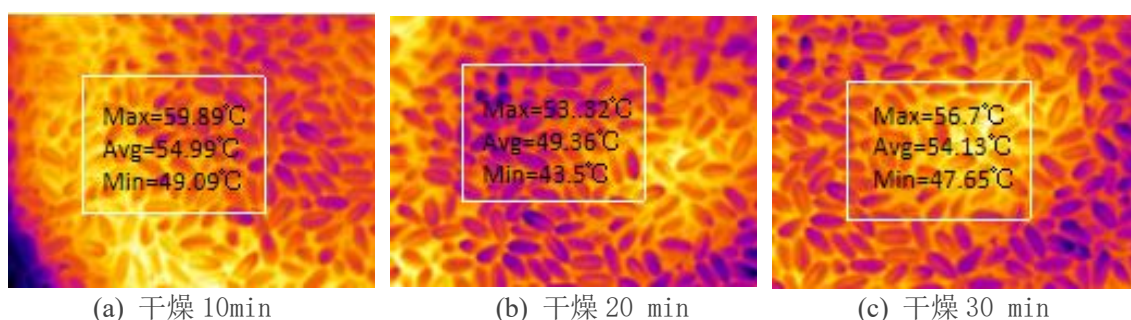


图 2-12 微波真空干燥过程温度分布图

在微波真空干燥过程中，小麦的温度分布通常表现为：内部温度高、表面温度低，且整体均匀性优于普通微波干燥。通过优化微波功率、控制真空度、改进小麦堆积方式以及使用辅助设备等措施，可以有效改善温度分布的均匀性，提高干燥效果和产品品质。微波真空干燥在快速干燥、低温处理和品质保持方面具有显著优势，是高品质小麦干燥的理想选择。

2.2.5 小麦温度均匀度分析

(1) 不同干燥方式下小麦的温度幅度

三种干燥方式干燥结束时温度幅度如表 2-3 所示。微波干燥下小麦温度过高，热风干燥的小麦温度比设定温度偏低，微波真空干燥温度最接近设定的干燥温度。微波真空干燥的最高温度（56.7 °C）和平均温度（54.13 °C）较低，表明其在低温条件下完成干燥，适合对热敏感的小麦品质保持。最低温度（47.65 °C）与最高温度差异较小，表明温度分布较为均匀，局部过热现象较少。真空环境下水的沸点降低，水分在较低温度下即可蒸发，减少了高温对小麦品质的破坏^[74]。微波干燥的最高温度（85.5 °C）和平均温度（77.65 °C）显著高于微波真空干燥和热风干燥，表

明其加热强度较高。最低温度（63.21 ℃）与最高温度差异较大，表明温度分布不均匀，局部过热现象明显。微波能量直接作用于内部水分子，导致内部温度较高，出现局部热点现象影响小麦品质。热风干燥的最高温度（52.28 ℃）和平均温度（47.57 ℃）较低，表明其在相对温和的条件下完成干燥。最低温度（40.89 ℃）与最高温度差异较小，表明温度分布较为均匀，但整体温度较低可能导致干燥时间较长。热风干燥主要通过热空气对流加热小麦表面，内部温度较低，干燥效率相对较低。

表 2-3 干燥方式下小麦结束干燥时温度

干燥方式	微波真空干燥	微波干燥	热风干燥
$T_{\max}$	56.7	85.5	52.28
T_{avg}	54.13	77.65	47.57
$T_{\min}$	47.65	63.21	40.89

(2)小麦温度分布均匀度分析

不同干燥方式对小麦平均温度和温度均匀度影响，如图 2-13 所示。三种干燥方式中，微波真空干燥的温度均匀度值最小，干燥均匀性最好；微波干燥的平均温度和温度均匀度都是最高，表明干燥效率高但会出现局部热点现象导致干燥品质下降；热风干燥平均温度最低，均匀度适中，说明干燥效率较低，没有过高温度造成的品质影响，但持续的热暴露会促进酶促褐变反应，影响小麦的外观品质。

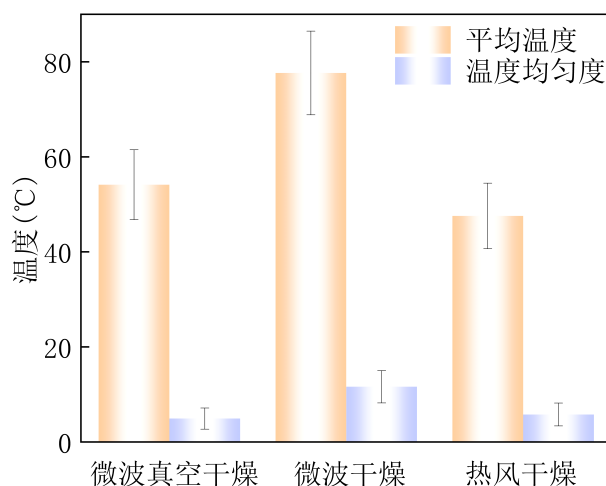


图 2-13 小麦不同干燥方式下小麦平均温度和温度均匀度

2.3 干燥方式评价

热风干燥的干燥速率较慢，主要通过热空气对流加热小麦表面，内部水分迁移

较慢，整体干燥时间较长。微波干燥的干燥速率最快，微波能量直接作用于小麦内部水分子，使水分快速蒸发，适合高效率生产。微波真空干燥的干燥速率较快，真空环境下水的沸点降低，水分在较低温度下即可蒸发，同时微波能量均匀加热内部水分，干燥效率高。热风干燥的水分活度降低效果较好，但温度分布不均匀可能导致局部水分活度差异，适合短期储存。微波干燥的水分活度降低效果最佳，干燥速度快，能够在较短时间内将水分活度降至较低水平，适合中期储存。微波真空干燥的水分活度降低效果较好，真空环境促进水分的快速蒸发，水分活度分布均匀，适合长期储存。

热风干燥的高温可能导致小麦表面褐变， L^* 值下降， a^* 值和 b^* 值升高，整体色泽品质较差。微波干燥的干燥时间短，色泽变化较小， L^* 值、 a^* 值和 b^* 值变化较小，整体色泽品质较好。微波真空干燥的低温干燥条件最大限度地保持小麦的色泽， L^* 值、 a^* 值和 b^* 值变化很小，整体色泽品质最佳。热风干燥的热风流动的不均匀性会导致局部区域温度差异，但热风干燥温和整体均匀性较好。微波干燥的温度分布不均匀，局部热点现象明显，最高温度与最低温度差异较大，整体均匀性较差。微波真空干燥的温度分布最均匀，真空环境促进了水分的快速蒸发和扩散，减少局部过热现象，整体均匀性最佳。

2.4 本章小结

本章对小麦进行了热风干燥、微波干燥和微波真空干燥三种干燥方式的实验，系统测量小麦在不同干燥方式下的干燥速率、水分活度、色泽度和温度分布均匀性。通过对比分析，研究发现微波真空干燥在干燥质量和干燥速率方面均显著优于热风干燥和微波干燥，是一种兼具高效性和高品质的干燥方式。

第3章 小麦微波干燥理论与模型

3.1 小麦微波干燥多物理场理论

微波干燥是一种利用微波电磁波对物料进行加热和脱水的过程。微波是一种频率范围在 300 MHz 到 300 GHz 之间的电磁波，其能量通过电介质的极化和离子传导机制被小麦吸收，并转化为热能。在微波干燥过程中，微波能量直接作用于小麦内部的水分子，使其快速振动并产生热量，从而加速水分的蒸发和迁移。与传统干燥方式（如热风干燥）相比，微波干燥具有加热速度快、能量利用率高、温度分布均匀等优点^[75-76]。

微波干燥的核心在于微波与物料的相互作用，包括电磁波的传播、吸收和衰减。小麦中的极性分子（如水分子）在交变电磁场的作用下重新排列并产生热量，这种内部热源的生成使得干燥过程更加高效。

3.1.1 电磁场的传播与吸收

(1) 电磁波的传播

当电磁波通过物质时，电场和磁场会与小麦中的粒子（如电子、离子、分子）发生相互作用。电场分布和能量吸收的强度与小麦的介电常数磁导率导电性以及电磁波的频率密切相关。对于非导电介质（如空气或水分较低的物质），可以通过以下麦克斯韦方程组来描述电磁波的传播^[77]。

$$\begin{cases} \nabla^2 E - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 B - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

式中， E 是电磁强度， B 是磁场强度， μ 是小麦的磁导率， ϵ 是小麦的介电常数， c 是光速。

在小麦中，电场分布通常受到介电常数和小麦的几何形状影响。假设有一个平面波入射到小麦表面，电场的传播可以通过如下的波动方程来计算。假设入射波为

单频平面电磁波，入射波的电场可表示为：

$$E(z, t) = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad (3-2)$$

式中， E_0 是电场幅值， ε_r 是相对介电常数， k 是波数，可表示为：

$$k = \frac{\omega}{v} \quad (3-3)$$

式中， v 是波速， $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$ 。

(2) 能量吸收

水的吸收特性主要由其高介电常数决定。电场的变化引起水分子（作为极性分子）在交变电场中发生极化和转动，导致摩擦热的产生。能量的吸收率电磁波在小麦中的能量吸收取决于电场强度、物质的介电常数和导电性^[78]。单位体积内的吸收功率为：

$$P_{\text{abs}} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (3-4)$$

式中， P_{abs} 是单位体积的能量吸收率，单位为 W/m^3 ， ω 是电磁波角频率， ε_0 是真空的介电常数 ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)， ε'' 是小麦的介电损耗因子，表示小麦对电磁能量的吸收能力。

(3) 边界条件

1) 电场切向分量连续， $E_0 \times n = E_L \times n$ ，其中 E_L 是距小麦表面 L 处的电场强度， n 是切向量；

2) 磁场切向分量连续， $B_0 \times n = B_L \times n$ ，其中 B_L 是距小麦表面 L 处的磁场强度。

3.1.2 热传导方程

微波能量通过介质转化为热能后，热量在小麦中传播。热传导过程可以通过以下的热传导方程描述^[79]：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + P_{\text{abs}} \quad (3-5)$$

式中， T 是温度， ρ 是小麦的密度， c_p 是比热容， k 是热导率。

为了计算温度场的演化，假设在干燥过程中只有一个维度的热传导（如沿着 x -轴方向），并在一些边界条件下进行求解。

(1) 稳态条件下的温度分布

假设温度分布在空间上达到了稳态（即没有时间变化），热传导方程简化为：

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = -Q_{abs} \quad (3-6)$$

假设小麦的热导率 k 是常数且均匀的，且电磁波的能量吸收 Q_{abs} 在小麦内部是均匀分布的，则方程可以简化为：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{Q_{abs}}{k} \quad (3-7)$$

(2)解温度场

通过积分该方程，得到温度分布的表达式：

$$T(x) = -\frac{Q_{abs}}{2k} x^2 + C_1 x + C_2 \quad (3-8)$$

式中， C_1 和 C_2 是积分常数，可以通过边界条件来确定。

(3)边界条件

假设边界条件为：

- 1)在小麦的表面 $x=0$ 处，温度为 T_0 ；
- 2)在小麦另一面 $x=L$ 处，温度为 T_L 。

3.1.3 水分迁移与蒸发方程

(1)水分迁移和蒸发的基本机制

水分迁移和蒸发的过程主要受温度场、水分浓度、蒸汽压差等因素的影响。在干燥过程中，水分从小麦内部通过扩散、蒸发等方式迁移到表面，然后以水蒸气的形式蒸发到空气中。

1)水分迁移，水分在小麦内部的迁移主要通过扩散进行。水分迁移速率受水分梯度、小麦的扩散系数等因素的影响。

2)水分蒸发，水分蒸发速率由小麦表面水蒸气的浓度和水蒸气在空气中的扩散速率控制，通常以表面蒸发速率来描述。

(2)水分迁移方程

水分迁移通常遵循扩散方程，假设水分在小麦中的扩散是线性的，可以用以下方程描述水分的迁移：

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2} \quad (3-9)$$

式中, $W(x,t)$ 是位置 x 和时间 t 处的水分含量, D 是水分扩散系数, $\frac{\partial^2 W(x,t)}{\partial x^2}$ 是水分浓度梯度, 表示水分从高浓度区域向低浓度区域的扩散速率。

(3) 水分蒸发方程

水的蒸发过程是温度和水分含量之间的强耦合过程。水分的蒸发速率通常由蒸发潜热和水分表面蒸发的条件决定:

$$\dot{m} = h_{\text{evap}} (\theta_s - \theta) \quad (3-10)$$

式中, $\dot{m}$ 是蒸发速率, h_{evap} 是水的蒸发潜热, θ_s 是物料表面水分含量, θ 是当前水分含量。

水分蒸发的热量需求也与物料的温度场相关, 因此这个过程与热传导耦合。

(4) 边界条件

假设介质内部水分分布均匀, 即 $W(x,t) = W_0 = \theta_s$, 其中 W_0 为介质初始含水率。

3.2 小麦微波干燥理论模型

3.2.1 一维扩散模型概述

扩散过程是指物质在空间中从高浓度区域向低浓度区域传递的过程。在微波干燥过程中, 水分从小麦内部迁移到表面并最终蒸发, 通常可以通过一维扩散模型来描述这种水分传递的现象。对于微波干燥而言, 水分的迁移和蒸发是主要的质量传递过程, 一维扩散模型提供了一种简化的数学框架来分析和预测水分在物料中的扩散行为^[80]。

一维扩散模型的核心假设是水分的扩散过程在某个方向上 (通常为小麦的厚度方向) 是均匀的, 忽略了其他方向的扩散效应。在微波干燥的情况下, 小麦的水分从内部分布向表面迁移, 并最终被蒸发到空气中, 因此可以通过一维的空间模型来简化分析。

3.2.2 扩散的物理基础

扩散是一种物质由高浓度区域向低浓度区域自发流动的过程^[81]。水分子在干燥小麦中以随机的方式运动, 当它们遇到浓度梯度时, 沿着浓度较低的区域移动。

扩散速率与浓度梯度、温度和小麦的特性等因素密切相关。

在微波干燥中，水分通过两种机制离开小麦：

(1)水分的扩散，水分从小麦的内部通过扩散的方式向表面迁移。

(2)水分的蒸发，水分到达小麦表面后，通过蒸发释放到空气中。

3.2.3 扩散模型的推导

在微波干燥的过程中，除了考虑水分在物料中的扩散和迁移外，还需要考虑固体物质的能量变化。固相能量守恒描述了在干燥过程中，小麦内部固体部分的能量（通常是热能）如何变化。在一维扩散模型中，固相能量守恒与水分的扩散密切相关，尤其是在微波干燥过程中，微波能量的输入和小麦的热传递都需要纳入考虑。

(1)质量扩散方程

小麦中液相的水在材料接受加热过程中由于表面液相水的蒸发而引起其内部各处液相水饱和度不均匀，从而引起液相水的扩散^[82]，结合式(3-9),小麦的液相水扩散可表示为：

$$\phi \rho_l \frac{\partial S_1}{\partial \tau} = D_{ls} \phi \rho_l \frac{\partial^2 S_1}{\partial Z^2} \quad (3-11)$$

式中， ϕ 是孔隙率， ρ_l 是液相密度， S_1 液相水饱和度， τ 是时间（s）， D_{ls} 是液相对固相的扩散系数。

(2)能量扩散方程

固相能量守恒的核心思想是描述固体部分的热量变化。假设小麦在干燥过程中吸收了微波能量，导致固体温度升高，同时这些热量又通过导热、对流等方式传递给小麦内部的其他部分。在干燥过程中，固体的能量来源主要有三部分：一是微波加热提供的能量，微波能量的输入加热小麦；二是热传导，热从小麦表面传递到内部；三是水分蒸发，水分从固体表面蒸发时需要吸收一定的热量（潜热），这会消耗小麦的部分内能。考虑到这些因素，固相的能量守恒方程可以表示为^[83]：

$$(1-\phi) \rho_s c_s \frac{\partial t_s}{\partial \tau} = (1-\phi) \lambda_s \frac{\partial^2 t_s}{\partial Z^2} + h_{s1} A_{s1} (t_1 - t_s) + h_{sg} A_{sg} (t_g - t_s) \quad (3-12)$$

式中， ρ_s 是固相密度， c_s 是固相比热容， t_s 是固相摄氏温度， λ_s 是固相导热系数， h_{s1} 是液相与固相的传热系数， A_{s1} 固相与液相接触面积， t_1 是液相温度， h_{sg} 是固相与气相的传热系数， A_{sg} 是固相与气相的接触面积， t_g 是气相的摄氏温度。

在微波干燥过程中，液相水分通过吸收微波能量和固相热量的传递来加热。随着温度的升高，水分的蒸发需要消耗一定的热量（潜热）。同时，液相水分的温度变化不仅受到微波能量和固体热传导的影响，还受到液相蒸发的潜热消耗的影响。

液相能量守恒的核心在于液相的能量变化是由于水分吸收热量后温度升高或蒸发而消耗热量。液相能量守恒方程可以写成如下的形式^[84]：

$$\phi \rho c_1 \frac{\partial S_1 t_1}{\partial \tau} = \phi S_1 \lambda_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial Z^2} - \phi S_1 \rho c_1 \omega \frac{\partial t_1}{\partial Z^2} + h_{s1} A_{s1} (t_s - t_1) + h_{lg} A_{lg} (t_g - t_1) \quad (3-13)$$

式中， c_1 是液相比热容， λ_1 是液相导热系数， h_{lg} 是液相与气相的传热系数， A_{lg} 是液相与气相接触面积。

在微波干燥过程中，水分从固体中蒸发并转化为气态水蒸气，进入气相。气相中的能量变化不仅与蒸发的水蒸气数量有关，还与气流的温度、湿度、速度及热传导过程密切相关。气相的能量守恒方程主要涉及以下几个方面：

- (1) 气相温度的变化，水蒸气扩散到气相后，气相温度可能会发生变化。
- (2) 蒸发释放热量，水分从固体表面蒸发时，释放的水蒸气进入气相并带走热量。
- (3) 气流的热交换，气流（如空气流动）与小麦表面以及气相之间发生热交换，影响气相温度。
- (4) 热传导，气相中的热量通过热传导扩散。
- (5) 气相能量守恒方程为^[80]：

$$\phi \rho_g c_g \frac{\partial (1-S_1) t_g}{\partial \tau} = \phi (1-S_1) \lambda_g \frac{\partial^2 t_g}{\partial Z^2} + h_{sg} A_{sg} (t_s - t_g) + h_{lg} A_{lg} (t_1 - t_g) \quad (3-14)$$

式中， ρ_g 是气相密度， c_g 是气相比热容， λ_g 是气相导热系数，对流项中的质量渗流可以等效成质量扩散，根据虎克定律可表示为^[85]：

$$\phi S_1 \rho c_1 \omega \frac{\partial t_1}{\partial Z} = -D_{1s} \phi \rho c_1 \frac{\partial S_1}{\partial Z} \frac{\partial t_1}{\partial Z} \quad (3-15)$$

联立质量与能量守恒可得：

$$\phi \rho c_1 \frac{\partial S_1 t_1}{\partial \tau} = \phi S_1 \lambda_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial Z^2} + D_{1s} \phi \rho c_1 \frac{\partial S_1}{\partial Z} \frac{\partial t_1}{\partial Z} + h_{s1} A_{s1} (t_s - t_1) + h_{lg} A_{lg} (t_g - t_1) \quad (3-16)$$

上述式中：

$$\begin{cases} t_s = t_1 = t_g = t \\ \lambda = (1-\phi)\lambda_s + \phi S_1 \lambda_1 + \phi(1-S_1)\lambda_g \\ \rho c = (1-\phi)\rho_s c_s + \phi S_1 \rho_1 c_1 + \phi(1-S_1)\rho_g c_g \\ \rho_g c_g = \rho_a c_a + \rho_v c_v \end{cases} \quad (3-17)$$

整理可得：

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + D_{1s} \phi \rho_1 c_1 \frac{\partial S_1}{\partial z} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (3-18)$$

3.2.4 小麦一维扩散干燥模型的建立与验证

(1) 建立小麦干燥的一维扩散模型

结合式(3-18)，小麦干燥过程的水分扩散可表示为：

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} \quad (3-19)$$

式中， $\partial M(x,t)$ 是小麦在位置和时间时的水分含量（%）。

(2) 确定小麦干燥过程的水分扩散系数

水分扩散系数随温度变化，使用阿伦尼乌斯方程计算^[86]：

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad (3-20)$$

式中， D_0 是指前因子（ m^2/s ）， E_a 是活化能（ J/mol ）， R 是气体常数， T 是绝对温度（ K ）。

(3) 确定初始条件和边界条件

1) 初始条件

假设小麦初始水分分布均匀，即 $M(x,t) = M_0 = 0.25$ 。

2) 边界条件

在 $x=0$ 处，小麦表面水分与外界水分达到平衡，即 $M(0,t) = M_e$ ；

在 $x=L$ 处，假设小麦水分分布对称，即 $\partial M(L,t) = 0$ 。

(4) 模型求解

利用 MATLAB(2018b) 对小麦干燥的一维扩散模型进行求解，外热源为微波，其功率 200 W。结合式(3-6)和式(3-19)，小麦的蒸发方程为：

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + S \quad (3-21)$$

式中, S 为外热源(水分蒸发速率)。

结合式(3-4)和式(3-7), 200 瓦微波能量部分转化为水分蒸发潜热:

$$S = \frac{P_{\text{abs}}}{h_{\text{evap}} \cdot \rho \cdot V} \quad (3-22)$$

式中, ρ 为小麦密度, V 为小麦体积。

边界条件为:

在 $x=0$ 处, 小麦表面水分与外界水分达到平衡, 即 $M(0,t) = M_e$;

在 $x=L$ 处, 假设小麦水分分布对称, 即 $\partial M(L,t) = 0$ 。

使用 MATLAB 求解结果如图 3-1 所示。

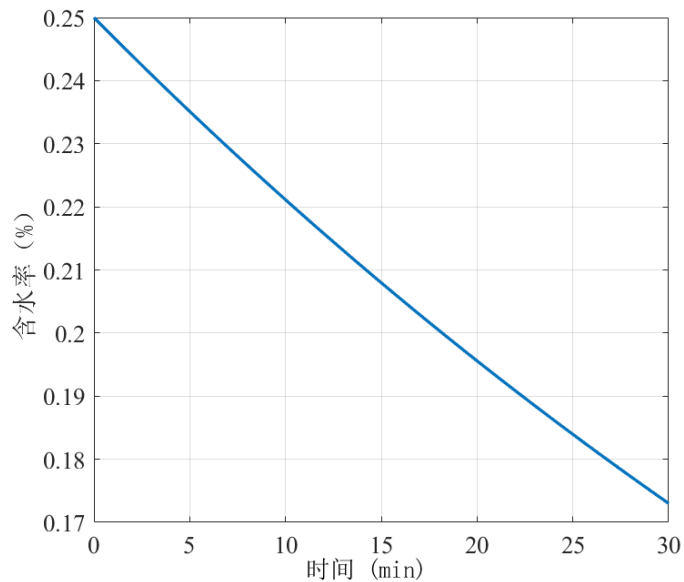


图 3-1 小麦一维扩散模型求解结果

3.3 小麦干燥经验模型

在小麦干燥研究中, 干燥模型的构建与应用已成为描述干燥过程的重要手段。通过筛选适宜的薄层干燥模型对小麦干燥过程进行拟合, 并验证模型的精确度, 可为小麦干燥过程的深入分析与预测提供理论支持。该方法不仅能够揭示小麦干燥过程中的动力学特性, 还可为优化干燥工艺参数及提高干燥效率提供科学依据。基于干燥模型的定量化研究对小麦干燥的技术理论探索与实践应用具有重要意义。

3.3.1 薄层干燥模型

小麦的干燥过程本质上是一个多场耦合的非稳态传热传质过程，其动力学特性受到物料微观结构和环境参数的双重影响。针对这一复杂过程，建立具有物理意义的数学模型对于实现干燥过程的精准预测与优化控制至关重要。目前研究中，由于理论模型涉及的物性参数存在时变特性且易受工况条件干扰，普遍采用半经验模型和经验模型来描述小麦的水分迁移规律。在小麦薄层干燥研究中，常用的干燥模型主要包含以下三种形式：

(1)指数模型：

$$MR = \exp(-kt) \quad (3-23)$$

(2)单项扩散模型：

$$MR = A \exp(-kt) \quad (3-24)$$

(3)Page 方程：

$$MR = \exp(-kt^N) \quad (3-25)$$

式中， t 是时间 (min)， k 、 A 、 N 是待定系数。

这些模型为描述小麦干燥动力学行为提供了理论依据，并为干燥工艺的优化奠定了重要基础。

为便于干燥模型的拟合和分析，需要对公式 3-23 至 25 进行变换处理，将模型取对数转化为线性模型：

$$\begin{cases} \ln(MR) = -kt \\ \ln(MR) = \ln A - kt \\ \ln(-\ln MR) = \ln k + N \ln t \end{cases} \quad (3-26)$$

3.3.2 经验模型拟合与验证

1.单因素实验

挑选颗粒大小均匀，颗粒饱满的小麦籽粒进行干燥实验，小麦初始含水率为 $(25 \pm 0.5)\%$ ，称取 100 g 小麦平铺在托盘上，分别在不同温度 (35, 40, 45, 50, 55 °C)、不同功率 (200, 300, 400, 500 W)、不同真空度 (-0.06, -0.07, -0.08, -0.09 MPa) 的微波真空干燥箱中进行微波干燥，每 5 min 快速取出称重并记录，直至小麦含水率干燥至 12.5% 以下。实验流程如图 3-2。

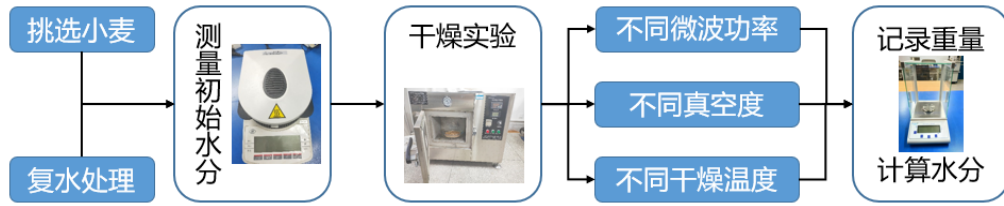


图 3-2 单因素实验流程图

2. 薄层模型拟合

(1) $\ln MR$ 与 t 的回归方程拟合

1) 不同干燥温度下 $\ln MR$ 与 t 的回归方程及相关检验, 检验结果如表 3-1 所示。

不同干燥温度下 $\ln MR$ 与 t 回归方程 R^2 值介于 0.7577 到 0.8710 之间, 说明回归方程能够较好地解释干燥温度与时间 t 之间的关系。随着干燥温度的升高, R^2 值呈现上升趋势(从 0.7577 到 0.8710), 说明在较高温度下, 模型对数据的拟合效果更好。

表 3-1 不同干燥温度拟合结果

干燥温度/ $^{\circ}\text{C}$	a_0	a_1	R^2
40	0.702	-0.1553	0.7577
45	0.7031	-0.2054	0.8108
50	0.644	-0.2576	0.8710
55	0.9275	-0.466	0.8593

2) 不同微波功率下 $\ln MR$ 与 t 的回归方程及相关检验, 检验结果如表 3-2 所示。

不同微波功率下 $\ln MR$ 与 t 回归方程 R^2 值介于 0.7249 到 0.8403 之间, 说明回归方程能够较好地解释微波功率 $\ln MR$ 与时间 t 之间的关系。由于干燥过程微波功率受到设定干燥温度影响, 在 200 W 时 R^2 值最高为 0.8403, 说明在 200 W 功率下模型的拟合效果最好。

表 3-2 不同微波功率拟合结果

微波功率/W	a_0	a_1	R^2
200	0.7449	-0.1792	0.8403
300	0.6629	-0.1969	0.7802
400	0.8281	-0.2242	0.7249
500	0.8162	-0.2532	0.7419

3) 不同真空度下 $\ln MR$ 与 t 的回归方程及相关检验, 检验结果如表 3-3 所示。

不同真空度下 $\ln MR$ 与 t 回归方程 R^2 值介于 0.7249 到 0.9236 之间, 说明回归方程拟合效果较好, 且拟合优度随真空度的提高而显著增加。这表明真空度对干燥过程有显著影响, 较高真空度下干燥过程更加稳定, 模型的解释能力更强。较低真空度

下，模型的拟合效果相对较差，可能受到其他因素的干扰。

表 3-3 不同真空度拟合结果

真空度/MPa	a_0	a_1	R^2
-0.06	0.4609	-0.1299	0.8471
-0.07	0.8277	-0.2242	0.7249
-0.08	0.5925	-0.2465	0.9135
-0.09	0.8162	-0.2532	0.9236

(2) $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程拟合

1)不同干燥温度小麦干燥结果的 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程及相关检验，检验结果如表 3-4 所示。不同干燥温度下 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程 R^2 值介于 0.9427 到 0.9815 之间，表明回归方程能够非常好地解释 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 之间的关系。随着干燥温度的升高，回归方程 R^2 值呈现逐渐增加的趋势（从 0.9427 到 0.9815），说明在较高温度下，模型对数据的拟合效果更好。 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程 R^2 值（0.9427 - 0.9815）显著高于 $\ln MR$ 与 t 回归方程 R^2 值（0.7577 - 0.8710）， $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 的模型对数据的解释能力更强，拟合效果更优。

表 3-4 不同干燥温度拟合结果

干燥温度/°C	a_0	a_1	R^2
40	-1.9446	0.1451	0.9427
45	-1.7466	0.1798	0.9708
50	-1.8934	0.2684	0.9712
55	-1.6365	0.3862	0.9815

2)不同微波功率小麦干燥结果的 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程及相关检验，检验结果如表 3-5 所示。不同微波功率小麦干燥结果的 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程 R^2 值呈现一定的波动，但整体保持在较高水平（均大于 0.93），说明模型在不同功率下均有较好的适用性。

表 3-5 不同微波功率拟合结果

微波功率/W	a_0	a_1	R^2
200	-1.8269	0.1552	0.9797
300	-1.5289	0.1545	0.938
400	-1.6283	0.1671	0.942
500	-1.7728	0.1838	0.9672

3)不同真空度小麦干燥结果的 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程及相关检验,检验结果如表 3-6 所示。随着真空度的变化, R^2 值呈现一定的波动,但整体保持在较高水平(均大于 0.93),说明模型在不同真空度下均具有较好的适用性。不同真空度下 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 回归方程 R^2 值(0.938–0.9797)显著高于 $\ln MR$ 与 t 回归方程 R^2 值(0.7249 – 0.9236),说明 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 的模型拟合效果更优。

表 3-6 不同真空度拟合结果

真空度/MPa	a_0	a_1	R^2
-0.06	0.1432	-0.1637	0.9358
-0.07	0.1568	-0.2242	0.9422
-0.08	0.1836	-0.2465	0.9673
-0.09	0.241	-0.2532	0.9568

$\ln MR$ 与 t 的回归方程是线性模型,而 $\ln(\ln MR)$ 与 $\ln t$ 的回归方程是对数-对数模型。对数-对数模型能够更好地捕捉干燥过程中的非线性动力学行为,因此拟合效果更优。故选取 Page 方程拟合小麦热风干燥特性曲线更加合适。

3.4 本章小结

本章阐述了微波干燥技术的特点及其核心工作原理,基于热传导理论与公式推导构建扩散模型并使用 MATLAB 进行计算验证。还通过实验数据拟合验证薄层干燥模型的准确性,结果表明该模型能够较好地模拟小麦在微波干燥过程中的水分变化规律。研究结果为微波干燥技术的优化及其在农业领域的应用提供了理论支持。

第 4 章 小麦微波真空干燥工艺分析与优化

小麦干燥是粮食产后加工的关键环节，其工艺条件直接影响干燥效率及品质特性。传统热风干燥易导致能耗高、干燥不均匀等问题，而微波真空干燥技术结合了微波加热的高效性与真空环境的低温脱水优势，在提高干燥速率的同时可有效降低热敏性物质的品质劣变。为了获得小麦微波真空干燥最佳工艺条件以提高干燥质量，研究小麦微波真空干燥特性，测试不同干燥温度、微波功率、真空度对小麦的干燥速率与爆腰率的影响。使用线性函数、指数函数、有理数函数模型对各工艺条件下小麦水分扩散系数进行拟合分析。通过对比分析干燥温度、微波功率、真空度对水分扩散系数和爆腰率的影响，明确最佳工艺组合。为提高小麦干燥效率和质量做出贡献，为微波真空干燥工业化提供参考。

4.1 材料与设备

4.1.1 实验材料

干燥实验所用小麦品种为济麦 22。挑选颗粒均匀、饱满、无霉变和机械损伤的小麦籽粒进行干燥实验。

4.1.2 实验设备

RWBZ-08S 微波真空干燥箱(南京苏恩瑞干燥设备有限公司)、水分活度仪(南京群联机电科技有限公司)、AB204-N 电子分析天平(梅特勒-托利多仪器上海有限公司)、HS100 烘干法水分测定仪(上海豪晟科学仪器有限公司)等实验仪器。

(1) AB204-N 电子分析天平

AB204-N 电子分析天平是一种专为实验室环境研发的高精度称重仪器，其核心设计融合了高稳定性传感器技术与智能化单片微机控制系统，从而保证了称量数据的高精确度和可靠性。该设备的工作原理基于以下机制：当待测样品置于称量盘时，内置传感器会即时生成相应的电信号，该信号经由精密模拟系统转换后传输至微处理器进行数据处理，最终以数字化形式直观呈现样品的质量值。这种设计不

仅提升了称量效率，同时确保了实验数据的准确性与可重复性。AB204-N 电子分析天平实物如图 4-1 所示。

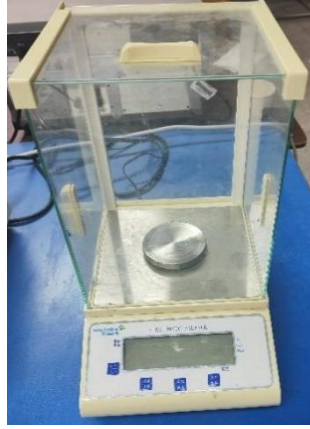


图 4-1 AB204-N 电子分析天平

(2) HS100 烘干法水分测定仪

HS100 烘干法水分测定仪基于热失重法（烘干法）进行测量。通过加热样品，使其中的水分蒸发，仪器实时监测样品重量的变化，并精确计算水分含量。其核心组件包括高精度称重传感器、加热单元和智能化控制系统，确保测量过程的准确性和重复性。HS100 烘干法水分测定仪实物如图 4-2 所示。



图 4-2 HS100 烘干法水分测定仪

4.2 实验方法

4.2.1 干燥实验方法

对小麦进行复水处理，使初始含水率为 $(25 \pm 0.5)\%$ ，称取 100 g 小麦平铺在托盘上，分别在不同温度（35，40，45，50，55 $^{\circ}\text{C}$ 、不同功率（200，300，400，500 W）、不同真空度（-0.06，-0.07，-0.08，-0.085，-0.09 MPa）的微波真空干燥箱

中进行微波干燥，每 5 min 快速取出称重并记录，直至小麦含水率干燥到 12.5%以下，计算各项指标，具体流程如图 4-3。

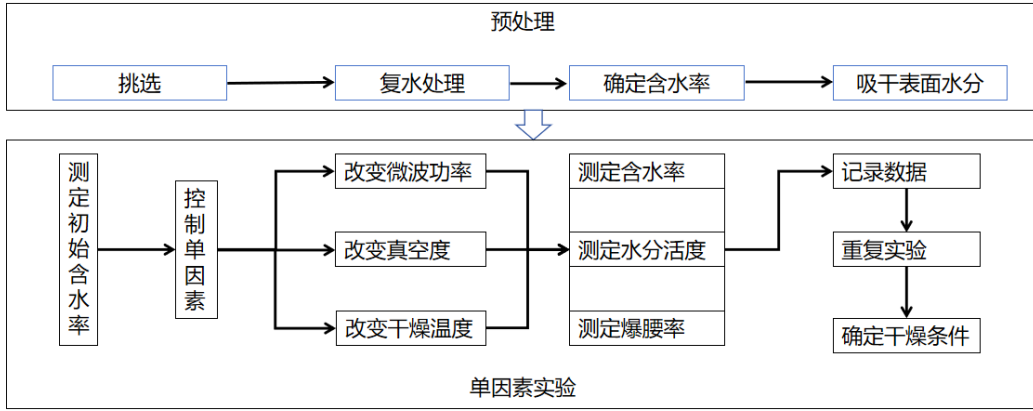


图 4-3 实验流程图

4.2.2 水分扩散系数测定

以 Fick 第二定律为理论基础对其扩散偏微分方程进行求解并加以分析^[87-88]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} t\right) \quad (4-1)$$

式中， M_t 为干燥 t 时刻含水率， M_e 为干燥平衡时刻含水率， M_0 为初始含水率， D_{eff} 为水分扩散系数， L 为样品厚度的一半。因为 M_e 相对于 M_t 、 M_0 很小，故：

$$MR = \frac{M_t}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} t\right) \quad (4-2)$$

对上式两边取对数变形：

$$D_{\text{eff}} = \frac{\ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \ln\left(\frac{M_t}{M_0}\right)}{t\pi^2} 4L^2 \quad (4-3)$$

4.2.3 实验干燥模型

选用如表 4-1 所示的线性函数、指数函数和有理数函数模型。

表 4-1 函数模型

模型名称	模型方程式	模型参数
线性函数	$f(x) = ax + b$	a, b
指数函数	$f(x) = a \exp^{bx}$	a, b
有理数函数	$f(x) = (ax^2 + bx + c) / (x + d)$	a, b, c, d

利用 MATLAB 对表 4-1 中函数模型拟合, 分析实验结果, 根据 R^2 、 X^2 和均方根误差(RMSE)的值来决定模型拟合度, R^2 越大, X^2 和均方根误差越小, 则模型拟合度越高。使用 EXCEL2017 对数据进行汇总处理。

4.3 小麦微波真空干燥特性分析

4.3.1 干燥温度对小麦干燥的影响

图 4-4 是微波功率 500 W, 真空度-0.08 MPa 时, 干燥温度对小麦微波真空干燥过程中含水率变化的影响。随着干燥时间的延长, 小麦的含水率逐渐降低。干燥温度越高, 含水率曲线的下降幅度越陡峭, 这表明较高温度能显著加快小麦的干燥速率^[88]。随着干燥温度的进一步升高, 相邻温度梯度对干燥时间的影响逐渐减小。当干燥温度从 45 °C 升高到 50 °C 时, 干燥时间减少 15 min; 从 50 °C 升高到 55 °C 时, 干燥时间只减少 10 min。这说明, 提升干燥温度在初期可以显著加快干燥过程, 但随着温度的进一步增加, 提升效果逐渐减弱。在较高温度下, 水分的蒸发速率达到一个临界点, 温度的进一步增加对干燥速率的提升作用变得有限。含水率曲线逐渐趋于平缓, 显示出小麦在单位时间内的干燥速率随着时间的推移而降低。

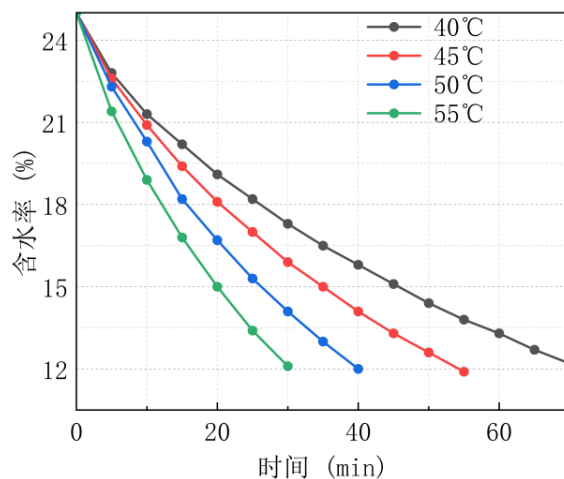


图 4-4 不同温度时小麦含水率与时间的关系

干燥温度与最终含水率及水分活度之间的关系, 如图 4-5 所示。水分活度的变化趋势与最终含水率变化相似, 表明水分活度与小麦的水分含量之间存在较强的相关性。在 50 °C 的干燥温度下, 水分活度的下降幅度相对较小。这主要是因为, 在较低的干燥温度下, 小麦内部的结合水和自由水的蒸发活性较低, 导致水分的去除速度较慢。当干燥温度过高时, 自由水大量蒸发, 结合水会被过度去除, 会影响小

麦的品质和营养成分。因此,在适中的干燥温度下,自由水的蒸发最为活跃,同时结合水保持较好,这能够有效去除过多的自由水而保留适量的结合水^[81]。选择合适的干燥温度可以优化小麦的干燥过程,从而更好地保持其品质和储存质量。

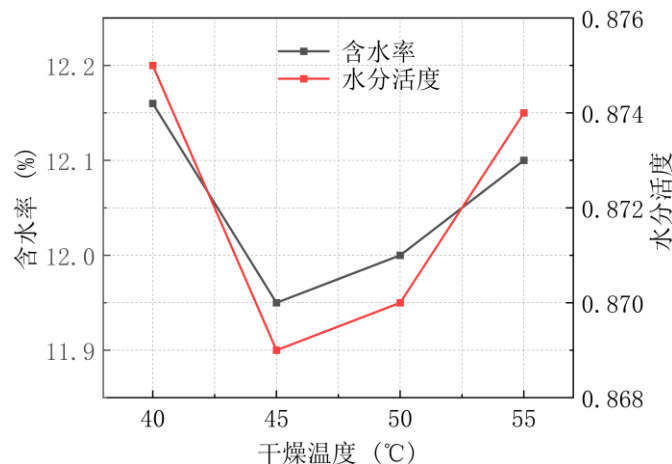


图 4-5 干燥温度与含水率、水分活度的关系

4.3.2 微波功率对小麦微波干燥的影响

图 4-6 是干燥温度 50 °C，真空度-0.08 MPa 时，不同微波功率对小麦微波干燥过程中干燥速率的影响。微波功率的增加能够显著促进物料中水分的扩散和蒸发，从而提高干燥效率。这是因为微波直接作用于水分分子，使其快速升温并转化为蒸汽，加速水分的迁移和蒸发过程。

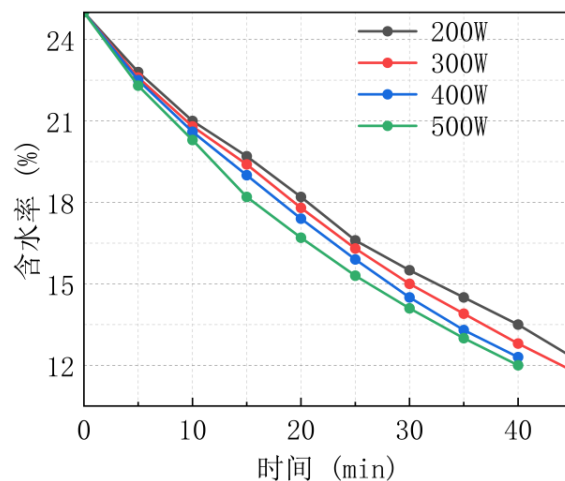


图 4-6 不同功率时小麦含水率与时间的关系

图 4-6 中显示不同微波功率下小麦含水率曲线之间的间距较小,这表明微波功率对微波真空干燥过程干燥速率的影响较小。这一现象的原因主要在于微波真空干燥过程的温度限制。在较高微波功率下,干燥介质的温度迅速升高,会超出设定

的干燥温度范围。为保证干燥质量，微波发射器会自动降低功率或停止运行，从而使干燥介质处于高温的时间变短。较低的微波功率通常能保持介质在设定的干燥温度附近，使温度更为稳定。因此，微波功率对干燥速率的影响在实际干燥过程表现为相对较弱。

图 4-7 是微波功率与小麦最终含水率及水分活度之间的关系。从图中可以看出，水分活度的变化趋势与最终含水率相似，均随着微波功率的降低而减小。这表明，微波功率对水分活度的影响较最终含水率的影响更为显著。是因为在较低的微波功率下，水分的蒸发速率较慢，水分活度的降低更为明显。而在干燥过程结束时，水分活度的变化能够更准确地反映微波功率对干燥效率的影响。适当调整微波功率不仅能够优化干燥过程，还能有效控制小麦的最终水分含量和水分活度，从而保证干燥质量和储存稳定性。

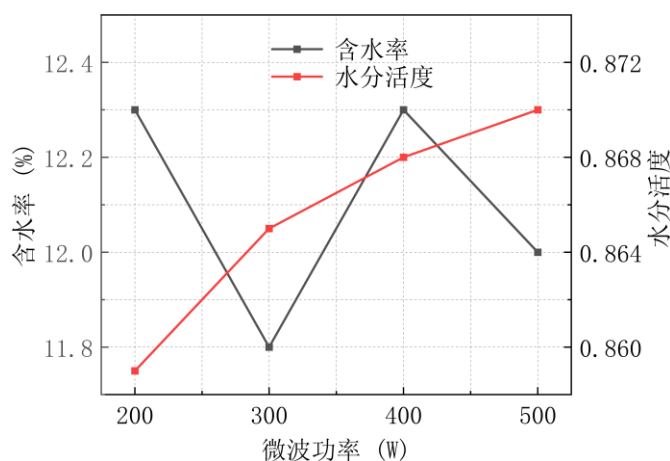


图 4-7 微波功率与含水率、水分活度的关系

4.3.3 真空度对小麦微波干燥的影响

图 4-8 是干燥温度 50°C ，微波功率 200W 时，不同真空度对小麦微波真空干燥过程中干燥速率的影响。提高真空度能显著加快小麦的干燥过程。因为在较高真空度下，空气的相对湿度降低，外界环境与介质内部的水分浓度差异增大。这种浓度梯度使得水分从介质内部向外部的迁移和扩散速率显著提升，加快干燥速率。图 4-8 中显示，不同真空度下的小麦含水率曲线间距随着真空度的增大而逐渐增大，这说明真空度对干燥速率的提升具有明显效果。在较高真空度下，干燥介质中的水分蒸发更加迅速，因为低真空度下的水分迁移动力不足，干燥过程中的水分扩散受限。因此，通过提高真空度可以有效增强干燥过程中的水分迁移，显著提升干燥速

率。

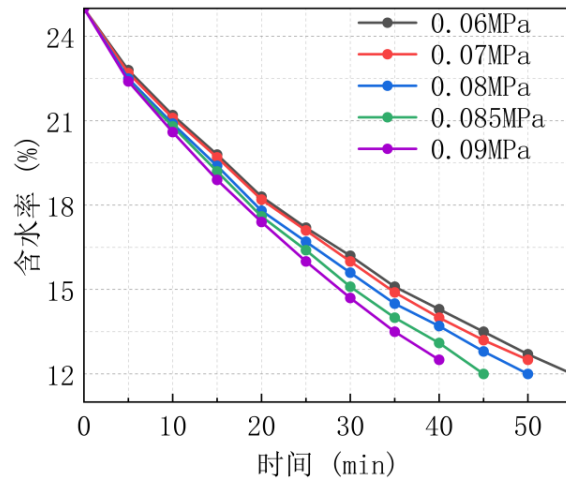


图 4-8 不同真空度时小麦含水率与时间关系

图 4-9 是真空度与小麦最终含水率及水分活度之间的关系。从图 4-9 中可以看出，在其他条件固定的情况下，小麦干燥后的水分活度和最终含水率的变化趋势基本一致。随着真空度的变化，小麦的最终含水率和水分活度的变化幅度较小，说明真空度对这两个指标的影响相对有限。水分活度与真空度的变化并未表现出明显的规律性。这是由于水分活度和最终含水率受干燥过程中综合因素的影响较大，包括干燥温度、微波功率以及时间等，而真空度的变化对这些指标的影响在特定条件下可能较为平稳。

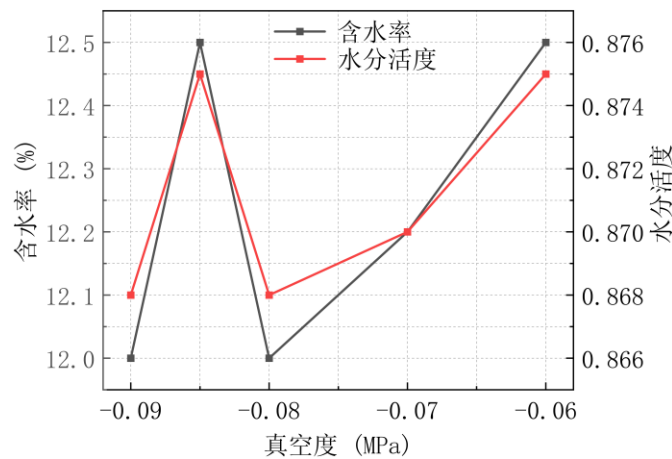


图 4-9 真空度与含水率、水分活度的关系

4.4 小麦水分扩散系数拟合分析

为了分析不同干燥温度、微波功率和真空度对小麦水分扩散系数的影响，对表 4-1 中的数学函数模型进行了拟合。通过对实验数据的拟合分析，如表 4-2 所示，

有理数模型在所有拟合中表现出较高的精度和适用性。

表 4-2 小麦水分扩散系数拟合结果

拟合对象	模型名称	模型参数	X^2	R^2	RMSE
干燥温度	线性函数	$a = 7.055 \times 10^{-9}$	9.2433×10^{-17}	0.9854	6.7983×10^{-9}
		$b = -2.092 \times 10^{-7}$			
	指数函数	$a = 7.645 \times 10^{-9}$	2.7643×10^{-18}	0.9996	1.1757×10^{-9}
		$b = 0.05723$			
	有理数函数	$a = 1.42 \times 10^{-8}$	4.7392×10^{-18}	0.9992	0
		$b = -8.786 \times 10^{-7}$			
		$c = 1.557 \times 10^{-5}$			
		$d = 0.8396$			
微波功率	线性函数	$a = 2.73 \times 10^{-11}$	3.0744×10^{-18}	0.9238	0.0124
		$b = 1.204 \times 10^{-7}$			
	指数函数	$a = 1.212 \times 10^{-7}$	3.3551×10^{-18}	0.9168	0.0128
		$b = 0.0001986$			
	有理数函数	$a = 0$	1.297×10^{-19}	0.9868	3.601×10^{-10}
		$b = 1.389 \times 10^{-7}$			
		$c = -2.777 \times 10^{-6}$			
		$d = 0.05991$			
真空度	线性函数	$a = -9.281 \times 10^{-7}$	6.9873×10^{-17}	0.8773	4.8261×10^{-9}
		$b = 4.221 \times 10^{-8}$			
	指数函数	$a = 5.191 \times 10^{-8}$	7.3306×10^{-17}	0.8713	4.9432×10^{-9}
		$b = -10.08$			
	有理数函数	$a = 0$	2.968×10^{-17}	0.9479	3.852×10^{-9}
		$b = 8.796 \times 10^{-8}$			
		$c = 9.485 \times 10^{-9}$			
		$d = 0.1016$			

4.4.1 模型选用与拟合

表 4-2 的数据中有理数模型对实验数据的拟合度较高。其中 R^2 均大于 0.94(最大值为 0.9992)，说明有理数模型能够很好地捕捉到实际数据的变化趋势，提供了准确的拟合结果。有理数模型的均方根误差 (RMSE) 值均为最小，进一步验证模型在数据拟合中的精确性。在对于干燥温度的拟合结果中，指数函数模型的拟合效果略优于有理数模型，但在微波功率和真空度的拟合中，有理数模型的表现明显优于

指数函数模型，这表明有理数模型在多种工艺参数下具有更好的适应性和稳定性。综合考虑，但有理数函数模型在对各种工艺参数的拟合中表现最为出色，适应性最佳。因此，有理数函数模型对小麦水分扩散系数的拟合效果最优。

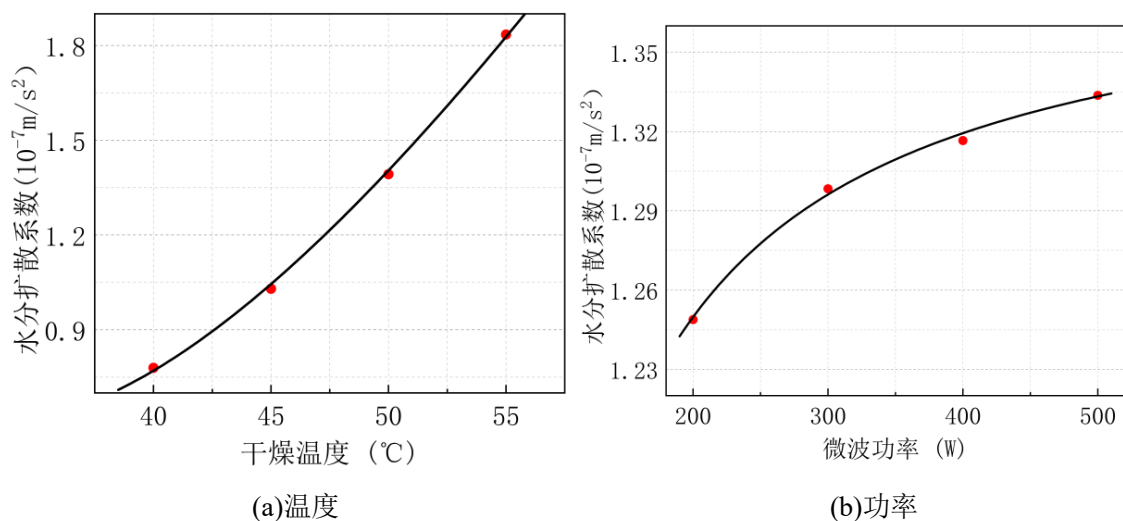
4.4.2 工艺参数对水分扩散系数的影响

各工艺参数对小麦水分扩散系数的影响如图 4-10 所示。

图 4-10(a)是在固定微波功率（500 W）和真空度（-0.08 MPa）条件下，干燥温度与水分扩散系数的关系。随着干燥温度的升高，水分扩散系数显著增大。较高的温度能够加快干燥过程，提升水分在小麦中的迁移速度，从而增强水分扩散系数。这种正相关性表明，提高干燥温度能够有效促进水分的扩散，并且这种影响随着温度的增加而逐渐加剧。说明在干燥工艺中，温度的提升可以显著提升水分扩散性能。

图 4-10(b)是在固定干燥温度（50 °C）和真空度（-0.08 MPa）条件下，微波功率与水分扩散系数的关系。提高微波功率会使干燥介质在单位时间内吸收更多的能量，从而提升水分扩散系数。这种影响受到设定干燥温度和真空度的限制，微波功率的增加，对水分扩散系数的提升效果会逐渐减弱。

图 4-10(c)是在固定干燥温度和微波功率条件下，真空度与水分扩散系数的关系。较高的真空度有助于提高水分扩散系数，进而提高干燥效率。这表明水分扩散系数与真空度呈正相关性（与压力呈负相关性），即真空度的提升会增强水分的扩散能力。随着真空度的增加，这种正相关影响会逐渐加剧，说明真空度越高，对干燥过程的影响越显著，对水分扩散系数的增加越明显。



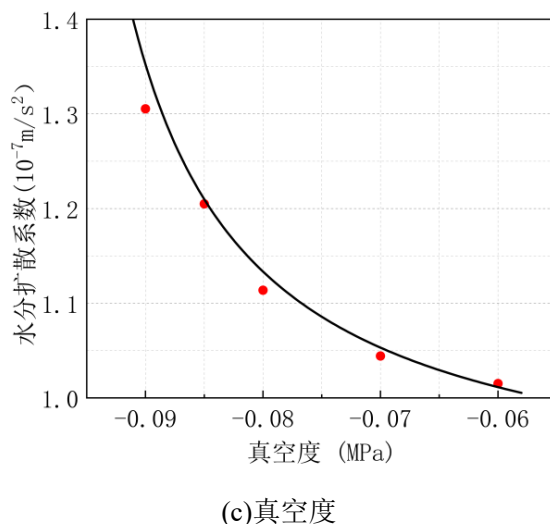


图 4-10 工艺参数对水分扩散系数的影响

4.5 小麦干燥工艺优化

图 4-11 是不同干燥温度、微波功率和真空度对小麦水分扩散系数及爆腰率的影响。

图 4-11(a)是在不同干燥温度下，小麦的水分扩散系数与爆腰率的变化情况。相比于 55 °C，50 °C 的干燥温度下，小麦的爆腰率降低 30%，水分扩散系数降低约 25%。这表明较高的干燥温度虽然可以提高干燥效率，但会显著增加爆腰率，降低干燥品质。与 40 °C 相比，50 °C 的干燥温度下，爆腰率增加 11.6%，水分扩散系数提高 177.6%，这表明较低的干燥温度可以提升干燥品质却会显著降低干燥速率。综合考虑，选择 50 °C 作为干燥温度是更为合适。

图 4-11(b)是不同微波功率下，小麦的爆腰率与水分扩散系数的关系。结果显示，在微波真空干燥过程中，微波功率对小麦的爆腰率和水分扩散系数的影响相对较小。较低的微波功率（200 W）能够获得更低的水分活度和爆腰率，故使用 200 W 作为小麦微波真空干燥的功率，以获得最佳的干燥效果。

图 4-11(c)是不同真空度下，小麦的水分扩散系数与爆腰率的变化。随着真空度的增大，水分扩散系数也相应增加。在实验过程中真空度高于 -0.09 MPa 或低于 -0.07 MPa 时，干燥时会出现较大的噪声。因此，选择 -0.085 MPa 作为小麦微波真空干燥的真空度是较为合适的，这一设定能够减少噪声并在保证干燥效果的同时维持较高的水分扩散系数。

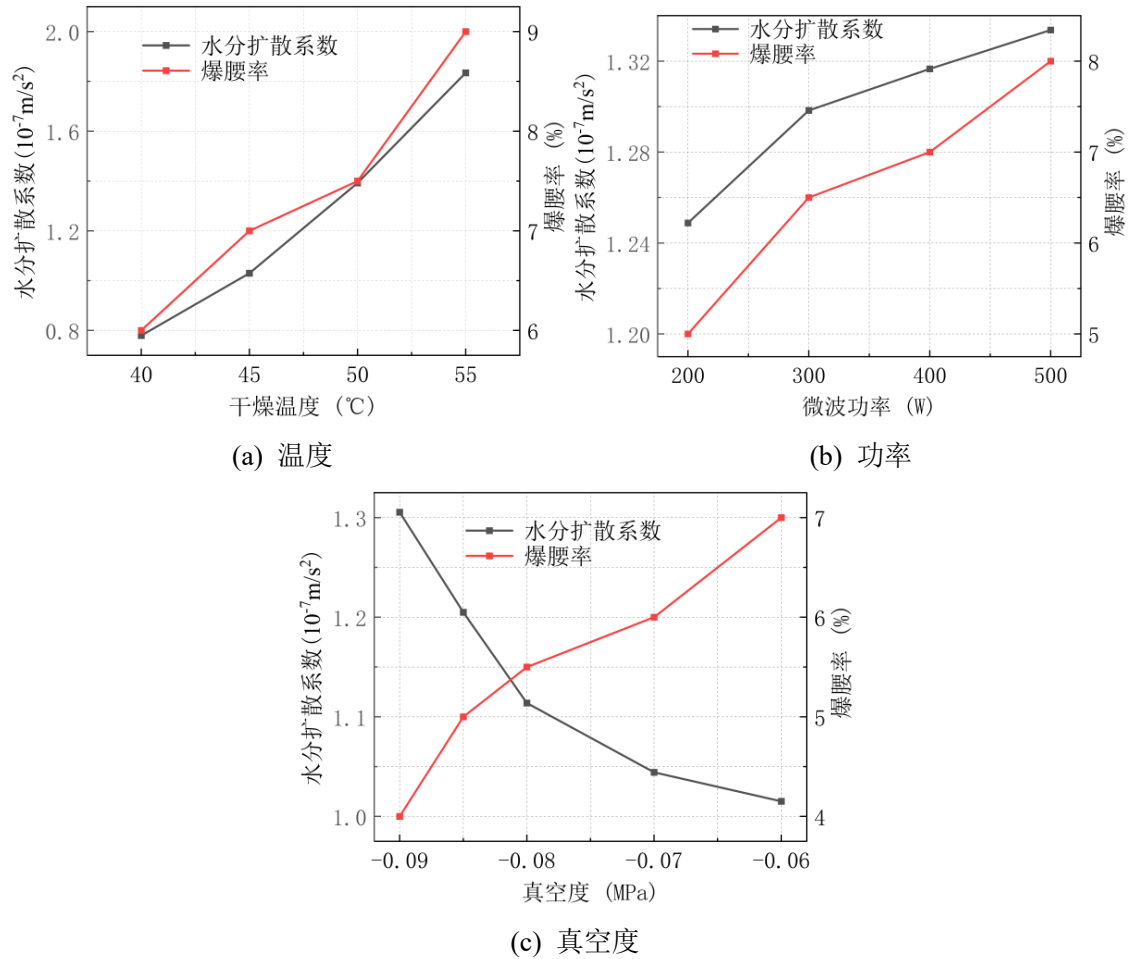


图 4-11 工艺参数对水分扩散系数和爆腰率的影响

4.6 本章小结

本章通过实验结果明确了干燥温度、真空度和微波功率对小麦干燥速率的影响规律，其中干燥温度的影响最为显著，真空度次之，微波功率的影响相对较小，为微波干燥工艺的优化提供了依据。实验确定最佳工艺参数组合（干燥温度 50 °C、微波功率 200 W、真空度 -0.085 MPa），该组合在保证较高干燥速率和产品质量的同时，显著降低干燥过程中的噪音水平，有效提升了工艺的实用性和可操作性。研究水分扩散系数与工艺参数间的变化规律，真空压力与水分扩散系数呈显著负相关，干燥温度和微波功率则与之呈正相关。通过数学模型对水分扩散系数的拟合发现，采用有理数函数模型对水分扩散系数进行拟合，模型拟合度达到 94% 以上，为微波真空干燥过程的理论研究提供了新的方法和数据支持。

第 5 章 小麦微波真空干燥缓苏工艺优化

小麦作为全球重要的粮食作物，其干燥工艺在储存和加工过程中至关重要。传统的热风干燥方法虽然设备简单、成本较低，但存在干燥效率低、能耗高以及易导致小麦品质下降等问题。近年来，微波真空干燥技术因其高效、节能且能够较好地保持物料品质而受到广泛关注。然而，在实际应用中，微波真空干燥过程中小麦内部水分分布不均和热应力积累等问题仍然存在，影响了干燥效果和最终产品品质。缓苏工艺作为一种有效的后处理手段，通过在一定条件下使物料内部水分重新分布并释放热应力，能够显著改善干燥均匀性和品质保持效果。因此，优化微波真空干燥中的缓苏工艺，对于提高干燥效率、降低能耗并保持小麦品质具有重要意义。

本章针对小麦微波真空干燥过程中的缓苏工艺进行优化，旨在通过单因素实验和响应面法（RSM）设计实验，系统研究缓苏时间、缓苏温度及缓苏湿度对干燥效果的影响。结合 NSGA-II（非支配排序遗传算法-II）多目标优化算法，以干燥时间和品质指标（如色泽、爆腰率）为优化目标，寻找最优缓苏工艺参数组合。研究表明，优化后的缓苏工艺能够显著缩短干燥时间、降低能耗，并有效保持小麦的色泽和营养成分。本研究不仅为小麦微波真空干燥工艺的优化提供了科学依据，也为其他谷物干燥工艺的改进提供了参考。

5.1 材料与方法

5.1.1 实验材料

原材料为河南的鲁丰济麦 22 小麦种子，密封环境运输，饱满无损，初始含水率 11.52%。

预处理：筛选出完整饱满小麦；复水处理后静置一段时间并吸干表面水分得到初始含水率 25%（ $\pm 1\%$ ）的小麦。

5.1.2 实验设备

RWBZ-08S 微波真空干燥箱(南京苏恩瑞干燥设备有限公司)、AB204-N 电子分

析天平（梅特勒-托利多仪器上海有限公司）、HS100 烘干法水分测定仪（上海豪晟科学仪器有限公司）等实验仪器。

5.1.3 实验评价指标

爆腰是农产品干燥过程中常见的一种品质劣化现象，其特征表现为物料表面因热力学应力作用而产生微裂纹^[89]。该现象的成因机制可归因于干燥过程中形成的非均匀温度场与湿度场耦合作用，导致物料内部产生显著的热-湿应力梯度。当复合应力超过物料的断裂强度时，即发生裂纹扩展行为。实验数据表明，当干燥强度超过临界阈值时，爆腰发生率呈指数增长，同时干燥效率显著降低^[90-92]。通过引入间歇式缓苏工艺，可建立内部水分再分布平衡时间，使应力松弛率提高，从而有效抑制裂纹萌生。这种优化策略在保证干燥品质的同时，可实现能耗降低，具有显著的工程应用价值。

使用放大镜观察干燥后的小麦，挑出带有裂纹的小麦并称重，以深度裂纹粒重与轻微裂纹粒重之和除以式样总重即为爆腰率，公式为：

$$C_r = \frac{W_1 + W_2}{W} \times 100\% \quad (5-1)$$

式中： C_r 为爆腰率， W_1 重度裂纹样品质量， W_2 为轻微裂纹样品质量， W 为样品总质量。

5.1.4 实验设计

(1) 单因素实验

本章研究旨在探究缓苏工艺对小麦微波真空干燥过程的影响规律。为排除其他变量的干扰，首先需确定适宜的微波功率与真空度参数组合。采用标准烘干法测定小麦初始含水率，通过控制单因素变量的实验设计方法，分别考察微波功率和真空度对干燥特性的影响。对预处理后的小麦进行微波真空干燥处理，测量并记录其含水率和爆腰率的变化，以此确定后续缓苏工艺优化实验的前置条件。实验中，微波功率设置为 200、300、400、500 W 四个梯度，真空度设置为 0.06、0.07、0.08、0.09 MPa 四个梯度。通过系统分析实验数据，为后续进行缓苏干燥工艺的优化提供依据。

(2) 正交实验

采用正交试验设计方法对小麦缓苏干燥工艺进行优化分析。基于 L_9 正交表安排试验方案,选取单次干燥时间、缓苏时长和缓苏次数作为考察因素,每个因素设置 3 个水平。基于响应面三维图解析工艺参数间的交互效应,结合期望函数进行多目标优化,最终确定最优工艺参数组合。该方法可有效揭示工艺参数与品质指标间的非线性关系,为干燥工艺优化提供可靠依据。正交实验因素方案见表 5-1。

表 5-1 正交实验方案

水平	影响因素		
	单次干燥时间	缓苏时长	缓苏次数
1	15	30	1
2	25	40	2
3	35	50	3

5.1.4 分析方法

为了寻找比单因素实验和遗传算法得到更优的工艺参数,使用 NSGA2 算法对实验数据进行分析求解,对微波强度和加热温度两个因素同时优化,寻找最佳的工艺参数。NSGA2 算法优化流程如图 5-1。

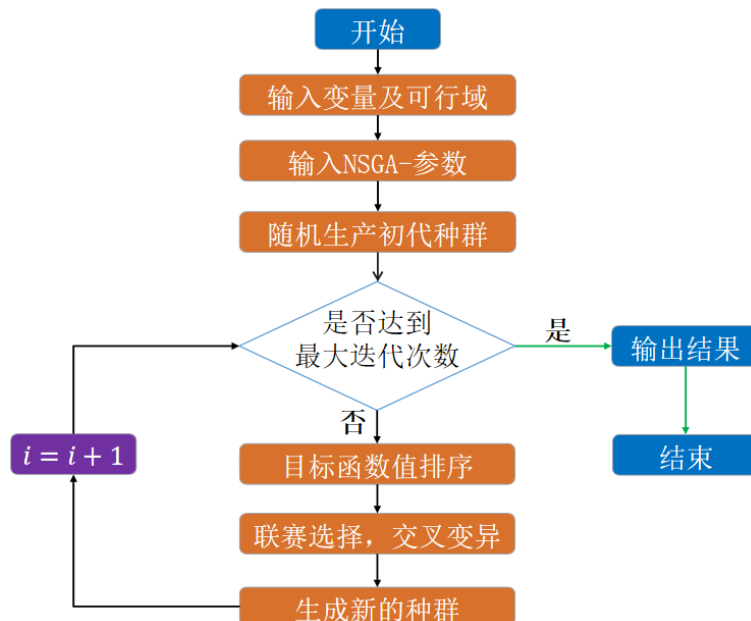


图 5-1 NSGA2 算法流程图

采用改进型 NSGA-II 多目标优化算法对小麦微波干燥工艺参数进行求解分析。在标准算法框架基础上,通过以下两方面进行优化:一是采用基于实验设计的步长约束法生成初始种群,确保解空间均匀分布;二是改进拥挤度计算策略,引入分组占比加权机制。该优化方法可有效提升 Pareto 前沿解的分布均匀性与收敛性,使

获得的工艺参数组合在含水率和爆腰率等关键指标上均显著优于单因素实验结果。经实际验证,优化后的工艺参数在保证干燥品质的同时,可显著提升干燥效率并提升小麦干燥品质。

5.2 微波功率和真空度对小麦干燥过程的影响

5.2.1 微波功率小麦含水率的影响

不同微波功率对小麦微波干燥过程中干燥速率的影响如图 5-2 所示。微波功率的增加能够显著促进物料中水分的扩散和蒸发,从而提高干燥效率。这是因为微波直接作用于水分分子,使其快速升温并转化为蒸汽,加速水分的迁移和蒸发过程。图中显示不同微波功率下小麦含水率曲线之间的间距较小,这表明微波功率对微波真空干燥过程干燥速率的影响较小。这一现象的原因主要在于微波真空干燥过程的温度限制。在较高微波功率下,干燥介质的温度迅速升高,可能会超出设定的干燥温度范围。为保证干燥质量,微波发射器会自动降低功率或停止运行,从而使干燥介质处于高温的时间变短。相比之下,较低的微波功率通常能保持介质在设定的干燥温度附近,使温度更为稳定。因此,微波功率对干燥速率的影响在实际干燥过程表现为相对较弱。

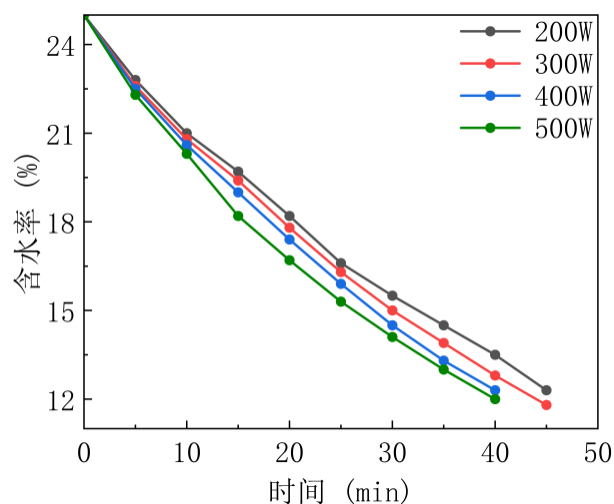


图 5-2 不同功率时小麦含水率与时间的关系

5.2.2 真空度对小麦含水率的影响

干燥温度 50 ℃,微波功率 200 W 时,不同真空度对小麦微波真空干燥过程中

干燥速率的影响如图 5-3 所示。提高真空度能够显著加快小麦的干燥过程。这是因为在较高真空度下，空气的相对湿度降低，外界环境与介质内部的水分浓度差异增大。这种浓度梯度使得水分从介质内部向外部的迁移和扩散速率显著提升，从而加快干燥速率。在图 5-3 中，不同真空度下的小麦含水率曲线间距随着真空度的增大而逐渐增大，这说明真空度对干燥速率的提升具有明显效果。在较高真空度下，干燥介质中的水分蒸发更加迅速，因为低真空度下的水分迁移动力不足，干燥过程中的水分扩散受限。因此，通过提高真空度可以有效增强干燥过程中的水分迁移，显著提升干燥速率。

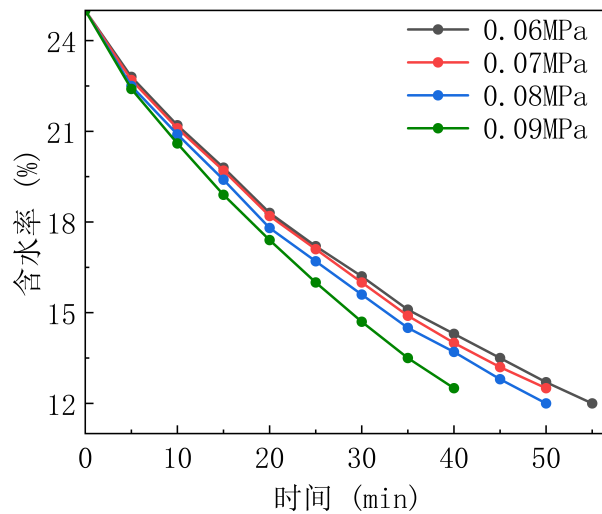


图 5-3 不同真空度时小麦含水率与时间关系

5.2.3 功率和真空度对小麦爆腰率的影响

微波功率和真空度对小麦爆腰率的影响如表 5-2 和表 5-3 所示。微波功率对小麦爆腰率影响较明显，随功率升高，爆腰率逐渐增大，两者成正相关性。0.06 MPa 到 0.09 MPa 四个实验结果中爆腰率接近，说明真空度对小麦爆腰率影响较弱。

表 5-2 不同功率对小麦爆腰率的影响

时间(min)	0	10	20	30	40
200 W	0	2	4	6	8
300 W	0	3	6	8	10
400 W	0	4	7	10	12
500 W	0	4	9	12	13

表 5-3 真空度对小麦爆腰率的影响

时间(min)	0	10	20	30	40
0.06MPa	0	4	10	12	14

续表 5-3

时间(min)	0	10	20	30	40
0.07MPa	0	3	8	10	12
0.08MPa	0	3	7	10	12
0.09MPa	0	3	6	10	13

实验结果表明,微波功率对小麦干燥过程的影响呈现选择性特征。微波功率对物料最终含水率影响较小,但对爆腰率具有显著调控作用。当微波功率超过 400 W 时,爆腰发生率呈现明显上升趋势。相比之下,真空度参数对含水率和爆腰率的影响均不显著。这一现象可能与小麦物料特性和微波作用机理相关因此,为确保缓苏实验的科学性与可靠性,本研究确定在微波功率为 200 W、真空度为 0.08 MPa 的条件下开展后续缓苏工艺实验。这一条件的选择旨在平衡干燥效率与品质控制,为后续优化研究提供稳定的实验基础。

5.3 正交实验结果分析

由表 5-4 可知,在小麦含水率干燥速率的影响因素中,各因素的主次顺序为:缓苏次数、缓苏时长、干燥时间。通过对 A (缓苏次数)、B (缓苏时长)、C (干燥时间)三个因素的最优水平进行筛选,得出仅以干燥速率为优化目标的最佳组合为 A₁、B₂、C₁^[88]。由于干燥时间对干燥速率的影响未达到显著性水平,因此综合考虑干燥效率与工艺可行性,最终确定最佳工艺条件为干燥时间 15 min,缓苏时长 40 min,缓苏次数 1 次。对于小麦干燥过程中的爆腰率,其均值主要集中在 0.070 左右。通过极差分析可知,各影响因素的主次顺序为干燥时间、缓苏时长、缓苏次数,其中单次干燥时间对爆腰率的影响显著高于其他因素^[88]。基于此,以爆腰率为优化目标的最佳组合为 A₁、B₁、C₁。由于缓苏次数对爆腰率的影响未达到显著性水平,因此综合考虑爆腰率控制与工艺可行性,最终确定最佳工艺条件为干燥时间 15 min,缓苏时长 30 min,缓苏次数 2 次。该组合可为降低小麦干燥过程中的爆腰率提供理论支持和实践参考。

表 5-4 小麦正交干燥实验结果

序号	干燥时/min	缓苏时/min	缓苏次数/次	含水率/%	爆腰率/%
1	15	30	1	17.4	8
2	15	40	2	16.8	7
3	15	50	3	15.7	8
4	25	30	2	16.8	9

续表 5-4

序号	干燥时/min	缓苏时/min	缓苏次数/次	含水率/%	爆腰率/%
5	25	40	3	15.6	5
6	25	50	1	16.7	6
7	35	30	3	17.1	3
8	35	40	1	17.8	5
9	35	50	2	15.5	7

5.4 NSGA2 算法寻优求解

在后续研究中,为进一步优化小麦微波真空干燥工艺,本研究将针对缓苏过程中的关键参数——单次干燥时间、缓苏时长及缓苏次数,采用 NSGA-II 算法对实验数据进行多目标优化求解。NSGA-II 算法作为一种高效的多目标优化方法,能够同时考虑干燥效率与品质指标(如含水率与爆腰率),并通过非支配排序与拥挤度计算获得 Pareto 最优解集。通过将 NSGA-II 算法的优化结果与正交实验分析结果进行对比,可综合评估各工艺参数的优劣,从而确定小麦微波真空干燥过程中的全局最优工艺条件。该方法不仅能够提高优化结果的科学性与可靠性,还可为干燥工艺的进一步改进提供理论依据和数据支持。

5.4.1 NSGA2 遗传算法

NSGA-II(非支配排序遗传算法 II)作为一种高效的多目标优化算法,为解决复杂优化问题提供了新的思路与方法。该算法通过模拟生物进化过程中的遗传与变异机制,对种群进行演化操作,从而在搜索空间中寻找最优解集。其核心优势在于能够有效处理多目标优化问题,并通过非支配排序与拥挤度计算生成 Pareto 前沿,即一组在多个目标之间达到最优权衡的解集。在工程实践中,NSGA-II 因其优异的收敛速度与鲁棒性,已被广泛应用于各类优化问题,例如在间歇采油制度优化中,该算法可用于在设计域中寻找最优妥协解(Pareto 前沿),并进一步确定抽油机的最佳工作制度。NSGA-II 的成功应用为多目标优化问题的求解提供了强有力的工具,同时也为工程优化领域的发展奠定了重要基础。

5.4.2 改进初始种群生成方式

本次的实验对象是小麦微波干燥实验参数,数据具有一定的局限性,NSGA2 遗传算法基础的种群是直接使用随机数生成,这样的种群不符合实际的设置。为了

使优化结果更加可靠，对随机数进行步长限定，使每一个个体都符合实际的取值。
改进后的种群生成程序如下：

```
len=(varmax - varmin)./step;
var=[varmin;step;varmax;round(len,0)];
for i=1:npop
    pop(i).position=create_x(var);
end
function x=create_x(var)
n=size(var,2);
x=zeros(1,n);
for i=1:n
    x(i)=var(1,i)+randi([0,var(4,i)],1)*var(2,i);
end
End
```

比较改进算法与原始算法种群生成位置，由结果判断，原始算法种群大部分个体不符合实际取值，使用改进后的种群生成方法可获得更可靠的优化结果，能够找更贴合实际的优化工艺参数。

5.4.3 改进拥挤度计算

NSGA-II 算法通过计算拥挤度来维持种群的多样性，其中拥挤度定义为种群中某个体在目标空间中相邻个体之间的密度。当优化问题涉及不同量纲的目标值时，传统的拥挤度计算方法会导致算法性能下降，甚至出现优秀个体被淘汰而劣势个体被保留的现象。为解决这一问题，本研究采用一种改进的拥挤度计算模型，通过对目标值进行归一化处理，消除量纲差异对计算结果的影响。具体公式如下^[93]：

$$d = \frac{|x_k^{m+1} - x_k^{m-1}|}{|x_1 - x_{\text{end}}|} + \frac{|y_k^{m+1} - y_k^{m-1}|}{|y_1 - y_{\text{end}}|} \quad (5-2)$$

式中， x_k^{m+1} 、 x_k^{m-1} 和 y_k^{m+1} 、 y_k^{m-1} 分别表示个体 $m+1$ 、 $m-1$ 对目标排序第 k 个子目标上的横纵目标函数值。

5.4.4 算法模型

由于小麦干燥过程中多个实验指标（如单次干燥时间、缓苏时长、缓苏次数）

与目标值（含水率与爆腰率）之间的关系复杂且难以直接确定，因此需要构建拟合函数以描述其内在关系。基于实验数据的分析，发现小麦干燥结果较好地符合二次多项式曲线的特征，因此本研究以单次干燥时间(x_1)，缓苏时长(x_2)及缓苏次数(x_3)作为自变量，以最终含水率与爆腰率作为因变量，构建如下所示的二次多项式数学模型^[93]：

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 \quad (5-3)$$

由于小麦干燥过程中各参数之间存在复杂的交互作用，直接求解模型可能导致最优解的误差较大。为避免结果溢出并提高模型的准确性，本研究针对实验条件进行进一步优化。设置小麦的初始含水率为 25%，并对模型结果施加阈值约束条件，以确保优化结果的合理性与实用性。约束条件如下：

$$\begin{cases} a_0 = 0.25 \\ 0 < y < 0.25 \end{cases} \quad (5-4)$$

对于不满足约束条件结果实施惩罚机制，给予极大的目标函数值并剔除。根据最小二乘法逐步迭代寻优，计算多次，最终选取含水率与实验指标模型方程为^[94]：

$$y = 25 - 0.025x_1 - 0.0018x_2 - 0.032x_3 + 0.001x_1x_2 + 0.002x_1x_3 + 0.003x_2x_3 + 0.0001x_1^2 + 0.0002x_2^2 + 0.0003x_3^2 \quad (5-5)$$

依据小麦初始与最终的爆腰率计算结果，对初始模型进行优化，对改进算法计算结果设置阈值约束条件^[95]：

$$\begin{cases} a_0 = 0 \\ y > 0 \end{cases} \quad (5-6)$$

对于不满足约束条件结果同样实施惩罚机制，给予极大的目标函数值并作剔除处理。最终获得爆腰率与实验指标模型方程为^[96]：

$$y = 0.05x_1 - 0.08x_2 - 0.25x_3 + 0.015x_1x_2 + 0.01x_1x_3 + 0.002x_2x_3 + 0.0008x_1^2 + 0.0004x_2^2 + 0.0015x_3^2 \quad (5-7)$$

5.4.5 算法寻优

(1)多目标优化问题描述

本研究的目标是通过优化单次干燥时间 x_1 、缓苏时长 x_2 和缓苏次数 x_3 同时最小化含水率 y_1 和爆腰率 y_2 优化问题的数学模型如公式(5-3)至(5-7)。

(2)NSGA-II 算法简介

NSGA-II（非支配排序遗传算法-II）是一种经典的多目标优化算法，适用于解决具有多个冲突目标的优化问题。其核心思想是通过非支配排序和拥挤度计算，生成一组 Pareto 最优解集，这些解在目标函数之间实现了最佳权衡。NSGA-II 的主要步骤包括。初始化种群，随机生成初始种群。非支配排序，将种群中的个体按支配关系分层。拥挤度计算，计算个体在目标空间中的分布密度。选择、交叉与变异：通过遗传操作生成新一代种群。迭代与终止，重复上述步骤，直到达到预设的迭代次数或收敛条件。

(3)优化结果

通过 NSGA-II 算法，得到了 Pareto 最优解集和其对应的目标函数值。表 5-5 是部分 Pareto 最优解。分析不同缓苏工艺参数对小麦干燥效果的影响，发现干燥时长、缓苏时长及缓苏次数与含水率及爆腰率之间的内在规律。实验结果表明，当工艺参数为干燥时长 25 min、缓苏时长 50 min、缓苏次数 1 次时，干燥结果的含水率与爆腰率呈现均衡状态，表明该条件在干燥效率与品质控制之间实现较好平衡；当工艺参数为干燥时长 35 min、缓苏时长 30 min、缓苏次数 3 次时，爆腰率显著降低，但含水率相对较高，适用于对裂纹抑制要求较高的场景；当工艺参数为干燥时长 35 min、缓苏时长 50 min、缓苏次数 2 次时，含水率降至最低，但爆腰率相对较高，适用于对水分含量要求严格的场景。

表 5-5 算法寻优解集

序号	干燥时间/min	缓苏时长/min	缓苏次数/次	含水率/%	爆腰率/%
1	25	50	1	16.7	6
2	35	30	3	17.1	3
3	35	50	2	15.5	6

5.5 结果与分析

利用 MATLAB 对小麦正交实验结果进行响应面分析，研究单次干燥时间和缓苏时长对干燥结果（含水率和爆腰率）的影响。通过公式(5-3)和(5-5)的数学模型并绘制响应面图，分析工艺参数与干燥结果之间的非线性关系，优化干燥工艺参数。

5.5.1 单次干燥时长与缓苏时长对干燥结果的影响

通过对干燥结果使用算法求解得到不同干燥时间与缓苏时长对小麦含水率与

爆腰率影响结果如图 5-4 所示，揭示了单次干燥时间与缓苏时长对小麦干燥特性的协同影响机制。缓苏时长设定为 30 min 至 50 min，单次干燥时间设定为 15 min 至 35 min，其余参数保持不变。研究结果表明，这两个关键工艺参数对物料最终含水率及爆腰率均产生显著的交互效应。

图 5-4 (a)表明，单次干燥时间与缓苏时长对最终含水率具有显著的交互作用。缓苏时长表现出明显的阈值效应。当缓苏时长超过 40 min 时，含水率随单次干燥时间延长呈现非线性变化特征，这种动力学行为可能与物料内部水分迁移机制的转变有关。，在中等干燥时间条件下，含水率对缓苏时长的响应呈现典型的抛物线特征。此外，当单次干燥时间为 30 min 时，最终含水率随缓苏时长的延长呈现先降后升的变化规律。

图 5-4 (b)显示，单次干燥时间与缓苏时长对最终爆腰率的影响同样显著。在缓苏时长固定的条件下，随着单次干燥时间从 15 min 增至 35 min，最终爆腰率呈现先升后降的趋势，峰值出现在 25 min 附近（约 7%）。当单次干燥时间为 35 min 时，最终爆腰率随缓苏时长的延长逐渐降低，并在（50 min, 35 min）处达到最低值，表明此时干燥品质最优；而在（30 min, 25 min）处，最终爆腰率达到最高值，表明干燥品质最差。

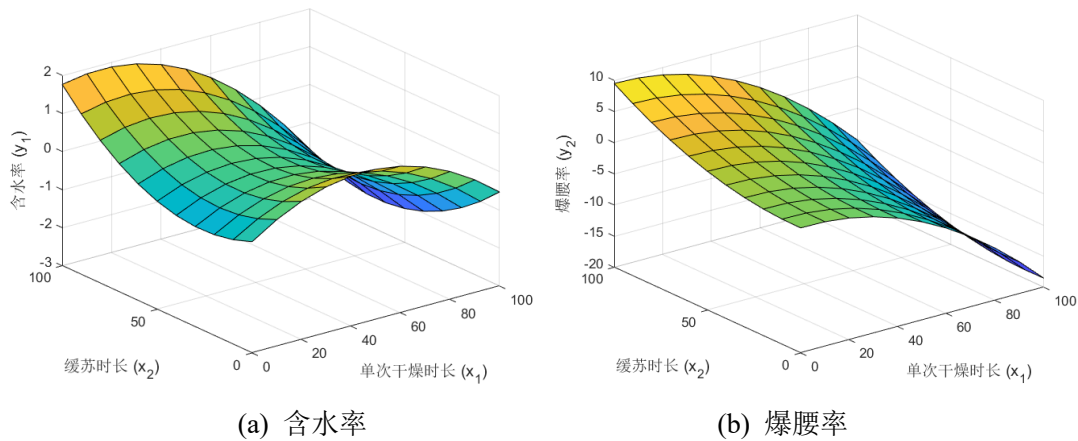


图 5-4 含水率和爆腰率随单次干燥时长与缓苏时长变化关系

综上所述可知，通过精确调控单次干燥时间与缓苏时长的组合，可以实现干燥效率与产品品质的协同优化，可有效提升小麦干燥效率与品质。

5.5.2 单次干燥时长与缓苏次对干燥结果的影响

通过对干燥结果使用算法求解得到不同干燥时间与缓苏次数对小麦含水率与

爆腰率影响结果如图 5-5 所示,揭示了单次干燥时间与缓苏次数对小麦干燥特性的耦合作用机制。研究结果表明,这两个工艺参数对物料含水率及爆腰率均产生显著的交互影响。

图 5-5(a)显示,在固定缓苏时长条件下,单次干燥时间与缓苏次数对物料最终含水率产生显著影响。研究显示,当单次干燥时间为中间值时,配合较高缓苏次数会导致含水率达到峰值,表明存在参数协同效应。随着缓苏次数减少,含水率呈现下降趋势,揭示了缓苏频率对干燥效率的调控作用。进在特定缓苏次数下,含水率随单次干燥时间延长呈现先上升后下降的非线性变化规律。这种变化特征反映干燥过程中不同阶段的主导机制转换,初期含水率上升可能与水分迁移速率变化相关,而后期下降则体现了干燥机制的转变。研究结果证实,单次干燥时间与缓苏次数之间存在复杂的交互作用,这种相互作用通过影响物料内部水分迁移过程,最终表现为含水率的非线性响应。该发现为理解间歇干燥动力学提供了重要依据。

图 5-5(b)表明,单次干燥时间与缓苏次数对物料爆腰率的调控呈现显著的非线性耦合特征。研究显示,在中等缓苏次数条件下,爆腰率随单次干燥时间变化呈现峰形响应曲线,其中间值区域(25 min)出现明显的品质劣变峰,而两端区域(15 min 和 35min)则保持相对稳定的低爆腰率。在较低单次干燥时间条件下,增加缓苏次数可有效抑制爆腰现象。表明通过优化缓苏工艺参数可以调控物料内部的热应力累积与释放过程,从而改善最终产品品质。研究结果证实,爆腰率的形成不仅取决于单一工艺参数,更受到参数间协同作用的显著影响增加缓苏次数可显著降低爆腰率。

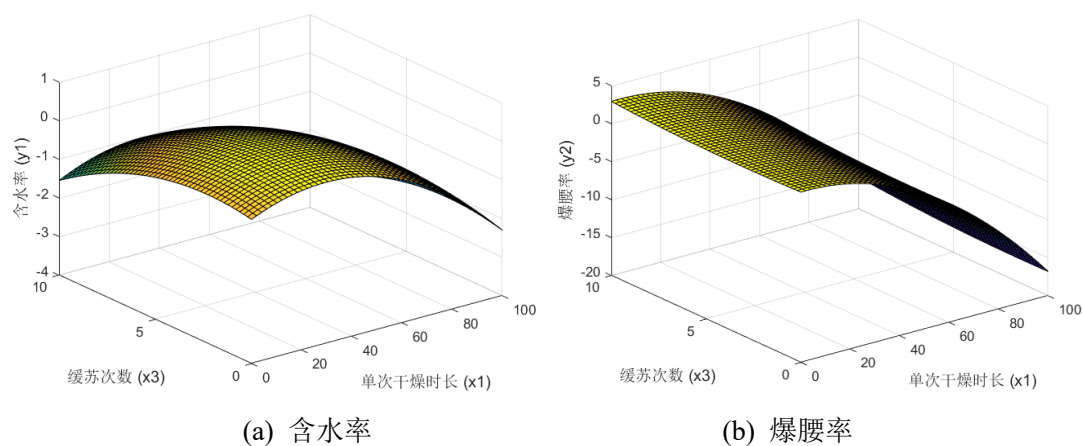


图 5-5 含水率和爆腰率随单次干燥时长与缓苏次数变化关系

实验结果表明,单次干燥时间与缓苏次数之间存在显著的交互作用,二者共同

影响小麦的干燥效率与爆腰率。在优化干燥工艺时，需综合考虑单次干燥时间与缓苏次数的合理配置，以实现高效干燥的同时有效控制爆腰率，从而提升小麦干燥品质。

5.5.3 单次干燥时长与缓苏次对干燥结果的影响

通过对干燥结果使用算法求解得到不同缓苏时长与缓苏次数对小麦含水率与爆腰率影响结果如图 5-6 所示，揭示了不同缓苏参数（缓苏次数与缓苏时长）对小麦干燥过程中最终含水率与爆腰率的影响规律。

图 5-6 (a)表明，缓苏工艺参数对物料脱水特性的非线性调控规律。通过系统分析发现，缓苏时长与次数对含水率的影响呈现显著的双因素交互效应。在 30 min 缓苏条件下，增加缓苏次数显著改善脱水效率，表明此时水分迁移机制占主导；当缓苏时长增至 50 min 时，缓苏次数增加反而降低效率，提示可能存在水分重吸收现象。固定缓苏次数时，含水率随缓苏时长的变化呈现典型的最小值特征，这种非线性关系揭示缓苏时长在 30-40 min 时内部水分梯度驱动效应显著；缓苏时长在 40-50 min 时过度缓苏导致效率下降。

图 5-6 (b)进一步分析缓苏参数对爆腰率的影响。在低缓苏次数条件下（1 次），缓苏时长的增加可显著抑制爆腰现象，表明此时应力松弛机制起主导作用；当缓苏次数增至 3 次时，缓苏时长的调节效应减弱，表明可能存在应力释放饱和现象。短缓苏时长（30 min）时，爆腰率随缓苏次数增加单调递减，显示累积缓苏效应；长缓苏时长（50 min）时，爆腰率呈现非单调变化，在中等缓苏次数（2 次）时出现极值。

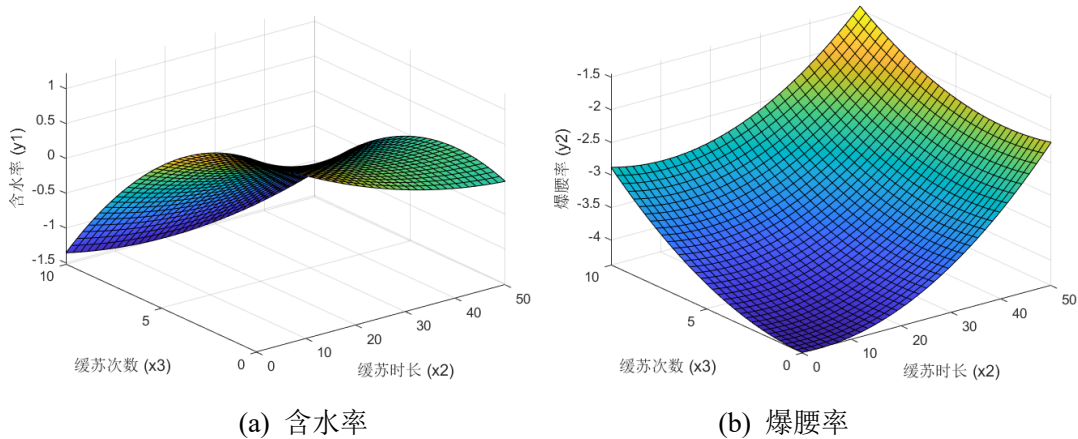


图 5-6 含水率和爆腰率随缓苏时长与缓苏次数变化关系

上述结果表明，缓苏时长与次数对小麦干燥过程中的含水率与爆腰率具有显著影响。在实际应用中，需根据具体目标（如降低含水率或控制爆腰率）合理优化缓苏参数，以实现干燥效率与品质的最佳平衡。

5.6 本章小结

基于本章的实验研究与数据分析，可得出以下主要结论：

(1)小麦微波干燥过程中，不同缓苏条件对干燥特性指标具有显著影响，且各参数间存在复杂的交互作用。研究表明，单纯增加缓苏时长、缓苏次数或减少单次干燥时间并不能确保获得最优干燥效果。通过系统优化分析发现，当采用单次干燥 35 min、缓苏 50 min、缓苏 3 次的工艺参数时，可获得最佳的干燥效率；而采用单次干燥 15 min、缓苏 30 min、缓苏 2 次的工艺参数时，则可实现最低的爆腰率。

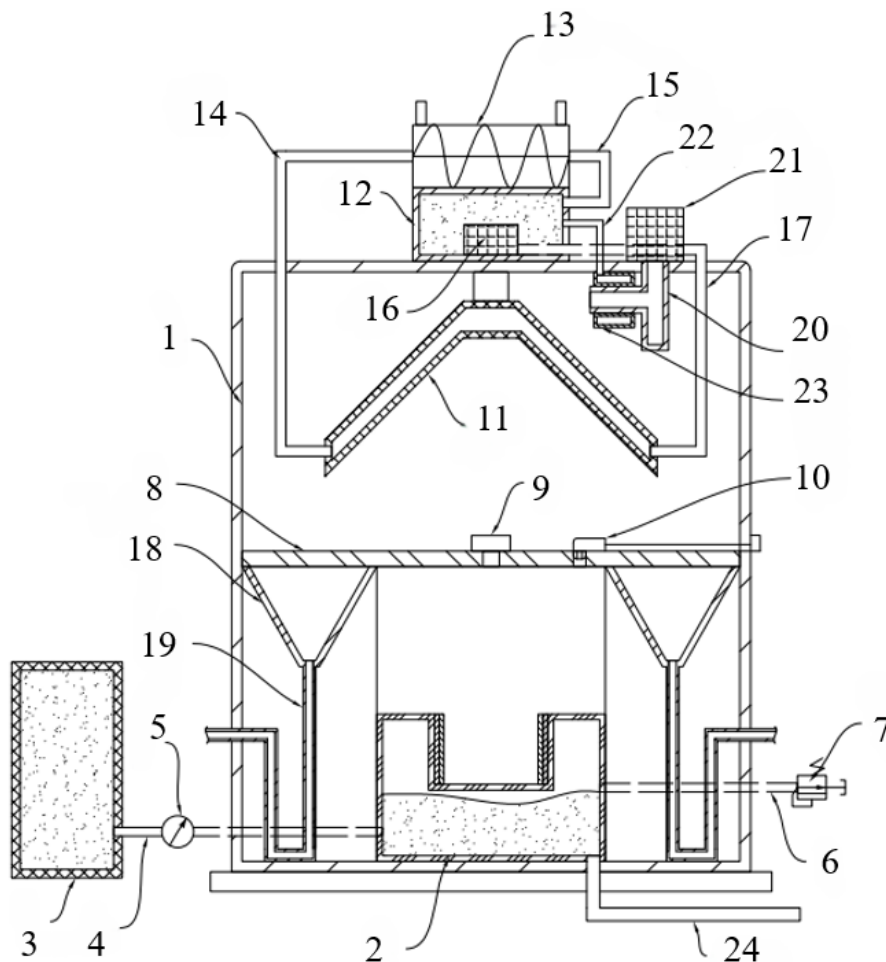
(2)通过对比改进算法与正交实验的结果，发现改进算法所获得的工艺参数在提升小麦干燥效率和品质方面具有显著优势。这一发现验证改进算法在小麦干燥工艺优化研究中的可行性，为农产品干燥优化提供了新的技术路径，对农产品深加工具有指导意义。

第 6 章 微波真空干燥装置优化

微波加热技术在物料处理过程中具有显著优势，其特点是可实现物料的整体均匀加热，理论上温差极小^[97]。然而，在极端低温环境条件下，如冬季室内外均处于零下温度时，物料表面的热力学特性会发生显著变化，导致冷凝水的生成。这种现象可以通过引入附加温度场来优化，具体实施方案之一是采用微波散射托盘对物料表面进行辅助加热，这种协同作用可有效提升干燥品质。在干燥工艺的实施过程中，通过设置顶棚结构，可实现对装置内部蒸汽的高效冷凝，并通过专门设计的冷凝水排出机构将冷凝介质移出干燥箱体。这种系统性设计显著降低了干燥箱体内部的水蒸气浓度，从而达到优化微波真空干燥装置整体性能的目的。

6.1 整体结构设计

本研究设计并集成了微波真空干燥装置的关键功能组件，其系统架构如图 6-1 所示。装置采用模块化设计理念，其中托盘系统由特制硼硅酸盐玻璃缸构成，内部设置精密加工的凹槽及可拆卸式隔离护板结构，确保物料定位的准确性与可重复性。流体控制系统通过高精度流量计与第一水箱形成闭环连接，实现供给流体的定量调节；配套的溢流管和电磁式溢流阀组件构成双重保护机制，有效维持系统流体动态平衡。干燥箱内部集成多功能横架结构，该结构采用 316L 不锈钢材质，不仅作为微波发射器的物理支撑，同时整合了温度检测功能模块。横架上布置的温度传感器阵列实时采集空间温度场数据，并通过 PLC 控制系统基于改进型模糊 PID 算法实现微波功率的闭环调节，确保干燥过程的温度稳定性。热交换系统采用 V 形顶棚设计，通过优化设计的循环管路与第二水箱、板式冷凝器构成完整的水冷循环回路，系统通过变频水泵实现循环速率的无级调节，在保证冷凝效率的同时降低能耗。真空系统配置双级旋片式真空泵，其进气端经铜质冷却筒实现气体预冷处理，真空度通过压阻式传感器实时监测。这种集成化设计方案在保证系统可靠性的同时，提升了装置的干燥效率与工艺可控性，为后续工艺优化研究提供了可靠的实验平台。



1-干燥箱 2-托盘 201-放置凹槽 202-隔离护板 3-第一水箱 4-第一连接管 5-流量计 6-溢流管 7-溢流阀 8-横架 9-微波发射器 10-温度检测机构 11-顶棚 12-第二水箱 13-冷凝器 14-第一循环管 15-第二循环管 16-水泵 17-第三循环管 18-收集漏斗 19-虹吸管 20-排气管 21-真空泵 22-进水管 23-冷却筒 24-排水管

图 6-1 微波真空干燥装置整体结构

6.2 主要结构设计

为优化微波真空干燥装置的性能，本研究设计并集成了以下关键组件：托盘及其供给与保护装置、顶棚及其冷凝装置，以及冷凝水排出装置。具体结构阐述如下：

(1) 托盘系统

托盘采用玻璃缸结构，内部设置凹槽，并在凹槽两侧壁安装隔离护板，以实现物料的定向定位。托盘外部连接第一水箱，通过带流量计的第一连接管与托盘连通，确保流体供给的精确控制。托盘侧端设有溢流管连接至排水管，并在连接处配置溢流阀，完成流体排出及对托盘结构的保护功能。

(2)横架与温度控制

在干燥箱内部，设计并安装一种横架结构，该横架与微波发射器实现物理连接，构成一个集加热与检测功能于一体的多功能单元。横架上集成高精度温度传感装置，用于实时监测托盘及其周边干燥环境的温度分布。这种集成化设计不仅优化温度检测的空间布局，还为温度调控系统提供高可靠性的数据来源。温度传感装置采集的实时温度数据通过高保真信号传输线路传输至可编程逻辑控制器（PLC）控制系统。PLC 基于预设的干燥温度设定值，结合实时温度反馈信号，采用先进的控制算法（如比例-积分-微分控制，PID）对微波发射器的输出功率进行动态调节。通过这种闭环反馈控制机制，系统能够实现干燥箱内温度的精确控制，确保干燥过程始终维持在恒温状态，从而提高干燥效率并保证产品质量的一致性。

(3)水汽处理系统

横架上方安装 V 形顶棚，其开口朝下并设有内腔。顶棚与干燥箱上侧的第二水箱通过第一、第二循环管及冷凝器相连，形成水冷循环系统。循环管中配置水泵，用于调节水冷循环速度，确保冷凝效率。顶棚下方两侧安装冷凝水排出机构，包括收集漏斗和虹吸管。收集漏斗与虹吸管连通，虹吸管另一端延伸至干燥箱外，利用液位压力差维持装置内部真空度并实现冷凝水的排出。水汽处理装置如图 6-2 所示。

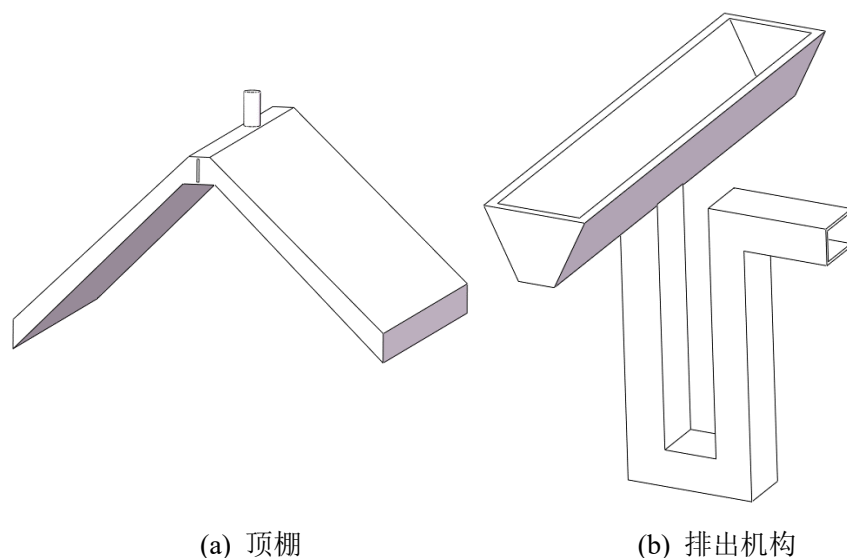


图 6-2 水汽处理装置三维结构

(4)真空系统与气体冷却

干燥箱上安装真空泵，真空泵的进气端通过排气管与干燥箱连通。排气管外部

设置冷却筒，冷却筒通过进水管与第二水箱相连，对真空泵吸入的气体进行冷却处理，进一步提升系统效率。

干燥装置腔体尺寸与实验室使用的 RWBZ-08S 微波真空干燥箱一致，不考虑外部结构，腔体长和宽为 320 mm×340 mm。顶棚总高 170 mm，两侧高 20 mm，棚顶宽 40 mm，壁厚 2 mm。以 ASTM A106 Gr. B 碳钢作为顶棚材料。其密度为 7.85 g/cm³，具有成本低，强度高，导热性和加工性好等优点。螺栓使用型号为 ASTM A307 的低碳钢。

(1)顶棚质量计算

V 形顶棚的外壳重量计算需考虑其材料密度、几何尺寸及结构设计。假设顶棚外壳由均匀材料制成，其重量为：

$$W_{\text{外}} = \rho_{\text{外}} \times V_{\text{外}} \quad (6-1)$$

式中， $W_{\text{外}} \approx 8470\text{g}$ 为顶棚质量， $\rho_{\text{外}}$ 为 7.85 g/cm³。

顶棚总质量为低碳钢材质的外壳和内部的冷凝水组成，其质量为：

$$W = W_{\text{外}} + W_{\text{水}} \quad (6-2)$$

式中，顶棚总质量 $W = 10262\text{g}$ 。

(2)确定顶端连接荷载

螺栓承受的总载荷 F 包括顶棚重量 W 及安全系数 K 的影响^[98]。

$$F = K \times W \times G \quad (6-3)$$

式中，螺栓承受的总载荷 $F = 150851.4\text{N}$ ， K 取值为 1.5。

(3)确定螺栓材料属性

根据螺栓材料的屈服强度 σ_y 和抗拉强度 σ_u ，确定螺栓的许用应力 σ_{allow} ^[98]：

$$\sigma_{\text{allow}} = \frac{\sigma_y}{n} \quad (6-4)$$

式中，屈服强度 $\sigma_y = 414\text{ MPa}$ ，抗拉强度 $\sigma_u = 248\text{ MPa}$ ， n 为安全系数取值为 2。

(4)螺栓直径计算

根据计算的许用应力 σ_{allow} 计算螺栓直径 d ^[99]：

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi \times \sigma_{\text{allow}}}} \quad (6-5)$$

根据计算结果，螺栓的最小直径 d 为 27.88 mm。查阅标准螺栓规格表，可选

择 M30 螺栓（公称直径 30 mm），以满足强度要求。

6.3 控制系统设计

6.3.1 系统组成

该系统由温度传感器、可编程逻辑控制器（PLC）、微波发生器及执行机构四部分构成，各组件协同工作以实现干燥过程的精确控制。温度传感器作为系统的感知单元，基于热电效应将干燥室内的温度变化转换为电信号，为后续控制提供实时数据支持。PLC 作为核心控制单元，通过输入模块接收温度传感器的模拟数字信号，并利用中央处理单元（CPU）进行数据处理与逻辑运算。基于预设的控制算法（PID 控制），PLC 生成控制信号，通过输出模块驱动执行机构，实现对系统的精确调控。微波发生器作为能量转换装置，其核心部件包括磁控管和高压电源，负责将电能转换为微波能量，用于干燥室内的物料加热。PLC 通过调节微波发生器的开关状态及输出功率，确保干燥过程的高效性与均匀性。执行机构作为终端控制元件，将 PLC 输出的控制信号转换为物理动作，驱动微波发生器的启动与停止。执行机构为固态继电器，利用半导体器件实现无触点开关，具有响应速度快、寿命长及抗干扰能力强的优势^[93]。系统流程图如图 6-3 所示。

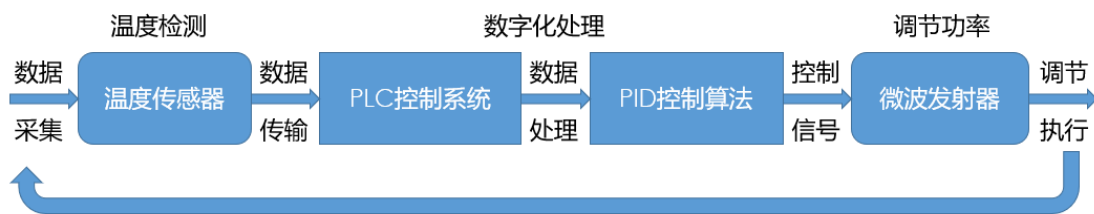


图 6-3 控制系统流程图

6.3.2 系统控制实现

1. 控制逻辑实现

(1) 启动条件

温度下限判定机制：可编程逻辑控制器（PLC）持续监测温度传感器采集的温度数据（ T ），并与预设启动温度阈值（ T_{start} ）进行比对分析。

1) 当检测到 $T < T_{\text{start}}$ 时，PLC 将激活微波发生器，启动加热过程。

2)若 $T \geq T_{\text{start}}$ ，PLC 维持微波发生器处于关闭状态。

启动延时保护机制：为规避设备频繁启动，PLC 可配置延时保护参数（5 秒），仅当温度持续低于 T_{start} 的时间超过预设延时阈值时，执行启动操作。

(2)运行控制

温度调节机制：PLC 基于温度传感器的实时反馈数据，采用脉宽调制（PWM）或模拟量输出方式，动态调节微波发生器的输出功率。

1)当检测到 $T < T_{\text{set}}$ （设定温度）时，系统将提升微波功率输出。

2)当 $T > T_{\text{set}}$ 时，系统将降低微波功率或暂时中止加热过程。

3)温度波动范围调控：PLC 预设温度波动范围($T_{\text{set}} \pm \Delta T$)。

4)当温度偏离预设范围时，PLC 将执行相应的功率调节策略（如功率提升或降低）。

(3)停止条件

温度上限判定机制：PLC 实时监测温度传感器数据（ T ），并与预设停止温度阈值（ T_{stop} ）进行对比。

1)当 $T \geq T_{\text{stop}}$ 时，PLC 将关闭微波发生器，终止加热过程。

2)若 $T < T_{\text{stop}}$ ，PLC 维持微波发生器的正常运行状态。

安全保护机制：当温度超过安全临界值（ T_{safe} ）时，PLC 将立即切断微波发生器电源，并触发安全警报系统。

2.控制程序实现

以下是 PLC 控制微波干燥装置的一个简单伪代码逻辑：

//定义参数

$T_{\text{start}}=30^{\circ}\text{C}$ //启动温度

$T_{\text{set}}=50^{\circ}\text{C}$ //设定温度

$\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ //温度波动范围

$T_{\text{stop}}=60^{\circ}\text{C}$ //停止温度

$T_{\text{safe}}=65^{\circ}\text{C}$ //安全温度

//主循环

WHILE TRUE:

```

T=READ_TEMPERATURE()      // 读取温度传感器数据
// 温度安全保护
IF T>T_safe:
    STOP_MICROWAVE()
    TRIGGER_ALARM()
    EXIT
//启动逻辑
IF T<T_start:
    START_MICROWAVE()

```

6.3.3 干燥控制 PID 算法模型

通过小麦干燥温度控制系统的实验研究，揭示了小麦干燥过程中的温度动态特性，为后续恒温控制系统的开发及系统参数的整定奠定了理论基础^[100]。恒温控制系统采用单输入单输出（SISO）的工作模式，该系统具有自平衡特性并包含纯滞后环节。基于系统特性分析，可采用一阶系统加纯滞后环节的方法构建其数学模型，其传递函数可表示为^[101]：

$$G(s) = (k \times e^{-\tau s}) / (Ts + 1) \quad (6-6)$$

式中， k 为系统增益， T 为时间常数， τ 为纯滞后时间， s 为复频率变量。

该模型准确描述了系统的动态响应特性，为控制器的设计与参数优化提供了理论依据。当控制系统处于稳态时，系统的输入量与输出量之间呈现线性关系。系统的自平衡能力直接影响其静态特性，具体表现为：当控制对象的自平衡能力增强时，系统的静态增益 k 相应减小；当自平衡能力减弱时，静态增益 k 则增大。在系统输入端施加阶跃信号后，系统输出量将从初始稳态经过时间常数 T 的过渡过程达到新的稳态^[102]。时间常数 T 是表征被控对象惯性特性的重要参数，其值越大表明系统的惯性越大。

由于热力学系统的能量传递过程具有不可瞬时完成的特性，系统输出量对输入量的响应存在明显的滞后现象，这一特性由滞后时间常数 τ 量化表征。滞后时间 τ 不仅反映了热力学系统固有的惯性特征，更直观体现了系统输出响应相对于激励输入的时延特性。图 6-4 展示了温度闭环控制系统的整体框架结构，该结构通过模块化设计清晰地呈现了传感器、控制器、执行机构等核心组件之间的相互作用关

系及其信号传递路径。这种滞后效应的存在使得控制系统设计必须考虑动态补偿策略，以确保系统的稳定性和控制精度。

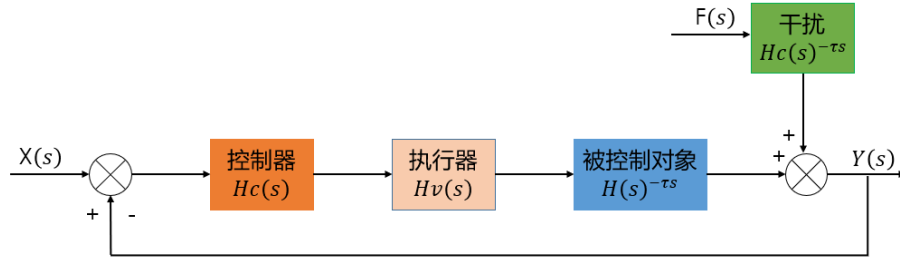


图 6-4 闭环控制系统的基本结构

在图 6-4 中， $F(s)$ 指代橡胶湿度干扰的传递函数， $H_c(s)$ 、 $H_v(s)$ 及 $H(s)$ 依次是控制器传递函数、执行器传递函数及被控对象传递函数， $N(s)$ 是系统干扰， $X(s)$ 是系统期望输入， $Y(s)$ 是系统输出， $e^{-\tau s}$ 指代控制对象系统延迟^[103]。受到 $F(s)$ 的影响，系统输出 $Y(s)$ 与实际产生的差异明显，控制系统的滞后性直接影响其稳定性及精度。由此推导得出系统的输出量：

$$Y(s) = \frac{H_v(s)H_c(s)H(s)e^{-\tau s}}{1 - H_v(s)H_c(s)H(s)e^{-\tau s}} X(s) + \frac{N(s)e^{-\tau s}}{1 - H_v(s)H_c(s)H(s)e^{-\tau s}} F(s) \quad (6-7)$$

可见，系统内部存在的干扰项 $F(s)$ 会直接影响被控量 $Y(s)$ ，导致其偏离预期值。此外，系统固有的滞后特性（由滞后项 $e^{-\tau s}$ 表示）进一步加剧控制过程的复杂性。滞后项的存在使得控制系统无法对干扰量进行实时补偿，从而导致控制精度下降和系统稳定性降低。干扰项 $F(s)$ 会引入额外的动态误差，而滞后项 $e^{-\tau s}$ 则延缓系统对干扰的响应速度，使得控制系统难以快速消除偏差。这种综合效应不仅降低了控制系统的稳态精度，还可能引发振荡或不稳定现象，从而影响系统的整体性能。因此，在设计控制系统时，必须充分考虑干扰项和滞后项的影响，并采取相应的补偿策略以提升系统的鲁棒性和控制精度。

6.3.4 PID 干燥温度控制

干燥温度控制系统中，常规 PID（比例-积分-微分）控制算法的核心机制是通过比例（P）、积分（I）和微分（D）三个控制环节的协同作用，实现对目标参数的负反馈调节^[97]。改进型 PID 算法进一步优化控制性能，其核心思想在于建立目标值与实际测量值之间的动态误差函数 $e(t)$ ，并基于该误差动态调整控制算法中的比例系数、积分时间常数和微分时间常数等关键参数，从而实现系统误差的最小化。

[104]。该控制策略的基本原理可通过图 6-5 所示的控制框图完整表示。相较于传统 PID 控制,改进算法通过参数自适应调整机制,能够更好地适应干燥过程中非线性、时变特性的影响,提高控制精度与动态响应性能。

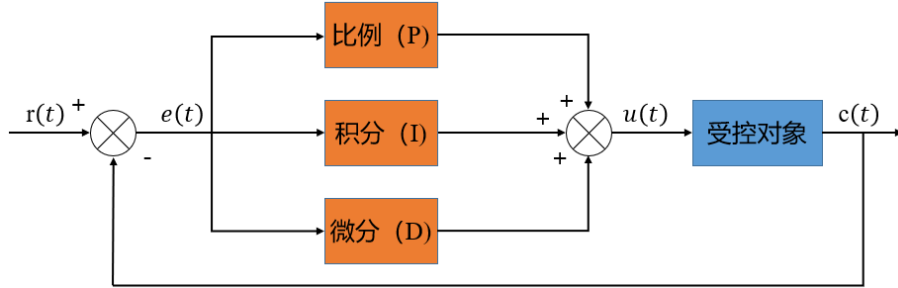


图 6-5 PID 控制器的原理框图

PID 控制的输出数学表达式^[105]:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \\ &= K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (6-8)$$

式中, T_I 、 T_D 分别表示微、积分的时间常数, 偏差的比例系数、积分系数、微分系数分别表示为 K_P , K_I , K_D 。

6.3.5 PID 控制器校正与优化

基于对控制系统控制精度、稳定性及响应特性的多维度考虑, 需对 PID 控制器的关键参数进行系统性校正与优化^[106-107]:

(1) 比例系数 K_P 的优化

比例系数 K_P 的调节旨在将系统误差 $e(t)$ 按特定比例放大, 从而提升系统对误差的敏感度并缩短响应时间。然而, K_P 值的设定需权衡系统性能: 过高的 K_P 值会导致系统出现振荡失稳现象, 同时显著增大超调量, 降低系统的动态性能; 而过低的 K_P 值则会延长系统响应时间, 劣化系统的动态与静态特性。特别是在存在显著外部干扰的情况下, 合理的 K_P 值设置可有效提升系统的抗干扰能力, 确保系统快速恢复稳定状态。

(2) 积分系数 K_I 的优化

积分系数 K_I 的主要功能是抑制系统的稳态误差。当 K_I 取值较大时, 系统会过早进入积分饱和状态, 导致超调量显著增加; 若 K_I 取值过小, 则难以有效消除稳

态误差，从而降低系统的控制精度。因此， K_I 的优化需要在消除稳态误差与避免积分饱和之间取得平衡。

(3)微分系数 K_D 的优化

微分系数 K_D 主要用于调节系统的稳定性并优化动态响应时间。其核心作用在于通过预测系统偏差的变化趋势，在偏差发生前进行预调节，从而增强系统的动态稳定性。 K_D 值的设定需谨慎：过大的 K_D 值会延长系统的调整时间，削弱系统的抗干扰能力；而过小的 K_D 值则无法充分发挥微分调节的作用，降低系统对偏差的自适应调节能力。此外，由于受调节器特性的限制，微分控制在受控量变化较小时几乎不产生调节效果，因此微分控制不能单独应用于 PID 控制系统中。

综上所述，PID 控制器的参数优化是一个多目标权衡过程，需综合考虑系统的动态响应、稳态精度及抗干扰能力，通过合理的参数整定实现系统性能的最优配置。

6.3.6 增量式 PID 控制算法

计算机控制系统基于离散数字信号进行处理，因此需对连续控制系统中的积分项和微分项进行离散化处理，以获得相应的离散数值，这一过程称为采样。设采样周期为 T ，采样序号 k 的取值范围为 0 到 I 。对于公式 6-8 中的积分项，采用矩形面积求和法进行离散化处理，可得到如下离散化公式^[108-109]：

$$\int_0^t e(t)dt \approx T \sum_{i=0}^k e(i) \quad (6-9)$$

式中， T 为采样周期； $e(i)$ 为第 i 个采样时刻的误差值； k 为当前采样序号。

对于微分项，采用后向差分法进行离散化处理，可表示为：

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (6-10)$$

通过上述离散化处理，连续时间域中的 PID 控制器可转化为离散时间域的数字 PID 控制器，其控制算法可表示为^[110-111]：

$$u(k) = K_p \times e(k) + K_I \times T \sum_{i=0}^k e(i) + K_D \times \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (6-11)$$

式中， $u(k)$ 表示第 k 个采样时刻系统的控制输出量，即控制器计算得到的调节量； $e(k-1)$ 表示第 $k-1$ 个采样时刻的系统误差，即前一个采样时刻的偏差值。

基于递推原理可以得到系统在 $k-1$ 时刻的输出：

$$u(k-1) = K_p \left[e(k-1) \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e_i T + T_D \frac{e(k-1) - e(k-2)}{T} \right] \quad (6-12)$$

使用式(6-11)与式(6-12)相减再化简即可得到增量 PID:

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (6-13)$$

增量式 PID 控制器的原理框图如图 6-6 所示:

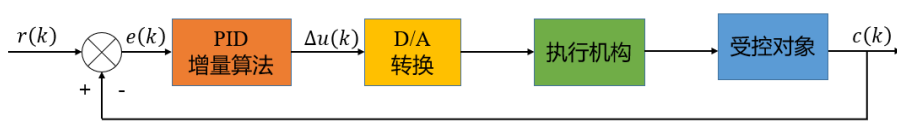


图 6-6 增量式 PID 控制器的原理框图

增量式 PID 控制算法通过仅关联当前时刻 (k)、前一时刻 ($k-1$) 以及前两时刻 ($k-2$) 的采样偏差，有效解决了传统 PID 控制算法中因偏差累加而导致的积分饱和问题。这一特性使其在计算效率、控制精度及系统鲁棒性方面具有显著优势。

6.3.7 PID 算法温度控制 MATLAB 仿真

通过 MATLAB 仿真，验证了基于增量式 PID 算法的恒温干燥控制系统的有效性。仿真结果如图 6-7 所示。

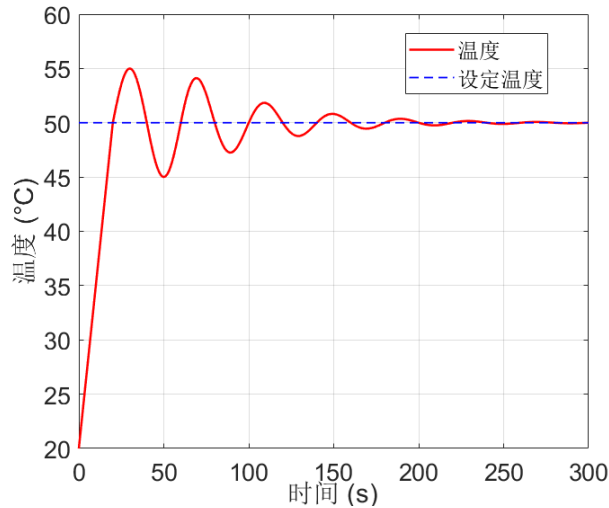


图 6-7 PID 算法的恒温干燥仿真结果

仿真结果表明，该系统能够实现温度的快速升温 and 精确控制，且温度波动范围逐渐减小，最终趋于稳定。通过合理调整 PID 参数和衰减因子，可进一步优化系统性能，满足实际工业应用的需求。

6.4 装置工作方式

以本实用新型涉及的微波真空干燥装置，其工作原理及结构特征如下：干燥箱内置有托盘，用于承载待干燥物料。微波发射器作为主要热源装置安装于干燥箱内部空间。为提升干燥效率，本装置特别设计了顶棚结构，其表面可作为冷凝面，将箱体内水蒸气凝结成液态水后，经由冷凝水排出机构排出系统。该顶棚采用 V 型设计，开口朝下，便于冷凝水汇集；同时内置水道与第二水箱构成循环回路，通过水泵驱动冷却水在系统内循环流动，有效提高冷凝效率。

本装置的创新点之一在于托盘采用玻璃缸设计，其内可盛放适量水，通过水介质吸收散射微波，实现对物料的双重加热效果。托盘设有放置凹槽，其内壁采用碳化硅材料制造，具有优异的微波吸收和保温性能；外壁则由隔热材料构成，确保热量集中于凹槽内部。为防止物料受损，凹槽两侧加装有隔离护板。为确保干燥过程的可控性，本装置设置完善的监测与控制单元：温度检测机构可实时监控干燥箱内温度变化；流量计精确调节第一水箱向托盘的注水量；溢流阀维持系统内部压力稳定。真空泵通过排气管抽吸箱内空气，配合冷却筒对排气系统进行降温，确保真空系统安全运行。

冷凝水收集系统采用双漏斗设计，配合几字形虹吸管，在保证密封性的同时实现冷凝水的自动排放。整个干燥过程通过多个控制单元的协同工作，确保干燥效果的优化和系统运行的稳定性。实验结果表明，该装置能够有效防止干燥过程中冷凝水对物料的污染，显著提升干燥品质。

微波发射器工作对物品进行干燥工作，干燥箱的箱体内部的水蒸气粘附在顶棚上，凝结冷凝水后通过冷凝水排出机构排出，从而防止干燥箱中的冷凝水在箱体内部壁上凝结滴落在干燥后的物品上，从而使得物品干燥效果更佳。

顶棚为 V 形，顶棚的开口朝下，从而保证凝结在顶棚上的冷凝水导流至顶棚下端后通过冷凝水排出机构排出；通过水泵、第一循环管、第二循环管、第三循环管、冷却器实现冷却水在第二水箱和顶棚的内腔中循环，从而冷却水吸收干燥箱中热量，便于水蒸气在顶棚上的快速凝结；真空泵工作通过排气管将干燥箱中的空气抽出，控制干燥箱内真空度，从而使得干燥装置的干燥效果更佳。

6.5 本章小结

本章在前文微波干燥理论与微波干燥实验过程为基础，针对现有干燥装置缺点，完成小麦微波干燥特性实验装置的设计与优化，具体改进措施包括：

(1)设计带有顶棚结构的水汽收集装置，通过优化冷凝与收集机制，显著降低干燥装置内的水汽积聚，提高干燥效率。

(2)采用可编程逻辑控制器（PLC）控制系统，通过温度传感器实时采集物料温度数据，并基于预设的温度设定值，动态调节干燥装置的输出功率，从而实现干燥过程的恒温控制。该系统通过闭环反馈机制，将温度检测数据与设定值进行比对，利用 PID 控制算法精确调节功率输出，确保干燥环境温度维持在目标范围内，最终达到优化干燥效率、保障产品质量一致性的目的。

(3)基于液面压力差原理，开发了智能化排水系统，实现水汽的自动排放，减少人工干预，提升操作的自动化程度。

(4)采用特殊材料与结构设计，研制具有微波吸收与热转化功能的托盘装置，提高了微波能量的利用效率，为装置的整体能效优化提供关键技术支持。

第 7 章 总结与展望

7.1 总结

本研究系统探讨小麦在热风干燥、微波干燥及微波真空干燥三种方式下的干燥特性,通过实验全面测量干燥速率、水分活度、色泽度及温度分布均匀性等关键指标。研究表明,微波真空干燥在干燥效率与产品质量方面均显著优于热风干燥和微波干燥,是一种兼具高效性和高品质的干燥技术。基于热传导理论,本研究构建小麦干燥的扩散模型,并通过实验数据验证其准确性,同时采用薄层干燥模型较好地模拟微波干燥过程中的水分变化规律。研究明确干燥温度、真空度及微波功率对干燥速率的影响顺序,提出最佳工艺参数组合(干燥温度 50 °C、微波功率 200 W、真空度-0.085 MPa),显著降低干燥噪音并提高工艺实用性。此外,研究创新性地应用有理数函数模型拟合水分扩散系数,模型拟合度达 94%以上,为微波真空干燥理论研究提供新方法。在缓苏工艺优化方面,研究发现单次干燥 35 min、缓苏 50 min、缓苏 3 次可实现最佳干燥效率,而单次干燥 15 min、缓苏 30 min、缓苏 2 次可有效降低爆腰率。改进算法的应用进一步验证其在干燥工艺优化中的可行性,为农产品干燥技术发展提供重要参考。最后,本研究设计并优化小麦微波干燥实验装置,通过改进水汽收集装置、引入 PLC 控制系统及开发智能化排水系统,显著提升装置的自动化程度和干燥效率。

本文主要结论和创新点如下:

(1)建立三种数学模型拟合分析干燥工艺参数对小麦水分扩散的影响机制,发现有理数函数模型对阐述工艺参数与小麦水分扩散系数的规律变化效果最佳。结合工艺参数对小麦爆腰率的影响对小麦微波真空干燥的干燥温度、微波功率和真空度进行分析,发现设置干燥温度 50 温度、微波功率 200 W、真空度 0.85 MPa 时小麦具有较快的干燥速率和较高的干燥品质。

(2)以单次干燥时长、缓苏时长及缓苏次数为三个关键参数,最终含水率和爆腰率为优化目标,建立二次多项式优化模型,采用改进 NSGA2 算法进行多目标寻

优。研究结果表明,当单次干燥时长为 35 min、缓苏时长为 50 min、缓苏次数为 3 次时,可获得最佳的干燥效率;而当单次干燥时长为 15 min、缓苏时长为 30 min、缓苏次数为 2 次时,可获得最低爆腰率的小麦。

(3)基于实验过程中发现的问题,优化了微波真空干燥装置。整体结构主要由水汽处理系统、温度控制系统、干燥腔体和加热托盘等组成。温控系统采用 PLC 控制,使用增量式 PID 算法实现,通过实时采集温度信号并动态调节微波发射器的功率输出,实现了干燥过程的恒温控制。针对干燥装置内部水汽积聚问题,设计了一套水汽收集与排出集成装置。采用带有冷凝水循环功能的 V 型顶棚结构,可有效吸附并冷凝装置内的水蒸气;通过 U 型管结构,利用液面高度差原理将冷凝水排出装置外部。通过具有辅助加热功能的托盘解决了干燥介质表面易产生水汽的现象。

7.2 展望

本研究尚存在一定局限性,未来研究可从以下方面进行改进与拓展:一是采用新收获小麦作为实验材料,以更准确地表征实际干燥过程中的物料特性差异,从而提高研究结果的普适性和实用价值;二是通过优化实验设计,适当缩短干燥过程的时间采样间隔,以提升 NSGA-II 算法的搜索效率,降低结果的不确定性,进而增强研究的精确性和可靠性。在技术创新方面,建议引入基于人工智能的干燥参数动态优化系统等智能化控制技术,实现工艺参数的实时精准调控,以进一步提高干燥效率和产品质量。在设备优化层面,可考虑集成多传感器融合技术,构建关键指标实时监测系统,从而提升干燥装置的自动化与智能化水平,为工业化应用提供技术支撑。

参考文献

- [1] 路田. 普通小麦(*Triticum aestivum* L.)穗花期外源施加 NAA 对耐热性的评估分析[D]. 西北农林科技大学, 2023.
- [2] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预冻对苹果片真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 241-250.
- [3] 王旖旎, 吴玲. 全球视域下国际形势、粮食安全与中国方案[J]. 农业经济与管理, 2024, (02): 13-24.
- [4] 钟钰, 巴雪真, 李天祥. 从 21 世纪粮食危机看中国粮食安全治理现代化[J]. 社会科学辑刊, 2023, (06): 201-212.
- [5] 朱晶, 张瑞华, 谢超平. 全球农业贸易治理与中国粮食安全[J]. 农业经济问题, 2022, (11): 4-17..
- [6] 何豪杰, 张银平, 龚魁杰, 等. 我国粮食烘干仓储技术装备研究应用现状与趋势[J]. 农机化研究, 2024, 46(04): 1-6+77.
- [7] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫, 等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报, 2022, 36(02): 414-421.
- [8] 马佳佳, 董明辉, 全鑫瑶, 等. 不同干燥方式对羊肚菌品质特性及复水性能的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 288-297.
- [9] 王恒鹏, 王引兰, 姜松松, 等. 不同干燥方式下调理猪肉干品质变化及其机制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 317-326.
- [10] 史佳一, 潘罗星, 陶宜红, 等. 不同干燥方式对祁菊花品质的影响[J]. 中国药房, 2024, 35(19): 2365-2371.
- [11] 程丽丽, 唐雪燕, 张媛媛, 等. 干燥方式对黑麦挂面品质及体外消化性的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(09): 145-151.
- [12] Tunçkal C, Direk M, Doymaz I, et al. Drying kinetics of nectarine slices in a heat pump drying system[J]. Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2024, 46(1): 1686-1700.
- [13] Pei YS, Fan L, Wang CZ, et al. Intelligent control of ginger far-infrared radiation and hot-air drying based on multi-sensor fusion technology[J]. Food and Bioproducts Processing,

- 2024, 149: 415-427.
- [14] Kayisoglu S. Rehydration kinetics of green pea grains dried at different microwave powers[J]. *Philippine Agricultural Scientist*, 2024, 107(4): 389-400.
- [15] Ignaczak A, Wozniak L, Salamon A, et al. Shaping the physicochemical and health-promoting properties of carrot snacks produced by microwave-vacuum drying with preliminary thermal and enriching treatment[J]. *Molecules*, 2024, 29(21): 5100.
- [16] Liang X, Li X, Zhang JM A, et al. Impact of power density on the drying kinetics, quality profiles, and microstructure of pork chip snacks dried by microwave vacuum drying[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2024, 205: 116477.
- [17] Addo PW, Garipey Y, Shearer M, et al. Microwave-assisted hot air drying of cannabis sativa: effect of vacuum and pre-freezing on drying kinetics and quality[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 218: 119015.
- [18] 王乐意, 李长河, 刘明政, 等. 中药材干燥技术与装备研究现状[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(02): 1-28.
- [19] 姜龙, 李丹丹, 王文亮, 等. 生姜干燥技术研究进展[J]. *中国果菜*, 2024, 44(02): 41-46.
- [20] 袁迪, 李洋, 陈丰, 等. 蓝莓微波冷冻干燥特性及品质分析[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(06): 248-263.
- [21] 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(02): 94-101.
- [22] Chen PX, Fan MK, Zhu, WX, et al. Numerical simulation of hot air drying of wheat grain piles based on CFD-DEM and experimental research[J]. *Drying Technology*, 2024, 48(2): 199-211.
- [23] Chauhan A, Singh S, Dhar A, et al. Optimization of pineapple drying based on energy consumption, nutrient retention, and drying time through multi-criteria decision-making[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 125913.
- [24] 张志军. 玉米真空干燥特性的研究[D]. 东北大学, 2009.
- [25] Izli G, Taskin O, Izli N. Convective, microwave and combined microwave-convective drying of pepino[J]. *Erwerbs-Obstbau*, 2021, 63(2): 175-184.
- [26] Zhang ZL, Chen YQ, Peng JW, et al. Study on drying characteristics of combined microwave-hot air drying of paddy[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 64: 105539.
- [27] Wang H, Fang B, Chen Y, et al. Numerical simulation and optimization of microwave

- p>
drying process of wheat bran[J]. Food And Bioproducts Processing, 2025, 151: 84-102.
- [28] Taghinezhad E, Szumny A, Figiel A, et al. The potential application of HSI and VIS/NIR spectroscopy for non-invasive detection of starch gelatinization and head rice yield during parboiling and drying process[J]. Journal Of Food Composition And Analysis, 2025, 142: 107443.
- [29] Alam MH, Ahmad MH, Imran M, et al. Production of Stevia-Based Persimmon Fruit Leather by Microwave Oven and Its Optimization With Response Surface Methodolog[J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(2): e70036.
- [30] Tang XX, Xian ZK, Liu Y, et al. Optimization of Variable-Temperature Pressure-Difference Puffing Drying Process for Persimmon Chips Using Response Surface Methodology[J]. Foods, 2024, 13(23): 3830.
- [31] 邹佳池, 张忠杰, 李瑞敏, 等. 粳稻热风-微波耦合干燥工艺优化研究[J].中国粮油学报, 2023, 38(07): 167-174.
- [32] 肖曼玉, 张秀玲, 刘明华, 等. 响应面法优化青椒微波-真空冷冻联合干燥工艺及品质分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(04): 191-200.
- [33] Abbaspour-Gilandeh Y, Zadhosein S, Kaveh M, et al. Drying time, energy and exergy efficiency prediction of corn (*Zea mays* L.) at a convective-infrared-rotary dryer: approach by an artificial neural network[J]. Energies, 2025, 18(3): 696.
- [34] 宋琦. 基于稻谷干燥过程评价模型的稻谷干燥过程智能控制技术研究[D].江苏大学, 2021.
- [35] An JY, Xie HX, Yan JC, et al. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology[J]. Energy Reports, 2024, 12: 5482-5506.
- [36] 梁志超, 王帅, 徐浩, 等. 谷物干燥过程控制策略研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2024, 49(04): 108-115.
- [37] 刘烨, 陈鹏泉, 朱文学, 等. 农产品干燥过程数值模拟研究现状及进展[J].食品与发酵工业, 2023, 49(16): 331-339.
- [38] 张凯强, 王小雷, 赵建锋, 等. 基于 GA-BP-Garson 模型的市政污泥干燥过程含水率预测[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(04): 1330-1336.
- [39] 吴绍锋, 强华, 张欣, 等. 基于遗传算法的南瓜联合干燥工艺优化[J]. 食品与机械, 2024, 40(07): 183-191+240.
- [40] 高若婉, 李丽, 梅树立, 等. 基于遗传算法的苦瓜片真空冷冻干燥工艺优化[J]. 农

- 业机械学报, 2017, 48(S1): 401-406.
- [41] Iheonye AC, Ferrie FP, Orsat V, et al. A two-Pass Deep Learning system for monitoring visual attributes of food in real-time during fluidized bed drying[J]. Drying Technology, 2025, 43(1-2): 387-411.
- [42] Chokphoemphun S, Hongkong S, Chokphoemphun S. Evaluation of drying behavior and characteristics of potato slices in multi-stage convective cabinet dryer: Application of artificial neural network[J]. Information Processing In Agriculture, 2024, 14(4): 457-475.
- [43] 吴庭, 凌菁, 张楠, 等. 麻雀搜索算法优化 BP 神经网络的牛肉微波干燥含水率预测[J]. 食品科技, 2023, 48(08): 113-120.
- [44] Yang J, Guan HO, Ma XD, et al. Rapid detection of corn moisture content based on improved ICEEMDAN algorithm combined with TCN-BiGRU model[J]. Food Chemistry, 2025, 46(2): 142133.
- [45] 丛燊阳, 刘晓红, 王星宇, 等. 微波真空干燥技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(09): 118-126.
- [46] 胡如响, 卢星宇, 王鹏, 等. 香菇不同干燥技术的研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 63-68.
- [47] 阮函钰, 宋莎莎, 王文亮, 等. 超声波预处理在果蔬干燥技术中的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 392-400.
- [48] 李玉. 花生荚果热风-射频联合干燥特性及干后品质研究 [D]. 河南工业大学, 2024.
- [49] 张沛琳. 稻米超声预处理对微波干燥特性及品质影响[D]. 武汉轻工大学, 2024.
- [50] 吴绍锋, 强华, 张欣, 等. 基于响应面法的南瓜热风-真空联合干燥工艺参数优化 [J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(09): 99-108.
- [51] 任广跃, 朱乐雯, 段续, 等. 苹果丁冷冻-热风联合干燥体积收缩机制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(02): 63-71.
- [52] 谢欢, 刘晓艳, 杨淑纯, 等. 热泵联合干燥技术在果蔬干燥工艺中的应用进展[J]. 农产品加工, 2022, (16): 75-78+83.
- [53] 张沛琳, 李彬, 胡志刚, 等. 微波联合超声干燥对大米干燥品质影响研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(03): 146-152.
- [54] 彭飞, 宋雨龙, 马传贵, 等. 微波热风联合干燥技术在农产品干燥中的研究进展[J].

- 农产品加工, 2024, (24): 69-72.
- [55] 王振宇, 王强, 刘东, 等. 污泥干燥特性实测及预测模型研究[J]. 西南科技大学学报, 2024, 39(01): 66-74+110.
- [56] 吴凤霞, 尤广林, 邓广明, 等. 楸木板材干燥含水率时间序列仿真分析与预测[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(01): 223-227+255.
- [57] 陈林林, 杨茜瑶, 王玲, 等. 加工技术对食品中酚酸含量及抗氧化活性影响研究进展[J]. 中国调味品, 2023, 48(02): 205-212.
- [58] 李娜, 周红丽, 周涛, 等. 稻谷储藏条件及储藏技术分析[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(03): 148-153.
- [59] Bekele DW, Admassu S. Pumpkin flour qualities as affected by ultrasound and microwave pre-drying treatment[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 2409-2424.
- [60] Ramírez-Aguirre MD, Montiel-López RD, García-Cayuela T, et al. Functional properties of dietary fiber concentrates from Mexican hawthorn fruit (*Crataegus mexicana*) [J]. International Journal of Food Properties, 2025, 28(1): 2477534.
- [61] Yusuf EH, Wojdylo A, Lech K, et al. The effect of combined drying process (OD-CD-VMD) on nutritional, phytochemical, and sensory profiles, and biological activities of colored dried carrot[J]. Lwt-Food Science and Technology, 2022, 173: 114231.
- [62] 宋玉, 刘超, 段依梦, 等. 稻谷就仓干燥水分迁移规律及干燥动力学模型研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(10): 115-123.
- [63] 陈恺, 承春平, 王雪妃, 等. 预处理对赛买提杏片热风干燥特性和水分迁移的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(08): 311-324.
- [64] 吴慧栋. 大豆的微波干燥工艺及装置优化研究[D]. 安徽工程大学, 2022.
- [65] 王露露, 史茜茜, 王雨桐, 等. 大豆肽的功能活性及其在食品加工中的应用[J]. 农产品加工, 2021, (02): 59-63.
- [66] 杨丰, 青舒婷, 王晨笑, 等. 远红外辅助热泵干燥技术在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(05): 75-80.
- [67] 代建武, 周厚彬, 黄杰, 等. 不同干燥方式对红托竹荪干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(06): 90-100.
- [68] 袁迪, 李洋, 陈丰, 等. 蓝莓微波冷冻干燥特性及品质分析[J]. 中国食品学报,

- 2024, 24(06): 248-263.
- [69] 马田田, 欧阳杰, 肖哲非, 等. 南极磷虾热风干燥特性及干燥模型[J]. 渔业现代化, 2023, 50(06): 93-102.
- [70] Patel R, Kumar A, Singh S, Sharma P. Influence of moisture diffusion coefficient on drying kinetics and efficiency[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 302(5): 110-118.
- [71] LI K X, LI W G, ZHANG Y, et al. Effects of different drying temperatures on flavor related quality of blueberry[J]. Journal of Berry Research, 2023, 13(1): 7-20.
- [72] SUN Y N, ZHAG M, MUJUMDAR A. Berry drying: Mechanism, pretreatment, drying technology, nutrient preservation, and mathematical models[J]. Food Engineering Reviews, 2019, 11(2): 61-77.
- [73] Abbaspour G Y, Kaveh M, Fatemi H, et al. Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties[J]. Foods, 2021, 10(5): 1006.
- [74] 贾真. 物源性过热蒸汽联合余热回收节能干燥系统设计与试验[D]. 福建农林大学, 2019.
- [75] Ma YC, Liu D, Zhang W, et al. Effects of hot-air coupled microwave on characteristics and kinetics drying of lotus root slices[J]. ACS Omega, 2021, 6(5): 3951-3960.
- [76] 王晓洁, 朱俊鹏. 基于波动方程的室内照明光传播特性数学模型研究[J]. 中国照明电器, 2025, (02): 118-120.
- [77] 苏蒸棠, 陈飞, 周致君, 等. 导热吸波一体化材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(05): 2308-2320.
- [78] 杨菁, 王维, 张朔, 等. 吸波材料辅助的液体物料微波冷冻干燥多物理场耦合模型[J]. 化工学报, 2019, 70(09): 3307-3319.
- [79] 侯岳岚, 程亚平, 夏源. 多孔介质中轻非水相流体溶解迁移的数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2025, 58(01): 39-44.
- [80] 王燕鹏, 刘义伦, 刘峥, 等. 回转窑内气固模型耦合解法的热传递分析[J]. 热科学与技术, 2024, 23(05): 502-510.
- [81] Zhang H, Li Q, Wang Y, et al. Moisture diffusion coefficient and its effect on drying efficiency and quality[J]. Food Research International, 2021, 138(2): 109-117.
- [82] 李长友. 干燥物系解析理论研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(06): 1-13.
- [83] 刘盼盼. 饱和蒸汽-热泵干燥组合处理对白萝卜干燥特性的影响[D]. 河南科技大

- 学, 2022.
- [84] 李昕姝, 付凯. 对流扩散方程的保正守恒特征有限体积法研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(08): 89-96+110.
- [85] 江文豪, 李江山, 黄啸, 等. 考虑热扩散情况下有机污染物在复合衬垫中一维瞬态运移的解析模型[J]. 土木工程学报, 2023, 56(09): 146-157+188.
- [86] 赵文勇, 曹熙勇, 杜心伟, 等. CMT 电弧增材制造过程传热传质数值模拟[J]. 机械工程学报, 2022, 58(01): 267-276.
- [87] 赵学观, 徐丽明, 何绍林, 等. 玉米定向种子带恒张力卷绕系统自适应模糊 PID 控制[J]. 农业机械学报, 2015, 46(03): 90-96.
- [88] 刘春菊, 钱旻, 宋江峰, 等. 速冻莲藕片贮藏过程中品质变化动力学模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(06): 301-308.
- [89] 刘涛, 周舟, 王清, 等. 大别山板栗片热泵干燥特性及动力学模型分析[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(07): 35-43.
- [90] 黄敏, 甘婷, 易萍, 等. 芒果切片热风干燥特性及模型[J]. 食品与机械, 2024, 40(04): 179-186+209.
- [91] 李凯. 基于玻璃化转变理论的稻谷籽粒干燥应力模拟[D]. 天津科技大学, 2018.
- [92] 张倩. 海参微波真空干燥及对品质的影响机制研究[D]. 华中农业大学, 2023.
- [93] 殷勤. 红桔木干燥材养生处理工艺研究[D]. 南京林业大学, 2023.
- [94] 方齐国. 不同干燥方式对糯稻品质的影响[D]. 武汉轻工大学, 2023.
- [95] 孙铜生, 吴慧栋, 王金志, 等. 基于改进粒子群算法的大豆微波真空干燥工艺优化[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(09): 231-239.
- [96] MELLAL M A, WILLIAMS E J. Cuckoo optimization algorithm with penalty function and binary approach for combined heat and power economic dispatch problem[J]. Energy Reports, 2020, 6: 2720-2723.
- [97] 张金凤, 赖良庆, 陈圣波, 等. 基于改进粒子群算法的水泵水轮机多目标优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 86-92.
- [98] 杨淼. 改进的遗传算法在多元函数优化中的应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2022, (05): 24-26.
- [99] 郑先哲, 张雨涵, 刘成海, 等. 微波技术在食品和农产品加工中应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(06): 14-28.

- [100] 孙文, 王军年, 王庆年, 等. 电动轮驱动系统结构设计与仿真研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(03): 330-336.
- [101] 王德伦, 申会鹏, 孙元, 等. 复杂零件结构设计概念单元方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(07): 152-163.
- [102] 于庭芳, 李帅, 王赞惠. 固态继电器在电厂余热锅炉给水系统中的应用[J]. 电工技术, 2022, (22): 127-128.
- [103] 朱红福. 基于参数自整定 PID 算法的橡胶干燥温控系统研究[D]. 昆明理工大学, 2023.
- [104] 袁国利. 基于三冗余 PLC 汽轮发电机组 DEH 控制系统的研究与应用[D]. 北京交通大学, 2011.
- [105] 吴敏, 王晓璐, 姜玉东, 等. 深度确定性策略梯度与模糊 PID 的协同温度控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(12): 2358-2365.
- [106] 刘小金, 严方伟, 韦祯, 等. 基于模糊算法的非标鱼塘智能增氧机控制系统设计[J]. 中国农机装备, 2024, (11): 79-82.
- [107] 屈浩轩. 基于改进 BP 神经网络结合 PID 的光伏并网逆变器控制策略研究[D]. 湖南工业大学, 2022.
- [108] 孙景彬, 曾令坤, 应婧, 等. 农业履带底盘关键技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 202-220.
- [109] 张志豪, 李军, 王林, 等. 基于内模控制和改进自抗扰控制的主汽温串级控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9331-9341.
- [110] 杨子兵, 周军, 孙永佳, 等. 基于干扰观测器和改进模糊 PID 的农用车辆路径跟踪控制策略[J]. 现代制造工程, 2022, (01): 52-60.
- [111] 毕建宇. 不稳定时滞系统的 PID 设计及整定[D]. 华北电力大学(北京), 2024.

攻读硕士期间获得的科研成果

一、论文情况

[1] Fan Jinsheng, Sun Tongsheng, Wu Jun, Zheng Le, Tang Hongtu. Analysis of dielectric properties of rice during Microwave drying process[J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(6): 1273-1282. (SCI 收录, EI 收录)

二、专利情况

[1] 郑乐,孙铜生,樊金生,吴俊,王凯,刘家豪. 一种微波真空干燥装置[P]. 实用新型, ZL202321873745.X, 2024.03.08.

[2] 王凯,孙铜生,曹冉,刘家豪,樊金生,郑乐,吴俊. 一种微波真空干燥装置[P]. 实用新型, ZL202322048332.4, 2024.04.05.

[3] 刘家豪,孙铜生,王凯,郑乐. 一种微波真空干燥装置[P]. 实用新型, ZL202321900213.0, 2024.02.23.

三、参研项目

[1] 安徽省自然科学基金资助项目面上项目“谷物微波干燥过程热电耦合传输理论及品质控制方法”(2208085ME140).

[2] 安徽高校自然科学研究项目重大项目“基于微波加热的谷物烘干过程能量转换理论与节能策略研究”(KJ2020ZD38).

致谢

行文至此，意味着我的硕士生涯即将画上句点。回首这段求学时光，心中充满感激之情。在此，我谨向所有给予我支持、指导和帮助的人致以最诚挚的谢意。

首先，由衷感谢我的导师孙铜生教授。从论文选题的反复推敲、研究框架的逐步完善，到最终文稿的字斟句酌，孙老师始终以严谨的治学态度、深厚的学术造诣和循循善诱的指导，为我指明方向。孙老师不仅传授了我专业知识，更教会我独立思考与解决问题的科学精神，这些宝贵的财富将伴随我未来的每一步。特别感谢同窗樊金生和室友毛徐徐，在论文撰写过程中提供的宝贵建议与无私帮助；感谢曹冉、刘家豪、王凯、吴俊、唐宏图 and 吕曦等师兄师弟，在实验设计、数据分析和研究方向讨论中给予的启发与支持。感谢我的室友与同学毛徐徐、王龙、毛伟和许书恒。在相关软件学习与论文构思上提供许多指导与意见。感谢他们与我一起在这些日子讨论学术、分享生活，让这段旅程充满温暖。深深感恩我的父母和家人，二十余载求学路，是你们无条件的爱与包容，让我在每一次彷徨时都能找到归途；是你们始终如一的信任与支持，让我有勇气面对挑战。

最后，谨向参与论文评审与答辩的各位专家老师致以诚挚的感谢，感谢你们拨冗审阅并提出宝贵意见，使我的研究得以进一步完善。

尚模敦学 唯实惟新

