

西南大学

硕士学位论文

竹笋微波、薄层及其联合干燥对比试验的研究

姓名：杨娜伟

申请学位级别：硕士

专业：农业机械化工程

指导教师：陈建;李云伍

20100601

摘要

竹笋含有蛋白质、脂肪、淀粉、膳食纤维、钙、磷、铁、胡萝卜素、Vb、Vc 等多种营养成分,是公认的最佳绿色天然食品,被誉为“素食第一品”。我国竹子种植面积占世界总量的30%,居世界第一,但具有明显的地域性特点。竹子和竹笋的相关产品年出口创汇达8亿美元。尽管如此,由于鲜竹笋季节性明显,采收期短,采后易木质化,储存期短等特性,因此研究竹笋的干燥贮藏对丰富人们的菜篮子、增加农民收入具有重要的意义。

以获得“优质高效低耗低排放”的笋干为目的,采用正交试验、对比试验及工艺优化试验等研究方法,确定了竹笋干燥工艺评价指标体系,研究了竹笋的干燥特性、竹笋微波杀青的最优组合条件以及热风薄层和微波—热风薄层联合干燥的最佳干燥工艺,比较了两种干燥方式的优劣性,验证了竹笋热风薄层干燥模型。试验数据主要运用 Excel 软件和 DPS 数据分析软件进行分析。

1、建立了一套竹笋干燥工艺评价指标体系,并对各试验结果进行了综合评分。对竹笋热风薄层干燥正交试验进行极差分析可知:①风速 3.05m/s、风温 65℃为最优组合,②风速 1.58m/s、风温 65℃为次优组合。但在风温一定风速不变的情况下,二者的综合得分相差不大,而最优组合的总耗能要大很多,由此可知方案②风速 1.58m/s、风温 65℃则为最优生产工艺。

对竹笋微波—热风薄层联合干燥正交试验进行极差分析可知:①最优组合为:在 250W 微波功率下干燥 20 分钟,然后转移到风速 1.58m/s、风温 65℃的热风薄层干燥条件下进行干燥;②次优组合为:在 750W 微波功率下干燥 2 分钟,然后转移到风速 1.58m/s、风温 65℃的热风薄层干燥条件下进行干燥。由于最优与次优组合综合得分状况相差很小,而次优组合总耗时缩短了十几分钟,由此可知方案②在 750W 微波功率下干燥 2 分钟,然后转移到风速 1.58m/s、风温 65℃的热风薄层干燥条件下进行干燥,为最优生产工艺。

由试验可知,单一微波干燥无法正常完成对竹笋的正常干燥,单一热风薄层干燥既耗能又费时,而微波—热风薄层联合干燥比其他两种干燥方式更优异。

2、微波杀青与传统杀青的试验结果表明:微波杀青优于传统杀青,微波杀青的最优组合为:微波功率为 900W,杀青时间为 60s。

3、竹笋干燥特性的试验中,恒温干燥特性的试验研究表明:载重量相同的情况下,温度越高,则干燥速率越高,干燥时间越短,失水速率曲线的加速、恒速、降速三个阶段越不明显;温度相同的情况下,载重量越大,则干燥速率越低,干燥时间越长,失水速率曲线的加速、恒速、降速三个阶段越明显。微波干燥特性的试验研究表明,微波功率越大,干燥时间越短,干燥速率越高。

4、竹笋分别在 150W、250W、350W、450W、550W、650W、750W 微波功率下进行干燥,结果表明:竹笋干燥一段时间后,表面出现褐变现象,大大影响了竹笋的品质,继续干燥褐变点变多、变深,使竹笋失去市场价值,竹笋微波干燥失去意义。

5、薄层干燥的数学模型包括单项扩散模型、指数模型、Page 方程三种,对干燥数据进行处理分析可知,单项扩散模型 $MR=B\exp(-At)$ 更适合做竹笋热风薄层干燥的模型。

6、在干燥时间与复水比、复水率、总功耗的比较曲线中发现,微波—热风薄层联合干燥结果都明显优于热风薄层干燥,竹笋干燥品质后者略输于前者,但相差不大,则说明微波—热风薄层联合干燥更具优越性,是今后生产实践中首选的方案。

关键词:竹笋 微波干燥 热风薄层干燥 微波—热风薄层联合干燥 正交对比试验

Experimental Study on Bamboo Shoots Drying by Microwave, Hot-air Thin-layer and Their Combined Method

ABSTRACT

Bamboo shoots contain multi-nutrient, such as protein, fat, starch, meal fibre, calcium, phosphorus, iron, carotene, vitamin B and C etc., and are known as the best green natural food and “The first of vegetable”. The plant area of bamboo in china occupies thirty percent of the total area of that all over the world, and is the largest one in the world, but they have obvious regional characteristics. Annual export volume of relational products of bamboo and bamboo shoots reached 800 million U.S. dollars. However, because fresh bamboo shoots only are produced in spring, and easily lignify after harvest, and harvest-time and storage-time are short. The storage of bamboo shoots dried to enrich people's food basket and increase their income is of great significance.

To gain dried bamboo shoots of “high quality, high efficiency, low consumption, low emission”, the study of bamboo shoots in this paper had adopted research methods of orthogonal experiments, comparison and technology optimization experiments, ensued technology evaluation system of drying bamboo shoots, researched drying characteristics of bamboo shoots, optimal combination conditions of killing blue of bamboo shoots with microwave and best drying technology by hot-air thin-layer and microwave-hot-air thin-layer drying of bamboo shoots, validated drying mathematics models of drying bamboo shoots by hot-air thin-layer. We had analyzed experimental data of experiments in this paper by making use of the software of Excel and DPS.

1. Technology evaluation system of drying bamboo shoots of bamboo shoots was established, and gaining comprehensive scores of various experimental results with it. From analyzing the orthogonal experiment data of drying bamboo shoots by hot-air thin-layer drying, the results are as follows: ①Drying bamboo shoots by hot-air thin-layer drying with wind speed 3.05m/s and temperature 65℃ for the best excellent combination; ②Drying bamboo shoots by hot-air thin-layer drying with wind speed 1.58m/s and temperature 65℃ for the hypo-excellent combination. But the comprehensive scores of the both combinations are similar by comparing with each other, and the total energy consumption of the best excellent combination is larger. So, drying bamboo shoots by hot-air thin-layer drying with wind speed 1.58m/s and temperature 65℃ is deemed to the best craft in the product process.

From analyzing the orthogonal experiment data of the microwave-hot-air thin-layer combined drying of bamboo shoots, the results are as follows: ①Bamboo shoots had been dried for twenty minutes with 250W microwave power first, then that were dried by the microwave-hot-air thin-layer combined drying with with wind speed 1.58m/s and temperature 65℃ for the best excellent combination; ②Bamboo shootd had been dried for two minutes with 750W microwave power first,

then that were dried by the microwave-hot-air thin-layer combined drying with with wind speed 1.58m/s and temperature 65°C for the hypo-excellent combination. But the comprehensive scores of the both combinations are similar by comparing with each other, and the total time-consuming of the best excellent combination is larger. So, bamboo shoots had been dried for two minutes with 750W microwave power first, then that were dried by the microwave-hot-air thin-layer combined drying with wind speed 1.58m/s and temperature 65°C is deemed to optimal production technology.

According to those experiments above, single microwave drying won't normally accomplish the drying of bamboo shoots, and single hot-air thin-layer drying will consume too much energy and time. Compareing with the both drying means above, microwave-hot-air thin-layer combined drying is a very excellent drying mean.

2. The experiment results of microwave killing blue and tradition killing blue had indicated: the former outgoed the later, and 900W microwave power, killing blue for 60s for optimum excellent combination in bamboo shoots killing blue with microwave.

3. The experiment on comparison temperature drying characteristics of bamboo shoots had indicated: with the same load of bamboo shoots, the temperature higher, the speed of drying swifter; the drying time shorter, curve of lose water rate more unconsPICuous in the three drying phases; with the same drying temperament, the load of bamboo shoots larger and drying rate lower, the drying time longer and curve of lose water rate more consPICuous in the three drying phases. The experiments on the characteristics of microwave drying had indicated: the microwave power bigger, the drying time shorter and drying rate higher.

4. The results of drying bamboo shoots by several microwave powers, namely, 150W, 250W, 350W, 450W, 550W, 650W, 750W etc. had indicated: bamboo shoots had been dried for some time by those microwave powers mentioned above, the surface of bamboo shoots would come forth some speckles, which influenced the quality of products of bamboo shoots. The color of spackles would become deeper and more, and would lose their market value and the significance of drying at last, if bamboo shoots went on being dried.

5. The mathematics models of hot-air thin-layer drying contain single-item diffuse model, exponential model and page equation. The analyzing results of experiment data had indicated: single-item diffuse model $MR=Bexp(-At)$ was the best model for bamboo shoots by hot-air thin-layer drying.

6. Comparing the curves of drying time, resume proportion, resume ratio and total energy consumption, the results had indicated: microwave-hot-air thin-layer combined drying outgoed single hot-air thin-layer drying on the drying of bamboo shootd. The former was a bit worse than the later on the quality of bamboo shoots dried, but very similar, which deeply had proved the superiority of microwave-hot-air thin-layer combined drying, and microwace-hot-air thin-layer combined drying would be preferred mean of drying ones of bamboo shoots in the future .

Key words: Bamboo shoots; microwave drying; hot-air thin-layer drying; microwave-hot-air thin-layer combined drying; comparison experiments

独创性声明

学位论文题目：竹笋微波、薄层及其联合干燥对比试验的研究

本人提交的学位论文是在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中引用他人已经发表或出版过的研究成果，文中已加了特别标注。对本研究及学位论文撰写曾做出贡献的老师、朋友、同仁在文中作了明确说明并表示衷心感谢。

学位论文作者：杨娜伟 签字日期：2010年6月8日

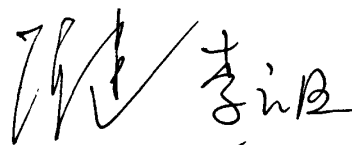
学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解西南大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南大学研究生院（筹）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，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，本论文：不保密，保密期限至 年 月止）。

学位论文作者签名：杨娜伟

导师签名：



签字日期：2010年6月8日

签字日期：2010年6月8日

第1章 文献综述

1.1 竹笋干燥

1.1.1 果蔬干燥概况

蔬菜和水果是仅次于粮食谷物外的重要农产品,是人类摄取维生素、矿物质、有机酸、膳食纤维等营养成分或生理活性成分的主要来源。在现代平衡膳食理念中,果蔬的消费占居至关重要的地位。干燥后的果蔬具有安全、营养、保健、方便的特点,满足了人们对健康食品、绿色食品和方便食品的强烈需求。因此,干燥后的果蔬受到国内外广大消费者的青睐,也是国际农产品贸易中的主要产品之一。果蔬干燥后最大的优点就是降低酶的活性,保存大量的营养物质和便于贮藏,其机理是:新鲜的果蔬经干燥处理后,由于大部分水分被除去,相对地增加溶质的浓度,即细胞内含有的蛋白质、酸、糖、盐类等溶质的稀溶液浓度升高,渗透压增大,水分活度降低,导致入侵的微生物发生质壁分离现象,抑制微生物正常的发育和繁殖活动,也抑制了果蔬所含酶的活性,使得产品得以保存。因此,果蔬干品的生产和加工,对于延长农产品的货架寿命、缓解农产品的产需季节性矛盾、提高农产品的附加值、丰富消费者的菜篮子均具有重要的意义^[1]。

包括果蔬干燥在内的物料干燥方法与其自身的特性密切相关,它直接影响到产品的形态、质量以及干燥过程的能耗。果蔬属于热敏性的物料,对温度升高非常敏感,当温度高过一定值后,它们很快会发生变质或老化等现象。因此,研究开发优质节能的果蔬干燥工艺和设备一直是科研工作的重要任务^[2]。

随着科学技术的迅猛发展,各学科和技术领域之间的交叉渗透,果蔬的干燥技术也呈现出日新月异的变化:从最传统的自然通风干燥、太阳能干燥发展到人工控制的现代干燥技术,例如流化床干燥、热风干燥、热泵干燥、真空干燥、远红外干燥、现代太阳能干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、微波真空干燥、声波场干燥、过热蒸汽干燥以及新发展的联合干燥等多种高强度的现代快速干燥技术^[2~5]。著名国际干燥专家 Mujumdar 教授预测了干燥技术的发展趋势是^[6]:向有效利用能源、提高产品质量及产量、减少环境污染、安全操作、一机多用、易于控制、多种能源干燥及联合干燥等方向发展。

1.1.2 竹笋干燥

竹笋是一种营养价值极高的蔬菜。正因为此,国内及国外的很多国家都有常年食用竹笋的习惯,尤以日本为最,年人均食笋 3kg^[7]。我国竹子种植面积广,且在地域上呈垂直分布的趋势:南方高而北方低;西部高而东部低;群山地区上限高,孤山地区上限低;南坡高而北坡低。研究竹笋干燥除了对提高农产品的附加值、丰富消费者的菜篮子、延长农产品的货架寿命等有着重要的意义之外,也有其自身特性方面的原因:首先,虽然竹笋来源比较丰富,但种植地域性强,生长季节性极强,如不及时采挖、加工,将会影响其品质和营养价值。其次,竹笋采摘后在常温下很容易发生木质化和老化,贮藏 24 小时后,即有约 60%的部分木质化,48h 后几乎失去食用价值;第三,由于鲜笋的出笋期只有 30~45 天,采收期短而集中,目前尚无法对鲜笋进行远距离运输或长期贮藏,而竹笋的对外销售市场主要在欧美、日本和

东南亚，其中以欧美和日本的销售量最大。因此，从竹笋的丰富的营养价值、容易老化的特性和广阔的市场需求等方面来看，都有必要对竹笋进行干燥试验的研究，以满足人们对方便食品的需求。另外，研究竹笋的干燥机理不但对于保持竹笋营养和品质有很大的意义，而且对于竹笋产业实现跨越式发展也极其重要，对于城乡经济的增长，尤其是对山区人民生活水平的提高有着更为重要的意义^[8-10]。

1.2 国内外相关领域研究现状

在果蔬和农副产品干品贮藏中，干燥是一种最有效最简便的方式。其中加热干燥是最常见的干燥方式，它是通过加热干燥室内的空气，一方面达到为物料加热，使物料水分快速蒸发的目的；另一方面热空气使得干燥室内的气压降低，物料表面和表层水分的蒸气压大于环境的蒸气压，从而使得水分更容易向空气中蒸发。表层水分的快速蒸发，造成表面与内部水分含量的差别，即存在水分梯度，在这种作用力下，内部水分将以液态或蒸汽形式向表层迁移，此干燥水分传递过程属于内部扩散控制。如此进行下去，物料的水分就会不断的减少。恒温干燥就是物料表面水分的蒸发与内部水分向外扩散的过程。其干燥过程可描述为：

热能→物料升温→干燥介质的蒸气压小于物料表面蒸气压→物料水分向干燥介质蒸发→物料表面水分密度小于内部水分密度→内部靠近表面的水分向表面快速扩散→内部远离表面的水分向表面缓慢扩散^[11]。

含水率高的物料，其干燥过程总是遵循加速、恒速、降速三个干燥阶段，最终达到平衡含水率的干燥过程。图 1-1、1-2 分别为物料的典型干燥曲线和典型干燥速率曲线^[12,13]。

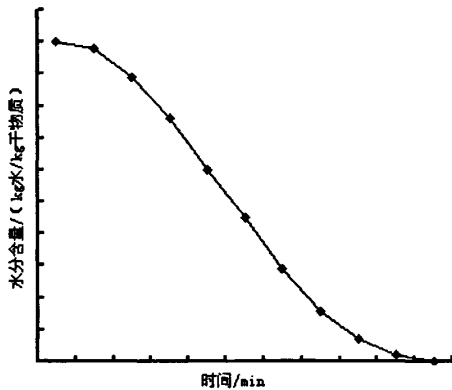


图 1-1 物料的典型干燥曲线

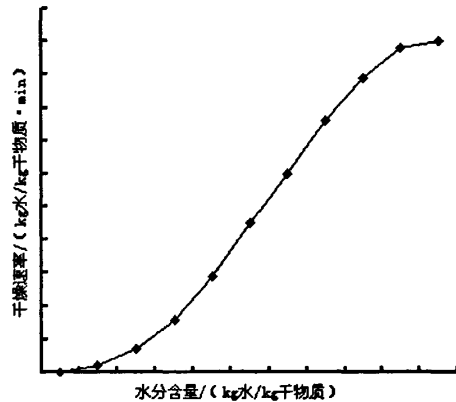


图 1-2 物料的典型干燥速率曲线

Fig.1-1 Classic drying curve of material Fig.1-2 Classic drying rate curve of material

当水分子从物料表面蒸发到干燥空气中的速率小于或等于水分子从物料内部迁移到表面的速率时，从物料表面向干燥空气进行对流传递的水分蒸汽压力决定了物料的干燥速率，称为外部扩散控制。

物料在加速期的干燥特点是干燥空气或能源首先加热物料表面的水分，使其快速地蒸发到空气中，在此过程中，物料内部的水分向外传递的速率很小，蒸发的水分主要来自物料表面，所以干燥期非常短暂，在某些物料或某些干燥方式下，此阶段非常不明显；在恒速期的

推动力是其表面的水分蒸汽压与干燥空气的水分蒸汽压之间的压差。在此干燥期间,影响干燥速率的其他因素有温度、空气流速、相对湿度、干燥空气与物料接触的表面积以及初始含水量;在降速期时,其表面含水率小于吸湿含水率,水分蒸汽压力下降,干燥介质与物料表面之间的蒸汽压力之差减小,干燥速率相对减少。在此干燥期间,影响干燥速率的因素主要是物料含水率和干燥空气的压力。一般情况下干燥降速阶段还可分为第一降速阶段和第二降速阶段两个阶段^[14, 15]。前者是外部扩散控制,失水速率较快;后者是内部扩散控制,失水速率逐渐变缓。

恒温干燥是典型的干燥方式之一,本研究中用其来进行初始含水率的测定和竹笋干燥特性的研究。

1.2.1 微波干燥

1.2.1.1 微波干燥的特点

所谓微波一般指的是波长在1mm~1m的电磁波。许多具有极性分子的物料处于交变电磁场中时,物料中原本处于杂乱状态的极性分子会随外电场的方向做定向排列。由于外电场是一种电场方向随时间变化的交变电磁场,故而物料中的极性分子在外电场的作用下以极快的速度改变方向,产生高速摆振,从而造成分子间的摩擦与碰撞,产生热能,进而使得物料的温度上升。微波干燥是从内部产生热量,在物料内部迅速生成的蒸汽与表面形成巨大的压力差,驱动水分以水蒸气的状态移向物料表面,产生一种“泵送效应”。有时甚至产生很大的压力梯度,使部分水分还未来得及被汽化就已经排出到物料表面,这就是微波干燥物料的基本机理^[16, 17]。

微波的热特性主要是指微波的加热特性。物料从其电性质方面来说称作介质,对电磁波都表现有吸收特性,物料对微波的吸收特性表现在微波能穿透物料深入到其内部加热,其深入距离与微波波长同数量级,透入物料内部的微波能量被物料吸收转化成热能并对物料进行加热,形成独特的物料加热方式——物料整体被加热,形成了无温度梯度加热。此时物料的表面、里层温度基本相同。随着物料表面水分不断蒸发,物料表层温度将略低于里层温度。即形成的温度梯度由内指向外,从而使得加热过程中热量迁移方向与蒸气压迁移方向一致。根据物料干燥理论,这种加热状态非常有利于物料的干燥。

由于微波具有很强的穿透性,可以穿透材料的内部,穿透深度随频率变化而变化,一般从几厘米到几十厘米;微波干燥无干燥惯性,可即开即停,有利于温度的控制,便于自动化和连续化生产;微波干燥效率高、速度快,所以在相同的条件下,微波干燥设备的体积较其他干燥设备小得多;微波干燥时只对炉内的物料进行加热,对周围环境及炉体不加热,也无热辐射,从而使得周围环境温度低,同时无燃料烟尘和温室气体等污染环境的有害物质排出,有利于产品的卫生和环保,工作环境也比较卫生舒适。所以微波干燥具有产品质量高;干燥速度快,干燥时间短;反应灵敏,易控制;热能利用率高,节省能源;具有杀菌、灭酶、防霉的作用,没有公害;设备占地小等特点^[18]。

1.2.1.2 微波干燥技术的研究现状

微波干燥的方法在工业上已成功用于粮食、果蔬、药材、纸张、木材、皮革、化工产品、电影胶片、卷烟、制茶及各种加工食品的干燥处理。尽管如此,由于首先不同物料具有其自

身的特性，微波干燥一种物料的结论一般不能直接应用到另一种物料的干燥；其次微波干燥虽然成功地应用于许多领域，但不意味着微波干燥是非常成熟的技术，相反，由于微波功率和干燥过程不易控制，常常给物料干燥带来诸多的不便；再次微波技术的局限性造成了微波干燥物料的不均匀性，时常使得被干燥物料某些部分出现碳化而另一些部分却还含有较高的水分。所以，对微波干燥尤其是与其相关的联合干燥的研究依然是有着深远的意义的^[19, 20]。

肖宏儒^[21]研究了微波用作绿茶杀青的可行性，结果表明微波杀青能保持绿茶特有的色泽；贺筱蓉^[22]研究了微波处理绿竹笋对保鲜的影响，与低温保鲜的鲜竹笋相比，结果表明，除总氮和总糖量在保鲜过程中分别降低了26.7%和21%，其他没有多大变化；刘钟栋^[23]的著述中表明，食品中常见的酶类对微波较为敏感，微波处理可以使麦芽中淀粉酶及其他酶类活性明显降低，说明酶对微波敏感。冯薇丽^[24]对黄姜进行微波干燥特性的研究中得出，微波对黄姜干燥是可行的；张蓉蓉等^[25]在微波干燥法生产马铃薯脆片的研究中，结果表明：微波功率越大，失水速率越快，微波功率和微波处理时间的变化对马铃薯片脆度具有显著的影响；陈卢亮等^[26]用微波炉加热的方法研究测定了三叶草含水量，结果表明：微波炉法较烘箱法测定值精确度高、准确性好；朱德泉等^[27]用微波对小麦进行干燥的研究表明，小麦微波干燥主要处于恒速干燥阶段，能耗主要受平均干燥速率的影响；李加兴等^[28]用微波干燥猕猴桃的研究表明，采用间歇式干燥，铺盘质量 $8\text{kg}/\text{m}^2$ ，微波干燥机的微波输出功率 8.25kW ，干燥温度 80°C ，送料速度 $4\text{min}/\text{次}$ ，间歇时间控制在 3min 以内，所得产品品质较好；韩清华^[29]用微波真空干燥膨化苹果片的研究表明，微波真空的干燥能力比热风干燥增加48.46%，单位能耗节约32.32%，维生素C保存率比纯热风干燥提高15.8%；得出在微波功率为 $12.0\text{W}/\text{g}$ 、切片厚度为 8mm 、真空度为 0.085MPa 、初始干基含水量为60%的试验条件下，苹果片的膨化率最大，达到321%；同时还得出最优工艺组合为：微波功率为 $12.0\text{W}/\text{g}$ 、切片厚度为 8mm 、真空度为 0.089MPa 、初始干基含水量为69.2%。

1.2.2 热风薄层干燥

热风薄层干燥是指物料厚度在 20mm 以下，其表面完全暴露在相同的环境条件下进行烘干的干燥方式(曹崇文, 1998)。热风薄层干燥的研究是为了进一步探讨在一定风温、风速和相对湿度条件下，物料水分随时间变化的规律，推导出物料含水率与干燥时间之间的关系式，并进一步探讨其理论基础，为以后的试验研究和实际应用提供理论依据^[30]。

国外对农副产品和果蔬的薄层干燥试验研究比较早，美国、加拿大、澳大利亚以及日本等国的学者对谷物和果蔬薄层干燥进行过大量研究工作，系统地分析了谷物和果蔬的各种薄层干燥特性，所建立的薄层干燥方程也比较多，如1949年美国的Page教授以玉米为研究对象，进行了薄层干燥试验研究，并得出著名的Page方程；1977年Agrawal和Singh根据Fick第二定律，对圆粒物料降速干燥阶段的干燥速率用无穷级数表示，得出扩散模型；同年，他们对谷物进行薄层干燥后，推导出相应的单项近似方程，即Paul Singh方程；另外还有1982年澳大利亚学者Sutherland等对水稻进行了大量的试验研究，最终建立了Sutherland方程。

国内对各种物料薄层的干燥的研究有：中国农业大学的曹崇文教授从1984年开始从事农业物料的干燥过程以及干燥特性的研究，尤其对谷物、种子的薄层干燥特性进行过许多的研究，且得出了一系列的数学模型(曹崇文, 1984; 曹崇文, 1998; 曹崇文和朱文学, 2001);

1993年吉林大学生物与农业工程学院王登峰、李慧珍等对新鲜玉米作了薄层干燥试验,确定了一系列的影响因素,通过分析得出了影响干燥的因素及其显著性;李爱平^[31]用薄层干燥方式对苜蓿进行了干燥特性的试验研究,结果表明,苜蓿干燥时含水率随时间呈指数关系变化;其中苜蓿的叶、茎含水率降至安全干基含水率所消耗的时间随风速和风速的升高而下降,Page方程(即 $MR=\exp(-Kt^N)$,其中干燥常数K是风速的函数,N是风速的函数)与试验结果吻合较好;阿达姆·穆罕默德·萨波^[32]做了干燥条件对小麦薄层干燥影响的研究,结果表明干燥气流的温度和相对湿度对干燥速率有较大影响;气流速度也有一定影响,分别用三个经典的薄层干燥模型与实验数据进行了对照,发现Henderson和Pabis模型对于小麦薄层干燥实验结果较为吻合;高琦^[33]做了胶乳法氯化天然橡胶薄层干燥特性的研究,结果表明:含水量和干燥温度对CNR水分扩散系数有显著影响,粒度和空气流量对扩散系数影响不大,干燥过程中扩散系数随着水分减少而增加,水分内部扩散系数为 $0.005\sim 0.05\text{mm}^2\cdot\text{min}^{-1}$,扩散系数随温度增大而呈指数增加。

用薄层干燥方式对油料作物进行的研究也有很多,如Syarief^[34]等人研究了葵花籽的薄层干燥速率,他们在四种不同的干燥空气温度下对同一品种的葵花籽进行了干燥试验研究,最终得出相应的Page方程;Yunfei Li^[35]等人也对油料葵花籽的薄层干燥速率进行了研究,考察了含油量对薄层干燥速率的影响,并验证和修正了Syarief的模型;结果表明:含油量对葵花籽的薄层干燥速率没有显著影响。1984年加拿大的Sokhansanj对新鲜油菜籽及复水油菜籽进行了薄层干燥特性的研究,得出一系列的Page方程进行对比,发现此两者的干燥速率有很大的不同,尤以第一次加湿的油菜籽与原始水分的差异最大;2006年周代梁在油菜籽薄层干燥研究中,得出了油菜籽薄层干燥的单项扩散模型、油菜籽悬浮速度线性回归方程以及压力降与风速的关系式。热风薄层干燥方式在竹笋干燥中的应用,至今还未有相关的研究资料,因此把热风薄层干燥引入到竹笋干燥中是一件非常有意义的尝试。

1.2.3 联合干燥

1.2.3.1 联合干燥的特点

联合干燥又称为组合干燥,Mujumdar教授认为组合干燥包括组合使用不同类型的干燥器或干燥技术;潘永康等学者对组合干燥定义如下:把两种或两种以上的干燥器串联组合起来,就可以达到单一干燥所不能达到的目的,这种干燥方式称为组合干燥,金国忠等^[24]学者则认为这种方式下的干燥器称为组合式干燥器^[6]。

根据加热方式的不同,对干燥方式可以进行不同的组合。将多种热源组合为同一干燥设备的热源,就形成了多热源干燥设备的一体组合,称为组合式干燥器;而将加热方式按阶段独立进行的组合,则称为不同干燥方式的分级组合。通常情况下,研究较多的是不同干燥方式的分级组合,即通过第一种干燥器干燥后使物料的含水率降到一定数值,再利用第二种干燥器继续干燥,使物料的含水率达到产品的标准要求^[6, 36-38]。本论文涉及到的联合干燥是指后者,即不同干燥方式的分阶段或分级组合。

采用分阶段或分级联合干燥,不仅可以改善产品质量,同时也能节约能源,提高干燥效率,尤其是对热敏性物料最为适用。工业生产中常用的联合干燥方式有两级组合干燥和三级联合干燥,而在食品工业中常用的联合干燥方式是:喷雾干燥和流化床干燥等干燥设备的二

级或三级联合(用于干制奶粉等), 喷雾干燥和带式干燥等干燥设备的三级组合(用于干燥食品等) [6, 38~39]。

1.2.3.2 果蔬联合干燥

根据果蔬干品生产中常用的干燥方式, 对果蔬的联合干燥定义^[6]如下: 根据果蔬自身的特性, 将两种或两种以上的干燥方式优势互补, 分级或分阶段进行的一种组合干燥。常见的干燥方式有: 热风干燥、热泵干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、太阳能干燥、压力膨化干燥、喷雾干燥和渗透干燥。这些干燥方式相结合而发展起来的联合干燥有: 热风—热泵联合干燥、热风—微波冷冻联合干燥、热风—微波联合干燥、热风—压力膨化联合干燥、微波真空—热风联合干燥、真空冷冻—热风联合干燥、渗透—热风联合干燥等。各种联合干燥方式是一项综合性很强的应用性技术, 它们涉及到流体力学、物理学、传热传质学、原料学、低温制冷、数学、自动控制、化学等学科, 也是这些学科交叉发展的产物。

国内外联合干燥的研究有很多: None. YJ等^[40]应用渗透—热风联合干燥香蕉片, 香蕉片被浸透在两个连续的蔗糖溶液(加白利度分别35Brix和70Brix的1g/dL CaCl₂溶液), 然后进行温和的热风干燥(40℃、72h、相对湿度60%), 得到水分质量分数为16.5%的产品, 获得了较佳的颜色; Sharma^[41]应用微波—热风联合干燥方式干燥大蒜丁香, 结果表明: 与传统的热风干燥相比, 微波—热风联合干燥缩短了干燥时间的80%~90%, 且获得了较高的感官质量, 具有较大的潜力, 此微波—热风联合干燥过程较适合Page经验模型; Torringa. E等^[42]把渗透脱水作为预处理, 用微波—热风联合干燥方式对蘑菇进行了研究, 认为微波—热风联合干燥的蘑菇质量好于传统热风干燥的蘑菇; Fito. PJ等^[43]对香蕉片进行了5种联合干燥方法的比较研究, 即热风—微波联合干燥、渗透—热风联合干燥、真空浸渍或渗透—热风联合干燥、渗透—热风—微波联合干燥、真空浸渍或渗透—热风—微波联合干燥。与热风干燥相比, 热风—微波联合干燥最快, 真空浸渍和渗透干燥比较慢, 但可提高产量及产品的品质和稳定性。

Phanindra. Kumar. HS等^[44]应用冷冻—热风联合干燥方式干燥切成块状的胡萝卜和南瓜, 评定其物化特性和质量, 分别与纯热风干燥和纯冷冻干燥的样品比较干燥速率、总的能量消耗和物化特性。结果表明: 冷冻—热风联合干燥的产品在外观和复水比方面优于热风干燥的产品, 且在物化质量方面更接近于纯冷冻干燥的产品。联合干燥总耗时和总耗能与纯冷冻干燥相比缩短了50%, 与热风干燥相差不多, 并推断出联合干燥在提高脱水蔬菜的质量、节省能量和时间消耗上是非常有效的。Litvin. S^[45]联合应用冷冻干燥、微波干燥及热风或真空干燥胡萝卜片: 初期冷冻干燥的搁板温度为30℃, 干燥2h后, 搁板温度为55℃, 再干燥2h后, 胡萝卜片的含水率约为40%; 接着微波处理50s, 最后用热风或真空干燥至含水率5%。终期为热风干燥时, 胡萝卜片的物化质量特性如颜色、大小、复水比与纯冷冻干燥的物化质量相似; 终期为真空干燥时, 提高了胡萝卜的颜色质量, 复水后的总质量与新煮的胡萝卜片相近。终期为热风干燥时, 胡萝卜片的干燥时间与纯冷冻干燥相比, 缩短了干燥时间3h, 并获得了与之物化质量类似的产品。总结可得, 联合干燥对于减少干燥时间、降低成本是非常有益的。

王枚等^[46]采用微波间歇—热风联合干燥方法对苹果脯进行了干燥影响因素及节能水平的试验。结果表明: 微波间歇时间对干燥速率影响显著。当苹果脯在风速为3.5m/s~7m/s的空气中进行间歇干燥时, 消耗的时间比在静止空气中显著缩短。联合干燥苹果脯, 比纯热风干燥能耗降低30.4%, 时间缩短31%; 王俊等^[47]采用远红外—热风联合干燥的方式对香菇的质热

特性进行了试验研究,建立了远红外—热风联合干燥香菇时有关质热参数模型,分析了干燥中对流传质汽化系数 K_c 、辐射强化系数 K_r 、辐射换热系数 α_e 以及总换热系数 α_0 等的变化规律。结果表明:因干燥温度和香菇含水率不同, K_c , K_r , α_e , α_0 等值也不同;徐贵力等^[48]在对现有香菇干燥设备及其存在的问题进行仔细分析的基础上,提出了负压远红外线干燥香菇的方法,并进行了不同干燥方法、相同干燥条件的对比试验,分析绘出了其失水特性曲线。在此基础上,又提出了远红外—负压远红外联合干燥香菇的方法,即在干燥前期用远红外线与排湿气流相结合的干燥方法较快地把香菇的含水率降到50%,然后在干燥后期用换气负压远红外线干燥的方法把香菇的含水率降到要求值。采用这种干燥方法,不仅可使香菇干燥时间缩短、能耗降低,而且提高了香菇干制品的优等率;徐彩霞等^[49]在太阳能—热泵联合干燥的研究中指出,太阳能—热泵联合干燥可以有效地提高一次能源的利用率,减少CO₂和其他污染物的排放,其必将以其优越的性能,突出的节能、环保效果而拥有广阔的发展前景。

1.2.4 竹笋干燥的研究现状

竹笋(Bamboo shoot)是禾本科(Poaceae)竹亚科(Bambusoideae)植物的新生芽。我国现有的500多个竹种中,大多数的竹笋可以食用,如分布于中亚热带的毛竹、南亚热带的麻竹等^[50]。毛竹(*Phyllostachys pubescens*),又名楠竹、猫头竹、孟宗竹,中国原产,为我国南方主要材用和笋用竹种,是我国栽培面积最大、经济价值最高的竹种。竹秆高10m~15m,横径10cm~15cm。竹壁厚,质坚韧,用途广。其笋称为毛竹笋(*Phyllostachys pubescens* shoot),又称孟宗竹笋,直接源于自然,安全无污染,是一种古老的天然植物资源。笋为圆锥形,甚肥大,适时采集的笋长约26cm,粗围约20cm,每株大约重2kg~2.5kg。泥下潭笋,其笋蛋黄,味最佳;出土后笋逐渐褐黄,其味尚好,随着出土时间的推进,笋面渐具黑斑,密布茸毛,笋味逐渐变劣。笋肉白色,相对笋壁厚0.85cm,节腔分化比较明显,可食部分占54.64%,浦头11.3%,笋箨34.0%,食味中等,质脆。3月下旬为收获初期,4月上、中旬进入盛期,4月下旬至5月上旬为收获末期,历时45天左右^[51, 52]。

传统的笋干加工流程是:选挖竹笋→切笋壳→蒸煮杀青→浸漂冷却→剥壳→烘干→熏硫→分级装袋(成品)。各种新鲜竹笋的含水量很高,一般为86%~93%,以游离水、结合水及化合水三种状态存在。因此,竹笋的干燥是笋干制作中的关键环节。传统的竹笋干燥多采用自然晒干或烘灶与烤房干制,方法与设备简单,成本低,但干燥缓慢,干燥过程中温度、时间难以控制,使得营养成分破坏严重、色泽褐变严重、复水性差,笋干总体品质差,而且常会因阴雨季节无法晒干而腐败变质。因此,利用现代干燥方法和工艺对竹笋进行干燥是提高笋干质量的有效途径。

国内外利用现代干燥技术研究竹笋干燥的文献较少。热风及热泵干燥方面,Ponciano S. Madamba^[53]研究了竹笋热风干燥工艺和干燥过程中的物理变化规律;陆蒸^[54, 55]利用热泵装置干燥毛竹笋和绿竹笋,探讨干燥温度、切分厚度及干燥前预处理对干燥特性、干制品复重率的影响,也研究了绿竹笋热泵干燥工艺;林启训^[56, 57]为提高竹笋干制品的质量,竹笋干燥过程中用CO₂、N₂在自行设计的小型气调干制实验设备上对干燥室气体进行调节,同时以热风干燥为对照进行了对比试验。

冷冻干燥是目前最先进的干燥技术,在竹笋冷冻干燥方面李加兴^[58]采用正交试验、均匀

设计试验和对比试验,对篾竹笋护色、预处理、真空冷冻干燥条件和不同干燥方法的干燥效果等进行探讨,结果表明真空冷冻干燥所得产品的质量明显优于热风干燥和真空干燥;徐艳阳^[52, 59]对毛竹笋进行了热风与真空冷冻联合干燥(AFD)的研究,应用热风与真空冷冻(AD+FD)和真空冷冻与热风(FD+AD)两种方式做不同转换点试验,确定了AFD联合干燥的方式和最佳转换点;徐艳阳^[60]同时对毛竹笋进行了真空冷冻干燥的试验研究,测定了鲜笋的共晶点和共融点,确定了较佳的真空冷冻干燥工艺,获得了冻干曲线。竹笋真空干燥方面,H.-P. Cheng^[61]研究了竹笋真空干燥过程中干燥室压力、竹笋温度、冷却水温度的相互关系。竹笋微波干燥方面,李安平^[62]对微波干燥笋干的生产工艺进行了研究,试验表明微波干燥优于热风烘箱干燥和自然干燥。

各种处理方法对采前采后的竹笋品质的影响的研究中,罗晓莉^[60]采用不同的方式处理采后竹笋,并把最优方案相结合对竹笋进行复合处理;赵丹^[6]采用试验的方式研究了处理条件对采后麻竹笋感官品质的影响及与品质有关的生理生化指标的变化规律,探讨了它们在品质劣化过程中的作用,提出了采后麻竹笋品质劣化机理及采后处理对品质劣化调控的可能途径;肖丽霞以绿竹笋(民间俗称“马蹄绿”)为试材,对采前施肥和培土措施对竹笋营养品质的影响进行了分析,测定了采后绿竹笋老化过程中营养指标的变化,分析其变化规律,采用药剂处理观察测定其控制老化效果,讨论了采后绿竹笋老化的可能原因,探讨了绿竹笋低温贮藏竹笋的品质和生理特性的变化。

1.3 竹笋干燥存在的问题

从已有的利用现代干燥方法干燥竹笋的资料来看,竹笋干燥还存在如下问题:

(1) 竹笋热风干燥具有生产方法相对简单、产量高等优点,但也存在许多不足,如产品皱缩度大、色泽褐变严重、复水率低、营养元素损失严重等。竹笋冷冻干燥可以改变上述品质缺陷,可最大限度地保持食品的色香味形及良好的复水性,其设备一方面要不停地制冷($-40^{\circ}\text{C}\sim-60^{\circ}\text{C}$),另一方面要不停地供热($20^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$),还要不停地抽真空,因此操作技术要求高、干燥时间长、能耗大、连续化生产困难、产量低,因而运行成本高,只适用于质量要求特别高的高档产品。

(2) 竹笋的微波干燥或远红外干燥,加热均匀,升温快,产品品质稳定,基本可保持原有的营养成分,但通常采用的方法是恒功率连续干燥,无法对过程进行控制,笋干品质不易保证。采用的工艺是预煮(加入柠檬酸杀青)、漂白(加入漂白剂)、热风干燥,然后微波干燥,除干燥环节外基本采用传统工艺,加入化学制剂,造成二次污染。

(3) 目前研究的竹笋现代干燥方法,主要围绕传统工艺解决干燥问题,仍然要经过烫漂以及护色处理来进行杀青。杀青的主要目的是钝化酶的活性和杀菌,传统烫漂杀青有沸水杀青和蒸汽杀青两种,烫漂温度为 $85^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$,时间通常 $10\text{min}\sim 40\text{min}$ 。因此传统杀青过程将消耗较多的燃料和排放大量 CO_2 ,这种工艺不能满足日益重视的节能减排要求。

因此,研究“优质高效低耗低排放”的笋干制作新工艺和新方法,对于竹笋加工具有重要的现实意义和学术研究价值。

第2章 绪论

2.1 选题背景及研究意义

竹笋内含多种营养成分,据测定,每100克竹笋中含蛋白质2.6克、淀粉3.6克、膳食纤维1.8克、脂肪0.2克、糖类0.4克等,100g竹笋中氨基酸和矿物质含量详列见附录(附表1),其中蛋白质、淀粉、膳食纤维含量高,脂肪和糖类含量低,说明竹笋是一种低热量高营养价值的森林蔬菜。竹笋是竹子提供的天然理想食品,中国也是竹笋生产、利用与研究的古国。早在公元300年前,戴凯之就对民间食用竹笋做了初步研究,著《笋谱》,是世界最早的一部竹笋专著。竹笋肉厚、色白、质嫩、气香、味鲜,为山珍海味的下八珍之一,营养丰富的同时具有一定的保健功效^[63]。医学研究表明,竹笋具有防癌、美容、益气、利尿、化痰、利水消肿、润肠通便等保健功能和药用价值^[64, 65]。唐代名医孙思邈的《千金要方》和明代医药学家李时珍的《本草纲目》中也都曾记载:“竹笋味甘、微寒、无毒、主消渴、利水道、益气力、可久食”^[66]。近年来还发现竹笋具有减肥、降血脂、抗衰老等多种保健功能,是一种新型的保健食品。竹笋中含有丰富的纤维素,而纤维素又被现代营养学家称之为“第七营养素”。常吃多纤维素的竹笋,可防治高血脂、高血压、冠心病、肥胖病、糖尿病、肠癌及痔疮等疾病。这是因为纤维素在肠内可减少人体对脂肪的吸收,增加肠道蠕动,防便秘,去积食。在经济发达的西方国家,竹笋则以其出众的减肥功能,还被称为是“美容食品”。因此,竹笋是公认的最佳绿色纯天然营养食品,是传统的森林蔬菜之一,被誉为“素食第一品”、“寒士山珍”和“理想的蔬菜”,也常被人们说成:“笋子一身都是宝”。在日本、加拿大和韩国,更是被认作“餐餐必备,天天必食”的蔬菜。

世界竹类有70~80属1300多种,我国有39属500余种。中国竹资源位居世界第一,约占世界总量的30%,素有“竹子王国”之称。第六次森林资源清查统计显示我国有竹林面积484.26万公顷(不包括山地竹林和以树木为主的竹木混交林),主要分布在我国南方的17个省(市),占全国营林总产值的18%^[67~69]。随着我国退耕还林政策的实施,中西部结合退耕还林工程建立了大批竹林培育基地。发展竹产业、提高竹笋经济价值是增加林区农民经济收入的一个重要的经济增长点。近年来我国竹笋及制品产量、出口量迅速增加。据统计,2005年竹笋产量310.5万吨,2005年前后我国每年竹笋出口创汇4亿多美元。随着人们对竹笋药用和食用价值了解的增多,竹笋的销量日益增加,全球食用竹笋消费每年以15%的速度递增,国际市场价格年平均上涨4.1%。我国生产的水煮笋、笋干等笋制品在国际上声誉甚高,其中竹笋干制品具有运输方便、易贮藏等优点,是竹笋市场的主要产品。作为绿色食品、保健食品,竹笋产品出口不受配额限制,预计2010年将达到8亿多美元。

重庆是我国竹子主产区之一。近年来重庆市为推进全市农业农村经济结构的战略性调整,实施种植100万亩竹林等多个“百万亩”工程的战略。通过战略性调整,重庆市竹笋资源开发量快速增加,如2007年荣昌县产竹笋2万吨,比2006年增长4倍,林农收入1400万元;2007年南川金佛山特色资源方竹笋面积达17万亩,产方竹笋近1.6万吨,比2006增产10%。

竹笋采收期短且集中,采后仍然呼吸旺盛,在常温下很容易产生木质化,对其营养和品质造成极大的影响。竹笋采后生长酶促进继续生长而消耗部分养分,苯丙氨酸解氨酶(PAL)和过氧化物酶(POD)活性迅速提高,多酚氧化酶(PPO)无显著变化,而PPO、PAL和POD三种酶都

能促进木质素的合成,提高组织的木质化程度^[70, 71]。由于竹笋多生产于交通不便的山区或丘陵,从采摘地区到销售地区的流通过程,更加重了竹笋的木质化。因此,每年生产的鲜笋40%左右用于鲜食、鲜销,60%左右用于生产加工。各种竹笋加工方法均存在保鲜问题,目前多采用添加防腐剂、化学保鲜剂,甚至采用硫磺熏蒸、亚硫酸盐类护色等方法进行保鲜护色。这些方法使得SO₂等有害残留物超标,甚至有毒害作用。人们越来越注重绿色健康食品,而且国际绿色贸易壁垒愈来愈高,这些化学处理方法已经严重影响了笋制品的销售和声誉,也影响到了我国竹笋制品在国际市场上的声誉。竹笋保鲜技术重点将向无毒的物理方法和生物方法方向发展,尽量减少防腐剂和化学保鲜剂的使用。

竹笋加工制品主要有笋干、水煮笋、盐渍笋和罐头笋以及软包装方便笋等产品。而笋干是其中最主要的产品之一,竹笋干品蛋白质含量高达15.23%,蛋白质经水解后可得到18种氨基酸,富含亮氨酸、赖氨酸、丝氨酸等8种人体必需的氨基酸以及铁、钙、磷等矿物营养元素和维生素,脂肪含量低至0.246%,食用纤维含量高达6%~8%。竹笋干制可大大减少竹笋采后迅速木质化和养分消耗造成的食用品质的下降,具有保持鲜嫩味美、方便易食、各具风味、可长期保藏、易包装和便于运输等优点,因此笋干是主要的竹笋加工制品,2006年我国生产竹笋干达47万吨。

优质笋干的供应,不但可以拓展竹笋的供需市场,延长竹笋的货架期,便于长途运输和销售,丰富人们的菜篮子,满足人们对方便食品的需要,同时也可提高农民,尤其是地区农民的收入。因此,开发研究一种“优质高效低耗低排放”的干燥新技术、新方法,对提高我国果蔬的干燥加工技术水平,提高果蔬加工企业抵御国内外市场风险的能力,推进农业产业结构和农村经济烦躁具有积极而又深远的社会意义。同时,也对农产品干燥技术的发展有着重要的学术价值和现实意义。

2.2 竹笋干燥研究内容及拟解决的问题

2.2.1 研究内容

以获得“优质高效低耗低排放”的笋干制作新工艺、新方法为目标,对如下的内容进行了研究:

- (1) 建立竹笋笋干的评价指标,研究竹笋微波杀青与传统杀青的优劣比较,确定微波杀青最优组合条件;
- (2) 研究竹笋恒温、微波、热风薄层干燥的干燥特性;
- (3) 探讨微波分段干燥的可行性;
- (4) 研究竹笋热风薄层干燥特性和最佳工艺组合,建立竹笋热风薄层干燥的干燥模型;
- (5) 分析衡量竹笋热风薄层和微波—热风薄层联合干燥各自的最佳干燥工艺;比较此二种干燥方式的优劣性。

2.2.2 拟解决的关键问题

本研究中需要解决的关键问题如下:

- (1) 竹笋微波杀青的最佳时间、功率;

(2) 竹笋微波分段干燥、热风薄层干燥、微波—热风薄层联合干燥、恒温干燥试验的设计；竹笋干燥特性曲线的建立及失水动力学模型的建立；竹笋在微波干燥方式下的干燥时间（功耗）—干燥温度曲线的建立；

(3) 通过试验，分析竹笋微波干燥及热风薄层干燥的干燥机理；

(4) 竹笋薄层干燥综合拟合方程的建立；

(5) 微波—热风薄层联合干燥的最佳工艺。

2.3 竹笋干燥的研究目标及特色

2.3.1 研究目标

本研究的总体目标是对竹笋进行微波杀青，得出其微波杀青的最佳功率和时间；研究竹笋恒温、微波、热风薄层干燥的干燥特性；分析衡量竹笋热风薄层干燥和竹笋微波—热风薄层联合干燥的最佳干燥工艺。具体目标分述如下：

(1) 通过微波杀青试验、微波干燥试验，探索微波分段干燥的可行性，得到竹笋（毛竹笋）微波杀青的最佳功率、时间以及杀青后的品质变化，建立起竹笋微波干燥失水动力学模型及干燥时间与温度的关系曲线；

(2) 通过竹笋恒温干燥试验、热风薄层干燥试验、微波—热风薄层联合干燥试验，探索竹笋在不同干燥方式下的干燥特性，建立失水动力学模型，并运用综合评分的方式，以干燥后竹笋笋干的色泽、香味、外观、质地、复水比、总功耗、总耗时等为指标，分析衡量竹笋热风薄层干燥和竹笋微波—热风薄层干燥的最佳干燥工艺；

(3) 通过拟合不同微波功率下，干燥竹笋至出现褐变点的时间，得出其拟合曲线，并求得其回归方程；通过拟合在一定风速、不同风温的热风薄层干燥条件下，干燥竹笋至安全干基时所消耗的时间，得出其拟合曲线，并求得其回归方程；

(4) 通过对竹笋薄层干燥三种模型的研究，对一定风速、不同风温下的竹笋薄层干燥进行了线性回归分析，并得出其线性关系，最终求得一种薄层模型的综合拟合方程。

2.3.2 研究特色

首先，研究了竹笋微波杀青的方法。微波作为一种高频电磁波，当它在介质内部起作用时，水、蛋白质、脂肪、碳水化合物等极性分子受到交变电场的作用而剧烈振荡，从而引起强烈的摩擦而产生热，这就是微波的介电感应加热效应。这种热效应也使得生物体内的蛋白质、核酸等分子结构改性或失活，从而达到对细菌、霉菌和酶的杀灭作用。因此，微波杀青处理成了近年来研究保鲜果蔬的一种手段。微波对竹笋杀青，利用竹笋中的有效介质（水、蛋白质等）强烈吸收微波能，使竹笋表里受热，就能达到快速灭酶的目的。因此，研究竹笋微波杀青特性和工艺对于改变传统蒸煮杀青工艺中的高能耗高排放具有重要意义。

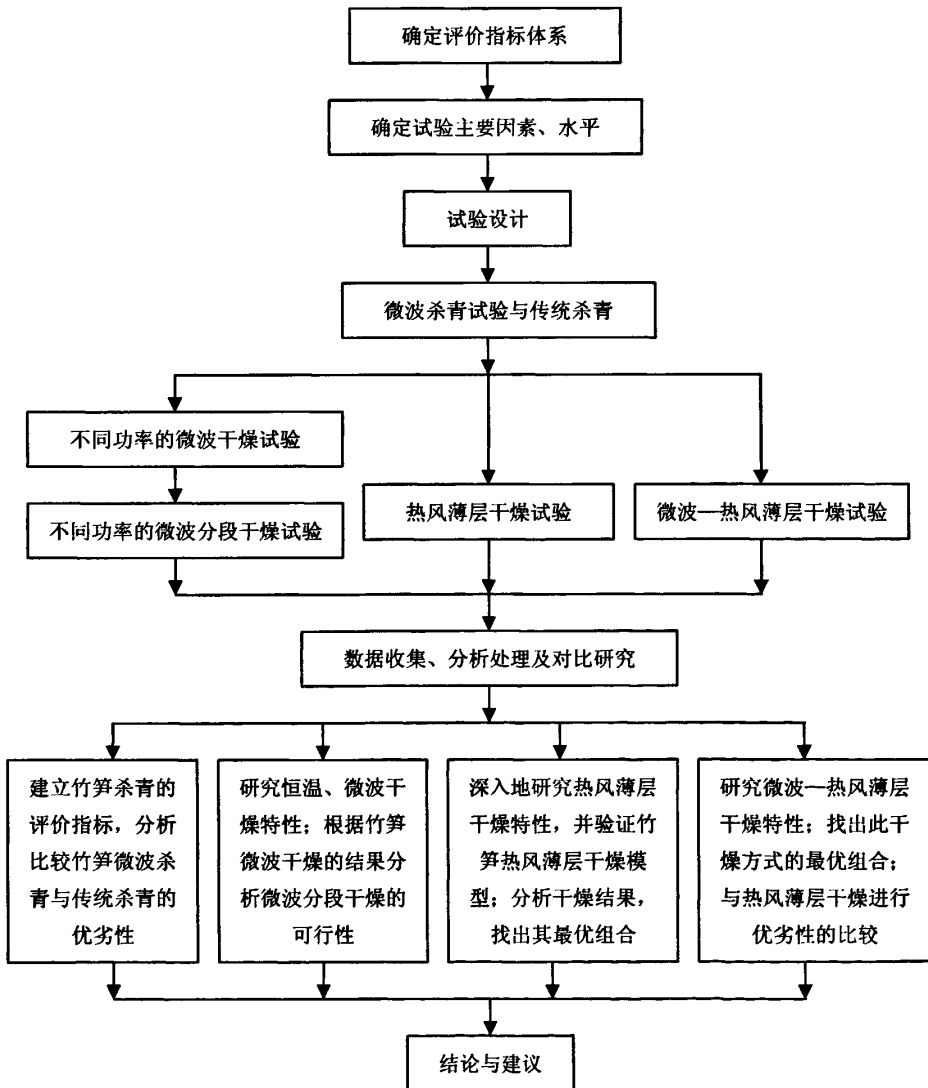
其次，研究了“优质高效低耗低排放”的竹笋干燥工艺。微波采用的是一种穿透式加热方式，使被加热物体本身成为发热体，没有常规加热的热传导过程，从而避免表面硬化及干燥不均匀等现象。竹笋微波干燥初步试验表明，在微波场的作用下，竹笋中的水分吸收微波能迅速蒸发膨胀，在竹笋表面形成无数的细小孔隙，这些孔隙能加快水分的蒸发，而且改善

笋干的复水性，提高产品的品质。因此，研究将微波杀青与微波干燥结合起来进行笋干制作，能充分利用微波加热的高效性，产品营养保持率高、品质和外观好的优点，对于降低微波干燥成本、提高笋干质量具有明显的现实意义。现有的微波干燥一般采用恒功率进行连续干燥。但是，物料中水分含量越高，介电常数也越大，因而也就越容易被加热，而在含水率为 20%~30%时，介电损耗因子随含水率的降低开始变缓，因此恒功率干燥过程中竹笋内部热能变化较大；同时，干燥过程中热能不但使竹笋失去水分，还会使笋体细胞不同程度受损，细胞壁渗透性被破坏。因此，需要探讨微波分段变温干燥方法，以提高产品的品质。

资料显示，关于微波—热风薄层联合干燥、热风薄层干燥、真空干燥对竹笋干燥特性研究方面的论文却几乎没有。因而，有必要对其进行研究。

2.4 竹笋干燥的研究路线

依据相关资料，制定如下研究路线：



第3章 竹笋干燥前的准备

3.1 试验材料和设备

(1) 试验材料

试验用到的竹笋购自北碚农贸市场，竹笋品种为毛竹笋中的楠竹，选购时选用新鲜（当天早晨采摘的）、大小适中、笋质较嫩的竹笋。

(2) 试验仪器和设备

DHS-250 恒温恒湿热试验箱 上海林频仪器设备有限公司

MKJ-J2 型箱式实验微波炉 青岛迈可威微波应用技术有限公司

BC-2 型薄层干燥试验台 长春吉大科学仪器设备有限公司

AL 电子天平 (METTLER LOLEDO 牌) 梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司

JD2000-2 型微机电子天平 沈阳龙腾电子有限公司

自行制作的以 8051 芯片为核心的测温装置

薄层干燥试验台自带的风速测量仪

(3) 试验地点

西南大学工程技术学院干燥中心

3.2 竹笋干燥试验参数的确定

相关研究资料表明，竹笋笋片取 5mm 时，干燥效果最好。同时考虑到复水和食用的方便性，试验中的竹笋均取 5mm 厚，宽度不大于 60mm，长度不大于 220mm 的切片。在试验的不同阶段，干燥竹笋的载重量也大有不同，比如在初始含水率的测定中取用了 250g 和 100g 两种载重量，分五次干燥试验测得；在传统杀青和微波杀青的试验中，每份均取 100g；在微波干燥试验中，每份均取 350g，然后取个别其他载重量的竹笋作对照试验；在热风薄层干燥、微波—热风薄层联合干燥、恒温恒湿箱干燥中取每份载重量为 200g 的竹笋等，如此设置竹笋质量，一方面便于不同干燥质量相互之间的比较；另一方面可以研究不同干燥质量对干燥过程的影响。

在试验因子的确定中，根据相关资料和经验，主要采用了如下因子：干燥时间，微波功率，热风风速，热风温度，恒温恒湿干燥温度等。

3.3 竹笋干燥评价标准的建立

根据相关资料^[52, 58, 62, 72~75]和初步试验结果，对于干燥而成的竹笋笋干，制定出以下评价标准：

表 3-1 竹笋笋干的评价标准

Tab. 3-1 The estimate standards of drying bamboo shoots

评价指标	感官评价	评分标准/分
色泽	心部乳白, 边缘浅黄, 与天然笋色相近	7~9
	心部黄白相间, 边缘黄色	4~6
	绝大部分为黄色, 部分偏深黄色或灰色	1~3
香味	笋香浓郁, 与天然笋香相近	7~9
	笋香清淡	4~6
	基本无笋香, 偶或有异味	1~3
外观	较平整, 有细小的皱褶	7~9
	不平整, 有较大的皱褶和卷曲	4~6
	很不平整, 皱褶和卷曲严重	1~3
质地	很松软, 海绵状气孔较多且均匀	7~9
	较松软, 海绵状气孔较少不均匀	4~6
	紧密, 无海绵状气孔或极少	1~3
复水比	$R_{\text{复}} > 4$	7~9
	$2 \leq R_{\text{复}} \leq 4$	4~6
	$R_{\text{复}} < 2$	1~3
总耗时/(min)	60min~90min	7~9
	90min~120min	4~6
	120min~150min	1~3
总功耗/(kw·h)	$W \leq 3.3 \times 10^4 \text{kJ}$	7~9
	$3.3 \times 10^4 \text{kJ} < W \leq 4.65 \times 10^4 \text{kJ}$	4~6
	$4.65 \times 10^4 \text{kJ} < W$	1~3

评价方法: 各种试验后的竹笋笋干品质和总耗时、总功耗的得分之和为综合评分, 且综合评分最高的为最优组合, 次高的为次优组合。

3.4 竹笋干燥的试验指标与测定方法

3.4.1 初始含水率的测定

3.4.1.1 初始含水率

物料中水分含量的百分比称为含水率^[76]。

含水率的表示方法有两种^[77]: 一种是湿基表示法, 一种是干基表示法。

湿基表示法, 是指以物料湿基质量为基准, 即把物料湿基质量 G 作为 100%, 湿基含水率是以物料湿基中的水分 (质量为 G_s) 在物料湿基中所占的质量百分数来表示:

$$M(\%) = \frac{G_s}{G} \times 100\% = \frac{G_s}{G_{\text{干}} + G_s} \times 100\% \quad (3-1)$$

式中： M —指物料湿基含水率(%)

干基表示法，是以物料湿基中绝干物质的质量 G_F 为基准，即把物料湿基中绝对干物质质量作为 100%，干基含水率即是以物料湿基中的水分（质量为 G_s ）与 G_F 之比的百分数来表示：

$$M_F(\%) = \frac{G_s}{G_F} \times 100\% \quad (3-2)$$

式中 M_F —指物料干基含水率(%)

式(3-1)和式(3-2)揭示了 G 、 G_F 、 M 、 M_F 四个量的相互关系，只要知道其中的三个量就可求出第四量。

物料的湿基含水率 M 与干基含水率 M_F 换算式为：

$$M_F(\%) = \frac{M}{100\% - M} \times 100\%$$

$$M(\%) = \frac{M_F}{100\% + M_F} \times 100\%$$

通常所说的物料含水率（水分），是指物料的湿基含水率。物料干基含水率（水分），常用在物料干燥理论计算中，因为物料中绝对干物质是不随物料中水分质量的变化而变化的，计算起来比较方便。但在使用物料的干基含水率时必须加符号注明。

3.4.1.2 初始含水率测定方法的选择

含水率的测定方法很多，归纳起来分为烘干减重法和电子仪器测定法两种^[78]。本试验采用工序相对简单而又有效的烘干减重法测定竹笋的初始含水率。

烘干减重法：恒温恒湿热试验箱测定法就属于烘干减重法。当恒温恒湿热试验箱接通电源后，箱内电热丝发出热能，通过传导和对流的传热方式，使箱内空气和物料的温度升高。箱内空气温度的升高，会降低箱内空气的相对湿度；物料温度的升高，则会使水分受热汽化而蒸发。因此，物料中的水分不断地向外扩散到箱内物料周围的热空气中，当湿度达到一定程度时，箱内外的空气进行对流互换，经过一定时间后，样品便被烘干。

3.4.2 干燥厚度的选择

在干燥中，并不是所有的物料都能接触到同一湿度同一温度的空气。蒸发水分需要热量，一定湿度和温度的空气接触到物料的最下层时，空气就要因蒸发水分释放热量而降温，同时也引起空气湿度的变化。空气越往上层移动，空气的温度就越低，湿度就越大。所以干燥的物料上层和下层的状态就不一致，但是如果堆积层的变化范围很小，降温 and 增湿的影响就可以忽略不计。在这种情况下，可认为在一定的堆积层内所有物料都能接触到同一湿度、同一温度的空气，称其为薄层干燥^[79]。如果物料堆积层厚度增加，热空气经过物料上下层时的湿度、温度就有较大的差别，这种干燥被称为厚层干燥。

本试验中，干燥方式采用的是薄层干燥。

3.4.3 安全含水率

水分含量是物料出售、贮藏及加工中要考虑的一个重要因素，干燥的目的就是将物料中

的水分降低到适合安全贮藏及加工的范围，物料在这个范围内时的干物质质量称之为安全干基。根据经验值，竹笋的安全干基为（湿基的）13%~16%左右^[62, 80]。

本试验中，安全干基取用13%~14%左右。

3.4.4 干燥能耗的计算

每干燥一个单位质量水分所消耗的能量(kJ/g)称为干燥能耗，其是评定干燥工艺优劣性的一个重要指标。

以微波额定输入功率与其在每次试验总加热时间的乘积作为微波干燥能耗；

以热风薄层额定输入功率与其在每次试验总加热时间的乘积作为热风薄层干燥能耗；

在微波—热风薄层联合干燥中，以微波额定输入功率与其在每次试验中干燥时间的乘积与薄层额定输入功率与其在每次试验中干燥时间的乘积之和作为微波—热风薄层联合干燥的干燥能耗。

3.4.5 干燥失水率的计算

各种干燥模式干燥失水率的计算步骤如下^[78]：

设有 G_1 kg 质量的竹笋，其含水率为 M_1 ，经过干燥后，这部分竹笋的质量为 G_2 kg，其含水率为 M_2 ，则

干燥前，竹笋中绝干物质的质量 $G_{\mp 1}$ ，为

$$G_{\mp 1} = G_1 \frac{100\% - M_1}{100\%} \quad (\text{kg})$$

干燥后，竹笋中绝干物质的质量 $G_{\mp 2}$ ，为

$$G_{\mp 2} = G_2 \frac{100\% - M_2}{100\%} \quad (\text{kg})$$

由于在干燥过程中，干物质的质量是不变的，即有 $G_{\mp 1} = G_{\mp 2} = G_{\mp}$ ，

所以有

$$G_1 \frac{100\% - M_1}{100\%} = G_2 \frac{100\% - M_2}{100\%} = G_{\mp} = \text{常数}$$

$$\text{或 } G_1 = G_2 \frac{100\% - M_2}{100\% - M_1} \quad (3-3)$$

$$G_2 = G_1 \frac{100\% - M_1}{100\% - M_2} \quad (3-4)$$

竹笋质量由 G_1 变为 G_2 ，含水率可由 M_1 变为 M_2 。所减轻的质量等于被汽化的水分量，用失水质量 $G_{s,失}$ 来表示。

$$G_{s,失} = G_1 - G_2 = G_{s1} - G_{s2} \quad (3-5)$$

将(3-3)、(3-4)式分别代入(3-5)式得：

$$G_{s,失} = G_2 \frac{M_1 - M_2}{100\% - M_1} \quad (\text{kg}) \quad (3-6)$$

$$G_{s失} = G_1 \frac{M_1 - M_2}{100\% - M_2} \quad (\text{kg}) \quad (3-7)$$

由(3-6)、(3-7)式可知,只要知道干燥前或干燥后的质量,并测得干燥前、后竹笋的水分,就可知道在该干燥过程中竹笋的失水量。竹笋在干燥过程中所失去的水分 $G_{s失}$ 占干燥前竹笋质量 G_1 的百分率,就是干燥的失水率:

$$M_{失} = \frac{G_{s失}}{G_1} \times 100\% = \frac{M_1 - M_2}{100\% - M_2} \times 100\% \quad (3-8)$$

3.4.6 干燥速率的计算

干燥速率有两种不同的定义^[77, 78]:

其一:干燥速率 \bar{v} 是指在单位时间内物料单位干燥面积上蒸发的水分量,用微分形式可表示如下:

$$\bar{v} = \frac{dG_s}{Fdt} = \frac{-G_F dM_t}{Fdt} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}) \quad (3-9)$$

式中 G_s —蒸发的水分量,即失水质量(kg)

F —干燥面积,即竹笋表面与环境空气接触的面积(m^2)

t —干燥消耗时间(h)

G_F —被干燥竹笋湿基中绝干物质的质量(kg)

M_t —干燥过程中竹笋含水率

上式中的负号表示竹笋含水率随干燥时间的增加而减少。

其二:干燥速率 \bar{v} 是指单位时间内竹笋含水率的变化,用微分形式可表示如下:

$$\bar{v} = \frac{-dM_t}{dt} \quad (\%/h) \quad (3-10)$$

上述两个干燥速率的定义虽然不同,但实质是一致的,都反映了干燥过程中竹笋水分的变化速率,只不过公式(3-9)反映了水分变化的绝对值,而公式(3-10)只反映了水分变化的相对值而已。本论文中绘制的干燥速度曲线采用后一个公式。

表示干燥速率与竹笋含水率、干燥时间之间关系的曲线称为干燥速率曲线;在干燥过程中,含水率 M 随干燥时间的变化而变化。含水率 M 与干燥时间 t 的关系曲线称干燥曲线。根据干燥曲线可找出干燥竹笋至某一含水率所消耗的时间。

3.4.7 失水效率的计算

失水效率是指在竹笋干燥的某一时刻,竹笋失水率在单位时间、某一功率内的值。其可以用来表示竹笋在某一干燥时刻,单位能耗下的失水速率。用公式可以表示如下:

$$\eta = \frac{M_{t失}}{P_i \times t}$$

式中, η —表示竹笋干燥 t 时刻的失水效率($\%/kW \cdot h$)

M_t —表示竹笋干燥 t 时刻的失水率 (%)

P_t —表示竹笋干燥的功率 (kW)

t —表示竹笋干燥时间 (h)

在竹笋微波干燥中, 通过失水效率的计算, 可以找出不同功率下干燥竹笋至出现褐变点时的失水效率最高的微波功率。

3.4.8 复水性的测定

复水性是指新鲜食品干制后重新吸回水分的程度, 可用复水比 ($R_{\text{复}}$)^[61] 或复水率 ($R_{\text{率}}$) 表示。

复水比就是复水后沥干质量 ($G_{\text{复}}$) 与干制样品质量 ($G_{\text{干}}$) 的比值, 即 $R_{\text{复}} = G_{\text{复}} / G_{\text{干}}$;

复水率就是复水后沥干质量 ($G_{\text{复}}$) 与干制样品质量 ($G_{\text{干}}$) 在湿基状态下的湿基质量 ($G_{\text{湿}}$) 的比值, 即 $R_{\text{率}} = G_{\text{复}} / G_{\text{湿}} \times 100\%$ 。

本试验中测定的方法是: 准确称取毛竹笋的安全干基样品 4g~5g, 记为 ($G_{\text{干}}$); 在常温 (试验中环境温度为 18℃~25℃) 下的水中浸泡 30h, 充分复水后, 取出沥干, 晾干表面水分后准确称重, 记为 ($G_{\text{复}}$)。以称取的安全干基的质量为基础, 根据其失水率的状况反向推出安全干基在湿基状态时的质量记为 ($G_{\text{湿}}$)。至此, 竹笋的复水性就可以根据以上两种方式分别表示出来了。

3.5 竹笋微波与传统杀青

3.5.1 试验设计

3.5.1.1 传统的竹笋杀青

竹笋杀青是指通过物理或化学的方式, 使得竹笋内与木质化相关的酶如苯丙氨酸解氨酶 (PAL)、过氧化物酶 (POD)、多酚氧化酶 (PPO) 的活性受到抑制, 或者使其失去活性, 从而减缓或阻止竹笋内部木质化、粗纤维化的过程。

传统竹笋产品, 如竹笋罐头、竹笋干物质、干制玉兰片等, 都经过杀青这一环节。传统杀青采用物理加热的方法, 主要有三种方式: 一是预煮杀青, 预煮的方式很多, 主要区别是指在沸水中煮的时间不同, 长则达几个小时, 短则仅有十几分钟, 一般而言大个的竹笋预煮时间长些, 小个的竹笋预煮时间短些, 此种方式最为常见; 二是热烫杀青, 指用 80℃~100℃ 的热水对竹笋或切片进行热烫, 根据竹笋大小或切片厚度的不同, 而使得杀青时间有所不同, 一般是几分钟到几十分钟; 三是热风杀青, 指用 50℃~80℃ 的热风对竹笋进行加热杀青, 杀青时间控制在 30s~120s 之间。在关于竹笋和其他果蔬干燥的论文中, 以上几种杀青方式均被应用过, 属于较为传统的杀青方式。但是通过以上几种杀青过程, 容易使竹笋内含有的可溶性糖、可溶性蛋白质、可溶性固形物、维生素 C 等有效物质大量损失。

3.5.1.2 竹笋微波杀青

根据微波的热特性与竹笋杀青的主要目的, 以及微波杀青在普洱茶干燥工艺中的应用情况的研究^[62], 有理由相信微波一样可以应用于竹笋的杀青过程中。根据微波干燥果蔬的经验可知, 微波干燥可以使得竹笋达到 50℃~90℃^[62] 左右的高温, 在普洱茶干燥中, 800W 的微

波炉，在 10s 内即使得普洱茶升温至 54℃，70s 即使得其升高至 84℃。基于以上的试验依据，对微波杀青试验方案设计如下：

表 3-2 竹笋微波杀青试验方案

Tab.3-2 Experiment project on microwave killing blue of bamboo shoots

因子	A 微波功率	B 铺层厚度	C 杀青时间	D 空列
试验号	1	2	3	4
1	1 (750W)	1 单层	1 (30s)	1
2	1	2 单层	2 (60s)	2
3	1	3 单层	3 (90s)	3
4	2 (900W)	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3 (1050W)	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3.5.1.3 竹笋传统杀青

传统的竹笋杀青以蒸煮杀青最为常见，续 3-2 表设计出传统杀青方案如下：

表 3-3 未杀青竹笋和传统竹笋杀青试验方案（续表 3-2）

Tab.3-3 Experiment project on without killing blue and traditional killing blue of bamboo shoots
(extending tab.3-2)

试验号	处理方式
10	未经处理的新鲜竹笋笋片
11	沸水中煮 0.5 小时的竹笋笋片
12	沸水中煮 1 小时的竹笋笋片
13	沸水中煮 2 小时的竹笋笋片

注：在数据处理时，把表 3-2 和表 3-3 放在一起分析

3.5.2 微波与传统杀青的对比试验

根据前面设计出的竹笋杀青方案，对竹笋进行杀青试验，记录试验刚刚结束后、杀青一天后和杀青三天后的竹笋状况，如表 3-4、3-5、3-6 中所示。

表 3-4 刚刚杀青过后各试验的结果

Tab.3-4 The results of bamboo shoots only killed blue

评价指标 试验号	颜色	外观和霉烂与否	风味和发酸与否	软硬度与脆性
1	颜色均匀与鲜竹笋 相似	与鲜竹笋相差不大, 无霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	硬,脆性一般
2	颜色均匀与鲜竹笋 相似	与鲜竹笋相差不大, 无霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	软度一般,脆性一般
3	颜色均匀与鲜竹笋 相似	与鲜竹笋相差不大, 无霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	较软、较脆
4	颜色均匀与鲜竹笋 相似	少量有小皱纹,无霉 烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	软、较脆
5	表皮略微发黄	少部分有小皱纹,无 霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	很软、较脆
6	颜色均匀与鲜竹笋 相似	与鲜竹笋相差不大, 无霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	软度一般,脆性一般
7	颜色均匀与鲜竹笋 相似	少部分收缩,无霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	很软、较脆
8	颜色均匀与鲜竹笋 相似	变化不大、无收缩, 无霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	软度一般,脆性一般
9	颜色均匀与鲜竹笋 相似	少量收缩,无霉烂	与鲜竹笋相似,没有 发酸	软、较脆
10	色泽均匀、白而微黄	平整,正常	与鲜竹笋相似,没有 发酸	硬,脆度一般
11	色泽均匀、呈黄色	平整,略皱	气味较淡	较软,脆度较差
12	色泽较均匀、呈黄色	平整、略皱	气味淡	软,脆度较差
13	色泽较均匀、呈黄色	平整、略皱	气味淡	软,脆度较差

第 3 章 竹笋干燥前的准备

表 3-5 杀青 1d 过后各试验的结果

Tab.3-5 The results of bamboo shoots killed blue after a day

评价指标 试验号	颜色	外观和霉烂与否	风味和发酸与否	软硬度与脆性
1	颜色变化不大,与鲜竹笋相似	外观平整,无霉烂	具有浓郁的笋香,无酸、霉味	较硬、脆性一般
2	颜色变化不大,有白点、条物产生	平整,无霉烂	具有浓郁的笋香,无酸、霉味	软度一般、较脆
3	表面大部分有白点、条,	平整,无霉烂	具有浓郁的笋香,无酸、霉味	较软、脆性一般
4	表面大部分发白	轻微褶皱,无霉烂	笋香较浓,无酸、霉味	较软、较脆
5	表面大部分发白,整体微黄	少部分褶皱,无霉烂	笋香较浓,无酸、霉味	较软、较脆
6	颜色变化不大,表面少部分发白	基本无褶皱,无霉烂	笋香浓郁、无霉酸味	较软、脆度一般
7	少量发白,大部分颜色变化不大	部分褶皱较重,几点霉褐变严重	笋香浓郁、无霉酸味	较软、较脆
8	大部分颜色较黄、少量发白	有褶皱,不明显,外骨节处霉点较多	笋香浓郁、无霉酸味	硬、较脆
9	大部分颜色无变化、少部分发白	边缘略微翘曲,少量霉点产生	笋香浓郁、无霉酸味	软度一般、较脆
10	颜色明显变黄、根部外骨节处有黄褐点产生	平整、变化不大	笋香浓郁、无霉酸味	较硬、较脆
11	大部分颜色呈深黄色、少量发白	平整、变化不大	笋香淡、无霉酸味	软、脆度一般
12	大部分颜色呈深黄色、少量发白	平整、变化不大	笋香淡、无霉酸味	软、脆度一般
13	颜色呈深黄色	平整、变化不大	笋香淡、无霉酸味	软、较脆

表 3-6 杀青 3d 过后各试验的结果

Tab.3-6 The results of bamboo shoots killed blue after three days

评价指标 试验号	颜色	外观和霉烂与否	风味和发酸与否	软硬度与脆性
1	发霉处发暗、其它色正常, 有少许霉点、少许细小红点	有少量黄水析出、笋片顶部三分之一发霉、其他有少许霉点 表层有较多黄水析出	无酸味、少许霉味	硬、较脆
2	发白、少许变暗、	出, 皱度一般、少许霉处	略有酸、霉味	较硬、脆性较差
3	发白基本无发暗有少许较大红点产生	略皱, 基本无霉点	酸味一般、部分有少许恶臭、有少许黄水析出	软度一般、脆性一般
4	发白、极个别笋芯处发暗	略皱、表层有少许水析出, 基本无霉点	基本无酸、霉味, 有较淡的笋香	较软、较脆
5	发白、少量变暗或有变暗趋势	略皱、表层有少许水析出、极少许红点	有略微的霉酸味	较软、较脆
6	发白、少许芯处发暗	笋片上半部发白、下半部发黄、部分略皱略翘, 有较多暗黑处较皱、表面发干, 略翘, 少许淡黄水析出, 有少量白霉菌	有一定的霉酸味	软度一般、较脆
7	发白、少许芯部发暗	翘, 少许淡黄水析出, 有少量白霉菌	略微霉酸味	软, 较脆
8	60%发黄、40%发白, 交界处发暗	较平整、表面有极少水析出, 无发霉	略微霉酸味	较软、脆性一般,
9	发白、有少许暗点	略皱翘、少许淡黄色水珠产生, 无发霉	酸味一般、基本无霉味	较软、脆性一般
10	发黄、色重, 15%发暗	略皱略翘, 无发霉	少许酸味、少许恶臭	较硬、较脆
11	深黄色、少部分暗灰色	略皱、表层有较多的白霉菌、有部分乳白色液体析出、手感粘	较浓的霉味、恶心	软、脆度较差
12	深黄色、少部分发暗	少量白霉菌、少许乳白色液体和水析出	略有霉味、少许恶臭, 粘度一般	软度一般、脆性较差
13	黄色, 少许深黄色	略翘, 基本无皱纹, 较多乳白色液体析出	霉味较为明显, 无酸味, 较粘, 基本无恶臭	软、脆性较差

3.5.3 对比试验结果分析

杀青的主要作用是使酶失活，阻止竹笋的木质化，并有一定的杀菌作用。由此定下其评价标准为：①颜色由劣及优的顺序为：呈暗灰色→呈深黄色→呈黄色→白而略黄；②外观由劣及优的顺序为：皱褶严重→大部分皱褶→少部分皱褶→少许皱褶→平整；③风味由劣及优的顺序为：大量恶臭→少量恶臭→浓重的霉味→少许霉味→笋香清淡或无→笋香浓郁；④软硬度由劣及优的顺序为：硬→较硬→软度一般→较软→软→很软；⑤脆性由劣及优的顺序为：脆性差→脆性较差→脆性一般→较脆→脆→很脆。

根据如上的评价标准，对以上三个表格中的杀青结果进行综合对比和分析，定性分析的结果是：微波杀青的总体效果比传统的蒸煮效果要好，并且当微波功率为 900W、杀青时间为 60s 时，杀青效果最好，即称其为最优组合。

3.6 统计软件

本研究中采用了：Excel 2003，DPS(Data Processing System) v2.00 普及版数据处理系统等软件对采集的数据进行分析处理。

第4章 试验方案的设计

4.1 鲜竹笋的处理工艺流程

挑选（从北碚菜市场选购大小相当、整体完好、无虫蛀等现象的新鲜竹笋）→去箨（去除竹笋外面的箨壳）→清洗（用清水清洗两到三遍）→沥干（用新毛巾轻轻擦去竹笋表面的水）→修整（去除损坏的部分，尤其是粘了泥土或有裂纹的刀口处，使其看上去美观）→切片（纵向中间一切为二，然后纵向切成5mm厚，长度不等的笋片）→开始做试验（剩余的部分竹笋要封装保存，防止水分散失，以免测得的数据不够准确）。

4.2 鲜竹笋初始含水率测定试验

采用烘干减重法测出其含水率，具体过程按照国家规定的“水果、蔬菜产品中干物质和水分含量的测定方法(GB 8858-1988)”进行。

测定方法：由于竹笋自身特殊的性质，不能一次性购买过多的鲜笋贮藏待用。所以每次只购得适量的鲜竹笋，然后做相应的试验。而竹笋初始含水率的测定也因此分了两两次进行，每次取两到三份鲜竹笋切片进行测定试验，算出每份的含水率，最后取其均值。

第一次试验具体做法如下：称取100g和250g的鲜竹笋切片，分别标记为 S_1 、 S_2 放在两个恒温恒湿热试验箱专用托盘上，然后放入45℃的恒温恒湿热试验箱进行初始含水率的测定试验，烘0.5个小时，取出放在干燥的箱内冷却到室温（约10~20分钟）称重。重复烘干，取出冷却后称重，前后两次之差不超过0.002g为准。失水过程见附录（附表2），记下质量并根据失水量计算初始含水率：

$$S_1 \text{ 份竹笋的含水率 (\%): } M_1(\%) = \frac{G - G_F}{G} \times 100\% = \frac{100 - 8.56}{100} \times 100\% = 91.44\%$$

$$S_2 \text{ 份竹笋的含水率 (\%): } M_2(\%) = \frac{G - G_F}{G} \times 100\% = \frac{250 - 20.27}{250} \times 100\% = 91.89\%$$

第二次试验具体做法如下：称取三份100g的鲜竹笋切片，分别标记为 S_3 、 S_4 、 S_5 放在三个恒温恒湿热试验箱专用托盘上，然后放入70℃的恒温恒湿热试验箱进行初始含水率的测定试验，前两个小时连续干燥，取出放在干燥的箱内冷却到室温（约20分钟）称重。重复烘干中，与第一次干燥过程相同，失水过程见附录（附表3）。初始含水率计算如下：

$$S_3 \text{ 份竹笋的含水率 (\%): } M_3(\%) = \frac{G - G_F}{G} \times 100\% = \frac{100 - 8.04}{100} \times 100\% = 91.96\%$$

$$S_4 \text{ 份竹笋的含水率 (\%): } M_4(\%) = \frac{G - G_F}{G} \times 100\% = \frac{100 - 8.14}{100} \times 100\% = 91.86\%$$

$$S_5 \text{ 份竹笋的含水率 (\%): } M_5(\%) = \frac{G - G_F}{G} \times 100\% = \frac{100 - 8.31}{100} \times 100\% = 91.69\%$$

综上所述可以得出竹笋的含水率（%）：

$$M(\%) = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5}{5} = 91.77\%$$

4.3 竹笋微波干燥试验方案的设计

4.3.1 微波干燥特性的研究

在本试验中, 不考虑微波干燥竹笋过程中其品质的变化状况, 仅从微波干燥竹笋至安全干基重量时, 竹笋微波干燥的失水特性以及微波干燥中竹笋表面温度变化状况考虑。取用每份 260g 的竹笋切片, 分别在 350W、750W 两个常规干燥功率下进行试验。

4.3.2 微波分段变温干燥试验方案

根据相关资料、正交试验的特性和初步试验结果, 设计出竹笋分段变温干燥的正交试验方案如表 4-1 所示:

表 4-1 竹笋分段变温干燥的试验方案

Tab.4-1 The experiment project of segmented and inconstant temperature of drying bamboo shoots

试验因子	A 第一阶段微波功率	B 第二阶段微波功率	C 第三阶段微波功率	D 第一阶段湿基含水率降低率	E 第二阶段湿基含水率降低率
序号	1	2	3	4	5
1	1 (500W)	1 (350W)	1 (100W)	1 (35%)	1 (25%)
2	1	2 (450W)	2 (200W)	2 (40%)	2 (30%)
3	1	3 (550W)	3 (300W)	3 (45%)	3 (35%)
4	1	4 (650W)	4 (400W)	4 (50%)	4 (40%)
5	2 (600W)	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3 (700W)	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4 (800W)	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

4.3.3 微波干燥褐变时间的测定

试验中, 取每份质量为 350g 的鲜竹笋切片, 分别在 750W、650W、550W、450W、350W、250W、150W 的微波功率下进行干燥试验, 直至其出现褐变点时停止干燥, 记下其出现褐变

点的时间及其失水量。最后用两条曲线对其进行拟合,即可获得不同微波功率干燥竹笋出现褐变点时的时间拟合曲线和失水拟合曲线。从而更明确地表示出干燥 350g 鲜竹笋时,出现褐变点的时间和失水量与微波功率之间的关系。

4.4 竹笋热风薄层干燥试验方案的设计

根据相关资料、正交试验设计的方法和初步试验结果,设计出竹笋热风薄层干燥的试验方案如表 4-2 所示:

表 4-2 竹笋热风薄层干燥试验方案

Tab.4-2 The experiment project of drying bamboo shoots by hot-air thin-layer

因子 试验号	A 空列 1	B 风速 2	C 空列 3	D 风温 4
1	1	1 (3.75m/s)	1	1 (65℃)
2	1	2 (3.05m/s)	2	2 (55℃)
3	1	3 (1.58m/s)	3	3 (45℃)
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

在竹笋热风薄层干燥中,由于干燥室内的湿度无法控制,竹笋切片均取 5mm 厚,因此此处干燥过程中仅有两个因子,相当于正交全试验干燥。

为了测定热风薄层干燥在一定风速,不同风温和一定风温、不同风速下,风温和风速与干燥竹笋至安全干基所耗时间的关系,设计出如表 4-3、4-4 所示的试验方案。

表 4-3 在 3.75m/s 风速、不同风温下,竹笋热风薄层干燥试验方案

Tab.4-3 The experiment project of drying bamboo shoots by hot-air thin-layer with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

因子 试验号	A 风速 1	B 风温 2
1	1 (3.75m/s)	1 (85℃)
2	1	2 (75℃)
3	1	3 (65℃)
4	1	4 (55℃)
5	1	5 (45℃)
6	1	6 (35℃)

在竹笋薄层干燥试验中,此试验方案的目的在于得出:在同一风速的情况下不同风温的竹笋干燥消耗时间的拟合曲线。

表 4-4 在 65℃ 风温、不同风速下, 竹笋热风薄层干燥试验方案

Tab.4-4 The experiment project of drying bamboo shoots by hot-air thin-layer with 65℃ wind temperature and different wind speeds

因子	A 风温	B 风速
试验号	1	2
1	1 (65℃)	1 (3.75m/s)
2	1	2 (3.43m/s)
3	1	3 (3.05m/s)
4	1	4 (2.25m/s)
5	1	5 (1.58m/s)
6	1	6 (0.78m/s)

在竹笋薄层干燥试验中, 此试验方案的目的在于得出: 在同一风温的情况下不同风速的竹笋干燥消耗时间的曲线。

以上两种曲线的绘制, 可为今后竹笋热风薄层干燥试验的研究提供干燥依据。

4.5 竹笋微波—热风薄层联合干燥试验方案的设计

竹笋微波—热风薄层联合干燥试验是在前面几组干燥试验的基础上设计的, 因为微波干燥特性和热风薄层干燥特性在前面的试验结果中会有所体现, 此联合干燥就不再做失水特性等方面的分析, 旨在寻找出联合干燥中的最优组合, 为实际生产和今后的研究提供参考。故利用正交设计的方法出如表 4-5 所示的实验方案。

表 4-5 竹笋微波—热风薄层干燥试验方案

Tab.4-5 The experiment project of drying bamboo shoots by microwave-hot-air thin-layer combined drying

因子	A 微波干燥状况	B 风速	C 空列	D 风温
试验号	1	2	3	4
1	1(750W、干燥 2min 后)	1 (3.75m/s)	1	1 (65℃)
2	1	2 (3.05m/s)	2	2 (55℃)
3	1	3 (1.58m/s)	3	3 (45℃)
4	2(500W、干燥 4min 后)	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3 (250W、干燥 20min 后)	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

第5章 试验结果与分析

5.1 竹笋干燥特性的研究

5.1.1 恒温干燥特性的研究

5.1.1.1 失水特性的分析

图 5-1 是 100g 竹笋在恒温恒湿热试验箱 50℃条件下，失水率随干燥时间变化的曲线。试验条件为：鲜竹笋 100g，切片厚 5mm，铺层厚度一层为 5mm，干燥温度为 50℃。

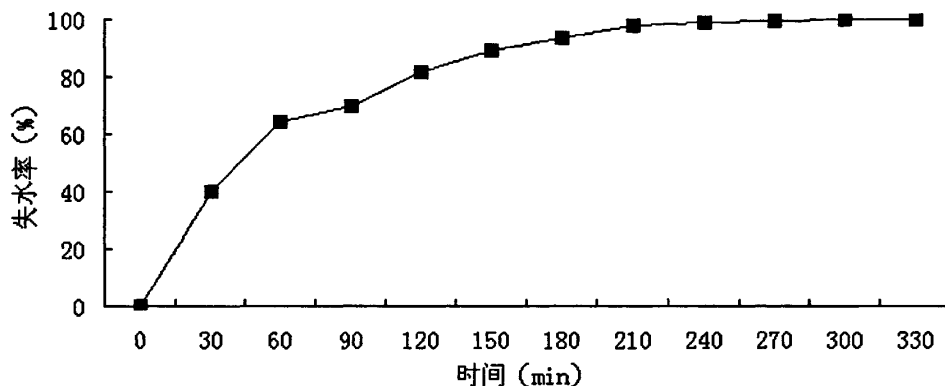


图 5-1 50℃恒温下，干燥 100g 竹笋的失水率曲线图

Fig.5-1 Water lose rate curve of drying 100g bamboo shoots by 50℃ constant temperature

试验中，整个干燥过程中前 60 分钟干燥失水率较高，而后 200 分钟干燥的失水率较低，这与恒温恒湿热试验箱的干燥特点有关。恒温箱内的热空气首先给竹笋表面和表层的水分加热，然后才把热量传递到内部。在这一过程中，由于表层和表面水分的蒸气压大于外界空气的大气压，加之表面和表层的水分很容易吸热蒸发，这就使得竹笋在开始的 60 分钟里，失水率比较高。当干燥进行到 60 分钟~70 分钟的时候，表面和表层的水分含量急剧减少，而内部的水分含量依旧比较高，内外产生了较大的水分梯度差，内部的水分向外扩散速度加快，但比起表层水分的蒸发仍然较慢，即属于内部扩散控制。所以竹笋切片内部的水分向外扩散的速度决定了干燥的速度，而扩散一直都比较慢，这就使得在干燥的过程中后 200 分钟里的失水率比较低。

恒温干燥箱是一种干燥缓慢、稳定、无污染的干燥设备，其干燥机理是靠电阻丝加热环境空气，使环境空气温度上升，室内空气压降低，造成物料表面水分与外界环境产生蒸气压差来蒸发水分的较缓慢的过程，虽然也存在与外界的空气交换，但风速很缓慢，主要目的只是为了排出箱内的湿蒸汽。在恒温干燥过程中，由于没有利用到恒湿的部分，干燥箱内的湿度是随着竹笋失水率的变化而变化的。随着干燥时间的增加，竹笋表面的褶皱越来越严重，而竹笋的颜色一直保持原有的色泽，笋香气味也较浓郁，等干燥至绝干物质时，笋片边缘有少量的卷曲现象。

从图中可以看出，100g 竹笋在 50℃下的恒温干燥曲线具有典型干燥曲线的普遍特征，干燥全过程可分为加速、恒速、降速 3 个阶段。从图中可以看出，加速阶段比较陡峭，恒速阶

段时间相对较短，而降速阶段显得过长。其原因一方面与恒温恒湿箱的干燥机理有关，另一方面与数据采集点的时间相隔太长，采集到的数据不够集中有关，干燥总耗时为 330 分钟。

图 5-2 是 250g 竹笋在恒温恒湿热试验箱 50℃ 条件下，失水率随干燥时间变化的曲线。试验条件为：鲜竹笋 250g，切片厚 5mm，铺层厚度为三层约 15mm，干燥温度为 50℃。

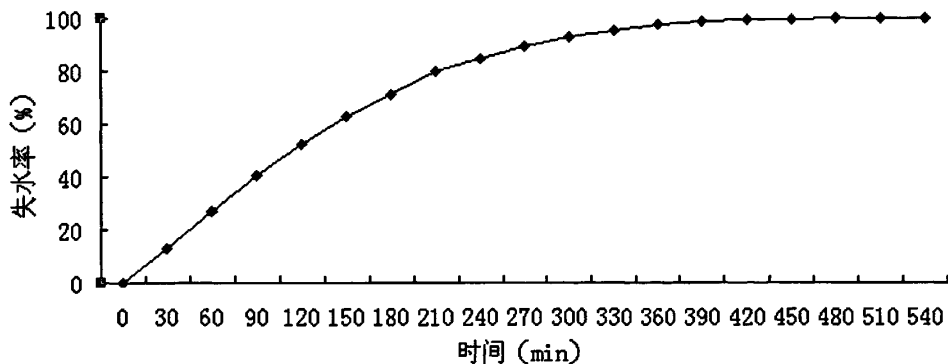


图 5-2 50℃ 恒温下，干燥 250g 竹笋的失水率曲线图

Fig.5-2 Water lose rate curve of drying 250g bamboo shoots by 50℃ constant temperature

试验中，整个干燥过程比及 100g 竹笋的干燥更为缓慢，前 200 分钟干燥失水率依然是非常高的，而后 300 分钟干燥的失水率却更低。一方面，由于物料质量增加到原来的 2.5 倍，在干燥过程中，同样的温度要加热比原来多 1.5 倍的物料，需要加热更长的时间、释放更多的能量才能使得竹笋表面和表层的水分得以蒸发，失水率自然就会变缓；另一方面，由于托盘的大小一定，而堆放的物料厚度却是原来的三倍左右，由恒温干燥加热的机理和水分扩散的机理不难得知，其干燥的时间一定会延长。

从图中可以看出，250g 竹笋的恒温干燥曲线具有典型干燥曲线的普遍特征，干燥全过程可分为加速、恒速、降速 3 个阶段。由图可知，加速阶段比 100g 竹笋干燥中要明显增加，恒速阶段的时间相对也较长，而降速阶段的时间比例相对下降，其原因一方面与恒温恒湿箱的干燥机理有关，另一方面与竹笋干燥的质量增加，速率减缓有关，干燥总耗时为 540 分钟。

图 5-3 是 100g 竹笋在恒温恒湿热试验箱 70℃ 条件下，失水率随干燥时间变化的曲线。试验条件为：鲜竹笋 100g，切片厚 5mm，铺层厚度为一层约 5mm，干燥温度为 70℃。

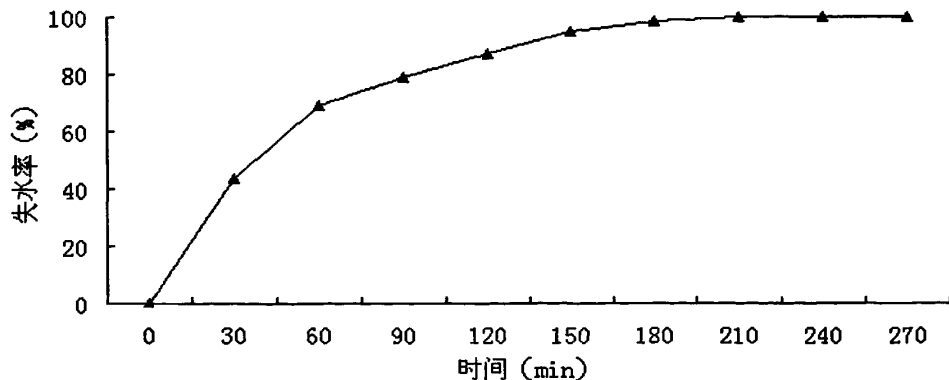


图 5-3 70℃恒温下, 干燥 100g 竹笋的失水率曲线图

Fig.5-3 Water lose rate curve of drying 100g bamboo shoots by 70℃ constant temperature

试验中, 整个干燥过程干燥强度比 50℃时要剧烈, 竹笋表面没有水珠析出。干燥曲线与 50℃、100g 条件下竹笋干燥的失水率曲线相似, 干燥前 60 分钟干燥失水率较高, 而后 200 分钟干燥的失水率较低。

从图中可以看出, 100g 竹笋在 70℃恒温下的干燥曲线具有典型干燥曲线的普遍特征, 干燥全过程可分为加速、恒速、降速 3 个阶段。由图可知, 加速阶段比 50℃干燥时更为陡峭, 并且非常不明显, 恒速阶段时间相对较短, 而降速阶段显得过长, 但比起 50℃干燥时要缩短一个小时左右。其原因一方面温度升高使得竹笋内部的水分向外扩散的速度加快; 另一方面温度升高使得环境温度升高, 竹笋表面的水分蒸汽压与环境的蒸汽压差扩大, 增加了扩散的速度, 干燥总耗时为 270 分钟。

图 5-4 竹笋在恒定温度, 不同物料重量的干燥条件下, 失水率随干燥时间变化的对比曲线图。试验条件为: 恒温恒湿热试验箱内部温度 50℃, 薄层平铺, 干燥竹笋的质量分别为: 100g, 250g

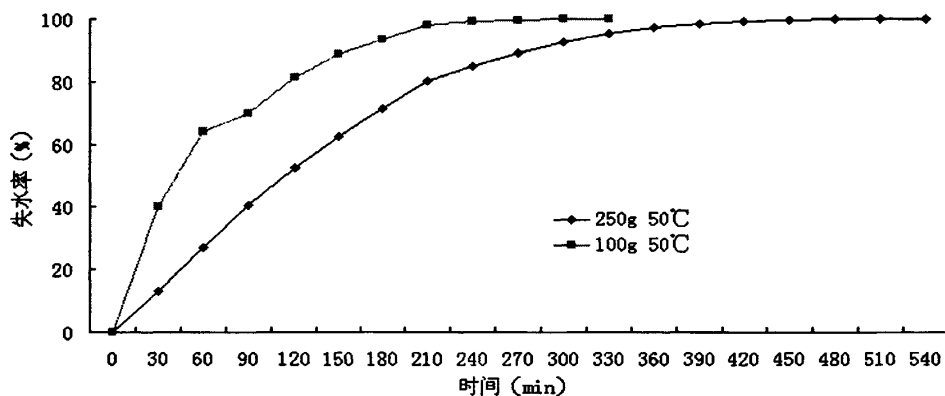


图 5-4 50℃恒温下, 100g 和 250g 竹笋的失水率对比曲线图

Fig.5-4 Comparison curves of water lose rate of drying 100g and 250g bamboo shoots by 50℃ constant temperature

从图中可以看出, 不同质量竹笋的恒温干燥曲线都具有干燥曲线的普遍特性: 随着干燥物料质量的增加, 失水率曲线的斜率变小, 形状愈来愈坡。表明恒温干燥中同一温度下, 随着物料质量的增加, 干燥速度下降, 干燥时间增加。

图 5-5 竹笋在不同温度, 相同物料重量的干燥条件下, 失水率随干燥时间变化的对比曲线图。试验条件为: 恒温恒湿热试验箱内部温度分别为 50℃和 70℃, 薄层平铺, 干燥竹笋的重量均为: 100g。

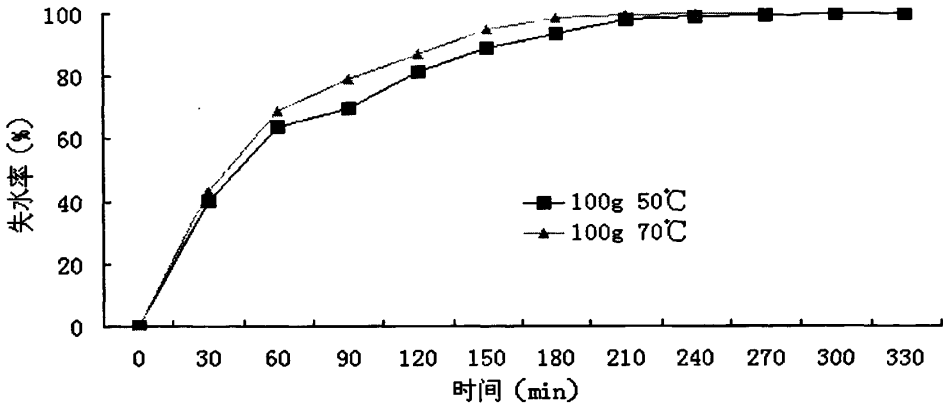


图 5-5 质量 100g 的竹笋, 在 70°C 和 50°C 恒温下的失水率对比曲线图

Fig.5-5 Comparison curves of water lose rate of drying 100g bamboo shoots by 50°C and 70°C constant temperatures

从图中可以看出, 同一质量的竹笋在不同温度下恒温干燥曲线都具有干燥曲线的普遍特性: 随着恒温干燥温度的增加, 失水率曲线的斜率变大, 形状愈来愈陡峭, 表明恒温干燥中同一质量的物料下, 随着干燥温度的增加, 干燥速度升高, 干燥时间减少。由图中不难看出, 100g 竹笋在 70°C 时干燥总耗时比 50°C 时缩短了 60 分钟。

5.1.1.2 恒温干燥的失水速率

图 5-6 是不同质量的竹笋在不同恒温条件下的失水速率随时间的变化曲线。

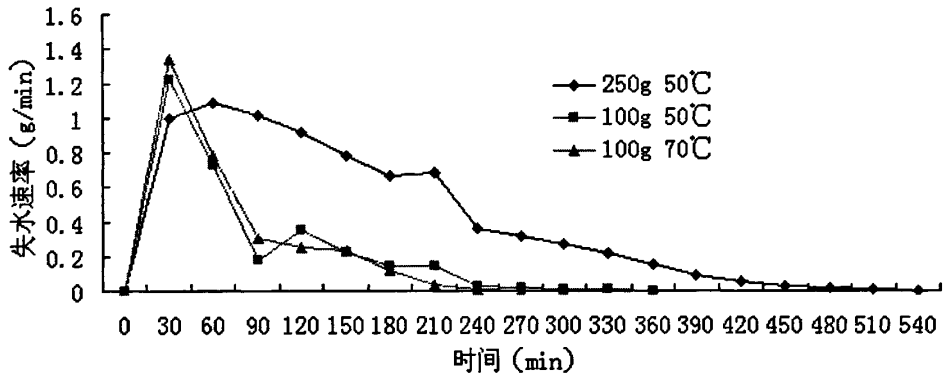


图 5-6 不同恒温温度, 不同竹笋质量的失水速率对比曲线图

Fig.5-6 Comparison curves of drying rate by different constant temperatures and masses of bamboo shoots

从图中可以看出, 同一恒定温度、不同竹笋质量下, 随着竹笋质量的增加, 干燥前 60 分钟~70 分钟的加速干燥阶段失水速率的斜率变小, 恒速干燥阶段的失水速率变小, 降速阶段的失水速率变大, 而干燥的时间明显增加。竹笋质量相同, 不同的恒温干燥温度下, 随着恒温干燥温度的增加, 干燥加速阶段的失水速率变大, 恒速阶段的失水速率变大, 降速阶段初始阶段的失水速率依然较高, 在 120 分钟以后降速阶段的失水速率变小, 干燥总时间明显减少。

由三条曲线图不难看出，干燥过程中，恒速干燥阶段与典型的干燥曲线相比不很明显。其原因：一是干燥过程中采集数据点的时间相隔太长，而竹笋本身干燥过程中恒速阶段就比较短暂，使得恒速阶段呈现得比较不明显；二是由于干燥的竹笋质量比较小，竹笋切片的厚度也比较薄，表层的水分蒸发比较快，内部的水分由里及表扩散的速度相对也比较快。

5.1.2 微波干燥特性的研究

5.1.2.1 失水特性的分析

图 5-7 是竹笋在微波炉中档功率条件下的失水率随干燥时间变化的曲线。试验条件为：竹笋 200g，切片厚度为 5mm，薄层平铺，微波功率为 750W。

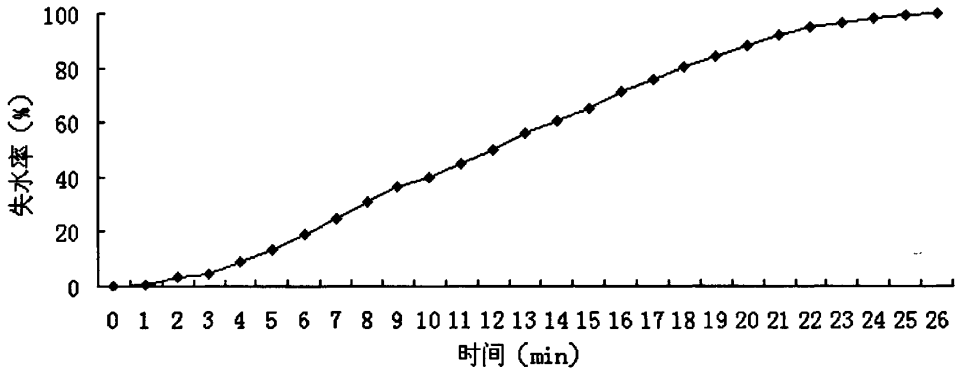


图 5-7 750W 功率下的失水率曲线图

Fig.5-7 Curve of water lose rate by 750W microwave power

试验中，整个干燥过程非常迅速，在干燥的初期，由于竹笋含水较多，吸收微波能的能力很强，干燥 1 分钟时，干燥箱内的水蒸气比较浓重，由于干燥箱内外的空气对流相对较弱，塑料盘底部有少量水珠出现，并且表层也出现水迹。干燥 6~7 分钟时，托盘底部的水分增加到最大，而室内的蒸汽也最为旺盛，此刻表层看不出水迹，表层的边缘有皱褶的趋势。干燥 9 分钟时，托盘里的竹笋开始出现糊褐斑，并随着时间的增加，糊褐斑的面积越来越大，色泽越来越深，直到后来部分竹笋直接碳化成黑色。整个干燥过程中托盘底部都有或多或少的水迹，竹笋内部产生一定数量的膨化气泡。

从图中可以看出：竹笋的微波干燥曲线具有典型干燥曲线的普遍特性，干燥全过程可分为加速、恒速、降速三个阶段。从图中可以看出，在 750W 试验条件下，竹笋整个失水过程 26min 左右，加速期约 3min，降速期约 3min，相对都比较短。与恒温干燥相比，微波干燥所用的时间大大缩短，从恒温干燥所需的几百分钟降到现在的几十分钟，且恒速干燥阶段的比重明显增加。

图 5-8 是竹笋在微波炉低档功率条件下的失水率随干燥时间变化的曲线。试验条件为：竹笋 200g，切片厚度为 5mm，薄层平铺，微波功率为 350W。

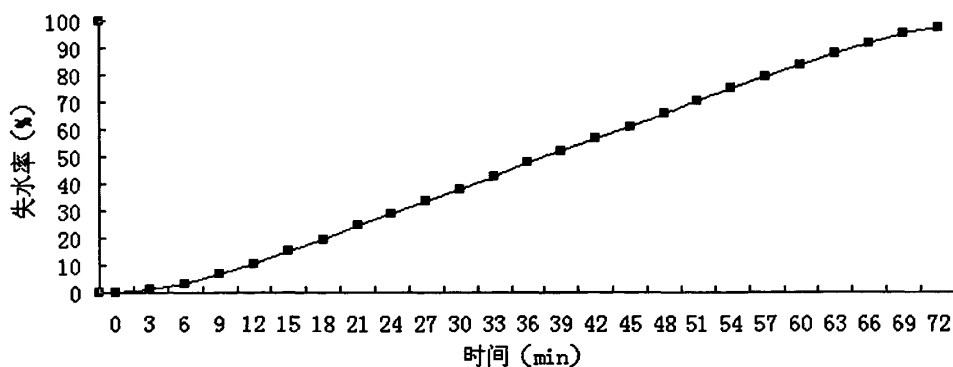


图 5-8 350W 功率下的失水率曲线图

Fig.5-8 Curve of water lose rate by 350W microwave power

试验中，整个干燥过程相对于 750W 时平和缓慢得多，相对于恒温干燥其干燥过程依然是相当迅速的，干燥 3 分钟时，由于干燥功率相对较低，干燥箱内的水蒸气比 750W 时稀薄，塑料盘底部依然有少量水珠出现，表层正常。干燥 12 分钟时，托盘底部的水分增加到最大，而空气的蒸汽也比较旺盛，此刻表层发干，表层及边缘有褶皱的趋势，并从此刻起托盘底部的水珠开始渐渐地减少。干燥 27 分钟时，托盘里的竹笋开始出现糊褐斑，并随着时间的增加，糊褐斑的面积越来越大，色泽越来越深。干燥 45 分钟时，托盘底部的水珠基本消失，竹笋部分褐变点开始出现明显的膨化现象。

从图中可以看出：竹笋的微波干燥曲线具有典型干燥曲线的普遍特性，干燥全过程可分为加速、恒速、降速三个阶段，从图中可以看出，在 350W 的试验条件下，竹笋整个失水过程 72min，加速期约 9min，降速期约 5min，相对都比较短。与 750W 功率的微波干燥相比，350W 的干燥时间增加，而与恒温干燥等干燥方式相比干燥时间大大缩短。

图 5-9 竹笋在恒定重量，不同干燥功率的干燥条件下，失水率随干燥时间变化的对比曲线。试验条件为：竹笋的重量为 200g，薄层平铺，微波功率分别为：750W，350W。

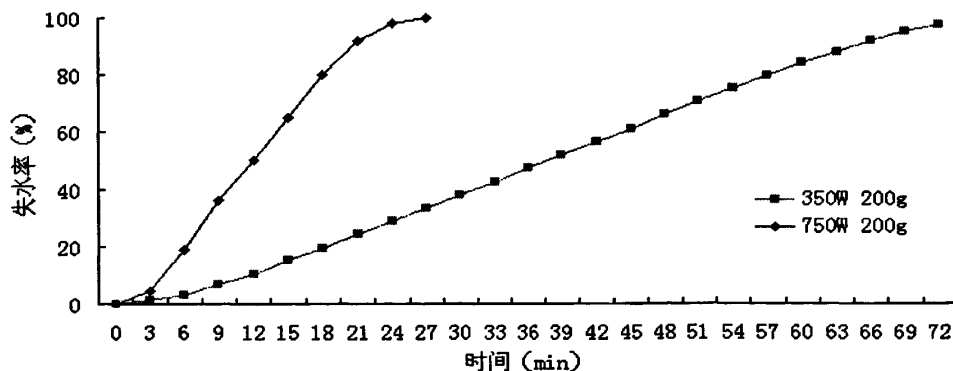


图 5-9 不同功率下的失水率对比曲线图

Fig.5-9 Curves of water lose rate by different microwave powers

从图中可看出，竹笋微波干燥曲线都具有典型干燥曲线的普遍特性：随着微波功率的升高，干燥曲线的斜率变大，形状越来越陡峭，表明随着微波功率或干燥温度的上升，干燥速

度增大，干燥时间缩短。

由图不难看出，微波功率越高则失水时间越短，750W 时的失水过程有 26min，而 350W 时却要 72 分钟。在干燥过程中，加速干燥阶段和降速干燥阶段的时间相对较短，而恒温干燥阶段时间比较长，可以推断出微波干燥主要是靠恒速阶段来完成物料的干燥。

图 5-10 为竹笋在 750W 微波功率下干燥失水率与表面温度曲线

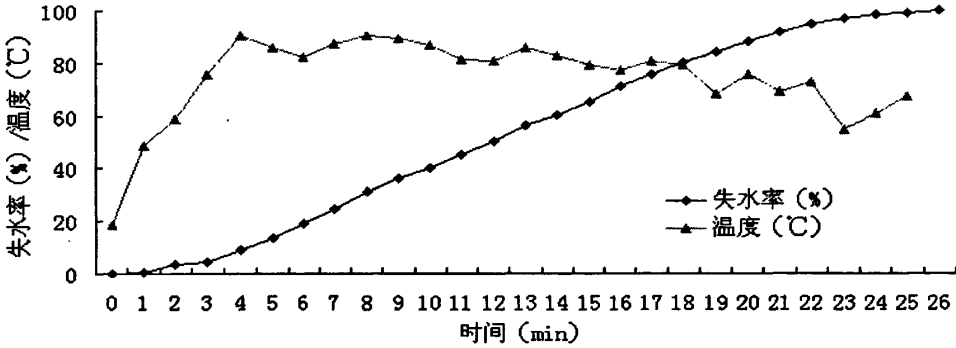


图 5-10 竹笋在 750W 的微波功率下干燥失水率与表面温度曲线图

Fig.5-10 Curves of water lose rate and surface temperature of bamboo shoots by 750W microwave power

由图可以看出，在 750W 微波干燥下，竹笋表面的温度在四分钟内上升到最大值 90℃ 以上，然后随着干燥时间和失水率的增加，在恒速干燥阶段保持着有波动但趋于恒定的温度，在降速干燥阶段，温度有所下降。微波干燥属于内部扩散控制干燥形式，加速干燥阶段和降速干燥阶段时间比较短，恒速干燥阶段比较长，这与干燥过程中竹笋表面温度上升速度比较快，恒温阶段比较长，降温阶段的时间比较短的趋势是一致的。

图 5-11 为竹笋在 350W 微波功率下干燥失水率与表面温度曲线

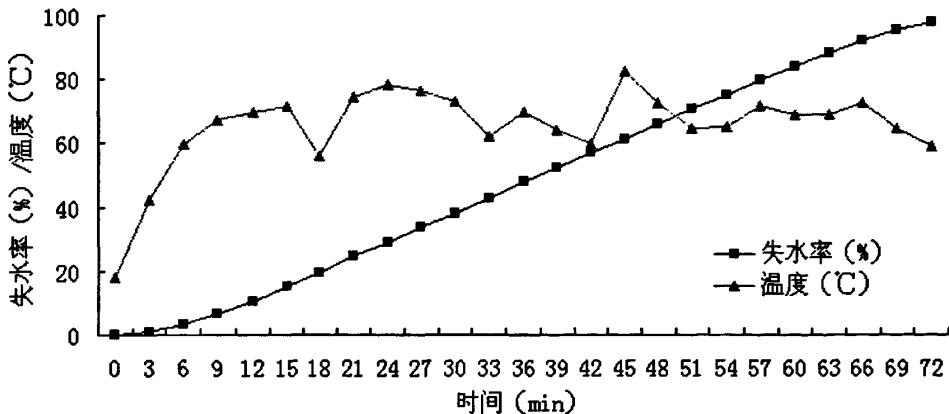


图 5-11 竹笋在 350W 微波功率下干燥失水率与表面温度曲线图

Fig.5-11 Curves of water lose rate and surface temperature of bamboo shoots by 350W microwave power

由图可以看出，与 750W 微波功率下的干燥相比，在 350W 微波功率干燥下，竹笋表面的温度上升比较缓慢，最高温度也比 750W 功率下低，温度曲线的趋势与 750W 时相似。

5.1.2.2 微波干燥的失水速率

图 5-12 是竹笋在不同微波功率条件下的失水速率随失水率的变化曲线。

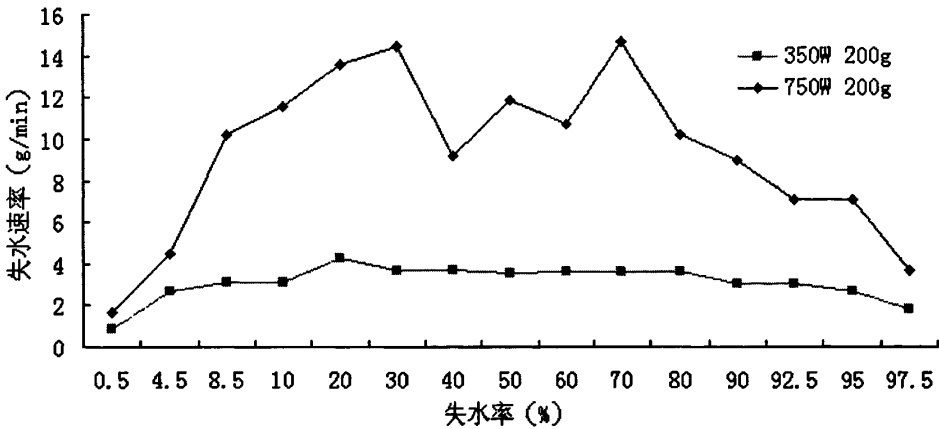


图 5-12 350W 和 750W 微波功率下的失水速率-失水率的对比曲线图

Fig.5-12 Comparison curves of drying rate-water lose rate by 350W and 750W microwave power

图中曲线表明，功率越高，失水速率越大。失水过程分为加速阶段、恒速阶段和降速阶段，但是加速阶段和降速阶段相对较短、恒速阶段相对较长。微波功率越低，除去前期和后期失水速率随失水率的增加而上升或下降外，中间阶段 80%~90%的失水率其失水速率趋于恒定。微波功率越高，其干燥过程越不稳定，其上升和下降阶段的失水率占总的失水比例越大；失水速率在上升阶段随失水率的增加而增加，下降阶段随失水率的增加而减少，很难保持在某一恒定值。原因在于：一方面是中高档功率下的微波飘逸频繁，功率比较不稳地；另一方面采集数据的点比较分散，采集数据的点相对较少，使得曲线趋势变化显得比较大。

5.2 竹笋微波干燥试验

5.2.1 干燥初期试验结果的分析

在微波干燥特性的试验中，当微波功率足够大时，微波干燥的高效性就能够得到充分的体现。随着微波功率的增加，微波干燥的迅速程度增加。微波在中档功率 750W 下干燥时，竹笋在较短的时间内就会出现褐斑，甚至碳化；微波在较低的功率 350W 下干燥时，虽然出现褐斑的时间会后延，出现褐斑时的失水率有所变化，但最终都在远没有达到安全干基重量之前就发生了褐变。同时，在干燥特性试验中，当竹笋被干燥至绝对干基的重量时，有大部分竹笋都发生了褐变，其中 20%~40%发生碳化，焦糊味刺鼻，而一小部分未发生褐变的竹笋颜色变化不大，用手挤压可以挤出少量的水分。试验结果表明，竹笋在 350W 以上的微波功率下进行变温干燥，最终都将损害竹笋的有效成分，使其发生褐变或碳化，大大降低了成品品质，这样的干燥研究也就没有多少实际的用途和意义。但试验结果也发现不同微波功率使竹笋发生褐变的时间点不同，失水重量也有所不同，而对这方面的研究应该是有意义的。因此，在否定微波三段式变温干燥竹笋的设想的同时，为了了解竹笋微波干燥是否真的可行，以及对竹笋微波干燥的其他特性进行一些更深入的研究，本研究进行了微波干燥竹笋拟合曲线的探索。

5.2.2 干燥功率与时间的关系

由于试验中所用到的微波炉是可调的(0W~1500W),但调试的精度不高,在微波炉工作时,常常发生微波功率的飘移。因此,仅选择几种相对稳定的功率进行试验。在以下的图形中,试验的结果原本是些孤立的点,根据微波干燥的规律和竹笋失水特性,绘图中把这些孤立的点用折线连接起来,这样可以大致推断出其余微波功率下对竹笋进行干燥时消耗时间的状况。

图5-13 同一重量的物料,在不同微波功率下干燥发生褐变的时间曲线。实验条件:每份350g竹笋,分别在150W、250W、350W、450W、550W、650W、750W的微波功率下进行干燥,记录各个功率下出现褐变的时间,画出时间-功率曲线图。

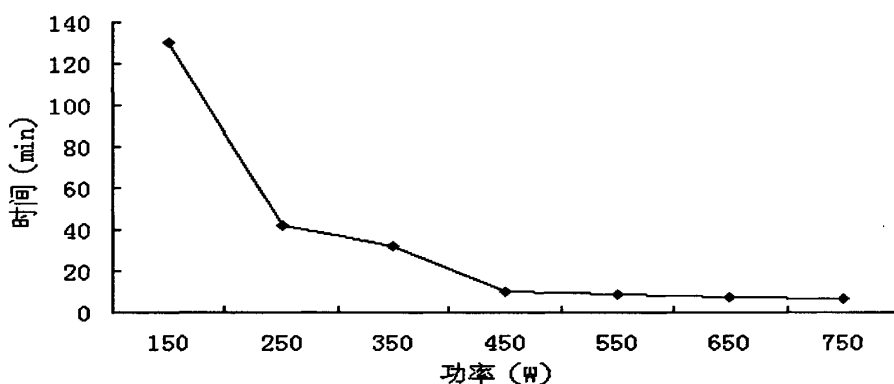


图5-13 不同微波功率干燥350g的竹笋,发生褐变的时间-功率曲线图

Fig.5-13 Curve of time-power of drying 350g bamboo shoots to brown by different microwave powers

由图不难看出,随着微波功率的增加,出现褐变的时间迅速减少。从曲线中可以看出,干燥时间分为三个阶段,第一个阶段是在250W及以下的微波干燥,微波干燥高效性的优势就会变弱,在干燥时间上与恒温干燥接近,而干燥的产品品质远比恒温干燥的品质差,所以不可取;第二个阶段在250W~450W之间的微波功率干燥时,其出现褐变的时间在十几到四十分钟之间,尚属于可以利用的微波功率范围;第三个阶段是在450W以后的微波功率干燥中,其出现褐变的时间相差不大,曲线看上去趋于平稳,也是可以加以利用的微波干燥功率。

由图5-13和试验数据可对曲线进行回归分析:

表5-1 微波干燥出现褐变点时的时间-功率方差分析表

Tab.5-1 Variance analysis of time-power on coming forth brown points by microwave drying

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	显著水平
回 归	11803.81	1	11803.8127	525.0734	0.000
剩 余	112.4016	5	22.4803		
总 和	11916.21	6	1986.0357		

可求得回归方程为: $y=2898994.7035x^{-1.9991}$

其中 y 为干燥时间(min), x 为微波功率(W)。

该模型的相关系数为 0.9953, 决定系数为 0.9906, 观察值曲线和拟合值曲线高度吻合。画出微波干燥出现褐变时的时间实测值曲线与拟合值曲线图如下:

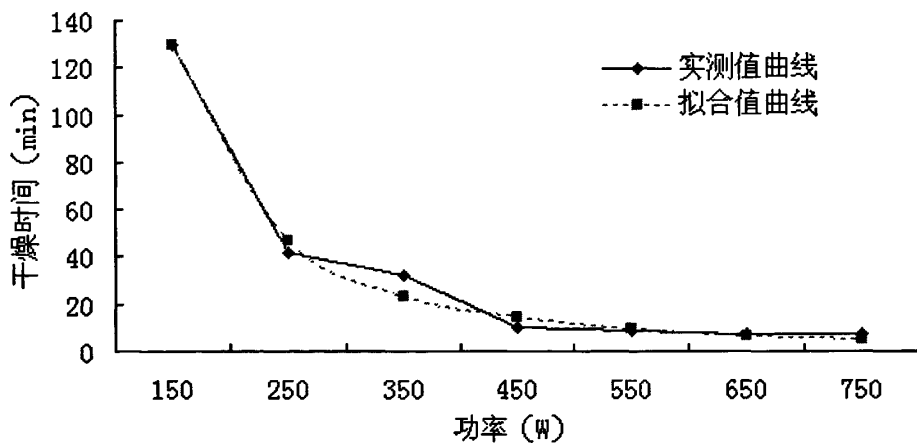


图 5-14 不同微波功率干燥 350g 竹笋至出现褐变时的时间实测值和拟合值的比较曲线图
Fig.5-14 Comparison curves of observational and fitted times of drying 350g bamboo shoots to brown by different microwave powers

图 5-15 为不同微波功率干燥 350g 竹笋, 发生褐变时的失水率-功率曲线。

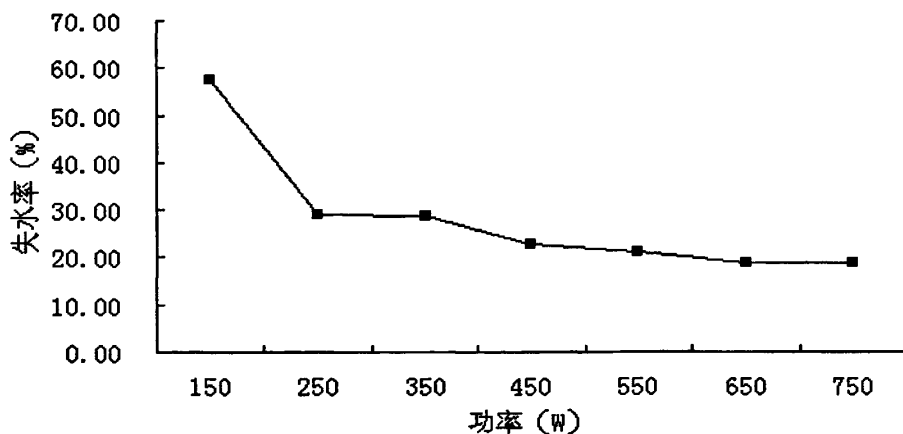


图 5-15 不同微波功率干燥 350g 竹笋, 发生褐变时的失水率-功率曲线图
Fig.5-15 Curve of water lose rate-power of drying 350g bamboo shoots to brown by different microwave powers

由图可知, 随着功率的增加, 出现褐变时的失水率不断的下降, 然而微波功率在大于 250 W 的情况下干燥时, 虽然出现褐变时的失水率依然呈下降趋势, 但明显变缓, 失水率相差不大。

图 5-16 为不同微波功率干燥下, 发生褐变时其失水率(%)、干燥时间(min)一功率曲线。

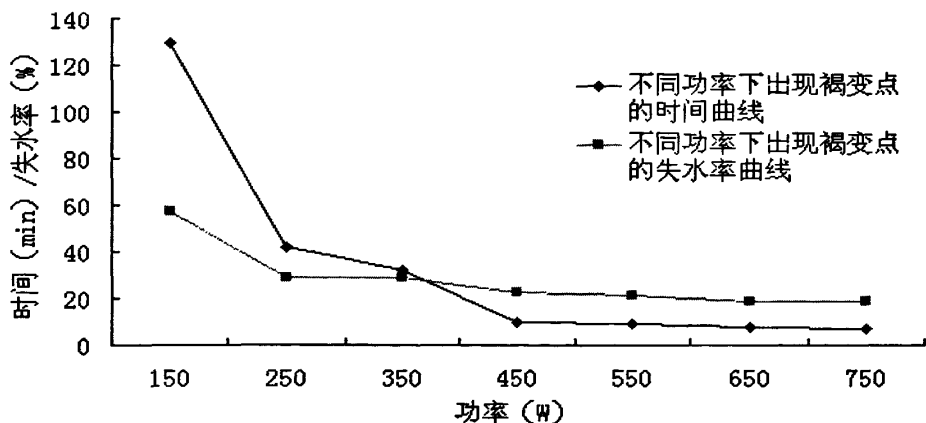


图 5-16 不同微波功率干燥 350g 竹笋, 发生褐变的时间、失水率-功率曲线图

Fig.5-16 Curves of time-power and water lose rate-power of drying 350g bamboo shoots to brown by different microwave powers

图中的两条曲线表明, 出现褐变时失水率和干燥时间都随功率的不断增加而下降, 它们的趋势是一致的, 只是干燥时间下降的速率比较快, 而失水率下降的速率相对慢些。

图 5-17 为不同功率干燥 350g 竹笋时, 单位功耗下的失水效率曲线

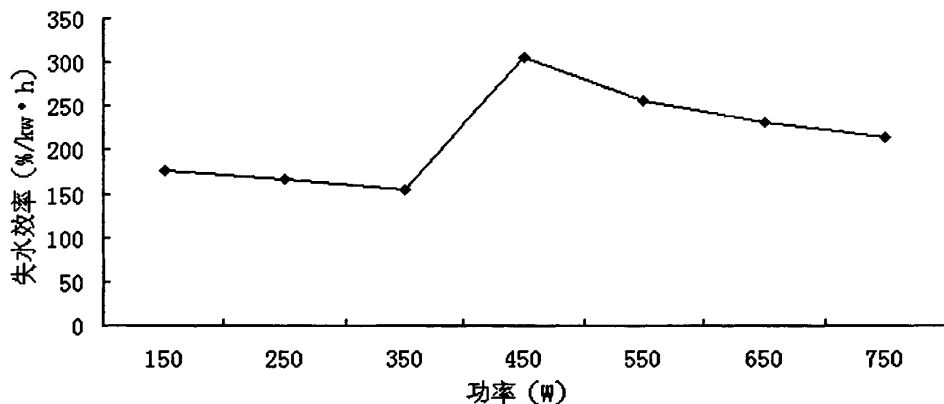


图 5-17 不同功率干燥 350g 竹笋时, 单位功耗下失水效率曲线图

Fig.5-17 Curve of water lose efficiency of drying 350g bamboo shoots per power dissipation by different microwave powers

由图可以看出, 失水效率随着微波功率的增加没有明确的上升或下降的趋势。图中微波在 150W~750W 之间的功率中, 竹笋出现褐变前失水效率最高的是 450W 左右的功率, 失水效率达到 300%/kw·h 左右。试验后, 又尝试用 750W 的微波功率对 150g 的竹笋进行干燥, 出现褐变的时间是第 3min~4min 之间, 比其干燥 350g 竹笋时出现褐变的时间缩短一半, 但是单位能耗的失水效率为 405%/kw·h 以上, 比对 350g 竹笋干燥时的 214%/kw·h 失水效率高出一倍。用 350W 的微波功率对 260g 的竹笋进行干燥, 出现褐变的时间为第 27min, 比对 350g 的竹笋进行干燥时短了 5min, 单位能耗的失水效率 195%/kw·h, 比对 350g 竹笋干燥时的 154%/kw·h 失水效率要高出百分之四十多。由此可以推断出, 同一功率下对不同质量的

竹笋干燥时，随着物料的减少，单位能耗干燥失水效率将会有所增加。由此可知，此曲线只对微波炉干燥质量为 350g 的竹笋时出现褐变点之前的单位能耗失水效率有参考价值。

5.3 竹笋热风薄层干燥试验

5.3.1 失水特性

图 5-18 为竹笋热风薄层干燥失水率随时间的变化曲线，其失水过程都呈现一致的趋势，都具有干燥曲线的典型特征。试验中，9 种试验干燥的目标都是使被干燥的竹笋达到安全干基即湿基质量的 13%~14% 左右。

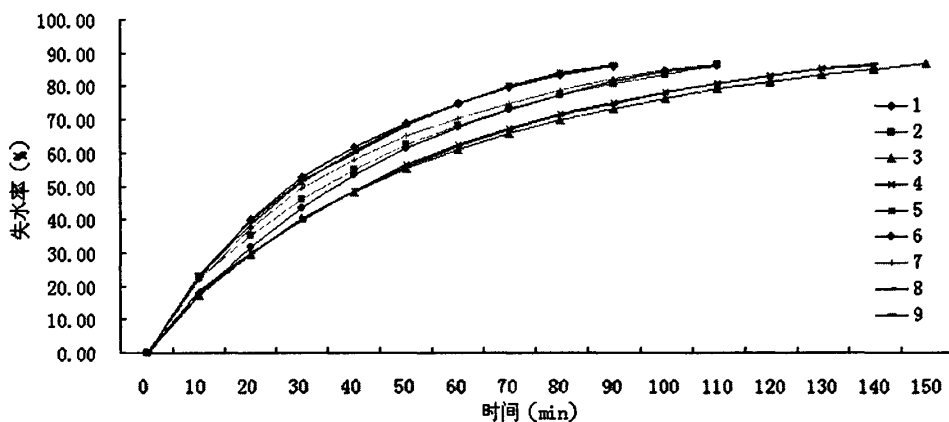


图 5-18 热风薄层干燥失水率随干燥时间的变化曲线

Fig.5-18 Variation curves of water lose rate-time by hot-air thin-layer drying

由图可以看出，9 条曲线可以明显地分为三组，最上面干燥时间最短和失水率最大的一组三条曲线分别是 1 号 (65℃, 3.75m/s)、5 号 (65℃, 3.05m/s)、9 号 (65℃, 1.58m/s) 干燥曲线；中间干燥时间和失水率居中的一组三条曲线分别是 2 号 (55℃, 3.75m/s)、6 号 (55℃, 3.05m/s)、7 号 (55℃, 1.58m/s) 干燥曲线；最下面干燥时间最长和失水率最小的一组三条曲线分别是 3 号 (45℃, 3.75m/s)、4 号 (45℃, 3.05m/s)、8 号 (45℃, 1.58m/s) 干燥曲线。由此可以推断出，同一风温、不同风速的干燥条件下，其失水率曲线非常接近，同一时刻的失水率相差不大，竹笋干燥至安全干基重量时的总耗时相差不大（除最下面一组三条曲线有少许的差别外），由此可以说热风薄层干燥的风速对物料干燥的影响比较小；不同风温、相同风速干燥条件下，同一时刻失水率随风温的升高而增加，竹笋干燥至安全干基重量时的总耗时随风温的升高而有较大幅度的减少。

整个干燥过程可分为加速、恒速和降速干燥三个阶段。由图不难看出，加速阶段的时间非常的短暂；降速阶段的时间相对要长些，尤其是 4 号试验、7 号试验和 8 号试验。而在整个干燥过程中，失水率最大的阶段是恒速干燥阶段。

5.3.2 失水速率

图 5-19 为热风薄层 9 种干燥试验的失水速率随失水率变化的曲线图。

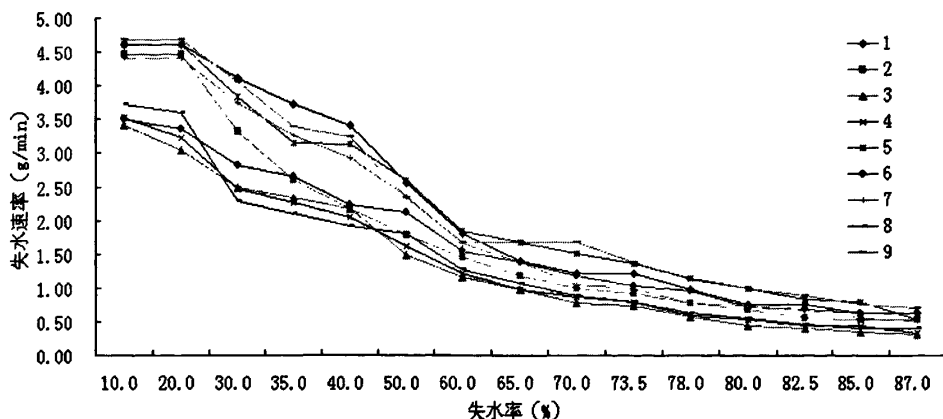


图 5-19 热风薄层 9 种干燥试验的失水速率随失水率的变化曲线

Fig.5-19 Variation curves of drying rate-water lose rate by 9 species of hot-air thin-layer drying trials

在进行热风薄层干燥试验中，每隔 10 分钟记录一次数据，结果发现 9 种试验干燥 10 分钟后的干燥失水率均在 10% 以上，故而图中略去了失水率在 10% 以前的失水速率变化曲线。物料干燥一般分为预热、恒速干燥和降速干燥三个阶段，也即是前面所说的加速干燥、恒速干燥和降速干燥三个阶段。有些物料预热阶段比较长，有些比较短，但预热阶段一般都是存在的，也就是说加速干燥阶段是存在的。由于采集数据相隔的时间较长，在图中未呈现出来。

由图可以看出，竹笋薄层干燥失水速率在 10%~87% 的失水率之间，前期较短暂的恒速率干燥过后，随失水率的增加而呈下降趋势。9 条曲线基本可分成三组，即最上面的干燥速率最快的一组三条曲线分别是 1 号 (65℃, 3.75m/s)、5 号 (65℃, 3.05m/s)、9 号 (65℃, 1.58m/s) 干燥曲线；中间干燥速率居中的一组三条曲线分别是 2 号 (55℃, 3.75m/s)、6 号 (55℃, 3.05m/s)、7 号 (55℃, 1.58m/s) 干燥曲线；最下面干燥速率最慢的一组三条曲线分别是 3 号 (45℃, 3.75m/s)、4 号 (45℃, 3.05m/s)、8 号 (45℃, 1.58m/s) 干燥曲线。其中第二组的三条曲线在失水率小于 50% 时不是很集中，可能与风温、风速不稳定有关，而其余两组相对则比较集中。

5.3.3 干燥时间与风温的关系

为测定在一定风速下热风薄层干燥竹笋至安全干基时干燥风温与时间的关系，设计出的试验方案如表 5-2 所示：

表 5-2 在 3.75m/s 的风速、不同风温下，竹笋干燥至安全干基时总耗时

Tab.5-2 Total time-consumings of drying bamboo shoots to safety dry basis by hot-air thin-layer with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

风温 (°C)	35	45	55	65	75	85
干燥时间 (min)	225	135	105	88	72	63

由表格中的信息可画出曲线图为：

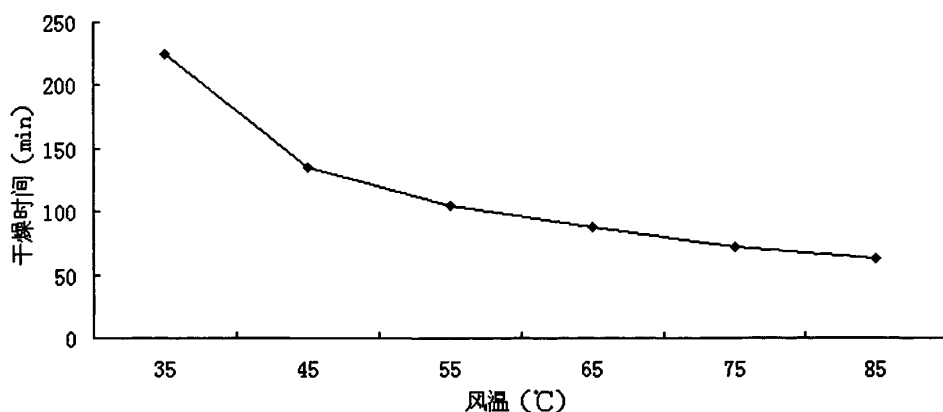


图 5-20 在 3.75m/s 的风速、不同风温下，竹笋干燥至安全干基总耗时曲线图

Fig.5-20 Total time-consuming curve of drying bamboo shoots to safety dry basis by hot-air thin-layer with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

由图可以看出，同一风速下，随着温度的升高，热风薄层干燥的时间呈明显的下降趋势。又由图 5-20 和试验数据对曲线进行回归分析：

表 5-3 在 3.75m/s 的风速、不同风温下，竹笋热风薄层干燥总耗时的方差分析表

Tab.5-3 Total time-consuming variance analysis of drying bamboo shoots to safety dry basis by hot-air thin-layer with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著水平
回 归	17844.6111	2	8922.3055	728.9013	0.00009
剩 余	36.7223	3	12.2408		
总 和	17881.3333	5	3576.2667		

可求得回归方程为： $y=30.6116\exp(61.6924/(x-4.0386))$

其中 y 为干燥时间 (min)， x 为热风薄层的风温 (°C)。

且该模型的相关系数为 0.9990，决定系数为 0.9979，观察值曲线和拟合值曲线高度吻合。画出竹笋热风薄层干燥总耗时的实测值与拟合值曲线图如下：

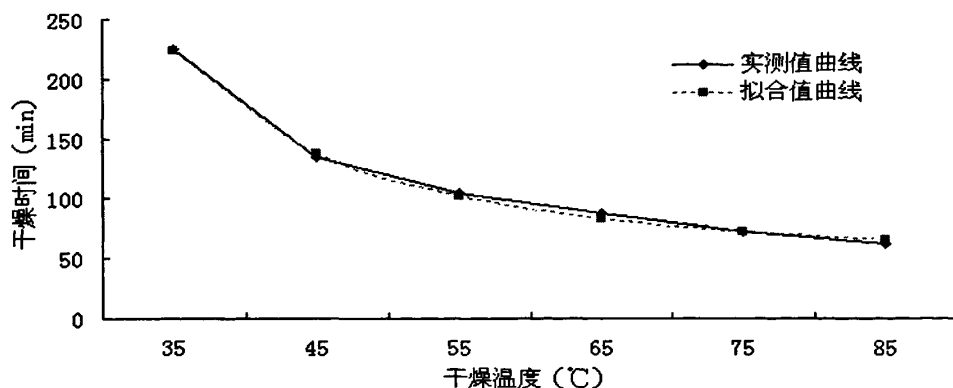


图 5-21 在 3.75m/s 的风速、不同温度下,竹笋干燥总耗时的实测值与拟合值对比曲线图
 Fig.5-21 Comparison curves of observational and fitted total time-consumings of drying bamboo shoots to safety dry basis by hot-air thin-layer with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

5.3.4 干燥时间与风速的关系

为测定在一定风温下热风薄层干燥竹笋至安全干基时干燥风速与时间的关系,设计出的试验方案如表 5-4 所示:

表 5-4 65℃风温、不同风速下干燥竹笋至安全干基消耗的时间

Tab.5-4 Total time-consuming of drying bamboo shoots to safety dry basis by hot-air thin-layer with 65℃ wind temperature and different wind speeds

风速 (m/s)	0.78	1.58	2.25	3.05	3.43	3.75
干燥时间 (min)	90	88	80	88	75	88

由表格中的信息可画出干燥时间—风速曲线图为:

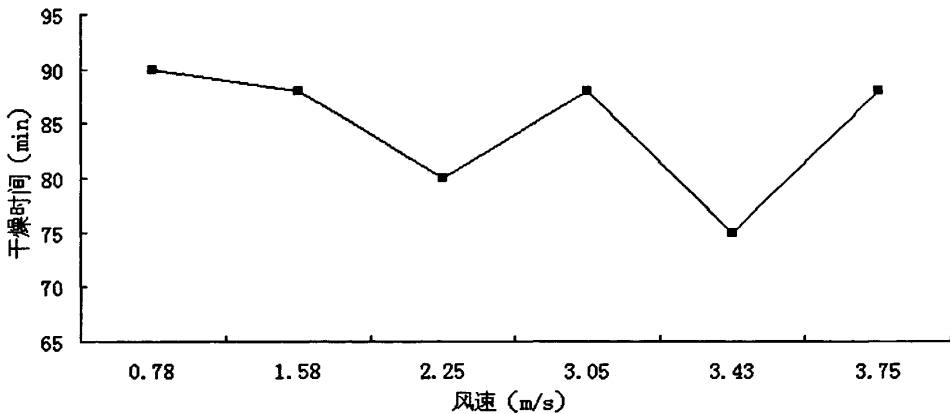


图 5-22 65℃风温、不同风速下干燥竹笋至安全干基所耗时间的曲线

Fig.5-22 Total time-consuming curve of drying bamboo shoots to safety dry basis by hot-air thin-layer with 65℃ wind temperature and different wind speeds

图中曲线不规则,可能的原因是 1.58m/s、2.25m/s 和 3.43m/s 的风速干燥时是连续干燥,干燥耗时少;而其他风速则是边干燥边测量数据,干燥耗时略大,从而使得曲线不规则。另外也说明风速对于竹笋热风薄层干燥总耗时的影响比较小。

5.3.5 干燥产品的复水比

图 5-23 为热风薄层干燥正交试验中各试验的复水比曲线图。

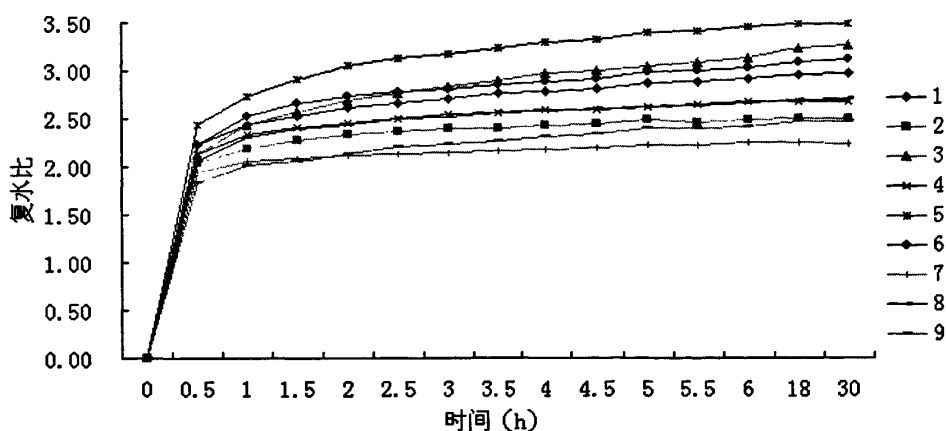


图 5-23 热风薄层干燥正交试验中各试验的复水比曲线

Fig.5-23 Rehydration ratio curves of 9 species of orthogonal experiments by hot-air thin-layer drying

由图中曲线可以看出，各试验的复水过程中，前半个小时的复水速率最快，复水比最高的可达到安全干基重量的 2.5 倍左右。在半个小时之后，复水速率变缓。复水 6 小时后，部分试验的复水速率曲线几乎水平，复水率增幅非常的小，即在后 24 小时的复水过程中，其复水比的增幅可以忽略不计。经过 30 个小时的复水过程后，图中的 9 种试验的复水比在 1.5~3.5 之间，复水比相对比较小。

5.3.6 数学模型的建立

5.3.6.1 竹笋热风薄层干燥的数学模型

目前用来描述物料薄层干燥的方程一般有三种数学模型^[83~86]。

$$\text{单项扩散模型: } MR = B \exp(-At) \quad (5-1)$$

$$\text{指数模型: } MR = \exp(-At) \quad (5-2)$$

$$\text{Page 方程: } MR = \exp(-Kt^N) \quad (5-3)$$

式中：t—干燥时间 (min)

MR—水分比

$$MR = \frac{(M_t - M_e)}{(M_0 - M_e)}$$

M_t —t 时刻竹笋的含水率 (干基)

M_0 —竹笋的原始水分 (干基)

M_e —竹笋的平衡含水率 (干基)

A、B、K、N—为待定系数

对式 (5-1)、(5-2)、(5-3) 三种模型进行线性化处理，得式 (5-4)、(5-5)、(5-6)：

$$\ln(MR) = \ln B - At \quad (5-4)$$

$$\ln(MR) = -At \tag{5-5}$$

$$\ln(-\ln(MR)) = \ln K + N\ln t \tag{5-6}$$

三种模型经线性处理后，由非线性关系转变为线性关系。热风薄层干燥竹笋满足何种干燥模型，必须对试验数据进行处理分析。因为热风薄层干燥竹笋的平衡含水率（干基） M_e 资料很少，试验获得难，因此把上述的水分比 MR 简化为： $MR = M_t / M_0$ 。安全干基含水率由式（3-2）可得：

$$M_t = \frac{(G_t - G_{\text{干}})}{G_{\text{干}}} \tag{5-7}$$

5.3.6.2 模型的选择

理论计算采用干基含水率。在水分比中 M_0 为干基初始含水率，试验中，竹笋样品的质量为 200g，测出湿基初始含水率为 91.77%，那么 $M_0 = 91.77 / 8.23 = 1115.07\%$ ，而任意时刻的 M_t 则可由公式（5-7）得：

$$M_t = \frac{(G_t - 16.46)}{16.46} \times 100\% \tag{5-8}$$

分别计算出在 3.75m/s 的风速、不同干燥温度下的水分比 MR ，再取对数，参看相对应的模型，整个过程采用 Excel 分析计算，图形也自动生成。

将试验数据分别在 $\ln(MR)$ 与 t 、 $\ln[-\ln(MR)]$ 与 $\ln t$ 坐标上绘出，得图 5-24 和图 5-25。比较图 5-24 和图 5-25， $\ln(MR) - t$ 曲线比 $\ln[-\ln(MR)] - \ln t$ 曲线更接近直线关系，且 $\ln(MR) - t$ 曲线优化后几乎为线性关系，所以继续对其因变量和水分比取对数后，做出的图形具有明显的对数函数特征。所以， $\ln(MR) - t$ 曲线能更好地描述竹笋热风薄层干燥问题。

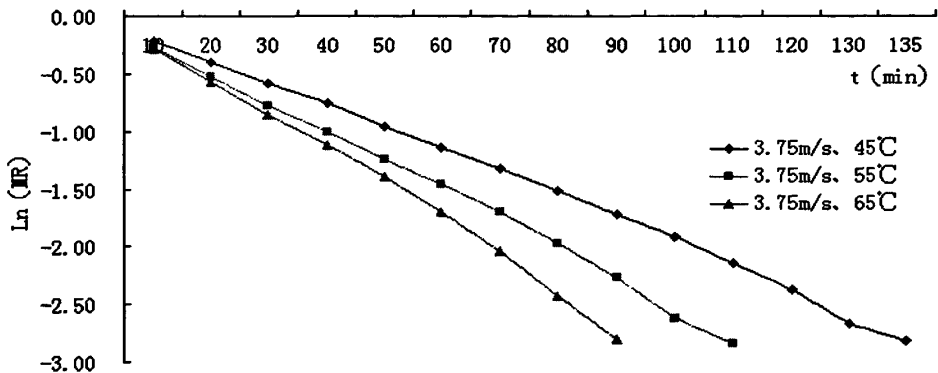


图 5-24 在 3.75m/s 的风速、不同风温下 $\ln(MR) - t$ 的曲线图

Fig.5-24 Curves of $\ln(MR)-t$ by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

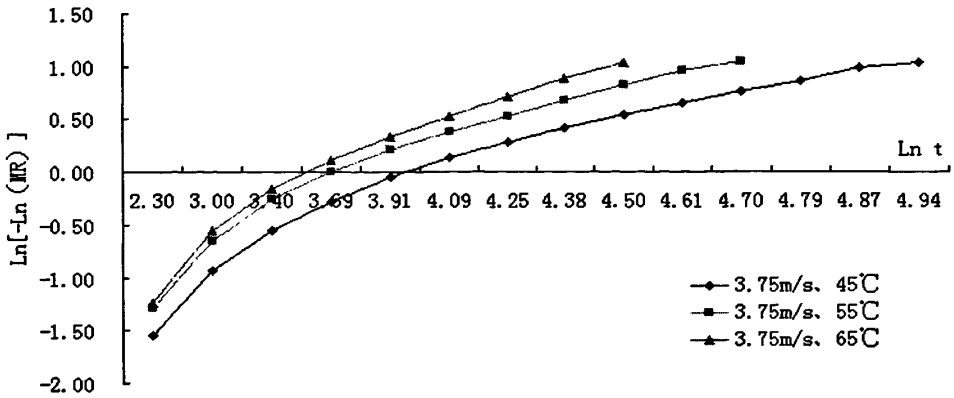


图 5-25 在 3.75m/s 的风速、不同风温下 $\text{Ln}[-\text{Ln}(\text{MR})]-\text{Ln } t$ 的曲线图

Fig.5-25 Curves of $\text{Ln}[-\text{Ln}(\text{MR})]-\text{Ln } t$ by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

图 5-26 与图 5-27 是根据 $\text{Ln}(\text{MR})-t$ 、 $\text{Ln}[-\text{Ln}(\text{MR})]-\text{Ln } t$ 的关系图添加趋势线后绘出的， $\text{Ln}(\text{MR})-t$ 上添加的线性趋势线，而在 $\text{Ln}[-\text{Ln}(\text{MR})]-\text{Ln } t$ 上添加的是对数趋势线，从图中可以看出，两个趋势线与实测线都非常接近。但因为 $\text{Ln}[-\text{Ln}(\text{MR})]-\text{Ln } t$ 是对数趋势线，故而不选择 Page 方程 $\text{MR} = \exp(-Kt^N)$ 作为竹笋热风薄层干燥的模型，从 $\text{Ln}(\text{MR})-t$ 的关系来看，指数模型和单项扩散模型都呈线性特征。从图和实验数据可知， $\text{Ln}(\text{MR})-t$ 曲线是不通过原点的，所以采用单项扩散模型 $\text{MR} = B \exp(-At)$ 作为竹笋热风薄层干燥模型更为合理。

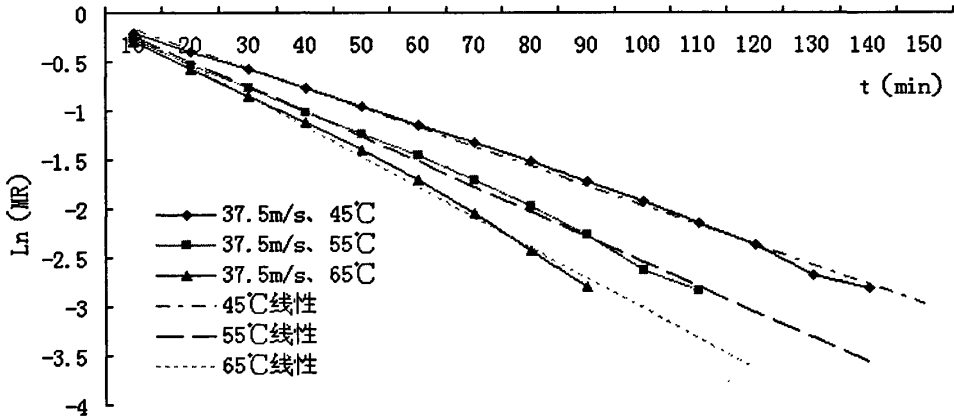


图 5-26 在 3.75m/s 的风速、不同风温下 $\text{Ln}(\text{MR})-t$ 的趋势曲线图

Fig.5-26 Trend curves of $\text{Ln}(\text{MR})-t$ by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

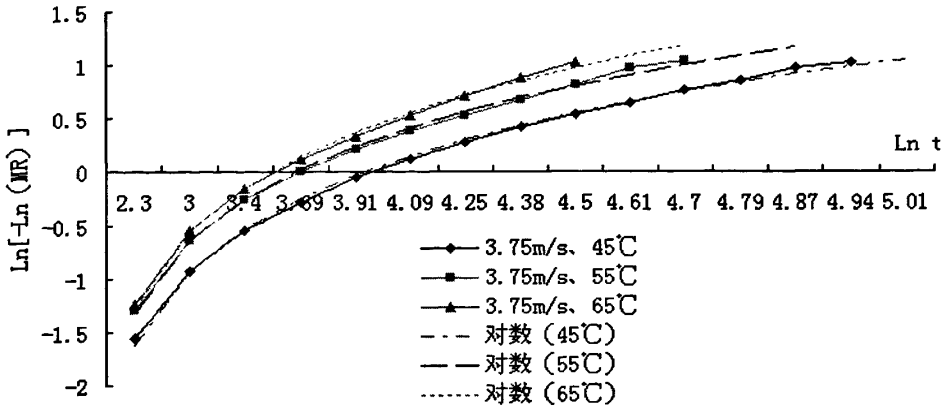


图 5-27 在 3.75m/s 的风速、不同风温下 $\text{Ln}[-\text{Ln}(\text{MR})]-\text{Ln} t$ 的趋势曲线

Fig.5-27 Trend curves of $\text{Ln}[-\text{Ln}(\text{MR})]-\text{Ln} t$ by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and different wind temperatures

5.3.6.3 线性回归

回归分析是考察竹笋的水分比与干燥时间之间关系的数学方程式的描述。

相关分析是考察竹笋的水分比与干燥时间之间关系的相关性程度。

通径分析是应用通径系数分析的方法，在回归分析与相关分析的基础上，进一步研究竹笋水分比与干燥时间之间的数量关系，并将相关系数分解为直接作用系数和间接作用系数，以揭示各因素对水分比的相对重要性。

决定系数是表示竹笋所有水分比对干燥时间的影响程度。如果决定系数显著，则说明通径分析成立；如果决定系数不显著，则说明通径分析无意义，决定系数等于相关系数的平方。

cook 距离(见附表 4~6)是衡量每一次观测值对拟合结果影响的大小，数值大的为强影响点^[87, 88]。

(1) 在风速 3.75m/s、风温 45℃干燥条件下的线性回归过程

把在风速 3.75m/s、风温 45℃干燥条件下的 $\text{Ln}(\text{MR})-t$ 的对应数据输入到 DPS 数据处理系统中，采用多元分析中的线性回归对其分析，结果如下：

表 5-5 在风速 3.75m/s、风温 45℃干燥条件下的线性回归系列表

Tab.5-5 Series of linear regression by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and 45℃

wind temperature						
变量	平均值	标准差	膨胀系数 VIF			
t	75	41.8330	1.0000			
Ln (MR)	-1.4657	0.8408				
方差分析						
方差来源	平方和	df	均方	F 值	显著水平	
回 归	9.16411	1	9.1641	4358.6173	0.0000	
剩 余	0.02523	12	0.0021			
总 和	9.18934	13	0.7069			
相关系数 R=0.998626 决定系数 R ² =0.997254						
变量	回归系数	标准系数	偏相关	标准误差	t 值	显著水平
Ln (B)	0.03956			0.02589	1.52831	0.1504
-A	-0.02007	-0.99863	-0.99863	0.0003	-66.0198	0.0000

通径系数分析:

作用因子 t 通过 t 以 -0.99863 的通径系数直接作用

则在 3.75m/s、45℃干燥条件下的 Ln (MR) -t 对应的线性关系应为:

$$\text{Ln} (MR) = \text{Ln} (B) -At \quad \text{——} \quad \text{Ln} (MR) = 0.03956 - 0.2007t$$

$$MR = B \exp (-At) \quad \text{——} \quad MR = 1.04035 \exp (-0.2007t)$$

相关系数高达 R=0.998626, 回归分析显著水平为 0, 说明回归方程非常显著。其中, 回归方程拟合检测表见附录 (附表 4)。

图 5-28 在风速 3.75m/s、风温 45℃干燥条件下回归方程实测值与拟合值的比较曲线图

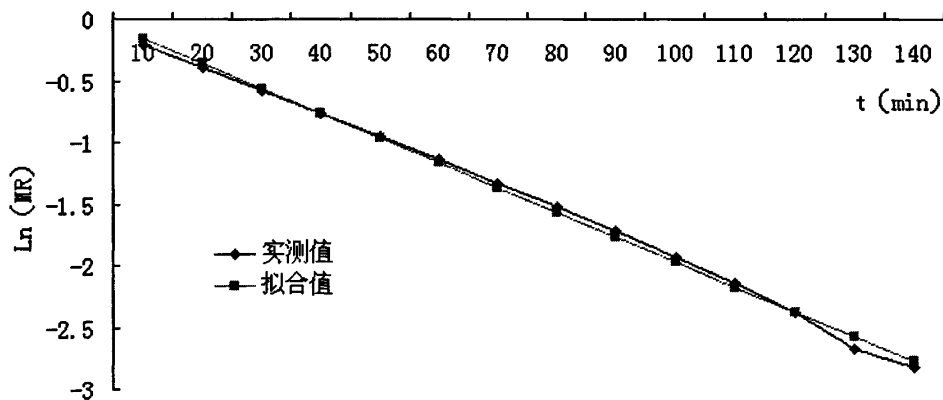


图 5-28 是在风速 3.75m/s、风温 45℃干燥条件下回归方程的实测值与拟合值对比曲线图

Fig.5-28 Comparison curves of observational and fitted values of regression equation by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and 45℃ wind temperature

由图中可以看出, 其拟合度很高。

(2) 在 3.75m/s、55℃干燥条件下的线性回归过程

把 3.75m/s、55℃ 下的 Ln (MR) -t 的对应数据输入到 DPS 数据处理系统中, 采用多元分析中的线性回归对其分析, 结果如下:

表 5-6 在风速 3.75m/s、风温 55℃ 干燥条件下的线性回归系列表

Tab.5-6 Series of linear regression by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and 55℃ wind temperature

变量	平均值	标准差	膨胀系数 VIF
t	60	33.16625	1.0000
Ln (MR)	-1.51727	0.84965	

方差分析					
方差来源	平方和	df	均方	F 值	显著水平
回 归	7.19361	1	7.19361	2547.9132	0.0000
剩 余	0.02541	9	0.00282		
总 和	7.21902	10	0.7219		

相关系数 R=0.998239 决定系数 R²=0.996480

变量	回归系数	标准系数	偏相关	标准误差	t 值	显著水平
Ln (B)	0.01709			0.03436	0.4974	0.62966
-A	-0.02557	-0.99824	-0.99824	0.00051	-50.4769	0

通径系数分析:

作用因子 t 通过 t 以 -0.99824 的通径系数直接作用

则在 3.75m/s、55℃ 干燥条件下的 Ln (MR) -t 对应的线性关系应为:

$$Ln (MR) = Ln (B) -At \quad \text{——} \quad Ln (MR) = 0.01709 - 0.2557t$$

$$MR = B \exp (-At) \quad \text{——} \quad MR = 1.01724 \exp (-0.2557t)$$

相关系数高达 R=0.998239, 回归分析显著水平为 0, 说明回归方程非常显著。其中回归方程拟合检验表见附录 (附表 5)。

图 5-29 在风速 3.75m/s、风温 55℃ 干燥条件下回归方程实测值与拟合值的比较曲线图

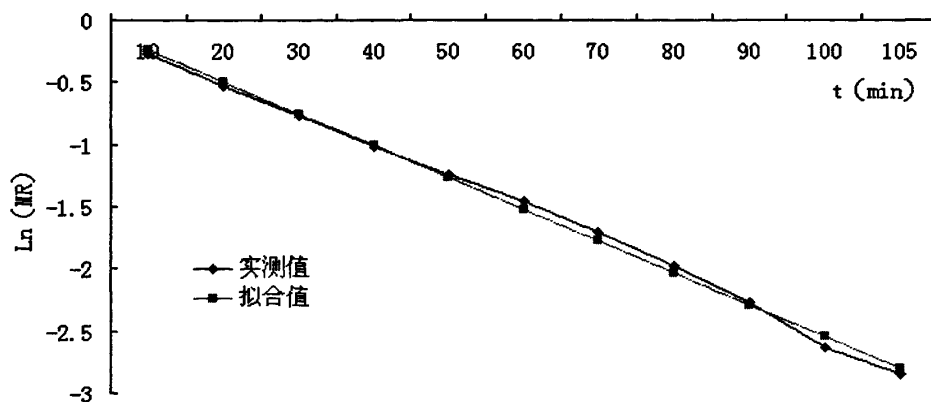


图 5-29 是在风速 3.75m/s、风温 55℃ 干燥条件下回归方程实测值与拟合值的对比曲线图

Fig.5-29 Comparison curves of observational and fitted values of regression equation by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and 55℃ wind temperature

由图中可以看出，拟合度很高。

(3) 在风速 3.75m/s、风温 65℃干燥条件下的线性回归过程

把在风速 3.75m/s、风温 65℃干燥条件下的 Ln (MR) -t 的对应数据输入到 DPS 数据处理系统中，采用多元分析中的线性回归对其分析，结果如下：

表 5-7 在 3.75m/s、65℃干燥条件下的热风薄层干燥线性回归系列表

Tab.5-7 Series of linear regression by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and 65℃ wind temperature

变量	平均值	标准差	膨胀系数 VIF		
t	50	27.38613	1.0000		
Ln (MR)	-1.46667	0.84938			

方差分析					
方差来源	平方和	df	均方	F 值	显著水平
回 归	5.74123	1	5.74123	1323.1536	0.0000
剩 余	0.03037	7	0.00434		
总 和	5.7716	8	0.72145		

相关系数 R=0.997365 决定系数 R²=0.994737

变量	回归系数	标准系数	偏相关	标准误差	t 值	显著水平
Ln (B)	0.08			0.04785	1.67173	0.13312
-A	-0.03093	-0.99737	-0.99737	0.00085	-36.3752	0

通径系数分析：

作用因子 t 通过 t 以-0.99737 的通径系数直接作用

则在 3.75m/s、65℃干燥条件下的 Ln (MR) -t 对应的线性关系应为：

$$Ln (MR) = Ln (B) -At \quad \text{——} \quad Ln (MR) = 0.08 - 0.03093t$$

$$MR = B \exp (-At) \quad \text{——} \quad MR = 1.08329 \exp (-0.03093t)$$

相关系数高达 R=0.997365，回归分析显著水平为 0，说明回归方程非常显著。其中回归方程拟合检验表见附录（附表 6）。

图 5-30 在风速 3.75m/s、风温 65℃干燥条件下回归方程实测值与拟合值的比较曲线图

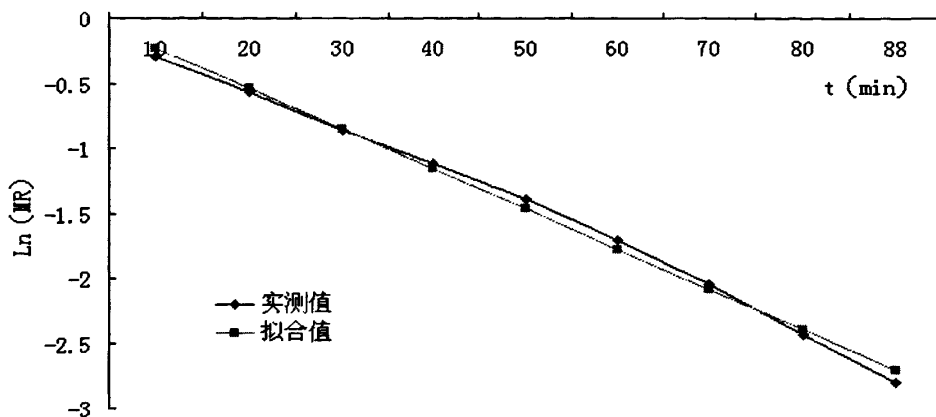


图 5-30 在风速 3.75m/s、风温 65℃干燥条件下回归方程实测值与拟合值的比较曲线图

Fig.5-30 Comparison curves of observational and fitted values of regression equation by hot-air thin-layer drying with 3.75m/s wind speed and 65℃ wind temperature

由图中可以看出，其拟合度很高。

5.3.6.4 综合方程的拟合

上述过程只是将在 3.75m/s 的风速、不同风温下的线性回归方程分别拟合出来了，下面将考虑热风薄层功率和装载量的影响，拟合竹笋热风薄层干燥的方程，以干燥时间和质功比为变量。

为简化参数，把热风薄层功率与装载量一起考虑，即用热风薄层功率与装载量的比值—质功比：即单位质量的竹笋平均分别消耗的功率(P)，以干燥时间和质功比作为其中的两个自变量，水分比作为因变量来拟合方程。同时为简化方程，利用质功比(P)的二次方程来求系数^[89]。因此，令：

$$B = a_1 + a_2P + a_3P^2 \quad (5-9)$$

$$-A = b_1 + b_2P + b_3P^2 \quad (5-10)$$

式中： P —指质功比 (W/g)：即指热风薄层干燥的功率 (W) 与竹笋初始湿基质量 (g) 的比值； a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 ——为待定系数。

将不同功率下的 B 、 $-A$ 、 P 的值代入式(5-9)、(5-10)中，可以得到两组三元一次方程组：

$$\begin{cases} a_1 + 86.75a_2 + 7525.56a_3 = 1.08329 \\ a_1 + 73.4a_2 + 5387.56a_3 = 1.01724 \\ a_1 + 60.05a_2 + 3606a_3 = 1.04035 \end{cases} \quad (5-11)$$

$$\begin{cases} b_1 + 86.75b_2 + 7525.56b_3 = -0.03093 \\ b_1 + 73.4b_2 + 5387.56b_3 = -0.2557 \\ b_1 + 60.05b_2 + 3606b_3 = -0.2007 \end{cases} \quad (5-12)$$

试验数据的处理：利用 DPS 数值分析，对式 (5-11)、(5-12) 进行线性方程求解，得竹笋热风薄层干燥模型各待定系数。结果见下表：

表 5-8 拟合方程系数值

Tab.5-8 Coefficients of fitting equation

系数	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
值	2.24684	-0.03511	0.00025	3.50629	-0.10886	0.00078

所以可得在风速为 3.75m/s 时的竹笋热风薄层干燥方程为：

$$MR = (2.24684 - 0.03511P + 0.00025P^2) \exp((3.50629 - 0.10886P + 0.00078P^2)t)$$

5.3.7 热风薄层干燥的工艺分析

利用竹笋评价指标体系对竹笋热风薄层干燥各试验的结果进行综合评分，结果如表 5-9 所示，并对其进行分析。

表 5-9 竹笋热风薄层干燥各试验的得分对比表

Tab.5-9 Comparison table of scores of 9 species of experiments by hot-air thin-layer drying

因素 序号	色泽	香味	外观	质地	复水比	时间总耗	总功耗	综合得分
1	9	6.5	7	4	5	7	2	40.5
2	6	5.5	6	4	4	5	3	33.5
3	3	5.5	4	3	5	2	6	28.5
4	4	6	6	4	4	3	1	28
5	9	6.5	7	5	6	7	5	45.5
6	7	6	6	2	5	5	7	38
7	7	6	6	3	4	5	2	33
8	5	6.5	5	4	5	3	3	31.5
9	8	7	6	3	4	7	7	42

由以上表格可知竹笋热风薄层干燥的最优组合：风速 3.05m/s、风温 65℃，综合得分为 45.5；次优组合分别为：风速 1.58m/s、风温 65℃，综合得分为 42。由表可知风温一定，干燥的风速对竹笋干燥的综合得分影响不大，考虑到风速越大，耗能越多，故而可得其最优生产工艺为：风速 1.58m/s、风温 65℃的热风薄层干燥。

5.4 竹笋微波—热风薄层联合干燥试验

5.4.1 联合干燥产品的复水比

图 5-31 为微波—热风薄层联合干燥正交试验中各试验的复水比曲线图。

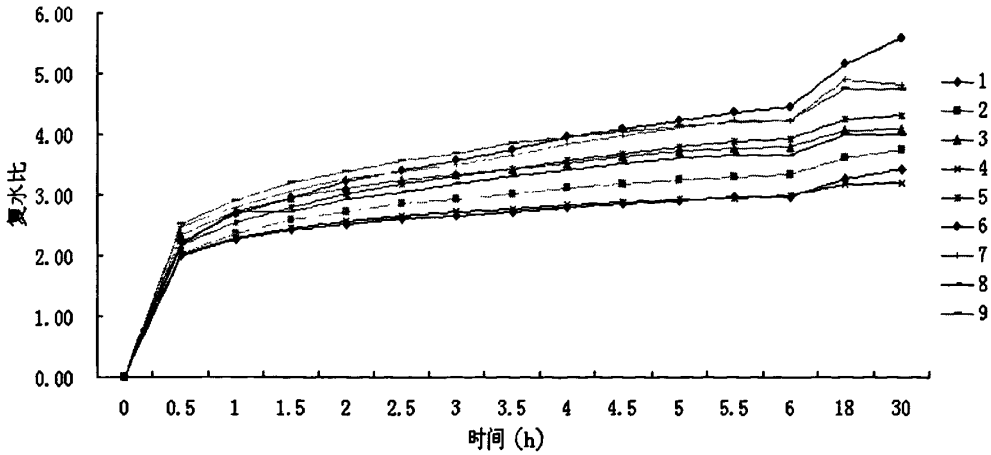


图 5-31 微波—热风薄层联合干燥正交试验中各试验的复水比曲线

Fig.5-31 Rehydration ratio curves of 9 species of orthogonal experiments by microwave-hot-air thin-layer combined drying

由图可以看出，前半小时的复水速率依然是最大的。与热风薄层干燥相比，微波—热风薄层联合干燥大部分试验干物质 6 小时后的复水比更高。与热风薄层干燥干物质在后期复水比变得非常缓慢相比，微波—热风薄层联合干燥的干物质在 6 小时~30 小时之间的复水趋势依然非常强劲。复水 30 小时后的复水比在 3~6 之间，比热风薄层干燥的复水比要大很多。

5.4.2 与热风薄层各相应试验的比较

图 5-32 为热风薄层干燥和微波—热风薄层联合干燥试验，干燥竹笋至安全干基时总耗时的比较曲线图，图形原本应绘制成散点图，为了清楚地表明热风薄层干燥与微波—热风薄层干燥各相应试验干燥时间的差异，故以折线的形式画出，其中的折线部分无实际意义。

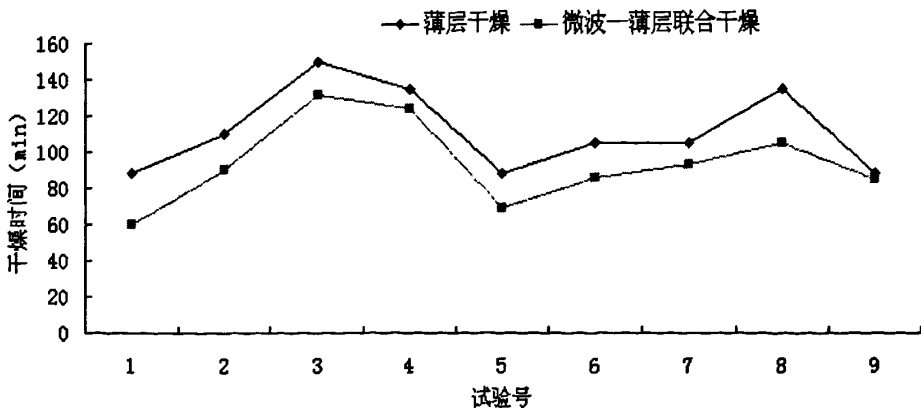


图 5-32 热风薄层干燥和微波—热风薄层联合干燥总耗时的对比曲线

Fig.5-32 Comparison curves of total time-consumings of 9 species of experiments by hot-air

thin-layer and microwave-hot-air thin-layer combined dryings

图 5-33 为热风薄层干燥和微波—热风薄层联合干燥的复水比对比曲线，其中折线部分没有实际意义，旨在容易识别和相互比较。

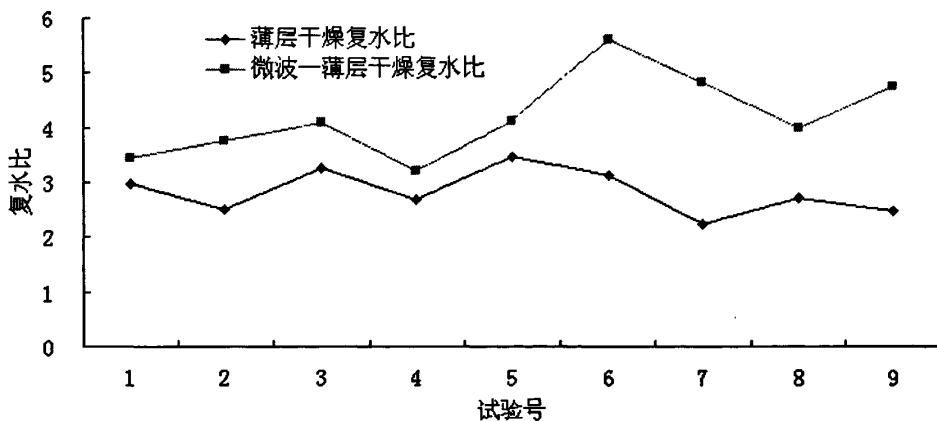


图 5-33 热风薄层干燥与微波—热风薄层联合干燥复水比的对比曲线

Fig.5-33 Comparison curves of rehydration ratios of 9 species of experiments by hot-air thin-layer and microwave-hot-air thin-layer combined dryings

由图可以看出，微波—热风薄层联合干燥的复水比总体上比薄层干燥复水比要高上一截。个别试验相差较大，可见微波—热风薄层联合干燥对竹笋复水比的影响较大。

图 5-34 为热风薄层干燥与微波—热风薄层干燥的复水率的对比曲线图，其中折线部分没有实际意义，旨在容易识别和相互比较。

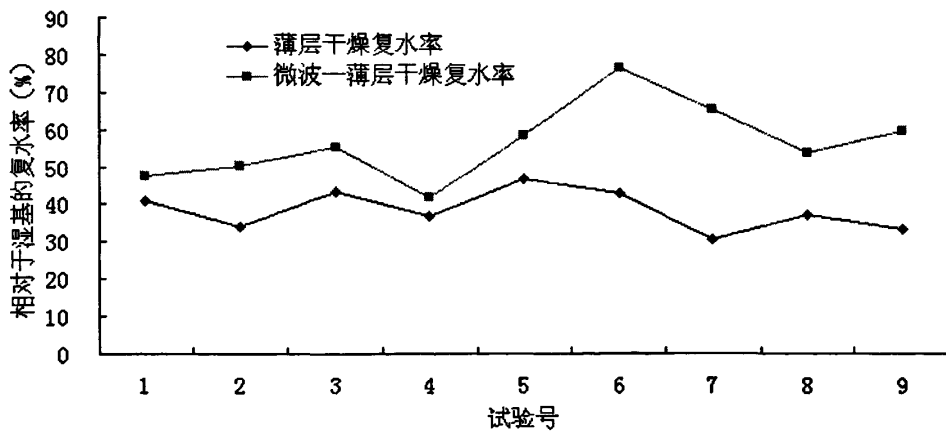


图 5-34 热风薄层干燥与微波—热风薄层联合干燥复水率的对比曲线

Fig.5-34 Comparison curves of rehydration rates of 9 species of experiments by hot-air thin-layer and microwave-hot-air thin-layer combined dryings

由图可以看出，复水率曲线与复水比的曲线非常的相近，其意义相同。

图 5-35 为热风薄层干燥与微波—热风薄层干燥总功耗的对比曲线图

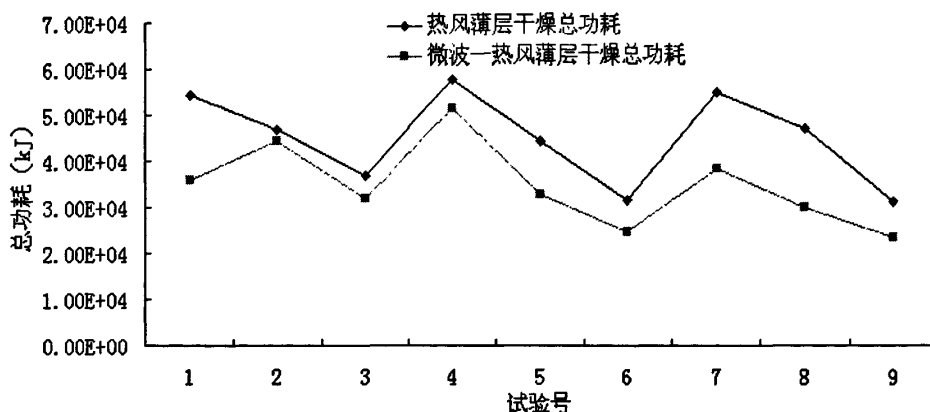


图 5-35 热风薄层干燥与微波—热风薄层联合干燥总功耗的对比曲线

Fig.5-35 Comparison curves of rehydration rates of 9 species of experiments by hot-air thin-layer and microwave-hot-air thin-layer combined dryings

5.4.3 联合干燥的工艺分析

利用竹笋评价指标体系对竹笋微波—热风薄层干燥各试验的结果进行综合评分，结果如表 5-10 所示。然后根据正交试验及其产品的综合评分结果进行水平极差分析，结果如表 5-11 所示。

表 5-10 竹笋微波—热风薄层联合干燥各试验的得分对比表

Tab.5-10 Comparison table of scores of 9 species of experiments by microwave-hot-air thin-layer combined drying

因素 序号	色泽	香味	外观	质地	复水比	时间总耗	总功耗	综合得分
1	8	7	7	5	6	9	6	48
2	6	8	4	4	6	7	4	39
3	8	7	5	5	7	3	7	42
4	6	7.5	4	3	5	3	2	30.5
5	6	8.5	6	6	7	8	7	48.5
6	2	7.5	5	7	9	7	8	45.5
7	4	8	7	7	8	6	5	45
8	4	6.5	6	4	6	5	7	38.5
9	5	6	7	7	8	7	9	49

表 5-11 竹笋微波—热风薄层联合干燥水平极差分析表

Tab.5-11 Level range analysis table of 9 species of experiments by macrowave-hot-air thin-layer combined drying

来源	A 微波干燥条件	B 风速	空列	D 风温
极差 分析	K_{1j}	129	123.5	145.5
	K_{2j}	124.5	126	129.5
	K_{3j}	132.5	136.5	111
	极差 $R_j(K)$	8	13	34.5
	因子主次		DBA	
	最优组合		$A_3B_3D_1$	
	次优组合		$A_1B_3D_1$	

由以上二表格可知竹笋微波—热风薄层联合干燥的最优组合是：在 250W 微波功率下干燥 20 分钟，然后转移到 1.58m/s、65℃的热风薄层干燥条件下进行干燥，综合得分为 49；次优组合为：在 750W 微波功率下干燥 2 分钟，然后转移到 1.58m/s、65℃的热风薄层干燥条件下干燥。由表可知，最优工艺组合与次优工艺组合联合干燥出的竹笋笋干质量相差无几，而次优组合比最优组合所消耗的能量略小，干燥的时间也缩短几十分钟。鉴于干燥效率和干燥能耗的原因，最优生产工艺为次优组合：即在 750W 微波功率下干燥 2 分钟，然后转移到 1.58m/s、65℃的热风薄层干燥条件下干燥。

比较微波—热风薄层联合干燥与热风薄层干燥的得分状况可得，热风薄层干燥综合得分状况普遍比微波—热风薄层联合干燥低，把两种干燥方式相应试验结果的得分进行比较也得出同样的结论。同时微波—热风薄层联合干燥的干燥效率和能耗方面也比热风薄层干燥对应试验优异。由此可知，微波、热风薄层及其联合干燥对竹笋的干燥中，联合干燥更为优异！

第6章 结论与建议

6.1 结论

1、建立了一套竹笋干燥工艺评价指标体系,选取干燥后竹笋品质的四项主要指标(即色泽、香味、外观、质地)以及干燥过程中的总耗时和总能耗作为评价因子,采用1~9的评分标准对各因子进行评分,然后求出其得分之和作为综合得分。由此可知,比较干燥竹笋方法的优劣,可以通过干燥后的竹笋品质、干燥总耗时以及干燥总能耗三个方面来进行。

在对竹笋热风薄层干燥正交试验进行极差分析时知:①风速 3.05m/s、风温 65℃为最优组合,②风速 1.58m/s、风温 65℃为次优组合,但在温度一定风速不变的情况下,风速的综合得分相差不大,而 3.05m/s 的风速比 1.58m/s 的风速状况下的总能耗要大很多,故而可得方案②,即风速 1.58m/s、风温 65℃为最优生产工艺。

在对竹笋微波—热风薄层联合干燥正交试验进行极差分析时知:①最优组合为:在 250W 微波功率下干燥 20 分钟,然后转移到风速 1.58m/s、风温 65℃的热风薄层干燥条件下进行干燥;②次优组合为:在 750W 微波功率下干燥 2 分钟,然后转移到风速 1.58m/s、风温 65℃的热风薄层干燥条件下干燥。由于综合得分相差很小,且在 750W 微波功率下干燥 2 分钟的干燥效果与在 250W 微波功率下干燥 20 分钟干燥效果相差不大,而时间却缩短了十几分钟,故而可得方案②,即在 750W 微波功率下干燥 2 分钟,然后转移到风速 1.58m/s、风温 65℃的热风薄层干燥条件下干燥为最优生产工艺。

由微波—热风薄层联合干燥与薄层干燥、微波干燥试验结果可知,纯微波干燥无法正常完成对竹笋的干燥,纯热风薄层干燥既耗能又费时,而微波—热风薄层联合干燥比其他两种干燥方式则更优异;

2、在竹笋微波杀青与传统杀青的试验中,建立了一个定性的评价指标体系,通过试验的结果显示,微波杀青比传统杀青更有效。对微波杀青的各试验结果进行比较和分析得出了微波杀青的最优组合为:微波功率为 900W,杀青时间为 60s;

3、竹笋恒温干燥特性的试验表明,载重量相同的情况下,温度越高,则干燥速率越快,干燥时间越短,失水速率曲线的加速、恒速、降速三个阶段越不明显;温度相同的情况下,载重量越大,则干燥速率越低,干燥时间越长,失水速率曲线的加速、恒速、降速三个阶段越明显。竹笋微波干燥特性的试验表明,微波功率越大,则干燥时间越短,干燥速率越高。失水速率-失水率曲线与温度曲线类似,呈现加速、恒速、降速三个阶段的趋势;

4、竹笋分别在 150W、250W、350W、450W、550W、650W、750W 纯微波功率下进行干燥,结果表明:在以上各微波功率干燥竹笋一段时间后,均使得竹笋出现褐变现象,大大影响了竹笋的品质,继续干燥,则褐变点变多变深,使竹笋失去了市场价值,竹笋微波干燥失去意义。记录下各微波功率干燥竹笋出现褐变点的时间,用 DPS 数据处理软件对其进行回归分析,并得到回归方程为: $y=2898994.7035 \times x^{-1.9991}$, 其中 y 为干燥时间(min), x 为微波功率(W)。此方程为与微波相关的竹笋联合干燥提供参考;

5、热风薄层干燥在风速 3.75m/s、风温分别为 35℃、45℃、55℃、65℃、75℃、85℃下干燥竹笋至安全含水率,记录下干燥温度与干燥时间的对应关系,用 DPS 数据处理软件对其进行回归分析,并得到回归方程为: $y=30.6116 \times \exp(61.6924/(x-4.0386))$, 其中 y 为干燥

时间 (min), x 为热风薄层干燥的风温 ($^{\circ}\text{C}$)。

通过用 DPS 数据处理软件对竹笋热风薄层干燥数据进行处理分析可知, 单项扩散模型 $MR = B \exp(-At)$ 更适合做竹笋热风薄层干燥的模型。并得出风速为 3.75m/s 时竹笋热风薄层干燥综合拟合方程为:

$$MR = (2.24684 - 0.03511P + 0.00025P^2) \exp((3.50629 - 0.10886P + 0.00078P^2)t)$$

其中 MR 为水分比, P 为热风薄层干燥的功率 (W) / 物料初始质量 (g); t 为干燥时间 (min);

6、由竹笋微波—热风薄层联合干燥与热风薄层干燥的干燥时间、复水比、复水率以及总功耗的比较曲线中可知, 微波—热风薄层联合干燥都优于热风薄层干燥, 而两种干燥方式的竹笋干燥品质后者略输于前者, 但相差不大, 这表明微波—热风联合干燥相对而言更优越, 是今后生产实践中首选的方案。

6.2 建议

1、今后在对竹笋恒温干燥特性、微波干燥特性、热风薄层干燥特性进行研究时, 建议开始干燥时选用较短的时间间隔来记录物料质量的数据, 在同一因子不同水平 (如同一温度不同载重量或者同一载重量不同功率等) 的试验中, 记录物料质量的时间间隔尽量取成一致, 这样可以得出更有说服力的干燥特性曲线;

2、建议今后在竹笋微波杀青试验中能够建立起一种更有效更有说服力的评价指标体系; 并希望今后在竹笋干燥试验的评价指标体系中能够引入营养成分等内在评价因素, 使得出的结论更有价值;

3、在进行试验前, 要有明确的目标, 并作出具体的试验安排 (设计); 对于没有经验参考的试验, 可先做一些简单的试验探索, 再进行系统的试验研究, 这也是本实验过程中获得的经验和教训, 有助于获取更有效更充分的试验数据;

4、由于试验是一次完成, 而后才对采集的数据进行分析处理, 造成很多数据说服力不强, 很多数据因缺乏系统性而在论文中未能够提及, 建议在今后竹笋干燥试验的数据采集中, 注重数据的系统性, 在每种干燥试验前, 能够加入微波杀青的部分;

5、由于恒温恒湿热试验箱本不是专用的物料干燥试验设备, 干燥品质虽好, 但是功耗大, 干燥效率也比较差, 建议在今后的研究中不要把恒温恒湿热试验箱作为竹笋干燥的研究设备; 而对真空干燥方式有必要做深入研究;

6、根据本试验的研究结果, 建议今后在果蔬、粮食和食品的干燥试验中, 能够多涉及一些几种干燥方式相结合的联合干燥试验, 尤其是与微波干燥相关的联合干燥试验。

参考文献

- [1] 赵丽芹. 园艺产品贮藏加工学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2002: 57~92
- [2] 徐艳阳. 毛竹笋真空冷冻与热风联合干燥研究: [博士学位论文]. 江苏: 江南大学, 2005.
- [3] Gallali Y.M., Abujnah Y.S., Bannani F.K. Preservation of fruits and vegetables using solar drier: a comparative study of natural and solar drying III; chemical analysis and sensory evaluation data of the dried samples, (grapes, figs, Tomatoes and onions). *Renewable Energy*. 2000, (19) 1-2: 203~212
- [4] Nijhuis H.H., Torringa H.M., Muresan S. Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*:1998, (9)1: 13~20
- [5] Esper A.- Miihlbauer W.. Solar Drying, An Effective Means of Food Preservation. *Renewable Energy*, 1998, 15(1-4): 95~100.
- [6] 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 9~10, 689~692
- [7] 王庆兰. 竹笋的加工与烹饪[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988. 5
- [8] 赵丹. 大叶麻竹笋采后品质劣化机理的研究: [硕士研究生论文]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [9] 刘明池. 竹笋的营养价值与食用方法[J]. *蔬菜*, 2002. 2: 14~17
- [10] 陈明木, 陈青青等. 竹笋保鲜技术的研究进展[J]. *保鲜与加工*, 2004 (2): 16~17
- [11] 董全 黄艾祥. 食品干燥加工技术[M]. 化学工业出版社, 2007
- [12] Dennis R. Heldman, Richard W. Hartel. *Principles of food processing*. Beijing: China light industry press, 2001: 124~128
- [13] 高奎兆译. 食品干燥原理与技术基础[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1986
- [14] 陈羽白. 荔枝和龙眼干燥特性的试验研究[硕士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 1995
- [15] 柴京富. 枸杞热风干燥特性及最佳工艺的试验研究[硕士学位论文]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2004: 10~12
- [16] 郑严, 陈建, 谢守勇等. 花椒恒温与控温热风干燥的对比试验研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24 (2): 277~280
- [17] 刘云珍, 邱健斌. 微波技术及其应用[J]. *福建化工*, 2005 (1): 38~40
- [18] 王薇. 加速微波技术在食品工业中的应用推广[J]. *食品与发酵工业*, 1996(2): 59~62
- [19] Lebedev.I.V. Microwave-the past, present and future[J]. *Rediotekhnika*, 1995 (4):74~78
- [20] Franc E.smith. Microwave-assisted sample preparation in analytical chemistry[J]. *Talanta*, 1996 (43): 1206~1268
- [21] 肖宏儒, 宋卫东, 朱志祥等. 茶叶微波加工技术及设备的研究[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(3): 91~93
- [22] 贺筱蓉. 微波处理绿竹笋保鲜技术研究[J]. *保鲜与加工*, 2004, 4(2): 33~34
- [23] 刘钟栋. 微波技术在食品工业中的应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999
- [24] 冯薇丽. 黄姜微波干燥特性与较佳干燥工艺研究: [硕士学位论文]. 云南: 昆明理工大学, 2005
- [25] 张蓉蓉, 孔庆新. 微波干燥法生产马铃薯脆片的研究[J]. *粮油食品与食品机械*, 2006 (1)
- [26] 陈卢亮, 玉柱. 微波炉测定三叶草含水量的研究[J]. *草地学报*, 2007, 15 (5): 465~468

- [27] 朱德泉, 周杰敏, 王继先等. 小麦微波干燥特性及工艺优化研究[J]. 包装与食品机械, 2006, 24 (1): 18~22
- [28] 李加兴, 袁秋红, 孙金玉等. 猕猴桃果脯微波干燥工艺研究[J]. 生产与科研经验, 2007, 33 (8): 99~101
- [29] 韩清华. 微波真空干燥膨化苹果片的机理及品质研究和设备设计: [博士学位论文]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2007
- [30] 周代梁. 油菜籽薄层干燥及其通风特性的试验研究: [硕士学位论文]. 湖南: 华中农业大学, 2006
- [31] 李爱平. 苜蓿薄层干燥特性的实验研究: [硕士学位论文]. 黑龙江: 黑龙江八一农垦大学, 2005
- [32] 阿达姆·穆罕默德·萨波. 干燥条件对小麦薄层干燥影响的研究: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2007
- [33] 高琦. 胶乳法氯化天然橡胶薄层干燥特性的研究: [硕士学位论文]. 海南: 华南热带农业大学, 2004
- [34] Syarif A M, Morey R V, Gustafson R J. Thin Layer Drying Rates of Sunflower seed[J]. *Trans, ASAE*, 1984, 27(1): 195~200
- [35] Yunfei Li, Morey R V, Afinrud A. Thin-Layer Drying Rates of Oilseed Sunflower[J]. *Trans, ASAE*, 1987, 30(4): 1172~1176
- [36] 金国森. 干燥设备(化工设备设计全书)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 410~416
- [37] Chou S:K. New hrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs[M]. *Trends in Food Science and Technology*, 2001, 12(10): 359~369
- [38] 董景山, 张克. 流态化干燥技术[M]. 中国建筑工业出版社, 1985: 189~205
- [39] Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying[M]. 1987: 282~284, 589~602
- [40] None YJ. Development of a combined process of dehydration impregnation soaking and drying of bananas (*Musa acuminata* groupe Cavendish)[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55 (3) : 231~236
- [41] Sharma G P. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot-air combination [J]. *Journal of food engineering*, 2001 (50) : 99~105
- [42] Torringa E. Osmotic dehydration as a pre2treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49 (2/3): 185~191
- [43] Baysal T. Effects of microwave and hot-air combination drying on the quality of carrots [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2002, 11 (1): 19~23
- [44] Phanindra Kumar H S. Effect of combination drying on the physico-chemical characteristics of carrot and pumpkin[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2001, 25 (6): 447~460
- [45] Maskan M. Microwave/ air and microwave finish drying of banana [J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 44: 71~78
- [46] 王枚. 微波干燥桃脯、苹果脯的影响因素和节能效果的研究[J]. 农业工程学报, 1998, 3: 253~255
- [47] 王俊. 远红外与热风混合干燥香菇的质热特性研究[J]. 农业工程学报, 1998, 4: 257~258

- [48] 徐贵力. 远红外常压、负压联合干燥香菇的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 3: 133~136
- [49] 徐彩霞, 张璧光, 常建民等. 太阳能—热泵联合干燥技术的研究现状[J]. 木材加工机械, 2004 (5): 36~39
- [50] 罗晓莉. 不同处理对竹笋采后木质化及品质的影响: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2007
- [51] 胡忠超. 竹笋栽培及加工利用[M]. 中国林业出版社, 1987
- [52] 徐艳阳, 张愨, 屠定玉等. 热风与真空冷冻联合干燥毛竹笋的试验研究[J]. 干燥技术与设备, 2005, 3(1): 9~16
- [53] Ponciano S. Madamba. Physical Changes in Bamboo (*Bambusa phyllostachys*) Shoot During Hot-air Drying[J]: Shrinkage, Density, and Porosity. DRYING TECHNOLOGY. 2003, 21(3): 555~568
- [54] 陆蒸, 林启训, 王浩等. 毛竹笋热泵干燥特性及制品复重率[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2001. 31(1): 117~120
- [55] 林启训. 绿竹笋热泵脱水的影响因素分析及工艺参数优化[J]. 福建农业大学学报, 2001, 30(4): 532~537
- [56] 林启训, 雷润波, 沈来盛. 竹笋气调干燥技术与干品贮存中的品质效应[J]. 干燥技术与设备, 2003(2): 34~37
- [57] 林启训, 沈来盛, 陈团伟. 气调与热风干燥对毛竹笋干燥速度与干制品品质的影响[J]. 食品科技, 2003(1): 23~26
- [58] 李加兴, 麻成金, 傅伟昌等. 篾竹笋真空冷冻干燥工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2007, 26(6): 80~83
- [59] Yanyang Xu, Min Zhang, Dingyu Tu, etc.. A two-stage convective air and vacuum freeze-drying technique for bamboo shoots[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2005, 40: 589~595
- [60] 徐艳阳, 张愨. 真空冷冻干燥毛竹笋的实验研究[J]. 食品科学与技术, 2005, 26(2): 99~101
- [61] H.-P. Cheng. Vacuum cooling combined with hydrocooling and vacuum drying on bamboo shoots[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 168~175
- [62] 李安平, 谢碧霞, 郑仕宏等. 毛竹笋干微波干燥工艺的研究[J]. 经济林研究, 2004, 22(2): 14~16
- [63] Wang H.X., Ng T.B., Dendrocin. A distinctive Antifungal Protein from Bamboo shoots[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2003(307):750~755
- [64] 汪奎宏, 李琴, 高小辉. 竹类资源利用现状及深度开发[J]. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 73~75
- [65] 石太全. 我国竹笋加工利用的现状与发展前景[J]. 竹子研究汇刊, 2003, 22(1): 1~4
- [66] 孙家华, 陈竹君, 叶自新等. 竹笋[M]. 上海: 科学技术文献出版社, 1992, 9
- [67] 傅懋毅, 杨校生. 我国竹类研究展望和竹林生境利用[J]. 竹子研究汇刊, 2003, 22(2): 1~8
- [68] 陆志科, 谢碧霞. 竹叶化学成分的分析与资源的开发利用[J]. 林业科技开发, 2003, 17(1): 6~9

- [69] 陈 功. 竹笋加工与综合利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007, 4
- [70] Zisheng Luo, Xiaoling Xu, Zhenzhen Cai, etc.. Effects of ethylene and 1-methylcyclopropene (1-MCP) on lignification of postharvest bamboo shoots [J]. Food Chemistry, 2007 (105): 521~527
- [71] 林雯, 俞际会, 陈丽娇. 竹笋保鲜技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2004, 25 (6): 114~116
- [72] 胡晓浩, 余顺火, 王泽南等. 荸荠片分段变温干燥加工工艺[J]. 食品研究与开发, 2007, 28 (09): 85~87
- [73] 尹礼国, 冯学愚, 幸治梅等. 不同干燥工艺制备的玉兰片品质比较[J]. 四川食品与发酵, 2008, 44 (1): 54~57
- [74] 张伟光, 林永生, 林雯等. 绿竹笋干燥工艺的研究[J]. 福建农业学报, 2005, 20 (2): 118~121
- [75] 徐艳阳, 张懋, 屠定玉等. 真空冷冻与热风联合干燥毛竹笋[J]. 无锡轻工业大学学报, 2004, 23 (6): 27~32
- [76] 赵超, 陈建, 邱兵. 花椒微波干燥特性试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38 (3): 98~101
- [77] 邵耀坚, 刘道被等. 谷物干燥机的原理与构造[M]. 机械工业出版社, 1985
- [78] 李笑光. 农作物干燥与通风贮藏[M]. 天津科学技术出版社, 1989
- [79] 武杰. 食品微波加工工艺与配方[M]. 科学技术文献出版社, 2003
- [80] 杨金英, 盖玲, 王建平. 春笋微波干燥动力学模型研究[J]. 干燥技术与设备, 2007. 5, (4): 186~189
- [81] 李安平. 微波低糖果脯的研究[J]. 食品科技, 2002(4): 14~16
- [82] 周利平. 微波干燥普洱茶工艺研究: 硕士学位论文. 云南: 昆明理工大学, 2007
- [83] 余莉, 明晓. 微波对流联合干燥特性的数值模拟[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005(1): 135~139
- [84] 徐贵力, 程玉米. 远红外常压、负压联合干燥香菇的试验研究[J]. 农业工程学报, 2001. 17(3): 133~136
- [85] 王俊, 徐乃章等. 微波干燥香菇试验研究[J]. 科技通报, 1996(1): 48~54
- [86] 李远志, 郑素霞. 马铃薯脆片微波干燥工艺研究[J]. 食品科技, 2003 (8): 31~34
- [87] 胡浩, 彭增华. 微波干燥生产线干燥黄姜的工艺研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2005(5): 35~37
- [88] 周纪萝. 实用同归分析方法[M]. 上海科学技术出版社, 1990
- [89] 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

附录

附录

附表 1 竹笋中 18 种氨基酸和矿物质的含量(每 100 克中含)

成分名称	含量(mg)	成分名称	含量(mg)	成分名称	含量(mg)
异亮氨酸	78	亮氨酸	126	赖氨酸	113
含硫氨基酸(T)	55	蛋氨酸	26	胱氨酸	29
芳香族氨基酸(T)	388	苯丙氨酸	79	酪氨酸	309
苏氨酸	76	色氨酸	36	缬氨酸	106
精氨酸	102	组氨酸	43	丙氨酸	106
天冬氨酸	283	谷氨酸	247	甘氨酸	85
脯氨酸	68	丝氨酸	85	锰	1.14
钙	9	磷	64	钾	389
钠	0.4	镁	1	铁	0.5
锌	0.33	硒	0.00004	铜	0.09

附表 2 初始含水率失水过程表(第一次)

干燥时间段 (min)	S ₁ 的实时质量 (g)	实时失水 质量 (g)	S ₂ 的实时质量 (g)	实时失水 质量 (g)
9: 40~10: 10	63.33	36.67	220.00	30.00
10: 20~10: 50	41.41	21.92	187.50	32.50
11: 00~11: 30	36.10	5.31	157.12	30.38
11: 40~12: 10	25.45	10.65	129.52	27.60
12: 20~12: 50	18.68	6.77	106.06	23.46
13: 00~13: 30	14.50	4.18	86.20	19.86
13: 40~14: 10	10.30	4.20	65.62	20.58
14: 20~14: 50	9.36	0.94	54.80	10.82
15: 00~15: 30	8.94	0.42	45.24	9.56
15: 50~16: 20	8.70	0.24	37.10	8.14
16: 40~17: 10	8.56	0.14	30.70	6.40
17: 30~18: 00	8.56	0.00	26.23	4.47
18: 20~18: 50	-	-	23.60	2.63
19: 10~19: 40	-	-	22.10	1.50
20: 00~20: 30	-	-	21.20	0.90
20: 50~21: 20	-	-	20.70	0.50
21: 40~22: 10	-	-	20.40	0.30
22: 30~23: 00	-	-	20.27	0.13
23: 20~23: 50	-	-	20.27	0.00

注: 附表 1 参考 <http://www.poptool.net/health/yingyang/04/5/407.html> 中数据

附表 3 初始含水率失水过程表（第二次）

干燥时间段 (min)	S ₃ 的实时质量 (g)	实时失水量 (g)	S ₄ 的实时质量 (g)	实时失水量 (g)	S ₅ 的实时质量 (g)	实时失水量 (g)
9: 30~11: 30	19.83	80.17	16.30	83.70	19.63	80.37
11: 50~12: 20	12.83	7.00	10.33	5.97	12.33	7.3
12: 40~13: 10	9.34	3.49	8.53	1.80	9.46	2.87
13: 30~14: 00	8.26	1.08	8.27	0.26	8.59	0.87
14: 20~15: 50	8.05	0.21	8.17	0.10	8.38	0.21
16: 10~16: 40	8.04	0.01	8.14	0.03	8.34	0.04
17: 00~17: 30	8.04	0.00	8.14	0.00	8.31	0.03
17: 50~18: 20	-	-	-	-	8.31	0

附表 4 3.75m/s 风速、45℃风温下，回归方程拟合检验表

观察值	拟合值	残差	标准残差	学生残差	cook 距离
-0.21	-0.16114	-0.04886	-1.06551	-1.23625	0.26451
-0.4	-0.36185	-0.03815	-0.83208	-0.93287	0.11178
-0.58	-0.56255	-0.01745	-0.38057	-0.41535	0.01648
-0.76	-0.76325	0.00325	0.07094	0.07585	0.00041
-0.95	-0.96396	0.01396	0.30436	0.32063	0.00564
-1.14	-1.16466	0.02466	0.53779	0.56108	0.01393
-1.33	-1.36536	0.03536	0.77121	0.8008	0.02507
-1.52	-1.56607	0.04607	1.00464	1.04318	0.04255
-1.72	-1.76677	0.04677	1.01997	1.06416	0.05012
-1.92	-1.96747	0.04747	1.03531	1.09065	0.06528
-2.14	-2.16818	0.02818	0.61448	0.65701	0.03091
-2.37	-2.36888	-0.00112	-0.02444	-0.02668	0.00007
-2.67	-2.56958	-0.10042	-2.18997	-2.45522	0.77433
-2.81	-2.77029	-0.03971	-0.86612	-1.0049	0.17478

附录

附表 5 3.75m/s 风速、55℃ 风温下，回归方程拟合检验表

观察值	拟合值	残差	标准残差	学生残差	cook 距离
-0.27	-0.23864	-0.03136	-0.59026	-0.71484	0.11923
-0.53	-0.49436	-0.03564	-0.67068	-0.76748	0.09116
-0.77	-0.75009	-0.01991	-0.37469	-0.41195	0.01772
-1.01	-1.00582	-0.00418	-0.0787	-0.08425	0.00052
-1.24	-1.26155	0.02155	0.40548	0.42742	0.01015
-1.46	-1.51727	0.05727	1.07787	1.13048	0.0639
-1.7	-1.773	0.073	1.37386	1.44817	0.11651
-1.97	-2.02873	0.05873	1.10525	1.18309	0.10206
-2.27	-2.28445	0.01445	0.27203	0.29909	0.00934
-2.63	-2.54018	-0.08982	-1.69038	-1.93437	0.57909
-2.84	-2.79591	-0.04409	-0.82979	-1.00493	0.23564

附表 6 3.75m/s 风速、65℃ 风温下，回归方程拟合检验表

观察值	拟合值	残差	标准残差	学生残差	cook 距离
-0.29	-0.22933	-0.06067	-0.92099	-1.16756	0.41383
-0.57	-0.53867	-0.03133	-0.47567	-0.55338	0.05411
-0.86	-0.848	-0.012	-0.18217	-0.2009	0.00436
-1.12	-1.15733	0.03733	0.56676	0.60686	0.02698
-1.39	-1.46667	0.07667	1.16388	1.23448	0.09525
-1.7	-1.776	0.076	1.15376	1.23539	0.11179
-2.04	-2.08533	0.04533	0.68821	0.75897	0.06227
-2.43	-2.39467	-0.03533	-0.5364	-0.62402	0.0688
-2.8	-2.704	-0.096	-1.45738	-1.84757	1.03625

致 谢

步入致谢一节，也就意味着与我的大学生活说再见的时候到了。有很多话想说，而此时最想说的就是：“谢谢”！

感谢我的导师陈建教授、李云伍副教授，他们在生活、学习和上都给予我无私的关怀、帮助和鼓励。他们博学而又智慧，他们严谨的治学、求真务实的工作作风和孜孜以求的钻研精神都深深地震撼和鼓舞着我，使我受益颇多！在李老师办公室学习的三年里，李老师言传身教的教导更让我终身受益。在此，我向二位导师致意最真挚的感谢！

在做试验期间，还得到了冯熙老师，吴达科老师，彭桂兰老师，周秀梅师姐，郭强同学，周彭全同学等人的热心帮助，在此，向他们表示谢意！

在七年大学生活里，我得到了学院许多认识的和不认识的老师和同学的帮助，我从他们身上看到了很多人性的光辉，学到了许多做人的道理，也得到了真挚的深情友谊，尤其是实验室的师姐、同学、师弟们和同寝室的室友，我要衷心地感谢和祝福他们！

感谢百忙之中对本论文进行评阅的各位老师和专家，感谢他们为此付出的时间、精力以及对本论文的圆满完成提出的宝贵建议和意见！

最后感谢我的父母和妹妹给予我的持续不断的支持和爱！衷心祝愿家人幸福、安康！

在校期间发表的论文

- [1] 杨娜伟, 陈建, 李云伍等. 西南丘陵山区农机化发展的现状与趋势[J]. 农机化研究, 2009, 31 (9), 244-246

作者: [杨娜伟](#)
学位授予单位: [西南大学](#)

相似文献(3条)

1. 期刊论文 [李安平, 谢碧霞, 陶俊奎, 王俊, LI An-ping, XIE Bi-xia, TAO Jun-kui, WANG Jun](#) [竹笋膳食纤维微波干燥特性及其功能特性 - 中南林业科技大学学报](#)2008, 28(2)

探讨微波干燥特性和干燥工艺条件(干燥功率、排湿风速、加热时间间隔比和漂白时间)对膳食纤维持水率、持油率、能耗和白度的影响。结果表明:膳食纤维微波干燥主要处于减速阶段,其动力学过程可以用指数模型描述;不同微波干燥工艺条件和漂白时间对膳食纤维功能特性、能耗和白度有显著影响;随微波干燥功率的增加和漂白时间的延长,膳食纤维的持水率和持油率下降;微波干燥能耗随微波功率和排湿风速的增大而增大,随漂白时间的延长而逐渐下降,随加热时间间隔比的增加而减小。

2. 期刊论文 [李安平, 谢碧霞, 郑仕宏, 曹清明, 黄亮, 毛竹笋干微波干燥工艺的研究 - 经济林研究](#)2004, 22(2)

对微波干燥笋干的生产工艺进行了研究。试验表明:微波干燥优于热风烘箱干燥和自然干燥,且以NG复合漂白剂漂白,笋片切成5mm厚度,微波功率选择0.75 kW/kg为较佳工艺条件。以此方法制成的笋干不仅色泽光亮、洁白,质地松软,复水性好,且营养味美。

3. 学位论文 [龚平](#) [高复水性无硫竹笋干的生产技术研究](#) 2009

二氧化硫在果蔬加工中具有抑制氧化酶、美拉德反应、漂白、抗氧化等功能,可保持果蔬加工制品良好的色泽和感官品质。但是人体长期摄入二氧化硫及亚硫酸盐等会破坏维生素B1,影响生长发育,易患多发性神经炎,出现骨髓萎缩等症状,也会造成肠道功能紊乱,从而引发剧烈腹泻、头痛、损害肝脏,影响人体营养吸收,严重危害人体的消化系统健康。竹笋干为了得到良好的感官品质,常加入二氧化硫,这已引起国内外各方的广泛关注。鉴于此,利用新鲜竹笋,开发无硫竹笋干的脱水加工技术,具有非常重要的意义。

本文拟采用现代的干燥技术,对竹笋的脱水技术进行了较系统的研究;利用现代的果蔬护色技术,研究了竹笋在干燥预处理中添加无硫护色剂以达到无硫的加工和添加复水剂以达到竹笋干的高复水性,最终获得了高复水性无硫竹笋干的脱水技术。主要研究结果如下:

(1)通过对竹笋干无硫脱水技术的系统研究,研究结果表明,微波干燥和先热风后微波的联合干燥方式不适合干燥竹笋,而热风干燥和先微波后热风的联合干燥方式适合竹笋的干燥,但先微波后热风的联合干燥方式能较好的节省干燥时间、保持产品质量;竹笋热风干燥的较佳工艺条件是笋片厚度1cm,长度8cm,漂烫时间为8min,漂烫温度90℃,热风干燥风速2.1m/s,热风干燥温度90℃,干燥5h;竹笋的较佳先微波后热风联合干燥工艺条件是:笋片厚度1cm,长度8cm,90℃漂烫8min,280W微波干燥12min后转入在热风风速2.1m/s,热风温度80℃下的热风干燥2h。

(2)竹笋的无硫护色技术研究表明,氯化锌不适合作为竹笋干的护色剂,其他护色剂中较优效果分别是0.1%柠檬酸、0.1%抗坏血酸、0.2%半胱氨酸、0.3%EDTA-2Na,其护色效果Q值分别是117.53、107.58、124.53、126.41。在柠檬酸、EDTA-2Na、半胱氨酸的止交组合中,没有一个因素显著,且选取的正交组合0.2%柠檬酸+0.2%半胱氨酸+0.3%EDTA-2Na的护色效果还不如单一护色剂0.3%EDTA-2Na。最优的护色工艺条件是0.3%EDTA-2Na。

(3)无硫竹笋干的复水技术研究表明,蔗糖组、麦芽糊精组对笋干的复水效果随蔗糖或麦芽糊精溶液浓度的增大而增强,氯化钠组对笋干的复水效果随氯化钠溶液浓度的增大而减弱;单一复水剂中复水效果最好的是15%麦芽糊精,竹笋干的复水比达6.68,复水速率1.67h⁻¹。正交试验中麦芽糊精对复水效果的影响显著,其余两个因素都不显著;复水处理最优组合是15%蔗糖+5%氯化钠+15%麦芽糊精。在此条件下,复水比为8.6,复水速率是4.15h⁻¹,大大优于单一组合。

(4)通过本实验技术制备的无硫竹笋干与对照组和硫组制备的竹笋干的品质对比研究,发现本试验本实验技术制备的无硫竹笋干品质大大优于对照组和硫组,成本仅比对照组高0.05元/kg,比硫组高0.04元/kg,证明该工艺是切实可行的。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1672288.aspx

授权使用: 北京方正奥德计算机系统有限公司(zhghgxx), 授权号: 68baac37-2769-442b-ae6b-9e630107e013

下载时间: 2011年1月6日