

分类号: 0441.4

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110165



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 红豆微波干燥工艺研究及装
置优化

论 文 作 者 吴俊

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) 现代机械设计理论与方法

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：0441.4

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110165

红豆微波干燥工艺研究及装置优化

Research on the microwave drying process and device optimization for red beans

学生姓名： 吴俊

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： 现代机械设计理论与方法

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：吴俊

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：吴俊
日期： 年 月 日

指导教师签名：孙钢生
日期： 年 月 日

红豆微波干燥工艺研究及装置优化

摘 要

红豆不仅是一种常见的粮食作物，还因其丰富的营养价值和药用特性而被广泛应用于食品加工和传统医学领域，其在收获后具有较高的含水量，这种高水分环境为微生物的生长和繁殖提供了有利条件，通过降低红豆的含水量，可以有效抑制微生物的生长和酶的活性，从而延长其保质期。当前，红豆的干燥手段丰富多样，从传统的自然晾晒、热风干燥，到近年来兴起的冷冻干燥、微波干燥等新型方式。自然晾晒具有操作简易、成本低廉的优势，但受制于环境气候条件；热风干燥提升了物料干燥速率，但干燥均匀性不足；冷冻干燥能够有效维持红豆的营养成分，但工艺成本高；而微波真空干燥时微波能直接作用于物料分子，实现快速均匀加热，缩短了干燥时间且能耗低。本文以红豆为干燥介质，探究了不同干燥条件对微波干燥红豆的影响，构建了红豆微波真空干燥含水率预测模型，探究了干燥过程传热传质规律，对干燥设备进行了优化。具体研究内容如下：

(1)红豆干燥方式的对比与评价

为探寻红豆最佳干燥方案，针对真空冷冻干燥(VFD)、微波真空干燥(MVD)及热风干燥(HAD)三种干燥方式，构建了包含单位能耗、色度参数、水分活度、热力学相变行为(DSC 曲线特征)及微观结构特征的多维度评价体系。结果发现：最佳干燥方式为微波真空干燥，其干燥到安全储存含水率所用时间最短，具有良好的热稳定性。研究结果为红豆干燥方式的选择提供参考。

(2)微波干燥工艺分析与含水率预测

围绕红豆干燥工艺优化展开，探究了不同真空度、微波功率与干燥

温度下红豆干燥特性变化。计算各条件下红豆内部温度均匀度,运用响应面法求出最佳工艺组合。测定了红豆干燥的水分扩散系数、活化能,建立了红豆干燥动力学模型。基于大量实验数据,运用 BP 神经网络算法构建了含水率预测模型,为红豆精准干燥、智能控制提供了理论与技术支撑。

(3)红豆微波真空干燥传热传质规律

运用 COMSOL 多物理场仿真软件构建了几何、传热传质模型,确定初始与边界条件,探究了干燥传热传质规律,模拟获取了特定条件下红豆内部温度与水分的变化,实验验证了模型准确性。考察了红豆的介电常数、损耗因子等关键指标与温度、含水率等因素之间的交互关系,为提高红豆微波干燥效率提供理论基础。

(4)微波干燥设备改进

结合红豆的微波干燥实验数据及其物料特性,确定了微波干燥装置的总体架构,针对微波干燥装置中的排湿系统、物料托盘等关键组件展开优化设计,提升了装置的干燥效能与稳定性。完成了波导的数量、排布形式以及干燥腔的几何形状设计,改善了微波场在干燥腔内的分布均匀性,提高了干燥效果。

关键词: 红豆, 微波干燥, 含水率, 介电特性, 干燥装置

RESEARCH ON THE MICROWAVE DRYING PROCESS AND DEVICE OPTIMIZATION FOR RED BEANS

ABSTRACT

Red beans serve not only as a staple food crop but are also utilized in food processing and traditional medicine owing to their rich nutritional value and medicinal properties, while exhibiting high moisture content post-harvest. This high-moisture environment facilitates microbial growth and reproduction. Reducing the moisture content effectively suppresses microbial proliferation and enzymatic activity, thereby significantly extending shelf life. Currently, diverse drying methods are available for red beans, ranging from traditional sun drying and hot air drying to emerging techniques like freeze drying and microwave drying. Sun drying offers operational simplicity and low cost but depends on environmental conditions. Hot air drying enhances drying rate but suffers from uneven dehydration. Freeze drying effectively preserves nutritional components but involves high processing costs. Microwave vacuum drying enables direct molecular-level heating, achieving rapid and uniform dehydration with reduced processing time and energy consumption. Using red beans as the drying medium, this study investigated the effects of various drying conditions, established a moisture content prediction model, analyzed heat and mass transfer mechanisms, and optimized drying equipment. The specific research contents are as follows:

(1) Comparison and evaluation of red bean drying methods

To identify the optimal drying method for red beans, a comprehensive evaluation system was established to compare vacuum freeze drying (VFD), microwave vacuum drying (MVD), and hot air drying (HAD). The system assessed specific energy consumption, chromatic parameters, water activity, thermodynamic phase behavior (DSC characteristics), and microstructure. Results indicated MVD as the superior method, achieving safe moisture content in the shortest time with excellent thermal stability. These findings provide valuable reference for selecting grain drying technologies.

(2) Analysis of Microwave Drying Process and Moisture Content Prediction

Focusing on the optimization of red bean drying process, the changes of red bean drying characteristics under different vacuum, microwave power and drying temperature were explored. The internal temperature uniformity of red bean was calculated under various conditions, and the optimal process combination was obtained by response surface method. The moisture diffusion coefficient and activation energy of red bean drying were measured, and the drying kinetic model of red bean was established. Based on a large number of experimental data, the moisture content prediction model was constructed by using BP neural network algorithm, which provided theoretical and technical support for the accurate drying and intelligent control of red beans.

(3) Heat and Mass Transfer Mechanisms in Microwave Vacuum Drying of Red Beans

Geometric, heat and mass transfer models were constructed using COMSOL MULTIPHYSICS simulation software. The initial and boundary conditions were determined, and the heat and mass transfer laws of drying were explored. The dynamic changes of temperature and moisture in red

beans under specific conditions were obtained by simulation, and the accuracy of the model was verified by experiments. The interactions between the dielectric constant, loss factor and other key indicators of red beans with temperature and moisture content were investigated, providing a theoretical basis for improving the microwave drying efficiency of red beans.

(4) Improvement of Microwave Drying Equipment

Based on experimental data and material characteristics of red beans, the overall structure of the microwave drying device was determined. Key components including the dehumidification system and material trays were optimized to enhance drying efficiency and stability. The design of waveguide quantity, arrangement pattern, and drying chamber geometry improved microwave field distribution uniformity, thereby increasing drying effectiveness.

KEY WORDS: red bean, microwave drying, moisture content, dielectric property, drying equipment

目录

第 1 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 干燥工艺研究现状	2
1.2.2 干燥理论研究现状	3
1.2.3 干燥装置研究现状	4
1.3 主要研究内容	5
1.4 技术路线	6
1.5 本章小结	6
第 2 章 不同干燥方式对红豆微观结构及品质特性的影响	7
2.1 材料与方法	7
2.1.1 材料与仪器	7
2.1.2 实验与方法	10
2.1.3 指标测定	10
2.2 结果与分析	12
2.2.1 干燥方式对水分活度的影响	12
2.2.2 不同干燥方式对红豆干燥特性的影响	13
2.2.3 不同干燥方式对红豆热稳定性的影响	14
2.2.4 不同干燥方式对红豆微观结构的影响	15
2.2.5 不同干燥方式对红豆色泽影响	16
2.2.6 不同干燥方式对能耗的影响	16
2.2.7 不同干燥方式对红豆感官品质的影响	17
2.3 本章小结	17
第 3 章 红豆微波真空干燥工艺及含水率预测	19

3.1 材料与方法	19
3.1.1 实验材料	19
3.1.2 主要仪器与装置	19
3.1.3 实验方法	19
3.2 干燥指标	20
3.2.1 红豆水分有效扩散系数	21
3.2.2 红豆干燥活化能	21
3.2.3 红豆干燥动力学模型	21
3.2.4 红豆温度均匀性	22
3.3 红豆干燥特性分析	23
3.3.1 红豆微波干燥的特性曲线	23
3.3.2 工艺参数对红豆微波干燥特性的影响	23
3.4 干燥因素对温度均匀性影响及工艺优化	27
3.4.1 干燥功率对红豆温度均匀性的影响	27
3.4.2 干燥温度对红豆温度均匀性的影响	28
3.4.3 真空度对红豆温度均匀性的影响	29
3.4.4 基于响应面分析的工艺条件优化	30
3.5 红豆微波干燥动力学模型构建	33
3.5.1 红豆干燥过程中的水分扩散系数	33
3.5.2 红豆干燥活化能的计算	34
3.5.3 干燥模型拟合与选用	34
3.5.4 干燥模型的验证	37
3.6 BP 神经网络算法预测含水率	37
3.6.1 神经元数量的确定	37
3.6.2 BP 神经网络样本数据的预处理	39
3.6.3 性能评价指标	39
3.6.4 BP 神经网络预测模型建立	40
3.6.5 网络模型训练	42

3.6.6 模型验证	42
3.6.7 Lewis 模型和神经网络优化结果对比	43
3.7 本章小结	43
第 4 章 红豆微波干燥多物理场数值模拟与介电特性研究	44
4.1 模型构建	44
4.1.1 研究对象及模型假设	44
4.1.2 物理场接口选择	44
4.1.3 控制方程	44
4.1.4 红豆的介电特性与温度、含水率关系模型	48
4.1.5 定义参数	48
4.2 红豆的介电参数测试	50
4.3 结果与分析	50
4.3.1 红豆介电特性与含水率的关系	50
4.3.2 红豆介电特性与温度的关系	52
4.3.3 红豆温湿度变化	53
4.4 本章小结	54
第 5 章 微波干燥实验装置优化	56
5.1 实验装置总体设计	56
5.1.1 主要内容	56
5.1.2 工作原理	58
5.2 主要部件设计	59
5.2.1 旋转托架	59
5.2.2 湿度和视觉传感器	59
5.2.3 储水机构	60
5.3 干燥腔体设计	60
5.3.1 微波谐振腔理论	61
5.3.2 单个波导电磁场耦合仿真	62
5.3.3 多个波导电磁场耦合仿真	63

5.3.4 干燥腔体形状对电磁场的影响	64
5.4 控制系统设计	66
5.4.1 PID 控制系统组成.....	66
5.4.2 PID 控制器的作用	67
5.4.3 PID 参数整定	67
5.4.4 干燥装置控制模型	68
5.5 本章小结	71
第 6 章 总结与展望	72
6.1 总结	72
6.2 展望	72
参考文献	74
攻读硕士学位期间发表的成果	81
致 谢	82

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

红豆，又称赤豆、小豆，是一种重要的豆类作物，属于豆科植物^[1]。红豆不仅是一种常见的粮食作物，还因其丰富的营养价值和药用特性而被广泛应用于食品加工和传统医学领域^[2]。在食品加工方面，红豆因其独特的口感和风味，被广泛用于制作各种传统食品 and 现代加工产品^[3]。在传统医学中，红豆被认为具有清热解毒、利尿消肿、健脾养胃的功效^[4]。

红豆在收获后通常含有较高的水分，含水量一般在 25%-30%左右。高湿度环境可能引发红豆内部的生化反应，进一步加速其变质过程。干燥处理是解决这一问题的关键步骤^[5-6]。通过降低红豆的含水量，可以有效抑制微生物的生长和酶的活性，从而显著延长其保质期。干燥后的红豆不仅能够长期储存，还能在储存过程中保持其原有的营养成分和风味特性^[7]。此外，干燥处理还能显著提高红豆的储存和运输效率。同时，低含水量的红豆在运输过程中不易受潮或变质，能够更好地适应长途运输和国际贸易的需求。

研究红豆干燥具有重要的理论价值和实际意义，不仅能够优化干燥工艺，还能对红豆产业的可持续发展提供技术支撑和科学依据。传统的干燥方式往往效率低下且受环境条件限制^[8-10]，而现代干燥方式虽然效率较高，并且可将热敏性成分保留率提升至 85%以上^[11]，并显著改善干制品的色泽与质构特性^[12]。但能耗较大且成本较高^[13-15]。研究红豆干燥有助于更好地保持红豆的营养成分和感官品质。干燥过程中，温度过高或时间过长可能导致蛋白质变性、维生素损失或风味物质挥发。通过调整干燥条件，可以最大限度地保留红豆中的活性成分，此外，研究红豆干燥工艺还能对减少资源浪费和环境污染提供解决方案。干燥是红豆加工过程中能耗较高的环节之一，优化干燥方式不仅可以降低能源消耗，还能减少碳排放，符合绿色生产和可持续发展的理念。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 干燥工艺研究现状

干燥是农业生产中至关重要的环节，直接影响农产品的储存品质、营养价值和经济价值。随着农业现代化和食品加工技术的进步，干燥工艺的研究不断深入，目前主要干燥方式为热风干燥、真空干燥^[16]和微波干燥^[17]。

韦强等学者探讨了热风干燥温度对白萝卜脱水品质的影响，结果表明，70 °C 条件下干燥效率较高，且能较好保持白萝卜的营养成分和整体品质^[18]。在对苹果片热风干燥过程的研究中，Yuan Y 等人创新性地构建了热质传递-应力应变多场耦合数学模型，并进行了数值仿真研究。研究结果显示，整个热风干燥阶段，苹果片内部的温度场与水分场呈现出均匀分布的状态。进一步对比模拟数据与实测数据，发现二者间的最大相对误差控制在 10%以内，这充分验证了模型的可靠性与准确性^[19]。袁婷婷团队以新鲜红朝天椒为研究对象，通过系统实验分析了热风干燥参数对脱水动力学的影响规律^[20]。研究表明，在热风干燥过程中，采用不同相对湿度控制方法对龙眼和山药的干燥特性会产生显著差异。通过 Weibull 模型对干燥曲线进行拟合分析发现：当形状参数 β 值小于 1 时，龙眼物料采用持续除湿干燥方式的效果明显优于降压除湿模式；而对于山药物料， β 值的变化与其几何特征密切相关，特别是切片厚度会显著影响 β 值^[21]。Aghilinategh N 等人采用响应面法对苹果片的间歇式微波-热风联合干燥工艺参数进行优化，实验结果表明，在风速为 1.78 m/s、空气温度 40 °C、脉冲比 4.48 及微波功率 600 W 的优化条件下，系统可获得最佳干燥效果，此时最大期望函数值达到 0.792^[22]。

另外，庞维建针对玉米的微波循环连续干燥过程展开实验分析，研究结果显示：1)微波功率密度与物料的干燥速率及温升呈正相关性，但当功率密度超过 3.75 W/g 时，玉米的温升速率明显减缓；2)单次循环干燥时长对干燥效率的影响呈现非线性特征，具体表现为干燥速率先下降后回升，而物料温度则经历先升高后降低的变化过程^[23]。Quispe F 等研究人员以浆果为研究对象，系统比较了真空冷冻干燥与传统热风干燥、太阳能干燥等方法的处理效果，实验数据表明，经真空冷冻干燥处理的浆果样品，其总酚类物质含量和抗氧化活性均显著优于其他干燥方式所得样品^[24]。杨颖团队通过真空冷冻干燥技术处理小麦种子的实验研究表明，该方法能显著提高种子的平均存活率。研究还揭示，干燥过程中冰晶的升华温度与干燥室压力存在显著相关性^[25]。Jiang G L 等采用真空冷冻干燥技术处理新鲜毛豆种子，结合近红

外反射光谱分析,结果表明该干燥方式能有效保留种子内蛋白质和油脂成分,且表现出良好的稳定性^[26]。

综上所述,国内外研究者针对不同物料的干燥特性、工艺优化等进行研究。不同的干燥方式对物料的干燥性能产生不同的变化;干燥工艺优化多采用响应面分析等方法,不同的干燥条件对物料影响有差别;干燥特性研究主要是研究物料的含水率、温度的变化。

1.2.2 干燥理论研究现状

干燥就是从含有水分的物质中除去水分的过程,本质上是一个传热传质过程。热量从干燥介质传递给湿物料,使物料中的水分获得能量而汽化,水汽再从物料表面传递到周围的干燥介质中被带走。干燥理论聚焦于干燥机理探究、干燥模型构建以及干燥过程的优化管控等多个方面。当下,国内外学者在非平衡传热传质、多孔介质湿分迁移模拟、干燥过程数学建模等基础理论方面取得进展,为工艺优化提供理论支持,成功推导出一系列干燥数学模型,诸如精准反映干燥速率动态变化的模型、阐释热量传递路径与效率的模型,以及依据能量守恒原理构建的模型等。

安可婧等对龙眼进行间歇微波干燥处理,其正交试验结果表明真空度 0.09 MPa、装载量 100 g、功率密度 12 W/g 为最佳干燥工艺^[27]。Choudhary R 等学者通过系统研究玉米叶的微波干燥动力学特性,确定了玉米叶最优的干燥动力学模型^[28]。物料含水率是表征干燥过程动态特性的关键变量,其非线性时变特征直接影响工艺调控效果。张利娟等基于神经网络建立了小麦真空干燥含水率预测模型,根据真空度、干燥温度、辅料厚度能够预估粮食的含水率,验证了神经网络模型能够较好地反映真空干燥工艺参数与含水率之间地复杂线性关系^[29], Amin T 等基于遗传算法建立了香叶干燥过程含水率预测模型,根据空气温度及湿度、气体流速及干燥时间等输入变量准确预估香叶水分含量^[30]。

王会林团队采用显式有限差分格式,建立了土豆和胡萝卜热风干燥的二维传热传质模型,通过耦合求解 Fourier 热传导方程和 Fick 扩散方程,实现了干燥过程中水分含量分布和温度场的预测^[31]。程强等通过数值模拟方法系统研究了微波真空干燥过程中的能量转换机制,重点分析了物料参数与工艺参数对电磁-热能转换效率的影响规律^[32]。农产品的介电特性也会对其传热传质产生影响, Mao Y 等探究核桃在 10 至 3000 MHz 的频率、20 至 80 °C 的温度以及整个核桃的水分含量在

8.04%至 20.01%之间下测量了核桃成分的介电性能^[33]。Zhu Z 等为了开发使用射频或微波能量的先进干燥方法，使用开放式同轴线探头和网络分析仪在 20 至 4500 MHz 的频率、水分含量在 15.1%和 43.1%之间，温度在 25 至 75 °C之间，测定了马铃薯淀粉的介电性能^[34]。Song C F 等基于射频或微波能量的包装内巴氏杀菌处理可以大大降低中式馒头微生物变质的危险。采用混合方程方法在 1 至 2450 MHz 频率范围内，温度范围为 25-100 °C，水分含量范围为 40.1-48.5%。分析了频率、水分含量和温度对馒头介电性能的影响^[35]。

这些模型可以帮助研究干燥过程中物料质量的波动、水分含量的递减以及温度的变化。以此为基础，为干燥装置的设计与优化升级提供了坚实的理论支撑，实现干燥效率与质量双提升。干燥理论研究还面临一些挑战，如干燥过程物料受热不均匀，有的地方产生热点从而破坏品质；干燥能量利用率比较低等问题。

1.2.3 干燥装置研究现状

国内干燥装置的研究相对于国外，起步时间比较晚，红豆加工生产体系仍以传统小作坊式作业为主导，缺乏现代化规模生产所需的技术集成度与产业协同性，其干燥工艺、产能规模、能源利用方式及测控技术等方面仍相对滞后，主要依赖传统热传导干燥模式。近年来，随着技术进步，我国在干燥装置研发领域已取得显著突破。干燥装置研究的主要方向是以下几个方面^[36-37]：

(1)干燥装置的结构优化，干燥装置的结构设计会直接影响干燥效率和质量^[38]。如在流化床结构方面，创新性地采用多层设计并优化导流板参数，使气固接触效率提升 42%，热效率达到 $67\pm 2.3\%$ ，较传统单层结构单位产能提高 40.5%；采用模块化架构设计，由预处理、双级逆流主干燥和冷却三个功能模块组成，各模块采用标准化接口设计，可实现快速更换，使平均维修时间缩短 65%，设备综合运行效率提升至 96.8%。

(2)干燥过程控制改进，近年来随着计算机技术的发展，干燥装置的控制算法不断被优化，优化控制算法可显著提升干燥产品的品质稳定性与均匀性，干燥效率也有所提高^[39]。如模型预测控制(MPC)，基于子空间辨识的温湿度预测算法，使含水率控制误差 $\leq 0.3\%$ ；数字孪生系统，结合 CFD 仿真与实时传感器数据，实现干燥过程动态补偿，能耗降低 18%。

(3)干燥装置加热方法的变化，传统的干燥装置常采用燃气、电加热、蒸汽等方

式进行加热。这类能源属于不可再生资源，最终将面临资源枯竭的风险，可再生能源深度应用可以解决这个问题，使用太阳能及风能为干燥设备加热；传统热源清洁化转型，燃气多级燃烧技术可有效降低温室气体排放，同时提升能源利用效率；在加热技术领域，电磁加热、红外加热及激光加热等新型技术较传统方式具有显著优势。这些新型加热方式比传统加热方式，具有更高的热效率和控制精度。

1.3 主要研究内容

本文以红豆作为实验研究对象，研究了真空冷冻干燥、微波真空干燥、热风干燥对红豆品质的影响，综合比较选出最适合红豆的干燥方式，研究了真空度、干燥功率、干燥温度对红豆干燥特性的影响，建立了红豆干燥动力学模型；借用 MATLAB 数学工具，运用 BP 神经网络算法红豆含水率预测模型；运用多物理仿真软件对红豆的传热传质规律进行探究；对干燥设备进行了改进，控制系统进行了优化。具体研究内容和结论如下：

(1)通过比较红豆在真空冷冻干燥、微波真空干燥、热风干燥后品质差别，选择出最佳干燥方式。主要通过比较干燥后的红豆能耗、色泽、水分活度、热力学特性、微观结构等因素来确定干燥方式优良。本章为后续的研究打下基础。

(2)研究了不同真空度、微波功率、干燥温度下红豆干燥特性的变化，对不同干燥条件下红豆温度均匀度进行了计算并在此基础上进行响应面优化，分析得出最佳干燥工艺条件。利用实验求出红豆的水分扩散系数及干燥活化能，研究了红豆干燥过程中水分变化的动力学模型。利用实验数据，运用 BP 神经网络算法创建了干燥过程含水率预测模型。

(3)运用多物理场仿真软件 COMSOL 建立红豆几何模型，构建红豆传热传质数学模型确定方程初始及边界条件，研究红豆干燥过程中的传热传质规律，获得在一定条件下红豆的温度与水分变化，并用实验结果加以验证模型的准确性。运用矢量网络分析仪等仪器，研究红豆的介电特性与温度、含水率的关系。

(4)基于红豆微波干燥实验数据，结合红豆的物料特性，完成微波干燥系统的整体架构设计。通过理论计算与工程经验相结合的方法，重点优化了排湿系统和物料承载装置等关键部件。同时，运用 COMSOL 多物理场仿真技术，对微波波导的配置方案（包括数量优化和空间排布）以及干燥腔体结构进行了数值模拟与优化设计，对微波干燥装置的控制系统进行改进，使其精度更高，稳定性更好。

1.4 技术路线

本文技术路线分为三大部分：实验研究、数值模拟和装置的改进，实验研究方面主要是干燥方式的选择、干燥工艺的优化及干燥动力学模型的研究，具体如图 1-1 所示。

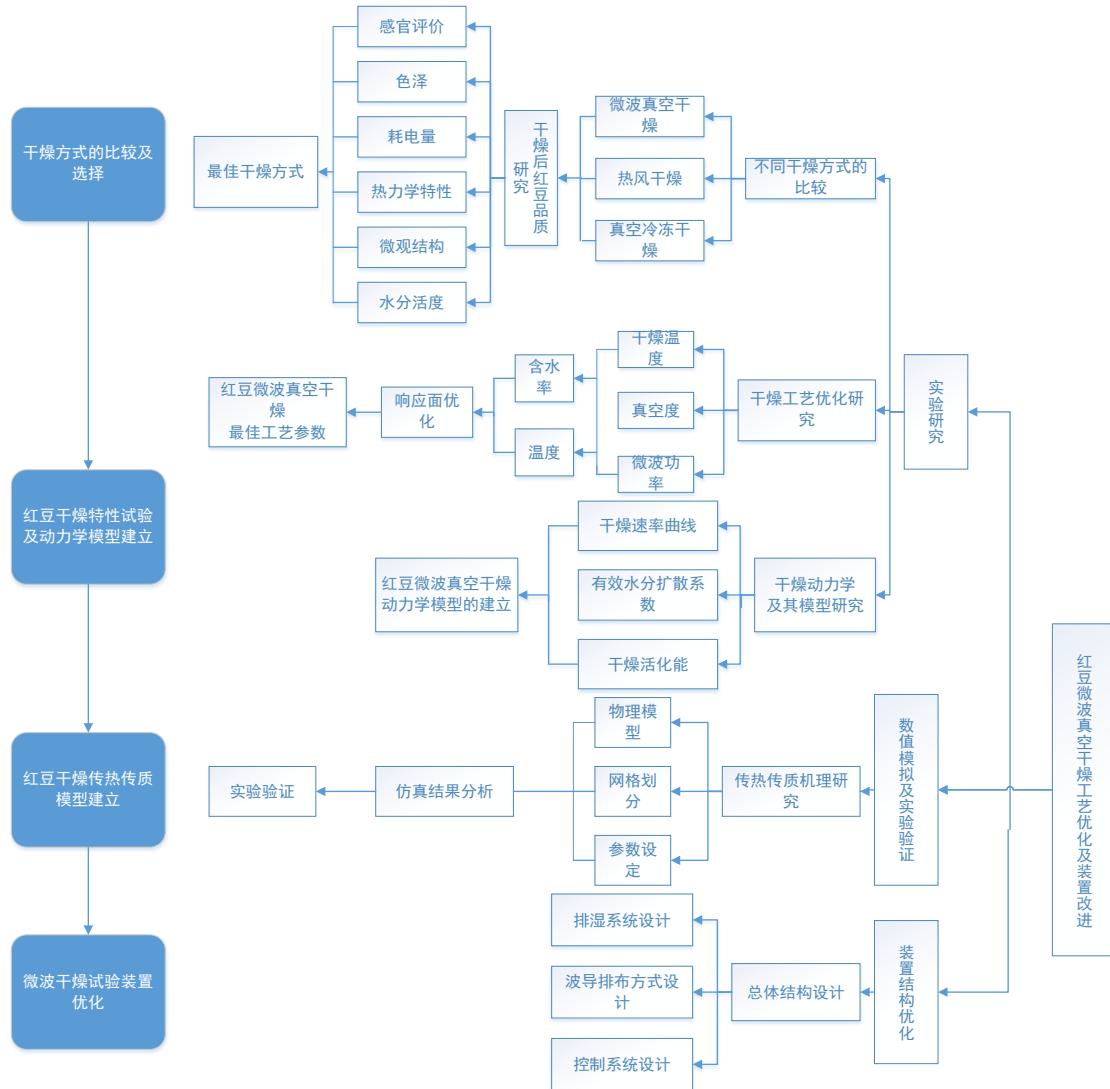


图 1-1 技术路线图

1.5 本章小结

本章主要是对红豆干燥的背景与意义进行叙述，对国内外研究现状主要包括干燥工艺、干燥理论和干燥装置三个方面进行分析，最后是对本文主要研究内容进行阐述，并绘制了本文研究技术路线图。

第 2 章 不同干燥方式对红豆微观结构及品质特性的影响

干燥处理通过有效降低物料水分活度，能够抑制微生物增殖并延缓酶促反应等生物化学变化，从而显著提升食品保藏性能。近年来，国内外学者针对不同物料的脱水工艺优化开展了系统性研究。唐秋实团队实验分析了四种干燥方式对杏鲍菇主要营养成分的影响^[14]。Le 等学者对比研究了热风干燥等三种干燥工艺对杜仲雄花主要活性成分的影响规律。实验数据表明，微波干燥技术虽然能最大程度保留活性物质含量，但会导致游离氨基酸显著降解^[15]。目前，有关不同干燥方式对红豆品质影响及干燥后微观结构变化的研究较少^[40]。本章采用 3 种不同的干燥方式干燥红豆，在监测品质变化规律的基础上，利用扫描电镜研究红豆微观结构的变化，分析研究不同干燥方法对红豆干制品质量的影响，为红豆最佳干燥加工方法的选择提供参考。

2.1 材料与方法

2.1.1 材料与仪器

实验材料选用黑龙江非转基因红豆，经筛选后个体均质性良好，采用密封容器运输储存，无机械损伤且种皮完整。本章所用到的实验仪器和设备如表 2-1 所示。

表 2-1 主要仪器与设备

设备名称	型号	生产产家
电热鼓风干燥箱	DHG-9023A	上海一恒科学仪器有限公司
微波真空干燥箱	RWBZ-08S	南京苏恩瑞干燥设备有限公司
立式冻干机	YTLG-18C	上海叶拓科技有限公司
色差仪	WR-10QC	深圳市威福光电科技有限公司
高精度电子天平	HC	上海花潮实业有限公司
电子卤素水分测定仪	DS100PE	武汉捷宝生物科技有限公司
同步热分析仪	TC-STA200	南京和晟科技有限公司
电力监控仪	BK-033	慈溪科沃德电子有限公司
扫描电子显微镜	S-4800	日本日立有限公司
红外热成像仪	FLIR E53	武汉鸿蒙有限公司

(1)微波真空干燥箱

微波真空干燥系统作为先进的脱水技术装备，主要面向具有热敏特性的高价值物料处理领域。该技术通过耦合微波能直接转化与真空低温环境，实现了较传统

热风干燥提升 3-5 倍的传质效率。如图 2-1 所示，该设备采用模块化控制系统，可实现关键参数精确调控。



图 2-1 微波真空干燥箱

(2)热风干燥箱

热风干燥箱作为现代农业与食品加工领域的基础装备，如图 2-1 所示，其核心控制系统采用高精度微处理器（分辨率 0.1°C ），集成 PID 闭环控制算法实现 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的温控精度。系统具备多重安全保障机制，有效保障了连续运行的可靠性。



图 2-2 热风干燥箱

(3)红外热成像仪

Ti32 红外线热成像仪借助 320x240 传感器能够快速找到目标，从而形成清晰的图像。热成像仪如图 2-3 所示，热灵敏度甚至能够识别微小的温度差异。



图 2-3 红外热像仪

(4)水分活度仪

水分活度测定仪是评估食品体系稳定性的关键分析设备，如图 2-5 所示，其通过精确测定水分活度值来表征物料中微生物可利用的自由水含量。



图 2-4 水分活度仪

(5)色差仪

WR-10 色差仪是 FRU 威福团队精心研发的性价比机器。在塑料、电子、油漆、油墨、印刷、木材、纺织、食品等行业普遍应用，如图 2-5 所示，该仪器可对多种颜色进行准确的测量，可进行产品品质的控制。本文用来测干燥后红豆色差。



图 2-5 色差仪

(6)电子卤素水分测定仪

电子卤素水分测定仪是一种通过快速加热失重法精确测量样品水分含量的实验室仪器，如图 2-6 所示，该仪器采用电磁力平衡传感器。本文用来测红豆含水率。



图 2-6 水分测定仪

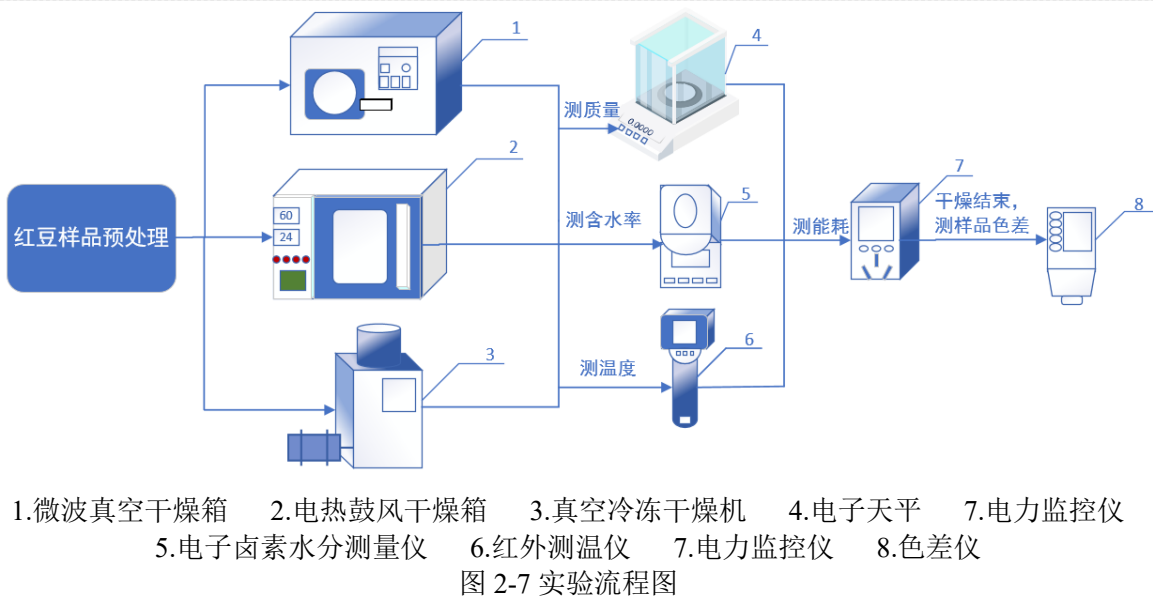
2.1.2 实验与方法

本研究采用三种干燥方法处理样品：热风干燥（HAD）在 60℃恒温条件下于电热鼓风干燥箱中进行 25 min；真空冷冻干燥（VFD）在专用冻干设备中持续 25 min；微波真空干燥（MVD）采用与 VFD 相同的处理时间。所有干燥过程均严格控制时间参数，处理完成后立即取样备用以待后续分析。

通过对不同干燥时间下物料含水率的监测发现，发现在 25 min 时，三种干燥方式均能使物料含水率降至目标值以下，满足后续加工或储存需求。各方法均保持 25 min 的统一处理时长以确保实验条件的一致性。实验的具体参数如表 2-2 所示，实验的流程图如图 2-7 所示。

表 2-2 实验设计与实验参数

干燥方式	实验参数
微波真空干燥	微波功率 20 W，真空度 0.08 MPa
真空冷冻干燥	真空度 0.08 MPa，
热风干燥	风速 3 m/s，温度 60℃



2.1.3 指标测定

2.1.3.1 干燥特性的测定

红豆在干燥过程中的干基含水率与干燥速率，按式(2-1)与(2-2)计算所得^[41]：

$$C_t = \frac{m_t - m}{m} \tag{2-1}$$

$$D_R = \frac{C_{t_1} - C_{t_2}}{t_1 - t_2} \quad (2-2)$$

式中, C_t 为干燥过程中任意 t 时刻红豆的干基含水率(g/g); m_t 为干燥过程中任意 t 时刻红豆的质量(g); m 为红豆绝干物质的质量(g); D_R 为干燥过程中 t_1 与 t_2 时间段的干燥速率(g/(g·h)), 和分别为干燥过程中 t_1 与 t_2 时刻的干基含水率(g/g)。

2.1.3.2 水分活度的测定

水分活度是指食品中水分对其自由水分的影响程度, 通常用来评估食品对微生物生长和化学变化的敏感性。水分活度的测定通常通过水分活度仪进行, 原理是利用食品中水分的蒸发与吸附在特定条件下达到平衡的方法。水分活度的测定对于食品加工、贮存和包装过程中的微生物控制和食品品质的保持非常重要。使用水分活度仪测定不同干燥方式干燥后红豆的水分活度, 每种干燥方式分别测量3次, 结果取平均值。

2.1.3.3 色差测定

使用色度仪测定不同干燥方式下红豆固体样品的颜色, 按照 GB/T 22106-2008 检验红豆感官性状的要求, 通过色差分析仪对样品表面色泽特性进行量化表征, 检测指标包括: 亮度值(L^*)、红绿度值(a^*)和黄蓝度值(b^*)。所有检测均在标准光照条件下完成。基于测得的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 计算总色差(ΔE), 综合评估不同干燥方式对样品色泽的影响^[42]。

$$\Delta E = \sqrt{(L_a^* - L^*)^2 + (a_a^* - a^*)^2 + (b_a^* - b^*)^2} \quad (2-3)$$

2.1.3.4 扫描电子显微镜分析

扫描电子显微镜是分析红豆表面微观结构的有效手段, 其观测结果可揭示红豆的形态特征与理化性质之间的关联^[13]。样品的制备流程如下: 首先在样品台表面均匀涂覆导电胶, 采用静电分散法使样品颗粒单层分布, 经氮气吹扫去除松散附着颗粒后, 置于离子溅射仪中镀覆 10 nm 金膜。样品最终在加速电压 15 kV、工作距离 8 mm 条件下, 通过二次电子探测器采集微观形貌图像。

2.1.3.5 感官评价

本研究建立的感官评价体系涵盖色泽、形态、破损、气味和口感五项指标。其中, 口感样品制备采用标准流程, 将干制品复水后沸水煮制 10 分钟并沥干备用。

采用 3 分制评分标准(0-3 分),由 5 名经过专业感官培训的评定员进行量化评价,培训内容包含红豆干制品的特性识别与评价规范,以确保评价结果的客观性和可靠性^[43]。感官评价评分标准如表 2-2 所示。

表 2-2 红豆的感官质量评分标准

感官指标	3.0 分	2.5 分	2.0 分	1.5 分	1.0 分	0.5 分
色泽	极红亮	非常红亮	比较红亮	比较灰暗	非常灰暗	极灰暗
气味	香气极足	香气非常足	比较香	香味不足	香气非常少	香气极少
形状	无明显变化	变化较小	变化稍大	变化较大	变化非常大	变化极大
口感	硬度极适中	硬度适中	硬度稍大	硬度较大	硬度非常大	硬度极大
破损	无明显破损	破损较小	破损稍大	破损较大	破损非常大	破损极大

2.1.3.6 热力学特性测定

热重分析仪可用于测定样品的热解温度和速率,热重分析法(TGA)是评价物质热稳定性的有效手段,其通过特征热解峰可明确区分不同热降解阶段^[31]。本研究采用 TGA 技术考察干燥工艺对红豆热稳定性的影响。具体方法为:精确称取 5-6 mg 经粉碎处理的试样置于坩埚中,在 100 mL/min 氮气流速条件下,以 10 °C/min 的升温速率从 20 °C 程序升温至 80 °C 进行热解特性分析。该测试条件可准确表征样品的热降解行为及其相变特征^[44]。

2.1.3.7 干燥能耗的测定

将电能监测装置连接于电源与干燥设备之间,实时记录能耗数据。操作流程为,系统启动时开始采集,以 5 分钟为间隔持续记录,直至干燥结束。总能耗通过起止时刻的电表读数差值计算^[45]。

2.2 结果与分析

2.2.1 干燥方式对水分活度的影响

不同干燥方式对红豆水分活度的影响如图 2-8 所示,热风干燥处理组样品的水分活度值最高为 0.832,微波真空干燥组次之为 0.758,真空冷冻干燥组最低为 0.626。实验结果表明,真空低温干燥技术能显著降低物料水分活度,有效抑制微生物活性。然而,该工艺存在干燥周期较长的问题,且持续的低温低压条件会造成较高的能耗和生产成本。热风干燥组的水分活度最高,高水分活度环境下,微生物繁殖和化学反应速度加快,导致红豆在常温储存中快速变质;微波真空处理可降低红豆的水分活度,从而提升其贮藏稳定性。此外,该技术兼具高效干燥特性,可缩短干燥时间,

降低能耗及生产成本，适用于红豆的工业化加工。

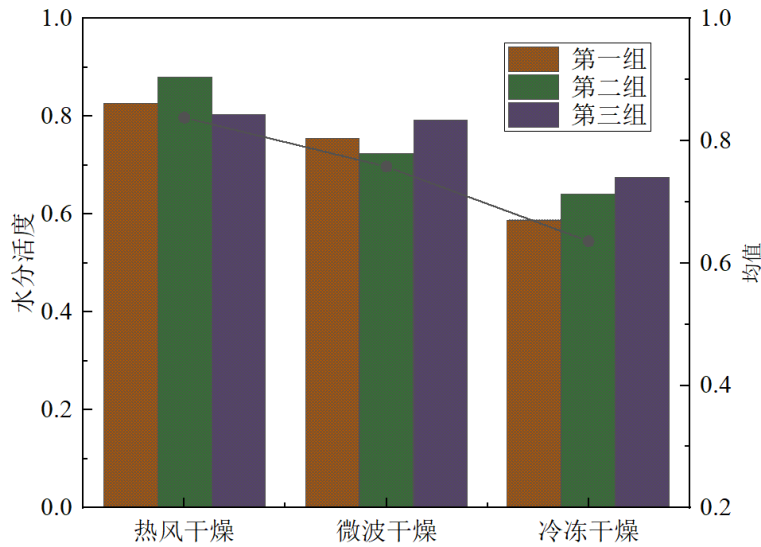


图 2-8 干燥方式对红豆水分活度的影响

2.2.2 不同干燥方式对红豆干燥特性的影响

不同干燥方式下，红豆干基含水率及温度变化曲线如图 2-9(a)所示。从图中可以观察到，微波真空干燥组的含水率先快速下降，干燥 15 min 时，速度逐渐放缓；而热风干燥组与冷冻干燥组却完全不同，含水率先缓慢下降，干燥 5 min 时，下降速度逐渐变快。热风干燥、微波真空干燥和真空冷冻干燥方式下，红豆干燥到标准干基含水率所需的时间各不相同。从传热传质机理角度分析，微波真空干燥与冷冻干燥的效率差异主要源于其能量转换和水分迁移路径的本质区别。微波真空干燥通过电磁能直接转化为分子动能，实现快速体积加热，从而在物料内部迅速建立蒸汽压力梯度；而冷冻干燥依赖于缓慢的升华界面推进过程，其传质效率受内外压强差和温度的影响。这种差异导致两种干燥方式表现出显著不同的特征，微波真空干燥方式相较于传统干燥方式，有更高的脱水效率。

微波真空干燥借助微波作为热源，利用物料的介电损耗生热机制，让物料内部的极性分子在电磁场的作用下产生剧烈运动，从而实现对电磁能的高效吸收。这些能量为物料内部水分的升华提供了所需的相变潜热，极大地促进了内部水分以蒸汽的形式快速向表面迁移，有效缩短了干燥周期^[46]。而热风干燥主要依靠热空气与物料表面进行对流传热。在干燥过程中，物料两面都直接与热空气接触，并且干燥设备配备的强制对流系统能够及时将物料表面蒸发出来的水蒸气带走，在一定程度上加快了干燥速度。热风干燥时，物料在受热过程中呈现显著的非均匀温度场

分布特征,表面区域因直接接受热辐射和对流作用而率先升温,形成径向递减的温度梯度。这种热梯度诱导产生逆向质量传递现象。而且,热风干燥的热源仅仅来自外部,当物料表面的水分蒸发后,内部的水分无法及时补充到表面,这就造成了传质阻力的增加,进而使得干燥效率低于微波真空干燥^[47]。

由图 2-9(b)可知,不同干燥方式对红豆温度有显著影响,随着干燥的进行,3 种干燥方式处理组中除了真空冷冻干燥组,红豆温度的上升速率都是先上升后下降,但是又有所区别,微波真空干燥组的红豆升温最快,热风干燥组的次之。干燥 5 min 时,微波干燥组与热风干燥组的温度差为 5℃左右,干燥 10 min 时,2 组的温度差大约为 7℃,干燥 25 min 时,二者温度差又缩小至 3℃。通过分析干燥曲线斜率变化规律发现,所有样品在初始干燥阶段均呈现最高干燥速率,之后速率呈持续下降趋势。

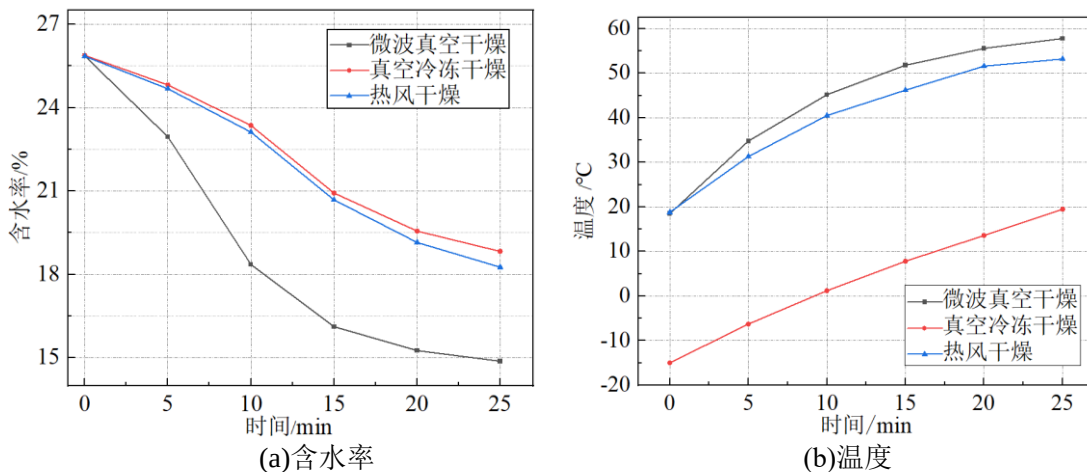


图 2-9 干燥方式对红豆的含水率和温度的影响

2.2.3 不同干燥方式对红豆热稳定性的影响

热稳定性是指物料在受热过程中的物理和化学性质保持稳定的能力,加工过程可能引发美拉德反应、酶促褐变及脂质氧化等化学变化,导致产品色泽劣变及营养成分降解,热稳定性的好坏直接影响到其质量、口感等^[48]。

不同样品组的 TG 和 DSC 曲线如图 2-10 所示,热风干燥组刚开始样品质量随温度下降的最快,温度到 55℃之后,质量下降速度变缓,温度到 62.5℃以后质量基本不变,40℃之后,微波干燥组的红豆样品质量随温度变化基本保持不变,冷冻干燥组的红豆质量,随温度的升高质量一直在损失。微波干燥组的功率只在前期发生变化,温度上升到 55℃左右功率保持稳定,冷冻干燥组的功率基本保持在相对恒定的速度在变化,热风干燥的功率变化与微波真空干燥组的相差不大。综上所述

述,可知微波真空干燥组样品的热稳定性最好,质量变化小的同时释放的热量也最少;其次是热风干燥组;冷冻干燥组的热稳定性最差,质量损失的最大同时释放的热量也最大。

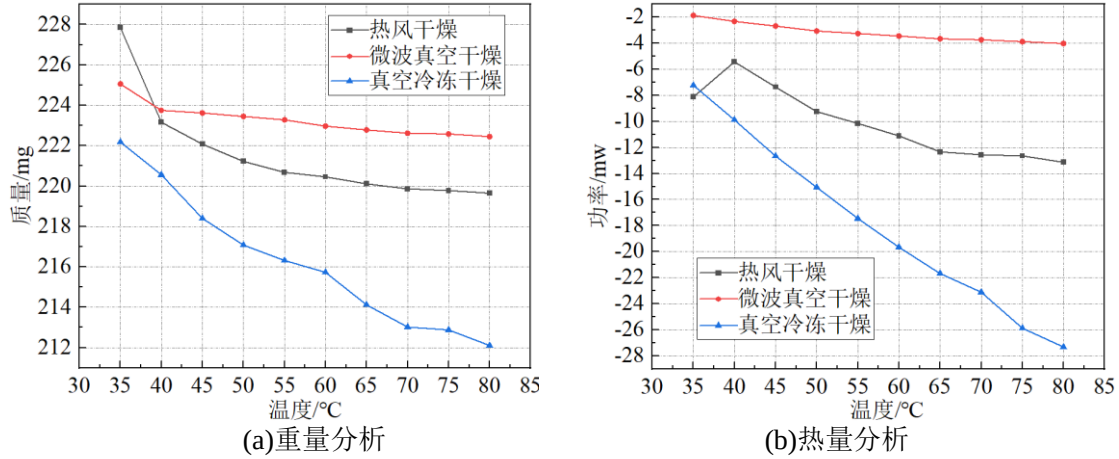


图 2-10 不同干燥方式下红豆热重分析曲线

2.2.4 不同干燥方式对红豆微观结构的影响

不同干燥方式下红豆微观结构扫描电镜图如图 2-11 所示。不同干燥方式对红豆微观结构有显著影响。微波干燥组对红豆微观结构影响较大,样品褶皱明显中间有孔隙。热风干燥组的红豆微观结构有层次感,干燥后的样品表面几乎没有褶皱,表面平整,结构紧凑,这是因为高温会促进淀粉的凝聚,可能导致红豆颗粒间的结合,形成更加致密的结构,热风干燥组的高温可以加速水分的蒸发,有助于快速去除红豆表面和内部的水分,从而形成更加均匀的结构;冷冻干燥组干燥后的样品表面虽有褶皱,但程度较轻趋于平坦,颗粒均匀分布且都比较小,由于冷冻干燥过程中,水分从冰态直接转变为气态,减少了水分对红豆结构的影响,有助于保持颗粒的完整性,冻干燥过程中的速冻可以防止结晶过程中的大颗粒形成,保持了较小的晶粒大小。

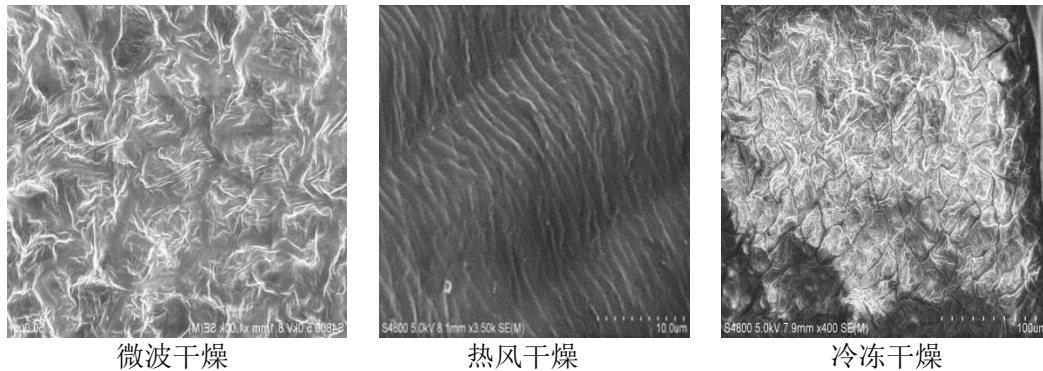


图 2-11 干燥方式对红豆微观结构的影响

2.2.5 不同干燥方式对红豆色泽影响

色泽也是评价干燥红豆质量好坏的重要指标之一，花青素在加工过程中的结构稳定性直接影响产品色泽品质^[49]。如图 2-12 所示，不同干燥工艺会显著改变红豆的色差参数。在黄度值方面，热风干燥组的黄度值最高为 1.0，其次是冷冻干燥处理组，微波干燥组的黄度值最低；真空冷冻干燥组的红度值最高为 4.5 左右。实验结果表明，三种干燥方式对红豆色泽的影响存在显著差异：冷冻干燥样品呈现最优的红度表现，较热风与微波干燥高约 1.5 个单位，这是因为低温真空条件下花青素等色素的稳定性较好；而热风干燥因处理周期较长，主要发生酶促褐变与美拉德反应；微波真空干燥则因局部过热效应引发物料结块与边缘焦化，显著影响产品白度。三个处理组中，真空冷冻干燥的亮度值最高，热风干燥其次，微波干燥最低。

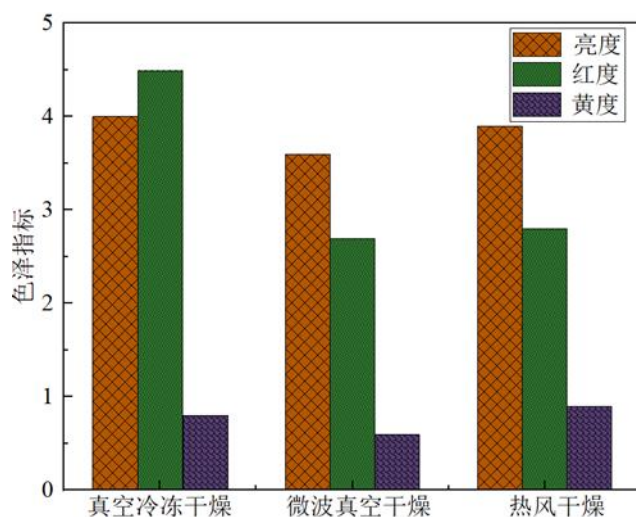


图 2-12 干燥方式对红豆色泽的影响

2.2.6 不同干燥方式对能耗的影响

能耗性能是评估干燥工艺的关键指标，直接影响生产成本控制^[50]。本研究采用电能监测系统对三种干燥方法的能耗特性进行定量测定，得到的数据如表 2-3 所示。

表 2-3 不同干燥方式干燥红豆的能耗表

干燥时间/min		0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	平均值
能耗/ kW·h	微波干燥	0.263	0.206	0.247	0.187	0.218	0.201	0.221
	热风干燥	0.016	0.012	0.009	0.022	0.015	0.018	0.015
	冷冻干燥	0.412	0.388	0.467	0.425	0.395	0.499	0.431

实验数据表明，三种干燥工艺的能耗特性存在显著差异。具体而言，热风干燥表现出最佳的能耗稳定性，其单位时间能耗维持在 0.015 ± 0.001 kW·h，显著低

于其他两种工艺。冷冻干燥的能耗波动范围最大,平均值为 $0.431 \pm 0.032 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。相比之下,微波干燥的能耗特性介于二者之间,平均值为 $0.221 \pm 0.015 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。微波干燥比热风干燥耗电量的原因是的真空泵需要额外消耗电量以获得真空环境,冷冻干燥的耗电量最高的原因是真空泵还需要大量耗电量而维持低温环境^[51]。

2.2.7 不同干燥方式对红豆感官品质的影响

由图 2-13 可知,在色泽方面,真空冷冻干燥处理组表现最佳,其色度评分高达 3.0 分,热风干燥组次之,约为 2.0 分;形状方面,每个处理组干燥后的红豆差异不大;不同方式干燥过后的红豆,微波干燥组与冷冻干燥组的口感相差不大,相差 0.5 分,热风干燥组的红豆口感最差,为 1.0 分左右;在气味方面,热风干燥组的红豆评分最高为 2.0 分左右,冷冻干燥组次之,为 1.0 分左右,微波干燥组最差,为 0.5 分;在破损方面,冷冻干燥组红豆保持较为完整,评分为 2.5 分,微波干燥组破损度稍差些,评分为 2.0 分左右。

真空冷冻处理组在色泽保持和结构完整性方面表现最优,但挥发性风味物质损失率高,导致感官接受度下降。微波真空工艺具有显著的效率优势,但在处理高水分物料时,会引发显著的体积收缩。当物料堆积厚度超过一定程度时,局部过热现象导致美拉德反应,过度焦糖化。热风干燥组表现出最低的感官品质,其形态完整性指数显著低于其他组,同时营养物质大量流失。热风干燥组在色泽和结构参数方面均呈现劣化^[52],验证了热风干燥对热敏性物料品质的负面影响机制。

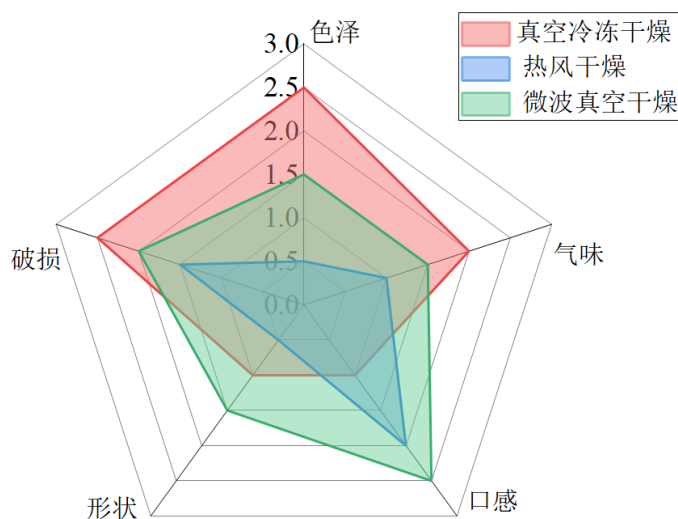


图 2-13 不同干燥方式对红豆感官品质的影响

2.3 本章小结

本章研究微波真空、冷冻真空、热风三种干燥方式对红豆干燥在干燥特性、色

泽、感官品质、能耗、水分活度和微观结构等方面的影响,实验结果表明三种干燥工艺在品质和能耗方面存在显著差异。干燥过程中,红豆水分含量和干燥速率下降,三种干燥方式水分减少速率和效果不同,微波真空干燥速率快,冷冻真空干燥保品质但能耗高,热风干燥能耗低但速率慢。干燥让红豆的微观结构改变、内部皱缩,微波真空与冷冻真空干燥能较好保持表面结构,热风干燥较差。干燥后,微波真空干燥的红豆色泽变化小,真空冷冻干燥样品呈现显著变化;感官评定结果显示微波真空干燥综合品质最佳,热风干燥相对最差。能耗分析显示:热风干燥的能耗最低,真空冷冻干燥最高。综合评估表明,微波真空干燥在干燥效率、产品品质和能耗控制等方面展现出优势,可为新型谷物干燥方式的研发提供重要参考。

第 3 章 红豆微波真空干燥工艺及含水率预测

基于前文中通过热风干燥、真空冷冻干燥和微波真空干燥三种不同干燥方式的对比分析,得出微波干燥稻谷的干燥效果更明显。因此,为了深入研究微波干燥稻谷的最佳工艺,提高微波干燥稻谷的干燥效率,本章基于微波干燥技术,系统研究红豆在不同干燥参数(微波功率、温度及真空度)作用下的水分迁移特性。通过建立干燥动力学模型,并结合 BP 神经网络算法,构建红豆含水率的预测模型,为优化微波干燥工艺参数及实现精准控制提供理论支撑。

3.1 材料与方

3.1.1 实验材料

红豆原料为新疆红小豆,筛选出大小适中,无腐坏的红豆。红豆样品含水率采用 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》法进行测定。

3.1.2 主要仪器与装置

本章所用到的实验仪器和设备如表 3-1 所示。

表 3-1 主要仪器与设备

设备名称	型号	生产产家
微波真空干燥箱	RWBZ-08S	南京苏恩瑞干燥设备有限公司
电子卤素水分测定仪	DS100PE	武汉捷宝生物科技有限公司
高精度电子天平	HC	上海花潮实业有限公司
同步热分析仪	TC-STA200	南京和晟科技有限公司
红外热像仪	FLIR E53	武汉鸿蒙有限公司

3.1.3 实验方法

首先采用单因素试验设计,具体参数设置详见表 3-2。将预处理后的红豆样品置于微波真空干燥箱内,启动干燥过程并同步计时。在干燥过程中,每间隔 5 min 从干燥箱中取出预先标记的样品,迅速进行质量测定,并将所得数据记录保存。试验持续进行,直至红豆样品达到安全水分含量时终止干燥实验。采用三因素三水平 L9(3⁴)响应面试验设计,系统考察干燥温度(A)、真空度(B)和微波功率(C)三个关键工艺参数对干燥过程的影响,如表 3-3 所示。

表 3-2 红豆微波真空干燥单因素实验方案

试验分组	试验序号	固定条件	试验条件
第一组	1	真空度 0.08 MPa, 微波功率 40 W	55 °C
	2		60 °C
	3		65 °C
第二组	1	微波功率 40 W, 温度 60 °C	0.07 MPa
	2		0.08 MPa
	3		0.09 MPa
第三组	1	真空度 0.08 MPa, 温度 60 °C	20 W
	2		40 W
	3		60 W

表 3-3 红豆微波真空干燥响应面实验

水平	因素		
	干燥温度/°C	真空度/MPa	微波功率/W
1	55	0.07	20
0	60	0.08	40
-1	65	0.09	60

3.2 干燥指标

干燥过程中,测定不同时刻红豆的质量,绘制干燥含水率曲线。红豆的干基水分含量按式(3-1)计算^[53]:

$$X = \frac{m_t - m}{m} \quad (3-1)$$

式中, m_t 为 t 时刻红豆的质量(g); m 为红豆绝干质量(g)。

红豆微波真空干燥水分含量用水分比来表示, 红豆中不同时间水分比按式(3-2)计算:

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} \quad (3-2)$$

式中, m_t 表示任意干燥时刻红豆的干基水分含量(g/g); m_e 表示平衡时红豆干基水分含量(g/g); m_0 表示初始时红豆干基水分含量(g/g)。

由于红豆的平衡水分含量 m_e 远远的小于 m_0 和 m_t , 式(3-2)可简化为式(3-3):

$$MR = \frac{m_t}{m_0} \quad (3-3)$$

3.2.1 红豆水分有效扩散系数

水分有效扩散系数(D_{eff})是表征物料内部水分迁移机制的关键传质参数,在食品干燥动力学研究中具有重要地位。基于菲克第二定律的扩散模型已被广泛应用于农产品干燥过程的数学描述,该模型通过建立 $\ln MR$ 与时间 t 的线性关系来定量计算 D_{eff} 值:

$$\ln MR = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r_e^2} \quad (3-4)$$

$$k = \frac{\pi^2 D_{eff}}{r_e^2} \quad (3-5)$$

式中, D_{eff} 为有效水分扩散系数(m^2/s); r_e 为物料层厚度的一半(m); t 为干燥时间(s); k 为斜率。

3.2.2 红豆干燥活化能

在干燥动力学研究中,水分有效扩散系数与温度的定量关系可通过阿伦尼乌斯方程进行数学表:

$$D_{eff} = D_0 e^{\left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)} \right]} \quad (3-6)$$

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T+273.15)} \quad (3-7)$$

式中, D_0 为物料中的扩散基数定值(m^2/s); E_a 为干燥活化能(kJ/mol); R 为通用气体摩尔常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为物料干燥温度($^{\circ}\text{C}$)。

3.2.3 红豆干燥动力学模型

农产品干燥动力学特性研究通常采用经典数学模型进行表征,主要包括 Page 方程、修正 Page 方程、Lewis 方程以及 Henderson & Pabis 方程等。为评估各模型的适用性,普遍采用决定系数 (R^2)、卡方检验值 (χ^2) 和均方根误差 ($RMSE$) 等统计学指标进行拟合优度分析^[54]。干燥模型见表 3-4。

表 3-4 红豆干燥曲线拟合的数学模型

编号	模型名称	模型公式	线性表达式
1	Page	$MR = e^{-kt^n}$	$\ln(-\ln MR) = \ln k + n \ln t$
2	Modified Page	$MR = e^{(-kt)^n}$	$\ln(-\ln MR) = n \ln k + n \ln t$

续表 3-4

编号	模型名称	模型公式	线性表达式
3	Lewis	$MR = e^{(-kt)}$	$\ln MR = -kt$
4	Henderson & Pabis	$MR = ae^{-kt}$	$\ln MR = \ln a - kt$

在干燥动力学模型筛选过程中, 决定系数 (R^2) 作为首要评价指标, 其数值大小与模型拟合优度呈正相关关系。此外, 模型验证还需结合均方根误差 ($RMSE$) 和卡方值 (χ^2) 进行综合评估, 该两项指标数值与模型预测精度呈负相关关系。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\exp,i} - MR_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{\exp}} - MR_{pre,i})^2} \quad (3-8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{\exp,i})^2}{N}} \quad (3-9)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{\exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (3-10)$$

式中, N 为实验数据个数; n 是所选用干燥动力学模型中参数的个数; $MR_{\exp,i}$ 为试验实际测定第 i 个水分比; $MR_{pre,i}$ 为模型预测第 i 个水分比。

3.2.4 红豆温度均匀性

温度场监测是评估红豆微波真空干燥品质的关键指标。本研究采用红外热成像技术 (精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$) 对干燥过程进行周期性监测 (采样间隔 300s), 通过获取物料表面温度的空间分布特征, 定量表征干燥均匀性。对于物料的温度, 离散值越大, 表明其分布的不均匀程度越高。物料表面的温度数据通过热成像仪内置软件获取, 料层表面不同位置上的温度数值可以使用温度矩阵表达^[55], 如式(3-11)所示:

$$T_{m \cdot n} = \begin{pmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{m1} & \cdots & t_{mn} \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

式中, $T_{m \cdot n}$ 为果浆料层表面的温度矩阵, $m \cdot n$ 为红外图像中物料区域中的像素个数, 即采集温度数据的取样点个数, t_{mn} 为不同位置上的温度值 ($^\circ\text{C}$)。

为了便于计算, 选择具有代表性的 9 个点来测定干燥均匀度。温度离散值 (V_T)

通过式(3-12)计算：

$$V_T = \frac{100 \cdot \sqrt{\sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^n (t_{mn} - \bar{t})^2}}{\bar{t} \cdot \sqrt{m \cdot n}} \quad (3-12)$$

式中， $\bar{t}$ 为温度矩阵 $T_{m \cdot n}$ 中各取样点的平均温度(°C)。

3.3 红豆干燥特性分析

3.3.1 红豆微波干燥的特性曲线

图 3-1 展示了红豆在特定微波真空干燥条件下的干燥曲线。实验结果表明，干燥过程呈现非线性特征，物料温度随时间演变呈现先快速上升后逐渐趋缓的变化规律，干基含水率则表现为持续单调递减趋势。干燥速率动态变化可分为三个典型阶段：初始快速上升期、中期相对稳定期以及后期逐渐衰减期。这种动力学特征充分体现了微波干燥技术的效率优势，其能量传递机制使得水分脱除速率显著高于传统干燥方法。通过对温度及含水率曲线的数学建模分析，发现其变化规律分别符合相应的函数，这一结果为理解微波真空干燥机理提供了重要依据。

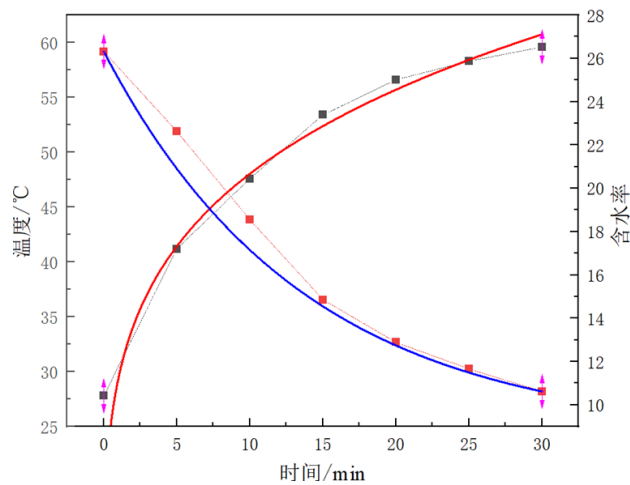


图 3-1 红豆干燥特性曲线图

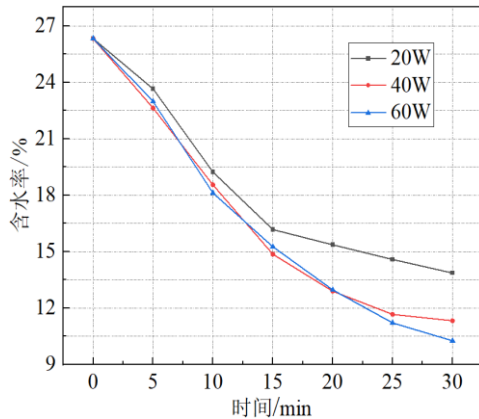
3.3.2 工艺参数对红豆微波干燥特性的影响

(1) 干燥功率对红豆干燥特性的影响

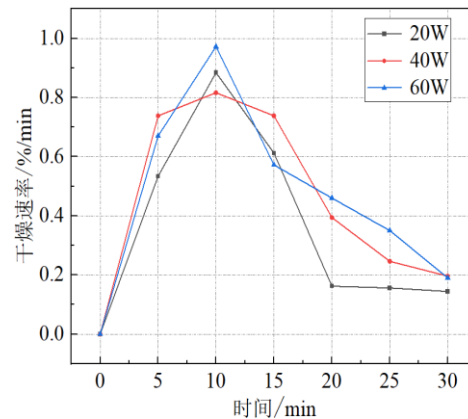
图 3-2 展示了干燥功率对红豆干燥特性的影响规律。从图 3-2(a)可看出，随着功率提升，干基含水率下降速率明显加快。具体表现为：在干燥 5 min 时，功率从 20 W 增至 40 W 和 40 W 增至 60 W 分别使含水率降低 1.02%和 0.35%；至 20 min 时，相应降幅达 2.47%和 0.07%。20-40 W 功率区间的含水率变化最为显著，这主要归因于微波能量输入的增强效应，功率提升使单位时间内作用于物料的微波能

增加,其中 20-40 W 范围的能效提升尤为明显,从而显著加速了水分迁移过程。如图 3-2(b)所示,在 0-10 min 的初始干燥阶段,干燥速率随功率提升而显著增加,其中功率从 40 W 增至 60 W 时速率增幅最大,为 0.156%/min,20 W 增至 40 W 时为 0.068%/min;当干燥时间超过 12 min 后,除 20 W 功率仍保持恒速干燥外,其余功率均进入降速阶段。特别地,20 W/g 功率条件下的干燥过程呈现典型三阶段特征:初期因物料含水率高、介电常数大,干燥速率急剧上升;中期随着含水率降低导致微波吸收减弱,速率趋于稳定;后期因含水率进一步降低而使干燥速率逐渐下降。

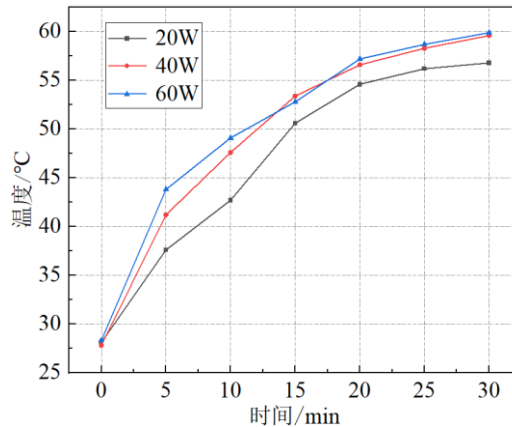
实验结果表明,在高干燥功率条件下,干燥过程呈现加速上升阶段和降速阶段。这种功率依赖性表现为:功率越大,临界转换时间点越早出现。高功率条件下,物料水分迁移速率显著提升,使得在较短时间内即可去除大量水分,导致含水率快速下降而直接进入降速阶段。如图 3-2(c)所示,温度曲线进一步揭示了这一过程:初期因高含水率物料介电常数大,微波热转化效率高,产热大于蒸发耗热,温度快速上升;中后期随着水分减少,产热与蒸发达到动态平衡,温度趋于稳定^[56-57]。



(a) 干燥功率对含水率的影响



(b) 干燥功率对干燥速率的影响



(c) 干燥功率对物料温度的影响

图 3-2 干燥功率对红豆干燥特性的影响

(2)干燥温度对红豆干燥特性的影响

图 3-3 揭示了干燥温度对红豆干燥特性的影响规律。图 3-3(a)结果表明,随着温度从 55℃升至 65℃,物料含水率下降速率有一定的提升,其中 60-65℃温区的脱水效果最为明显,含水率降幅达 4.39%,比 55-60℃温区提升的多。温度升高缩短了达到安全含水率所需的干燥时间。这一现象表明,适当提高干燥温度能提升整体干燥效率。从图 3-3(b)中可以看出,在 55-65℃温度范围内,虽然升温会提高干燥速率,但各温度下的速率差异并不显著。55℃条件下呈现典型的三阶段特征——加速、短暂恒速和降速,而 65℃时则表现为双阶段模式,加速后直接进入降速。这种差异源于较低温度允许物料内部建立暂时性水分平衡,形成短暂的恒速期。如图 3-3(c)所示,红豆物料温度变化呈现典型的双阶段特征:快速升温期和稳定期。提高干燥温度能提升物料最终温度,其中当干燥时间达到 20 min 时,将温度从 60℃提升至 65℃可使物料温度由 54.6℃升至 56.7℃,增幅最为明显。

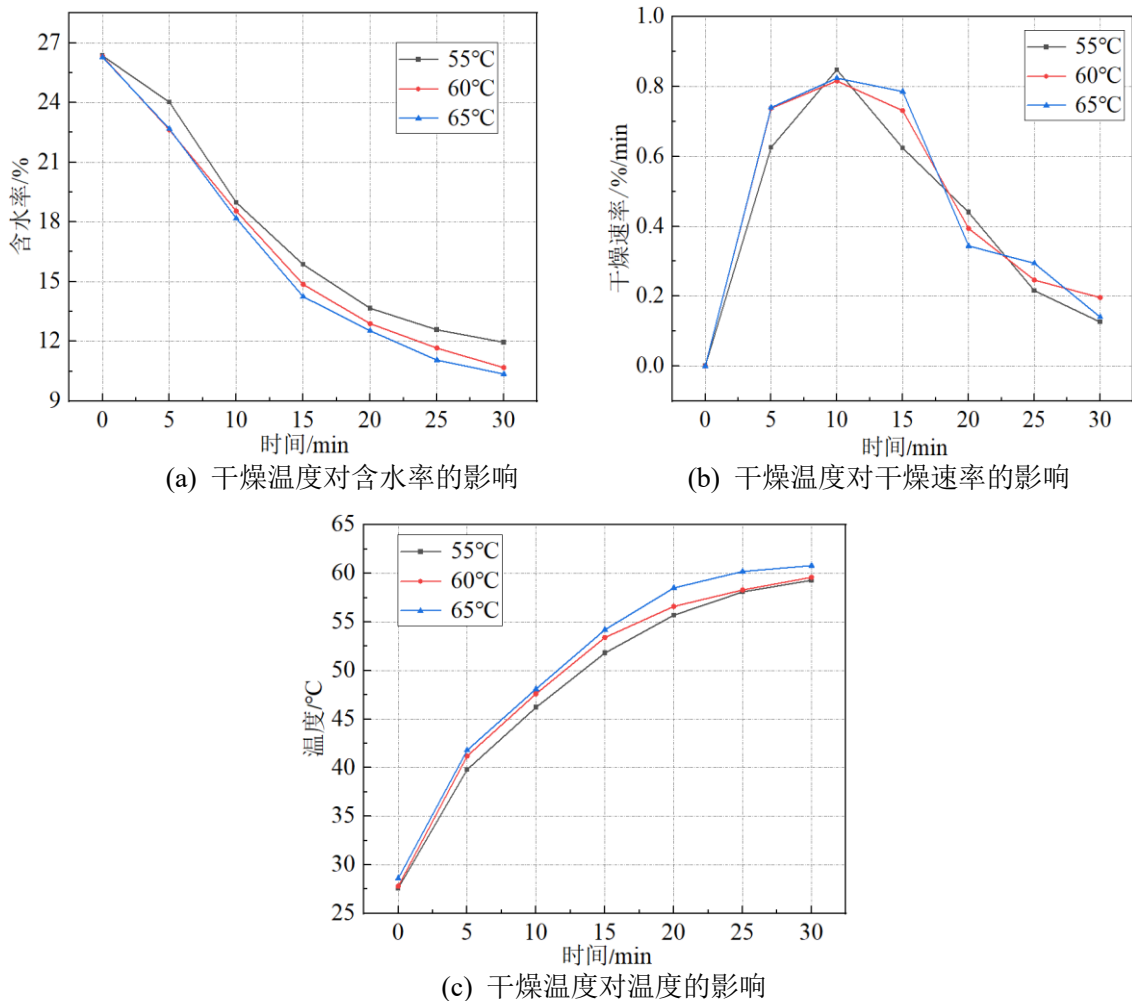


图 3-3 干燥温度对红豆干燥特性的影响

(3)真空度对红豆干燥特性的影响

如图 3-4(a)所示, 在 0.07-0.09 MPa 真空度范围内, 红豆物料含水率下降幅度呈现非线性变化特征: 当真空度从 0.07 MPa 到 0.08 MPa 时, 脱水效率略有降低, 降幅为 5.2%; 真空度从 0.08MPa 到 0.09 MPa 时, 含水率下降幅度进一步减小。主要原因是, 高真空度促进水蒸气排出, 增强微波能量吸收效率; 过高的真空度会加速物料表面水分蒸发, 导致热质传递失衡。如图 3-4(b)所示, 在干燥速率上升阶段, 真空度变化对干燥速率的影响呈现非线性特征: 当真空度从 0.09 MPa 降至 0.08 MPa 时, 干燥速率略有提升; 而继续降至 0.07 MPa 时则出现小幅下降。值得注意的是, 在 0.07-0.08 MPa 条件下, 干燥过程呈现典型的三阶段特征(加速、短暂恒速和降速), 其中恒速阶段持续时间较短; 而在 0.09 MPa 时则简化为双阶段模式, 临界时间点为 14.8 min。如图(c)所示, 红豆物料的温度变化呈现明显的两阶段特征: 初始快速升温期和后期稳定期。结果表明, 提高真空度会导致物料最终温度降低。

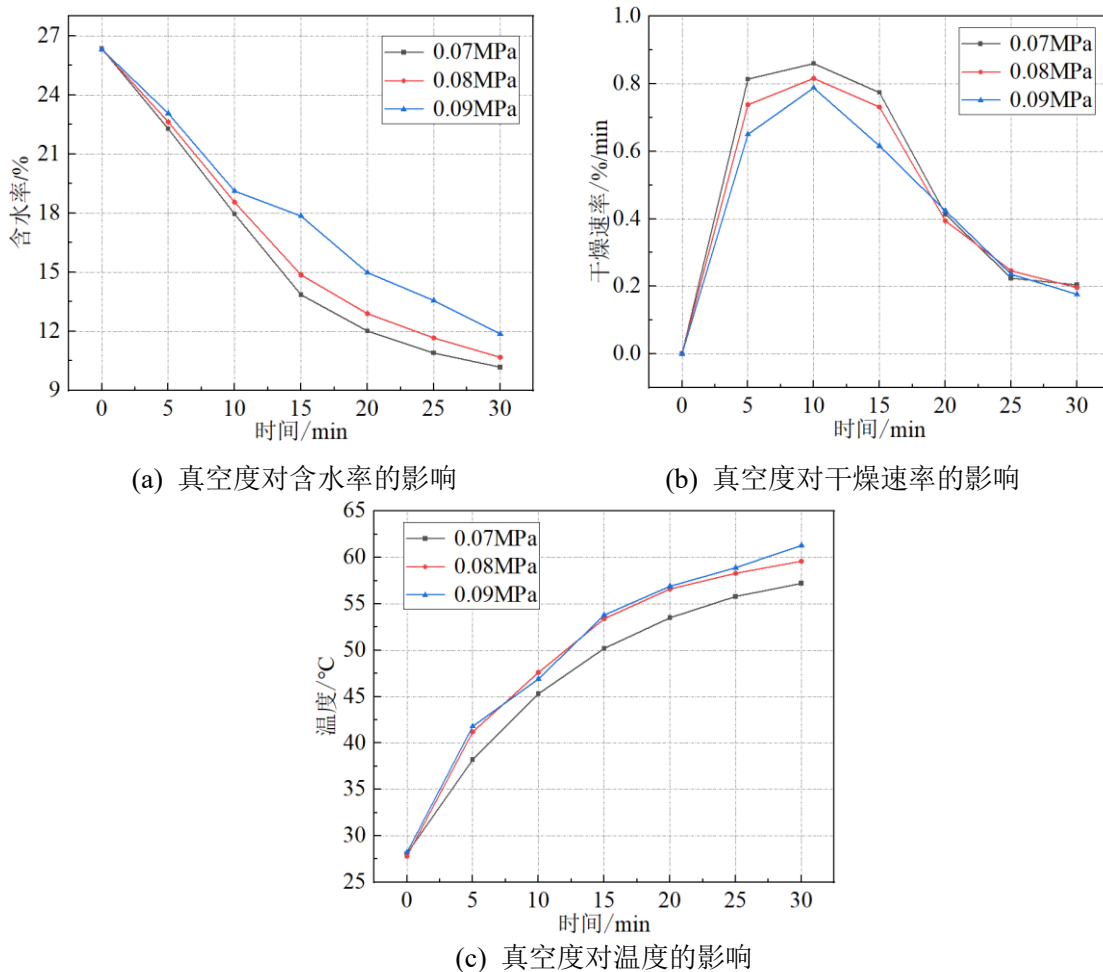
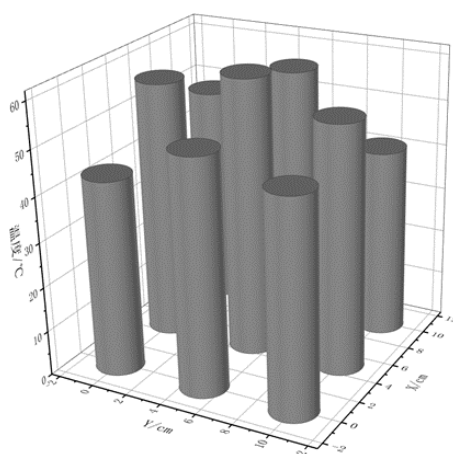


图 3-4 干燥真空度对红豆干燥特性的影响

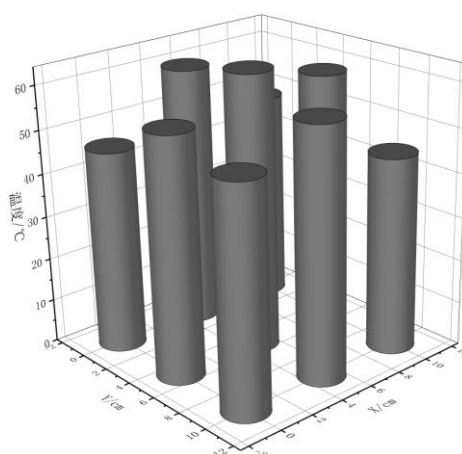
3.4 干燥因素对温度均匀性影响及工艺优化

3.4.1 干燥功率对红豆温度均匀性的影响

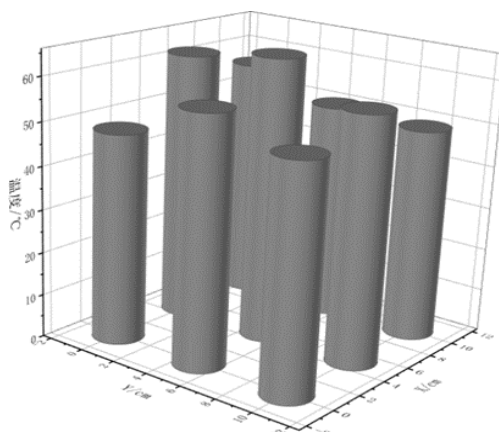
微波功率对红豆干燥制品温度均匀性的影响如图 3-5 所示。通过红外热成像技术检测发现，随着输入功率从 20 W 增至 60 W，温度均匀度指数呈现显著上升趋势。实验结果表明，当微波干燥功率提升时，红豆样品内部温度分布趋于均匀，其最大温差由 21.5℃降低至 16.9℃。这种温度场均匀性的改善主要源于微波能量在物料内部的吸收和衰减特性变化。具体而言，较高功率条件下，微波能的空间分布更为均衡，从而减小了样品不同部位间的温度梯度。该现象符合微波加热的选择性热效应理论，在物料内部，水分含量梯度与微波能吸收系数的正相关性导致中心区域产生更多焦耳热，而边缘区域由于水分蒸发导致的降温效应形成温度补偿。值得注意的是，当功率超过阈值时，物料表面会出现局部过热现象，此时温度均匀度指数的提升速率趋缓，这可能与物料表面结壳引起热质传递阻力增加有关。



(a) 干燥功率为 20 W



(b) 干燥功率为 40 W



(c) 干燥功率为 60 W

图 3-5 不同干燥功率下红豆温度分布

表 3-5 展示了不同微波功率条件下红豆干制品的温度分布特征参数。实验数据显示,随着微波功率的增强,样品整体平均温度呈现显著上升趋势,同时温度分布的离散程度明显降低。表明提高干燥功率可有效改善物料内部温度场的均匀性^[58]。

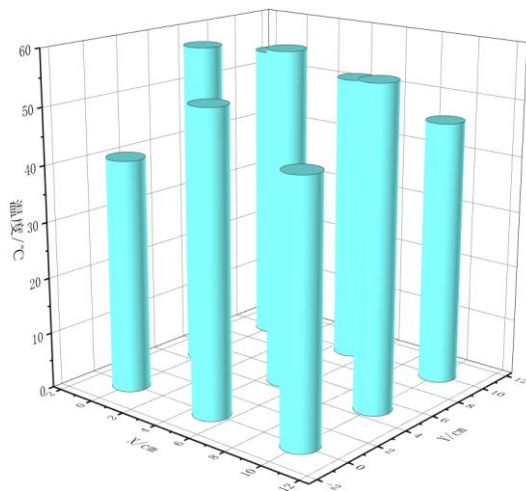
表 3-5 不同功率下红豆的温度分布特征值

特征指标/°C	最低温度	最高温度	平均温度	温度均匀度	温差
干燥条件 20W	39.6	61.1	51.58	6.556	19.5
40W	45.2	63.6	54.23	6.465	18.4
60W	48.6	65.5	55.34	6.371	16.9

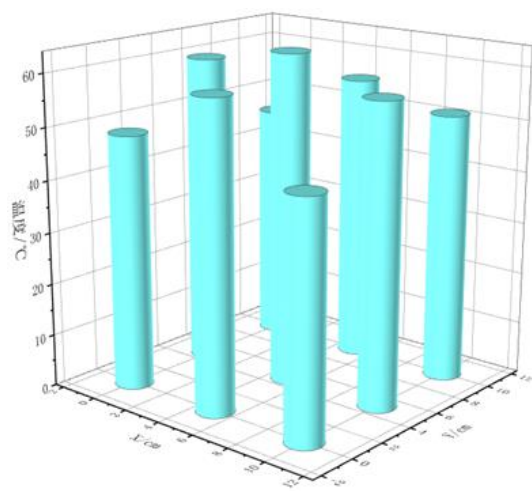
3.4.2 干燥温度对红豆温度均匀性的影响

图 3-6 展示了不同干燥温度下的温度分布特征。结合表 3-6 可以看出,60 °C干燥条件下温度分布相对均匀,而 65 °C时温度梯度显著增大,且呈现明显的中心-边缘温度梯度。温度分布不均现象随干燥温度升高而加剧,具体表现为:中心区域温度持续偏高,边缘部位出现局部过热,温度均匀性下降。这种热分布特性与微波能的穿透衰减效应密切相关,当温度超过临界值时,物料介电特性改变导致能量吸收失衡,进而引发边缘焦糊现象^[59]。

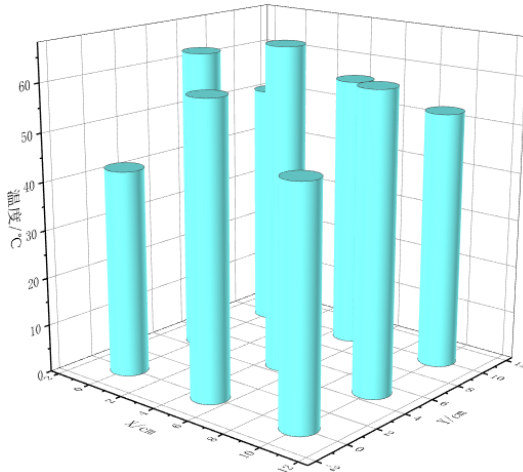
高温条件下,物料内部温度场的离散程度增大,均匀性降低。当微波功率恒定且干燥温度提升时,物料内部水分汽化产生的蒸汽压梯度增大,导致传质阻力系数上升。这种现象引发干燥初期中心-湿区温度梯度的快速形成,随着干燥进程推进,局部干燥速率差异扩大,最终表现为物料整体干燥均匀性下降。该结果与微波加热的选择性热效应一致,即高温环境下物料介电损耗的空间分布异质性加剧,从而形成非对称温度场。



(a) 干燥温度为 55°C



(b) 干燥温度为 60°C



(c) 干燥温度为 65°C

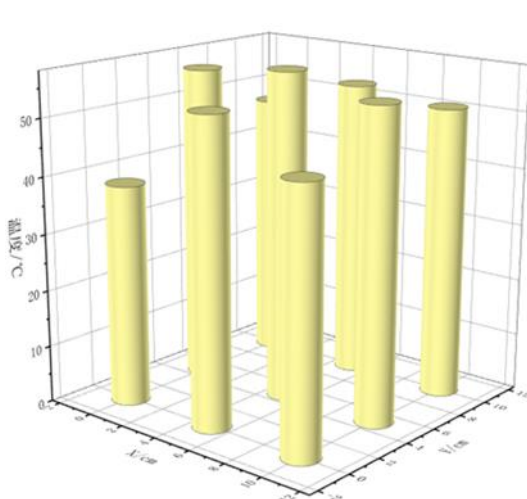
图 3-6 不同干燥温度下红豆温度分布

表 3-6 不同温度下红豆的温度分布特征值

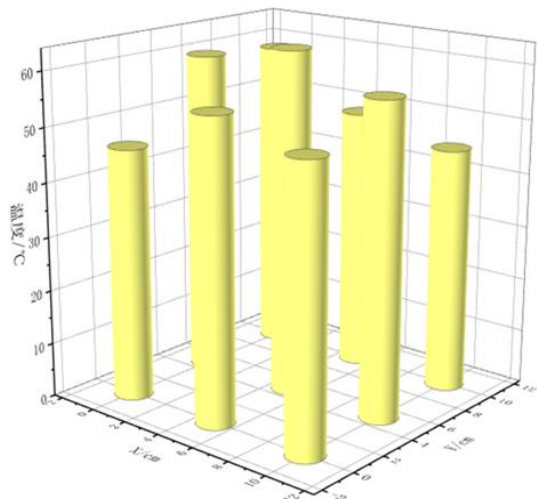
特征指标/°C	最低温度	最高温度	平均温度	温度均匀度	温差
干燥条件 55°C	43.3	59.9	51.97	6.261	16.6
60°C	45.6	63.9	54.45	6.418	18.3
65°C	47.9	67.2	56.27	6.951	19.5

3.4.3 真空度对红豆温度均匀性的影响

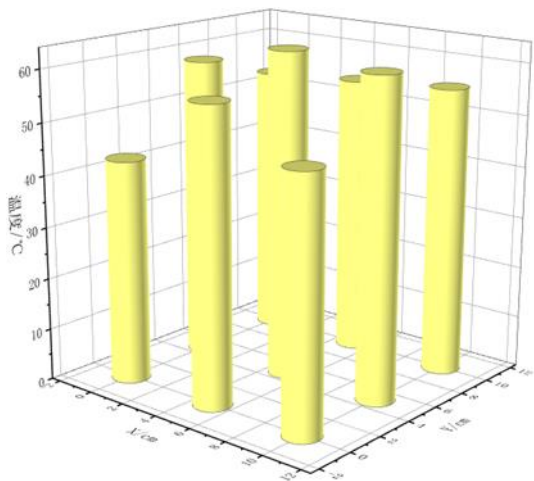
图 3-7 和表 3-7 的实验数据揭示了真空度对温度分布的影响规律：在不同真空度条件下，红豆干燥品均呈现中心高温、边缘低温的分布特征，真空度的改变可使温度均匀性提升。具体表现为：当真空度从 0.09 MPa 到 0.07 MPa 时，平均温度和最高温度发生了变化，温度均匀度提高。这种改善效应源于高真空环境增强了水蒸气排出效率，有效抑制了边缘区域的能量积聚，从而优化了整体温度场分布。上述结果表明调控真空参数是改善干燥均匀性的有效途径^[60]。



(a) 真空度为 0.07 MPa



(b) 真空度为 0.08 MPa



(c) 真空度为 0.09 MPa

图 3-7 不同真空度下红豆温度分布

表 3-7 不同真空度下红豆的温度分布特征值

特征指标/°C		最低温度	最高温度	平均温度	温度均匀度	温差
干燥条件	0.07MPa	42.8	60.6	51.65	6.258	17.8
	0.08MPa	45.1	63.3	54.37	6.465	18.2
	0.09MPa	46.4	65.5	55.63	6.952	19.1

3.4.4 基于响应面分析的工艺条件优化

模型建立与显著性检验，确定响应面试验优化微波干燥红豆最佳工艺条件，系统考察了干燥温度(A)、真空度(B)和微波功率(C)三个关键参数对干燥特性的影响。通过回归分析和方差分析对模型进行拟合，确定模型的显著性。在拟合过程中，使用一些关键参数来确定模型的拟合程度。 R^2 是决定系数，随着 R^2 值的增大，模型的拟合效果变好。所得的试验设计和结果见表 3-8。

表 3-8 响应面试验结果

试验号	功率	干燥温度	真空度	温度/°C	含水率/%
1	0	-1	-1	53.6	12.24
2	0	0	0	59.9	10.59
3	0	1	-1	57.2	9.88
4	0	0	0	59.3	10.55
5	-1	0	-1	48.8	10.85
6	-1	1	0	58.6	11.79
7	0	1	1	63.6	8.76
8	1	-1	0	60.6	11.23
9	0	0	0	59.7	10.57
10	-1	-1	0	51.6	12.65
11	0	0	0	59.2	10.62

续表 3-8

试验号	功率	干燥温度	真空度	温度/℃	含水率/%
12	-1	0	1	61.5	11.52
13	1	1	0	63.6	9.89
14	1	0	-1	53.9	8.58
15	0	-1	1	57.9	13.12
16	1	0	1	64.8	12.16
17	0	0	0	59.5	10.63

对表 3-8 的试验数据进行多元回归拟合，得到微波干燥的含水率二次多项回归模型方程为：

$$Y=11.04176-1.2650A-0.495B-0.43C-0.37AB+1.155AC-0.51BC+0.53A^2+0.51B^2-0.099C^2。 \quad (3-13)$$

对该模型进行显著性检验，结果见表 3-9。

表 3-9 回归方程系数显著性检验

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	25.64	9	3.87	5.42	0.0183	**
A	12.85	1	12.85	24.44	0.0017	**
B	1.96	1	1.96	3.73	0.0948	
C	1.48	1	1.48	2.81	0.1374	
AB	0.55	1	0.55	1.04	0.3415	
AC	5.34	1	5.34	10.15	0.0154	*
BC	1.04	1	1.04	1.98	0.2024	
A ²	1.19	1	1.19	2.26	0.1767	
B ²	1.10	1	1.10	2.09	0.1915	
C ²	0.041	1	0.041	0.08	0.7875	
残差	6.10	10	0.61			
失拟项	6.08	6	1.01	236.02	<0.0001	**
纯误差	0.021	4	0.0517			
总误差	29.32	16				

注：*表示影响显著， $P<0.05$ ；**表示影响极显著， $P<0.01$

含水率回归模型的统计学分析表明：1) 模型整体显著性检验证实自变量与因变量存在显著相关性；2) 失拟检验显示模型不存在显著拟合不足问题；3) 方差分析显示 X2 的一次项和二次项 (X12、X22、X32) 对含水率有显著影响。模型具有较高的拟合度，能有效表征微波功率等工艺参数与含水率之间的定量关系。

基于响应面分析结果，各工艺参数对含水率的影响可通过响应曲面斜率进行评估。如图 3-8 所示，在 0.08 MPa 真空度条件下，干燥温度与微波功率的交互效

应表现为：固定干燥温度时，含水率与微波功率呈负相关；固定微波功率时，含水率随干燥温度升高而降低。这表明提高热能输入可促进红豆内部水分的迁移扩散。

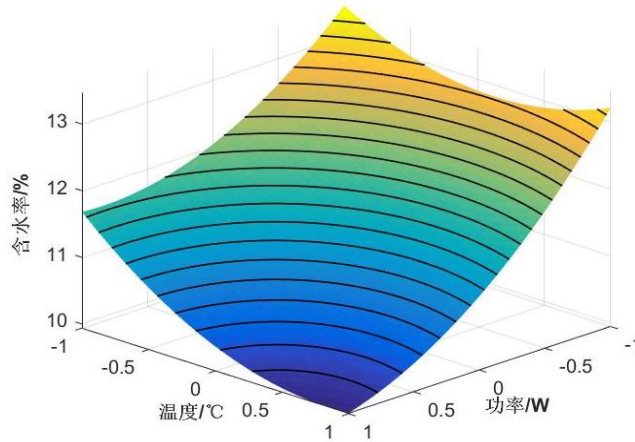


图 3-8 温度和功率对含水率交互影响

图 3-9 展示了 60 °C干燥条件下真空度与微波功率的协同作用机制。研究结果表明：固定微波功率时，真空度降低会使干燥速率降低，最终含水率提高，这归因于真空环境降低水分蒸发焓；恒定真空度下，功率从 20 W 增加到 60 W，可使干燥速率提升，含水率降低，其机理在于电磁场增强促使极性分子运动加剧。

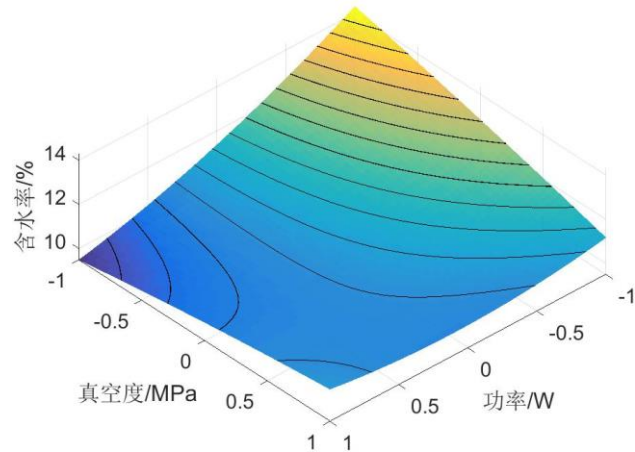


图 3-9 真空度和功率对含水率交互影响

微波功率为 40 W 时，干燥温度和真空度交互作用对含水率的影响如图 3-10 所示。真空度一定时，干燥温度越高，红豆干燥速率越快；因为当干燥温度较小时，红豆内部的水分获得热量较少，只能有部分水分挥发出去，使红豆干燥速率变慢从而导致红豆含水率较高。当干燥温度一定时，真空度越低，红豆干燥速率越快，含水率越低红豆内部水分子蒸发所需能量越低，能在低温下干燥。因此为加快红豆干燥速率，应尽可能降低真空度，增大微波功率^[61]。

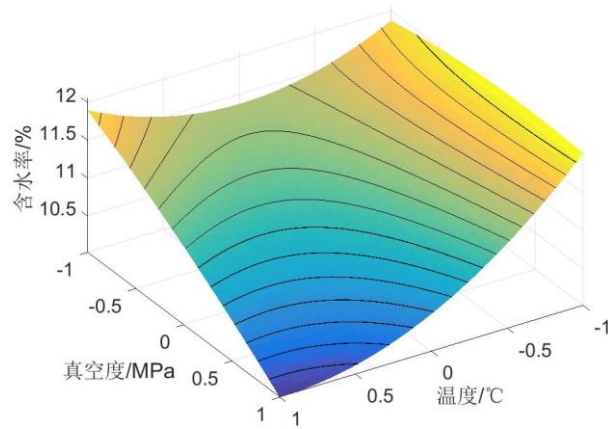


图 3-10 温度和真空度对含水率交互影响

基于响应面优化分析，确定红豆微波真空干燥的最优工艺参数为：微波功率 57.32 W、真空度 0.078 MPa、干燥温度 62.31 °C，此时预测含水率为 10.16%。考虑到设备调控精度，将参数修正为：功率 57 W、真空度 0.078 MPa、温度 62.5 °C 进行验证实验。实验结果显示平均含水率为 10.32%±0.15%，与预测值的相对误差为 1.55%（<5%的允许误差阈值），证实了响应面模型的可靠性。该结果验证了采用响应面法优化热敏物料干燥工艺的可行性^[62]。

3.5 红豆微波干燥动力学模型构建

3.5.1 红豆干燥过程中的水分扩散系数

表 3-10 数据揭示了红豆微波干燥过程中水分有效扩散系数（ D_{eff} ）的变化规律：在固定其他参数条件下，当微波功率从 20 W 增至 60 W 时， D_{eff} 由 $2.9768 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 线性提升至 $3.3335 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ，增长率为 12%；相同条件下，干燥温度由 55 °C 升至 65 °C 时， D_{eff} 从 $3.0123 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 增至 $3.3081 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ，增幅 9.8%，符合 Arrhenius 温度效应规律。真空度的影响呈现非线性特征，这归因于低压环境下气体传质阻力的增加。多元回归分析表明，三因素对 D_{eff} 的影响显著性排序为：真空度 > 功率 > 温度。

表 3-10 不同干燥条件对红豆水分扩散系数影响

干燥条件	决定系数	卡方	有效水分扩散系数
20 W	0.96679	0.02075	2.9768×10^{-7}
40 W	0.98018	0.01412	3.2007×10^{-7}
60 W	0.98779	0.00936	3.3335×10^{-7}
55 °C	0.98943	0.00661	3.0123×10^{-7}

续表 3-10

干燥条件	决定系数	卡方	有效水分扩散系数
60 °C	0.98118	0.01439	3.2125×10^{-7}
65 °C	0.96996	0.02312	3.3081×10^{-7}
0.07 MPa	0.96680	0.02705	3.3993×10^{-7}
0.08 MPa	0.97895	0.01378	3.2056×10^{-7}
0.09 MPa	0.98127	0.00744	2.4378×10^{-7}

3.5.2 红豆干燥活化能的计算

干燥活化能 (E_a) 是表征物料脱水过程能量壁垒的关键热力学参数, 其物理意义为克服水分子与物料基质结合力所需的最小势能。 $\ln D_{eff}$ 与 $\frac{1}{T+273.15}$ 的变化曲线如图 3-11 所示, 根据其斜率可求得干燥活化能为 10.427 kJ/mol, 表达式的相关系数为 0.95858, 两者的关系表达式为:

$$\ln D_{eff} = -1.25245 / (T + 273.15) - 11.83119 \quad (3-14)$$

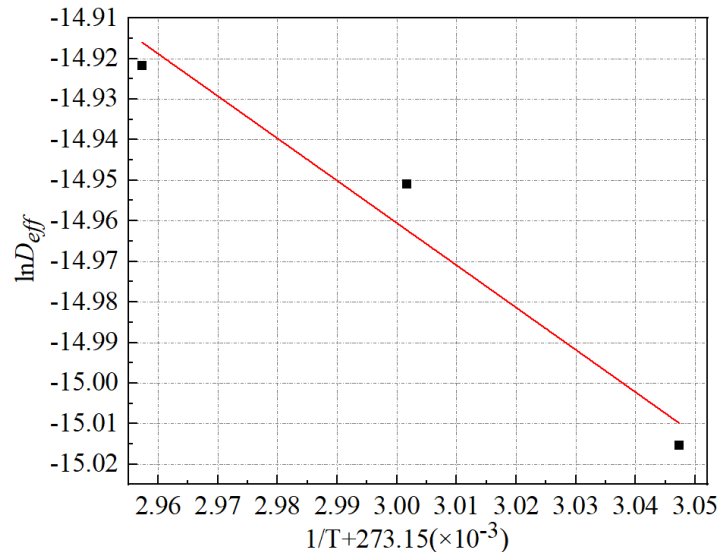


图 3-11 有效水分扩散系数与温度关系

3.5.3 干燥模型拟合与选用

为构建红豆微波干燥过程的数学模型, 本研究基于薄层干燥理论选取了四种典型动力学模型 (Page、Henderson & Pabis、Lewis 及 Modified Page 模型)。通过将不同工艺参数下的水分比与时间实验数据进行线性化处理, 采用非线性回归方法对各模型参数进行优化拟合。模型评价指标包括决定系数 (R^2)、卡方检验 (χ^2) 和均方根误差 ($RMSE$), 最终筛选出最优拟合模型。

(1)不同真空度下模型选择

在 40 W 微波功率和 0.08 MPa 温度条件下, 通过对比四种干燥模型在不同真空度下的拟合效果(表 3-11)发现, Lewis 模型的 R^2 值最高(0.98933~0.99366), 且具有最低的 $RMSE$ (0.00980~0.16279)和 χ^2 值(0.09165~0.03092), 表明其预测结果与实际数据吻合度最佳; 而 Modified Page 模型表现最差($R^2=0.96976\sim0.98206$)。基于此, 本研究选用 Lewis 模型来模拟红豆微波真空干燥过程。

表 3-11 不同真空度下红豆微波干燥拟合结果

模型	真空度 /MPa	模型参数	决定系数 R^2	卡方 χ^2	残差平方 和 $RMSE$
Page	0.07	$k=0.03774, n=0.98976$	0.97312	0.05940	0.19899
	0.08	$k=0.03196, n=1.02336$	0.98206	0.04633	0.17012
	0.09	$k=0.02775, n=0.97985$	0.96976	0.06573	0.20933
Lewis	0.07	$k=0.03552$	0.98933	0.03092	0.16279
	0.08	$k=0.03281$	0.99366	0.01563	0.11575
	0.09	$k=0.02549$	0.99341	0.00980	0.09165
Henderson&Pabis	0.07	$a=0.95849, k=0.03355$	0.96880	0.02705	0.13902
	0.08	$a=0.96893, k=0.03068$	0.98116	0.01536	0.10286
	0.09	$a=0.97458, k=0.02427$	0.98001	0.00841	0.07750
Modified Page	0.07	$n=0.10166, k=0.03649$	0.97312	0.05940	0.19899
	0.08	$n=1.02545, k=0.32167$	0.98206	0.04633	0.17012
	0.09	$n=0.96889, k=0.02578$	0.96976	0.06573	0.20933

(2)不同微波功率下模型选择

在恒定干燥温度(60 °C)和真空度(0.08 MPa)条件下, 四种干燥模型对不同微波功率的拟合效果如表 3-12 所示。模型拟合优度排序为: Lewis 模型($R^2=0.9897\sim0.9963$)>Henderson & Pabis 模型($R^2=0.9801\sim0.9967$)>Modified Page 模型>Page 模型。所有模型的决定系数均超过 0.9, 表明其对不同功率条件的适应性良好。进一步分析显示, Lewis 模型和 Henderson & Pabis 模型不仅具有较高的决定系数, 同时表现出较低的 $RMSE$ (<0.015) 和 χ^2 值 (<0.0005), 说明这两种模型能准确预测该干燥条件下的水分变化规律。基于综合比较, Lewis 模型展现出最优的预测性能, 故被选定为微波真空干燥红豆的最佳动力学模型。

表 3-12 不同微波功率下红豆微波干燥拟合结果

模型	微波功率/W	模型参数	决定系数 R^2	卡方 χ^2	残差平方 和 $RMSE$
----	--------	------	---------------	-------------	------------------

续表 3-12

模型	微波功率/W	模型参数	决定系数 R^2	卡方 χ^2	残差平方和 RMSE
Page	20	$k=0.01971, n=1.14945$	0.95931	0.12304	0.28640
	40	$k=0.03185, n=1.01754$	0.98181	0.04212	0.16757
	60	$k=0.02749, n=1.07345$	0.97851	0.05555	0.19243
Lewis	20	$k=0.03016$	0.98978	0.02137	0.13534
	40	$k=0.03266$	0.99639	0.01612	0.11672
	60	$k=0.03364$	0.99616	0.00991	0.09216
Henderson&Pabis	20	$a=0.98322, k=0.02938$	0.99679	0.02075	0.12174
	40	$a=0.97392, k=0.03159$	0.98018	0.01412	0.10043
	60	$a=0.98409, k=0.03292$	0.98779	0.00936	0.08176
Modified Page	20	$n=1.14952, k=0.03283$	0.95931	0.12304	0.28640
	40	$n=1.01826, k=0.03380$	0.98181	0.04212	0.16757
	60	$n=1.07623, k=0.03516$	0.97851	0.05555	0.19243

(3)不同干燥温度下模型选择

在固定真空度和微波功率条件下, 不同干燥温度对四种干燥模型拟合效果的影响如表 3-13 所示。模型拟合优度排序为: Lewis 模型 ($R^2=0.9905-0.9965$) > Modified Page 模型 ($R^2=0.9704-0.9875$) > Page 模型 > Henderson & Pabis 模型 ($R^2=0.9699-0.9894$)。其中, Lewis 和 Modified Page 模型展现出最优的预测性能, 其 RMSE (<0.018) 和 χ^2 值 (<0.0006) 均显著低于其他模型。综合比较各模型的统计指标, Lewis 模型因其更高的决定系数和更低的误差值, 被确定为预测不同干燥温度下红豆微波真空干燥动力学行为的最优模型。

表 3-13 不同干燥温度下红豆微波干燥拟合结果

模型	干燥温度/ $^{\circ}\text{C}$	模型参数	决定系数 R^2	卡方 χ^2	残差平方和 RMSE
Page	55	$k=0.02949, n=1.01822$	0.98758	0.02862	0.13885
	60	$k=0.03069, n=1.02688$	0.98121	0.04533	0.17329
	65	$k=0.03110, n=1.04029$	0.97047	0.07228	0.21951
Lewis	55	$k=0.03058$	0.99656	0.00734	0.07932
	60	$k=0.03298$	0.99535	0.01583	0.10965
	65	$k=0.03414$	0.99053	0.02536	0.14743
Henderson&Pabis	55	$a=0.98176, k=0.02973$	0.98943	0.00661	0.06871
	60	$a=0.97562, k=0.03086$	0.98365	0.01566	0.11068
	65	$a=0.96825, k=0.03265$	0.96996	0.02312	0.12851
Modified Page	55	$n=1.01913, k=0.03141$	0.98758	0.02862	0.13885

续表 3-13

模型	干燥温度/ $^{\circ}\text{C}$	模型参数	决定系数 R^2	卡方 χ^2	残差平方和 RMSE
	60	$n=1.02712, k=0.03306$	0.98121	0.04533	0.17329
	65	$n=1.04311, k=0.03558$	0.97047	0.07228	0.21951

3.5.4 干燥模型的验证

为验证回归模型与试验数据的拟合准确度，选择微波功率 40 W、干燥温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 、真空度为 0.08 MPa 的试验数据与同等条件下的拟合值对比和验证，结果如图。由图 3-12 可知，Lewis 模型的预测值与试验值基本拟合相关系数为 0.981，两者极显著相关($P < 0.01$)，表明 Lewis 模型能够较好地预测红豆微波干燥规律。

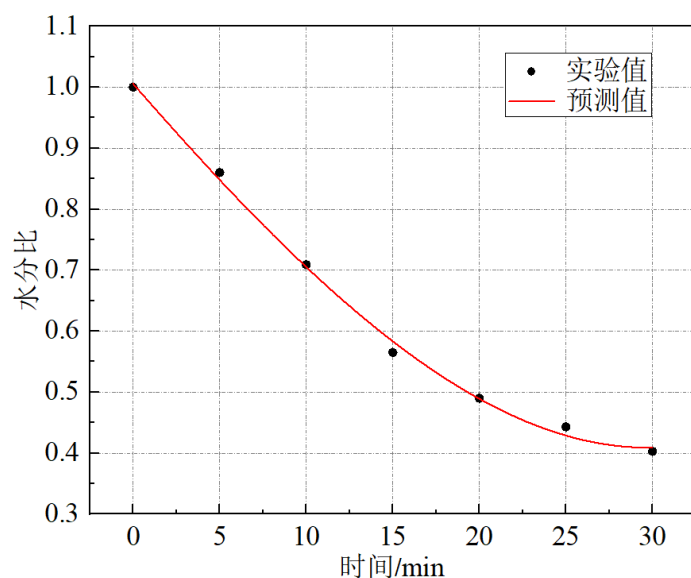


图 3-12 红豆微波干燥动力学拟合验证曲线

3.6 BP 神经网络算法预测含水率

神经网络是一种受生物神经系统启发而构建的计算模型。其中，BP 神经网络作为人工神经网络的典型代表，在研究和应用领域都占据重要地位。这种网络结构能够模拟人脑的信息处理方式，实现数据的存储、检索和分析，并展现出良好的容错特性。基于这些优势，BP 神经网络特别适用于复杂系统的建模与控制任务。

3.6.1 神经元数量的确定

本文构建的神经网络预测模型采用典型的三层前馈神经网络架构，包含输入层、隐含层和输出层三个基本组成部分。根据隐含层配置的不同，该网络可分为单隐含层结构与多隐含层结构。其中，多隐含层结构通过增加非线性变换层次提升模

型的表达能力，相较于单隐含层结构，预测误差降低 8-10%，但训练时间复杂度呈指数级增长。隐含层层数的确定需在模型复杂度与计算效率间进行权衡。对于具有简单非线性映射关系的干燥过程建模，采用单隐含层结构即可满足预测精度要求。而对于涉及多场耦合的复杂系统，需采用多层隐含层结构^[63]。因此，根据本文研究的需求，本文选择单隐含层。算法流程图如图 3-13 所示。

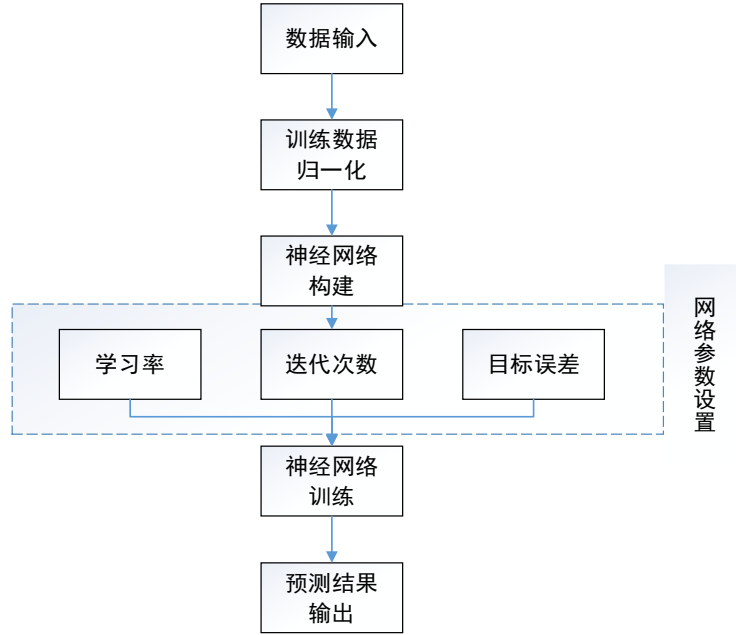


图 3-13 算法流程图

神经元过多会延长训练时间，可能导致不收敛；神经元过少则会使模型欠拟合，难以准确表征输入输出间的非线性关系。因此，隐含层中神经元个数的确定尤为关键^[64]。在红豆干燥工艺优化研究中，干燥温度、微波功率及真空度作为关键工艺参数，均显著影响物料最终含水率^[65]。隐含层节点数 k 可以根据公式 3-15 确定。

$$\begin{cases} k > n-1 \\ k < \sqrt{m+n} + a \\ k = \log_2 a \\ k = 2n-1 \end{cases} \quad (3-15)$$

式中， n 为输入层节点数； k 为隐含层节点数； m 为输出层节点数； a 为 0~10 之间的常数。

根据式 3-15 确定隐含层节点数 $5 \leq k \leq 12$ ，通过网格搜索法确定 BP 神经网络最优隐含层维度。训练过程中采用均方误差作为评价指标。该网络架构由以下核心组件构成，加权求和单元，非线性激活函数，可调连接权矩阵。其信息传递机制表现

为：输入特征经前向传播时，各权值通过规则动态调整，最终输出进行归一化处理^[66]。作为典型的多层前馈网络，其三层拓扑结构（输入-隐含-输出）通过误差反向传播算法实现监督学习。神经网络原理如图 3-14 所示。

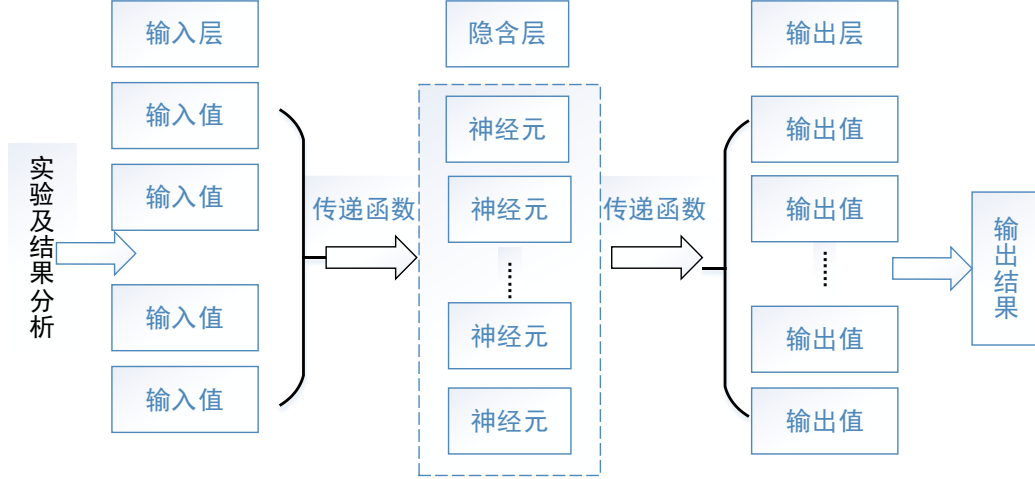


图 3-14 神经网络原理图

3.6.2 BP 神经网络样本数据的预处理

本研究采用随机分层抽样方法将实验数据按 7:3 比例划分为训练集与测试集。为消除量纲差异并优化网络收敛性能，所有输入变量均经过标准化处理。考虑到 BP 神经网络激活函数的输出范围限制，相应地对目标变量进行了归一化转换。按式 3-16 对原始数据进行归一化处理^[67]。

$$P = \frac{P_1 - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (3-16)$$

式中， P 为输入数据； P_1 为原始数据； $P_{\min}$ 为相应指标的最小值； $P_{\max}$ 为相应指标的最大值。

3.6.3 性能评价指标

在 BP 神经网络预测模型的性能评估中，需要综合考察模型的拟合效果、泛化能力和预测准确性。本研究采用双维度评价体系。

(1)模型相关性检验指标，引入决定系数 R^2 和均方根误差 $RMSE$ 评估预测偏差。其值越小表明模型精度越高； R^2 越接近 1 代表拟合效果越理想。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (3-17)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-18)$$

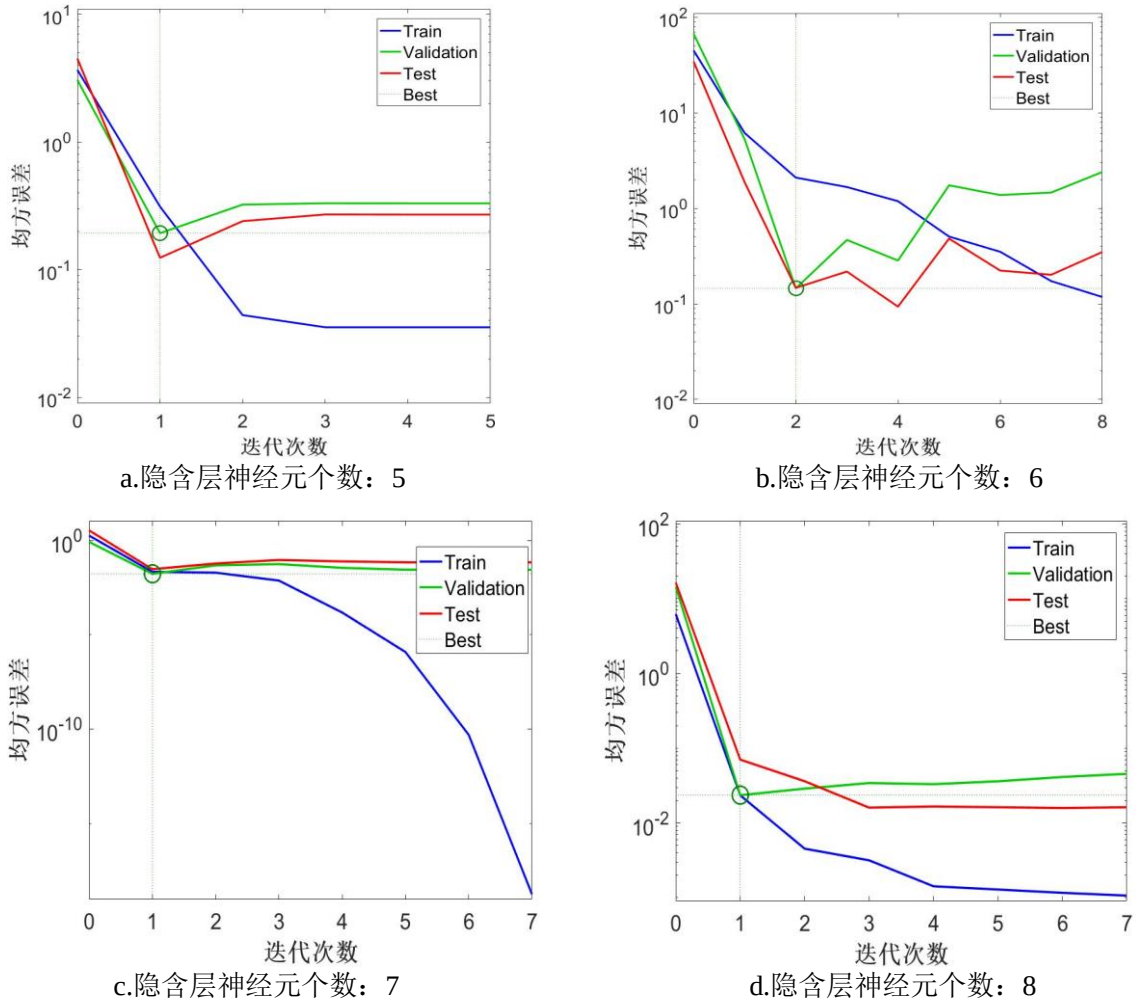
式中, y_k 为样本真实值, $\hat{y}_k$ 为样本预测值, $\bar{y}$ 为样本均值, n 为样本总数。

(2)模型预测精度检验指标, 神经网络模型通过相关性检验仅能证明其具备基础的预测功能。为进一步验证模型的实际预测性能, 本研究额外引入平均绝对百分比误差(MAPE)作为精度评价指标, MAPE 不受量纲影响, 其计算表达式为:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|y_k - \hat{y}_k|}{y_k} \times 100\% \quad (3-19)$$

3.6.4 BP 神经网络预测模型建立

基于上文含水率预测模型设计, 基于 MATLAB 平台构建 BP 神经网络预测模型, 最终确定网络模型结构为“3-K-1”。对红豆微波干燥含水率预测模型进行训练及验证^[68]。在构建红豆干燥含水率的 BP 神经网络预测模型时, 采用单隐含层结构设计, 不同节点数训练过程收敛曲线如图 3-15 所示。



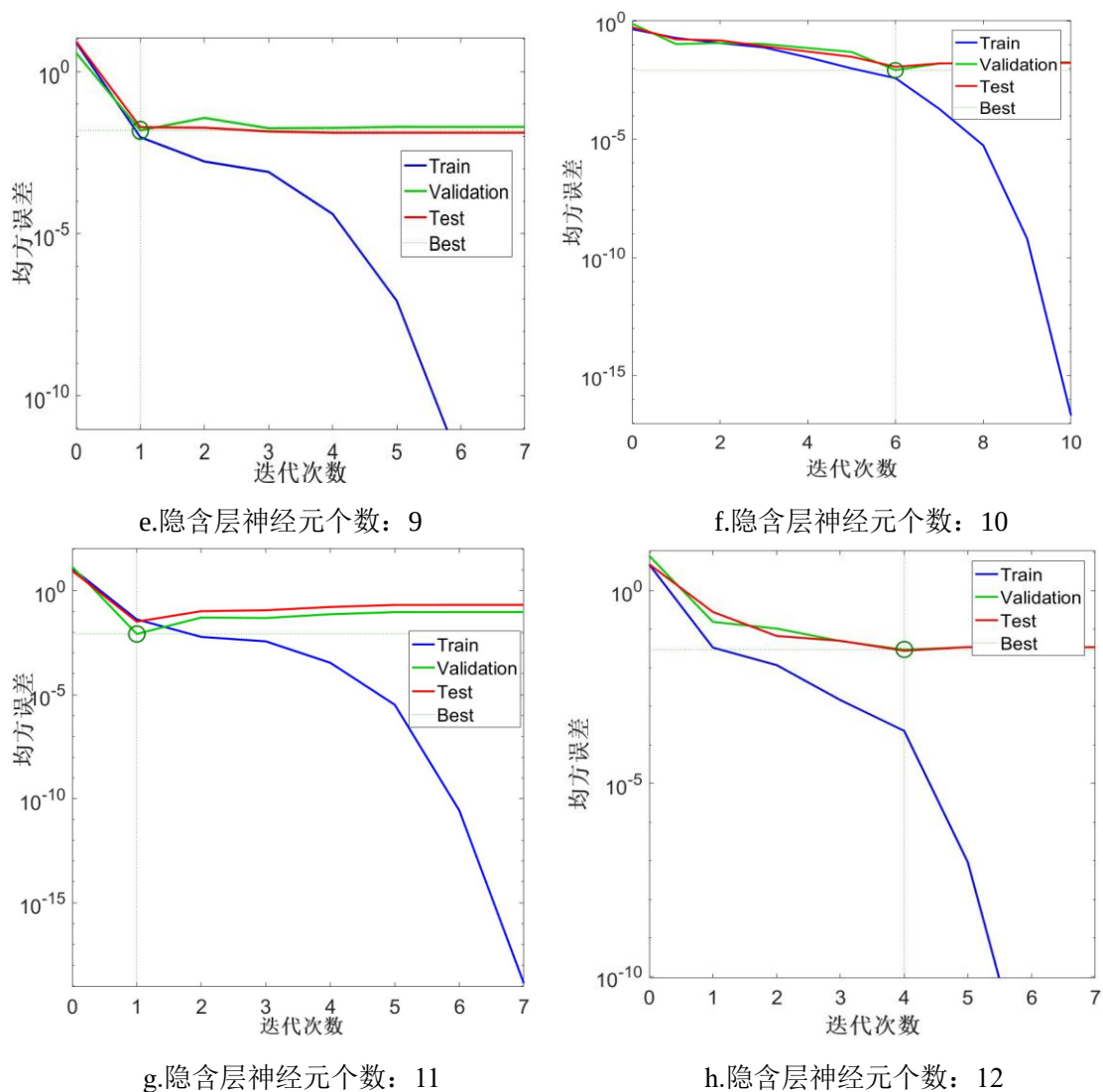


图 3-15 隐含层神经元训练结果

隐含层神经元数目与 BP 神经网络 $RMSE$ 和训练迭代次数的对应关系如表 3-14 所示。从表中内容可以看出，当隐含层神经元个数为 11 时均方误差最小，为 0.0084，且所需的迭代次数仅需要 2 次，收敛速度较快，故本实验选择神经元数量为 11 个。

表 3-14 微波真空干燥红豆 BP 神经网络隐含层不同节点训练结果

节点数	$RMSE$	迭代次数
5	0.19316	1
6	0.14538	2
7	0.01689	1
8	0.02366	1
9	0.01527	1
10	0.00854	6
11	0.00841	1
12	0.02166	4

3.6.5 网络模型训练

为构建含水率预测模型，本研究采用 BP 神经网络算法，将样本数据集按 7:3 的比例划分为训练集和测试集。网络结构确定后，利用训练集数据进行模型训练，以实现含水率分布曲线的精确预测^[69]。神经网络模型的泛化能力评估结果如图 3-16 所示，试验数据与预测值之间具有显著的线性相关性。

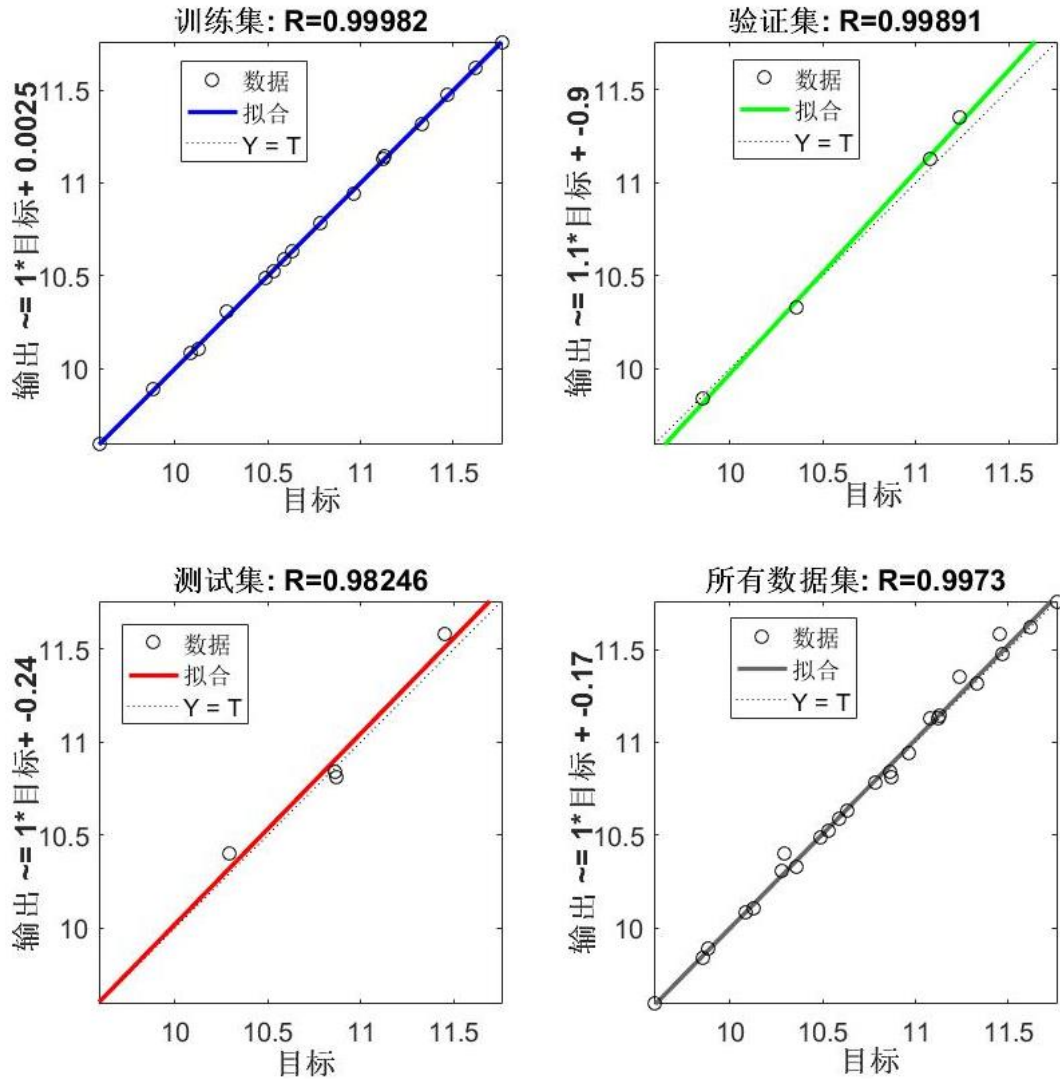


图 3-16 BP 神经网络训练回归图

3.6.6 模型验证

如图 3-17 所示，通过随机选取的 8 组独立实验数据进行模型验证，结果显示：预测含水率与实测值的平均相对误差为 $3.2 \pm 0.8\%$ ，决定系数 R^2 达到 0.982。具体分析表明：1) 整个干燥过程的预测曲线与实验数据趋势高度一致；2) 不同初始条件的样本均表现出良好的预测一致性。这些定量分析结果证实了所建模型具有较高的预测精度和泛化能力，能够准确表征红豆微波干燥过程中的水分迁移规律。

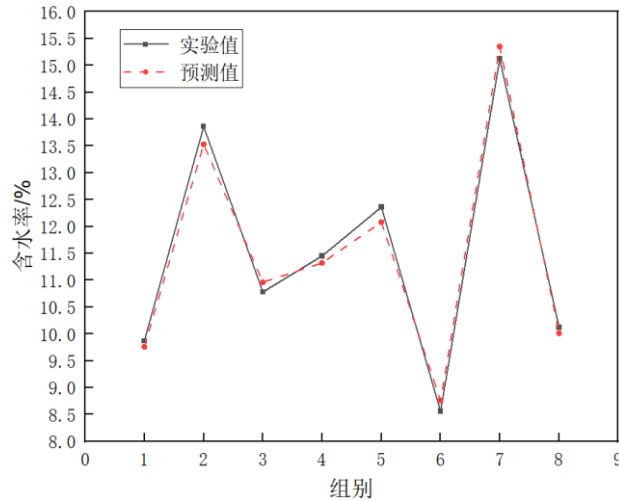


图 3-17 红豆含水率预测值与实际值回归分析

3.6.7 Lewis 模型和神经网络优化结果对比

两种方法对红豆含水率预测结果如表 3-15 所示。表 3-15 的对比分析结果表明，BP 神经网络模型与 Lewis 模型在含水率预测方面存在差异。具体表现为：BP 神经网络模型的预测误差区间为 1.11-2.39%，显著低于 Lewis 模型的 4.77-9.46%。实验数据证实，BP 神经网络凭借其多层感知器结构和反向传播算法，在含水率预测方面具有更优的准确度。

表 3-15 微波干燥红豆含水率的实验值与预测值

编号	实验值/%	Lewis 模型		神经网络	
		预测值/%	误差/%	预测值/%	误差/%
1	9.87	10.65	7.91	9.76	1.11
2	13.86	14.52	4.77	13.53	2.39
3	10.78	10.11	6.22	10.96	1.68
4	11.45	12.32	7.61	11.32	1.14
5	8.56	9.13	6.66	8.76	2.34
6	15.12	13.69	9.46	15.35	1.52

3.7 本章小结

本章运用微波真空干燥方法，研究不同干燥条件对红豆干燥速率、温度、含水率的影响，发现随着微波功率的增加，红豆的温度等干燥特性也在增加，两者是正相关关系，干燥温度的影响与功率的一致，随着真空度增加，物料温度会下降。探究红豆的干燥动力学模型，发现了 Lewis 模型能准确的描述干燥过程中水分比变化，运用 MATLAB 中的神经网络算法预测含水率，并用实验验证模型的准确性。

第 4 章 红豆微波干燥多物理场数值模拟与介电特性研究

为了探明微波与红豆之间复杂的作用机理,需要进行数值模拟研究。本章基于热质传递耦合理论,采用 COMSOL MULTIPHYSICS 仿真平台建立了红豆微波真空干燥过程的三维瞬态模型。通过联立求解能量守恒方程、质量传输方程,构建了完整的微波-热-质多物理场耦合系统。该模型采用有限元离散方法,实现了对干燥过程中微波能吸收分布、温度场变化以及水分迁移规律的预测。并借助矢量网络分析仪,探究红豆介电特性与温度、含水率的关系。

4.1 模型构建

4.1.1 研究对象及模型假设

模拟对象为含水率为 27.8% 的红豆,

为了简化建模过程而不失模拟准确性,作如下假设^[70]:

- (1) 红豆的初始温度均匀。
- (2) 红豆介质均匀、各向同性,不考虑干燥中红豆的收缩变形。
- (3) 红豆在模拟过程中不会发生化学反应。
- (4) 不考虑干燥箱壁面的热损失。

4.1.2 物理场接口选择

该多物理场耦合模型采用微波加热模块实现电磁-热交互仿真,通过集成电磁波频域分析与固体传热模块构建双向物理场接口。系统采用单向耦合策略,传热过程采用瞬态求解。通过多物理场接口的顺序调用实现从电磁场分布到热响应的跨尺度耦合分析。而对于传质模块,选择稀物质传递物理场接口。

4.1.3 控制方程

(1) 电磁方程

微波炉腔内的电磁分布由麦克斯韦波形方程解析^[71]:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \end{cases} \quad (4-1)$$

式中, μ_r 为相对磁导率; $\vec{E}$ 是电场强度(V/m); f 是频率(Hz)。

电磁能量的损耗与介电损耗(ε'')和电场强度的平方成正比^[72]:

$$Q = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' |E|^2 \quad (4-2)$$

式中, ε_0 和 ε'' 分别是介电常数和介电损耗, 介电常数 ε_0 反映了材料在电磁场中存储电能的能力, 介电损耗因子 ε'' 影响电磁能到热能的转换, j 为虚数。 Q 为损耗功率(W/m³); ω 为角频率(rad/s)。

(2)质量守恒方程

红豆中包含许多细小的孔隙, 因此红豆可当成多孔介质来进行分析。

孔隙率(ϕ)定义为孔隙(由液体和气体占据)与样品总体积的比例, 由下式给出^[73]:

$$\phi = \frac{\Delta V_w + \Delta V_g}{\Delta V} \quad (4-3)$$

式中, ΔV_w 和 ΔV_g 分别是液态水的气体占据的体积; ΔV 是物料的总体积。

对于每一个体积元素的孔隙, 水饱和度(S_w)和气体饱和度(S_g)分别定义为液态水的气体的体积分数:

$$S_i = \frac{\Delta V_i}{\phi \Delta V} \quad i = w, g \quad (4-4)$$

液态水、气体和水蒸气的质量守恒方程如下^[74]:

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot (n_w) = -I \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial c_g}{\partial t} + \nabla \cdot (n_g) = I \quad (4-6)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \cdot (n_v) = I \quad (4-7)$$

式中, c_w , c_v , c_g , 为水, 蒸汽和气体的浓度(mol/m³); t 为时间(s); n_w , n_g , n_v 分别是水通量, 气体通量和蒸汽通量(mol/(m²·s)); I 是液态水的蒸发速率(mol/(m³·s))。

由于该实验在真空微波干燥箱中进行, 所以气体的影响可忽略不计。

上述方程(4-5)、(4-6)、(4-7)可简化为:

$$\frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \cdot (n_w) = -I \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \cdot (n_v) = I \quad (4-9)$$

水和气体的饱和度(S_w 、 S_g)可由 c_w 求得:

$$S_w = \frac{c_w M_v}{\phi \rho_w} \quad (4-10)$$

$$S_g = 1 - S_w \quad (4-11)$$

其中 n_w 、 n_g 、 n_v 由以下方程控制^[75-76]:

$$n_w = \rho_w \mu_w - D_{w, cap} \nabla c_w \quad (4-12)$$

$$n_g = \rho_w \mu_g \quad (4-13)$$

$$n_v = \rho_w - \left(\frac{c_g^2}{\rho_g} \right) M_v M_a D_{bin} \nabla x_v \quad (4-14)$$

式中, u_i ($i=w, g$)是由压力驱动下液态水和气体的流动速度(m/s), ρ_g 为蒸汽的密度; M_v 、 M_a 分别是蒸汽和空气的摩尔质量(kg/mol); D_{bin} 为空气中的蒸汽扩散率(m²/s); x_v 是蒸汽的体积分数; $k_{in,j}$ 和 $k_{r,j}$ 分别是内在渗透率和相对渗透率; μ_i 为黏度(Pa·s)。由达西定律来描述^[77-78]:

$$\vec{u}_i = -\frac{k_{in,j} k_{r,j}}{\mu_i} \nabla p \quad (4-15)$$

式中, ρ_w 为水的密度(kg/m³); $D_{w, cap}$ 为水的毛细管扩散率(m²/s)。

(3)稀物质传递

稀物质传递物理场用于计算物料内的物质的量浓度,即物料中的含水率。红豆内部水分迁移满足 Fick 定律,质量守恒方程为^[79]:

$$R_i = -\nabla \cdot (D \nabla c_i) \quad (4-16)$$

式中, R_i 为积存速率(kg/(m³·s)); C_i 为 t 时刻物料的浓度(mol/m³); D 为扩散系数(m²/s)。

红豆的初始含水率为 27.8%。传质边界条件设为对流传质边界条件,边界条件为:

$$-n \cdot (-D \nabla c) = h_m (c_b - c_i) \quad (4-17)$$

式中, c_b 为初始浓度 (mol/m^3); h_m 为传质系数, ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。

(4) 能量守恒方程

方程包括流体相对流、热传导、蒸发冷却和微波热源项。多孔介质干燥过程中有固体、液体和气体三种形式, 三者在同一地点处于同一温度, 因此只需要列出干燥介质的能量守恒方程^[80]:

$$\rho_{eff} C_{p,eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=w,v,a} (n_i \nabla (C_{p,j} T)) = \nabla (k_{eff} \nabla T) - \lambda_h I + Q \quad (4-18)$$

$$\rho_{eff} = \varphi (S_g \rho_g + S_w \rho_w) + (1 - \varphi) \rho_s \quad (4-19)$$

$$C_{p,eff} = \varphi (S_g C_{p,g} + S_w C_{p,w}) + (1 - \varphi) C_{p,s} \quad (4-20)$$

$$k_{eff} = \varphi (S_g k_g + S_w k_w) + (1 - \varphi) k_s \quad (4-21)$$

式中, w 、 v 、 a 分别指液态水、蒸汽和空气; λ_h 指蒸发潜热 (J/kg); $C_{p,j}$ 是 j 相的比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); ρ_{eff} , $c_{p,eff}$, k_{eff} 分别指混合物加权后密度 (kg/m^3), 比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), 导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。

(5) 初始及边界条件的确定

微波干燥室内腔壁为理想电导体, 其切向电场为 0:

$$E_{\text{切向}} = 0 \quad (4-22)$$

初始条件:

$$t = 0, T = T_0 \quad (4-23)$$

边界条件:

$$n_{w,surf} = h_m \varphi S_w (\rho_v - \rho_{v,oven}) \quad (4-24)$$

$$n_{v,surf} = h_m \varphi S_g (\rho_v - \rho_{v,oven}) + C_v \mu_{n,v} \quad (4-25)$$

式中, $n_{w,surf}$ 和 $n_{v,surf}$ 分别是液态水和蒸汽在边界处的通量 ($\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); $\rho_{v,oven}$ 为微波炉内的水蒸气的密度。

食品表面产生对流传热:

$$q_n = \frac{n_{v,surf} C_{p,v} T}{M_w} + h_t (T - T_0) + h_m \varphi S_w (\rho_v - \rho_{v,amb}) (\lambda + C_{pv} T) \quad (4-26)$$

式中, q_n 是物料表面的对流传热量 (W/m^2); $\rho_{v,amb}$ 是环境周围水蒸气的密度 (kg/m^3); h_t 是传热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); T_0 是环境周围温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

4.1.4 红豆的介电特性与温度、含水率关系模型

介电常数和介电损耗因子用于预测谷物和种子的介电特性，包括频率、含水率和温度变化。当频率为 2.45 GHz，介电常数和介电损耗因数与温度和含水量之间的关系如下，使用线性模型将温度和含湿度以一般形式联系起来：

$$\varepsilon' = a + bm + ct \quad (4-27)$$

式中， a 、 b 和 c 是模型系数，介电常数与温度和含水率的关系如下：

$$\varepsilon' = a_1 + a_2m + a_3t + a_4mt + a_5m^2 + a_6t^2 \quad (4-28)$$

同样，介电损耗因子与温度和含水量之间的关系为：

$$\varepsilon'' = b_1 + b_2m + b_3t + b_4mt + b_5m^2 + b_6t^2 \quad (4-29)$$

式中， t 为温度(°C)； m 为含水率(%)； a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 和 a_6 是介电常数的模型系数； b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 和 b_6 是介电损耗因子的模型系数。

4.1.5 定义参数

在 COMSOL MULTIPHYSICS 多物理场仿真平台中构建微波真空干燥系统的三维几何模型时，需要精确定义关键参数，主要参数设置如表 4-1 所示。

表 4-1 仿真模型中几何模型的参数

名称	表达式	值	描述
干燥室宽度(Wo)	320[mm]	0.32 m	Oven width
干燥室长度(Do)	340[mm]	0.34 m	Oven depth
干燥室高度(Ho)	280[mm]	0.28 m	Oven height
波导宽度(Wg)	55[mm]	0.055 m	Waveguide width
波导长度(Dg)	95[mm]	0.095 m	Waveguide depth
波导高度(Hg)	65[mm]	0.065 m	Waveguide height

微波真空干燥箱的内壁采用铜，基本物理参数如表 4-2 所示。

表 4-2 微波真空干燥箱内壁的物理参数

属性	值	单位
电导率	0.8	S/m
相对介电常数	35-2j	1
相对磁导率	0.35	1
导热系数	1.2	W/(m·K)
电阻率	0.73	$\Omega \cdot m$
密度	7930	kg/m ³
杨氏模量	194020	Pa
泊松比	0.3	1

本研究中干燥腔体内的气体介质参数直接调用 COMSOL 材料数据库中的标准空气物性参数，其关键物理特性参数详见表 4-3。

表 4-3 空气的基本物理参数

属性	值	单位
电导率	0	S/m
相对介电常数	1	1
相对磁导率	1	1
热膨胀系数	273.15	1/K
本体黏度	1.428*10 ⁻⁴	Pa·s
动力黏度	1.822*10 ⁻⁵	Pa·s
比热率	1.4	1
恒压热容	1.01	J/(kg·K)
密度	1.29	kg/m3

红豆的基本物理参数如表 4-4 所示。

表 4-4 红豆的基本物理参数

属性	值	单位
电导率	0.1	S/m
相对介电常数	3.2-0.45j	1
相对磁导率	1	1
导热系数	1.35	W/(m·K)
恒压热容	2637	J/(kg·K)
初始温度	20	°C
含水率	28	%

基于 COMSOL 多物理场仿真软件构建的红豆干燥模型如图 4-1 所示。

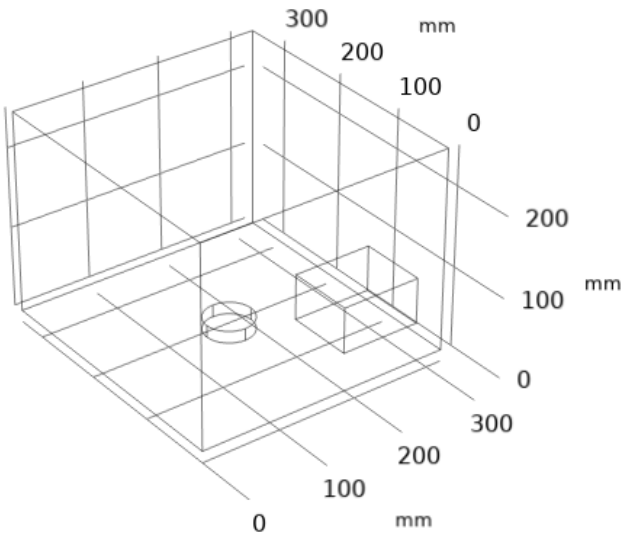


图 4-1 红豆微波真空干燥几何模型

4.2 红豆的介电参数测试

本研究采用矢量网络分析仪构建的介电特性测试平台，系统组成包括：高温同轴探头、低损耗射频电缆及数据采集系统。测试严格遵循标准，在中心频率 2.45 GHz（带宽 ± 50 MHz）下进行测量^[81]。红豆介电参数测量实验步骤如下：1.样品准备，确保红豆样品充分干燥且表面清洁，以消除水分及杂质对介电参数测量的潜在影响。2.仪器检查，校准前需核查矢量网络分析仪及配套探头的连接状态，确保线缆无松动或损坏，并准备符合标准的校准件。3.系统校准，采用短路-开路-负载校准法，采用二端口校准方法，通过顺序连接标准校准器件至测试端口，执行完整的 S 参数矩阵校准程序，以消除系统测量误差。4.参数设置，依据被测样品的介电特性，在操作界面设定扫描频率范围及测量模式。5.样品测试：将探头垂直置于红豆样品表面，施加恒定压力以保证探头与样品间紧密接触，避免空气间隙引入测量误差。6.数据采集：启动扫描后实时监测参数曲线，待信号稳定后记录数据。实验原理图如图 4-2 所示。

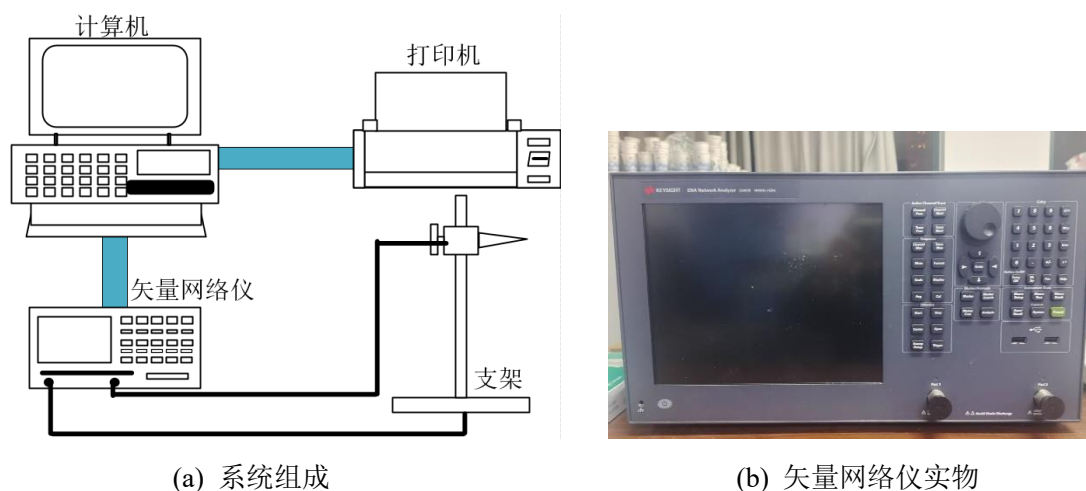


图 4-2 实验原理图

4.3 结果与分析

4.3.1 红豆介电特性与含水率的关系

图 4-3 至 4-5 中描述的是不同含水率下的红豆介电常数与介电损耗因子变化。实验数据表明，在 2.45 GHz 微波频率作用下，红豆样品的介电特性存在含水率依赖性。具体而言，当含水率从 10%增加到 30%时，介电常数从 1.06 显著上升至 1.92，；同时介电损耗因子由 0.26 增至 0.65，。在 2.4-2.5GHz 频段内，介电参数呈现明显的频率依赖性：介电常数随频率变化呈"V"型曲线，在 2.43GHz 处出现极小值；介电损耗因子则表现为抛物线特征，其最小值出现在 2.45GHz 处。

介电损耗因子随频率变化也是先减小后增大,介电损耗因子的最低点在 2.45 GHz。当温度相同时,红豆含水量的增加会导致介电常数的增加,这表明红豆的含水量与介电常数呈正相关,即含水量越高,介电常数越大,红豆可以储存的能量就越多。水分子的电学性质是影响含水介质介电特性的关键因素。水分子具有较大的固有偶极矩,这使其表现出高达 78.5 的介电常数。同时,水溶液中可解离离子的存在显著提升了介质的电导率。这种复杂的电磁响应机制直接表现为红豆等含水农产品的介电常数显著提升。

实验结果表明红豆介电特性与含水率之间存在显著相关性。在恒温条件下,随着样品含水率的增加,其介电参数呈现规律性变化,它们的变化速率不一样,介电损耗因子的增长速率比介电常数增加速率要低一点,介电损耗因子在 25% 到 30%之间增长的最快,而介电常数在 10%到 15%之间上升的最快。

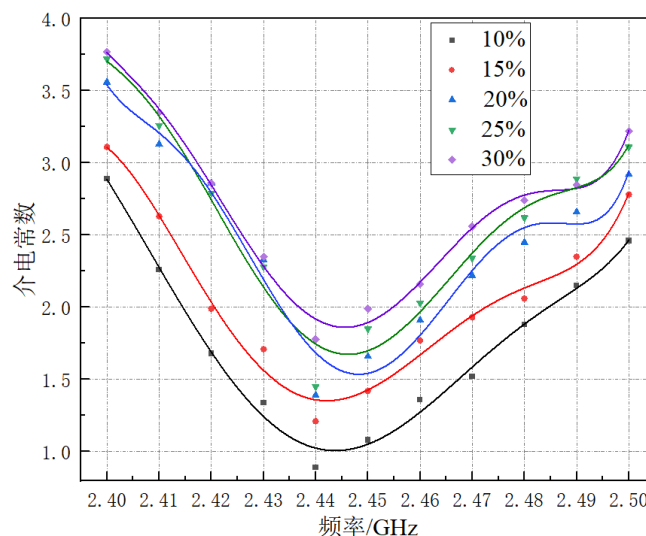


图 4-3 含水率对介电常数的影响

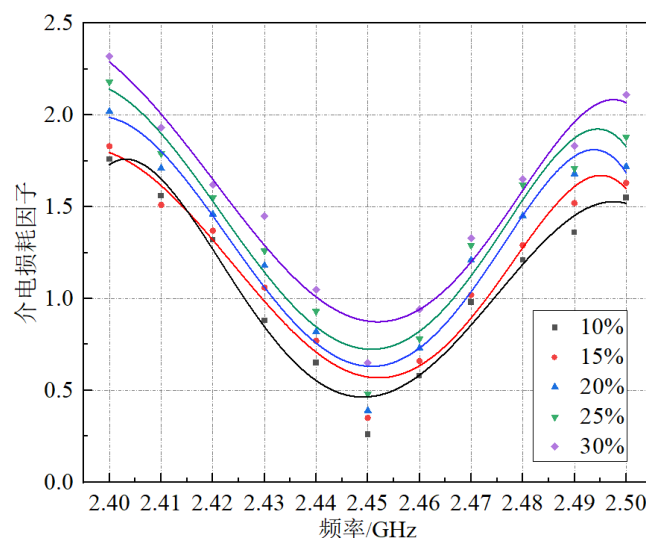


图 4-4 含水率对介电损耗因子的影响

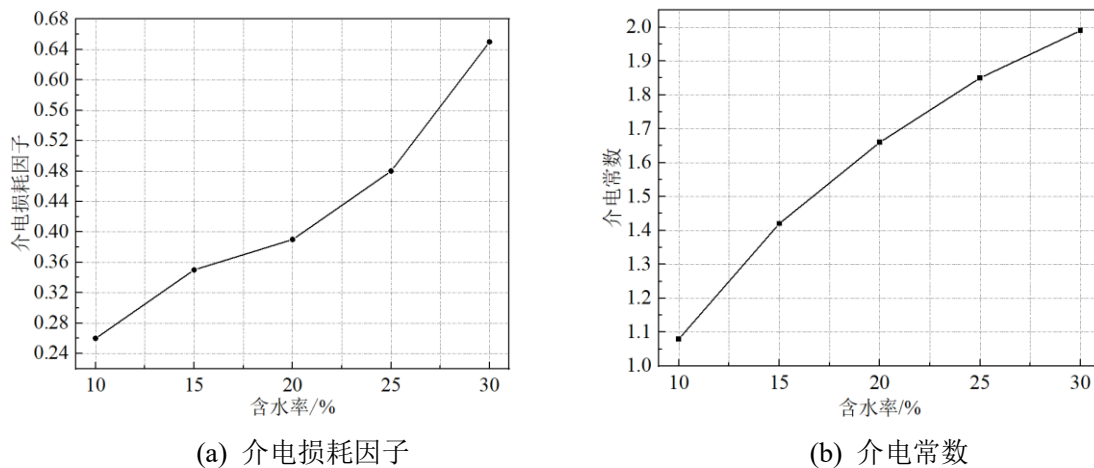


图 4-5 2.45 GHz 下含水率对介电特性的影响

4.3.2 红豆介电特性与温度的关系

图 4-6 至 4-8 中描述的是不同温度下的红豆介电常数与介电损耗。实验数据表明,介电性能参数存在温度依赖性。当温度从 30℃ 升至 55℃ 时,介电常数由 1.55 增至 2.23;相应的介电损耗从 0.37 上升至 0.73,两者均随温度升高呈现单调递增趋势。在干燥过程中,当环境温度升高时,材料内部的分子热运动加剧,导致分子间相互作用强度降低,进而引发介电特性的显著改变。

实验结果表明,红豆样品的介电特性呈现显著存在温敏特性。在恒定含水率条件下,随着温度升高,其介电常数和损耗因子均表现出增长趋势。具体而言,当环境温度从 20℃ 升至 80℃ 时,样品的介电损耗由 0.15 增至 0.32,介电常数则由 3.5 提升至 5.2。这种变化规律可能与极性分子热运动加剧导致的偶极矩取向极化增强有关。介电损耗因子的增长速率比介电常数速率要低一点,介电损耗因子在 40℃ 到 45℃ 之间增长的最快,介电常数在 30℃ 到 35℃ 之间增加的最快。

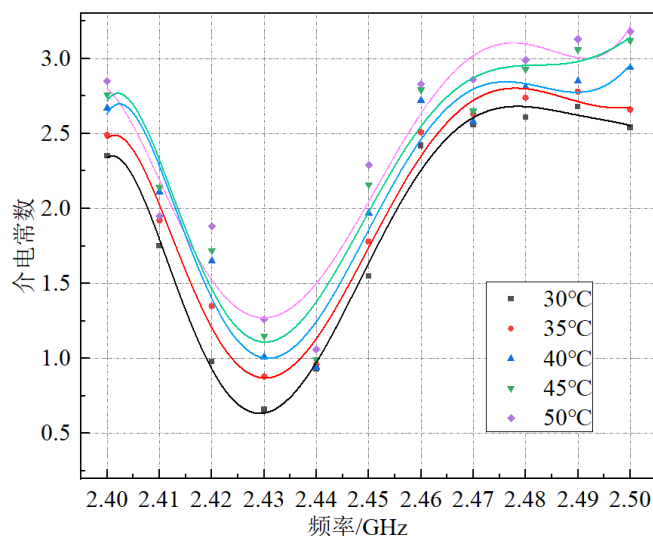


图 4-6 温度对介电常数的影响

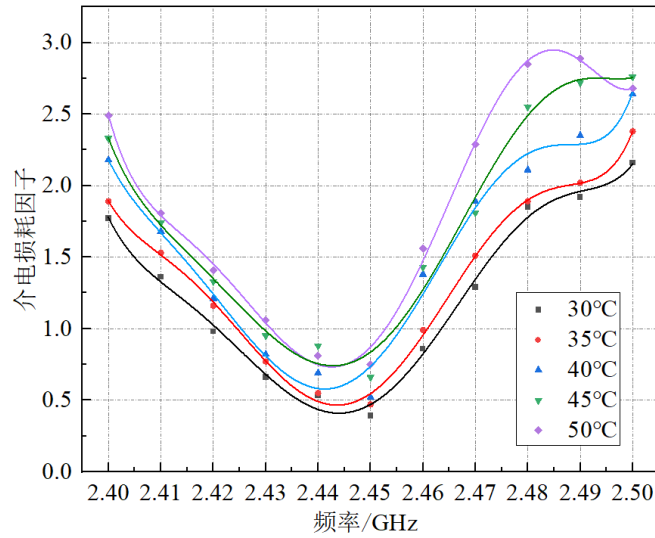


图 4-7 温度对介电损耗因子的影响

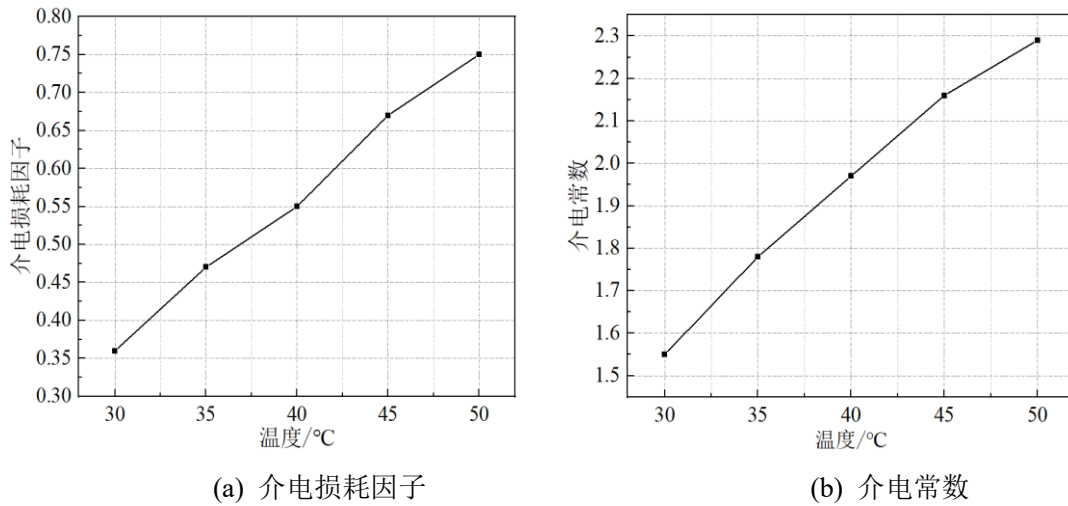


图 4-8 2.45 GHz 下温度对介电特性的影响

4.3.3 红豆温湿度变化

(1) 温度随时间变化规律

如图 4-9 所示，温度-时间变化曲线呈现出以下特征：实验温度在初始阶段快速上升约 10°C ，而在后续阶段仅升高 5°C ，表明加热过程呈现明显的速率减缓趋势，实验曲线曲率逐渐降低。相比之下，仿真温度曲线在整个过程中保持线性上升，反映了理想化的加热模型。实验值与仿真值具有较好的一致性，最大偏差为 3.5°C ，数值模拟结果与实验数据的对比分析表明，该干燥模型能够有效表征红豆在干燥过程中的温度动态变化规律。研究发现，模拟曲线的平均温升速率较实验数据偏高，这种差异主要源于以下因素：1) 实验采用红外测温仪仅能捕捉物料表面温度，而模拟计算则反映体积平均温度，二者存在热梯度差；2) 为便于过程观察，干燥仓未采取完全绝热设计。此外，干燥后期温升趋缓是由于设备内

置的温控系统限制了最高温度，该保护机制通过 PID 算法实现。

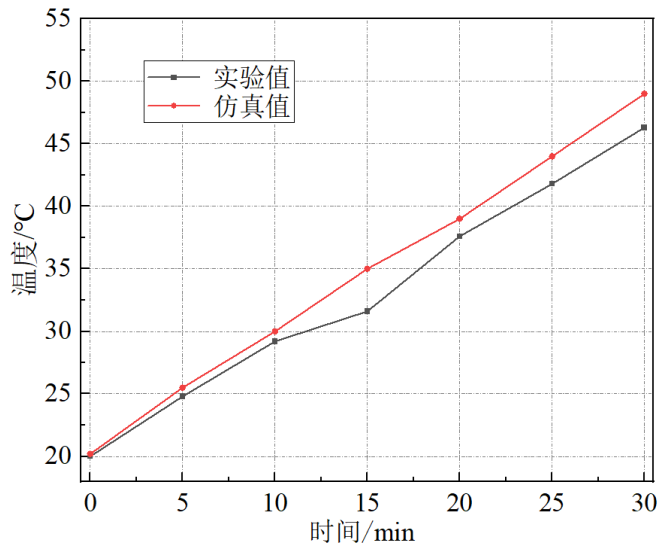


图 4-9 温度随时间的变化图

(2)含水率随时间变化

图 4-10 中描绘干燥时长为 30 分钟的红豆含水率的变化情况，从图中可以看出，红豆的含水率随时间大致呈线性下降。本实验红豆初始含水率为 28.08%。随着干燥的进行，红豆内部的水分开始逐渐释放出来，进一步导致含水率的降低。这个过程中，红豆的外观可能会变干，表面可能会出现皱纹，同时红豆内部的水分也会逐渐减少。干燥过程中红豆的含水率变化是一个渐进的过程，直到红豆完全干燥。5-10 分钟红豆的含水率降低了 5.23%，而 20-25 分钟只下降了 0.86% 左右。可以看出红豆水分变化是先快速下降到后期含水率干燥缓慢。

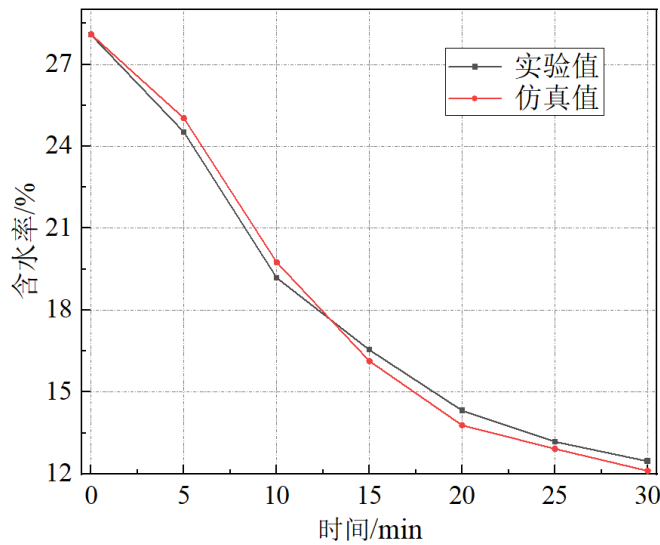


图 4-10 含水率随时间的变化图

4.4 本章小结

本章基于多物理场耦合理论，采用 COMSOL 数值仿真平台建立了红豆微波

真空干燥过程的有限元模型。该模型通过耦合多个方程实现了对干燥过程中电磁能-热能-质量传递的多场耦合数值模拟。通过此建模方法，可定量分析在微波场作用下红豆物料内部的热质传递特性及其相互作用机制。并运用实验对模型的准确性进行确定，发现两者误差不大；还探究了红豆介电特性与温度和含水率的关系，发现了红豆的介电常数与介电损耗都和温度、含水率呈正相关。

第 5 章 微波干燥实验装置优化

微波干燥技术作为一种新型介电加热工艺,与传统传导或对流干燥方式不同,该技术基于物料内部极性分子在外加电磁场作用下产生的介电损耗生热机制,形成由内向外的体热源特性,可使干燥效率提升并降低能耗^[82]。然而,该工艺存在干燥不均匀和不能实现精准温控的问题。本章基于微波干燥红豆的工艺实验数据与数值仿真结果,重点开展干燥系统的优化设计研究。通过分析微波场分布特性,对干燥腔体进行结构优化设计;同时针对实验装置的控温精度和自动化程度进行改进,优化控制算法以提升干燥过程的稳定性和能效比。

5.1 实验装置总体设计

如图 5-1 所示微波干燥装置主要由排湿系统、微波干燥腔及控制系统等部分组成。微波加热系统的工作流程如下,当设备通电后,磁控管产生的微波能量通过波导结构导入干燥腔体,实现对物料的加热处理。该系统的控制单元具备以下功能,可精确调节磁控管的功率输出;控制旋转机构以低速带动被干燥物料转动,确保加热均匀性;调控排湿装置的工作状态,优化腔体内湿气排放速率和气流分布特性。

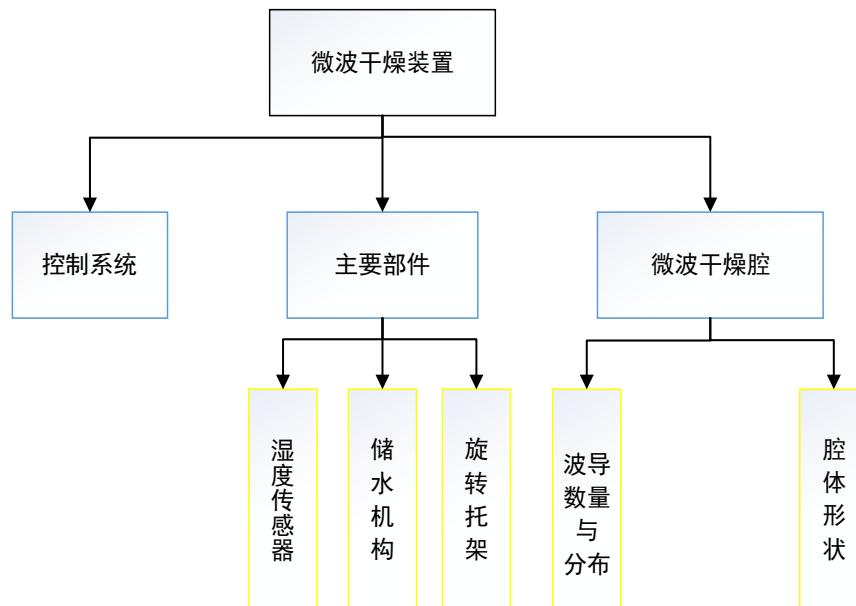


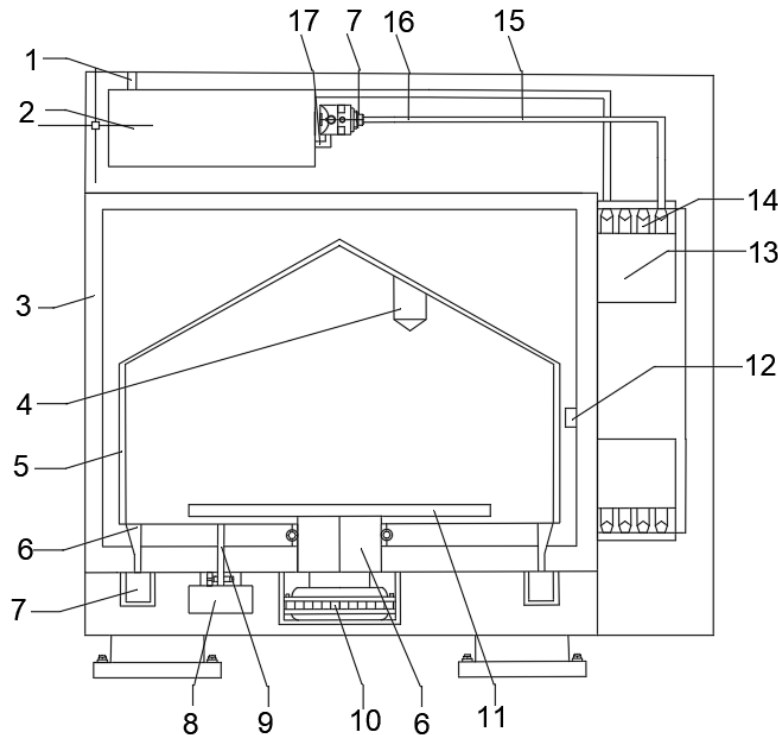
图 5-1 干燥装置主要结构组成图

5.1.1 主要内容

微波干燥箱体的外壁设置有控制面板,内部设置有三角干燥室,三角干燥室

的顶端设置有视觉传感器，箱体内部通过轴承安装转轴，且转轴的顶端安装有物料托盘，箱体的内壁设置有微波发生器，箱体一侧设置有磁控管，磁控管的外壁设置水冷散热机构，所述三角干燥室的底端开设有转轴，该装置启动储水罐通过吸入水管和排水管道将水箱处冷凝水输送至冷凝管处对磁控管位置进行水冷散热，避免物料干燥时磁控管出现温度过高而运行不正常。

图 5-2 为干燥装置主剖视结构示意图，干燥装置包括微波干燥箱体、转轴和三角干燥室，微波干燥箱体的外壁设置控制面板，箱体内部设置三角干燥室，三角干燥室的顶端设置视觉传感器，箱体的内部通过轴承安装转轴，转轴的顶端安装物料托盘，微波干燥箱体的内壁设置微波发生器，三角干燥室的底端开设转轴，且转轴的底端设置储水罐，箱体的底端设置电机，且电机输出端通过联轴器与转轴的底端相连接，三角干燥室的内壁设置吸湿材料，微波干燥箱体的外壁铰接门板，箱体的内部设置储气罐，微波干燥箱体底端安装贯穿储气罐的连接管，且连接管内壁设置电磁阀，将物料放置物料托盘的上方，接着启动电机带动转轴旋转，从而转轴带动物料托盘旋转，进而物料托盘带动物料进行旋转。

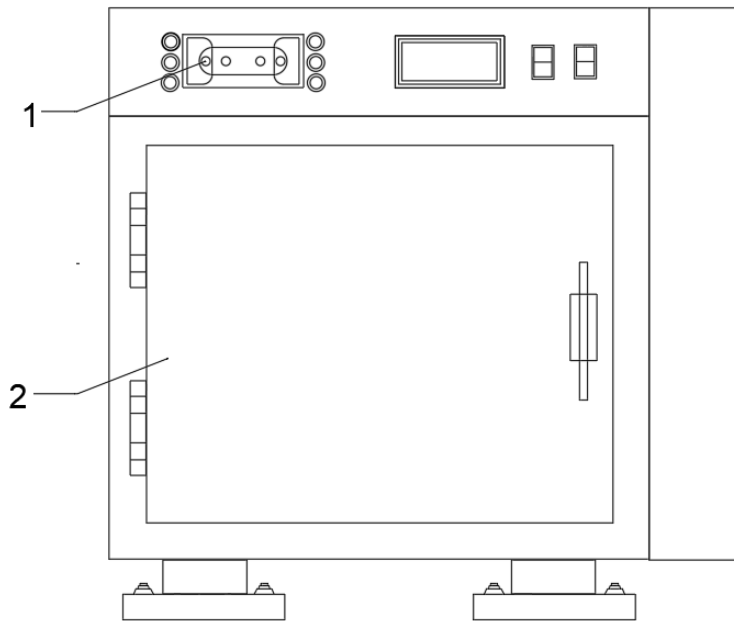


1、进水管道；2、水箱；3、微波干燥箱体；4、视觉传感器；5、三角干燥室；6、转轴；7、储水罐；8、储气罐；9、连接管；10、电机；11、物料托盘；12、微波发生器；13、磁控管；14、冷凝管；15、回收水管 16、排水管道；17、吸入水管

图 5-2 干燥装置主剖视结构示意图

图 5-3 为干燥装置的主视结构示意图，微波干燥箱体的一侧设置磁控管，且

磁控管的外壁设置水冷散热机构，水冷散热机构包括冷凝管和水箱，磁控管的外壁设有冷凝管，微波干燥箱体的顶端开设水箱，且水箱顶端设置贯穿微波干燥箱体的进水管，微波干燥箱体的顶端设置储水罐，在储水罐的输出端，安装带有贯穿冷凝管的排水管道，在输入端安装与水箱相连的吸入水管。本系统采用闭环水冷循环机制实现磁控管的高效热管理。具体而言，冷凝水通过进水管注入水箱后，由储水罐经吸入水管和排水管道将冷却介质输送至磁控管冷凝单元，通过强制对流换热方式对磁控管进行定向散热，从而有效控制其在物料干燥过程中的工作温度，避免因过热导致的性能异常或器件损坏。完成热交换后的冷却水经由回收管道返回水箱，形成完整的资源循环利用体系，不仅显著提升了冷却效率，同时实现了水资源利用率的最大化，体现了系统设计的节能环保特性。



1、控制面板;2、门板

图 5-3 干燥装置的主视结构示意图

5.1.2 工作原理

首先接通外部电源，用手翻转并打开门板处，接着将物料置于物料托盘上方后关闭门板，接着开启磁控管和微波发生器处开始干燥，而在干燥过程中，本系统通过连接管道实现干燥室内处理气体的定向收集。干燥室顶部采用独特的三角形几何构型，在干燥过程中产生的水蒸气，部分被设置于腔体上部的吸湿性复合材料选择性吸附；另一部分则通过冷凝作用在干燥室底部的旋转导流轴上形成液滴，并沿特定路径汇集至储水装置。为精确控制干燥进程，系统集成高分辨率视

觉传感单元，可对物料表面形貌及色泽特征进行实时图像采集与分析，从而实现干燥度的在线监测与反馈控制。针对微波干燥装置中磁控管易发生过热的问题，本研究设计了一套高效的水冷散热系统。该系统通过进水管将冷凝水注入水箱后，利用储水罐的泵送作用，经吸入水管和排水管道将冷却介质输送至磁控管冷凝单元，通过强制对流换热方式实现定向散热。该散热机制可有效维持磁控管在物料干燥过程中的工作温度稳定在的适宜范围内，避免因温度过高导致的器件性能衰减或永久性损伤。

5.2 主要部件设计

5.2.1 旋转托架

为提高微波干燥的均匀性，实验装置设计了专门的物料旋转系统。如图 5-4 所示，该系统的核心部件是一个十字形旋转支架，其四个端部各设有限位装置。圆形物料盘通过限位装置固定于支架上，在垂直方向上保持固定位置，确保物料与腔体顶部间距恒定，这一距离即为微波对物料的直接作用距离。驱动系统选用永磁同步电机作为动力源，带动整个旋转机构平稳运转。输入功率 70 W，输出转速 60 r/min，托架的转动速度为 5 r/min。

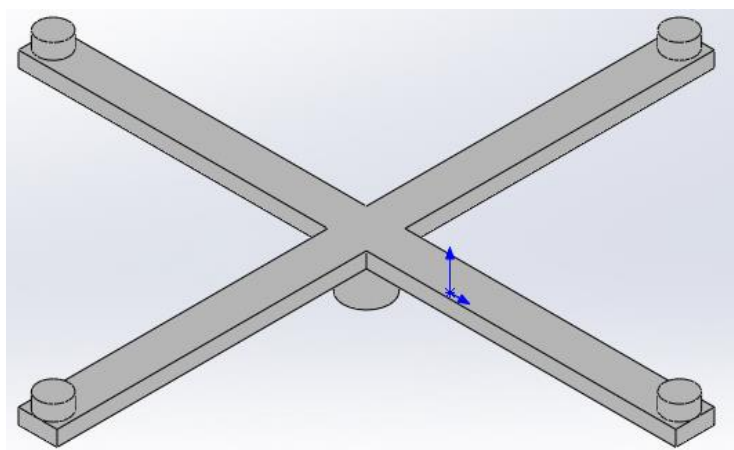


图 5-4 旋转托架示意图

5.2.2 湿度和视觉传感器

为实时监测干燥腔内的湿度变化并实现工艺参数自动调节，系统在腔体右上方配置了温湿度传感器。该传感装置可根据检测数据动态调整以下参数，当检测温度低于预设值时，自动提升微波输出功率；当湿度超过设定阈值时，系统将启动除湿程序；同时配合真空度调节功能，实现多参数协同控制。为了便于观察干燥过程中物料状态，在干燥腔内安装视觉传感器。温度传感器原理图如

图 5-5 所示。

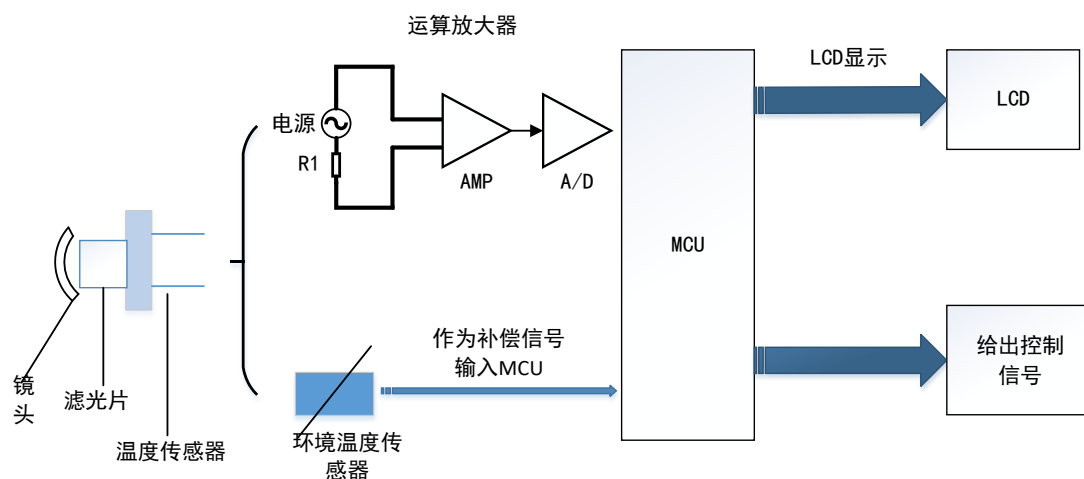


图 5-5 温度传感器原理图

5.2.3 储水机构

储水机构包括水箱、水泵等部分，它可以在干燥过程中吸收物料干燥排出的水分，又可以给水冷系统提供水资源。微波干燥装置的外部设有保护壳，保护壳内固定有水箱以及水泵，冷凝管穿过保护壳，并与水箱连通，水箱一侧设有水泵，储水箱的下端侧壁设有出水管，储水箱的侧壁设有进水管，水泵通过软管分别与出水管，进水管相连接。主要作用是收集干燥过程中产生的水分，并为冷却系统提供水资源。

本装置通过储水罐驱动系统建立水冷循环，经由吸入管路将水箱中的冷凝工质泵送至磁控管冷凝单元，再通过排水管路形成闭合循环通路。该水冷系统通过相变换热原理实现对磁控管关键部位的选择性散热，使其工作温度稳定控制在最佳工况区间，避免物料干燥时磁控管出现温度过高，导致磁控管出现运行不正常，而出现损伤，收集到的水可回收水管处排入水箱内，可便于循环再利用，节约资源。

另外通过连接管处可将三角干燥室内物料干燥后气体进行收集，而由于三角干燥室上方形状为三角形，干燥过程中产生的水一部分被吸湿型材料吸收，另外部分随着三角干燥室下方的转轴汇聚在一起，将多余水分用储水罐收集。

5.3 干燥腔体设计

微波谐振干燥腔作为典型的封闭电磁系统，通常由金属材料构成并作为波导终端负载，其能量传输过程涉及微波发生器产生的电磁能量通过矩形或圆形波导定向传输至腔内。系统设计需综合考虑微波馈入口、物料通道及压力平衡装置的

配置，当微波能量通过馈入端口进入腔体后，经金属壁面全反射形成多模叠加的电磁场分布，通过偶极子极化与离子传导机制将能量转化为热能。根据腔内电磁场模式数量，可将其分为单模与多模谐振腔。

5.3.1 微波谐振腔理论

微波谐振腔是一种基于电磁场驻波原理工作的微波器件，其物理本质是通过金属边界对电磁波的约束作用实现能量存储与频率选择。微波谐振腔的特性主要由谐振频率、品质因数、模式等参数决定。

在波导中传输电磁波时，电磁波的分布方式称为模式。波导传输有许多不同的模式，其中一些最常见的模式包括：TE 模式和 TM 模式。2 种常见的电磁场分布差异如表 5-1 所示，每种模式对应不同的场分布和谐振频率。微波谐振腔中的电磁模式本质上是满足麦克斯韦方程组及边界条件的本征解，其分类与空间场结构密切相关。在直角坐标系中采用 TE_{mnp}/TM_{mnp} 标记，其中下标 m 、 n 、 p 分别表示沿三个坐标轴的半波数变化次数。干燥设备中的谐振腔的电磁场主要是由波导从微波发送器接收并传输来的，图 5-6 是谐振腔原理图。

表 5-1 2 种模式的区别

特性	TE 模式	TM 模式
电场分布	横向涡旋，环状分布	纵向驻波，中心场强最大
磁场分布	纵向分量主导，贴近腔壁	横向闭合环路，穿透深度深
能量存储	磁场能量占比 > 50%	电场能量占比 > 50%
损耗机制	主要来自腔壁欧姆损耗	介质损耗和表面电流损耗

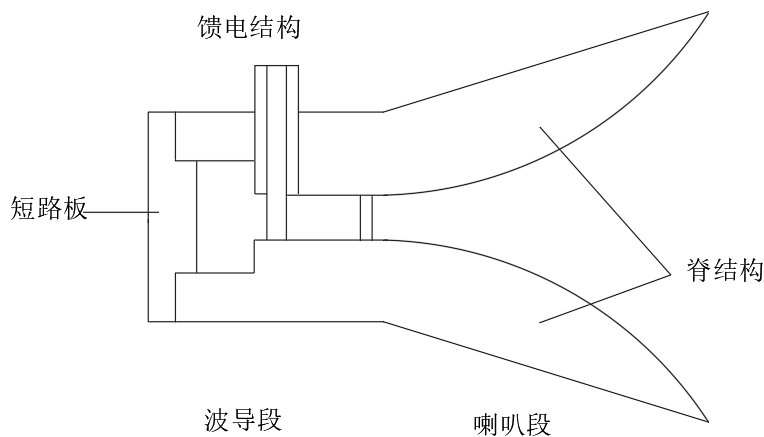


图 5-6 谐振腔原理图

谐振腔的谐振频率取决于腔的形状、尺寸和工作模式。不同类型谐振腔有各自的谐振频率计算公式，如矩形波导腔的谐振频率与光速、腔的长宽高以及模式对应的整数有关；圆柱形波导腔的谐振频率由其结构尺寸等因素决定。对于矩形

谐振腔，谐振频率 f_{mnp} 由以下公式决定^[83]：

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (5-1)$$

式中, c 为光速; a 、 b 、 d 分别为腔体的长、宽、高; m 、 n 、 p 为模式指数, 取正整数。

品质因数 Q 表征谐振腔的特性。有载品质因数 Q_L 与内部品质因数 Q_i (固有品质因数或无载品质因数, 反映腔壁导体损耗和腔内介质损耗)、外部品质因数 Q_e (取决于外电路负载情况) 相关。谐振腔的损耗包括内部损耗和外部损耗。定义为谐振系统储能与耗效率的量化指标, 其数学表达式为:

$$Q = 2\pi \frac{W}{W_T} \quad (5-2)$$

式中, W 为干燥腔体总储能; W_T 为一个周期腔体的能耗。该公式表明, 当系统在谐振频率下工作时, Q 值与能量损耗呈反比。

5.3.2 单个波导电磁场耦合仿真

本研究针对单馈口微波加热腔的电场分布特性展开分析, 重点考察加热过程中腔体内的电磁场分布规律, 以此评价该类型加热腔的工作性能。通过数值模拟方法, 系统研究了单馈口微波加热腔在加热工况下的电场均匀性特征。为提升腔体内电场强度的分布均匀性, 在对比不同馈口配置方案时, 所有波导端口均统一设置在腔体侧壁的几何中心位置, 所有的功率都是统一的。波导在腔体的分布如图 5-7 所示。

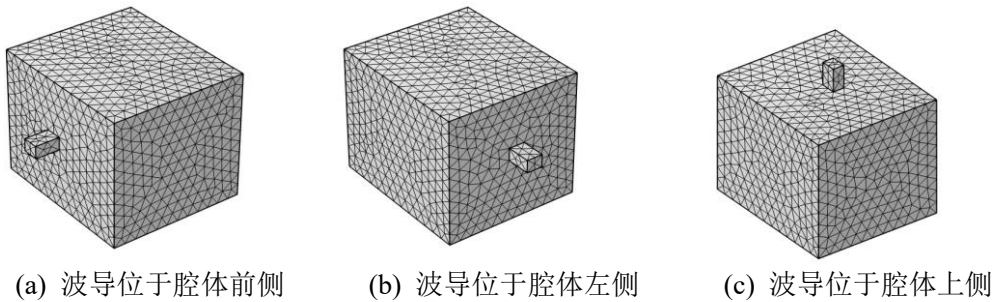
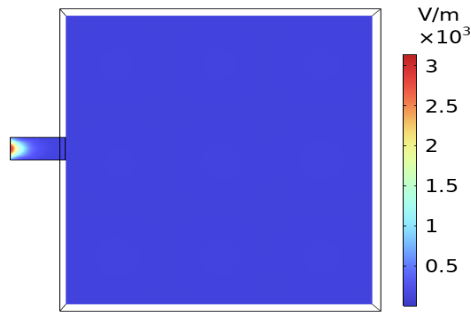


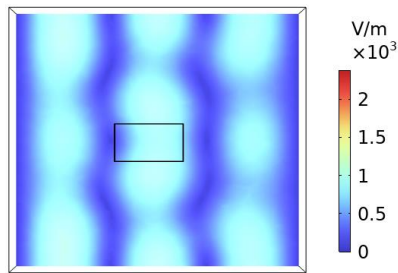
图 5-7 单波导在腔体不同位置示意图

波导在腔体不同位置时的电场分布如图 5-8 所示。当波导位于腔体前侧和上侧时, 腔体内部没有电场分布, 只有在端口处有场强, 最大值分别为 3100 V/m 和 5300V /m, 最小值分别为 500 V/m 与 1000 V/m; 当波导位于上侧时, 腔体内部才有电场分布, 场强最大值为 1600 V/m, 电场强度的最小值为 100 V/m。间接

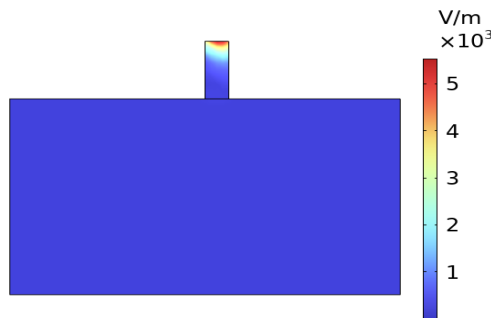
证明了矩形波导只传输一个方向的电场。腔体内部场强低的原因因为电场在波导传输过程中产生损失。



(a) 波导位于腔体前侧电场图



(b) 波导位于腔体左侧电场图



(c) 波导位于腔体上侧电场图

图 5-8 单波导电场分布示意图

5.3.3 多个波导电磁场耦合仿真

单馈口微波加热腔凭借其结构紧凑、加工成本低、操作便捷等优势，在小规模加热与烘干领域展现出良好适用性，但其电磁场分布受限于单馈口激励模式，导致能量密度呈现高斯型分布特征。多馈口系统通过复数馈电网络实现多模式叠加，可在腔内构建复杂的驻波与行波混合场。相较于单馈口系统的一维能量传输特性，多馈口结构通过空间分集与相位调控，显著提升场强分布均匀性。多馈口微波加热器件的设计和优化需要考虑许多因素，如馈口尺寸和形状、馈口的数量和位置、加热物体的形状和位置等，涉及模式简并度分析、场强耦合矩阵优化及多

目标遗传算法求解。两波导在腔体的不同排布如图 5-9 所示。

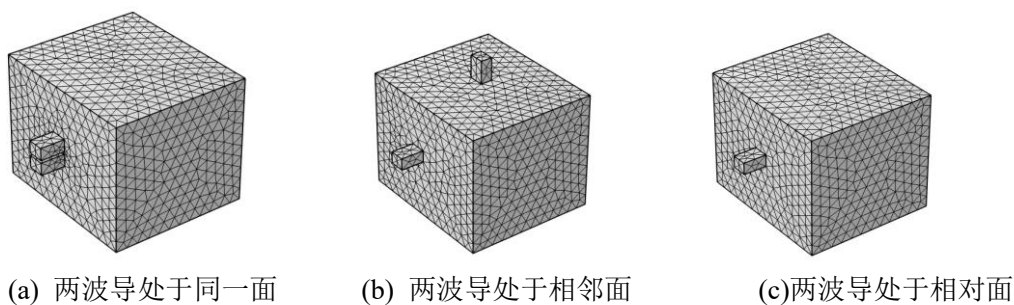
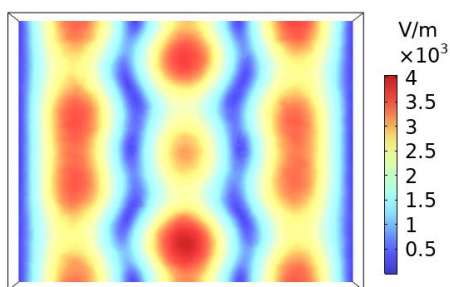
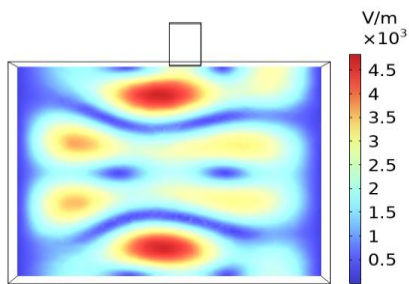


图 5-9 双波导不同位置示意图

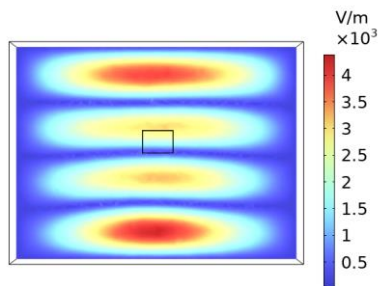
两波导微波加热腔的电场分布如图 5-10 所示，两波导在一个面上时，腔体内部最大电场强度约为 4100V/m ，电场集中分布在三个区域，腔体左侧电场强度比右侧略高；两波导在相邻 2 个面时，电场强度最高可达 4650V/m 左右，电场集中分布在 6 个区域；两波导在相对 2 个面时，电场强度最大值约为 4500V/m ，腔体下半侧场强略高于上半侧。



(a) 两波导处于同一面的电场图



(b) 两波导处于相邻面的电场图



(c) 两波导处于相对面的电场图

图 5-10 双波导电场分布示意图

5.3.4 干燥腔体形状对电磁场的影响

微波干燥腔体的形状设计通常根据干燥箱的设计和微波频率的要求而定，常见的形状包括矩形和圆形。矩形腔体通常由金属材料制成，因为金属能够反射微波，防止微波泄漏。在腔体内壁，可能会设计一些特殊的结构，确保物料能够受到均匀的微波照射。圆形腔体设计可以减少微波在传输过程中的反射和散射，提高能量的利用率。腔体结构如图 5-11 所示。

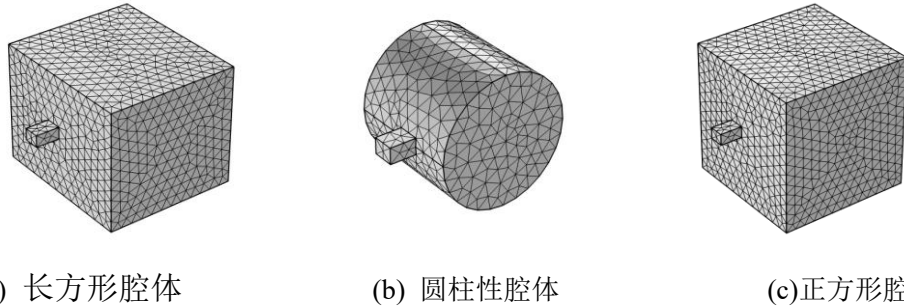
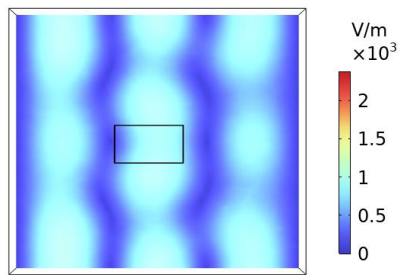
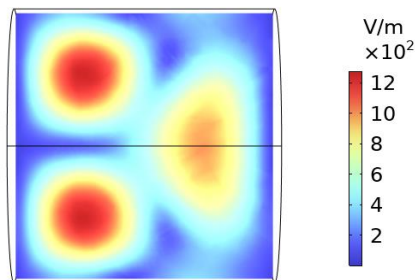


图 5-11 不同腔体形状示意图

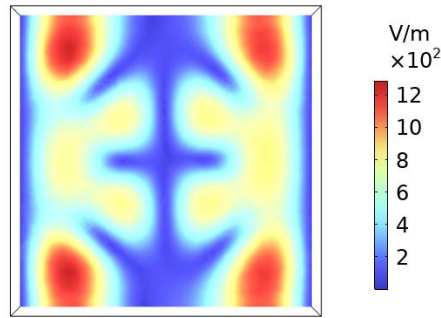
不同腔体形状的电场如图 5-12 所示，当腔体形状为圆柱体时，电场呈上下对称分布，电场集中在 2 个区域最大值为 1236 V/m ，均匀性最差；对于正方体腔体，仿真结果表明，腔体内部电场分布呈现显著的非均匀特性，其场强最大值为 2280 V/m 集中于腔体顶角区域。正方体腔体的四个顶角均观测到高强度电场分布，形成明显的高能聚集区。在相同水平截面上，电场强度分布表现出良好的均匀性特征。腔体几何结构对电磁场分布有影响；当腔体形状为长方体时，电场强度最大处位于腔体的端口处，为 2212 V/m ，场强分布均匀性好。



(a) 长方形腔体电场图



(b) 圆柱形腔体电场图



(c) 正方形腔体电场图

图 5-12 不同腔体形状电场分布示意图

综上所述，可以得出双波导干燥腔电场均匀性比单波导的要好，两个波导排在干燥腔相邻 2 个面时，电场均匀性最好，此时干燥对物料加热的均匀好，在干燥腔形状方面选择长方体，电场强度高且电场均匀性好。

5.4 控制系统设计

控制系统按反馈机制可划分为开环控制系统与闭环控制系统两大类。该闭环架构通过负反馈机制构建误差驱动的调节环路，其稳定性分析需满足奈奎斯特判据，而系统性能优化通常需引入补偿器，通过超前或滞后校正等策略改善系统的幅频响应特性、时域响应指标。闭环系统的输出响应由系统传递函数与反馈环节共同决定，其设计本质是在稳定性、快速性与准确性之间进行动态权衡^[84]。PID 控制作为一种经典的反馈控制策略，在自动化领域应用广泛。其核心思想是通过实时监测系统输出与目标值的偏差，动态调节控制量以实现精确控制^[85]。

5.4.1 PID 控制系统组成

PID 控制系统作为经典线性控制理论的核心架构，微波干燥控制系统架构由被控对象（物料）、检测单元、执行机构及信号接口组成。其中，检测单元集成温湿度传感器（测量环境参数）和机器视觉系统（监测物料形态）；执行机构采用电磁阀等元件实现工艺调控，各组件通过标准通信接口实现数据交互^[86]。控制系统的组成如图 5-13 所示。

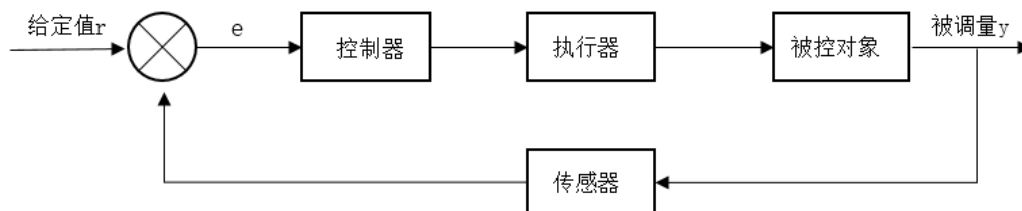


图 5-13 控制系统组成

5.4.2 PID 控制器的作用

PID 控制器参数的选择对闭环控制系统性能的影响具有明确的数学表征与物理意义。控制器参数(比例增益 K 、积分时间常数 T_I 、微分时间常数 T_D)的调整将直接改变系统开环传递函数的极点分布,进而对控制性能产生系统性影响。常见的几种控制器参数如下。

(1)比例系数

比例系数在控制系统中基于偏差的线性关系进行调节,其核心功能是通过与误差信号成比例的控制量实现快速响应。该参数直接影响系统的动态特性:增大 K 值可提升系统响应速度和控制灵敏度,但过高的 K 值会导致超调量增大、振荡加剧以及调节时间延长。当 K 值超过临界阈值时,系统将出现稳定性问题,甚至可能导致控制失效。

(2)积分时间系数

积分系数可以实现稳态误差消除,通过积分作用的累积特性,完全消除系统对阶跃输入的稳态误差,实现精确跟踪。积分时间常数的增大将导致系统时域响应特性发生如下变化,系统输出的超调量会受到抑制,而系统动态响应速度则呈现相应的下降趋势。

(3)微分时间系数

微分控制对线性时不变系统动态特性的影响呈现显著的非线性特征。微分环节通过引入相位超前补偿,对系统动态性能具有显著影响。适度的微分作用能够有效提升系统的响应速度并抑制超调现象,然而当参数超过临界阈值时,将导致相位裕度显著下降,进而引发持续振荡。

5.4.3 PID 参数整定

PID 参数整定是通过系统化调节比例、积分和微分三个控制环节的增益系数,使控制系统达到最优动态性能指标的过程。典型参数整定方法主要包括以下几种:

(1)经验试凑法

经验试凑法是一种基于启发式搜索的 PID 参数优化方法,其基本原理是通过迭代调整控制器的比例增益系数、积分时间常数和微分时间常数,使系统的动态响应特性逐步逼近预设的性能指标要求。该方法基于工程实践经验,无需精确的数学模型,通过观察闭环系统对阶跃输入的响应曲线,按照预设规则迭代调整参数,最终使系统达到稳定、快速且无超调的控制效果。

(2)临界比例度法

临界比例度法源于自动控制理论中的频域分析与稳定性判据。该方法通过闭环系统的临界振荡特性确定比例增益的临界值，进而推导出 PID 控制器的最优参数组合。在仅含比例控制环节的系统中，通过渐进增大比例增益直至系统输出呈现稳态等幅振荡，此时对应的增益值定义为临界比例度。根据奈奎斯特稳定判据，此时系统处于稳定边界，基于这一临界状态，通过经验公式可计算出包含积分与微分作用的 PID 控制器参数。

(3)响应曲线法

响应曲线法理论基础建立在时域分析与频域补偿的耦合关系之上。该研究方法采用单位阶跃激励信号作为系统输入，通过采集被控对象在开环工况下的动态响应数据，建立其时域特性曲线。提取其动态特性参数，进而依据经验公式推导 PID 控制器的最优参数组合。

临界比例度法和响应曲线法的经验公式如表 5-2 所示。

表 5-2 参数整定公式

方法	比例增益 K_p	积分时间 T_i	微分时间 T_d
临界比例度法	$0.6K_{pc}$	$0.5T_{pc}$	$0.125T_{pc}$
响应曲线法	$\frac{1.2T}{K\tau}$	2τ	0.5τ

其中， K_{pc} 为系统产生等幅振荡时的比例增益； T_{pc} 为等幅振荡的周期； K 为静态增益，稳态输出与输入幅值之比； T 惯性时间常数，响应曲线拐点切线与稳态值交点的时间差； τ 纯滞后时间，响应曲线拐点切线与时间轴交点的时间。

5.4.4 干燥装置控制模型

本研究基于微波干燥过程的加热特性分析，采用一阶惯性滞后环节构建微波装置的传递函数模型：

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (5-3)$$

本文采用实验的方法来建立干燥设备的传递函数，使用玻璃容器盛装一定量的红豆样品，放入干燥设备，进行干燥实验，实验过程中，每分钟测量一下样品温度并记录下来，设置最高温度为 40 °C，温度达到稳定后停止实验，微波加热红豆温度采样数据如表 5-3 所示。对实验数据进行拟合，得到的温度变化如图 5-14 所示，将数据拟合并使用 Cohn-Coon 公式建立加热系统传递函数^[87]。

$$K = \frac{\Delta C}{\Delta R} \quad (5-4)$$

$$T = 1.5 \times (t_{0.632} - t_{0.28}) \quad (5-5)$$

$$\tau = 1.5 \times (t_{0.28} - \frac{1}{3}t_{0.632}) \quad (5-6)$$

式中， ΔR 为系统的阶跃输入； ΔC 为系统的阶跃输出； $t_{0.28}$ 为对象阶跃响应达到 $0.28\Delta C$ 所需要的时间； $t_{0.632}$ 为对象阶跃响应达到 $0.632\Delta C$ 所需要的时间。

表 5-3 微波加热红豆温度采样数据

时间/s	温度/°C	时间/s	温度/°C
0	24.8	420	39.5
60	25.6	480	40.3
120	27.6	540	39.8
180	29.4	600	40.2
240	32.1	660	39.9
300	34.6	720	40.1
360	36.8	780	39.8

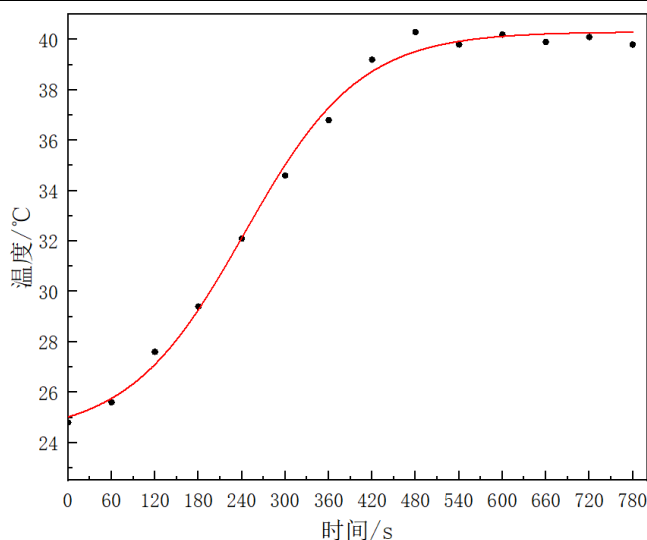


图 5-14 微波干燥设备温度响应曲线

根据实验数据记录，系统响应曲线首次达到设定温度所需的时间常数可通过图 5-14 确定。基于该时间常数，分别计算 $0.632Ts$ 和 $0.28Ts$ 两个特征值，并将计算结果代入式 5-4、5-5、5-6 中，计算 T 与 τ ，值分别为 296 和 58， K 值为 15。所以微波干燥箱温度控制系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{15 \cdot e^{-58s}}{296s + 1} \quad (5-7)$$

本文运用 MATLAB 中的 SIMULINK 模块搭建干燥设备温度控制系统，仿真结构图如图 5-15 所示，延迟时间 τ 不会对仿真结果产生影响，只是将输出向后

延迟,因此本文中延迟时间设为 0,阶跃响应值设为 40,其中 PID 控制器使用子系统创建,PID 控制器及其子系统如图 5-16 所示。

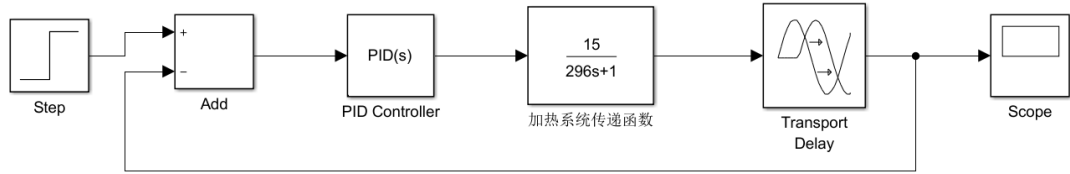
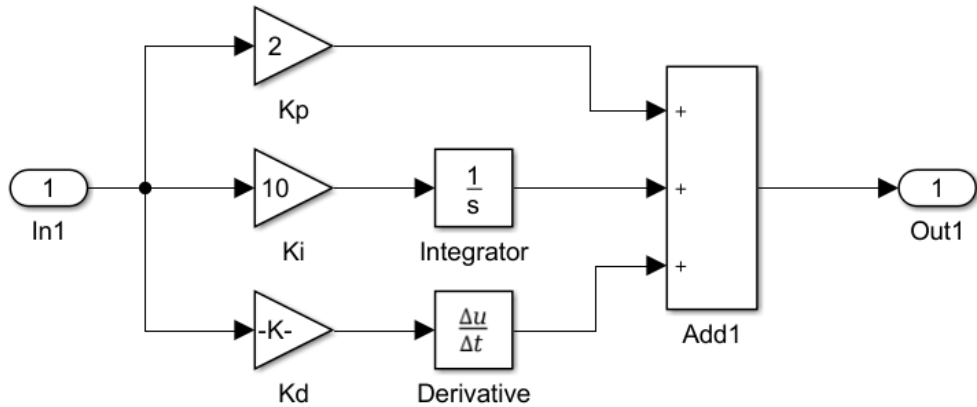
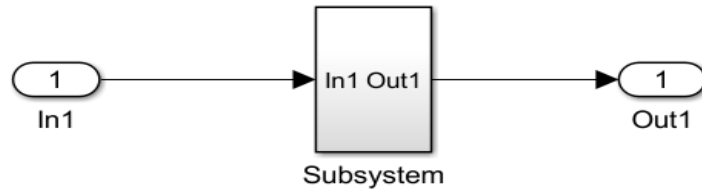


图 5-15 PID 控制系统仿真结构图



(a) PID 控制器模型



(b) 子系统

图 5-16 PID 控制器模型及子系统

在仿真实验设计中,将总仿真时长设定为 240 秒,并完成传递函数模型参数的初始化配置。在仿真执行阶段,通过动态仿真过程对控制器增益参数和被控对象特性参数进行迭代优化调整。为评估系统性能,实时监测包括阶跃响应曲线、调节时间和超调量在内的多项动态响应指标,并基于这些量化指标对控制效果进行综合评价,本研究基于时域响应曲线分析法开展 PID 控制器参数优化,仿真实验结果如图 5-17 所示。从图 5-17 的响应特性曲线可以得出,经过参数优化后的控制系统具有以下动态性能指标:阶跃响应调节时间为 180 秒^[88],系统在 13 s 时达到温度最大值为 68 ℃,之后温度随着时间不断衰减,在 22 s 时温度衰减到波

谷，此时系统温度为 22°C ，在 $0\text{--}180\text{ s}$ 这段时间内，系统温度在 40°C 上下摆动， 180 s 之后，温度稳定在 40°C 。

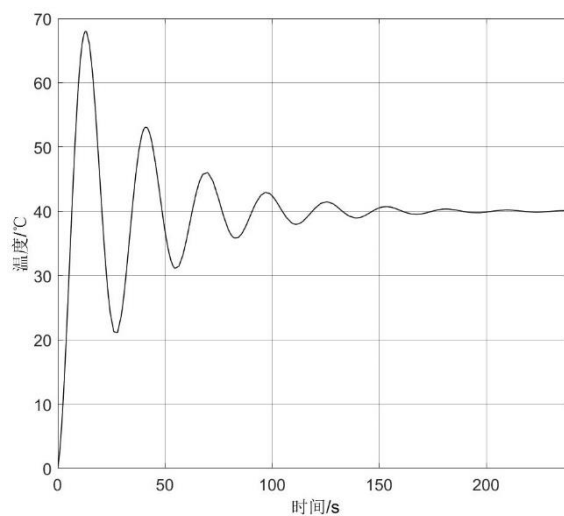


图 5-17 PID 控制响应图

5.5 本章小结

本章是基于前面几章的微波干燥理论和实验来进行的，对微波干燥设备进行设计与优化，先对干燥设备的总体结构进行设计，再对干燥设备的各个部分进行改进，如干燥设备的旋转托架，所需要的传感器等；基于微波谐振腔理论，对干燥设备的波导排布及腔体形状进行设计优化；最后对干燥设备控制系统进行设计。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文旨在提升红豆的干燥效率，先是研究微波干燥、热风干燥、真空冷冻干燥 3 种干燥方式对红豆品质影响，在保证干燥速率和能耗的前提下，挑选出对红豆品质损坏较小的干燥方式——微波真空干燥；进而探究外部条件对红豆干燥的影响，微波功率、真空度、干燥温度 3 个影响因素，先是进行单因素分析，在此基础上进行响应面分析，找到红豆干燥最佳工艺；再从内部分析——物料本身，探究红豆介电特性与温度、含水率的关系，运用 COMSOL 软件探究红豆干燥过程中的传热传质规律；最后从干燥装置着手来提高干燥效率，对干燥装置的主要结构进行优化以及干燥装置控制系统进行改进。

本文主要结论和创新点：

(1)对比了 3 种干燥方式——微波真空干燥、热风干燥、真空冷冻干燥对干燥后红豆品质的影响，综合比较三者微观结构、色差、能耗、热稳定性等各方面的差异，发现微波真空干燥对红豆的影响最小。

(2)分析了不同因素条件微波功率、温度和真空度对红豆干燥特性的影响，发现真空度对其影响作用最大，运用响应面分析确定红豆干燥的最佳工艺；借助之前的实验数据，对红豆的干燥动力学模型进行研究，求解出它的水分扩散系数和干燥活化能，利用阿伦尼乌斯公式求得活化能为 10.427 kJ/mol，Lewis 模型在不同干燥条件下，决定系数 R^2 较大、RMSE 相对较小，能较好地与不同条件下的干燥过程进行拟合，因此选择 Lewis 模型用于红豆干燥过程的预测和控制。运用 MATLAB 数学软件，利用神经网络算法构建含水率预测模型。

(3)运用了 COMSOL 多物理场仿真软件建立红豆热湿传递模型，模拟红豆过程中温度与水分的变化，并做干燥实验验证模型的准确性，结果表明实验值与模拟值接近；运用矢量网络分析仪探究红豆介电特性与温度、含水率的关系；对干燥装置进行优化，对主要部件进行改进，微波干燥腔的形状和波导排布进行设计，对干燥装置的温控系统进行优化。

6.2 展望

本文建立了红豆微波真空干燥传热传质模型，探究了不同因素对红豆干燥特

性及温度均匀性的影响，并对干燥装置结构及控制系统进行了优化。但由于时间和条件的限制，本研究仍有不足之处：

研究热质传递模型时红豆近似看成圆柱体，没有考虑到其中的间隙，后续可以优化，使模型更加准确的反映干燥过程中的变化；探究红豆的介电特性时，只考虑了温度、含水率对其影响，没有考虑微波频率的影响；装置优化停留在理论设计，未见样机的实验过程；干燥腔的优化只分析了电场分布均匀性，没有考虑的优化后能源消耗问题。

参考文献

- [1] Wang L, Wang J, Cheng X. Adzuki bean (*vigna angularis* (willd.) ohwi & ohashi) breeding[J]. *Advances in Plant Breeding Strategies: Legumes*, 2019, 7(2): 1-23.
- [2] Jide A O, Alademeyin J O, Ajongbolo K F. Adzuki (*Vigna angularis*) beans as food: Chemical composition, nutrition and quality identities[J]. *Journal of Advanced Education and Sciences*, 2023, 3(3): 05-08.
- [3] Wang Y, Yao X, Shen H, et al. Nutritional composition, efficacy, and processing of *Vigna angularis* (Adzuki bean) for the human diet: An overview[J]. *Molecules*, 2022, 27(18): 6079.
- [4] 谷春梅, 候春宇, 程安玮. 蒸汽爆破对红豆和绿豆多酚含量及抗氧化活性的影响[J]. *核农学报*, 2021, 35(07): 1574-1582.
- [5] Khan M I, Alfarsi M. Drying of fruits and vegetables: A review of traditional and modern methods[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 289: 110172.
- [6] Cai J, Wang H, & Liu Y. Effects of drying methods on the quality and nutritional properties of fruits: A comprehensive review[J]. *Food Chemistry*, 2022, 379: 132196.
- [7] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(03): 101-108.
- [8] Kumar, P, & Singh, S. Traditional drying methods: A review on grain and fruit-drying[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(3): 1512-1521.
- [9] Remberg S F, Abegaz K, Narvhus J, et al. Impact of drying methods on the nutrient profile of fruits of *Cordia africana* Lam. in Tigray, northern Ethiopia[J]. *Fruits*, 2015, 70(2): 77-990.
- [10] Feng, H., & Zhao, H. Overview of drying technologies for fruits and vegetables: Traditional methods and recent advancements[J]. *Food Reviews International*, 2021, 37(3): 221-239.
- [11] 段续, 张萌, 任广跃, 等. 玫瑰花瓣红外喷动床干燥模型及品质变化[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(08): 238-245.
- [12] 刘德成, 郑霞, 肖红伟, 等. 红枣片冷冻-红外分段组合干燥工艺优化[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(17): 293-302.
- [13] 林萍, 姚娜娜, 车凤斌, 等. 5 种干制方式对大果沙棘干燥特性及品质的影

- 响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(04): 41-48.
- [14] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(04): 25-30.
- [15] Le X N, Hu S C, Zheng J L, et al. The influence of different drying methods on bioactive components of *Eucommia ulmoides* Oliver male flower and the comprehensive assessment for industrial application[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 177: 114469.
- [16] Zhang M Q, Cheng F, Chang M C, et al. The influence of different drying methods on the quality of dried shiitake mushrooms after non sulfur color protection[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2017, 12(25): 162–169.
- [17] Liu Q L, Wang Q W. The effect of mid short wave infrared drying on the drying characteristics, nutritional quality, and antioxidant activity of mulberries[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(12): 39-45.
- [18] 韦强, 郑丽静, 武冬雪. 热风干燥温度对脱水白萝卜品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(01): 165-169.
- [19] Yuan Y, Tan L, Xu Y, et al. Numerical and experimental study on drying shrinkage-deformation of apple slices during process of heat-mass transfer[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 136: 539-548.
- [20] 袁婷婷, 李学琼, 陈厚荣. 基于几何加权法的辣椒热风干燥品质工艺优化[J]. 农产品工, 2018, (17): 2228.
- [21] Ju H Y, Law C L, Fang X M, et al. Drying kinetics and evolution of the sample's core temperature and moisture distribution of yam slices (*Dioscorea alata* L.) during convective hot-air drying[J]. *Drying Technology*, 2016, 34(11): 1297-1306.
- [22] Aghilinategh N, Rafiee S, Hosseinpour S, et al. Real-time color change monitoring of apple slices using image processing during intermittent microwave convective drying[J]. *Food Science and Technology International*, 2016, 22(7): 634-646.
- [23] 庞维建. 适用于玉米特性的微波干燥工艺探究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [24] Quispe F I, Vega G A, Aranda M, et al. Effects of drying processes on composition, microstructure and health aspects from maqui berries[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57: 2241-2250.
- [25] 杨颖, 李夔宁, 童明伟. 小麦种子的真空冷冻干燥处理[J]. 重庆大学学报(自

- 然科学版), 2002, (08): 61-64.
- [26] Jiang G L, Townsend W, Sismour E, et al. A study of application and comparison of thermal drying and freeze drying of fresh edamame seeds in the analysis of seed composition[J]. Agronomy, 2022, 12(9): 1993.
- [27] 安可婧, 徐玉娟, 魏来, 等. 龙眼间歇真空微波干燥动力学研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(09): 30-36.
- [28] 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.
- [29] 张利娟, 耿令新, 金鑫, 等. 基于BP神经网络的小麦真空干燥含水率预测模型[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(03): 101-106.
- [30] Amintaheri G,Venkatesh M,Leila N.Artificial neural network-genetic algorithm modeling for moisture content prediction of savory leaves drying process in different drying conditions,Engineering in Agriculture[J], Environment and Food, 2018, 11(04): 56-65.
- [31] 王会林, 卢涛, 姜培学. 生物多孔介质热风干燥数学模型及数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 325-333.
- [32] 程强. 马铃薯片的微波温度场仿真与微波真空干燥的能耗研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2018.
- [33] Mao Y, Hao Y, Guan X, et al. Temperature and moisture dependent dielectric and thermal properties of walnut components associated with radio frequency and microwave pasteurization[J]. Foods, 2022, 11(7): 919.
- [34] Zhu Z, Guo W. Frequency, moisture content, and temperature dependent dielectric properties of potato starch related to drying with radio-frequency microwave energy[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 9311.
- [35] Song C F, Wang Y, Wang S, et al. Temperature and moisture dependent dielectric properties of Chinese steamed bread using mixture equations related to microwave heating[J]. International journal of food properties, 2016, 19(11): 2522-2535.
- [36] 姚渠, 尹君, 李瑞敏, 等. 我国粮食干燥技术发展现状与趋势[J]. 粮食加工, 2022, 47(03): 77-79.
- [37] 潘云. 食品干燥设备恒温控制系统设计[J]. 中国食品工业, 2022(17): 112-116.
- [38] 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.

- [39] 金骁. 谷物干燥工艺优化及过程控制技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2019.
- [40] 王恒鹏, 王引兰, 姜松松, 等. 不同干燥方式下调理猪肉干品质变化及其机制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 317-326.
- [41] Mousavi M, & Ghoreish S M. Drying methods and their effects on food preservation: Focus on microbial growth and enzymatic reactions[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(6): 2124-2136.
- [42] Zhang H, Zhang Q, & Yang M. Modeling of drying kinetics and moisture content in agricultural products: A review and new insights[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 335: 111238.
- [43] Yang H, Zhang H., & Chen Y. Color analysis and sensory evaluation of food products: Techniques and applications[J]. *Food Science & Nutrition*, 2023, 11(5): 2334-2348.
- [44] Smith J, & Jones A. Review on characteristics of trained sensory panels in food science[J]. *Food Quality and Preference*, 2022, 89(4): 1043-1056.
- [45] Lee H, & Kim J. Investigation of thermal stability and degradation kinetics of polymer composites using thermogravimetric analysis[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, 192: 109698.
- [46] 陈健凯. 不同干燥方法对杏鲍菇结构及品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 221-228.
- [47] Zhou L, & Liu Y. Optimization of energy efficiency in drying systems: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 171: 112907.
- [48] Zhang W P, Yang X H, et al. The influence mechanism and control strategy of relative humidity on hot air drying of fruits and vegetables: a review[J]. *Drying Technology*, 2021, 40: 2217-2234.
- [49] Wu Y, Zhang X, & Wang L. Effects of temperature gradients on moisture distribution during hot air drying of agricultural products[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 321: 112-123.
- [50] Braga M B, Veggi P C, Codolo M C, et al. Evaluation of freeze-dried milk-blackberry pulp mixture: Influence of adjuvants over the physical properties of the powder, anthocyanin content and antioxidant activity[J]. *Food Research International*, 2019, 125: 108557.

- [51] Doe J, & Smith A. Effect of thermal processing on the stability of bioactive compounds in functional foods[J]. *Journal of Functional Foods*, 2024, 15(2): 215-227.
- [52] Smith R, & Thomas M. Optimization of drying processes for energy efficiency and cost reduction[J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(2): 456-465.
- [53] 蒋齐翻, 张凯, 周明干, 等. 杜仲叶微波热风组合干燥工艺研究[J]. *真空电子技术*, 2020, (03): 77-81.
- [54] 叶庆华. 双频道激电和伪随机三频激电的三维正演数值模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [55] 王立霞, 兰昊, 郑倩雨, 等. 红枣气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(02): 131-140.
- [56] 高明. 蓝莓果浆微波干燥均匀性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [57] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 150-155.
- [58] 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.
- [59] 张海静, 杨哲, 张敏, 等. 挤压膨化对酱油渣蛋白溶解度的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(15): 61-66.
- [60] 孙宇. 浆果微波干燥理论与技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2021.
- [61] 宋月. 微波泡沫干燥浆果果浆均匀性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [62] 于海明, 姜骥文, 胡玉辉, 等. 热风辅助微波干燥对苦瓜干燥品质和效率的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(02): 69-80.
- [63] 葛艳琳. 山葡萄皮花青素超声波辅助提取及抗氧化活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(10): 48-55.
- [64] 肖韵. Hilbert-Huang变换端点问题处理方法的分析与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [65] 付宗营, 蔡英春, 高鑫, 等. 基于人工神经网络模型的木材干燥应变模拟预测[J]. *林业科学*, 2020, 56(06): 76-82.
- [66] 白竣文, 田潇瑜, 马海乐. 基于BP神经网络的葡萄气体射流冲击干燥含水

- 率预测[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 198-203.
- [67] 杨亮. 苦瓜片热风与红外干燥特性及品质评价[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [68] 刘海军, 刘伟, 张春芝, 等. 基于 BP 神经网络的微波真空膨化浆果脆片工艺参数优化[J]. 中国食品学报, 2016, 16(03): 103-108.
- [69] 程嘉蔚. 基于 BP 神经网络的储粮温度预测模型及应用[D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
- [70] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 基于 BP 神经网络预测红外-喷动干燥带壳鲜花生水分比[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 9-18.
- [71] Chen J, Pitchai K, Birla S, et al. Modeling heat and mass transport during microwave heating of frozen food rotating on a turntable[J]. Food and Bioprocess Processing, 2016, 99: 116-127.
- [72] Song G, Choudhary R and Watson D G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(1): 90-99.
- [73] Dai J W, Yang S L, Wang J, et al. Effects of microwave vacuum drying on drying characteristics and quality of banana slices [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 493-500.
- [74] Selimefendigil F, Özcan C S and Öztöpe H F. Convective drying of a moist porous object under the effects of a rotating cylinder in a channel[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020, 141(5): 1569-1590.
- [75] Chen J J, Pitchai K, Birla S, et al. Heat and mass transport during microwave heating of mashed potato in domestic oven: Model development, validation, and sensitivity analysis[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(10): 1991-2004.
- [76] Halder A, Datta A K. Surface heat and mass transfer coefficients for multiphase porous media transport models with rapid evaporation[J]. Food and Bioprocess Processing, 2012, 90(3): 475-490.
- [77] Gulati T, Zhu H, Datta A K. Coupled electromagnetics, multiphase transport and large deformation model for microwave drying[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 156: 206-228.
- [78] Bingöl G, Pan Z L, Roberts J S, et al. Mathematical modeling of microwave-assisted convective heating and drying of grapes[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2008, 1(2): 46-54.
- [79] Pham N D, Khan M I and Karim M A. A mathematical model for predicting the

transport process and quality changes during intermittent microwave convective drying[J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126-132.

- [80] 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.
- [81] 杨化宇. 液态食品连续式微波加热方法设计及过程研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [82] 孙芳, 江水泉. 我国果蔬干燥加工技术现状及发展前景[J]. 粮食与食品工业, 2016, 23(04): 11-15+20.
- [83] 马登成, 刘壮壮, 刘双鹤. 微波-热风混合加热沥青路面回收料仿真分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(12): 143-154.
- [84] 刘浩, 赵春江, 宁圆盛, 等. 旋压机液压伺服系统位置压力复合控制研究[J]. 液压与气动, 2022, 46(07): 11-16.
- [85] 金毅. 基于等效积温的谷物干燥过程建模与智能控制[D]. 吉林: 吉林大学, 2019.
- [86] 张静峰. 基于 PLC 的热泵干燥控制系统设计与研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
- [87] 杜婉, 杨彪, 郭林嘉, 等. 微波加热钛精矿试验建模及温度控制器设计[J]. 自动化仪表, 2020, 41(02): 28-31+36.
- [88] 黄柳儒, 任德均, 陈崑, 等. 数字式比例多路阀控制系统设计[J]. 机械, 2017, 44(09): 51-54.

攻读硕士学位期间发表的成果

一、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, 实用新型, 2024.03.08, ZL202321873745.X.

[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, 实用新型, 2024.04.05, ZL202322048332.4

二、论文情况

[1] Wu Jun, Sun Tongsheng, Tang Hongtu, et al. Effects of different drying methods on microstructure and quality characteristics of red bean [J]. Cereal Chemistry, 2025. (录用)

[2] Fan Jinsheng, Sun Tongsheng, Wu Jun, 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)

三、参加项目

[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，三年的研究生生涯，终要落幕。我与这个学校的故事始于 2022 年的金秋，终于 2025 年的盛夏。三年的研究生时光转瞬即逝，回首三年光阴，感慨万千。

首先，我要感谢我的导师孙铜生教授，导师学识渊博、细致严谨，从论文的选题、开题到反反复复的修改直至定稿，孙老师在承担繁重的教学与科研任务之余，仍耐心为我答疑解惑，对我的研究工作给予了细致指导。得遇良师，我倍感荣幸，祝孙老师学术长青，万事顺遂。

其次，我要感谢我的父母家人，在我成长过程中默默奉献。支持我，尊重我做的每一个选择，做我最坚实的后盾，让我有机会去体验这世间的各种美好。养育之恩，无以为报。我还要感谢课题组的师兄弟们，在科研道路上给予我的帮助，当我遇到困难时，热心为我解惑，一起度过了快乐的科研时光。我也要感谢从未放弃的自己，这是我快速成长的三年，科研与生活交织的道路虽然曲折，却充满了深刻的意义。这三年，让我更加了解自己，使我变的更加优秀。感谢这三年读研期间遇见的所有人与事。

最后，对所有参与论文评审、答辩的各位老师致以诚挚的感谢！

尚禮敬學 唯實惟新

