

分类号: TS213.3

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120154



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 稻谷微波真空干燥特性研究
与干燥腔结构优化

论 文 作 者 刘家豪

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: 2024 年 5 月 31 日

分类号：TS213.3

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120154

稻谷微波真空干燥特性研究与干燥腔结构优化

Study on microwave vacuum drying characteristics of rice and
optimization of drying chamber structure

学生姓名：_____刘家豪_____

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：_____2024 年 5 月 18 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：刘 家 豪

日期：2024 年 5 月 31 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：刘 家 豪 指导教师签名：孙 银 彬

日期：2024 年 5 月 31 日

日期：2024 年 5 月 31 日

稻谷微波真空干燥特性研究与干燥腔结构优化

摘要

中国是世界上最大的稻谷生产国之一，稻谷是中国的主要粮食作物之一，对中国的粮食安全至关重要，近年来稻谷产量保持着稳步上升的趋势，每年储藏大量的稻谷。但稻谷在储存期间由于稻谷籽粒为活体组织，收获后仍进行生物反应，以呼吸作用影响为主，储存期间籽粒吸收氧气释放二氧化碳使环境温度升高，且稻谷收获时水分含量较高导致储存环境湿度较高，为霉菌和真菌提供了理想的生长条件，从而导致稻谷的品质降低。当前国内大部分地区采用传统干燥方法，通过对稻谷表皮进行外部加热，通过热传递的方式由外至内将热量传递至籽粒内部，蒸发籽粒内部水分达到干燥效果，但是干燥期间稻壳影响稻谷内部籽粒干燥水分的迁移，在传统干燥方式下，稻谷的干燥损耗较大。而微波干燥作为一种新型干燥方式，相比传统干燥方式，在保证品质的情况下提升了干燥速率、缩短了干燥周期、减少了物料损耗，提高了干燥效率。

本文通过对稻谷微波干燥特性及参数进行研究，采用传热传质、微波电磁场理论对稻谷微波干燥期间的含水率及温度进行实验仿真分析，通过研究建立了稻谷微波干燥的动力学模型，探讨了真空保持时间，装载量等因素对稻谷微波干燥特性的影响，并对微波腔体结构上进行了仿真设计及优化。主要研究内容如下：

（1）稻谷微波干燥参数热电场传输理论研究

通过对稻谷的结构和特性对其参数进行预估, 研究分析了稻谷的微波干燥特性, 确定稻谷传热传质的模型, 确定了稻谷的基本生理及干燥参数, 应用了稻谷的微波谐振腔理论进行分析研究, 建立了稻谷干燥期间在腔体内部的传热及电磁场理论方程, 为稻谷干燥装置的改进与仿真模拟提供理论依据。

（2）稻谷微波干燥特性实验研究

通过微波真空干燥的实验方法, 测定了稻谷在相同时间内不同真空度、微波功率、初始温度, 装载量的实验数据, 采用正交实验的方法进行数据拟合分析, 研究发现了稻谷真空干燥影响从大到小的顺序为初始温度、微波功率、真空度、装载量, 真空保持时间。进一步阐述了稻谷的干燥参数对微波干燥特性的影响。

（3）基于 LS-SVM 算法的含水率预测模型

为实现稻谷的含水率预测, 应用了 LS-SVM 算法建立了微波干燥数学模型, 采用 7 种干燥模型进行单因素影响对比分析研究, 通过多个真空干燥工艺参数为输入, 以稻谷含水率作为输出的含水率预测模型, 得到了不同干燥模型的模型参数和评价参数。利用该模型分析了在不同因素条件下进行真空干燥对稻谷的影响。结果显示预测模型 LS-SVM 算法模型含水率的预测精度达到 98.9974%, 拟合程度相比其他模型效果更好, 表明该模型能够较好地预测稻谷的含水率。

（4）稻谷微波热电场模型及数值解析

利用 COMSOL 软件, 建立了稻谷微波干燥过程中传热传质和腔

体内电磁场的多项耦合模型。通过模型将稻谷的干燥特性、麦克斯韦方程组和传热传质方程相互关联，模拟稻谷内部温度和水分的分布变化规律，反映了真实的干燥环境和稻谷生理特性。通过仿真结果与实验结果的对比，发现存在一定程度的差异，但整体变化趋势相似。表明了建立的三维仿真耦合模型能够较好地应用于稻谷的微波干燥。

（5）微波干燥实验装置设计与优化

为优化微波干燥腔体的结构及性能，设计了一种可调整微波磁控管工作方式的微波真空装置。装置包括了非同步式旋转微波源、小型圆盘式微波源、弧形干燥腔体，微波水分仪等结构。通过对磁控管内部阳极回路及波导天线的结构进行设计改良，提高波导的天线增益使磁控管发射的微波能覆盖范围更广泛，微波能较为均匀分布在干燥腔体内。通过对微波腔体磁控管位置及结构进行仿真设计，分析得出磁控管数目控制在两个且位置处于相对分布，并处于腔体内壁中部位置可获得较强的干燥效率。

关键词：稻谷，微波干燥，干燥特性，温度场，含水率，传热传质，干燥装置

Study on microwave vacuum drying characteristics of rice and optimization of drying chamber structure

ABSTRACT

China is one of the largest producers of rice in the world. Rice is one of the main food crops in China and is crucial to China's food security. In recent years, rice production has maintained a steady upward trend, and a large amount of rice is stored every year. However, since rice grains are living tissues during storage, they still undergo biological reactions after harvest, mainly under the influence of respiration. During storage, grains absorb oxygen and release carbon dioxide, which increases the ambient temperature. Moreover, higher moisture content during rice harvest leads to higher humidity in storage environment, providing ideal growth conditions for molds and fungi. As a result, the quality of rice deteriorates and deteriorates in a short time. At present, the traditional drying method is adopted in most parts of China. However, during drying, the rice husk affects the migration of dry water inside the rice grain, and the drying loss of rice under the traditional drying method is large. As a new drying method, microwave drying improves the drying rate, shorens the drying period, reduces the material loss and improves the drying efficiency while ensuring the quality.

In this paper, microwave drying characteristics and parameters of rice were studied, heat and mass transfer and microwave electromagnetic field theory were used to conduct experimental simulation analysis on the moisture content and temperature of rice during microwave drying. A dynamic model of microwave drying of rice was established through research, and the effects of microwave power, drying time, initial temperature and loading capacity on the drying characteristics of rice were discussed. The structure of microwave cavity is simulated and optimized. The main research contents are as follows:

(1) Theoretical research on microwave drying parameters and physiological characteristics of rice

By predicting the structure and characteristics of rice and its parameters, the microwave drying characteristics of rice were studied and analyzed, the heat and mass transfer model of rice was determined, the dynamic theory of rice was applied for analysis and research, and the boundary conditions inside the cavity during rice drying were established, which provided a theoretical basis for the improvement of rice drying device and simulation.

(2) Experimental study on microwave drying characteristics of rice

The experimental data of different vacuum degree, microwave power, initial temperature and loading capacity of rice in the same time were measured by microwave vacuum drying experiment. The orthogonal

experiment method was used for data fitting analysis, and it was found that the order of influence of vacuum drying factors on rice was initial temperature, microwave power, vacuum degree, loading capacity. The effects of drying parameters of rice on microwave drying characteristics were further expounded.

(3) Moisture content prediction model based on LS-SVM algorithm

In order to realize the prediction of rice moisture content, LS-SVM algorithm was applied and simulation analysis was carried out in Matlab environment. Four vacuum drying process parameters measured by experiments were taken as inputs, and rice moisture content was taken as outputs, so as to build a moisture content prediction model with four inputs and one output. The model was used to analyze the effects of vacuum drying on rice under different conditions. The results showed that the moisture content prediction accuracy of the model reached 98.9974%, indicating that the LS-SVM algorithm model can predict the moisture content of rice well.

(4) Numerical simulation of microwave drying of rice

A multi-item coupling model of heat and mass transfer and electromagnetic field in the microwave drying process of rice was established by COMSOL software. The drying characteristics of rice, By comparing the simulation results with the experimental results, it is found that there are some differences, but the overall change trend is similar.

The results show that the 3D simulation model can be applied to microwave drying of rice.

(5) Design and optimization of microwave drying experimental equipment

In order to optimize the structure and performance of microwave drying cavity, a microwave vacuum device which can adjust the working mode of microwave magnetron was designed. The device includes a non-synchronous rotating microwave source, a microwave moisture meter and other structures. Through the design and improvement of the internal anode loop of the magnetron and the structure of the waveguide antenna, the antenna gain of the waveguide is improved, so that the microwave energy transmitted by the magnetron is more extensive, and the microwave energy is more evenly distributed in the dry cavity. Through the simulation design of the position and structure of the magnetron in the microwave cavity, the analysis shows that the number of magnetron is controlled in two and the position is relatively distributed, and the drying efficiency can be obtained in the middle of the cavity wall.

KEY WORDS: rice, microwave drying, drying characteristics, temperature field, moisture content, heat and mass transfer, drying device

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 微波干燥技术研究现状.....	1
1.2.2 微波干燥仿真研究现状.....	3
1.2.3 干燥动力学研究现状.....	4
1.2.4 传热传质模拟研究现状.....	5
1.3 研究内容及目标.....	5
1.4 章节研究安排.....	6
第二章 稻谷微波干燥特性实验及正交工艺分析.....	8
2.1 引言.....	8
2.2 稻谷干燥理论基础.....	8
2.2.1 稻谷结构参数.....	8
2.2.2 稻谷干燥参数.....	9
2.2 材料与方法.....	10
2.2.1 材料.....	10
2.2.2 方法.....	10
2.2.3 仪器与设备.....	10
2.3 稻谷的多因素真空干燥特性.....	13
2.3.1 不同微波功率对稻谷微波干燥特性的影响.....	13
2.3.2 不同真空度对稻谷微波干燥特性的影响.....	15
2.3.3 不同初始温度对稻谷微波干燥特性的影响.....	17
2.3.4 不同真空保持时间对稻谷微波干燥特性的影响.....	19
2.3.5 不同装载量对稻谷微波干燥特性的影响.....	21
2.4 稻谷正交实验分析研究.....	23
2.5 本章小结.....	27

第三章 基于 LS-SVM 算法的稻谷含水率预测模型.....	28
3.1 稻谷干燥动力学研究.....	28
3.1.1 微波干燥数学模型.....	28
3.1.2 最小二乘支持向量机模型.....	29
3.2 稻谷微波干燥含水率预测模型.....	31
3.2.1 基于 LS-SVM 算法的稻谷干燥模型.....	31
3.2.2 干燥动力学模型结果分析.....	32
3.3 网格搜索和交叉验证参数寻优.....	38
3.4 本章小结.....	39
第四章 稻谷微波热电场数值解析.....	40
4.1 稻谷微波干燥仿真研究意义.....	40
4.2 稻谷干燥三维几何模型.....	40
4.2.1 三维模型理论假设.....	40
4.2.2 干燥腔体几何模型.....	41
4.3 稻谷干燥仿真边界条件及网格划分.....	42
4.3.1 边界条件.....	42
4.3.2 微波传热传质方程.....	42
4.3.3 微波腔体电磁场方程.....	43
4.3.4 干燥腔体网格划分.....	45
4.4 微波干燥仿真结果分析.....	46
4.4.1 端口数目对电场强度的影响.....	46
4.4.2 双端口布局对场强温度的影响.....	47
4.4.3 四端口布局对场强温度的影响.....	50
4.5 本章小结.....	52
第五章 微波干燥实验装置设计与优化.....	53
5.1 微波干燥装置的设计意义.....	53
5.2 整体结构仿真及设计.....	54
5.2.1 设计创新点.....	54
5.2.2 干燥装置波导端口仿真设计.....	54

5.2.3 干燥装置结构设计.....	57
5.2.4 干燥装置工作原理.....	59
5.3 主要零部件结构设计.....	60
5.3.1 磁控管结构设计.....	60
5.3.2 波导天线设计.....	63
5.3.3 微波干燥腔体内部设计.....	64
5.4 具体实施方式.....	65
5.5 本章小结.....	66
第六章 总结与展望.....	67
6.1 总结.....	67
6.2 展望.....	68
参考文献.....	69
攻读硕士期间获得的科研成果.....	76
致谢.....	77

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

水稻作为世界上最重要的主食之一，主要以精米的形式消费。近几年叠加耕地面积减少，劳动力短缺的营收，自 2018 年以来我国稻谷种植面积开始呈现下降的态势^[1]。据资料显示，2022 年我国稻谷播种面积为 29450 千公顷，同比下降 1.6%。2022 年稻谷单产 7079.6 公斤/公顷，同比下降 0.5%；产量 20849.5 万吨，同比下降 2.0%^[2]。国家粮油信息中心 6 月份预计，2022/23 年度稻谷食用消费 15950 万吨，比上年度下降 50 万吨^[3]。2020 年，我国大米加工业的平均出米率为 64.5%，而日本等加工技术先进国家的出米率水平一般 70%左右^[3]。因此，对于粮食储备干燥等环节亟待加强粮食减损技术支撑^[4]。

稻谷作为一种对温度敏感性强的粮食，其具有吸湿和失湿的特性，当环境湿度高时，稻谷会吸收周围的水分，增加其水分含量若稻谷在储存过程中暴露在湿润的环境中或无适当的通风，则水分不易挥发，稻谷湿度将保持较高水平，从而易导致霉变的发生，霉变会产生有害物质，如黄曲霉素等，对人体健康和食品安全造成威胁^[5]。因此稻谷的干燥存储尤为重要，通过进行干燥处理，可以减少水分含量，减少霉变和发酵的风险，从而保持稻谷的质量和安全性。进而影响米粒的完整性和碾米过程中的碎米率，最终影响米的出率和经济价值。目前水稻干燥工艺，如多级加热和循环式干燥，多采用低温慢速干燥策略以减少爆腰率并保持稻谷品质，但这种方法能耗较高，且不适合快速干燥需求。因此，研究在确保稻谷干燥品质的同时，能提高生产效率的干燥技术是重要手段^[7]。随着我国稻谷行业的稳定发展，收获后的稻谷进行及时干燥处理已经成为稻谷产后加工的必要环节^[8]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 微波干燥技术研究现状

微波真空干燥技术相对于传统干燥技术而言是一种新型干燥技术，其集微波

和真空干燥为一体,具备了微波以及真空干燥的一系列优势,相比传统热风干燥,晾晒干燥,时间更短效率更高,干燥周期大大缩短,在干燥过程中减少了干燥物料的损耗,其干燥效果可能是普通干燥方式的数倍^[9]。在微波加热过程中,热量均匀分布在流动的液体或固体的整个体积中^[10]。这与传统的热加工形成对比,传统的热加工依赖于热表面的传导和对流,将能量传递到产品中^[11]。微波加热非常迅速,材料是通过能量转换而不是传统技术通过能量转移来加热^[12]。

Huang D 等研究了油籽微波间歇干燥特性,发现干燥时间比热风干燥缩短 4 倍以上,能耗降低数百倍。但易造成油茶种子烧焦,从而影响油茶油的品质^[13]。Ye S 等发现真空干燥是铁线莲干燥的最佳选择,既保留了铁线莲原有的颜色和外观,又获得了理想的香气^[14]。在微波干燥中,电磁辐射引起食品材料的加热直接和体积由于极性分子在其中的搅拌。微波真空干燥机干燥后产品质量的普遍提高可能是由于食品内外层压力梯度增大和电磁波对物体内部直接加热作用的综合作用^[18]。微波真空干燥过程中,能量被食品物料内部的水分吸收转化为热能。因此,在物料中心产生较大的蒸汽压力,导致更快的除湿^[19]。郑先哲等研究了微波浆果干燥在不同微波强度下的温度,水分等因素解决连续式微波干燥品质和效率的关系^[20]。张倩等研究了裙带菜微波真空干燥中的最佳工艺参数,对其热质进行了优化与建模。为了优化干燥效果并提升干燥物料的品质,对微波干燥的均匀性进行深入研究成为关键步骤^[21]。

李盼盼等阐述了微波真空干燥技术的原理、优点,分析了影响微波真空干燥的因素、微波真空干燥特性及其动力学模型^[22]。李瑞敏等从稻谷干燥动力学、稻谷品质、外观、结构及有害生物方面重点归纳了微波干燥对稻谷的影响^[23]。王钰超等针对木材干燥设计了隧道式干燥设备,探究了波导数目组合方式对木材干燥中电场强度的影响,研究了两行两列波导布置方案以改善木材品质^[24]。Jumrat S 等建造了用于干燥鲢鱼金枪鱼的微波干燥系统,微波功率的校准可以调整用于干燥鲢鱼金枪鱼的功率^[25]。张斌尧等设计了一种微波耦合干燥装置,通过改变磁控管高压回路的电容,使磁控管高压回路的阻抗发生改变,以达到微波发出功率的线性可调^[26]。金鑫等设计了一种适用于干燥白心红薯的微波干燥装

置,对物料进行间歇式干燥,能对物料的微波干燥进行精准的控制^[27]。王磊等判断了矩形磁控管波导开启模式为平行排列,且在长边方向上中心点间距为 $1/4$ 微波波长的奇数倍时提高了整个料层的电场均匀性^[28]。郑先哲等研究了泡沫树莓气体渗流、气相导热、液相导热等系数变化对其干燥的影响,得到了当气流速度小于 1.5m/s 时,气流速度与干燥均匀性呈显著正相关^[29]。徐亚元等通过研究考察不同蔗糖渗透液质量分数,微波密度,时间温度等因素对胡萝卜微波预干燥水分均匀性、色泽均匀性及压差膨化干燥后产品的收缩率、脆度、色差和总类胡萝卜素保留率的影响,以期获得较优的胡萝卜脆片干燥工艺^[30]。杨微等在现有的微波干燥设备上增加了热风机,提高了新型微波干燥设备的效率^[31]。宋月等研究了微波泡沫干燥浆果的干燥均匀性,发现微波泡沫干燥条件(包括微波强度、物料厚度和风速)对浆果果浆干燥均匀性影响显著^[32]。

Wang S 等研究考察了磁控管排列和微波功率组合对胡萝卜干燥均匀性的影响。干燥均匀性受磁控管位置和数量的影响^[33]。Pu Y Y 等采用三种干燥方法对芒果切片进行干燥脱水助高光谱成像技术,结合多变量数据分析和图像处理,对不同干燥方式下芒果切片的水分含量分布进行了可视化,发现当 HAD 和 MVD 结合使用时,干燥均匀性得到改善,从而产生水分分布均匀的干燥产品^[34]。韩俊豪等对生鲜花生进行了预处理,结果表明适宜功率强度的微波处理可有效延缓生鲜花生的衰老和品质劣变^[35]。陈敬举等将微波干燥装置与转筒干燥相结合利用转筒的转动可克服微波干燥的不均匀性,同时可充分发挥微波干燥速度快,转筒干燥处理量大等优点^[36]。李伊帆等提出一种基于双端口非同步旋转结构的加热方法,降低端口间的互耦,分析了双微波源端口之间的旋转速度对端口间的互耦和加热均匀性的影响,实现了端口间低互耦、高均匀性的加热,同时极大提高了微波加热的效率^[37]。

1.2.2 微波干燥仿真研究现状

微波干燥仿真研究是一种涉及多物理场耦合的方法,其中包括电磁场和温度场等相互作用。尽管实验能够探究物料在干燥过程中的规律,但由于实验方法的局限性,部分物料在微波腔体内的干燥情况可能不太明显,变化较小,使得对某些物料的干燥特性的研究受到一定限制。为深入研究微波干燥过程中物料的形状,

性质等变化,采用多项多孔介质模型,并对仿真中得到的各项数值进行了验证和分析。邢文龙通过三维电磁仿真软件 HFSS 对 2 种常见微波谐振腔进行仿真研究,针对单馈口、双馈口和四馈口 3 种激励方式提出 8 种布置方案,经过对电场强度分布和电场最值的分析,选取出谐振腔最合适的馈口布置方案^[38]。张紫恒等通过仿真分析表明干燥机磁控管采用"三二三排布方式"、微波作用距离为 250mm 时电磁场分布的均匀性更好^[39]。肖瑶等通过仿真分析油菜籽有效分离的干燥筒出口气流场特性,利用毕托管对干燥筒出口气流场风速进行测量,验证了该仿真模拟方法的正确性^[40]。Song F 等设计并评估了多物理场旋转仿真模型和间歇微波干燥模式,尝试了一种新颖的阶段间歇时间控制策略,在每个干燥阶段采用适当的策略。用这种方法可以获得最佳的干燥效果^[41]。考察了物料配比、反应温度、反应时间等因素对材料吸水倍率与接枝效率的影响^[42]。Fu W 等为了提高胡萝卜干的品质,减少过热面积和过度干燥问题,研究采用多物理场模拟和微波干燥测试系统相结合的方式进行研究^[43]。

1.2.3 干燥动力学研究现状

对微波干燥中物料的干燥特性进行分析,建立相对应的干燥模型是研究干燥动力学的重要途径之一。对稻谷的干燥工艺以及工艺参数的选择具有重要的意义。Süfer Ö 通过测定苦橙果实的干燥和颜色动力学、粉末性质、总酚含量(TPC)和抗氧化行为,研究了苦橙果实的微波干燥^[44]。Zhou Y 对菠萝片进行微波真空干燥,研究了微波功率度对干燥动力学和传热传质特性的影响。采用数值模拟和台架试验研究了干燥过程中微波体积加热与温湿度的变化特性,并选取了最佳干燥模型^[45]。Béttega R 等考察了微波输出功率对预处理胡萝卜切片干燥的颜色变化动力学以及一些理化和生物活性组成特征的影响,使用数学模型对颜色变化的分析表明, L^* 、 a^* 和 b^* 都拟合到零阶和一阶动力学模型中^[46]。Hadjout-Krimat L 进行了机器学习和数学建模技术,以模拟微波或常规空气干燥下豌豆荚的薄层干燥动力学^[47]。研究了 9 种不同微波输出功率和 5 种不同通风烘箱温度对干燥动力学的影响。Guemouni S 研究了番茄切片的干燥特性,旨在利用对流和微波方法预测番茄切片的干燥动力学^[48]。甘婷等采用 6 种常见的数学模型对微波干燥进行非线性拟合,得到芒果微波干燥动力学模型^[49]。沈素晴通过青香蕉微波干

干燥试验,考察了青香蕉在不同微波功率密度下干燥特性,建立了青香蕉干燥动力学模型,并发现 Page 模型拟合度较高可为描述青香蕉微波干燥过程中水分随时间的变化规律^[50]。

1.2.4 传热传质模拟研究现状

传热传质过程往往伴随着流体流动、化学反应等现象,因此多物理场耦合模拟成为了一个研究热点。Bhamani M 研究了 3 种空心多孔介质的流功能、温度分布和浓度畸变,研究发现具有半圆形叶片的空心比具有方形和三角叶片的空心具有更高的导热热^[51]。王莹进行了果蔬保鲜贮藏的传热传质数学模拟及实验研究,将数值模拟与实验结果进行对比分析,得到龙丰果真空超冰温储藏的最佳技术参数^[52]。王雪芹研究了非稳态传热和质量守恒,建立了球形果蔬真空冷却的温度和质量数学模型,并以卷心菜为例进行了模拟和实验,缩短了真空周期^[53]。周峰模拟转化过程中放热化学反应与多组分流动耦合传热传质的协同作用,探究了该体系中流场与温度场、浓度场的协同作用^[54]。本研究通过运用 COMSOL 多物理场仿真平台,结合稻谷的生物学属性与麦克斯韦方程组以及热传导方程,开发了一个集电磁场、温度场与物质扩散传递于一体的三维耦合模拟模型。该模型专门针对稻谷在微波干燥过程中的热量与质量传输进行仿真分析,揭示了籽粒内部的温度变化规律,并通过对比实验结果来验证模型的准确性与可靠性。

1.3 研究内容及目标

(1) 通过对稻谷的结构和特性对其参数进行预估,研究分析了稻谷的微波干燥特性,确定稻谷传热传质的模型,应用了稻谷的谐振腔及内热源理论进行分析研究,建立了稻谷干燥期间在腔体内部的边界条件,为稻谷干燥装置的改进与仿真模拟提供理论依据。

(2) 通过微波真空干燥的实验方法,测定了稻谷在相同时间内不同真空度、微波功率、初始温度,装载量的实验数据,采用正交实验的方法进行数据拟合分析,研究发现了稻谷真空干燥因素影响大小顺序为初始温度、微波功率、真空度、装载量,进一步阐述了稻谷的干燥参数对微波干燥特性的影响。

(3) 为实现稻谷的含水率预测,建立多个干燥数学模型进行分析对比,应

用了 LS-SVM 算法, 在 Matlab 环境下进行仿真分析, 通过实验测量的 4 个真空干燥工艺参数(初始温度、真空度、微波功率、装载量)为输入, 以稻谷含水率作为输出, 从而构建 4 输入 1 输出的含水率预测模型。利用该模型分析了在不同因素条件下进行真空干燥对稻谷的影响。

(4) 利用 COMSOL 软件, 建立了稻谷微波干燥过程中传热传质和腔体内电磁场的多项耦合模型。通过模型将稻谷的干燥特性、麦克斯韦方程组和传热传质方程相互关联, 模拟稻谷内部温度和水分的分布变化规律, 反映了真实的干燥环境和稻谷生理特性。通过仿真结果与实验结果的对比发现变化趋势相似。表明了建立的三维耦合模型能够较好地应用于稻谷的微波干燥。

(5) 为优化微波干燥腔体的结构及性能, 设计了一种可调整微波磁控管工作方式的微波真空装置。装置包括了非同步式旋转微波源、小型圆盘式微波源、弧形干燥腔体, 微波水分仪等结构。通过对磁控管内部阳极回路及波导天线的结构进行设计改良, 提高波导的天线增益使磁控管发射的微波能覆盖范围更广泛, 微波能较为均匀分布在干燥腔体内。通过对微波腔体磁控管位置及结构进行仿真设计, 分析得出磁控管数目控制在两个且位置处于相对分布, 并处于腔体内壁中部位置可获得较强的干燥效率。

1.4 章节研究安排

本研究利用微波电磁场理论和传热传质学原理, 构建了稻谷微波干燥的理论框架。通过搭建稻谷微波干燥实验平台, 以稻谷作为研究样本, 探究了其在微波干燥过程中的各项指标变化。并基于此建立了一种稻谷微波薄层干燥的数学模型, 并针对微波功率、初始温度以及装载量等因素对干燥特性的影响进行了模型优化。进一步对稻谷在微波干燥过程中的水分和温度分布进行了仿真分析并根据仿真数据及对比得出最佳干燥工艺。研究目标是设计并实现了一套稻谷微波干燥的实验装置, 在仿真及理论实践基础上建立了干燥腔模型, 完成了干燥装置结构设计上的优化, 旨在深化对稻谷微波干燥机理的理解并提高干燥过程的效率, 本文研究路线如图 1-1 所示。

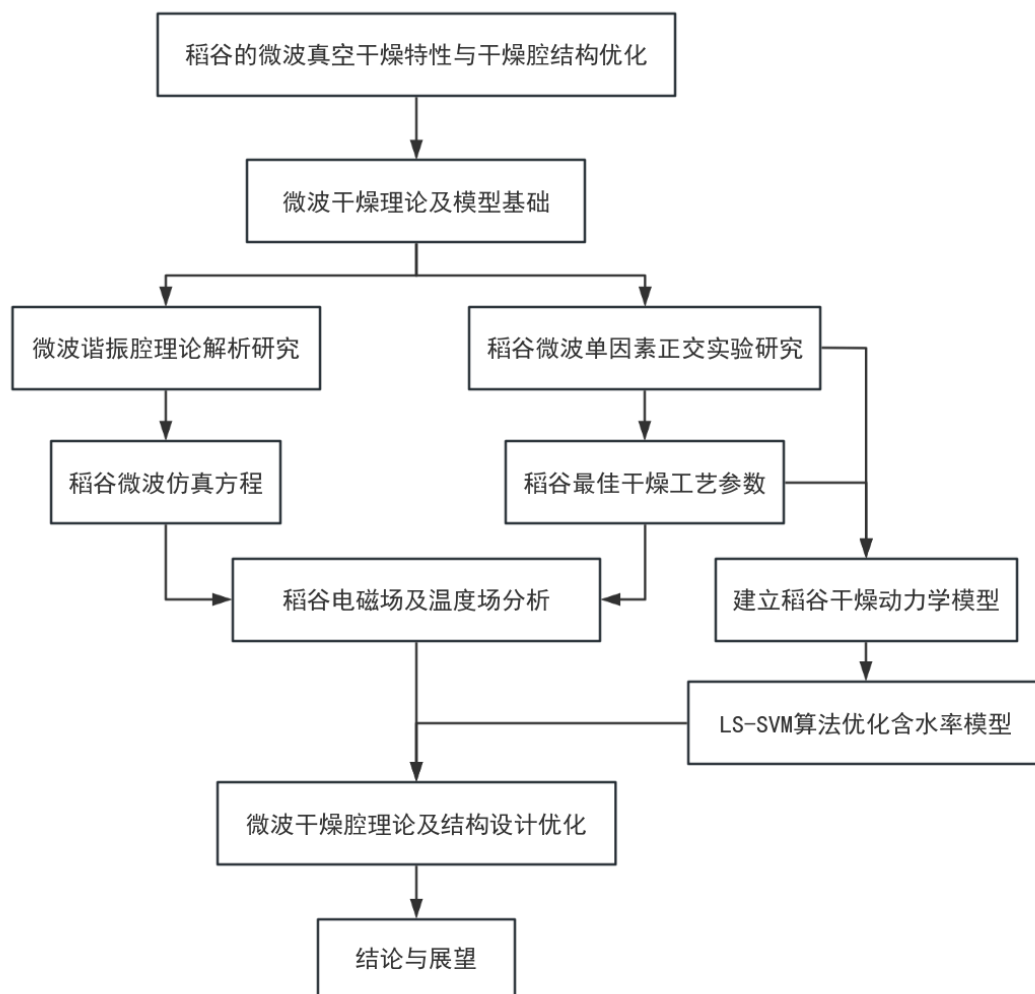


图 1-1 论文研究思路框架图

第二章 稻谷微波干燥特性实验及正交工艺分析

2.1 引言

通过采用多因素正交实验设计,研究了稻谷在不同干燥参数下的干燥特性并对数据进行分析解释,阐述了稻谷在干燥期间的生理特性变化对干燥下的影响,由于微波干燥过程中传热传质没有固定的理论方程,稻谷的含水率呈现非线性表征,当前稻谷干燥多数停留在含水率的监测中,稻谷的多项干燥参数并没有受到过分关注,使得稻谷的干燥特性相对于常规物料了解较少。由于微波稻谷具有多种优点,如何充分发挥微波在稻谷干燥中的优势,目前正在进行研究,因此在这个关键过程中是深入了解干燥过程中各项参数指标对干燥特性的影响。

本章深入研究了利用微波真空干燥技术对稻谷进行干燥处理的过程。在实验中,以稻谷为研究对象,通过改变不同的工艺参数,系统地分析了这些参数对稻谷微波干燥特性的具体影响。这些工艺参数主要包括微波功率、初始温度和间歇时间。微波功率的高低直接关系到能量的输入速度,进而影响稻谷中水分的蒸发速度。通过调整不同的微波功率水平,以确定最适宜的微波功率设置,使稻谷达到理想的干燥效果。间歇时间,即干燥过程中的停止和启动周期,也是影响干燥效果的一个重要因素。通过调整间歇时间,可以控制稻谷在干燥过程中的热量累积和水分移除速度,进而影响整个干燥过程的均匀性和效率。本研究采用了干燥数学模型来模拟稻谷干燥过程。通过对比实验数据和模型预测结果,调整模型的参数,以实现稻谷干燥过程的精确描述和优化。稻谷的微波真空干燥工艺提供科学的理论依据,为后续的数据仿真分析奠定坚实的理论基础,从而优化干燥工艺,提高干燥效率,确保稻谷的质量和储存稳定性。

2.2 稻谷干燥理论基础

2.2.1 稻谷结构参数

稻谷籽粒的内部存在大量孔隙,空气和水分在稻谷籽粒里内部扩散和传递,稻谷的孔隙率比例如式 2-1 所示^[56]:

$$\begin{cases} \rho_t = \frac{m_t}{v_t} \times 100\% \\ \rho_b = \frac{m_b}{v_b} \times 100\% \\ \varepsilon_R = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}\right) \times 100\% \end{cases} \quad (2-1)$$

式中, ρ_t 为物料真实密度, m^3 ; ρ_b 为物料体密度, kg/m^3 ; m_t 为物料粉末质量, kg ; v_t 为物料切碎后体积, m^3 ; m_b 为物料质量, kg ; v_b 为物料体积, m^3 。

2.2.2 稻谷干燥参数

稻谷含水率分为干基, 湿基含水率。干基含水率如式 2-2 所示^[57]:

$$M_g = \frac{W}{G_g} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中, M_g 为干基含水率, %; W 为物料中水的质量, g ; G_g 为干物质质量, g 。

稻谷内部水分随干燥过程在籽粒内部扩散的湿基含水率如式 2-3 所示^[58]:

$$M = \frac{(m_i - m_0)}{m_i} \times 100\% \quad (2-3)$$

式中, M 为湿基含水率, %; m_i 为 i 时刻物料质量, g ; m_0 为初始物料质量, g 。

干基含水率是以干物质质量为分母, 干物质质量在干燥过程中基本保持不变, 便于计算, 因而在文中出现的谷物水分非做说明均指干基含水率。水分比用来描述一定干燥条件下物料的剩余含水率。水分比如式 3-4 所示^[59]:

$$MR = \frac{M_g - M_e}{M_0 - M_e} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中, MR 为水分比, %; M_e 为稻谷的平衡含水率, %; M_0 为初始含水率, %。

干燥速率通常表示为单位时间内失去的水分量与初始含水量的比率, 稻谷的微波干燥速率计算方法如式 2-5 所示^[60]:

$$DR = \frac{M_{g,t-dt} - M_{g,t}}{dt} \quad (2-5)$$

式中, DR 为干燥速率, %/min; $M_{g,t-dt}$ 为样品在 $t-dt$ 时刻的干基含水率, %; $M_{g,t}$

为样品在 t 时刻的干基含水率，%。

2.2 材料与方法

2.2.1 材料

选自湖南益阳同一位置所选育的常规湘早籼 45 号中熟早籼稻。

2.2.2 方法

确定稻谷的干燥参数（微波功率、真空度、初始温度、真空保持时间，装载量），进行单因素实验设计分析各项参数的最优数值，并通过实验数据建立正交表对实验结果进行正交组合，研究分析每个组合稻谷的干燥速率及爆腰率得出最优干燥参数。取出稻谷样品，选择稻种颗粒饱满且不含有裂纹的籽粒，先将其在常温环境静止一天以祛除保存时候存在的湿气，再把稻谷放入水中浸泡 6 个小时后将其取出，并用纸吸收稻谷表面存在的水分。通过不同浸泡时间来测定每个时间段稻谷的含水率，确定稻谷初始含水率，并通过恒温水浴锅可获得不同初始温度的稻谷。

微波干燥各项参数如表 2-1 所示。

表 2-1 稻谷微波干燥参数

参数	微波功率 /W	初始温度 /°C	真空度/kPa	真空保持 时间/min	装载量/g
1	200	30	20	2	40
2	400	35	40	4	80
3	600	40	60	6	120
4	800	45	80	8	160

2.2.3 仪器与设备

实验装置主要选取 Ti32 红外热成像仪；RWBZ-08S 微波真空干燥箱；AB204-N 电子分析天平；LDS-1G 电容式谷物水分测量仪；HH-4 数显恒温水浴锅。

图 2-1 所示的 Ti32 红外热成像仪是一种先进的光学设备，能够通过捕捉并转换物体表面发出的红外辐射来生成热图像。它利用了物体因其温度而产生的红外辐射的特性，将这些辐射转换为可见的图像，展现出物体表面不同区域的温度分布情况。基于热辐射的物理原理，允许在不接触物体的情况下，快速、准确地识别出温度异常或热量分布的变化，通过红外热成像仪利用特殊的红外探测器（通常是热电偶或微波探测器）来感知物体发出的红外辐射，然后通过镜头聚焦并转换为电信号。这些电信号经过处理后形成热图像，不同亮度和色彩代表了不同温度的区域。本研究通过红外热成像仪观察稻谷干燥过程中的温度变化情况。



图 2-1 红外热成像仪

图 2-2 所示的 RWBZ-08S 微波真空干燥箱运用微波能量与真空环境相结合的技术手段，并可调整多种工作参数的选择，通过微波辐射在物质内部的迅速吸收与转化为热能，从而促使物料内部水分分子快速挥发蒸发。微波辐射能够以非接触方式直接作用于物料内部，引发水分分子的极化转动和摩擦运动，导致温度升高，同时真空环境降低了水分沸点，有利于水分的挥发，使得干燥过程更加高效迅速。此工艺结合微波辐射与真空环境的优势，实现了对物料内部水分快速、均匀、节能地蒸发，从而达到高效干燥的目的。



图 2-2 微波真空干燥箱

图 3-3 所示的 AB204-N 电子分析天平利用电磁感应原理和质量与重力的关系，通过传感器检测托盘上物体的质量，将其转换为电流变化，并通过内部处理器计算后将结果显示在屏幕上，实现了对物体质量的精确测量与显示。图 2-4 所示的 LDS-1G 电容式谷物水分测量仪电通过测量谷物中的电容变化来估算其含水量。当谷物样品置于传感器中时，谷物与传感器之间形成一个电容器。含水量较高的谷物会导致电容器的电容值增加，因为水分具有较高的介电常数。本研究通过测量这种电容值的变化来推断稻谷的水分含量。



图 2-3 电容式谷物水分测量仪

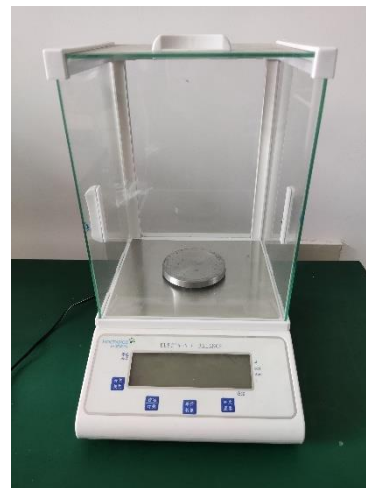


图 2-4 电子分析天平

图 2-5 所示的 HH-4 数显恒温水浴锅利用电热器加热水槽中的水，并通过内置的温度传感器监测水温。控制系统根据传感器反馈的实时温度数据，调节电热器的加热功率，使水槽中的水保持恒定的温度。数显显示屏将实时的温度信息以

数字形式显示，可以通过控制面板调节设定温度，确保在需要的温度范围内稳定加热，实现精准、稳定的恒温水浴。



图 2-5 数显恒温水浴锅

2.3 稻谷的多因素真空干燥特性

2.3.1 不同微波功率对稻谷微波干燥特性的影响

在进行稻谷的微波真空干燥实验时，设置了固定的初始条件：初始温度为 30℃、真空保持时间为 2min、真空度为 20kPa、装载量为 40g。通过采用微波功率分别为 200W、400W、600W 和 800W 的条件进行稻谷的微波真空干燥。分析干燥含水率曲线如图 3-6 所示，在相同初始含水率下，不同微波功率条件下稻谷的最低含水率分别为 12.1%、11.3%、11%和 10.5%。初期干燥阶段 0-2min 时段显示各微波功率条件下稻谷含水率迅速下降，随着干燥时间的增加，含水率的降低速率逐渐减缓，呈现出 4-8min 时段的平缓降低趋势。总体趋势表明，随着微波功率的增加，相同时间内稻谷的含水率降低速率增加。结果清晰地阐释了微波功率对于稻谷含水率的降低效果的显著影响。

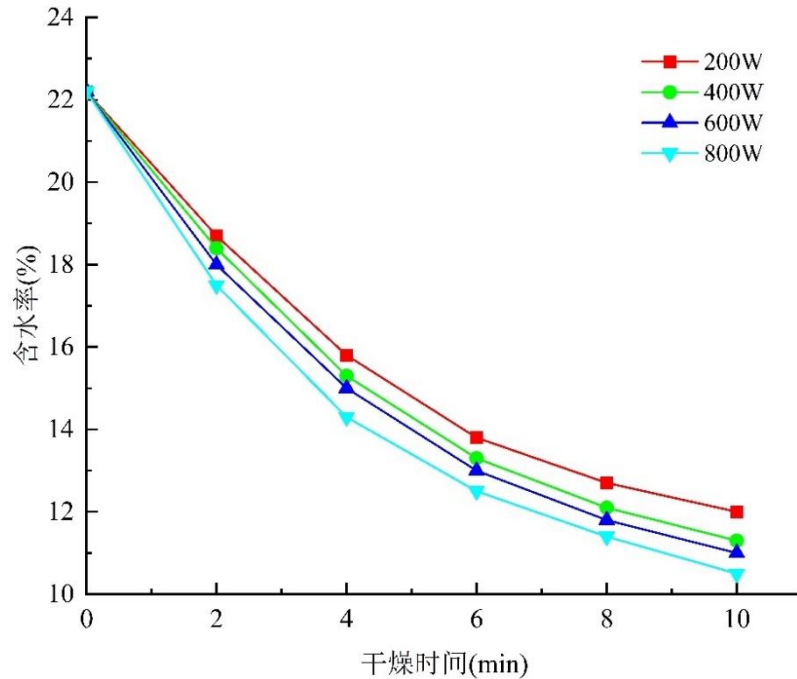


图 2-6 不同微波功率干燥含水率曲线

不同微波功率稻谷的干燥速率如图2-7所示,由图可知稻谷在200W、400W、600W, 800W 的条件下最高干燥速率为 1.24%/min、1.38%/min、1.7%/min, 1.81%/min。分析发现随着微波功率的增加,稻谷的干燥速率也相应提高。微波能量的增加导致稻谷内部水分更快地被加热并蒸发,加速了干燥过程,不同功率下的干燥速率均出现先上升后下降的趋势。表明在干燥初期,随着微波功率的增加,水分蒸发速度加快,干燥速率迅速上升。但随着干燥过程的进行,稻谷内部的水分逐渐减少,导致干燥速率开始下降是由于稻谷内部水分的持续蒸发,剩余的水分变得更加难以被微波能量加热到足够高的温度以继续蒸发,因此干燥速率逐渐减慢。

总体趋势上稻谷的干燥过程呈现缓慢衰减的模式。在干燥的早期阶段,微波功率的提高可显著增加干燥速率,随着时间的推移和稻谷内部水分的减少,影响逐渐减弱,干燥速率也随之降低。虽提高微波功率可以加速稻谷的干燥过程,但要实现高效和均匀的干燥效果,需综合考虑功率调整和干燥时间的配合。此外,过高的微波功率可能会导致稻谷局部过热或烧焦,影响最终产品的质量,故实际应用中应选取适宜的微波功率以达到最佳的干燥效果。

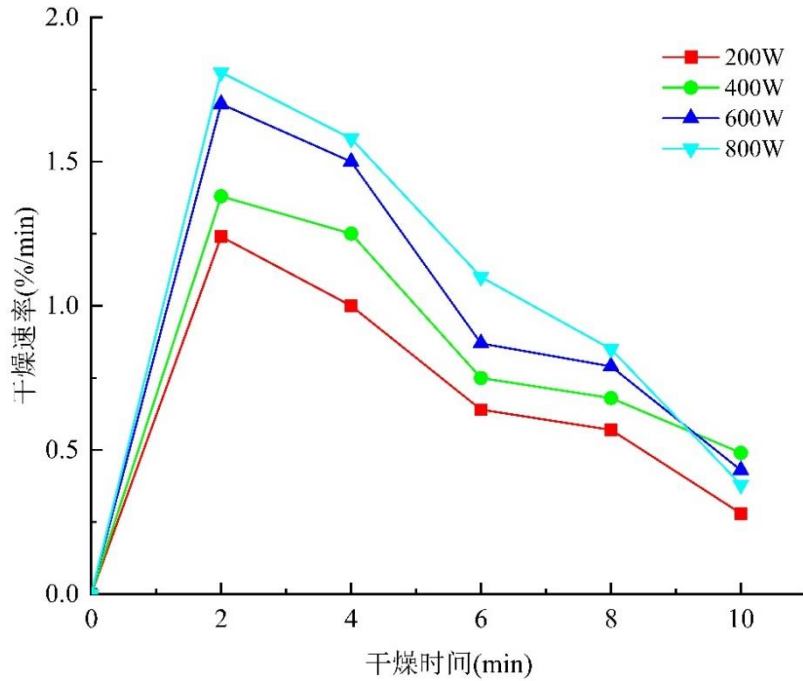


图 2-7 不同微波功率干燥速率曲线

2.3.2 不同真空度对稻谷微波干燥特性的影响

在进行稻谷的微波真空干燥实验时，设置了固定的初始条件：初始温度为 30℃、真空保持时间为 2min、微波功率为 600W、以及装载量为 40g。实验中分别采用了四种不同的真空度条件，分别为 20kPa、40kPa、60kPa 和 80kPa，以观察不同真空度对稻谷干燥过程和最终含水率的影响。

结果如图 2-8 所示，实验表明随着真空度的增加，稻谷的最终干燥含水率逐渐降低。在 20kPa 条件下，稻谷的最低含水率为 12.1%，而在 80kPa 的条件下，最低含水率降至 10.5%。这一结果说明，真空度的提高对于降低稻谷的含水率有明显的促进作用。研究发现在较高的真空度下，空气的密度和气压都会降低，使干燥室内的气体分子数量减少。由于气体分子间的碰撞减少，减少了传热和传质过程中的阻力。在微波能量的作用下，稻谷内部的水分更容易被加热并转化为水蒸气，在低气压环境中，水的沸点降低，水分蒸发所需的能量减少。使水分的蒸发速率加快，提高了干燥效率，降低了干燥过程中的能耗。

在 20kPa 和 40kPa 的较低真空度条件下，稻谷的干燥含水率下降趋势相对平缓。这表明在这些条件下，虽然微波能量可以加速水分的蒸发，但由于真空度较低，气体分子的数量相对较多，传热和传质的阻力仍然存在，影响了干燥速率。

随着真空度的提高至 60kPa 和 80kPa，干燥含水率的降低速度加快，说明高真空度下的干燥过程更为高效。

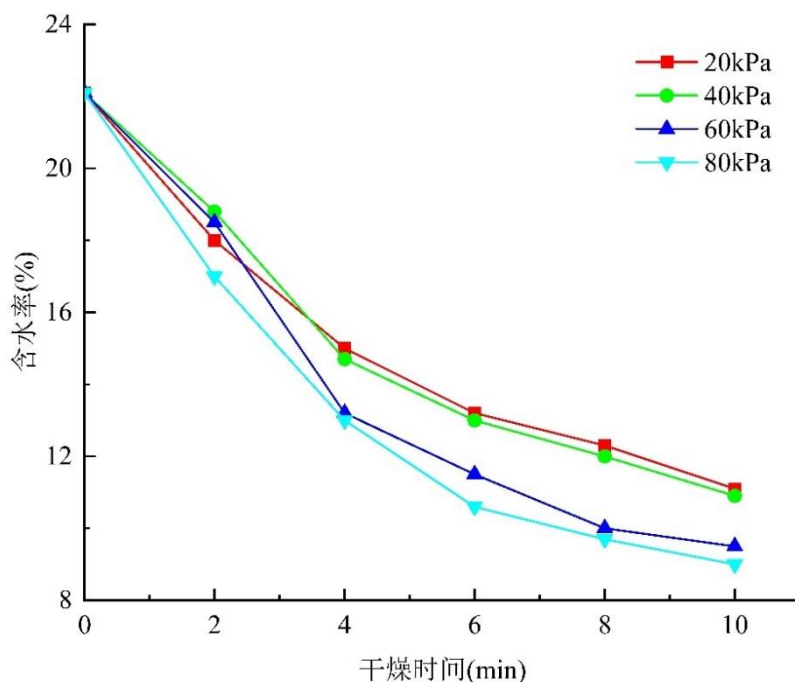


图 2-8 不同真空度含水率曲线

不同真空度的稻谷干燥速率曲线如图 2-9 所示，由图可知不同真空度的曲线变化趋势极其相似，在 20kPa、40kPa、60kPa，80kPa 条件下稻谷的最高干燥速率为 2.27%/min、2.35%/min、2.5%/min，2.7%/min。随着真空度的提升，干燥室内的气体密度降低，减少了空气的抵抗，使微波能量更加容易穿透物料并与物料中的水分子发生作用。微波能量的这种穿透能力使物料内部的水分能够快速被加热并转化为水蒸气，加速了干燥过程。

在干燥的初期 0-2min，由于稻谷含有较多的自由水分，微波能量可以迅速将其加热蒸发，在这一阶段发现干燥速率较快的增加。随着干燥过程的进行，稻谷中的自由水分逐渐减少，转而干燥更难以移动的结合水。在干燥的后期 6-10min，稻谷籽粒内部的水分含量降低，水分的迁移和蒸发变得更加困难，导致干燥速率呈现缓慢的衰减趋势。不同真空度下稻谷的最高干燥速率存在细微的差别，整体差异的绝对值相对较小。表明真空度的增加能够提高干燥速率，但其影响程度并非特别显著。

研究表明微波真空干燥过程中的真空度对稻谷干燥速率有一定的影响。提高真空度能够促进微波能量的穿透能力，加快水分的蒸发，从而在干燥初期实现较

高的干燥速率。然而随着干燥的进行,由于稻谷内部水分的减少,干燥速率逐渐降低,最终趋于平稳。阐述了微波真空度在提高干燥效率方面的影响,同时也表明了在实际应用中需要综合考虑多种因素以优化干燥过程。

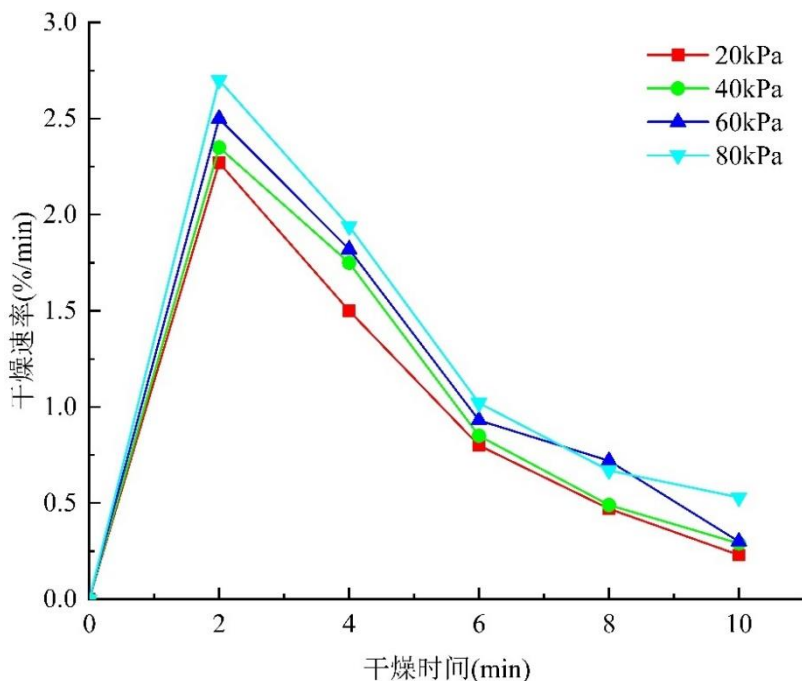


图 2-9 不同真空度干燥速率曲线

2.3.3 不同初始温度对稻谷微波干燥特性的影响

在进行稻谷的微波真空干燥实验时,设置了固定的初始条件:保持微波功率 600W、真空保持时间 2min、真空度 20kPa、装载量为 40g 的条件下,分别采用初始温度 30℃、35℃、40℃、45℃的条件进行稻谷的微波真空干燥。干燥含水率曲线如图 2-10 所示,由图可知在 30℃、35℃、40℃、45℃的条件下稻谷的最低含水率为 11%、10.2%、9.5%, 8.7%。结果反映了初始温度对稻谷微波干燥效率具有显著影响。初始温度较高时稻谷籽粒中的水分子由于温度较高而处于较活跃状态,增加了吸收微波能量并转化为蒸汽的效率。微波能量通过与物料中的水分子直接作用,使其快速加热并蒸发,加快了干燥速率。因此,当初始温度较高时,稻谷的含水率下降得更快,干燥过程也相对较短。反之较低的初始温度意味着水分子的初始能量较低,需要更多的时间来吸收足够的微波能量,以提升至足以蒸发的温度。这导致在低初始温度条件下,干燥速率较慢,达到相同含水率水平所需的时间更长。

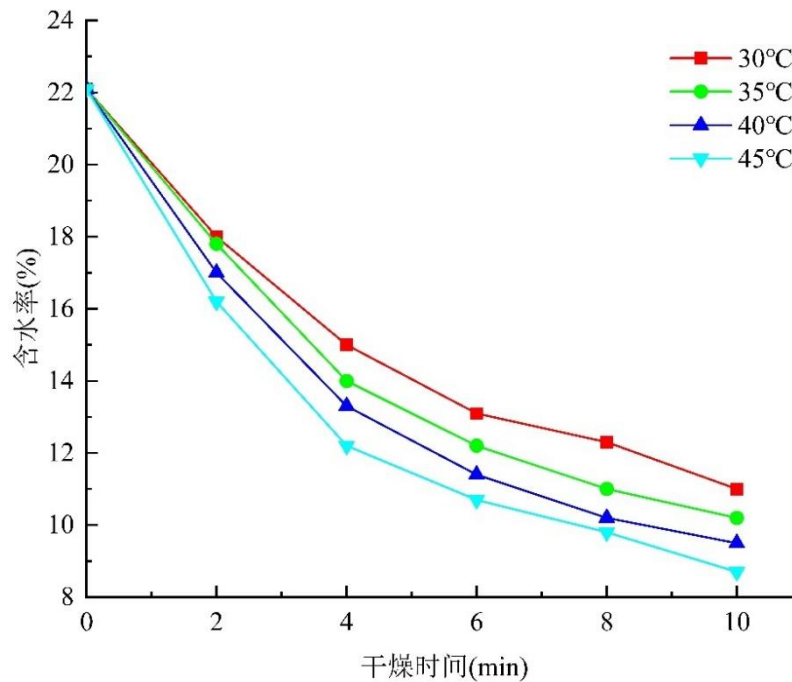


图 2-10 不同初始温度稻谷含水率曲线

不同初始温度的稻谷干燥速率曲线如图 2-11 所示，由图可知在不同初始温度下稻谷的干燥速率曲线呈现较陡的趋势，在 30°C、35°C、40°C、45°C 的条件下稻谷的干燥速率峰值为 1.82%/min、2.1%/min、2.35%/min、2.51%/min。随着初始温度的提高，干燥速率由起初的峰值迅速降低至一个较低的标准，初始温度提高产生的热动力学效应，在较高的初始温度下，稻谷内部的水分子具有较高的初始动能，这使得它们更容易被微波能量加热到蒸发点。因此，水分从稻谷内部向外迁移和蒸发的过程更为迅速，导致干燥速率增加。同时随着物料温度的升高，物料对微波的吸收能力增强，高温可促使水分子进入到能够有效吸收微波能量的状态。研究发现在高初始温度下，微波能量转化为物料内部热能的效率更高，加快了干燥速率。通过研究分析证明了物料的初始温度对微波真空干燥过程有着显著的影响。

研究发现了初始温度在调节微波干燥过程中的重要作用。高初始温度不仅加快了干燥速率，还能够降低最终产品的含水率，这对于提高干燥效率和改善干燥产品的质量具有重要意义。过快的干燥速率可能会导致物料内部和外部水分迁移和蒸发速率不一致，进而可能产生不均匀干燥、裂纹或者其他质量问题。因此在设计和优化微波真空干燥过程时，必须仔细考虑初始温度对干燥特性的影响，以平衡干燥速率和产品质量。

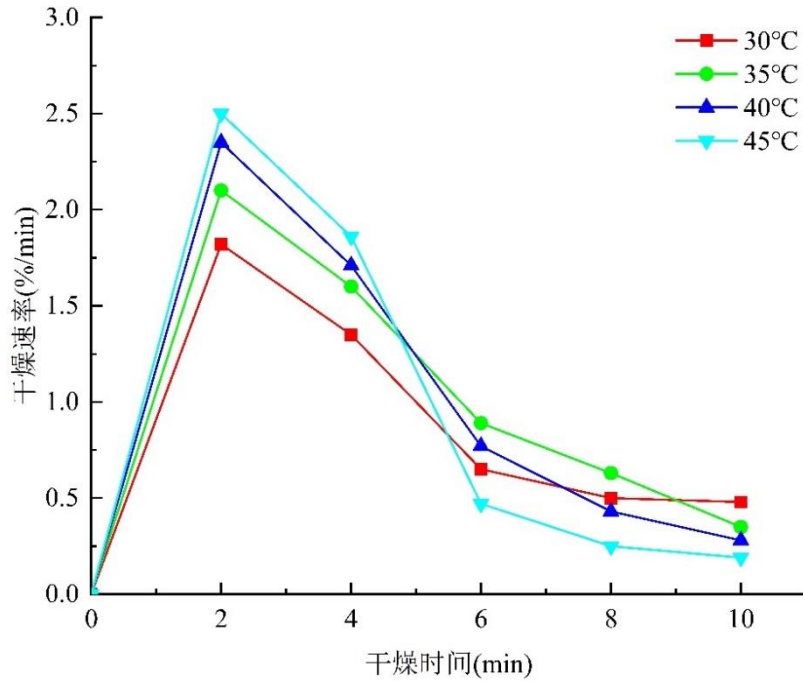


图 2-11 不同初始温度稻谷干燥速率曲线

2.3.4 不同真空保持时间对稻谷微波干燥特性的影响

在进行稻谷的微波真空干燥实验时,设置了固定的初始条件:微波功率 600W、初始温度为 30°C、真空度 20kPa、装载量为 40g 的条件下,分别采用真空保持时间 2min、4min、6min, 8min 的条件进行稻谷的微波真空干燥。稻谷干燥含水率曲线如图 3-12 所示,由图可知在真空保持时间 2min、4min、6min, 8min 的条件下稻谷的最低含水率为 12.4%、12.1%、11.5%, 10.5%。通过实验数据分析发现了真空保持时间与稻谷最终含水率的关系显示的趋势,随着真空保持时间的增加,稻谷的最低含水率从 12.4%降至 10.5%。结果表明,在较长的真空保持时间下,稻谷的水分更加充分地蒸发,从而达到更低的含水率。真空状态下水分沸点降低,在 20kPa 的真空度下,水的沸点低于常压下的 100°C,表明水分可以在较低的温度下开始蒸发。真空保持时间的增加加速了水分蒸发,保持较长时间的真空状态,为稻谷内部水分向外迁移和蒸发提供了足够的时间,使水分充分地 from 稻谷中移除,降低了稻谷的最终含水率。较长的真空保持时间可以降低含水率,同时需考虑干燥的均匀性和物料的质量。过长的真空保持时间可能会导致稻谷干燥过度,进而影响稻谷的质量和后续使用效果。根据实验结果,真空保持时间为 8 分钟时的最低含水率 10.5%接近或可能低于稻谷的安全干燥范围。

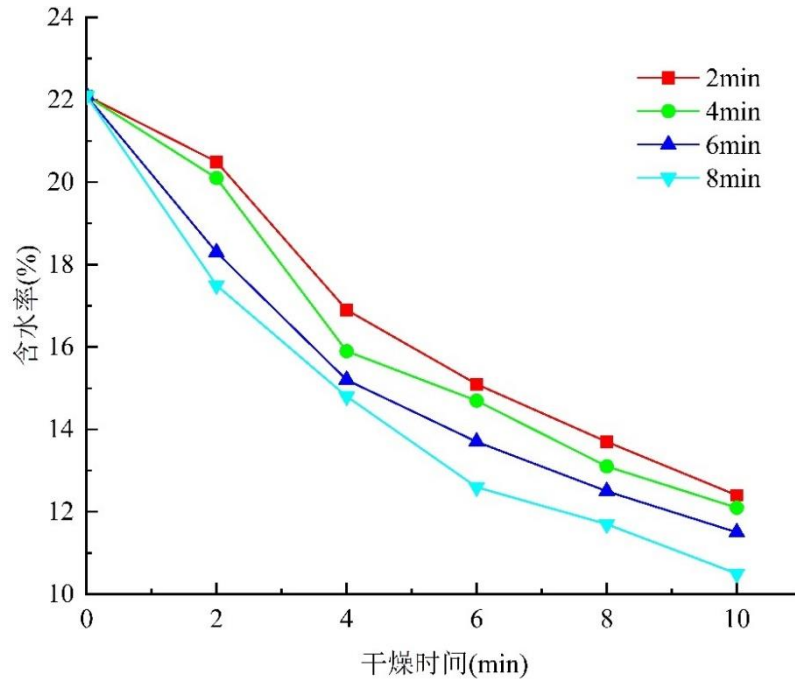


图 2-12 不同真空保持时间含水率曲线

不同真空保持时间的稻谷干燥速率曲线如图 2-13 所示，由图可知不同真空保持时间的条件下，各时段干燥速率趋势不均匀，变化幅度较大，在真空保持时间 2min、4min、6min、8min 的条件下稻谷的干燥速率峰值为 1.24%/min、1.48%/min、2.23%/min、2.66%/min。实验观察发现在长真空保持时间如 6min 和 8min 下，干燥初期 0-2min 的干燥速率迅速上升，之后速率急剧下降。真空保持时间较短如 2，8min 时，干燥速率的绝对差值显著。表明不适当的真空保持时间（无论过短或过长）都可能对干燥质量产生不利影响。过短的真空保持时间可能不足以使物料中的水分充分蒸发，导致干燥不均匀这种速率的快速上升可归因于在真空环境下，水分蒸发的初始驱动力较大，特别是当微波加热使水分迅速蒸发时。随着物料内部水分的减少，由于可蒸发的水分越来越少，干燥速率下降。

研究发现过长的真空保持时间虽然可以增加干燥程度，但能量消耗较大，故在设计微波真空干燥过程时，需找到一个平衡时间确保稻谷干燥得既充分又均匀，同时避免过度干燥导致的质量下降。实际应用中最优的真空保持时间可平衡干燥效率和能源消耗，达到高效的干燥过程。

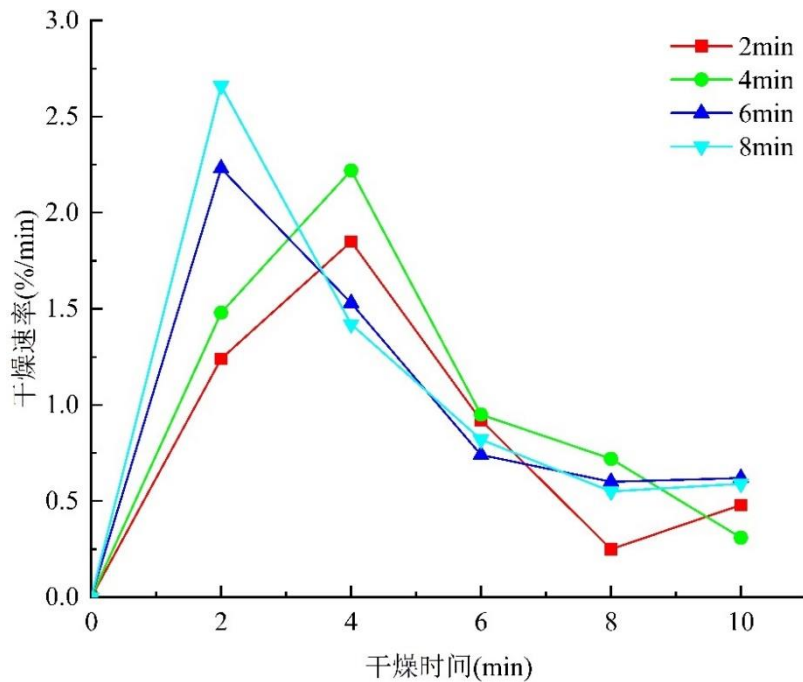


图 2-13 不同真空保持时间干燥速率曲线

2.3.5 不同装载量对稻谷微波干燥特性的影响

保持微波功率 600W、初始温度为 30℃、真空度 20kPa、真空保持时间为 2min 的条件下，分别采用 40g、80g、120g、160g 装载量的条件下进行稻谷的微波真空干燥。稻谷干燥含水率曲线如图 3-14 所示，由图可知在装载量为 40g、80g、120g、160g 的条件下稻谷的最低含水率为 10%、11.1%、10.9%、11.2%。通过数据分析研究的处初始物料的装载量对微波干燥存在较大的影响，据实验数据发现随着稻谷装载量的增加，其干燥过程中含水率的降低幅度逐渐减小。表明较小的装载量有助于实现更高的水分去除率，即含水率降低得更快。研究分析较大的装载量意味着需要移除更多的水分，微波能量在物料内部的传递和水分的蒸发过程需更长时间，增加达到特定含水率所需的干燥时间。同时较大的装载量可能导致物料内部以及不同区域间的温度和湿度分布出现不均匀现象。这种不均匀性可能导致部分区域的稻谷受热较快，而其他区域则受热较慢，从而影响干燥效果的一致性和效率。在微波干燥过程中，微波能量的有效穿透和分布对水分的快速蒸发至关重要。研究表明较小的装载量意味着微波能更均匀、更有效地穿透物料，从而加速水分的蒸发。

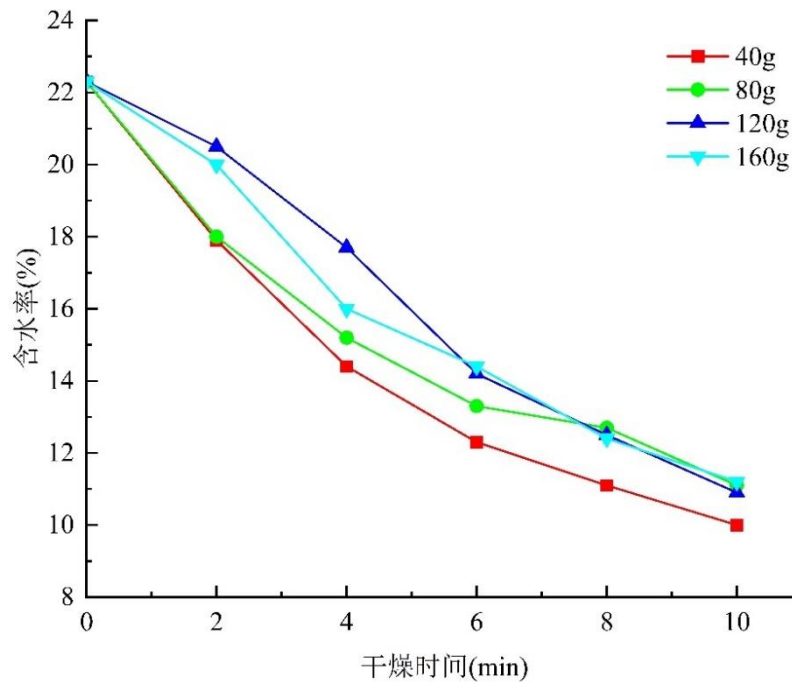


图 2-14 不同装载量含水率曲线

不同装载量的稻谷干燥速率曲线如图 2-15 所示,由图可知在稻谷微波干燥实验中,通过对不同装载量 40g、80g、120g, 160g 下的干燥速率进行观察与分析。实验结果显示在较高装载量(如 160g)下,干燥过程在初期展现出较高的干燥速率。这一现象可归因于在干燥初期,由于物料覆盖较广,微波能量主要作用于材料的外围,而内部区域受热较少,产生了表面快速蒸发水分而内部水分迁移较慢的情况,导致了干燥初期速率的虚高。随着干燥过程的进行,外部水分迅速减少后,微波穿透到物料内部的能力受限,使得干燥速率开始下降。较高的装载量不仅影响了干燥速率的初始表现,而且还可能导致干燥过程中物料内部与外部的干燥程度出现显著差异,降低干燥的均匀性。干燥速率与装载量之间的关系及其对干燥效率的影响。

研究应当关注如何通过精确控制微波功率、真空度、温度控制以及装载量等参数的优化组合,达到最佳的干燥效果。此外,对于微波干燥过程中物料内部温度和湿度分布的深入研究,将有助于更好地理解干燥机制,通过精细控制装载量以及优化干燥参数,可以显著提高微波干燥的速率及稻谷干燥过程的均匀性和品质。

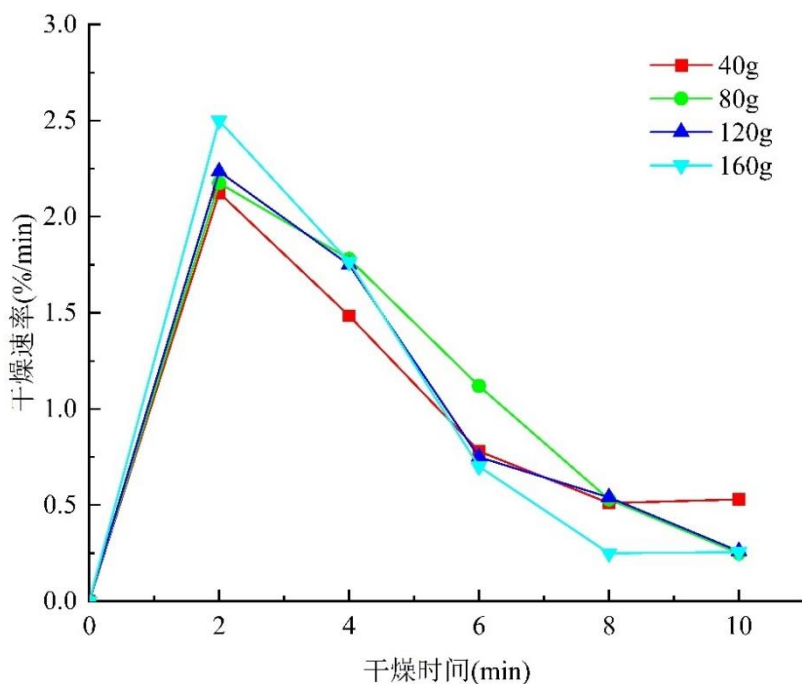


图 2-15 不同装载量干燥速率曲线

2.4 稻谷正交实验分析研究

根据单因素实验研究，选取微波功率 400W、600W，800W；装载量 80g、120g，160g；真空保持时间 4min、6min，8min；初始温度 35℃、40℃，45℃四个因素进行四水平的正交实验，正交表 $L_9(3^5)$ ，因素水平如表 2-2 所示。

表 2-2 正交试验因素水平设计

水平	初始温度/℃	装载量/g	真空保持时间/min	微波功率/W
1	35	80	4	400
2	40	120	6	600
3	45	160	8	800

根据正交因素进行实验设计，保持微波干燥功率 600W、真空保持时间 4min、装载量 80g，初始干燥温度 35℃的情况下通过实验测得不同因素水平下的稻谷爆腰率及干燥时间，实验结果如表 3-3 所示。结果显示在保持初始温度、装载量，微波功率保持不变的情况，稻谷的干燥时间为 140min，随着微波真空保持时间的增加，逐渐缩短了稻谷的干燥时间。在保持初始温度、微波功率，真空

保持时间不变的情况下，随着稻谷装载量的增加，稻谷的微波干燥时间逐渐减少为 136min。保持初始温度、真空保持时间，装载量不变的情况下，随着微波功率的提高，稻谷的微波干燥时间缩短为 114min。保持微波功率、装载量，真空保持时间不变的情况下，随着初始温度的提升，稻谷的微波干燥时间最短为 77min。通过实验研究分析得出对于稻谷的微波真空干燥因素稻谷的干燥影响因素顺序为初始温度>微波功率>装载量>微波真空保持时间。

表 2-3 正交实验设计结果

序号	初始温度 /°C	装载量/g	真空保持时间 /min	微波功率 /W	干燥时间 /min
1	1	1	1	1	140
2	1	2	2	2	136
3	1	3	3	3	127
4	2	1	2	1	121
5	2	2	3	3	114
6	2	2	1	2	105
7	3	1	3	1	90
8	3	2	1	3	85
9	3	3	2	2	77

稻谷的爆腰率是指在稻谷干燥过程中，由于温度或湿度不当导致谷壳破裂，使稻谷内部的籽粒暴露在外的比例。爆腰率是衡量稻谷干燥过程中质量损失的一个重要指标，也是评估干燥工艺的效果的关键参数之一。通过适当调节温度、湿度、干燥速率以及干燥设备的参数，最大限度地减少爆腰率，保证稻谷的质量和产量。表 2-4 正交实验极差结果，通过分析正交实验结果判断稻谷各组合的爆腰率。

表 2-4 正交实验极差结果

		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
爆腰率	k_1	6.63	8.83	12.13	11.56
	k_2	8.75	10.53	11.01	10.96
	k_3	16.67	12.77	10.32	9.87
	<i>R</i>	11.12	2.98	1.22	1.17
影响因素		$A > B > C > D$			
干燥时间	k_1	124.20	109.33	114.56	102.45
	k_2	109.07	101.27	111.67	107.47
	k_3	84.33	100.13	102.67	102.76
	<i>R</i>	44.67	10.34	3.67	1.67
影响因素		$A > B > C > D$			

根据表 2-3 的数据，在正交实验设计框架下，分析了不同参数组合下稻谷干燥过程的效果。观察到在 $A_1B_1C_1D_1$ 组合下，干燥温度变化趋势如图 2-16 所示。稻谷表层最高温度超过 50℃，干燥时间达到了最长，为 140 分钟，在这种情况下，稻谷的爆腰率值较低，这一结果反映了长时间干燥对于保持稻谷完整性的积极作用。当干燥时间缩短至 77 分钟的 $A_3B_3C_2D_2$ 组合，干燥温度变化趋势如图 2-17 所示，稻谷表面温度接近 50℃，此时爆腰率值达到最高。表明较高的干燥温度及较短的干燥时间促进了稻谷爆腰率的增加，反映了过快的水分蒸发可能导致稻谷内部压力增大，进而影响稻谷的结构完整性。进一步分析实验数据发现，真空保持时间和装载量对微波干燥过程的影响相比于微波功率及初始温度较小。研究表明在优化微波真空干燥过程以提高干燥效率和减少稻谷损坏率的过程中，微波功率和初始温度是两个关键的调控参数。相对而言，微波真空保持时间和装载量虽然影响干燥效果，实际应用中调节这两个参数所带来的效果改善可能不如调节微波功率和初始温度显著。

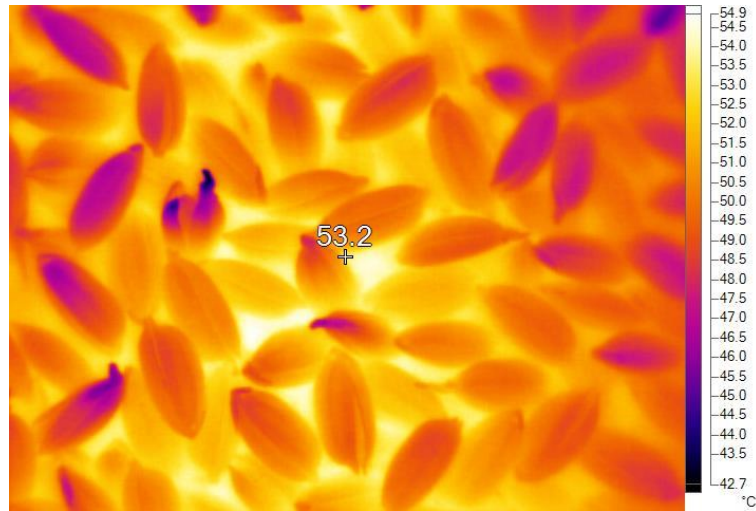


图 2-16 $A_1B_1C_1D_1$ 组合稻谷温度

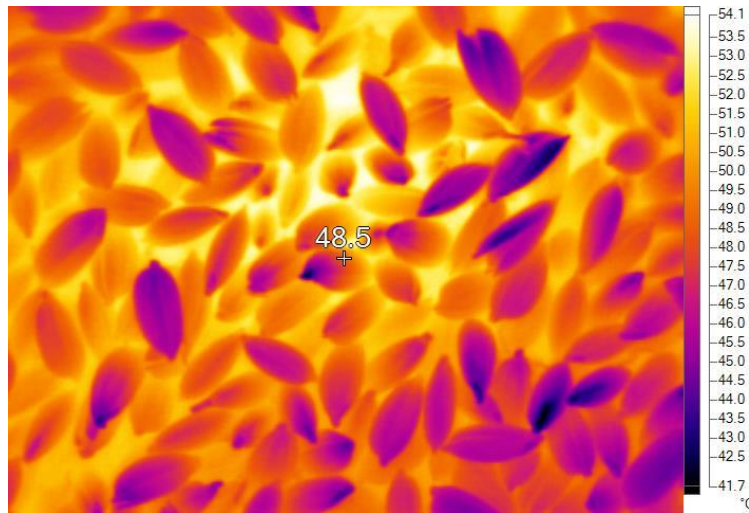
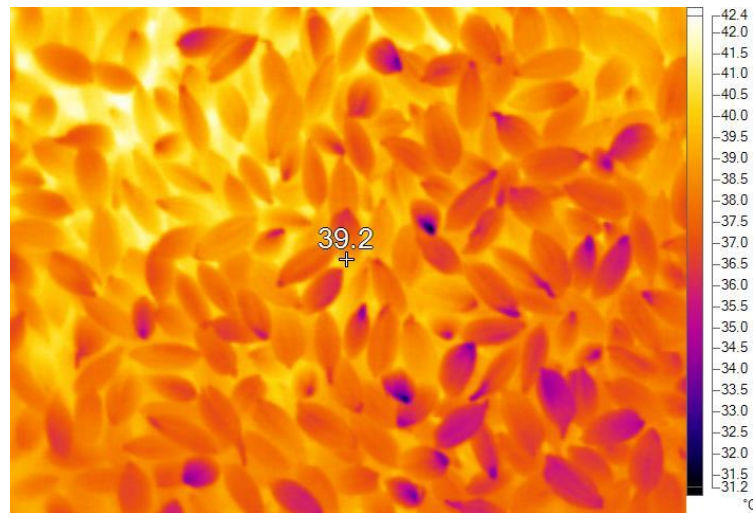


图 2-17 $A_3B_3C_2D_2$ 组合稻谷温度

在深入分析实验数据的基础上，可观察到当干燥时间设定为 105 分钟时， $A_2B_2C_1D_2$ 参数组合下稻谷干燥过程中的爆腰率达到最低值，稻谷干燥温度如图 3-18 所示。研究发现适宜干燥时间对于维持稻谷品质的重要性。通过对比分析多个参数组合发现在初始温度控制在 40°C 、微波功率设置为 600W、真空保持时间为 4min 以及装载量为 80g 的条件下，不仅能够保证稻谷的干燥品质，同时也确保了较高的干燥速率。这表明，在该参数组合下，微波干燥技术能够在保证干燥效率的同时最小化稻谷损伤，显著提升稻谷的处理品质。

图 2-18 $A_2B_2C_1D_2$ 组合稻谷温度

2.5 本章小结

本章研究了稻谷的不同干燥参数在不同指标下对稻谷干燥特性的影响,应用正交实验法完成了对稻谷各项参数的拟合分析,研究了稻谷的干燥含水率及干燥速率曲线分析了稻谷在相同条件下不同参数数值的变化趋势,通过正交实验极差分析结果表明稻谷干燥特性的干燥影响顺序大小为初始温度、微波功率、装载量、微波真空保持时间,真空度。研究发现了控制初始温度为 40°C、微波功率 600W、真空保持时间 4min,真空度 80kPa 下为稻谷的最佳干燥工艺参数。

第三章 基于 LS-SVM 算法的稻谷含水率预测模型

3.1 稻谷干燥动力学研究

稻谷的干燥涉及能量、热质量、场强量交换的复杂热质传递，其特点包括非线性特性、变量间的高度耦合、错综复杂的因果逻辑以及显著的时间滞后性。深入研究稻谷干燥动力学，构建适宜的干燥模型，并通过数值仿真技术进行分析，已成为当前工程科学研究与开发领域的一项关键技术手段^[61]。此项研究在干燥特性研究、水分扩散机制探索及干燥设备设计方面发挥着重要作用。目前，干燥动力学的研究方法已被广泛应用于多种物质的干燥参数测定中^[62]。

3.1.1 微波干燥数学模型

干燥模型着重于模拟材料内外部热质转变过程中的相互作用，并能有效预测物料内部的水分与温度梯度^[62]。Luikov 方程的提出是为了在多孔介质中描述热量和质量传输过程的相互作用和耦合效应。这一理论体系建立在热力学的不可逆传输定理和守恒的基本定律之上，揭示了材料内部的热量和质量传递过程之间的联系。数学模型拟合度评价方程通过几种常见的干燥数学模型对稻谷就仓干燥进行数据拟合并进行结果分析，常见的几种干燥模型如表 3-1 所示。

表 3-1 干燥数学模型

编号	模型名称	模型方程式
1	Wang et al.	$y = ae^{-(kx^n)}$
2	Henderson & Pabis	$y = ae^{-kx}$
3	Page	$y = e^{-(kn)}$
4	Modified Page	$y = ae^{-(kx)^n}$
5	Logarithmic	$y = a + be^{-kx}$
6	Wang & Singh	$y = 1 + ax + bx^2$
7	Diffusion approach	$y = ae^{-kx} + (1-a)e^{-kx}$

3.1.2 最小二乘支持向量机模型

最小二乘支持向量机 (Least Squares Support Vector Machine, LS-SVM) 是一种支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 的变体, 它在处理线性和非线性分类、回归以及数据降维等机器学习任务时具有很好的性能。与传统的支持向量机相比, LS-SVM 使用最小二乘法来优化模型参数, 从而避免了二次规划问题中的对偶问题, 简化了模型的求解过程。LS-SVM 的基本原理是通过最小化误差的平方和来求解模型参数, 同时将分类间隔最大化, 使得模型能够更好地泛化到未见过的数据。在求解过程中, LS-SVM 将数据点映射到高维空间, 利用核函数来处理非线性可分的情况, 从而将样本在特征空间中进行线性划分或近似线性划分^[66]。要将 LS-SVM 应用于含水率预测, 首先需要准备包含不同特征和相应含水率的数据集。对数据进行特征选择和预处理, 确保数据质量和稳定性。将数据集划分为训练集和测试集。在训练集上构建 LS-SVM 模型, 通过交叉验证和网格搜索选择最佳的核函数和参数组合。训练好的模型经过评估后, 在测试集上进行性能验证。最终, 将训练好的 LS-SVM 模型应用于新数据, 以预测含水率。即可实现对含水率的准确预测, 并为相关应用提供可靠的支持。

模型结构将干燥过程中的工艺参数模型设定为训练样本集 $(x_i, f(x))$, $i=1, 2, \dots, n$ 。其中 x_i 为输入样本, i 为样本个数, 在谷物干燥过程中非线性不可分的问题使得在低维特征空间下无法有效地将不同类别的数据分开, 利用核技巧将数据映射到高维特征空间, 使原本非线性不可分的问题转化为高维特征空间中的线性可分问题, 通过转化可找到线性超平面来有效地分离不同类别的数据点, 从而构建出更准确的谷物干燥过程参数模型, 如式 3-1 所示:

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (3-1)$$

式中, w 为权值系数; b 为偏置。

目标函数的优化过程旨在找到最适合数据的超平面, 使模型在拟合数据的同时尽量减小结构风险, 即在训练误差和模型复杂度之间取得平衡。LS-SVM 等式约束如式 4-2^[67]所示:

$$\begin{cases} \arg \min \phi(w) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^N e_i^2 \\ y_i (x_i w^T + b) - (1 - e_i) = 0, i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3-2)$$

式中, x_i 为输入样本; e_i 为松弛变量; γ 为权重参数; b 为偏置。

通过最大化该函数的偏导数求解拉格朗日乘子, 满足 KKT 条件, 计算模型参数, 定义拉格朗日函数如式 3-3^[75]所示:

$$L(w, b, e; \alpha) = J(w, b, e) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \{y_i [w^T \phi(x_i) + b] - 1 + e_i\} \quad (3-3)$$

式中, α_i 为拉格朗日乘数的约束, 可为正或负。

求解最优化条件, 通过 SVM 约束优化得式 3-4 所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \phi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = \gamma e_i, i = 1, \dots, N \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow y_i [w^T \phi(x_i) + b] - 1 + e_i = 0, i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3-4)$$

通过对式 4-4 进行求解对偶问题, 得到线性方程解如式 3-5 所示:

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & -Z^T \\ 0 & 0 & 0 & -Y^T \\ 0 & 0 & \gamma I & -I \\ Z & Y & I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ b \\ e \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vec{1} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

式中, Z 为 $[\phi(x_1)^T y_1; \dots; \phi(x_N)^T y_N]$; Y 为 $[y_1, \dots, y_N]$; $\vec{1}$ 为 $[1, \dots, 1]$; e 为 $[e_1, \dots, e_N]$; α 为 $[\alpha_1, \dots, \alpha_N]$ 。

化简式 4-5 得线性矩阵如式 3-6 所示:

$$\begin{bmatrix} 0 & -Y^T \\ Y Z Z^T + \gamma^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vec{1} \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

根据 KKT 条件求偏导, 则求解得到基于 LS-SVM 如式 3-7 所示^[68]:

$$y = f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x, x_i) + b \quad (3-7)$$

式中, $K(x, x_i)$ 为 $\left[\phi(x_1)^T y_1; \dots; \phi(x_N)^T y_N \right] \left[\phi(x_1)^T y_1; \dots; \phi(x_N)^T y_N \right]^T$ 。

因此,由线性回归模型取代二次规划问题。满足 Mercer 条件的核函数,常见的核函数形式有 Gaussian 径向基核函数,多项式核函数,线性核函数,Sigmoid 核函数。其中,LS-SVM 算法可选择泛化能力强,不需要正则化参数,简化了模型调参;可直接在原始数据空间中求解,适用于非线性问题,并且可以通过选择不同的核函数适应不同的数据特征,灵活性强,应用于任意分布样本的高斯径向基核函数(Radial basis function kernel, RBF kernel)。

3.2 稻谷微波干燥含水率预测模型

3.2.1 基于 LS-SVM 算法的稻谷干燥模型

通常物料含水率计算不为初始含水率,而为当前含水率,模型干燥时间为实际干燥时间,以试验数据为基础,采用最小二乘法,使模拟数据无限逼近试验数据,从而确定模型参数。稻谷的最小二乘法表达式如 3-8 所示:

$$w_s = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i t_s \gamma \left(|x_i - x|^2 \right) + b \quad (3-8)$$

式中, w_s 为当前含水率, %; t_s 为干燥时间, s。模型参数求值如表 3-2 所示。

表 3-2 数学模型参数值

模型参数	w_s	γ	b	i
数值解	0.05	0.478	1.38	110.24

采用决定系数 R^2 和均方根误差 RMSE 作为评价指标参数, R^2 越大、RMSE 值越小,则模型拟合越好,如式 3-9 所示:

$$\begin{cases} R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \\ RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3-9)$$

式中, y_i 为干燥试验实测的第 i 个水分比; $\hat{y}_i$ 为利用 LS-SVM 预测的第 i 个水分比; n 为试验测得数据的个数。

3.2.2 干燥动力学模型结果分析

根据表 3-1 常见的干燥数学模型, 采用 Matlab 软件进行非线性迭代拟合。拟合结果的相关系数 R^2 及均方根误差(root mean square error, RMSE)来判断不同数学模型中最适合干燥过程各层水分含量变化的模型 R^2 越大、RMSE 值越小, 则拟合越好^[63]。通过真空干燥实验研究发现温度对干燥特性影响最大, 故采用不同温度分析不同模型的拟合程度。

在实验条件不同温度的条件下进行模型参数分析。设置实验条件为 30℃、35℃、40℃、45℃的情况下对 7 种干燥模型进行单因素影响分析研究。通过对数学模型进行数据上的拟合分析, 得到了不同干燥模型的模型参数和评价参数, 如表 3-3 所示。图 3-1 为不同初始温度条件下 LS-SVM 算法模型下的拟合效果, 由图可知模型的拟合效果计算程度偏离效果较小, 图 3-2 为模型下的残差值, 从表中可得出决定系数 R^2 为 0.9986, RMSE 最小值为 0.0102 的 LS-SVM 模型相比较其他 7 种干燥模型拟合程度较好。

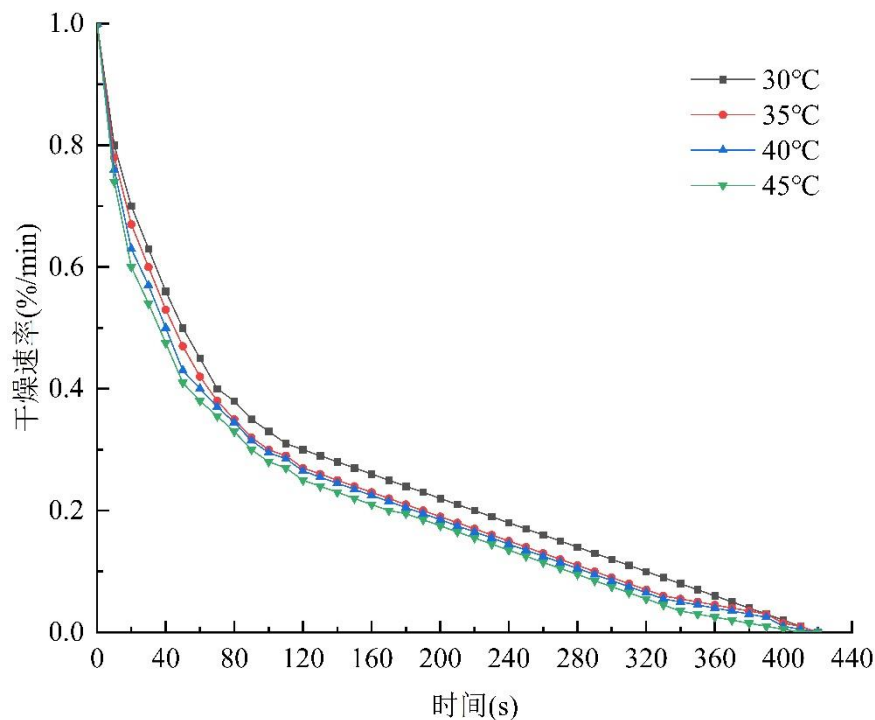


图 4-1 不同初始温度 LS-SVM 模型的拟合效果

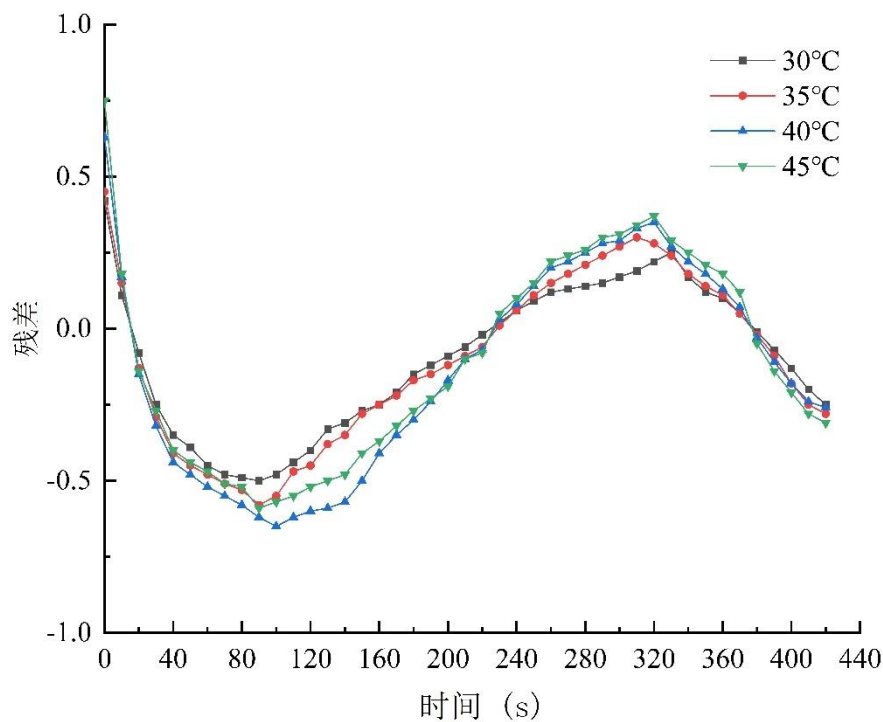


图 3-2 不同初始温度 LS-SVM 模型的残差值

表 3-3 不同干燥模型的模型参数和评价参数

模型	温度	参数				R^2	RMSE
		a	b	k	n		
Wang et al.	30	0.9558		0.0125		0.9956	0.0211
	35	0.9678		0.0212		0.992	0.0346
	40	0.9892		0.0235		0.9956	0.0229
	45	1.0241		0.0376		0.9966	0.0155
Henderson and Pabis	30	0.9527		0.0111		0.9945	0.0178
	35	0.9567		0.0148		0.9901	0.0251
	40	0.9872		0.0239		0.9952	0.0221
	45	1.0222		0.0407		0.9954	0.0155
Page	30			0.0186	0.9356	0.995	0.0182
	35			0.0288	0.8761	0.9877	0.0271
	40			0.0292	0.9817	0.9925	0.0227

续表 3-3

模型	温度	参数				R^2	RMSE
		a	b	k	n		
Modified Page	45			0.0365	1.0267	0.9967	0.0153
	30			0.0121	0.9356	0.995	0.0194
	35			0.0183	0.8761	0.9877	0.0271
	40			0.0252	0.9817	0.9925	0.0227
	45			0.0349	1.0267	0.9967	0.0153
Logarithmic	30	0.9231	-0.046	0.0121		0.9987	0.0138
	35	0.957	-0.061	0.0128		0.9923	0.0251
	40	1.0168	-0.0721	0.0199		0.9963	0.0171
	45	1.0879	-0.0389	0.0401		0.9987	0.0131
	30	-2.38E-04	0.9512			0.9995	0.0161
Wang & Singh	35	-1.25E-04	0.9021			0.9941	0.0208
	40	-2.19E-04	0.9801			0.998	0.0157
	45	9.18E-06	1.0089			0.9989	0.0086
	30	0.0756	0.0098	0.1902		0.9986	0.0163
	35	0.8968	0.201	0.021		0.9931	0.0231
Diffusion approach	40	2.61E-05	0.0312	-0.0711		0.9972	0.0176
	45	9.79E-06	0.0413	-0.1099		0.9995	0.0091
	30					0.9987	0.0107
	35					0.9989	0.0102
	40					0.9997	0.0105
LS-SVM	45					0.9998	0.0104

续表 3-3

模型	温度	参数				R^2	RMSE
		a	b	k	n		
Modified Page	30			0.0121	0.9356	0.995	0.0194
	35			0.0183	0.8761	0.9877	0.0271
	40			0.0252	0.9817	0.9925	0.0227
	45			0.0349	1.0267	0.9967	0.0153
Logarithmic	30	0.9231	-0.046	0.0121		0.9987	0.0138
	35	0.957	-0.061	0.0128		0.9923	0.0251
	40	1.0168	-0.0721	0.0199		0.9963	0.0171
	45	1.0879	-0.0389	0.0401		0.9987	0.0131
Wang & Singh	30	-2.38E-04	0.9512			0.9995	0.0161
	35	-1.25E-04	0.9021			0.9941	0.0208
LS-SVM M	40	-2.19E-04	0.9801			0.998	0.0157

在实验条件不同微波功率的条件下进行模型参数分析。设置实验条件为 200W、400W、600W、800W 的情况下对 7 种干燥模型进行单因素影响分析研究。得到不同干燥模型的模型参数和评价参数如表 3-4 所示。图 3-3、3-4 为不同微波功率条件下 LS-SVM 算法模型下的拟合效果及残差值，由图可知 LS-SVM 模型的拟合效果计算程度偏离效果及残差较小。从表中可得出决定系数 R^2 为 0.9998，RMSE 最小值为 0.0095 的 LS-SVM 模型。在不同微波干燥因素下基于 LS-SVM 算法的干燥模型的计算值在实验值的附近，偏离程度及残差值较小，该模型相对于其他 7 种干燥数学模型拟合效果更好，故可以较好的应用于稻谷含水率的预测。

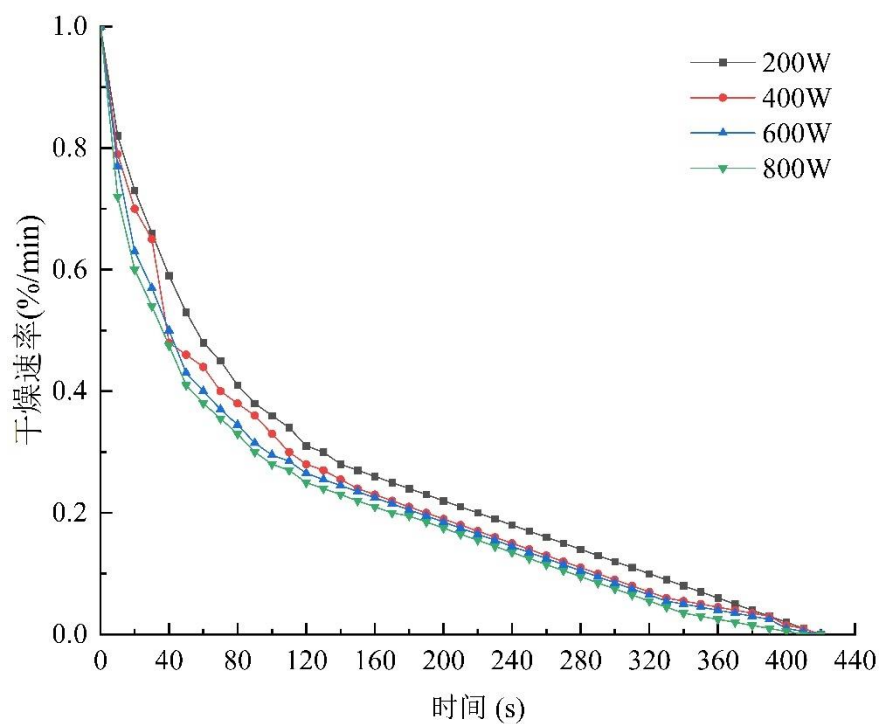


图 3-3 不同功率 LS-SVM 模型的拟合效果

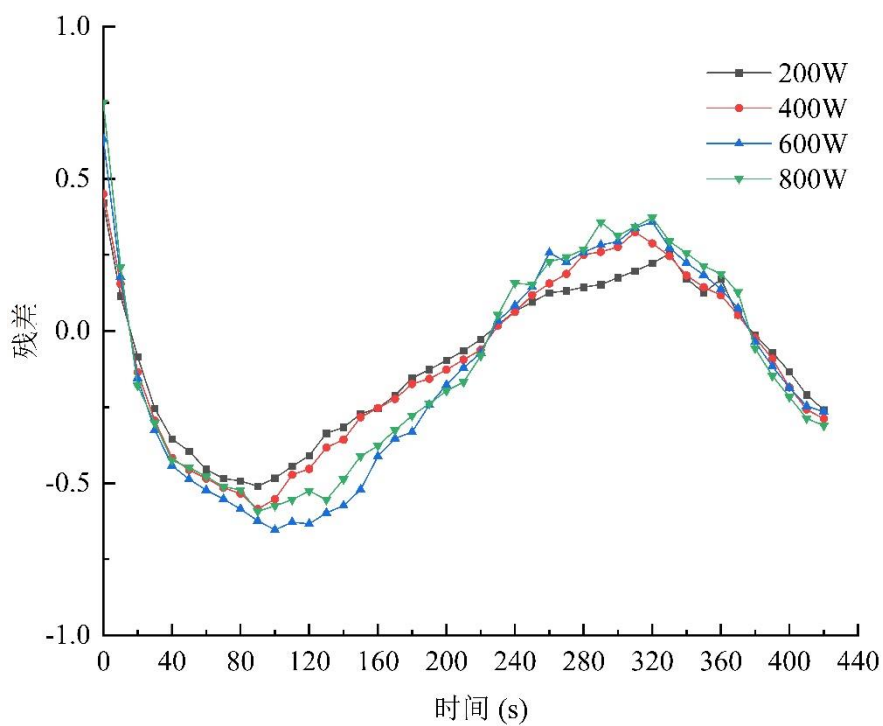


图 3-4 不同功率 LS-SVM 模型的残差值

表 3-4 不同干燥模型的模型参数和评价参数

模型	功率	参数				R^2	RMSE
		a	b	k	n		
Wang et al.	200	0.9478		0.0158		0.9968	0.0221
	400	0.9578		0.0265		0.9921	0.0357
	600	0.9895		0.0225		0.9975	0.0234
	800	1.0178		0.0384		0.9967	0.0175
Hender son and Pabis	200	0.9531		0.0111		0.9958	0.0184
	400	0.9578		0.0128		0.9913	0.0264
	600	0.9881		0.0257		0.9945	0.0234
	800	1.0185		0.0435		0.9924	0.0175
Page	200			0.0212	0.956	0.9954	0.0185
	400			0.0312	0.8882	0.9888	0.0278
	600			0.0298	0.9867	0.9975	0.0284
	800			0.0375	1.0278	0.9954	0.0165
Modifi ed Page	200			0.0132	0.9365	0.9958	0.0202
	400			0.0202	0.8821	0.9887	0.0282
	600			0.0258	0.9832	0.9934	0.0232
	800			0.0367	1.0278	0.9958	0.0156
Logarit hmic	200	0.9227	-0.046	0.0134		0.9988	0.0142
	400	0.9544	-0.087	0.0134		0.9957	0.0255
	600	1.0175	-0.0737	0.0212		0.9975	0.0184
	800	1.0902	-0.0412	0.0442		0.9987	0.0142

续表 3-4

模型	温度	参数				R^2	RMSE
		a	b	k	n		
Wang & Singh	200	-2.35E-04	0.9534			0.9978	0.0167
	400	-1.27E-04	0.9121			0.9981	0.0212
	600	-2.21E-04	0.9822			0.9975	0.0163
	800	9.21E-06	1.0121			0.9991	0.0087
Diffusi on approa ch	200	0.0777	0.0104	0.1924		0.9924	0.0175
	400	0.9111	0.232	0.0233		0.9954	0.0245
	600	2.59E-05	0.0327	-0.0735		0.9978	0.0181
	800	9.82E-06	0.0421	-0.1122		0.9968	0.0099
LS-SV M	200					0.9989	0.0097
	400					0.9993	0.0098
	600					0.9997	0.0095

3.3 网格搜索和交叉验证参数寻优

本研究中 Matlab 工具箱被选作为实验模型研究软件。随机选择了 30 组试验数据作为训练样本，余下的 15 组数据则用作预测样本。该研究以实验测量得到的 4 个真空脉动干燥工艺参数（干燥温度、真空度、间歇时间、干燥时间）为输入，以稻谷含水率作为输出，构建了一个 4 输入 1 输出的含水率预测模型。模型训练之前，需要对核函数的正则化因子 C 和核函数参数 γ 进行优化。根据模型的需要，定义 4 个参数的网格。这些参数网格包含了通过搜索来优化的模型参数的各种可能的值或值的组合。确定模型性能的评价标准，为了更准确地评估模型在未见数据上的表现，通常采用交叉验证的方法。采用 k 折交叉验证，将数据集分成 k 个大小相等的子集，依次将每个子集作为验证集，其余的 $k-1$ 个子集作为训练集，进行模型训练和评估。每一组参数配置都要进行一次完整的 k 折交叉验证，以保证评估的稳定性和可靠性。对于 C 和 γ 的初始搜索范围被设定为

$[10^{-2}, 10^{-4}]$ ，网格搜索粒度为 10，并设定终止精度为 10^{-3} 。在完成所有参数组合的交叉验证后，比较各组参数的性能，选择出最优的参数组合。通过遍历参数网格中的所有参数组合，对每一组参数进行交叉验证，根据事先定义的评价标准，记录下每组参数的平均性能。最终，一次参数寻优得到了最佳结果为 $(C, \gamma) = (6207.989, 20.1023)$ 。这一组参数被认为是在给定的参数网格和评价标准下，模型可能达到的最佳性能配置，使用选定的最优参数，在全部训练数据上重新训练模型，以构建最终的模型。研究数据拟合得基于 LS-SVM 算法的稻谷含水率预测模型平均偏差率为 0.5876%，均方根误差 RMSE 为 0.1056，决定系数 R^2 为 0.9998，含水率的预测精度达到 98.9974%，表明 LS-SVM 算法模型能够很好地用于谷物含水率的预测。

3.4 本章小结

本节介绍了含水率预测模型拟合分析，稻谷含水率预测的背景和目的，描述了稻谷含水率数据的采集与预处理过程，包括数据清洗和异常值处理。选择最小二乘支持向量机数学模型，解释了模型选择的理由和建立过程。通过多种干燥数学模型进行数据拟合，并与基于 LS-SVM 算法的模型进行分析对比，通过训练集对模型进行拟合，并使用测试集评估了模型的性能，研究发现含水率的预测精度达到 98.9974%。分析该模型的优缺点，结果表明最小二乘向量机模型在稻谷含水率预测中的适用性和泛化能力较强。

第四章 稻谷微波热电场数值解析

4.1 稻谷微波干燥仿真研究意义

稻谷的微波真空干燥仿真研究具有重要的意义，微波真空干燥是一种快速、高效的干燥方法，可以有效地降低干燥时间和能源消耗。通过仿真研究，可以优化微波功率、真空度、干燥温度等参数，使干燥过程更加高效，提高稻谷的干燥速率和品质。仿真研究可以帮助预测稻谷在微波真空干燥过程中的温度分布、水分迁移规律等干燥特性^[69]。这有助于了解干燥过程中的热量传递和质量传递机制，为干燥参数的优化提供理论依据。同时微波真空干燥是一种较为节能的干燥方法，但合理控制干燥参数对节能和成本的影响至关重要。通过仿真研究，可以有效地节约能源和成本，降低生产过程的经济成本。稻谷的干燥过程会影响其品质，包括颜色、口感、营养成分等^[70]。通过仿真研究，可以优化干燥参数，避免过度干燥或局部过热等问题，保证稻谷的品质和营养价值。微波真空干燥相对于传统的热风干燥方法具有更低的能源消耗和更短的干燥时间，从而减少了对环境的影响。通过仿真研究，可以优化干燥参数，降低能源消耗，减少对环境的负荷。同时，合理控制干燥参数也可以减少干燥过程中的安全风险，保障生产作业人员的安全。

综上所述，稻谷的微波真空干燥仿真研究对于优化干燥过程、节约能源和成本、提高产品质量、环境保护和安全性等方面都具有重要意义，有助于推动稻谷加工技术的发展和應用。

4.2 稻谷干燥三维几何模型

4.2.1 三维模型理论假设

- (1) 假设稻谷在干燥过程中可以近似看作是均匀的颗粒或颗粒组成的多孔介质。
- (2) 真空度和压力干燥过程控制数值稳定在一个区间。
- (3) 干燥腔体内部不存在泄露等物理上故障问题。

4.2.2 干燥腔体几何模型

(1) 微波干燥腔体结构及参数设置

通过 COMSOL 软件建立干燥腔体的基础模型，腔体左侧为波导端口，稻谷籽粒位于微波干燥腔物料托盘中静置。选取 TE_{10} 模进行波导传输，微波频率设置为 2.45GHz，微波干燥腔体模型如图 4-1 所示。

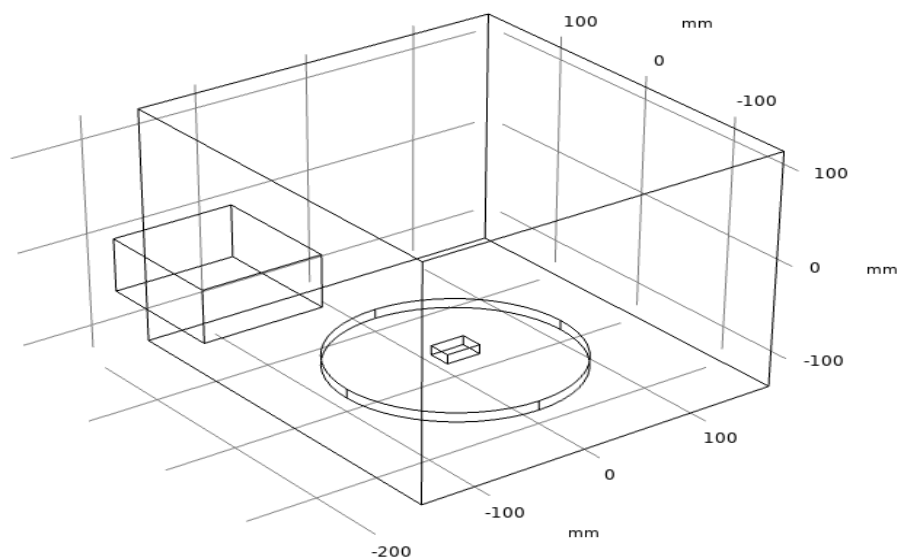


图 4-1 稻谷微波干燥腔体模型

(2) 稻谷干燥生理参数设置

在 COMSOL 中建立了稻谷籽粒模型，稻谷的基本生理参数如表 4-1 所示。

表 4-1 稻谷的基本物理参数

名称	符号	数值
密度/(kg/m^3)	ρ_P	1078
相对介电系数	ϵ_r	4.5-2j
电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	σ	0
导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	λ	0.55
相对磁导率/($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$)	μ_r	1
初始温度/ $^\circ\text{C}$	T_0	20
水分子量/(mol/m^3)	M_{H_2O}	0.018

4.3 稻谷干燥仿真边界条件及网格划分

4.3.1 边界条件

稻谷微波干燥过程中采取不同真空度等因素,考虑多种因素可能会影响稻谷的干燥质量,故设置限制温度最高不超过 45℃,传热传质传递方程的解不是唯一的,其描述了材料的质量和热量交换定律,但并没有解决特定的问题^[71]。微波加热传热边界条件用微分形式 4-1 表示^[72]:

$$n \times (k \nabla t) = h_r (T - T_g) + \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4-1)$$

式中, T_g 为室内温度, °C; h_r 为稻谷热表面换热系数, W/(m²·°C); n 为向量方向; λ 为微波波长。

4.3.2 微波传热传质方程

微波干燥技术的核心原理是利用微波能量对被干燥物料内部的水分子进行加热,从而实现快速而均匀的干燥过程。微波是一种电磁波,其频率在 300 MHz 到 300 GHz 之间,对水分子具有强烈的吸收能力。当微波能量与水分子相互作用时,水分子会转换成热能,从而引起被干燥物料内部的温度升高,随着被干燥物料内部温度的升高,水分子的动能增加,部分水分子会脱离物料表面并转化为水蒸气,进而从物料中蒸发出去。与传统的热空气干燥相比,微波干燥具有更快的干燥速度和更高的能量利用效率,同时可以减少热损失和保持被干燥物料的品质^[73]。由微波加热理论表明,微波电磁场和内部热源之间的能量转换关系存在如式 4-2 所示^[74]:

$$P_{abs} = P_a = 2\pi\epsilon_0\epsilon' \tan\delta E^2 f \quad (5-2)$$

式中, P_{abs} 为内热源强度, W/m³; P_a 为微波功率, W; ϵ_0 为真空中介电常数, F/m; ϵ' 为介电程度; $\tan\delta$ 为介电损耗; E 为电场强度, V/m; f 为频率, S⁻¹。

稻谷的微波干燥过程是将稻谷置于微波加热设备中,利用微波能量对其内部水分子进行加热,导致水分子转化为水蒸气并从表面蒸发的过程。依据能量守恒定律和傅里叶导热定律,存在导热微分方程,如式 4-3 所示^[75]:

$$\rho_{den} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \quad (4-3)$$

式中, ρ_{den} 为固相密度, kg/m^3 ; T 为稻谷温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为干燥时间, min ; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

干燥过程中稻谷水分的能量传递微分方程如 4-4 所示^[66]:

$$\rho_{den} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \Delta T) + m_{ev} \gamma + Q_e - hA(T - T_0) \quad (4-4)$$

式中, K 为热传导系数, $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; m_{ev} 为水分蒸发速度, $\%/ \text{min}$; γ 为水分汽化潜热, KJ/kg ; Q_e 为单位时间内产生的体积热, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; h 为对流传热传递系数, $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$; A 为稻谷料层表面积, m^2 。

在传热传质过程中, 当物料的含水率较高时, 干燥时的体积收缩主要是水分损失, 物料收缩过程中固体能量守恒, 微波传质的质量守恒方程如式 4-5 所示^[81]:

$$\rho_{den} \frac{\partial S}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_s \frac{\partial T}{\partial x} \right) - f_T \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) - f_T P_{abs} \quad (4-5)$$

式中, S 为能量饱和度; K_s 为有效导热系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$; f_T 为源转换系数, kg/J 。

微波传质的传质控制方程如式 4-6 所示^[81]:

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_{den}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e \frac{\partial \rho_{den}}{\partial x} \right) \quad (4-6)$$

式中, τ 为时间, s ; D_e 为干物料有效扩散系数, m^2/s 。

4.3.3 微波腔体电磁场方程

干燥腔中微波的传递过程符合 Maxwell 电磁场方程^[76], 电磁场的特性可用方程如式 4-7 所示:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{D} = \vec{q} \\ \nabla \times \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

上式中 E 、 H 、 B 、 D 和 J 之间的关系可用方程 4-8 所示：

$$\begin{cases} \vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \\ \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} \end{cases} \quad (4-8)$$

式中， E 为电场强度，V/m； H 为磁场强度，A/m； B 为磁感应强度， D 为电位移矢量， J 为电流密度，A/m²； μ_0 为真空磁导率，H/m； μ 为相对磁导率。

依据麦克斯韦方程组和材料属性，对于谐振腔电场强度及温度可以用方程进行耦合描述，如式 4-9 所示^[77]：

$$\nabla \times \mu_r (\nabla \times E) - k_0^2 \left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) E = 0 \quad (4-9)$$

式中， μ_r 为磁导率，S/m； k_0 为自由空间波数，rad/m； σ 为电导率，H/m； j 为虚部单位； ω 为角频率，rad/s。

加热物料所需要的能量如式 4-10 所示：

$$J = m \times C_p \times \Delta T \quad (4-10)$$

式中， m 为质量，g； ΔT 为温升，°C。

物料吸收的功率体现为能量的变化率，如式 4-11 所示：

$$P \times V = m \times C_p \times \frac{d\Delta T}{dt} \quad (4-11)$$

式中， V 为物料体积，m³。将式 2-14 代入式 2-15 中得式 4-12：

$$\frac{4.9\pi E^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}{\rho \times C_p} = \frac{d\Delta T}{dt} \quad (4-12)$$

式中， $V=m/\rho$ ， ρ 为密度，kg·m⁻³。

由上式可知温度于电磁场联系。按照矩形干燥腔为模型进行设计，设置边界为理想条件，矩形谐振腔中激励的谐振模式，设置干燥模式为 TE_{10} 模，干燥如式 4-13 所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} E_x = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \\ E_y = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \\ E_z = 0 \\ H_x = -\frac{1}{k_c^2} \frac{m\pi}{a} \frac{p\pi}{l} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \\ H_y = -\frac{1}{k_c^2} \frac{n\pi}{b} \frac{p\pi}{l} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \\ H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \end{array} \right. \quad (4-13)$$

式中， a 、 b 、 l 为干燥腔长、宽，高的网格数； m 、 n 为TE模式的各角标。

极化方向波对于一定比值的 a/b ，在给定的工作频率下 TE_{10} 模具有最小的衰减；根据TE模式表达式将 $m=1$ ， $n=0$ 带入得到 TE_{10} 模场量方程如式4-14所示：

$$\left\{ \begin{array}{l} E_y = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \\ H_x = -\frac{1}{k_c^2} \frac{\pi}{a} \frac{p\pi}{l} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \\ H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l}z\right) e^{j\omega t} \\ E_x = 0, E_z = 0, H_y = 0 \end{array} \right. \quad (4-14)$$

4.3.4 干燥腔体网格划分

在数学建模和仿真中，模型的网格划分是指将要研究的区域或对象分割成离散的小单元，每个小单元被称为网格单元或网格元素。这个过程将连续的几何形状或区域转化为由有限个网格单元组成的离散形式，以便于在计算机上进行数值计算和求解，本文对干燥腔体及稻谷的网格划分如图4-2所示。

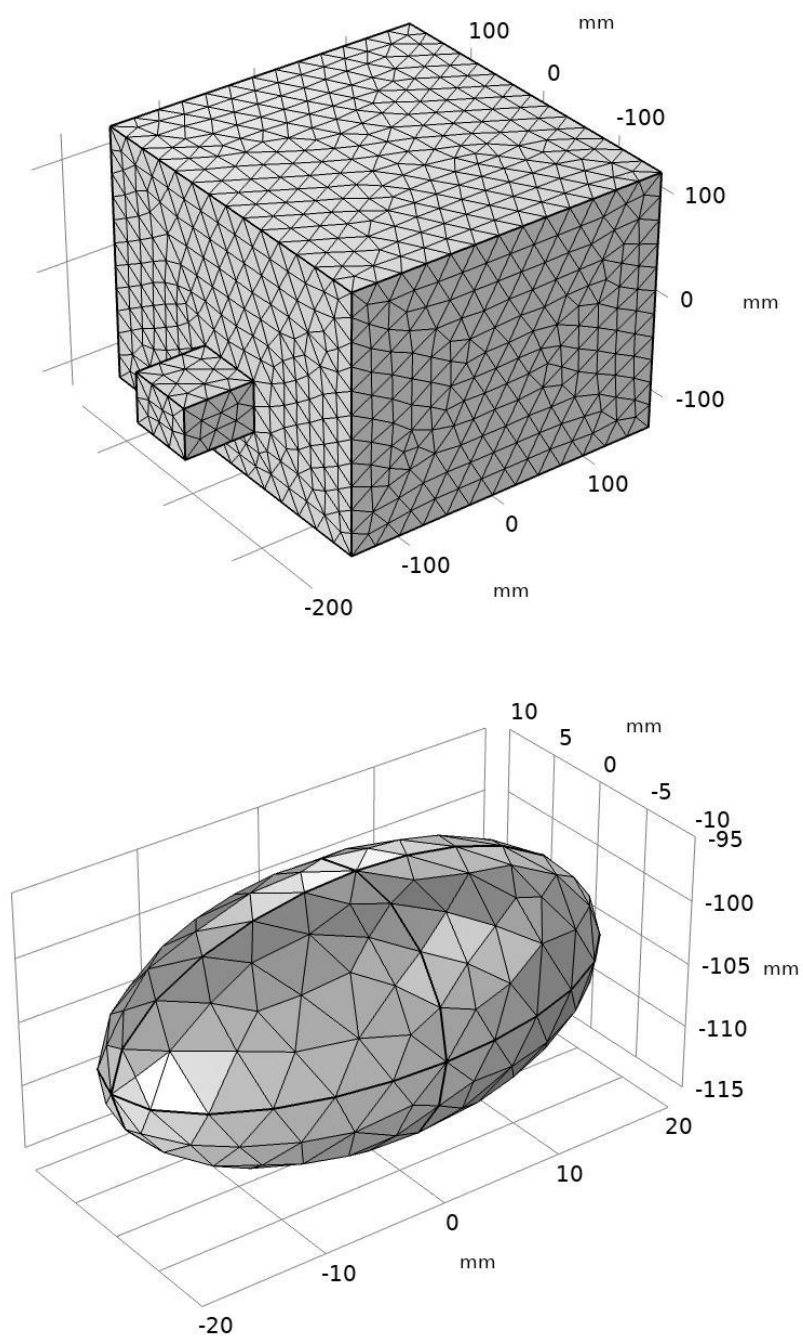


图 4-2 微波腔体及稻谷网格划分

4.4 微波干燥仿真结果分析

4.4.1 端口数目对电场强度的影响

在探讨微波干燥过程中，微波源的数目对干燥效率和干燥均匀性的影响重要的研究方向。理论上微波源的数目增加，可更均匀地向干燥物料传递能量，减少

局部过热和干燥不均的现象，从而提高干燥效率和干燥质量。增加微波源的数目可以提供更广泛的微波覆盖范围，使微波能量均匀地分布在干燥室内，有助于实现物料内部和表面的同时加热。均匀加热有利于缩短干燥时间，减少能量消耗，同时也可以减少由于局部过热造成的物料损坏，保持干燥物料的品质。故在设计微波干燥系统时，需要通过优化微波源的布局 and 数量，以达到成本效益最优化。

在微波腔体中，建立了单端口和双端口两种不同的腔体模型进行仿真分析，分析波导端口的数量对物料介质电场强度的影响。稻谷表层电场强度如图 4-3 所示。单端口腔体中，稻谷中心的电场强度最高仅达到 $1.15 \times 10^4 \text{ V/m}$ ，明显低于双端口腔体中最高处的 $1.76 \times 10^4 \text{ V/m}$ 。此外，单端口腔体中边缘的电场强度也低于双端口腔体。虽然单端口腔体中电场强度的均匀性略微优于双端口腔体，但其场强数值相对较低。可能导致单端口腔体中的物料电场强度偏低，物料的干燥速率下降，对稻谷干燥的温升产生影响。

仿真研究表明波导端口的数量对于微波腔体中物料的电场强度分布和均匀性具有较强的影响。单端口腔体虽然具有较为均匀的电场分布，但电场强度相对较低，可能影响物料的加热效果和干燥速率。

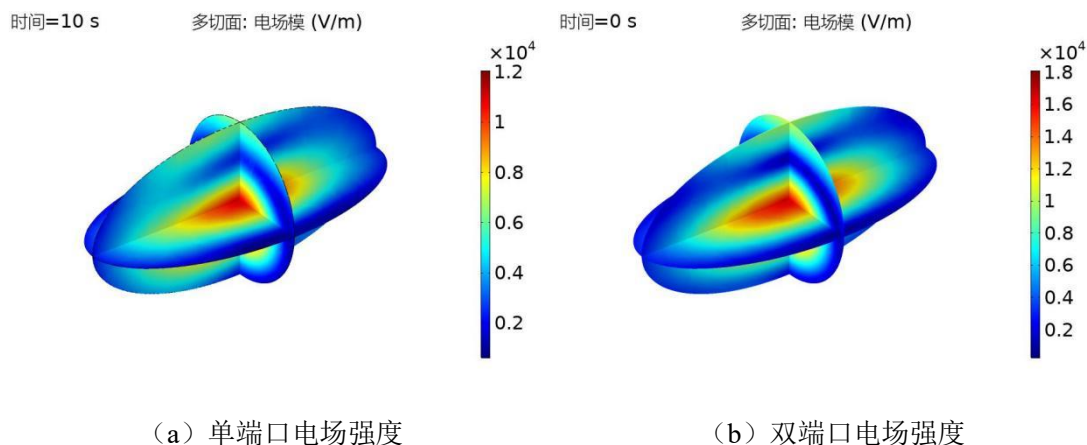


图 4-3 稻谷表层电场强度

4.4.2 双端口布局对场强温度的影响

不同的微波源布局方式会以不同的方式影响电磁场的分布和性能，微波源的布局方式会直接影响电磁场的均匀性。微波源的布局方式也会影响能量传输的效率。合理的布局方式可以确保电磁场能够充分覆盖整个系统，将能量有效地传输到需要加热或处理的物体或介质中，提高能量利用率。分散式布局或多点布局可

以更均匀地覆盖整个系统，提高电磁场的均匀性。故本文设置了三种端口的排布布局，布局位置如图 4-4 所示。

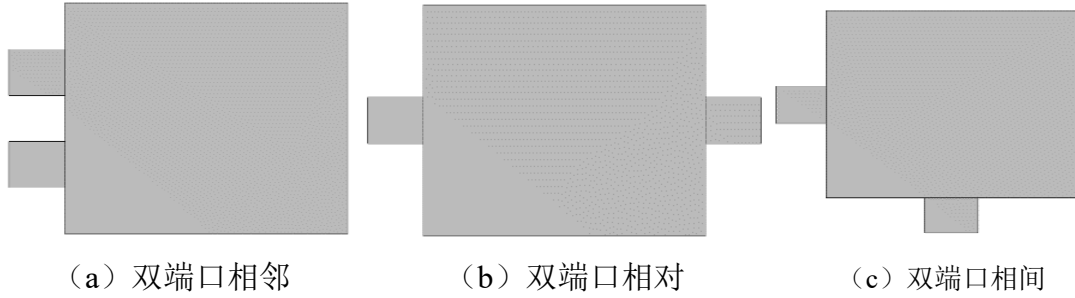


图 4-4 双端口布局位置

双端口呈相邻布局位置时场强及温度分布如图 4-5 所示。由图可知当端口布局呈相邻位置时，干燥腔体内稻谷的电场强度最高值 $1.07 \times 10^4 \text{ V/m}$ ，稻谷籽粒内部电场强度分布极为不均匀，同时干燥最高温度值 97.6°C ，稻谷籽粒可能出现开裂，焦糊等情况。通过仿真研究表明呈相邻布局的方式导致电磁场在腔体内部产生较大的变化梯度，由于微波源位置较近，端口之间产生干扰，微波多数集中在一个区域使得干燥区域电场强度及热电效应较高，降低了稻谷吸收微波的能力，使稻谷的干燥均匀性较低。

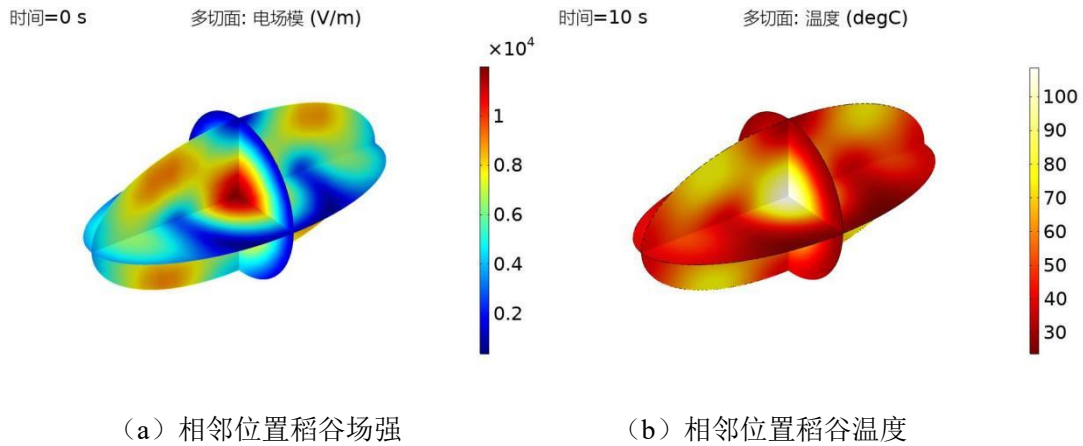


图 4-5 双端口相邻位置稻谷场强及温度

双端口呈相对布局时场强及温度分布如图 4-6 所示。由图可知当端口布局呈相对位置时，干燥腔体内稻谷籽粒的电场强度最高 $1.043 \times 10^4 \text{ V/m}$ ，稻谷籽粒内部电场强度分布较为均匀，同时稻谷籽粒的温度分布也较为均匀，干燥温度最高值为 57°C ，但由于稻谷籽粒外部在温度处于 $30 \sim 45^\circ\text{C}$ 环境下持续进行干燥，使得稻谷干燥的品质相对较高，爆腰率较低，干燥过程较为平滑。仿真研究揭示了在相

对布局模式下，电磁场内部的变化梯度并不显著，表明稻谷对微波的吸收能力较强。这种布局方式使得腔体中部区域的场强和热点效应可忽略，对干燥系统的稳定性造成的影响微乎其微。该研究发现为微波干燥技术提供了重要的设计和操作参考，有助于实现更加高效和均匀的干燥过程。

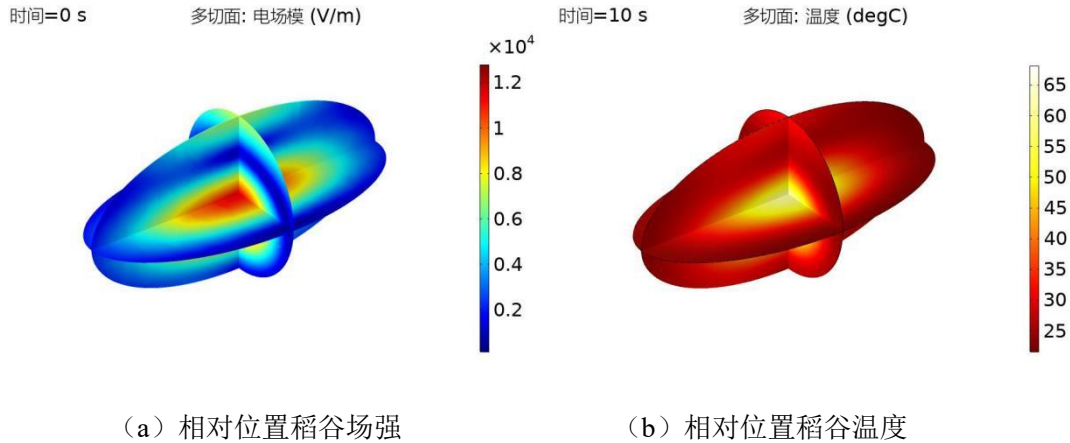


图 4-6 双端口相对位置稻谷场强及温度

双端口呈相间布局时场强及温度分布如图 4-7 所示。由图可知当端口布局呈相间位置时，干燥腔体内稻谷籽粒的电场强度最高值为 $8.78 \times 10^3 \text{ V/m}$ ，稻谷籽粒内外部电场强度分布较为均匀，稻谷籽粒的干燥温度也相对较为均匀，最高温度值为 76°C ，稻谷外部温度分布处于 $40\sim 60^\circ\text{C}$ 之间，此温度条件下稻谷可能产生裂纹，干燥情况较好，爆腰率相对于相邻位置较低。通过仿真研究表端口呈相间布局的方式下电磁场及温度场变化幅度小，稻谷吸收微波的能力相对较强，由于微波源位置相距较远，故端口的互相干扰小，微波腔体干燥区域内电磁感应及热点效应影响低，微波干燥能力相对较强。

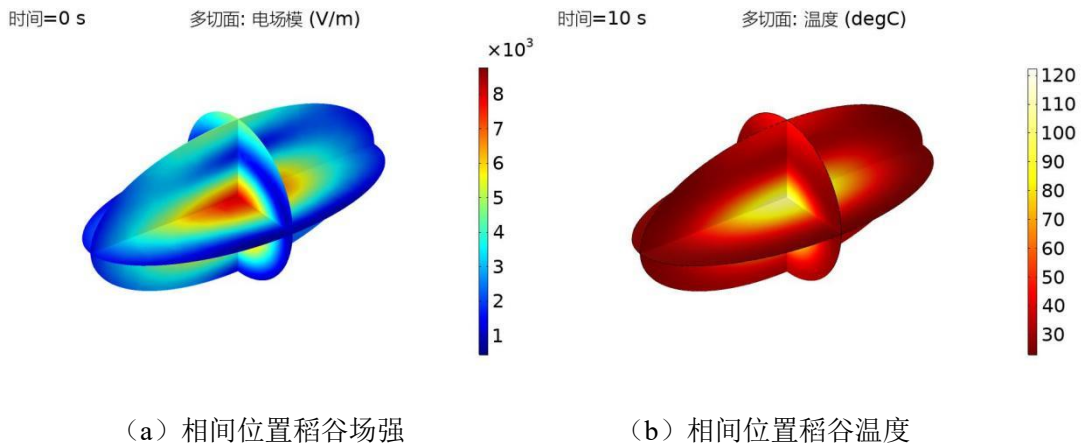


图 4-7 双端口相间位置稻谷场强及温度

4.4.3 四端口布局对场强温度的影响

多端口的布局方式在微波干燥技术中直接影响到微波能量的分布和干燥过程的均匀性。理想的端口布局能够确保微波能量在被干燥物料的整个体积中均匀分布，从而避免了局部过热或未能充分干燥的区域。通过以上分析同理取四端口 $Z=0\text{ mm}$ 处位置，分析腔体内稻谷籽粒的电场强度及温度，微波端口的布局位置如图 4-8 所示，四个端口分别呈两组相对、四个相对，两组相间位置布局。

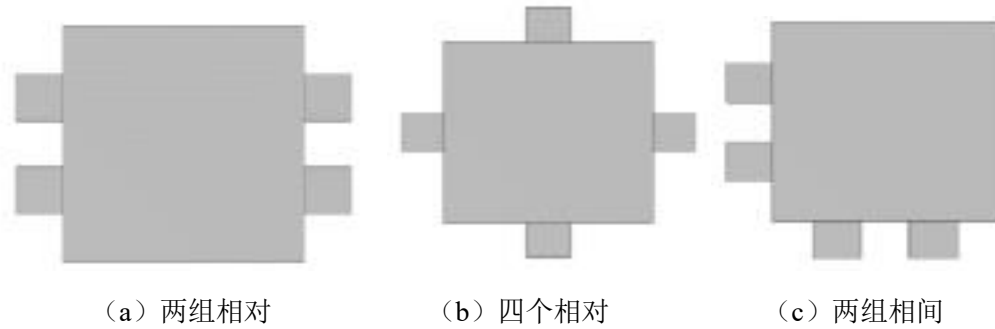


图 4-8 四端口布局位置

四端口布局呈两组相对时场强及温度分布如图 4-9 所示。由图可知当四端口布局为两组相对位置时，干燥腔体内稻谷籽粒的电场强度峰值为 $8.95 \times 10^3 \text{ V/m}$ ，稻谷籽粒外部表层场强较低，但分布较为均匀。稻谷籽粒的干燥温度峰值为 55°C ，籽粒外部表层干燥温度处于 $25\sim 40^\circ\text{C}$ 之间，符合稻谷的最佳干燥温度，稻谷堆的爆腰率极低。通过仿真研究发现了当端口布局呈相对布局时，稻谷的干燥温度及场强较为符合稻谷需求的工艺参数，稻谷的干燥品质较好。

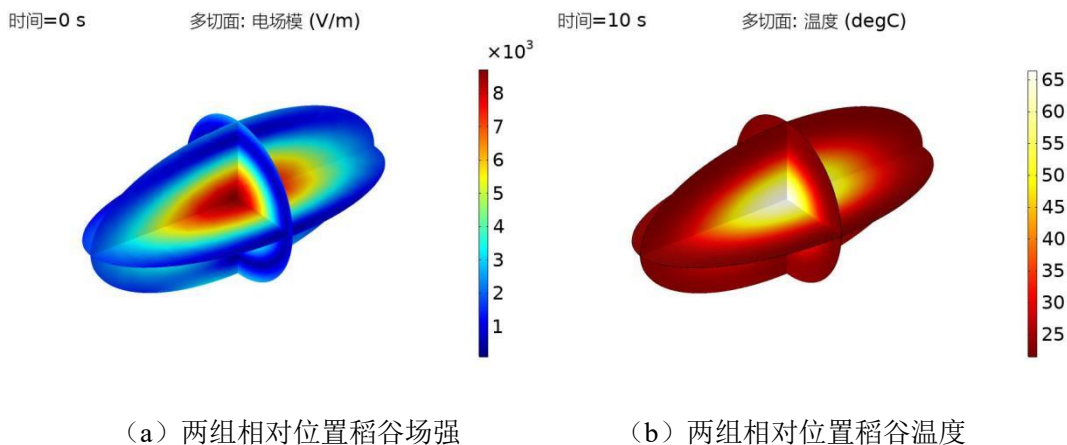


图 4-9 两组相对位置稻谷场强及温度

四端口布局呈四个相对时场强及温度分布如图 4-10 所示。由图可知当四个

端口呈相对布局位置时，稻谷籽粒的电场强度峰值为 $1.478 \times 10^3 \text{ V/m}$ ，由于微波源的增加和互耦，使干燥腔内中心区域电磁感应增强，稻谷籽粒表层电场强度和籽粒内部场强差距较大，电场强度分布不均匀。稻谷籽粒表面温升和内部温度差异较大，表层干燥温度处于 $50 \sim 75^\circ\text{C}$ ，稻谷内部最高温度为 129°C ，稻谷开始出现裂纹等不利情况。通过仿真研究发现四个端口呈相对布局时，端口之间产生互耦的情况导致电场强度分布不均，稻谷干燥温度变化较大，爆腰率增加，较大程度影响了稻谷的干燥效率。

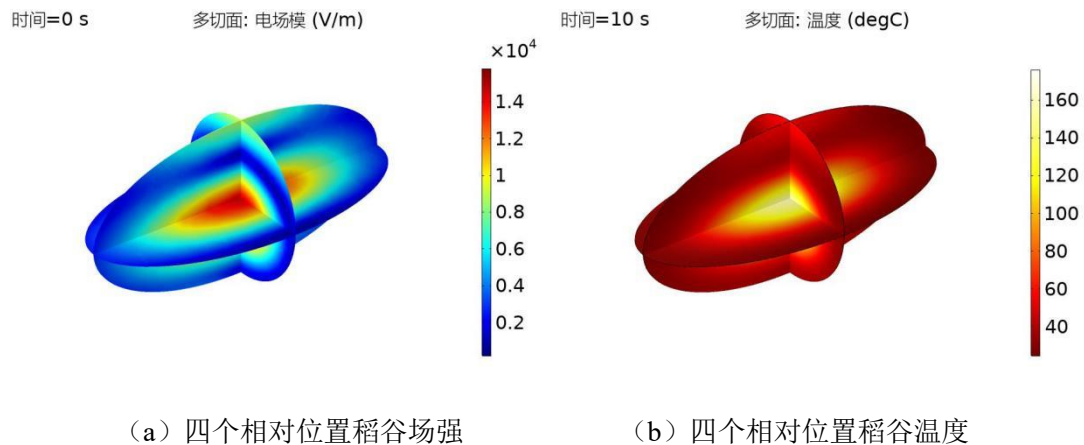


图 4-10 四个相对位置稻谷场强及温度

四端口布局呈两组相间时场强及温度分布如图 4-11 所示。由图可知当四个端口呈两组相间布局位置时，通过双端口相间的仿真结论中可知微波源的位置相距较远，端口互耦的影响较小，干燥区域内电磁感应强度相对低于四个相对布局位置，稻谷表层的电场强度处于 $4.5 \sim 7.8 \times 10^3 \text{ V/m}$ 之间，场强峰值为 $9.45 \times 10^3 \text{ V/m}$ ，稻谷籽粒表层及内部电场强度分布比较均匀。稻谷籽粒干燥表层及内部温差较小，籽粒温度处 $35 \sim 45^\circ\text{C}$ 之间，最高峰值为 56°C ，符合稻谷的最佳干燥温度。通过仿真研究表明四个端口呈两组相间时，端口之间互耦较小，干燥温度及场强分布较为均匀，爆腰率相对于四个相对位置低，稻谷的干燥效率及干燥品质较高。

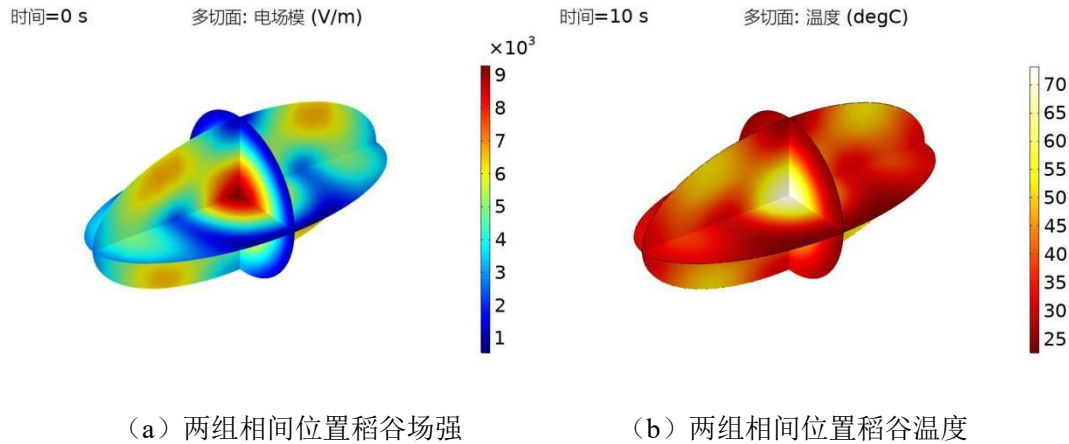


图 4-11 两组相间位置稻谷场强及温度

4.5 本章小结

本章分析了微波端口数目及布局方式对微波腔体中干燥物料的温度场强影响，得出以下结论：

(1) 微波端口的数目对微波干燥的影响较大，端口数目越多干燥腔内电场强度越大，单个微波端口比之双端口场强及干燥速率较低，但物料内部的场强均匀性单端口比双端口相对较高。端口数目为四个端口时的电场强度、物料温升，干燥效率均强于双端口。端口数量越多场强越高，温升相对较高，但温升过高可能会导致物料焦糊等情况，且多端口的互相干扰增加了电磁波的消耗，干燥效率降低。研究分析了腔体内电场强度需分布均匀，腔体的电场分布与物料温度场分布具有较好的一致性，腔体的电场均匀性决定了物料的温度场均匀性，对料层的表面的干燥效果有直接的影响。

(2) 通过多端口的微波加热模型的仿真研究，分析了多微波源端口布局方式对物料内电场强度及加热均匀性的影响。当双端口布局方式为相对分布时，相对于相邻及相间分布，干燥腔体内部区域场强及热点效应影响微乎其微，对干燥系统的稳定性影响较小，干燥效率更高。当四端口布局方式为两组相对时，稻谷的干燥表层温度符合最佳干燥工艺参数，爆腰率低，干燥品质及效率相对于两组相间，四个相对位置更高。

第五章 微波干燥装置结构与优化

5.1 微波干燥装置的设计意义

在植物产品的加工中，在对一些花瓣等含水分的植物进行干燥时，经常需要保证物料干燥后的含水量且需要快速加热以避免营养物质的流失，现有的采用真空微波干燥箱对其进行干燥，但是存在干燥不均匀的问题，造成物料品质下降，另外现有的微波干燥设备还存在干燥出的水蒸气汇集在干燥腔顶部，产生大量水珠，容易滴到干燥物料上面，导致干燥不彻底的问题^[78]。微波干燥装置设计的主要体现在以下内容：

能效转换的高效性。微波干燥技术通过电磁波的形式直接作用于物料内部，实现能量的迅速转换和分布，与传统的热传递干燥相比，可以显著提高能量利用效率。这种能量的直接作用减少了热量传递的时间和能量损失，特别是对于热敏感物料或者要求快速干燥的场合，具有明显的优势。

干燥时间的缩短。由于微波加热的特性，微波干燥装置能够在短时间内迅速提升物料温度，加速水分的蒸发速度。相较于传统干燥方法，微波干燥大大缩短了干燥周期，提高了生产效率，对于提升产能和降低生产成本具有重要意义。

环境影响的降低。微波干燥作为一种干净、高效的干燥手段，其运行过程中减少了对环境的热污染和化学污染，相比传统干燥技术具有更低的环境影响。此外，由于干燥效率的提高，微波干燥装置在能源消耗和运营成本方面具有明显优势，有助于实现生产过程的绿色化和可持续发展。

国内外学者对改善微波加热效果已有大量研究，其中模式搅拌器是最频繁用来提高加热性能的方法，也有其他学者研究 2 个馈入端口电极化方向对减少端口之间的耦合的影响^[79]。微波干燥装置的设计意义不仅在于其干燥效率和质量的显著提升，也在于其对环境友好、操作灵活、能效高效的综合优势，这些特性使其在现代工业干燥技术中占据重要地位，对推动相关领域技术进步和产业升级具有重要意义^[80]。

5.2 整体结构仿真及设计

5.2.1 设计创新点

在设计微波干燥系统时，采取以下创新方式以提高干燥效率和均匀性：

（1）物料托盘设计。采用抽屉型的物料托盘，由聚四氟乙烯制成，可以盛放物料的同时允许微波顺利通过。物料托盘与物料室内的聚乙烯醇内层结合使用，其中聚乙烯醇内层作为支架部分，物料托盘作为盛料部分。物料托盘设计为抽屉状，可随时增加或减少物料数量。

（2）干燥室顶面设计。干燥室的顶面采用弧形结构设计，使得水蒸气凝结成的水珠沿着弧形顶面流动，被吸收并集中储存在干燥室隔板上，便于更换排水。这样的设计防止了水珠直接滴入物料盘，从而提高了干燥效率。

（3）微波源设计。设置有非同步旋转微波源，通过两个波导分别作为两端馈口，使微波能够进入加热腔体。波导连接在铝质转轴上，通过端口的同向转动来实现微波源的旋转。这种设计可以实现非同步旋转结构加热、同步旋转结构加热和静态加热三种加热方法。

（4）微波功率调节。在干燥室上方设置有小型圆盘微波源，该微波源可以在圆盘上旋转，并且可以调整微波功率。将微波功率细致划分为不同阶段，每 10W 为一段，以便清晰地分析微波干燥物料的最佳功率。可旋转的小型微波源能够使微波干燥更加均匀，效果类似于非同步旋转微波源。

（5）内部隔板和屏蔽板设计。干燥室内部设置有聚乙烯醇隔板和微波屏蔽板，其中微波屏蔽板能有效地防止微波反射的浪费。转轴由铝制材料制成，防止微波的吸收，加强物料对微波的吸收，从而提高微波干燥的效率。

5.2.2 干燥装置波导端口仿真设计

由第四章可知在双端口下微波干燥的效率相对单端口较高且能耗相对于四端口较低，对此通过建立了微波仿真干燥模型，干燥仿真模型如图 5-1 所示，分析了端口处于干燥腔体内高度对电场强度及温度场的影响为设计干燥腔体结构提供仿真基础。以双端口设计为例取腔体中部 Z 轴 -50mm，0mm，50mm 处的物料电场强度分布情况和温度分布图进行分析和判断。

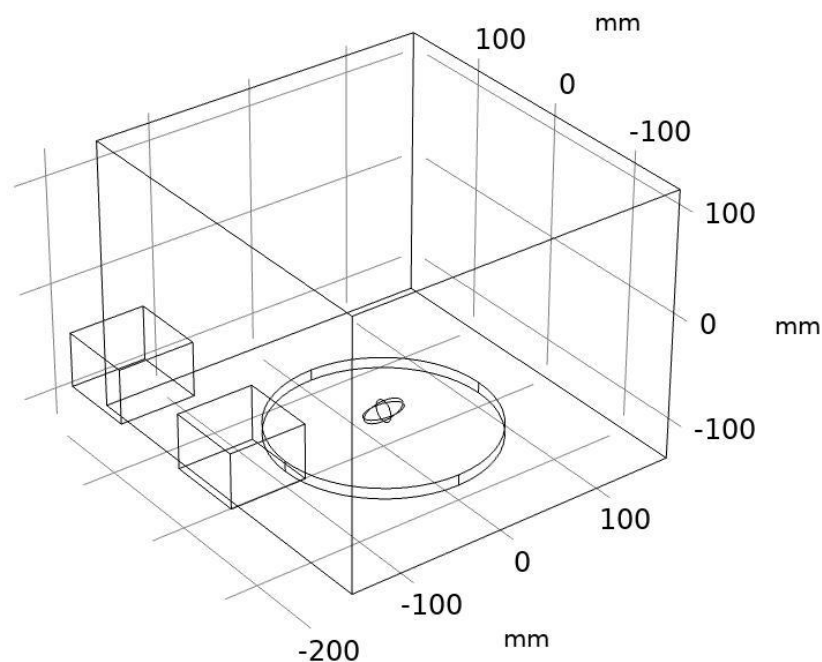


图 5-1 双端口干燥模型

当端口处于 $Z=-50\text{ mm}$ 处时，干燥腔及物料电场强度如图 5-2 所示。由图可知，双端口处于腔体底部位置时，由于微波辐射的传播特性和干燥箱

内部的反射和吸收。在干燥箱中，微波辐射的波长相对较长，因此在干燥箱内部会产生驻波效应，而底部通常位于驻波节点附近，因此电场强度可能会相对较弱。微波源发出的电磁波会与干燥箱内壁和样品交互，产生多次反射和吸收，同时品的存在也会影响电场分布。且样品放置在底部，可能会遮挡微波辐射，导致底部电场强度进一步减弱，使整个腔体的电场强度较低。而由第四章可知过低的电场强度可能会导致干燥速率的降低，对稻谷的干燥速率产生较大的影响。

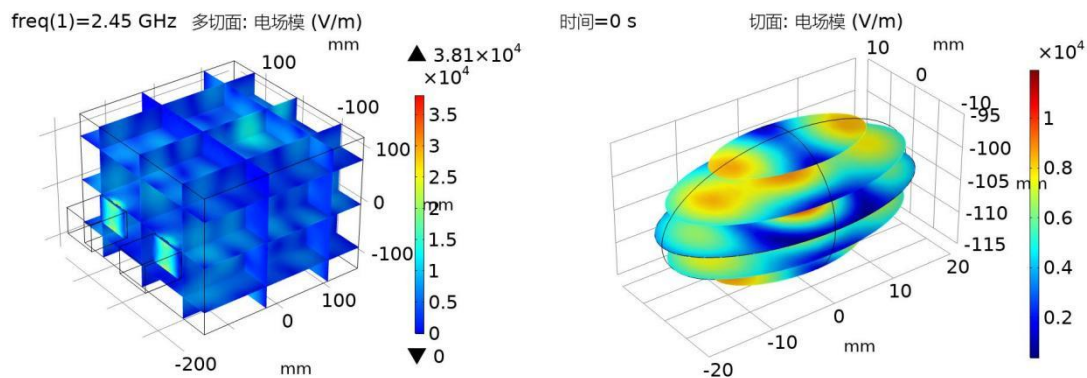


图 5-2 Z 轴以下-25mm 处干燥腔及物料电场强度

当端口处于 $Z=0$ mm 处时,干燥腔及物料电场强度如图 5-3 所示。由图可知双端口处于腔体中心位置时,干燥腔及物料的电场强度明显高于底部位置。微波源设置在干燥箱的中心部位,电场强度可能会在整个干燥箱内更加均匀。中心部位可减少微波辐射的传播路径,减少反射和吸收的影响。微波辐射均匀地向各个方向传播。由于辐射路径较短,能量损失较少,电场强度在空间中更加均匀分布。通过第四章仿真分析可知位于中心位置,稻谷的干燥效率较高。故设置微波源在中心部位可以减少驻波效应。当微波源位于干燥箱的中心时,驻波节点和驻波腹部分布更加均匀,减少了电场强度的波动使整个微波干燥腔电场强度较为均匀。

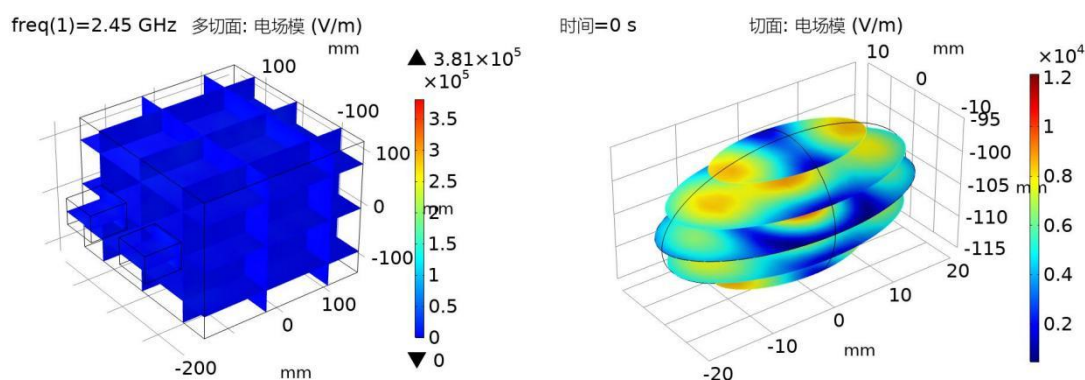


图 5-3 Z 轴 0mm 处干燥腔及物料电场强度

当端口处于 $Z=50$ mm 处时,干燥腔及物料电场强度如图 5-4 所示。由图可知双端口位于干燥腔顶部时干燥腔及物料的电场强度明显高于其他两个位置,顶部较近的区域会受到来自微波源的直接辐射。这导致顶部的电场强度相对较高,因为辐射的能量并没有经过太长的传播路径。同时微波辐射在干燥箱内壁上发生反射。顶部较接近微波源,因此反射的能量较多,这会增加顶部的电场强度。反射效应会导致顶部辐射的叠加效应,使得顶部电场更强,微波辐射在干燥箱内壁和样品上发生吸收。虽部分能量被吸收,但顶部位置吸收较少,微波源距离顶部较近,辐射经过路径较短,且顶部通常是驻波腹部的位置,因此电场强度更强,导致顶部的电场强度相对较高。而由于过高的电场强度可能会导致物料温升过高,由第四章可知电场强度可能会引起开裂等不利干燥情况。

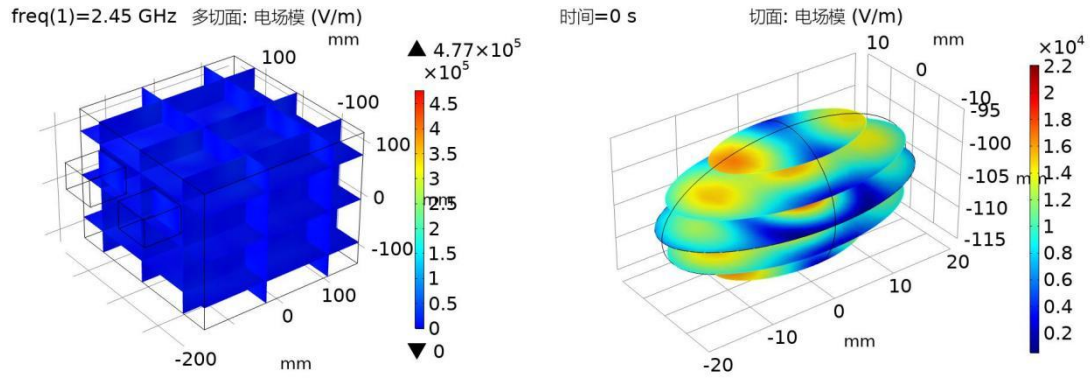


图 5-4 Z 轴 50mm 处干燥腔及物料电场强度

在进行微波干燥过程中，微波端口的位置对腔体内电场强度的分布及其对物料干燥效率的影响具有决定性作用。本研究通过详细的仿真分析，探讨了微波端口位于干燥腔底部、顶部以及中部时对干燥效率的具体影响。当微波端口设置于干燥腔的底部时，观察到腔体及物料内的电场强度相对较低。这一现象导致物料在干燥过程中的干燥速率降低，从而对干燥效率产生显著的负面影响。这种配置下，电场强度的不足限制了微波能量的有效传递至物料，减缓了水分的蒸发速度，延长了干燥时间。相反，当微波端口位于干燥腔顶部时，腔体及物料内部的电场强度显著增强。虽然这种配置有利于提高干燥速率，但过高的电场强度可能导致物料温度急剧升高，从而引发裂纹、焦糊等不良干燥效果，影响物料的品质和外观。微波端口定位于干燥腔的中部，可以实现腔体及物料内部电场强度的均匀分布，同时相比于顶部位置，场强得到适当的降低。基于上述仿真研究结果，本文将微波端口设计在干燥腔的中部位置。此设计可优化电场强度的分布，确保物料干燥过程中的均匀性和效率，同时降低不良干燥现象的发生概率，从而显著提高干燥过程的整体性能和效率。

5.2.3 干燥装置结构设计

微波真空干燥箱是一种新型材料干燥设备，其设计理念在于利用微波技术实现高效、均匀的干燥过程，同时通过真空环境降低干燥物料的沸点，在较低温度下快速去除物料中的水分，不仅能够保护热敏感材料不被破坏，也能大幅提高干燥效率。本文将对微波真空干燥箱的构造进行详细解析，并阐述其工作原理。

微波真空干燥箱主要由机箱、微波干燥室、物料托盘、以及控制系统组成。其中，机箱作为设备的主体结构，为其他组件提供了稳定的支撑和保护。位于机

箱内部的微波干燥室是干燥过程的核心区域，其内部设计有物料托盘，用于放置需要干燥的物料。干燥室的顶部采用圆弧形结构设计，这种设计能够有效地分散微波能量，并保障真空干燥的水分可通过弧形结构流至集水盒中，确保物料受热均匀，从而提高干燥效率和质量。

控制系统是由位于机箱外侧的控制面板组成，包括触摸屏和监视器位于干燥室一侧，能够方便地调整干燥参数并实时监控干燥过程。通过这高度集成的控制系统，操作者可以精确控制微波输出功率和真空度，以适应不同物料的干燥需求。

微波干燥室与动力室之间通过一块微波屏蔽板进行密封间隔，确保微波能量被有效利用且不对外界环境造成干扰。动力室内设有微波电源和真空泵，分别负责产生微波能量和维持干燥室内的真空环境。微波电源通过小型圆盘微波源，该微波源与干燥室内部通过转轴下方的杆件连接，并且可拆卸，便于维护和更换。

此外，非同步微波源的设计增强了设备的灵活性和效率，通过转轴和聚四氟乙烯隔板与机箱相连接，确保微波能量的均匀分布。物料托盘则与机箱转盘电机相连，该设计使得物料托盘能够旋转，从而实现物料的均匀干燥。

微波真空干燥箱通过其独特的结构设计和高效的控制系统，实现了对物料的快速、均匀干燥。圆弧形的干燥室顶部设计、高效的微波能量利用、以及精准的控制系統共同保证了干燥过程的高效率和高质量，使其成为干燥热敏感材料的理想选择。实验装置组成如图 5-5，5-6 所示。

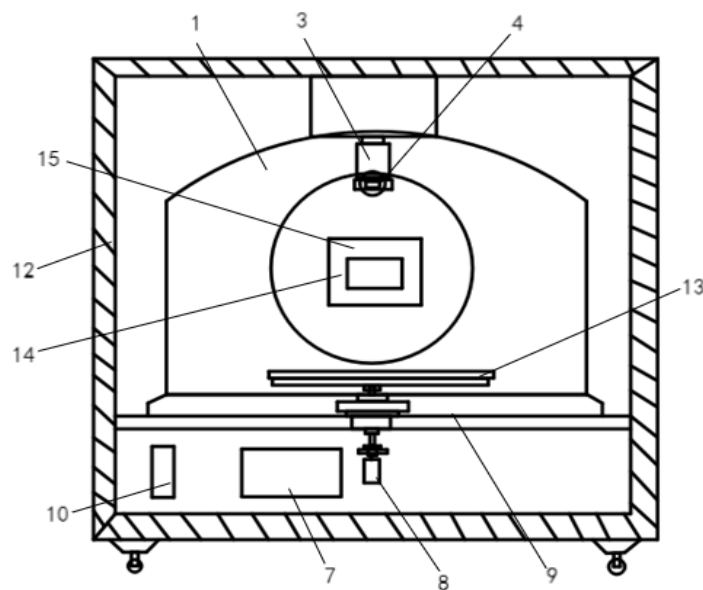


图 5-5 干燥装置左视图

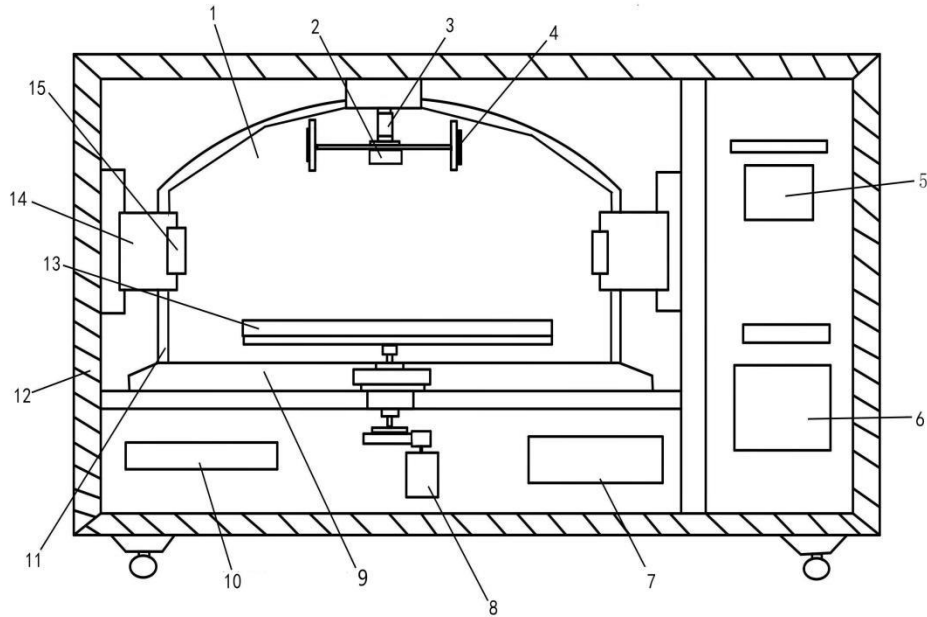


图 5-6 干燥装置正视图

微波干燥装置中结构：1.干燥室；2.微波水分仪；3.转轴；4.小型圆盘微波源；5.触摸屏；6.监视器；7.真空泵；8.转盘电机；9.微波屏蔽板；10.微波电源；11.聚四氟乙烯隔板；12.机箱；13.物料托盘；14.圆盘转轴；15.非同步旋转微波源。

5.2.4 干燥装置工作原理

微波真空干燥箱构建于一定结构的机箱内，其中心设备为干燥室，该干燥室内部配备有转盘电机转轴，以实现物料托盘的旋转，从而保证物料的均匀干燥。该干燥室还装有微波水分仪，此设备的主要功能是计算物料的实时含水率，确保干燥过程的精确控制。为实现稻谷等农产品的有效干燥，干燥室内还设置有小型圆盘微波源及物料托盘。物料托盘设计为抽屉型结构，旨在便于用户根据实际需求随时更换或调整物料质量。此外，机箱外部设有触摸屏及监视器，用以操作控制和监视干燥过程。

干燥室的顶部设计为弧形结构，其下端连接有动力室，其中包括微波电源和真空泵。干燥室与动力室之间通过微波屏蔽板进行密封隔离，以防微波泄露。同时，干燥室与转轴之间采用聚乙烯醇或聚四氟乙烯隔板进行密封，这种隔板具有强烈的吸水性，能够防止水蒸气凝结成的水珠滴落到物料上，从而影响干燥效果。

转轴与非同步旋转微波源相连，可通过调整旋转角速度实现不同的工作模式，包括同步、非同步及静态运转，以适应不同物料的干燥需求。小型圆盘微波源不

仅可调整低段功率，而且能与非同步微波源共同工作或单独工作，实现最佳干燥效果。综上微波真空干燥箱的设计充分考虑了物料干燥过程中的均匀性、效率及安全性，通过精确控制微波发射及真空环境，可显著提高稻谷等农产品的干燥效率和质量，对农产品后处理领域具有重要的应用价值。

5.3 主要零部件结构设计

微波磁控管是一种用于微波放大的电子器件。它由一个中空的金属管组成，管内包裹着细丝螺旋成的阴极和环绕阴极的聚束线圈。在管的两端有高频输入和输出端口。工作时，微波信号通过输入端口输入到管内，同时管内产生的磁场通过聚束线圈使电子从阴极发射并向阳极加速，形成电子束。在电子束通过时，微波信号引起了电子束中的电子密度的微小变化，这就形成了微波信号的放大效果。最后，通过输出端口输出放大后的微波信号。

磁控管由一密封真空管组成，主要是由管芯和磁铁两部分构成。管芯内有一柱形中心阴极(电子源)，置于铜质环柱形阳极里，电子被静电场吸引流至阳极(铜质环柱形)。沿真空管轴的稳定磁场，铜质环柱形内部的槽柱间因 LC 振荡形成交换磁场，磁场可约束自由电子进入铜导体，并产生旋转磁场使阴极线圈通过电磁感应大量施放自由电子使电子偏离其径向路程，绕阴极旋转(因铜环内槽正负极性旋转变化使阴极大量施放自由电子周围自由电子旋转)，产生微波频率的振荡(旋转的电子沿枪口喷射)。磁控管的设计和工作机理展示了电子在电磁场中的复杂相互作用，以及这些相互作用如何被利用来高效地转换能量。通过对磁控管结构的深入理解，可以更好地把握其产生微波能量的原理，从而在相关领域如雷达技术、通信和微波加热中找到广泛的应用。

5.3.1 磁控管结构设计

微波源是指产生微波能量的装置称为微波源。不同的治疗目的，需要不同频率和不同功率的微波能量。有连续波源、脉冲调制波源、磁控管，微波晶体管来产生微波振荡。对微波源的要求是输出功率和频率的稳定性微波。微波干燥绝大多数选择磁控管为微波源，对微波腔体内传输微波能量，再由搅拌器将微波能量再腔内进行反射对固液体加热。

传统微波真空干燥箱仅配置单个微波源,导致在微波干燥过程中物料加热不均匀,内外部热量分布不均匀,干燥不彻底,干燥效率较低。本文设计了一种非同步旋转微波源,再原有微波干燥箱的基础进行了改良优化,增加了一个微波源,将微波源即端口设置在微波腔体内部左右端呈对立分布,并在微波源后端进行了改进,增添了一段圆盘转轴,使得微波发射器可在旋转过程中微波能量可在腔体内直接传输反射,并且可设置加热方法分别为非同步旋转结构加热,同步旋转结构加热,静态结构加热三种方法。在非同步旋转加热种,两个波导端口之间产生互相耦合的情况,对加热过程的效率有较高的提升。同时解决了传统微波干燥中由于搅拌器的影响导致微波能量不均匀的不利因素。微波源采用连续波磁控管,磁控管固定在干燥腔两端的圆盘转轴上,转轴镶嵌在干燥箱壁上。非同步微波源结构设计内容如下:

磁控管内部的主要结构包括阴极、阳极(通常称为相互作用空间)以及外加的静磁场和电磁场。主体的管芯结构主要由输入、输出、阴极、磁极、磁路,谐振(阳极回路)组成,结构如图 5-7 所示。

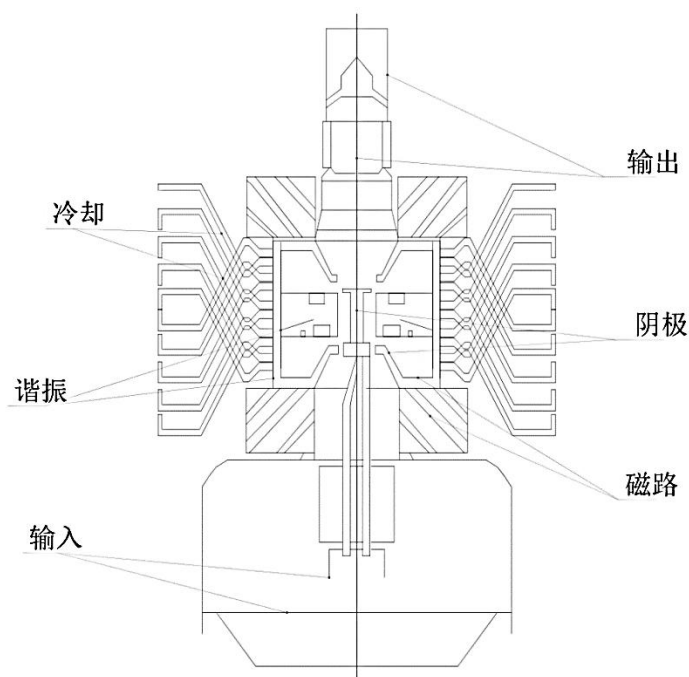


图 5-7 磁控管管芯结构

磁控管的阳极回路是磁控管中的一个重要部分,如图 5-8 所示。它的设计和功能对磁控管的性能有着直接影响,阳极回路的主要作用是提供电子运动的路径,同时作为微波能量的提取和输出端。在磁控管工作时,阴极发射出的电子在外加

磁场的作用下会沿螺旋路径向阳极移动，这些电子在移动过程中与阳极回路中的微波电场相互作用，产生能量的放大。磁控管的阳极回路镶嵌于阳极板上，磁控管的阳极通常是金属制成的圆筒，内部有多个腔体。

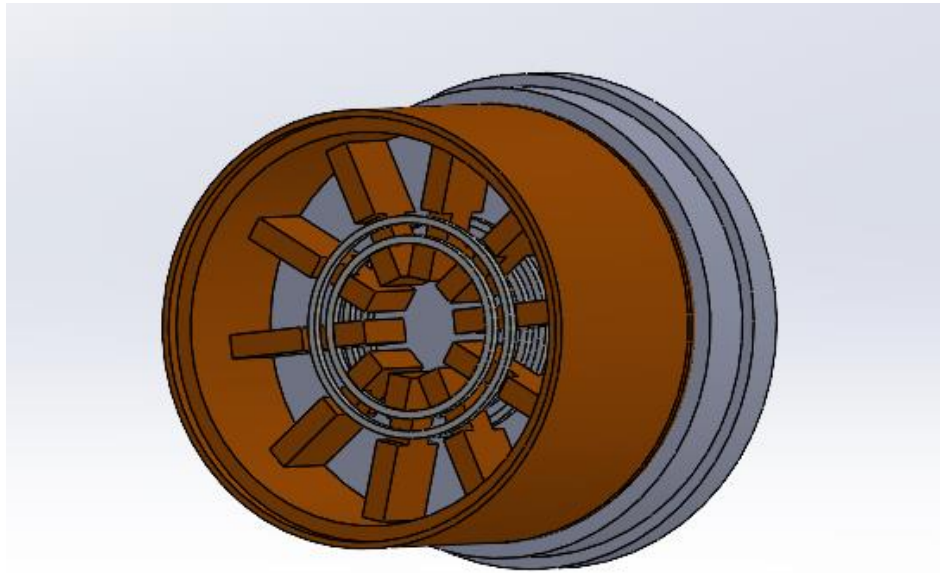


图 5-8 阳极回路装配图

这些腔体通过特定的设计和排列，使得电子流在通过时能够有效地与其中的电磁场发生作用，产生或放大微波信号，其主要是两个均压环和阳极筒组成，如图 5-9 所示，均压环作为改善绝缘子串电压分布的器具可将高压均匀的分布在物体周围，使磁控管内部没有电位差，达到均匀的效果，阳极做成筒状，轴线和磁场方向平行，为微波场强提供较为均匀的场所，阳极筒配置大小各一个均压环，使微波能量产生的时候对阳极筒产生相对均匀的压力，即在阳极回路中电磁场强能较为均匀的分布于磁控管中

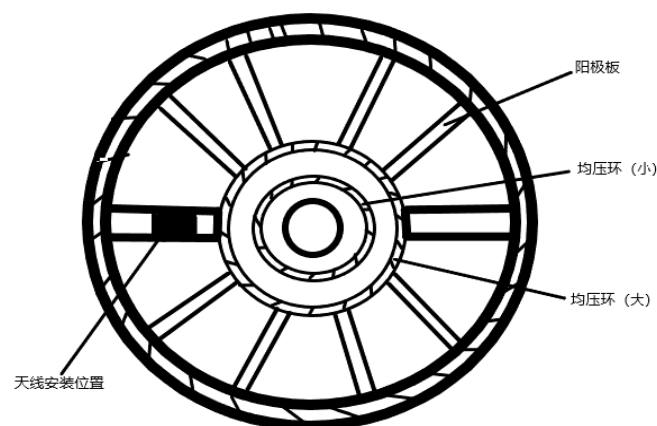


图 5-9 阳极回路切面图

5.3.2 波导天线设计

波导天线是一种利用波导作为主要传输介质来辐射和接收电磁波的天线。波导是一种特殊的管道，能够引导微波或射频波沿特定路径传播。波导天线广泛应用于雷达、卫星通信和无线网络等领域。电场强度在实际过程中不能被相关仪器测量到，只能通过计算得出。在矩形波导中的电场强度如式 5-1 所示：

$$E = \frac{\sqrt{\varphi P}}{\alpha\beta} \quad (5-1)$$

式中， φ 为阻抗， Ω ； α, β 为波导截面尺寸，mm。

这种天线的结构和设计对其性能有着直接的影响。波导天线的性能受多种因素影响，天线增益是评估天线性能的重要指标之一，天线是无源器件不能产生能量，天线增益是指将能量有效集中向某特定方向辐射或接受电磁波的能力。由于天线的增益于天线的尺寸有关，通过调整波导的尺寸可使其更好地适配工作频率，提高天线的带宽和增益。故本文对磁控管的天线结构进行改良优化。波导天线材料采用铜铝合金增强其导电性能。通常情况下，天线尺寸越大，增益越高，磁控管天线尺寸较小，单位时间内接收微波能较少，通过对波导的长度、高度和宽度等尺寸参数进行优化，可以实现更好的电磁耦合和辐射效果，波导天线在微波干燥下得电场强度如式 5-2 所示。将式 4-2 代入式 5-1 得微波干燥腔得电场强度如式 5-2 所示：

$$E = \frac{4P}{\alpha\beta} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda}{2\alpha}\right)^2} \quad (5-2)$$

在条件允许的情况下增加天线的尺寸，使得波导口直径变大，单位时间内接受并发射的微波能提升，在微波干燥腔体内使得电磁能覆盖的距离和范围更大。磁控管底部滤波器，电极引出线与转轴相连接，磁控管底端与转轴顶端部分连接，通过控制系统启动转轴电机电源带动磁控管的旋转，转轴内部两端与磁控管外壁进行铆接，外壁采用铝制材料，由于铝制材料散热性能较好，阻热范围在 $1^\circ\text{C/W} \sim 2^\circ\text{C/W}$ ，且拥有优异的电气性能，电磁屏蔽能力使得磁控管在发射微波能量时转轴内部的微波能不会消耗流失，在转轴内壁上反射进入干燥腔体内，较大程度上的利用了微波能，减少了损耗。

5.3.3 微波干燥腔体内部设计

微波干燥腔体内部主要由机箱、微波干燥室、物料托盘构成。干燥腔体设计内容如下：

(1) 微波干燥室设计

真空微波干燥箱主要核心在于微波能量的有效应用和干燥环境的优化，干燥腔体整体结构如图 5-10 所示。微波发生器产生的微波，通过复杂的馈能系统，均匀地分布到微波加燥器的每一个角落。这种设计不仅确保了物料加热的均匀性，还显著提高了加热效率，减少了能量损失。

干燥腔体的设计采用了创新的弧线型结构，这一点特别针对了干燥过程中水蒸气的管理问题。弧线型的顶部设计，不仅增强了腔体的结构强度，减少了能量的辐射损失，而且有效地指导了水蒸气沿着腔体顶部凝结、流动，并最终收集到专门设计的积水盒中。这种设计显著减少了物料受水珠直接滴落的影响，从而保证了干燥后物料的质量和干燥效率。

干燥装置材料选择冷轧钢板和铝锌合金材料的运用，既确保了干燥腔体的耐用性和结构稳定性，也优化了热能的保持和微波能量的有效利用。这种材料的使用，加之精确的工艺制造，保证了整个干燥箱的使用寿命和能源利用效率。在系统控制方面，采用了微处理器技术和传感器，实现了对干燥过程的实时监控和精确控制。通过对温度、湿度、微波强度等关键参数的实时调整，确保了干燥过程的最优化，进一步提升了干燥效率和物料干燥后的品质。

(2) 物料托盘以及隔板设计

为了进一步提高微波真空干燥装置中微波能量的吸收和反射效率，设计了一种干燥腔体内隔板。采用高性能的聚四氟乙烯（PTFE）作为隔板材料。聚四氟乙烯不仅具有耐高温、耐低温、耐化学腐蚀的特性，而且对微波具有极好的透过性。这种材质允许微波能量无阻碍地穿透，而不会像传统金属材料那样吸收或反射微波能量，从而最大化地利用了微波能量，确保了能量的有效分布。在此基础上，隔板采用了特殊设计，以增强微波在干燥腔体内部的反射和分布效果。隔板设置在弧形干燥腔体内部，以促进微波的多次反射和穿透，使微波能量更加均匀地分布在腔体内部。这种设计不仅提高了干燥效率，还确保了物料干燥的均匀性。

物料托盘的抽屉型设计允许物料托盘多层堆叠并且易于拆卸和清洁。物料托

盘同样采用聚四氟乙烯材料，不仅因其与隔板相同的材质特性优化了微波的利用效率，还因为其非粘特性便于清洁和维护。每个托盘都设计为可以与干燥室内部的转盘电机连接，通过电机驱动物料托盘旋转，进一步确保了物料在干燥过程中的均匀受热。

为了最大化地提升干燥过程中微波能的利用效率及物料干燥均匀性，干燥腔体的设计考虑了微波的多角度入射和反射路径。利用聚四氟乙烯隔板的透微波特性以及托盘旋转机制，微波能在腔体内部形成复杂的反射和折射路径，从而实现

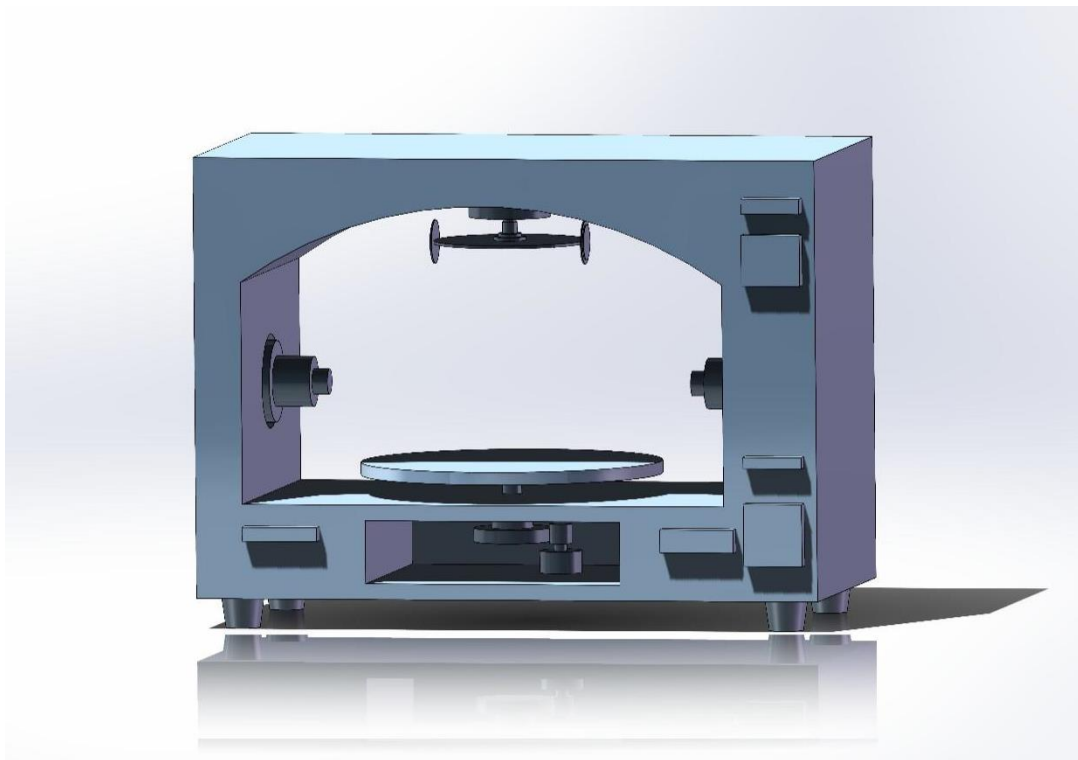


图 5-10 微波干燥腔体结构

5.4 具体实施方式

在进行工作操作时，首先需要对干燥室进行准备，确保所有操作步骤均按照规范进行，以确保安全和干燥效率。操作开始前打开干燥室的门。随后，将待干燥的物料仔细放置在专门设计的物料托盘上，放置需确保物料分布均匀，避免干燥过程中出现干燥不均的问题。完成物料放置后，关闭干燥室的门，确保门扉紧密封闭，防止干燥过程中的热量和微波泄漏。接着，通过接通干燥箱的电源，为

后续的干燥操作提供所需的能量。电源接通后，通过控制面板上的触摸屏，启动干燥箱，根据物料的特性和干燥需求，设置合适的干燥模式和参数。干燥箱启动后，物料托盘会被转盘电机驱动，按照预设的速度旋转。这种旋转机制确保了托盘上的物料能够均匀受热，从而提高干燥效率并保持物料质量。此外，干燥室内部的非同步旋转微波源根据实验要求，可以选择不同的旋转方式发射微波，通过控制角速度，以达到最佳的干燥效果。通过干燥室上方的转盘电机控制的小型圆盘微波源，可以按照设定的角速度旋转并发射微波，过程中可与非同步旋转微波源相结合，通过调整功率等参数，实现对干燥过程的精细控制。

5.5 本章小结

本章深入探讨了微波干燥技术的仿真基础与结构设计原理，对微波干燥模型腔体进行了详细的设计与建模。在此基础上，通过先进的仿真技术对腔体内的电磁场分布进行了深入分析，旨在理解微波能量在腔体内的传播与分布情况。通过仿真分析，本研究精确调整了微波腔体内部端口的数量和具体位置布局，确保微波能量在腔体内均匀分布，从而提高干燥效率和效果。

为最大程度地提升干燥效能，磁控管的内部结构进行了细致的优化改进，对波导天线的设计进行了重点改进，通过调整天线结构和参数，增强了其将微波能量有效导入干燥腔体的能力。设计了微波干燥装置内部的其他零部件，包括微波反射器、干燥托盘等，确保这些部件能够协同工作。通过对这些零部件设计和布局，提高干燥效率，确保干燥过程的均匀性和可控性。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本文以研究稻谷的微波干燥特性和干燥装置优化为落脚点,首先通过对稻谷的结构参数及生理特性变化,对在微波干燥过程中的传热传质机理进行研究分析,并讨论了多种干燥数学模型,对稻谷干燥动力学理论进行了阐释,通过对数学模型进行数据上的拟合分析,得到了不同干燥模型的模型参数和评价参数。并通过传热传质理论完成了稻谷的单因素研究并进行了正交实验,得到了稻谷的最佳干燥工艺参数。通过实验数据基于 LS-SVM 算法建立了关于稻谷含水率变化的预测模型,阐述了稻谷在干燥期间的水分变化。利用 COMSOL 建立了微波仿真模型,对稻谷在干燥腔内的电场强度及温度进行了分析,为微波干燥装置的设计提供了仿真实论基础。并通过进一步微波源仿真基础设计了一种微波干燥装置,对装置进行了结构设计及优化。

本文的主要创新点如下:

(1) 对稻谷干燥过程中的热质传递机理进行了系统分析,探讨了干燥过程对稻谷品质的影响,并基于此,评估并比较了多种干燥动力学模型,通过精确的数据拟合分析,明确了各模型的参数与评价指标,确立了适用于稻谷干燥的最优动力学理论模型。

(2) 通过单因素实验分析了影响稻谷干燥的多种因素,结果知稻谷干燥特性的干燥影响大小顺序为初始温度、微波功率、装载量、微波真空保持时间,真空度。并通过实验数据拟合了稻谷含水率的变化,以此建立了稻谷的含水率模型,研究表明通过 LS-SVM 算法建立的干燥含水率模型预测精度达到 98.9974%,能够较好的应用于其含水率的预测。

(3) 仿真分析了微波端口(即微波源)在不同数目及布局位置下的电场强度及物料的场强温度变化,仿真结果显示微波端口数目对微波干燥的影响较大,通过分析知微波端口数目保持两个且布局位置为相对的时候,稻谷的电场强度及温度分布情况符合其干燥工艺。通过仿真研究得出微波装置的端口设计,并通过微波波导端口的理论进行了结构上的优化设计,对干燥装置的研究和开发提供了

实践及理论基础。

6.2 展望

微波干燥及干燥装置设计优化领域专注于通过微波技术实现物料的快速、均匀干燥，努力提高能量效率、加热均匀性，并减少环境影响。这包括优化微波频率和功率分布精确调节干燥过程，以及研究不同材料的电磁属性以改善微波与材料的相互作用。此外，环境与安全性评估也是设计中不可忽视的方面。

参考文献

- [1] 国家统计局.国家统计局关于 2023 年早稻产量数据的公告[M].北京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] 徐春春,纪龙,陈中督,等.2023 年我国水稻产业形势分析及 2024 年展望[J].中国稻米,2024,30(02):1-4.
- [3] 王瑞元.2022 年我国粮油产销和进出口情况[J].中国油脂,2023,48(06):1-7.
- [4] 李天祥,朱晶.粮食产后服务体系建设的国际经验与启示[J].世界农业,2024,(04):50-60.
- [5] 姚靖.国际粮食价格波动对中国粮食安全的影响分析[J].价格月刊,2024,(04):26-33.
- [6] 郑先哲,王成芝.水稻干燥新工艺的研究[J].农机化研究,1999,(03):38-41.
- [7] Dehghannya J, Hosseinlar S H, Heshmati M K. Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018,45:132-151.
- [8] 王骋, 窦鸿瑄.微波技术在食品加工中的应用[J].食品安全导刊,2022,13:168-170.
- [9] 储涛涛,江阳,尹勇,等.农产品微波干燥技术的应用与展望[J].安徽农学通报,2022,28(05):151-152.
- [10] 李少萍,张小燕,刘瑞祥,等.农产品微波组合干燥技术研究进展[J].食品研究与开发,2022,43(07):207-212.
- [11] 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.
- [12] 熊添,蔡芳,何建军,等.不同干燥工艺下紫薯全粉品质分析[J].食品工业科技,2023,44(06):49-57.
- [13] Huang D, Men K, Tang X, et al. Microwave intermittent drying characteristics of camellia oleifera seeds[J]. Journal of Food Process Engineering,

2021,44(1):e13608.

- [14] Ye S, Wang Z, Shen J, et al. Sensory qualities, aroma components, and bioactive compounds of *Anoectochilus roxburghii* (Wall.) Lindl. as affected by different drying methods[J]. *Industrial crops and products*, 2019,134:80-88.
- [15] Ren Y, Sun D W. Monitoring of moisture contents and rehydration rates of microwave vacuum and hot air dehydrated beef slices and splits using hyperspectral imaging[J]. *Food chemistry*, 2022,382:132346.
- [16] Gomide A I, Monteiro R L, Laurindo J B. Impact of the power density on the physical properties, starch structure, and acceptability of oil-free potato chips dehydrated by microwave vacuum drying[J]. *LWT*, 2022,155:112917.
- [17] Xu J, Wang D, Lei Y, et al. Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of *Tremella fuciformis*[J]. *Ultrasonics sonochemistry*, 2022,84:105963.
- [18] Péré C, Rodier E. Microwave vacuum drying of porous media: experimental study and qualitative considerations of internal transfers[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2002,41(5):427-436.
- [19] Sharma G P, Prasad S. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination[J]. *Journal of food engineering*, 2001,50(2):99-105.
- [20] 郑先哲,封少轩,高瑞丽,等.浆果微波干燥品质控制系统研究[J].*东北农业大学学报*,2022,53(02):63-72.
- [21] 张倩,李世榆,李秀辰,等.裙带菜微波真空干燥质热传递特性与品质优化[J].*食品与机械*,2022,38(07):166-173.
- [22] 李盼盼,胡钦锴,张敏.微波真空干燥技术研究进展[J].*食品安全导刊*,2022,(20):175-177.
- [23] 李瑞敏,邹佳池,张洪清,等.微波干燥对稻谷的影响研究进展[J].*食品科技*,2023,48(01):153-158.
- [24] 王钰超,彭飞,张丽梅.隧道式木材微波干燥装置结构与仿真分析[J].*装备制造技术*,2023,(09):7-9+26.
- [25] Jumrat S, Punvichai T, Karrila S, et al. Experimental and simulation study of

- drying skipjack tuna with a modified microwave drying system[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2021,30(8):968-979.
- [26] 张斌尧,张兆国,张付杰.一种微波功率可调的热风微波耦合干燥装置[J].*农机化研究*,2017,39(07):240-243.
- [27] 金鑫.微波干燥装置优化研究[J].*现代食品*,2023,29(01):8-10.
- [28] 王磊,沈柳杨,刘成海,等.微波干燥浆果过程中料层电场分布影响能量利用分析[J].*农业工程学报*,2021,37(04):1-10.
- [29] 郑先哲,秦庆雨,王磊,等.气流改善泡沫树莓果浆微波干燥均匀性提高能量利用率[J].*农业工程学报*,2019,35(14):280-290.
- [30] 徐亚元,郎旭敏,肖亚冬,等.超声渗透辅助组合干燥对胡萝卜干燥均匀性及品质的影响[J].*江苏农业科学*,2021,49(09):148-156.
- [31] 杨微.改善隧道式微波干燥设备均匀性的研究[J].*真空电子技术*,2021,(01):76-79.
- [32] 宋月,王文君,陈锴迪,等.微波泡沫干燥条件下浆果果浆干燥均匀性研究[J].*食品科技*,2017,42(12):74-81.
- [33] Wang S, Hu Z, Han Y, et al. Effects of magnetron arrangement and power combination of microwave on drying uniformity of carrot[J]. *Drying technology*, 2013,31(11):1206-1211.
- [34] Pu Y Y, Sun D W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution[J]. *Biosystems Engineering*, 2017,156:108-119.
- [35] 韩俊豪,杨慧,李凯歌,等.微波预处理对生鲜花生贮藏特性和品质的影响[J].*花生学报*,2024,53(01):97-104.
- [36] 陈敬举,谢建松,肖彦民.微波转筒干燥研究[J].*现代食品*,2015(22):10-13.
- [37] 李伊帆,王凤霞,解田,等.双馈口旋转对微波加热均匀性和互耦的影响[J].*太赫兹科学与电子信息学报*,2020,18(02):264-268+277.
- [38] 邢文龙,曹有福,张小燕,等.用于微波干燥的矩形和圆柱形谐振腔仿真分析[J].*包装与食品机械*,2022,40(04):50-54.

- [39] 张紫恒,张吉军,唐正,等.北方粳高粱微波干燥特性试验与仿真分析[J].中国农机化学报,2021,42(11):65-71.
- [40] 肖瑶,吴明亮,张锐,等.油菜旋风式烘干机干燥筒内气力流场特性仿真分析[J].中国农业科技导报,2019,21(09):77-83.
- [41] Song F, Zhang N, Liu P, et al. Heating uniformity improvement of the intermittent microwave drying for carrot with simulations and experiments[J]. Journal of Food Process Engineering, 2024,47(3):e14581.
- [42] 谭凤芝,刘晓东,曲长春,等.微波辐射下秸秆基多孔吸水材料的制备[J].大连工业大学学报,2019,38(01):40-43.
- [43] Fu, W, Li, J, Pei, Y, Ning, W, & Li, Z. Effect of Microwave Drying Temperature Distribution on Drying Characteristics and Quality of Carrot[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2023,23(5):151–161.
- [44] Süfer Ö, Pandiselvam R, Kaya Y Y. Drying kinetics, powder properties, and bioactive components of bitter orange (*Citrus aurantium* L.) dried by microwave-assisted foam-mat approach[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024,14(1):1275-1287.
- [45] Zhou, Y, Liu, Y, Li, Q, Fan, W., Pan, X, & Yu, W. Drying kinetics and heat mass transfer characteristics of thin layer pineapple during microwave vacuum drying[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering,2023,23(3):1–14.
- [46] Béttega R, Rosa J G, Corrêa R G, et al. Comparison of carrot (*Daucus carota*) drying in microwave and in vacuum microwave[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2014,31:403-412.
- [47] Hadjout-Krimat L, Belbahi A, Dahmoune F, et al. Study of microwave and convective drying kinetics of pea pods (*Pisum sativum* L.): A new modeling approach using support vector regression methods optimized by dragonfly algorithm techniques[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023,46(2):e14232.
- [48] Guemouni S, Mouhoubi K, Brahmi F, et al. Convective and microwave drying

- kinetics and modeling of tomato slices, energy consumption, and efficiency[J].
Journal of Food Process Engineering, 2022,45(9):e14113.
- [49] 甘婷, 易萍, 黄敏, 等. 芒果微波干燥特性及数学模型研究[J]. 食品科技, 2024, 49(01): 19-26.
- [50] 沈素晴, 徐亚元, 李大婧, 等. 青香蕉微波干燥特性及动力学模型研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 110-117.
- [51] Bahmani M, Jalili B, Jalili P, et al. Effect of variations hollow of octagon porous media on heat and mass transfer[J]. International Journal of Thermofluids, 2024, 21: 100576.
- [52] 王莹, 庞云凤, 何首旺, 等. 果蔬真空超冰温保鲜贮藏中传热传质的数值模拟及实验研究[J]. 冷藏技术, 2019, 42(02): 10-14.
- [53] 王雪芹, 刘宝林, 闫静文. 卷心菜真空冷却过程的 CFD 传热传质模拟[J]. 制冷学报, 2012, 33(01): 65-68.
- [54] 周峰, 刘琪英, 王晨光, 等. 基于 COMSOL 的果糖脱水传热传质数值模拟[J]. 太阳能学报, 2019, 40(06): 1677-1683.
- [55] Pandey R N, Pandey S K, Ribeiro J W. Complete and satisfactory solutions of Luikov equations of heat and moisture transport in a spherical capillary—Porous body[J]. International communications in heat and mass transfer, 2000, 27(7): 975-984.
- [56] 童金杰, 李长友, 刘木华, 等. 稻谷流动层孔隙率检测装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(11): 26-31.
- [57] 陈宇曦, 阮培英, 王健, 等. 大蒜含水率的测定方法[J]. 农业工程与装备, 2022, 49(06): 18-21.
- [58] 陈若龙, 华伟. 微波干燥中介质温度梯度与含水率变化关系的研究[J]. 真空电子技术, 2023, (02): 70-75.
- [59] 甘婷, 易萍, 黄敏, 等. 芒果微波干燥特性及数学模型研究[J]. 食品科技, 2024, 49(01): 19-26.
- [60] 付文杰, 李静, 裴永胜, 等. 微波干燥温度分布对胡萝卜干燥特性与品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(05): 151-161.

- [61] 孙帅,崔政伟.柱状胡萝卜样品热风微波耦合干燥数学模型[J].食品工业科技,2013,34(12):161-165+172.
- [62] 张玉华,李绪平,寇子琦,等.桶内微波干燥温度场模拟[J].山东化工,2022,51(11):161-164.
- [63] 顾思忠,刘斌,杨兆丹.胡萝卜在微波干燥条件下的热物理性质和多孔特性[J].江苏农业学报,2018,34(04):897-903.
- [64] 张同旺,张翊,朱丙田,等.喷雾干燥过程中雾滴内传质与传热方程的数值求解[J].石油学报(石油加工),2019,35(04):708-713.
- [65] 贾潇然,赵景尧,蔡英春.锯材高频-对流联合加热干燥传热传质数学模型[J].中国工程科学,2014,16(04):106-112.
- [66] 梁才航.基于高分子透湿膜的全热回收器的传热传质的研究[J].科学技术与工程,2013,13(14):4015-4018.
- [67] 赵希强,王敏,张建,等.秸秆料包微波加热过程的温度分布的数值模拟[J].农业工程学报,2011,27(08):308-312.
- [68] 吴钊龙,张小叶,黄纪民,等.黄精片间歇微波干燥特性及模型拟合[J].江苏农业科学,2022,50(15):156-162.
- [69] 唐小闲,刘艳,咸兆坤,等.小黄姜真空微波干燥特性及其动力学研究[J].食品科技,2021,46(10):87-94.
- [70] 陆军.分数阶热传质 Luikov 耦合方程的显式代数解[J].郑州师范教育,2014,3(04):18-20.
- [71] 尹晓峰,杨玲.稻谷薄层红外干燥特性及数学模型[J].中国粮油学报,2024,39(02):11-19.
- [72] 吴生礼,陶乐仁,谷志攀,等.污泥薄层干燥特性及动力学模型分析[J].净水技术,2017,36(12):33-37.
- [73] 汪照,谢春燕,李岩,等.胭脂萝卜薄层干燥的动力学模型及工艺优化[J].食品工业科技,2016,37(02):265-269.
- [74] Hashim F A, Mostafa R R, Hussien A G, et al. Fick's Law Algorithm: A physical law-based algorithm for numerical optimization[J]. Knowledge-Based Systems, 2023,260:110146.

- [75] Zhang J, Matsuura H, Shirakashi R. A method for measuring dielectric relaxation of water by NIR spectroscopy: Applicability and application to measurement of water diffusion coefficient[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2023,46(7):e14335.
- [76] Omolola A O, Jideani A I O, Kapila P F. Modeling of thin layer drying characteristics of banana cv. Luvhele[J]. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2015,21(2):342-348.
- [77] Abdollahpour S, Kosari-Moghaddam A, Bannayan M. Prediction of wheat moisture content at harvest time through ANN and SVR modeling techniques[J]. *Information processing in agriculture*, 2020,7(4):500-510.
- [78] 朱学飞. 基于 PLC 控制的微波干燥箱设计与研究[J]. *现代信息科技*, 2020,4(09):26-28+32.
- [79] 李伊帆,王凤霞,解田,等. 双端口旋转对微波加热均匀性和互耦的影响[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2020,18(02):264-268+277.
- [80] 葛新锋,刘存祥. 金银花环形微波干燥装置的设计与研究[J]. *食品科技*, 2010,35(01):116-119.
- [81] 段续,闫莎莎,曾凡莲,等. 基于介电特性的白蘑菇微波冻干传热传质模拟[J]. *现代食品科技*, 2016,32(06):177-182.

攻读硕士期间获得的科研成果

一、论文专利情况

- [1] 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, 2024-2-23.
- [2] 孙铜生,刘家豪,王凯,郑乐.一种新型微波真空干燥箱[P], 发明专利申请, 申请号: CN202310886602.0, 2023-07-19.
- [3] 孙铜生,杨震,曹冉,王静平,王凯,刘家豪.一种谷物微波干燥方法及装置[P], 发明专利申请, 申请号: CN202211327428.8, 2022-10-27.
- [4] 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, 2024-4-05.
- [5] Sun Tongsheng, Cao Ran, Wang Kai, Liu Jiahao. Mechanism of crack formation in corn during microwave drying process[J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(3): 563-576.

二、获奖情况

- [1] 2022.12 第十一届芜湖市大学生专利创新大赛二等奖
- [2] 2022.10 第八届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛优秀奖
- [3] 2022.08 第十一届安徽工程大学专利发明与创新大赛二等奖
- [4] 2021.12 研究生学业奖学金二等奖学金

致谢

感谢孙铜生导师的三年教导，导师严谨的科研态度，平易近人的作风，对工作认真踏实的敬业精神，令我敬佩并深深的影响着我。在研究生的三年时间里，孙老师不仅在科研上给我悉心指导，还在生活上给我无微不至的关怀和帮助。

感谢安徽工程大学机械工程学院提供的优良的学习和科研环境，感谢所有指导、关心和帮助过我的老师和同学。

还要感谢工作室的同学，感谢你们在三年内生活和工作上的陪伴。也感谢实验室的师兄师弟们给予我的支持和帮助。

感谢我的家人，感谢他们在生活上对我无微不至的关心和鼓励，他们是最坚实的后盾，也是我努力的动力。

最后再次向所有给予我帮助的老师 and 同学表示感谢！

尚德敏学 唯实惟新

