

密 级：公开

学 号: 2210110120



Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

结构优化

研 究 方 向 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：O441.1

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210110120

玉米微波真空干燥工艺与腔体结构优化

OPTIMIZATION OF MICROWAVE VACUUM DRYING PROCESS AND CAVITY STRUCTURE OF CORN

学生姓名： 曹 冉

指导教师： 孙铜生 教授

专 业： 机械工程

研究方向： 现代机械设计理论及方法

论文答辩日期： 2024 年 5 月 18 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名： 

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：



日期： 2024 年 5 月 18 日

指导教师签名：



日期： 2024 年 5 月 18 日

玉米微波真空干燥工艺与腔体结构优化

摘要

玉米作为重要的粮食和饲料作物，具有巨大的生产潜力和较高的经济效益。它具有粮食、饲料等多种工业用途，在保障粮食安全方面发挥着重要的战略作用。我国玉米种植面积和产量总体呈稳定增长态势，并形成了涵盖玉米种植、生产、加工、流通等几大环节的完整产业链。刚成熟的玉米种子水分含量高，内部存在较强的呼吸作用，会消耗养分，降低经济价值，产生的热量会导致玉米籽粒腐烂变质。因此，需对新收获的玉米籽粒进行干燥处理，使含水量降低到安全储藏范围内。微波干燥作为一种较新的干燥技术，具有清洁、节能、生产效率高、干燥速度快和质量好等优点。本文以玉米籽粒为干燥介质，微波真空干燥为干燥方法，测量了介电参数随干燥频率、温度和含水率的变化；分析了干燥过程中温度和湿度的变化及其对应力和裂纹的影响，并分析了裂纹产生的机理；总结了实验和模拟中存在的问题，优化了实验中使用的干燥设备，提高了干燥的均匀性。

本文主要研究内容和结论如下：

（1）介电参数变化规律分析

微波干燥过程中，介电参数是影响干燥效果的主要参数，使用网络分析仪和同轴探头法测定玉米籽粒温度在 25~35℃范围，含水率在 18~41%范围，频率在 0.8GHz~3GHz 范围内介电参数的变化。探究了

玉米籽粒介电参数与频率、温度、含水率的关系。结果表明，介电常数随着含水量的降低而逐渐减小，当含水量大于 30% 时，介电常数会随着温度的升高逐渐增大。介电常数在 1.4GHz~1.8GHz 频段内，随频率的升高而减小，在较低测试频率（1GHz~1.5GHz）值较大，且随含水率的下降尤为明显。介电损耗因子在 0.8GHz~1.5GHz 频段内，先增大后减小，在 1.5GHz~1.9GHz 频段内，反向急剧增大。随着温度的升高，介电损耗因数的值逐渐增大。在含水量相同的情况下，温度越高，介电损耗因子值越大。

（2）微波干燥模型和应力-应变模型

玉米微波干燥过程中存在热湿应力，使其极易产生裂纹，降低干燥后的品质和发芽率，必须尽量避免。基于电磁学、传热学和传质学建立了玉米微波干燥模型，并与应力-应变模型耦合，获得了玉米微波干燥过程中温度和含水率的变化规律。分析了干燥应力的变化规律，阐明了温湿度和应力之间的关系。此外，还针对微波干燥模型的准确性进行了实验验证，温度和含水率的仿真与实验值最大误差分别为 8.04% 和 9.21%。在设定的干燥条件下，热应力随着温度的升高而增大，在玉米籽粒表面达到最大应力值。湿应力随含水率梯度的增大而增大，含水率(干基)为 16.13% 时应力和裂纹指数最高。

（3）玉米微波干燥裂纹产生机理的研究

玉米籽粒微波干燥过程中减少裂纹的产生，是提高其经济效益的重要手段。利用三维软件的图像处理技术构建了玉米籽粒几何模型，基于能量和质量守恒定律、多相传输学建立了玉米微波干燥过程中水

的固、液、汽相互转化的模型，基于弹性变形和固体动量守恒建立了变形模型，并将模型进行了耦合。获得了裂纹在三个方向的变化和分布规律，分析了裂纹变化的过程，以及温度和含水率对裂纹产生的影响，实验与仿真对比验证模型的准确性。在设定的干燥条件下，随温度的升高，裂纹逐渐增多，变形逐渐增大，裂纹指数呈指数上升。随着含水率的降低，变形先增大后减小，裂纹不断增多。裂缝指数呈线性上升，变形在含水率为 31% 时达到最大值。

（4）玉米微波干燥装置优化

在玉米籽粒微波干燥应力和裂纹分析的基础上，基于麦克斯韦方程、谐振腔理论、以及微波干燥箱的结构和工作原理，对微波干燥箱的结构和波导进行了优化设计。以电磁场和温度的均匀性为评价标准，重新设计了波导的数量和相对位置。结果表明：单馈入口中，E 型馈入口的电磁场分布较均匀，H 型馈入口，磁场存在密集分布的现象。双馈入口中，H-H 型干燥腔内磁场分布更加均匀，且不存在局部较大值。综合分析 E-E 型馈入口最好，温度均匀，含水率降低快，温度差值较小，热点少，最大程度上提高干燥均匀性。

关键词：玉米籽粒，微波干燥，介电参数，应力，裂纹，结构优化

OPTIMIZATION OF MICROWAVE VACUUM DRYING PROCESS AND CAVITY STRUCTURE OF CORN

ABSTRACT

Corn, as an important food and feed crop, has enormous production potential and high economic benefits. It has various industrial uses such as grain and feed, and plays an important strategic role in ensuring food security. The planting area and yield of corn in China generally show a stable growth trend, and a complete industrial chain covering several major links such as corn planting, production, processing, and circulation has been formed. Freshly matured corn seeds have high moisture content and strong internal respiration, which consumes nutrients and reduces economic value. The heat generated can cause the corn seeds to rot and spoil. Therefore, it is necessary to dry the newly harvested corn kernels to reduce their moisture content to a safe storage range. Microwave drying, as a relatively new drying technology, has advantages such as cleanliness, energy conservation, high production efficiency, fast drying speed, and good quality. This article uses corn kernels as the drying medium and microwave vacuum drying as the drying method to measure the variation

of dielectric parameters with drying frequency, temperature, and moisture content; Analyzed the changes in temperature and humidity during the drying process and their effects on stress and cracks, and analyzed the mechanism of crack generation; Summarized the problems in the experiment and simulation, optimized the drying equipment used in the experiment, and improved the uniformity of drying.

The main research contents and conclusions of this paper are as follows :

(1) Analysis of the variation law of dielectric parameters:

During the microwave drying process, dielectric parameters are the main parameters that affect the drying effect. The network analyzer and coaxial probe method are used to measure the changes in dielectric parameters of corn kernels in the temperature range of 25-35 °C, moisture content range of 18-41%, and frequency range of 0.8GHz-3GHz. Explored the relationship between the dielectric parameters of corn kernels and frequency, temperature, and moisture content. The results show that the dielectric constant gradually decreases with the decrease of water content. When the water content is greater than 30%, the dielectric constant will gradually increase with the increase of temperature. The dielectric constant decreases with increasing frequency in the frequency range of 1.4GHz to 1.8GHz, and is higher at lower test frequencies (1GHz to 1.5GHz), particularly with a decrease in water content. The dielectric loss factor

increases first and then decreases in the frequency range of 0.8GHz to 1.5GHz, and sharply increases in the opposite direction in the frequency range of 1.5GHz to 1.9GHz. As the temperature increases, the value of the dielectric loss factor gradually increases. Under the same moisture content, the higher the temperature, the greater the dielectric loss factor value.

(2) Microwave drying model and stress-strain model:

During the microwave drying process of corn, there is thermal and moisture stress, which makes it prone to cracking and reduces the quality and germination rate after drying. It must be avoided as much as possible. A corn microwave drying model was established based on electromagnetics, heat transfer, and mass transfer, and coupled with a stress-strain model to obtain the changes in temperature and moisture content during the corn microwave drying process. Analyzed the variation pattern of drying stress and elucidated the relationship between temperature, humidity, and stress. In addition, experimental verification was conducted on the accuracy of the microwave drying model, and the maximum errors between the simulation and experimental values of temperature and moisture content were 8.04% and 9.21%, respectively. Under the set drying conditions, thermal stress increases with the increase in temperature, reaching the maximum stress value on the surface of corn kernels. The wet stress increases with the increase of the moisture content gradient, and the stress and crack index are highest when the moisture

content (dry basis) is 16.13%.

(3) Research on the Mechanism of Cracks in Corn Microwave Drying:

Reducing the generation of cracks during microwave drying of corn kernels is an important means to improve their economic benefits. A geometric model of corn kernels was constructed using image processing techniques in 3D software. A model for the conversion of solid, liquid, and vapor phases of water during microwave drying of corn was established based on the laws of energy and mass conservation and multiphase transport. A deformation model was established based on elastic deformation and solid momentum conservation, and the model was coupled. Obtained the changes and distribution patterns of cracks in three directions, analyzed the process of crack changes, and the effects of temperature and moisture content on crack generation. The accuracy of the model was verified through experimental and simulation comparisons. Under the set drying conditions, as the temperature increases, cracks gradually increase, deformation gradually increases, and the crack index increases exponentially. As the moisture content decreases, deformation first increases and then decreases, and cracks continue to increase. The crack index shows a linear increase, and the deformation reaches its maximum value at a moisture content of 31%.

(4) Optimization of corn microwave drying device:

Based on the analysis of stress and cracks in microwave drying of

corn kernels, the structure and waveguide of the microwave drying oven were optimized and designed based on Maxwell's equation, resonant cavity theory, and the structure and working principle of the microwave drying oven. Based on the evaluation criteria of electromagnetic field and temperature uniformity, the number and relative position of waveguides have been redesigned. The results show that in the single feed inlet, the electromagnetic field distribution in the E-type feed inlet is relatively uniform, while in the H-type feed inlet, there is a phenomenon of dense magnetic field distribution. In the doubly fed inlet, the magnetic field distribution in the H-H drying chamber is more uniform and there is no local large value. Overall analysis shows that the E-E type feed inlet is the best, with uniform temperature, fast decrease in moisture content, small temperature difference, and fewer hot spots, maximizing drying uniformity.

KEY WORDS: corn kernels, microwave drying, dielectric parameters, stress, cracks, structural optimization

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 选题背景与研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 干燥理论研究现状	2
1.2.2 微波干燥技术研究现状	3
1.2.3 介电参数研究现状	4
1.3 主要研究内容与章节安排	4
1.3.1 主要研究内容	4
1.3.2 章节安排	5
1.4 本章小结	5
第 2 章 玉米籽粒微波干燥介电参数分析	6
2.1 引言	6
2.2 材料与方法	6
2.2.1 材料	6
2.2.2 实验仪器	7
2.2.2 实验方法	7
2.3 介电参数	8
2.3.1 介电常数和介电损耗因子	8
2.3.2 穿透深度	8
2.3.3 同轴探头法原理	8
2.4 结果与分析	9
2.4.1 含水率对介电参数的影响	9
2.4.2 温度对介电参数的影响	12
2.4.3 介电参数分析	15
2.5 本章小结	16
第 3 章 玉米籽粒微波干燥传热传质模型及应力特性研究	18
3.1 引言	18
3.2 材料与方法	18
3.2.1 材料	18
3.2.2 分析方法	19

3.2.3 实验方法	19
3.3 传热传质和应力模型	21
3.3.1 基本假设	21
3.3.2 干燥腔内电磁方程	21
3.3.3 传热方程	21
3.3.4 传质方程	22
3.3.5 应力模型	23
3.4 结果与分析	24
3.4.1 模型验证	24
3.4.2 干燥过程温度和热应力变化	25
3.4.3 干燥过程含水率和湿应力变化	28
3.4.4 总应力分析	30
3.5 本章小结	31
第 4 章 玉米籽粒微波干燥应力裂纹产生机理的研究	32
4.1 引言	32
4.2 材料与方法	32
4.2.1 材料	32
4.2.2 分析方法	32
4.2.3 实验方法	33
4.3 多相传输和变形模型	33
4.3.1 基本假设	33
4.3.2 干燥腔内电磁方程	33
4.3.3 质量守恒方程	34
4.3.4 能量守恒方程	36
4.3.5 固体变形	36
4.3.6 边界条件	37
4.4 结果与分析	39
4.4.1 模型验证	39
4.4.2 干燥温度对变形影响的分析	41
4.4.3 含水率对变形影响分析	43
4.4.4 裂纹分析	45
4.5 本章小结	46

第 5 章 玉米微波干燥设备腔体的优化设计	47
5.1 引言	47
5.2 微波系统构成	47
5.3 干燥腔体设计	47
5.3.1 微波谐振腔理论	47
5.3.2 谐振腔尺寸	49
5.3.3 微波馈入口分布设计	49
5.4 结果与分析	50
5.4.1 单馈入口电场分析	50
5.4.2 单馈入口磁场分析	52
5.4.3 双馈入口电场分析	53
5.4.4 双馈入口磁场分析	55
5.4.4 干燥腔优化分析	56
5.5 本章小结	57
第 6 章 总结与展望	59
6.1 总结	59
6.2 展望	59
参考文献	61
攻读硕士期间获得的科研成果	70
一、论文情况	70
二、专利情况	70
三、获奖情况	70
致谢	71

第1章 绪论

1.1 选题背景与研究意义

玉米是禾本科一年生草本植物，俗称苞谷、玉蜀黍、珍珠米等。在全球主要作物中，玉米因用途广、种植简单等优势而使种植面积迅速扩大，目前成为世界第一大作物^[1-2]。预计到 2025 年，玉米将成为产量最高的作物^[3]。中国的玉米-产量位居世界第二，占世界总产量的两成，在我国粮食供给中的地位十分重要^[4]。玉米籽粒中含有丰富营养物质，包括淀粉、蛋白质、脂肪、维生素等。因而成为重要的粮食、饲料以及经济作物，被广泛用于养殖业、畜牧业以及工业生产，例如生产玉米淀粉、酒精、生物油等^[5]。

新收获的玉米含水率在 20%~40%之间^[6]，当玉米籽粒含水率高于 21%时，在自然条件下储藏会发霉，安全储藏的含水率应小于 14%^[6-7]。含水率高既会加快霉菌、细菌和真菌的生长，也是激发食物中酶活性的重要因素，有利于微生物的繁殖，导致籽粒内部进行旺盛的呼吸作用^[8]，消耗籽粒内部营养物质，降低经济价值；还会产生热量，使玉米霉变，不利于长期保存^[9]。据统计，每年因腐败变质而损失的玉米高达几百万吨^[10]。因此玉米的干燥，是抑制霉菌生长，防止玉米变质的重要环节，也是发挥其经济效益的前提。

干燥的目的是减少谷物的水分含量，以消除其储藏时的负面影响^[11-12]。目前，我国玉米干燥主要采用两种方式：自然晾晒和热风干燥。自然晾晒去除水分，这种干燥方式时间长，占用场地大，易受天气影响，易使玉米产生大量霉变，已逐渐被淘汰^[13]。常规的热风干燥方式，热风温度一般较高，会损害谷物的结构，对品质影响较大，且干燥时间较长，能耗和成本较高。随着经济的快速发展，传统的干燥技术不能满足对玉米干燥后不断提高的品质要求，采用先进的干燥技术是确保粮食安全的重要手段，能更好地提高玉米的整体品质^[14]。微波干燥作为一种比较新型的干燥技术，干燥热量主要是由谷物内部偶极子旋转产生^[15-16]，且干燥速率快、清洁、节能、生产效率高、干燥品质好等优点^[17-18]。国内外对微波干燥

技术的研究日益增多,包括理论研究、干燥参数研究以及与其他干燥技术结合的研究。

玉米微波干燥涉及较多理论,包括传热传质学、弹性力学、流体力学、多孔介质学等参与其中。玉米属于吸湿性非饱和多孔介质,其形状具有不规则性,内部结构较复杂,干燥过程中内部含水率也不同,且多孔介质中的热质耦合具有复杂性^[19]。在玉米籽粒微波干燥过程中,内部水分存在多样性和不均匀性,包括固态、液态和气态,并伴随着相互转化,同时受热的不均匀性一直存在。随着数值模拟方法的发展,能借助分析软件可视化干燥过程中的物理量,如应力、温度、水分、介电参数等,这为构造玉米干燥过程中的传热传质模型、多孔介质模型、应力-应变模型等提供了全新的方法。

本文测量了介电参数随干燥频率、温度、含水率的变化,采用数值模拟和试验相结合的方法,建立了玉米籽粒微波干燥过程中温度、含水率、应力变形的模型,得到了干燥过程中温度、含水率、变形的变化,以及热湿应力的变化。在玉米籽粒微波干燥过程中,因温度和水分梯度所产生的应力,是裂纹产生的主要原因^[20],根据冯·米塞斯应力的屈服准则,当材料受到大于其屈服应力的作用力时,就会产生裂纹^[21-22]。因此,有必要基于玉米籽粒的温度和水分传递,研究其裂纹形成机理。裂纹和应力的产生主要受介电参数的影响,介电参数主要由介电常数和介电损耗因子两部分组成,分别描述了材料在外加电场作用下储存能量的能力和将电磁能转化为热能的能力^[22]。深入研究介电参数对干燥裂纹的影响,以最大程度地减少玉米籽粒在干燥过程中的裂纹率,从而提高其经济价值。在研究应力、裂纹和介电参数的基础上,对使用的干燥设备进行结构改进和优化,以确保干燥过程中温度和湿度的均匀性。这不仅有助于提高玉米干燥的效率和品质,还对其他谷物的干燥具有指导意义。综上所述,这些研究对于改进玉米干燥的效率和品质,以及对其他谷物的干燥过程都具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 干燥理论研究现状

18 世纪初,国外科学家开始研究干燥理论,包括传热传质理论、水迁移理论、扩散理论等。Sherwood 等人^[24]提出浓度梯度是多孔介质干燥过程中水迁移

的驱动力。Parti 等人^[25]研究了玉米干燥过程中的传热传质并建立了扩散系数模型。通过实验,发现玉米的扩散系数主要受温度和水分含量的影响。Hacıhafızoglu 等人^[26]将液体扩散模型理论应用于玉米干燥过程,并研究了玉米籽粒形状对干燥的影响。结果表明,球形结构的模拟结果与实验结果基本一致。Takhar 等人^[27],建立了玉米干燥过程中温度、水分和应力的数学模型,可以获得温度、含水率、应力的变化趋势,结果表明含水率对应力有较大的影响。Selimefendigil 等人^[28]探究风道位置和旋转角速度对干燥过程中传热传质的影响。

我国对干燥理论的研究始于 18 世纪末,1995 年,贾灿春等人^[29]建立了玉米二维多组分模拟模型,用于分析干燥过程中的温度和水分变化。研究结果显示,在干燥的初始阶段,玉米内部温度逐渐上升,而水分浓度则逐渐减小,呈现出由内而外的趋势。2006 年,刘雪强等^[30]利用弹性理论建立了玉米干燥应力模型,研究了玉米籽粒干燥过程中热、湿应力的变化。2015 年,刘军等人^[31]利用 CT 扫描设备构建了玉米籽粒三维模型,通过热湿传递和应力模型得到了干燥过程中应力的变化。2018 年,吴中华等人^[32]利用图像处理技术构建物料几何模型,准确模拟干燥和缓苏干燥过程中物料温度和水分的变化。2020 年,程裕东等人^[33]等人基于电磁学、多相传输和固体力学形变模型,并使用软件进行求解,获得了物料表面和点瞬态温度分布。

1.2.2 微波干燥技术研究现状

微波干燥是一种较新的干燥技术,其主要特点是干燥从内部开始加热,热量传递方向与内部水分扩散方向一致,并且微波可以穿透物料进行干燥,使干燥速率加快、效率提高、均匀性增强。目前,对于微波干燥技术国内外学者进行了多方面的研究,主要侧重于寻找不同物料在微波干燥或与其他方法联合干燥时最佳工艺参数,及获得物料颜色、发芽率、酮含量、蛋白质含量、直链淀粉含量等特性参数^[34-37]。Liu 等人^[38],De 等人^[39]和 Song 等人^[40],对玉米微波干燥过程中功率、时间、温度、发芽率等进行了研究,对玉米微波干燥工艺的改进起了一定作用。随着科技的不断进步,微波干燥技术正被更深入研究,得出的干燥规律也越来越多,进一步促进了干燥技术的发展。

1.2.3 介电参数研究现状

微波干燥过程中,为达到最优干燥效果,有必要了解微波产生的电磁能与农产品之间的相互作用以及介电性能的变化规律。自从1953年第一篇^[41]关于谷物介电特性的文章发表以来,越来越多的科学家致力于农产品尤其是食品介电特性的研究。介电参数主要由介电常数和介电损耗因子两部分组成,分别描述了物料在外加电场作用下存储能量的能力和电磁能转化为热能的能力^[42]。国内外学者也对影响介电特性的因素进行了研究,如频率、温度^[43]、水分含量、容重^[44]、成分等。农产品的介电特性会根据频率、温度和水分含量而改变^[45],且受水分含量的影响较大。一些研究对低水分食品如蔬菜粉^[46]、面粉^[47-49]、淀粉^[50]、香料^[51-52]、辣椒粉^[53]等在较低微波频率下的介电特性进行了研究,忽略了高水分和高频率对介电参数的影响。介电材料介电性能的测量方法有传输线法、自由空间法、谐振腔法、平行板法、开放式同轴探针法等。其中,开放式同轴探头法因其覆盖的频带较宽,使用方便,被广泛用于多种农产品的测量。

1.3 主要研究内容与章节安排

1.3.1 主要研究内容

本文以玉米粒为干燥介质,微波真空干燥为干燥方法。首先探究了频率、温度和含水率对介电参数的影响,以及介电参数对微波干燥的影响;然后,建立了玉米微波干燥的数学模型,分析了干燥过程中温度和湿度的变化,并将应力-应变模型与干燥模型耦合,阐明了三者之间的关系,为降低干燥应力提供了参考;其次,分析了玉米干燥裂纹的产生机理,阐明了温湿度与裂纹之间的关系,提高了干燥质量;最后,通过总结温湿度、应力、裂纹和介电参数之间的关系,找出实验和模拟中存在的问题,对实验中使用的干燥设备进行了优化。具体研究思路如图1-1所示。

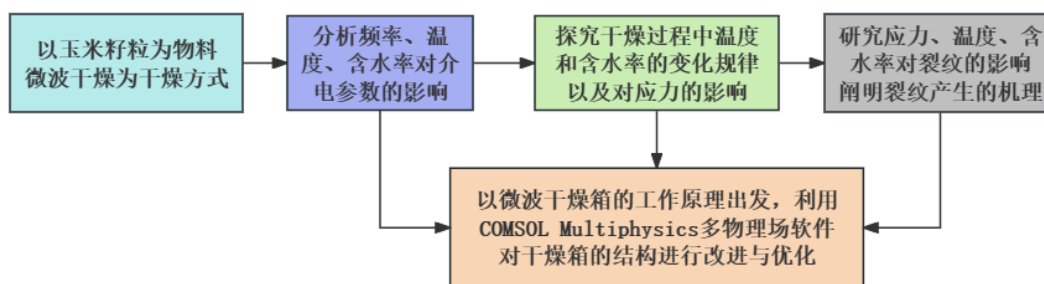


图 1-1 论文整体框架

1.3.2 章节安排

详细章节安排如下：

(1)第一章为绪论，介绍了研究的背景与意义和课题相关理论的研究现状，主要介绍了研究内容与章节安排。

(2)第二章为玉米介电参数的分析，介电参数是影响干燥效果的主要参数，对减少裂纹十分重要。采用网络分析仪和同轴探头法测定玉米籽粒温度在 25-35℃ 范围，含水率在 18-41%范围，频率在 0.8GHz-3GHz 范围内介电参数的变化，并研究了玉米介电参数与频率、含水率、温度的关系，为研究玉米介电参数的变化提供参考。

(3)第三章建立了玉米微波干燥模型、应力-应变模型，并结合实验和模拟方法分析了玉米微波干燥过程中温度、含水率和干燥应力的变化规律。阐明了温度、含水率和应力之间的关系。为降低玉米微波干燥过程中的应力提供参考。

(4)第四章建立了玉米微波干燥过程中多相传递与变形的模型。通过研究温度和湿度梯度对裂纹产生的影响，分析了裂纹产生的机理，为研究玉米微波干燥过程中裂纹的产生提供参考。

(5)第五章以微波干燥箱的工作原理出发，利用 COMSOL Multiphysics 多物理场软件对干燥箱的结构进行改进与优化，对比优化前后电场、磁场和温度的分布情况，以期找到最优结构，从而最大程度上提高干燥均匀性。

1.4 本章小结

本章为绪论部分，主要介绍选题的背景与意义、课题相关理论的国内外研究现状、主要研究内容与章节安排，起到描绘论文骨架的作用。

第2章 玉米籽粒微波干燥介电参数分析

2.1 引言

玉米微波干燥过程中应力和裂纹的产生主要受介电参数的影响，介电参数的变化会影响电磁能与玉米籽粒之间的相互作用。为了达到最佳的干燥效果，有必要了解玉米籽粒介电参数的变化。介电参数主要由两部分组成：介电常数和介电损耗因子，它们分别描述了材料在外加电场作用下的储能能力和将电磁能转化为热能的能力。影响介电性能的因素很多，如频率、温度、含水量、体积密度和成分，其中含水量对介电性能的影响最大。介电参数的测量方法包括传输线法、自由空间法、谐振腔法、平行板法和开放式同轴探针法等。由于受国内实验设备的限制，大部分介电参数研究采用平行板法，此方法有很大缺陷，即达不到较高的测试频率，又会因为夹具问题导致测量数值错误。但开放式同轴探头法覆盖的频带较宽，探头可以与被测物料充分接触，测量数值更准确。本章以玉米籽粒为研究对象，使用矢量网络分析仪和同轴探头技术测定玉米籽粒温度在 25~35℃ 范围，含水率在 18~41% 范围，频率在 0.8GHz~3GHz 范围内的介电参数，分析介电参数与温湿度之间的关系，为玉米籽粒介电参数研究提供参考。

2.2 材料与方法

2.2.1 材料

郑单 958 号的玉米籽粒，选用色泽正常饱满无裂纹的籽粒作为实验材料。实验前进行浸泡复水，采用 105℃ 烘干至恒质量的方法，获得不同初始干基含水率的玉米籽粒（37.98%±2%，35.97%±2%，29.93%±2%，22.85%±2%，18.56±2%），并将不同含水率的玉米籽粒装入密封袋中，在 4℃ 冰箱中储藏备用，实验时提前取出，平衡至室温。

2.2.2 实验仪器

介电参数测量使用E5061B 矢量网络分析仪，Keysight 公司；微波干燥采用 RWBZ-08S 型微波真空干燥箱，南京苏恩瑞设备有限公司；温度测量采用 Ti32 型热成像仪，Fluke 公司；含水率测定采用 HS100 烘干法水分测定仪，武汉捷宝生物科技有限公司；质量测定采用 AB204-N 型电子分析天平，上海花潮实业有限公司。

2.2.2 实验方法

介电特性测量系统原理图如图 2-1 所示。测量前矢量网络分析仪 E5061B 通电预热 1 小时，然后在使用端口上使用 50Ω 负载进行校准。校准端口通过低损耗同轴电缆连接到 N1501A 探头。N1501 软件启动后，系统设置为在 0.9GHz 至 3GHz，对数尺度上提供 101 个频率点的测量。N1501A 开放式同轴线探头通过空气、短路和 25°C 去离子水进行校准。

实验前将复水至不同初始含水率的玉米籽粒取出，静置擦干水分，制作一份不同含水率的粉碎玉米籽粒。实验时，将完整或者粉碎籽粒放入量杯后放入水浴箱内，根据实验需求设置水浴箱水温，玉米籽粒温度达到设定值后，在 2min 内进行三次介电性能测量，所有测量重复三次，不同温度和含水率需重新进行实验。

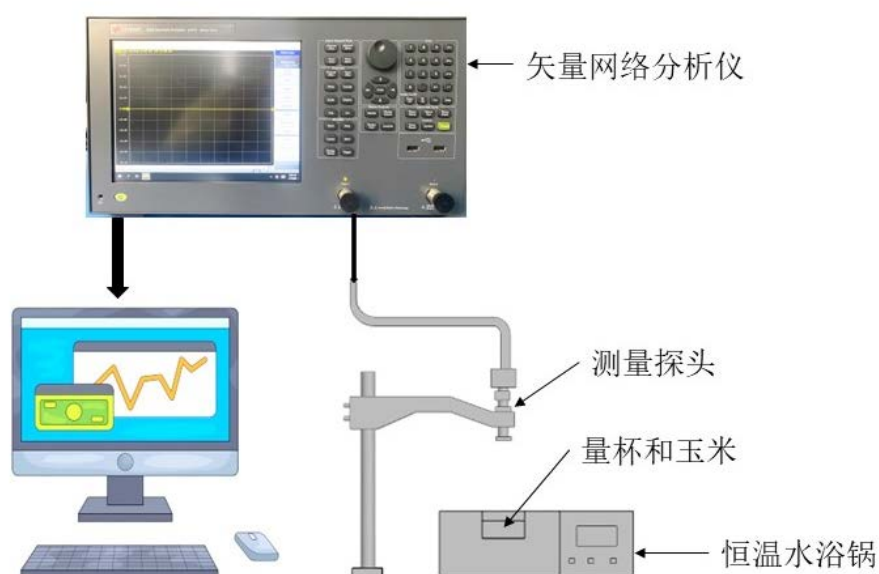


图 2-1 介电特性测量系统原理图

2.3 介电参数

2.3.1 介电常数和介电损耗因子

Debye 提出的描述纯极性材料介电常数和介电损耗因的数学公式为^[54]:

$$\begin{cases} \varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} \\ \varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) * 2\pi f \tau}{1 + (2\pi f)^2 \tau^2} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中, ε' 和 ε'' 分别为介电常数、介电损耗因子; ε_{∞} 为频率无穷大时的介电常数;

ε_s 为静态介电常数; f 为频率, Hz; τ 为弛豫时间, s。

对于德拜弛豫时间与水的粘度关系式为^[55]:

$$\tau = V \frac{3\nu}{kT} \quad (2-2)$$

式中 V 为体积, m^3 ; ν 为粘度; k 为常数; T 为温度, T。

2.3.2 穿透深度

理论上, 穿透深度被定义为功率密度为 $1/e$ ($e=2.718$)的材料平面以下的深度大于垂直冲击并向前传播的平面电磁波表面的衰减。它是确定待加工样品厚度和评价微波加热均匀性的重要参数。食品材料一般是非磁性的, 受平面波入射的材料穿透深度可计算为^[56]:

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right]}} \quad (2-3)$$

式中, d_p 为穿透深度, m; c 为光在自由空间中的速度。

2.3.3 同轴探头法原理

矢量网络分析仪进行介电参数的测量, 是利用同轴电缆将电磁波在玉米籽粒上发生反射, 通过测量反射系数算出玉米籽粒的介电参数。探头末端的等效阻抗为:

$$Z = \frac{1}{j\omega[(C_f + \varepsilon' C_0) - jC_0(\frac{\omega\varepsilon''\varepsilon_0 + \sigma_d}{\omega\varepsilon_0})]} \quad (2-4)$$

式中， Z 探头末端的等效阻抗， Ω ； ω 为频率，Hz； C_f 为探头内部等效电容，F； C_0 为外部等效电容，F； ε_0 为自由空间的介电常数； σ_d 为有效电导率，S/m。

入射信号 a_i 和反射信号 b_i 通过散射矩阵联系：

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

式中， S_{11} ， S_{12} ， S_{21} ， S_{22} 为散射参数。

2.4 结果与分析

2.4.1 含水率对介电参数的影响

由图 2-2 不同温度和含水率下完整或粉碎玉米籽粒介电常数频谱可知，随着含水率的降低，完整或粉碎玉米籽粒的介电常数逐渐降低，水分含量的降低导致玉米籽粒内部的极化分子减少，从而导致介电常数随着水分含量的降低而降低。含水率大于 30% 时，随着温度的升高介电常数逐渐增大，且粉碎籽粒高于完整籽粒，因为粉碎籽粒与实验探头接触几乎不存在空隙，测试结果更准确。含水率低于 30% 时，介电常数受含水率影响较大。随着频率的增加，介电常数先增大，后减小，再增大。在 1.4GHz 到 1.8GHz 的频率范围内，随着频率的增加，等效偶极子的取向极化有变缓的趋势，表现为介电常数随频率的增加而减小；在较低的测量频率(1~1.5GHz)下，介电常数的值相对较大，且随着含水量的降低，介电常数下降尤为显著。粉碎籽粒介电常数高于完整籽粒，在含水率越高越明显，随着含水率降低，温度和籽粒状态对介电常数影响逐渐减小。研究表明，纯水在射频范围内的介电常数在 80 左右，而籽粒中干物质在相同频率范围内的介电常数小于 3。因此，水分是影响谷物介电特性的主要因素^[57]。随着含水率和温度的变化，完整籽粒介电常数变化较小，粉碎籽粒介电常数变化明显。

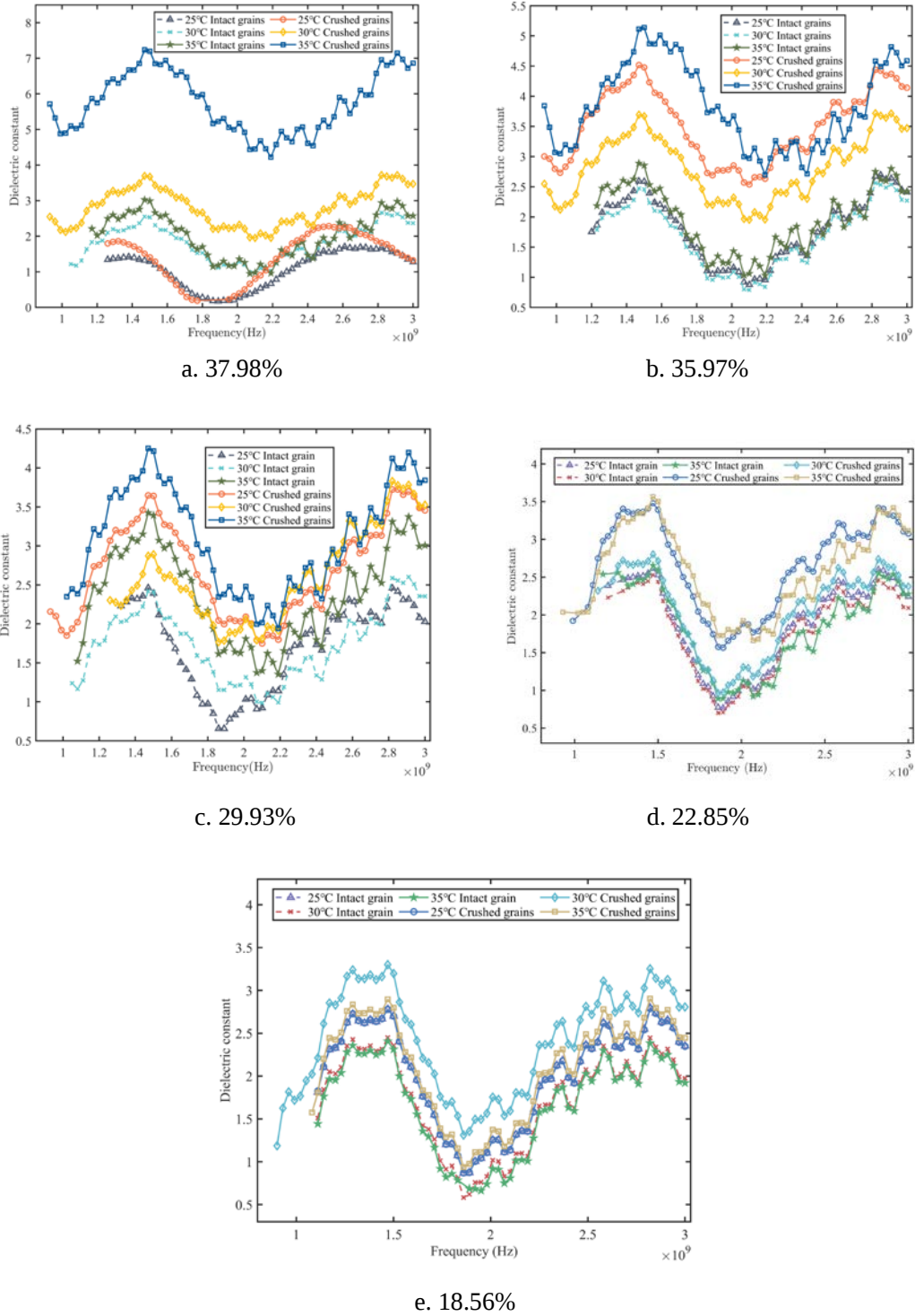
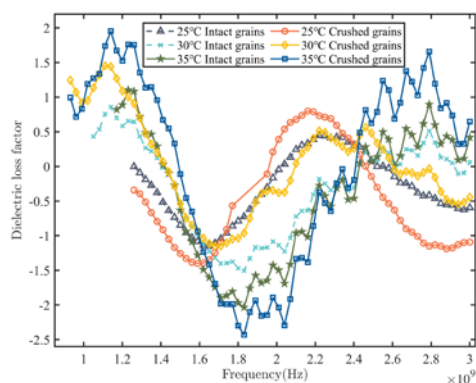


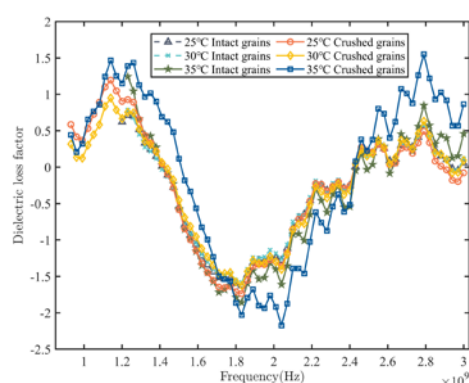
图 2-2 不同温度和含水率下完整或粉碎玉米籽粒介电常数频谱

由图 2-3 不同温度和含水率下完整或粉碎玉米籽粒介电损耗因子频谱可知，玉米籽粒的介电损耗因子变化曲线较为复杂。在 $0.8\text{GHz}\sim 1.5\text{GHz}$ 频率范围内，介质损耗因数先增大后减小。在上述频率范围内，玉米籽粒介电损耗的主要来源是离子传导和界面极化^[58]。离子传导引起的介电损耗随频率的增加而减小，而界面极化引起的介电损耗随频率的增加呈现先增大后减小的趋势，在

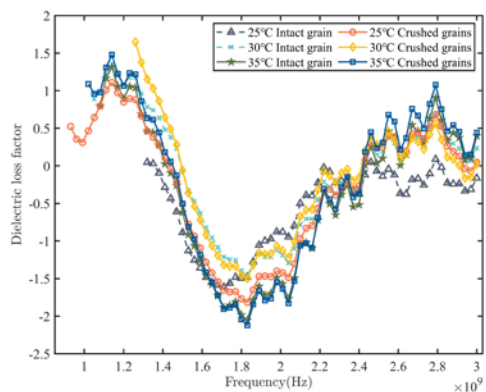
1GHz~1.2GHz 之间出现峰值。随着电压的增大, 介质损耗角的偏差减小, 当电流与电压的夹角为 90° 时, 介质损耗因数变为负值。在 1.5GHz~1.9GHz 频段, 介电损耗因子反向急剧增大, 在 1.9GHz~2.45GHz 频段, 介电损耗因子反向减小, 在 2.45GHz~3GHz 频段, 介电损耗因子曲折变化。水分含量越高, 不同频率和温度下完整和破碎玉米粒的介电损耗因子差异越大, 含水率越低, 差异越小。随着含水率的降低, 完整或粉碎玉米籽粒介电损耗因子负值和正值区域数值上逐渐降低, 不同温度下变化趋势基本一致, 温度对介电损耗因子影响较小。介电损耗因子负值数值最大值大于正值数值最大值, 负值和正值区域, 数值变化趋势相同, 即先增大后降低, 存在峰值。



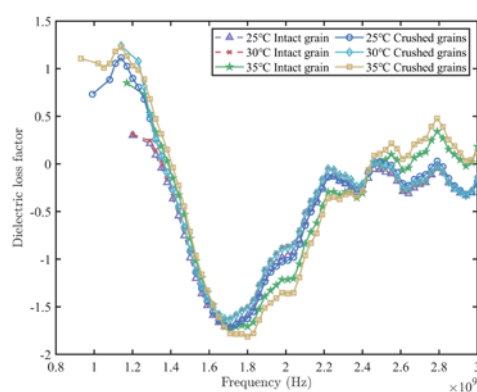
a. 37.98%



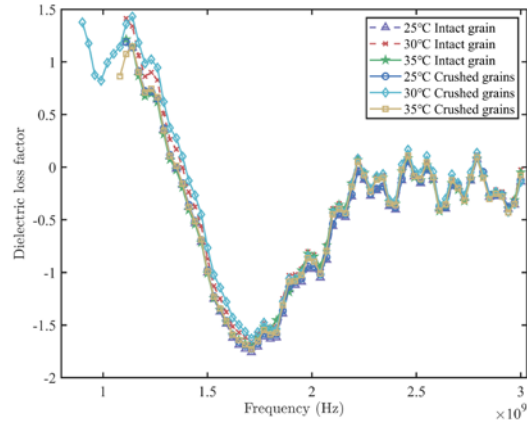
b. 35.97%



c. 29.93%



d. 22.85%

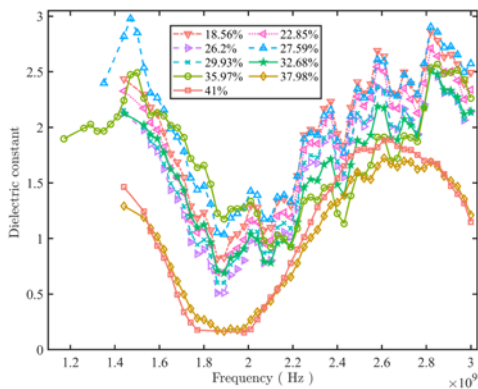


e. 18.56%

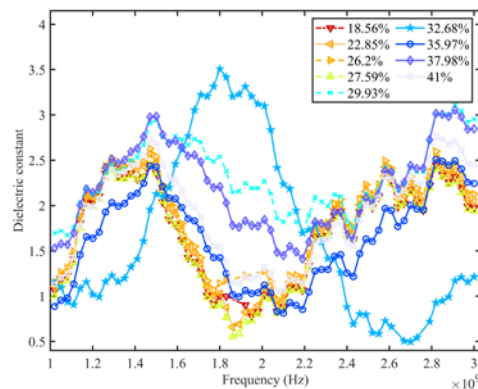
图 2-3 不同温度和含水率下完整或粉碎玉米籽粒介电损耗因子频谱

2.4.2 温度对介电参数的影响

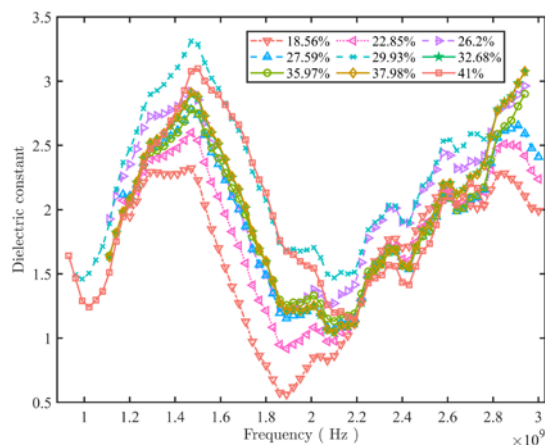
由图 2-4 和图 2-5 不同含水率下完整或粉碎玉米籽粒介电常数随温度的变化规律可知，在实验频段内，不同含水率完整或粉碎玉米籽粒，介电常数随着测试频率先增大后减小再增大，随着温度的升高逐渐增大，在 1.4GHz~1.6GHz 内取得峰值。在相同频率下，温度越高，介电常数值越大。根据介电极化理论，在低频电场作用下会发生表面极化，电荷在导电区域的边缘处显著积聚，导致材料的总电容和介电常数增加^[59]。随着温度的升高，不同含水率完整或粉碎的玉米籽粒介电常数变化趋势趋于一致，数值差距越小，且高含水率的玉米籽粒在较低频段下的介电常数变化更为显著。完整或粉碎玉米籽粒在含水率 30%~40%之间的介电常数高于其他含水率下的籽粒。在 30℃时，含水率为 32.68%玉米籽粒的介电常数变化剧烈且数值较高。粉碎玉米籽粒的介电常数变化较为平缓，且数值大于完好玉米籽粒。



a. 25°C

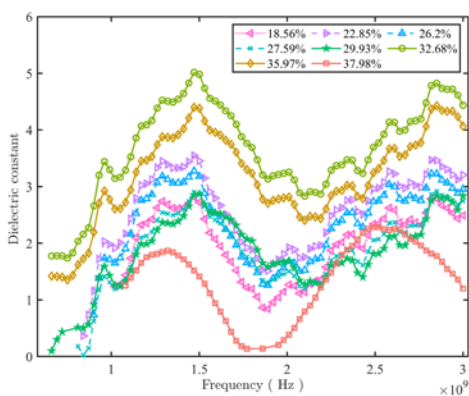


b. 30°C

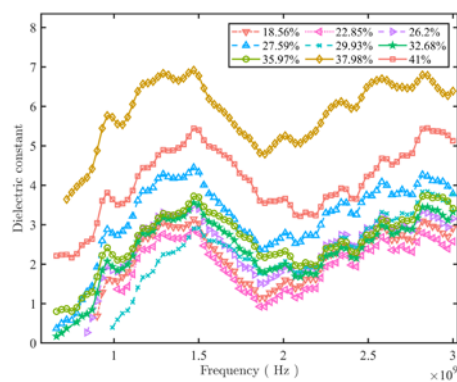


c. 35°C

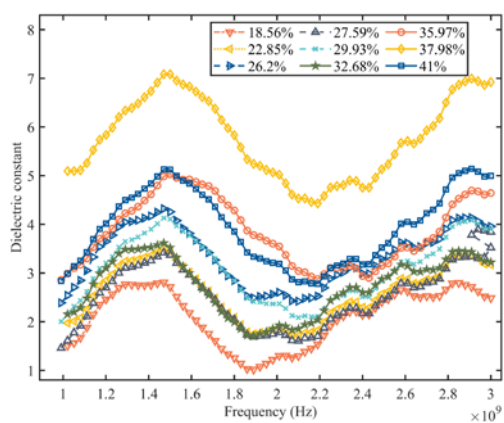
图 2-4 不同含水率下完整玉米籽粒介电常数随温度的变化规律



a. 25°C



b. 30°C



c. 35°C

图 2-5 不同含水率下粉碎玉米籽粒介电常数随温度的变化规律

由图 2-6 不同含水率下完整玉米籽粒介电损耗因子随温度的变化规律和图 2-7 不同含水率下粉碎玉米籽粒介电损耗因子随温度的变化规律可知，随着温度的升高，介电损耗因子的值逐渐增大，不同含水率的玉米籽粒，无论是完整还是破

碎,其介电损耗因子的变化趋势趋于一致,数值差异较小。介电损耗因数由偶极损耗和离子损耗 2 部分组成,在高频段水偶极旋转是介电损耗因子产生的主要因素,且离子损耗随温度的升高而增大,偶极损耗随温度的升高而减小,因此高频段介电损耗因子在数值上小于低频段。温度和频率越高,介电损耗因子存在交替变化的现象,在 2.4GHz~2.8GHz 频段内,含水率大于 35%时,介电损耗因子反向增大,小于 35%时,介电损耗因子正向增大,增大速度较快,且温度越低变化更为显著。在 30℃时,含水率为 32.68%玉米籽粒的介电损耗因子变化剧烈且数值较高。在相同含水率下,温度越高,介电损耗因子数值越大。与粉碎玉米籽粒相比,完整玉米籽粒介电损耗因子变化更剧烈,温度越低变化更显著。

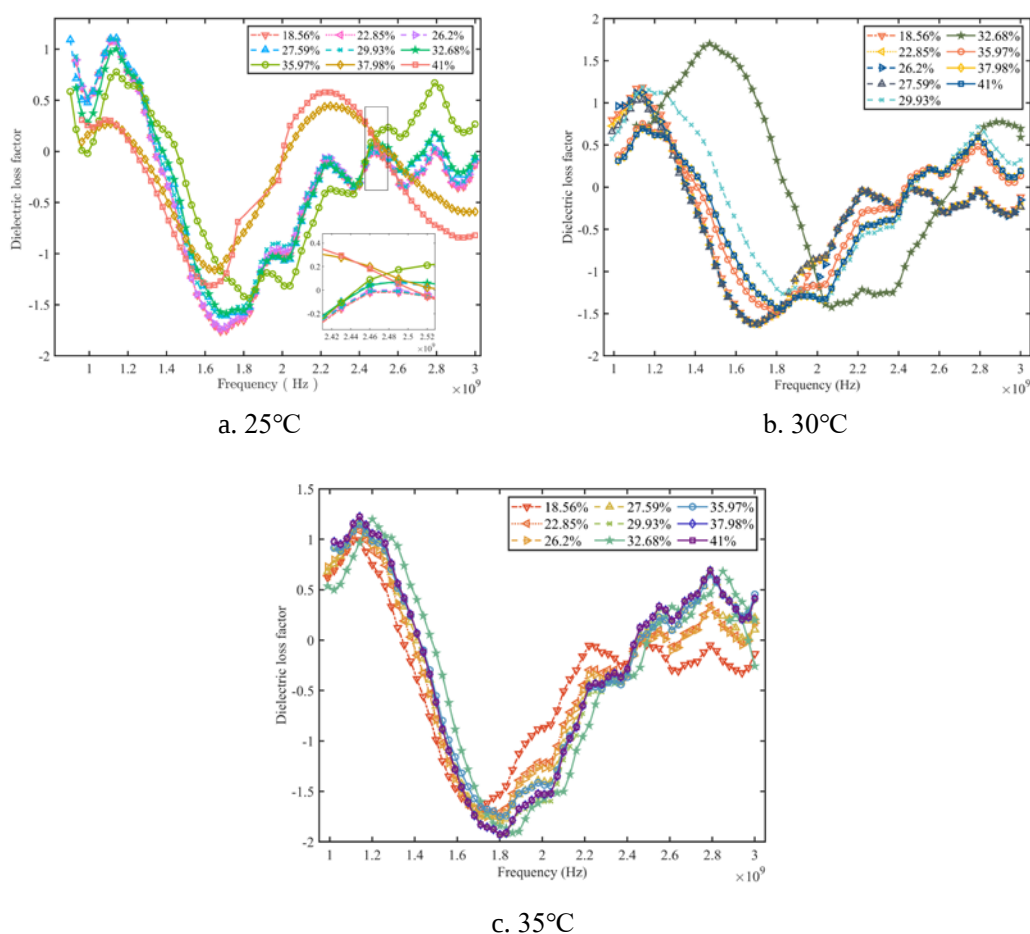


图 2-6 不同含水率下完整玉米籽粒介电损耗因子随温度的变化规律

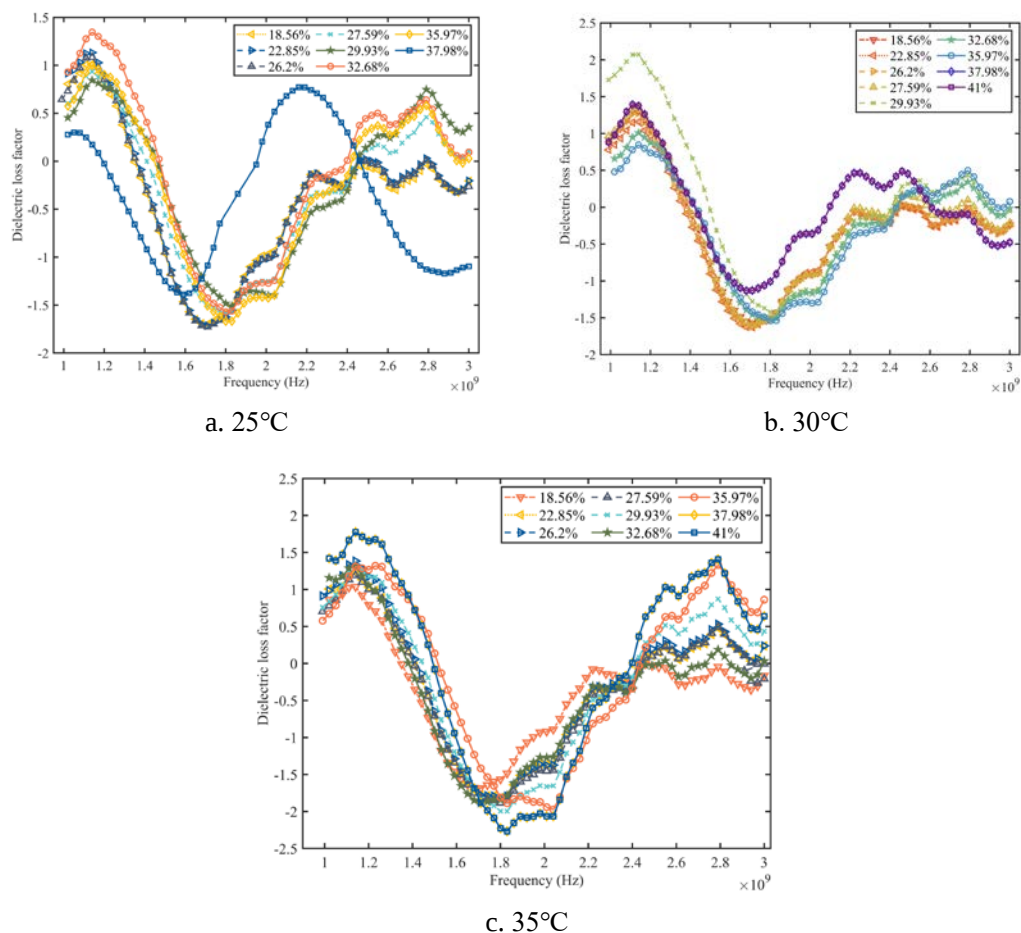
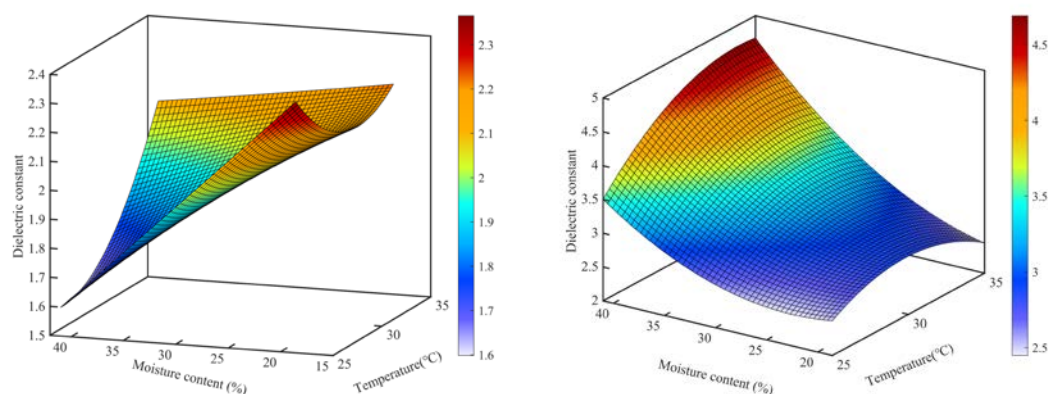


图 2-7 不同含水率下粉碎玉米籽粒介电损耗因子随温度的变化规律

2.4.3 介电参数分析

温度和含水率对完整和粉碎玉米籽粒介电常数的影响如图 2-8 所示。当温度一定时，随着含水率的降低，完整玉米籽粒介电参数越高，粉碎玉米籽粒介电参数先减小后增大。当含水率一定时，随着温度的升高，含水率在 30% 以上时，完整玉米籽粒的介电常数逐渐增大。当含水率低于 30% 时，介电常数先减小后增大，而粉碎玉米籽粒的介电常数先增大后减小。完整玉米籽粒的介电常数在低水分含量和温度下达到最大值。粉碎玉米籽粒在高水分含量和温度下取得介电常数最大值。完整玉米籽粒与实验测量探头之间存在少量缝隙，导致介电常数低于粉碎玉米籽粒。

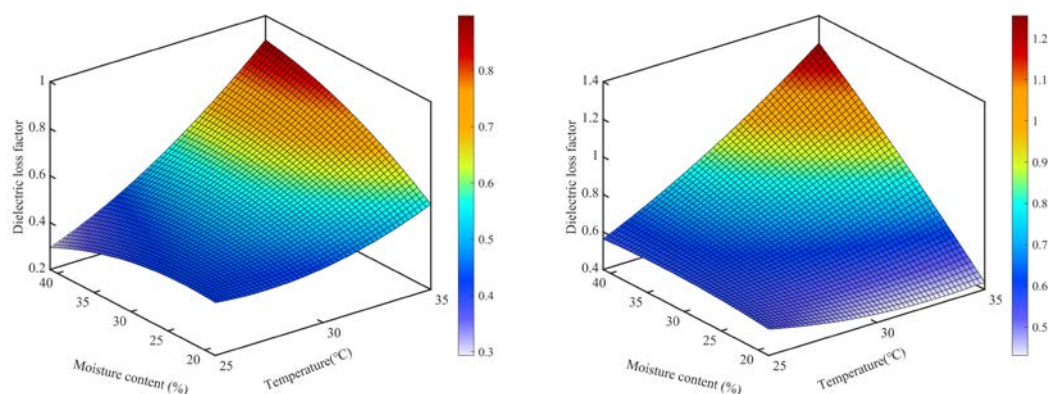


a. 完整籽粒

b. 粉碎籽粒

图 2-8 温度和含水率对完整和粉碎玉米籽粒介电常数的影响

温度和含水率对完整和粉碎玉米籽粒介电损耗因子的影响如图 2-9 所示。当温度恒定时，随着水分含量的降低，干燥温度为 25℃和 35℃时的完整玉米粒的介电损耗因子先增大后减小，干燥温度为 30℃时先减小后增大。碎玉米粒的介电损耗因子先减小后增大。当水分含量不变时，随着温度的升高，完整玉米粒的介电损耗因子先降低后升高。粉碎玉米籽粒含水率高于 30%时，介电损耗因子逐渐增大，含水率低于 30%时，介电损耗因子先减小后增大。完整和粉碎玉米籽粒在高含水率和温度时，取得介电常数的最大值。完整玉米籽粒介电损耗因子数值低于粉碎玉米籽粒。当温度低于 30℃时，介电损耗因子受温度的影响，高于 30℃，介电损耗因子由含水率主导。



a. 完整籽粒

b. 粉碎籽粒

图 2-9 温度和含水率对完整和粉碎玉米籽粒介电损耗因子的影响

2.5 本章小结

当含水量大于 30%时，介电常数会随着温度的升高而逐渐增大，粉碎谷物的

介电常数高于完整谷物的介电常数。在低测量频率（1GHz~1.5GHz）下，介电常数的值相对较大，含水量越低值越大。在相同频率下，温度越高，介电常数值越大。水分含量在 30%至 40%之间的完整玉米籽粒或粉碎玉米粒的介电常数高于其他水分含量的玉米籽粒。完整玉米籽粒介电常数的最大值在低水分含量和低温条件下达到的。粉碎的玉米粒在高含水量和高温条件下介电常数最大。

介电损耗因子在 0.8GHz~1.5GHz 频段，先增大后减小，在 1GHz~1.2GHz 内可观察到一个峰值。在 1.5GHz~1.9GHz 频段，反向急剧增大。水分含量越高，不同频率和温度下完整和破碎玉米粒的介电损耗因子差异越大。随着温度的升高，介电损耗因子在数值上逐渐增大。在 2.4GHz~2.8GHz 频段内，含水率大于 35%时，介电损耗因子反向增大，小于 35%时，介电损耗因子正向增大，增大速度较快。完整和粉碎玉米籽粒在高含水率和温度时，取得介电损耗因子的最大值。当温度低于 30℃时，介电损耗因子由温度主导，高于 30℃，介电损耗因子由含水率主导。

第3章 玉米籽粒微波干燥传热传质模型及应力特性研究

3.1 引言

玉米籽粒在干燥过程中会产生裂纹,干燥后的裂纹率是衡量干燥品质的重要指标。存在裂纹的玉米籽粒作为种子时不能正常发芽,发芽率低,而且有裂纹的玉米籽粒很容易发生霉变。研究表明,裂纹的产生主要与干燥产生的热湿应力有关。在干燥过程中,随着温度的升高和含水率的降低,导致玉米籽粒内部产生温度和水分梯度,进而产生热湿应力。因此,必须探究玉米微波干燥过程中应力的特性,提高干燥后的发芽率和品质。

玉米微波干燥是涉及电磁、质热传输的复杂过程,并涉及多个物理场耦合问题。魏硕等^[60], Takhar 等^[61]和 Wei 等^[62],建立了玉米干燥过程中温度、水分和应力的数学模型,获得了温度、含水率、应力的变化趋势,但干燥方式非微波干燥,不能应用于微波干燥方面。因此,建立玉米微波干燥传热传质模型可以更直观了解微波干燥的过程中温湿度度的变化。在微波干燥过程中,由于物料内部温度和含水率的变化,会产生热应力和湿应力。当热、湿应力超过玉米的屈服极限时,就会产生裂纹,影响品质。本章以玉米籽粒为研究对象,采用计算机模拟和实验相结合的方法,应用多物理场模拟软件,建立了玉米籽粒微波干燥过程中温度、含水率以及应力的模型,实验数值与仿真数值对比验证质热传递模型的准确性,并探究温度和含水率对干燥应力的影响,阐明了三者的关系,为今后实现玉米高效的干燥提供了理论依据。

3.2 材料与方法

3.2.1 材料

实验用玉米为郑单 958 号高产玉米,从中挑选出尺寸相近、色泽正常、颗粒饱满且无裂纹的籽粒,淘洗干净,浸泡复水后擦干,放入 $(4\pm1)^{\circ}\text{C}$ 的冰箱内冷藏。

依据国标法（GB9457-85）测得初始含水率为 $(30\pm 2)\%$ 。

3.2.2 分析方法

微波干燥箱，工作频率为 2.45GHz ，功率为 $0.35\text{W/g}^{[63]}$ ，工作尺寸 $32\text{cm}\times 34\text{cm}\times 25\text{cm}$ 。为了保证仿真的准确性，腔体网格尺寸为 $5\text{-}20\text{mm}$ ，磁控管网格尺寸为 $5\text{-}10\text{mm}$ ，物料网格尺寸为 $2\text{-}3\text{mm}^{[33]}$ ，网格划分如图 3-1 所示。

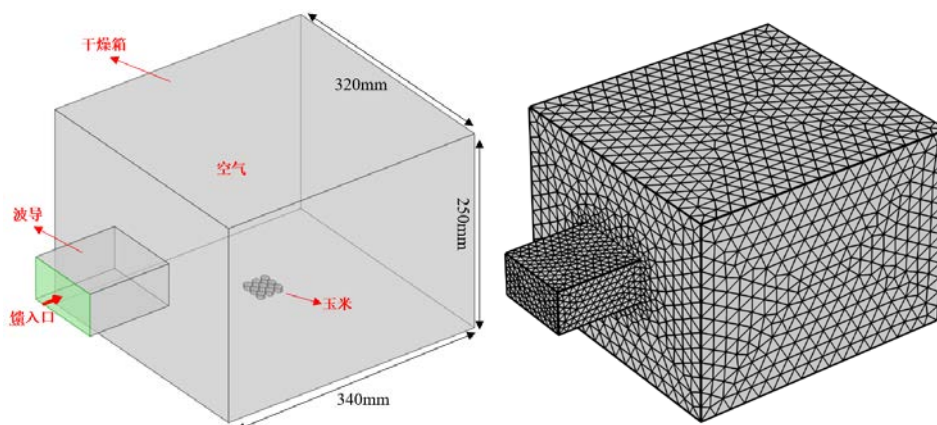


图 3-1 微波干燥模型的建立和网格划分

采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 5.5 进行仿真，微波加热物理场对电磁方程和固体传热方程进行求解，稀物质传递物理场对传质方程进行求解，仿真时间 45min ，步长为 1，将固体传热和传质仿真结果分别与固体力学耦合求解热应力和湿应力，热应力和湿应力耦合求得总应力。

3.2.3 实验方法

主要实验仪器如图 3-2 所示。微波干燥采用 RWBZ-08S 型微波真空干燥箱，南京苏恩瑞设备有限公司；温度测量采用 Ti32 型热成像仪，Fluke 公司；含水率测定采用 HS100 烘干法水分测定仪，武汉捷宝生物科技有限公司；质量测定采用 AB204-N 型电子分析天平，上海花潮实业有限公司。



a. 微波真空干燥箱



b. 水分测定仪



c. 电子分析天平



d. 热成像仪

图 3-2 主要实验仪器图

从冰箱取出玉米籽粒，静置一段时间后擦干水分，称取 20g 复水籽粒均匀放置于干燥箱的托盘上，干燥时间分别为 8min，16min，24min，32min，40min 取出籽粒，测量温度和含水率，不同时间需重新称取籽粒进行实验。

取不同含水率的玉米籽粒，静置至室温，放入干燥箱中，将干燥温度设置为 40℃，干燥时间设置为 60min，随机取 100 粒，并对出现的裂纹的籽粒进行记录。干燥结束后玉米籽粒的应力裂纹指数（SCI）参照如下公式统计：

$$SCI = 5A + 3B + C \quad (3-1)$$

式中，A、B、C 分别为 100 粒玉米种多裂纹、双裂纹和单裂纹籽粒的数量。

3.3 传热传质和应力模型

3.3.1 基本假设

为构建玉米传热、传质和应力模型，做出以下基本假设：玉米籽粒为各向同性均质体，玉米籽粒内部初始温度和水分分布均匀。初始应力为 0。玉米籽粒的固体体积保持不变，是一种粘弹性材料。干燥过程籽粒不受其他外力作用。

3.3.2 干燥腔内电磁方程

微波真空干燥箱内电磁方程，可用麦克斯韦波形方程表示^[64]：

$$\begin{cases} \nabla \times u^{-1}(\nabla \times \vec{E}) - w^2 \varepsilon \vec{E} = 0 \\ \varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') \\ w = 2\pi f \end{cases} \quad (3-2)$$

式中， u 为相对磁导率； $\vec{E}$ 为电场强度，V/m； w ：角频率，rad/s； ε 为复介电常数； ε_0 为自由空间的介电常数； ε' 为介电常数； ε'' 为有效损耗因子； u_0 为自由空间磁导率（ $u = u_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$ ）； f 为频率，Hz。

微波干燥过程中的电磁能量损耗^[65]：

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

式中， Q 为损耗功率，W/m³。

3.3.3 传热方程

根据能量守恒定律，微波干燥过程中玉米籽粒内部传热过程可以描述为^[66]：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_{eff} \nabla T) + Q \quad (3-4)$$

$$\text{其中：} \quad C_p = 1470 + 3600M / (1 + M) \quad (3-5)$$

$$K_{eff} = 1.33 \times 10^{-5} T^2 + 0.5964 M^2 - 9.32 \times 10^{-3} T - 2.273 M + 7.633 \times 10^{-3} TM + 1.706 \quad (3-6)$$

初始条件和边界条件为：

$$\begin{cases} t = 0, \quad T = T_0 \\ -QV = Ah_t (T - T_0) \end{cases} \quad (3-7)$$

式中, ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; K_{eff} 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; M 为干基含水率, kg/kg ; V 为体积, m^3 ; A 为表面积, m^2 ; h_t 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; t 为时间, s ; T_0 为初始环境温度, K 。

3.3.4 传质方程

玉米视为固相和水的液相组成的混合物, 水由液态转化成气态运输到环境中。

液态水和水蒸气的动量守恒方程为^[67]:

$$\begin{cases} \frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \vec{n}_w = -I \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + \nabla \vec{n}_g = I \end{cases} \quad (3-8)$$

式中, c_w 、 c_g 是水和水蒸汽的浓度, mol/m^3 ; t 为是时间, s ; $\vec{n}_w$ 、 $\vec{n}_g$ 分别是水、水蒸汽的通量, $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; I 为液态水的蒸发速率, $\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$ 。

$$\begin{cases} I = \frac{KM_w(p_{eq} + p_g)}{RT} \\ \vec{n}_w = \rho_w \vec{u}_w - D_w \nabla c_w \\ \vec{n}_g = \rho_g \vec{u}_g \end{cases} \quad (3-9)$$

其中:

式中, $\vec{u}_w$ 、 $\vec{u}_g$ 是由压力驱动下液态水和水蒸汽的流速, 由达西定律来描述为:

$$\vec{u}_i = -\frac{k_{in,i}k_{r,i}}{\mu_i} \nabla p (i = w, g) \quad (3-10)$$

初始条件和边界条件为:

$$\begin{cases} t = 0, \quad c = c_0 \\ c = c_0 - It \end{cases} \quad (3-11)$$

式中, K 为蒸发速率常数; M_w 为水的摩尔质量, kg/mol ; p_{eq} 为水的平衡蒸汽压, Pa ; p_g 为理想气体定律计算的蒸汽压, Pa ; R 为理想的气体常数; T 为温度, K ; D_w 为毛细管扩散率, m^2/s ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; ρ_g 为蒸汽的密度, kg/m^3 ; $u_i (i = w, g)$ 为流速, m/s ; $k_{in,i}$ 为内在渗透率, m^2/s ; $k_{r,i}$ 为相对渗透率, m^2/s ; μ_i

为粘度, Pa·s; p 为水的饱和蒸汽压, kg/m³; c_0 为初始水的浓度, mol/m³。

3.3.5 应力模型

在干燥过程中, 生物材料既表现出弹性特性, 也表现出部分粘性特性。将多孔生物材料视为粘弹性材料可以更准确地反映其内部应力变化特征^[68], 因此玉米可看成由固体和流体组成的粘弹性体, 表现出粘弹性行为, 用 Maxwell 模型表征玉米组织粘弹性最常用的模型。粘弹性应力-应变关系有以下表达式^[69]:

$$\sigma = D_d (\varepsilon - \varepsilon^d) + K_b (\varepsilon - \varepsilon^d) + S_q \quad (3-12)$$

式中, $G = \frac{E(t)}{2(1+u)}$, $K_b = \frac{E(t)}{3(1-2u)}$, D_d 为刚度矩阵, 由式 (2-13) 确定:

$$D_d = G \begin{pmatrix} \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad (3-13)$$

弹性模量与物料干燥时间、温度及含水率存在一定函数关系为^[31]:

$$\begin{cases} E(t) = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(\frac{-\xi}{\tau_i}\right) \\ \xi = \frac{t}{\partial_T \partial_M} \end{cases} \quad (3-14)$$

对玉米介质, ∂_T 、 ∂_M 为:

$$\begin{cases} \partial_T = \exp[-0.02(T - T_0) - 6.75 \times 10^{-4}(T - T_0)^2] \\ \partial_M = \exp[-170(M - M_0)] \end{cases} \quad (3-15)$$

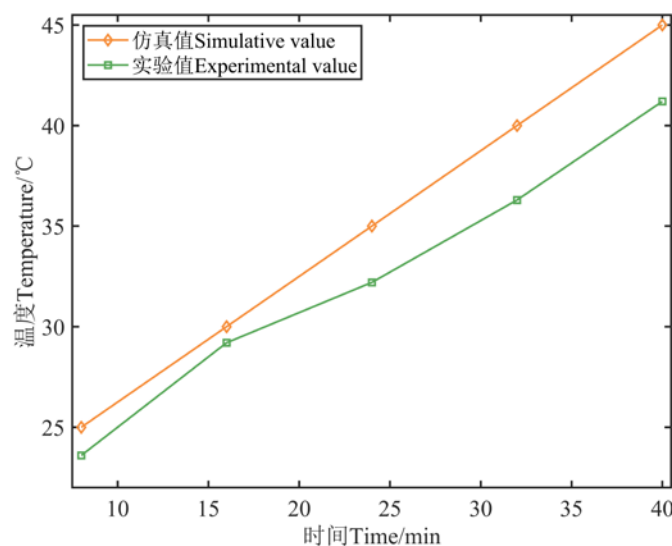
式中, D_d 为刚度矩阵, Pa; ε 为总应变; ε^d 为收缩应变; K_b 为体积弹性模量, Pa; S_q 为粘弹性应力, Pa; σ 为总应力, Pa; G 为剪切模量, Pa; $E(t)$ 为弹性模量, Pa; E_0 为玉米籽粒弹性模量, Pa; u 为泊松比; E_1 、 E_2 、 $E_3 \cdots$ 为多项式系

数； ξ 为总折算时间，s； τ_1 、 τ_2 、 τ_3 …弛豫时间，s； t 为干燥时间，s； ∂_T 为温度引起的变异因子； ∂_M 为水分引起的变异因子； T 为温度，K； M 为干基含水率，kg/kg。

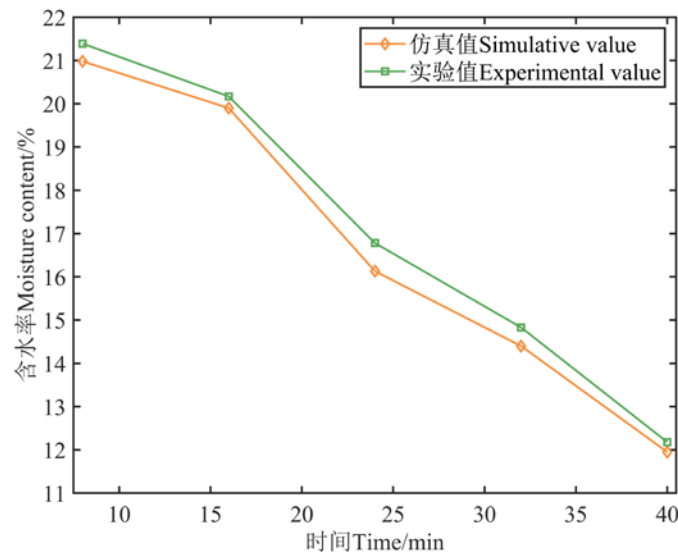
3.4 结果与分析

3.4.1 模型验证

玉米籽粒微波干燥过程温度（实验温度 40℃）和含水率（30±2%）实验值和仿真值如图 3-3 所示。从图中可以看出，温度的实验值略低于仿真值，而含水率高于仿真值，主要是因为，一是在工作时微波干燥箱的频率是不断变化的，二是实验测量温度时物料会散失部分热量。玉米籽粒温度随时间增加而升高，含水率先是缓慢下降，后快速下降，这是因为随着干燥时间的增加，温度不断上升，玉米籽粒内部的水分向外界传递加速。温度和含水率的仿真和实验值变化趋势基本一致，两者间最大误差分别为 8.04%和 9.91%，表明干燥模型可进行玉米籽粒温度、含水率和应力的研究。



a. 玉米籽粒的温度变化

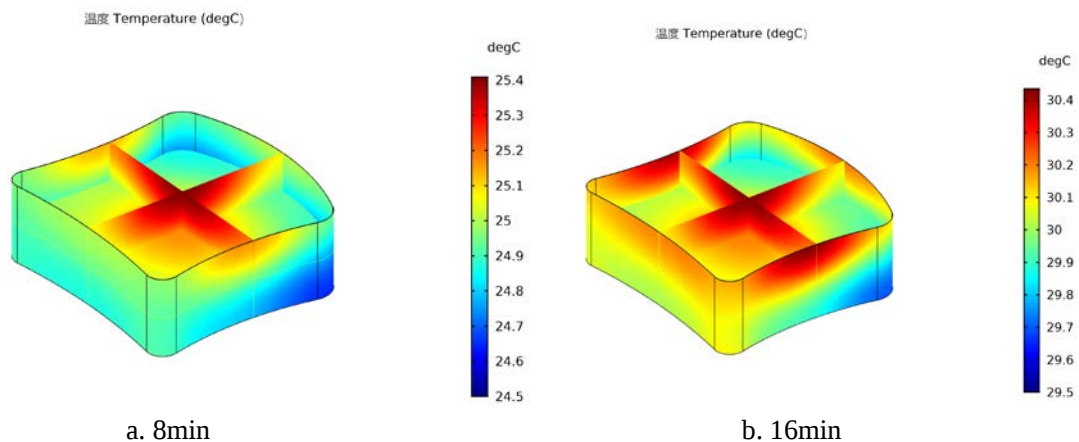


b. 玉米籽粒的含水率变化

图 3-3 干燥过程中玉米籽粒温度和含水率的实验值和仿真值

3.4.2 干燥过程温度和热应力变化

图 3-4 为玉米籽粒在不同时刻 ($t=8, 16, 24, 32, 40\text{min}$, 初始含水率 $30\pm2\%$) 温度变化规律。从图 3-4 和图 3-3a 可以看出, 玉米籽粒温度随干燥时间增加而升高, 在干燥 8~16min 和 24~32min 内温度上升较快, 在 32min 时温度差值最大为 2.3°C 。图 3-4 显示干燥过程中玉米籽粒中心温度最高, 内部温度始终高于外部温度, 干燥开始时内部快速升温, 表面升温慢, 内外温度存在明显温度梯度。随着干燥的进行, 内部升温速度下降, 外部开始逐渐升温, 内外温差降低, 并且微波加热存在不均匀性, 玉米籽粒始终存在热点。这是由于微波干燥是一种内部加热的方法, 干燥时物料内部的水分子发生剧烈的碰撞和摩擦, 产生大量热量使水的温度升高蒸发而离开物料, 从而使物料得到干燥。



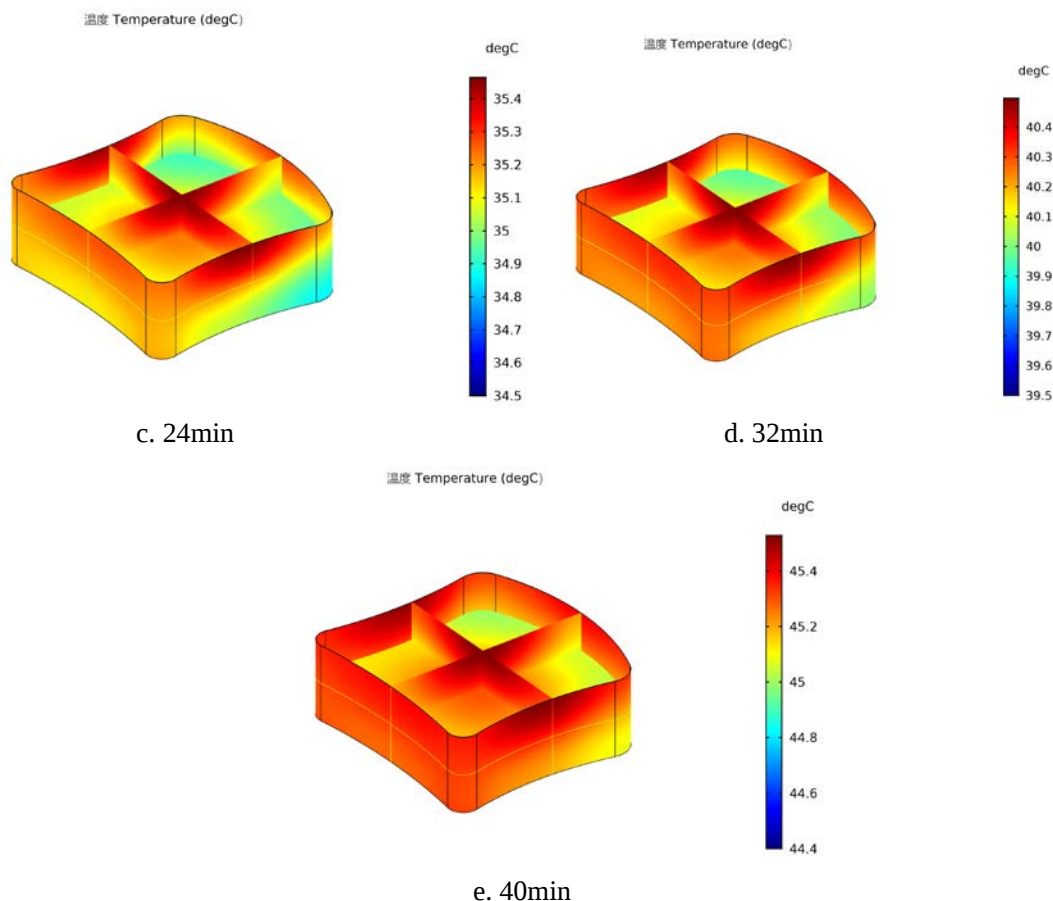
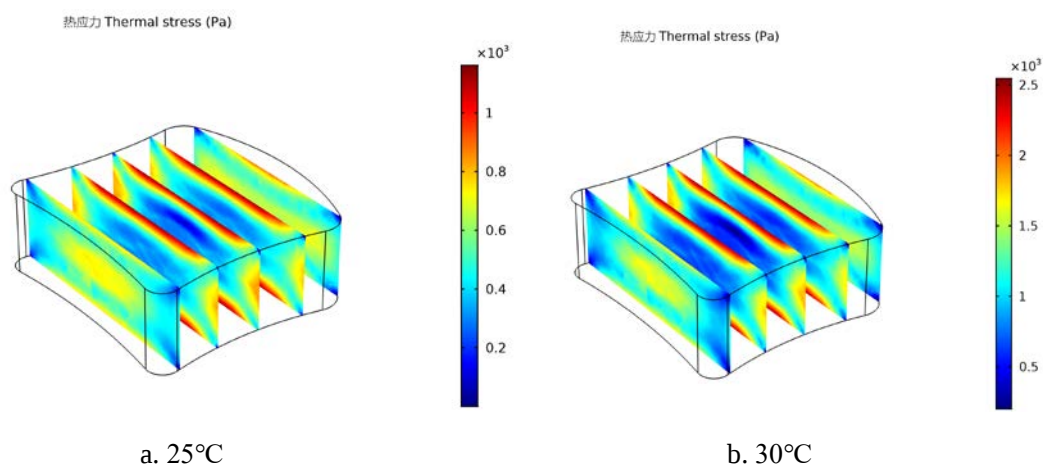


图 3-4 温度变化图

图 3-5 为玉米籽粒在不同温度 ($T=25, 30, 35, 40, 45^{\circ}\text{C}$, 初始含水率 $30\pm 2\%$) 下热应力变化规律。热应力随温度升高而增大, 30°C 和 35°C 时内外热应力变化明显, 在 45°C 时应力最大为 7690Pa 。热应力沿着长度方向先增大后减小, 两侧小于中间, 厚度方向沿中间先减小后增大, 上下表面和中间位置应力较大, 极易产生裂纹, 魏硕^[60]等模拟玉米干燥应力时获得相似结果, 且实验玉米籽粒产生裂纹处与热应力最大处相对应。



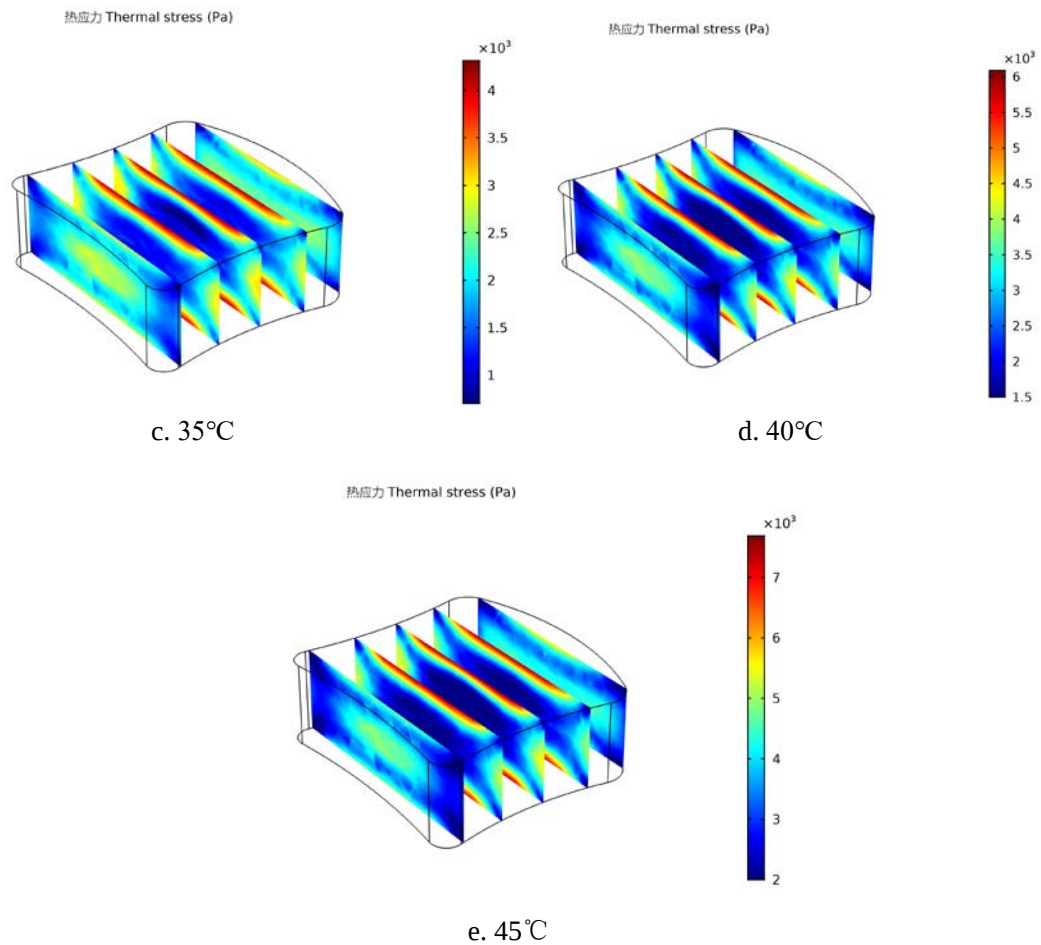


图 3-5 热应力变化图

图 3-6 为不同含水率玉米籽粒在不同温度 ($T=25, 30, 35, 40, 45^{\circ}\text{C}$) 下应力变化规律。从图 3-6 可以得出, 不同含水率的玉米籽粒, 随温度的升高, 应力逐渐增大。在不同温度下, 玉米籽粒含水率为 16.13% 时应力最大, 含水率为 20.98% 时应力最小, 应力受含水率影响较大。温度小于 35°C 时, 应力差值较大, 大于 35°C 时, 应力差值逐渐减小。

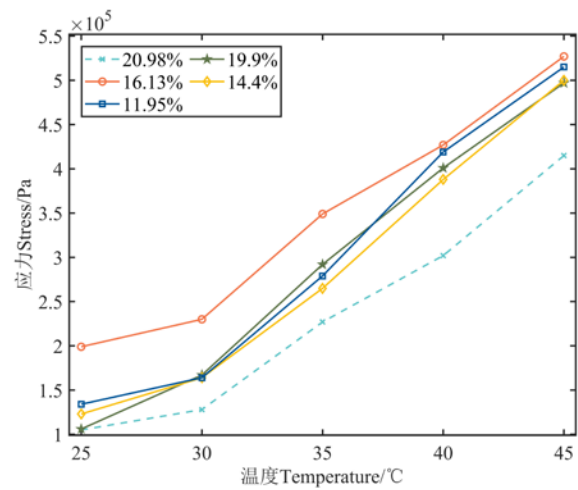
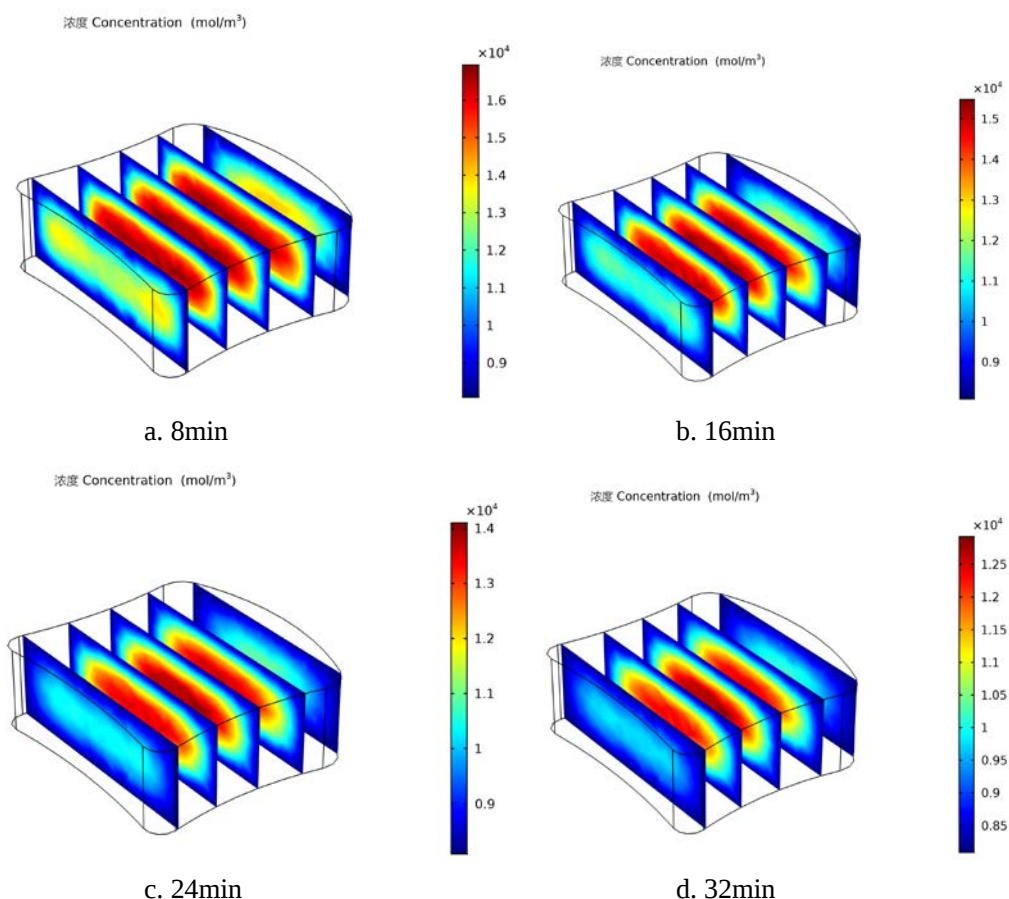


图 3-6 总应力随温度变化图

3.4.3 干燥过程含水率和湿应力变化

图 3-7 为玉米籽粒在不同时刻($t=8, 16, 24, 32, 40\text{min}$, 初始含水率 $30\pm 2\%$) 含水率变化规律。水分从内部向外部转移, 籽粒内部水分扩散明显。越靠近中心, 水分迁移和扩散越快, 从而形成水分梯度。在图 3-3b 中, 玉米籽粒的水分梯度随着干燥时间的延长先增大后减小, 最大水分梯度出现在 $t=16\sim 24\text{min}$ 时。表面含水量总是低于中心含水量。沿长度方向和厚度方向, 含水量逐渐降低, 并且存在明显的水分梯度, 长度方向大于厚度方向。这是因为微波干燥是从内部开始加热的, 内部的液态水首先转化为水蒸气。干燥初期, 内部水分迅速减少, 表面变化不大。随着干燥的进行, 内部水分减少得更慢, 而外部水分开始减少, 最终达到干燥的目的。



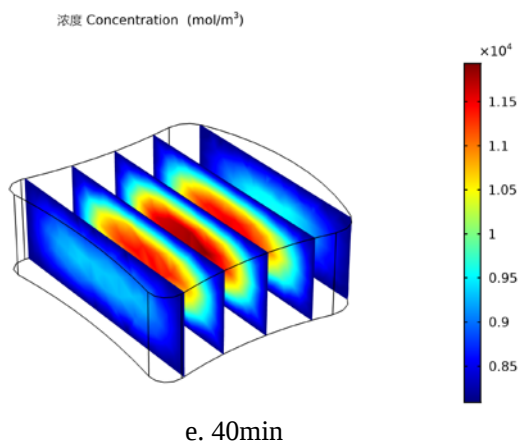
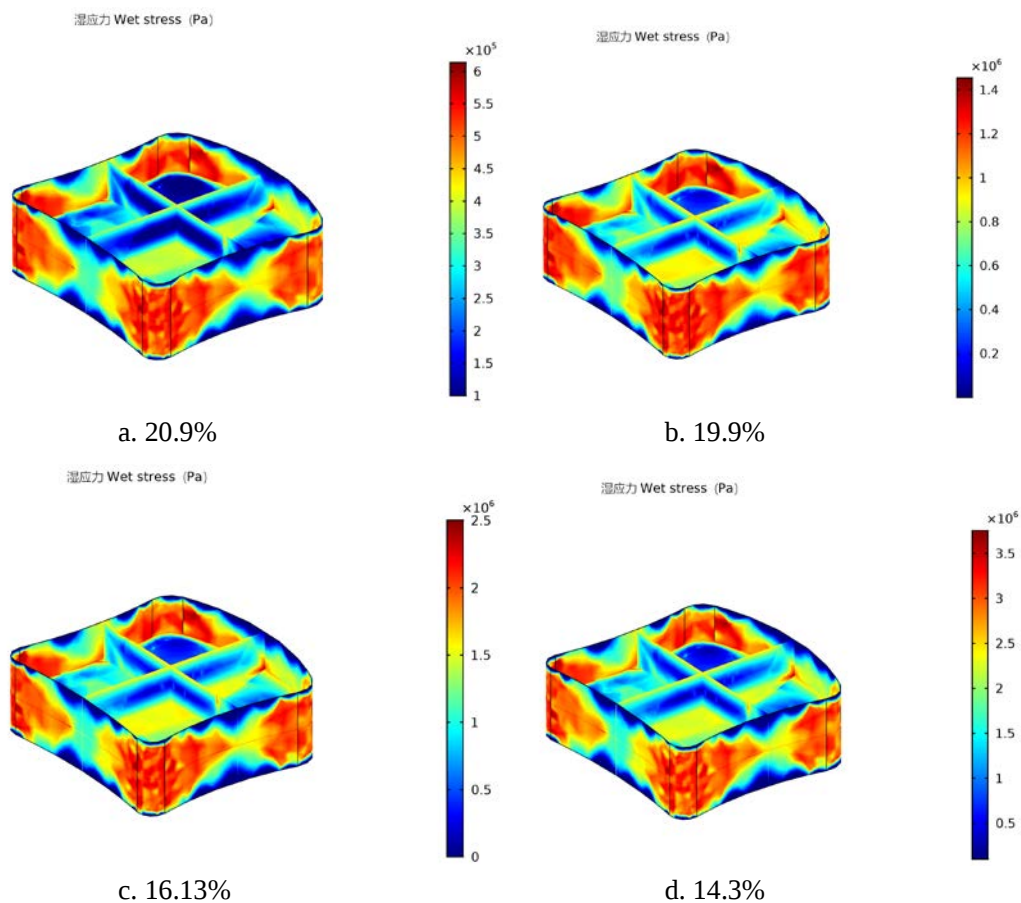
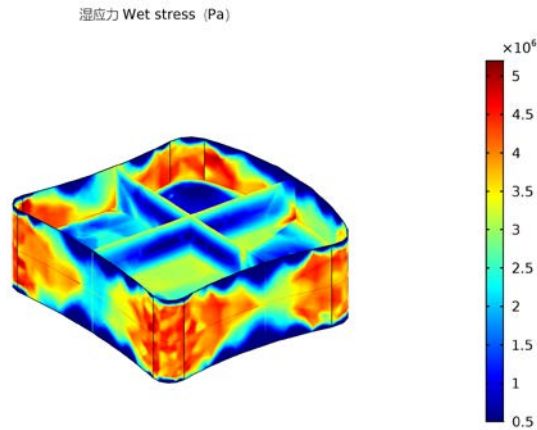


图 3-7 含水率变化图

图 3-8 为玉米籽粒在不同含水率 ($M=20.4, 19.9, 16.13, 14.3, 11.6\%$) 下湿应力变化规律。从图 3-8 可以得出, 玉米籽粒四周应力值较大, 且存在应力集中现象, 极易产生裂纹, 表面湿应力值始终大于内部, 湿应力模拟数值与已有研究结果相近^[62]。湿应力在长度和厚度方向上的变化与含水率的变化一致, 由于内部的水分梯度较低, 湿应力大小基本一致。表面在干燥过程中, 存在明显的水分梯度易产生裂纹, 玉米籽粒因湿应力产生损伤较明显, 是玉米籽粒产生裂纹的主要原因。





e. 11.6%

图 3-8 湿应力变化图

图 3-9 为不同温度玉米籽粒在不同含水率下应力变化规律。从图 3-9 可以看出，随着含水率的降低，湿应力先增大后降低再增大，这是因为干燥刚开始时，微波的突然馈入导致水分快速变化，所以湿应力较大，随着干燥正常进行，湿应力有所减小，含水率为 16.13% 时，此时水分梯度最大，湿应力最大为 $5.27 \times 10^5 \text{Pa}$ 。温度越高，随着含水率的降低，湿应力变化越明显。

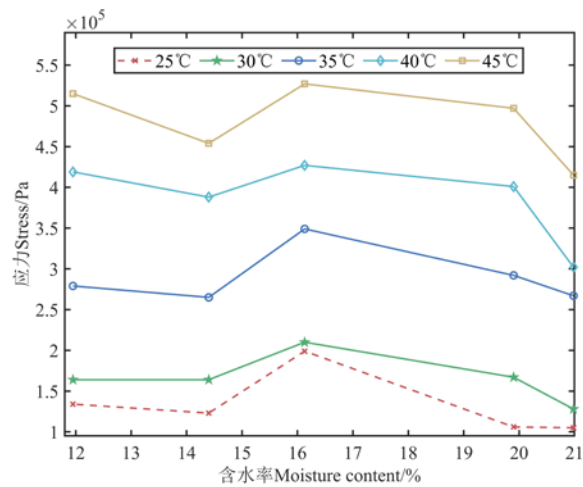


图 3-9 总应力随含水率变化图

3.4.4 总应力分析

通常认为谷物籽粒的干燥应力是由温度分布不均和水分梯度导致内外不均匀收缩而产生的。图 3-6 为不同含水率玉米籽粒的应力随温度变化规律，图 3-9 为不同温度玉米籽粒的应力随含水率变化规律。表 3-1 为不同含水率下玉米籽粒的应力裂纹指数。可以图 3-5 和图 3-8 看出，热应力远远小于湿应力，基本可以忽略不计，但温度可以通过影响弹性模量间接影响湿应力的大小，进而导致总应

力变化。从图 3-6 和图 3-9 可以看出, 总应力随温度升高而增大, 随含水率变化先减小后增大再减小, 与水分梯度变化趋势一致, Srisang 等^[70]模拟糙米和 Wu^[71]等研究玉米干燥应力得到相似结果。从表 3-1 可以看出, 应力裂纹指数先增大后减小, 与总应力变化相对应。从图 3-6, 图 3-9 和表 3-1 可以得出, 含水率在 16.13% 时, 此时总应力最大, 应力裂纹指数最大, 这是由于此时玉米籽粒的水分梯度最大, 是造成玉米籽粒产生裂纹的主要原因。

表 3-1 不同含水率下的裂纹指数的值

含水率/%	20.4	19.9	16.13	14.3	11.6
A	1	3	2	2	4
B	3	4	7	3	2
C	15	21	23	17	20
SCI	29	48	54	36	44

3.5 本章小结

本章建立玉米籽粒传热传质以及应力模型, 应用 COMSOL Multiphysics 5.5 多物理场仿真软件进行仿真, 并把玉米籽粒看成粘弹性体, 提高了玉米籽粒应力仿真的准确性。

玉米籽粒温度和含水率变化的实验值与模拟值有很好的吻合度, 最大误差分别为 8.04% 和 9.91%。干燥过程中, 温度随时间增加而升高, 内部温度始终高于外部, 含水率随时间先快速下降后变缓, 表面含水率始终低于中心含水率, 表面存在明显水分梯度, 沿着长度方向和宽度方向, 随着温度升高, 含水率逐渐降低。

在干燥过程中, 玉米籽粒的热应力随着温度的升高而增大, 而湿应力先增大后减小。总应力和应力裂纹指数与湿应力和水分梯度的变化一致。水分梯度越大, 湿应力和应力裂纹指数越大, 是引起裂纹的主要原因, 含水率为 16.13% 时, 应力和应力裂纹指数最大, 玉米籽粒裂纹最多。

第4章 玉米籽粒微波干燥应力裂纹产生机理的研究

4.1 引言

在玉米籽粒干燥过程中，会因干燥应力产生裂纹，降低抗断裂强度。当搬运和运输时，带有裂纹的谷物比完好的谷物更容易破碎。裂纹的多少是衡量玉米干燥品质的重要指标。玉米籽粒干燥过程中温度和水分梯度产生的应力是裂纹形成的主要原因。当材料受到超过其屈服应力的作用力时，就会产生裂纹。因此，有必要基于玉米籽粒的温度和水分含量对其裂纹形成机理进行研究。目前关于干燥裂纹研究主要是探究不同因素下裂纹产生的情况，而很少提及温度和含水率对裂纹产生的影响，但在干燥过程中温度和含水量是裂纹产生的主要原因。本章以玉米籽粒为研究对象，建立微波干燥过程中多相传输以及变形的仿真模型，实验数值与仿真数值对比验证模型的准确性，并通过研究温度和湿度梯度对裂纹产生的影响，分析裂纹产生的机理，为玉米微波干燥过程中裂纹的研究提供参考。

4.2 材料与方法

4.2.1 材料

玉米籽粒为郑单 958 号，选用色泽正常饱满无裂纹的作为实验材料。实验前进行浸泡复水，在不同浸泡时间下取出，采用 105℃烘干至恒质量的方法，获得不同初始干基含水率的玉米籽粒，并将不同初始含水率的玉米籽粒装入密封袋，储藏在 4℃冰箱中备用，实验前取出，室温平衡 4h。

4.2.2 分析方法

微波干燥箱，工作频率为 2.45GHz，功率设置为 0.35W/g。完整的干燥三维模型包括腔体、玉米籽粒、磁控管、物料等。微波加热物理场对电磁方程和固体传热方程进行求解，稀物质传递物理场对质量守恒方程进行求解，将能量守恒和质量守恒仿真结果与固体力学和变形几何耦合求解变形。

模型仿真结果和精度主要受网格划分的影响，物料参数的不同导致网格划分情况不同。为保证玉米籽粒微波干燥仿真时的准确性，网格尺寸（ h_n ）根据自由空间的波长（ λ_w ）和物料的介电常数确定：

$$h_n = \frac{\lambda_w}{\varepsilon'} \quad (4-1)$$

4.2.3 实验方法

实验仪器如图 3-2 所示。微波干燥采用 RWBZ-08S 型微波真空干燥箱，南京苏恩瑞设备有限公司；温度测量采用 Ti32 型热成像仪，Fluke 公司；含水率测定采用 HS100 烘干法水分测定仪，武汉捷宝生物科技有限公司；质量测定采用 AB204-N 型电子分析天平，上海花潮实业有限公司。

采用微波干燥箱对玉米籽粒进行微波干燥实验。取出不同初始含水率（ $39\pm2\%$ ， $35\pm2\%$ ， $31\pm2\%$ ， $27\pm2\%$ ， $23\pm2\%$ ）的玉米籽粒，擦干水分后静置至室温，测量初始温度和质量，均匀放置于干燥箱的托盘上，干燥温度设置为 30°C ， 35°C ， 40°C ， 45°C ， 50°C ，干燥 45min 后取出籽粒，再次测量温度和质量，不同温度和含水率需重新称取籽粒进行实验。玉米籽粒实验后冷却至室温，随机取不同干燥温度和含水率下的玉米籽粒 100 粒，并对出现的裂纹的籽粒进行记录。干燥结束时玉米籽粒的应力裂纹指数（ SCI ）参照式（3-1）统计。

4.3 多相传输和变形模型

4.3.1 基本假设

为了构建玉米干燥过程中的质量守恒、能量守恒和变形模型，进行如下基本假设：玉米籽粒为各向同性均质体，玉米籽粒内部初始温度和水分分布均匀。初始应力为 0，干燥过程籽粒不受其他外力作用。玉米籽粒的固体体积保持不变，为多孔介质。干燥过程籽粒不受其他外力作用。

4.3.2 干燥腔内电磁方程

微波真空干燥箱内电磁方程，可以用麦克斯韦波形方程表示^[64]：

$$\begin{cases} \nabla \times u^{-1}(\nabla \times \vec{E}) - w^2 \varepsilon \vec{E} = 0 \\ \varepsilon = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') \\ w = 2\pi f \end{cases} \quad (4-2)$$

式中， u 为相对磁导率； $\vec{E}$ 为电场强度，V/m； w ：角频率，rad/s； ε 为复介电常数； ε_0 为自由空间的介电常数； ε' 为介电常数； ε'' 为有效损耗因子； u_0 为自由空间磁导率（ $u = u_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$ ）； f 为频率，Hz。

微波干燥过程中的电磁能量损耗^[65]：

$$Q = \frac{1}{2} w \varepsilon_0 \varepsilon'' |\vec{E}|^2 \quad (4-3)$$

式中， Q 为损耗功率，W/m³。

4.3.3 质量守恒方程

玉米籽粒视为固相、液态水、水蒸气和空气的混合物。微波干燥过程中物质的运输由多相多孔介质模型约束。

液相和气相所占的体积分数根据总孔隙率定义，由下式给出：

$$\varphi = \frac{\Delta V_w + \Delta V_g}{\Delta V} = \varphi_w + \varphi_g \quad (4-4)$$

式中， ΔV_w 和 ΔV_g 分别为液态水和气体所占据的体积，m³； ΔV 为物料的总体积，m³； φ_w 和 φ_g 分别为液相和气体的孔隙率。

在干燥过程中，物料发生变形，但固体体积不变，可通过固体体积不变确定任意时刻的孔隙率^[33]：

$$\Delta V(1 - \varphi) = \Delta V_0(1 - \varphi_0) \quad (4-5)$$

式中， ΔV 为玉米的初始总体积，m³； φ_0 为玉米的初始孔隙率。

液态水、气体和水蒸气的动量守恒方程如下^[67]：

$$\begin{cases} \frac{\partial c_w}{\partial t} + \nabla \vec{n}_w = -I \\ \frac{\partial c_g}{\partial t} + \nabla \vec{n}_g = I \\ \frac{\partial c_v}{\partial t} + \nabla \vec{n}_v = I \end{cases} \quad (4-6)$$

水和气体饱和度可由 c_w 求得^[33]:

$$\begin{cases} S_w = \frac{C_w M_v}{\phi \rho_w} \\ S_g = 1 - S_w \end{cases} \quad (4-7)$$

液态水的蒸发速率由以下方程控制^[72]:

$$I = K(p_{eq} - p_v)S_g \phi \quad (4-8)$$

在多孔物料中, 水蒸气和液态水处于平衡状态, 特定含水率和温度下的平衡蒸汽压可用水分等温线描述^[73]:

$$\ln \frac{p_{eq}}{p_{sat}} = -0.0267 M^{-1.656} + 0.0107 e^{-1.287 M} M^{-1.513} \ln(p_{sat}(T)) \quad (4-9)$$

式中, C_w , C_g 和 C_v 分别为液态水, 蒸汽和气体的浓度, mol/m^3 ; $\vec{n}_w$, $\vec{n}_g$ 和 $\vec{n}_v$ 分别为液态水, 气体和蒸汽的通量, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; t 为时间, s ; I 为水的蒸发速率, $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; S_w 和 S_g 为液态水和气体的饱和度; M_v 为蒸汽的摩尔质量, kg/mol ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; K 为蒸发速率常数; p_{eq} 、 p_v 和 p_{sat} 分别为水的平衡蒸汽压, 理想气体定律计算的蒸汽压和纯水的饱和蒸汽压, Pa ; M 为物料含水率; T 为温度, k 。

水、气体和蒸汽的通量由以下方程控制^[33]:

$$\begin{cases} \vec{n}_w = \rho_w \vec{u}_w - D_w \nabla c_w \\ \vec{n}_g = \rho_g \vec{u}_g \\ \vec{n}_v = \rho_w \vec{u}_w - \left(\frac{C_g^2}{\rho_g} \right) M_v M_a D_{bin} \nabla x_v \end{cases} \quad (4-10)$$

液态水和气体流动速度, 由达西定律控制:

$$\vec{u}_i = -\frac{k_{in,i}k_{r,i}}{\mu_i}\nabla p(i=w,g) \quad (4-11)$$

其中水的毛细管扩散率由下面方程控制：

$$D_w = -\rho_w \frac{k_{in,w}k_{r,w}}{\mu_i} \frac{\partial p_c}{\partial c_w} \quad (4-12)$$

式中， D_w 为水的毛细管扩散率， m^2/s ； $\vec{u}_i$ 流速， m/s ； μ_i 为黏度； p 为蒸汽总压力， Pa ； $k_{in,i}$ 和 $k_{r,i}$ 分别为内在渗透率和相对渗透率， m^2 ； ρ_g 为水蒸气的密度， kg/m^3 ； M_a 为水蒸汽的摩尔质量， kg/mol ； D_{bin} 为蒸汽扩散率， m^2/s ； x_v 为蒸汽的体积分数。

4.3.4 能量守恒方程

玉米干燥过程中，液相和固相在同一个位置上具有相同的温度，因此能量守恒方程包括流体相对流，热传导，蒸发冷却和微波热源项：

$$\rho_{eff}C_{p,eff}\frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{i=w,v,a}(\vec{n}_i\nabla(C_{p,i}T)) = \nabla(K_{eff}\nabla T) + Q - \lambda_h I \quad (4-13)$$

其中^[67]：

$$\begin{cases} \rho_{eff} = \varphi(S_g\rho_g + S_w\rho_w) + \rho_s(1-\varphi) \\ C_{p,eff} = m_sC_{p,s} + m_w(S_wC_{p,w} + m_gC_{p,g}) \\ K_{eff} = K_s(1-\varphi) + \varphi(S_wK_w + S_g(k_vw_v + k_aw_a)) \end{cases} \quad (4-14)$$

式中， w, v, a 分别为液态水，水蒸气和空气； ρ_{eff} ， $C_{p,eff}$ ， K_{eff} 分别为加权后密度， kg/m^3 ，比热容， $J/(kg\cdot K)$ ，导热系数， $W/(m\cdot K)$ ； $C_{p,i}$ 为 i 相的比热容， $J/(kg\cdot K)$ ； λ_h 为蒸发潜热， J/kg ； ρ_s 为固体的密度， kg/m^3 ； m_s ， m_w 和 m_g 分别为固体，液体和气体总的质量分数； k_a 和 k_v 分别为空气和蒸汽的体积分数； w_a 和 w_v 分别为空气和蒸汽的质量分数。

4.3.5 固体变形

食品在传热传质过程中的变形梯度 F ，是由弹性变形梯度 F_{el} 和水分梯度 F_M

共同作用产生^[74-75]:

$$F = F_{el} F_M \quad (4-15)$$

弹性变形取决于材料的弹性特性, 即弹性模量和泊松比, 水分梯度产生的变形是指物料水分损失导致的体积变化^[76]。

固体动量守恒表示微波干燥过程中物料内部产生的应力^[76]:

$$\begin{cases} \nabla \sigma = \nabla p \\ \sigma = S F_{el}^T \end{cases} \quad (4-16)$$

第二个 Piola-Kirchhoff 应力 s 是亥姆霍兹自由能与柯西-格林变形张量 c 的偏导数可以表示为体积和等容分量的总和^{[69][77]}:

$$S = 2 \frac{\partial \psi(C, \Gamma, \dots, \Gamma_m)}{\partial c_w} = S_{vol}^\infty + S_{iso} = S_{vol}^\infty + S_{iso}^\infty + \sum_{\partial=1}^m Q_{\partial} \quad (4-17)$$

其中:

$$\begin{cases} \psi(C, \Gamma, \dots, \Gamma_m) = \psi_{vol}^\infty(J^e) + \psi_{iso}^\infty(\bar{C}) + \sum_{\partial=1}^m \gamma_{\partial}(\bar{C}, \Gamma_{\partial}) \\ \psi_{vol}^\infty(J^e) = \frac{\kappa}{2} (J^e - 1)^2 \\ \kappa = (1 - 2\nu)(C_1 + C_2) / 2 \\ \psi_{iso}^\infty(\bar{C}) = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + C_3(\bar{I}_1 - 3)(\bar{I}_2 - 3) \\ Q_{\partial} = \exp\left(\frac{-T}{\tau_{\partial}}\right) Q_{\partial 0} \int_0^T \exp\left(-\frac{(T-t)}{\tau_{\partial}}\right) p \beta_{\partial}^\infty S_{iso}^\infty(\bar{C}) \end{cases} \quad (4-18)$$

式中, p 为蒸汽产生的气体压力, Pa; σ 为应力, Pa; F 为变形梯度; S 为第二个 Piola-Kirchhoff 应力, Pa; S_{iso}^∞ 和 S_{vol}^∞ 分别为平衡等容和体积应力, Pa; Q_{∂} 为张量变量; ψ_{vol}^∞ 和 ψ_{iso}^∞ 分别为体积弹性响应和等容弹性响应, Pa; J^e 为弹性响应的雅可比; γ_{∂} 为粘弹性的耗散势; κ , C_1 , C_2 , C_3 , $\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$ 为常数; τ 弛豫时间, s; β_{∂}^∞ 为无量纲应变能因子; Γ_{∂} 为粘弹性等容响应, Pa; ν 为泊松比。

4.3.6 边界条件

假设干燥箱内壁是电场为零的完美电导体。电场的切向分量为零:

$$E_t = 0 \quad (4-19)$$

液态水从材料内部移动并到达表面，在表面形成对流变成蒸汽。液态水和蒸汽在样品边界的通量为^[76]：

$$\begin{cases} \bar{n}_{w,s} = h_m \varphi S_w (\rho_v - \rho_{v,oven}) \\ \bar{n}_{v,s} = h_m \varphi S_w (\rho_v - \rho_{v,oven}) + c_v \bar{u}_v \end{cases} \quad (4-20)$$

物料表面产生对流传热^[33]：

$$q_n = \frac{\bar{n}_{w,s} C_{p,v} T}{M_w} + h_m \varphi S_w (\rho_v - \rho_{v,amb}) \left(\frac{Ev}{(1+v)(1-2v)} + C_{p,v} T \right) + h_t (T - T_a) \quad (4-21)$$

式中， E_t 为干燥箱内切向电场，V/m； $\bar{n}_{w,s}$ ， $\bar{n}_{v,s}$ 分别为液态水和蒸汽在边界出的通量，mol/(m²·s)； h_m 为传质系数，m/s； h_t 为传热系数，W/(m²·K)； ρ_v 为蒸汽密度，kg/m³； $\rho_{v,oven}$ 为微波炉内水蒸气的密度，kg/m³； $\bar{u}_v$ 为蒸汽的流速，m/s； q_n 为物料表面的对流传热量，W/m²； $\rho_{v,amb}$ 为环境周围蒸汽的密度，kg/m³； T_a 为环境周围温度，K。

表4-1 材料和物理特性参数

参数	数值或方程	参考文献
玉米籽粒密度 (kg/m ³)	1240	
玉米籽粒比热容 (J/(kg·K))	1470 + 3600M / (1 + M)	[78]
玉米籽粒导热系数 (W/(m·K))	1.33×10 ⁻⁵ T ² + 0.5964M ² - 9.32×10 ⁻³ T - 2.273M + 7.633×10 ⁻³ TM + 1.706	[79]
玉米籽粒水分扩散系数 (m ² /s)	7.817×10 ⁻⁵ exp(5.5M)exp(-4850/T)	[80]
玉米籽粒泊松比	0.32	[81]
玉米籽粒弹性模量 (MPa)	exp(12.07 - 0.01792T - 10.4M)	[82]
玉米籽粒屈服应力 (MPa)	0.0386(100M - 9.7) ² + 29.6 - 1.962(100M - 9.7) - 0.1016	[83]

续表 4-1

参数	数值或方程	参考文献
水的密度 (kg/m^3)	998	
蒸汽的密度 (kg/m^3)	理想气体	
水的比热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	4183	[84]
蒸汽的比热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	1900	[84]
水的导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	$0.59 + 9.8 \times 10^{-4}T$	[84]
气体的导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	0.026	[84]
有效汽化潜热 (J/kg)	$383650(647.1 - T)^{0.316}(1 + 0.8953\exp(-12.32M))$	[78]

4.4 结果与分析

4.4.1 模型验证

玉米籽粒微波干燥过程中温度变化实验值和仿真值如图 4-1 和图 4-2 所示, 不同位置的籽粒温度不同。主要是因为, 一是微波干燥箱工作时不同位置的功率不一样, 二是测量温度时物料会散失部分热量。由于微波加热的不均匀性, 有热点存在。玉米籽粒微波干燥过程中水的浓度随干燥温度变化实验值和仿真值如图 4-3 所示, 变化趋势基本一致, 两者间最大误差分别为 4.73%和 7.76%, 表明干燥模型可用于玉米籽粒传热传质以及变形的研究。水的浓度先是缓慢下降, 后快速下降, 在 $40\sim 45^\circ\text{C}$ 下降速度最快, 在 $45^\circ\text{C}\sim 50^\circ\text{C}$ 下降速度降低, 主要是因为玉米籽粒内部水分梯度降低, 导致水分向外传递的压力减小。

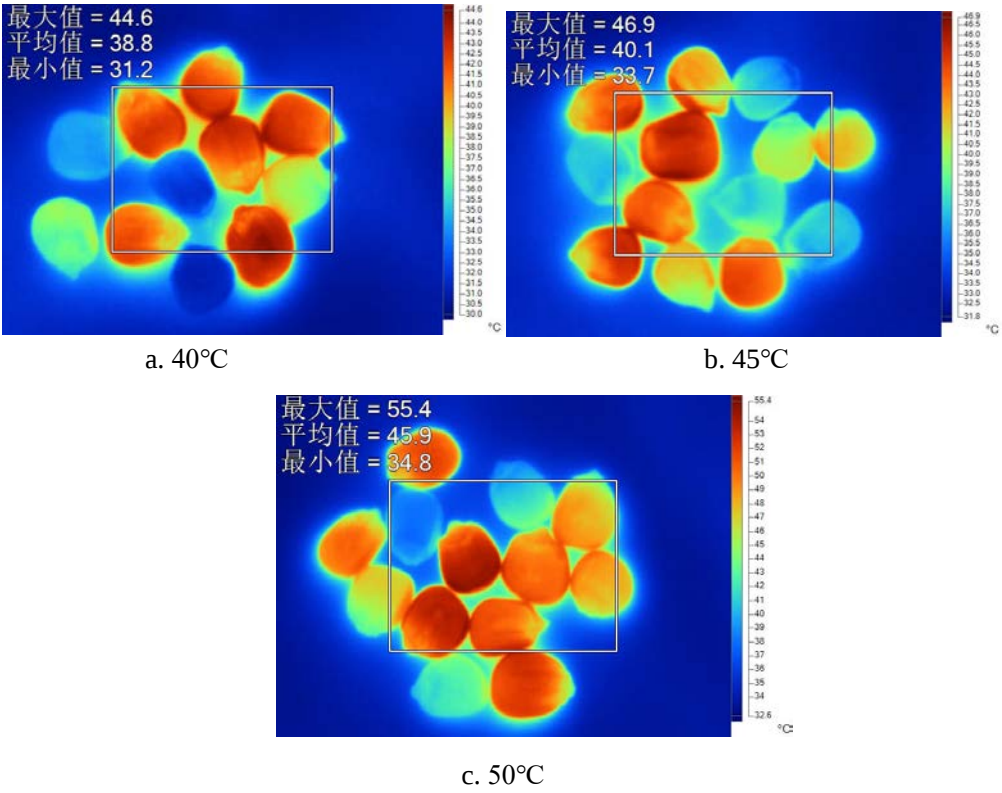
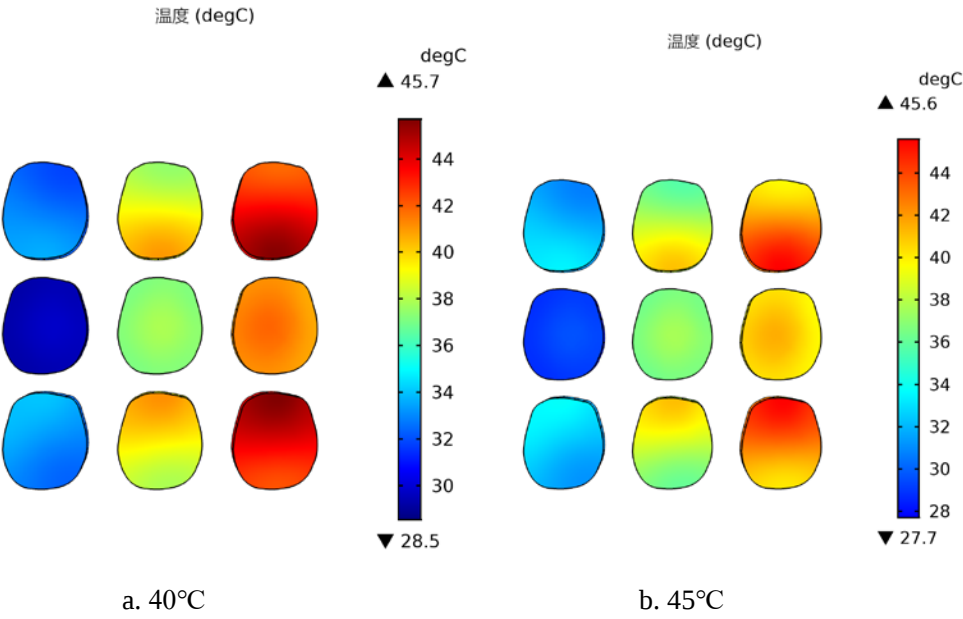


图 4-1 温度的实验值



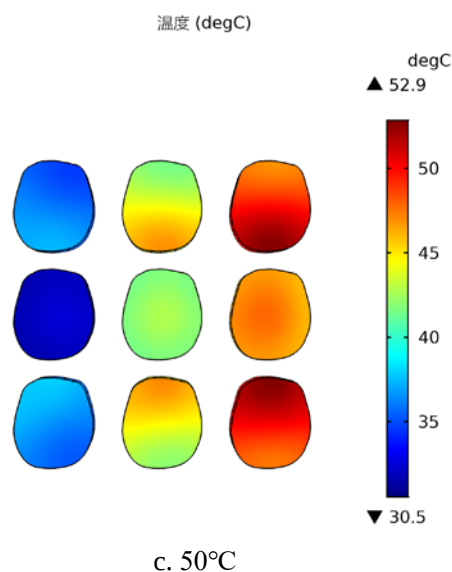


图 4-2 温度的仿真值

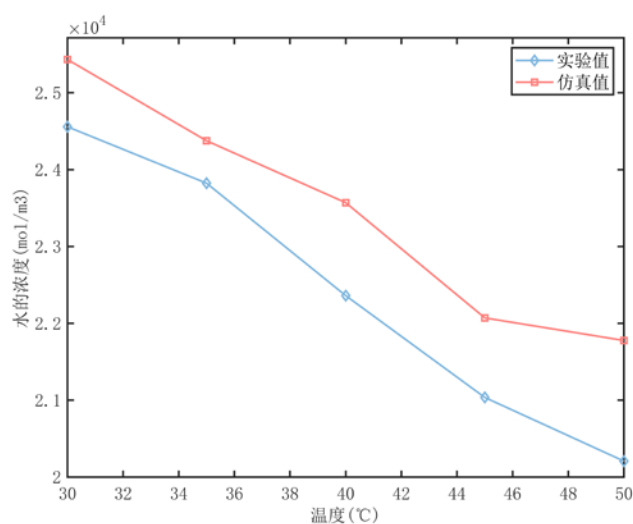


图 4-3 水的浓度随干燥温度变化的实验值和仿真值

4.4.2 干燥温度对变形影响的分析

以玉米籽粒长度方向为 x 轴，宽度方向为 y 轴，厚度方向为 z 轴。图 4-4 为玉米籽粒在不同干燥温度下 x 轴方向变形规律。变形随着温度的升高逐渐增大，且变形不断向表面和边缘延伸，两侧变形始终大于内部变形，Mahiuddin 等^[85]通过研究干燥过程中食品材料的收缩时获得了相似的结果。变形沿 x 轴方向先增大后减小，离微波馈入口近，吸收的能量多的位置变形大。边缘处变形较大，是因为微波干燥是从内部开始加热，边缘存在较大的温度梯度，也是产生裂纹的主要区域之一。

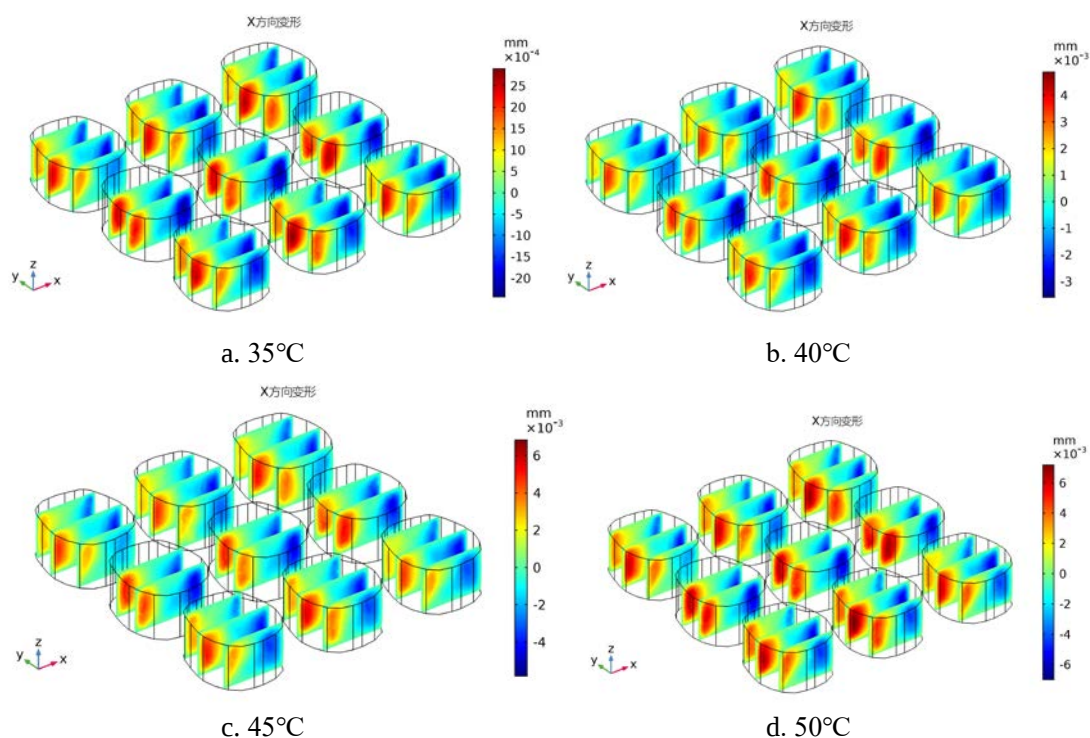
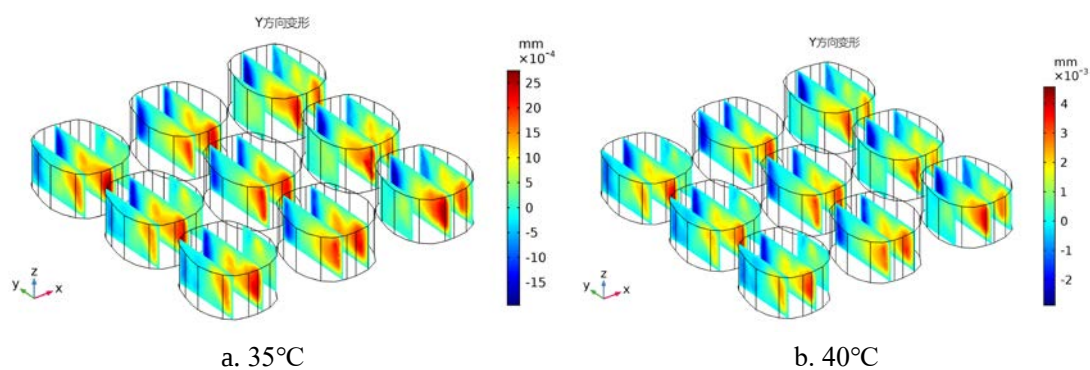


图 4-4 x 轴方向变形

图 4-5 为玉米籽粒在不同干燥温度下 y 轴方向变形规律。变形随温度的升高而逐渐增大，40°C 下变形最均匀，说明干燥温度为 40°C 时含水率也更加均匀，因为变形主要与温度和含水率有关且含水率起主要作用。变形沿 y 轴方向呈阶梯性降低，主要发生在 y 轴的右侧，最大处在右侧的边缘，也是热点所在位置，与实验裂纹产生的主要位置一致。变形沿 y 轴方向分布不均匀，出现局部变形最大值，并可能发生玉米籽粒结构的变化。



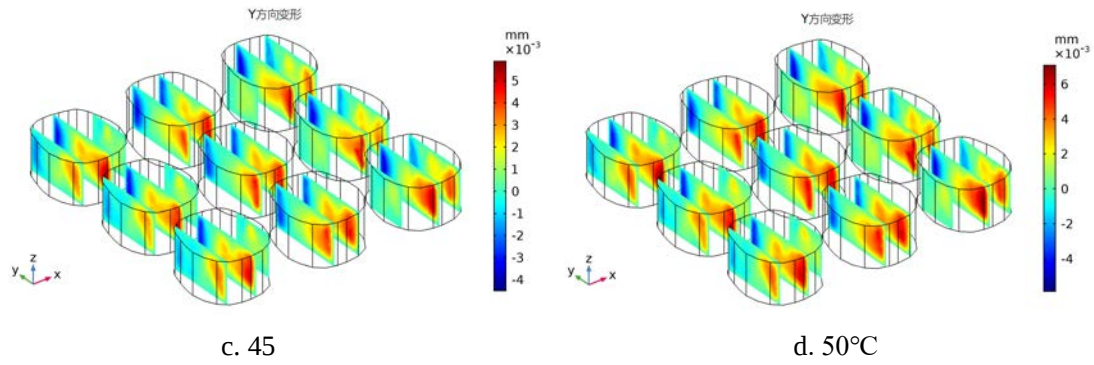


图 4-5 y 轴方向变形

图 4-6 为玉米籽粒在不同干燥温度下 z 轴方向变形规律。变形随着温度的升高直线增大，沿 z 轴方向逐渐降低。将玉米籽粒沿中间分成上下两部分，上半部变形始终小于下半部变形，变形分布均匀。随着干燥的进行，下半部分变形变化明显。与 x 轴和 y 轴方向相比，z 轴方向变形最大处，在靠近下半部分边缘处取得，这是因为在干燥过程中，玉米籽粒底部与托盘接触，水分不易扩散，有较大的湿度梯度。

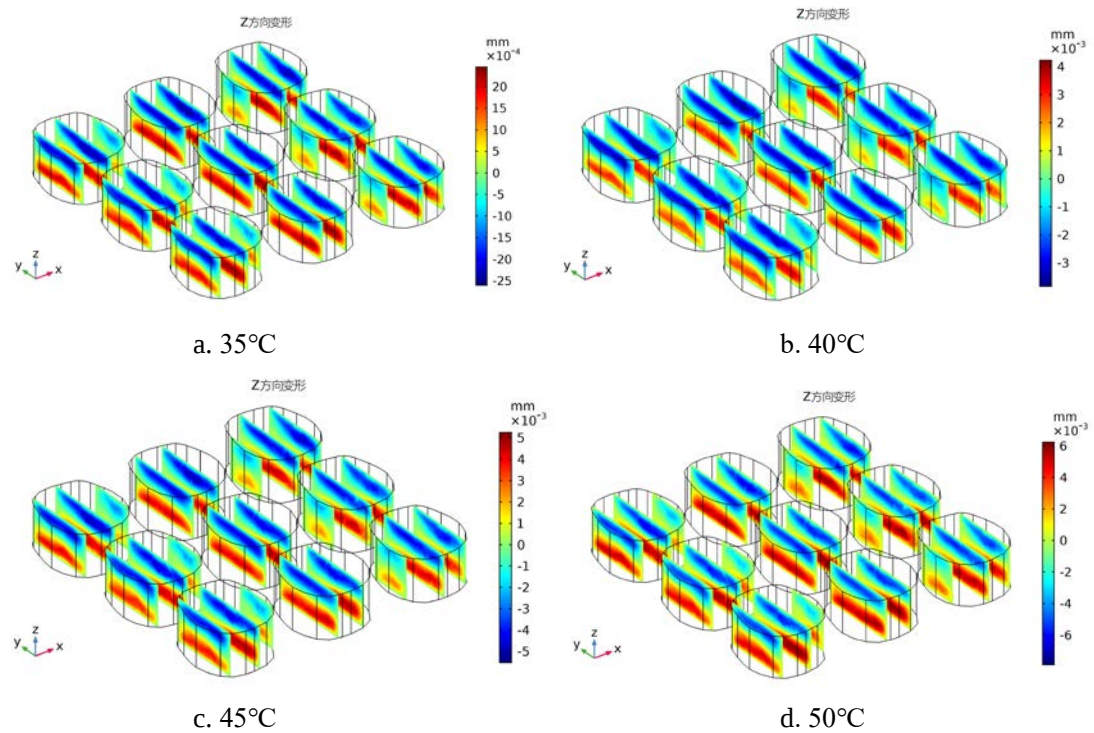


图 4-6 z 轴方向变形

4.4.3 含水率对变形影响分析

图 4-7 为不同方向的变形随含水率变化规律，z 轴方向变形最小，x 轴和 y 轴方向变形较大。随着含水率的下降，变形先缓慢增大，接着快速增大，最后缓

慢降低。变形缓慢增大阶段，是处于微波刚馈入阶段，含水率下降缓慢，湿度梯度较小。含水率从 39% 下降到 35% 时，处于快速干燥阶段，含水率梯度最大，导致变形快速增大，是裂纹产生的主要原因。随着干燥的进行，内外水分梯度减小，变形也随之减小。在相同的实验条件下，水分含量为 31% 时，三个方向的变形值都最大。从图 4-8 可以看出，当水分含量为 31% 时，玉米籽粒的温度分布不均匀，此时变形量最大。

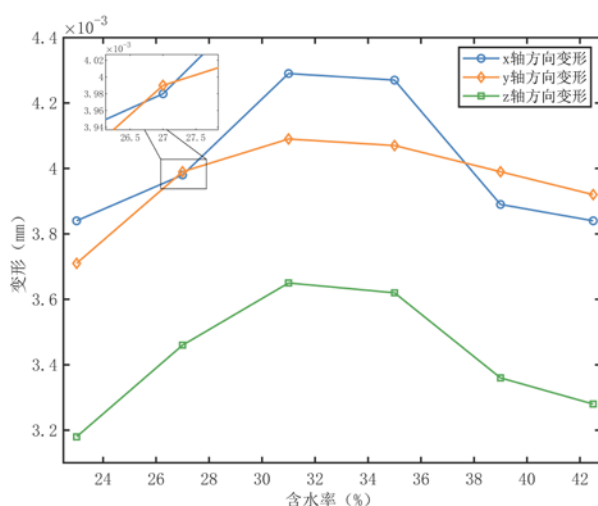


图 4-7 不同方向的变形随含水率的变化图

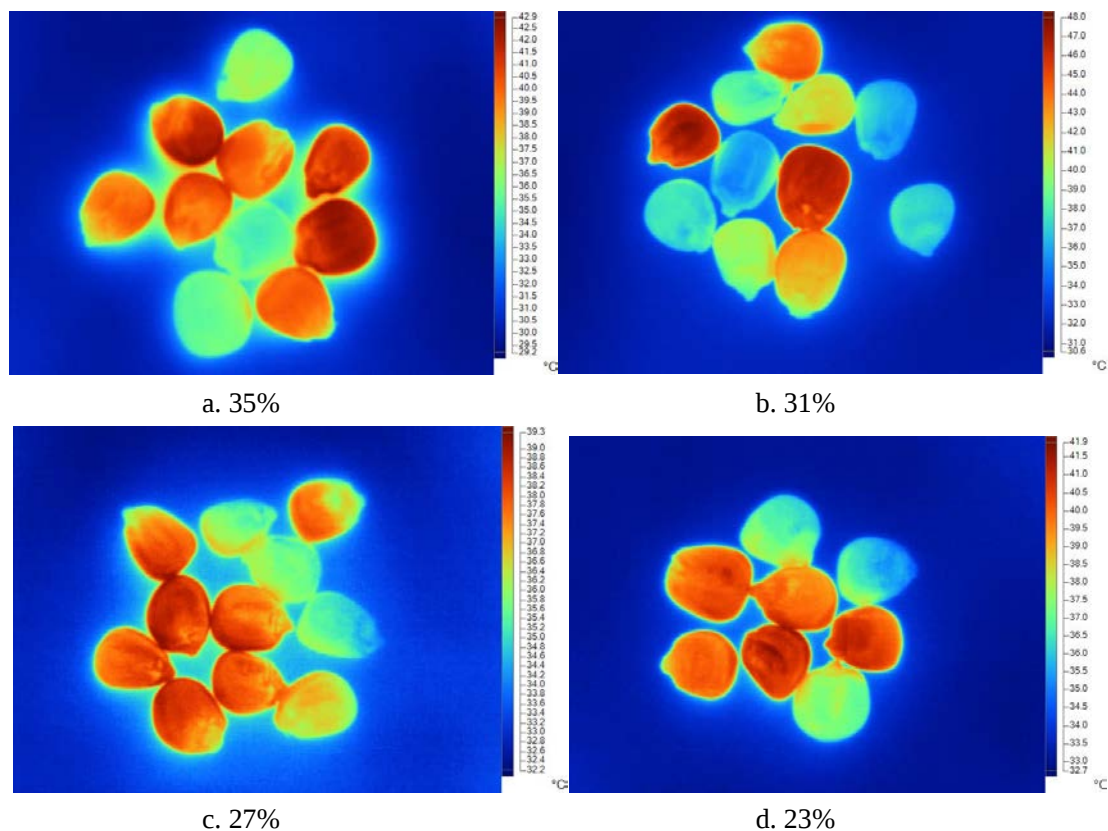
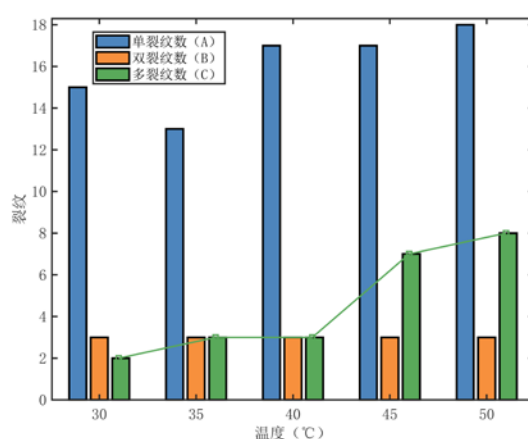


图 4-8 不同含水率下温度分布图

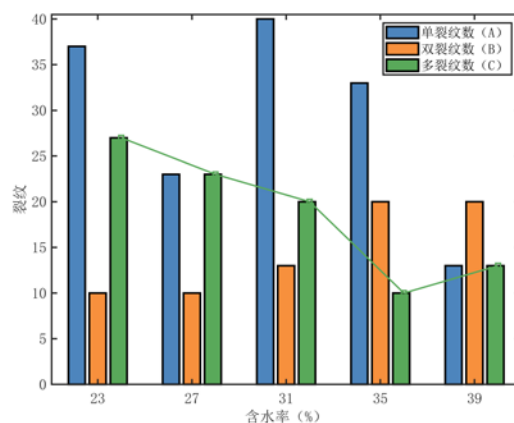
4.4.4 裂纹分析

图 4-9 为单裂纹、双裂纹、多裂纹随干燥温度（30℃，35℃，40℃，45℃，50℃）和含水率（39%，35%，31%，27%，23%）变化规律。图 4-10 为裂纹指数随干燥温度和含水率变化规律。图 4-9 和图 4-10 可以看出，裂纹整体随着温度的升高而增加，裂纹指数随温度升高呈指数上升。干燥温度低于 40℃时，单裂纹数较多，双裂纹变化不明显，高于 40℃时，多裂纹增加明显。温度从 40℃增加到 50℃，玉米籽粒温度梯度升高，裂纹指数快速增大。

从图 4-9 可以看出，单裂纹随着含水率的降低，先增多后减少再增多。随着干燥进行，单裂纹逐渐变化成双裂纹或多裂纹，单裂纹数降低。双裂纹随着含水率的降低而减少，并逐渐转变为多裂纹。多裂纹随着含水率的降低而不断增加，且随着含水率的降低，玉米籽粒发生变形，裂纹不断增加。从图 4-10 可以看出，随着含水率的降低，裂缝指数逐渐增大。

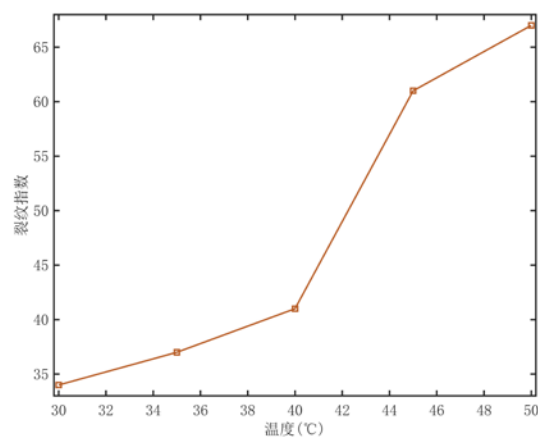


a. 裂纹随干燥温度变化图

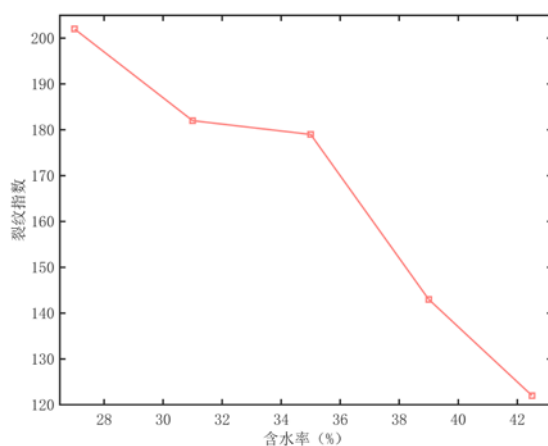


b. 裂纹随含水率变化图

图 4-9 裂纹随温度和初始含水率变化图



a. 裂纹指数随干燥温度变化图



b. 裂纹指数随含水率变化图

图 4-10 裂纹指数随温度和初始含水率变化图

4.5 本章小结

本文建立玉米籽粒电磁、质量、能量以及变形数学模型，实验和仿真结合验证模型，温度和含水率仿真和实验值之间最大误差分别为 4.73%和 7.76%。

干燥过程中，随着温度的增加，裂纹不断增多，裂纹指数呈指数上升。变形沿宽度方向先增大后减小，两侧大于内部，边缘处较大。变形沿长度方向呈阶梯性降低，有热点存在。变形沿厚度方向逐渐降低，与宽度和长度方向相比，最大值在底部取得。

干燥过程中，随着含水率的降低，单裂纹先增多后降低再增多，双裂纹不断减少，多裂纹不断增多。裂纹指数随着含水率下降，直线上升，同一干燥温度和时间下，在含水率为 31%时取得变形和裂纹的最大值，此时温度分布不均匀。

第5章 玉米微波干燥设备腔体的优化设计

5.1 引言

根据前述章节，微波干燥过程存在着不均匀性和局部热点问题，这一结论已被多项研究所证实^[86-87]。首先，谐振腔内的电场分布不均可能引起材料温度的不均匀分布，因此，改善微波电场的强度分布成为优化的主要目标。其次，微波在不同材料中的穿透深度以及材料的介电常数变化，也会对材料内部的温度分布产生影响。最后，微波谐振腔的形状和物料位置对微波的利用效率有显著影响，这可能导致实际生产中的能量利用效率低于理论值。本章基于对微波干燥玉米的实验和仿真分析，特别侧重于优化干燥腔体的结构设计，以提高微波干燥实验装置的效率。在这一过程中，需综合考虑电场分布的均匀性、材料特性以及腔体结构对微波的反射和穿透情况，以实现更有效的微波能量利用。

5.2 微波系统构成

微波系统通常包括磁控管、谐振腔、波导和匹配的外电路^[88]。磁控管激发的电磁波通过波导传输到谐振腔中。谐振腔由金属制成，反射入射的电磁波形成驻波场^[89]，实现物料的加热。磁控管将电能转换为微波能，由阴极、阳极、能量耦合装置、磁路和调谐装置组成。波导连接磁控管和谐振腔，常见的是矩形波导。谐振腔是形成驻波场的封闭系统，常见的类型包括金属谐振腔，如矩形、圆柱形和同轴谐振腔。

5.3 干燥腔体设计

5.3.1 微波谐振腔理论

微波谐振腔中，信号反射次数增加会增强效果。因此，腔体尺寸、形状、材料、表面处理、耦合方式、支撑结构和固定方式等因素对性能和有效性至关重要

[90]。

微波谐振腔被视为典型的谐振装置，其特性可通过谐振频率和品质因数（Q 值）等参数来描述。谐振频率受到腔体尺寸、形状和材料介电常数等因素的影响。在反射过程中，能量逐渐损失，从而使腔体的 Q 值增加，可达数千甚至数万，这有助于减少插入损耗并提高输出功率。因此，微波谐振腔在微波干燥等领域得到广泛应用。微波加热装置腔体的尺寸参数决定了谐振模式的存在，谐振模式越多，腔内电场分布越均匀，从而实现了玉米籽粒加热过程中的温度均匀性。为了优化微波干燥装置的性能，需要对谐振腔的尺寸和形状进行精确设计，以确保谐振频率和 Q 值的匹配，从而实现更高效的微波能量利用。

波导是一种特殊形状的导体结构，用于传输微波信号。电磁波的传播取决于波导的形状和大小，其传输过程中的电磁波分布称为模式。常见的模式包括：TE 模式（无横向电场）、TM 模式（无横向磁场）、TEM 模式（无横向电场和磁场）以及 Hybrid 模式（同时在波导截面内和轴向存在电磁场）^{[91][92]}。在矩形波导中，可以忽略 TEM 模式，因其需要两个导体的结构特性。若电磁波频率低于截至频率，则波将会快速衰减^[93]。当波导长、宽分别为 a 、 b 时，TE 模和 TM 模所对应的临界波长可表示为^[94-95]：

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (5-1)$$

式中， λ 为波长，mm； m 、 n 分别表示在长、宽方向上半驻波波长个数； a 、 b 分别表示为长和宽。

矩形波导的主要模式为 TE₁₀ 模，即 $m=1$ ， $n=0$ 。则式 5-1 可以化为：

$$\lambda = 2a \quad (5-2)$$

因此在进行微波加热腔体设计时，应该保证腔体工作波长小于 $2a$ 。腔体内部电磁场分布可以由波动方程描述^[96]：

$$\begin{cases} \nabla^2 E + k^2 E = 0 \\ \nabla^2 H + k^2 H = 0 \end{cases} \quad (5-3)$$

式中， E 为电场，V/m； H 为磁场，A/m； k 为电磁波在介质中的波数：

$$k = w\sqrt{\epsilon\mu} \quad (5-4)$$

式中， ω 为角频率，rad/s； ε 为腔体内部媒质介电特性； μ 为磁导率，N/m²。

微波干燥箱在 2.45GHz 频率下工作，TE₁₀ 为其主要工作模式。则 TE₁₀ 模场分量为^[97]：

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

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

5.3.2 谐振腔尺寸

在微波干燥装置设计中,品质因素 Q 是微波谐振腔储能状况与损耗状况的表征 Q_0 值越大，则微波谐振干燥腔加热过程中能量损耗越少，加热效率也就越高。

$$Q_0 = 2\pi \frac{\text{腔体内能量}}{\text{一个周期内损耗能量}} \quad (5-6)$$

Q_0 的大小近似可以等于^[98]：

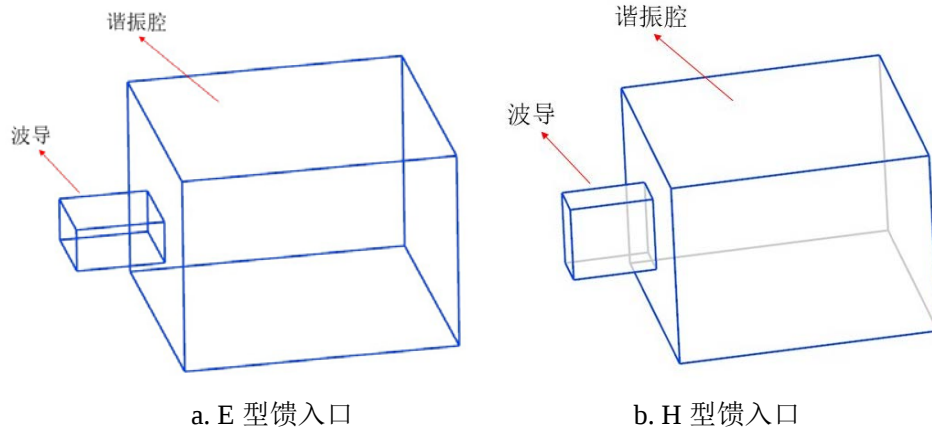
$$\begin{cases} Q_0 = \frac{1}{\delta} \frac{V}{S} \\ \delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}} \end{cases} \quad (5-7)$$

式中， V 为腔体体积，m³； S 为腔体内部表面积，m²； δ 为微波腔体内壁的集肤深度，m。

因此，当腔体体积一定时，微波腔体 δ 越小，微波腔体就越高，加热效率也越高，参考国内相同类型微波加热干燥设备腔体的相关参数，选择将微波腔体三维尺寸设置 $a=320\text{mm}$, $b=340\text{mm}$, $c=250\text{mm}$ 。

5.3.3 微波馈入口分布设计

微波腔体的馈口数量、位置分布对电场均匀性有重要影响。通常，矩形馈口的长宽比为 2:1，导致馈口有长边和短边之分，从而形成两种基本布置方式：E 型分布和 H 型分布，分别是将馈口长边和短边与水平面平行，如图 5-1 所示。

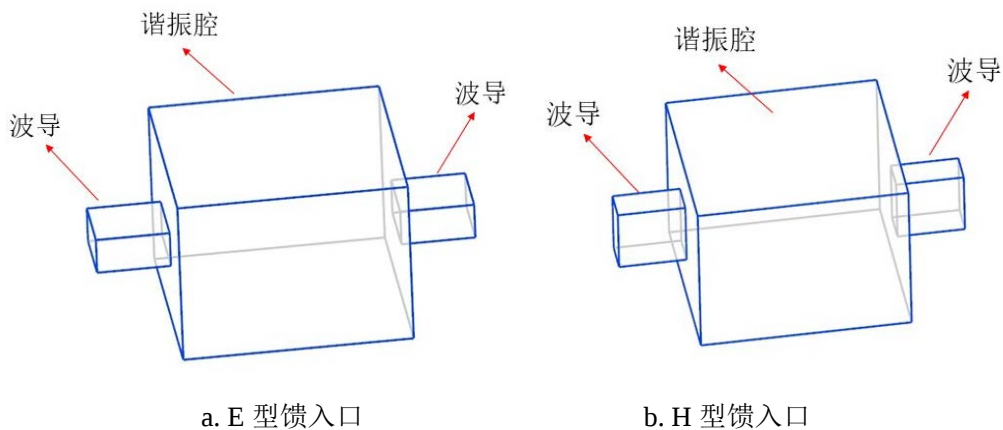


a. E 型馈入口

b. H 型馈入口

图 5-1 单馈入口位置分布图

针对单一馈入口的微波加热腔，结构简单易制造，适用于小规模加热和干燥。但工业级设备需要高功率和更严格的加热均匀性。单一馈入口难以在高功率下实现均匀加热，因此需要设计多馈电口的微波加热腔。多馈源腔能实现复杂的电磁场分布和精确的加热均匀性，适合大规模应用。设计和优化需要考虑多种因素，如馈源端口的尺寸、形状、数量和位置，以及被加热物体的形状和位置等。为了实现更加均匀的干燥效果并减少热点的出现，需要对 E-E 型和 H-H 型馈入口进行分析，具体如图 5-2 所示。



a. E 型馈入口

b. H 型馈入口

图 5-2 E 型和 H 型馈入口对称位置分布图

5.4 结果与分析

5.4.1 单馈入口电场分析

E 型和 H 型馈入口电场分布如图 5-3 和图 5-4 所示。E 型馈入口电场值最大处位于馈入口的前端和后端，最大值为 5690V/m；在微波腔电场在 z 轴方向上对称分布，微波腔内电场最大值位于腔体的右侧，远离馈入口的一侧。H 型馈入口

电场值最大处位于馈入口的中部，最大值为 3110V/m ；微波腔内电场较大处位于 Y-Z 平面的中部，且在其他两个平面电场较大处都位于中部，是热点主要产生的位置。E 型馈入口场强在三个方向上场强分布均匀性较好，H 型馈入口场强在垂直面上较均匀。这是因为馈入口不同，导致微波在腔体内反射方向发生变化，从而导致电场分布差异较大。总体来说，E 型馈入口电场分布更均匀，适合慢速干燥，对于需要快速降低水分的物料，H 型馈入口更适合。

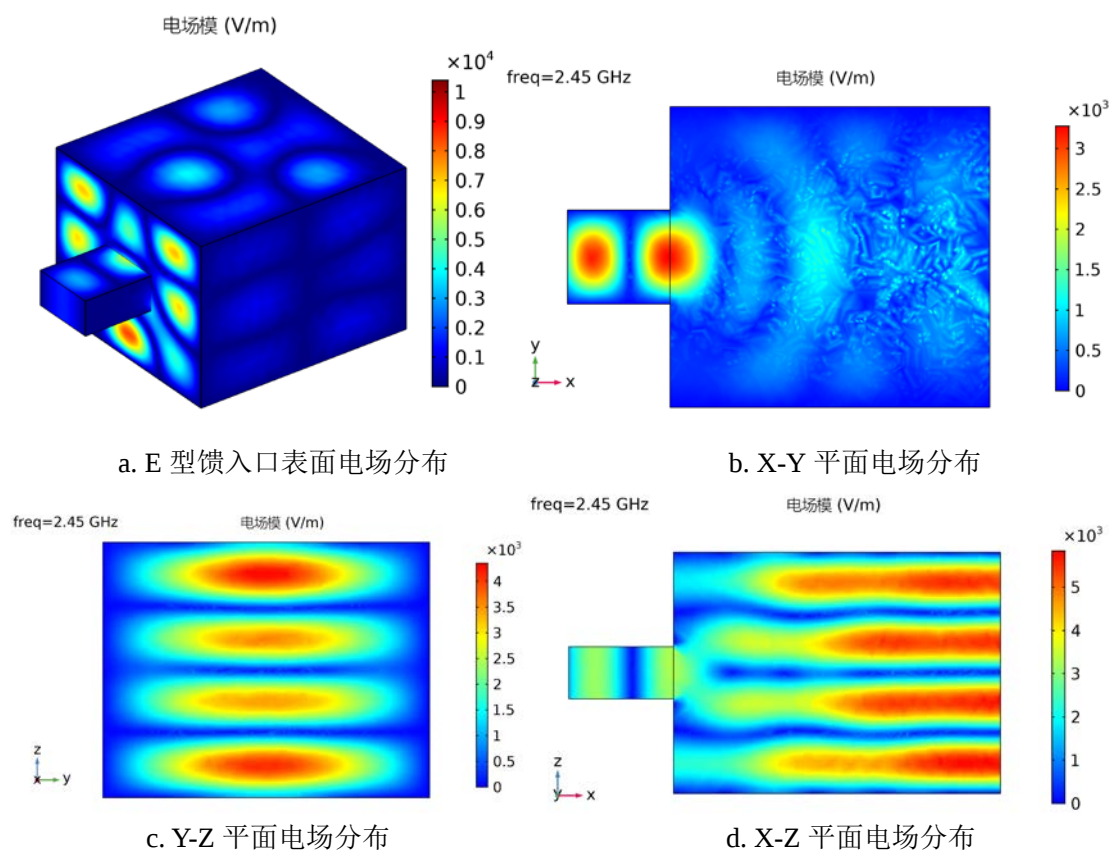
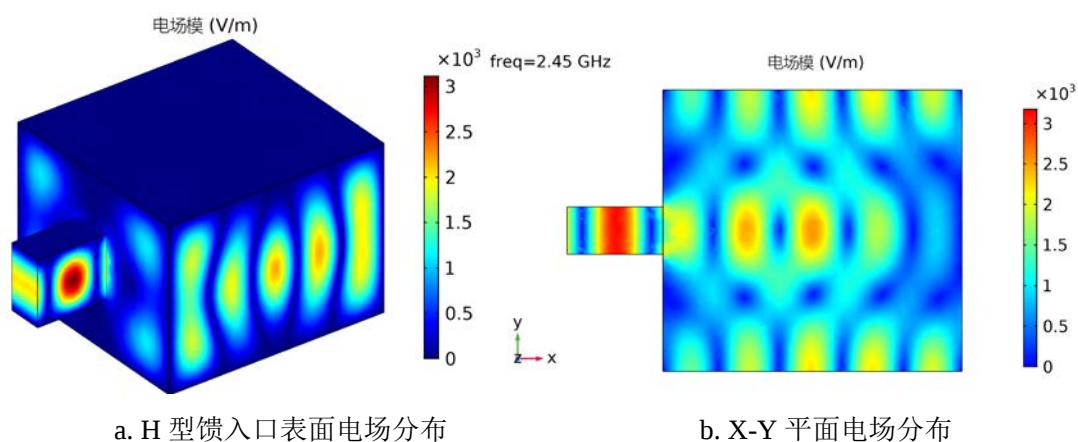


图 5-3 E 型馈入口电场分布



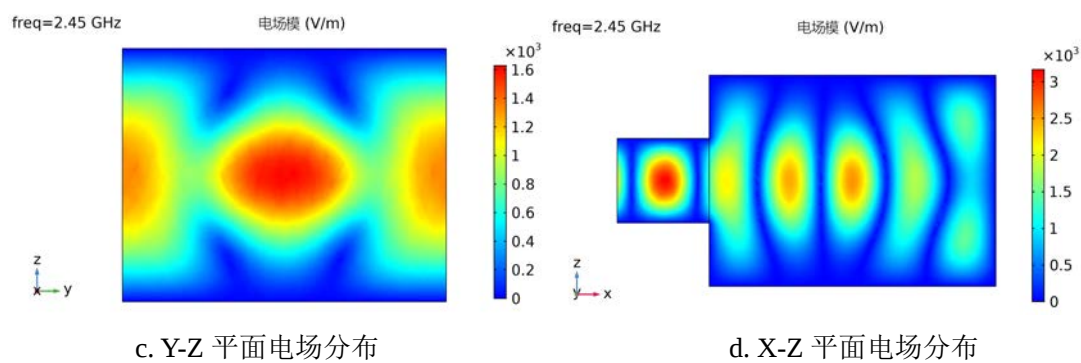
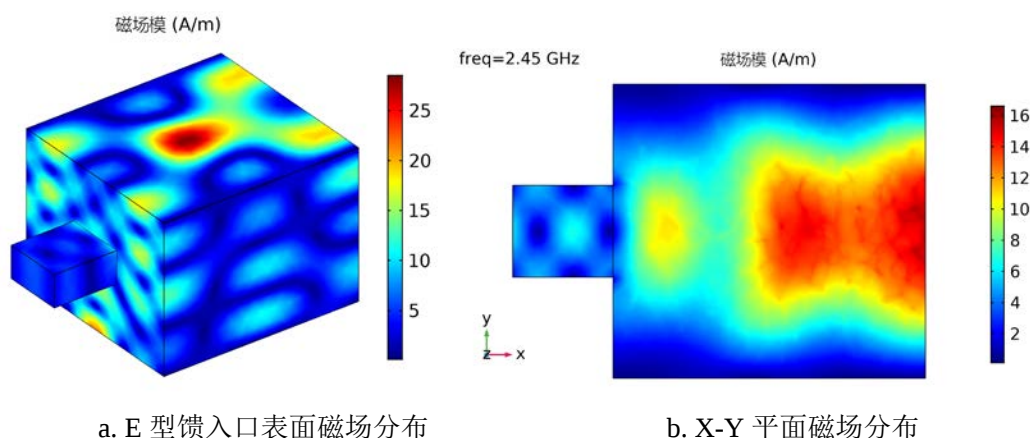


图 5-4 H 型馈入口电场分布

5.4.2 单馈入口磁场分析

E 型和 H 型馈入口磁场分布如图 5-5 和图 5-6 所示。E 型馈入口磁场在 X-Y 平面取得磁场值最大值，为 16.7A/m ，且数值较大区域位于干燥腔的右侧，面积较大，是热点产生的主要位置。在其他平面磁场分布较均匀，但磁场均匀位置偏干燥腔右侧，使靠右的物料干燥速度大于靠左侧的物料，是的两侧物料温度分布不均。H 型馈入口磁场，在馈入口前后端和干燥腔中间位置都存在磁场密集分布的现象，磁场最大值为 7.43A/m 。在 X-Y 平面和 X-Z 平面，磁场分布存在区域集中现象，使得磁场分布呈现块状分布和分层现象，不适合将物料堆积进行干燥。E 型和 H 型相比，虽存在磁场值较大处，但磁场总体分布均匀，可通过将物料旋转干燥降低干燥时物料的温差。



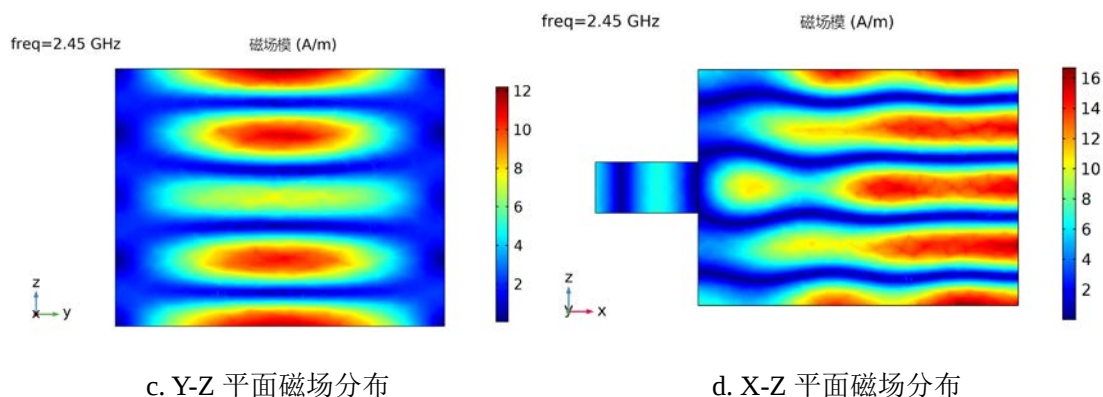


图 5-5 E 型馈入口磁场分布

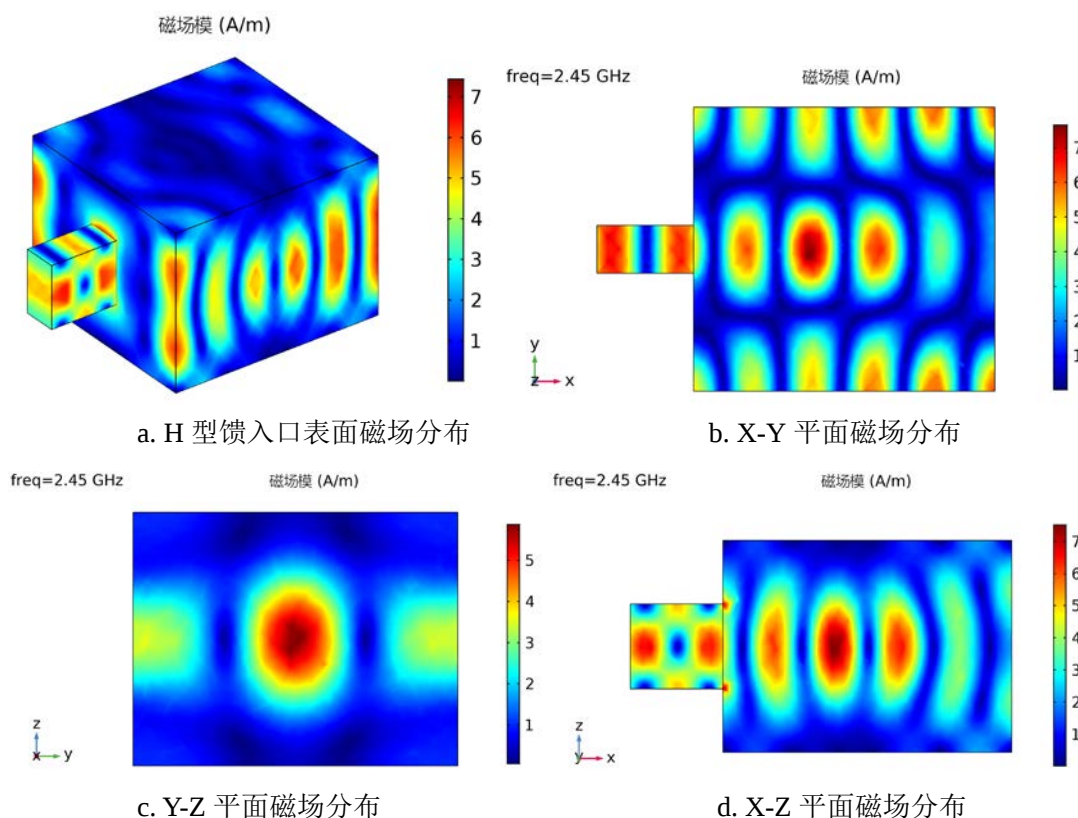


图 5-6 H 型馈入口磁场分布

5.4.3 双馈入口电场分析

E-E 型和 H-H 型馈入口电场分布如图 5-7 和图 5-8 所示。从图 5-7a 可知，E-E 型馈入口分布，电场较大值位于馈入口和与馈入口连接的干燥箱两侧，最大值位于馈入口，为 2390V/m。Y-Z 平面和 X-Z 平面电场在 z 轴方向上呈对称分布，且电场强度沿着中间向两侧逐渐降低，四周边缘处场强最低。与 E 型馈入口相比，相同实验条件升温更快，在 X-Z 平面，场强分布更均匀，且此平面是影响物料干燥的主要平面。H-H 型馈入口分布，场强最大值主要位于馈入口，为 2920V/m。

与 H 型馈入口相比，馈入口场强聚集现象降低，最大值较低，干燥腔四周场强分布更加均匀，四周场强不存在局部的较大值；在 X-Y 平面和 X-Z 平面，场强分布均匀性明显提高，且不存在热点，在 Y-Z 平面场强也有所改善。与 E-E 型馈入口分布相比，干燥腔内部场强分布更好，干燥时的温升更加均匀，但温升速度低于 E-E 型。对于薄层干燥，选用 E-E 型更好，温度上升快，不会因为 y 轴方向场强分布不均，导致温差较大；对于堆积干燥，H-H 型更好，因为干燥腔内部场强分布均匀，场强插值小，干燥更加均匀。

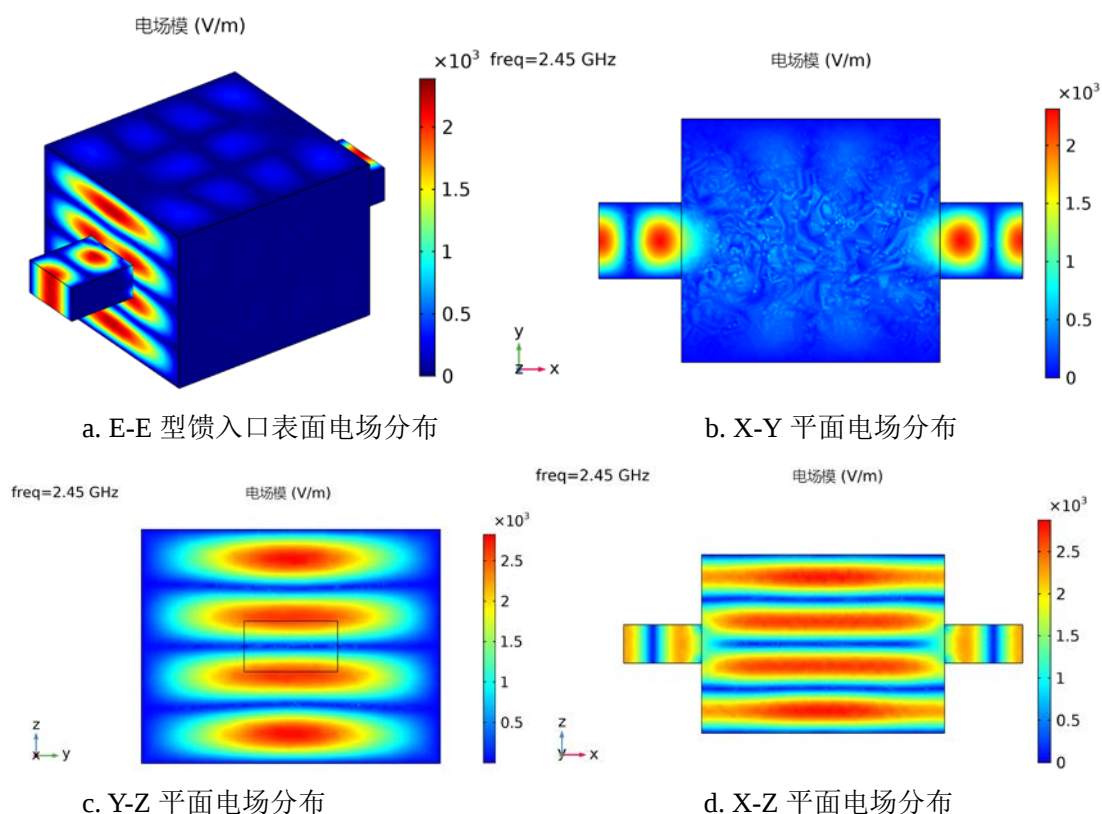
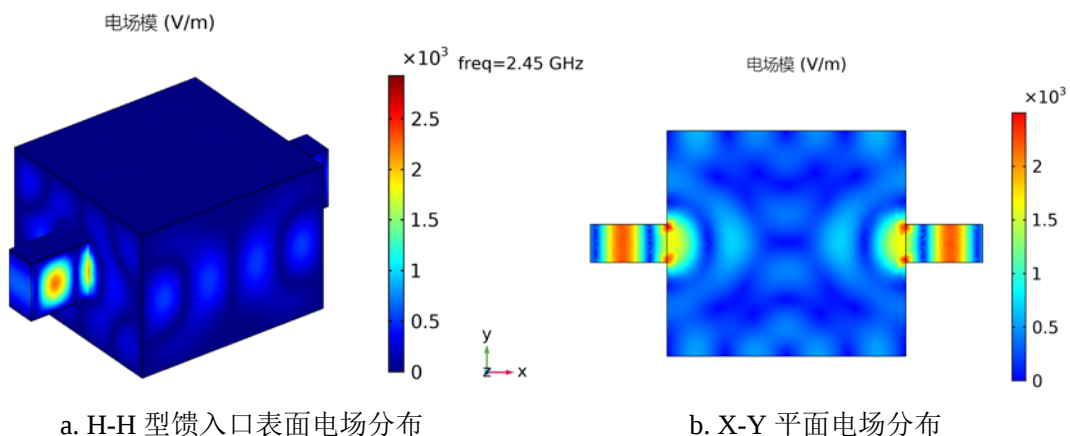


图 5-7 E-E 型馈入口电场分布



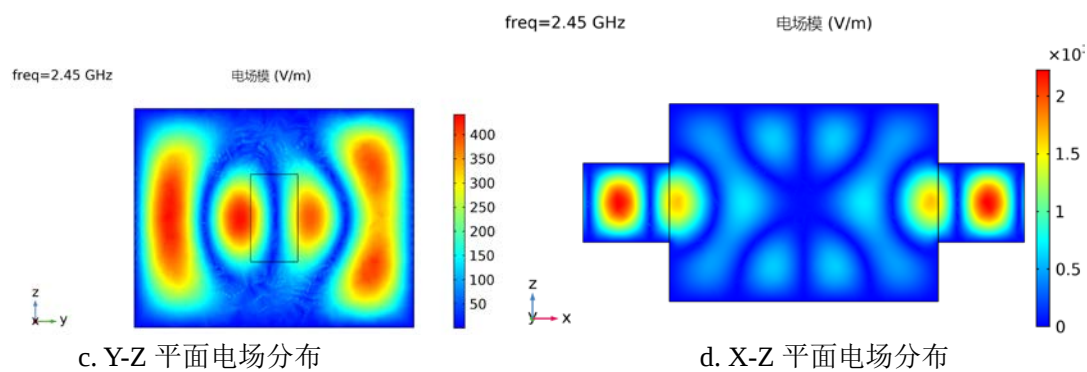
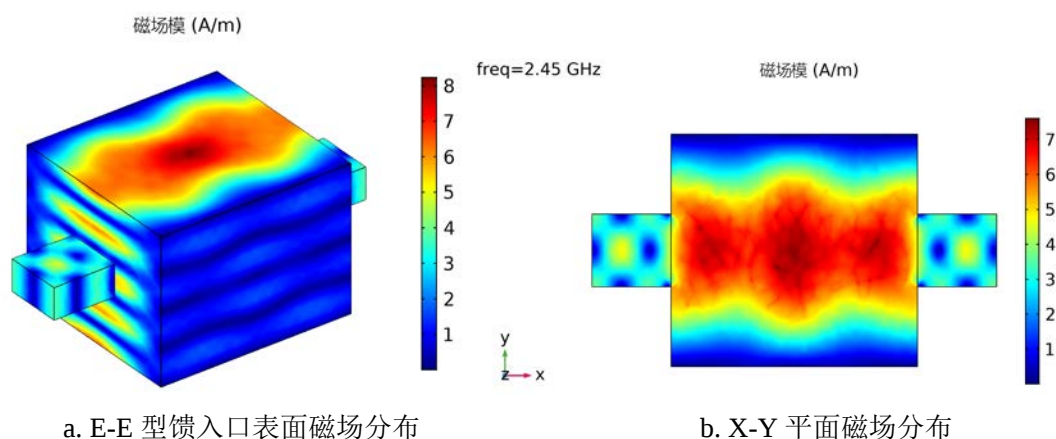


图 5-8 H-H 型馈入口电场分布

5.4.4 双馈入口磁场分析

E-E 型和 H-H 型馈入口磁场分布如图 5-9 和图 5-10 所示。E-E 型馈入口，磁场最大值位于 X-Y 平面，为 8.23A/m 。与 E 型磁场分布相比，干燥腔四周磁场明显改善，且前后两个面改善最明显，基本不存在磁场局部较大值；三个平面磁场分布更均匀，在 X-Y 平面，磁场沿腔体中间向 y 轴两侧，逐渐降低，在 X-Z 平面，磁场沿腔体中间向 x 轴两侧，逐渐降低。H-H 型馈入口分布，磁场最大值位于馈入口前端和后端，为 5.19A/m 。与 H 型磁场相比，干燥腔四周磁场分布有较大改善，四周磁场聚集现象不存在；在 X-Y 平面和 X-Z 平面磁场分布提升明显，两个平面的干燥腔内部磁场分布均匀，磁场块状分布消失。E-E 型和 H-H 型馈入口相比，后者干燥腔内磁场分布更加均匀，且不存在局部较大值，但干燥腔内部磁场强度低于前者，干燥速度慢，前者更适合需温升快的物料，后者适合慢速品质要求高的干燥。



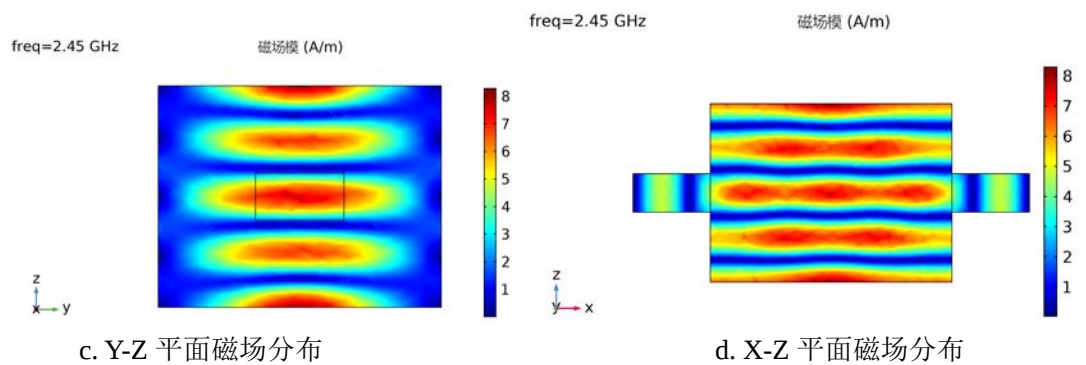


图 5-9 E-E 型馈入口磁场分布

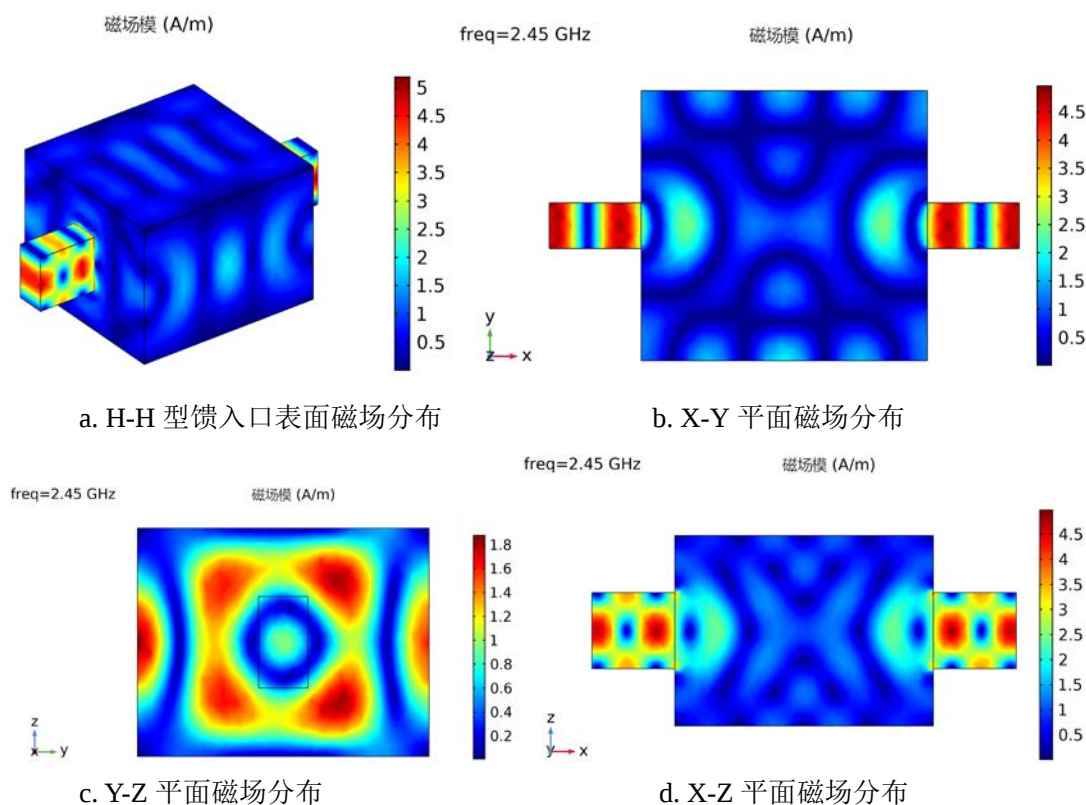


图 5-10 H-H 型馈入口磁场分布

5.4.4 干燥腔优化分析

不同馈入口温度分布如图 5-11 所示。E 型馈入口分布，上表面温度较高，且存在热点，籽粒下表面和四周温度较低，除上表面存在局部较大值，温差最大值为 1.6°C ，整体温度分布较均匀。E 型馈入口分布，籽粒左侧温度明显比右侧温度高，温度分布不均匀，热点的区域在左侧上表面，温差最大值为 1.2°C 。单馈入口相比，H 型馈入口温差较小，除去热点位置，整体温度分布均匀，含水率降低也更均匀，不易产生干燥裂纹。E-E 型馈入口分布，温度最大差值为 1.5°C ，籽粒下部分温度高于上半部分，热点位置较集中，主要在下表面的中部，温差小且

均匀。H-H 型馈入口分布，籽粒左右两侧温度存在明显差距，左侧温度较高，温差最大值为 2.1°C ，温度分布十分不均匀。双馈入口相比，E-E 馈入口温度分布更好。E-E 馈入口与 H 型馈入口相比，H 型馈入口温差较小，但 E-E 型馈入口在物料相同的情况下，升温快，干燥时间短，表面温度和中心温度差值小。总的来说，E-E 型馈入口最好，温度均匀，含水率降低快，温度差值较小，热点少。

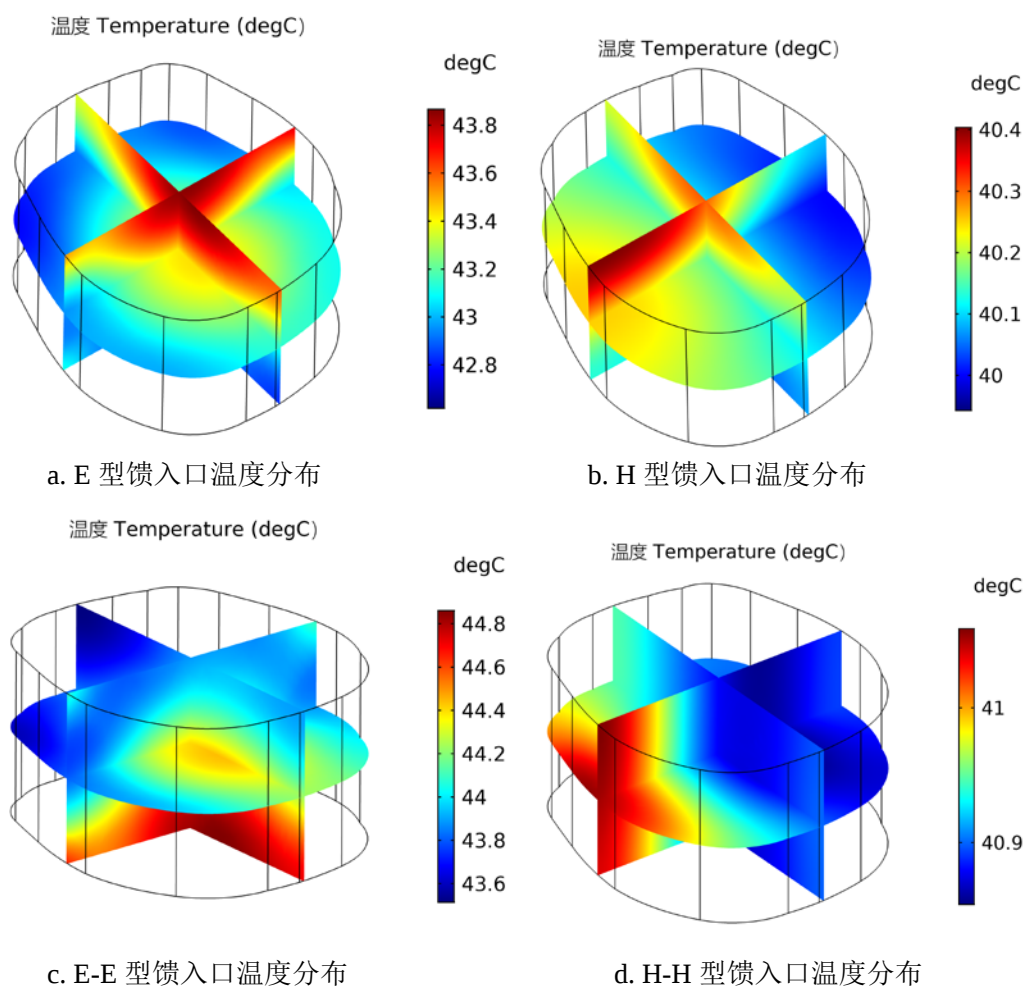


图 5-11 不同馈入口温度分布

5.5 本章小结

本章对于微波腔体和馈入口分布进行研究，仿真分析了 E 型、H 型、E-E 型、H-H 型，电场和磁场的分布情况，并进行对比分析。

E 型馈入口微波腔内电场在 z 轴方向上对称分布，在三个方向上场强分布均匀性较好；H 型馈入口微波腔内电场在 $Y-Z$ 平面的中部取得较大值，场强在垂直面上较均匀。E 型馈入口磁场在 $X-Y$ 平面取得磁场值最大值，为 16.7A/m 。H 型

馈入口磁场，存在磁场密集分布的现象，磁场最大值为 7.43A/m；在 X-Y 平面和 X-Z 平面，磁场分布呈现块状分布和分层现象。

E-E 型馈入口电场较大值位于干燥箱两侧，为 2390V/m，在 Y-Z 和 X-Z 平面场强在 z 轴方向上呈对称分布。H-H 型馈入口分布，场强最大值位于馈入口，为 2920V/m。E-E 型馈入口磁场最大值位于 X-Y 平面，为 8.23A/m。与 E 型磁场分布相比，磁场分布较均匀。H-H 型磁场最大值位于馈入口前端和后端，为 5.19A/m。H-H 型馈入口干燥腔内磁场比 E-E 型分布更加均匀，且不存在局部较大值。

E 型馈入口分布，上表面温度较高，下表面和四周温度较低，H 型馈入口分布，籽粒左侧温度明显比右侧温度高，E-E 型馈入口分布，籽粒下部分温度高于上半部分，热点位置较集中，H-H 型馈入口分布，籽粒左右两侧温度存在明显差距，左侧温度较高，温差最大值为 2.1℃。总的来说，E-E 型馈入口最好，温度均匀，含水率降低快，温度差值较小，热点少。

第6章 总结与展望

6.1 总结

本文以玉米籽粒作为干燥介质，微波干燥作为干燥方式，研究温湿度在干燥过程中的变化规律，温湿度在干燥过程中对应力的影响，阐明三者关系，为降低干燥应力提供参考。应力的产生，导致干燥过程中玉米籽粒产生裂纹，因而分析玉米干燥时裂纹产生的机理，对减少裂纹，提高干燥品质十分重要。在微波干燥过程中，介电参数是影响干燥效果的主要参数，也影响应力和裂纹的产生，因而，通过总结温湿度与应力、裂纹、介电参数的关系，归纳实验和仿真存在的问题，对实验用的干燥设备进行优化。

本文主要创新点如下：

（1）基于电磁学、传热传质学、应力-应变理论建立了玉米微波干燥模型，获得了干燥应力的变化规律，与实验结果对比分析，验证了模型的准确性；并阐明温度、含水率、应力三者之间的关系。

（2）基于电磁学、多相传输学建立了玉米微波干燥过程中固、液、汽之间的相互转化模型，分析裂纹产生的机理，研究了温度和湿度梯度对裂纹产生的影响。

（3）在上述玉米微波干燥理论基础上，使用网络分析仪和同轴探头法测定玉米籽粒介电参数随频率、温度、含水率的变化。探究了玉米介电参数与频率、含水率、温度的关系，为玉米微波干燥提供参考。

（4）以微波干燥箱的工作原理为出发点，借助 COMSOL Multiphysics 多物理场软件对干燥箱和波导的结构进行改进与优化，以磁场均匀性为评价标准，对比优化前后的分布情况，以期找到最优结构，从而最大程度上提高干燥均匀性。

6.2 展望

玉米在我国粮食结构中占重要地位，也是重要的经济作物。微波干燥作为一

种比较新型的干燥技术，具有干燥速率快、清洁、节能、生产效率高、干燥品质好等优点，在未来一定会发挥重要作用。微波干燥过涉及多种物理场参与，本文完成了干燥应力、裂纹、介电参数与温湿度的关系，以及对干燥设备进行了结构优化，但限于实验条件和篇幅的原因，本文仍存在一些不足：

（1）实验采用浸泡法获得不同含水率从的物料，与使用新鲜采摘的物料进行实验存在误差；无法实时测量温度和含水率的变化；未在显微镜下对产生的裂纹进行观察。

（2）建立玉米籽粒内部应力-应变数学模型时，使用了黏弹性理论与传热传质模型进行耦合，并未验证黏弹性理论是否可用于评价玉米籽粒的力学性能。

（3）介电参数实验设定的温度较低，结构优化缺少实验验证，缺少自动化设计，腔体结构的电磁场分布仿真偏向于小型实验室设备。

针对上述不足，使用新收获的物料进行实验，优化工艺参数；验证或开发出一套全新理论用于谷物开裂性能评价；搭建出优化后的设备，用于验证仿真，对提高玉米微波干燥品质具有重要意义。

参考文献

- [1] Espinosa C D, Fanelli N S, Stein H H. Digestibility of amino acids and concentration of metabolizable energy are greater in high-oil corn than in conventional corn when fed to growing pigs[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 280: 115040.
- [2] Zhang R, Ma S, Li L, et al. Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review[J]. *Grain & Oil Science and Technology*, 2021, 4(3): 89-107.
- [3] Mirsam H, Kalqutny S H, Aqil M, et al. Indigenous fungi from corn as a potential plant growth promoter and its role in *Fusarium verticillioides* suppression on corn[J]. *Heliyon*, 2021, 7(9): 1-12.
- [4] 朱靖宇, 王启民. 考虑流场作用的玉米籽粒热风干燥特性分析[J]. *现代食品*, 2022, 28(15): 164-167.
- [5] Fatemi A, Singh V, Kamruzzaman M. Identification of informative spectral ranges for predicting major chemical constituents in corn using NIR spectroscopy[J]. *Food chemistry*, 2022, 383: 132442.
- [6] Marques da Silva J R M, Silva L L. Relationship between distance to flow accumulation lines and spatial variability of irrigated maize grain yield and moisture content at harvest[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(4): 525-533.
- [7] Xie Y, Zhang Y, Xie Y, et al. Radio frequency treatment accelerates drying rates and improves vigor of corn seeds[J]. *Food chemistry*, 2020, 319: 126597.
- [8] 彭小伟, 彭雅兰, 何旭华, 等. 不同干燥方式对玉竹干燥动力学特征及品质的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 42(11): 164-172.
- [9] 梁秋萍, 严学迎. 超声辅助热风干燥对芒果干品质的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(12): 205-210.
- [10] 陈思羽, 李捷涵, 刘春山, 等. 稻谷热风干燥水分扩散特性及含水率预测[J].

- 农机化研究, 2023, 45(06): 188-192.
- [11] 金旭, 王晨, 毕清跃, 等. 玉米热风干燥特性模拟研究[J]. 热科学与技术, 2021, 20(02): 128-133.
- [12] Szadzińska J, Mierzwa D. The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2021, 167: 108532.
- [13] 李亚南, 吴建, 陈治华, 等. 云南小粒种咖啡热风干燥特性及其数学模型[J]. 热带作物学报, 2022, 43(03): 622-633.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Macedo L L, Corrêa J L G, Júnior I P, et al. Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry[J]. LWT, 2022, 155: 112918.
- [17] Kutlu N, İşci A, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, et al. Effect of different drying methods on drying characteristics of eggplant slices and mathematical modeling of drying processes[J]. Academic Food Journal, 2016, 14(1): 21-27.
- [18] Béttega R, Rosa J G, Corrêa R G, et al. Comparison of carrot (*Daucus carota*) drying in microwave and in vacuum microwave[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2014, 31(2): 403-412.
- [19] 尹丽妍. 基于水势的玉米真空干燥传热传质模型及介电特性的研究[D]. 吉林大学, 2011.
- [20] Wu J, Zhang H, Li F. A study on drying models and internal stresses of the rice kernel during infrared drying[J]. Drying Technology, 2017, 35(6): 680-688.
- [21] Srisang N, Varanyanond W, Soponronnarit S, et al. Effects of heating media and operating conditions on drying kinetics and quality of germinated brown rice[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(3-4): 385-392.

-
- [22] Bolong W, Mingjie G, Duanyang G, et al. Study on damage mechanism and crack growth of the corn grain[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2022, 22(4): 1526-1534.
 - [23] Sosa-Morales M E, Valerio-Junco L, López-Malo A, et al. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(8): 1169-1179.
 - [24] Sherwood T K. The drying of solids—I[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1929, 21(1): 12-16.
 - [25] Parti M, Dugmanics I. Diffusion coefficient for corn drying[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(5): 1652-1656.
 - [26] Hacıhafizoğlu O, Cihan A, Kahveci K, et al. Diffusion model for thin layer drying process of corn[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2009, 223(4): 233-241.
 - [27] Takhar P S. Hybrid mixture theory based moisture transport and stress development in corn kernels during drying: Coupled fluid transport and stress equations[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 105(4): 663-670.
 - [28] Selimefendigil F, Oban S Z, Ztop 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, 2019, 141(2): 1-22.
 - [29] 贾灿纯, 李业波, 刘登瀛, 等. 缓苏过程中玉米颗粒内部水分分布的数学模拟[J]. 农业工程学报, 1996(01): 147-151.
 - [30] 刘雪强, 陈晓光, 吴文福, 等. 玉米干燥过程中颗粒内部应力分析与预测[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006(S1): 42-45.
 - [31] 刘军, 孔宁华, 张世伟, 等. 基于三维实体模型的玉米颗粒干燥过程中内部应力分析[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2015, 27(03): 177-184.
 - [32] 吴中华, 李凯, 高敏, 等. 稻谷籽粒内部热湿传递三维适体数学模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(01): 329-334.
 - [33] 程裕东, 易正凯, 金银哲, 等. 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.
 - [34] Çelen S. Effect of microwave drying on the drying characteristics, color,

- microstructure, and thermal properties of Trabzon persimmon[J]. *Foods*, 2019, 8(2): 84.
- [35] Chahbani A, Fakhfakh N, Balti M A, et al. Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.)[J]. *Food Bioscience*, 2018, 25: 32-38.
- [36] 吕豪, 吕为乔, 崔政伟, 等. 不同微波环境下苹果片干燥特性分析[J]. *农业机械学报*, 2018,49(S1): 433-439.
- [37] 张吉军, 曹龙奎, 衣淑娟, 等. 微波间歇干燥对北方粳高粱蛋白质及淀粉品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(07): 52-60.
- [38] Liu H, Liu H, Zhang X, et al. Microwave drying characteristics and drying quality analysis of corn in China[J]. *Processes*, 2021, 9(9): 1511.
- [39] De Faria R Q, Dos Santos A R P, Garipey Y, et al. Optimization of the process of drying of corn seeds with the use of microwaves[J]. *Drying Technology*, 2020, 38(5-6): 676-684.
- [40] Song G, Choudhary R, Watson D G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2013, 6(1): 90-99.
- [41] Nelson S O, Soderholm L H, Yung F D. Determining the dielectric properties of grain[J]. *Agricultural Engineering*, 1953, 34(9): 608-610.
- [42] Sosa-Morales M E, Valerio-Junco L, López-Malo A, et al. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43(8): 1169-1179.
- [43] 郭文川, 王婧, 朱新华. 基于介电特性的燕麦含水率预测[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(24): 272-279.
- [44] 宋华鲁, 闫银发, 宋占华, 等. 利用介电参数和变量筛选建立玉米籽粒含水率无损检测模型[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 262-272.
- [45] Feng H, Tang J, Cavalieri R P. Dielectric properties of dehydrated apples as affected by moisture and temperature[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(1): 129.
- [46] Qi S, Han J, Lagnika C, et al. Dielectric properties of edible fungi powder related

- to radio-frequency and microwave drying[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2021, 3: 1-13.
- [47] Bansal N, Dhaliwal A S, Mann K S. Dielectric properties of corn flour from 0.2 to 10 GHz[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 166: 255-262.
- [48] Guo W, Tiwari G, Tang J, et al. Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour[J]. biosystems engineering, 2008, 101(2): 217-224.
- [49] Zhu X, Guo W, Wu X, et al. Dielectric properties of chestnut flour relevant to drying with radio-frequency and microwave energy[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(1): 143-150.
- [50] Tao Y, Yan B, Fan D, et al. Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 99: 593-607.
- [51] Guo W, Zhu X. Dielectric properties of red pepper powder related to radiofrequency and microwave drying[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7: 3591-3601.
- [52] Ozturk S, Kong F, Singh R K, et al. Dielectric properties, heating rate, and heating uniformity of various seasoning spices and their mixtures with radio frequency heating[J]. Journal of food engineering, 2018, 228: 128-141.
- [53] Li Y, Zhou L, Chen J, et al. Dielectric properties of chili powder in the development of radio frequency and microwave pasteurisation[J]. International journal of food properties, 2017, 20(sup3): S3373-S3384.
- [54] Nelson S O, Datta A K. Dielectric properties of food materials and electric field interactions[M]. Handbook of microwave technology for food application. CRC Press, 2001: 69-114.
- [55] Von Hippel, A. R. Dielectric Properties and Waves[M]. New York, N.Y.: John Wiley, 1954.
- [56] Metaxas A C, Meredith R J. Industrial microwave heating[M]. IET, 1983.
- [57] Sacilik K, Tarimci C, Colak A. Dielectric properties of flaxseeds as affected by moisture content and bulk density in the radio frequency range[J]. Biosystems

- Engineering, 2006, 93(2): 153-160.
- [58] 王云阳. 澳洲坚果射频干燥技术研究[D]. 西北农林科技大学, 2012.
- [59] Nelson S O, Trabelsi S. Principles for microwave moisture and density measurement in grain and seed[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2004, 39(2): 107-117.
- [60] 魏硕, 陈鹏皋, 谢为俊, 等. 基于三维湿热传递的玉米籽粒干燥应力裂纹预测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 296-304+319.
- [61] Takhar P S, Maier D E, Campanella O H, et al. Hybrid mixture theory based moisture transport and stress development in corn kernels during drying: validation and simulation results[J]. Journal of food engineering, 2011, 106(4): 275-282.
- [62] Wei S, Xiao B, Xie W, et al. Stress simulation and cracking prediction of corn kernels during hot-air drying[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 121: 202-212.
- [63] 朱德泉, 王继先, 朱德文. 玉米微波干燥特性及其对品质的影响[J]. 农业机械学报, 2006(02): 72-75.
- [64] Datta A K, Anantheswaran R C. Handbook of microwave technology for food application[M]. CRC Press, 2001.
- [65] Song G, Choudhary R, Watson D G. Microwave drying kinetics and quality characteristics of corn[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(1): 90-99.
- [66] Arballo J R, Campañone L A, Mascheroni R H. Modeling of microwave drying of fruits[J]. Drying Technology, 2010, 28(10): 1178-1184.
- [67] 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.
- [68] 刘国红, 陈君若, 赵彩敏, 等. 多孔材料热风干燥过程中力学特性分析[J]. 化学工程, 2015, 43(03): 33-36.
- [69] Aregawi W A, Defraeye T, Verboven P, et al. Modeling of coupled water transport and large deformation during dehydration of apple tissue[J]. Food and Bioprocess

- Technology, 2013, 6: 1963-1978.
- [70] Srisang N, Soponronnarit S, Thuwapanichayanan R, et al. Modeling heat and mass transfer-induced stresses in germinated brown rice kernels during fluidized bed drying[J]. Drying Technology, 2016, 34(6): 619-634.
- [71] Wu J, Zhang H, Li F. A study on drying models and internal stresses of the rice kernel during infrared drying[J]. Drying Technology, 2017, 35(6): 680-688.
- [72] Halder A, Dhall A, Datta A.K. Modeling transport in porous media with phase change: Applications to food processing[J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(3): 1-13.
- [73] Ratti C, Crapiste G H, Rotstein E. A new water sorption equilibrium expression for solid foods based on thermodynamic considerations[J]. Journal of Food Science, 1989, 54(3): 738-742.
- [74] Chester S A, Anand L. A coupled theory of fluid permeation and large deformations for elastomeric materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2010, 58(11): 1879-1906.
- [75] Duda F P, Souza A C, Fried E. A theory for species migration in a finitely strained solid with application to polymer network swelling[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2010, 58(4): 515-529.
- [76] Bonet J, Wood R D. Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis[M]. Cambridge university press, 1997.
- [77] Martins P, Natal Jorge R M, Ferreira A J M. A comparative study of several material models for prediction of hyperelastic properties: Application to silicone - rubber and soft tissues[J]. Strain, 2006, 42(3): 135-147.
- [78] 曹崇文, 朱文学. 农产品干燥工艺过程的计算机模拟[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [79] Wei S, Wang Z, Wang F, et al. Simulation and experimental studies of heat and mass transfer in corn kernel during hot air drying[J]. Food and Bioproducts Processing, 2019, 117: 360-372.
- [80] 黄凯, 陈兴付, 陈鹏皋, 等. 玉米籽粒的传质干燥模拟及实验分析[J]. 工程热

- 物理学报, 2017, 38(09): 2005-2010.
- [81] Wang B, Wang J, Du D. Theoretical analysis and multiscale finite element simulation of the dynamic behavior of maize kernel impact on threshing tooth[C]. 2018 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018.
- [82] Waananen K M, Okos M R. Failure properties of yellow-dent corn kernels[J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31(6): 1816-1827.
- [83] Çengel Y. A. Heat and mass transfer: A practical approach[M]. Singapore: McGraw Hill, 2006.
- [84] Joardder M U H, Kumar C, Karim M A. Multiphase transfer model for intermittent microwave-convective drying of food: Considering shrinkage and pore evolution[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 95: 101-119.
- [85] Mahiuddin M, Khan M I H, Kumar C, et al. Shrinkage of food materials during drying: Current status and challenges[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(5): 1113-1126.
- [86] Reimbert C G, Jorge M C, Minzoni A A, et al. A note on caustics and two-dimensional hot spots in microwave heating[J]. Journal of engineering mathematics, 2002, 44: 147-153.
- [87] Song C, Wu T, Li Z, et al. Analysis of the heat transfer characteristics of blackberries during microwave vacuum heating[J]. Journal of food engineering, 2018, 223: 70-78.
- [88] 杨先玮. 微波炉电磁仿真与优化设计[D]. 电子科技大学, 2009.
- [89] Tu B H, Yang G, Li G H, et al. Steady states of a microwave-irradiated modulation-doped heterostructure under perpendicular magnetic field[J]. Physics Letters A, 2006, 359(5): 534-541.
- [90] 丁旭. 基于 HFSS 新型微波谐振腔设计与优化[J]. 真空电子技术, 2020(01): 75-78+91.
- [91] 王楠, 邓鉴, 秦薇敏, 等. 矩形波导中模式分类的讨论[J]. 电气电子教学学报, 2022,44(03): 134-136.

- [92] 赖可璘. 微波数据传输技术及其工程应用[D]. 北京化工大学, 2019.
- [93] 石萌, 杨理践, 高松巍, 等. 微波传播模式对增强金属表面缺陷检测能力的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(06): 109-114.
- [94] 石峰, 杨涓, 汤明杰, 等. 微波谐振器系统的调谐实验研究[J]. 物理学报, 2014, 63(15): 131-139.
- [95] 冯传奇. 多馈口微波加热腔的多物理场仿真[D]. 电子科技大学, 2023.
- [96] 黄亮. 可调腔体微波加热器的加热效率及均匀性研究[D]. 云南师范大学, 2021.
- [97] 王楠, 邓鉴, 秦薇敏, 等. 矩形波导中模式分类的讨论[J]. 电气电子教学学报, 2022, 44(03): 134-136.
- [98] 杨承帅, 张希恒, 张孙力, 等. 基于多物理场耦合的高温掺合阀温度场数值模拟研究[J]. 流体机械, 2021, 49(05): 54-60.

攻读硕士期间获得的科研成果

一、论文情况

- [1] Sun Tongsheng, **Cao Ran**. Analysis of thermal and wet stress of corn kernel based on microwave drying[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(3): 1501-1508.
- [2] Sun Tongsheng, **Cao Ran**, Wang Kai, Liu Jiahao. Mechanism of crack formation in corn during microwave drying process[J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(3): 563-576.

二、专利情况

- [1] 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.
- [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[P]. 实用新型, CN220728786U, 2024-04-05.

三、获奖情况

2021-2022 研究生一等学业奖学金;
2022-2023 研究生二等学业奖学金;
2023-2024 研究生二等学业奖学金;
2022.10 “互联网+”大学生创新创业大赛校优秀奖;
2022.12 第十一届专利发明与创新大赛校级二等奖;
2022.12 第十一届芜湖市大学生专利创新大赛二等奖。

致谢

时光飞逝，三年研究生生活即将结束，在这三年里学到了很多，既有多种多样的专业知识，也有一丝不苟做学问的态度；不仅丰富了我的人生阅历，也让我变得更加成熟稳重，学会了如何与他人交流合作的处事哲理，同时也得到了很多人的帮助。三年的读研生活，从开始做课题的懵懵懂懂，到慢慢的熟悉，再到后来第一篇论文的发表；在此期间，学习到了领域的专业知识，提高了专心科研的能力，也锻炼了独立开展实验探究的技能水平。在三年将会是我人生道路生一笔巨大财富。

我最应该感谢我的导师孙铜生教授，导师在科研上认真严谨的态度一直影响着我，是我学习的榜样。研一刚来，导师就告诫我们端正科研态度，拒绝一切形式的弄虚作假。同时，导师不断指导我们进行课题研究，培养我们的科研水平和科研态度，当方向出现偏差会及时指出，在我们犯错时，他也会态度坚决地指出，并让我们加以修改，不断提升我们对细节的把握能力。从小论文到毕业论文的撰写，导师都会给我提出很多建设性意见，让我能够顺利的完成论文，在这里衷心地向导师说声谢谢！

其次，我要感谢师兄弟们，从杨震、王金志、凌峰三位师兄到现在一共 13 个师兄弟的大家庭。我们会一起讨论课题，让我有更多的思路，并帮助我进行实验，让我更好的完成课题。最后，我要感谢我的家人给予我的经济支持，让我能够在科研压力下不断坚持下来，得以顺利毕业。

感谢安徽工程大学，感谢读研期间所有帮助过我的老师和同学们！同时，也希望母校能够越来越好。

尚禮敬學 唯實惟新

