

分类号: TS213.3

学校代码:10363

密 级: 公开

学 号:2210120151



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 小麦微波真空干燥工艺及装
置优化研究

论 文 作 者 王 凯

校 内 导 师 孙铜生 教授

校 外 导 师 周文建 研究员

专业学位类别 机 械

研究方向(领域) 现代机械设计理论及方法

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号：TS213.3

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120151

小麦微波真空干燥工艺及装置优化研究

OPTIMIZATION STUDY OF MICROWAVE VACUUM
DRYING PROCESS AND EQUIPMENT FOR WHEAT

学生姓名： 王 凯

指导教师： 孙铜生 教授

校外导师： 周文建 研究员

专 业： 机 械

研究方向： 现代机械设计理论及方法

论文答辩日期： 2024 年 5 月 18 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：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，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：王凯

日期：2024 年 5 月 18 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：王凯

指导教师签名：孙新

日期：2024 年 5 月 18 日

日期：2024 年 5 月 18 日

小麦微波真空干燥工艺及装置优化研究

摘 要

小麦作为五谷杂粮之一，其在国内外市场需求量巨大。然而刚刚收获的小麦由于含水量较高，无法安全地储存，因此干燥过程成为小麦收获后至关重要的处理环节。传统的干燥方法，如自然干燥、热风干燥、冷冻干燥和喷雾干燥等，都存在一定的限制。然而，微波干燥作为一种创新的干燥方法，利用电磁辐射的方式直接加热物料，并和物料内部水分子相互作用，实现水分转移。这种干燥方式具有诸多优点，包括高干燥效率、优质干燥产品以及高能量利用率等。微波真空干燥技术则是将微波干燥的快速高效和真空干燥的低温特性结合，较好的解决了小麦品质和经济效益之间的矛盾。

本研究以小麦为对象，探究在微波真空干燥过程中满足工业干燥要求的最佳工艺参数，同时保持小麦品质。研究目的是为处理刚收获小麦等农作物提供干燥方案，为后续微波真空干燥装置的设计提供优化思路。主要研究内容和结论如下：

(1) 小麦微波真空干燥特性分析及数值模拟

本研究以电磁波传播、热量交换、水分迁移等理论为基础，探究微波真空干燥过程中的干燥特性，确定本研究的参数指标；整合含水率、有效水分扩散系数、爆腰率等参数指标的计算方法，并确定其判定标准；利用 COMSOL 软件模拟微波真空干燥的整个过程，从仿真角度分析干燥过程的温度变化、

电磁场分布和应力产生过程，为后续微波真空干燥实验数据提供参数参照和对比。

(2) 小麦微波真空干燥有效水分扩散系数和活化能研究

以小麦的工业干燥要求为前提，设计微波真空干燥实验，分析满足干燥要求的工艺参数范围，初步得到小麦干燥过程中的效率标准。为明确具体工艺参数对小麦干燥效率标准的影响，本研究从微波密度、有效水分扩散系数、能耗和爆腰率角度对实验结果进行分析。根据干燥结果选择合适的微波密度，以降低微波真空干燥不均匀的影响，为后续干燥设备在干燥均匀性优化方面提供数据支撑。此外，对干燥过程中小麦有效水分扩散系数结果作曲线拟合，从外观层面分析干燥裂纹对水分传输的影响，并为后续从内部应力层面分析干燥裂纹对水分传输的影响提供数据参照。

(3) 小麦微波真空干燥应力解析及裂纹预测

针对小麦干燥过程中的爆腰现象，本研究从内部应力层面分析干燥裂纹的产生过程及控制方法，旨在探究裂纹对干燥过程中水分传输、温度变化、抗压特性等方面的影响，为建立小麦裂纹模型奠定基础。在压缩试验中，采用质构仪对小麦进行压缩，并设置不同的初始含水率和温度条件，测量小麦的压缩变形量、压缩裂纹数量以及整个压缩过程的压缩负载，并对压缩数据进行分析，得出压缩过程中的应力-应变模型。同时，将应力-应变模型与微波真空干燥实验数据相结合，建立一套与应力、含水率和温度相关的裂纹预测模型。最终，利用裂纹预测模型，设计了一套最佳的微波真空干燥工艺。

研究结果对降低小麦微波真空干燥干燥的爆腰率、改善小麦储存方案、分析裂纹对小麦内部温度变化和水分传递的影响等研究提供数据支持。

(4) 微波真空干燥实验装置设计与优化

本章针对前文小麦干燥过程中的不均匀现象，并结合在使用微波真空干燥机过程中所遇到的机器噪音大、物料温度测量难、仪器能量利用率低等问题，实现了对微波真空干燥装置的设计与优化。本章结合实验所用微波真空干燥机的特点，描述了一种新型微波真空干燥装置的创新之处。创新之处表现在物料托盘结构设计、安装称重托盘、降噪等方面。采用六角分布的托盘组放置物料，配合凸轮机构和齿轮机构实现物料在干燥过程中自动翻滚和均匀分布，且受热均匀；干燥托盘与耐高温称重装置结合，使干燥过程中物料的质量实时显示，可有效减少操作步骤和能量损耗；真空泵内部包涂橡胶，排气口处附加阻尼消声器，降低干燥机经过共振区的振幅，从而达到降低噪声的目的。这些优化措施可以提高微波真空干燥装置的干燥效率、产品质量，并改善工作环境和操作体验。

关键词：微波真空干燥，水分扩散系数，裂纹预测，应力解析，温度场

OPTIMIZATION STUDY OF MICROWAVE VACUUM DRYING PROCESS AND EQUIPMENT FOR WHEAT

ABSTRACT

Wheat, as one of the major cereal grains, has a significant demand in both domestic and international markets. However, freshly harvested wheat with high moisture content cannot be safely stored, making the drying process crucial. Traditional drying methods such as natural drying, hot air drying, freeze drying, and spray drying have limitations. Microwave drying, as a novel drying technique, utilizes electromagnetic waves to generate heat within the material, facilitating the gradual transfer of internal temperature and moisture gradients. This drying method offers several advantages, including high drying efficiency, superior drying quality, and high energy utilization. Microwave vacuum drying technology combines the rapid and efficient drying of microwave drying with the low-temperature characteristics of vacuum drying, effectively addressing the trade-off between wheat quality and economic benefits.

This study focuses on wheat and aims to identify process parameters that can improve drying efficiency without compromising wheat quality, using drying efficiency (moisture content change) as the benchmark. The study also examines the stress applied to wheat during the drying process and observes changes in wheat's external kernel bursting rate. The research aims to provide drying solutions for freshly harvested crops such as wheat and offer optimization insights for the design of subsequent microwave vacuum drying equipment. The main

research contents and conclusions are as follows:

(1) Analysis and Numerical Simulation of Microwave Vacuum Drying Characteristics for Wheat:

Based on theories of electromagnetic wave propagation, heat exchange, and moisture migration. This study aims to demonstrate the superiority of microwave vacuum drying for materials such as wheat. It explores observable and comparable characteristic indicators to evaluate the drying efficiency and quality of wheat. Utilize COMSOL software to simulate the entire process of microwave vacuum drying and analyze the temperature variation, electromagnetic field distribution, and stress generation during the drying process from a simulation perspective, providing parameter references and comparisons for subsequent experimental data of microwave vacuum drying.

(2) Study on effective water diffusion coefficient and activation energy of microwave vacuum drying of wheat:

Building upon the microwave vacuum drying theory, this study designs drying experiments to investigate different process parameters and their impact on drying efficiency standards for wheat. The experimental results are analyzed from the perspectives of microwave density, drying activation energy, and kernel bursting rate. Based on the drying outcomes, an appropriate microwave density is selected to mitigate the uneven drying effect of microwave vacuum drying, providing data support for optimizing drying uniformity in subsequent drying equipment. Additionally, curve fitting analysis and comparison of drying process results offer reference for studying wheat stress characteristics and optimizing processing conditions to extend food storage duration.

(3) Stress analysis and crack prediction in microwave vacuum drying of wheat:

Building on the microwave vacuum drying theory, this study designs

microwave vacuum drying experiments and compression tests to explore the relationship between different process parameters and the kernel bursting rate and stress of wheat, laying the foundation for establishing a crack prediction model for wheat. In the compression tests, a texture analyzer is used to compress wheat, with varying initial moisture content and temperature conditions. Measurements of compression deformation, number of compression cracks, and compression load throughout the process are analyzed to derive a compression crack model. By combining the compression crack model with experimental data from microwave vacuum drying, a crack prediction model related to stress, moisture content, and temperature is established. Finally, using the crack prediction model, an optimal microwave vacuum drying process is designed. The results provide data support for reducing the bursting rate of wheat in microwave vacuum drying, improving wheat storage scheme, and analyzing the effects of cracks on temperature change and water transfer in wheat.

(4) Design and optimization of microwave vacuum drying experimental equipment:

This chapter focuses on the non-uniformity in wheat drying process mentioned above, this section addresses the shortcomings of existing drying equipment and presents the design and optimization of an experimental setup for microwave vacuum drying of wheat. It describes the overall structure, component design features, operation mode, and innovations of the wheat microwave drying experimental setup. The improvements include the design of a material tray structure, installation of a high-temperature weighing tray, and noise reduction measures. The hexagonal arrangement of trays enables uniform distribution of materials during the drying process, coupled with cam and gear mechanisms to achieve even heating. The drying tray is combined with a high-temperature weighing device, allowing real-time display of the material's mass during the

drying process and reducing operational steps and energy consumption. The vacuum pump is coated with rubber, and an additional damping muffler is attached to the exhaust port to reduce the amplitude of the drying machine passing through the resonance zone, thereby reducing noise. These optimization measures enhance the drying efficiency and product quality of the microwave vacuum drying setup, as well as improve the working environment and user experience.

KEY WORDS: microwave vacuum drying, moisture diffusion coefficient, crack prediction, stress analysis, temperature field

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 微波真空干燥技术研究现状	2
1.2.1 国外微波真空干燥研究现状	2
1.2.2 国内微波真空干燥研究现状	2
1.2.3 微波密度和有效水分扩散系数研究现状	3
1.2.4 微波真空干燥应力研究现状	4
1.3 存在问题	4
1.4 研究内容及研究目标	5
第 2 章 小麦微波真空干燥特性分析及数值模拟	7
2.1 微波真空干燥理论概述	7
2.2 小麦微波真空干燥特性分析	7
2.2.1 小麦微波真空干燥特性理论分析	8
2.2.2 小麦微波真空干燥特性指标	9
2.3 小麦微波真空干燥数值模拟	11
2.3.1 微波真空干燥三维模型	11
2.3.2 小麦模型假设	12
2.3.2 控制方程	13

2.3.3 初始条件及基本参数	14
2.3.4 干燥腔体内部电磁场分布规律	14
2.3.5 干燥腔体内部温度场分布规律	16
2.3.6 小麦干燥应力分析	18
2.4 本章小结	20
第 3 章 小麦微波真空干燥有效水分扩散系数和活化能研究.....	21
3.1 引言	21
3.2 材料与方法	21
3.2.1 实验材料	21
3.2.2 实验设备	21
3.2.3 实验流程	24
3.2.4 实验方法	24
3.2.5 有效水分扩散系数和活化能计算	25
3.3 数据与分析	26
3.3.1 干燥实验结果分析	26
3.3.2 有效水分扩散系数与活化能结果分析	31
3.4 本章小结	33
第 4 章 小麦微波真空干燥应力解析及裂纹预测.....	35
4.1 引言	35
4.2 材料与方法	35

4.2.1 应力解析方程	35
4.2.2 实验设备	38
4.3 实验方法	38
4.4 结果与分析	40
4.4.1 压缩实验分析	41
4.4.2 应力与温度和含水率的关系	42
4.4.3 应力与裂纹的关系	45
4.4.4 爆腰的预测	46
4.5 本章小结	48
第 5 章 微波真空干燥实验装置设计与优化	50
5.1 引言	50
5.2 物料室优化方案	50
5.3 称重装置与控温系统设计	52
5.3.1 耐高温称重传感器	52
5.3.2 物料托盘可称重化	53
5.3.3 智能控温系统设计	54
5.3.3.1 智能控温系统硬件设计	55
5.3.3.2 智能控温系统软件设计	58
5.4 微波真空干燥机降噪处理	60
5.5 设计创新点	63

5.6 本章小结	64
第 6 章 结论	65
6.1 总结	65
6.2 展望	66
参考文献	67
攻读硕士期间获得的科研成果	79
致谢	80

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

小麦被列为“三大”谷类作物之一，每年收获超过 7 亿吨^[1]。根据数据，2023 年全球小麦总产量为 7.78 亿吨。小麦是全球最重要的粮食作物之一，被广泛用于食品加工和消费，同时还在饲料、酿酒、生物质能源等领域发挥着重要作用。

小麦在收获期间含水率较高，不能长时间储藏，且容易生霉。为了控制小麦的含水率，需要对刚收获小麦进行处理，一般要求长期贮藏时水分含量不超过 12.5%。然而，由于小麦结构的特殊，干燥过程受到很多限制，并不能耐受高温的影响。过高的干燥温度会对小麦的结构和成分造成损伤，进而直接影响小麦的品质和营养价值。因此，干燥技术在小麦的产后储存中起着重要作用，提高干燥效果至关重要^[2-12]。

目前热风干燥、自然晾晒和微波干燥是最主流的干燥形式^[13]。农村地区普遍采用的自然晾晒方式相比其他干燥方式，具有占用大量的空间资源、速度较慢、难控制干燥过程中的温度和湿度等劣势，这对于保持小麦的品质和营养价值构成极大挑战。热风干燥应用广泛，偏向于迅速干燥大批量的物料，然而热风具有的高温性质却容易降低小麦品质^[14]。真空干燥小麦的方法可以得到较高质量的干小麦，但相对于其他干燥方式，真空干燥效率低，能耗高，且设备和维修成本高，这使其应用范围受到限制。微波干燥具有比热风干燥更好的控制温度能力，且微波能直接作用水分子，但其干燥不均匀问题严重^[15-21]。目前复合干燥方法的研究受到人们的高度重视，具有增加干燥驱动力、缩减干燥时间和能耗等优点，可以获得高质量的产品。微波真空干燥技术作为复合干燥方法的一种，结合微波干燥的快速高效和真空干燥的低温特性的特点，较好的解决了小麦干燥品质和经济效益之间的矛盾。

本研究选择小麦为研究对象，通过分析微波真空干燥特性，确定本研究的参数指标；利用 COMSOL 软件模拟微波真空干燥的整个过程，从模拟角度解释参数在干燥中的变

化过程；设计微波真空干燥实验和压缩试验，从微波密度、有效水分扩散系数、应力、能耗和爆腰率角度对实验结果进行分析，一方面从外观层面分析干燥裂纹对水分传输的影响，一方面从内部应力层面分析干燥裂纹的产生过程及控制方法，再设计一套最佳的微波真空干燥工艺；针对小麦干燥过程中的不均匀现象，并结合在使用微波真空干燥机过程中所遇到的问题，实现对微波真空干燥装置的设计与优化。

1.2 微波真空干燥技术研究现状

1.2.1 国外微波真空干燥研究现状

利用真空环境和微波加热相结合的方式，微波真空干燥箱将微波能量传达到物料内部，引起分子振动和摩擦，从而达到物料内部的水分迅速蒸发，同时结合真空环境降低干燥温度，以降低热量对物料的直接传递水平，从而实现物料快速干燥的目的。微波真空干燥相对于传统的干燥方式具有多项优势^[22-25]。物料内部被微波能量直接作用，无需依赖传热或传导介质，因此具有更快的干燥速度。此外，微波真空干燥还具备快速高效、节能环保和控制精度高等优势。微波真空干燥广泛应用于多个领域，包括木材、农产品、纸张、食品和药品等^[26]。基于这些优点，学者们不断对其进行了深入研究。

Figiel A 等^[27]在对比多种干燥方式后，采用微波真空干燥的处理方式对水果和蔬菜进行脱水，结合化学性质和物理参数分析。证明与传统干燥相比，微波真空干燥能够大幅度减少干燥总时长，并降低干燥收缩率。

Therdtha 等^[28]对比了微波真空干燥及热风干燥应用于薄荷叶的过程，结果表明将薄荷叶干燥至相同干基含水率时（10%）微波真空干燥所用时间显著少于热风干燥。

Drouzas 等^[29]对比了微波真空干燥及真空冷冻干燥香蕉片的品质，发现在复水性、香气及口感等方面二者无明显差异。

1.2.2 国内微波真空干燥研究现状

在微波真空干燥的相关研究中，研究者们对真空度、微波功率和温度梯度等干燥条件和较为单一的品质参数更为关注。但近些年数值模拟研究技术发展迅速，凭借干燥实

验过程中的物料消耗低, 研究结果更具有普适性和精确性, 有望发展为微波真空干燥领域一种重要的模式。

张乐等^[30]以刚收获的板栗片作为原料, 通过调整真空度大小和微波功率, 在对应数据基础层面上获得干燥过程中板栗片干燥时间和水分比之间的变化模型, 计算出的有效水分扩散系数水平在 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 量级之间, 变化规律为: 调高微波功率和真空度, 有效水分扩散系数增加, 所得板栗片颜色改变小、获得高品质干燥板栗片的最优条件对应实验数据中的最小真空度和次小微波功率。

刘德成等^[31]将单一干燥与联合干燥的结果进行比对, 探究了干燥红枣的工艺。研究结果在理论依据和技术层面为不同类型的红枣干制品提供干燥加工工艺, 并为设计和优化新型干燥设备提供支持。

1.2.3 微波密度和有效水分扩散系数研究现状

微波密度和有效水分扩散系数是帮助优化干燥过程的重要参数。前者表示微波辐射场中单位质量或单位体积的微波功率, 与控制加热均匀性、优化干燥效率、保障产品质量, 并促进设备的优化和安全性有密切关系。后者是描述水分在干燥过程中扩散和传递的参数。可见选择合适的微波密度并设计适合和有效水分扩散系数对优化干燥工艺、提高产品品质、降低能源消耗, 并促进对干燥机制的深入理解有着重要意义^[32-36]。

近年来, 更多的学者们展开了微波密度和有效水分扩散系数的研究。宋玲玲^[37]针对微波干燥过程中功率的变化, 以黄豆为物料, 设计 0.8 W/g 、 0.6 W/g 、 0.4 W/g 的微波密度, 以四种方案进行微波干燥实验。结果表明, 微波密度越高, 需要的能量越多, 黄豆在干燥过程中的湿基含水量越低。微波干燥黄豆的过程中, 干燥前期的微波密度不宜过大, 干燥过程的后期有能量的大量浪费的风险, 易减少不同微波密度的干燥阶段。王红提等^[38]针对疏解棉秆微波干燥过程中装载量对干燥速率、干燥时间、单位能耗及干燥效率的影响, 设计了微波干燥实验。结果表明, 疏解棉秆的水分有效扩散系数与装载量成反比, 其平均值介于 $1.8078 \times 10^{-8} \sim 4.1997 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间, 确定了干燥速率与物料装载量的关系。Horuz E 等^[39]研究了微波-常规混合干燥条件对红辣椒干燥模型、干燥动力学、水分和热扩散率、温度分布以及活化能的影响。结果表明有效水分系数与微波功率和温

度成正比，其范围在 $8.86 \times 10^{-10} \sim 4.23 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ，这反映出较大的有效水分扩散系数使水分更容易在材料内部均匀分布。本次研究采用微波真空干燥箱对小麦进行干燥实验，以确定合适的微波密度，并确定有效水分扩散系数对干燥效率的影响。

1.2.4 微波真空干燥应力研究现状

在微波真空干燥中，干燥应力是指干燥过程中由于水分迁移和物质收缩引起的应力或应变。当水分从材料中蒸发或扩散出去时，材料会发生体积收缩，从而产生内部应力。这些应力可能导致材料的变形、开裂或破裂。干燥应力的大小取决于多个因素，包括材料的性质、初始含水率、干燥速率、温度变化等。较高的干燥速率和温度变化往往会导致更大的干燥应力。控制和管理干燥应力是微波真空干燥中的重要考虑因素，以确保产品的质量和完整性^[40-47]。

目前对于微波真空干燥应力的研究，学者们主要在开裂、裂纹预测、孔隙率等角度展开。吕黄飞^[48]以红竹、圆竹材为研究对象，设计微波真空干燥实验，研究其干缩、开裂等力学特性，发现了干燥工艺参数对干燥应力的影响。刘雪强^[49]以玉米为研究对象，对谷物干燥过程中的复杂性和品质影响因素进行分析，建立玉米干燥应力模型，并对应力裂纹进行预测，为谷物干燥应力研究提供了理论和实验数据基础。Y Ando 等^[50]研究了在不同压力条件下微波真空干燥对干苹果三维孔隙结构和力学性能的影响。结果表明干燥后的结构特征被赋予样品不同的硬度和脆度，微波真空干燥苹果的孔隙结构特性不是由压力条件决定的，而是由预冻结方法决定的。反映出不同的微波真空干燥工艺在力学性能上存在差异，影响力学性能的因素不只是孔隙结构。本研究根据微波真空干燥应力产生机理，结合压缩试验，对小麦的干燥裂纹进行预测和预防。

1.3 存在问题

目前我国微波真空干燥领域主要存在以下问题：（1）微波干燥设备成本高，与传统干燥设备相比，微波干燥设备成本较高；（2）对微波真空干燥过程小麦的应力应变研究分析较少，主要是由于小麦这种谷物介质较小，并且在干燥过程中很难数据检测进行分析；（3）微波真空干燥的控制比较困难，微波干燥的过程受到多种因素的影响，如微波

功率、频率、加热时间等。

1.4 研究内容及研究目标

小麦微波真空干燥工艺及装置优化的技术路线如图 1-1 所示。本研究的主要内容及目标如下：

（1）小麦微波干燥特性分析及数值模拟

本研究以电磁波传播、热量交换、水分迁移等理论为基础，探究微波真空干燥过程中含水率、有效水分扩散系数、爆腰率等参数指标；利用 COMSOL 软件模拟微波真空干燥的整个过程，从仿真角度分析干燥过程的温度变化、电磁场分布和应力产生过程，为后续微波真空干燥实验数据提供参数参照和对比。

（2）小麦微波真空干燥有效水分扩散系数和活化能研究

以工业微波真空干燥小麦要求为前提，设计单因素干燥实验，调整干燥小麦过程中的工艺参数，得到满足要求的最佳微波密度，并分析有效水分扩散系数对干燥效率和干燥品质的影响。为分析不同工艺参数条件下小麦有效水分扩散系数对干燥效率和干燥品质的影响，本研究对干燥过程结果作曲线拟合并进行分析与比较，结果可为后续研究小麦应力特性、裂纹预测及提高产品品质提供参考。

（3）小麦的微波真空干燥应力解析及裂纹预测

针对微波真空干燥小麦时，易发生内部应力过大产生应力裂纹而影响品质的问题。本研究设计了微波真空干燥实验和压缩试验，探究了干燥过程中小麦的含水率、温度、爆腰率和应力之间的联系，进而建立小麦干燥裂纹模型。采用质构压缩分析仪模拟小麦在干燥过程中所受的内部应力和变形量的关系，建立小麦应力-应变模型。同时，将应力-应变模型与微波真空干燥实验数据相结合，建立一套与应力、含水率和温度相关的裂纹预测模型。最终，利用裂纹预测模型，设计了一套最佳的微波真空干燥工艺。研究结果对降低小麦微波真空干燥干燥的爆腰率、改善小麦储存方案、分析裂纹对小麦内部温度变化和水分传递的影响等研究提供数据支持。

（4）微波真空干燥实验装置设计与优化

本章针对前文小麦干燥过程中的不均匀现象，并结合在使用微波真空干燥机过程中

所遇到的机器噪音大、物料温度测量难、仪器能量利用率低等问题，实现了对微波真空干燥装置的设计与优化。设计优化主要体现在物料室托盘、物料实时称重和真空泵降噪方面。设计优化后的干燥装置可以自动实现物料的翻滚和均匀分布、实时质量检测 and 低噪音运行。这些优化措施可以提高微波真空干燥装置的干燥效率、产品质量，并改善工作环境和操作体验。

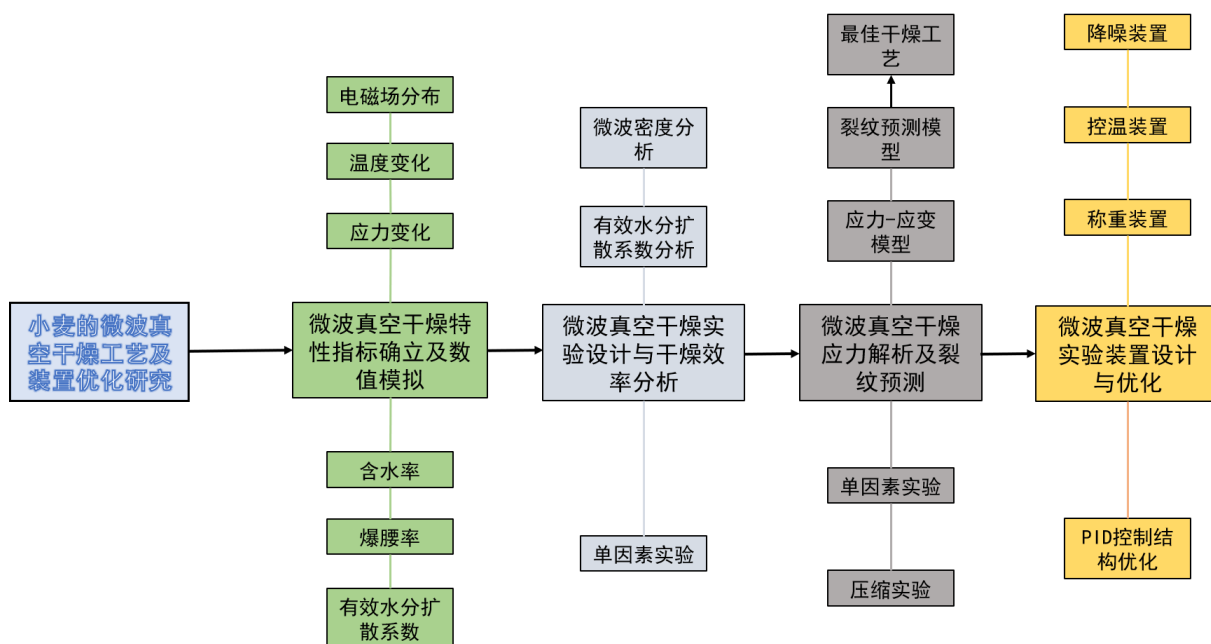


图 1-1 技术路线图

第2章 小麦微波真空干燥特性分析及数值模拟

2.1 微波真空干燥理论概述

微波根据其特性，在干燥中凭借穿透性和直接作用在物料内部水分子的能力，使水分快速传递和蒸发。微波真空干燥作为一种利用真空环境进行微波辐射的干燥技术，在药品、食品和粮食等领域有着广泛的应用，具有快速、环境友好和高质量干燥的优势^[51-54]。为细致研究小麦微波真空干燥过程中的效率和产品质量，需探究小麦在微波真空干燥过程中性能指标，并结合数值模拟的方法对干燥进行模拟和分析。

2.2 小麦微波真空干燥特性分析

小麦在真空环境下被微波作用后，处于不具备电导性的中性偶极子产生振荡、反转、迁移和有规律导向性排列的行为。这种导向排列体现在负极吸引带正电的极子，带负电的极子趋向正极，且这种排列过程伴随着损失大量机械能，并转化为热能。这种热能会由偶极子传递给外部的介质，介质吸收热能实现升温，从而降低含水率。但此过程中磁控管会将接收来的微波能通过波导传输给小麦，进而提供一定量的势能给偶极子^[55-57]。其中导向性排列行为可以参考图 2-1。

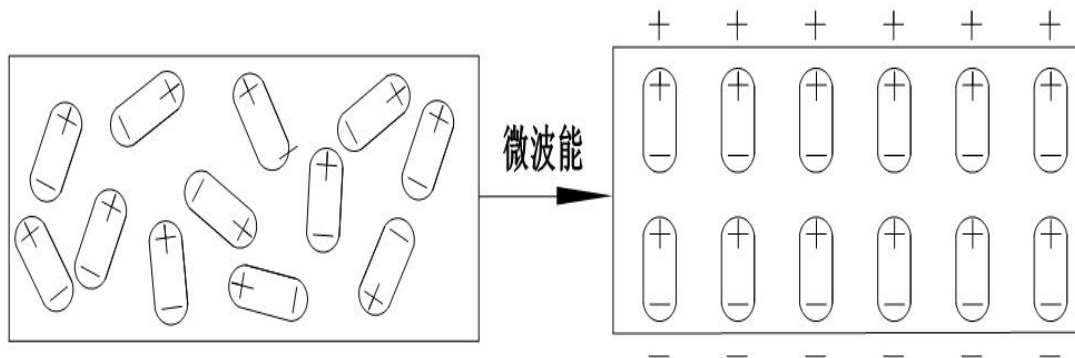


图 2-1 偶极子排列示意图

2.2.1 小麦微波真空干燥特性理论分析

在小麦的微波真空干燥过程中，了解干燥过程中的干燥特性有助优化干燥工艺、保障干燥质量、节约干燥成本，进而提升竞争力。

(1) 电磁波传播理论

微波真空干燥过程中产生的电磁波主要作用于波导处，用麦克斯韦波形方程可将干燥腔内的电磁分布解释为^[58]：

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

式中， μ_r 为相对磁导率； E 为电场强度， V/m ； f —— 电磁场频率， Hz ； c 为光速， $3.0 \times 10^8 m/s$ ； ζ' 为介电常数； ζ'' 为介电损耗因子。

(2) 真空度理论

真空度是一种描述真空系统的压力指标，可以用绝对压力或相对压力表示^[59]。

$$\begin{cases} V = (P_{abs}/P_{atm}) \times 100\% \\ V = (P_{atm} - P_{rel})/P_{atm} \times 100\% \end{cases} \quad (2-2)$$

式中， V 为真空度，%； P_{abs} 为绝对压力， Pa ； P_{atm} 为大气压力， Pa ； P_{rel} 为相对压力， Pa 。

真空度对于微波真空干燥过程有十分重要的影响：改变微波真空干燥箱内的真空度可以调节小麦内部水分的沸点，合适的真空度可以让水分更容易从小麦中蒸发；提高微波真空干燥箱内的真空度的可以降低室内气体压力，减少蒸发的水分子与小麦之间的碰撞，从而减少传热传质阻力，降低能耗；调节真空度可以改变小麦在微波真空干燥箱内的热敏性，有助于保障小麦干燥过程中的营养价值^[60]。

(3) 热量转换过程

随着微波真空干燥箱的运转，物料室内的小麦产生电势能，并在磁场的作用下生成内能，实现小麦的升温，热能部分用于小麦含水率的降低。小麦温度、含水率和热能的变化与干燥箱产生的电磁能可以通过能量守恒定律和坡印廷定理确定^[61]：

$$-\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = \frac{d}{dt} \int_V \left(\frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} + \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B} \right) dV + \int_V \vec{E} \cdot \vec{J} dV \quad (2-3)$$

$$Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + k \Delta T \frac{1}{S} + \rho h \frac{\partial M}{\partial t} \quad (2-4)$$

小麦的传热传质则由式 2-5 表示^[61]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - \rho C_p u \cdot \nabla T \quad (2-5)$$

式中, S 为坡印廷矢量; E 是电场强度, V/m ; H 为磁场强度, A/m ; J 为电流密度, A/m^2 ; Q 为小麦内能, J ; ρ 为小麦密度, kg/m^3 ; C_p 为小麦的比热容, $J/(kg \cdot K)$; k 为小麦导热系数, $W/(m \cdot K)$; T 为温度, $^{\circ}C$; M 为小麦水分蒸发量, g 。

(4) 小麦水分迁移过程

微波真空干燥可以直接将微波能作用在小麦内部, 小麦内部水分吸收微波能后将其转化为热能, 使小麦温度增加。温度升高过程使小麦内外产生压力差, 这种压力差形成一种将小麦内部水分向外迁移的驱动力, 迫使小麦含水率降低^[62-64]。微波真空干燥过程中, 小麦内部的水分迁移过程与小麦的温度梯度、小麦的热量传递方向相同, 具体过程如图 2-2 所示。

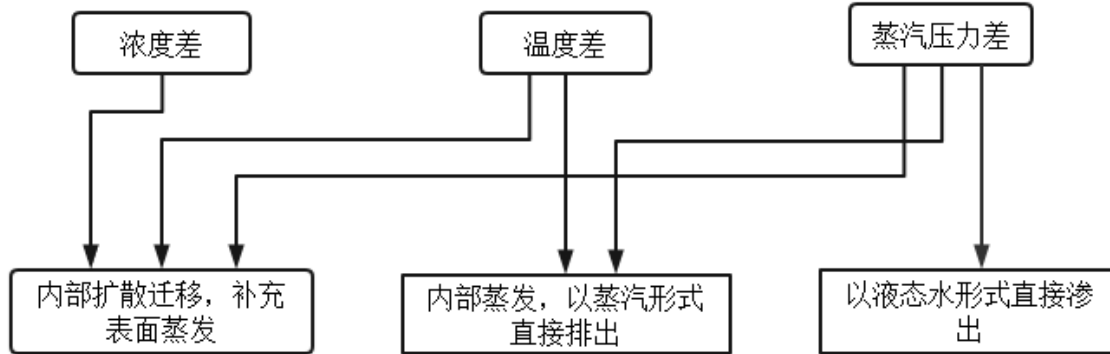


图 2-2 微波真空干燥小麦内部水分迁移图

2.2.2 小麦微波真空干燥特性指标

小麦在微波真空干燥腔体内接收热量, 升高温度, 从而迁移其内部的水分。在微波真空干燥过程中, 水分和能量的转换往往通过一些特性指标进行评价。主要包括含水率、爆腰率、有效水分扩散系数、活化能、孔隙率、密度、比热容等^[65-73]。为了更好的应对工业干燥小麦的需求, 本文以小麦微波真空干燥过程中含水率、爆腰率、有效水分扩散

系数等指标评价干燥结果。

(1) 含水率。含水率作为评价微波真空干燥特性的一个重要指标,反映了小麦干燥过程中水分的含量。含水率评价指标主要体现在初始含水率、含水率变化趋势、目标含水率等,它们反映了干燥过程的开始、变化趋势和结束^[74-77]。

含水率可细分为湿基含水率与干基含水率,以干燥后小麦干物质质量为计算标准的干基含水率不适合干燥数据的纵向比较,因此本文以湿基含水率 (M_s) 作为含水率标准,其计算表达式为^[78]:

$$M_s = \frac{W}{G_s} = \frac{W}{G_g + W} = \frac{m_t - m'}{m_t} \quad (2-6)$$

式中, W 为小麦中水分质量, g; G_s 为湿物质质量, g; G_g 为干物质质量, g; m_t 为 t 时刻小麦质量, g; m' 为小麦烘干后质量, g。

(2) 有效水分扩散系数。有效水分扩散系数作为评价微波真空干燥特性的一个重要指标,反映了微波真空干燥中水分在小麦内部和外部中扩散和传递的速率。有效水分扩散系数评价指标主要体现在比较其他干燥模型的水分扩散效率、工艺参数对有效水分扩散系数的影响、预测水分扩散的过程和效率等^[79-82]。有效水分扩散系数表达式为^[83]:

$$\ln \frac{M_t}{M_0} = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} T}{4L^2} \quad (2-7)$$

式中, M_t 为小麦 t 时刻干基含水率, $M_t = (m_t - m')/m'$, %; M_0 为初始干基含水率, %; D_{eff} 为有效水分扩散系数; T 为干燥时常, min。

(3) 爆腰率。爆腰率是评估反映小麦微波真空干燥后其干燥完整性的指标,对评估干燥后品质具有重要意义。参考 GB/T 5496-1985《粮食、油料检验 黄米粒及裂纹粒检验法》,将干燥后的小麦放置 24 h 后取 300 粒分三组手工剥壳,后使用放大镜观察,凡内部有裂纹的糙米即为爆腰。在微波真空干燥小麦时,爆腰主要是由小麦水分不均匀、孔隙结构、干燥不均匀、温度不均匀等原因引起。工业干燥小麦,需要在考虑效率的同时保障物料品质^[84-86]。高效率往往伴随着高功率,高功率又会引起爆腰,因此分析爆腰对高效干燥小麦非常有意义。

2.3 小麦微波真空干燥数值模拟

以微波真空干燥原理为基础，使用 COMSOL 软件构建小麦微波真空干燥模型，对干燥实验选用的微波真空干燥箱进行实体建模。模拟干燥过程中小麦在干燥箱内部的电磁场分布以及小麦应力分布情况，初步了解小麦微波真空干燥结果。微波真空干燥小麦数值模拟流程如图 2-3 所示：

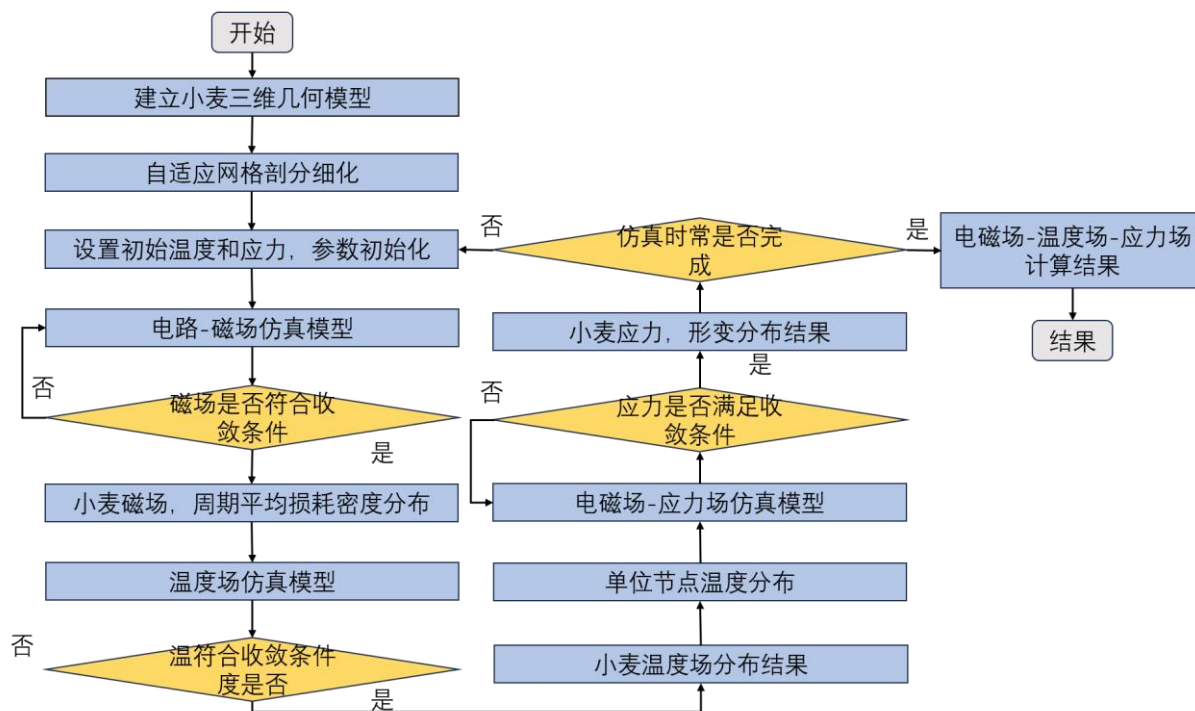
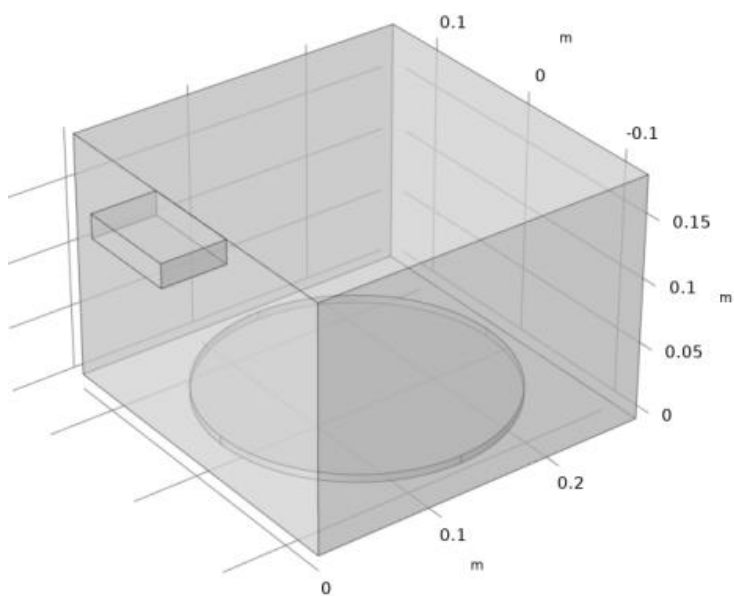


图 2-3 小麦数值模拟流程图

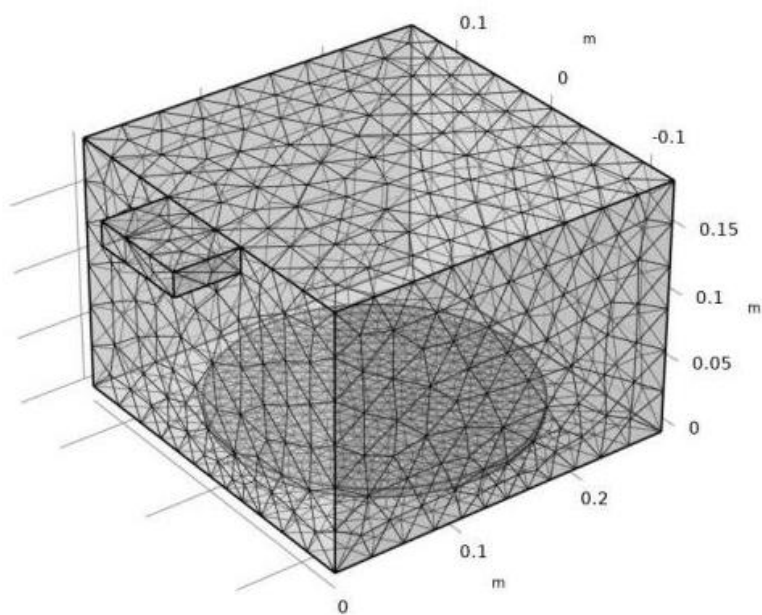
2.3.1 微波真空干燥三维模型

根据型号为 RWBZ-08S 的微波真空干燥装置建立加热腔体三维模型及网格划分结构，如图 2-4（a）、（b）所示。物理场与研究类型选择电磁波-频域，电磁热研究序列，腔体研究频率与功率与后续小麦干燥实验条件一致，采用瞬态研究，考虑到计算时间与精度，网格划分选择常规大小。该模型由尺寸为 $320\text{mm} \times 340\text{mm} \times 250\text{mm}$ 的腔体、TE10 模式的矩形波导和托盘组成，且波导和腔体材质均为铜制，托盘聚材质为四氟乙烯^[87]。

微波真空干燥腔体内研究对象为小麦籽粒，干燥腔体内频率为 2.45GHz ，功率为 100W ，工作外环境设为 20°C ，采用瞬态研究，常规网格划分大小。



(a) 腔体三维模型



(b) 腔体网格划分

图 2-4 腔体三维模型及网格划分效果

2.3.2 小麦模型假设

本文以小麦籽粒为研究对象，由于小麦在微波真空干燥过程中的干燥复杂性，对小麦模型做出以下假设：

- (1) 小麦籽粒是一个均匀连续介质；
- (2) 微波真空干燥过程中小麦没有发生形变；
- (3) 微波真空干燥过程中空气是理想气体；
- (4) 整个微波真空干燥过程为非稳态过程；
- (5) 小麦均匀排布在干燥托盘上。

2.3.2 控制方程

质量守恒定律。在微波真空干燥过程中，水不是简单的区分为液态水和水蒸气，而是气相混合物，其质量守恒方程为^[88]：

$$\frac{\partial(\phi\rho_g)}{\partial t}\nabla\cdot(\rho_g u_g)=R_v \quad (2-8)$$

式中， ϕ 为小麦孔隙率， $\phi=0.75$ ； ρ_g 为气相混合物密度， kg/m^3 ； u_g 为气相混合物达西速度， m/s ； R_v 为水蒸气相变量， $\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ 。

能量守恒模型。根据小麦微波真空干燥特点，结合能量守恒定律，得出小麦干燥过程能量变化的偏微分方程^[89]：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla\cdot(k\nabla T) + m_{ev}\gamma + Q_e - hA(T-T_0) \quad (2-9)$$

式中， ρ 为小麦密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； C_p 为小麦比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； k 为导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； m_{ev} 为水分蒸发速率， $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ； γ 为水分汽化潜热， kJ/kg ； Q_e 为单位体积微波能在小麦内部单位时间产生的体积热， W/m^3 ； h 为对流热传递系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ； A 为小麦表面积， m^2 。

动量守恒方程。在微波真空干燥过程中，流体流动用不可压缩 N-S 方程描述，如式 (2-10) 所示^[90]：

$$\rho(u\cdot\nabla)u = \nabla\cdot\left[-PI + \mu\left(\nabla u + (\nabla u)^T\right)\right] + F \quad (2-10)$$

式中， ∇ 为哈密顿算子； u 为流体的表观流速， m/s ； μ 为流体粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； P 为压强，

P_a ； F 为体积力， N 。

2.3.3 初始条件及基本参数

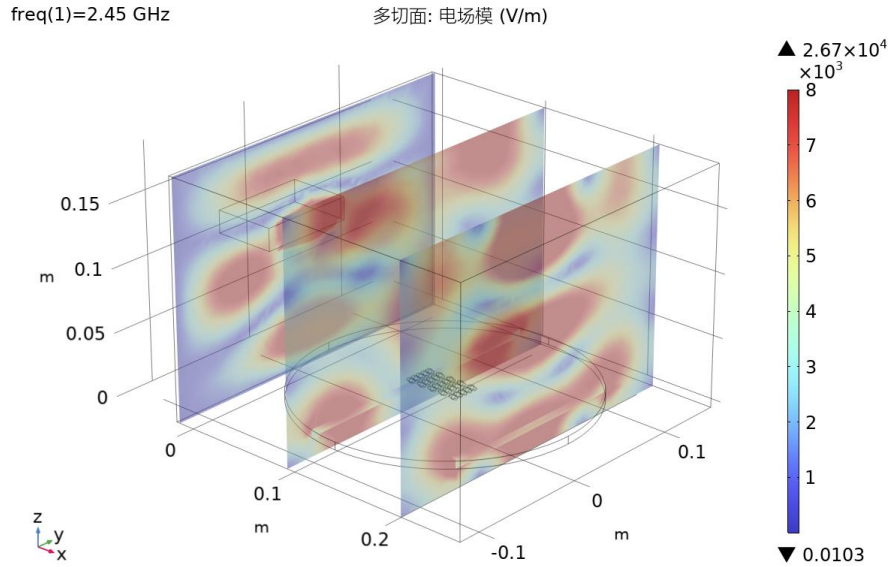
通过文献资料和实验测定，腔体模型中的小麦籽粒和气体物理特性基本参数如表 2-1 所示^[91]：

表 2-1 数值解析基本参数

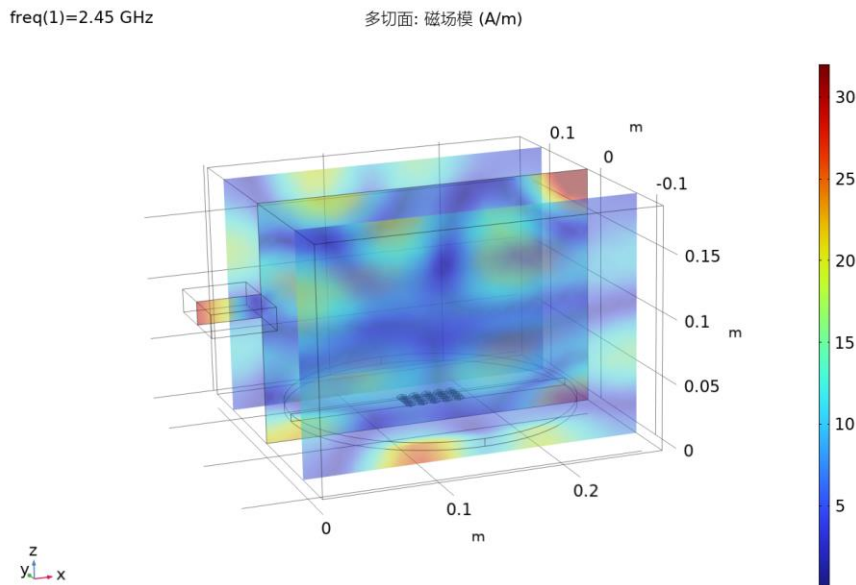
参数	数值或方程
初始温度 T_0	293.15K
初始压力 P_0	95.4745 kPa
相对湿度	0.15
小麦密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	745
小麦导热系数 $k / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	$0.08 + 0.002M$
小麦比热容 $C_p / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	$1073.75 + 16.34M$
小麦水分扩散系数 $D_{\text{eff}} / (\text{m}^2/\text{s})$	5.041×10^{-10}
电导率 $/ (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	0
相对磁导率	1
孔隙率 φ	0.75
毛细扩散率 D_w	$1.0 \times 10^{-8} \exp(-2.8 + 2.0M_t)$

2.3.4 干燥腔体内部电磁场分布规律

在对小麦模型做出理想化假设后，模拟出小麦在微波真空干燥箱腔体内的电场强度分布和磁场强度分布，模拟结果如图 2-5 所示。



(a) 电场分布



(b) 磁场分布

图 2-5 微波真空干燥腔内电磁场分布

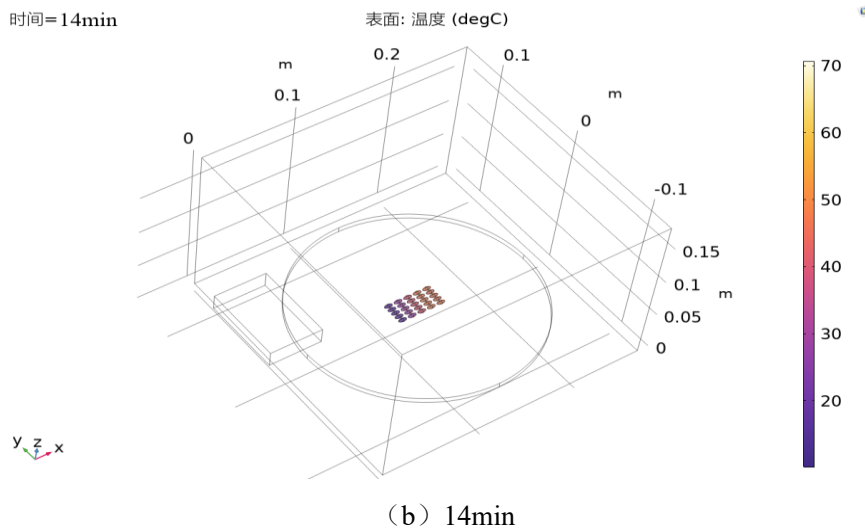
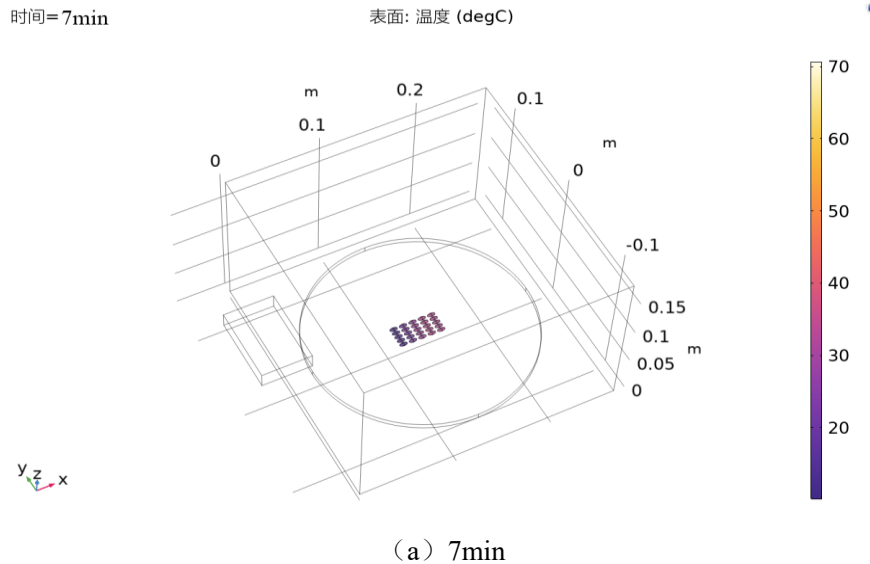
由图 2-5 (a) 中可以看出, 干燥腔体内部的各种波长范围一直处于腔体结构尺寸范围内。图 (a) 中电场强度的分布并没有因为小麦模型的理想化假设而分布均匀, 这是因为微波能在腔体内部辐射行为中产生了漫反射。从图中也可以看出电场强度最小值集中在腔体内部的中心范围, 其值为 $1.03 \times 10^3 \text{ V/m}$; 最大值在腔体边缘处, 其值为 $2.67 \times 10^4 \text{ V/m}$ 。

如图 (b) 所示, 微波真空干燥腔体内部磁场散乱分布。最低磁场强度分布在小麦籽

粒附近,这是由于小麦吸收部分微波,使周围磁场强度降低,微波的能量被转化为热能,使磁场振幅衰减。最大磁场强度分布在腔体边缘处,这是由于腔体的金属结构,铜具有良好的电导性,微波在此处进行反射和折射时产生驻波现象。腔体右上角磁场强度最高,由于右上角是驻波的峰值位置,此处电磁波振幅最大,导致磁场强度最高。

2.3.5 干燥腔体内部温度场分布规律

针对上述小麦在微波真空干燥腔体内部的电场、磁场分布不均匀现象,使用COMSOL 软件进一步探究其不均匀原理。模拟了小麦在相同电磁场情况下 7min、14min 和 21min 时小麦表面及内部温度分布情况。图 2-6 和图 2-7 分别为小麦的表面温度和内部温度分布情况。



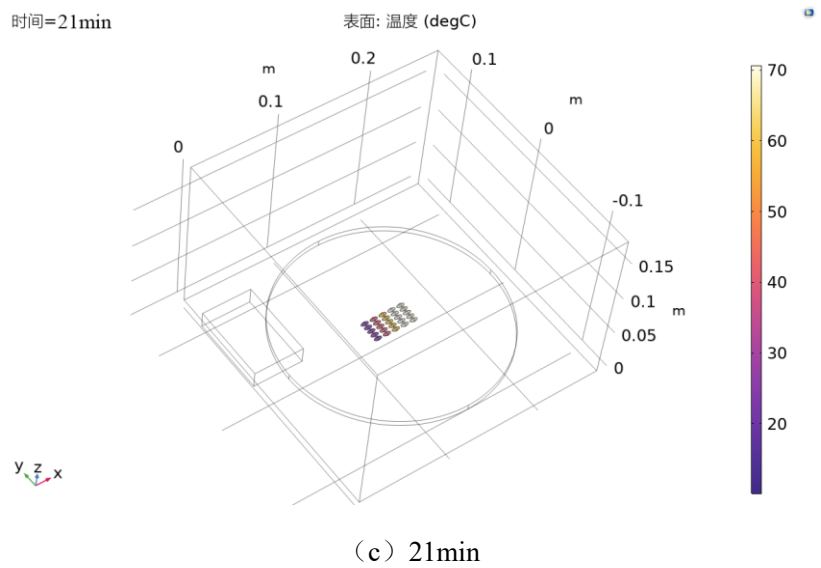
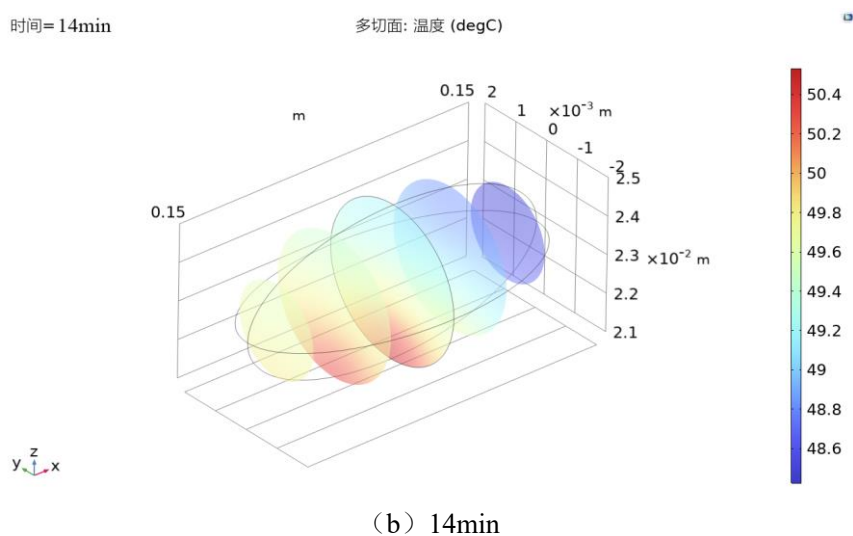
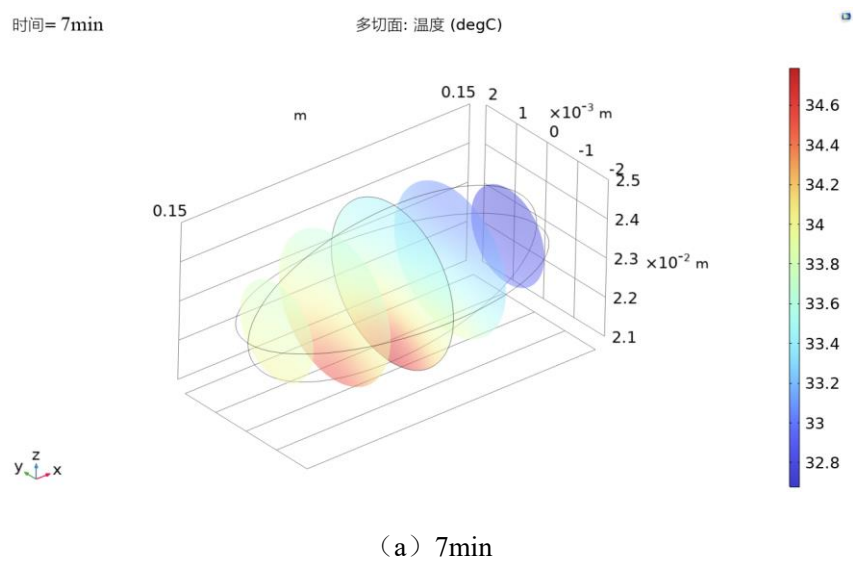
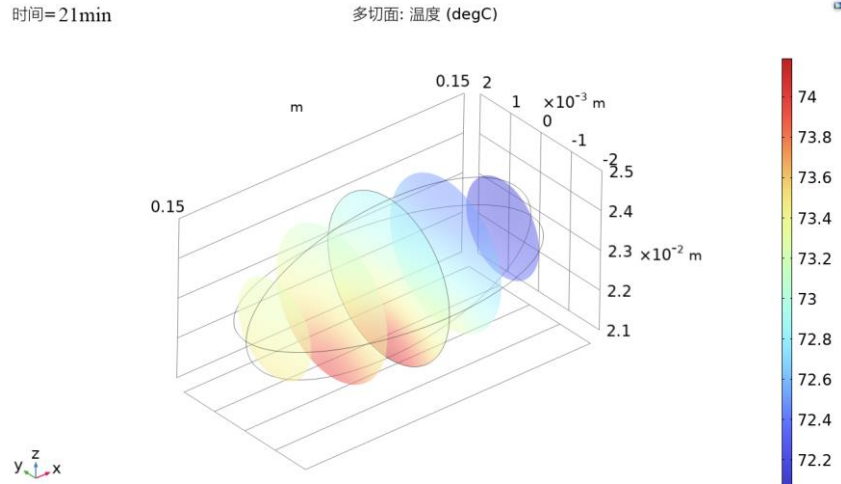


图 2-6 小麦表面温度变化图





(c) 21min

图 2-7 小麦内部切面温度变化图

如上述图 2-6 (a)、(b)、(c) 可以看出, 小麦在微波真空干燥过程中, 同一腔体内的不同小麦之间存在较大的温度差, 温度分布不均匀现象明显。小麦间的温度不均匀会造成小麦干燥效果差, 含水率不统一, 为使含水率达到工业干燥要求, 需要更多的能源, 使温度低的小麦含水率也达标。图 2-7 (a)、(b)、(c) 可以看出, 同一小麦内部也存在较大的温度差, 这种温度差会导致小麦内部存在不同的水分梯度。不同的温度梯度和水分梯度会使小麦产生较大的干燥应力, 进而增大爆腰率, 降低小麦干燥品质。

随着干燥的进行, 在干燥 7min 内, 小麦表面温度范围在 30°C-35°C, 内部温度在 32.8°C-34.6°C; 干燥 7min-14min 内, 小麦表面温度范围在 45°C-55°C, 内部温度在 48.6°C-52°C; 在干燥 14min-21min 内, 小麦表面温度范围在 70°C-75°C, 内部温度在 72.2°C-74°C。由此可见, 相同时间段内的温度上升并不一致, 且不均匀。

2.3.6 小麦干燥应力分析

基于小麦的黏弹性体理论, 根据物料干燥过程中的偏应力计算公式, 模拟小麦在微波真空干燥实验过程中的应力分布。图 2-8 和图 2-9 的模拟条件为: 微波密度 0.2W/g、真空度 0.06MPa、温度梯度为 20°C、水分梯度 0.14KG/KG。负值表示压应力, 正值表示拉应力。

由图 2-8 可以看出, 在干燥过程中, 小麦中心部位受压应力, 平均表层部位受拉应

力。这种应力的不均匀分布也使小麦产生裂纹的部位有所不同，裂纹分布的最有可能部位表层>中心>中层。

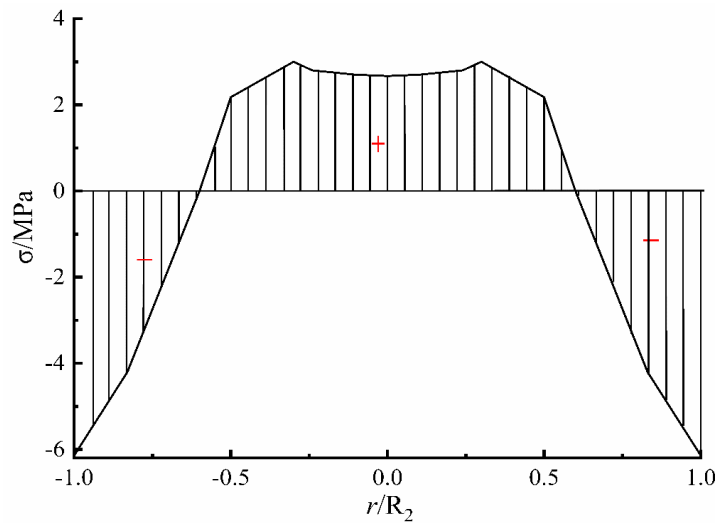


图 2-8 小麦内部切向应力分布

根据图 2-9 的观察结果，可以得出以下结论：随着干燥过程的进行，小麦颗粒经历了拉应力和逐渐增加的压应力。当干燥过程进行到 16 分钟时，小麦颗粒所受的压应力开始趋于稳定，达到 2.95MPa。在裂纹产生前，小麦颗粒所承受负荷与变形量之间近似线性关系，负荷随着变形量的增加而增加。在裂纹产生后，小麦颗粒的机械强度降低，其所受的负荷也相应减小。随着小麦颗粒的变形量进一步增加，接触面积增大，颗粒所承受的负荷由于增加的趋势。

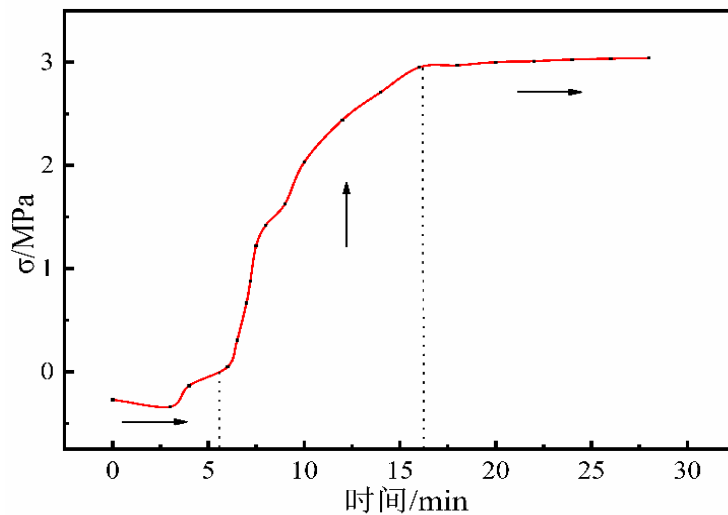


图 2-9 $r = R_2$ 处小麦内部径向应力分布

2.4 本章小结

本章在微波真空干燥理论基础上，通过分析小麦干燥特性指标，初步预测干燥过程中的小麦内部的水分迁移、裂纹机理、温度变化、质量损失等情况。并结合 COMSOL 软件模拟小麦在微波真空干燥过程中腔体内部小麦电场、磁场分布规律，分析多个时间段内小麦表面及内部温度分布规律，及小麦应力分布情况。最终根据仿真结果进一步得出小麦微波真空干燥物料的具体特点。

第3章 小麦微波真空干燥有效水分扩散系数和活化能研究

3.1 引言

在近些年微波真空干燥的研究中发现,干燥效率问题一直是避不开的话题,尽管微波真空干燥技术有着诸多优势,但在能量需求和效率之间的平衡却需要更加深入的研究^[92-94]。为评定不同工艺条件对小麦干燥效率标准的影响,本研究从微波密度、有效水分扩散系数和爆腰率层面对实验结果进行分析。根据干燥结果确定微波密度,以降低微波真空干燥不均匀的影响,并对干燥过程结果作曲线拟合,进行分析与比较,为后续干燥设备在干燥均匀性优化方面提供数据支撑。

3.2 材料与方法

3.2.1 实验材料

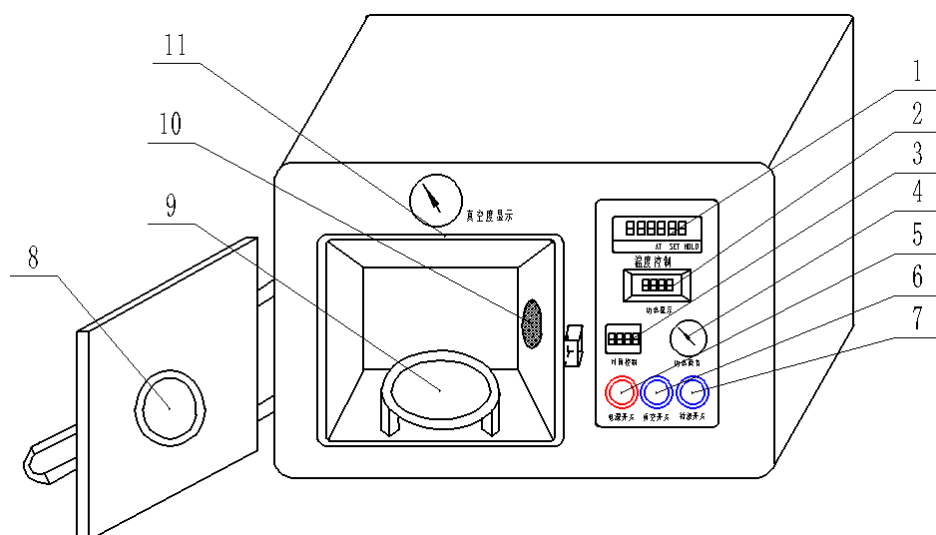
实验物料选用中国山东生产的颗粒饱满、表面光滑、无裂纹的小麦。

3.2.2 实验设备

干燥实验设备包括:(1)型号为 RWBZ-08S、工作尺寸为 $320\times 340\times 250\text{mm}$ 的微波真空干燥箱;(2)型号为 HC5003X、精度为 $\pm 0.1\text{ mg}$ 电子天平,用于测量干燥前后小麦质量;(3)放大镜,用于观察干燥后小麦裂纹;(4)红外电子测温仪,用于测量小麦的温度;(5)水分测量仪,用于测量小麦水分。部分实验仪器,如图 3-1 至图 3-4 所示。

(1) RWBZ-08S 微波真空干燥箱

实验围绕微波真空干燥箱展开,该设备可根据实验需要设计真空度、微波功率、干燥温度等。如结构简图 3-1 所示,微波真空干燥箱主要由微波真空干燥腔体、微波源、真空泵、托盘和控制系统组成。该设备具有干燥快速、干燥稳定、实用性强等特点,其实物图如 3-2 所示。



1、温度面板 2、功率面板 3、时间面板 4、功率面板 5、电源开关
6、真空开关 7、微波开关 8、观察口 9、托盘 10、波导 11、真空面板

图 3-1 RWBZ-08S 微波真空干燥箱简图



图 3-2 RWBZ-08S 微波真空干燥箱实物图

(2) 红外电子测温仪

本实验选用的红外电子测温仪设备用于测量不同干燥时段小麦温度。该设备为非接触式测温设备，测温范围在-10—1000℃之间。具有质量轻、快速、准确、寿命长、使用安全等特点。其实物图如图 3-3 所示。



图 3-3 红外电子测温仪

(3) 电子分析天平与谷物水分测量仪

HC5003X 型号的电子天平具有高精度、反应快、抗干扰等特点。其精度为 $\pm 0.1\text{ mg}$ ，能够准确的测量物料干燥前后的质量。封闭的称重台可以减少外部环境的干扰，并减少高温物料对外蒸发的水分。电容式谷物水分测量仪主要用于测量物料干燥前和预处理后的含水率。该仪器常用于农业和粮食行业，用于测量小麦、稻谷、玉米、大豆、油菜籽谷物和其他颗粒物料的水分含量。具有快速测量、操作简单、不破坏物料等优点。其实物图分别为图 3-4 和 3-5 所示。

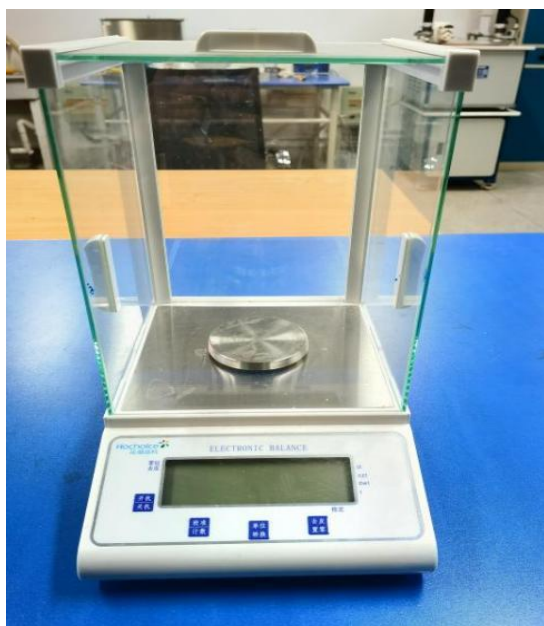


图 3-4 电子分析天平图



图 3-5 谷物水分测量仪

3.2.3 实验流程

本实验将干燥后小麦内部中水分和干物质共同作为数据标准，所以采用湿基含水率作为实验数据进行纵向对比。实验按照如图 3-6 顺序进行。

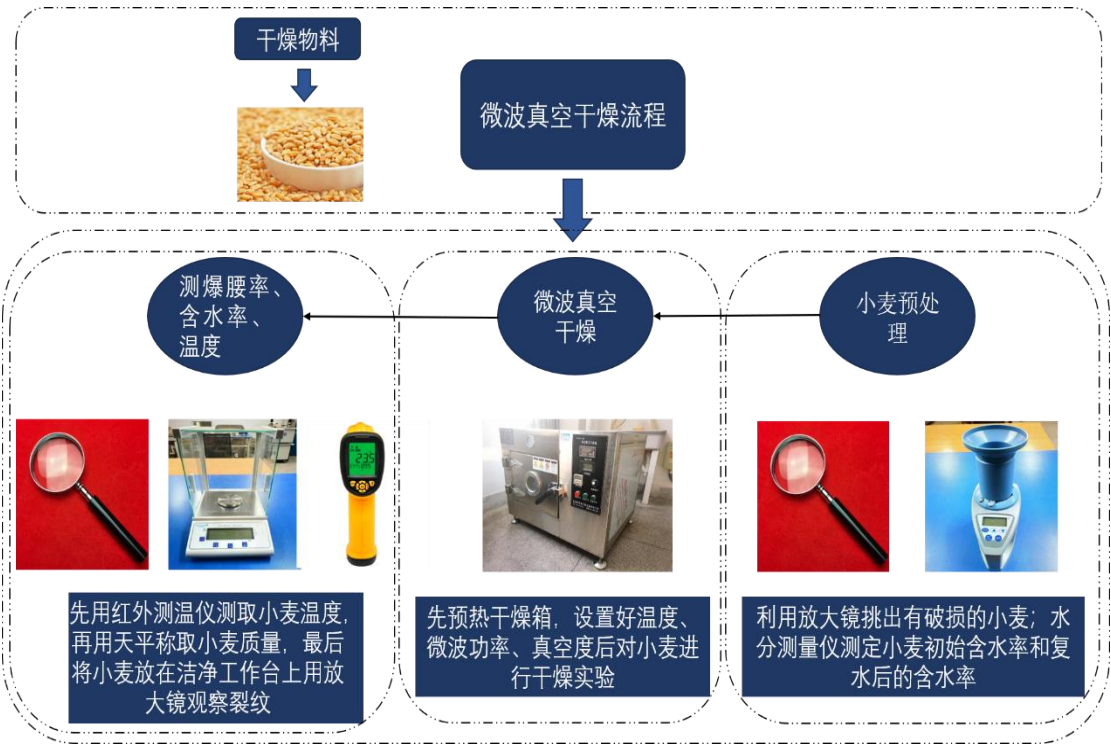


图 3-6 干燥实验流程图

3.2.4 实验方法

将收获后的小麦润湿，并把湿基含水率调配到 20%。详细步骤为：用电容式谷物水分测量仪测出小麦的初始含水率；把小麦配成湿基含水率为 20%所需的蒸馏水倒入小麦，充分搅拌，使其完全复水，实验前将小麦样品从水浴锅取出，在室温条件下实验；将干燥箱提前预热一小时，使干燥箱内部环境趋于稳定状态；预热后，设置干燥箱温度、微波功率和真空度将小麦均匀铺在托盘上，进行微波真空干燥，其中真空度为 0.06MPa；用红外测温仪和电子天平先后测出目标时间段后小麦的温度和质量，根据质量计算小麦的含水率。小麦的湿基含水率不超过 12.5%时结束干燥。具体实验方案如表 3-1 所示。

表 3-1 实验方案

水平	影响因素		
	干燥时间/min	实验温度/min	微波密度 W/g
1	7	30	0.2
2	14	50	0.4
3	21	70	0.6

每组实验结束后，在托盘三个不同位置随机取出 100 粒小麦，在灯光下用放大镜下观察小麦的裂纹情况，记录有裂纹小麦的数量，并计算出爆腰率，最后取三组小麦爆腰率的平均值作为实验数据。按照实验方案，进行 9 组实验，数据如表 3-2 所示。

表 3-2 实验结果

序号	时间/	温度	微波	湿基	爆腰	物料
	min	/℃	密度 W/g	含水率/%	率/%	温度/℃
1	7	30	0.2	16.9	3	28.1
2	7	30	0.4	15.8	4.3	28.5
3	7	30	0.6	14.83	7.6	29.2
4	14	50	0.2	14	5	47.6
5	14	50	0.4	12.9	7.8	48.1
6	14	50	0.6	11.42	12.2	48.6
7	21	70	0.2	11.44	9	67.1
8	21	70	0.4	9.2	13.1	68.1
9	21	70	0.6	8.4	19.2	68.8

3.2.5 有效水分扩散系数和活化能计算

有效水分扩散系数是评估物料内部水分向表面迁移的过程指标，也是微波真空干燥过程中一个重要的物性参数。计算小麦干燥过程中的效水分扩散系数有利于构建该工艺的小麦干燥模型，实现对小麦干燥效率和内部水分分布的预测，提高干燥物料的品质。

有效水分扩散系数 D_{eff} 与含水率和时间有关^[95]：

$$D_{\text{eff}} = \frac{\left(\ln \frac{8}{\pi^2} - \ln \frac{M}{M_0} \right) L^2}{\pi^2 t} \quad (3-1)$$

式中， D_{eff} 为有效水分扩散系数， m^2/s ； L 为小麦厚度， m ； M 为干燥过程某一时刻小麦的含水率， $\%$ ； M_0 为小麦的初始含水率， $\%$ 。

在微波真空干燥过程中，活化能反映了小麦内部水分子蒸发所需的能量，其大小取决于具体干燥过程，这是环境、物料、工艺等多个因素综合作用的结果。在第二章小麦的数值模拟中，小麦受到微波辐射的影响，电磁场分布并不均匀，可见微波真空干燥过程涉及非热传导机制，小麦的干燥活化能也受微波辐射影响。所以在小麦干燥活化能分析时，需要综合考虑微波辐射影响^[96-98]。

干燥活化能计算 E_a 公式如下^[95]：

$$E_a = \ln \frac{D_0}{D_{\text{eff}}} RT \quad (3-2)$$

式中， D_0 为扩散基数， m^2/s ； E_a 为活化能， KJ/mol ； R 为气体常数， $8.314\text{KJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ； T 为小麦绝对温度， K 。

3.3 数据与分析

3.3.1 干燥实验结果分析

在微波真空干燥实验中，针对不同微波密度条件下，计算和统计达到工业干燥小麦湿基含水率要求所需的能耗，结果如图 3-7 所示。从图中可以观察到，在 0.2W/g 、 0.4W/g 和 0.6W/g 的微波密度条件下每 1000g 小麦湿基含水率达到工业要求所需的能耗分别为 60Wh 、 97.44Wh 和 112.02Wh 。可见不同微波密度下微波真空干燥相同条件小麦造成的能耗存在明显差异。存在差异的原因是高功率的微波对小麦的干燥效果不佳。功率的增加加重了微波真空干燥不均匀问题，导致小麦表面与内部的温度梯度增加，降低了干燥效果。 0.2W/g 、 0.4W/g 和 0.6W/g 微波密度之间的能耗增率降低，原因在于 0.6W/g 的微波密度干燥小麦时，时间发生了大幅度下降，进而一定程度的降低了能耗。可见高功率的微波虽然增加了干

燥能耗，却也大幅度降低时间损耗。

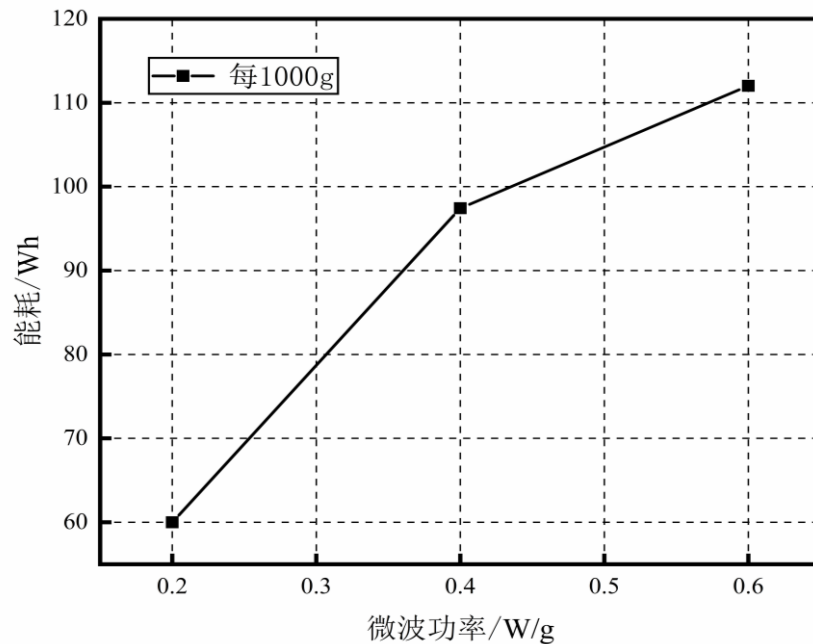


图 3-7 满足含水率条件下不同微波密度能量消耗

图 3-8 所示为满足爆腰率条件下不同微波密度能量消耗。从结果可以看出，0.2W/g、0.4W/g 和 0.6W/g 的微波密度下每 1000g 小麦爆腰率达到工业要求所需的能耗最大值分别为 63.34Wh、73.32Wh 和 56.4Wh。0.4W/g 时所需的能耗大于 0.2W/g 所需的能耗，可见 0.2W/g-0.4W/g 的微波密度范围内小麦的爆腰增长率并不剧烈，但 0.4W/g 的微波密度无法同时满足含水率和爆腰率要求。在 0.4 W/g-0.6W/g 的微波密度范围内小麦的爆腰率出现井喷式增长。0.6W/g 时达到爆腰率最大值比满足含水率要求所需的能耗少了 55.62Wh。少的能耗使该条件下干燥小麦无法同时达到含水率和爆腰率要求。最终满足工业干燥小麦要求的微波密度为 0.2W/g。

图 3-9 所示为 0.2W/g 微波密度条件下，满足工业干燥每 1000g 小麦能量消耗范围，其范围为 60Wh-63.34Wh。低于 60Wh 则不满足含水率要求，高于 63.34Wh 则不满足爆腰率要求。

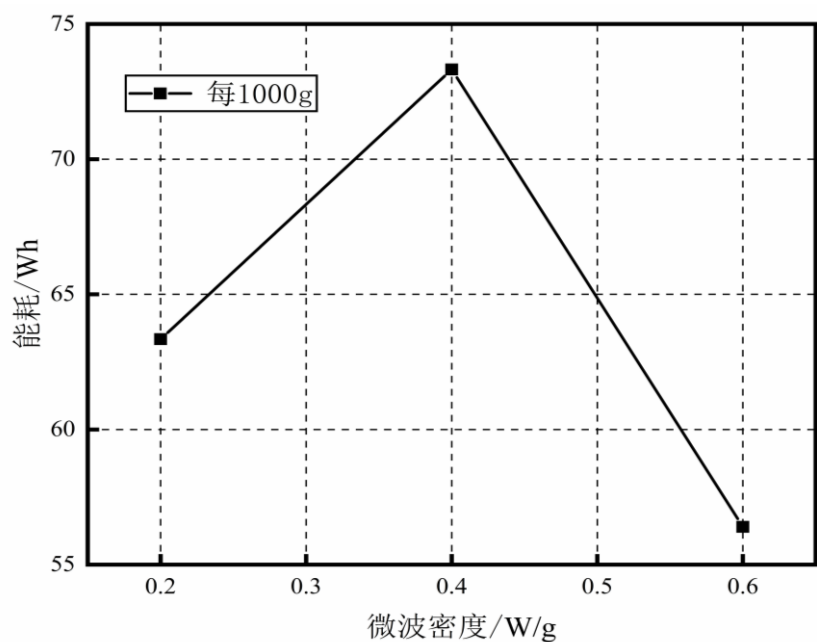


图 3-8 满足爆腰率条件下不同微波密度能量消耗

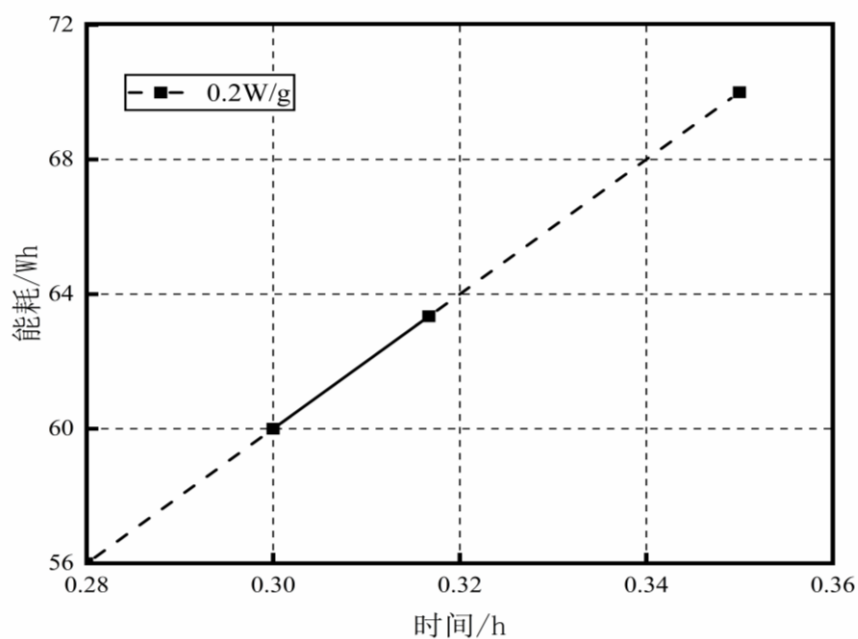


图 3-9 满足工业干燥要求的能量消耗范围

在现实需求中,根据干燥小麦的使用情况不同,如只需满足含水率要求或只需满足爆腰率要求的场合,0.4W/g 和 0.6W/g 的微波密度条件也是有其实用价值的。

在微波真空干燥实验中,针对不同时刻和微波密度对小麦的湿基含水率进行了测量和统计,结果如图 3-10 所示。从图中可以观察到,在微波密度为 0.2W/g、

0.4W/g 和 0.6W/g 的条件下,小麦湿基含水率降至 12.5%所需的时间分别为 18 分钟、14 分钟 36 秒和 11 分钟 18 秒。通过观察下降至合格含水率所需的时间,可以观察到在相同条件下,增加微波密度可以加快小麦的干燥速率。但干燥速率的提高可能导致应力裂纹指数的增加和风险。随着干燥的进行,含水率曲线的斜率是在逐渐减小。因为温度逐渐升高,使小麦的水分减少,低含水率的小麦更难脱离水分,小麦外部水分蒸发速率在不断降低。

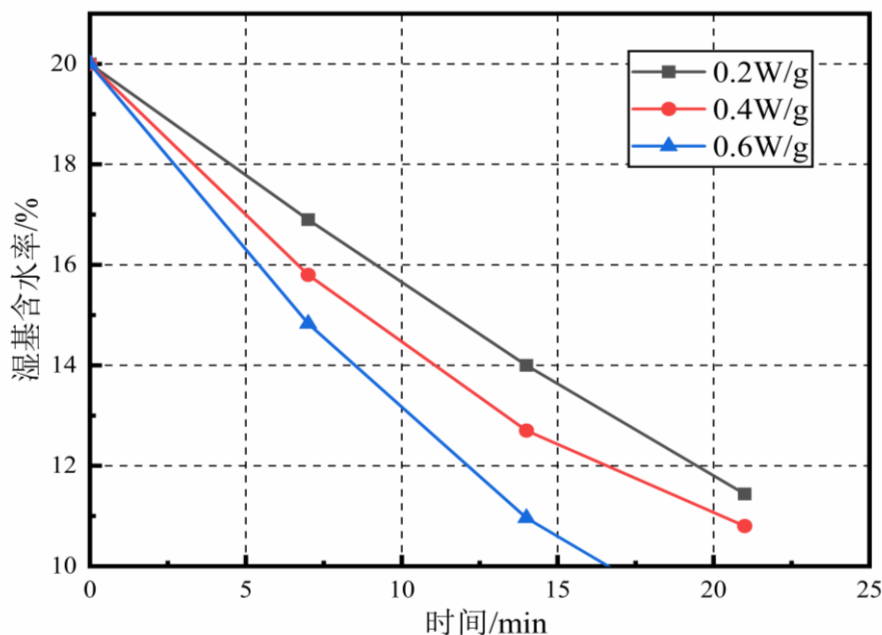


图 3-10 湿基含水率

随着微波真空干燥实验的持续进行,小麦的爆腰率呈现增加的趋势。根据图 3-11 所示,可以观察到小麦爆腰率的变化情况。结果显示,微波密度为 0.2W/g、0.4W/g 和 0.6W/g 时,小麦爆腰率符合工业要求标准极限的时间分别为 19 分钟、11 分钟和 5 分钟 42 秒。值得注意的是,随着微波真空干燥的进行,同一微波密度下的小麦爆腰增率不断提高,一方面可以归因于温度的升高,导致小麦内部水分子之间摩擦效应增强,进而加速了这一阶段的爆腰增长率,另一方面也反映了爆腰后的小麦更容易破碎、破碎或开裂。从图中还可以发现,同一微波密度下的小麦其爆腰率随干燥时间呈现指数形式增加。因此合理的调控干燥时间对干燥小麦的品质具有非常重要的意义。

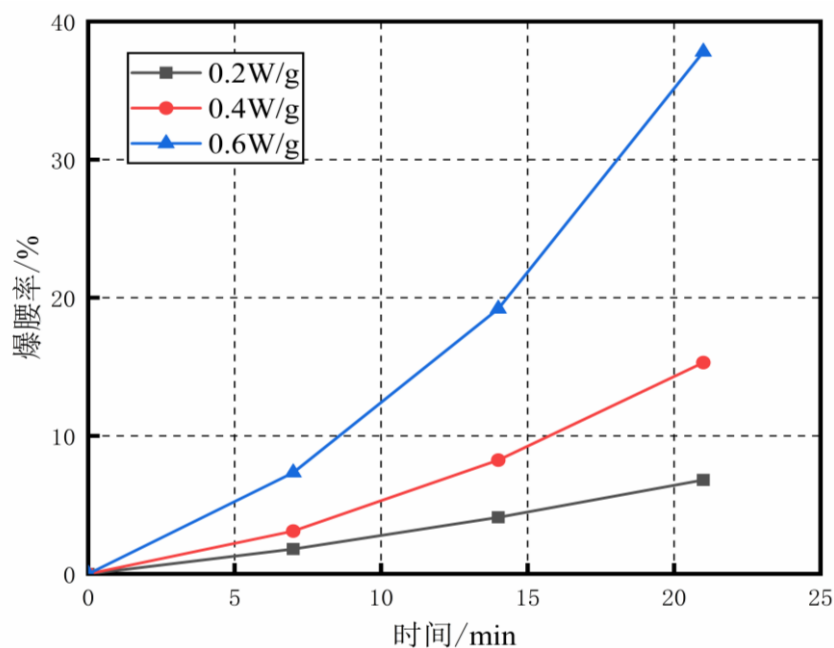


图 3-11 爆腰率

分析并总结微波真空干燥小麦温度和爆腰率的关系对保障干燥后小麦品质至关重要。小麦温度与爆腰率的关系如图 3-12 所示。结果表明, 0.2 W/g、0.4 W/g 和 0.6 W/g 时, 工业干燥要求小麦爆腰率极限时的温度分别为 61.4℃、39.5℃和 30.7℃。

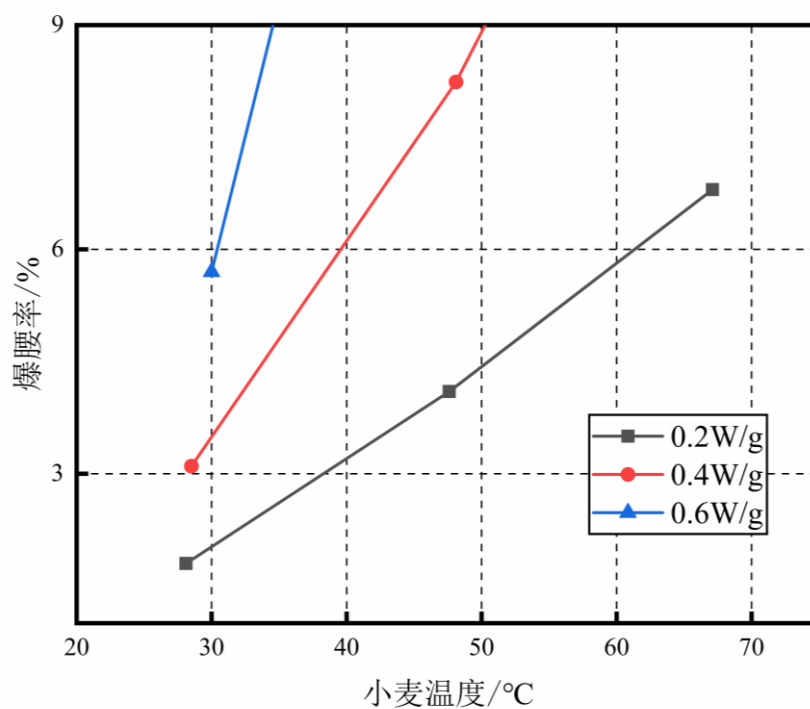


图 3-12 小麦温度和爆腰率的关系

综上, 根据上述实验结果可知, 0.2 W/g 的微波密度可以同时满足工业干燥小

麦的爆腰率和含水率要求，然而干燥的时间却比远远长于 0.4W/g 和 0.6W/g 。若只需满足含水率或爆腰率要求， 0.4W/g 和 0.6W/g 的条件可能更适合。为了更加准确的分析微波密度对干燥小麦的影响，还需对干燥过程中的有效水分扩散系数和活化能进行分析。

3.3.2 有效水分扩散系数与活化能结果分析

通过将表 3-2 中的微波真空干燥实验结果代入式 3-1 可以得出小麦有效水分扩散系数与时间的关系, 如图 3-13 所示。在微波密度为 0.2W/g 下, $50、60、70^{\circ}\text{C}$ 小麦有效水分扩散系数分别为 1.592×10^{-10} 、 2.074×10^{-10} 和 $2.523\times 10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 。在微波密度为 0.4W/g 下, 干燥温度为 $50、60、70^{\circ}\text{C}$ 时, 小麦的有效水分扩散系数分别为 2.481×10^{-10} 、 3.29×10^{-10} 和 $4.10\times 10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 。在微波密度为 0.6W/g 下, 干燥温度为 $50、60、70^{\circ}\text{C}$ 时, 小麦的有效水分扩散系数分别为 3.804×10^{-10} 、 5.041×10^{-10} 和 $6.278\times 10^{-10}\text{m}^2/\text{s}$ 。可知在小麦微波真空干燥时, 温度和微波密度的增加加快了水分的传递。然而水分传递速度没有因为微波密度和温度的成倍增加而出现速度加倍的现象, 可预测水分的传递是受到干燥裂纹、含水率、干燥温度、微波功率等的综合影响。

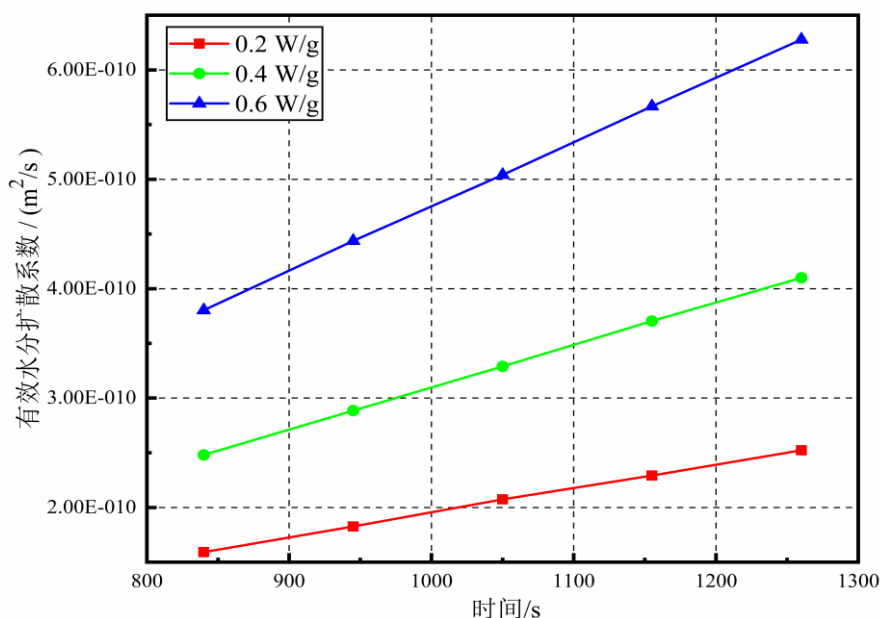


图 3-13 有效水分扩散系数

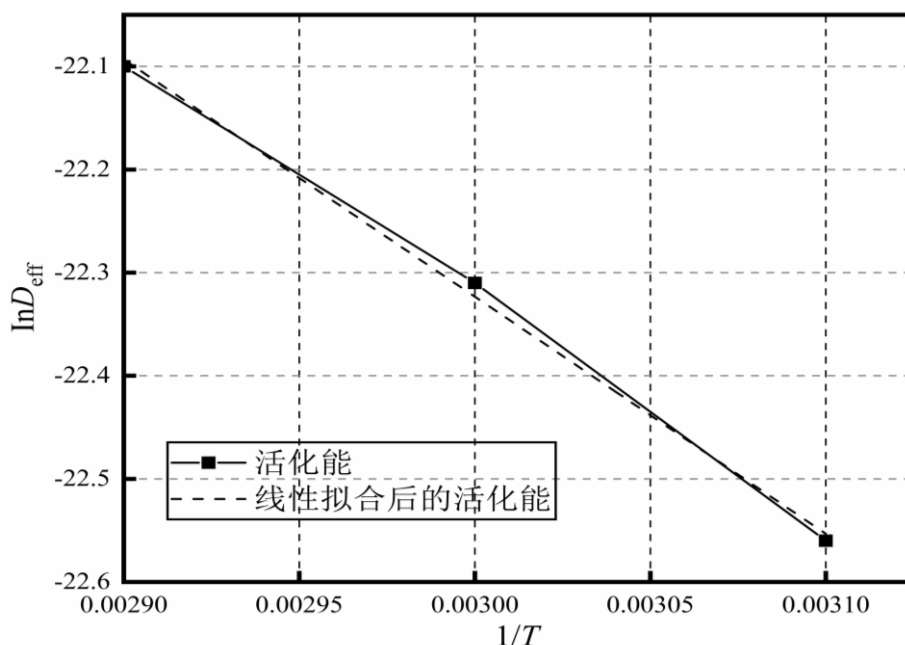
通常小麦的微波干燥活化能不是由式 (3-2) 直接的出, 而是转化为:

$$\ln D_{\text{eff}} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (3-3)$$

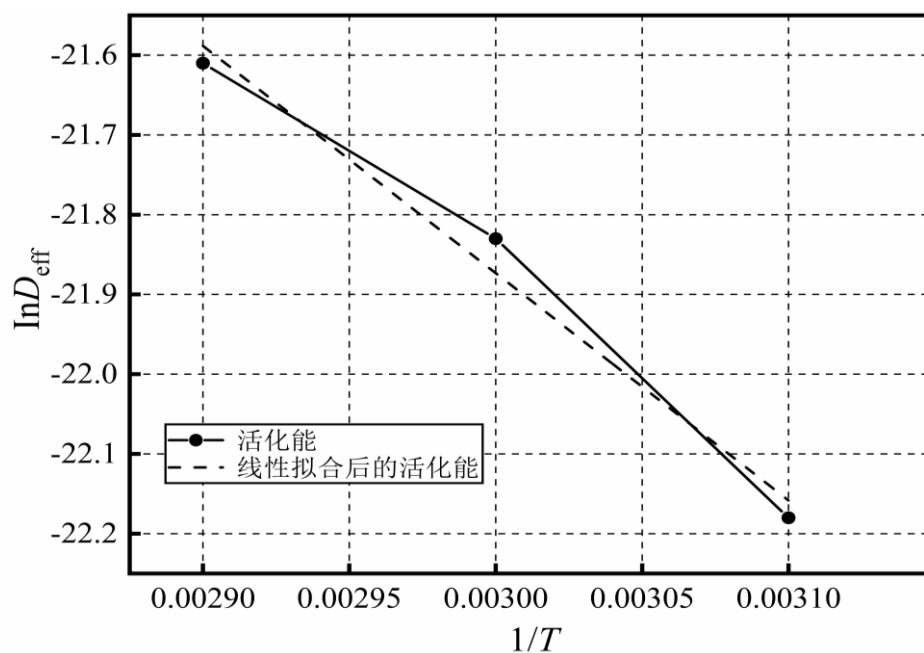
将图 3-13 中的时间和有效水分扩散系数值带入式 (3-3) 中, 得到图 3-14, 对 3-14 中的曲线进行线性拟合, 得到表 3-3, 表 3-3 中的斜率与气体常数之比即为小麦的活化能。由表 3-3 和图 3-14 可以看出, 在微波密度为 0.2 W/g、0.4 W/g、0.6 W/g 时, 小麦的活化能分别为 276.64 kJ/mol、342.8 kJ/mol、300.7 kJ/mol。0.2 W/g 的微波密度条件下, 活化能数值最小、最稳定, 因此干燥最容易, 干燥品质最佳。

表 3-3 线性拟合数据

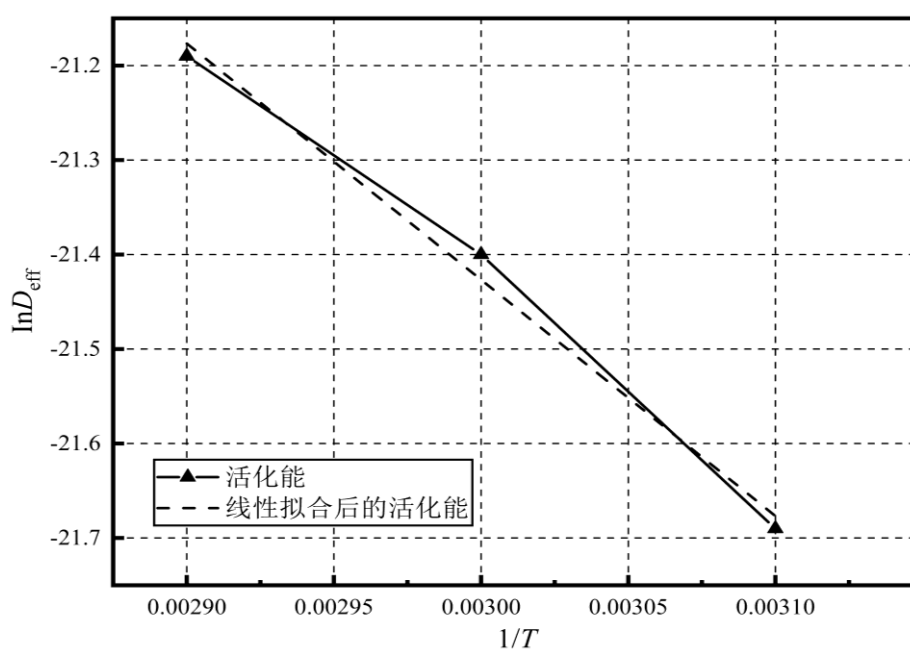
微波密度	0.2W/g	0.4W/g	0.6W/g
截距	-15.423±0.34654	-13.323±1.1263	-13.927±0.69308
斜率	-2300±115.47	-2850±375.28	-2500±230.94
残差平方和	2.6667×10 ⁻⁴	2.82×10 ⁻³	1.07×10 ⁻³
Pearson 相关系数	-0.99874	-0.99144	-0.99576
R 平方 COD	0.99749	0.98296	0.99154
调整后 R 平方	0.99497	0.96591	0.98308



(a) 0.2 W/g



(b) 0.4 W/g



(c) 0.6 W/g

图 3-14 不同微波功率下的活化能求解

3.4 本章小结

结合小麦的干燥特性，根据本章实验结果与数据分析可得到下列结论：

(1) 在微波真空干燥过程中，小麦在不同微波密度条件下对微波能的吸收效率是不同的。微波密度的增加只是加快了小麦含水率下降速度，能耗和爆腰率

却会因微波功率的增加而增大。经试验结果分析,满足工业干燥小麦要求的最佳微波密度为 0.2W/g ,干燥每 1000g 小麦对应的能耗范围为 $60\text{Wh} - 63.34\text{Wh}$,干燥结束后,小麦的温度在 61.3°C 左右。

(2) 在对比不同微波密度对水分传递速率和干燥难易程度的影响中,发现 0.2W/g 的微波密度干燥小麦,其水分传递速率最慢,但干燥难度最低; 0.4W/g 的微波密度干燥小麦,其水分传递速率适中,但干燥难度最高; 0.6W/g 的微波密度干燥小麦,其干燥速率最快,干燥难度适中。活化能反映的是去除单位摩尔水分所需的启动能量,在 $0.4\text{W/g} - 0.6\text{W/g}$ 的微波密度区间内,活化能是降低的,结合小麦干燥爆腰结果可以得出,此区间内小麦爆腰率的激增使小麦总表面积增加,使水分更容易的从内部向外部转移。

(3) 对比不同微波密度条件下,含水率、爆腰率、干燥速率、能耗和干燥难易程度之间的关系可以发现,特定的微波功率密度并不具备所有的干燥优点。 0.2W/g 的微波密度可以较好的实现工业干燥小麦的含水率和爆腰率要求,且干燥难度最低,但干燥所消耗的时间较长,长时间的干燥加大了人工和机器的成本。因此根据干燥要求,权衡各因素的主次才能更好的实现干燥预期。

(4) 微波真空干燥小麦的过程中,爆腰率具有特殊的意义。爆腰率一方面降低了干燥等级,另一方面也加快了干燥效率。如果能够适当的提高一些爆腰率,而较大的加快干燥效率则会更加的干燥工艺。因此分析小麦干燥过程中的爆腰特性具有非常高的工业价值。

第 4 章 小麦微波真空干燥应力解析及裂纹预测

4.1 引言

在微波真空干燥过程中,小麦内部因存在不同水分梯度和温度梯度而产生干燥应力,当干燥应力超过小麦强度极限时,会产生裂纹,形成爆腰,降低小麦干燥后的品质,并改变其原有的干燥特性^[99-101]。因此,分析物料干燥时爆腰原理是微波真空干燥研究的一个重点方向。本章研究针对小麦在微波真空干燥过程中内部温度梯度、水分梯度和应力值之间的关系,通过构建小麦干燥应力模型,对小麦进行裂纹预测。旨在分析中可以找到提高小麦干燥效率及品质的实验指标,为后续小麦微波真空干燥深加工研究中提供实验和理论基础。

4.2 材料与方法

实验材料选用山东生产的颗粒饱满、表面洁净、无任何裂纹小麦,将湿基含水率调配到 20%后于常温状态下的水浴锅密封保存。本文将小麦视为黏弹性体,所建模型考虑了水分、温度、应变和应力等因素;应力方程包括径向应力、应力平衡和主应力;样品的应力应变关系由广义 Maxwell 模型描述。

4.2.1 应力解析方程

(1) 广义 Maxwell 模型

在黏弹性体理论中,物料的黏弹性质主要表现在应力和应变率方面。Kelvin 模型和 Maxwell 模型是两种最基本的黏弹性体模型。由于广义 Maxwell 黏弹物理模型能够精确地表达并分析小麦的应力应变本构关系,所以本章数值理论分析采用广义 Maxwell 模型。为了清晰地反映出小麦颗粒的应力松弛规律,在对广义 Maxwell 原件添加一个固定应变后,本构方程可表达为^[102]:

$$\sigma(t) = \int_0^t 2G_1(t) \frac{\partial}{\partial \tau} e(\tau) d\tau \quad (4-1)$$

式中, $\sigma(t)$ 为随时间变化的应力, Pa; $G_1(t)$ 为松弛函数, Pa/s; τ 为松弛时间, s。

在黏弹性材料的本构方程中, 剪切松弛模量为材料的重要参数, 其函数公式反映的是一组经过指数加权后的松弛时间离散分布之和, 这些时间系数被称为 Maxwell 模型参数^[103]。小麦粘弹性行为的弛豫时间分布函数是通过均值为零的两个正态分布函数求和而获得的。实验室中很难算出小麦颗粒的 Maxwell 模型参数, 在对比其他物料的 Maxwell 模型参数中分析发现, 绝大部分物料的 Maxwell 模型参数都是通过经验公式^[104] (KWW 函数) 求得。广义 Maxwell 模型的剪切松弛模量函数可表达为^[105]:

$$G_1(t) = G_0 \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right] \quad (4-2)$$

式中, G_0 为初始剪切模量, Pa; β 为指数扩展因子。

(2) 无量纲化

在微波真空干燥过程中, 小麦内部存在水分梯度和温度梯度, 因此水分和温度是变量, 需对此无量纲化。无量纲时间-温度转换因子 α_T 和时间-水分转换因子 α_M 的转换关系为^[106]:

$$\alpha_T = \frac{t}{\vartheta_T}; \alpha_M = \frac{t}{\vartheta_M} \quad (4-3)$$

式中, ϑ_T 为温度折算时间, s; ϑ_M 为水分折算时间, s。

由式 4-3 得出总转换因子 α 为:

$$\alpha = \alpha_T \alpha_M = \frac{t}{\vartheta} \quad (4-4)$$

式中, ϑ 为总折算时间, s。

(3) 径向偏应力方程

根据 Mukimder S 的研究^[107], 偏应力可表达为:

$$S_{kl}(r, t) = \int_0^t G(t-t') \frac{\partial}{\partial t'} e_{kl}(r, t) dt' \quad (4-5)$$

式中, S_{kl} 为偏应力, Pa; k 为小麦切面的法线方向; l 为小麦主应力方向; e_{kl} 为偏应变, Pa。

结合式 4-3，偏应力式转换为^[108]：

$$S_{rr}(r,t) = \frac{T_0 \omega_0}{T_f \omega(r,t)} \int_0^t G_0 [\vartheta(r,t) - \vartheta(r,t')] \frac{\partial}{\partial t'} e_{rr}(r,t') dt' \quad (4-6)$$

式中， T_0 为小麦初始温度，K； ω_0 为小麦初始水分，%； T_f 为实验温度，K。

根据 Mukimder S 的研究^[107]，偏应变式为：

$$e_{rr}^e(r,t) = \frac{2(1+\nu)\alpha_\omega}{3(1-\nu)} [\omega(r,t) - \bar{\omega}(r,t)] \quad (4-7)$$

式中， ν 为小麦的泊松比； α_ω 为小麦的线性吸湿膨胀系数； ω 为 t 时刻小麦内部半径 r 处的水分； $\bar{\omega}$ 为 t 时刻小麦内部半径 r 处的平均水分。

将式 4-7 代入式 4-6，得到最终径向偏应力公式：

$$S_{rr}(r,t) = \frac{\alpha}{\omega(r,t)} \int_0^t G_0 [\vartheta(r,t) - \vartheta(r,t')] \left[\frac{\partial \omega(r,t)}{\partial t} - \frac{\partial \omega(r,t')}{\partial t'} \right] dt' \quad (4-8)$$

(4) 应力平衡方程

在不考虑小麦颗粒本身的惯性力时，根据应力平衡理论，微波真空干燥下小麦的应力平衡方程为^[107]：

$$\sigma_{rr}(r,t) = 3 \int_r^{R_2} S_{rr} \frac{(r',t)}{r'} dt' \quad (4-9)$$

式中， R_2 为测量点和小麦表面的距离($r = R_2$)。

(5) 主应力方程

在弹性力学理论中，偏应变和偏应力的关系可表达为^[109]：

$$\begin{aligned} S_{rr} &= -2S_{\theta\theta} = -2S_{\varphi\varphi} = \frac{2}{3}(\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) \\ S_{r\theta} &= S_{\theta\varphi} = S_{\varphi r} = 0 \\ e_{rr} &= -2e_{\theta\theta} = -2e_{\varphi\varphi} = \frac{2}{3}(\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta}) \\ e_{r\theta} &= e_{\theta\varphi} = e_{\varphi r} = 0 \end{aligned} \quad (4-10)$$

式中， S 为偏应力， N/m^2 ； e 为偏应变； σ 为主应力， N/m^2 ； ε 为主应变。

将径向主应力 $\sigma_{rr}(r,t)$ 代入式 4-10，得到切向主应力：

$$\sigma_{\theta\theta}(r,t) = \sigma_{rr}(r,t) - \frac{3}{2} S_{rr}(r,t) \quad (4-11)$$

(6) 主要特征参数

1) 对于测定小麦膨胀系数的研究鲜有人涉猎, 本文引用华云龙^[110]等人的部分实验结果, 其中: $\beta = 0.434$ 。

2) 小麦线膨胀系数 $\alpha_w = 0.390$, 泊松比^[109] $\nu = 0.4$ 。

3) 加权系数^[107] $\omega_i = \frac{G_i}{G_0} = 0.1$ 。

4) 转换因子 $\alpha(M)$ 和折算时间 $\vartheta(t, M)$ ^[111] 表达式为:

$$\alpha(M) = 2280 \exp[-(0.02T_f + 11M)] \quad (4-12)$$

$$\vartheta(t, M) = 4.39 \times 10^{-4} \exp[(0.02T_f + 11M)t] \quad (4-13)$$

4.2.2 实验设备

实验设备包括: (1) RWBZ-08S 型号微波真空干燥箱; (2) HC5003X 型号电子天平, 工作精度 $\pm 0.1 \text{ mg}$; (3) 放大镜; (4) Fluke 568 型号红外电子测温仪; (5) CT3 型号质构分析仪; (6) Mitutoyo 395 型号螺旋测微器。图 4-1 为质构分析仪实物图。

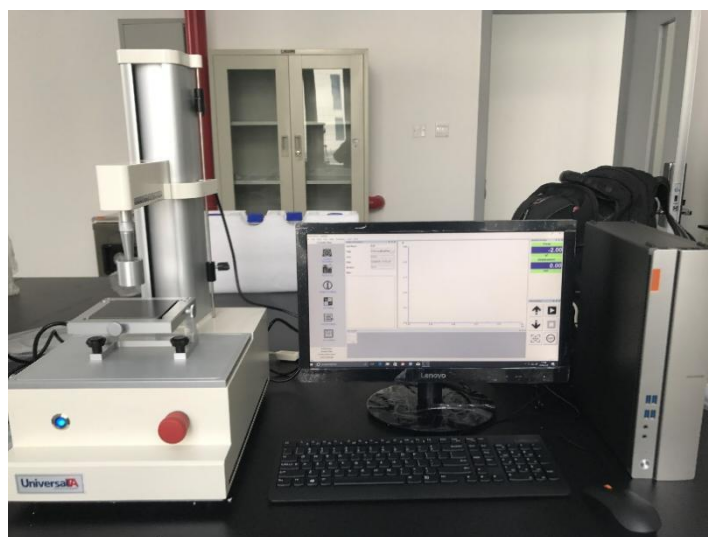
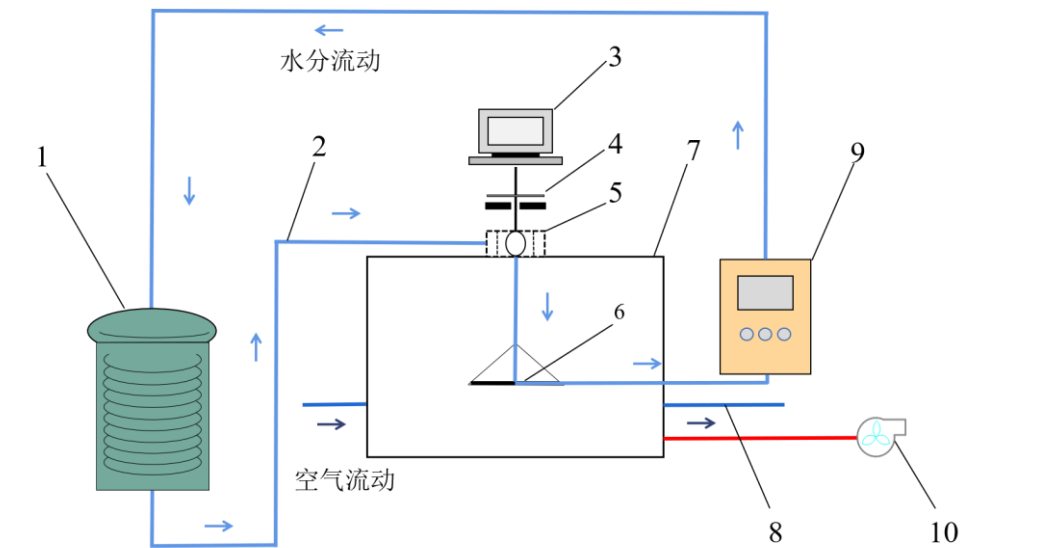


图 4-1 质构分析仪

4.3 实验方法

4.3.1 微波真空干燥实验

微波真空干燥实验前，将干燥箱预热一小时左右，使干燥箱运转环境处于稳定状态。预热后，将处理好的小麦均匀地铺在托盘上，进行微波真空干燥实验。实验结束后用电子天平和红外测温仪分别测出每组时间段内小麦质量和温度。具体干燥流程如图 4-2 所示：



1、循环冷却水泵 2、水循环 3、电脑 4、电子天平 5、红外电子测温仪 6、物料 7、微波腔 8、空气循环 9、微波源 10、真空泵

图 4-2 干燥实验流程图

当微波真空干燥机内小麦的湿基含水率低于 12.5%时结束干燥，具体实验方案如表 4-1 所示。

表 4-1 实验方案

水平	影响因素	
	干燥时间/min	实验温度/min
1	7	30
2	14	50
3	21	70

实验结束后，在托盘三个不同位置随机取出 100 粒小麦，在灯光下用放大镜下观察小麦的裂纹情况，记录有裂纹小麦的数量，并计算出爆腰率，最后取三组小麦爆腰率的平均值作为实验数据。按照实验方案，进行 9 组实验，数据如表 4-2 所示。

表 4-2 实验结果

序号	时间/min	温度/℃	湿基含水率/%	单裂纹率/%	双裂纹率/%	龟裂率/%	物料温度/℃
1	7	30	16.9	2.1	0.6	0.3	28.1
2	14	50	14	2.2	2.1	0.7	47.6
3	21	70	11.44	1.7	3.2	4.1	67.1

4.3.2 压缩试验

利用基于数字图像测量系统的质构分析仪进行小麦压缩试验，选取 TA3/100 型号的压缩探头、TA-RT-KIT 型号的压缩底座。按照 ASAE S368.4DEC2000(R2006)^[105]标准，小麦样品取 30 次重复压缩试验。具体实验方案如表 4-3：

表 4-3 压缩实验方案

小麦短轴	小麦中轴	小麦长轴	压缩速率	压缩目标	触发点/g
Z/mm	X/mm	Y/mm	mm/s		
3.39±0.16	3.88±0.22	7.16±0.19	0.02mm/s	50%	10g

结合试验数据，绘制出横坐标为变形量，纵坐标为负荷的关系曲线。小麦籽粒破坏变形量与原长的比值为破坏应变，压缩破坏变形量之前的压缩作用力与变形量曲线与横轴之间的面积是压缩破坏能^{[112][113]}。

将实验平均分为 6 组，以一组为单位取每组内平均值作为数据，确定压缩变形量与负荷关系。每组数据曲线在负荷降低而变形量发生较大变化的点为小麦在压缩过程中的破裂点^[114]。

4.3.3 裂纹分类

将干燥实验后的小麦放在明亮的观察台，用放大镜观察小麦的裂纹情况。根据从籽粒外部观察到的裂纹数量，将小麦的裂纹分为单裂（一条裂纹）、双裂（两条裂纹）和龟裂（三条及三条以上裂纹）三种类型^{[115][116]}。

4.4 结果与分析

4.4.1 压缩实验分析

根据图 4-3 的结果, 对于 30°C-70°C 的小麦, 在质构仪进行压缩的过程中, 当压缩变形量在 0.62 mm-0.8 mm 之间时, 所受负荷呈现下降趋势。这是因为小麦在受到质构仪的挤压时, 产生了初始裂纹。随着持续的压缩过程, 当压缩变形量在 1.12 mm-1.22 mm 之间时, 温度在 30°C-70°C 的小麦发生了第二次破裂。第二道裂纹产生后, 小麦表面的负荷将不断增加, 直至负荷达到质构仪探头所能承受的负荷范围的上限。在这个过程中, 小麦将进入龟裂状态。对于 80°C 的小麦批次, 所受负荷不断增加, 但并未出现破裂点。这是由于 80°C 批次的小麦含水率较低, 同时其硬度过大, 超出了质构仪探头所能施加的负荷范围。

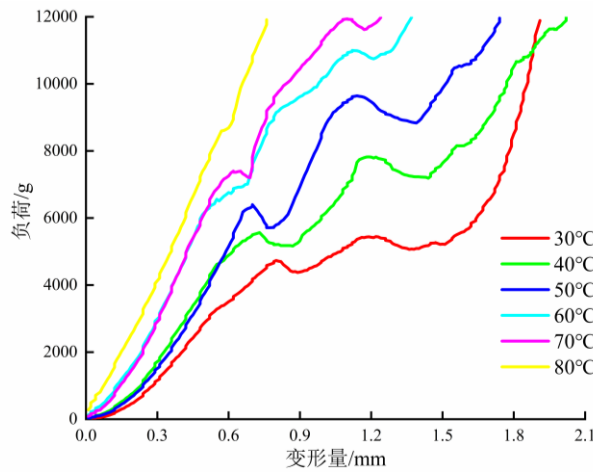


图 4-3 压缩变形量与负荷关系

用螺旋测微器测定小麦籽粒的三轴长度, 对 Z 轴进行压缩。计算出小麦籽粒与两压力平面接触部分的曲率半径 R , R' 和参数 $\cos \theta$ [117]。

$$R = \left[(X/2)^2 + (Z/2)^2 \right] / Z \quad (4-14)$$

$$R' = \left[(Y/2)^2 + (Z/2)^2 \right] / Z \quad (4-15)$$

$$\cos \theta = (1/R' - 1/R) / (1/R' + 1/R) \quad (4-16)$$

按照 ASAE S368. 4DEC2000(R2006) 标准, 将实验数据代入式 4-14、式 4-15 和式 4-16, 计算出小麦籽粒的弹性模量 E [117]。

$$E = \frac{0.338F(1-\nu)^2}{D^{3/2}} \left[2K(1/R + 1/R')^{1/3} \right]^{3/2} \quad (4-17)$$

式中, E 为弹性模量, MPa; F 为载荷, N; D 为变形量, m; ν 为泊松比; R 、

R' 为小麦上、下的曲率半径, m ; K 为中间参数。

小麦为椭圆形谷物, 在压缩过程中小麦与压力板接触面的半长轴 A 与半短轴 B 的计算式为^[118]:

$$A = m \left[\frac{3F_R(1-\nu)^2}{2E} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{-1} \right]^{1/3} \quad (4-18)$$

$$B = n \left[\frac{3F_R(1-\nu)^2}{2E} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)^{-1} \right]^{1/3} \quad (4-19)$$

根据实验测出的 30 个样品的压缩力与变形量数据, 代入式 4-18 和式 4-19, 根据应力方程可求出压缩过程中小麦所受的应力。

4.4.2 应力与温度和含水率的关系

根据主应力方程中应力与水分 ω 的关系, 设用以下线性方程:

$$P = aM + b \quad (4-20)$$

式中, P 为小麦所受的径向应力, MPa; M 为小麦的含水率, %; a , b 为与干燥温度 T 相关的系数。

将式 4-8 与表 4-2 的单裂纹数据结合, 得出不同干燥温度 T 时, 径向应力 P 和含水率 M 的关系, 如表 4-4 所示:

表 4-4 小麦产生一道裂纹时, 系数 a 、 b 与干燥温度 T 之间的关系

干燥温度 $T / ^\circ\text{C}$	a	b
30	-61.3	1246.2
50	-70.7	1268.7
70	-29.4	664.3

对表 4-4 中的数据进行回归分析, 分别的到系数 a 、 b 与干燥温度 T 的回归方程, 如下所示:

$$a = 0.06T^2 - 5.54T + 47.84 \quad (4-21)$$

$$b = -0.78T^2 + 63.53T + 39.2 \quad (4-22)$$

把式 4-21 和 4-22 代入式 4-20 中, 得到下式:

$$P_1 = (0.06T^2 - 5.54T + 47.84)M - 0.78T^2 + 63.53T + 39.2 \quad (4-23)$$

式中, P_1 为小麦产生一道裂纹时所受的径向应力, MPa。

图 4-4 展示了小麦处于单裂纹时, 不同温度与含水率对小麦所受应力的影响。保持其它参数不变, 温度变化范围为 30°C - 70°C , 含水率变化范围为 10% - 20% 。图 4-4 表明, 在相同湿基含水率的条件下, 当温度匀速上升时, 小麦达到单裂纹点所需的应力呈现较为匀速的上升; 在相同温度的条件下, 当湿基含水率匀速下降时, 小麦达到单裂纹点所需的应力不断降低, 且下降的速率不断增加。在温度和湿基含水率都均匀变化时, 温度对于应力的影响程度略大于湿基含水率对其的影响, 且湿基含水率越高, 这种现象越明显。

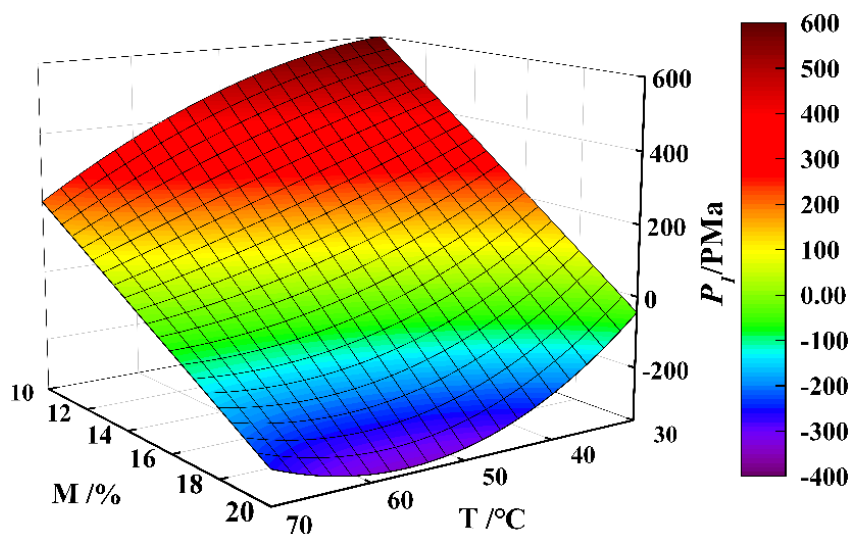


图 4-4 小麦产生一道裂纹时所受应力随温度与含水率的变化规律

将式 4-8 与表 4-2 的双裂纹数据结合, 得出不同干燥温度 T 时, 径向应力 P 和含水率 M 的关系, 如表 4-5 所示:

表 4-5 小麦产生两道裂纹时, 系数 a 、 b 与干燥温度 T 之间的关系

干燥温度 $T/^{\circ}\text{C}$	a	b
30	-53.8	1150.9
50	-109.3	1958.5
70	-47.8	1076.8

对表 4-5 中的数据进行回归分析, 分别得到系数 a 、 b 与干燥温度 T 的回归方程, 如下所示:

$$a = -0.15T^2 - 14.48T + 248.83 \quad (4-24)$$

$$b = -2.11T^2 + 209.31T - 3229.4 \quad (4-25)$$

把式 4-24 和 4-25 带入式 4-20 中，得到下式：

$$P_2 = (-0.15T^2 - 14.48T + 248.83)M - 2.11T^2 + 209.31T - 3229.4 \quad (4-26)$$

式中， P_2 为小麦产生两道裂纹时所受的径向应力，MPa。

图 4-5 展示了小麦处于单裂纹时，不同温度与含水率对小麦所受应力的影响。保持其它参数不变，温度变化范围为 30°C-70°C，含水率变化范围为 10%-20%。图 4-5 表明，在湿基含水率低于 14% 的区间内，当湿基含水率相同时，随着温度匀速上升，小麦达到双裂纹所需应力呈现先上升后下降的趋势；在含水率高于 14% 的区间内，当湿基含水率相同时，随着温度匀速上升，小麦达到双裂纹所需应力呈现先下降后上升的趋势。在相同温度的条件下，当湿基含水率匀速下降时，小麦达到双裂纹点所需的应力呈现较为匀速的上升。在温度和湿基含水率都均匀变化时，湿基含水率对于应力的影响程度大于湿基含水率对其的影响。

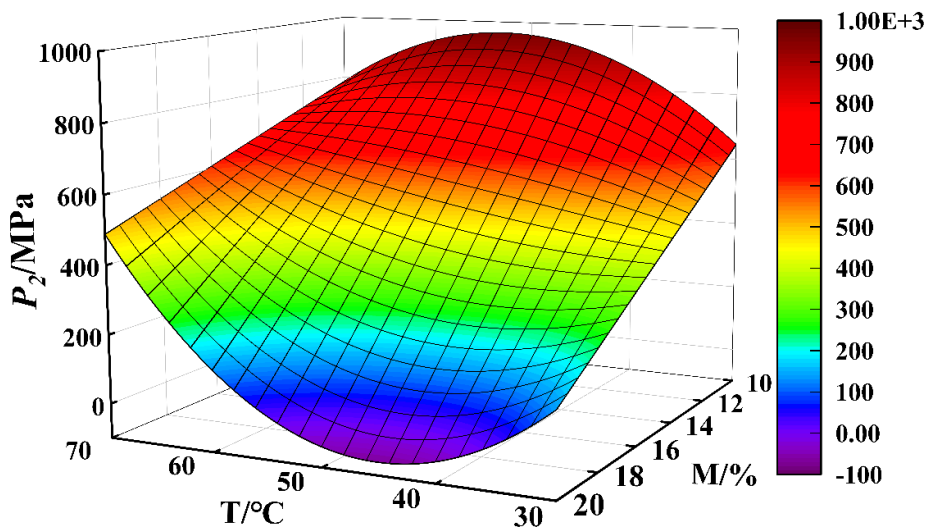


图 4-5 小麦产生两道裂纹时所受应力随温度与含水率的变化规律

将式 4-8 与表 4-2 的龟裂数据结合，得出不同干燥温度 T 时，径向应力 P 和含水率 M 的关系，如表 4-6 所示：

表 4-6 小麦产生三道及以上裂纹时，系数 a 、 b 与干燥温度 T 之间的关系

干燥温度 $T / ^\circ\text{C}$	a	b
30	-34.9	814.1
50	-29.3	761.1
70	-15.2	677.7

对表 4-6 中的数据进行回归分析，分别得到系数 a 、 b 与干燥温度 T 的回归

方程，如下所示：

$$a = 0.011T^2 - 0.57T - 29.2 \quad (4-27)$$

$$b = -0.038T^2 + 0.39T + 836.6 \quad (4-28)$$

把式 4-27 和 4-28 带入式 4-20 中，得到下式：

$$P_3 = (0.011T^2 - 0.57T - 29.2)M - 0.038T^2 + 0.39T + 836.6 \quad (4-29)$$

式中， P_3 为小麦产生三道及以上裂纹时所受的径向应力，MPa。

图 4-6 展示了小麦出现龟裂时，不同温度与含水率对小麦所受应力的影响。保持其它参数不变，温度变化范围为 30°C-70°C，含水率变化范围为 10%-20%。图 4-6 表明，在相同湿基含水率的条件下，当温度匀速上升时，小麦出现龟裂所需的应力不断升高，且升高的速率不断增加，湿基含水率越高，应力上升速率越大；在相同温度的条件下，当湿基含水率匀速下降时，小麦达到单裂纹点所需的应力呈现较为匀速的上升。在温度和湿基含水率都均匀变化时，湿基含水率对于应力的影响程度略大于温度对其的影响，且温度越低，这种现象越明显。

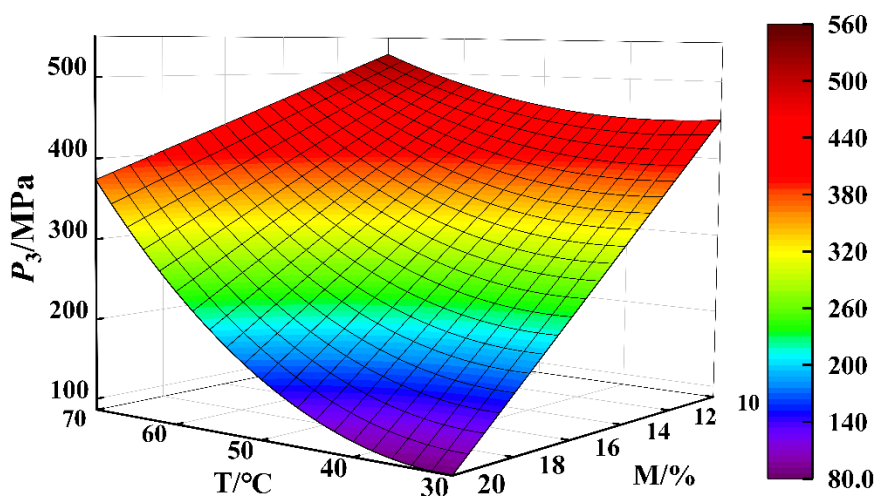


图 4-6 小麦出现龟裂时所受应力随温度与含水率的变化规律

4.4.3 应力与裂纹的关系

根据上述的微波真空干燥实验和工业干燥小麦的含水率要求（要求在 12.5% 以下），可以确定满足这一要求的温度为 61.4°C。在 60°C 和 70°C 下，不同裂纹所需的负荷和变形量如表 4-7 所示：

表 4-7 不同裂纹点对应的负荷与变形量

温度/°C	裂纹数	负荷/g	变形量/mm
60	单裂纹	6920	0.36
	双裂纹	10998	0.61
	龟裂	9764	0.63
70	单裂纹	7398	0.35
	双裂纹	11938	0.60
	龟裂	11369	0.63

经过负载和压缩后，将小麦的尺寸代入式 4-5 和 4-6，得到以下结果：

对于单裂纹的情况，小麦的应力范围为 307 Mpa-328.2 Mpa，变形量的区间为 0.35 mm-0.36 mm；对于双裂纹的情况，小麦的应力范围为 487.9 Mpa-529.6 Mpa，变形量的区间为 0.6 mm-0.61 mm；对于龟裂的情况，小麦的应力范围为 433.1 Mpa-504.3 Mpa，变形量的区间为 0.63 mm-0.64 mm。

4.4.4 爆腰的预测

为了更好地保证小麦干燥后的品质，不仅需要满足工业干燥小麦的要求（爆腰率在 6%以下），还要尽量降低爆腰小麦的裂纹数量。根据图 4-7 的数据，可以观察到不同温度下小麦爆腰率的变化趋势。随着温度的升高，小麦的爆腰率呈逐渐增加的趋势，并且增加速率也逐渐加快。图中显示，满足工业干燥小麦爆腰率要求的温度范围为 50°C-70°C。在这个温度范围内，随着温度的增加，小麦单裂纹的数量呈现下降的趋势，而双裂纹和龟裂的数量呈现上升的趋势。这是因为一旦小麦出现裂纹，其承载能力降低，干燥应力的增加会导致裂纹数量增加。

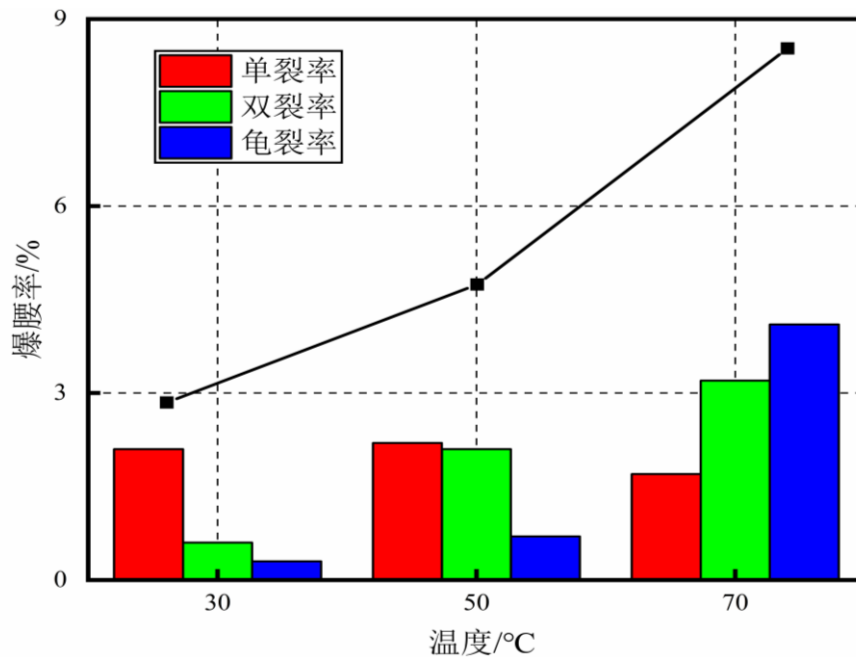


图 4-7 爆腰率

根据小麦压缩试验和微波真空干燥实验数据的结合,可以得出小麦应力随时间变化的规律,如图 4-8 所示。其中,恒定温度梯度曲线代表原有干燥方案中时间和应力之间的关系,可变温度梯度曲线表示调整干燥温度后小麦应力与时间的关系。为了降低小麦干燥后的爆腰率和减少爆腰小麦的裂纹数量,采取了调整小麦干燥温度的新方案。

该新方案在第 7 分钟到 14 分钟之间,将温度保持在恒定的 40°C,以避免由于温度跨度大而大量产生应力裂纹的风险。在 14 分钟之后的时间段内,温度范围从 50°C-70°C 调整为 50°C-61.4°C,通过增加最后阶段的干燥时间,以确保小麦能够达到所需的含水率。这种新方案的目标是通过调整温度和干燥条件,减少干燥过程中的应力集中和裂纹形成的风险,从而降低小麦的爆腰率和裂纹数量。

通过实施调整后的温度方案,可以观察到两种方案下小麦爆腰率的变化。根据图 4-9 的数据,新的温度方案显著降低了小麦的爆腰率。将图 4-9 中的爆腰率与图 4-8 中的应力相对应,可以观察到小麦龟裂的比例明显减少。这表明新的温度方案对小麦干燥后的品质有显著的改善效果。通过减少爆腰率和龟裂的比例,该方案能够降低小麦在干燥过程中遭受的应力,从而减少小麦的损伤和裂纹数量。这些结果进一步验证了调整温度方案对于保持小麦品质的重要性,并为小麦干燥过程中的温度控制提供了有益的参考。

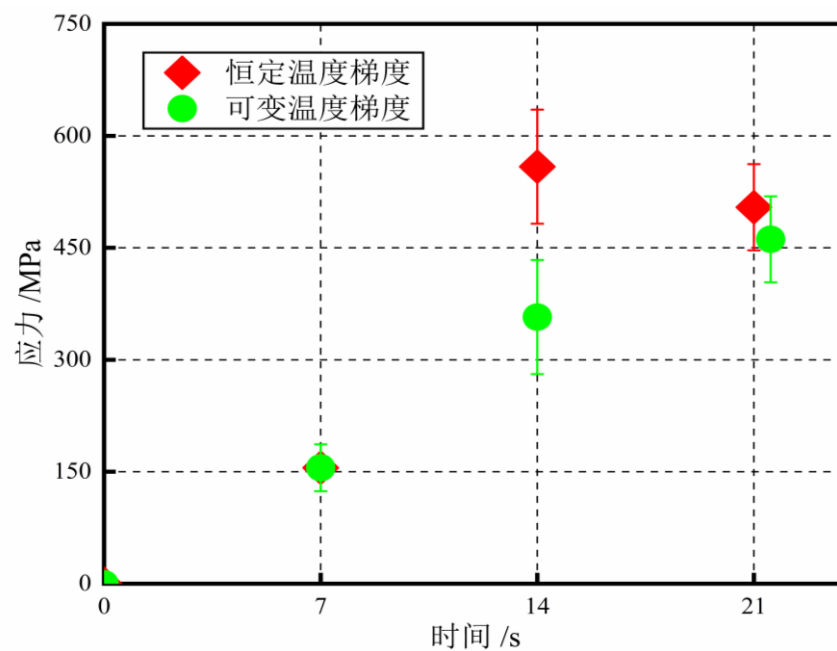


图 4-8 应力随时间变化的规律

注：恒定温度梯度代表了温度梯度恒定为 $2.86^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ；可变温度梯度代表了三个时间段的温度梯度分别为 $2.86^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 和 $1.63^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，下同。

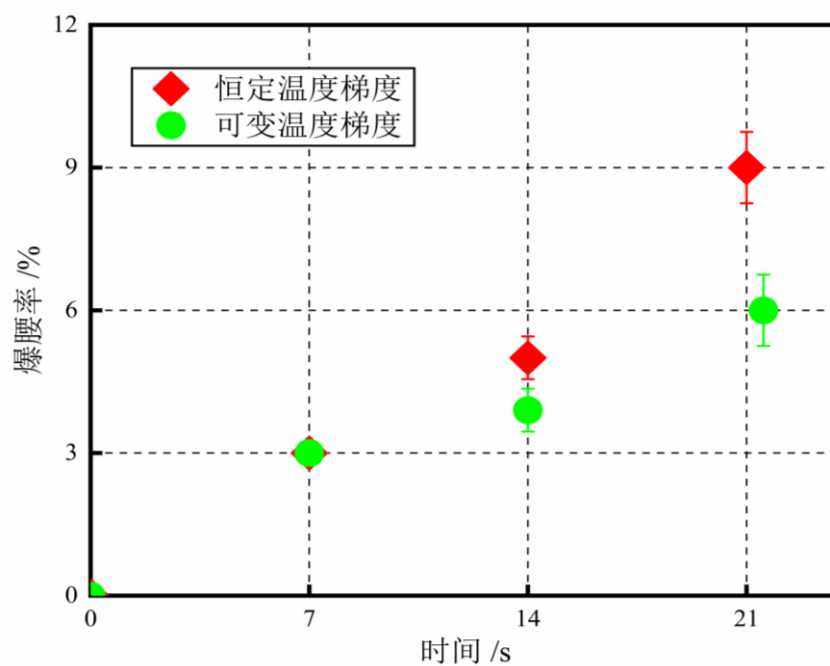


图 4-9 爆腰率随时间的变化规律

4.5 本章小结

由本章研究得出下列结论：

(1) 裂纹增量最大的温度范围位于 50°C-80°C 之间。在这个温度范围内, 小麦颗粒的裂纹数量会显著增加, 并导致其承载能力大幅度下降。这种下降的承载能力会使小麦颗粒更容易发生更严重的破裂。为了确保干燥后小麦的品质, 应采取措施来减少双裂纹小麦的产生。

(2) 温度和湿基含水率对小麦干燥过程中所受应力具有不同程度的影响, 这种影响主要体现在小麦的裂纹状态和湿基含水率为 14% 时。

(3) 在小麦的干燥过程中, 当应力超过颗粒的强度极限时, 会导致裂纹的形成。裂纹的增加会进一步降低小麦颗粒的强度极限。

(4) 通过调整干燥温度和时间, 在控制小麦的爆腰率的同时减少裂纹数量是可能的。这需要综合考虑温度、时间和干燥条件, 以确保小麦在干燥过程中受到的应力分布均匀, 从而降低小麦的损伤和裂纹风险, 提高小麦的干燥品质。

第 5 章 微波真空干燥实验装置设计与优化

5.1 引言

微波真空加热是一种同时从内部和外部对物料进行加热的方法，能够高效地进行干燥。然而，在干燥小麦时，现有的微波真空干燥装置存在一些问题，如物料受热不均匀、实验误差大、实验噪音过大，导致干燥后的农产品质量下降。为了解决这些问题，本研究基于前期的小麦仿真分析和微波真空干燥实验，利用微波真空干燥和机械设计技术，进行了小麦微波真空干燥实验装置的优化。该实验装置采用微波真空干燥，以提高干燥效率并降低能量损耗。同时，设计了温度梯度区间，以减少小麦的裂纹并改善干燥效果^[119-121]。研究的主要内容包括：物料室优化设计、称重结构和消声器优化等。装置操作流程及部分结构可由图 5-1 表示：

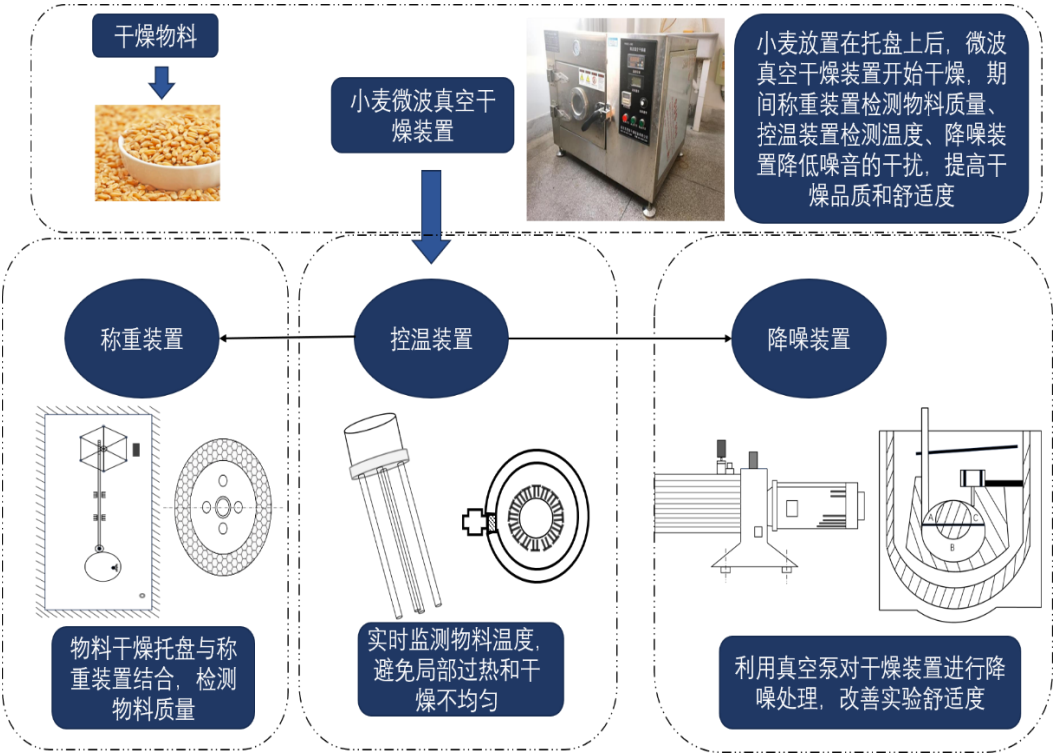


图 5-1 实验装置原理示意图

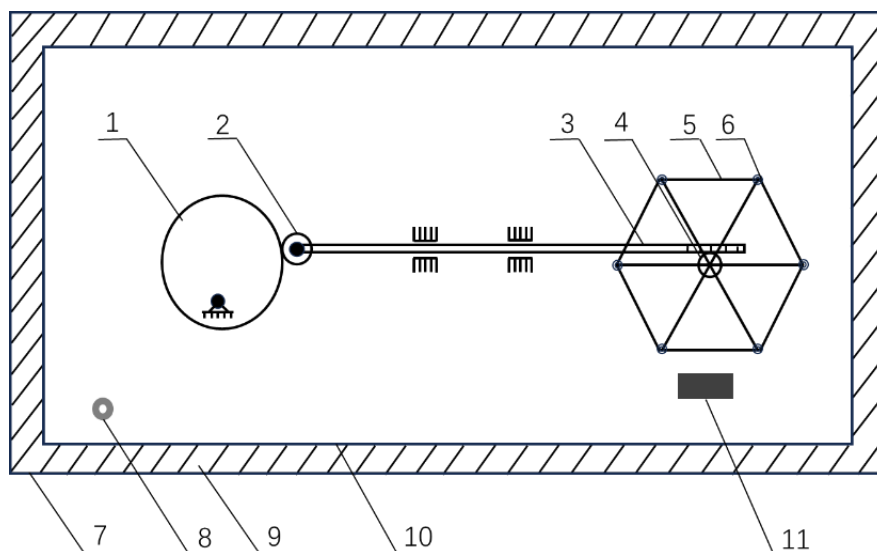
5.2 物料室优化方案

微波真空干燥机中的物料托盘是一种特殊的托盘或载具,用于支撑和放置待干燥的物料。它在干燥过程中具有支持、传递微波能量和促进物料均匀干燥的功能。通常,物料托盘采用耐高温、耐腐蚀的材料制造,如不锈钢,以确保其在高温和湿度变化的环境下保持稳定和耐用性。物料托盘通常具有一定的高度和边缘,以防止物料在干燥过程中溢出或泄漏。托盘底部通常设计为网状或开孔结构,以促进微波能量的传递和物料的通风。在干燥过程中,物料托盘的上表面直接接受铝制加热板的辐射加热,而物料托盘的下表面传热主要由不锈钢网丝和网孔组成。因此根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,按式 5-1 简化计算出不同温差下加热板通过不锈钢网状托盘对物料的传热功率^[119]。

$$Q = \sigma_b (T_1^4 - T_2^4) \left(\frac{1}{R_{r1}} + \frac{1}{R_{r2}} + \frac{1}{R_{r3}} \right) \quad (5-1)$$

式中, Q 为不锈钢网状托盘的辐射换热量, W ; σ_b 为黑体辐射常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; T_1, T_2 为加热板、小麦的绝对温度, K ; R_{r1}, R_{r2}, R_{r3} 为小麦上表面、不锈钢网丝和网孔的辐射系统热阻, $R_{r1} = 2.77, R_{r2} = 43.9, R_{r3} = 3.9$ 。

物料托盘配备有温度传感器,用于监测物料的温度变化,以控制干燥过程中的温度参数^[120-124]。如图 5-2 所示,微波真空干燥装置的物料室主要是对托盘提供试验环境。物料室具有双层结构,外层由不锈钢外壁包裹,以防止微波泄露,内层由聚四氟乙烯内壁组成,使微波可以顺利通过。因为凸轮的不断转动,滚轮形成了往复的左右移动,与滚轮连接的齿条也随之左右移动。与齿条配合的齿轮也会因齿条往复的移动而周期的逆时针和顺时针转动,齿轮的转动带动其上的正六边形支架和托盘做相同的运动。托盘上放置的物料因齿轮周期的顺时针和逆时针转动而有规律的转动。物料在这种转动下形成的摩擦力作用下均匀分布在托盘上,而不会出现堆积现象。物料因托盘的相反转动而做相反的相对运动,进而保证物料的各个面都受热均匀。正六边形支架结构确保了托盘可以更广泛的分布在物料室中,尽可能的减少了局部过热的影响。



1、凸轮，2、滚轮，3、齿条，4、齿轮，5、正六边形支架，6、托盘，7、不锈钢外壁，
8、真空孔，9、陶瓷板，10、聚四氟乙烯内壁，11、测温装置

图 5-2 物料室结构

托盘的结构和运动设计细节如下：

（1）物料室设有双层结构，外层设为不锈钢组成，防止微波泄露；内层由聚四氟乙烯组成，微波可以顺利的通过；（2）托盘划分为 6 个部分，均匀分布在以正六边形 6 个拐角为落点的位置上；（3）托盘底部设计成齿轮结构，把连杆的一端设为齿条状，与齿轮配合，另一端与提供动力的凸轮配合，配合后的托盘可以形成往复的顺时针和逆时针旋转；（4）物料室的底部设置微波屏蔽板，屏蔽板上均匀分布直径为 3mm 的小孔，微波屏蔽板可防止微波进入真空发生室，通过真空管泄露。

5.3 称重装置与控温系统设计

5.3.1 耐高温称重传感器

耐高温称重传感器是一种专门设计用于在高温环境下进行称重和重量测量的传感器。它们通常采用耐高温材料和特殊的结构设计，以保证在高温条件下的准确性和可靠性。

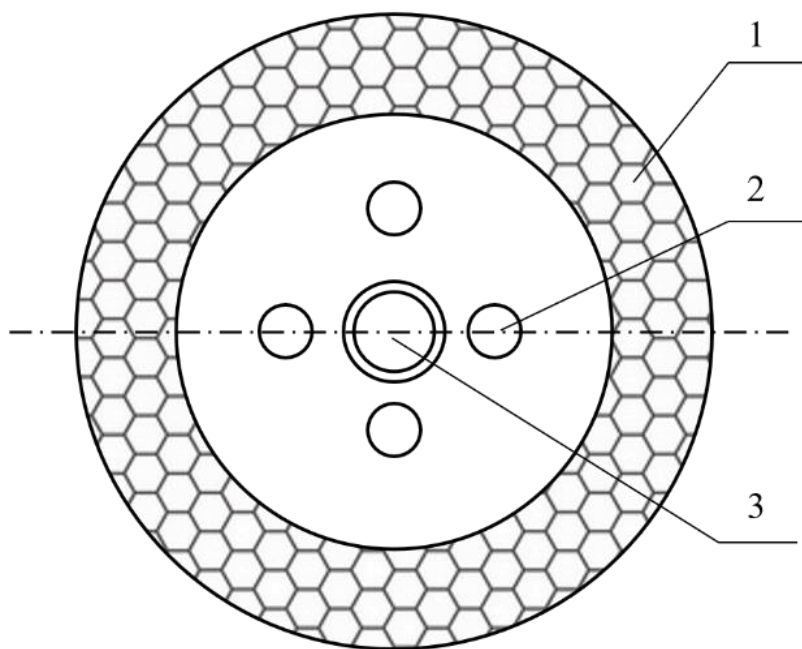
耐高温称重传感器采用能够承受高温的特殊材料制造，如合金钢、不锈钢和陶瓷等。这些材料具有出色的耐高温性能，能够在高温环境下稳定运行。为了应

对高温环境对传感器性能的影响,耐高温称重传感器通常具备温度补偿功能。通过测量和补偿环境温度,可以提高传感器的准确性和稳定性。在设计耐高温称重传感器的结构时,需要考虑高温环境下的热膨胀和热应力等因素。传感器的结构应该能够抵抗温度变化所带来的影响,并保持稳定的测量性能。电容式高温称重传感器蠕变的补偿量的计算公式如下^[125]:

$$\begin{cases} Y_i = C_1 X_{1i} + C_2 X_{2i} \\ X_{1i} = DX_i + B_1 X_{1(i-1)} \\ X_{2i} = DX_i + B_2 X_{2(i-1)} \end{cases} \quad (5-2)$$

式中, Y_i 为补偿量; C_1 、 C_2 为初偿系数; B_1 、 B_2 为衰减系数; DX_i 为重量增量。

耐高温称重传感器具备高精度和稳定的测量性能,确保在高温环境中可靠地进行重量测量。为了适应高温环境中可能存在的腐蚀性气体和化学物质,耐高温称重传感器具备良好的防腐蚀性能,以延长使用寿命和提高可靠性。此外,耐高温称重传感器能够承受较大的负荷,以满足不同应用场景下的称重需求^[126-129],具体结构由图 5-3 所示。



1、耐高温橡胶, 2、通孔, 3、中心孔

图 5-3 耐高温称重传感器

5.3.2 物料托盘可称重化

干燥托盘可称重化,也称为称重干燥托盘。称重化的干燥托盘具有集成的称

重系统，可以实时监测和记录物料的重量变化。这种设计可以提供更精确的干燥控制和监测，以及对干燥过程中物料的水分损失进行实时跟踪。

称重化干燥托盘配备了称重装置，通常是负荷传感器或称重传感器，用于测量和记录物料的重量变化。称重系统与控制系统连接，实现实时的重量监测和数据记录。通过监测物料的重量变化，称重化干燥托盘可以提供更精确的干燥控制。根据实时的重量数据，控制系统可以调整干燥参数，如温度、湿度或干燥时间等，以实现更准确的干燥效果。称重化干燥托盘可以实时跟踪物料的水分损失，通过记录重量变化，计算物料的水分损失率，并据此评估干燥过程的效果和物料的干燥程度。便于操作人员对干燥过程和物料的水分损失进行更详细的分析和评估。

如图 5-4 所示，物料室中的托盘添加称重装置的目的是降低实验的测量误差。托盘结构设计完成后，在称重托盘下添加耐高温称重传感器，且耐高温称重传感器与电子秤数据无线发射器相连，并在控制室中添加连接好的无线数传器和电子秤数据无线接收器。通过电子秤数据无线发射器发射信号，无线数传器传递信号到连接好的电子秤数据无线接收器上，最后通过数据显示器将物料的质量数据显示在显示面板上。

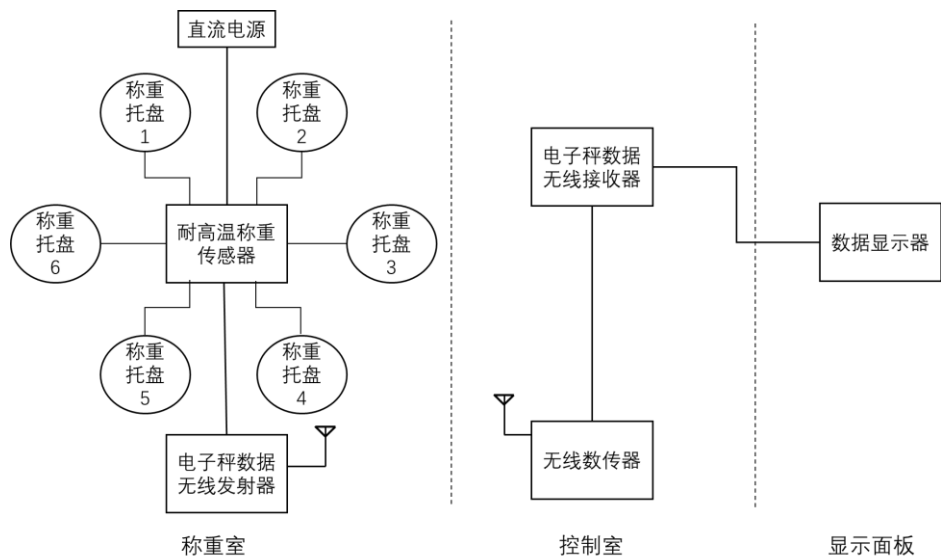


图 5-4 称重托盘系统

5. 3.3 智能控温系统设计

微波真空干燥机的智能控温系统是基于温度反馈和控制算法的自动化系统，旨在实现对干燥过程中温度的精确控制和调节。

5.3.3.1 智能控温系统硬件设计

在小麦干燥过程中需要保障其干燥后的品质，不允许出现超温现象，为此设计合适的控温系统是十分必要的。智能控温系统需要可靠的温度传感器来测量干燥室内的温度。常用的温度传感器包括热电偶和热敏电阻。在选择传感器时，需要考虑其响应速度、精度和适应真空环境的能力。控温系统通过调整微波功率和其他干燥参数来实现温度的调节。当实际温度低于设定温度时，系统增加微波功率以提高温度；当实际温度高于设定温度时，系统降低微波功率以降低温度。通过不断的反馈和调节，系统可以实现温度的精确控制和稳定性。此外，智能控温系统还应具备温度保护功能，以防止温度超出安全范围。当温度超过预设的安全限制时，系统应触发警报或自动停止加热，以保护设备并避免对产品造成损坏。智能控温系统能够记录和监控干燥过程中的温度数据，以进行分析和优化。通过数据记录和监控，可以识别潜在问题，并进行相应的调整和改进，以提高干燥效率和产品质量。

智能控温系统的硬件包括：温度检测模块、磁控管调功模块和其他电路部分。

温度检测模块。微波真空干燥机的智能控温系统使用温度传感器监测干燥室内的温度。在设计智能控温系统时，需要综合考虑温度范围、精确度、响应速度和成本等因素。温度传感器与控制系统连接，将温度数据传输给控制系统，以便根据设定温度进行调节和控制。智能控温系统通过实时采集和比较实际温度与设定温度之间的差异，实现精确的温度控制，并调整微波功率和其他干燥参数以满足要求。

红外线温度传感器是广泛使用的温度传感器，具有广泛的温度范围和良好的响应速度。红外线温度传感器利用红外线辐射来测量物体表面的温度，通过接收物体发出的热辐射并将其转换为温度值。黑体辐射理论指出，在理想条件下，任何辐射都可以被视为黑体。黑体吸收所有波长的能量，无传输和反射。普朗克定律揭示了黑体辐射能量在不同温度条件下根据波长的分布规律。这是红外温度测量技术的理论基础，其数学表达如下^[130]：

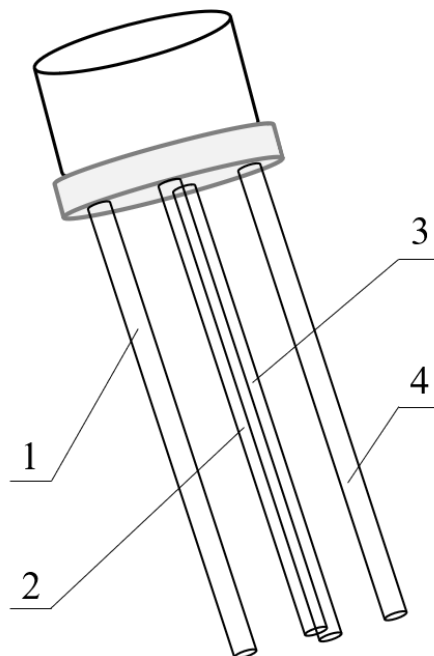
$$M_{bb}(T, \lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (5-3)$$

式中， M_{bb} 为黑体辐射的能量密度， $W/(\mu m \times m^2)$ ； C_1 为第一辐射常数，

$C_1 = 2\pi hc^2 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 \text{ W m}^{-2} \mu^{-4}$; C_2 为第 3 辐射常数 ,

$C_2 = ch/k = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \mu_{\text{m}} \text{ K}$; λ 为光波的辐射波长, μm 。

红外线温度传感器具体的结构可参考图 5-5。



1、地极，2、电热堆正极，3、电热堆负极，4、NTC 电敏电阻正极

图 5-5 红外温度传感器

磁控管调功模块。微波真空干燥机的智能控温系统通常使用磁控管调功模块来实现微波功率的调节。磁控管是一种产生和放大微波能量的设备，通过调整微波真空干燥机的工作状态，可以控制微波功率的输出。

磁控管是微波真空干燥机中常用的微波发生器，它由阴极和螺旋形阳极组成。通过加热阴极，电子从阴极发射并受到阳极上的高电场加速。在螺旋形阳极的作用下，电子产生旋转电场，并与磁场相互作用，从而产生微波能量。为了实现智能控温，可通过调节磁控管的工作状态来控制微波功率输出。常见的调节方法是调整磁控管的工作电压和工作电流。增加工作电压和电流可增加微波功率输出，而减小工作电压和电流则可降低微波功率输出。磁控管内电流、电压与微波功率的关系可以表达为^[131]：

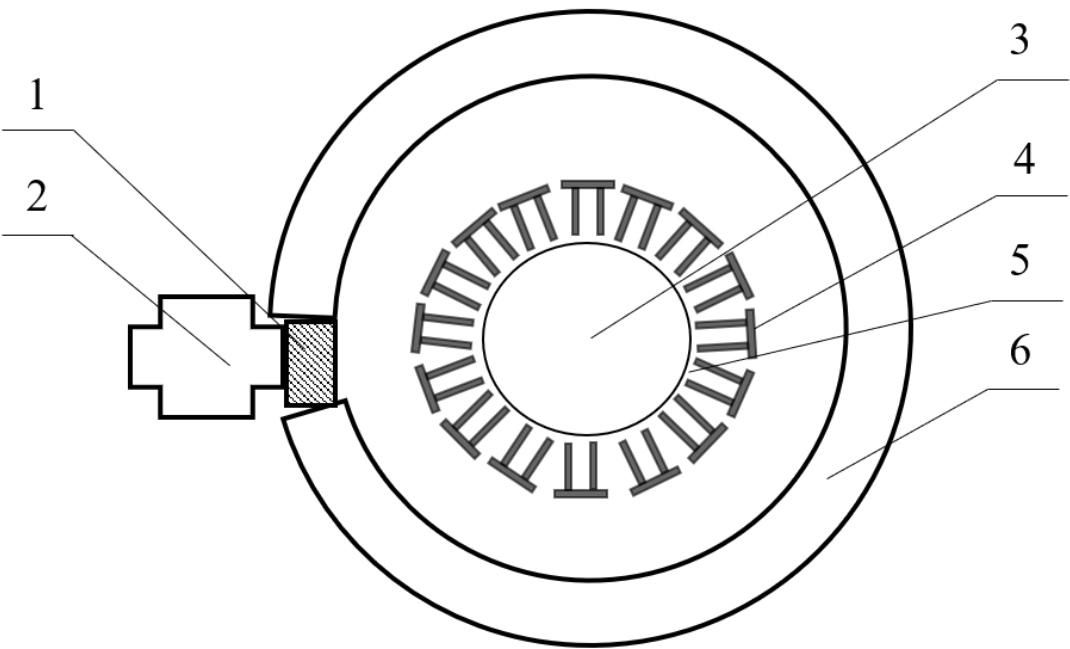
$$P = (V \cdot I) \times \eta \quad (5-4)$$

式中， P 为微波功率， W ； V 为磁控管内的电压， V ； I 为磁控管内的电流，

A ； η 为功率转换效率。

磁控管调功模块通常与智能控温系统的控制算法配合使用，以实现微波功率的精确调节。控制算法根据温度传感器测量到的实际温度与设定温度之间的差异，调节磁控管的工作电压和电流来控制微波功率的输出。智能控温系统具备反馈控制机制，通过持续的反馈和调节过程，使温度稳定在设定值附近。磁控管调功模块中的温度传感器测量到的实际温度用于反馈给控制算法，根据实际温度与设定温度之间的差异来调节磁控管的工作状态，实现微波功率的调节。

本系统中的磁控管采用脉冲调制模式进行温度调节，以提高热效率并降低热量损耗。采用 MOC3601 光电双向可控硅驱动器，简化了外围电路，提高了精度，方便了功能扩展，从而提高了系统的集成度和性能。理论数据表明，在热稳定的工作环境下，磁控管每 2 秒能够使谷物温度发生变化，因此将控制周期设定为 2 秒。具体结构如图 5-6 所示。



1、磁铁，2、输出口，3、阴极，4 阳极谐振腔，5、内腔，6、连接壳

图 5-6 磁控管

其他电路部分。除了磁控管调功模块和温度检测模块外，微波真空干燥机的智能控温系统还包括控制器、安全保护电路、通信接口等，用于实现温度控制和干燥过程的监测。

控制器用以接收温度传感器信号，进行温度测量和控制算法运算。控制器

通常采用微处理器或嵌入式系统，具备计算和控制逻辑能力，通过比较设定温度和实际温度之间的差异，控制磁控管调功模块，实现精确的温度控制。智能控温系统还配备安全保护电路，监测电源电压、电流和温度等参数，以及异常情况如过热、过载等。一旦检测到异常，触发报警、停机或其他保护措施，确保设备安全。此外，智能控温系统具备通信接口，如以太网、USB 或无线通信模块，实现远程监控和数据传输，将温度数据、状态信息和报警信息传输给上位机或远程监控系统，实现远程控制和数据管理。

5.3.3.2 智能控温系统软件设计

控温系统的核心是控制算法，它根据温度传感器测量到的实际温度和设定温度之间的差异，自动调节微波功率和其他参数，以实现温度的精确控制^[102-104]。常用的控制算法包括比例积分微分（PID）控制算法和模糊逻辑控制算法。这些算法可以根据实际需求进行调整和优化，以实现快速稳定的温度控制。

智能控温系统的软件设计是实现温度控制和监测的关键部分。软件设计应包括温度控制算法的开发。该算法根据温度传感器测量到的实际温度和设定温度之间的差异，决定磁控管调功模块的工作状态，以实现温度的控制。控制算法可以采用比例积分微分（PID）控制算法或其他高级控制算法，根据具体应用需求进行选择和优化。软件设计应实现温度数据的采集和处理。温度传感器测量到的温度数据需要被获取并传递给控制算法进行处理。此外，还可以采集其他相关的参数，如时间、湿度等，以便进行全面的干燥过程监测和分析。

软件设计应包括报警和保护机制的实现。根据设定的温度范围和其他安全参数，当温度超出设定范围或发生其他异常情况时，软件应能及时发出报警信号，并触发相应的保护措施，如停机、降低功率等，以确保设备和操作的安全性。软件设计可以包括数据存储和分析功能，以便对干燥过程进行记录和分析。温度数据、时间数据和其他相关参数可以存储在数据库或文件中，供后续分析、工艺优化和质量控制使用。

自适应 PID 控制模块工作流程如图 5-7 所示，在控制过程中系统检测当前温度值并计算温度误差和温度误差变化率。系统对 PID 控制器的三个参数进行处理、查表和自调整，新的控制参数对被控对象实现控制。

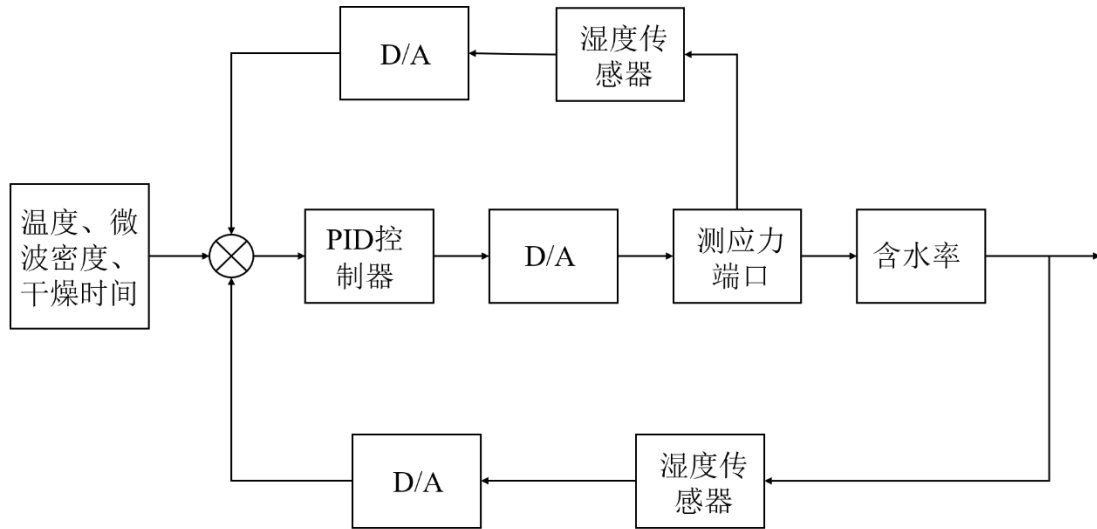


图 5-7 PID 控制模块工作流程图

在软件设计过程中，需要充分考虑系统的稳定性、响应速度、易用性和可扩展性。软件设计应经过充分测试和验证，确保其在实际应用中能够稳定可靠地实现温度控制和监测功能，满足干燥过程的要求。模糊 PID 控制算法的稳定性计算通常使用模糊稳定度准则来评估，其中常见的模糊稳定度准则是基于积分平方误差（ISE）的稳定性计算，其计算公式如下^[132]：

$$ISE = \int_0^t (r(t) - y(t))^2 dt \quad (5-5)$$

式中， ISE 为积分平方误差； $r(t)$ 为控制目标； $y(t)$ 为系统的输出。

由于温度控制系统具有滞后性和较大的惯性，在控制过程中系统是不稳定的。传统的 PID 控制可以通过调整 PID 的三个参数实现对控制系统的最优控制，但实验过程更加复杂，实时控制参数并不容易，无法满足对时变和非线性系统的精确控制。因此，本文采用模糊 PID 控制改进了 PID 控制器，如图 5-8 所示。系统误差（ e ）和误差变化率（ ec ）被用作输入，实时校正 PID 控制的三个参数 ΔK_p （校正比例增益）、 ΔK_i （校正积分增益）和 ΔK_d （校正微分增益）。从而获得了 PID 的最优控制参数。

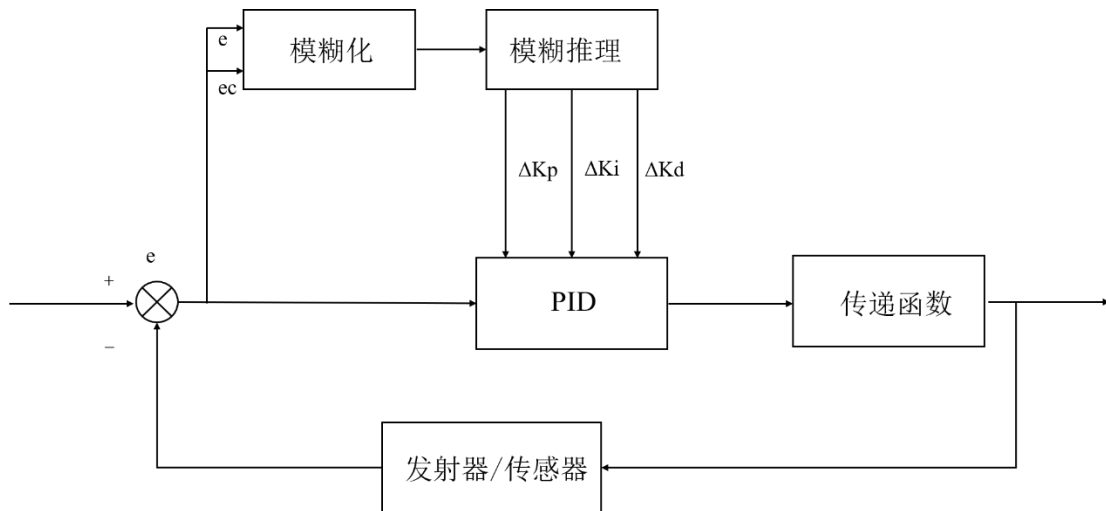


图 5-8 模糊 PID 控制器的结构

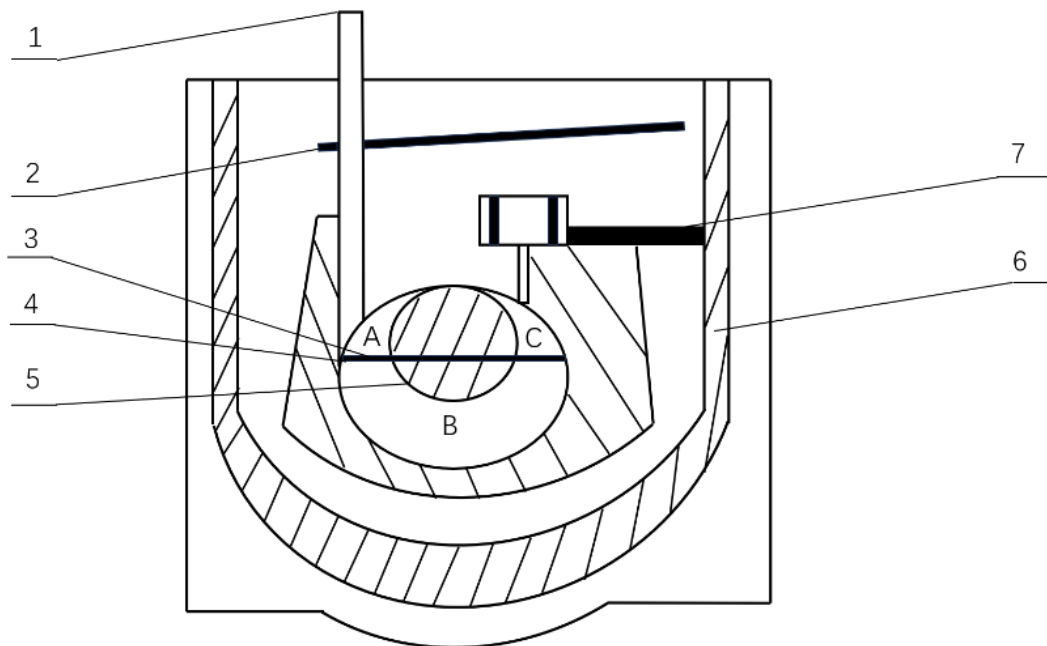
5.4 微波真空干燥机降噪处理

在微波真空干燥机中，降噪处理的目的是减少或消除设备运行时产生的噪音。可以通过改进设备的机械结构设计来减少机械运动过程中的震动和噪音产生。采用减震垫、减振脚等措施来减少振动传递，从而降低噪音水平。选择降噪效果较好的材料来构建设备的外壳和部件。例如，使用吸音材料或隔音材料来包裹设备，减少噪音的传播和反射。在设备周围设置隔音罩或隔音板，以隔离噪音源和减少噪音传播。这些罩和板采用吸音材料构建，吸收和消散噪音能量。通过调整设备的布置和安装位置，增加设备与人员活动区域之间的距离，减少噪音对人员的影响。可以通过合理规划工厂或实验室的空间布局，将噪音源与敏感区域隔离开。采取措施减少或隔离设备运行时产生的振动，从而减少噪音的产生。这可以包括使用减震装置、弹性联接件、减振垫等。在设备内部或外部安装吸音材料，如泡沫材料、吸音板等，以吸收噪音并减少反射。定期清洁和更换吸音材料，确保其吸音性能的有效性。

降噪处理可以减少工作过程中产生的噪音，提供更安静的工作环境。这利于操作员抵抗噪音对工作效率和舒适性的干扰，提高工作效率和工作质量。高噪音环境对人的听力健康有潜在的危害，通过降低微波真空干燥机产生的噪音水平，可以减少对操作员和其他工作人员听力的损害风险，提供更安全的工作环境。噪音通常是设备运行中某些问题的表现，如机械振动、松动零件等。通过降噪处理，

可以识别和解决这些问题，提升微波真空干燥机的稳定性、可靠性和寿命。噪音可能对微波真空干燥机的工作过程产生干扰，对产品质量产生影响。降噪处理可以减少外部干扰和机器内部的振动，确保干燥过程的稳定性和一致性，提高产品的质量和一致性。

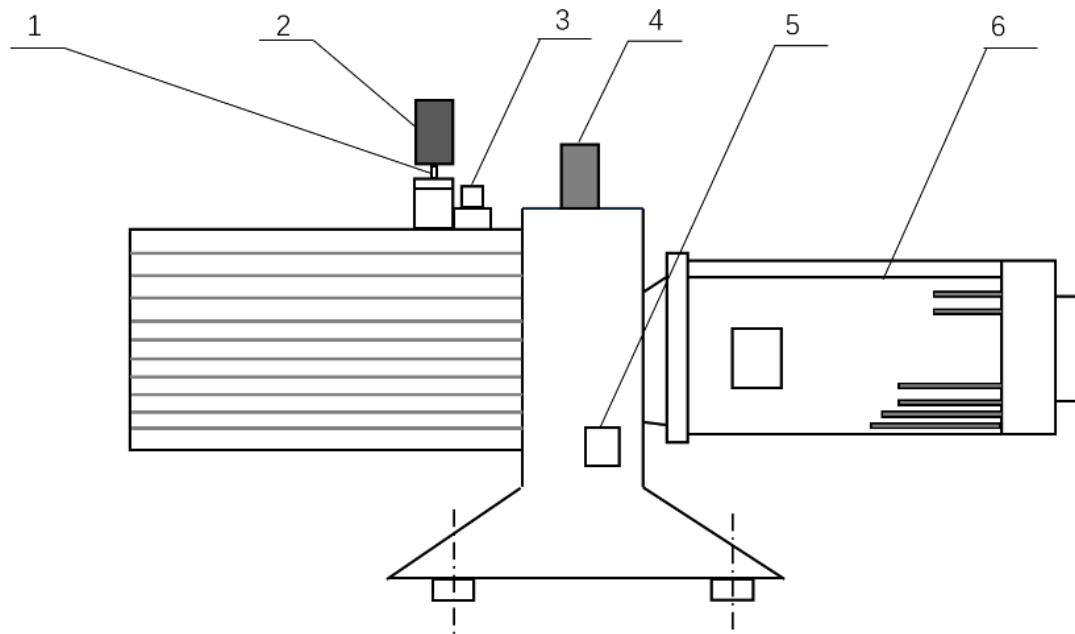
如图 5-9 所示，旋片泵的工作原理及结构特性决定了其振动和噪声是不可避免的，有必要对其振动噪声进行研究和控制^[110]。



1、进气管，2、挡油板，3、旋片弹簧，4、旋片，5、转子，6、油箱，7、排气阀片

图 5-9 真空泵内部结构

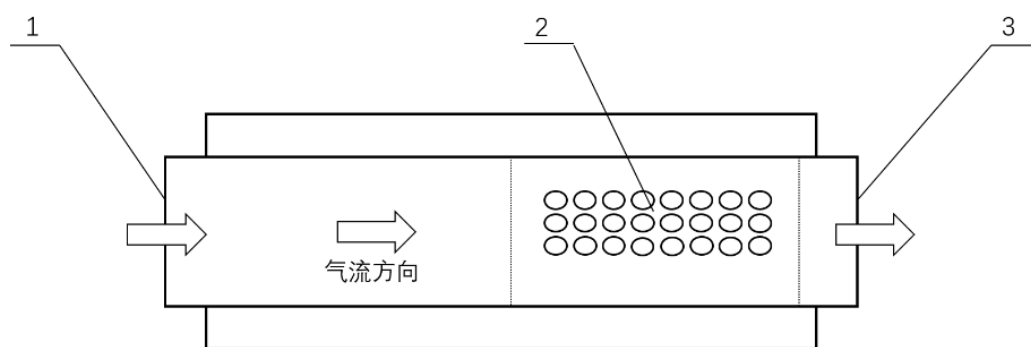
为了更好的对微波真空干燥机进行降噪处理，本装置在原有真空泵内部的旋片弹簧上包涂橡胶。橡胶这类阻尼材料可以较好的降低真空泵的噪声，提高系统的动态稳定性。如图 5-10 所示，装置在真空泵排气口处附加了一个阻尼消声器。通过使用附加阻尼消振器，可以增加接触面的阻尼效果，减少振动流动干燥机在启动和停车时通过共振区域时产生的振幅，并缩短通过时间，以减少噪音水平。阻尼消声器由金属或复合材料制成，表面涂有阻尼材料。声波进入阻尼板后，被阻尼材料吸收和转化为热能，从而减少噪音的传播和反射。



1、排气口，2、消声器，3、进气管，4、手柄，5、电源插口，6、电机

图 5-10 真空泵外部结构

扩张室消声器和内插管式消声器都存在截面突变的问题，这会导致局部阻力的产生，严重影响其空气动力性能。为了改善空气动力性能，可以通过增加穿孔管的穿孔率，将内插管连接起来，这样可以显著改善空气动力性能，对消声器的频率消声性能影响不大。图 5-11 展示了改善空气动力性能后的单根扩张室消声器的内部结构。实际应用中，消声器是竖直安装的，将上下插管连接起来可以增强插管的连接刚度。



1、消声器顶盖，2、消声室，3、消声器排气口

图 5-11 消声室结构

多个扩张室的设计可以增加声波的传播路径和反射面积，从而增加噪音的吸收和散射。每个扩张室都能够对特定频率范围的声波进行消声处理，通过串联或并联多个扩张室，可以提高消声器的降噪效果。不同大小和形状的扩张室对不同

频率的声波有不同的消声效果。通过多个扩张室的组合，可以扩展消声器的工作频率范围，从而更好地适应不同频率的噪音源。单个扩张室的消声效果通常在特定频率范围内较为显著，而在其他频率上可能效果较差。通过多个扩张室的组合，可以平滑声音衰减曲线，使得消声器在更广泛的频率范围内都能够提供较好的降噪效果。多个扩张室的设计通常可以在有限的空间内实现较高的消声效果。相比于其他消声器结构，如吸音棉或隔音板，多个扩张室可以更充分地利用空间，并在其中安排多个消声单元，提供更高的降噪能力。多个扩张室的设计提供了一定的可调性和灵活性，可以根据具体需求进行调整和优化。通过增加或减少扩张室的数量、调整室内的尺寸和形状，可以对消声器的性能进行调节，以满足不同的噪音控制要求。

5.5 设计创新点

对于很多微波真空干燥装置而言，其干燥实验过程中的误差、物料受热不均匀和实验噪音过大一直是不可避免的问题。干燥实验过程的实验误差由系统误差、随机误差和粗大误差组成。实验过程中测取物料质量，就不得不将物料取出放入天平去测其质量，但在此过程中物料的其他因素，如温度就不可避免的发生变化；由于真空度过低时，机器干燥时会产生较大噪音，真空度过高易发生击穿放电，常用的微波真空干燥真空度也伴随着很大的噪音。因此，能有效的改进测量方法，降低误差、使干燥受热均匀和降低实验过程中的噪音是非常有意义的。

(1) 本干燥装置将物料室设为双层结构。外层设为不锈钢组成，防止微波泄露；内层由聚四氟乙烯组成，微波可以顺利的通过。将托盘划分为 6 个部分，均匀分布在以正六边形 6 个拐角为落点的位置上。将托盘底部设计成齿轮结构，把连杆的一端设为齿条状，与齿轮配合，另一端与提供动力的凸轮配合，配合后的托盘可以形成往复的顺时针、逆时针旋转。托盘上放置的小麦因齿轮周期的顺时针和逆时针转动而有规律的转动，这种可变转动下形成的摩擦力作用下的小麦可以均匀分布在托盘上，而不会出现堆积现象。小麦也因托盘的相反转动而做相反的相对运动，进而保证物料的各个面都受热均匀，减少受局部过热和干燥不均匀的影响。

(2) 在托盘下方添加耐高温称重传感器，耐高温称重传感器下方连接电子

秤数据无线发射器，在控制室中添加连接好的无线数传器和电子秤数据无线接收器，托盘上的物料质量会被传输到干燥箱外部的显示面板上，记录面板上的物料质量便可继续实验，此过程时间短，且对干燥实验没有过多的干扰。且通过前后物料的质量差便可测出物料这段时间内的含水率变化。在称重装置的托盘中装备耐高温的称重传感器，保证了在正常实验条件下仪器的精度和耐久度。

(3) 在真空泵内部的旋片弹簧上包涂橡胶，橡胶这类阻尼材料可以较好的降低真空泵的噪声，提高系统的动态稳定性；在真空泵排气口处附加了一个阻尼消声器，通过使用附加阻尼消振器，可以增加接触面的阻尼效果，减少干燥机在启动和停车时通过共振区域时产生的振幅，并缩短通过时间，以降低噪音水平。

5.6 本章小结

本章针对前文小麦干燥过程中的不均匀现象，并结合在使用微波真空干燥机过程中所遇到的机器噪音大、物料温度测量难、仪器能量利用率低等问题，实现了对微波真空干燥装置的设计与优化。设计优化主要体现在物料托盘结构设计、安装称重托盘、降噪等处理，提高物料在干燥过程中的热传导效率，使得微波能量更加均匀地传递到物料中，提高干燥效率；精确控制物料的干燥时间和干燥程度，避免过度干燥或干燥不足，从而提高产品质量；通过降噪处理，可以减少噪音对工作环境和操作人员的影响，提升工作舒适度和安全性。这些优化措施可以提高微波真空干燥装置的干燥效率、产品质量，并改善工作环境和操作人员的体验。

第 6 章 结论

6.1 总结

本研究以小麦为对象,探究在微波真空干燥过程中满足工业干燥要求的最佳工艺参数,同时保持小麦品质。研究目的是为处理刚收获小麦等农作物提供干燥方案,为后续微波真空干燥装置的设计提供优化思路。

主要研究内容和结论如下:

(1) 本研究以电磁波传播、热量交换、水分迁移等理论为基础,探究微波真空干燥过程中含水率、有效水分扩散系数、爆腰率等参数指标小麦微波真空干燥特性的影响。通过对实验所得的数据进行拟合分析,发现 0.2W/g 的微波密度对微波真空干燥小麦最为合适。 50°C - 70°C 对应的有效水分扩散系数范围为 15.92×10^{-11} - $25.23 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$,对应的活化能为 276.64 kJ/mol 。通过对有效水分扩散系数和活化能的研究,寻求微波真空干燥过程中能量需求和效率之间的平衡。

(2) 针对微波真空干燥小麦时,易发生内部应力过大产生应力裂纹而影响品质的问题,本文以干燥应力和爆腰率为出发点,采用质构分析仪进行小麦的压缩试验,并结合广义 Maxwell 模型建立了小麦的应力模型,得出裂纹增量最大的温度范围位于 50°C - 80°C 之间。在这个温度范围内,小麦颗粒的裂纹数量会显著增加,并导致其承载能力大幅度下降。这种下降的承载能力会使小麦颗粒更容易发生严重的破裂。最终得出最佳干燥工艺:将常温下的小麦以 $2.86^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温度上升速率干燥至 40°C ,温度到达 40°C 后恒温干燥 7 分钟,最后将温度上升速率调整到 $1.63^{\circ}\text{C}/\text{min}$,温度到达 61.3°C 后结束干燥的工艺。此工艺不仅降低了干燥小麦 30%的爆腰率,还可以预测爆腰小麦的裂纹数量,为微波真空干燥小麦工艺提供了理论和实验基础。

(3) 针对小麦干燥过程中的不均匀现象,并结合在使用微波真空干燥机过程中所遇到的机器噪音大、物料温度测量难、仪器能量利用率低等问题,完成小麦微波真空干燥特性实验装置的设计与优化。包括物料托盘结构设计、安装称重托盘、降噪处理等。采用六角分布的托盘组放置物料,配合凸轮机构和齿轮机构

实现物料在干燥过程中均匀分布,且受热均匀;干燥托盘与耐高温称重装置结合,使干燥过程中物料的质量实时显示,可有效减少操作步骤和能量损耗;真空泵内部包涂橡胶,排气口处附加阻尼消声器,降低干燥机经过共振区的振幅,从而达到降低噪声的目的。

6.2 展望

微波真空干燥作为一种利用微波能量和真空环境进行物质干燥的技术,对微波内热源的处理要求较高。在本文中未对物料干燥过程中的热量进行回收利用,及微波真空干燥的能耗进行具体深入的分析研究。此外,本文因无法测试工业上的大型干燥装置,所以对于微波真空干燥装置的设计更多的是在实验室设备上。

在本研究中,对于小麦微波真空干燥特性的影响,进行了工艺参数的分析。然而,工艺参数并不宽泛,为了简化过程,实验设计时需要小麦进行预处理,保证小麦实验前含水率均匀。因此,本研究在广泛性和普适性方面存在一定缺陷,仍需要更多准确的实验方案,以保证实验数据的适用性。

结合研究中存在的不足,希望对干燥过程中的热量进行回收利用,将物料在干燥前的预处理和干燥装置的预热结合,降低整个干燥过程的能耗。同时,针对实验装置的优化,可以采用更专业化和自动化的手段,以提升实验室内小麦干燥实验的精确性。这些改进措施对于提高小麦微波真空干燥效率和品质,以及对实现小麦微波真空干燥设备的自动化生产具有显著的借鉴价值。

参考文献

- [1] Shewry P R. Wheat[J]. Journal of experimental botany, 2009, 60(6): 1537-1553.
- [2] 孙继君. 谷物干燥典型特性分析[J]. 农机使用与维修, 2023, (04): 89-92.
- [3] 王慧, 张从合, 汪和廷等. 小麦花粉的低温和超低温保存研究[J]. 中国种业, 2022, (10): 66-69.
- [4] 郭翎菲. 新收获小麦干燥条件的选择[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(04): 15-18.
- [5] VM P, MV L, VM Y, et al. Research on the rational regimes of wheat seeds drying[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2018, 56(3).
- [6] Su Y, Zhang M, Mujumdar A S. Recent developments in smart drying technology[J]. Drying Technology, 2015, 33(3): 260-276.
- [7] 郭翎菲. 新收获小麦干燥条件的选择[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(04): 15-18.
- [8] 马强, 黄宗玲, 李伯群等. 自然干燥对糯小麦籽粒透明度和角质率变化的影响[J]. 南方农业, 2019, 13(19): 1-6.
- [9] Jiang M, Wu P, Liu H, et al. Interaction of swing temperature and alternating airflow with vibration on drying uniformity in deep-bed wheat drying[J]. Drying technology, 2020, 38(13): 1749-1759.
- [10] 王金炫, 王小平. 小麦品质和储存时间对面筋吸水量的影响[J]. 现代面粉工业, 2018, 32(03): 22-25.
- [11] Yanfei G, Zhang Y, Zhang B, et al. The moisture migration behavior of wheat starch/gluten blended powders and extrudates[J]. Drying Technology, 2021, 39(10): 1401-1411.
- [12] Cheng S, Zhang T, Yao L, et al. Use of low-field-NMR and MRI to characterize water mobility and distribution in pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during drying process[J]. Drying Technology, 2018, 36(5): 630-636.
- [13] Burdo O, Bezbakh I, Shyshov S, et al. Research of wheat drying in a microwave and combined filter-microwave dryer[J]. EUREKA: Life Sciences, 2019 (5): 70-78.

- [14] 刘鹤, 焦俊华, 田友, 等. 杏鲍菇热风干燥中热质传递的实验及模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(04): 1074-1081.
- [15] Huang L L, Lian M M, Duan X, et al. Studies on the quality and moisture distribution of kiwifruit dried by freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(1): e13581.
- [16] Huang J, Xu G, Liang Y, et al. Improving coal permeability using microwave heating technology—A review[J]. Fuel, 2020, 266: 117022.
- [17] Zielinska M, Ropelewska E, Xiao H W, et al. Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave-assisted drying of food products: Quality properties[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(13): 2212-2264.
- [18] Xue L, Gao R, Shen L, et al. Dependence of degradation of anthocyanins on non-uniformity of microwave heating in blueberry puree[J]. Food and Bioproducts Processing, 2023, 139: 129-143.
- [19] Ando Y, Nei D. Comparison of potato void structures dried by air-drying, freeze-drying, and microwave-vacuum-drying, and the physical properties of powders after grinding[J]. Food and Bioprocess Technology, 2023, 16(2): 447-458.
- [20] Liu H, Liu H, Liu H, et al. Microwave drying characteristics and drying quality analysis of corn in China[J]. Processes, 2021, 9(9): 1511.
- [21] 王新智, 王天池, 吴玉柱, 等. 微波间歇干燥对玉米籽粒中淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(02): 179-190.
- [22] 姜龙, 李丹丹, 王文亮等. 生姜干燥技术研究进展[J]. 中国果菜, 2024, 44(02): 41-46.
- [23] 王泽伦, 宋怀玉, 仲际帆, 等. 微波对糙米品质特性的影响研究进展[J]. 中国稻米, 2024, 30(01): 69-74+83.
- [24] Zielinska M, Zielinska D, Markowski M. The effect of microwave-vacuum pretreatment on the drying kinetics, color and the content of bioactive compounds in osmo-microwave-vacuum dried cranberries (*Vaccinium macrocarpon*)[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11: 585-602.

-
- [25] Cârlescu P M, Băetu M M, Roșca R, et al. Studies on the physical changes in corn seeds during hybrid drying (convection and microwave) [J]. Agriculture, 2023, 13(3): 519.
- [26] Mouhoubi K, Boulekbache-Makhlouf L, Mehaba W, et al. Convective and microwave drying of coriander leaves: Kinetics characteristics and modeling, phenolic contents, antioxidant activity, and principal component analysis[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(1): e13932.
- [27] Figiel A, Michalska A. Overall quality of fruits and vegetables products affected by the drying processes with the assistance of vacuum-microwaves[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 18(1): 71.
- [28] Therdthai N, Zhou W B, Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha Cordifolia*opizes Fresen) [J]. Journal of Food Engineering 2009, 91(3): 482-489.
- [29] Drouzas A E, Schubert H Microwave application in vacuum drying of fruits[J]. Journal of Food Engineering 1996, 28(2): 203-209.
- [30] 张乐, 李鹏, 王赵改, 等. 板栗片微波真空干燥的动力学模型及品质分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(04): 235-243.
- [31] 刘德成, 郑霞, 肖红伟, 等. 红枣干燥技术与装备研究进展[J]. 农机化研究, 2022, 44(01): 8-18.
- [32] Ren Y, Lei T, Sun D W. In-situ indirect measurements of real-time moisture contents during microwave vacuum drying of beef and carrot slices using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135943.
- [33] Cheng X, Wang S, Iqbal M S, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on the drying kinetics, water state, and physicochemical properties of microwave vacuum-dried potato slices[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 106557.
- [34] Kusuma H S, Sembiring L I, Aisahasnati S. Microwave-assisted drying of *Cymbogon nardus* leaves: Kinetics, moisture diffusivity, energy, and emission study[J]. Journal of Stored Products Research, 2023, 102: 102130.

-
- [35] González-Pérez J E, Romo-Hernández A, López-Malo A, et al. Evaluation of osmodehydration and vacuum-assisted osmodehydration as pre-treatments during fruit drying process: The effect on drying rates, effective water diffusion and changes in product quality[J]. *Journal of Engineering Research*, 2023, 11(4): 275-282.
- [36] Laskar A A, Ahmed M, Vo D V N, et al. Mathematical modeling and regression analysis using MATLAB for optimization of microwave drying efficiency of banana[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 46: 102157.
- [37] 宋玲玲. 微波干燥过程中多阶段不同功率密度对黄豆品质的影响[J]. *机电信息*, 2017, (20): 20-27.
- [38] 王红提, 郭康权, 李鹏, 等. 疏解棉秆的微波干燥动力学及能耗分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 294-301.
- [39] Horuz E, Bozkurt H, Karatas H, et al. Microwave-conventional drying characteristics of red pepper: modeling, temperature profile, diffusivity and activation energy[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(2): 425-437.
- [40] Liu Y, Sun W, Li B, et al. Dehydration characteristics and evolution of physicochemical properties of *Platycodon grandiflorum* (Jacq. A. DC.) roots (PGR) during pulse-spouted microwave vacuum drying (PSMVD)[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 177: 114449.
- [41] Dai J W, Fu Q Q, Li M, et al. Drying characteristics and quality optimization of papaya crisp slices based on microwave vacuum drying[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(5): e16506.
- [42] Li L, Ren X, Chen J, et al. Changes and relationships of viscoelastic and physical properties of Chinese yam during a novel multiphase microwave drying process[J]. *Lwt*, 2022, 168: 113969.
- [43] Zeng T, Liu B, Bi L, et al. Effects of different drying methods on quality and water distribution of *Lycium barbarum*[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(12): e14482.

-
- [44] 姜大龙, 王文杰, 王善钰, 等. 红外联合热风干燥白萝卜片的耦合建模与热质传递分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(01): 314-323.
 - [45] 袁越锦, 李沈沈, 徐英英, 等. 基于变异系数法评价不同湿热处理对大豆干燥品质的影响[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2023, 41(6).
 - [46] 杨颖頔, 周显青, 韩佳静. 微波对粳糯米理化性质, 蒸煮特性及食用品质的影响[J]. Journal of Henan University of Technology Natural Science Edition, 2024, 45(1).
 - [47] 林柏泉, 刘彦池, 曹轩. 微波辐射作用下煤体热效应的特性分析[J]. 西安科技大学学报, 2023, 43(02): 236-246.
 - [48] 吕黄飞. 圆竹材微波真空干燥特性的研究[D]. 中国林业科学研究院, 2018.
 - [49] 刘雪强. 谷物干燥过程复杂性分析及其控制[D]. 吉林大学, 2006.
 - [50] Ando Y, Nei D. Effects of different pre-freezing methods and pressure levels on the pore structure and mechanical properties of microwave-vacuum dried apple[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 369: 111944.
 - [51] 陈煜青, 王蕾, 赵立山, 等. 等离子体鞘套低频通信电磁波透射率与辐照微波场强关系仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(08): 160-166.
 - [52] Wu T, Duan Z, Wang C. Effects of microwave drying on color change, phenolic substance content and phenolase activity of different parts of persimmon slices[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(1): 357-369.
 - [53] Zang Z, Huang X, He C, et al. Improving drying characteristics and physicochemical quality of Angelica sinensis by novel tray rotation microwave vacuum drying[J]. Foods, 2023, 12(6): 1202.
 - [54] 尚小标, 李广超, 白永珍等. 微波冶金反应器加热效率与均匀性优化[J]. 微波学报, 2023, 39(03): 89-96.
 - [55] Zhang D, Huang D, Zhang X, et al. Drying performance and energy consumption of Camellia oleifera seeds under microwave-vacuum drying[J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32(7): 969-977.
 - [56] Tagnamas Z, Idlimam A, Lamharrar A. Effect of microwave pretreatment on truffle solar drying from an energetic perspective[J]. Food Frontiers, 2024.

- [57] 唐海刚, 田长卿. 微波技术原理及应用浅析[J]. 中国科技投资, 2013, (Z1): 155.
- [58] 王洪广, 翟永贵, 李记肖, 等. 基于频域电磁场的微波器件微放电阈值快速粒子模拟[J]. 物理学报, 2016, 65(23): 281-287.
- [59] Nadi F, Rahimi G H, Younsi R, et al. Numerical simulation of vacuum drying by Luikov's equations[J]. Drying Technology, 2012, 30(2): 197-206.
- [60] Li Y, Qi Y, Wu Z, et al. Comparative study of microwave-vacuum and vacuum drying on the drying characteristics, dissolution, physicochemical properties, and antioxidant capacity of Scutellaria extract powder[J]. Powder Technology, 2017, 317: 430-437.
- [61] 帅炜奎, 王瑞芳, 高亚平, 等. 基于电场分布的单波导矩形微波喷动床结构设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(04): 89-93+157.
- [62] He X, Lin R, Cheng S, et al. Effects of microwave vacuum drying on the moisture migration, microstructure, and rehydration of sea cucumber[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(6): 2499-2512.
- [63] Pu Y Y, Sun D W. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution[J]. Biosystems Engineering, 2017, 156: 108-119.
- [64] Puttalingappa Y J, Natarajan V, Varghese T, et al. Effect of microwave - assisted vacuum drying on the drying kinetics and quality parameters of Moringa oleifera leaves[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(8): e14054.
- [65] Durairaj S, Chaudhary A, Basak T. Efficient microwave heating of discrete food samples layered with ceramic composites[J]. Journal of food engineering, 2009, 95(1): 62-75.
- [66] Kappe C O, Dallinger D. Controlled microwave heating in modern organic synthesis: highlights from the 2004–2008 literature[J]. Molecular diversity, 2009, 13: 71-193.
- [67] 朱德泉, 王继先, 朱德文, 等. 小麦微波干燥特性及其对品质的影响[J]. 农业工程学报, 2006(04): 182-185.

- [68] 魏孟辉, 袁建, 何荣, 等. 大豆主要品质指标对其力学特性的影响[J]. 粮食储藏, 2017, 46(01): 19-24.
- [69] 吴中华, 刘兵, 王丹丹, 等. 大豆干燥缓苏特性与裂纹产生规律研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(05): 368-374.
- [70] 任广跃, 张伟, 陈曦, 等. 缓苏在粮食干燥中的研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 279-285.
- [71] 吴坚, 张凌野. 基于 COMSOL 的一种保温箱建模仿真与温度场分析[J]. 科技通报, 2018, 34(08): 84-89+94.
- [72] Radoiu M. Microwave drying process scale-up[J]. Chemical Engineering and Processing, 2020, 155:108088.
- [73] Olatunde G A, Atungulu G G. Milling behavior and microstructure of rice dried using microwave set at 915 MHz frequency[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 80:167-173.
- [74] Zhang F J, Wang X, Xin L D, et al. Moisture diffusion modelling and effect of microwave vacuum drying on drying kinetics and quality of yam[J]. International Food Research Journal, 2023, 30(3): 626-639.
- [75] Dumpler J, Moraru C I. Modeling the drying kinetics of microwave vacuum drying of concentrated skim milk: correlation of dielectric properties, drying stages, and specific energy demand at pilot scale[J]. Drying Technology, 2023, 41(1): 17-33.
- [76] Zhou Y, Liu Y, Li Q, et al. Drying kinetics and heat mass transfer characteristics of thin layer pineapple during microwave vacuum drying[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2023, 23: 1165–1178.
- [77] Zang Z, Huang X, He C, et al. Improving drying characteristics and physicochemical quality of *Angelica sinensis* by novel tray rotation microwave vacuum drying[J]. Foods, 2023, 12(6): 1202.
- [78] Liu Y, Zhou X, Pan X, et al. Analysis of drying characteristics and quality of Star Anise (*Illicium verum*) using microwave vacuum and hot air combined drying[J]. Journal of Biotech Research, 2023, 15: 386-396.

-
- [79] Man X, Li L, Fan X, et al. Evolution and Modelling of the Moisture Diffusion in Walnuts during the Combination of Hot Air and Microwave–Vacuum Drying[J]. Agriculture, 2024, 14(2): 190.
- [80] Murugesan P, Moses J A, Anandharamakrishnan C. Low-temperature drying technologies[M]//Non-thermal technologies for the food industry. CRC Press, 2024: 267-289.
- [81] Musielak G, Mieszczakowska-Frać M, Mierzwa D. Convective drying of apple enhanced with microwaves and ultrasound—process kinetics, energy consumption, and product quality approach[J]. Applied Sciences, 2024, 14(3): 994.
- [82] Lei Y, Chen J, Zhang Z, et al. Influence of microwave vacuum drying on the effective moisture diffusivity of seedless white grapes[J]. Food science and technology, 2020, 42: e37020.
- [83] Song C, Ma X, Li Z, et al. Mass transfer during osmotic dehydration and its effect on anthocyanin retention of microwave vacuum - dried blackberries[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(1): 102-109.
- [84] 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.
- [85] Guan H, Wu Y, Liu X. Effect of microwave precooking and freeze-drying on the quality of the germinated brown rice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2023, 2023: 3610644.
- [86] Sun T, Wang J, Ling F, et al. Hot-air drying of corn kernels: Drying kinetics and quality improvement[J]. Cereal Chemistry, 2023, 100(4): 1015-1025.
- [87] Ren L, Zhang K, Wang F, et al. Microwave heating of coal slime based on multi-physics field simulations: Regulating waveguide port size and sample radius to improve microwave utilization efficiency[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 470: 143975.

- [88] Shen L, Zhu Y, Liu C, et al. Modelling of moving drying process and analysis of drying characteristics for germinated brown rice under continuous microwave drying[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 195: 64-88.
- [89] 满余, 童军杰. 基于红薯片多孔介质的间歇微波干燥数值分析[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(04): 157-164.
- [90] 刘焯. 高水分小麦籽粒热风干燥特性及湿热传递模拟研究[D]. 河南工业大学, 2023.
- [91] Çengel Y. A. Heat and mass transfer: A practical approach[M]. Singapore: McGraw Hill, 2006.
- [92] 梁昌祥, 覃梦雨, 梁明华, 等. 微波真空干燥杏鲍菇的工艺优化及能耗分析[J]. *现代食品*, 2021, (17): 78-82.
- [93] 韩清华, 李树君, 马季威, 等. 微波真空干燥膨化苹果片的能耗与品质分析[J]. *农业机械学报*, 2008, (01): 74-77.
- [94] 丁睿. 马铃薯微波真空干燥动力学及设备能耗的实验研究[D]. 哈尔滨商业大学, 2017.
- [95] Alibas I. Mathematical modeling of microwave dried celery leaves and determination of the effective moisture diffusivities and activation energy[J]. *Food Science & Technology*, 2014, 34: 394-401.
- [96] 王鹤, 慕松, 吴俊, 等. 基于 Weibull 分布函数的枸杞微波干燥过程模拟及应用[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(01): 141-147.
- [97] 付毕安, 陈梅倩, 黄友旺. 添加剂对褐煤薄层微波干燥特性影响[J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(05): 946-951.
- [98] Abano E E. 热风干燥、真空微波干燥和红外干燥对番茄片干燥动力学和品质的影响[D]. 江苏大学, 2013.
- [99] 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.
- [100] 陈先冠, 冯利平, 白慧卿, 等. 基于小麦模型算法集成平台的三种水分胁迫算法比较[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 47-57.

- [101] 吴威, 祖广鹏, 陈桂云, 等. 利用光谱趋势参数快速判定小麦粉 DON 等级的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(05): 1565-1568.
- [102] Qiao Y, Wang X, Xu H, et al. Numerical analysis for viscoelastic fluid flow with distributed/variable order time fractional Maxwell constitutive models[J]. Applied Mathematics and Mechanics(English Edition), 2021, 42(12): 1771-1786.
- [103] 帅词俊, 段吉安, 王炯. 数值分析中粘弹材料剪切模量松弛函数的拟合方法[J]. 机械强度, 2005, (04): 522-525.
- [104] Murata K, Utsumi M, Hirata T, et al. Effect of thermal modification on the stress relaxation behavior and microstructure of the cell wall[J]. Journal of Wood Science, 2023, 69(1): 25.
- [105] He Y, Li H, Du J. Fitting methods based on custom neural network for relaxation modulus of viscoelastic materials[J]. International Journal of Performability Engineering, 2019, 15(1): 107-115.
- [106] 陈刚, 陈爱娣, 杨杏玲. 再谈量纲分析法[J]. 物理通报, 2000(12): 6-8.
- [107] Yamaguchi S, Wakabayashi K, Yamazawa S. Change of cracked rice percentage and internal stress of brown rice kernels during drying operation[M]//Drying'85. Springer, Berlin, Heidelberg, 1985: 445-452.
- [108] Shen L, Gao M, Zhu Y, et al. Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 70: 102673.
- [109] Muthukumarappan K, Jindal V K, Gunasekaran S. Volumetric changes in rice kernels during desorption and adsorption[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(1): 235-241.
- [110] 华云龙, 傅志一, 秦太验, 等. 关于谷物湿膨胀系数的讨论[J]. 农业工程学报, 1998(02): 209-214.
- [111] Vera C M, Mendoza M G V. Concentration-dependent moisture diffusion coefficient estimation in peas drying considering shrinkage: An observer approach[J]. Biosystems Engineering, 2022, 218: 256-273.

- [112] Li H, Li X, Fu J, et al. Experimental study on compressive behavior and failure characteristics of imitation steel fiber concrete under uniaxial load[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 399: 132599.
- [113] Wei H, Li J, Hu B, et al. Influence of temperature on deformation failure and acoustic emission characterisation of asphalt concrete under uniaxial compression[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, 24(2): 2038380.
- [114] 吴中华, 王珊珊, 董晓林, 等. 不同温度及含水率稻米籽粒加工过程破裂载荷分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(02): 278-283.
- [115] 李栋, 毛志怀. 稻谷应力裂纹的分形研究[J]. *中国农业大学学报*, 2003(02): 11-14.
- [116] 康艳, 金诚谦, 陈艳普, 等. 谷物籽粒损伤研究现状[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(07): 94-104.
- [117] Zhu X, Chi R, Ma Y. Effects of corn varieties and moisture content on mechanical properties of corn[J]. *Agronomy*, 2023, 13(2): 545.
- [118] Riley D, Einav I, Guillard F. A constitutive model for porous media with recurring stress drops: From snow to foams and cereals[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 262: 112044.
- [119] 张为民, 康平, 卢允庄. 食品真空冷冻干燥设备中网状托盘设计与研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(06): 453-456.
- [120] Ononogbo C, Nwifo O C, Okoronkwo C A, et al. Equipment sizing and method for the application of exhaust gas waste heat to food crops drying using a hot air tray dryer[J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2020, 13(5): 502-518.
- [121] 于啸, 张中平, 解佩勋, 等. 连续式微波干燥机智能控温系统的研制[J]. *自动化技术与应用*, 2021, 40(11): 21-26.
- [122] Omofoyewa M G, Popoola L T, Giwa A. Optimization of drying parameters of moringa seeds in a tray dryer using Box-behnken technique of RSM[J]. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2017, 32: 86-99.

- [123] Gupta P M, Das A S, Barai R C, et al. Design and construction of solar dryer for drying agricultural products[J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017, 4(3): 1946.
- [124] Hossain M Z, Hossain M A, Awal M A, et al. Design and development of solar dryer for chilli drying[J]. International Journal of Research, 2015, 2(1): 63-78.
- [125] Araya S S, Zhou F, Liso V, et al. A comprehensive review of PBI-based high temperature PEM fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(46): 21310-21344.
- [126] 方彬, 肖兴华. 电容式高温称重传感器应用的探讨[J]. 衡器, 2009, 38(06): 21-23.
- [127] 朱秋英, 肖兴华. 电容式高温称重传感器的应用[J]. 中国仪器仪表, 2009, (01): 87-89.
- [128] Atalay A, Sanchez V, Atalay O, et al. Batch fabrication of customizable silicone - textile composite capacitive strain sensors for human motion tracking[J]. Advanced Materials Technologies, 2017, 2(9): 1700136.
- [129] Hwang J, Kim Y, Yang H, et al. Fabrication of hierarchically porous structured PDMS composites and their application as a flexible capacitive pressure sensor[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 211: 108607.
- [130] Wei S, Qin W, Han L, et al. The research on compensation algorithm of infrared temperature measurement based on intelligent sensors[J]. Cluster Computing, 2019, 22: 6091-6100.
- [131] Von Keudell A, Hecimovic A, Maszl C. Control of high power pulsed magnetron discharge by monitoring the current voltage characteristics[J]. Contributions to Plasma Physics, 2016, 56(10): 918-926.
- [132] Arun N K, Mohan B M. Modeling, stability analysis and computational aspects of nonlinear fuzzy PID controllers[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 31(3): 1807-1818.

攻读硕士期间获得的科研成果

专利情况:

[1] 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[P]. 实用新型: ZL202322048332.4, 2024-04-05.

[2] 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.

[3] 刘家豪, 孙铜生, 王凯, 郑乐. 一种微波真空干燥装置[P]. 实用新型: ZL202321900213.0, 2024-02-23.

[4] 孙铜生, 刘家豪, 王凯, 郑乐, 一种新型微波真空干燥箱[P], 发明专利申请, 申请号: CN202310886602.0, 2023.07.19.

[5] 孙铜生, 杨震, 曹冉, 王静平, 王凯, 刘家豪. 一种谷物微波干燥方法及装置[P], 发明专利申请, 申请号: CN202211327428.8, 2022.10.27.

论文情况:

[1] Sun Tongsheng, Cao Ran, **Wang Kai**, Liu Jiahao. Mechanism of crack formation in corn during microwave drying process[J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(3): 563-576.

获奖情况:

[1] 安徽工程大学 2021 年度一等学业奖学金.

[2] 安徽工程大学 2022 年度二等学业奖学金.

[3] 安徽工程大学 2023 年度二等学业奖学金.

[4] 第十一届芜湖大学生专利创新创业大赛二等奖.

[5] 互联网+大学生创新创业大赛研究生创意组优秀

致谢

时光飞逝，当在键盘上敲下“致谢”两个字时，意味着的三年硕士生涯终于要走到终点了，也应该是最后以学生这个身份完成任务了。有感慨，也有一阵恍惚，时间未免过得也太快了……

回想三年的硕士生涯，有喜有悲，如今能够走到今天，要感谢的导师孙铜生教授，孙老师本身学术造诣极高，研究范围广泛，在这三年，孙老师为的诸多研究提供许多建设性的意见与开拓性的思路。同时孙老师对课题组日常生活也时常关心，为提供了许多帮助，是值得一生学习的人。感谢母校安徽工程大学多年的培养，在这里我如同在家一样温暖。感谢我的父母对多年的养育与读研的支持，是最坚实的后盾。感谢胡紫微，在漫漫研路上的同行，在学业上的帮助，在生活中的陪伴，在精神上的支撑。感谢课题组的师兄弟：王金志、朱龙、凌峰、杨震、夏富生、曹冉、刘家豪、樊金生、郑乐、吴俊和唐宏图提供的许多帮助，感谢他们让这原本枯燥的硕士生涯又多了一些欢乐。感谢室友李帅、陶万宝、凌鑫为在相关软件学习与论文构思上提供许多指导与意见，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！

尚德敏学 唯实惟新

