

Y1852261

茭白微波干燥的实验研究



论文作者签名: 宋文胜

指导教师签名: _____

论文评阅人 1: 应铁进\教授\浙江大学生物系统工程与食品科学学院

评阅人 2: 张京平\副教授\浙江大学生物系统工程与食品科学学院

评阅人 3: 舒伟军\高级工程师\浙江省农机化技术开发推广总站

评阅人 4: _____

评阅人 5: _____

答辩委员会主席: 李建平\教授\浙江大学生物系统工程与食品科学学院

委员 1: 王俊\教授\浙江大学生物系统工程与食品科学学院

委员 2: 于勇\副教授\浙江大学生物系统工程与食品科学学院

委员 3: 舒伟军\高级工程师\浙江省农机化技术开发推广总站

委员 4: 宗四弟\高级农艺师\浙江省农业厅经济作物管理局

委员 5: _____

答辩日期: 2008 年 12 月 7 日

Study of Microwave Drying Characteristic and
Technology on Wild Rice Stem



Author's signature: _____

Supervisor's signature: _____

External Reviewers: _____

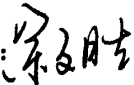
Examining Committee Chairperson: _____

Examining Committee Members: _____

Date of oral defence: _____

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

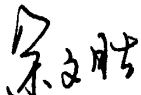
学位论文作者签名：

签字日期：2008 年 12 月 8 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：2008 年 12 月 8 日

签字日期： 年 月 日

致 谢

本论文在王俊教授的悉心指导下完成，王老师实事求是、一丝不苟的工作作风和精益求精的科研态度，让我受益良多。

在论文研究过程中，得到了许多老师和在校研究生的热情建议与帮助，特别是于勇副教授和周博同学的热心帮助。在此一并对以上帮助和关心我的老师、同学表示最真诚的感谢！

感谢省农机局领导和同事们对我生活上的诚挚关怀和工作上的关心照顾与支持。

感谢浙江大学生物系统工程与食品科学学院老师们对我学业的悉心教育，感谢研究生教育科的张良、冯水娟老师对我的关心和帮助。

借此机会向培育过我的母校所有老师表示深切而诚挚的谢意。

余 文 胜

二〇〇八年十月

摘 要

本论文以探讨茭白微波干燥最佳加工工艺为目标,研究了食品干燥以及微波干燥技术的一些基本理论,对茭白微波干燥进行单因子试验,得出干燥特性,建立了茭白微波干燥数学模型。同时进行三因子正交回归旋转组合试验,得出回归方程,经综合优化得出较佳工艺组合。主要包括:

1. 茭白微波干燥特性的试验研究

从含水率与时间、失水速率与含水率以及耗电量与含水率等变化关系上,分析了切片厚度、装载量、微波火力对茭白微波干燥特性的影响。

2. 茭白微波干燥数学模型研究

茭白微波干燥适用 Page 方程模型,根据茭白微波干燥特性实验数据,利用 DPS 数据处理系统进行拟合,得出了茭白微波干燥的数学模型。

3. 茭白微波干燥较佳工艺的试验研究

以前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间为变化因素,以外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量为指标,设计了三因素五水平的二次正交旋转组合试验,得出了茭白微波干燥各目标函数的回归方程,对各目标函数进行了目标优化,从而得出针对各指标的前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间的最佳组合。在此基础上,对这四个目标函数进行综合优化,得到了综合考虑各指标因素的前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间的最佳参数组合。同时根据回归方程,分析、阐述了各因素对各指标的影响规律。

关键词: 茭白 微波干燥 干燥特性 较佳工艺

Abstract

In this paper, to explore the best wild rice stem microwave drying process as the goal, studied food to be dry as well as microwave drying technology's some elementary theories, have carried on the single factorial experiment to the wild rice stem microwave drying, has obtained the dry characteristic, has established the wild rice stem microwave drying mathematical model. Carries on three factor orthogonal return revolving combination test to wild rice stem microwave drying, has obtained the regression equation, has obtained the good craft combination after the synthesis optimization. The main contents include:

Frist,wild rice stem microwave drying characteristic experimental studies.

From change relations and so on moisture content and time, dehydration speed and moisture content as well as power consumption and moisture content, has analyzed the slice thickness, the loading, the microwave firepower to the wild rice stem microwave drying characteristic influence.

Second,the wild rice stem microwave drying mathematical model studies.

The wild rice stem microwave drying is suitable the Page equation model, according to the wild rice stem microwave drying characteristic empirical data, carries on the fitting using the DPS data processing system, has obtained the wild rice stem microwave drying mathematical model.

Third, the wild rice stem microwave drying good craft experimental studies.

Take the preliminary unit mass emissive power, the later period unit mass emissive power, the earlier period drying time as the change factors, take the appearance quality, the rehydrate compared to, the unit interval/unit time precipitation rate, the unit power consumption as the target, has designed three factor five level two orthogonal revolving combination tests, has obtained the wild rice stem microwave drying various objective function regression equation, has carried on the goal optimization to various objective function, thus obtains in view of various targets preliminary unit mass emissive power, the later period unit mass emissive power, the earlier period drying time optimal fit.

Key words: the wild rice stem,microwave drying,drying characteristics, better technology

目 次

独创性声明.....	I
致谢.....	II
摘要.....	III
Abstract.....	IV
目次	
1 绪论.....	1
1. 1 蔬菜干制概述	1
1. 2 微波干燥机理及特点	4
1. 3 微波干燥食品现状及发展前景	5
1. 4 本论文研究的主要内容	7
2 茭白微波干燥试验方法	9
2. 1 试验设备	9
2. 2 试验方法	9
2. 3 实验指标	11
3 茭白微波干燥特性的试验与分析	13
3. 1 切片厚度对茭白微波干燥特性的影响.....	13
3. 2 装载量对茭白微波干燥特性的影响.....	16
3. 3 微波发射火力对茭白微波干燥特性的影响.....	18
4 茭白微波干燥数学模型的研究	22
4. 1 果蔬干燥常用数学模型.....	22
4. 2 茭白微波干燥模型的确定	23
4. 3 茭白微波干燥模型的拟合	25
5 茭白微波干燥较佳工艺的试验研究	28
5. 1 试验设计与实施.....	28
5. 2 回归方程建立及显著性检验.....	31
5. 3 试验优化分析.....	34
6 结论与建议	43

6. 1 主要研究结论.....	43
6. 2 进一步研究建议.....	45
参考文献	46
作者简历	48

1 绪论

1.1 蔬菜干制概述

蔬菜是人们日常消费的大众食品,是人体所需维生素、无机物、碳水化合物等营养成分的重要来源。新鲜蔬菜含水量大,在贮藏、运输、销售过程中容易腐烂、变质。为延长贮藏期,蔬菜干制是常用方法之一。

蔬菜干制又称蔬菜干燥脱水,即在人工控制条件下利用一定技术脱除蔬菜中的水分,降低含水率,提高原料可溶性物质的浓度,阻碍微生物繁殖,抑制蔬菜中所含酶的活性,从而使脱水后的蔬菜能够在常温下较久保存,且便于运输和携带。我国蔬菜干制技术历史悠久,源远流长,干制品如金针菜、香菇、木耳、辣椒干、洋葱、胡萝卜等品质优良而畅销国内外。二十世纪八十年代以来,随着我国改革开放的不断深化,在对外开放、对内搞活的经济形势和农业增效、农民增收的背景下,国家越来越重视农产品采后加工产业化,蔬菜干制理论和技术方法的研究层出不穷,许多高新干燥技术及其设备如真空冷冻干燥、微波干燥、远红外线干燥等得到广泛应用,蔬菜干制品在感官性状、营养价值等方面明显改善提高,极大地促进了蔬菜脱水加工产业的发展。据统计数据显示,我国已成为脱水蔬菜生产大国,脱水蔬菜出口量连年据世界第一位,年出口平均增长率高达 20%。2005 年,脱水蔬菜出口 24.24 万吨,比 2004 年增长 5.30%,占蔬菜出口总量的 3.56%;出口创汇 7.02 亿美元,比 2004 年增长 22.57%,占蔬菜出口金额的 15.66%。

蔬菜干制是一种既经济又大众化的加工方法,干制所用设备可简可繁,生产技术容易掌握,干制成品体积小、质量轻、便于贮运,可以调节蔬菜供应的淡旺季,有利于解决周年供应问题,同时对勘测、航海、旅行、军用、方便食品生产等方面都具有重要意义。目前,我国脱水蔬菜仅有 20 多类 30 多个品种,与上千种蔬菜品种相比,发展潜力和空间无疑巨大。

1.1.1 蔬菜干燥技术发展动态

近年来,蔬菜的干燥技术得到了国内外学者的广泛关注,干燥技术与装备类型多样,干燥理论不断发展。主要应用的技术有以下几种:

常压热风干燥 该技术机理与其它常规物料干燥的机理一致,主要特点是采用合适温度和风量的热风来促进蔬菜内部水分通过毛细管向外扩散。由于常压热

风技术被大量采用,因而国内外对常压热风干燥的技术和装备都进行了深入研究。如国内的尖椒脱水穿流干燥工艺试验研究,胡萝卜丝、香菇、洋葱等热风干燥特性研究,以及国外的热风对流干燥器计算器数学模型研究等。

真空冷冻干燥 该技术是将蔬菜在较低的温度下($-10\sim-50^{\circ}\text{C}$)先冻结成固态,然后在高真空($133\sim0.133\text{Pa}$)下,将其中水分不经液态直接升华成气态而脱水的干燥过程。经冻干处理的蔬菜,酶化作用微弱,而原先的化学、生理性能基本不变,内部呈多孔性结构,体积变化小,容易复原。与常规干燥方法相比,冻干蔬菜基本上可以保持新鲜蔬菜的营养素及色、香、味,食用时清脆可口,与新鲜蔬菜无多大差异。

微波干燥 该技术是利用物料内部水分对微波的吸收特性,将被吸收的微波能转化为热能,使内部水分转化为蒸汽而达到干燥要求的含水量。常用的微波加热专用频率为 915MHz 和 2450MHz 。比较研究表明,微波加热均匀,可以避免一般加热干燥过程由于内外加热不均而引起的品质下降,并能充分保持新鲜蔬菜内原有的营养成分。微波干燥还具有反应灵敏、便于控制、热效率高、无余热、无污染等显著特点。

远红外干燥 该技术是基于很多物质对 $3\sim15\mu\text{m}$ 波长的远红外辐射有很强的吸收性的原理。由于蔬菜水分含量很高,远红外使深处的水分产生剧烈振动升温而汽化,在负压状态的干燥室内蔬菜的内外压差和湿度梯度加速了外扩散,可以在不使蔬菜过热的情况下,脱水速率上升,含水量下降。若辅以较优的干燥参数工艺,可以使干燥效率和干燥质量得到极大提高。

真空低温油炸干燥 该技术是利用在减压状态(0.07MPa)下,物料中水分汽化温度降低,能在短时间内迅速脱水,实现在较低温度(100°C 左右)条件下进行油炸。热油脂既作为脱水传热的中间体,又是改善食品风味的重要因素。这种方式通常用于果蔬脆片的制作,如苹果脆片、马铃薯片、香蕉片等。

渗透干燥 该技术是将蔬菜浸泡感动浓缩糖溶液中去除大量的水、且渗入一些溶质的过程。蔬菜干燥前渗透脱水处理已成为降低干燥能耗、缩短干燥时间、提高干制品品质的一个重要手段。

过热蒸汽干燥 该技术是用过热水蒸汽代替通常的热空气作为干燥介质进入干燥机,以过热蒸汽的显热使物料中的水分蒸发成水蒸汽,再同作为干燥介质

的热水蒸汽一起排出,并加以再利用。过热蒸汽干燥具有热效率高、节能效果显著、干燥速度快、物料品质好等优点。

膨化干燥 该技术首先使蔬菜含水率降至 20%~30%,然后放入密封容器内加热一定时间,再突然将容器的阀门打开,使蔬菜内的水分骤然排出,形成膨化多孔组织。膨化后可进一步进行干燥处理,使成品含水率降至 4%~5%。这种产品复水性和口感好,但体积较大。为减少成品体积,可在膨化后将产品压成饼后再进行干燥。

CO₂干燥 用 CO₂代替空气作为介质对蔬菜进行干燥的方法。只要将传统的热风干燥设备稍加改造,增加 CO₂循环管路和冷凝、加热装置,便可组成用 CO₂干燥蔬菜的新系统,用该工艺得到的干制蔬菜质量好、易复水。

联合干燥 根据物料特性,将两种或两种以上的干燥方式优势互补,分阶段进行的一种复合干燥技术。联合干燥不仅可以节约能源,而且可以地控制整个干燥过程,有助于获得高质量的产品。其中包括热风—微波联合干燥、热风—冷冻联合干燥、热风—微波真空联合干燥、热风—微波冷冻联合干燥、热风—压力膨化联合干燥、渗透—热风联合干燥等。

1. 1. 2 蔬菜干制研究发展方向

任何蔬菜干制技术的研究都向着高效率、低能耗、低成本、高品质和开发新产品的方向发展。

开发选用新技术,以保障优质品质 开发选用不同干制技术以适应不同蔬菜的干制特性,从而保障干制品的品质。如真空冷冻干燥、过热蒸汽干燥分别适用于热敏和氧敏性物料的干燥;微波加热均匀,可以避免一般加热干燥过程因内外加热不匀而引起的品质下降;远红外干燥可以使干燥效率和干燥质量得到极大提高。

提高干燥速率(热效率),以降低能耗与成本 干燥操作是脱水蔬菜生产中主要的耗能单元,用空气作为干燥介质时,热效率仅为 30%~60%。开发高效率干燥设备,强化干燥过程以提高干燥速率(热效率),降低能量消耗和成本,同时兼顾干燥产品质量,就成为蔬菜干制研究发展的主要方向之一。

开发特种脱水蔬菜,以开拓新市场 由于特种蔬菜具有特殊的功能,具有开拓新的脱水蔬菜市场的潜力,已成为当前一个令人振奋的前沿领域,得到了许多

研究者和生产者的关注。目前特种脱水蔬菜研究方向有：调控脱水产品水分活性型、调节人体生理功能型、调节脱水产品自由基状态型、调控产品复原程度型等。

1. 2 微波干燥机理及特点

1. 2. 1 微波干燥机理

微波是指波长范围为 $1\text{mm} \sim 1\text{m}$ 、频率范围为 $300\text{MHz} \sim 300\text{GHz}$ 的电磁波。国际无线电管理委员会规定的民用微波频率有： 433MHz ， 915MHz ， 2450MHz ， 5800MHz 和 22125MHz 。国内通常用于加热的微波频率为： 915MHz 和 2450MHz 。微波发生器的磁控管接受电源功率而产生微波功率，通过波导输送到微波加热器中，使需要加热的物料在微波场的作用下被加热。微波加热利用的是介质损耗原理，而且水的损耗因数比干物质大得多，电磁场释放能量中的绝大部分被物料中的水分子吸收。一般情况下，被干燥物料中的水分子由于布朗运动，分子的排列杂乱无章并迅速变化，极性相互抵消，宏观上不呈现极性。而被置于由微波发生器产生的电场中时，微波场以每秒几亿次的高速周期地改变外加电场的方向，使介质的极性水分子迅速摆动，产生显著的热效应，从而使物料内部和表面的温度同时迅速升高。微波加热造就物料体热源的存在，改变了常规加热干燥过程中某些迁移势和迁移势梯度方向，形成了微波干燥的独特机理。由于物料中的水分介质损耗较大，能大量吸收微波能并转化为热能，因此物料的升温和蒸发是在整个物体中同时进行的。在物料表面由于蒸发冷却的缘故，使物料表面温度略低于里层温度；同时由于物料内部产生热量，以致内部蒸汽迅速产生，形成压力梯度。如果物料的初始含水率很高，物料内部的压力非常快地升高，则水分可能在压力梯度的作用下从物料中排出。初始含水率越高，压力梯度对水分排出的影响越大，也即有一种“泵”效应，驱使水分离向表面，加快干燥速度。由此可见，微波干燥过程中，温度梯度、传热和蒸汽压迁移方向均一致，从而大大改善了干燥过程中的水分迁移条件，当然要优于常规干燥。同时由于压力迁移动力的存在，使微波干燥具有由内向外的干燥特点，即对物料整体而言，将是物料内层首先干燥，这就克服了在常规干燥中因物料外层首先干燥而形成硬壳板结阻碍内部水分继续外移的缺点。

1. 2. 1 微波干燥特点

微波干燥具有以下明显特点：

干燥速度快、干燥时间短 由于微波能够深入到物料内部而不是靠物体本身的热传导进行加热,所以加热时间非常短,干燥时间可缩短 50% 或更多。

产品质量高 微波加热温度均匀,表里一致,干燥产品可以做到水分分布均匀。由于微波对水有选择加热的特点,可以在较低温度下进行干燥,而不致使产品中的干物质过热而损坏。微波加热还可以产生一些有利的物理或化学作用。

反应灵敏、易控制 通过调整微波输出功率,物料的加热情况可以瞬间改变,便于连续生产和实现自动化控制,提高劳动生产率,改善劳动条件。

热能利用率高,节省能源、环保、设备占地少 微波加热设备本身不耗热,热能绝大部分 (>80%) 都作用在物料上,热效率高,所以节约能源,一般可节电 30%~50%; 对环境温度几乎没有影响,微波干燥设备可以做得较小。

不丧失低温杀菌,保持食品营养和风味 微波加热具有热效应和生物效应,因此能在较低的温度下杀灭霉菌和细菌,最大限度地保持物料的活性和食品中的维生素、色泽和营养成分。

由于微波干燥具有以上明显特点,其在食品及农产品加工中的应用越来越广泛。

1.3 微波干燥食品现状及发展前景

1.3.1 国内外微波干燥食品的应用现状

微波干燥起源于上世纪 40 年代,到 60 年代国外才大量应用。由于微波干燥的独特优点使得其发展很快。国外已在轻工业、食品工业、化学工业、农业和农产品加工等方面得到应用。由于微波对水有选择加热的特点,使得粮食、油料作物、茶叶、蚕茧、木材、纸张、烟草等含水物质均可用微波进行干燥。上世纪 70 年代以来,国外微波干燥的应用还在继续扩大,特别是在食品干燥方面。如美国微波干燥公司研制的 915MHz、60KW 的通心面干燥机,每小时加工通心面 4000 磅,而细菌含量仅为原来的 1/15,该机比传统热风干燥节能 25%; 法国利用隧道式微波真空干燥机生产速溶桔粉,产品不仅保持了桔汁原有的颜色和风味,而且保留的维生素 C 是喷雾干燥不可能达到的; 日本成功地用微波干燥蛋黄粉; 瑞典用 2450MHz、80KW 的微波面包杀菌防霉机,用于每小时加工 4400 磅面包片的生产线上。我国微波干燥技术的应用始于上世纪 70 年代初期,到目前已应用于轻工、化工及农产品食品加工等方面。如上世纪 70 年代研制的 2450MHz、45KW 隧

道式微波干燥乳儿糕生产线,八十年代研制的 915MHz、40KW 牛肉干烘干、杀菌设备和微波大豆干燥脱腥设备,九十年代研制的微波无油方便面设备等等。尽管我国在微波干燥方面已经有一些成功的范例,但从整个食品行业来看,装机功率仍然非常低,与发达国家相比仍有很大的差距。

目前,成功应用微波干燥的食品种类很多,大致可以分为:

果蔬类——土豆片、薯片、菠菜、白菜、西红柿、胡萝卜、竹笋、蒜、苹果脯、葡萄、香蕉、黄桃、山楂、南瓜、葱、紫菜、西红柿、洋葱等;

肉制品——鸡肉、鱼片、对虾、香肠、牛肉干、猪肉等;

米面类——玉米片、通心面、糕点、面包、方便面、肉馅饼、方便米粉、大米等;

药材类——人参、药丸、鹿茸、蛇、枸杞、花粉、蜂王浆等;

饮料类——咖啡、桔粉、果汁、奶粉等;

农副土特产品——茶叶、大豆、花生、山野菜、瓜子、木耳、烟叶、谷物、油菜籽、香菇、海带等;

其它——蛋黄粉、魔芋粉、豆腐皮、槟榔芋等。

微波干燥食品的种类还有待于进一步开发研究,不少研究人员仍在进行这方面的努力,他们的研究文章不时见诸学术期刊、杂志。如陈燕、陈羽白的《荔枝微波干燥特性及其对品质的影响研究》(刊载于《农业工程学报》2004.04);朱德泉、王继先、朱德文等《玉米微波干燥特性及其对品质的影响》(刊载于《农业机械学报》2006.02);杜传来、叶洪梅、康永真等的《香椿芽微波干燥特性的研究》(刊载于《保鲜与加工》2007.01);赵超、陈建等《花椒微波干燥特性的试验研究》(刊载于《农业机械学报》2007.03);彭增华、刘丽等《云南普洱茶微波干燥工艺研究》(刊载于《昆明理工大学学报(理工版)》2007.03);杨金英、盖玲、王剑平等《春笋微波干燥动力学模型研究》(刊载于《干燥技术与设备》2007.04)。这些研究为微波干燥食品的进一步开发、应用奠定了良好的理论基础。

1. 3. 2 微波干燥食品发展前景

IDS(国际干燥会议)常任主席 A. S. Mujumdar 教授指出:1990 年以来,干燥的能源价格依然是重要的,但对于干燥研究而言不再是最关键的因素,现在是

由新产品和新的加工过程的需求推动干燥研究。同时指出,如今的热风干燥不是一种环保良好的作业,矿物燃料的燃烧产生的二氧化碳是被称之为“绿色居室效应”的主要成分。基于这些考虑,当前干燥的总目标是“以最快的速度排除液体(通常是水)并对产品有最小的负面影响;不破坏环境以及投入最低的资金和操作费用”。因此,此领域的实际工程策略,是对各种规模的干燥过程,从百万级(从经济和环保考虑)到微量级(物料性质)进行探索和联合考虑。还指出对流、传导和微波干燥可否联合的构想。食品的干燥也应以此为目标进行研究。微波干燥作为一项新技术正符合这样的发展要求。

我国自 1973 年由南京电子管厂(现南京三乐电气总公司)率先研制成功工业微波干燥设备以来,经过 20 余年的发展,我国在微波加热设备方面已经完全能够国产化,磁控管的寿命和质量大大提高,整机生产技术已经过关,并能向国外出口。在工业、医疗和高新科技等领域都完全走向实用性阶段,并发展成为一支新的产业,特别是食品、轻纺、化工、农产品干燥等方面,在节约能源,提高生产率,改善劳动条件和提高产品质量等方面都取得了明显的经济效益和社会效益。我国已先后开发了用于食品工业的系列微波炉、食品干燥机等微波设备。但是因微波干燥设备的技术要求较高,现在生产微波干燥设备的企业还比较少,产品缺少系列化。目前生产微波设备的企业主要有以下四种类型:①以三乐电气总公司等为代表的老牌国有企业;②以格兰仕、美的等为代表的以内资为主的股份公司;③以上海松下等为代表的以外资为主的合资企业;④规模较小的私营或集体企业。相对来说,我国微波干燥食品的研究要滞后一些。由于微波干燥和烹制的特点,在开发微波干燥食品时首先要解决其色泽、风味和包装等问题,为此这方面还有大量的工作要做。

我国是一个拥有 13 亿人口的发展中国家,食品工业在国民经济中起着举足轻重的作用,庞大的消费体已为微波食品的开发提供了广阔的潜在市场,只有加快研究和开发的步伐,才能使微波能的应用取得更大的经济和社会效益。可以预见,微波干燥作为一项高新技术,以其独特的加热特点和干燥机理为食品干燥开辟了一条崭新的途径,应用前景十分广阔。微波技术将在完善自身技术方法和设备的同时,不断与其它干燥技术相结合,向着更广更深的方向发展,新兴的微波真空干燥技术、微波冷冻干燥技术以及微波膨化技术等都将在理论的建立、完善

和应用中不断发展。

1. 4 本论文研究的主要内容

茭白又名茭瓜、菰首、茭笋,属于禾本科宿根性多年水生草本植物,原产我国,主要分布在长江流域以南各地。茭白味道鲜美、营养丰富而深受人们喜食。茭白是一种高含水量的水生蔬菜,采后极易失去水分而导致萎蔫,常温下较难保存,一般仅为3~5d,时间过长会出现茭壳变黄、肉质发青、纤维化、霉变、软化甚至于腐烂等现象,影响食味。近年来,我国茭白生产发展迅猛,盛产期茭白产地都曾出现严重积压,造成茭白价格迅速下滑甚至出现大量茭白腐烂田头的现象。

本论文利用微波炉对茭白进行了一系列微波干燥试验研究,旨在通过干燥试验,研究茭白干燥理论,探索茭白干制实践,对于调节茭白供应淡旺季,减少盛期损失,增加农民收入等具有积极的现实意义。

本论文研究的主要内容是:进行微波干燥茭白的干燥特性试验,拟得出茭白微波干燥的失水规律和耗电规律,建立茭白微波干燥数学模型;以微波干燥外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量为试验指标,以前期单位发射功率、后期单位发射功率、前期干燥时间为因素,对茭白微波干燥进行三因素四指标的二次正交回归旋转组合试验,拟得出三因素对四指标的影响规律,建立各目标函数回归方程并进行单目标及多目标综合优化,得出微波干燥茭白的较佳工艺。

经文献检索,目前国内外尚无对茭白微波干燥进行过研究和报道。

2 茭白微波干燥试验方法

2.1 试验设备

2.1.1 微波炉

型号 G80F20CSL-DG (S0); 额定电压及额定频率 220V、50Hz; 额定输入功率 1300W (微波)、850W (光波); 微波输出功率 800W; 额定微波频率 2450MHz。微波火力分十档, 分别为 10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%和 100%火力。该设备由佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司生产。

2.1.2 烘箱

型号 202-A0 台式干燥箱; 额定电压及额定频率 220V、50Hz; 加热功率 3.6Kw。该设备由上海浦东劳丰科学仪器公司生产。

2.1.3 温度指示控制仪

型号 WMZK-01; 温控范围 20℃ ~ 300℃; 灵敏度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。该仪器由余姚热工仪表厂生产。

2.1.4 电子天秤

型号 T1000Y; 量程 1000g; 精度 $d=0.1\text{g}$ 。该仪器由常熟市双杰测试仪器厂生产。

2.1.5 单相电子式电能表

型号 DDS237; 额定电压 220V; 标定电流 25 (10) A; 电表常数 6400imp/kwh; 准确度等级 1.0 级。该仪器由上海华立电表厂生产。

2.1.6 其它设备

西门子冰箱、刻度尺等。

2.2 试验方法

2.2.1 干燥预处理

带壳茭白从农贸市场同一批购进, 用塑料袋包装、扎紧, 放入冰箱冷藏 1~2 天后实验。

实验前, 从冰箱中取出茭白并在室温下放置约 1 小时后剥壳分选, 选取形状均匀、大小相仿、嫩度相当、无损伤的茭白做实验。然后按一定的要求 (切片厚

度)进行切片,再用滤纸吸去表面水分,称重均匀平铺在网状耐热塑料盛物盘里。

2. 2. 2 茭白初始含水率测定

用烘箱测定。按干燥预处理后,将茭白切成片状,大小均匀,取 50g 放入事先调好温度(105℃)的烘箱,烘 2 小时后,每 15 分钟称重,直至茭白质量基本不变,此时质量即可认作茭白片的干物质质量 $M_{干}$ 。经测定本次实验 50g 茭白的干物质质量为 3.4g。

茭白初始含水率公式为:

$$W_{初} = (M_{初} - M_{干}) / M_{初} * 100\%$$

式中: $W_{初}$ ——茭白初始含水率(湿基), %

$M_{初}$ ——茭白初始质量, g

$M_{干}$ ——茭白的干物质质量, g

经计算,实验所用茭白的初始含水率为 93.2%(湿基)。

2. 2. 3 茭白微波干燥 t 时刻含水率测定

茭白 t 时刻含水率测定,是由该时刻茭白质量、茭白初始质量及初始含水率计算得到。公式如下:

$$W_{t,湿} = (M_t - M_{干}) / M_t * 100\%$$

$$W_{t,干} = (M_t - M_{干}) / M_{干} * 100\%$$

$$M_{干} = M_{初} - M_{初} * W_{初}$$

式中: $W_{t,湿}$ ——茭白 t 时刻的含水率(湿基), %

$W_{t,干}$ ——茭白 t 时刻的含水率(干基), %

M_t ——茭白 t 时刻的质量, g

$M_{初}$ ——茭白初始质量, g

$W_{初}$ ——茭白初始含水率(湿基), %

2. 2. 4 微波干燥实验

称取一定量的经预处理过的茭白片,均匀平铺在网状耐热塑料盛物盘,放入微波炉干燥。在干燥过程中,每隔一段时间迅速取出称重一次(称重时间间隔视具体情况确定),记录时刻重和耗电量,直至达到所要求的水分(安全含水率)为止。茭白安全含水率为 17~19%(湿基)、20.5~23.5%(干基)。

2. 2. 5 干制品复水实验

将干燥到安全含水率的茭白片称重,放入盛有适量清水的杯中浸泡 24 小时

后取出, 用滤纸吸去表面水分后称重。

2. 3 实验指标

2. 3. 1 失水速率

干燥过程中失水速率采用一定时间内两相邻测试点间茭白含水率的变化量表示。公式如下:

$$V_t = (W_{t1} - W_{t2}) / T * 100\%$$

式中: V_t ——失水速率, %/min

W_{t1} 、 W_{t2} ——分别为 t_1 、 t_2 相邻两时刻茭白的含水率 (干基)

T ——两相邻测试点时间差, min

2. 3. 2 复水性能指标

果蔬干制品复水性能指标常用两种: 复水比 (R_x) 和复水系数 (K_x), 其相应的计算公式分别如下:

$$R_x = G_x / G_z$$

式中: G_x ——干制品复水后滤干的重量, g

G_z ——干制品复水前的重量, g

$$K_x = G_x / G_{\text{鲜}}$$

式中: $G_{\text{鲜}}$ ——干制品在干燥前相应的鲜物重量, g

2. 3. 3 单位耗电量

单位耗电量是指脱去每千克水的耗电量, 是干燥全过程耗电量与脱去总水量的比值。单位为 kwh/kg。公式如下:

$$p = \Delta P / \Delta G$$

式中: ΔP ——干燥过程实际耗电量, kwh

ΔG ——干燥脱去的总水量, kg

2. 3. 4 单位时间降水率

单位时间降水率是反映干燥全过程干燥速度快慢的指标, 它是干燥全过程脱水百分率 (湿基) 与实际干燥时间的比值。公式如下:

$$V_{\text{降}} = (W_{\text{初}} - W_{\text{安}}) / \Delta t$$

式中: $V_{\text{降}}$ ——单位时间降水率, %/min

$W_{\text{初}}$ ——初始含水率 (湿基), %

$W_{\text{安}}$ ——干燥到安全含水率区域的实际含水率（湿基），%

Δt ——从初始干燥到安全含水率微波干燥的实际时间，min

2. 3. 5 茭白干制品外观质量指标

干制品外观质量指标是一项很重要的指标，它直接关系到干燥方法是否可行。在对茭白干制品进行质量评定时，本论文采取有经验专家打分的方法进行。从茭白干制品实际情况出发，综合考虑干制品色泽、香味、外形、软硬等指标。茭白干制品质量评分标准见表 2-1。

表 2-1 茭白干制品外观质量评分标准（满分：34）

评分指标	评分标准	加权值
色泽	乳白（5） 淡黄（4） 黄（3） 焦黄（2） 焦黑（1）	3
外形	不翘曲（4） 翘曲轻微（3） 翘曲一般（2） 翘曲严重（1）	2
香味	浓（4） 一般（3） 淡（2） 无（1）	2
软硬	软（3） 一般（2） 硬（1）	1

3 茭白微波干燥特性的试验与分析

本章节采取不同切片厚度、不同装载量和不同微波火力对茭白微波干燥特性进行试验和分析。

3. 1 切片厚度对茭白微波干燥特性的影响

将用塑料袋包好的保存在冰箱冷藏 1-2 天的茭白取出，在室温下放置 1 小时后，剥去茭壳，用干滤纸吸去茭白表面水分后，将茭白斜切成大小相对均匀、厚度分别为 4mm、6mm、8mm 的茭白片。各称取 200g，选择 30%火力档进行微波干燥。每间隔 4 分钟取出并迅速称重，记录耗电量和茭白时刻重，计算各时刻含水率(干基) W_t 和各时段失水速率 V_t 。

3. 1. 1 切片厚度对失水特性的影响

根据不同切片厚度的茭白微波干燥实验数据，绘制含水率(干基) W_t —时间 t 的曲线图(见图 3-1)、失水速率 V_t —时间 t 的曲线图(见图 3-2)和失水速率 V_t —含水率(干基) W_t 的曲线图(见图 3-3)。

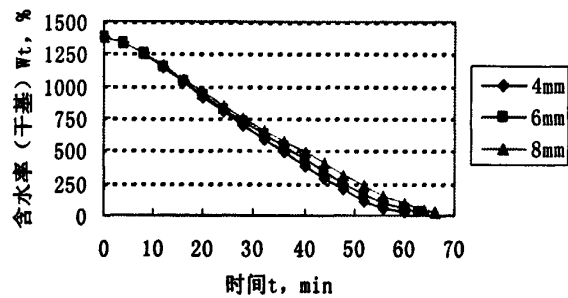


图 3-1 切片厚度对失水的影响(装载量 200g,火力 30%)

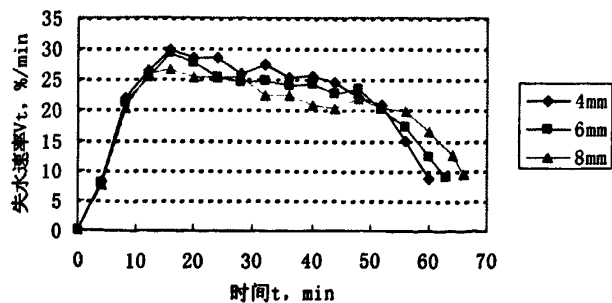


图 3-2 切片厚度对失水速率的影响(装载量 200g, 火力 30%)

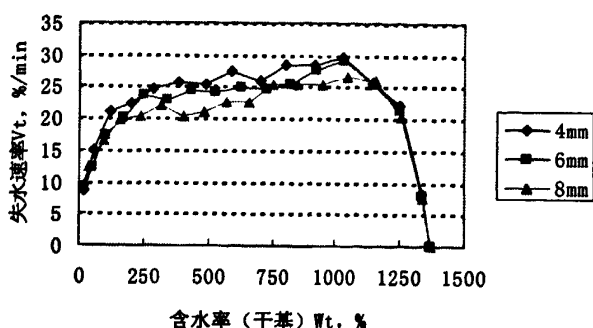


图 3-3 切片厚度对失水速率的影响 (装载量 200g, 火力 30%)

图 3-1 表示的是不同切片厚度在相同干燥条件下, 在干燥过程中含水率随时间变化的曲线。由图可知, 在微波干燥过程中, 同一时刻切片厚度对茭白失水有影响, 但影响不大。从干燥开始到干燥到茭白安全含水率 (湿基: 17~19%; 干基: 20.5~23.5%), 200 克茭白在 30%火力下, 总体干燥时间大多为 60 余分钟。这是因为微波干燥有别于传统的热风干燥, 它是通过对物体内外进行“整体加热”, 通过激励物料内部极性分子, 使物料内部产生热量来进行的, 因此切片厚度对失水影响不大。虽然影响不大, 但可以看出, 切片厚度的影响还是有一定的规律可循: 随着厚度增加, 失水速率略降, 干燥时间略长。图 3-1 表明, 在干燥过程中, 同一时刻的含水率随切片厚度增加而增大, 干制到相同含水率所花时间也略多些。这可能是由于切片厚度增加, 内部水分向外层迁移需要更多时间, 单位质量表面积减少以致散热条件下降以及微波能在渗透过程中衰减的缘故。图 3-2 和图 3-3 显示, 不论切片厚度厚薄, 茭白微波干燥速度大体分为三个阶段, 即初期加速失水干燥阶段、中期相对匀速失水干燥阶段和后期降速失水干燥阶段。干燥初期, 三种不同切片厚度的茭白片, 其失水速率沿着相同的“轨迹”加速失水干燥 (表现在失水速率曲线图, 其曲线基本重合), 当干燥到一定程度 (图 3-3 显示干基含水率下降至 1150%左右) 后, 才按各自“轨迹”失水干燥: 厚度厚的 8mm 茭白片率先进入相对匀速失水干燥阶段, 其次是 6mm 厚度、最后是 4mm 厚度茭白片才相继进入相对匀速失水干燥阶段。干燥中期, 厚度较薄的 4mm 厚度茭白片的失水速率较高, 相对匀速失水干燥阶段的时间较短; 厚度最厚的 8mm 厚度的茭白片失水速率较低, 在相对匀速失水干燥阶段的时间较长。干燥后期, 厚度较薄的 4mm 茭白片率先进入降速失水阶段, 其次是 6mm 厚度茭白片, 最后是 8mm 厚度茭白片。4mm 厚度茭白片降速时间较短, 8mm 厚度茭白片降速时间较长。分析茭白

干燥出现以上三个阶段的原因, 本文认为: 存在第一阶段是因为微波干燥初期, 茭白片需要一个升温过程, 微波能量一部分用来使茭白片温度上升, 另一部分用于脱去水分。随着温度的升高, 用来使茭白升温的能量减少, 相应地用来蒸发水分的能量增加, 因此就加速失水。当温度升高到一定程度, 温度不再升高, 此时所有能量都用来蒸发茭白的水分, 失水速率就达到最大, 也就进入了第二个阶段(相对匀速失水干燥阶段)。在这个阶段, 茭白片表面有足够的水分吸收微波能量而蒸发, 茭白的失水速率保持相对恒定。当茭白表面没有足够水分吸收微波能量, 而内部水分向表面转移的速度又赶不上表面水分汽化速度时, 相对匀速失水干燥阶段即告结束, 从而进入第三阶段(降速失水干燥阶段)。在这个阶段, 随着茭白片内部水分的减少, 物料介质耗能下降(即物料吸收微波能减少), 内部水分向表面迁移以供蒸发越来越难, 蒸发水分的速率也就越来越小, 这就形成了降速失水干燥阶段。

3. 1. 2 切片厚度对耗电量的影响

根据不同切片厚度的茭白微波干燥实验数据, 绘制耗电量—时间 t 的曲线图(见图 3-4)和耗电量—含水率(干基) W_t 的曲线图(见图 3-5)。

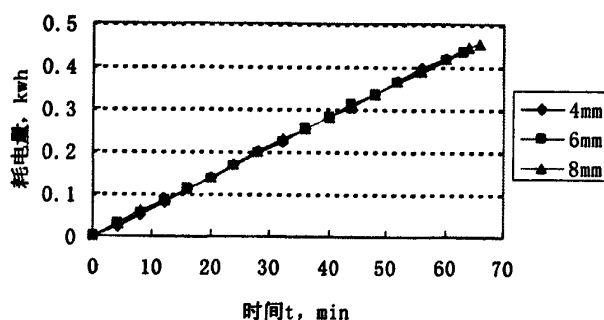


图 3-4 切片厚度对耗电量的影响(装载量 200g, 火力 30%)

由图 3-4 可知, 耗电量与时间呈线性变化。这是因为在功率一定条件下, 耗电量与时间成正比关系, 且斜率相同。不同切片厚度对物料干制到安全含水率的耗电量影响不大, 这是因为微波干燥使物料内外整体加热, 所以切片厚度影响不明显。实验中, 6mm 厚度茭白片的耗电量仅比 4mm 厚度茭白片的耗电量增加了 3.6%, 而 8mm 厚度茭白片的耗电量也仅比 4mm 厚度茭白片的耗电量增加了 7.1%。

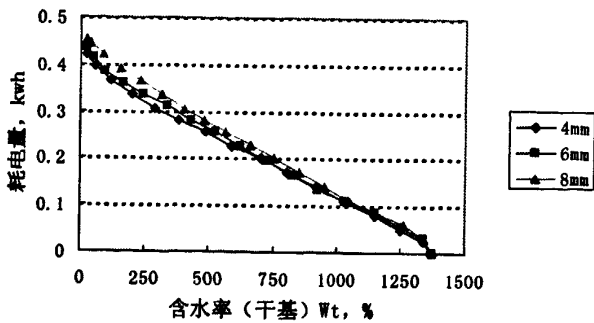


图 3-5 切片厚度对耗电量的影响（装载量 200g，火力 30%）

由图 3-5 可知，耗电量与含水率呈非线性关系。从图中可以看出，相同含水率随着切片厚度增加，耗电量有所增加，也就是说随着切片厚度增加，干燥到相同含水率，耗电量有所增加。

3. 2 装载量对茭白微波干燥特性的影响

将用塑料袋包好的保存在冰箱冷藏 1-2 天的茭白取出，在室温下放置 1 小时后，剥去茭壳，用干滤纸吸去茭白表面水分后，将茭白斜切成大小相对均匀、厚度为 4mm 的茭白片。分别取 100g、200g、300g 茭白片，选取 30%火力档进行微波干燥。每间隔 4 分钟取出并迅速称重，记录耗电量和茭白时刻重，计算各时刻含水率（干基） W_t 和各时段失水速率 V_t 。

3. 2. 1 装载量对失水特性的影响

根据不同茭白片装载量的实验数据，绘制含水率（干基） W_t —时间 t 的曲线图（见图 3-6）、失水速率 V_t —时间 t 的曲线图（见图 3-7）和失水速率 V_t —含水率（干基） W_t 的曲线图（见图 3-8）。

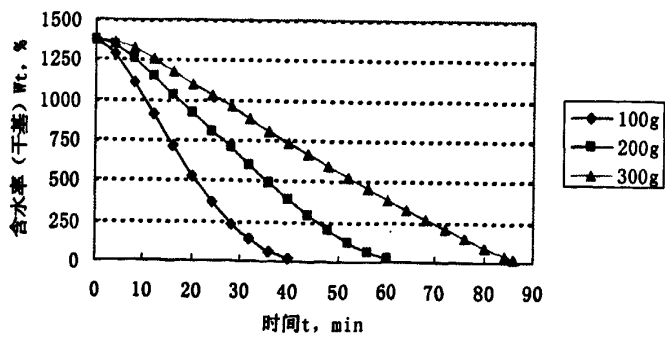


图 3-6 装载量对失水的影响（切片厚度 4mm，火力 30%）

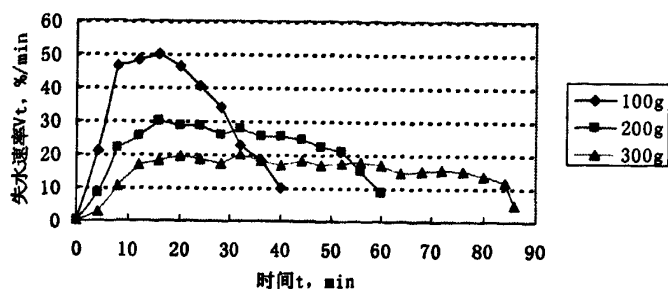


图 3-7 装载量对失水速率的影响 (切片厚度 4mm, 火力 30%)

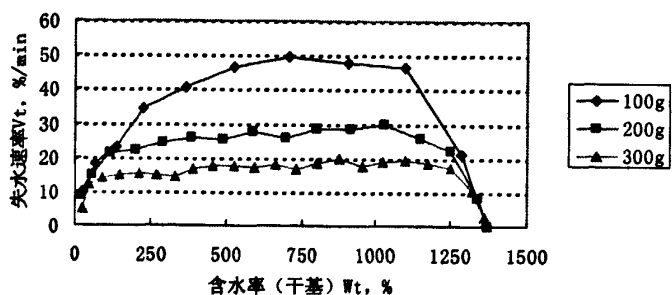


图 3-8 装载量对失水速率的影响 (切片厚度 4mm, 火力 30%)

图 3-6 为不同装载量在干燥过程中不同时刻的含水率曲线图。由图可知, 在相同干燥状况下, 不同装载量表现在干燥时间上 (干燥到安全含水率), 装载量少的, 干燥时间短; 装载量多的, 干燥时间长。实验中, 100 克装载量的, 干燥时间为 40 分钟; 200 克装载量的, 干燥时间达到 60 分钟, 增加 50%; 300 克装载量的, 干燥时间达到 86 分钟, 比 100 克装载量的多了 1 倍多干燥时间。图 3-7、图 3-8 分别为不同装载量在干燥过程中, 失水速率随时间变化和含水率变化的曲线图。由图看出, 整个微波干燥过程可分为三个阶段, 即初期加速失水干燥阶段、中期相对匀速失水干燥阶段和后期降速失水干燥阶段。在相同干燥条件下, 装载量不同, 相应的失水速率也不同: 装载量越大, 其失水速率越小; 反之, 则失水速率越大。这是因为随着装载量增加, 单位质量吸收的微波能量减少, 因而失水速率下降。

3. 2. 2 装载量对耗电量的影响

根据不同茭白片装载量的实验数据, 绘制耗电量—时间 t 的曲线图 (见图 3-9) 和耗电量—含水率 (干基) W_t 的曲线图 (见图 3-10)。

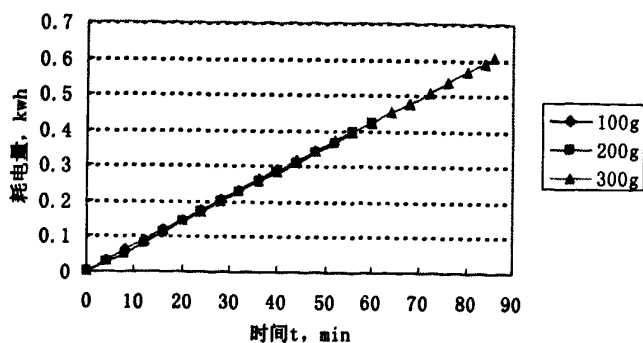


图 3-9 装载量对耗电量的影响 (切片厚度 4mm, 火力 30%)

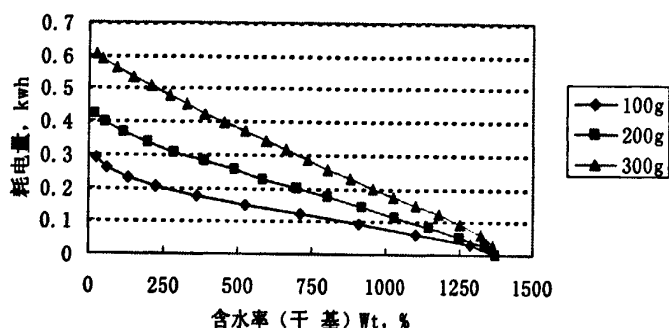


图 3-10 装载量对耗电量的影响 (切片厚度 4mm, 火力 30%)

图 3-9 显示,耗电量与时间呈线性关系,三条线基本重合,这是因为干燥功率相同。由图 3-10 可知,干制到相同含水率,耗电量随装载量增加而增大。实验中,100g 茭白片干制到安全含水率,耗电 0.29kwh;200g 茭白片干制到安全含水率,耗电 0.42kwh,比 100g 茭白片的耗电量增加 44.8%;300g 茭白片干制到安全含水率耗电 0.605kwh,比 100g 茭白片的耗电量增加 1.09 倍。

3.3 微波发射火力对茭白微波干燥特性的影响

将用塑料袋包好的保存在冰箱冷藏 1-2 天的茭白取出,在室温下放置 1 小时后,剥去茭壳,用干滤纸吸去茭白表面水分后,将茭白斜切成大小相对均匀、厚度为 4mm 的茭白片。每次称取 200g,分别选取 20%火力档、30%火力档和 40%火力档进行微波加热。每间隔 4 分钟取出并迅速称重,记录耗电量和茭白时刻重,计算各时刻含水率 (干基) W_t 和各时段失水速率 V_t 。

3.3.1 火力对失水特性的影响

根据不同火力的实验数据,绘制含水率 (干基) W_t -时间 t 的曲线图 (见图

3-11)、失水速率 V_t —时间 t 的曲线图 (见图 3-12) 和失水速率 V_t —含水率 (干基) W_t 的曲线图 (见图 3-13)。

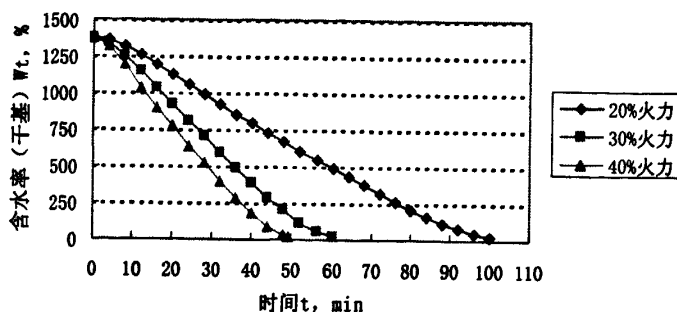


图 3-11 火力对失水的影响 (切片厚度 4mm, 装载量 200g)

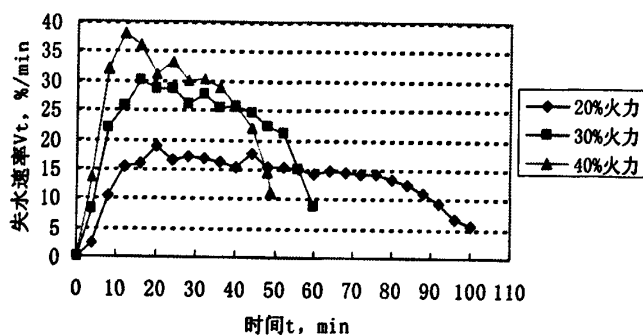


图 3-12 火力对失水速率的影响 (切片厚度 4mm, 装载量 200g)

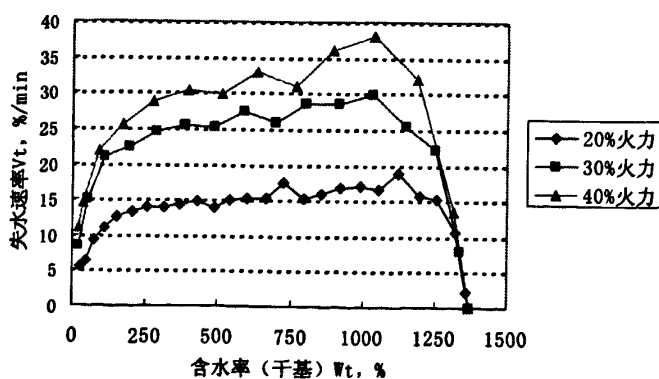


图 3-13 火力对失水速率的影响 (切片厚度 4mm, 装载量 200g)

从图 3-11 可以看出, 不同微波火力干燥茭白时, 其含水率随时间变化是不同的: 在干燥过程的同一时刻, 微波火力越大, 含水率越低; 微波火力越大, 干制到安全含水率所需时间越短。这说明微波火力越大, 干燥得越快。在干燥后期,

含水率(干基) W_t —时间 t 曲线变得平缓,这说明微波干燥脱水难度增加,这是因为干燥后期物料含水率较低,其介质耗能减少,物料吸收微波能减少,加上物料中大部分游离水已排除,剩余的主要是结合水与化学水,而化学水存在于蔬菜化学物质中,一般是不能因干燥作用而排除的。图 3-12、图 3-13 反映的是不同火力下失水速率与时间和失水速率与含水率的曲线。由图可看出,三种火力下茭白的微波干燥同样由三种过程组成,即初期是加速失水,中期相对匀速失水,后期则是降速失水。由图 3-12 可知,火力越大,加速期加速斜率越大,加速时间越短,即在更短的时间到达相对匀速失水期。在相对匀速失水期,火力越大,其失水速率越大,但相对匀速失水期时间越短。在进入降速失水期后,火力越大,降速斜率越大,降速时间更短。但要特别提出,在微波干燥过程中,火力越大,在干燥中后期易出现局部过热及打火现象,茭白内部容易烧焦,影响干制品外观质量。中后期火力较小,干制品质量较好。

3.3.2 火力对耗电量的影响

根据不同微波火力干燥的实验数据,绘制耗电量—时间 t 的曲线图(见图 3-14)和耗电量—含水率(干基) W_t 的曲线图(见图 3-15)。

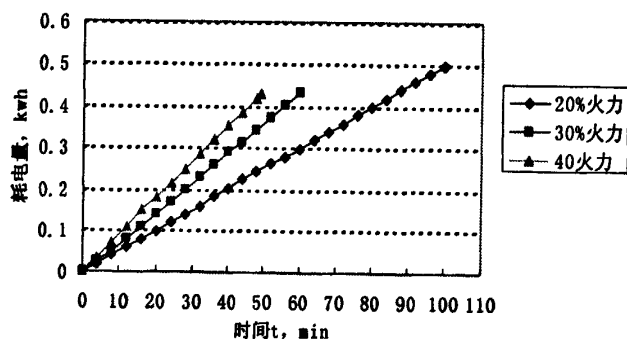


图 3-14 火力对耗电量的影响(切片厚度 4mm, 装载量 200g)

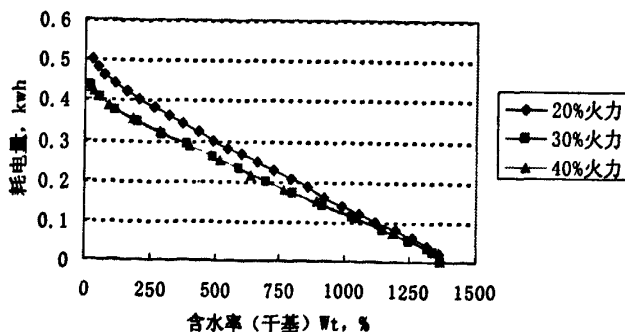


图 3-15 火力对耗电量的影响(切片厚度 4mm, 装载量 200g)

由图 3-14 可知,不同火力下的耗电量与时间均呈线性关系,也即随着时间增加,其耗电量呈线性增加。只是耗电量增加的斜率不一样,火力越大,斜率越大,说明其耗电速率越大。由图 3-15 可知,茭白微波干燥到安全含水率所耗电量,用 20%火力干燥的耗电量明显比 30%、40%火力干燥的大,大约要多耗 20%的电量。而用 30%、40%火力干燥的实验,其耗电量-含水率(干基)曲线却基本重合。究其原因,分析认为,茭白微波干燥的耗电量实际由两部分组成:一是磁波器发射微波能的电耗;二是微波炉其它部件的电耗。发射微波能的电耗受微波火力(相当于发射功率)和工作时间的双重影响,而其它部件的电耗则与工作时间成线性正比关系。当微波火力较低时,微波炉的电耗更大程度上是由其它部件的能耗所决定,工作时间越长,电耗越大。当微波火力逐步增大,发射微波能的电耗在整个微波炉耗电中的比重不断增加,并逐步成为主导作用时,电耗并不因火力增加、工作时间减少而减少,反而可能增加的了。此外,较高的微波火力,易使干燥物料表面形成低含水率“硬壳”,一定程度上阻碍水分向外扩散,相应增加一些干燥时间,也增加了电耗。这也就是用 40%火力干燥,与 30%火力相比,火力增加,干燥时间缩短,而耗电量并未减少的原因。

4 茭白微波干燥数学模型的研究

物料干燥是一个复杂的非稳态的传热传质过程,不仅受干燥介质的温度、湿度等影响,而且因物料种类、内部结构、外部形状及其物理化学性质的不同而存在明显差异。由于数学模型能较准确地描述物料在任何时刻干燥过程的状况,因此研究建立茭白微波干燥数学模型对摸索茭白微波干燥规律,预测不同干燥工艺下的工艺参数具有重要作用。本章节通过对果蔬常用数学模型的比较分析,确定了茭白微波干燥适用数学模型,并通过数据拟合,得出了茭白微波干燥拟合方程。

4.1 果蔬干燥常用数学模型

果蔬干燥作为干燥学科一个分支,干燥理论中的一些干燥模型,在研究果蔬干燥中也被广泛应用。最常用的是指数模型、单项扩散模型和 Page 方程模型。

4.1.1 指数模型

$$MR = \exp(-Kt)$$

式中: $MR = (W_t - W_e) / (W_0 - W_e)$ 称水分比。

W_t — t 时刻物料含水率(干基)/%;

W_0 —物料初始含水率(干基)/%;

W_e —物料干燥平衡含水率(干基)/%

$\exp$ — e 函数

t —干燥持续时间/min;

K —干燥常数,与工艺参数有关

这个模型最早由 Lewis (1921) 根据 Newton 冷却定律建立,它只考虑了物料表面边界层对水分运动的阻力,而忽略了内部水分运动的阻力。Pasis 等 (1961), Shahab、Sokinson 等 (1984) 利用这一模型研究了玉米、小麦、大麦等农作物的干燥特性。王俊 (1994) 在研究热风、远红外和微波干燥香菇、蘑菇失水方程时认为:该模型具有一定使用范围。热风干燥时不论粗大物料还是薄片物料,通过表面水汽化被强制带走来实现失水,内外浓度差是内部水分扩散的主要动力。干燥高水分物料时,水分以液态水的形式向表面扩散,而在微波干燥过程中由于激励产生内热源,使得内部有部分水分汽化,扩散形式多,速度快,因而不适用该模型。远红外干燥时,远红外具有一定穿透性,使得干燥能力介于两者之间,对

于粗大物料其干燥能力并不能表现出来,干燥过程分三个阶段,在每个阶段仍适用指数模型,而对于切片物料,水分扩散能力增强,因而不适用采用指数模型来表达。

4. 1. 2 单项扩散模型

$$MR=A\exp(-Kt)$$

式中: MR 、 $\exp$ 、 K 、 t 含义同前。 A 为待定系数,是与干燥条件有关的常数。

该模型根据 Pick 第二扩散定律建立,假定物料中的水分以液态水形式从表面向外扩散。Thompson(1967)、Wing 和 Singh(1978)、Sharaf 和 Eldeen(1979)曾利用这一模型研究稻谷、小麦等干燥特性。王俊(1994)分别用热风 and 远红外对香菇进行干燥研究,发现其干燥方程与单向扩散模型相符。王修兰等(1992)在研究金针菇干燥特性时,发现单向扩散方程能较好模拟金针菇实际干燥过程。

4. 1. 3 Page 方程模型

$$MR=\exp(-Kt^n)$$

式中: MR 、 $\exp$ 、 K 、 t 含义同前。 n 为幂指数,是与干燥条件有关的常数。

Page 方程模型是在指数模型基础上的经验改进。Page(1949)利用这个方程模拟了玉米干燥模型。Syarief(1984)用 Page 方程研究了向日葵的干燥特性。Pathak(1991)通过实验确定了油菜籽在传统的干燥温度范围和提高了的温度范围内的降水速度。Liu(1989)、Muhidong(1992)分别对辣椒、洋麻(韧皮和芯部纤维)的薄层干燥过程进行了实验研究,发现 Page 方程符合两者的干燥特性。

4. 2 茭白微波干燥模型的确定

根据上述介绍的三种数学模型:指数模型、单项扩散模型和 Page 方程模型。茭白微波干燥满足何种干燥模型,必须对实验数据进行比对研究后才能确定。对指数模型、单项扩散模型和 Page 方程模型的数学表达式进行线性化处理,将茭白微波干燥实验中各实验数据转化成 $\ln MR-t$ 和 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 的形式,视符合何种线性关系而确定适用干燥模型。

4. 2. 1 常用模型表达式线性化处理

对指数模型、单项扩散模型和 Page 方程模型的数学表达式进行线性化处理,分别得表达式如下:

指数模型数学表达式线性化处理: $\ln MR = -Kt$

单项扩散模型数学表达式线性化处理: $\ln MR = \ln A - Kt$

Page 方程模型数学表达式线性化处理: $\ln(-\ln MR) = \ln K + n \ln t$

三种模型经处理后, 由非线性关系转变为线性关系。

4. 2. 2 茭白微波干燥适用模型确定

因微波干燥果蔬的平衡含水率 M_e 资料很少, 实验也难以确定, 因此将水分比 MR 简化为: $MR = W_t / W_0$; W_t 为物料在 t 时刻的含水率 (干基), W_0 为物料初始含水率 (干基)。

根据前面实验数据, 计算不同切片厚度、不同装载量、不同微波发射火力条件下各时刻的 $\ln MR$ 、 $\ln(-\ln MR)$ 值, 绘制 $\ln MR-t$ 曲线图 (见图 4-1、图 4-2、图 4-3) 和 $\ln(-\ln MR)-\ln t$ 曲线图 (见图 4-4、图 4-5、图 4-6)。

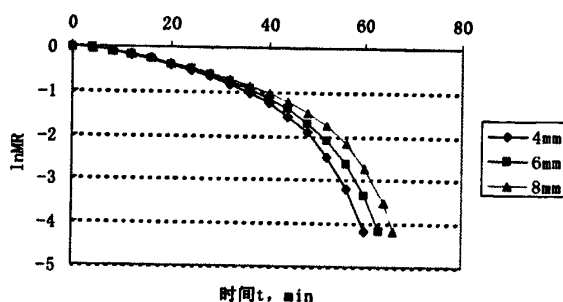


图 4-1 不同切片厚度下的 $\ln MR-t$ 曲线

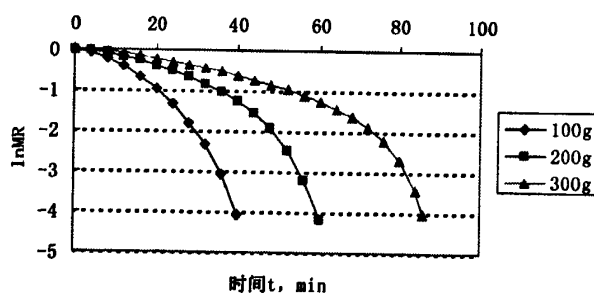


图 4-2 不同装载量下的 $\ln MR-t$ 曲线

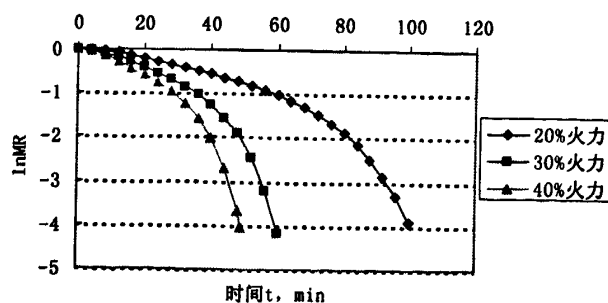


图 4-3 不同微波火力下的 $\ln MR-t$ 曲线

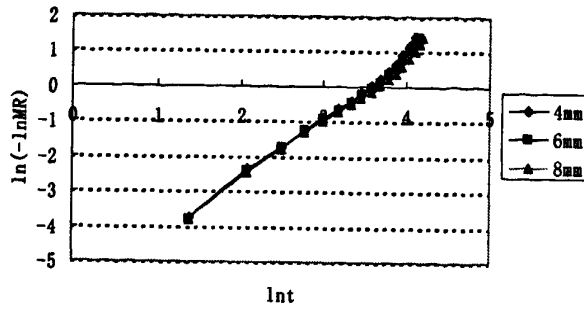


图 4-4 不同切片厚度下的 $\ln(-\ln MR)$ — lnt 曲线

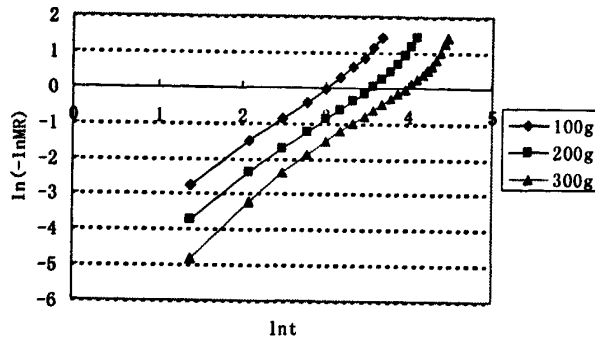


图 4-5 不同装载量下的 $\ln(-\ln MR)$ — lnt 曲线

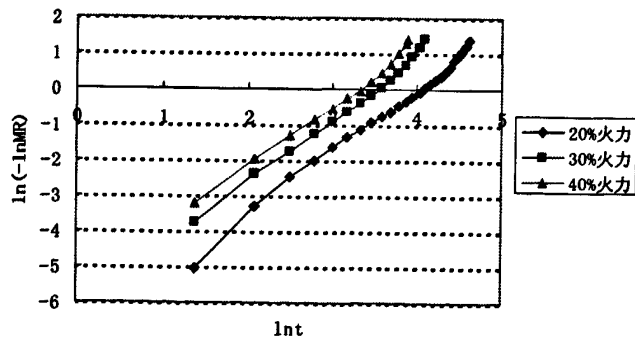


图 4-6 不同微波火力下的 $\ln(-\ln MR)$ — lnt 曲线

从图 4-1、图 4-2、图 4-3 可以发现，各图中曲线在各点处的斜率是各不相同的，这说明 $\ln MR$ 与时间 t 不成线性关系，因此指数模型和单项扩散模型不适合茭白微波干燥模型的建立。从图 4-4、图 4-5、图 4-6 可看出，各曲线基本成直线，说明 $\ln(-\ln MR)$ 与 lnt 成较好的线性关系，Page 方程符合茭白微波干燥特性，可以用 Page 方程建立茭白微波干燥数学模型。

4.3 茭白微波干燥模型的拟合

由前述知，这是一个 $\ln(-\ln MR)$ 与 $\ln t$ 的线性方程，茭白的微波干燥适用此方程。从图 4-4 可知，三种不同切片厚度的 $\ln(-\ln MR) - \ln t$ 曲线几乎重合，这说明切片厚度对 $\ln(-\ln MR) - \ln t$ 方程影响不大，因此可以在方程拟合中不考虑切片厚度的因素影响。从图 4-5、图 4-6 中看出，不同装载量以及不同微波火力的 $\ln(-\ln MR) - \ln t$ 曲线，几成三条互相平行的直线，且间距明显，这说明装载量、火力对 $\ln(-\ln MR) - \ln t$ 方程影响较大，在拟合方法时应该考虑。由于微波火力无法量化，这对研究火力对干燥方程的影响带来困难。微波火力实际上是通过调节微波发射次数来达到控制微波发射强度的目的，高火（100%火力）时是连续发射微波，低火时微波发射次数较疏，为量化微波火力，便于微波干燥实验研究，经请教微波及农产品加工方面专家，可以将微波火力视同“微波发射功率”来研究。各档“微波发射功率”为微波炉输出功率与各档火力系数的乘积。本实验各档微波火力与“微波发射功率”的对应关系见表 4-1。

表 4-1 微波火力与“微波发射功率”的对应关系

微波火力	10%档	20%档	30%档	40%档	50%档	60%档	70%档	80%档	90%档	100%档
微波发射功率(w)	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800

为使干燥方程更具有实际应用价值，同时从简化因子出发，将装载量和“微波发射功率”合在一起考虑，即用微波火力相对应的“微波发射功率”与装载量的比值（称为单位质量发射功率，用 P 表示）来研究干燥方程。本文采用单位质量发射功率二次方程求系数。

将 Page 方程模型： $MR = \exp(-Kt^n)$ 线性化，得：

$$\ln(-\ln MR) = \ln K + n \ln t$$

令： $\ln K = a + bP + cP^2$, $n = d + eP + fP^2$

则有： $\ln(-\ln MR) = a + bP + cP^2 + (d + eP + fP^2) \ln t$

式中： P —单位质量发射功率，单位为 w/g

$a、b、c、d、e、f$ —待定系数

根据茭白微波干燥特性的 118 组实验数据，利用 DPS 数据处理系统进行拟合，得出茭白微波干燥拟合方程的各待定系数、方程系数的标准误差与 t 测验，并对拟合方程进行统计检验。结果分别见表 4-2、表 4-3。

由表 4-2 可知，系数 e、f 的显著水平为不显著，可以剔除。则得茭白微波干燥的拟合方程：

$$\ln(-\ln MR) = -9.61532 + 3.79720P - 0.82312P^2 + 1.91372\ln t$$

式中：MR—简化的水分比。MR=W_t/W₀，W_t为物料在 t 时刻的含水率（干基），
W₀为物料初始含水率（干基）

P—单位质量发射功率，w/g

t—干燥持续时间，min

经对拟合方程统计检验（检验结果见表 4-3），F 检验值为 1792.46704，p < 0.00001，达到极显著水平。相关系数为 0.9938，拟合度 98.77%，拟合效果很好。因此该拟合方程可作为茭白微波干燥的数学模型，利用这个模型可以比较准确地预测茭白在微波干燥过程中各时刻的水分比和含水率。

表 4-2 茭白微波干燥拟合方程系数、标准误差与 t 测验

各系数	标准误差	t 值	显著水平
a=-9.61532	0.54782	17.55197	0.00000
b=3.79720	0.79209	4.79388	0.00001
c=-0.82312	0.25414	3.23889	0.00158
d=1.91372	0.15669	12.21306	0.00000
e=-0.18062	0.23241	0.77716	0.43870
f=0.04848	0.07652	0.63358	0.52764

表 4-3 茭白微波干燥拟合方程的统计检验

方程来源	平方和	df	均方	F 值	显著水平	R	拟合度
回归	226.28977	5	45.25795	1792.46704	0.00000	0.9938	98.77%
剩余	2.82789	112	0.02525	-	-	-	-
总的	229.11765	117	1.95827	-	-	-	-

5 茭白微波干燥较佳工艺的实验研究

5. 1 试验设计

本试验选取前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间作为三因素，以单位时间降水率、单位耗电量、复水比和外观质量为指标，进行三因素五水平的二次正交旋转组合试验。

5. 1. 1 列因素水平编码表

根据二次正交旋转组合设计参数表，变量 $p=3$ ，则 $m_c=2^p=2^3=8$ ， $m_r=2p=2 \times 3=6$ ，零水平 $m_0=9$ ，星号臂 $\gamma=1.682$ 。试验总次数 $N=m_c+m_r+m_0=8+6+9=23$ 。

选定前期单位质量发射功率下水平 $z_{11}=1.4\text{w/g}$ ，上水平 $z_{21}=2.6\text{w/g}$ ；后期单位质量发射功率下水平 $z_{12}=1.4\text{w/g}$ ，上水平 $z_{22}=2.6\text{w/g}$ ；前期干燥时间下水平 $z_{13}=14\text{min}$ ，上水平 $z_{23}=26\text{ min}$ 。

依据编码公式： $Z_{0j}=(Z_{1j}+Z_{2j})/2$ ； $\Delta_j=(Z_{21}-Z_{11})/\gamma$ ； $X_j=(Z_j-Z_{0j})/\Delta_j$ ，得出茭白微波干燥各因素实际值与编码值换算关系式如下：

$$Z_1=0.6X_1+2; \quad Z_2=0.6X_2+2; \quad Z_3=6X_3+20$$

列各因素及水平编码表（见表 5-1）：

表 5-1 茭白微波干燥各因素水平编码表

因素(Z_j) 编码(X_i)	前期单位质量 发射功率 Z_1 (w/g)	后期单位质量 发射功率 Z_2 (w/g)	前期干燥时间 Z_3 (min)
1.682	3	3	30
1	2.6	2.6	26
0	2	2	20
-1	1.4	1.4	14
-1.682	1	1	10

5. 1. 2 试验计划确定

根据编码表，列茭白微波干燥二次正交旋转组合试验计划表（见表 5-2）。

表 5-2 茭白微波干燥二次正交旋转组合试验计划表

因素 试验号	编码值			对应真实值		
	X ₁	X ₂	X ₃	前期单位质量 发射功率(w/g)	后期单位质量 发射功率(w/g)	前期干燥 时间(min)
1	1	1	1	2.6(240w/92.3g)	2.6(240w/92.3g)	26
2	1	1	-1	2.6(240w/92.3g)	2.6(240w/92.3g)	14
3	1	-1	1	2.6(320w/120g)	1.4(160w/120g)	26
4	1	-1	-1	2.6(320w/120g)	1.4(160w/120g)	14
5	-1	1	1	1.4(160w/120g)	2.6(320w/120g)	26
6	-1	1	-1	1.4(160w/120g)	2.6(320w/120g)	14
7	-1	-1	1	1.4(160w/114.3g)	1.4(160w/114.3g)	26
8	-1	-1	-1	1.4(160w/114.3g)	1.4(160w/114.3g)	14
9	-1.682	0	0	1(160w/160g)	2(320w/160g)	20
10	1.682	0	0	3(240w/80g)	2(160w/80g)	20
11	0	-1.682	0	2(320w/160g)	1(160w/160g)	20
12	0	1.682	0	2(160w/80g)	3(240w/80g)	20
13	0	0	-1.682	2(240w/120g)	2(240w/120g)	10
14	0	0	1.682	2(240w/120g)	2(240w/120g)	30
15	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
16	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
17	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
18	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
19	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
20	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
21	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
22	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20
23	0	0	0	2(240w/120g)	2(240w/120g)	20

注：表中，X₁列对应的因素是前期单位质量发射功率（编码值）；X₂列对应的因素是后期单位质量发射功率（编码值）；X₃列对应的因素是前期干燥时间（编码值）。

5. 1. 3 试验计划实施

根据试验计划，进行 23 次实验，得到四项指标值列入表 5-3。

表 5-3 茭白微波干燥二次正交旋转组合试验结果表

因素 试验号	编码值			试验结果			
	X ₁	X ₂	X ₃	外观质量 (分)	复水比	单位时间 降水率 (%/min,湿基)	单位耗电量 (kwh/kg)
1	1	1	1	19	3.09	1.54	3.6
2	1	1	-1	20	3.17	1.49	3.67
3	1	-1	1	22	2.86	1.40	3.45
4	1	-1	-1	26	3.02	1.16	3.4
5	-1	1	1	15	2.93	1.40	3.4
6	-1	1	-1	19	2.97	1.64	3.13
7	-1	-1	1	25	2.56	0.82	3.96
8	-1	-1	-1	27	2.56	0.79	3.96
9	-1.682	0	0	16	2.64	1.29	2.95
10	1.682	0	0	27	2.87	1.33	3.9
11	0	-1.682	0	23	2.60	0.94	2.96
12	0	1.682	0	18	2.93	1.43	3.97
13	0	0	-1.682	23	2.80	1.40	3.02
14	0	0	1.682	21	3.12	1.45	3.03
15	0	0	0	18	3.09	1.40	3.01
16	0	0	0	23	2.83	1.43	3.15
17	0	0	0	19	2.89	1.39	3.03
18	0	0	0	18	2.85	1.49	2.98
19	0	0	0	21	2.94	1.40	3.12
20	0	0	0	20	2.89	1.42	2.98
21	0	0	0	21	2.96	1.55	2.89
22	0	0	0	22	2.81	1.47	2.90
23	0	0	0	21	2.85	1.46	2.94

5. 2 回归方程建立与显著性检验

根据茭白微波干燥二次正交旋转组合试验结果，利用 DPS 数据处理系统建立各指标回归方程，并进行方差分析，结果见表 5-4。

表 5-4 各指标回归方程及试验结果方差分析

回归方程	试验结果方差分析					
外观质量： $Y_1=20.32836$ $+1.42783X_1$ $-2.59276X_2$ $-1.05175X_3$ $+0.46038X_1^2$ $+0.10683X_2^2$ $+0.63716X_3^2$ $+1.12500X_1X_2$ $+0.12500X_1X_3$ $+0.12500X_2X_3$	变异来源	平方和	自由度	均方	比值 F	显著水平 p
	X_1	27.8424	1	27.8424	4.89690	0.04541
	X_2	91.8070	1	91.8070	16.14696	0.00146
	X_3	15.1069	1	15.1069	2.65699	0.12707
	X_1^2	3.2937	1	3.2937	0.57930	0.46017
	X_2^2	0.1567	1	0.1567	0.02755	0.87072
	X_3^2	6.3726	1	6.3726	1.12080	0.30902
	X_1X_2	10.1250	1	10.1250	1.78078	0.20496
	X_1X_3	0.1250	1	0.1250	0.02198	0.88440
	X_2X_3	0.1250	1	0.1250	0.02198	0.88440
	回归	155.0422	9	17.2269	$F_2=3.030$	0.05085
	剩余	73.9143	13	5.6857		
	失拟	49.9143	5	9.9829	$F_1=3.328$	0.03740
	误差	24.0000	8	3.0000		
	总和	228.9565	22			
复水比： $Y_2=2.89954$ $+0.11033X_1$ $+0.12558X_2$ $+0.01890X_3$ $-0.03655X_1^2$ $-0.03302X_2^2$ $+0.03593X_3^2$ $-0.05000X_1X_2$ $-0.02500X_1X_3$ $+0.00500X_2X_3$	变异来源	平方和	自由度	均方	比值 F	显著水平 p
	X_1	0.1663	1	0.1663	13.62276	0.00272
	X_2	0.2154	1	0.2154	17.64700	0.00104
	X_3	0.0049	1	0.0049	0.39992	0.53810
	X_1^2	0.0213	1	0.0213	1.74162	0.20970
	X_2^2	0.0173	1	0.0173	1.41908	0.25485
	X_3^2	0.0211	1	0.0211	1.72558	0.21169
	X_1X_2	0.0200	1	0.0200	1.63881	0.22286
	X_1X_3	0.0050	1	0.0050	0.40970	0.53324
	X_2X_3	0.0002	1	0.0002	0.01639	0.90010
	回归	0.4710	9	0.0523	$F_2=4.289$	0.01737
	剩余	0.1587	13	0.0122		
	失拟	0.0992	5	0.0198	$F_1=2.667$	0.07158
	误差	0.0595	8	0.0074		
	总和	0.6297	22			

接上表

回归方程	试验结果方差分析					
单位时间降水率: $Y_3=1.44595$ $+0.07376X_1$ $+0.19947X_2$ $+0.01202X_3$ $-0.05171X_1^2$ $-0.09590X_2^2$ $-0.01105X_3^2$ $-0.12000X_1X_2$ $+0.06250X_1X_3$ $-0.05750X_2X_3$	变异来源	平方和	自由度	均方	比值 F	显著水平 p
	X_1	0.0743	1	0.0743	10.89316	0.00574
	X_2	0.5434	1	0.5434	79.67093	0.00000
	X_3	0.0020	1	0.0020	0.28908	0.59989
	X_1^2	0.0413	1	0.0413	6.05425	0.02864
	X_2^2	0.1448	1	0.1448	21.23782	0.00049
	X_3^2	0.0016	1	0.0016	0.23470	0.63612
	X_1X_2	0.1152	1	0.1152	16.89133	0.00123
	X_1X_3	0.0313	1	0.0313	4.58207	0.05184
	X_2X_3	0.0264	1	0.0264	3.87826	0.07061
	回归	0.9817	9	0.1091	F2=15.993	0.00012
	剩余	0.0887	13	0.0068		
	失拟	0.0668	5	0.0134	F1=4.901	0.00970
	误差	0.0218	8	0.0027		
单位耗电量: $Y_4=2.99466$ $+0.09283X_1$ $+0.05335X_2$ $+0.01954X_3$ $+0.20163X_1^2$ $+0.21577X_2^2$ $+0.06021X_3^2$ $+0.22625X_1X_2$ $-0.03625X_1X_3$ $+0.01875X_2X_3$	变异来源	平方和	自由度	均方	比值 F	显著水平 p
	X_1	0.1177	1	0.1177	1.25577	0.28273
	X_2	0.0389	1	0.0389	0.41483	0.53073
	X_3	0.0052	1	0.0052	0.05563	0.81722
	X_1^2	0.6340	1	0.6340	6.76535	0.02196
	X_2^2	0.7276	1	0.7276	7.76434	0.01542
	X_3^2	0.0523	1	0.0523	0.55764	0.46850
	X_1X_2	0.4095	1	0.4095	4.37012	0.05678
	X_1X_3	0.0105	1	0.0105	0.11218	0.74301
	X_2X_3	0.0028	1	0.0028	0.03001	0.86513
	回归	2.0131	9	0.2237	F2=2.387	0.09755
	剩余	1.2182	13	0.0937		
	失拟	1.1538	5	0.2308	F1=28.666	0.00000
	误差	0.0644	8	0.0081		
	总和	3.2313	22			

由表 5-4 可知，茭白微波干燥外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量指标的回归方程均显著。 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间编码值（编码值与实际值换算关系见表 5-1），

Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 分别为外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量指标。外观质量回归方程方差分析表明,前期单位质量发射功率(X_1 项)对外观质量影响显著,后期单位质量发射功率(X_2 项)对外观质量影响极显著,前期干燥时间(X_3 项)、前期单位质量发射功率平方项(X_1^2 项)、后期单位质量发射功率平方项(X_2^2 项)、前期干燥时间平方项(X_3^2 项),以及三因素的交互项(X_1X_2 项、 X_1X_3 项、 X_2X_3 项)对外观质量影响不显著。复水比回归方程方差分析表明,前期单位质量发射功率(X_1 项)、后期单位质量发射功率(X_2 项)对复水比指标影响均极显著,其它项对复水比指标影响不显著。单位时间降水率回归方程方差分析表明,前期单位质量发射功率(X_1 项)、后期单位质量发射功率(X_2 项)、后期单位质量发射功率平方项(X_2^2 项)、前期单位质量发射功率与后期单位质量发射功率交互项对单位时间降水率指标影响极显著,前期单位质量发射功率平方项(X_1^2 项)对单位时间降水率指标影响显著,前期单位质量发射功率与前期干燥时间交互项(X_1X_3 项)、后期单位质量发射功率与前期干燥时间交互项(X_2X_3 项)对单位时间降水率指标有影响,前期干燥时间(X_3 项)及其平方项(X_3^2 项)对单位时间降水率指标影响不显著。单位耗电量回归方程方差分析表明,前期单位质量发射功率平方项(X_1^2 项)、后期单位质量发射功率平方项(X_2^2 项)对单位耗电量指标影响显著,前期单位质量发射功率与后期单位质量发射功率的交互项(X_1X_2 项)对单位耗电量指标有影响,其它项对单位耗电量指标影响不显著。

剔除不显著项后,得简易的外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量指标回归方程如下:

外观质量:

$$Y_1 = 20.32836 + 1.42783X_1 - 2.59276X_2$$

复水比:

$$Y_2 = 2.89954 + 0.11033X_1 + 0.12558X_2$$

单位时间降水率:

$$Y_3 = 1.44595 + 0.07376X_1 + 0.19947X_2 - 0.05171X_1^2 - 0.09590X_2^2 - 0.12000X_1X_2 + 0.06250X_1X_3 - 0.05750X_2X_3$$

单位耗电量:

$$Y_4 = 2.99466 + 0.20163X_1^2 + 0.21577X_2^2 + 0.22625X_1X_2$$

5. 3 试验优化分析

5. 3. 1 单目标优化

为确定前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间对茭白微波干燥的最佳组合，分别需对外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量指标进行优化计算。四项指标中，外观质量、复水比、单位时间降水率指标越高越好，单位耗电量指标越低越好。因此对各指标优化计算，实际上就是求在编码值 $-1.682 \leq X_i \leq 1.682$ ($i=1, 2, 3$) 约束条件下外观质量、复水比、单位时间降水率指标回归方程极大值和单位耗电量指标回归方程极小值。通过 DPS 数据处理系统目标优化计算，得各指标优化参数组合（见表 5-5）。

表 5-5 茭白微波干燥各指标优化参数组合

指标	前期单位质量发射功率		后期单位质量发射功率		前期干燥时间		目标 优化值
	编码值 X_1	实际值 (w/g)	编码值 X_2	实际值 (w/g)	编码值 X_3	实际值 (min)	
外观质量 Y_{1max}	1.682	3	-1.682	1	-1.682	10	27.09 (分)
复水比 Y_{2max}	1.682	3	1.682	3	-1.682	10	3.30 (无量纲)
单位时间降水率 Y_{3max}	-1.682	1	1.682	3	-1.682	10	1.92 (%/min)
单位耗电量 Y_{4min}	0	2	0	2	-1.682	10	2.99 (kwh/kg)

表 5-5 为各目标函数达到目标优化值及各自的三因素最佳组合，其因素的编码值与实际值表中已列出。表中复水比、单位耗电量的目标优化组合中，前期单位质量发射功率与后期单位质量发射功率相同，因此其前期时间没有实际意义。

5. 3. 2 综合目标优化

茭白微波干燥时，前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间对各指标均有影响，虽然上节对各单个指标的目标函数进行了优化，但仅仅只是针对该指标而言，然而在实际茭白微波干燥时，要综合考虑对四个目标函数的影响，因此有必要对三个因子进行综合优化，找出满足四个目标函数的最佳参数组合。

5. 3. 2. 1 综合目标函数的确定

这是一个多目标非线性优化问题，可采用评价函数法将其转化为单目标的非

线性优化。由于外观质量、复水比、单位时间降水率越大越好，而单位耗电量则越少越好，同时这四个目标函数之间各自的量纲不同，为此先采用“线性型功效系数法”进行规范化后，再求综合目标函数的极值。

$$\text{设: } D_1 = (Y_1 - Y_{1\min}) / (Y_{1\max} - Y_{1\min})$$

$$D_2 = (Y_2 - Y_{2\min}) / (Y_{2\max} - Y_{2\min})$$

$$D_3 = (Y_3 - Y_{3\min}) / (Y_{3\max} - Y_{3\min})$$

$$D_4 = 1 - (Y_4 - Y_{4\min}) / (Y_{4\max} - Y_{4\min})$$

D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 与分别对应的 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 存在线性关系， Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 的极大值和极小值可通过 DPS 数据处理系统求得。将 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 各目标函数回归方程代入各自功效系数。得：

$$D_1 = 0.44988 + 0.10561X_1 - 0.19177X_2$$

$$D_2 = 0.49943 + 0.13791X_1 + 0.15698X_2$$

$$D_3 = 0.72115 + 0.04339X_1 + 0.11734X_2 - 0.03042X_1^2 - 0.05641X_2^2$$

$$-0.07059X_1X_2 + 0.03676X_1X_3 - 0.03382X_2X_3$$

$$D_4 = 0.99727 - 0.11018X_1^2 - 0.11791X_2^2 - 0.12363X_1X_2$$

用线性系数法确定综合目标函数 Y ，令：

$$Y = \lambda_1 D_1 + \lambda_2 D_2 + \lambda_3 D_3 + \lambda_4 D_4$$

式中： λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 分别为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 的加权系数，满足 $\lambda_1 > 0$ 、 $\lambda_2 > 0$ 、 $\lambda_3 > 0$ 、 $\lambda_4 > 0$ ，且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ 。

本论文首要考虑外观质量，其次考虑复水比，第三考虑单位时间降水率，最后考虑单位耗电量。为此，分别取 $\lambda_1 = 0.4$ 、 $\lambda_2 = 0.3$ 、 $\lambda_3 = 0.2$ 、 $\lambda_4 = 0.1$ 。

将功效系数函数 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 和 $\lambda_1 = 0.4$ 、 $\lambda_2 = 0.3$ 、 $\lambda_3 = 0.2$ 、 $\lambda_4 = 0.1$ 代入综合目标函数 Y ，得到关于前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间三因素的综合目标函数方程：

$$Y = 0.57374 + 0.09232X_1 - 0.00615X_2 - 0.0171X_1^2 - 0.02307X_2^2$$

$$-0.02648X_1X_2 + 0.00735X_1X_3 - 0.00676X_2X_3 \quad (-1.682 \leq X_i \leq 1.682; i=1, 2, 3)$$

5. 3. 2. 2 综合目标优化

利用 DPS 数据处理系统，对上节得到的综合目标函数方程求极大值。得综合优化结果，见表 5-6。

表 5-6 综合优化参数组合

前期单位质量发射功率		后期单位质量发射功率		前期干燥时间		综合目标 优化值
编码值 X_1	实际值 (w/g)	编码值 X_2	实际值 (w/g)	编码值 X_3	实际值 (min)	
1.682	3	-1.682	1	1.682	30	0.741

计算在综合优化参数组合下，外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量的指标值，并与各自单目标优化值比较，见表 5-7。

表 5-7 综合优化参数组合下各指标值与单目标优化值的比较

指标	综合优化参数组合下 各指标值	单目标优化值
外观质量(分)	27.09(分)	27.09(分)
复水比(无量纲)	2.88	3.30
单位时间降水率 (%/min)	1.15	1.92
单位耗电量 (kwh/kg)	3.53	2.99

从表 5-7 可以看出，综合优化参数组合下的外观质量指标与其单目标优化值相同，而单位时间降水率、单位耗电量离单目标优化值较远，这主要是在综合优化中考虑外观质量指标权重较大，而考虑单位时间降水率、单位耗电量权重较轻的缘故。前期单位质量发射功率 3 w/g、后期单位质量发射功率 1w/g、前期干燥时间 30min 的参数组合，是本文综合考虑各指标要素的最优组合。

5. 3. 3 各因素对茭白微波干燥的影响分析

综上所述，前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间在茭白微波干燥过程中起着不同的作用，它们不同组合，影响到整个干燥过程和干制品质量、生产率和耗电量。上面得出的目标函数回归方程，定量地描述了各因素对诸干燥指标的作用。本章节利用上节得出的综合优化结果，分别将三因素中两因素设定在优化点上，进行降维处理后，用图形的形式，说明前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率、前期干燥时间等单因子与外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量之间的关系。

5. 3. 3. 1 前期单位质量发射功率对茭白微波干燥的影响

将后期单位质量发射功率、前期干燥时间设定在 $X_2 = -1.682$ (实际值为 1 w/g)、 $X_3 = 1.682$ (实际值为 30 min)，可得外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量与前期单位质量发射功率的关系方程。

外观质量:

$$Y_1 = 24.68938 + 1.42783X_1$$

复水比:

$$Y_2 = 2.68831 + 0.11033X_1$$

单位时间降水率:

$$Y_3 = 1.0018 + 0.38073X_1 - 0.05171X_1^2$$

单位耗电量:

$$Y_4 = 3.60510 + 0.20163X_1^2 - 0.38055X_1$$

将各关系方程制成曲线图，见图 5-1 ~ 图 5-4。

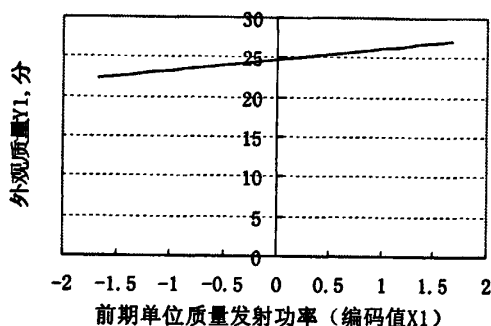


图 5-1 前期单位质量发射功率对外观质量的影响

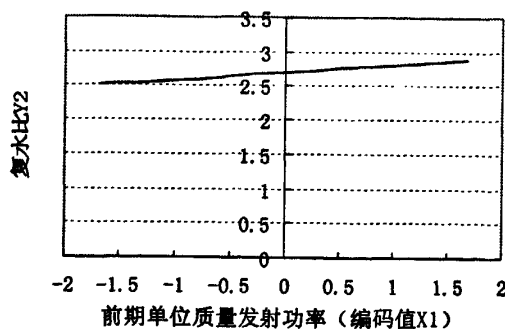


图 5-2 前期单位质量发射功率对复水比的影响

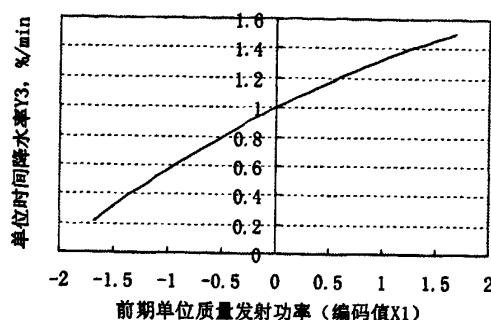


图 5-3 前期单位质量发射功率对单位时间降水率的影响

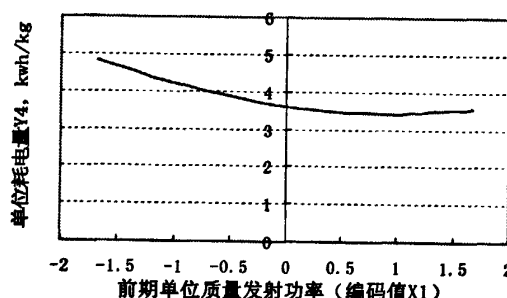


图 5-4 前期单位质量发射功率对单位耗电量的影响

图 5-1 表示在后期单位质量发射功率 $X_2 = -1.682$ (实际值为 1w/g)、前期干燥时间 $X_3 = 1.682$ (实际值为 30min) 条件下前期单位质量发射功率对外观质量的影响关系曲线图。由图可知, 外观质量随前期单位质量发射功率的提高而线性递增, 当前期单位质量发射功率 $X_1 = -1.682$ (实际值为 1w/g) 时, 外观质量分值最低; $X_1 = 1.682$ (实际值为 3w/g) 时, 外观质量分值最高。分析认为, 较高的前期单位质量发射功率, 使干燥物料较快达到一定温度, 达到最大干燥速度, 进入相对匀速干燥阶段, 减少了干燥时间, 一定程度上抑制了褐变现象, 提高了外观质量。

图 5-2 表示在后期单位质量发射功率 $X_2 = -1.682$ (实际值为 1w/g)、前期干燥时间 $X_3 = 1.682$ (实际值为 30min) 条件下前期单位质量发射功率对复水比的影响关系曲线图。从图可以看出, 复水比随前期单位质量发射功率的增加而线性增加, 当前期单位质量发射功率 $X_1 = -1.682$ (实际值为 1w/g) 时, 复水比最低; $X_1 = 1.682$ (实际值为 3w/g) 时, 复水比最高。这表明较高的前期单位质量发射功率可以适当提升茭白干制品的复水性能。

图 5-3 表示在后期单位质量发射功率 $X_2 = -1.682$ (实际值为 1w/g)、前期干燥时间 $X_3 = 1.682$ (实际值为 30min) 条件下前期单位质量发射功率对单位时间降

水率的影响关系曲线图。前期单位质量发射功率对单位时间降水率的影响呈抛物线增加关系,在较低发射功率时,增加的快;在较高发射功率时,增加的慢。不难理解,较高的前期单位质量发射功率,干燥物料吸收的微波能量也多,加快了干燥速度。

图 5-4 表示在后期单位质量发射功率 $X_2 = -1.682$ (实际值为 1w/g)、前期干燥时间 $X_3 = 1.682$ (实际值为 30min) 条件下前期单位质量发射功率对单位耗电量的影响关系曲线图。由图可以看出,当前期单位质量发射功率 $X_1 = -1.682$ (实际值为 1w/g) 时,单位耗电量最高;当前期单位质量发射功率 $X_1 \approx 1$ 时 (实际值约为 2w/g) 时,单位耗电量达到最低值,然后再随单位质量发射功率的进一步提高,单位耗电量略有提高。这个现象与本论文第三章微波火力 (发射功率) 对耗电量影响分析是一致的。

5. 3. 3. 2 后期单位质量发射功率对茭白微波干燥的影响

将前期单位质量发射功率、前期干燥时间设定在 $X_2 = 1.682$ (实际值为 3w/g)、 $X_3 = 1.682$ (实际值为 30min) , 可得外观质量、复水比、单位时间降水率、单位耗电量与后期单位质量发射功率的关系方程。

$$Y_1 = 22.72997 - 2.59276X_2$$

复水比:

$$Y_2 = 3.27069 + 0.12558X_2$$

单位时间降水率:

$$Y_3 = 1.60054 - 0.09952X_2 - 0.09590X_2^2$$

单位耗电量:

$$Y_4 = 3.56510 + 0.38055X_2 + 0.21577X_2^2$$

将各关系方程制成曲线图,见图 5-5 ~ 图 5-8。

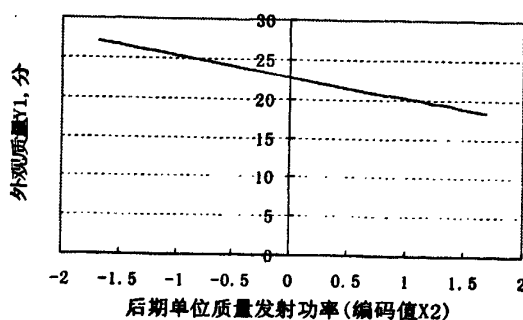


图 5-5 后期单位质量发射功率对外观质量的影响

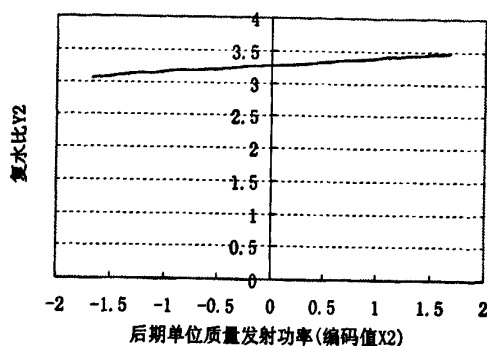


图 5-6 后期单位质量发射功率对复水比的影响

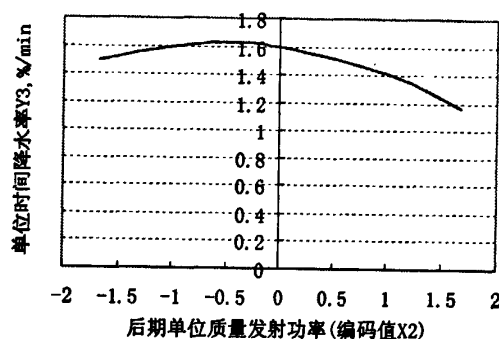


图 5-7 后期单位质量发射功率对单位时间降水率的影响

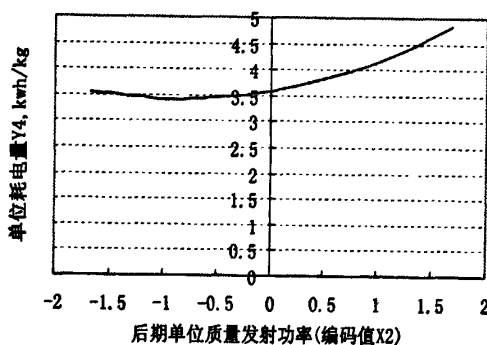


图 5-8 后期单位质量发射功率对单位耗电量的影响

图 5-5 表示在前期单位质量发射功率 $X_1=1.682$ (实际值为 3w/g)、前期干燥时间 $X_3=1.682$ (实际值为 30min) 条件下后期单位质量发射功率对外观质量的影响关系曲线图。由图可知,外观质量随后期单位质量发射功率的提高而线性递减,当后期单位质量发射功率 $X_2=-1.682$ (实际值为 1w/g) 时,外观质量分值最高; $X_2=1.682$ (实际值为 3w/g) 时,外观质量分值最低。分析原因,本文认为是较高的后期发射功率容易使茭白焦化,从而影响外观质量。

图 5-6 表示在前期单位质量发射功率 $X_1=1.682$ (实际值为 3w/g)、前期干燥时间 $X_3=1.682$ (实际值为 30min) 条件下后期单位质量发射功率对复水比的影响关系曲线图。从图可以看出,复水比随后期单位质量发射功率的增加而线性增加,当后期单位质量发射功率 $X_2=-1.682$ (实际值为 1w/g) 时,复水比最低; $X_2=1.682$ (实际值为 3w/g) 时,复水比最高。这与前期单位质量发射功率对复水性能的影响是一致的。总体而言,加大发射功率,可以提高复水性能。

图 5-7 表示在前期单位质量发射功率 $X_1=1.682$ (实际值为 3w/g)、前期干燥时间 $X_3=1.682$ (实际值为 30min) 条件下后期单位质量发射功率对单位时间降水率的影响关系曲线图。后期单位质量发射功率对单位时间降水率的影响比较复杂,在较小单位质量发射功率情况下,随后期单位质量发射功率的提高而略有提高(变化不大),当后期单位质量发射功率达到编码值 $X_2 \approx -0.5$ (实际值为 1.69w/g) 时,单位时间降水率达到最高值(约 $1.63\%/ \text{min}$)。随后随着后期单位质量发射功率的进一步提高,单位时间降水率反而较快下降。分析认为,在较低的后后期单位质量发射功率水平下,干燥失水本身比较平缓,适当增大发射功率,能略微增加干燥速度。但当后期发射功率大到一定程度后,发射功率越大,越容易产生低含水率“硬壳”,阻止内部水分进一步散失,反而降低了干燥速度。这也就是为什么在后后期单位质量发射功率对单位时间降水率影响关系曲线中,当后期单位质量发射功率 $X_2 > -0.5$ 后,发射功率越大,单位时间降水率越低的原因。

图 5-8 表示在前期单位质量发射功率 $X_1=1.682$ (实际值为 3w/g)、前期干燥时间 $X_3=1.682$ (实际值为 30min) 条件下后期单位质量发射功率对单位耗电量的影响关系曲线图。由图可以看出,在较低的后后期单位质量发射功率水平下,单位耗电量变化不大,但随着发射功率的进一步提高,到达一定值后,单位耗电量就会随着发射功率的提高而快速增加。产生这一现象的主要原因同后期单位质量发射功率对单位时间降水率的影响一致,也即在较大发射功率时,发射功率越大,越容易产生低含水率“硬壳”,增加了干燥时间,从而增加耗电量。

5.3.3.3 前期干燥时间对茭白微波干燥的影响

从各指标回归方程及方差分析看,前期时间对外观质量、复水比、单位耗电量影响不显著,因此本节不就前期时间对外观质量、复水比、单位耗电量的影响进行分析。

将前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率设定在综合优化点，即 $X_1=1.682$ （实际值为 3 w/g）、 $X_2=-1.682$ （实际值为 1w/g），可得单位时间降水率与前期时间的关系方程：

$$Y_3 = 1.15639 + 0.20185X_4$$

将方程制成曲线图，见表 5-9。

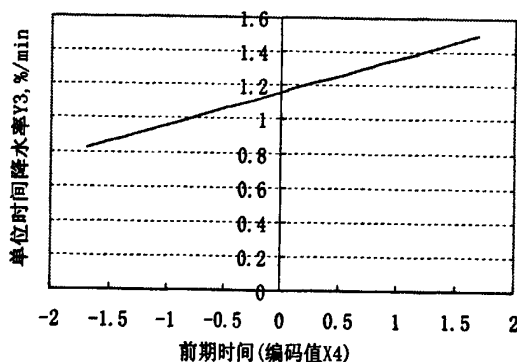


图 5-9 前期时间对单位时间降水率的影响

图 5-9 表示在前期单位质量发射功率 $X_1=1.682$ （实际值为 3w/g）、后期单位质量发射功率 $X_2=-1.682$ （实际值为 1w/g）条件下前期干燥时间对单位时间降水率的影响关系曲线图。从图中看出，单位时间降水率随前期干燥时间增加而线性递增。这是因为采取的干燥条件中，前期单位质量发射功率较大而后期单位质量发射功率较小，增加前期较大发射功率干燥的时间，将大幅度缩短后期较小发射功率干燥的时间，总的干燥时间随之缩短，加快了干燥速度，也即提高了单位时间的降水率。

6 结论与建议

6.1 主要研究结论

本文根据微波技术在食品及农产品加工领域的应用,利用微波干燥特点,对茭白微波干燥特性及干燥工艺进行了实验研究。主要研究结论如下:

6.1.1 茭白微波干燥特性

6.1.1.1 茭白微波干燥的失水特性

茭白微波干燥过程根据其失水速率的变化情况分为三个阶段,即初期加速失水阶段、中期相对匀速失水阶段和后期降速失水阶段。茭白切片厚度对干燥时间、失水速率影响不大,切片厚度增加,干燥时间、失水速率会略有增加。装载量对茭白干燥的影响比较明显,装载量大,干燥速率低,干燥时间长,200克装载量的干燥时间比100克的增加50%,300克装载量的干燥时间要比100克的增加一倍多。微波火力对茭白干燥影响也十分显著,火力大,失水速率大,干燥时间短。在微波干燥过程中,微波火力越大,在干燥中后期易出现局部过热及打火现象,茭白内部容易烧焦,影响干制品外观质量。中后期火力较小,干制品质量较好。

6.1.1.2 茭白微波干燥的耗电特性

切片厚度对物料干制到安全含水率的耗电量影响不大。实验中,6mm厚度茭白片的耗电量仅比4mm厚度茭白片的耗电量增加了3.6%,而8mm厚度茭白片的耗电量也仅比4mm厚度茭白片的耗电量增加了7.1%。装载量对耗电量影响明显,干制到相同含水率,耗电量随装载量增加而明显增加。实验中,100g茭白片干制到安全含水率,耗电0.29kwh;200g茭白片干制到安全含水率,耗电0.42kwh,比100g茭白片的耗电量增加44.8%;300g茭白片干制到安全含水率耗电0.605kwh,比100g茭白片的耗电量增加1.09倍。微波火力对耗电量的影响比较复杂,在相同装载量和较低的微波火力条件下,微波火力大的,耗电量少;但随着火力逐步增加到一定程度后,火力大的,耗电量也大。

6.1.2 茭白微波干燥数学模型

茭白微波干燥适用Page方程模型。经拟合,其微波干燥的数学模型为:

$$\ln(-\ln MR) = -9.61532 + 3.79720P - 0.82312P^2 + 1.91372\ln t$$

利用这个模型可以比较准确地预测茭白在微波干燥过程中各时刻的水分比和含水率。

6. 1. 3 茭白微波干燥的较佳工艺

6. 1. 3. 1 单目标优化

就前期单位质量发射功率、后期单位质量发射功率和前期干燥时间等三个因子,建立了外观质量、复水比、单位时间降水率和单位耗电量等四个指标的目标函数的回归方程,并得出各自目标优化值:当前期单位质量发射功率编码值为1.682(实际值为3 w/g)、后期单位质量发射功率编码值为-1.682(实际值为1 w/g)、前期干燥时间编码值为-1.682(实际值为10 min)时,外观质量指标最优;当前期单位质量发射功率编码值为1.682(实际值为3 w/g)、后期单位质量发射功率编码值为1.682(实际值为3 w/g)、前期干燥时间编码值为-1.682(实际值为10 min)时,复水比指标最大;当前期单位质量发射功率编码值为-1.682(实际值为1 w/g)、后期单位质量发射功率编码值为1.682(实际值为3 w/g)、前期干燥时间编码值为-1.682(实际值为10 min)时,单位时间降水率指标最大,生产率最大;当前期单位质量发射功率编码值为0(实际值为2 w/g)、后期单位质量发射功率编码值为0(实际值为2 w/g)、前期干燥时间编码值为-1.682(实际值为10 min)时,单位耗电量指标最小,最省电。

6. 1. 3. 2 综合目标优化

建立了综合目标函数的回归方程,得出了综合优化参数组合:当前期单位质量发射功率取编码值 $X_1=1.682$ (实际值为3 w/g)、后期单位质量发射功率取编码值 $X_2=-1.682$ (实际值为1 w/g)、前期干燥时间取编码值 $X_3=1.682$ (实际值为30 min)时,综合指标最佳。

6. 1. 3. 3 三因素对各指标的影响

在优化点上采取降维处理后,分析、阐述了各因素对各指标的影响规律:前期单位质量发射功率对于干制品外观质量、复水比的影响呈线性递增关系,随前期单位质量发射功率的增加,外观质量提高,复水比增大;前期单位质量发射功率对单位时间降水率的影响呈开口向下的抛物线关系,开始随单位质量发射功率的增加,单位时间降水率增大,达到一定值后,随单位质量发射功率的增加,单位时间降水率反而下降;前期单位质量发射功率对单位耗电量影响呈开口向上的抛

物线关系,单位耗电量随前期单位质量发射功率的提高,先下降后上升。后期单位质量发射功率对茭白微波干燥外观质量的影响呈线性递减关系,发射功率越高,外观质量越差;后期单位质量发射功率对复水比影响呈线性递增关系,发射功率越大,复水比越大;后期单位质量发射功率对单位时间降水率、单位耗电量的影响,类似前期单位质量发射功率对两指标的影响,随发射功率的增加,单位时间降水率是先升后降,单位耗电量则是先降后升。前期干燥时间对外观质量、复水比、单位耗电量的影响不显著,对单位时间降水率的影响呈线性递增关系,前期干燥时间越长,单位降水率越大。

6.2 进一步研究建议

微波干燥虽然具有加热均匀、干燥速度快、反应灵敏、便于控制、热效率高、无余热、无污染等优点,但本论文实验发现,对茭白单纯采用微波干燥,如功率稍大则易产生焦片,且干制的茭白片过于硬、脆,影响干制质量。为探索茭白的较佳干制工艺路线,建议对茭白再进行微波与热风、或微波与真空等组合干燥试验,得出较佳结果,使干燥技术在促进农业增效、农民增收中发挥积极作用。

参考文献

- [1] Mujumdar A S. Innovation in Drying. IDS'96
- [2] Wang J. and Y.S.Xi, Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process, Journal of Food Engineering 68(2005): 505-511
- [3] J.Wang, Y.S.xiong and Y.Yu, Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato, European Food Research and Technology 219(2004): 500-506
- [4] Wang J., J.P.Zhang, J.P.Wang and N.Z.Xu, Modeling simultaneous heat and mass transfer for microwave drying on apple, Drying Technology 17(1999): 1927-1934
- [5] Lin Tm, Durancetd, Scamanc H. Physical and sensory properties of vacuum microwave dehydrated shrimp[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 1999, 8(4): 41-53
- [6] Parry J L. Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: a Review. J. Agric. Engng. Res. 1985, 32(1): 1-29
- [7] 科学技术部中国农村技术开发中心组织编写. 农产品深加工技术. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007
- [8] 杨清香, 于艳琴主编. 果蔬加工技术. 北京: 化学工业出版社, 2006.5
- [9] 胡秉民, 张全德编写. 农业试验统计分析方法. 浙江科学技术出版社, 1985
- [10] 刘德全, 肖承和编著. 农业试验设计与分析. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2005.11
- [11] 唐启义, 冯明光著. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统. 北京: 科学出版社, 2002.5
- [12] 潘永康主编, 王喜忠副主编. 现代干燥技术. 北京: 化学工业出版社, 1998.2
- [13] 刘钟栋. 微波技术在食品工业中的应用. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.2
- [14] 叶兴乾. 果品蔬菜加工工艺学. 北京: 中国农业出版社, 2002.2
- [15] 赵丽芹. 果蔬加工工艺学.. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.3
- [16] 李秀娟, 李小梅, 李雷斌. 果蔬加工原理与技术. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002
- [17] 潘永康. 干燥过程特性和干燥技术的研究策略. 第十届全国干燥技术大会研讨论文
- [18] 张海红, 韩小珍, 刘贵珊. 蔬菜干燥技术与理论研究动态. 宁夏工程技术, 2005, (5)
- [19] 吕丽爽. 微波干燥技术在食品中的应用. 食品与机械, 2006, (5): 119-122
- [20] 秦成文. 我国脱水蔬菜产业的发展现状与对策. 河南农业, 2005, (5): 46
- [21] 于勇, 胡桂仙, 王俊. 脱水蔬菜研究现状及展望. 粮油加工与食品机械, 2003, (4):

102-105

- [22] 黄劲松, 周裔彬, 杜先锋等. 脱水蔬菜的研究进展. 食品工业科学, 2006, 27 (4): 68-71
- [23] 王俊, 胥芳, 蒋生昕. 微波干燥黄桃及预处理对其影响的研究. 食品科学, 1996, (1)
- [24] 王俊, 许乃章. 香菇热风干燥工艺试验研究. 食品科学, 1994, (2)
- [25] 王俊, 许乃章. 热风、远经外线和微波干燥香菇方程研究. 农业机械学报, 1994, 25 (2): 45-49
- [26] 王俊, 许乃章, 蒋生昕, 胥芳. 微波干燥香菇试验研究. 科技通报, 1996, 12 (1): 48-53
- [27] 张立彦等. 微波干燥食品技术. 食品工程, 1999, (1)
- [28] 李里特. 微波加工果蔬脆片的研究. 食品科学, 1995, (11): 20-23
- [29] 熊永森. 微波干燥土豆、胡萝卜的干燥特性和较佳工艺研究. 浙江大学硕士学位论文, 2000.12
- [30] 王绍林. 微波加热技术在食品加工中的应用. 食品科学, 2000, (2): 6-9
- [31] 李里特, 马莉. 微波在食品加工中应用的问题和特殊效果. 食品科学, 1997, (2): 4-7
- [32] 郭建中, 郝玉书. 微波促进食品工业的发展. 食品工业科学, 1999, (5)
- [33] 李安平, 李忠海, 袁列江等. 微波低糖果脯的研究. 食品科学, 2002, (4): 26-27
- [34] 陈燕, 陈羽白. 荔枝微波干燥特性及其对品质的影响研究. 农业工程学报, 2004, (4)
- [35] 杜传来, 叶洪梅, 康永真. 香椿芽微波干燥特性的研究. 保鲜与加工, 2007, (1)
- [36] 王绍林. 微波加热技术在食品加工中应用. 食品科学, 2000, (2)
- [37] 葛仕福. 现代干燥理论与技术简评. 化工装备技术, 2004, 25 (2)
- [38] 王修兰, 徐师华. 金针菇干燥特性及数学模型. 农业工程学报, 1992, (1): 103-111
- [39] 张敏, 等. 脱水蔬菜食用前的复水. 北京农业工程大学学报, 1994, (2): 95-99
- [40] 熊永森, 王金双, 王俊. 土豆片的微波干燥特性及较佳工艺研究. 食品科技, 2002, (7): 16-19
- [41] 赵超, 陈建, 邱兵等. 花椒微波干燥特性试验研究. 农业机械学报, 2007, (3)
- [42] 彭增华, 刘丽等. 云南普洱茶微燥干燥工艺研究. 昆明理工大学学报(理工版), 2007, (3)
- [43] 朱德泉, 王继先等. 玉米微波干燥特性及其对品质的影响. 农业机械学报, 2006, (02)
- [44] 杨金英, 盖玲, 王剑平. 春笋微波干燥动力学模型研究. 干燥技术与设备, 2007, (4)
- [45] 李加兴, 袁秋红等. 猕猴桃果脯微波干燥工艺研究. 食品与发酵工业, 2007, (8)

作者简历

一、个人简历

余文胜，男，39岁，浙江天台人，高级工程师。

1988年9月至1992年7月，在浙江农业大学农业工程系农业机械制造与设计专业学习；

1992年8月至今，在浙江省农业机械管理局工作，从事过农机鉴定、科教、管理、监理等工作，历任省农机局办公室副主任、农机鉴定科科长、科教管理科科长、监督管理科科长等职务。其中，2004年3月起参加浙江大学工程硕士（农业工程专业）学习。

二、攻读学位期间论文发表情况

1. 余文胜，王俊. 茭白微波干燥特性及数学模型的研究. 科技通报（已录用待发表）