

学校编码: 10384

学号: 19820061151815

分类号\_\_密级\_\_

UDC\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

微波陶瓷在微波炉中的应用研究

Study on the Application of Microwave Ceramic in  
Microwave Oven

张邦成

指导教师姓名: 肖 芬教授

专 业 名 称: 无线电物理

论文提交日期: 2009 年 6 月

论文答辩时间: 2009 年 6 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: \_\_

评阅人: \_\_

2009 年 6 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

---

## 摘要

家用微波炉是微波大功率的最典型最广泛应用，微波在微波炉腔内的谐振而起到加热食物过程，因此，炉腔的水平和垂直方向都呈现驻波的分布状态，特别在固体的加热和解冻过程中，明显出现加热不均匀状态。目前市面上的产品是采用在微波炉底部增加转盘及添加搅拌器的方法使加热更均匀。

本课题组与广东美的集团公司合作的项目是研制解冻板和匀场板，目的是使食品受热更均匀，更方便烹调，特别是在去除底部转盘的平板式微波炉中，仍然能起到均匀加热食物的功能。

本论文从微波炉的加热理论入手，研究了微波炉加热的机制，提出了微波陶瓷在微波炉中的匀场功能，并使用 HFSS 对微波炉空腔、放置肉块和水杯等情况进行了仿真工作，同时在此基础上进行了大量测试，设计指导了微波快速解冻板及匀场板的研制，目前微波柔性解冻板已小规模试用，并有望进行批量生产，匀场板也已在实验数据上符合指标要求，目前仍在批量制作完善的过程中。

论文首次在微波炉中采用微波陶瓷，利用微波陶瓷谐振时俘获能量的功能，在场强较弱处放置介电常数较高的微波陶瓷，在场强较强处放置介电常数较低的微波陶瓷或不放微波陶瓷，破坏干扰原有腔内驻波场，使腔内场振荡模式更高更复杂，但场强分布更均匀，起到改善平板式微波炉的加热均匀性，同时，论文首次采用 HFSS 的场计算器，计算了炉腔内测试水杯的水温，该仿真计算的数据与实验测试数据吻合。

本论文主要包括以下内容：

第一部分概括了快速解冻板和匀场板研制的课题背景，介绍了微波炉的发明和发展过程，并简要阐述了微波介质陶瓷。介绍了微波炉加热的理论，微波谐振腔理论，微波加热不均匀的影响因素及微波陶瓷能量俘获原理。此外还分析了高频仿真软件 HFSS 及其程序构成、设计和功能特点。

第二部分阐述了微波炉快速解冻板和微波炉匀场板的研制，首先介绍了微波炉快速解冻板和微波炉匀场板项目的需求，然后用 HFSS 软件对项目进行仿真，并给出了微波炉中所进行的实验及结果。

第三部分提出了蒸煮式微波炉和多输出口的微波源匀场装置，进行了设计仿真，并对所做的工作进行总结，指出今后课题努力的方向。

关键词：微波炉；微波陶瓷；HFSS

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

The domestic microwave oven is the most representative and widely using of high power microwave. In the cavity of the oven, microwave works in multi resonant modes, distributes as standing wave in the horizontal and vertical directions, and heats up the food by rolling the water molecule  $2.34 \times 10^9$  times per second. Until now the food or others present in the microwave oven has been heated or ice-out uniformly for the inhomogeneous field in the cavity. There is an improving method to solve the uniform heating by a rotor to rotated the food on it.

We cooperated with Guangdong Midea Group to design a kind of thawing plate, which can make the frozen meat thaw homogeneously and quickly, and be cooked more conveniently. The other task is to design a kind of homogeneously heating plate, which can make the food be heated homogeneously, especially in the oven without rotor plate.

On the basis of the microwave oven heating theory, the paper presents the mechanism of microwave oven heating and the application of microwave function ceramics in microwave oven, also the development of thawing plate and homogeneously heating plate. High Frequency Structure Simulator (HFSS) is used to simulate the electromagnetic field in of the microwave oven cavity with or without the meat and water. Based on the result of simulation and a lot of correspondent experiments, the design of microwave fast thawing plate and homogeneously heating plate were achieved successfully. The microwave fast defrosting plate has been put into trial manufacture in a small scale and will be in mass production recently. The homogeneously heating plate has fulfilled the target demand and needs some improvment before batch production.

The first innovatiion of the paper is the means to get the homogeneous field in the cavity by energy seizing function of microwave ceramic. The microwave ceramic with higher permittivity was laid in the place with weaker field, or vice verse. Such method interfered the standing wave in the cavity and excited more complicated and higher modes which made the field more homogeneous and improved the microwave

---

heating uniformity. The second innovation of the paper is theoretic calculation the temperature of a cup of water in the microwave oven cavity by HFSS, and the result was validated by the experiments.

This paper contains following contents.

The research background of microwave fast thawing plate and homogeneously heating plate is mainly summarized in part 1. The progress of the invention and development of microwave oven and the microwave dielectric ceramics are briefly expatiated too. It also introduces several parts of the theory of microwave oven heating including theory of microwave heating, the structure of microwave oven, the theory of microwave resonant cavity, the influencing factors of the inhomogeneity of microwave heating and the theory of the energy capture capability of microwave ceramics. The simulation software of electromagnetic field—HFSS is also introduced and its program composition, design and function characteristics are analyzed.

The research of microwave fast thawing and heating plate is detailedly expatiated respectively in part 2. The demand of the project and the simulation of HFSS is introduced, and the experiments and the results of the project are given.

Part 3 puts forward the stream-cooking microwave oven and multi-output microwave source shimming device. Finally it summarizes the work and points out the direction of researches in the future.

**Key Words:** Microwave Oven; Microwave Ceramics; HFSS Software

# 目录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.2 微波炉的发明和发展.....	1
1.3 本论文研究的主要内容.....	5
第二章 微波炉加热基本理论.....	6
2.1 微波加热理论.....	6
2.2 微波炉的结构.....	9
2.3 微波谐振腔理论.....	11
2.4 电磁场三维仿真软件——HFSS.....	15
2.5 微波陶瓷能量俘获原理.....	22
第三章 微波炉柔性解冻板研究.....	25
3.1 微波炉的空腔能量分布.....	25
3.2 柔性解冻板的检测方法.....	35
3.3 HFSS 软件对肉块解冻的仿真.....	37
3.4 微波陶瓷在肉块解冻中的应用.....	41
第四章 微波炉匀场板研究.....	47
4.1 微波炉水温均匀性研究方法.....	47
4.2 HFSS 对水杯加热的仿真.....	47
4.3 HFSS 场计算器简介.....	50
4.4 微波陶瓷在水杯均匀加热中的应用.....	54
第五章 微波炉的其他改进措施.....	58
5.1 蒸煮式微波炉的设计仿真.....	58
5.2 微波源多输出出口的匀场装置.....	60
第六章 总结与展望.....	62

---

6.1 总结.....	62
6.2 展望.....	62
参考文献.....	63
论文发表情况.....	65
致谢.....	66
附录.....	67

厦门大学博硕士论文摘要库

# Contents

<b>1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 The Background of the Research.....	1
1.2 The Invention and Development of Microwave Oven.....	1
1.3 Main Content of Paper .....	5
<b>2 The Basic theory of Microwave Oven Heating.....</b>	<b>6</b>
2.1 The Theory of Microwave Heating.....	6
2.2 The Structure of Microwave Oven.....	9
2.3 The Theory of Microwave Resonant Cavity.....	11
2.4 The 3d Simulation Software of Electromagnetic Field---HFSS.....	15
2.5 The Theory of the Energy Capture Capability of Microwave Ceremics .....	22
<b>3 Research on the Flexible Thawing Plate.....</b>	<b>25</b>
3.1 The Energy Distribution of Microwave Oven Empty Cavity.....	25
3.2 The Experimental Method of Flexible Thawing Plate.....	35
3.3 The HFSS Simulation of Frozen Meat Defrosting.....	37
3.4 The Application of Microwave Ceremics in Frozen Meat Defrosting ...	41
<b>4 Research on the Homogeneously Heating Plate.....</b>	<b>47</b>
4.1 The Experimental Method of Water Temperature Uniformity.....	47
4.2 The HFSS Simulation of Water Heating.....	47
4.3 Brief Introduction of HFSS Field Calculator.....	50
4.4 The Application of Microwave Ceremics in The Uniform heating of Water.....	54
<b>5 Other Methods to Improve Microwave Oven.....</b>	<b>58</b>
5.1 The Design and Simulation of Stream-cooking Microwave oven.....	58
5.2 Multi-output Microwave Source Shimming Device.....	60

---

<b>6 Summing-up and Prospect</b> .....	62
<b>6.1 Summing-up</b> .....	62
<b>6.2 Prospect</b> .....	62
<b>Reference</b> .....	63
<b>List of Papers</b> .....	65
<b>Acknowledgement</b> .....	66
<b>Appendix</b> .....	67

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 课题背景

微波的发展与应用，是与微波振荡功率源的产生紧密联系的。微波功率源——磁控管与速调管分别在 1921 年和 1939 年被研制出<sup>[1]</sup>，微波自出现以来主要应用于雷达等通讯领域。直至二十世纪初，微波功率源才迅速进入微波加热应用中，目前家用微波炉几乎进入所有的家庭。

家用微波炉是微波大功率的最典型最广泛应用，它利用微波在微波金属炉腔体内的来回振荡而加热食物，因此，炉腔的水平 and 垂直方向都呈现驻波的分布状态，在固体的加热和解冻过程中，明显出现加热不均匀状态。目前市面上的产品是采用在微波炉底部增加转盘及添加搅拌器的方法使加热更均匀。

本课题组与广东美的集团公司合作的项目就是开发研制解冻板和匀场板，使食品受热均匀性更好，更方便食物加热。特别是在去除底部转盘的平板式微波炉中仍然能使食物加热均匀。

### 1.2 微波炉的发明和发展

#### 1.2.1 微波炉的发明

微波炉是 1945 年由美国人泊西·斯潘塞发明的<sup>[2]</sup>，他是美国雷声公司（Raytheon）的工程师，在一次雷达起振的实验时，和他一起工作的人员，忽然看到他胸前衣兜上渗出暗黑色的血迹，结果发现是衣袋内的巧克力糖融化，此时，雷达天线正在发射着强大的电波，该电波是无线电波中一种波长很短的波即微波。泊西·斯潘塞经过多次实验和分析，得出结论，自然界中的物体是由带电粒子组成的，因电磁场的方向不断地发生变化，所以带电粒子也随之跟着来回运动而产生热量，同时电磁波具有一定的穿透能力，食物的分子会在电磁波的作用下受热起来。通过设想和实验，泊西·斯潘塞动手制作了世界上第一台雷达波烤肉的灶具，这种灶具就是现在使用的微波炉前身。

1947 年雷声公司和通用电气公司（GE）推出了两款原型炉。随着微波加热应用的发展，以上两个公司都提出了微波炉使用频率的申请，雷声公司提出 2450MHz 的频率，其优点是可容许较小的负载及较好的耦合，腔体尺寸小，而可

用多模腔改善加热均匀性。通用电气公司则提出了 915MHz 的频率，其优点是穿透深度大，解冻过程热失控小。FCC 批准了这两个频率，分配给微波加热使用，并一直沿用至今天。

### 1.2.2 微波炉在各国的发展

雷声公司于 20 世纪 60 年代支配着美国的微波加热市场，大力推进微波炉进入餐馆，并成为磁控管的主要生产厂家<sup>[3]</sup>，在该时期微波炉的 120 个专利中，雷声公司拥有一半以上。雷声公司生产了 600W 及 1.6KW 的微波炉，还进行了大量研究工作，如土壤消毒，蘑菇漂白，冰冻马血浆升温，橡胶成形，塑料制造，铸芯制陶，食品加工等<sup>[4-5]</sup>。此时出现的 Tappan 公司，大力发展了雷声公司忽视了的家用微波炉，并占据了美国家用炉的市场，这个时期每台微波炉的售价都超过了 1000 美元。不久 Litton 公司推出了新型加热管，取代了 Tappan 公司家用炉中使用的雷声制的磁控管，同时，新日本无线电公司又发展了一种 2450MHz、700W、钨阴极、同轴输出、空气冷却的新管种，雷声公司把这种日本管子改进成一种新型号 QKH1381，被广泛用于微波炉。同期 GE 公司推出了 915MHz、700W 的家用微波炉，荷兰的 Philips 公司也设计了 2~5KW 磁控管，一时间微波加热市场在美国、日本、欧洲盛行开，1963 年召开了第一次微波功率会议。

1966 年，仅有 1 万个微波炉在美国家庭中使用，其普及率低的原因主要在于它的价格以及人们对微波的恐惧心理等，随着微波炉价格的降低，其家用微波炉的销量在美国也逐渐增多。

我国的磁控管生产开始于 1960 年代后期，而微波加热的探索则开始于 1970 年<sup>[6]</sup>，主要由电子部的几个微波管的生产厂家，如南京电子管厂、贵州宇光电子管厂、成都国光电子管厂等，进行研制与生产微波加热管和加热设备，在工业上生产出包括热疗机、烟叶烘烤机、木材烘干机、鹿茸干燥机等 20 个品种的产品。目前我国的工业微波应用已有了较迅速的发展，并逐渐推广至家用微波炉。

### 1.2.3 对微波炉加热均匀性的研究背景

家用微波炉是典型的多模腔加热器，该加热器将一定功率的微波耦合到密封的金属腔，腔体的结构和尺寸大小至少在两个方向上应有几个波长的长度，给定

的频段在腔体中维持多个的谐振模式<sup>[7]</sup>，该腔的特点是机械结构简单，可以适应于不同的加热负载，存在的主要问题是加热不均匀，在不同区域电磁场的强度不同，所以被加热物体的升温速率不同，微波场的多模分布及加热均匀性是微波炉得以应用的基础，在封闭的矩形腔体中，微波场的分布是由激励于某一给定频率的所有模式的总和决定的，虽然吸收负载的存在会使驻波比降低、模次改变，但不均匀性仍然明显存在，特别是某些介质的介电损耗因子随着温度上升而上升，加热的不均匀性更加明显，此外还有以下两方面原因<sup>[8]</sup>：

#### (1) 食品组分

食品中各组分的分子极性不同，介电常数不同，它们对微波的吸收就会产生差异，从而导致食品物料各部分升温的不同。

#### (2) 食品物料的形状和大小

微波加热具有尖角效应，食品的尖角及球形部分比其他形状更容易聚集微波而升温，且微波对不同的食品有不同的穿透深度，过厚的物料内部吸收微波能很少，往往不能被充分加热。

改善不均匀性的方法有：

(1) 目前市面上的微波炉采用负载在多模腔里面移动的方式。为避免微波加热时“热点”的产生，大多数微波炉内都有物料旋转盘，在家用微波炉中，负载被放在旋转的托盘上转动，对腔体内的场产生扰动，使场随着负载移动而不断变化，起到使场分布匀化的作用。

(2) 早期的微波炉在腔体顶部设置窄波束旋转天线，也称模式搅拌器，作用是连续地搅动场的分布。通常由一个多叶片的金属扁面组成，当叶片旋转时，将激励并改变各种模式的范围，尽管这种装置相对粗糙，但对腔体内均匀加热起着重要作用。

(3) 有的厂家设计出“光波炉”，实现了在使用中既可以微波操作，又可用光波单独操作，还可以光波微波组合操作，在一定程度上弥补了微波加热不均匀的缺点。

除了以上方法，我们课题组提出使用微波介质陶瓷来改善微波炉的加热均匀性，下面简要对微波介质陶瓷进行简介。

### 1.2.4 微波介质陶瓷简介

微波介质陶瓷 (MWDC) 是指应用于微波频段 (主要是 UHF、SHF 频段, 300MHz~300GHz) 电路中作为介质材料并完成一种或多种功能的陶瓷, 是近年来国内外对微波介质材料研究领域的一个热点方向。这主要是适应微波移动通讯的发展需求。微波介质陶瓷主要用于用作谐振器、滤波器、介质天线、介质导波回路等微波元器件, 用于移动通讯、卫星通讯和军用雷达等方面<sup>[9]</sup>。微波介质谐振器与金属空腔谐振器相比, 具有以下一些优点: (1) 小型化, (2) 高稳定性, (3) 低损耗。

评价微波介质陶瓷介电性能的主要参数和普通电介质材料一样, 主要包括相对介电常数  $\epsilon_r$ , 介质损耗  $tg\delta$  和谐振频率温度系数  $\tau_f$ <sup>[10]</sup>。但由于其使用频率是在微波频率下, 因而有一些特殊性。

在微波炉的应用中, 微波介质陶瓷三个主要性能指标应满足以下基本要求<sup>[11]</sup>:

(1) 在微波频率下, 相对介电常数  $\epsilon_r$  要大于 10。在介电常数  $\epsilon_r$  的介质中, 电磁波的波长与  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$  成正比, 而在同样谐振频率  $f_0$  下, 介质谐振器的形状和尺寸又取决于电磁波的波长, 即

$$\lambda_{介} = \frac{\lambda_{空}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-2-1)$$

式中  $\lambda_{介}$  为电磁波在介质中的波长;  $\lambda_{空}$  为电磁波在空气中的波长;  $\epsilon_r$  为介质材料的相对介电常数。

因此, 在同样的谐振频率  $f_0$  下,  $\epsilon_r$  越大, 介质谐振器的尺寸就越小, 电磁能量也越集中与介质体内, 受周围环境的影响也越小。这既有利于介质谐振器的小型化, 也有利于其高品质化。

(2) 在微波频率下, 介质损耗  $tg\delta$  要小, 或品质因数  $Q$  ( $Q = 1/tg\delta$ ) 应很高, 一般要求  $Q > 1000$ 。在微波范围内  $Q \times f$  的乘积基本保持不变, 它只与微波范围内的频率有关。在微波炉中, 高品质因数的陶瓷更不易因发热而炸裂。

(3) 谐振频率温度系数  $\tau_f$  主要由材料的线膨胀系数  $\alpha_1$  和介电常数决定, 三

者有如下关系：

$$\tau_f = -(\alpha_1 + \frac{1}{2}\varepsilon_r) \quad (1-2-2)$$

目前，国际上已实用化的微波介质陶瓷的 $\tau_f$ 都接近于零，在微波炉中，该项指标却是越高越好，越不稳定对模式的变化越有利。

### 1.3 本论文研究的主要内容

本文简要介绍了微波炉加热的原理，阐述了微波炉的快速解冻板和匀场板的设计、仿真等研制过程，并对其工作的原理进行详细的介绍，同时给出实验结果，现研制的两板已符合测量指标。论文分为五章：

第一章概括了快速解冻板和匀场板研制的课题背景，介绍了微波炉的发明和发展过程，并简要阐述了微波介质陶瓷。

第二章介绍了微波炉加热的理论，微波谐振腔理论，微波加热不均匀的影响因素及微波陶瓷能量俘获原理。此外还分析了高频仿真软件 HFSS 及其程序构成、设计和功能特点。

第三章详细阐述了微波炉快速解冻板的研制，首先介绍了微波炉快速解冻板项目的需求，然后用 HFSS 软件对项目进行仿真，接着给出了微波炉快速解冻板研制所进行的实验及结果

第四章详细阐述了微波炉匀场板的研制，先介绍了微波炉匀场板的项目需求，然后用 HFSS 软件对项目进行仿真，接着针对微波炉匀场板研制所进行的实验，并对实验结果进行分析。

第五章提出了蒸煮式微波炉和多输出口的微波源匀场装置，并进行设计仿真。

第六章对所做的工作进行总结，指出今后课题努力的方向。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库