

分类号: O441.4

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220120112



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 稻谷微波干燥工艺分析及装置
优化

论 文 作 者 樊金生

指 导 教 师 孙铜生 教授

学 科 (专 业) 机械工程

研 究 方 向 现代机械设计理论及方法

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：O441.4

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220120112

稻谷微波干燥工艺分析及装置优化

Microwave Drying Process Analysis and Equipment Optimization for Paddy Rice

学生姓名： 樊金生
指导教师： 孙铜生 教授
专 业： 机械工程
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：樊金生

日期： 年 月 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：樊金生

日期： 年 月 日

指导教师签名：孙钢生

日期： 年 月 日

稻谷微波干燥工艺分析及装置优化

摘 要

稻谷是全球最重要的粮食作物之一，是亚洲、非洲和拉丁美洲等地区数十亿人口的重要主食来源。稻谷收获后通常含有较高水分，若不及时干燥，易发生霉变、发芽或虫害，导致粮食损失和品质下降。因此，干燥处理是确保稻谷储存稳定性、延长保质期及维持营养价值的关键环节。自然晾晒方式受制于气候条件，干燥效率较低；而热风干燥虽然效率较高，但存在能耗大、温度难以精确控制等问题，容易造成稻谷品质下降和营养成分损失。相比之下，微波干燥技术通过电磁能直接作用于稻谷内部水分，实现内外同步加热，避免了传统干燥中的“外焦内湿”现象，提高了干燥均匀性。同时，微波干燥速度快、能耗低，且能有效减少营养成分损失，降低裂纹率，保持稻谷品质。

本文主要研究内容如下：

(1) 稻谷介电特性及其对微波干燥效果的影响机制

稻谷的介电特性是决定微波干燥效果的关键因素。构建了介电特性测试系统，采用同轴电缆法测试了稻谷的介电特性，建立了介电常数和介电损耗因子与温度、含水率和微波频率的数学模型。实验表明：介电参数随温度、含水率和微波频率的增加而显著上升，并在高温、高含水率和高频率条件下达到峰值。这种变化规律影响电磁波的穿透深度和能量吸收效率，进而决定干燥效果。基于介电参数建立的模型可有效预测干燥过程中的温度分布、水分变化及微波穿透深度，为优化微波干燥工艺提供了理论依据。

(2)干燥参数对干燥效率及稻谷品质的影响

干燥参数的选择对稻谷微波干燥的效率及品质具有决定性影响。通过正交试验研究了间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度的影响。结果表明：适当延长间歇时间可缓解干燥应力，降低裂纹率，并使籽粒内部温度和水分分布更均匀。提升真空度能加快干燥速度，因高真空环境下水分沸点降低，促进内部水分快速蒸发。在高微波功率条件下，稻谷籽粒内部的温度梯度和水分梯度会显著加剧，导致应力应变增大，裂纹率明显上升。因此，需合理选择干燥参数，在保障稻谷品质的同时提高干燥效率。

(3)基于 BP 神经网络与遗传算法的干燥模型优化

微波干燥过程具有高度非线性和动态特性，传统数学模型难以准确描述其复杂变化。采用 BP 神经网络构建稻谷含水率预测模型，并通过遗传算法(GA)优化网络参数。BP 神经网络通过学习实验数据建立干燥参数与工艺条件的非线性映射，并引入 GA，通过模拟生物进化的自然选择和遗传机制，优化网络初始权值和阈值，显著提升了训练效率和预测精度。经过实验验证，优化后的 GA-BP 神经网络模型在预测精度方面较传统 BP 神经网络具有明显优势，在平均绝对误差(MAE)和平均绝对百分比误差(MAPE)等关键性能指标有显著改善，且在收敛速度和稳定性方面表现更优。

(4)微波干燥控制策略及干燥腔体结构的优化

微波干燥过程中的温度控制是影响干燥效果的关键因素。对比了传统 PID 控制与模糊控制的性能，发现 PID 控制在处理非线性系统时存在动态响应慢、超调量大等问题，而模糊控制通过模拟人类决策过程，能够更好地适应非线性特性。结果表明：模糊控制在动态响应速度、控制精度和系统稳定性方面均优于 PID 控制，减少了温度波动和

超调量。此外，以电磁场分布为评价标准设计了波导的数量和位置，仿真发现了双 E 型馈入口结构表现出更好的电场均匀性和磁场分布特性。

关键词：稻谷，微波干燥，介电常数，介电损耗因子，含水率，温度

MICROWAVE DRYING PROCESS ANALYSIS AND EQUIPMENT OPTIMIZATION FOR PADDY RICE

ABSTRACT

Rice is one of the world's most important staple crops and a key food source for billions of people in Asia, Africa, and Latin America. After harvesting, rice usually contains a high moisture content, and if not dried in time, it is prone to mold growth, germination, or pest infestation, leading to grain loss and quality degradation. Therefore, the drying process is a critical step in ensuring the storage stability of rice, extending its shelf life, and maintaining its nutritional value. Traditional sun drying is limited by climatic conditions and has low drying efficiency. While hot air drying is more efficient, it consumes a large amount of energy and has difficulties in precise temperature control, which can easily result in quality deterioration and nutrient loss in rice. In contrast, microwave drying technology directly acts on the moisture inside the rice through electromagnetic energy, achieving simultaneous internal and external heating. This avoids the "surface scorching while inner moisture remains" issue commonly seen in traditional drying methods, thereby improving drying uniformity. Additionally, microwave drying offers advantages such as rapid drying speed, lower energy consumption, and reduced nutrient loss. It also helps to lower the crack rate and better preserve the quality of rice. The main content of this paper is as follows:

(1) Dielectric properties of rice and their influence mechanism on microwave drying efficiency

The dielectric properties of rice are key factors determining the effectiveness of microwave drying. A dielectric property measurement system was constructed, and the coaxial cable method was used to test the dielectric properties of rice. A mathematical model was established to describe the relationships between the dielectric constant, dielectric loss factor, and variables such as temperature, moisture content, and microwave frequency. Experimental results show that dielectric parameters increase significantly with rising temperature, moisture content, and microwave frequency, reaching peak values under high-temperature, high-moisture, and high-frequency conditions. These variations affect the penetration depth of electromagnetic waves and the efficiency of energy absorption, which in turn determine the drying performance. The model based on dielectric parameters effectively predicts the temperature distribution, moisture variation, and microwave penetration depth during the drying process, providing a theoretical basis for optimizing microwave drying technology.

(2) Influence of drying parameters on drying efficiency and rice quality

The selection of drying parameters plays a decisive role in the efficiency and quality of rice microwave drying. An orthogonal experiment was conducted to investigate the effects of intermittent time, vacuum degree, microwave power, and drying temperature. The results showed that appropriately extending the intermittent time can alleviate drying stress, reduce the crack rate, and promote a more uniform distribution of temperature and moisture inside the grains. Increasing the vacuum degree accelerates the drying process, as the boiling point of water decreases in a high-vacuum environment, facilitating rapid internal moisture evaporation. Under high microwave power conditions, the temperature and moisture gradients inside the rice grains increase significantly, leading to greater stress and strain, which in turn raises the crack rate. Therefore, drying parameters should be carefully selected to enhance drying efficiency while

ensuring rice quality.

(3) Optimization of the drying model based on bp neural network and genetic algorithm

The microwave drying process exhibits highly nonlinear and dynamic characteristics, making it difficult for traditional mathematical models to accurately describe its complex variations. To address this, a BP neural network was used to construct a moisture content prediction model for rice, with network parameters optimized using a genetic algorithm (GA). The BP neural network learns from experimental data to establish a nonlinear mapping between drying parameters and process conditions. By incorporating GA, which simulates natural selection and genetic mechanisms in biological evolution, the initial weights and thresholds of the network were optimized, significantly improving training efficiency and prediction accuracy. Experimental validation demonstrated that the optimized GA-BP neural network model outperforms the traditional BP neural network in terms of prediction accuracy. Key performance indicators, such as mean absolute error (MAE) and mean absolute percentage error (MAPE), showed significant improvements. Additionally, the GA-BP model exhibited faster convergence speed and greater stability.

(4) Optimization of microwave drying control strategy and drying chamber structure

Temperature control in the microwave drying process is a critical factor influencing drying performance. A comparison between traditional PID control and fuzzy control was conducted, revealing that PID control struggles with nonlinear systems due to its slow dynamic response and large overshoot. In contrast, fuzzy control, which mimics human decision-making processes, better adapts to nonlinear characteristics. The results indicate that fuzzy control outperforms PID control in terms of dynamic response speed, control accuracy, and system stability, effectively reducing temperature

fluctuations and overshoot. Additionally, the waveguide configuration was redesigned based on electromagnetic field distribution as an evaluation criterion. Simulation analysis showed that a dual E-type feed structure exhibited superior electric field uniformity and improved magnetic field distribution characteristics.

KEY WORKS: rice, microwave drying, dielectric constant, dielectric loss factor, moisture content, temperature

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 稻谷干燥技术研究现状.....	2
1.2.1 稻谷常用干燥技术研究现状.....	2
1.2.2 稻谷微波干燥技术研究现状.....	4
1.3 研究内容与技术路线.....	5
1.4 章节安排.....	6
第 2 章 稻谷微波干燥介电特性分析.....	8
2.1 样品制备与分析方法研究.....	8
2.1.1 实验设备.....	8
2.1.2 样品制备.....	9
2.1.3 正交实验.....	9
2.1.4 分析方法.....	11
2.2 介电特性模型.....	11
2.2.1 介电参数预测模型.....	11
2.2.2 穿透深度.....	12
2.2.3 介电参数测量原理.....	13
2.2.4 传热传质模型.....	13
2.3 结果与分析.....	15
2.3.1 温度与含水率对介电特性结果影响.....	16
2.3.2 温度与微波频率对结果影响.....	17
2.3.3 含水率与微波频率对结果影响.....	18
2.3.4 结果对比分析.....	19
2.4 本章小结.....	19
第 3 章 稻谷干燥过程应力解析.....	21
3.1 干燥模型.....	21

3.1.1 电磁波方程.....	21
3.1.2 传热传质模型.....	21
3.1.3 应力模型.....	23
3.2 分析方法与实验方法系统研究.....	25
3.2.1 材料.....	25
3.2.2 实验设备.....	26
3.2.3 分析方法.....	26
3.2.4 实验方法.....	27
3.3 结果与讨论.....	29
3.3.1 不同干燥条件对含水率变化的影响.....	29
3.3.2 干燥因素主效应分析.....	31
3.3.3 不同干燥条件对稻谷裂纹产生的影响.....	34
3.3.4 显著性检验不同干燥条件的影响.....	36
3.4 本章小结.....	38
第 4 章 微波真空干燥稻谷含水率预测.....	39
4.1 含水率预测方法.....	39
4.1.1 BP 神经网络预测模型设计.....	39
4.1.2 GA-BP 神经网络模型设计.....	46
4.2 GA-BP 神经网络的稻谷含水率预测.....	48
4.2.1 基于遗传算法改进的 BP 神经网络模型的训练.....	48
4.2.2 基于 GA-BP 神经网络模型的稻谷含水率预测.....	48
4.2.3 BP 与 GA-BP 神经网络算法比较.....	49
4.3 本章小结.....	50
第 5 章 稻谷微波干燥控制系统及干燥腔体优化.....	51
5.1 微波干燥控制系统设计.....	51
5.1.1 干燥机理分析.....	52
5.1.2 干燥装置控制模型.....	53
5.1.3 系统参数辨识.....	54
5.2 微波干燥装置控制方法优化.....	55
5.2.1 PID 控制系统.....	55

5.2.2 模糊控制.....	57
5.3 微波干燥装置腔体优化.....	59
5.3.1 微波谐振腔理论.....	59
5.3.2 谐振腔形状与尺寸.....	61
5.3.3 腔体溃入口分布设计.....	62
5.3.4 腔体表面电磁场分布.....	64
5.3.5 腔体截面电场分布.....	66
5.3.6 腔体截面磁场分布.....	67
5.4 本章小结.....	70
第 6 章 总结与展望.....	70
6.1 结论.....	71
6.2 展望.....	72
参考文献.....	73
攻读硕士期间获得的科研成果.....	82
致谢.....	83

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

稻谷作为全球主要粮食作物之一，其种植面积已达 1.6 亿公顷，是数十亿人口的重要主食来源^[1]。然而，稻谷在收获后因高含水率易受霉菌、害虫和真菌侵害，导致每年损失超过 500 万吨^[2-5]。稻谷含水率过高不仅会降低其营养价值，还会影响储存稳定性，从而造成巨大的经济损失^[6]。因此，将稻谷含水率及时干燥至储藏标准的安全范围，是确保其品质和延长保质期的关键措施^[7]。

传统的自然干燥方式受天气条件限制，效率低且难以满足大规模生产需求^[8]。随着粮食产量的持续增长，现代农业对高效、节能的干燥技术提出了更高要求^[9]。微波干燥技术作为一种创新性干燥方法，通过微波的热效应和非热效应双重作用，实现了稻谷水分的快速均匀去除，同时较好地保持了其营养成分^[10,11]。与传统干燥方法相比，微波干燥具有加热速度快、能量利用率高、可控性强等优势，逐渐成为稻谷干燥领域的研究热点^[12]。此外，我国粮食产业链损耗问题日益突出。《中国农业产业发展报告 2023》指出，稻谷全产业链损失率高达 26.2%，其中储藏和加工环节的损失尤为严重。过度加工导致的稻谷损失率甚至达到 10.95%。研发高效节能的干燥工艺对降低粮食损耗、维护粮食供应安全具有重要的实践价值^[13]。

从技术层面来看，微波干燥能够显著提高干燥效率^[14]。传统热风干燥需要较长时间才能将稻谷含水率降至安全范围，而微波干燥利用电磁波直接作用于稻谷内部水分分子，实现快速加热和蒸发，大幅缩短干燥时间^[15,16]。此外，微波干燥的均匀性较好，能够避免传统干燥中因温度分布不均导致的局部过热或干燥不足问题，从而提高稻谷的整体品质^[17]。从经济角度来看，微波干燥技术的应用有助于减少粮食损失，降低生产成本^[18]。稻谷在储存过程中因含水率过高而导致的霉变和虫害问题，每年造成巨大的经济损失^[19]。通过微波干燥技术，可以快速将稻谷含水率控制在安全范围内，有效减少储存环节的损失^[20]。同时，微波干燥的高效性和节能性也有助于降低能源消耗，为粮食加工企业节约成本^[21]。从社会效益来看，微波

干燥技术的研究与应用对保障粮食安全具有重要意义。我国作为世界最大的稻谷生产国和消费国，稻谷的产后损失问题直接影响粮食供应和食品安全。通过推广微波干燥技术，可以有效减少稻谷在储藏和加工环节的损失，提高粮食利用率，为保障国家粮食安全提供技术支持^[22]。从环保视角分析，微波干燥技术展现出显著的绿色低碳特性^[23]。相较于传统干燥方法，该技术具有能耗低、污染少的优势，与可持续发展原则高度契合^[24]。在全球环保意识日益增强的背景下，微波干燥技术的普及应用将为农业生产的生态化转型提供有力支持。

综上所述，稻谷微波干燥技术的研究不仅能够提高干燥效率、降低粮食损失，还具有显著的经济、社会和环境效益^[25,26]。随着技术的不断发展和完善，微波干燥有望成为稻谷产后处理的重要技术手段，为粮食产业的可持续发展注入新的动力。

1.2 稻谷干燥技术研究现状

稻谷是由稻壳和颖果构成的复杂结构谷物，其干燥行为表现出显著的特异性。由于稻壳质地坚硬，在干燥过程中会阻碍颖果内部水分的迁移，导致干燥效率降低且易出现品质问题^[27]。这种结构特性使得稻谷干燥过程比普通谷物更为复杂，对干燥技术提出了更高要求。近年来，随着粮食产后损失问题的日益突出，稻谷干燥技术的研究备受关注。传统干燥方法如自然晾晒和热风干燥虽广泛应用，但存在效率低、能耗高、品质难以保障等局限性^[28]。为此，微波干燥、真空干燥等新型技术逐渐成为研究热点，旨在通过创新干燥方式提高效率、降低损耗并保障稻谷品质^[29]。

1.2.1 稻谷常用干燥技术研究现状

干燥是稻谷产后处理的关键环节，直接影响其储存稳定性和加工品质。农业科技的进步推动了干燥技术的革新，从传统自然干燥逐步向高效节能的现代干燥方式演进。当前主流干燥方法涵盖自然干燥、热风干燥、微波干燥、红外干燥及冷冻干燥等多种形式^[22,30,31]，每种技术适用于不同干燥需求。

(1) 自然干燥

自然干燥是最传统的干燥方式，主要依靠阳光和自然风的作用降低稻谷含水率^[32]。其优点是成本低、操作简单，适用于小规模农户。然而，自然干燥受天气条

件限制较大，干燥周期长，且易受灰尘、虫害和微生物污染，导致稻谷品质下降。此外，自然干燥的均匀性较差，容易出现局部过干或过湿现象。因此，在现代农业生产中，自然干燥逐渐被机械化干燥方式取代。

(2)热风干燥

热风干燥作为主流的机械化干燥方法，采用热空气对流换热机制，通过向干燥仓内通入加热空气来实现稻谷水分的去除^[33]。热风干燥具有干燥效率高、适用范围广的优点，尤其适合大规模生产^[34]。然而，热风干燥也存在一些局限性：一是能耗较高，运行成本较大；二是干燥过程中温度控制不当易导致稻谷爆腰率增加，影响碾米品质；三是热风干燥的均匀性较差，容易出现局部过热现象^[35]。近年来，通过热风干燥参数的优化调控及分段干燥工艺的创新，上述问题已得到部分改善^[36]。

(3)微波干燥

微波干燥是一种新型干燥技术，利用微波电磁场使稻谷内部水分分子产生热运动，从而实现快速、均匀的干燥效果^[37]。与热风干燥相比，微波干燥具有加热速度快、能量利用率高、干燥均匀性好等优势^[17]。研究表明，微波干燥不仅能显著缩短干燥时间，还能有效保留稻谷的营养成分和外观品质^[38]。然而，微波干燥设备成本较高，且对操作技术要求较严格，限制了其大规模推广应用。目前，研究人员正致力于开发微波-热风联合干燥技术，以兼顾干燥效率和成本^[20]。

(4)红外干燥

红外干燥利用红外辐射直接加热稻谷表面，通过热传导作用降低内部水分^[39]。红外干燥具有加热速度快、能量利用率高的特点，且设备结构简单、易于操作^[22]。然而，红外干燥的穿透能力有限，主要适用于薄层物料的干燥^[40]。对于稻谷这种结构复杂的物料，红外干燥容易导致表面过热而内部干燥不足^[41]。因此，红外干燥技术通常与其他干燥方法联合应用，以增强整体干燥效果。

(5)冷冻干燥

冷冻干燥技术利用升华原理，在真空条件下对冷冻稻谷进行脱水处理^[42,43]。冷冻干燥能够最大限度地保留稻谷的营养成分和外观品质，且干燥后的产品复水性好^[44]。然而，冷冻干燥设备成本高、能耗大，且干燥周期长^[45]，主要适用于高附加值产品的生产，难以满足大规模粮食干燥的需求^[35]。

总体而言，各种干燥技术各有优缺点，其选择需根据实际生产需求和成本预算

进行权衡。传统干燥技术虽成本较低，但存在效率低、品质难以保障等问题；新型干燥技术虽能显著提高干燥效率和品质，但设备成本和能耗较高。未来，干燥技术的发展方向将集中在高效节能、智能化控制以及多种干燥方式的联合应用上，以满足现代农业对粮食干燥的更高要求。

1.2.2 稻谷微波干燥技术研究现状

稻谷干燥是通过去除水分以保持其品质并延长储存时间的关键环节。传统干燥理论研究主要围绕干燥机理、数学模型及过程优化等方面展开。在干燥过程中，水分从稻谷内部迁移至表面并蒸发，涉及复杂的水分传递和热传递机制。水分传递可通过扩散和蒸发等机制描述，而热传递则基于能量守恒原理。目前，研究者已建立了多种干燥模型，如干燥速率模型、传热传质模型和能量守恒模型等，这些模型揭示了干燥过程中物料质量、水分含量及时间等参数的变化规律，为设备设计与优化提供了理论支撑^[46]。然而，传统干燥技术在实际应用中仍面临能耗高、效率低和品质难以保障等问题。为此，微波真空干燥技术作为一种新型干燥方式，逐渐受到关注^[47]。该技术结合了微波加热和真空环境的优势，利用微波的热效应快速加热物料内部水分，同时在真空条件下降低水的沸点，加速水分蒸发^[48]。这种技术不仅显著缩短了干燥时间，还能避免高温对稻谷品质的损害，从而提高干燥效率和产品质量^[49]。

目前，稻谷微波真空干燥技术的研究主要集中在干燥机理、工艺参数优化、设备设计及品质控制等方面。研究者通过探讨微波场和真空环境对水分迁移和热传递的影响，建立相关数学模型^[50,51]；优化微波功率、真空度和干燥时间等参数以提高干燥效果^[52]；开发高效节能设备以降低成本；同时分析干燥过程对稻谷营养成分和储存稳定性的影响，提出品质保障措施。

尽管微波真空干燥技术展现出显著优势，但仍面临设备成本高、能耗优化不足等挑战^[53]。未来研究需进一步探索降低成本和能耗的途径，深化干燥过程中品质变化的机理研究，并推动技术的产业化应用。综上所述，稻谷微波真空干燥技术作为一种高效节能的创新干燥方法，展现出广阔的应用潜力，其持续发展将为粮食产业的可持续转型提供有力支撑。

稻谷干燥是去除水分以保持品质和延长储存的关键环节^[54]。传统干燥理论研

究涉及干燥机理、数学模型及过程优化,揭示了水分传递(如扩散和蒸发)和热传递(基于能量守恒)的规律,为设备设计提供了理论支撑^[55]。然而,传统技术存在能耗高、效率低和品质难保障等问题。微波真空干燥技术结合了微波加热和真空环境的优势,利用微波热效应快速加热稻谷内部水分,同时在真空条件下降低水的沸点,加速水分蒸发^[56]。该技术不仅显著缩短干燥时间,还能避免高温对稻谷品质的损害,提高干燥效率和产品质量。

目前研究集中在干燥机理、工艺优化、设备设计及品质控制等方面。通过建立数学模型、优化微波功率和真空度等参数、开发高效设备,并分析干燥对营养成分和储存稳定性的影响,推动技术发展。尽管该技术优势明显,但仍面临设备成本高、能耗优化不足等挑战。

1.3 研究内容与技术路线

稻谷微波干燥技术在实际应用中面临多重挑战。首先,设备成本较高,限制了其大规模推广;其次,微波能量分布不均匀,易导致干燥不彻底或局部过热;此外,微波干燥对物料的适应性有限,需针对稻谷特性进行专门优化;同时,局部高温问题可能影响稻谷品质;最后,干燥过程受多种因素影响,控制难度较大,难以实现精确调控。这些挑战制约了微波干燥技术的进一步发展和应用。

为应对上述挑战,未来研究可从以下方向展开:一是优化设备设计和材料选择,降低制造成本;二是开发多模式微波源或联合干燥技术,改善能量分布均匀性;三是针对稻谷特性优化工艺参数,提升物料适应性;四是引入实时温度监测与反馈控制系统,解决局部高温问题;五是结合神经网络算法,实现干燥过程的智能化控制。通过技术创新与工艺优化,稻谷微波干燥技术有望克服现有瓶颈,在粮食干燥领域实现更高效、更经济的应用,为粮食产业的可持续发展提供有力支持。

本课题围绕稻谷微波真空干燥过程中的传热传质机理展开研究,重点包括以下几个方面:首先,基于电磁学和多相传输理论,建立稻谷微波干燥的传热传质模型,分析微波场中温度分布和水分迁移规律;其次,利用 COMSOL 软件对干燥腔体内的电场分布和稻谷温度变化进行仿真,结合实验数据研究干燥过程中的温度均匀性和含水率变化;再次,通过实验测定稻谷在不同温度、含水率和频率下的介电参数,分析其变化规律;最后,基于实验和仿真结果,优化干燥装置的控制算法,

提升温度控制精度和干燥效率。

本课题旨在实现以下目标：一是构建稻谷微波真空干燥的传热传质模型，揭示干燥过程中温度、水分及微波能量的变化规律，为工艺优化提供理论依据；二是通过仿真和实验研究，优化干燥腔体结构，改善干燥均匀性；三是测定稻谷介电参数特性，为工艺参数的精准调控提供数据支持；四是开发智能控制算法，提升干燥装置的性能，确保稻谷干燥品质。通过上述研究，推动微波干燥技术的理论创新与工程应用，为粮食干燥领域的可持续发展提供技术支持。本文的技术路线如图 1-1 所示。

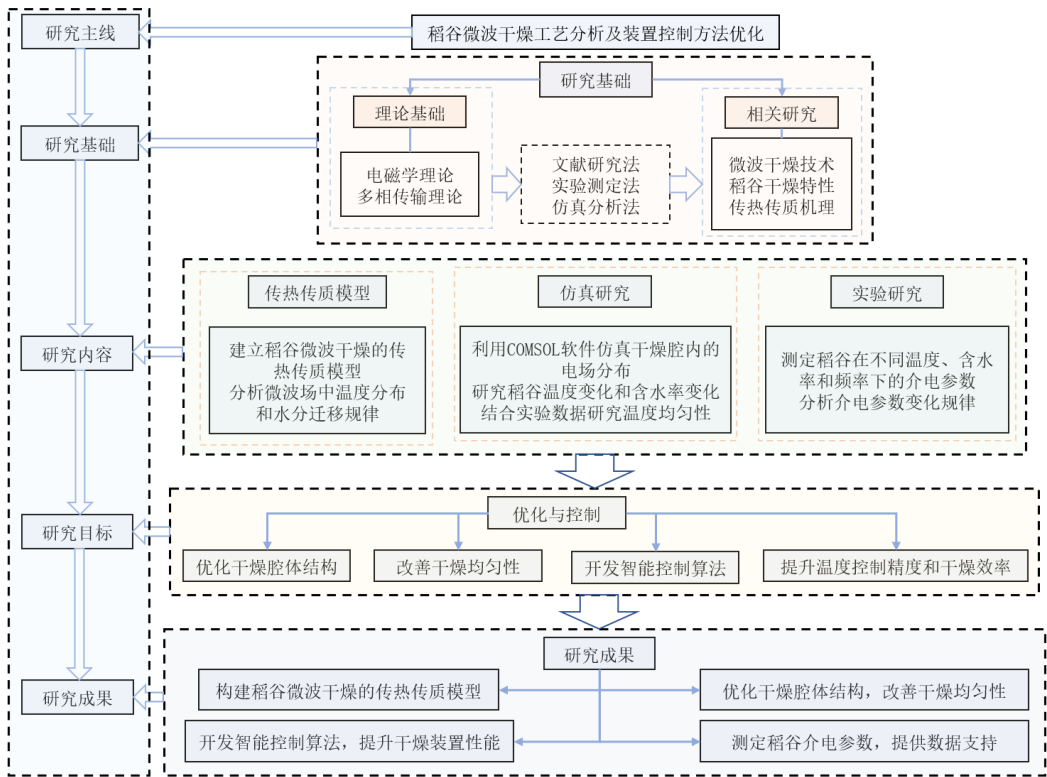


图 1-1 技术路线

1.4 章节安排

本文的章节结构安排如下：

(1)第 1 章为绪论部分，系统阐述了稻谷微波干燥技术的研究背景及其重要意义，并对当前相关领域的研究进展进行了全面综述。本章重点探讨了该领域面临的研究挑战，明确了技术路线，并详细规划了研究内容及各章节的具体安排。

(2)第 2 章聚焦于稻谷介电参数的精确测量与深入分析。鉴于介电参数对稻谷

微波干燥效果及干燥后品质的关键影响，本章采用矢量网络分析仪结合同轴探测法，系统测定了稻谷籽粒在 500~3000 MHz 频率范围和 25~50 °C 温度条件下，含水率在 5%~30% 区间内的介电参数变化规律。基于实验数据，构建了介电常数和介电损耗因子的数学模型，为优化稻谷微波干燥工艺提供了理论依据。

(3)第 3 章致力于构建稻谷微波干燥模型及应力应变模型。通过实验手段，深入分析了间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度等参数对稻谷裂纹产生的影响机制。借助红外热成像仪和扫描电子显微镜，获取了干燥后稻谷的温度分布图和微观结构图，揭示了各工艺参数与应力之间的内在联系，为有效降低稻谷微波干燥过程中的应力应变提供了科学依据。

(4)第 4 章重点研究稻谷微波干燥过程中的含水率预测模型。基于实验数据，分别建立了 BP 神经网络和 GA-BP 神经网络算法的含水率预测模型。通过对比分析两种模型的预测精度和训练效果，为稻谷微波干燥含水率的精确预测提供了新的研究方法和技术路径。

(5)第 5 章从微波干燥箱的温度控制系统和微波干燥腔体结构优化入手，利用 MATLAB 软件中的 Simulink 模块，构建了 PID 控制系统和模糊控制系统的仿真模型，使用 COMSOL 软件对多馈入口分布进行仿真分析。通过对比分析两种控制系统的响应特性，包括温度波动程度和超调量大小，旨在探索更优的控制策略，为微波干燥箱的温度控制提供更为精准和稳定的解决方案。在现有干燥装置的基础上对干燥腔体进行馈入口结构上的优化，从而找寻到合适的馈入口布置方式。

第 2 章 稻谷微波干燥介电特性分析

在稻谷微波干燥过程中，含水率、微波频率和温度是决定介电特性的核心变量，这些特性直接影响电磁能与稻谷籽粒的相互作用强度，从而显著影响干燥效果。介电特性主要由介电常数和介电损耗因子构成，前者反映材料在电场中的储能能力，后者表征电磁能向热能的转换效率。频率、温度和含水量是影响稻谷介电性能的主要因素，其中含水率的影响最为显著。目前，介电特性的测量方法包括传输线法、自由空间法、谐振腔法、平行板法和开放式同轴探针法等。尽管平行板法应用广泛，但其测试频率范围有限且易受夹具干扰，限制了测量精度。相比之下，开放式同轴探头法因其宽频带覆盖和良好的物料接触性，能够提供更高的测量精度。本章以稻谷籽粒为研究对象，利用矢量网络分析仪结合同轴探头技术，系统测定稻谷籽粒在温度 25~50 ℃、含水率 5~30%、频率 0.8~3 GHz 范围内的介电参数。通过深入分析含水率、微波频率和温度对介电参数的影响规律，为稻谷籽粒介电特性的研究提供理论依据和数据支持。这一研究不仅有助于揭示稻谷微波干燥过程中介电参数的变化机制，还可为优化干燥工艺参数、提高干燥效率与品质提供科学指导。

2.1 样品制备与分析方法研究

2.1.1 实验设备

本实验采用实验仪器如表 2-1 所示。

表 2-1 实验设备

测量项目	设备名称	型号	制造商
质量	电子分析天平	AB204-N	梅特勒-托莱多(上海)
含水率	电子卤素水分仪	DS100	武汉捷宝生物科技
温度	红外热成像仪	Ti32	福禄克测试仪器(上海)
干燥处理	微波真空干燥箱	RWBZ-08S	南京苏恩瑞设备
介电参数	矢量网络分析仪	E5051B ENA	是德科技(中国)
样品预处理	研磨机	HEFENG	赫枫有限公司

2.1.2 样品制备

本实验选用的稻谷来自中国江苏省的南粳 46 品种。实验开始时,先使用 DS100 电子卤素水分仪测量稻谷的初始含水率。随后,对稻谷进行复水处理,通过调整浸泡时间使其含水率恢复到刚收获时的水平。浸泡完成后,用吸水纸吸除稻谷表面的水分,并再次使用 DS100 电子卤素水分仪测量其含水率,以确保处理后的稻谷达到预期状态。

随后,将稻谷置于微波真空干燥箱中进行干燥处理,使其含水率降至实验所需的水平(具体参数见表 2-2)。在测量稻谷的介电参数时,为了避免籽粒间空气引入的测量误差,需将干燥后的稻谷研磨成粉末状后进行测量。

通过上述步骤,确保稻谷从复水到干燥及最终测量的全过程满足实验要求,为后续实验结果的准确性提供保障。

2.1.3 正交实验

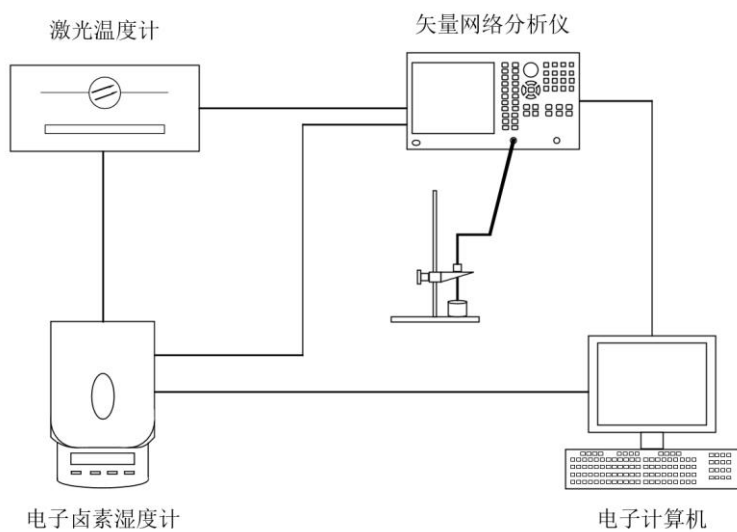
由于实验因素包含含水率,为方便反映稻谷中水分的实际含量及对比不同含水率下的实验结果,本实验选择湿基含水率。

(1)实验条件

实验采用 DS100 电子卤素水分仪测定稻谷含水率,通过调控微波功率和真空度等单因素变量,将稻谷置于微波真空干燥箱中进行处理,随后检测其温度和含水率变化。

(2)介电参数测量

稻谷的介电性能决定了其在微波和射频下的加热能力。本文采用同轴电缆法测量介电参数,具体实验步骤为:介电探头安装至正下方,确保探头表面一直与待测物料接触。每次实验前需进行开路、短路、负载校准,即空气、短路块、水对探针进行校准,介电探针与线缆中接有电子校准件,以确保实验结果的可靠性。将磨碎的稻谷放于烧杯中,每组样品质量为 90 g,分别在不同温度、含水率、微波频率下进行介电特性的测量。使用矢量网络分析仪(E5051B ENA)进行测量,由软件(Keysight Technologies Co., LTD., Palo, California, USA)得出所需数据结果,介电特性测试系统如图 2-1 所示。



(a) 系统组成



(b) 矢量网络分析仪实物

图 2-1 介电特性测试系统

(3) 正交实验

在单因素实验的基础上，使用 DS100 电子卤素水分仪测定稻谷初始含水率，开展稻谷介电性能的正交实验。采用 $L_{18}(6^4)$ 正交实验设计，具体方案见表 2-2。依据正交实验表，依次调整温度、含水率和微波频率等单因素变量，测定稻谷的介电常数和介电损耗因子。按照设计方案共完成 18 组实验，实验结果如表 2-3 所示。

表 2-2 正交实验方案

水平	温度/°C	含水率/%	微波频率/GHz
1	25	5	0.5
2	30	10	1
3	35	15	1.5
4	40	20	2
5	45	25	2.5
6	50	30	3

表 2-3 正交实验结果

水平	温度/°C	含水率/%	微波频率/GHz
1	25	5	0.5
2	30	10	1
3	35	15	1.5
4	40	20	2
5	45	25	2.5
6	50	30	3
7	25	10	1.5
8	30	15	2
9	35	20	2.5
10	40	25	3
11	45	30	0.5
12	50	5	1
13	25	15	2.5
14	30	20	3
15	35	25	0.5
16	40	30	1
17	45	5	1.5
18	50	10	2

2.1.4 分析方法

为简化实验次数，本文采用正交实验，在最少实验次数上，能最大程度呈现温度、含水率、微波频率对介电常数和介电损耗因子的影响关系。为增强实验结果的直观性，采用控制变量法，分析介电常数和介电损耗因子在温度、含水率和微波频率中两因素作用下的变化规律。

2.2 介电特性模型

现有研究已探讨了介电常数、介电损耗因子与频率、水分含量及温度之间的关联性，为预测农产品介电特性提供了理论依据^[57]。

2.2.1 介电参数预测模型

在 2.45GHz 频率下，介电常数和介电损耗因子与温度、含水率的关系可通过线性模型进行关联分析^[57]，一般形式为：

$$\varepsilon' = a + bm + ct \quad (2-1)$$

式中， a 、 b 、 c 为模型系数，介电常数与温度及含水率的关系可表述如下：

$$\varepsilon' = a_1 + a_2 m + a_3 t + a_4 mt + a_5 m^2 + a_6 t^2 \quad (2-2)$$

同理可得介电损耗因子关于温度和含水率之间的关系：

$$\varepsilon'' = b_1 + b_2 m + b_3 t + b_4 mt + b_5 m^2 + b_6 t^2 \quad (2-3)$$

式中， t 为温度($^{\circ}\text{C}$)； m 为含水率(%); a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 为介电常数的模型系数； b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 b_6 为介电损耗因子的模型系数。

本研究构建了 2.45 GHz 条件下介电常数和介电损耗因子关于温度及含水率的数学模型，用于预测稻谷的介电特性。

$$\varepsilon' = 0.2232 + 0.02247m + 0.0751t - 0.0008mt - 0.0007m^2 - 0.0006t^2 \quad (2-4)$$

$$\varepsilon'' = 0.9726 + 0.0003m - 0.034t + 0.0008mt + 0.0003m^2 + 0.0006t^2 \quad (2-5)$$

当频率在 0.5~3 GHz 范围为变化时，则介电特性与温度、含水率、微波频率关系的一般形式为：

$$\varepsilon' = a \pm b \cdot t \pm c \cdot m \pm d \cdot f \quad (2-6)$$

式中， a ， b ， c ， d 为模型系数 f 为频率，GHz。

稻谷的介电常数使数学模型将温度与含水率和微波频率联系起来，则介电常数为：

$$\varepsilon' = c_1 + c_2 t^2 + c_3 m^2 + c_4 f^2 + c_5 tm + c_6 tf + c_7 mf + c_8 tmf \quad (2-7)$$

同理，介电损耗因子与温度与含水率与微波频率之间的关系为：

$$\varepsilon'' = d_1 + d_2 t^2 + d_3 m^2 + d_4 f^2 + d_5 tm + d_6 tf + d_7 mf + d_8 tmf \quad (2-8)$$

式中， c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 、 c_7 、 c_8 为介电常数系数， d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 、 d_7 、 d_8 为介电损耗因子系数。

基于稻谷的温度(t)、含水率(m)及微波频率(f)预测其介电性能：

$$\begin{aligned} \varepsilon' = & 2.4679 - 0.0004t^2 + 0.0092m^2 + 0.5814f^2 \\ & - 0.008tm - 0.0219tf - 0.3278mf + 0.0075tmf \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon'' = & 0.7239 - 0.0001t + 0.0019m^2 + 0.326f^2 \\ & - 0.0012tm - 0.0199tf - 0.1333m + 0.0028tmf \end{aligned} \quad (2-10)$$

2.2.2 穿透深度

微波干燥的显著特征在于其穿透性，其中微波穿透深度定义为微波能量衰减至初始值约 37%时的传播深度，是微波加热和干燥过程中的关键参数。穿透深度

由材料的介电常数和介电损耗因子决定,同时还受到微波频率、温度、含水率和物料的结构等因素影响。微波在低频时(如 915 MHz)具有较大的穿透深度,适用于厚度较大的物料干燥,而在高频时(如 2.45 GHz),穿透深度较小,适用于薄层物料的干燥。数学上,微波穿透深度可以用以下公式^[58]表示:

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi(2\varepsilon')^{0.5}} \left[\varepsilon' \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2-11)$$

式中, d_p 表示微波能量在物料中传播时,电磁场强度或功率密度衰减到初始值的 $1/e$ 所对应的距离; λ_0 是微波在自由空间中的波长; ε' 表示材料的介电常数,体现了材料储存电能的能力; ε'' 表征材料的介电损耗因子,反映了材料吸收和耗散微波能量的特性。

因此,由式(2-11)可以确定微波频率、介电常数以及介电损耗因子得出微波穿透能力大小。微波穿透深度决定了微波能量分布的均匀性和加热效率,对于穿透深度较浅的物料,干燥时,微波能量集中在表面,可能导致物料表面过热或炭化,而内部干燥不足;若穿透深度较大,微波能量能更加均匀地渗透至物料内部,促进物料整体加热,缩短干燥时间。

2.2.3 介电参数测量原理

本实验使用矢量网络分析仪测量稻谷的介电参数。矢量网络分析仪(VNA)通过测量电磁波在稻谷样品中的反射系数(S11)和传输系数(S21),实现对其介电参数的精确测量。当电磁波通过稻谷样品时,稻谷内部的水分子及其他极性分子因交变电场的作用而振动,导致电磁波的传播速度减慢、幅值衰减和相位偏移。这些变化包含了稻谷的介电特性信息。根据测得的 S 参数,结合样品的厚度、密度和测量环境(如频率范围和温度),利用电磁场理论模型计算出稻谷的复介电常数,其中介电常数(ε')反映材料存储电能的能力,介电损耗因子(ε'')反映吸收电能并转化为热能的能力。通过在多个频率(如 915 MHz 和 2450 MHz)和温度范围下的测量,可全面表征稻谷的介电特性,为微波干燥工艺的优化提供关键的理论基础和实验数据支持。

2.2.4 传热传质模型

(1)电磁方程

微波加热腔内的电磁波的作用可以用麦克斯韦方程^[59]描述：

$$\nabla \mu_r^{-1} (\nabla \vec{E}) - \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 (\varepsilon' - \varepsilon'') \vec{E} = 0 \quad (2-12)$$

式中， μ 表示相对磁导率； $\vec{E}$ 表示电场强度，V/m； f 表示微波频率，Hz； c 表示光速(3.0×10^8 m/s)； ε' 表示介电常数； ε'' 表示介电损耗因子； j 表示虚数。

电磁能量的耗散与材料的介电损耗及电场强度 E 的平方成正比^[60]，其损耗功率可表述为：

$$Q = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (2-13)$$

式中， Q 表示损耗功率，W/m³； ω 表示角频率，rad/s； ε_0 表示自由空间的介电常数。

稻谷的含水率用湿基表示， W_I 表示干燥前重量，kg； W_F 表示干燥后重量，kg。

$$M_w = \frac{W_I - W_F}{W_I} \quad (2-14)$$

孔隙率 φ 为气相和液相占据的体积与微元体总体积的比值^[61]，即：

$$\varphi = \frac{\Delta V_g + \Delta V_w}{\Delta V_g + \Delta V_w + \Delta V_s} = \frac{\Delta V_g + \Delta V_w}{\Delta V} \quad (2-15)$$

式中， ΔV_g 为气体所占体积，m³； ΔV_w 为液态水的体积，m³； ΔV_s 为微元体骨架所占体积，m³； ΔV 为气体和液态水以及骨架总体积，m³。

气体饱和度 S_g 和水饱和度 S_w 分别定义为气相和液态水的体积分别与气相和液态水的体积之和之比^[62]：

$$S_w = \frac{\Delta V_w}{\Delta V_g + \Delta V_w} = \frac{\Delta V_w}{\varphi \times \Delta V} \quad (2-16)$$

$$S_g = \frac{\Delta V_g}{\Delta V_g + \Delta V_w} = \frac{\Delta V_g}{\varphi \times \Delta V} = 1 - S_w \quad (2-17)$$

假设稻谷在干燥过程中体积发生变化，没有发生化学反应，其固体基质体积和质量不发生变化，则孔隙率发生变化^[61]：

$$\Delta V (1 - \varphi) = \Delta V_0 (1 - \varphi_0) \quad (2-18)$$

式中， ΔV 表示初始时刻微元体体积，m³； φ_0 表示初始孔隙率。

(2)传质方程

液态水、水蒸气和空气的浓度用质量守恒方程表示，质量守恒方程由对流项、扩散项和反应项表示^[63]：

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{n}_i = \pm I \quad (2-19)$$

式中， i 为 w 、 v 和 g ，分别表示液态水、水蒸气以及气相； C_i 表示质量浓度(kg/m^3)； $\vec{n}_i$ 表示质量通量(m^2/s)； $\pm$ ：液态水取 $-$ ，水蒸气和气相取 $+$ 。

微波干燥过程中的温度变化可以用能量守恒方程描述。能量守恒方程包含微波热源、热传导、蒸发冷却以及相对流^[64]，则方程为：

$$\rho_{eff} C_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=w,v,g} (\vec{n}_i C_{p,i} \nabla T) = \nabla (k_{eff} \nabla T) - \lambda I + Q \quad (2-20)$$

式中， w 、 v 和 g 分别指液态水、水蒸气和空气； λ 表示蒸发潜热(J/kg)； $C_{p,i}$ 是 i 相的比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)； ρ_{eff} 、 $C_{p,eff}$ 和 k_{eff} 分别表示加权后密度(kg/m^3)； ρ_{eff} 表示加权后密度(kg/m^3)； $C_{p,eff}$ 表示加权后比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$)； k_{eff} 表示加权后导热系数($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。

在发生水蒸气到液态水或液态水到水蒸气的相变时，采用非平衡蒸发公式^[65]，即：

$$I = K_{evap} \frac{M_v}{RT} (p_{v,eq} - p_v) \quad (2-21)$$

式中， $p_{v,eq}$ 为水的平衡蒸汽压， Pa ； K_{evap} 为蒸发速率常数， $1/\text{s}$ ； p_v 为理想气体的蒸气压， Pa ； R 表示理想的气体常数， $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； T 表示温度， K 。

2.3 结果与分析

为了验证所提出的数学模型的准确性，我们基于温度、含水率和频率对稻谷的介电特性进行了预测，并通过实验测量了其介电常数和介电损耗因子。通过对比实测数据与模型预测值，发现两者基本吻合，如表 2-4。

表 2-4 介电常数和介电损耗因子的预测值与测量值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	含水率/%	频率/ GHz	预测值/ ε'	测量值/ ε'	预测值/ ε''	测量值/ ε''
30	10	2.4	1.9362	1.303	0.495	0.388

续表 2-4

温度/°C	含水率/%	频率/GHz	预测值/ ε'	测量值/ ε'	预测值/ ε''	测量值/ ε''
40	20		2.266	2.260	0.579	0.542
50	30	2.45	2.474	2.484	0.785	0.865
30	10	1	1.998	2.121	0.354	0.297
40	20	2	2.327	2.121	0.258	0.320
50	30	3	3.339	3.095	0.411	0.488

这一结果表明，所建立的数学模型能够准确反映稻谷的介电特性，可用于通过温度、含水率和频率等参数预测其介电常数和介电损耗因子。

2.3.1 温度与含水率对介电特性结果影响

当微波频率恒为 2.45 GHz，温度与含水率对介电常数和介电损耗因子的影响如图 2-2 所示。

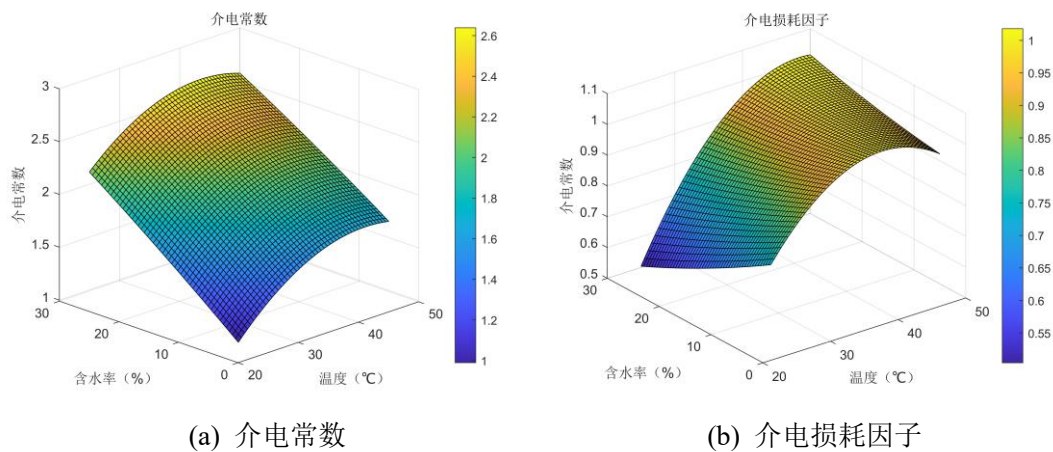


图 2-2 微波频率为 2.45 GHz 时，介电特性随温度和含水率的变化

图 2-2a 显示，在特定范围内，稻谷的介电常数和介电损耗因子随温度和含水率的升高而呈现上升趋势。在 25 °C 至 50 °C 的温度区间内，随着含水率的上升，介电常数呈现递增规律，且温度越高，增幅越显著。低温条件下，含水率的改变对介电常数的影响较弱，表明其变化不明显。当含水率在 5% 至 30% 范围内时，随着温度从 25 °C 升至 50 °C，介电常数逐渐增大，且含水率越高，增幅越明显。介电常数的最小值出现在 25 °C 和 5% 含水率的条件下，而最大值则出现在 50 °C 和 30% 含水率的条件下。图 2-2b 中含水率不变时，随着温度的增加，介电损耗因子随之增大。温度不变时，当含水率从 5% 增加至 30%，介电损耗因子随之增大。当温度恒定时，介电损耗因子随含水率的上升而增大。然而，在 25 °C 条件下，含水率从 5% 增至 15% 时，介电常数和介电损耗因子的变化较为缓慢，甚至出现下降趋势，

这表明低温环境下含水率对介电特性的影响较弱。

图 2-3 表明不同温度与不同含水率对最终稻谷的介电常数和介电损耗因子的影响。保持微波频率不变，温度变化范围为 25~50 °C，含水率变化范围为 5~30%。图 2-3a 表明随着稻谷温度和含水率在一定范围内的增加，介电常数呈现增大的趋势。在 25 °C 至 50 °C 的温度范围内，随着稻谷含水率的增加，介电常数呈现上升趋势，这表明稻谷的含水率与介电常数呈现正相关，即含水率越高，介电常数越大，稻谷则可以储存更多的能量^[66]，且当温度越高时，介电常数增加的趋势更显著。在含水率为 5% 至 30% 的范围内，随着温度升高，介电常数逐渐增大，并在含水率为 30% 时达到最大值，这表明在含水率较高的情况下偶极旋转对介电性能起主导作用，而在较高温度下，生物材料的粘度较低，离子电导率高^[67]，当含水率较低为时，随着温度的增加介电常数则呈现先减小后增加的趋势。图 2-3b 表明温度变化和含水率变化对介电损耗因子的影响。在含水率恒定时，介电损耗因子随温度升高而增大，且在 45 °C 和 50 °C 时，温度对其影响更为显著。当温度不变时，介电损耗因子随含水率的增加而增大，尤其在含水率为 25% 和 30% 时，增幅更为明显。

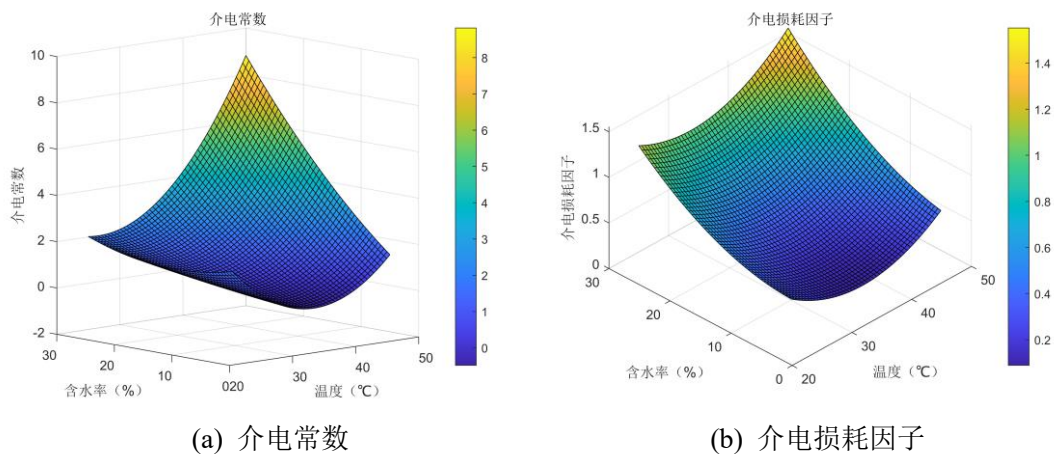


图 2-3 介电常数、介电损耗因子随温度与含水率的变化规律

2.3.2 温度与微波频率对结果影响

图 2-4 展示了稻谷温度从 25 °C 升至 50 °C、微波频率从 0.5 GHz 增至 3 GHz 时，介电常数和介电损耗因子的变化情况。图 2-4a 显示，温度和频率的增加对介电常数影响显著。当频率固定时，介电常数随温度升高而增大，且在低频(如 0.5 GHz)下，温度对其影响较小；当温度固定时，介电常数随频率增加而增大，但在低温(如 25 °C、30 °C)下呈现先降后升的趋势，而在高温(如 50 °C)下增幅显著，表

明温度对介电常数的影响大于频率。介电常数在最高温度和频率下达到最大值。图 2-4b 揭示了温度和频率对介电损耗因子的影响规律。当频率固定时，介电损耗因子随温度升高而增大，且频率越高，增幅越快；当温度固定时，介电损耗因子随频率增加呈现先降后升的趋势。介电损耗因子在最高频率和温度下达到最大值。

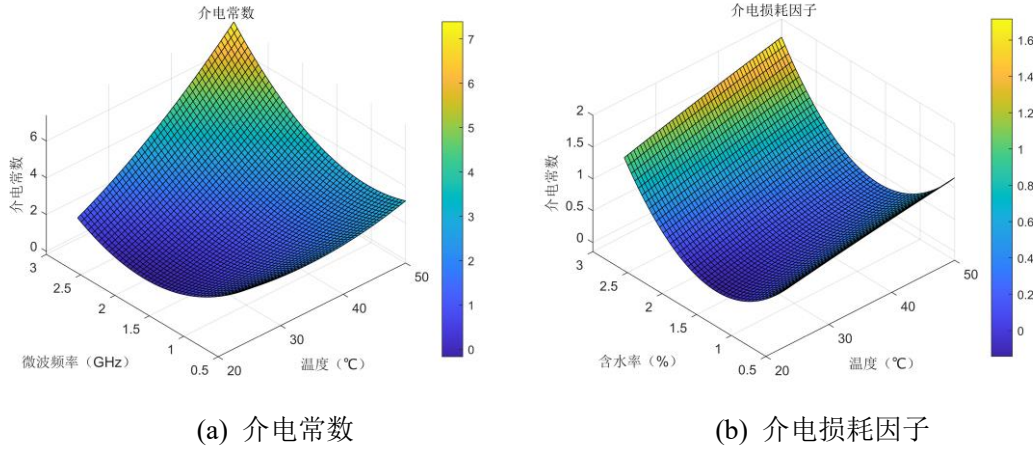


图 2-4 介电常数、介电损耗因子随温度与微波频率的变化规律

2.3.3 含水率与微波频率对结果影响

含水率与微波频率对介电常数和介电损耗因子的影响如图 2-5 所示。保持其它参数不变，含水率变化范围为 5%到 30%，微波频率变化范围为 0.5 GHz 至 3 GHz。

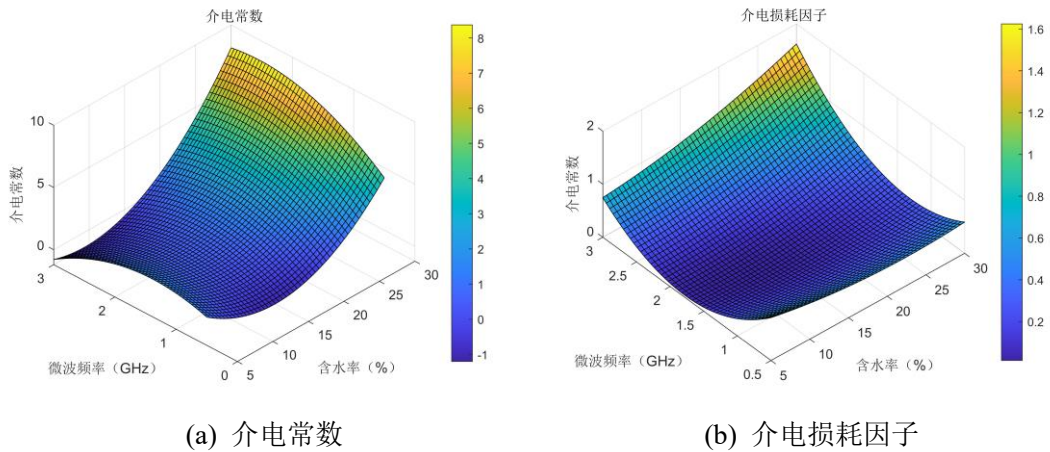


图 2-5 介电常数、介电损耗因子随含水率与微波频率的变化规律

图 2-5a 表明随着含水率的增加与微波频率的增加，介电常数随着变大；当含水率较低为 5%、10%不变时，微波频率的变化对介电常数影响较低；当微波频率在 0.5 GHz 至 3 GHz 范围内时，介电常数随含水率的增加呈现先降后升的趋势；而在含水率不变时，介电常数随频率的升高而增大，并在含水率为 30%、频率为 3

GHz 时达到最大值。图 2-5b 显示, 介电损耗因子随温度和频率的升高而增大。当频率固定时, 介电损耗因子随含水率从 5% 增至 30% 而增大, 且在低频(如 0.5 GHz)下, 含水率对其影响较小, 而在高频(如 3 GHz)下增幅显著。当含水率较低(如 5%、10%)时, 介电损耗因子随频率增加呈现先降后升的趋势; 而在高含水率(如 30%)时, 介电损耗因子随频率增加持续上升, 并在含水率为 30%、频率为 3 GHz 时达到最大值。

2.3.4 结果对比分析

介电损耗因子反映了材料将电磁能转化为内能的能力, 其值越大, 表明材料吸收的电磁能越多^[68]。表 2-3 的测量结果显示, 稻谷的介电常数和介电损耗因子受温度、含水量及微波频率的共同影响, 且三者之间存在相互作用。这一结论使我们能够使用一个介电特性模型通过温度、含水率和微波频率来预测其介电性能。

图 2-6 揭示了温度、含水率和微波频率对稻谷介电特性的影响规律。结果表明, 随着温度、含水率和频率的升高, 介电常数和介电损耗因子均呈现增大的趋势。图 2-6a 进一步显示, 介电常数随含水率、温度和频率的增加而增大, 并在温度为 50 °C、含水率为 30%、频率为 3 GHz 时达到最大值。图 2-6b 表明了三项因素与介电损耗因子之间的关系, 表明含水率为 30%、温度为 50 °C、微波频率为 3 GHz 时稻谷介电损耗因子最大。

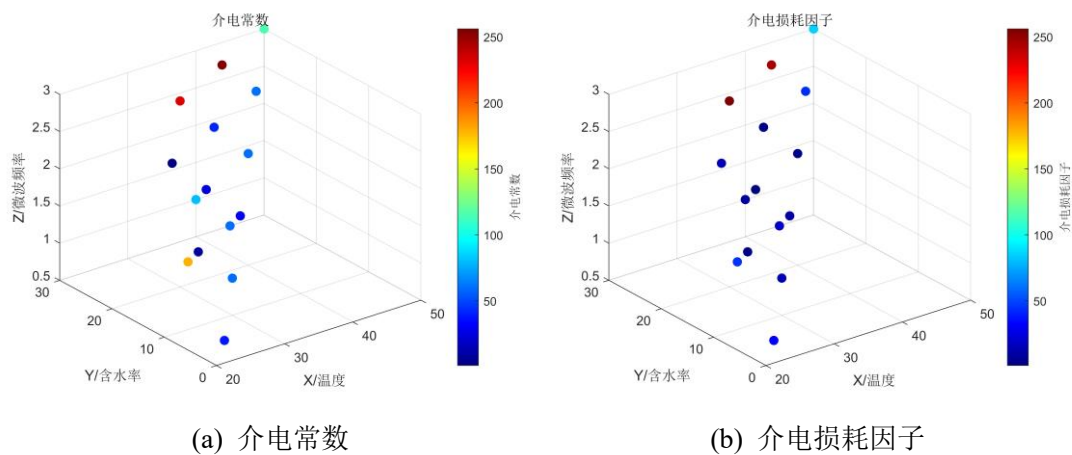


图 2-6 介电常数和介电损耗因子随温度、含水率及频率的变化规律

2.4 本章小结

介电特性的测量是复杂的, 受到系统误差颗粒材料尺寸因素的影响, 致使颗粒

材料间存在空气,导致测量结果存在误差。温度、含水率和频率对稻谷的介电特性具有显著影响,介电常数和介电损耗因子随温度、含水率及频率的增加而增大。基于 25~50 ℃温度范围、5%~30%含水率范围以及 500~3000 MHz 微波频率范围内的变化规律,分别建立了预测介电常数和介电损耗因子的数学模型。研究发现,介电常数和介电损耗因子在温度、含水率及频率均达到最大值时取得峰值。稻谷的介电性能决定了其在微波和射频下的加热能力,介电特性测试与分析为稻谷的干燥工艺设计提供了必要的基础。

第3章 稻谷干燥过程应力解析

本文以稻谷为研究对象，探究稻谷在微波真空干燥中的传热传质及活化能和应力应变变化规律。针对这些问题建立稻谷电磁波方程，应力应变模型，并通过实验验证了模型的可靠性，探究相关参数对稻谷微波真空干燥的影响，为稻谷干燥提供理论依据。

3.1 干燥模型

为了构建稻谷干燥过程中传热、应力模型，对稻谷进行了简化假设，稻谷是一种粘弹性材料，稻谷内部的初始温度和水分布是均匀的，初始应力为零。稻谷在干燥过程中固体体积不变，不受外力影响。

3.1.1 电磁波方程

稻谷在微波真空干燥箱中的电磁方程可用麦克斯韦波动方程^[69]表示：

$$\nabla \mu_r^{-1} (\nabla \vec{E}) - \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 (\varepsilon' - j\varepsilon'') \vec{E} = 0 \quad (3-1)$$

式中， μ_r 表示相对磁导率， $\vec{E}$ 表示电场强度，V/m； f 表示频率，Hz； c 表示光速 (3.0×10^8 m/s)； ε' 表示介电常数，F/m； ε'' 表示介电损耗； j 为复数。

微波干燥过程中的能量损失^[70]：

$$Q = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (3-2)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \quad (3-3)$$

3.1.2 传热传质模型

微波干燥过程中能量守恒，能量守恒方程包括传热导、蒸发冷却和热源(微波能量)^[71]，即：

$$\rho_{eff} C_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k_{eff} \nabla T) - \lambda I + P \quad (3-4)$$

式中, ρ_{eff} 表示密度, kg/m^3 ; $C_{p,eff}$ 表示比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; k_{eff} 表示导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T 表示温度, K ; λ 表示蒸发潜热, J/kg ; I 表示水的蒸发速率, $\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ 。

干燥速率^[72]为:

$$D_R = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (3-5)$$

式中, $M_{t+\Delta t}$ 为 $t+\Delta t$ 时刻的水分含量;

含水率公式为^[20]:

$$M_R = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) = \frac{M_t}{M_0} \quad (3-6)$$

式中, M_t 、 M_0 和 M_e 分别表示干燥 t 时刻的含水率、初始含水率和平衡含水率, M_e 值相比于 M_t 和 M_0 很小 ($M_e \approx 0$), 假设 M_e 忽略不计; D_{eff} 表示有效扩散系数 (m^2/s); L 表示样品的一半厚度 (m)。即:

$$M_R = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t\right) = \frac{M_t}{M_0} \quad (3-7)$$

对方程两边取对数, 得:

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

绘制 $\ln(M_R)$ 随时间变化的曲线, 根据斜率公式求得有效扩散系数 D_{eff} , 即:

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (3-9)$$

式中, k 表示斜率。

有效扩散系数为:

$$D_{eff} = \frac{4L^2 k}{\pi^2} \quad (3-10)$$

活化能公式由以下公式得出:

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a m}{P}\right) \quad (3-11)$$

式中, P 为微波功率, W ; m 为物料质量, g ; E_a 为活化能, W/g ; D_0 为前指数因子, m^2/s 。

对方程两边取对数, 则活化能为:

$$Ea = P \frac{\ln(\frac{D_0}{D_{eff}})}{m} \quad (3-12)$$

3.1.3 应力模型

将稻谷在宏观尺度上视为一种均匀的、各向同性的线性粘弹体，由固体粘弹相和粘性水组成，在微观尺度上假定不可压缩。假定稻谷产生的应力应变是由于干燥过程稻谷内部形成的温度梯度和水分梯度形成的，且在开始干燥前，稻谷内部没有应力应变，水分分布均匀。

水相相对于固相的速度($v_E^{w,s}$)由 Takhar 的广义菲克定律^[73]表示：

$$v_E^{w,s} = -\varepsilon^w (D^w \nabla_E \varepsilon^w + B_c \nabla_E \sigma) \quad (3-13)$$

式中， ε^w 为水相的体积分数， D^w 表示有效水分扩散系数， B_c 为粘弹性参数， ∇_E 为欧拉梯度算子， σ 为粘弹性应力^[74]，可表达如下：

$$\sigma(t) = \sum_{m=0}^p \int_0^t G_m \exp\left(-\frac{t-\tau}{\lambda'_m}\right) \frac{\partial E_{MM}^s}{\partial \tau} d\tau \quad (3-14)$$

式中， E_{MM}^s 为应变张量的轨迹， G_m 和 λ'_m 分别为第 m 个 MaxWell 单元的应力系数和重标松弛时间， E_{MM}^s 与水体积分数的关系式^[75]为：

$$E_{MM}^s = \frac{\varepsilon^w - \varepsilon_0^w}{1 - \varepsilon^w} \quad (3-15)$$

为了使用有限元方法求解方程，将上述方程进行拉普拉斯变换和逆变换，转换成常微分方程^[76]，如下：

$$\frac{\partial Z_m}{\partial t} + \frac{1}{\lambda'_m} Z_m = G_m \frac{\partial E_{MM}}{\partial \tau}, \quad (m = 0 \text{ to } p) \quad (3-16)$$

式中， Z_m ($m = 0 \text{ to } p$)为第 m 个 MaxWell 单元的粘弹性应力。

故粘弹性应力公式变成：

$$\sigma(t) = \sum_{m=0}^p Z_m \quad (3-17)$$

广义麦克斯韦模型用于描述稻谷干燥过程中在应变和应力作用下的粘弹性行为。该模型由弹簧与 m 个麦克斯韦单元并联组成，每个麦克斯韦单元包含弹簧和阻尼器。通过单轴或剪切试验获得的应力松弛数据，采用 Prony 序列进行非线性拟合，可得到广义麦克斯韦的应力松弛函数^[77]。

$$G(t) = G_0 + \sum_{m=1}^p G_m e^{-t/\lambda'_m} \quad (3-18)$$

式中，弹簧 G_0 对关系函数 $G(t)$ 的贡献可以在经过拉普拉斯变换和逆变换后的 $P+1$ 常微分方程中通过考虑接近无穷大的松弛时间 ($\lambda_0 \rightarrow \infty$) 得到。这意味着在式 (3-16) 的第二项 LHS 在数值计算 Z_0 时将等于 0。 λ'_m 的值与松弛时间 λ_m 的关系^[77]可表述为：

$$\lambda'_m = \frac{\lambda_m}{a_M a_T} \quad (3-19)$$

式中， a_M 和 a_T 分别为水分和温度变化因子， a_M 和 a_T 通过时间-含水率-温度叠加获得。

从微观尺度上看稻谷内部由固体和水相组成，这两种构成可以使稻谷表现出粘弹性行为，因此稻谷可以被视为一种线性粘弹体。材料的粘弹性可以通过弹簧和阻尼器的连接系统来模拟。本研究参考了 MaxWell 模型，这是表征稻谷组织粘弹性最常用的模型。MaxWell 模型中的弹簧代表响应的弹性分量，它在施加载荷时瞬间变形，在释放载荷时立即松弛。阻尼器代表粘弹性部件，只要施加载荷，其位移就会随时间增加。线性黏弹性应力-应变关系^[78]如下：

$$\sigma = D_d (\varepsilon - \varepsilon^d) + K_b (\varepsilon - \varepsilon^d) + S_{qx} \quad (3-20)$$

式中， D_d 表示刚度矩阵，Pa； ε 表示总应变，Pa； ε^d 表示收缩应变，Pa； K_b 表示体积弹性模量，Pa； S_{qx} 表示三个 MaxWell 单元的粘弹性应力，Pa。

刚度矩阵 D_d 可由式 (3-21) 表示：

$$D_d = G \begin{bmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

式中， G 为剪切模量。其中 G 可表示为：

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3-22)$$

式中, ν 为泊松比, E 为弹性模量。

体积弹性模量可由式(3-23)表示:

$$K_b = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3-23)$$

粘弹性应力定义^[79]为:

$$S_{qx} = G_1 q_1 + G_2 q_2 + G_3 q_3 \quad (3-24)$$

式中, S_{qx} 表示三个 MaxWell 单元的粘弹性应力, 排除了与麦克斯韦单元平行连接的纯弹性效应, 即自由弹簧。在 MaxWell 模型中, 每个弹簧的应变(q_i)由单个麦克斯韦单元的总应变率($k\nu$)和松弛时间(τ_i)确定, 公式如下:

$$\dot{q}_i + \frac{q_i}{\tau_i} = \dot{\epsilon} \quad (3-25)$$

式中, 第一项为阻尼器作用下粘性部分的应变率, 第二项为弹簧作用下弹性部分的应变率。

拉格朗日坐标系中的控制方程^[76]:

$$v_L^{w,s} = -\epsilon^w \left(j^{\frac{1}{3}} \right) \left(D^w \nabla_L \epsilon^w + B_c \nabla_L \sigma \right) \quad (3-26)$$

式中, ∇_L 表示拉格朗日梯度算子, j 是雅可比矩阵的行列式。

固相相对于水相的速度^[76]可表示为:

$$\rho^w \frac{\partial \epsilon^w}{\partial t} + \left(j^{\frac{1}{3}} \right) \nabla_L \cdot (\epsilon^w \rho^w v_L^{w,s}) + \frac{\epsilon^w \rho^w}{1 - \epsilon^w} \frac{\partial \epsilon^w}{\partial t} = 0 \quad (3-27)$$

3.2 分析方法与实验方法系统研究

3.2.1 材料

实验采用南埂 58 号稻谷作为研究材料, 从中挑选出颗粒饱满、无裂纹的、尺寸相近和色泽正常的籽粒, 洗涤干净, 对其浸泡复水处理, 吸收稻谷表面水分, 挑选出无裂纹的籽粒, 放入冰箱内(5 ± 1 °C)冷藏。依据国标法(GB9457-85)测得初始含水率为 $22 \pm 2\%$ 。

3.2.2 实验设备

主要实验仪器如图 3-1 所示。实验设备包括：上海花潮实业有限公司的 AB204-N 电子天平(精度 ± 0.1 mg)、武汉捷宝生物科技有限公司的 HS100 卤素水分测定仪、南京苏恩瑞干燥设备有限公司的 RWBZ-08S 微波真空干燥箱，以及福禄克测试仪器(上海)有限公司的 Fluke59 红外电子测温仪和 Ti32 红外热成像仪。



(a) 微波真空干燥箱

(b) 扫描电子显微镜



(c) 电子分析天平

(d) 卤素水分测定仪

(e) 红外热成像仪

图 3-1 主要实验仪器图

3.2.3 分析方法

实验使用的干燥装置是腔体尺寸为 $320 \times 340 \times 250$ mm、工作频率为 2.45 GHz 微波真空干燥箱。基于实验所用微波真空干燥箱的结构，采用 COMSOL Multiphysics 6.1 有限元软件对干燥腔体进行建模与仿真分析，使用电磁波、固体传热、稀物质传递等物理场模拟仿真微波真空干燥箱干燥稻谷，求解传热传质方程，仿真时间为 24 min，步长为 1，将固体传热传质仿真结果与固体力学耦合求解稻谷在干燥过程中产生的应力应变，分析应力应变与稻谷籽粒裂纹的关系，如图 3-2 所

示。

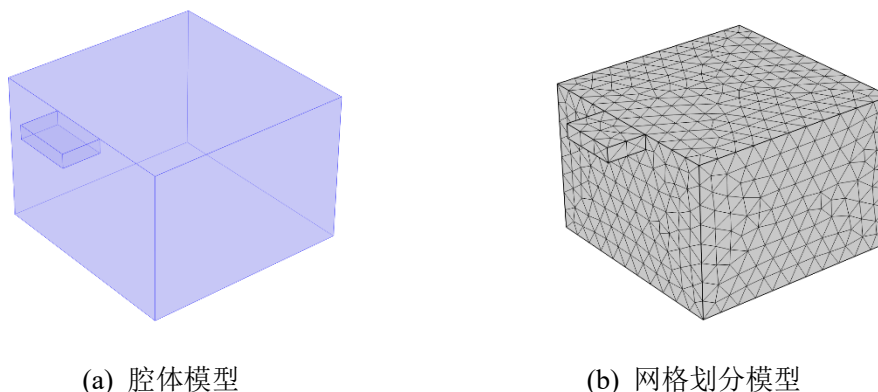


图 3-2 干燥腔体模型

3.2.4 实验方法

取出冷藏在冰箱中的稻谷籽粒，静置在空气中一段时间，吸收稻谷籽粒表面水分，待稻谷籽粒温度达到实验初始温度后，将稻谷放置在微波真空干燥箱干燥腔体内托盘上，稻谷干燥时间设置为 4 min、8 min、12 min 和 16 min，间歇时间选取 0 min、2 min 和 4 min 的中间值，即是在 16 min/2 时，关闭微波真空干燥箱的微波发生器，停止干燥，称量稻谷质量，将稻谷分别静置 0 min、2 min、4 min，静置后进行干燥稻谷 $X1 \text{ min}/2$ 时间，完成干燥，称量干燥后稻谷的质量，使用红外热成像仪和激光测温仪拍摄和记录稻谷的温度分布，统计稻谷温度分布不均匀程度。实验选取间歇时间(0 min、2 min、4 min)、真空度(0.05 MPa、0.07 MPa、0.09 MPa)、微波功率(300 W、400 W、500 W)和干燥温度(30 °C、40 °C、50 °C)作为实验因素，如表 3-1 所示。本实验采用正交实验设计方法($L_9(3^4)$)，干燥时间相同条件下进行 9 组实验，实验结果如表 3-2 所示。

表 3-1 实验因素

因素	间歇时间/min	真空度/MPa	微波功率/W	干燥温度/°C
1	0	0.05	300	30
2	2	0.07	400	40
3	4	0.09	500	50

表 3-2 正交实验

实验号	间歇时间/min	真空度/MPa	微波功率/W	干燥温度/°C	实验结果
1	0	0.05	300	30	16.06%
2	0	0.07	400	40	14.87%

续表 3-2

实验号	间歇时间/min	真空度/MPa	微波功率/W	干燥温度/°C	实验结果
3	0	0.09	500	50	11.39%
4	2	0.05	400	50	13.47%
5	2	0.07	500	30	15.30%
6	2	0.09	300	40	12.92%
7	4	0.05	500	40	15.78%
8	4	0.07	300	50	12.02%
9	4	0.09	400	30	15.41%

(1) 温度均匀度与波动度

使用红外热成像仪拍摄稻谷干燥后温度分布图片，分析其温度均匀度和波动度。从温度分布图取 9 个温度点，对 9 个温度点求温度平均值，再对其进行偏差分析，计算偏差的平均值，最后用方差分析求解温度均匀度。本文采用绝对平均偏差法求温度波动度^[80]。具体公式如下：

$$\begin{cases} \Delta T_u = \sum_{i=1}^n (T_{i\max} - T_{i\min}) \\ \Delta T_f = \max(T_{j\max} - T_{j\min}) \end{cases} \quad (3-28)$$

式中， ΔT_u 为温度均匀度，单位为°C； $T_{i\max}$ 和 $T_{i\min}$ 分别是各测量点在第 i 次测量的最高温度和最低温度，单位为°C； n 是测量次数； ΔT_f 是温度波动度，单位为°C； $T_{j\max}$ 和 $T_{j\min}$ 分别是第 j 个测量点的最高温度和最低温度，单位为°C； j 是测量点。

(2) 极差分析

间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度各设置三个实验水平，根据正交试验表进行计算^[81]，公式如下：

$$Z_d = \frac{Y_i + Y_j + Y_k}{3} \quad (3-29)$$

式中， Y_i 、 Y_j 和 Y_k 分别表示试验号为 i 、 j 和 k 的实验结果， Z_d 表示试验水平为 d 的平均结果， d 取值为 1、2、3。

通过计算间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度不同实验水平的极差，通过极差分析可量化干燥因素对结果的影响程度^[81]，极差公式如下：

$$R = \max Z - \min Z \quad (3-30)$$

式中， R 是极差值的大小； $\max Z$ 是平均结果的最大值； $\min Z$ 是平均结果的最小值。

极差值 R 越大, 表明干燥因素对实验结果的影响越显著; 反之, 极差值 R 越小, 则影响越弱。分析间歇时间、真空度、干燥温度和微波功率的极差, 进行排序, 可以确实对实验结果的影响程度。

(3) 方差分析

方差分析是一种通过比较干燥因素水平间的变异量和实验误差的变异量来判断干燥因素是否显著的方法。若干燥因素水平间的变异量远大于误差的变异量, 则表明该干燥因素对实验结果具有显著性影响。显著性检验通过 F-检验(即方差比)进行判断。方差分析的总变异公式^[82]如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} SST = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \\ \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \\ SSA = \sum_{j=1}^k n_j (\bar{Y}_j - \bar{Y})^2 \\ SSE = SST - SSA \end{array} \right. \quad (3-31)$$

式中, SST 为总平方和, 表示实验结果的总变异; SSA 为因素平方和, 表示某干燥因素不同水平引起的变异; SSE 为残差平方和, 表示试验误差或其他未考虑干燥因素导致的变异; Y_i 为第 i 次试验的实验结果; $\bar{Y}$ 为所有实验结果的平均值; 式中 k 为该因素的水平数; n_j 为第 j 水平的试验次数; $\bar{Y}_j$ 为第 j 水平的平均实验结果。

均方(MS)和 F-值公式^[82]如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} MS_A = \frac{SSA_A}{k-1} \\ MS_E = \frac{SSE}{n-k} \\ F_A = \frac{MS_A}{MS_E} \end{array} \right. \quad (3-32)$$

式中, $k-1$ 表示因素 A 的自由度(水平数减 1), $n-k$ 表示残差自由度(试验次数减因素的水平数)。

3.3 结果与讨论

3.3.1 不同干燥条件对含水率变化的影响

正交实验结果如图 3-3 和图 3-4 所示。图 3-3 显示, 随着干燥时间的延长, 稻谷含水率呈现逐渐下降的趋势, 且整体降低趋势逐渐减缓, 表明稻谷在微波干燥过程中, 在干燥初始阶段中, 降低的水分主要为存在于稻谷籽粒内部的自由水, 这部分水分与周围的结构结合较弱, 容易受热蒸发。随着自由水的降低, 稻谷籽粒内部存在的结合水开始蒸发, 然而结合水与籽粒内部结构结合较为紧密, 蒸发所需的能量较高, 因此稻谷干燥速率开始降低, 随着干燥时间的增加, 结合水含量逐渐减少。由图 3-4 可知, 稻谷干燥速率在 0~4 min 时, 稻谷干燥速率急剧上升, 而在 4~44 min 之间, 整体干燥速率呈现降低的趋势, 且降低速度愈发缓慢, 这表明在 0~4 min 时, 稻谷干燥降低的水分主要为自由水, 在 4 min 后的干燥中, 逐渐减少稻谷籽粒内部的结合水。

结合图 3-3, 间歇时间恒定为 0 min 时, 随着微波功率、真空度和干燥温度的增加, 稻谷含水率降低趋势更加显著, 当真空度为 0.09 MPa, 微波功率为 500 W, 干燥温度为 50 °C 时, 此时稻谷干燥速率达到最快, 干燥到储藏标准时间仅需 16 min, 在真空度为 0.05 MPa、微波功率为 300 W、干燥温度为 30 °C 的条件下, 稻谷干燥至目标含水率所需时间为 44 min, 这表明微波功率、真空度和干燥温度对稻谷干燥速率具有较大影响。

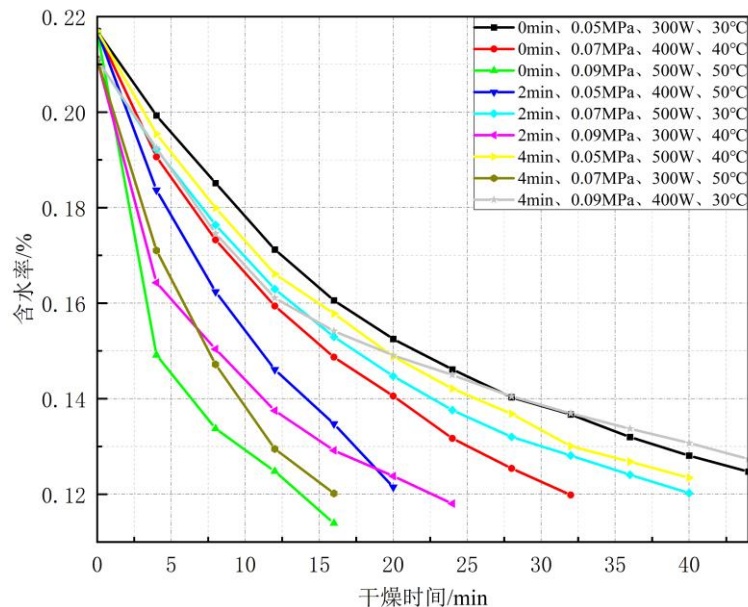


图 3-3 稻谷含水率变化

注: 图中标单位中 0 min、2 min、4 min 表示间歇时间分别为 0 min、2 min、4 min, 0.05 Mpa、0.07 Mpa、0.09 Mpa 表示真空度分别为 0.05 Mpa、0.07 Mpa、0.09 Mpa, 300 W、400 W、500 W 表示微波功率分别为 300 W、400 W、500 W, 30 °C、40 °C、50 °C 表示干燥温度分别为

30 ℃、40 ℃、50 ℃，下图采用同样方法进行标注。

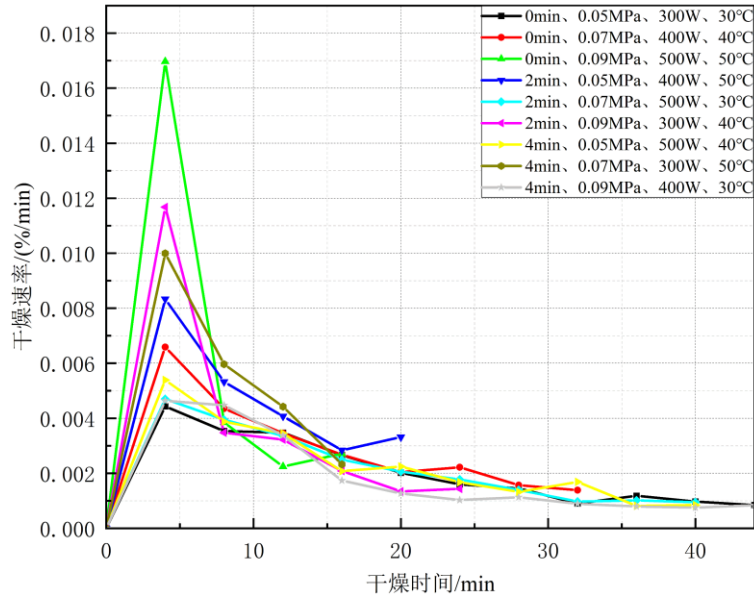


图 3-4 稻谷干燥速率

3.3.2 干燥因素主效应分析

对间歇时间、微波功率、真空度和干燥温度按照其实验水平将实验结果分类，如表 3-3 所示。

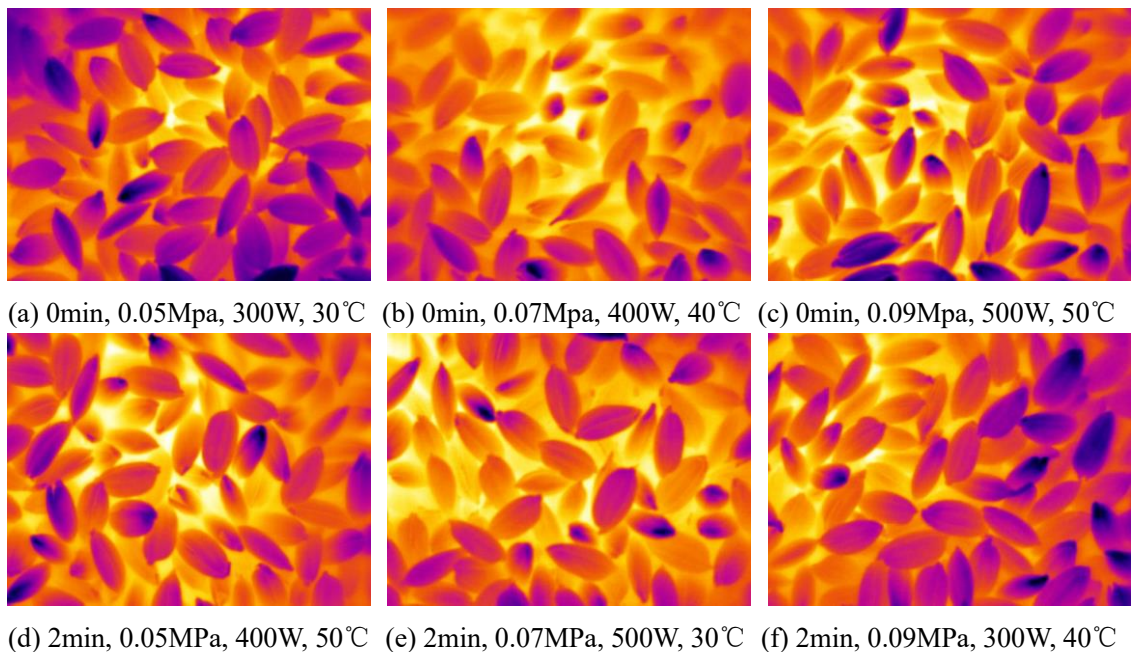
表 3-3 主效应分析

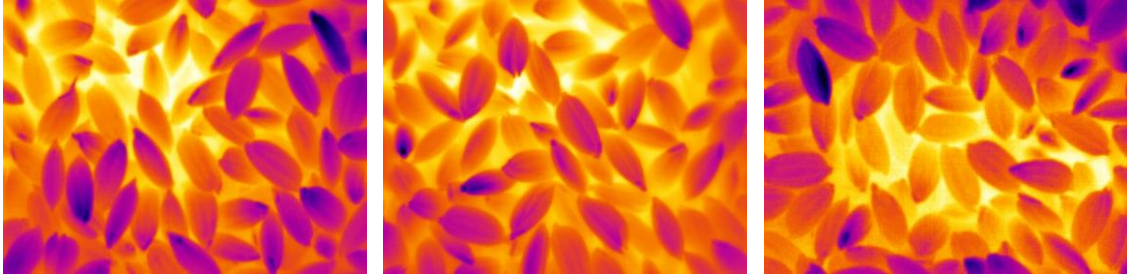
因素	水平	实验号	平均结果
间歇时间	0 min	1、2、3	14.11%
	2 min	4、5、6	13.90%
	4 min	7、8、9	14.40%
真空度	0.05 MPa	1、4、7	15.10%
	0.07 MPa	2、5、8	14.06%
	0.09 MPa	3、6、9	13.24%
微波功率	300 W	1、6、8	13.67%
	400 W	2、4、9	14.58%
	500 W	3、5、7	14.16%
干燥温度	30 ℃	1、5、9	15.59%
	40 ℃	2、6、7	14.52%
	50 ℃	3、4、8	12.29%

表 3-3 的主效应分析表明，在干燥时间固定为 16 min 的条件下，间歇时间为 0 min、2 min 和 4 min 时，稻谷的含水率分别为 14.11%、13.90%和 14.40%。随着间歇时间的延长，稻谷的含水率先下降后上升。这表明，当间歇时间为 0 min 或 4

min 时, 间歇时间过短或过长对微波干燥效率的提升影响较小, 而在间歇时间为 2 min 时, 稻谷的含水率最低, 显示中等的间歇时间对提升微波干燥效率影响较大。表 3-3 显示, 当真空度从 0.05 MPa 增加到 0.09 MPa 时, 在干燥时间保持 16 min 的条件下, 稻谷含水率从 15.10% 逐渐下降至 13.24%, 且下降速率逐渐减缓。这表明, 随着真空度的提高, 使水分的沸点降低, 稻谷籽粒内部的水分蒸发速度加快, 达到干燥效率增加的效果。微波功率从 300 W 增至 500 W, 使干燥腔内的微波密度增加。在相同干燥时间内, 稻谷含水率呈现先降后升的趋势, 表明在 500 W 微波功率下, 干燥质量下降, 可能是由于微波功率过高导致稻谷籽粒出现微波吸收饱和现象。正交实验结果表明, 当干燥温度从 30 °C 升至 50 °C 时, 稻谷的含水率持续下降, 且下降速度逐渐加快, 含水率从 15.59% 降至 12.29%。

图 3-5 展示了稻谷微波干燥 16 min 时的温度分布情况, 图中显示干燥过程中温度分布不均匀, 中心区域温度高于四周。这主要是因为在微波干燥过程中, 微波干燥箱腔体内部分布的微波并不是一个均匀值, 而是在腔体中分布不均匀, 导致稻谷在干燥中四周与中心在相同时间内吸收的微波能不一致, 导致稻谷籽粒温度不一致, 其次是因为微波干燥箱在干燥过程中微波不是一个固定值, 而是在运行过程中不断发生变化的值, 使得微波在腔体中的分布不均匀。





(g) 4min, 0.05MPa, 500W, 40℃ (h) 4min, 0.07MPa, 300W, 50℃ (i) 4min, 0.09MPa, 400W, 30℃

图 3-5 稻谷温度分布图

稻谷微波干燥后的温度分布进行分析，稻谷干燥平均温度如图 3-6 所示。由图 3-6 可知，当实验条件为实验号 1 和实验 8 时，稻谷平均温度真实值与预测值基本一致，而当实验条件为实验号 2、3、4、5、6、7、9 时，稻谷平均温度真实值大于预测值。

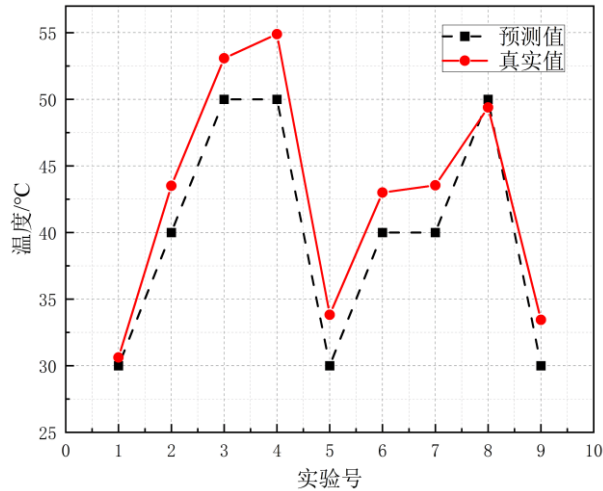


图 3-6 温度对比

根据稻谷微波干燥实验，使用红外热成像仪拍摄实验结果，分析其温度分布图可知稻谷籽粒温度分布情况，采用式(3-28)分析稻谷微波干燥后温度均匀度与波动度变化规律，如图 3-7 所示。由图 3-7 可知，当实验条件为实验号 3、5 和 9 时，温度波动度数值较小，而当实验条件为实验号 4 和 8 时，温度波动度数值较大；当实验条件为实验号 1、5、6、9 时，温度均匀度数值较低，而当实验条件为 4、6、7 时，温度均匀度数值较高。

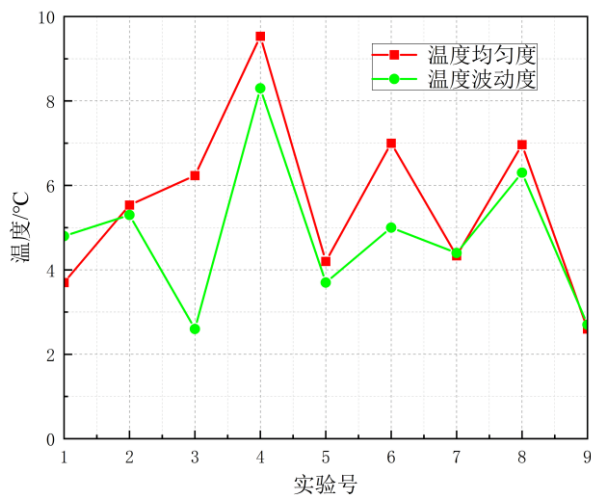
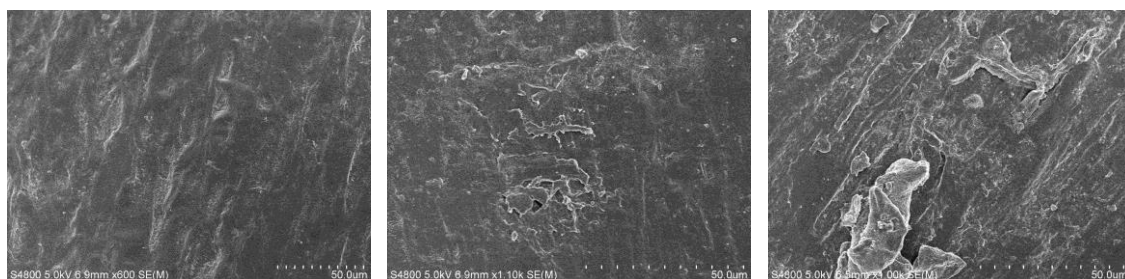


图 3-7 温度均匀度与波动度

3.3.3 不同干燥条件对稻谷裂纹产生的影响

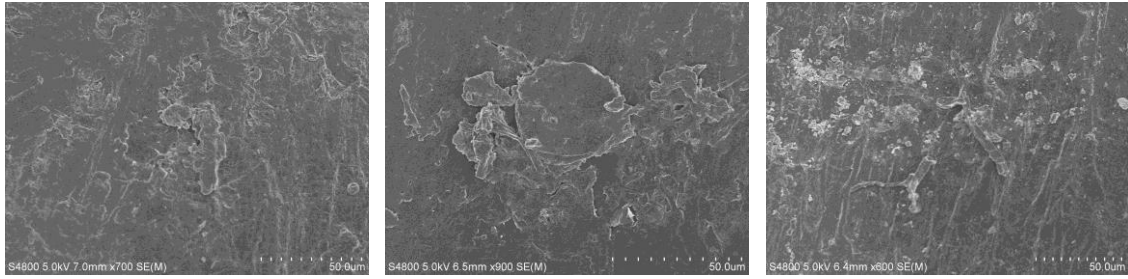
微波干燥后稻谷裂纹情况，本文使用扫描电子显微镜分析稻谷应力与裂纹变化规律，实验结果如图 3-8 和 3-9 所示。分别从宏观和微观层次分析研究稻谷产生稻谷籽粒裂纹情况，图 3-8 为宏观层次图，图 3-9 为微观层次图。



(a) 0min, 0.05Mpa, 300W, 30°C (b) 0min, 0.07Mpa, 400W, 40°C (c) 0min, 0.09Mpa, 500W, 50°C



(d) 2min, 0.05Mpa, 400W, 50°C (e) 2min, 0.07Mpa, 500W, 30°C (f) 2min, 0.09Mpa, 300W, 40°C

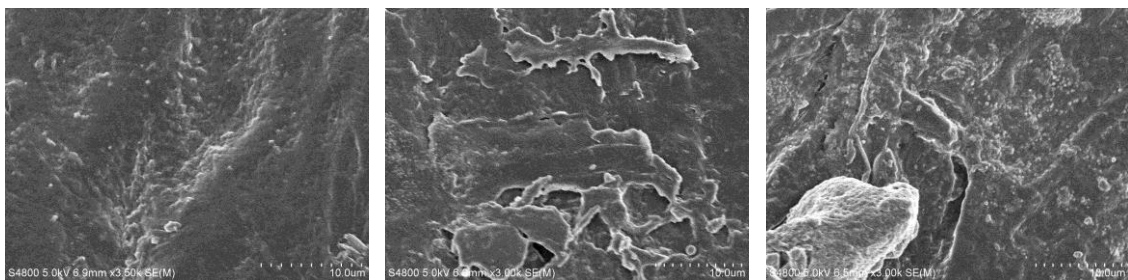


(g) 4min, 0.05MPa, 500W, 40℃ (h) 4min, 0.07MPa, 300W, 50℃ (i) 4min, 0.09MPa, 400W, 30℃

图 3-8 宏观层稻谷表面质量

注：宏观层为扫描电子显微镜放大约 1000 倍。

根据图 3-8 和 3-9，结合表 3-3 表明随着间歇时间从 0 min 增加至 4 min，稻谷干燥至储藏含水率所需干燥时间呈现先增加后减小的趋势，且间歇时间越长，干燥后籽粒温度分布更均匀，籽粒内部的水分梯度和温度梯度值有所降低，形成的应力应变显著降低，干燥后稻谷的裂纹率明显下降，表面裂纹大小无明显变化。在相同干燥条件下，随着真空度从 0.05 MPa 提升至 0.09 Mpa，稻谷干燥至所需含水率需要的时间显著降低，且干燥后稻谷籽粒温度分布更均匀，这是因为随着真空度的增加，使水分的沸点降低，从而加快稻谷籽粒内部水分的蒸发，达到干燥效率增加的效果，但稻谷表面裂纹显著变大。当微波功率从 300 W 增加至 500 W，干燥腔体内部的微波密度也随之增加，在同等干燥时间内，稻谷籽粒内部水分吸收的微波能量增加，使微波干燥效率提升，然而，这会导致籽粒温度分布不均，内部温度梯度和水分梯度的加剧会引发更大的应力应变，从而使稻谷裂纹率上升，表面裂纹大小无明显变化。正交试验表明干燥温度的增加，在同等干燥条件下，稻谷含水率呈现下降的趋势，这说明干燥温度的增加提升了微波干燥效率，但随着温度的增加，籽粒内部形成的水分梯度和温度梯度加剧了应力应变的产生，使得稻谷干燥后的裂纹率显著增加，且表面裂纹大小变化明显，这表明温度的变化对稻谷干燥后品质的影响大于间歇时间、真空度和微波功率。



(a) 0min, 0.05Mpa, 300W, 30℃ (b) 0min, 0.07Mpa, 400W, 40℃ (c) 0min, 0.09Mpa, 500W, 50℃

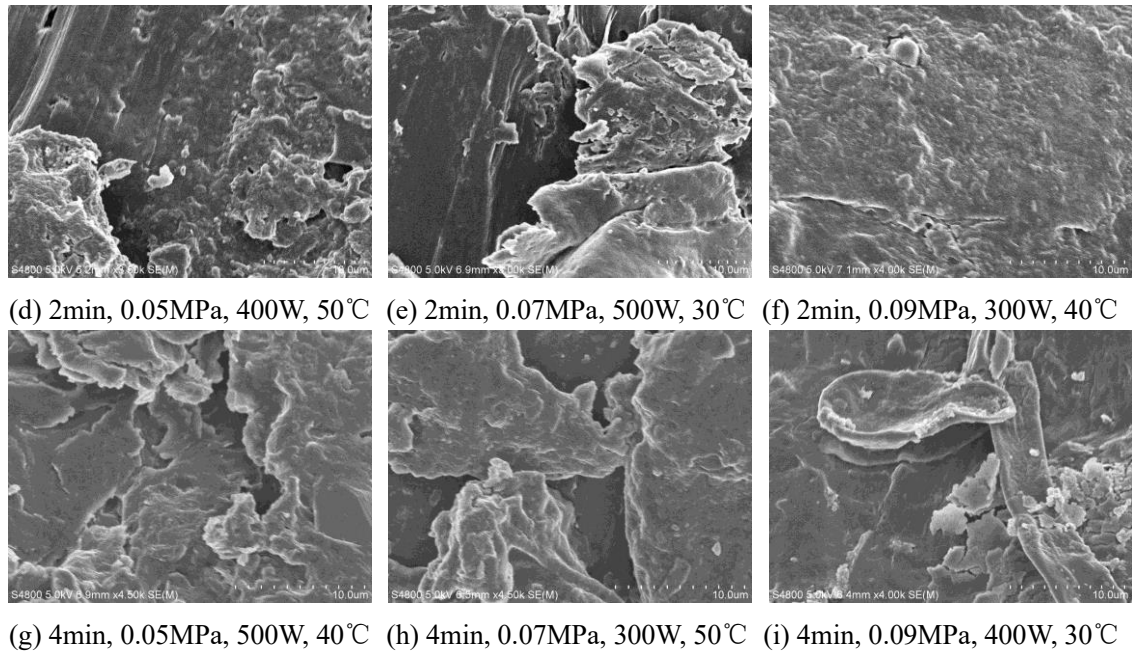


图 3-9 微观层次稻谷表面质量

注：微观层为扫描电子显微镜放大约 4000 倍。

3.3.4 显著性检验不同干燥条件的影响

稻谷微波干燥结果进行极差分析，结合式(3-29)和式(3-30)得到间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度不同实验水平的极差。由表 3-4 数据可知，各实验参数对稻谷微波干燥含水率的影响程度存在显著差异。其中，干燥温度参数的极差值达到 3.30%，为四个因素最大值，表明温度是调控稻谷微波干燥过程的首要因素；真空度参数的极差值为 1.86%，较干燥温度降低 1.44%，说明其影响强度次之；微波功率参数的极差值为 0.91%，较真空度进一步下降 0.95%%，反映其影响再次之；间歇时间参数极差值最小(0.50%)，较微波功率减少 0.45%，表明该因素影响最小。上述极差分析结果表明，在稻谷微波干燥过程中，各参数影响程度排序为：干燥温度(3.30%)>真空度(1.86%)>微波功率(0.91%)>间歇时间(0.50%)，各因素间存在明显的梯度差异。

表 3-4 极差分析

条件	水平	最大值	最小值	极差值
间歇时间/min	0、2、4	14.40%	13.90%	0.50%
真空度/Mpa	0.05、0.07、0.09	15.10%	13.24%	1.86%
微波功率/W	300、400、500	14.58%	13.67%	0.91%
干燥温度/°C	30、40、50	15.59%	12.29%	3.30%

结合式(3-31)和式(3-32)，对稻谷微波干燥实验结果进行分差分析，可得自由度

和平方和参数，如表 3-5 所示。

表 3-5 分差分析

条件	自由度	平方和 SS	均方 Ms
间歇时间/min	2	0.0000378	0.0000189
真空度/Mpa	2	0.0005214	0.0002607
微波功率/W	2	0.0001245	0.0000622
干燥温度/°C	2	0.0017008	0.0008504
误差平方和	1	0.0000016	0.0000016
总	8	0.002386142	0.001194

平方和 SS 表示单一因素对实验结果的贡献程度。平方和越大，表明该因素对实验结果的影响越显著。表 3-5 显示，干燥温度的平方和为 0.0017008，在四个干燥条件中最大，说明干燥温度对稻谷微波干燥实验结果的影响最为显著；其次是真空度平方和为 0.0005214，与干燥温度平方和相比降低了 0.0011866，影响相对较低；再次是微波功率平方和为 0.0001245，与真空度平方和相比减少了 0.0003969，影响效果更低；最后是间歇时间的平方和为 0.0000378，与微波功率的平方和相比减少了 0.0000867，影响效果最低。这表明干燥温度对稻谷微波干燥实验结果的影响最大，其次是真空度，微波功率影响较低，间歇时间对实验结果的影响最小。均方 Ms 用于比较不同干燥条件的影响是否显著。干燥温度的均方为 0.0008504，远大于间歇时间、真空度和微波功率的均方(其中间歇时间均方为 0.0000189，真空度均方为 0.0002607，微波功率均方为 0.0000622)，表明干燥温度条件对稻谷微波干燥的实验结果影响最为显著。由间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度的均方值分析，各干燥条件对稻谷微波干燥的影响程度从大到小依次为：干燥温度、真空度、微波功率和间歇时间。且本实验的误差均方为 0.0000016，表明实验误差较小，数据具有真实性。

结合式(3-32)和表 3-5 中的数据，进一步分析显著性(F 值)，得到如表 3-6 所示结果。根据表 3-6 的分析结果，四种干燥条件(间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度)对稻谷微波干燥的影响均达到了显著性水平(F 值均大于临界值 5.79)。进一步分析显示，干燥温度和真空度对稻谷微波干燥的影响最为显著，其中干燥温度的 F 值为 521.014，真空度的 F 值为 159.721，均显著高于临界值，表明这两者是影响稻谷微波干燥的关键因素。其中，干燥温度的 F 值最大，说明干燥温度是影响稻谷

微波干燥的最重要因素。相比之下，微波功率和间歇时间的 F 值分别为 38.129 和 11.585，均大于临界值 5.79，表明这两个因素对稻谷微波干燥也具有显著影响。然而，间歇时间的 F 值最小，说明其对干燥结果的影响程度相对较低。

综上所述，干燥温度和真空度是影响稻谷微波干燥的关键因素，其次是微波功率，而间歇时间的影响程度最低。因此，在进行稻谷微波干燥实验时，应优先优化和调整干燥温度和真空度，以获得最佳干燥效果；而对于微波功率和间歇时间，可在实验设计中适当简化或优化。

表 3-6 F 值显著性检验

因素	临界值	F 值
间歇时间/min	5.79	11.585
真空度/Mpa		159.721
微波功率/W		38.129
干燥温度/°C		521.014

3.4 本章小结

本章通过正交试验对稻谷微波真空干燥过程中各单一干燥因素的影响进行了分析，结果表明间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度均对干燥效率及干燥后稻谷品质有显著影响。随着间歇时间从 0 min 增加至 4 min，稻谷干燥至储藏含水率所需的时间呈现先增加后减小的趋势，同时间歇时间越长，稻谷干燥后的温度分布更加均匀，籽粒内部的水分梯度和温度梯度明显降低，干燥应力应变得以缓解，裂纹率显著下降。真空度的增加亦显著提升干燥效率，当真空度从 0.05 MPa 增加至 0.09 MPa 时，稻谷达到目标含水率的时间大幅缩短，且干燥后籽粒温度分布更加均匀。

此外，微波功率和干燥温度的变化对干燥过程有重要影响。随着微波功率从 300 W 增加至 500 W，稻谷籽粒内部吸收的微波能量增加，使干燥效率提升，但高功率条件下籽粒内部温度梯度和水分梯度加剧，导致应力应变增大，裂纹率显著提高。干燥温度的升高也对稻谷含水率的快速下降具有积极作用，但温度的进一步增加同样会导致籽粒内部温度梯度和水分梯度显著加剧，从而增加干燥后的裂纹率。综合分析表明，在优化微波真空干燥参数时，应权衡干燥效率与稻谷品质，合理选择各因素水平，以实现高效低裂纹的干燥效果。

第 4 章 微波真空干燥稻谷含水率预测

由上一章实验结果可知，谷物在微波干燥过程中，其含水率变化与温度响应受多重因素影响，导致干燥品质难以稳定控制。在实际操作中，干燥工艺参数的调整不仅会改变装置运行条件，还会显著影响腔体内电磁场分布特性，进而影响最终干燥品质。

BP 神经网络凭借其强大的非线性映射能力，可有效建立干燥参数与工艺条件间的复杂关系，为干燥过程预测和优化提供了新方法。然而，BP 网络存在易陷入局部最优、训练效率低等局限。为此，研究者提出了基于遗传算法(GA)的优化策略，通过模拟自然选择机制优化网络参数，显著提升了模型性能。GA-BP 混合模型不仅提高了预测精度，还增强了泛化能力，为微波干燥的智能化控制提供了有效解决方案。

4.1 含水率预测方法

4.1.1 BP 神经网络预测模型设计

本节研究构建了基于 BP 神经网络的稻谷微波干燥预测系统，主要用于水分含量的预测分析。在模型构建初期，完成了 BP 神经网络架构的设计工作，其中包括对各层级神经元数量的确定，具体涵盖输入层、隐含层及输出层的节点配置，接着，选择适当的激活函数(如 Sigmoid 或 ReLU)，并设定训练目标误差和学习率等参数。然后，通过训练、验证和测试数据对网络进行优化。训练完成后，使用已训练的模型预测稻谷干燥过程中的含水率。通过评估指标(如均方误差 MSE 和决定系数 R^2)分析模型的拟合度、适应性和预测精度，以验证 BP 神经网络在稻谷干燥过程中的应用效果。整个过程借助 MATLAB 平台进行仿真和分析，确保了预测的准确性和可靠性。

(1)性能评价指标

BP 神经网络的性能评估是衡量其预测效果和泛化能力的重要环节。模型性能评估主要采用以下量化指标： MSE (均方误差)、 $RMSE$ (均方根误差)、 R^2 (决定系

数)、 MAE (平均绝对误差)以及相关系数。在这些指标中, MSE 和 $RMSE$ 作为误差度量指标, 其数值与预测精度呈负相关关系; R^2 用于表征模型的解释能力, 其值域范围为 0 到 1, 数值越大表明模型拟合优度越理想。 MAE 从绝对值角度反映误差水平, 而相关系数则用于评估预测值与观测值之间的线性相关性, 其绝对值趋近于 1 时表示二者具有显著的相关性。此外, 训练时间和收敛速度也是评价模型效率的重要因素。过长的训练时间或较慢的收敛速度可能表明模型的训练效率较低。最后, 泛化能力, 即模型在未知数据上的表现, 也是关键评估标准。综合考虑这些指标, 可以全面了解 BP 神经网络在特定任务中的性能和实用性。本文模型性能评价方法包括相关性检验和预测误差检验两部分, 用于评价模型拟合效果及预测误差。

1)模型相关性检验

模型相关性检验中引入样本均方根误差、决定系数以及相关系数来验证模型的准确性和可靠性。 $RMSE$ 作为 MSE 的平方根, 具有更高的误差敏感性, 有效解决了 MSE 数值偏大的局限性。该指标与预测精度呈反比关系, 其值越低表明模型性能越优。决定系数 R^2 用于评估模型的拟合优度, 反映了回归方程对观测数据的解释程度。当 R^2 趋近于 1 时, 表明模型能够充分解释数据变异; 反之, 当 R^2 接近 0 时, 则提示模型的预测效能欠佳。皮尔逊相关系数用于量化预测值与实际观测值之间的线性关联强度, 其取值范围为。当系数值接近 ± 1 时, 表明变量间存在显著的相关性; 而当系数值接近 0 时, 则说明变量间缺乏线性关联。

样本均方根误差 $RMSE$ 计算公式为:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \lim_{x \rightarrow \infty} \quad (4-1)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (4-2)$$

决定系数 R^2 计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4-3)$$

相关系数 PCC 具体计算公式为:

$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(y_i - \hat{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}} \quad (4-4)$$

式中， MSE 表示样本均方误差， $\hat{y}_i$ 表示样本预测值， $\bar{y}$ 表示样本均值， n 表示样本总数。

2)模型预测误差检验

基于 $RMSE$ 、 R^2 和相关系数等多元评价指标的验证结果表明，神经网络模型在满足相关显著性要求的基础上，已展现出可靠的预测性能。为深入评估模型的预测准确性和稳定性，本研究引入 MAE 指标进行补充验证分析。

平均绝对误差计算公式为：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4-5)$$

为评估模型预测结果的精度，本文对预测精度进行了分级设定，如表 4-1 所示。当 MAE 值低于 50% 时，模型被认为具有预测能力，并根据具体值划分为高精度预测、良好预测和可行预测。当 MAE 值超过 50% 时，则表明模型预测能力不足，判定为不可行预测。

表 4-1 MAE 预测精度等级

MAE 精度范围	预测精度等级
$MAE \leq 5\%$	高精度预测
$5\% < MAE \leq 10\%$	良好预测
$10\% < MAE \leq 30\%$	可行预测
$30\% < MAE \leq 50\%$	及格预测
$MAE > 50\%$	不可行预测

(1)网络结构确定

BP 神经网络采用典型的三层架构，包含输入层、中间隐含层和最终输出层，其本质是一种基于误差反向传播机制的前馈型神经网络。以稻谷微波真空干燥实验数据为基础，结合稻谷含水率的干燥特性及特征重要性分析，构建稻谷微波真空干燥过程的预测模型。假设实验中的其他条件在整个过程中保持不变，并视为常量。本文选择微波功率(W)、间歇时间(t)、真空度(MPa)及干燥温度(T)四个主要影响因素作为 BP 神经网络的输入变量，稻谷微波干燥过程的含水率(M)作为输出变量，构建了一个四输入一输出的微波真空干燥预测模型。实验采用表 4-2

的稻谷微波干燥数据，其中 300 组数据用于训练预测模型，另从 8 组不同微波功率条件下各选取 60 组数据作为测试集，分别用于训练网络模型和检验其预测精度。

1)初始化网络

该 BP 神经网络模型的架构参数配置如下：输入层维度设为 n 个神经元，隐含层为单层神经元，输出层维度为 m 。网络权重矩阵中，表示输入层至隐含层的连接权重，则代表隐含层至输出层的权值分布。模型初始化阶段，隐含层偏置设置为 a ，输出层偏置初始化为 b 。

2)隐含层计算

由于输入层仅承担信息传递功能而不参与实际运算，在模型分析中可予以简化处理。隐含层的输出结果直接依赖于输入特征 O_f 的映射关系，输出特征 O_f 为：

$$O_f = f \left[\sum_{j=0}^x w_{ij} x_i + a_j \right] \quad (4-6)$$

式中， f 表示隐含层的传递函数， O_f 表示隐含层输出， x_i 表示输入函数， w_{ij} 表示连接输入层与隐含层的权重， a_j 表示隐含层神经元阈值。

3)输出层计算

BP 神经网络预测的输出 O_k 为：

$$O_k = \sum_{j=1}^i O_j w_{jk} + b_k \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (4-7)$$

式中， O_k 表示神经网络的预测输出， w_{jk} 表示连接隐含层与输出层的权重， b_k 表示输出阈值。

期望输出 Y_k 为：

$$Y_k = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m) \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (4-8)$$

4)节点寻优

隐含层神经元数量是影响神经网络预测微波真空干燥稻谷含水率精度的关键参数^[87]，该参数值可通过以下经验公式计算获得：

$$l = \sqrt{m+n} + a \quad (4-9)$$

式中， l 表示隐含层的神经元个数； m 表示输出层的神经元个数，个数为 1； n 表示输入层的神经元个数，个数为 4； a 表示常量，取值为 1~10。

图 4-1 展示了 BP 神经网络的三层拓扑结构，该模型采用单隐含层设计^[88]。其中，输入层配置四个神经元单元，隐含层节点数量依据公式(4-9)计算确定，输出层则包含两个神经元。

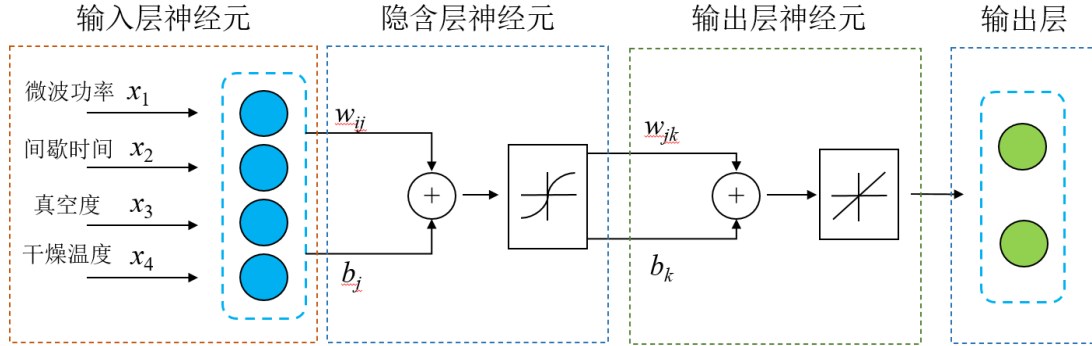
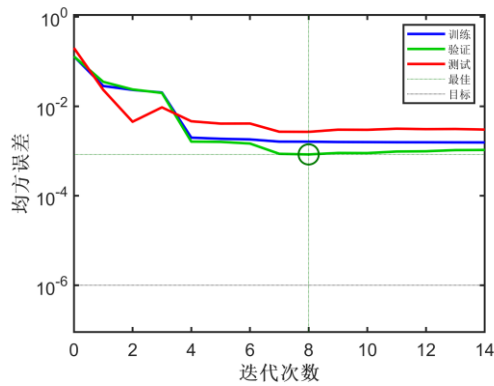
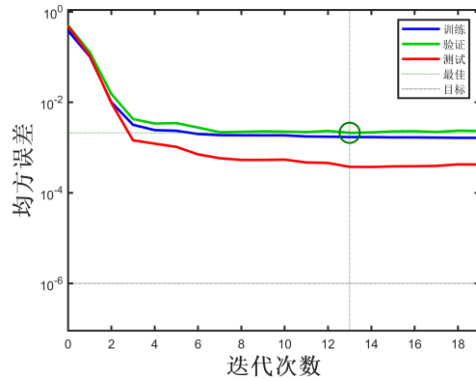


图 4-1 BP 神经网络结构图

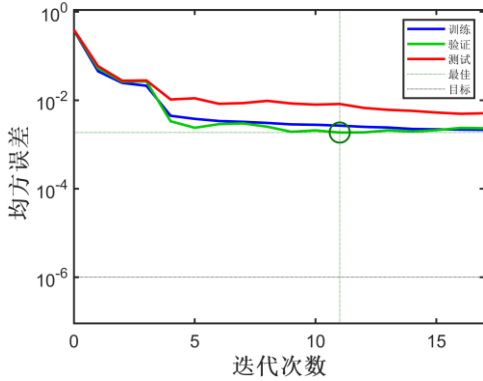
基于公式(4-9)的计算结果，确定稻谷微波真空干燥含水率预测模型的隐含层神经元数量范围为 3 至 13 个。通过将不同节点数代入 BP 神经网络进行迭代训练，当训练集的均方误差低于 0.002 时停止训练。不同隐含层节点配置下的模型训练效果如图 4-2 所示。



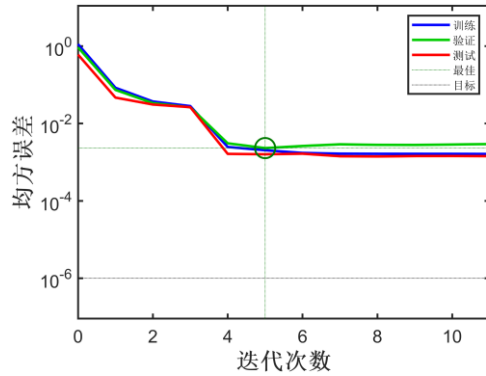
(a) 隐含层神经元个数：3



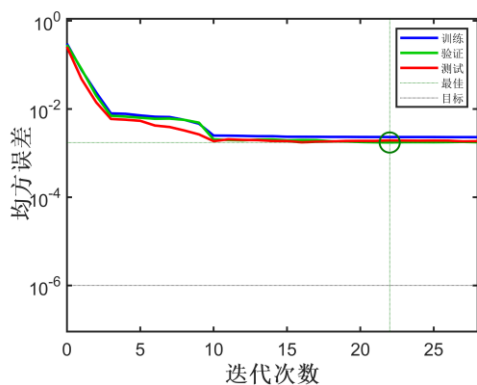
(b) 隐含层神经元个数：4



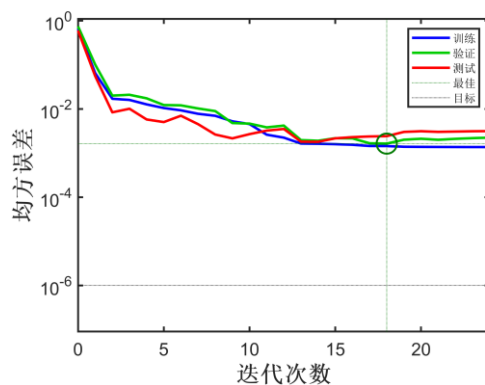
(c) 隐含层神经元个数：5



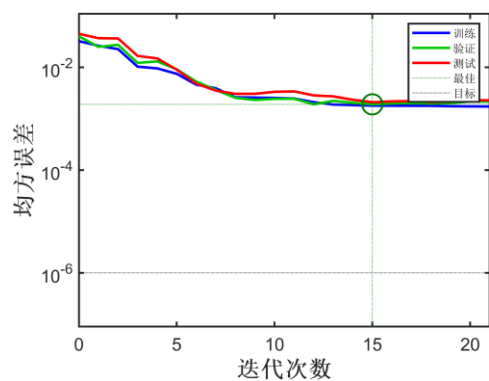
(d) 隐含层神经元个数：6



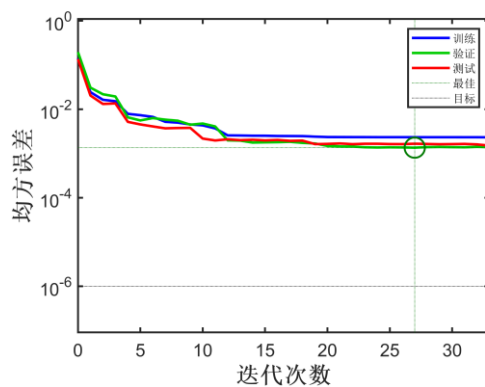
(e) 隐含层神经元个数: 7



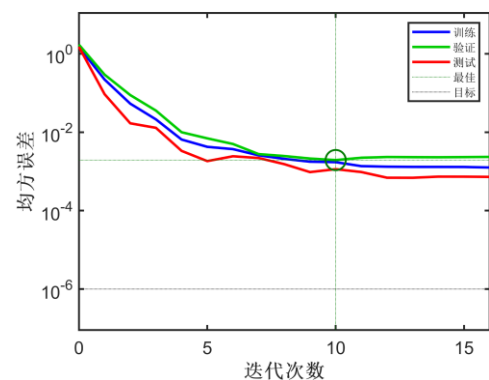
(f) 隐含层神经元个数: 8



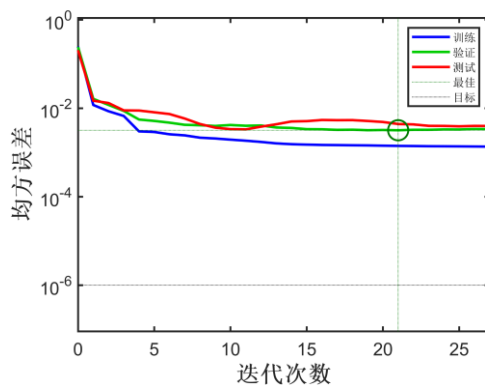
(g) 隐含层神经元个数: 9



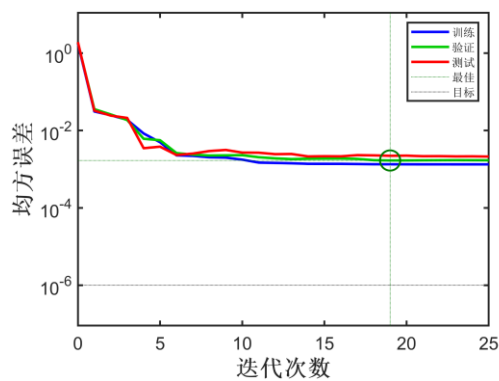
(h) 隐含层神经元个数: 10



(i) 隐含层神经元个数: 11



(j) 隐含层神经元个数: 12



(k) 隐含层神经元个数: 13

图 4-2 隐含层神经元个数为 3~13 的训练结果

图 4-3 展示了不同隐含层神经元数量配置下，模型训练结果的均方误差变化情况。

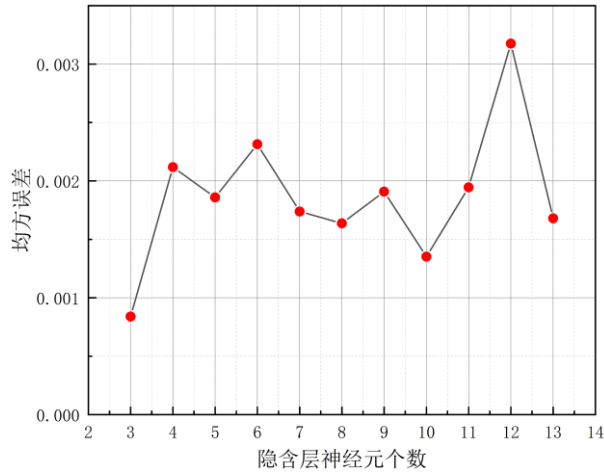


图 4-3 隐含层神经元节点数对应的训练结果均方误差

图 4-3 的实验数据表明，隐含层神经元数量的变化会显著影响 BP 神经网络的训练精度指标。在实验过程中，均方误差的最小值和最大值分别为 0.00083976 和 0.0031755。同时，图 4-4 进一步展示了隐含层神经元数量与模型训练迭代次数之间的关系。

图 4-4 的实验结果表明，隐含层神经元数量与 BP 神经网络的最佳训练性能呈现显著相关性。实验数据显示，模型收敛所需的迭代次数在 5-27 次之间波动。当隐含层配置 6 个和 9 个神经元时，训练精度均突破 0.01 的预设阈值，其对应的收敛迭代次数分别为 5 次和 15 次。通过对比分析发现，6 神经元配置的均方误差(0.0023139)较 9 神经元配置(0.0023139)略高。基于模型精度和训练效率的综合评估，本研究确定 9 个神经元为最优隐含层配置方案。

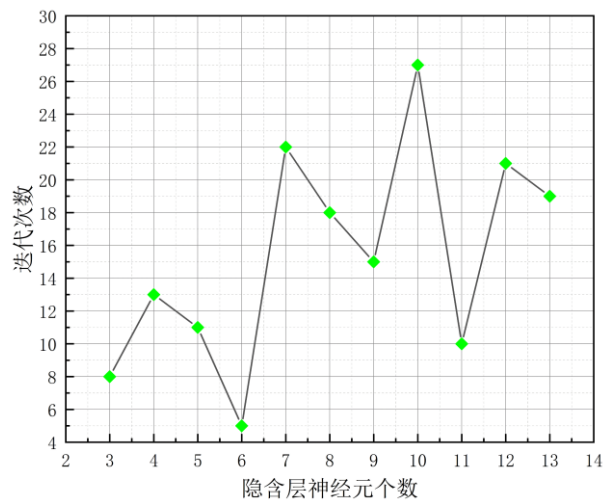


图 4-4 隐含层个数对应的迭代次数

在训练结果分析中，均方误差被用作评估神经网络性能的关键指标。图 4-5 展示了 BP 神经网络的输入回归直线，反映了模型输出与实际值之间的拟合关系。如图所示，训练集、测试集、验证集以及完整数据集均呈现出相似的拟合趋势，这证实了稻谷含水率预测结果与实测数据具有较高的吻合度。具体表现为：训练集相关系数达到 0.99024，验证集为 0.9884，测试集为 0.98666，而完整数据集的相关系数则为 0.98946。上述数据充分证明，BP 神经网络的拟合回归系数均高于 0.9800，验证了模型的训练效果，使其能够初步应用于稻谷微波干燥过程中的含水率预测任务^[89]。

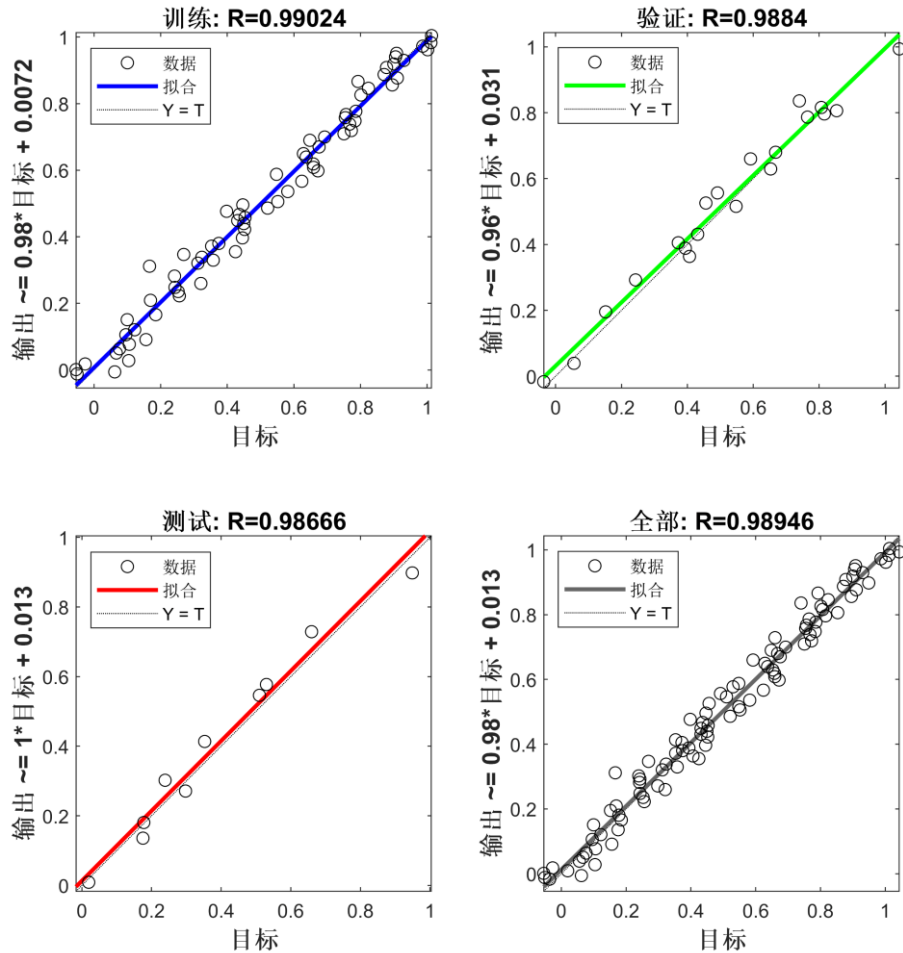


图 4-5 BP 神经网络训练回归直线

4.1.2 GA-BP 神经网络模型设计

针对 BP 神经网络存在的收敛速度慢、易陷入局部最优解以及参数敏感性等问题，本研究采用遗传算法(GA)对其进行优化改进。遗传算法作为一种全局优化方法，具有强大的解空间搜索能力，能够有效避免局部最优问题。通过将遗传算

法与 BP 神经网络融合，构建 GA-BP 混合模型，可实现对网络结构和参数的协同优化，显著提升模型的学习效率和预测精度。图 4-6 和图 4-7 分别展示了遗传算法和 GA-BP 混合模型的网络拓扑结构。

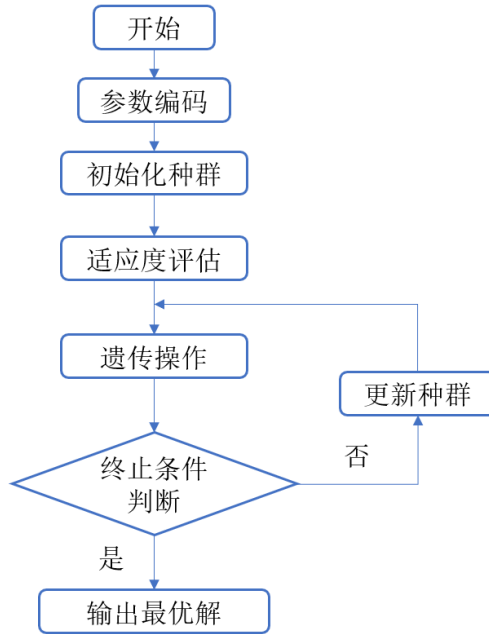


图 4-6 遗传算法(GA)结构图

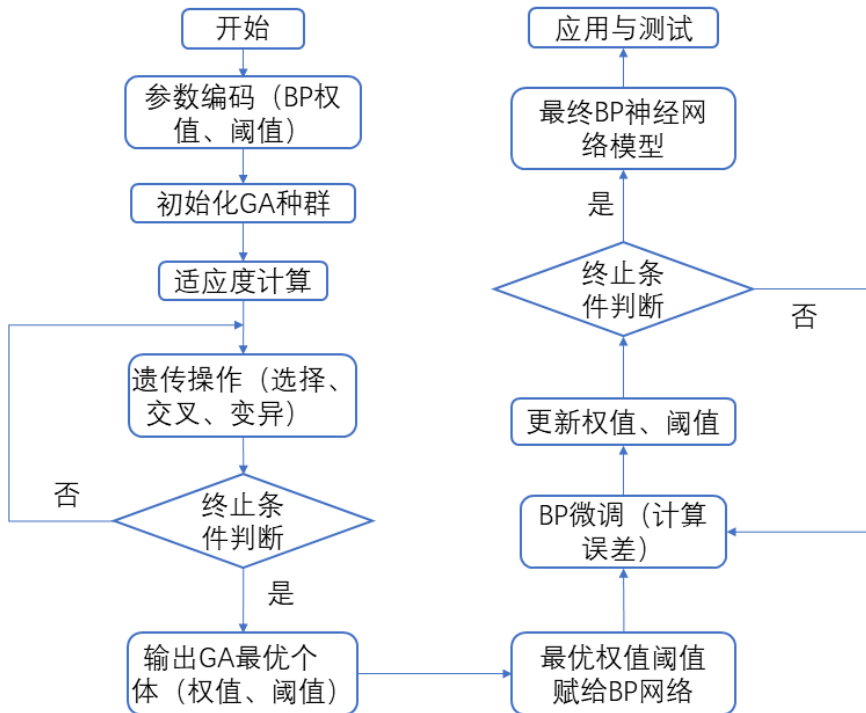


图 4-7 GA-BP 神经网络结构图

如图 4-6 所示，遗传算法的执行流程可概括为：种群初始化→适应度评估→遗传操作→终止判断的迭代循环。具体而言，算法首先随机生成初始种群并进行

染色体编码，随后通过预设的适应度函数评估个体质量。在遗传操作阶段，依次执行选择、交叉和变异运算。当满足终止条件时输出最优解，否则更新种群并重复上述过程。图 4-7 展示了 GA-BP 混合算法的两阶段优化过程：第一阶段采用遗传算法全局优化 BP 网络参数，包括随机初始化种群、适应度评估以及遗传操作等步骤，旨在获取最优的权值和阈值；第二阶段则利用优化后的参数，通过 BP 神经网络进行模型训练和预测，同时结合梯度下降法实现参数的局部微调，完成误差计算和参数更新。这一微调过程有助于进一步优化网络，提升模型的预测精度和泛化能力。

4.2 GA-BP 神经网络的稻谷含水率预测

4.2.1 基于遗传算法改进的 BP 神经网络模型的训练

在完成 GA-BP 神经网络稻谷微波干燥含水率预测模型的构建后，为评估其性能优势，采用与 4.2 节 BP 神经网络模型相同的数据集和神经元配置进行对比实验。图 4-8 展示了当 GA-BP 神经网络隐含层神经元数量设置为 9 时的训练效果。

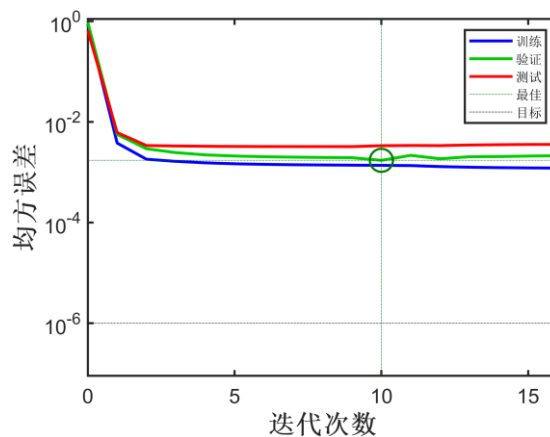


图 4-8 GA-BP 神经网络隐含层神经元数为 9 的训练结果

图 4-8 的实验结果表明，GA-BP 神经网络预测模型取得了优异的性能指标：均方误差最小值达到 0.0017204，决定系数 R^2 为 0.9986，皮尔逊相关系数 PCC 高达 0.9996。

4.2.2 基于 GA-BP 神经网络模型的稻谷含水率预测

本研究采用 BP 神经网络训练样本作为 GA-BP 混合模型的初始种群，设置

种群规模为 50，最大迭代次数 100，代沟系数 0.9。通过染色体编码将处理后的数据输入预训练的 BP 神经网络，获得不同干燥条件(间歇时间、真空度、微波功率和温度)下的稻谷含水率预测值。随后计算个体误差并评估适应度，其中误差与适应度呈负相关关系。经过选择、交叉和变异等遗传操作，算法逐步逼近最优解。图 4-9 展示了 90 次迭代过程中的误差收敛曲线。

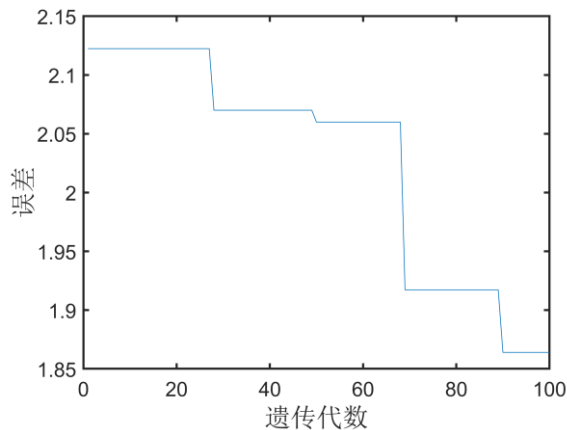


图 4-9 GA-BP 神经网络的误差进化曲线

本文采用 BP 神经网络预测模型的训练样本作为 GA-BP 混合算法的初始种群。本研究采用以下实验参数配置：种群规模 50，最大迭代次数 100，代际替换率 0.9。利用染色体编码技术将输入特征映射至预训练的 BP 网络，从而获得不同工艺参数组合(间歇时间、真空度、微波功率、干燥温度)对应的稻谷含水率预测值。随后，基于预测误差计算个体适应度，其中适应度值与预测误差呈负相关，误差与适应度呈负相关关系，即误差值越小对应的适应度越高，表明个体性能越优。基于此，通过选择、交叉和变异等遗传操作对种群进行优化。图 4-9 展示了算法经过 90 代迭代后的收敛轨迹，其误差进化曲线直观反映了优化过程的动态特性。

4.2.3 BP 与 GA-BP 神经网络算法比较

BP 神经网络与 GA-BP 神经网络在优化机制、收敛特性及适用范围等方面存在明显区别。BP 神经网络采用梯度下降法，通过误差反向传播机制更新网络权值和阈值参数。然而，该方法存在两个主要局限性：一是容易收敛于局部最优解，二是对初始参数设置具有较强的依赖性。相比之下，GA-BP 神经网络结合了遗传算法的思想，通过选择、交叉和变异等操作实现全局优化，能够有效避免局部最优问题，在算法稳定性方面，BP 神经网络展现出显著的改进效果。就收敛特

性而言,该网络虽具有较快的收敛速率,但在求解复杂非线性问题时易发生早熟收敛;而 GA-BP 神经网络通过种群进化策略,能够在解空间中进行更全面的搜索,尽管收敛速度较慢,但能够找到更优的全局解。

为了更加直观的呈现出 BP 神经网络与 GA-BP 神经网络的预测精度对比,结合公式(4-5),得出如表 4-2 所示误差对照表。

表 4-2 误差对照表

特征指标	BP 神经网络		GA-BP 神经网络	
	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>
含水率	5.150%	0.637%	1.730%	0.169%

由表 4-2 的数据分析可知,相较于传统 BP 神经网络模型,GA-BP 神经网络模型在预测稻谷微波干燥含水率方面表现出更高的精度,预测误差显著降低。实验结果表明,*MAE* 指标从 BP 模型的 5.150%显著下降至 GA-BP 模型的 1.73%,降幅达 3.42%;同时,*MAPE* 值也从 0.637%降低到 0.169%,减少了 0.468%。

优化后的 GA-BP 神经网络模型达到了预设的高精度预测标准,这一结果充分证实了遗传算法对 BP 神经网络预测性能的优化效果。实验数据显示,在给定实验条件下,GA-BP 混合模型的预测结果与实测数据具有更好的拟合优度,其泛化性能显著优于传统 BP 神经网络模型。因此,GA-BP 神经网络模型可作为一种可靠的方法应用于稻谷微波干燥过程中含水率的精准预测^[90]。

4.3 本章小结

本章分别采用反向传播算法(BP)和遗传-反向传播混合算法(GA-BP)构建了稻谷微波干燥含水率预测模型。基于稻谷微波干燥实验数据对 BP 神经网络模型进行训练,实验结果表明,当隐含层神经元数量设置为 9 时,模型的均方误差(*MSE*)达到 0.0019083,验证了 BP 神经网络模型在稻谷微波干燥含水率预测中具有较高的准确性。为增强模型预测性能,本研究采用遗传算法对 BP 神经网络实施优化。通过对比实验发现,GA-BP 神经网络在收敛速度、预测精度及模型稳定性等方面均取得了明显提升,体现了其在复杂非线性预测问题中的优越性。

第 5 章 稻谷微波干燥控制系统及干燥腔体优化

根据上述章节实验结果可知，稻谷在微波干燥过程中存在明显温度控制误差和温度不均匀现象。为提升谷物微波干燥过程中的温度场均匀性和温控稳定性，亟需对微波干燥控制系统进行深入研究并开发有效的控制策略。由于干燥腔内存在显著的温度梯度，腔体结构的优化设计成为关键。本研究以谷物微波干燥系统及其腔体结构为研究对象，基于干燥动力学机理分析，构建了过程控制数学模型，实现了温控精度和电磁场均匀性的双重优化。

5.1 微波干燥控制系统设计

微波真空干燥箱是一种利用微波发生器发射的电磁波能量直接加热物料的设备。该设备通过将微波辐射加热与真空环境相结合，有效降低物料沸点，从而实现高效干燥。微波真空干燥箱的控制系统如图 5-1 所示，其控制系统需要协调温度、真空度和微波功率等多个耦合变量。尽管微波加热具有响应迅速和能量利用率高的优势，但要实现精确控制仍需建立可靠的数学模型，这对提升控制性能及开发新型控制策略具有重要意义。

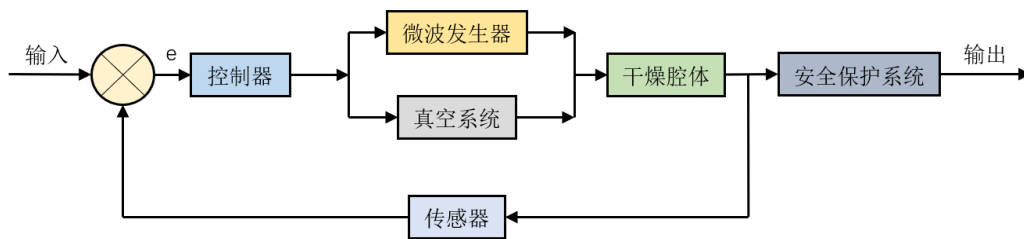


图 5-1 微波真空干燥箱的控制系统

本章重点研究了微波真空干燥箱的加热系统建模与控制优化问题。研究以微波真空干燥箱的微波加热系统为对象，基于热力学第一定律，建立了系统的能量平衡方程，并通过数学推导获得了加热过程的基础数学模型。利用阶跃响应实验数据提取系统动态特性，实现了模型参数的准确辨识。考虑到微波加热的特殊效应，对其加热机理和控制方法展开深入研究。这种直接面向微波加热方式的研究路径，突

出了研究对象的技术先进性和控制复杂性。

5.1.1 干燥机理分析

将稻谷置于微波真空干燥箱干燥腔体中，启动微波真空干燥箱，微波发生器发射微波到干燥腔体内部，微波分布在稻谷四周，其中一部分微波被稻谷中的水分吸收，使其温度升高。微波真空干燥箱输入和输出能量的差值即为微波真空干燥腔体中稻谷所吸收的能量。干燥腔体内部电磁波方程可用麦克斯韦方程^[91]表示：

$$\begin{cases} \nabla \times u^{-1}(\nabla \times \vec{E}) - w^2 \varepsilon \vec{E} = 0 \\ \varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') \\ w = 2\pi f \end{cases} \quad (5-1)$$

式中， u 表示相对磁导率； $\vec{E}$ 表示电场强度，V/m； w 表示角频率，rad/s； ε 表示复介电常数； ε_0 表示自由空间的介电常数； ε' 表示介电常数； ε'' 表示介电损耗因子； u_0 表示自由空间磁导率； f 表示频率，Hz。

基于热力学第一原理，稻谷颗粒内部的热传导过程可通过以下方程表征^[92]：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5-2)$$

式中， ρ 为稻谷密度， C_p 为稻谷比热容， T 为稻谷温度， t 为干燥时间， λ 为稻谷热导率。

初始条件：

$$t = 0; T = T_0 \quad (5-3)$$

边界条件：

$$-k_r \frac{\partial T}{\partial t} = h_t (T - T_a) \quad (5-4)$$

式中， h_t 表示对流传热系数， T_0 表示干燥开始干燥前微波真空干燥箱的温度。

在微波真空干燥条件下，由于谷物颗粒的厚度尺寸显著小于其横向尺寸参数，可将干燥体系中的水分迁移过程简化为单向扩散模型。依据菲克扩散理论，该过程中的质量输运行为可通过以下方程表达：

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (5-5)$$

式中， x 表示当前位置物料几何中心的垂直距离，m。

假设在干燥过程初始阶段，若谷物颗粒具有均一的初始湿含量，且其内部水分分布及迁移阻抗呈现均匀特性，同时忽略物料体积收缩效应，则干燥阶段的湿含量变化可表述为：

$$M_R = \frac{8}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff}}{4L^2} t \right] \quad (5-6)$$

式中， M_R 表示稻谷的含水率，%； L 表示稻谷厚度的一半，m； n 表示实验采样点组数。

根据式(5-6)所示，扩散系数与材料特性及环境温度呈函数关系。研究表明，随着微波场强的增强，水分子动能显著提升，从而促进其扩散迁移。同时，系统真空度的提升有利于加速表面水分的去除，形成显著的水分浓度梯度。由此可见，微波场强参数和真空度条件是调控物料脱水速率的关键工艺变量。

5.1.2 干燥装置控制模型

在微波加热脱水过程中，系统通过实时监测物料温度参数，将其与预设值进行对比分析，由控制单元动态调节输出功率，实现干燥腔内热场的精确调控。稻谷的干燥过程是一个滞后、非线性和多参数耦合的过程。为了实现对干燥温度的精确控制，需要对微波真空干燥箱的温度控制系统建立数学模型。

在微波真空干燥箱的温度控制系统设计中，数学建模是实现精确控制的关键环节。由于微波加热过程涉及复杂的电磁场与物质相互作用，直接基于 MaxWell 方程和物质传递方程建立理论模型具有较高的复杂性，难以直接应用于实际控制系统。因此，本研究采用实验数据驱动的方法，通过采集系统的输入输出数据，建立经验传递函数模型，以描述微波功率与干燥箱内温度之间的动态关系。具体而言，微波真空干燥箱的温度控制系统可近似为一阶惯性滞后环节，其传递函数形式^[93]为：

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (5-7)$$

式中， K 为系统增益，表征微波功率与温度变化之间的比例关系； T 表示系统时间常数，反映系统的惯性特性； τ 表示滞后时间，表示系统响应的延迟。

系统增益 K ^[94]可由公式计算：

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta U} \quad (5-8)$$

式中, $y(\infty)$ 为系统稳态温度; $y(0)$ 为系统初始温度; ΔU 表示阶跃输入的微波功率变化量。

5.1.3 系统参数辨识

为了得到精确的微波干燥温度系统的控制模型, 对干燥装置控制模型中的传递函数的位置参数进行辨识。利用微波真空干燥装置进行谷物加热的阶跃响应测试, 采集系统多组输入输出参数, 并运用切线法与两点法确定传递函数中的待定系数。实验流程如下: 取 100 g 处理好的稻谷样本放置于玻璃容器中, 将玻璃容器放置在微波真空干燥箱的中心位置, 确保微波加热均匀, 设置微波真空干燥箱的输出功率为 500 W, 干燥温度最高为 50 °C, 在 $t=0$ 时, 启动微波干燥装置, 施加阶跃功率(从 0 W 增加至 500 W), 使用温度计实时测量稻谷温度, 并记录温度随时间的变化数据, 温度变化如图 5-2 所示。

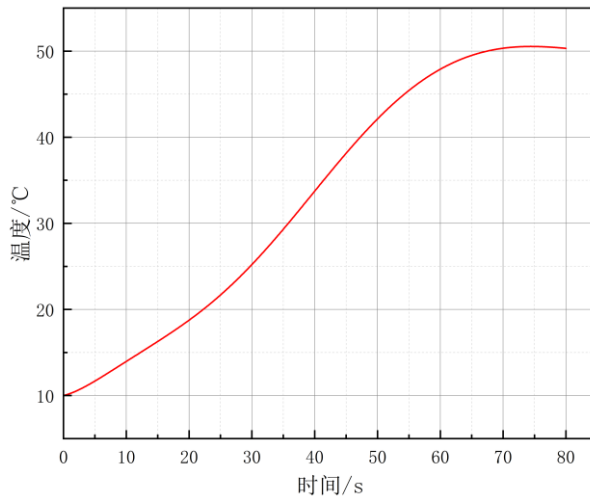


图 5-2 稻谷微波加热阶跃响应温度曲线

通过图 5-1 与切线法的综合分析, 可确定系统的稳态输出值 $y(\infty)$ 和初始响应值 $y(0)$, 进而依据式(5-8)计算出系统的增益系数 K 。由图 5-1 的数据利用 Cohn-Coon 公式求解传递函数中的未知参数^[95]。

$$\begin{cases} T = 1.5(t_{0.632} - t_{0.283}) \\ \tau = 1.5\left(t_{0.283} - \frac{1}{3}t_{0.632}\right) \end{cases} \quad (5-9)$$

结合式(5-9)可求得 K 为 0.1, T 为 31.4, τ 为 6.5。所以该微波加热系统的传递函数模型表示为:

$$G(s) = \frac{0.1}{31.4s + 1} e^{-6.5s} \quad (5-10)$$

5.2 微波干燥装置控制方法优化

5.2.1 PID 控制系统

PID 控制器是一种基于反馈原理的经典控制算法, 广泛应用于工业自动化、温度控制、机器人控制等领域。其核心思想是通过实时比较系统输出与期望值之间的误差, 动态调整控制器的输出, 基于 PID 控制算法的系统可实现变量的精准调控。该控制器包含比例(P)、积分(I)和微分(D)三个核心单元, 分别通过调节系统偏差、偏差积分及偏差变化速率, 实现快速动态响应、消除静态误差并有效抑制系统震荡。

PID 控制系统结构如图 5-3 所示。

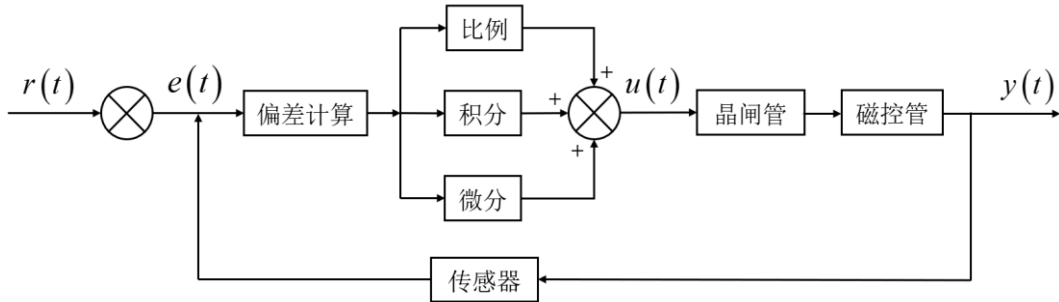


图 5-3 微波加热 PID 控制系统结构

根据误差 $e(t)$, 通过比例(P)、积分(I)和微分(D)环节生成控制信号 $u(t)$ [96]:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5-11)$$

式中, k_p 、 k_i 和 k_d 分别表示比例、积分和微分增益系数; $e(t)$ 表示当前值($y(t)$)与设定值($r(t)$)的差值。

PID 控制器的性能主要依赖于比例(P)、积分(I)和微分(D)三个环节的合理选择和参数整定。每个环节在控制过程中扮演不同的角色, 具有各自的优点和局限性。

(1)比例环节(P)

功能特性：比例单元依据实时偏差信号生成相应的控制量，其输出与输入偏差呈线性关系。比例系数直接影响系统对偏差的敏感程度。该环节的优势体现在能够即时响应偏差变化，有效提升系统动态性能，同时具有结构简单、易于实现的特点。缺点在于比例控制无法完全消除系统的静态误差(稳态误差)，尤其是在存在外部干扰或系统非线性时。当比例增益 k_p 过大时，可能导致系统超调量增加，甚至引发振荡或不稳定。

(2)积分环节(I)

积分单元通过对偏差信号的积分运算进行调节，能够有效消除稳态误差，提升控制精度。该环节通过偏差的持续累积，逐步修正控制输出，使系统响应值趋近于目标设定值。积分增益 k_i 决定了系统对误差累积的敏感程度。缺点在于较大的积分增益可能导致系统响应过渡，产生超调或振荡，当响应速度较慢时，积分环节的调节作用较慢，可能影响系统的动态性能。

(3)微分环节(D)

微分单元依据偏差信号的微分值产生控制量，具有预测系统动态趋势和抑制震荡的功能。微分系数决定了系统对偏差变化速率的敏感程度。该环节的优势在于能够显著提升系统稳定性，有效抑制震荡，并通过预判偏差变化趋势来加速系统响应，降低超调现象。然而，微分环节对噪声较为敏感，可能导致高频噪声的放大效应，导致控制信号波动。而且微分增益 k_d 的参数整定复杂，因此微分增益 k_d 的选择需要谨慎，过大的 k_d 可能使系统对噪声过于敏感，而过小的 k_d 则无法有效抑制振荡。

使用 MATLAB 的 Simulink 模块中构建基于 PID 控制算法的微波真空干燥箱温度控制系统，如图 5-4 所示。

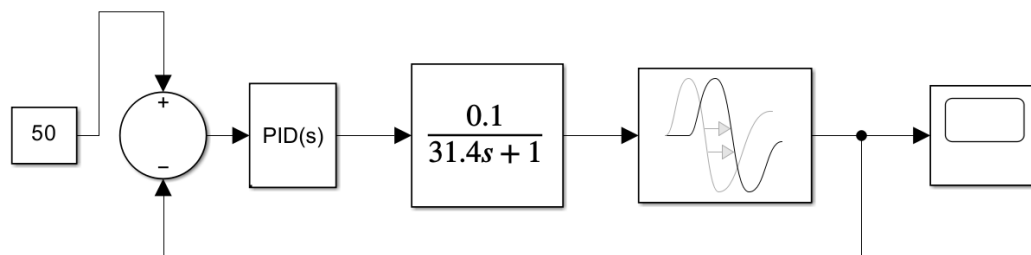


图 5-4 PID 控制仿真模型

根据图 5-4，设置 PID 仿真模型的总时长为 300 s，然后设置比例、积分、微

分增益系数和时间延迟值等参数，随后进行仿真操作，调整控制器参数和被控对象参数，观察控制响应结果，进行优化调整，修改比例、积分和微分增益系数使响应速度符合要求，调整后的比例、积分和微分增益系数分别为 1.5、0.45、2，仿真结果如图 5-5 所示。

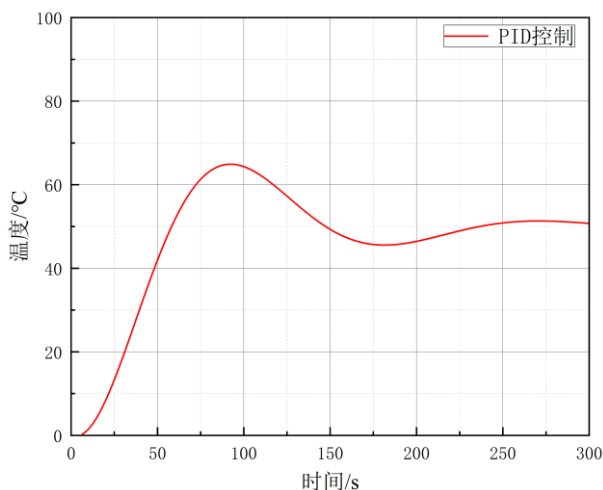


图 5-5 微波加热系统 PID 控制响应

根据图 5-5 所示实验数据，当设定温度为 50 °C 时，PID 控制系统在 92.4 秒达到峰值温度 64.9 °C，随后经过 236.6 s 进入稳定状态，最终将温度精确维持在设定值。

5.2.2 模糊控制

模糊控制策略是一种基于模糊集合理论的控制方法，其核心在于模拟人类认知过程中的模糊推理特性，能够有效处理系统的不确定性和非线性特征。区别于传统精确控制方法，该策略通过构建模糊规则库和隶属函数，将输入量映射为模糊集合，经推理机制获得模糊输出，最终通过解模糊过程转换为精确的控制指令。这种方法适用于那些难以用精确数学模型描述的系统，如复杂的非线性系统或具有不确定性的系统。模糊控制的核心在于模糊规则库的构建，这些规则通常以“如果-那么”的形式表达，例如“如果温度高，那么降低加热功率”。通过模糊推理，系统可以根据当前状态灵活调整控制策略，而不需要依赖精确的数学模型。

模糊控制的优势在于其强大的适应性和鲁棒性，能够有效处理复杂系统中的不确定性和非线性问题，且不需要依赖精确的数学模型，设计过程可以基于专家经验，降低了实现难度。

在本系统中，控制器的输入量为温度偏差信号，输出量为微波加热装置的功率调节信号。系统首先通过模糊化处理模块，将采集到的温度信号转化为模糊量。知识库中预存了多组模糊控制规则，其核心控制策略为：当检测温度低于设定目标值时，系统自动提升加热功率；反之，当检测温度高于目标值时，则相应降低加热功率。推理模块基于这些预设规则进行逻辑运算，生成相应的模糊控制量。随后，去模糊化处理模块将这些模糊量转换为精确的控制参数。系统采用闭环控制结构，将输出的控制量实时反馈至输入端，形成动态调节机制，从而实现控制性能的持续优化。图 5-6 展示了该模糊控制系统的原理图。

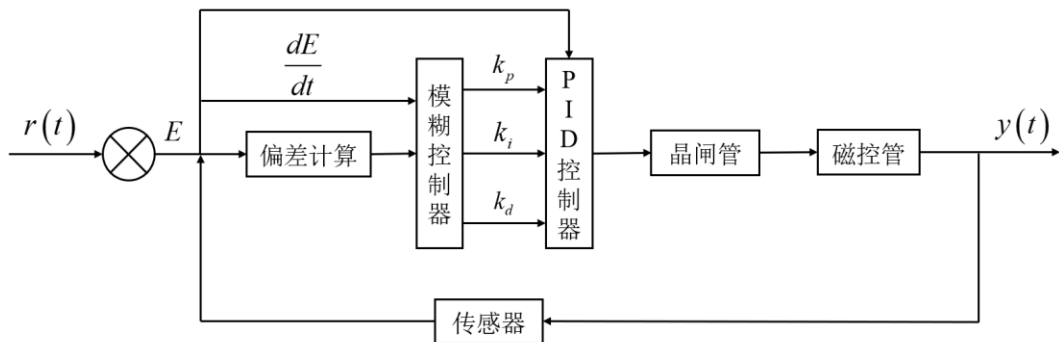


图 5-6 模糊控制原理图

基于图 5-6 的实验数据，采用 MATLAB 模糊逻辑工具箱进行控制系统设计，并通过 Simulink 平台搭建的模糊控制仿真模型如图 5-7 所示。

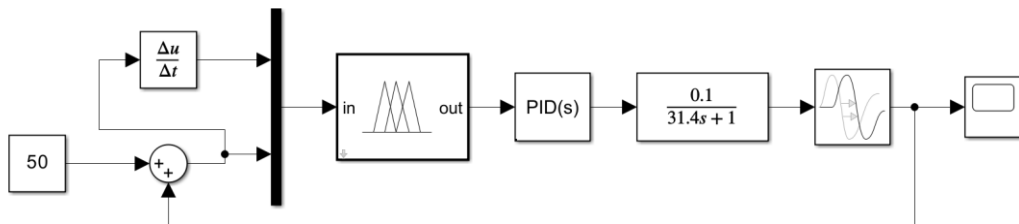


图 5-7 模糊控制仿真结构

相较于传统 PID 控制，模糊控制策略在动态性能方面展现出显著优势。PID 控制与模糊控制的响应对比如图 5-8 所示。

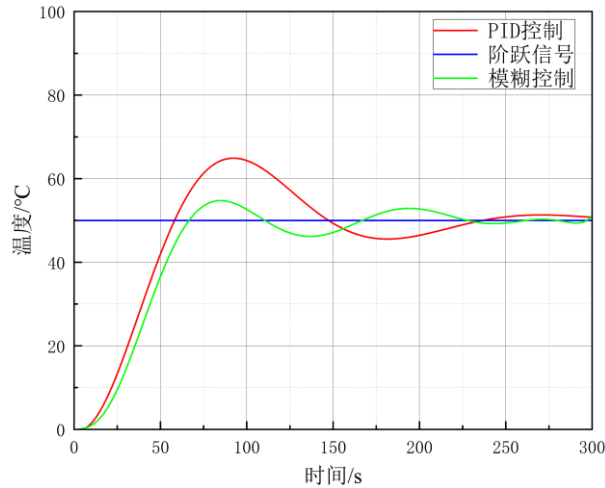


图 5-8 微波加热控制系统响应比较

由 5-8 可知，模糊控制不仅缩短了系统达到设定温度的时间，而且在控制精度方面表现更加突出：其温度波动范围较 PID 控制显著降低，且系统超调量小于 PID 控制。从系统稳定性指标来看，模糊控制下的温度曲线更加平滑，过渡过程更为平稳。这些实验数据充分证明，在微波加热系统的温度控制中，模糊控制策略具有更优的综合性能，因此建议在实际工程应用中优先采用该控制方案。

5.3 微波干燥装置腔体优化

微波干燥箱的微波系统通常由磁控管、波导、微波谐振腔、耦合结构、微波匹配器、控制系统、温控与监测系统、真空系统、物料承载与旋转装置以及屏蔽与安全装置等主要结构组成。微波源产生高频微波能量，波导负责传输微波至谐振腔，耦合结构确保微波能量高效进入谐振腔，匹配器优化系统阻抗匹配以减少能量损耗，控制系统用于调节微波功率和工作时间，温控与监测系统实时监控干燥环境，真空系统在真空干燥中降低气压以加速干燥过程，物料承载与旋转装置确保物料均匀受热，屏蔽与安全装置防止微波泄漏以保障操作安全。

5.3.1 微波谐振腔理论

谐振腔是一种能够在其内部形成并维持电磁波振荡的封闭或半封闭结构，主要用于频率选择与滤波、能量存储、放大与振荡、模式控制及频率稳定等功能。常见的谐振腔类型包括矩形谐振腔，圆柱形谐振腔，球形谐振腔，同轴谐振腔等。微波谐振腔广泛应用于频率选择、能量存储、信号放大及模式控制等领域。其核心特性

由谐振频率、品质因数(Q 值)和电磁场分布等关键参数决定, 这些特性共同决定了腔体的性能和应用范围。

谐振频率是微波谐振腔的固有属性, 由腔体的几何形状、尺寸以及内部填充介质的介电常数决定。矩形谐振腔的固有频率可由以下方程确定:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (5-12)$$

式中, c 表示光速; a 、 b 、 d 表示腔体尺寸; m 、 n 、 p 表示模式指数。

Q 值是衡量腔体能量损耗的重要指标, 定义为腔体储存能量与每周期损耗能量的比值。高 Q 值表明腔体在每周期内的能量损耗较低, 能够实现高效的能量存储与传输。 Q 值主要受腔体材料、表面处理及填充介质损耗的影响。通常采用高导电性材料(如铜或银), 并通过表面镀银等工艺降低欧姆损耗。此外, 使用真空或低损耗介质填充腔体也能显著提高 Q 值。微波信号在腔体内通过多次反射形成驻波, 从而实现电磁场能量的积累与增强。反射次数越多, 能量增强效果越显著, 这一特性与腔体的 Q 值直接相关。高 Q 值腔体能够显著降低插入损耗并提高输出功率, 在微波干燥、通信滤波及科学研究等领域具有重要应用。

波导是一种特殊形状的导体结构, 用于高效传输微波信号。其电磁波的传播特性主要取决于波导的几何形状和尺寸, 而电磁波在波导中的分布形式被称为模式。波导系统中主要存在四种电磁场分布形式: 横向电场分布(TE)、横向磁场分布(TM)、横电磁场分布(TEM)以及复合场分布(混合模式)。TE模式的特征是在波导的传播方向上不存在电场分量, 电磁场仅分布在波导的横截面内; TM模式则是在传播方向上不存在磁场分量, 电磁场同样局限于横截面内。TEM模式要求电磁场在横向上既无电场分量也无磁场分量, 但由于其需要双导体的结构特性, 因此在单导体结构的矩形波导中通常被忽略。混合模式则是电磁场同时在波导横截面和轴向方向上分布的模式。

波导的传输特性还与其截止频率密切相关。当工作频率低于波导截止频率时, 电磁波将呈现显著的衰减特性而无法传输。在矩形波导结构中, 截止波长与波导截面尺寸参数($a \times b$)存在确定关系, 其中TE和TM模式的截止波长可通过相应计算公式获得。这一特性使得波导在微波传输中具有频率选择性, 能够有效滤除低于截止频率的信号, 从而保证高频微波信号的高效传输。当波导的横向尺寸分别

为 a 和 b 时, TE 模式和 TM 模式的截止波长可以通过以下公式表示:

$$\lambda_e = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (5-13)$$

由式 5-2 可知半驻波波长个数越多, 临界波长就越小。矩形波导的主要模式为 TE_{10} 模, 即 $m=1, n=0$ 。因此式 5-2 可以转换为:

$$\lambda_e = 2a \quad (5-14)$$

在微波加热腔体的设计过程中, 需确保腔体的工作波长满足 $\lambda < 2a$ 的条件。腔体内的电磁场特性可通过求解波动方程获得:

$$\begin{cases} \nabla^2 E + k^2 E = 0 \\ \nabla^2 H + k^2 H = 0 \end{cases} \quad (5-15)$$

式中, E 为电场强度矢量, V/m; H 为磁场强度矢量, A/m; k 为电磁波在介质中的波数, 表达式可表述为:

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu} \quad (5-16)$$

式中, ω 表示角频率, rad/s; ϵ 为干燥腔体内部介质介电特性; μ 为介质的磁导率特性, N/m²。

本文所采用的微波干燥箱的工作频率为 2.45 GHz, 主要工作模式为 TE_{10} , 该模式的电磁场分量为:

$$\begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = \frac{\beta_z}{\epsilon_r} B_{10} \sin(\beta_z z) \cos(\beta_y y) e^{-j\beta_x x} \\ E_z = \frac{\beta_y}{\epsilon_r} B_{10} \sin(\beta_z z) \cos(\beta_y y) e^{-j\beta_x x} \end{cases} \quad (5-17)$$

式中, E_x 、 E_y 、 E_z 分别为电场在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的分量, rad; β_y 、 β_z 分别表示 y 轴、 z 轴相位角分量; B 为电磁波模的振幅常数。

5.3.2 谐振腔形状与尺寸

在微波干燥系统的设计中, 品质因数 Q 值是评估谐振腔性能的关键参数, Q 值表征了谐振腔内电磁能量的存储效率与损耗特性之间的量化关系。 Q 值与系统能

耗呈现显著的负相关特性：当 Q 值增大时，谐振腔内的电磁场能量损耗相应降低，这直接导致了能量转换效率的提升。因此，较高的 Q 值表明微波能在谐振腔内能够更有效地转化为热能，从而显著提高了干燥过程的热效率。

$$Q_0 = \frac{1}{\delta} \frac{V}{S} \quad (5-18)$$

式中， V 为腔体体积， m^3 ； S 为腔体内部表面积， m^2 ； δ 为微波腔体内壁的集肤深度， m 。

在该系统设计中，基于 TE_{10} 的工作模式，本文对长方体和圆柱体两种谐振腔形状进行了对比分析。长方体与圆柱体谐振腔的优缺点如图 5-1 所示。

表 5-1 不同形状谐振腔形状对比分析

分析	长方体谐振腔	圆柱体谐振腔
优点	电磁场沿单一方向均匀分布	结构对称性好
	便于物料的连续输送	表面电场分布均匀
	成本较低	
缺点	腔体拐角处易产生电场集中现象	不利于带状物料的连续输送
		相同容积下，占地面积更大 成本较高

根据表 5-1，经综合评估，本研究最终选的长方体作为谐振腔的基本构型。长方体结构更符合连续式干燥工艺的物料输送要求；在 TE_{10} 模式下，长方体腔体能够提供更好的场强均匀性；从工程经济性角度，长方体结构在制造、安装和维护方面具有明显优势；通过合理的结构优化，可有效改善拐角处的电场集中问题。

基于微波谐振腔的尺寸效应理论，在保持腔体容积恒定的条件下，腔体结构的紧凑化设计可显著提升品质因数。随着腔体几何尺寸的减小，电磁场能量密度相应增大，从而导致品质因数的提升和热效率的优化。通过对比分析国内同类微波加热干燥设备的工程参数，并结合电磁场仿真计算结果，本研究确定谐振腔的最优结构尺寸为：x 轴向 320 mm，y 轴向 340 mm，z 轴向 250 mm，微波干燥装置的工作频率设定为 2.45 GHz，馈入口输入的微波功率为 500 W。。

5.3.3 腔体馈入口分布设计

微波谐振腔内电场场强分布的均匀性受多种因素影响，主要包括被加热物料的介电特性、腔体几何尺寸以及馈口配置参数等关键因素。其中，馈口系统的设计

尤为重要，其数量选择和位置分布直接影响腔内电磁场模式的形成与分布特性。根据微波传输理论，标准矩形馈口通常采用 2:1 的长宽比设计，这种比例关系使得馈口具有明确的长边和短边方向性特征，进而形成了两种基本的馈口布置方式：E 型分布和 H 型分布。E 型分布将馈口长边与水平面平行布置，有利于 TE 模式的激励；而 H 型分布则将短边与水平面平行，更适合 TM 模式的建立。馈入口分布如图 5-9 所示。

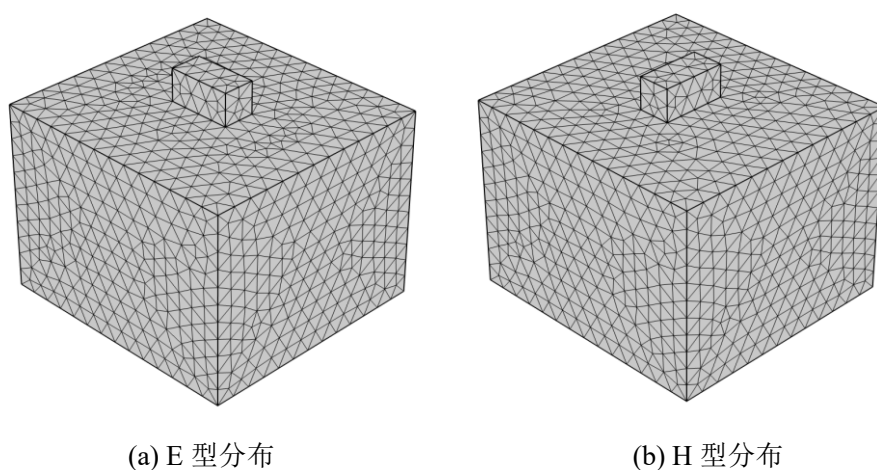


图 5-9 馈入口分布示意图

微波加热腔的馈口配置需依据应用需求进行针对性设计。小型加热干燥系统可采用单馈口结构，具有制造简便、成本较低的优势，但其功率承载能力和热场均匀性存在不足。工业级设备因需满足大功率和高均匀性要求，必须采用多馈口方案。这种设计通过多个馈源的协同作用，能够构建复杂的电磁场分布，主要优势包括：大幅提升功率承载能力，适应大规模生产；利用相位和幅值调控实现精准的热场分布；可适配不同形态和位置的加热对象。但多馈口系统也面临技术复杂性的挑战，需要统筹优化馈源的几何参数、空间布局等要素，并确保与加热对象的电磁特性相匹配。实际设计中需要考虑制造成本、系统复杂度和性能指标间的平衡性，还保证系统的可维护性和运行可靠性。多馈口系统如图 5-10 所示。

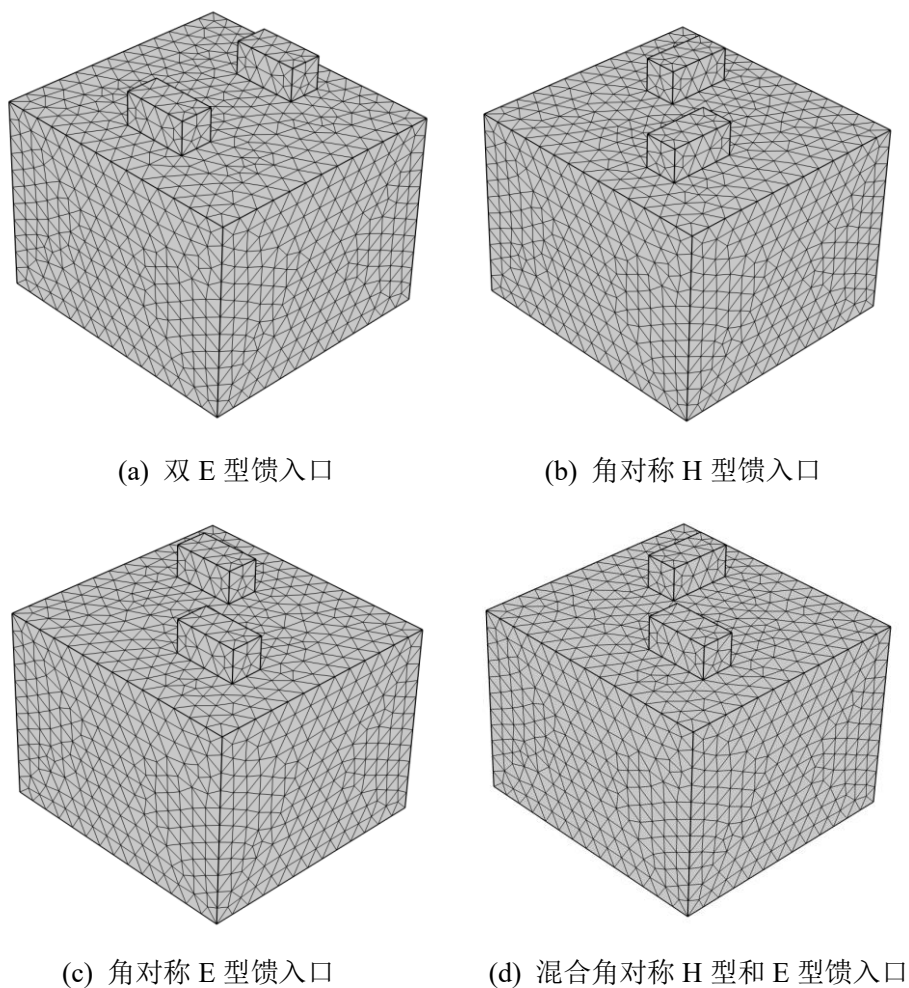


图 5-10 多馈入口系统

5.3.4 腔体表面电磁场分布

通过对四种不同馈入口配置(双 E 型、角对称 E 型、角对称 H 型及混合角对称 H 型和 E 型)的腔体电场和磁场分布进行仿真分析,仿真结果如图 5-11 与 5-12 所示。通过分析图 5-11 的电场强度分布特征,双 E 型馈入口和角对称 E 型馈入口的电场强度最大值主要集中于两个端口区域。其中,双 E 型馈入口的电场沿 X 轴呈现对称分布,而角对称 E 型馈入口的电场在腔体表面分布较为均匀。角对称 H 型馈入口的电场最大值则集中于其中一个端口。混合角对称 H 型和 E 型馈入口的电场最大值分布于腔体表面位置。根据图 5-12 的磁场分布分析,双 E 型馈入口和角对称 E 型馈入口的磁场强度主要集中于两个端口区域,且双 E 型馈入口的磁场沿 X 轴呈现对称分布,角对称 E 型馈入口的磁场在腔体表面分布较为均匀。角对称 H 型馈入口的磁场则集中于其中一个端口,而混合角对称 H 型和 E 型馈入口未表

现出明显的磁场集中现象。

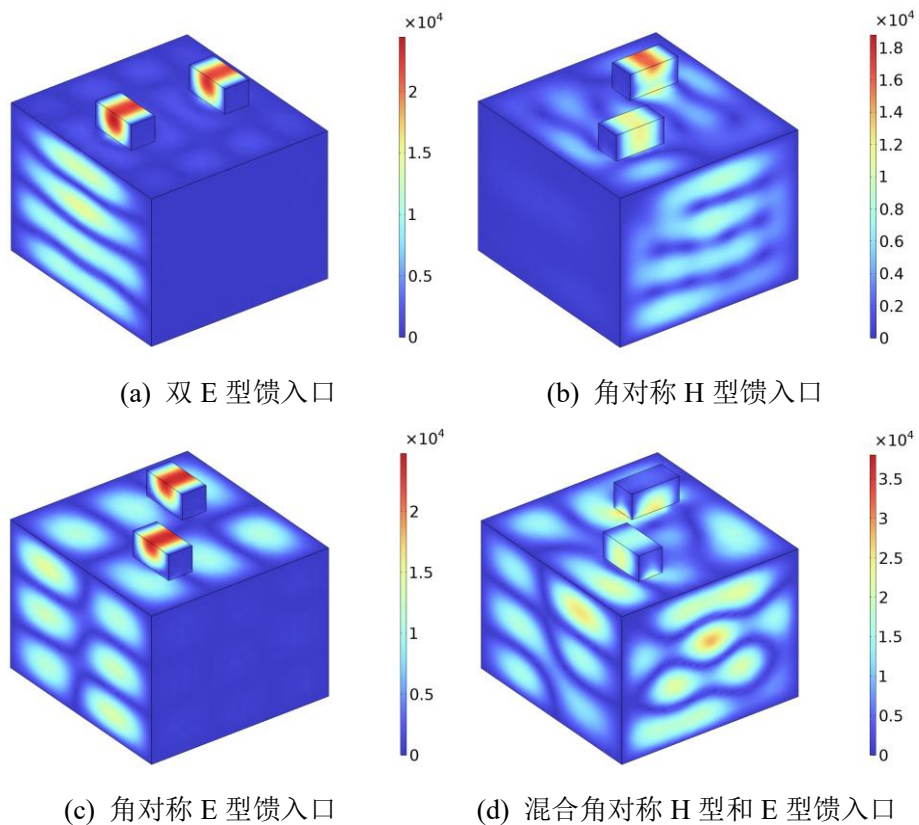


图 5-11 腔体表面电场分布

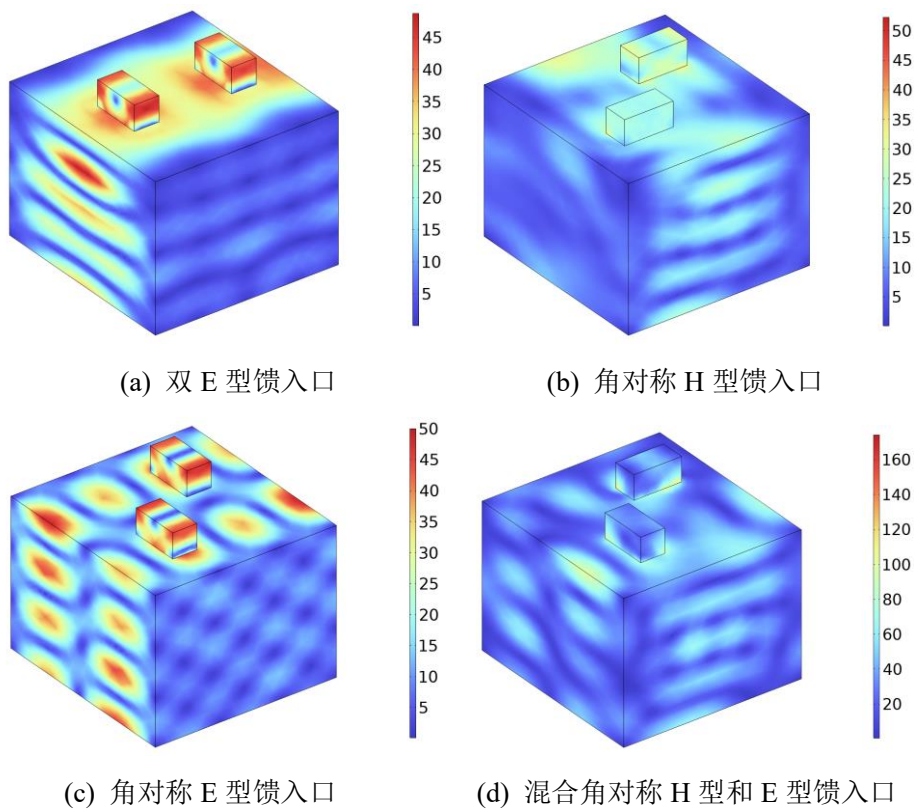


图 5-12 腔体表面磁场分布

5.3.5 腔体截面电场分布

为了进一步深入研究微波腔体内电场与磁场的空间分布特性，对腔体进行了切片处理，分别沿 X-Y 平面、Y-Z 平面和 X-Z 平面进行截面分析。电磁场分布特征如图 5-13、5-14 和 5-15(电场)及图 5-16、5-17 和 5-18(磁场)所示。

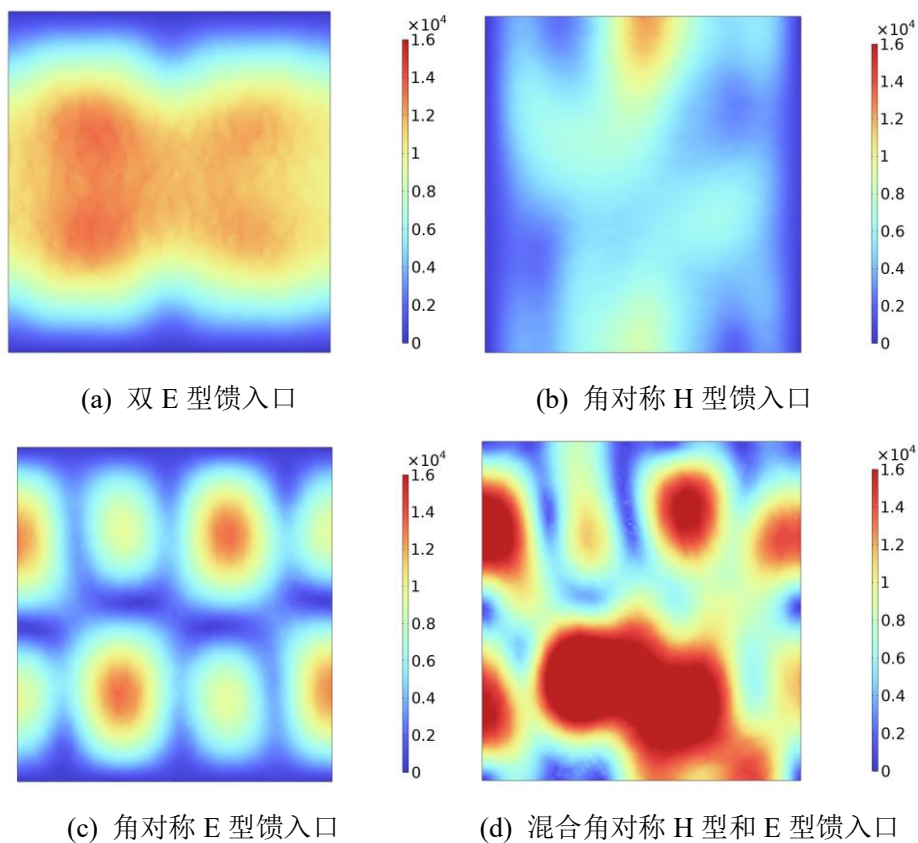
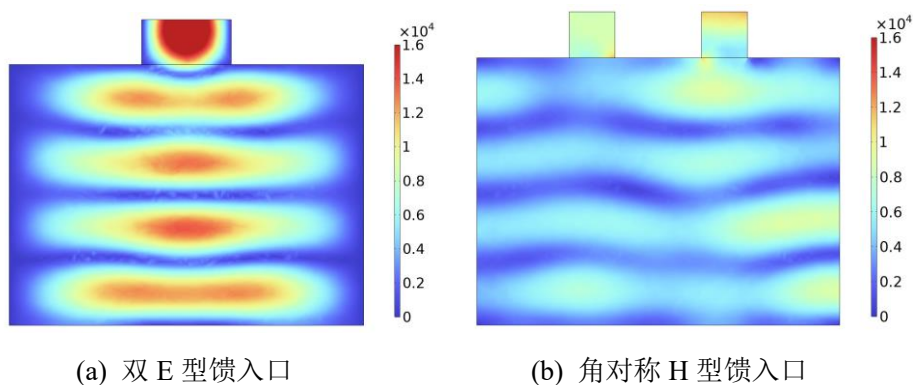


图 5-13 腔体 X 和 Y 平面电场分布



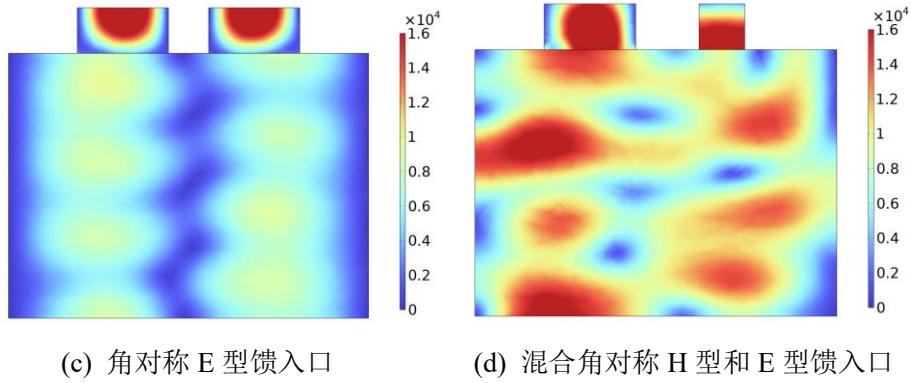


图 5-14 腔体 Y 和 Z 平面电场分布

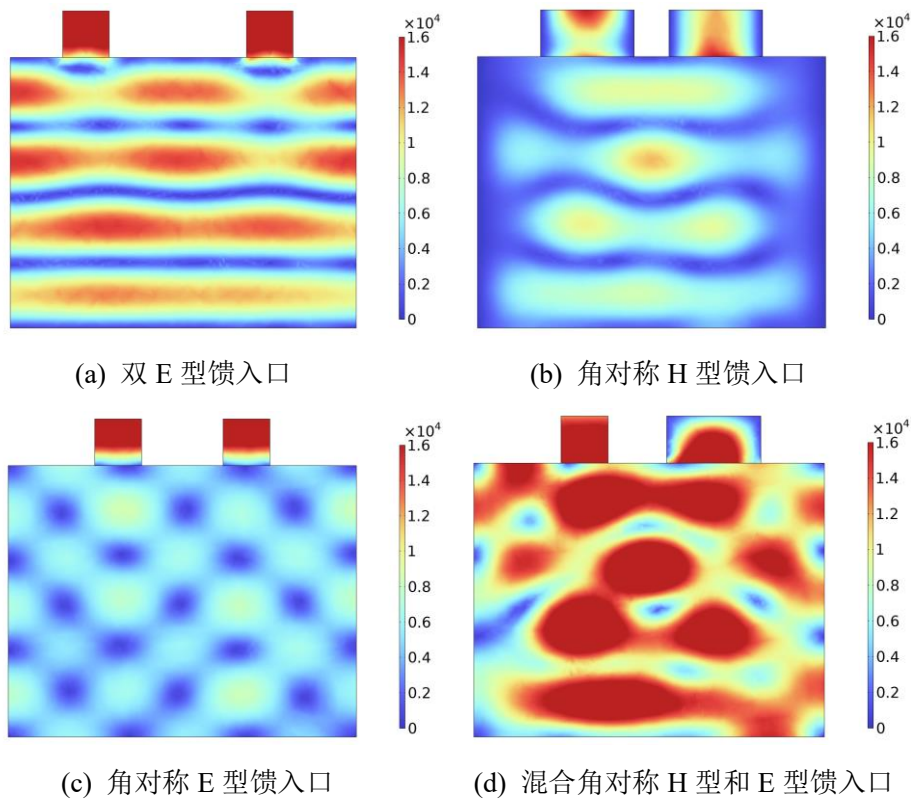


图 5-15 腔体 X 和 Z 平面电场分布

5.3.6 腔体截面磁场分布

由图 5-13、5-14 和 5-15 可知，双 E 型馈入口电场在 Y-Z 平面和 X-Z 平面集中分布在中心区域，在四层电场集中区域中，中间两层电场强度较大，上下两层电场强度较小，电场强度随着中心区域向四周扩散降低，最大值为 2.45×10^4 V/m。角对称 H 型馈入口电场在微波腔体中没有明显集中现象，最大值为 1.38×10^4 V/m，分析表明，干燥腔内电场分布呈现良好的均匀性特征，但由于场强幅值较低，可能导致物料脱水效率受限。而角对称 E 型馈入口的电场在三个平面中有集中现象，

最大值为 1.43×10^4 V/m，会导致物料在干燥过程中加剧热点现象。因此，需要对角对称 EE 型馈入口进行优化，以改善电场分布不均匀的现象。混合角对称 H 型和 E 型馈入口与角对称 E 型馈入口相比，电场不均匀现象更加显著，集中于几个区域中，电场强度最大值为 3.17×10^4 V/m，物料在干燥过程中易产生一部分已经干燥完全，另一部分干燥不彻底，无法确保干燥后物料的品质。

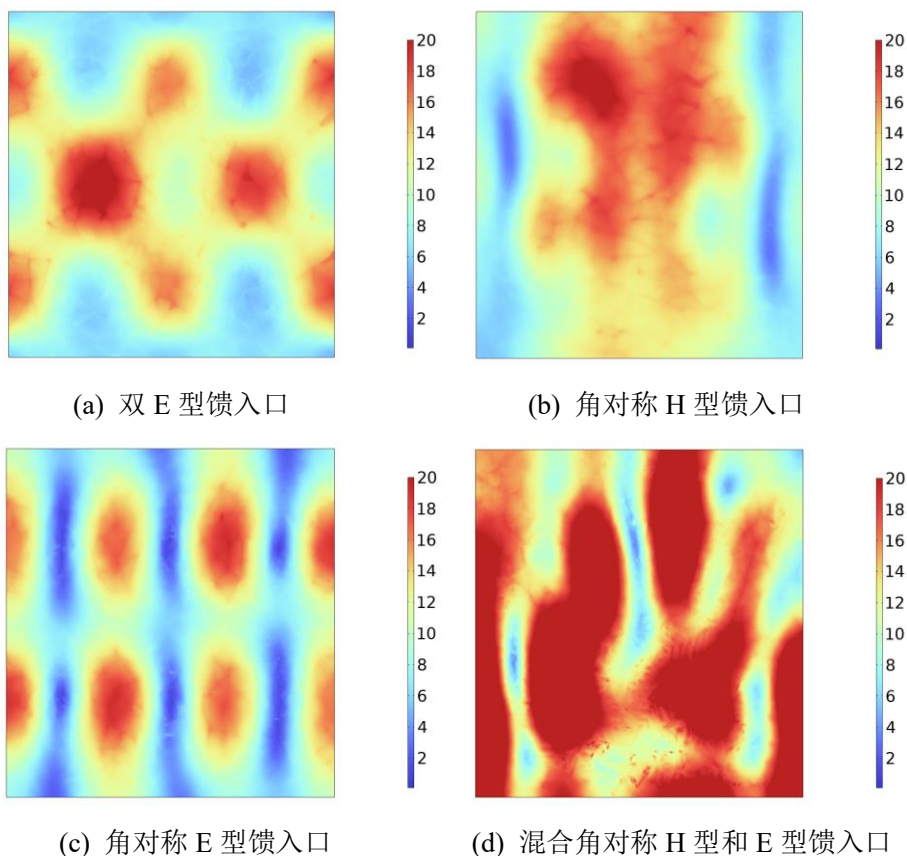
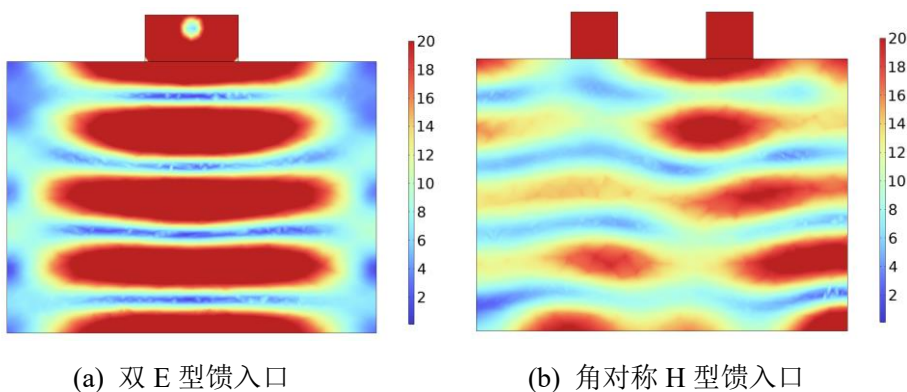
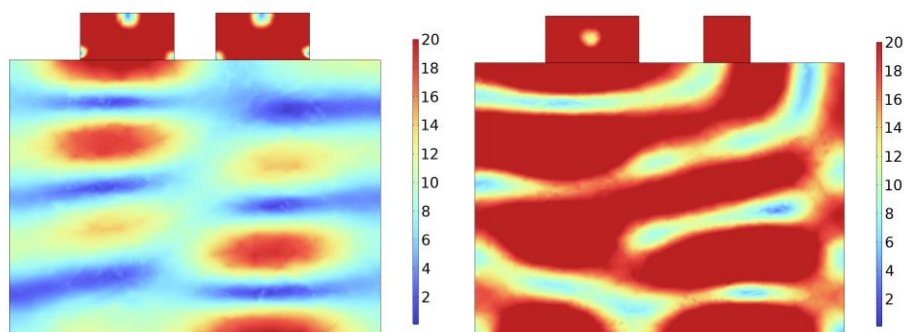


图 5-16 腔体 X 和 Y 平面磁场分布

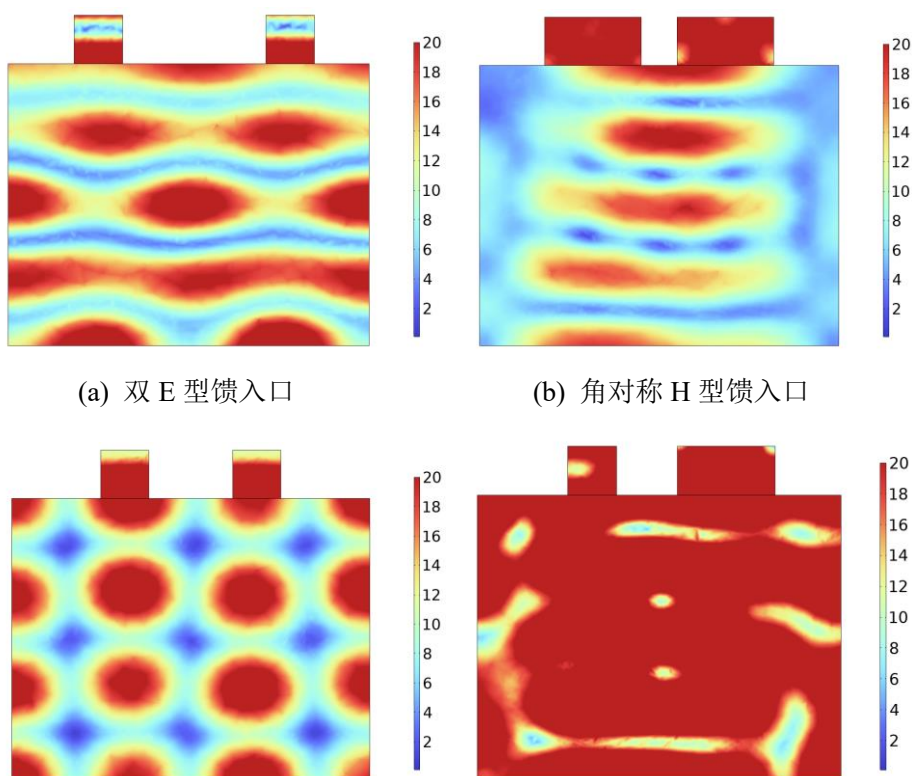




(c) 角对称 E 型馈入口

(d) 混合角对称 H 型和 E 型馈入口

图 5-17 腔体 Y 和 Z 平面磁场分布



(a) 双 E 型馈入口

(b) 角对称 H 型馈入口

(c) 角对称 E 型馈入口

(d) 混合角对称 H 型和 E 型馈入口

图 5-18 腔体 X 和 Z 平面磁场分布

根据图 5-16、5-17 和 5-18 可知，双 E 型馈入口、角对称 H 型馈入口和角对称 E 型馈入口与混合角对称 H 型和 E 型馈入口相比，磁场分布更加均匀，但磁场存在块状现象，前者磁场最大值分别为 46.6 A/m、47.5 A/m 和 32.8 A/m，后者磁场最大值为 80.5 A/m，前者磁场强度远小于后者。因此，混合角对称 H 型和 E 型馈入口适用于干燥品质要求较低的物料。四种多馈入口在 X-Y、Y-Z、X-Z 三个平面上都存在磁场集中现象，角对称 H 型馈入口磁场分布相较于其他三种馈入口系

统更加均匀，但在 Y-Z 平面中，干燥腔体内部左侧磁场强度值远低于右侧磁场强度，故该馈入口适用于品质要求较高的干燥。而双 E 型馈入口和角对称 E 型馈入口，在 X-Y 平面和 Y-Z 平面中，后者磁场分布优于前者，但在 X-Z 平面中，前者磁场分布优于后者，这两种馈入口适用于干燥速率中等的物料。

通过对比电场与磁场仿真结果图，可以得出双 E 型馈入口结构具有更好的电场均匀性和中等的磁场分布特性，因此在设计工业化微波干燥腔体结构时应考虑双 E 馈入口腔体结构，从而获得较好的微波加热效果。

5.4 本章小结

本章针对微波真空干燥箱的微波加热系统，分别采用 PID 控制和模糊控制进行了优化设计，对干燥腔体馈入口分布方式进行了研究，分析了双 E 型、角对称 H 型、角对称 E 型和混合角对称 H 型和 E 型馈入口电场、磁场分布特性。通过对比两种控制方法的性能发现，模糊控制在动态响应和控制精度方面具有显著优势：其温度波动范围更小，系统超调量明显降低，且整体稳定性优于传统 PID 控制。研究发现电场与磁场分布与馈入口分布形式紧密关联，模糊控制能够有效提升微波加热系统的控制效果，为微波真空干燥箱的温度控制提供了更优的解决方案。

第6章 总结与展望

6.1 结论

本文以谷物籽粒为研究对象,采用微波干燥技术,系统探究了干燥过程中含水率与应力应变的动态变化特征。重点考察了间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度等工艺参数对应力应变行为的影响机制,为优化干燥工艺、提升谷物品质提供理论依据。研究发现,干燥应力是导致籽粒裂纹形成的关键因素,因此深入分析裂纹产生机理对改善干燥品质具有重要意义。在微波干燥过程中,介电特性不仅决定了干燥效率,还直接影响力分布和裂纹形成。基于此,本研究通过建立干燥温度、含水率与介电参数之间的定量关系,对实验参数进行了优化调整。为提升干燥均匀性,本研究对干燥腔体结构进行了优化设计。通过数值模拟和实验验证,优化了腔体尺寸和微波馈入方式,显著改善了腔体内电磁场分布的均匀性,从而提高了干燥效率和产品质量。为准确预测干燥过程,本研究分别采用BP神经网络和GA-BP神经网络对实验数据进行建模分析,并对两种模型的预测精度和训练效果进行了对比评估。此外,基于实验数据建立了温控系统模型,结合PID与模糊控制策略,实现了干燥装置的智能优化控制。

本文主要结论和创新点如下:

(1)基于微波干燥理论,本研究采用同轴探测技术结合矢量网络分析仪,系统研究了稻谷籽粒介电特性随温度、含水率及微波频率的演变规律。通过实验数据分析,构建了介电常数和介电损耗因子与上述影响因素之间的数学模型,为稻谷微波干燥工艺的优化提供了理论依据和数据支撑。

(2)本研究通过微波干燥实验,系统探究了间歇时间、真空度、微波功率和干燥温度等工艺参数对稻谷品质的影响机制。利用红外热成像仪获得了干燥过程中温度场的空间分布特征,并结合扫描电子显微镜对籽粒微观结构进行表征分析。研究发现,在诸多影响因素中,真空度与干燥温度对稻谷品质的调控作用最为显著,其影响程度明显高于其他工艺参数。这一发现为优化微波干燥工艺参数提供

了重要依据。

(3)本研究采用 BP 神经网络算法建立了谷物微波脱水过程的含水率预测模型。为进一步提高预测精度,引入遗传算法对网络参数进行优化,建立了改进型 GA-BP 神经网络预测模型。实验结果表明,该模型能够准确预测微波干燥过程中的含水率变化,为干燥过程的智能化控制提供了可靠的技术支持。

(4)本研究构建了微波真空干燥箱加热控制系统的数学模型,并创新性地提出了一种新型干燥腔体馈入口分布方案。通过 Simulink 仿真平台,对传统 PID 控制与模糊控制两种策略进行了对比分析,同时利用 COMSOL 多物理场仿真软件对馈入口分布方式的电磁场特性进行了深入研究。研究结果表明:在系统动态响应、控制精度及抗干扰性能等关键指标上,模糊控制策略较传统 PID 控制具有显著优势;此外,双 E 型馈入口结构展现出优异的电场与磁场分布特性。本研究为微波干燥设备的智能化控制及腔体结构优化提供了新的理论依据和技术方案。

6.2 展望

谷物作为我国粮食体系的核心组成部分,兼具主粮作物和经济作物的双重属性。微波脱水技术凭借其快速脱水、环境友好、能源效率高及产品品质优异等特点,在谷物处理领域具有广阔的应用前景。然而,该技术涉及复杂的多场耦合机制,其理论基础和实际应用仍面临诸多技术瓶颈。本文围绕干燥应力、裂纹形成、介电特性与温湿度关系等关键问题展开研究,并对干燥设备进行了结构优化,但由于实验条件和研究篇幅的限制,本文仍存在一些不足:

(1)本实验采用的稻谷样品为经预干燥处理后通过浸泡法复水的材料,而非新收获的原始稻谷,其内部结构和理化性质可能与新鲜稻谷存在一定差异,这可能导致实验结果与实际生产中的干燥特性产生偏差。

(2)在微波干燥过程中,由于设备限制,无法实时获取稻谷温度和含水率的动态变化数据;在进行扫描电镜观察时,未对稻谷样品进行切片处理,可能影响微观结构特征的完整呈现。

(3)本文的实验数据样本规模相对有限,这在一定程度上影响了 BP 神经网络和 GA-BP 神经网络含水率预测模型的训练效果和预测精度。数据量的不足可能导致模型泛化能力较弱,难以全面反映稻谷微波干燥过程中含水率变化的复杂规律。

参考文献

- [1] Donlao N, Matsushita Y, Ogawa Y. Influence of postharvest drying conditions on resistant starch content and quality of non-waxy long-grain rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Drying Technology*, 2018, 36(8): 952-964.
- [2] 陈尚兵, 袁建, 张斌, 等. 微波干燥对高水分稻谷中优势霉菌致死率的研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(08): 119-125+132.
- [3] Jimoh K A, Hashim N, Shamsudin R, et al. Recent advances in the drying process of grains[J]. *Food Engineering Reviews*, 2023, 15(3): 548-576.
- [4] Jimoh K A, Hashim N, Shamsudin R, et al. Recent advances of optical imaging in the drying process of grains—a review[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2023, 103: 102145.
- [5] Nasrnia E, Sadeghi M, Isa-Abadi A R, et al. A novel simulation model to analyze rice intermittent drying considering glass transition concept[J]. *Journal of Food Engineering*, 2024, 364: 111819.
- [6] 韦智, 潘婷婷, 李佳钰, 等. 不同稻谷干燥方式对浸泡前后稻谷品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(02): 67-74.
- [7] 邵小龙, 徐文, 时小转, 等. 不同收储条件对粳稻南粳 5055 储藏品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(05): 130-136+143.
- [8] 李亚南, 吴建, 陈治华, 等. 云南小粒种咖啡热风干燥特性及其数学模型[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(03): 622-633.
- [9] 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.
- [10] Guo J, Zheng L, Li Z. Microwave drying behavior, energy consumption, and mathematical modeling of sewage sludge in a novel pilot-scale Microwave drying system[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 777(9): 146109.
- [11] Zalazar-Garcia D, Román M C, Fernandez A, et al. Exergy, energy, and sustainability assessments applied to RSM optimization of integrated convective air-drying with

- pretreatments to improve the nutritional quality of pumpkin seeds[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 49: 101763.
- [12] Dash K K, Shangpliang H, Bhagya Raj G, et al. Influence of Microwave vacuum drying process parameters on phytochemical properties of sohiong (*Prunus nepalensis*) fruit[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(3): e15290.
- [13] Ye J, Xu C, Zhang C, et al. A hybrid ALE/implicit function method for simulating Microwave heating with rotating objects of arbitrary shape[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 302(6923): 110551.
- [14] Kayisoglu S. Rehydration Kinetics of Green Pea Grains Dried at Different Microwave Powers[J]. *The Philippine Agricultural Scientist*, 2024, 107(4): 4.
- [15] Guo Q, Sun D-W, Cheng J-H, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 67: 236-247.
- [16] An N-N, Sun W, Li D, et al. Effect of Microwave-assisted hot air drying on drying kinetics, water migration, dielectric properties, and microstructure of corn[J]. *Food Chemistry*, 2024, 455: 139913.
- [17] Lin R, Wang B, Li B, et al. Effect of Microwave and infrared on the wine-drying efficiency, quality and volatile compounds of *Radix paeoniae Alba*[J]. *Drying Technology*, 2025, 43(3): 541-554.
- [18] Mascarenhas F J R, Simões R M D S, Dias A M P G, et al. Moisture and Temperature Profiles of Heartwood *Pinus pinaster* Ait. Wood Specimens during Microwave Drying[J]. *Forests*, 2024, 15(6): 944.
- [19] Du Y, Yan J, Wei H, et al. Drying kinetics of paddy drying with graphene far-infrared drying equipment at different IR temperatures, radiations-distances, grain-flow, and dehumidifying-velocities[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 43: 102780.
- [20] Zhang Z, Chen Y, Peng J, et al. Study on drying characteristics of combined Microwave-hot air drying of paddy[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 64: 105539.
- [21] Sami S, Deymi-Dashtebayaz M, Gholizadeh M, et al. Potential of an internal combustion engine as an energy supplier for the drying process: a thermo-economic analysis with multi-objective optimization[J]. *Energy*, 2024, 291: 130429.

- [22]Mahmood N, Liu Y, Zheng X, et al. Influences of emerging drying technologies on rice quality[J]. Food Research International, 2024: 114264.
- [23]Mondal M H T, Sarker M S H. Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 199: 114442.
- [24]An J, Xie H, Yan J, et al. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology[J]. Energy Reports, 2024, 12: 5482-5506.
- [25]Bala E, Dey S, Patra S, et al. Assessment of Microwave drying for raPID and convenient analysis of medicinal plants for quality assurance[J]. Phytochemical Analysis, 2024, 35(4): 903-922.
- [26]Chojnacka K, Mikula K, Izydorczyk G, et al. Improvements in drying technologies- Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320: 128706.
- [27]Saniso E, Prachayawarakorn S, Swasdisevi T, et al. Parboiled rice production without steaming by Microwave-assisted hot air fluidized bed drying[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 120: 8-20.
- [28]Das H J, Saikia R, Mahanta P. Thermo-economic assessment of bubbling fluidized bed paddy dryers[J]. Energy, 2023, 263: 125668.
- [29]Zhang P, Li B, Hu Z, et al. Effects of ultrasonic and Microwave treatment on color, quality and drying characteristics of rice[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 116: 103856.
- [30]Taghinezhad E, Szumny A, Kaveh M, et al. Parboiled paddy drying with different dryers: Thermodynamic and quality properties, mathematical modeling using ANNs assessment[J]. Foods, 2020, 9(1): 86.
- [31]Leilayi M, Arabhosseini A, Kianmehr M H, et al. Design, construction and performance evaluation of paddy rice solar drum dryer equipped with perforated drum[J]. Clean Energy, 2023, 7(2): 328-339.
- [32]Yang K, Dong X, Wang Y, et al. Simulation Study on Heat and Moisture Transfer in Cross - Flow Drying Aeration of Bulk Corn in a Cone - Bottom Silo Using Natural and Low - Temperature Air[J]. Journal of Food Process Engineering, 2024, 47(11): e14774.
- [33]Jimoh K A, Hashim N, Shamsudin R, et al. Optimization of computational intelligence approach for the prediction of glutinous rice dehydration[J]. Journal of

- the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(10): 6208-6220.
- [34]Wang J, Cauduro V H, Zhang M-N, et al. The mechanisms of thermal processing techniques on modifying structural, functional and flour-processing properties of whole-grain highland barley[J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142698.
- [35]Jimoh K A, Hashim N, Shamsudin R, et al. Assessment of performance and quality indices of glutinous rice under different drying methods[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2025, 73: 104161.
- [36]Ren L, Zheng Z, Fu H, et al. Hot air–assisted radio frequency drying of corn kernels: the effect on structure and functionality properties of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131470.
- [37]Bruce R M, Atungulu G G, Bautista R C. Fissure formation in rice during conventional and Microwave drying[J]. Journal of the ASABE, 2023, 66(3): 617-625.
- [38]Mahmood N, Muhoza B, Kothakot A, et al. Application of emerging thermal and nonthermal technologies for improving textural properties of food grains: A critical review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13286.
- [39]Anumudu C K, Onyeaka H, Ekwueme C T, et al. Advances in the Application of Infrared in Food Processing for Improved Food Quality and Microbial Inactivation[J]. Foods, 2024, 13(24): 4001.
- [40]Zhang Y, Zhu G, Li X, et al. Combined medium-and short-wave infrared and hot air impingement drying of sponge gourd (*Luffa cylindrical*) slices[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 284: 110043.
- [41]Chen P, Tian G, Jiang M, et al. Effects of drying methods on the drying kinetics and quality of maize[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2024, 17(5): 275-283.
- [42]Garhwal R, Bhardwaj A, Kumar H, et al. Biochemical, dielectric and surface characteristics of freeze-dried donkey milk powder[J]. Food and Agricultural Immunology, 2025, 36(1): 2442358.
- [43]Llavata B, Clemente G, Bon J, et al. Pulsed electric field (PEF) pretreatment impact on the freezing and ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying of butternut squash and yellow turnip[J]. Journal of Food Engineering, 2025: 112543.
- [44]Azizpour M, Jian F, Wang B-C. Atmospheric Freeze Drying (AFD): Fundamentals

- and Innovative Approaches[J]. *Food Reviews International*, 2024: 1-30.
- [45] Da Silva N B, Azoubel P M, Converti A, et al. Ultrasound and freezing pretreatment as effective solutions for convective drying of BRS vitória grape[J]. *Food Chemistry*, 2025: 143041.
- [46] Bi J, Zhang J, Chen Z, et al. Quality variation analysis and rehydration kinetics modeling of yuba subjected to three different drying process[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 24: 101987.
- [47] Kalse S, Jain S, Swami S, et al. A Comprehensive Review of Mechanisms, Heat Transfer Dynamics and the Hybrid Approach of Refractance Window™ Drying[J]. *Food Engineering Reviews*, 2025: 1-25.
- [48] Cin M, Palazoğlu T K. Effect of Microwave-vacuum drying on some nutritional and quality characteristics of rosehips[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2025: 1-19.
- [49] Wang X, Shi K, Cao X, et al. Effects of different drying methods on the drying kinetics and quality characteristics of Oran (Citrus reticulata) slices[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2025: 1-10.
- [50] Bulantekin Ö, Kuşçu A. Evaluation of Microwave vacuum drying combined with explosion puffing drying and compared with Microwave vacuum drying and hot-air drying by the quality of the dried apple slices[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2024, 10(1): 2404699.
- [51] Han L, Yan Y. Heat-moisture-mechanical bidirectional coupling multiphase porous media model for Microwave vacuum drying of pitaya[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2025, 112: 109731.
- [52] Li Y, Zhang J, Wang J, et al. Evaluation of Drying Characteristics and Quality Attributes for Microwave Vacuum Drying of Pork Skin Crisps[J]. *Foods*, 2024, 13(24): 4020.
- [53] Mathatheeranan P, Lu T-J, Wongprasert T, et al. Impact of drying techniques on volatile aroma profiles and formation mechanisms of black soybean thua nao[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 24: 102040.
- [54] Li J, Chang K, Yin J, et al. Study on Optimization of Rice-Drying Process Parameters and Directional Regulation of Nutrient Quality[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(23): 2076-3417.
- [55] Chokphoemphun S, Donmuang A, Mongkolvai J, et al. Energy assessment and

- p>
drying characteristics of paddy in a step-down flow convective hot air dryer: Experimental investigation and mathematical prediction[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025: 103322.
- [56]Zhu H, Liu C, Bai C, et al. Effects of Microwave vacuum drying on drying characteristics, quality attributes and starch structure of germinated brown rice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282(4): 137153.
- [57]Nelson S O, Trabelsi D S S. Sensing grain and seed moisture and density from dielectric properties[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2011, 4(1): 75-81.
- [58]Ge T, Li F, Li Y. Influence of dielectric property of organic sulfur compounds on coal Microwave desulfurization[J]. Asia - Pacific Journal of Chemical Engineering, 2021, 16(1): e2581.
- [59]Hou L, Li R, Wang S, et al. Numerical analysis of heat and mass transfers during intermittent Microwave drying of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller)[J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 129: 10-23.
- [60]Song G, Choudhary R, Watson D G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(1): 90-99.
- [61]程裕东, 易正凯, 金银哲. 微波干燥过程中南极磷虾肉糜的传热传质及形变参数模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(03): 302-312.
- [62]王光宇, 孟境辉, 张锴. 煤泥间歇微波干燥模拟及介电性质[J]. 化工进展, 2023, 42(04): 1779-1786.
- [63]Selimefendigil F, Öztop H F. Three dimensional unsteady heat and mass transport from six porous moist objects in a channel under laminar forced convection[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 183: 116100.
- [64]Li H, Zheng C, Lu J, et al. Drying kinetics of coal under Microwave irradiation based on a coupled electromagnetic, heat transfer and multiphase porous media model[J]. Fuel, 2019, 256: 115966.
- [65]Kumar C, Joardder M U H, Farrell T W, et al. Investigation of intermittent Microwave convective drying (IMCD) of food materials by a coupled 3D electromagnetics and multiphase model[J]. Drying Technology, 2018, 36(6): 736-750.

- [66]Hearle J. The dielectric properties of fiber assemblies[J]. Textile research journal, 1956, 26(2): 108-111.
- [67]Xie W, Chen P, Wang F, et al. Dielectric properties of *Camellia oleifera* seed kernels related to Microwave and radio frequency drying[J]. International Food Research Journal, 2019, 26(5): 1577-1585.
- [68]Huang Z, Zhang B, Marra F, et al. Computational modelling of the impact of polystyrene containers on radio frequency heating uniformity improvement for dried soybeans[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 33: 365-380.
- [69]Datta A K, Anantheswaran R C. Handbook of Microwave technology for food application[M]. CRC Press, 2001.
- [70]Teleken J T, Quadri M B, Oliveira A P, et al. Mechanistic understanding of Microwave-vacuum drying of non-deformable porous media[J]. Drying Technology, 2021, 39(7): 850-867.
- [71]齐力娜, 彭荣艳, 程裕东, 等 草鱼鱼片的微波干燥特性[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(01): 119-123.
- [72]Jia T, Wang L, Li J, et al. Integrating a genome-wide association study with transcriptomic analysis to detect genes controlling grain drying rate in maize (*Zea mays*, L.)[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2020, 133: 623-634.
- [73]Takhar P S. Unsaturated fluid transport in swelling poroviscoelastic biopolymers[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 109: 98-110.
- [74]Christensen R M. Theory of viscoelasticity[M]. Courier Corporation, 2013.
- [75]Ozturk O K, Takhar P S. Hybrid mixture theory-based modeling of moisture transport coupled with quality changes in strawberries and carrots[J]. Drying Technology, 2021, 39(7): 932-949.
- [76]Takhar P S, Maier D E, Campanella O H, et al. Hybrid mixture theory based moisture transport and stress development in corn kernels during drying: validation and simulation results[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(4): 275-282.
- [77]Abedi F, Kumar S, Kumar N, et al. Moisture transport and stress development in rice during drying, a Hybrid Mixture Theory-based model[J]. Drying Technology, 2023, 41(13): 2119-2142.
- [78]Multiphysics C. Structural mechanics module, continuum application modes[J]. User's manual, version, 2008, 3: 167-186.
- [79]Aregawi W A, Defraeye T, Verboven P, et al. Modeling of coupled water transport

- p>and large deformation during dehydration of apple tissue[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(8): 1963-1978.
- [80]纪洪芝, 韩斌, 吴振宇, 等. 恒温水浴锅温度均匀度和波动度仿真分析与实验测试[J]. 计量与测试技术, 2024, 50(11): 33-36.
- [81]付经伦, 陈永超, 邱彬. 不同流量工况下透平与排汽缸耦合流场变化特性数值研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(04): 907-917.
- [82]Wells R O N, García-Prada O. Differential analysis on complex manifolds[M]. 21980. Springer New York, 1980.
- [83]程嘉蔚. 基于 BP 神经网络的储粮温度预测模型及应用[D]. 安徽大学, 2021.
- [84]Aghbashlo M, Hosseinpour S, Mujumdar A S. Application of artificial neural networks (ANNs) in drying technology: a comprehensive review[J]. Drying technology, 2015, 33(12): 1397-1462.
- [85]陈鹏飞. 基于 SA-PSO-BP 神经网络的牛肉微波干燥含水率预测研究[D]. 宁夏回族自治区: 宁夏大学, 2022.
- [86]吴庭. 基于改进神经网络的牛肉干燥含水率及能耗预测方法研究[D]. 宁夏回族自治区: 宁夏大学, 2023.
- [87]杨照林, 陈观慈, 张文斌, 等. 基于 BP 神经网络和 NSGA-II 算法的直流电磁泵结构优化[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(01): 182-190.
- [88]熊兴俊. 基于 BP 神经网络的大气污染物浓度预测模型[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(08): 129-132.
- [89]姬云云, 田洪磊, 詹萍, 等. BP 神经网络结合遗传算法优化羊肉汤中香辛料的添加量[J]. 中国食品学报, 2021, 21(03): 128-137.
- [90]张怡君, 左颖婷, 刘近春, 等. GA-BP 与 BP 神经网络在医学研究中的应用与比较[J]. 中国卫生统计, 2018, 35(02): 239-241+245.
- [91]Li B, Feng S, He Q, et al. Numerical simulation of continuous Microwave drying of rice grains[J]. Journal of Food Process Engineering, 2024, 47(7): e14678.
- [92]Buttress A, Jones A, Kingman S. Microwave processing of cement and concrete materials—towards an industrial reality?[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 68: 112-123.
- [93]李姗姗, 佟君宇, 张涛, 等. 基于系统辨识的微反应器系统优化设计[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(08): 88-91.

- [94]刘宁, 柴天佑. PID 控制器参数的优化整定方法[J]. 自动化学报, 2023, 49(11): 2272-2285.
- [95]刘晓伟. 基于先进 PID 控制的电加热炉系统[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.
- [96]张伟. 自整定 PID 控制算法的比较与研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.

攻读硕士期间获得的科研成果

一、论文情况

- [1] **Fan J**, Sun T, Wu J, et al. 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.

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

时光荏苒，岁月如梭，转眼间我的硕士求学生涯即将画上句号。回首这段充满挑战与收获的旅程，我心中充满了感激之情。

首先，我要将最诚挚的谢意献给我的父母、姐姐和姐夫。你们无私的爱与支持，是我求学路上最坚强的后盾。无论我身处顺境还是逆境，你们始终给予我无条件的理解、鼓励和帮助。你们的关怀与付出，不仅为我提供了精神上的慰藉，更在经济上给予了我莫大的支持，让我能够心无旁骛地专注于学业。你们的爱，我将永远铭记于心。

衷心感谢我的导师孙铜生教授。孙老师严谨的治学态度、渊博的学识和敏锐的学术洞察力，深深影响着我。每周的组会，孙老师都会认真听取我们的研究进展，并提出宝贵的意见和建议，为我的研究方向指明道路。在论文撰写过程中，孙老师更是倾注了大量心血，从论文框架的搭建到细节的打磨，都给予了我细致入微的指导。孙老师的言传身教，不仅让我在学术上受益匪浅，更让我领悟到了为人处世的道理。

感谢实验室的师兄弟们，与你们一起度过的时光是我研究生涯中最宝贵的回忆。我们一起讨论课题、分享经验、碰撞思想，在思维的交流中迸发出创意的火花。你们的陪伴与鼓励，让我在科研的道路上不再孤单，也让我更加坚定了前行的信心。

最后，我要感谢所有曾经帮助过我的人，你们的支持与鼓励，我将永远铭记于心。

未来的路还很长，我将带着这份感恩之心，继续努力，不断前行。

尚德敏学 唯实惟新

