

文章编号:1673-1689(2006)02-0115-05

# 食品干燥新技术的研究进展

张 愨<sup>1,2</sup>, 张 鹏<sup>2</sup>

(1. 江南大学 食品科学与安全教育部重点实验室, 江苏 无锡 214036; 2. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214036)

**摘 要:** 阐述了各种干燥方法的技术特点, 介绍了微波干燥、红外线辐射干燥、冲击干燥、渗透干燥、卤素干燥、流化床干燥以及冷冻干燥在国内外的研究和应用现状, 以及这些技术在食品干燥加工中存在的问题和应用前景。

**关键词:** 食品干燥; 新技术; 研究进展

**中图分类号:** S 37

**文献标识码:** A

## Progress of New Food Drying Technology

ZHANG Min<sup>1,2</sup>, Zhang Peng<sup>2</sup>

(1. The Key Laboratory of Food Science and Safety, Ministry of Education, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. School of Food Science and Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China)

**Abstract:** The technological characteristics of various drying methods were formulated in this work. Meanwhile, this study introduced current research and application of various drying methods both inland and outland. Finally, the existing problems and application prospects of various technology in the drying process of food were discussed.

**Key words:** food drying; new technology; research progress

我国是果蔬、肉禽蛋奶等农产品的生产大国, 每年生产的大量农产品用于当地消费或者出口<sup>[1]</sup>。很多农产品都有很高的初始水分含量, 使用干燥脱水把水分控制在安全贮藏水分范围是非常有效的保藏方法。

干燥技术是最古老的食品保存方法之一, 由于在传统空气干燥脱水食品的过程中, 长时间高温干燥过程会使产品品质发生不良的变化, 因此选择合适的干燥方法是食品脱水加工过程的客观要求<sup>[2]</sup>。本文主要介绍几种典型的干燥方法以及在食品工

业中的应用进展。

### 1 微波干燥

在用传统的空气干燥方法干燥食品过程中, 由于水分迁移引起干燥产品的严重损伤, 使产品品质发生了不良的变化。因此传统热风干燥在食品工业中的应用受到限制。食品热风干燥的主要缺点是在降速阶段所需时间长、效率低。因为在此阶段食物料的热传导率较低, 所以传统加热过程中热量向物料内部的传递受到限制<sup>[3]</sup>。为了消除这种现象, 防止其品质下降, 实现快速、有效的热处理,

收稿日期: 2004-09-15; 修回日期: 2005-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(20576049).

作者简介: 张 愨(1962-), 男, 浙江平湖人, 教授, 工学博士, 博士研究生导师.

食品干燥过程中微波技术得到了广泛的应用。微波干燥比传统热风干燥更快、能效更高、产品品质更均一。在这个方法中,湿度的降低速度提高,而且,由于没有对流,热量向固体的传递得到显著的降低。因为微波干燥系统能量集中,与传统的热风干燥设备比较,只占用其20%~30%的空间。然而,微波技术如果应用不当也容易引起产品品质的下降<sup>[2]</sup>。

通常,干燥不是仅仅由电介质加热引起的,大部分微波干燥系统都结合了传统的干燥手段。几种手段可以分段进行,也可以同时进行。微波干燥和传统干燥一样,都是由于内部和表面的蒸汽压不同而产生水分迁移的驱动力。这种方法在水分含量低于20%的产品中最有效(Mudgett, 1989; Giese, 1992)。据报道,在微波技术的应用中,采用强制对流干燥和微波干燥的二段式干燥过程可以在节约能量和时间的同时得到品质更好的产品(Jeppson, 1964; Nury, Salunkhe, 1968)。水分在大部分食品体系(特别是高含水量果蔬)中占了很大的比例。因此,这些产品适合于应用微波技术,只要有残存水分就可以快速、有效的吸收微波的能量。微波应用于干燥具有很大的优势,例如,能量的吸收与残存的水分量成正比。蛋白质、油脂和其他的成分也可以吸收微波的能量,但是吸收率较低;干燥过程引起浸湿面从表面向内部退却。在传统的干燥系统中,作用在表面的热量必须穿透由于浸湿面后退而形成的绝热层。而在微波干燥系统中,微波可以轻易的穿透绝热层而被浸湿面的水分直接吸收。能量的迅速吸收引起了水分的快速蒸发,大大提高了传质速率<sup>[4]</sup>。

已有的研究表明,微波干燥适合于用在降速阶段或者低含水量时来完成干燥过程(Funebo & Ohlsson, 1998; Kostaropoulos & Saravacos, 1995)。另外,微波干燥可以通过改变输出功率来实现,如通过改变输出功率对胡萝卜进行的二段式微波干燥<sup>[2]</sup>。

近年来,微波干燥作为辅助干燥手段被广泛应用在水果、蔬菜、休闲食品和奶制品的生产中。已有报道<sup>[2]</sup> 酸奶酪(Kim and Bhowmik(1995))、酸果蔓(Yongsawatdigul and Gunasekaran (1996))、胡萝卜片(Lin, Durance, and Seaman (1998))、水果果冻(Drouzas and Saravacos (1999))、脱脂奶粉、全脂奶粉、酪蛋白粉、奶油和新鲜意大利面条(Al-Duri and McIntyre (1992))、马铃薯片(Bouraout, Richard, and Durance (1994))、葡萄(Tulasidas,

Raghavan, and Morris (1996))、苹果和蘑菇(Funebo and Ohlsson (1998))、西洋参(Ren and Chen (1998))等多种产品已经成功地应用了微波-真空干燥微波-对流干燥技术。

## 2 红外线辐射干燥

红外干燥技术是基于水分吸收红外辐射的特性。红外线(IR)波长范围是0.75~100  $\mu\text{m}$ ,其中可以细分为短波 IR(0.75~2  $\mu\text{m}$ ),中波 IR(2~4  $\mu\text{m}$ )和长波 IR(4~100  $\mu\text{m}$ )<sup>[5]</sup>。生物产品干燥的机理是水分从物料内部向周围空气的扩散过程。红外线穿透物料一定深度并提高它的温度,随着温度的提高,水的扩散速率提高,水分蒸发到物料的表面,水分被干燥空气带走,从而获得较快的干燥速率。

利用红外线辐射技术干燥食品的优点主要是干燥时间短,热效高,最终产品品质较好,产品干燥过程中温度均一,不需要有气流穿过物料(Dostie, Seguin, Maure, Ton-That, Chatingy, 1989; Mongpreneet, Abe, Tsurusaki, 2002; Navari, Andrieu, Gevaudan, 1992)。红外辐射还有一个优点就是可以和传统的干燥技术联合使用<sup>[6]</sup>。

Ginzburg (1969)、Yagi 和 Kunii (1951)在把红外技术应用在农业物料干燥方面做了早期的尝试。后来的研究证明,红外辐射与对流和真空干燥相结合是一项很有前途的干燥方法(Abe Afzal, 1997; Dontigny, Angers, Supino, 1992; Hasatani, Harai, Itaya, Onoda, 1983; Hasatani, Itaya, Miura, 1986)。用间歇红外辐射和连续对流加热联合干燥多孔物料比只用对流干燥节省20%的时间,同时产品具有良好的表面品质和较高的能效(Dostie, Seguin, Maure, Ton-That, & Chatingy, 1989)<sup>[7]</sup>。

利用高能量的红外加热器进行的土豆的远红外干燥可以实现较高的干燥速率(Masamura et al., 1988)。研究表明,当提供给远红外加热器的电能增加时,样品获得的温度也随之提高,从而获得了较高的干燥速率。为了进一步研究红外干燥的干燥机理和效果,Hashimoto, Hirota, Honda, et al. (1991)对远红外和红外干燥与热风干燥的热传递过程进行了定量比较。

## 3 冲击干燥

冲击干燥是利用单个或多个蒸汽喷嘴向物料表面垂直喷射气流。因为冲击喷射可以获得较高的热量和物质扩散系数,所以被应用在冷冻、加热

和干燥领域。干空气和过热蒸汽是在冲击干燥中最主要的两种干燥介质。用过热蒸汽作为干燥介质时,在干燥开始的瞬间会有部分水蒸汽凝结在产品的表面,就像过热蒸汽与冷的固体接触是发生的现象一样(Beeby & Potter, 1992)<sup>[8]</sup>。

冲击干燥的一些特征包括:干燥速度快、使用普遍、有多种喷嘴可供选择,喷射温度速率分别在100°C到350°C、10到100m/s范围内<sup>[9]</sup>。

在食品工业中,空气冲击干燥技术被用在烘焙和烹饪中,产品有玉米粉圆饼、土豆、比萨饼、饼干、面包和蛋糕等(Rickard, Wuertner & Barret, 1993)。这些产品比在对流烤箱中烘烤的更快、更均匀。在产品表面进行高速的空气冲击可以消除水气界面,从而加速热量传递,减少操作时间。空气连续流通以带走水分和重新加热<sup>[9]</sup>。

这项技术也已经应用在了咖啡、可可、大米和坚果等颗粒状产品的干燥中。喷嘴产生的高速气流可以产生一个空气床,使产品处于悬浮状态,从而形成一个虚拟的颗粒流化床。颗粒状产品将获得更高的干燥速率,并且水分含量分布均匀<sup>[9]</sup>。

Lujan-Acosta, Moreira, 和 Seyed-Yagoobi (1997)用空气冲击干燥技术干燥玉米圆饼。通过提高干燥空气温度可以显著的提高干燥速率,通过提高对流加热传递效率可以稍微的提高干燥速率。玉米圆饼在平衡水分含量时收缩10%到14%。空气温度对收缩率几乎没有影响,对流传热效率越低收缩越严重<sup>[9]</sup>。

过热蒸汽用于冲击干燥可以改善食品的质地,冲击干燥可以生产出比空气干燥更脆的油炸产品。在生产过程中,蒸汽可能引起产品质地的变化<sup>[9]</sup>。

## 4 渗透干燥

简单地讲,渗透就是溶剂穿过半透膜从低浓度溶液流向高浓度溶液,达到溶质化学势能平衡的过程(Aguilera & Stanley, 1999)。在食品中,渗透干燥是将含水物料浸在含有可食用溶质的高渗透压的水溶液中(果汁或盐水),实现物料的部分脱水的过程。如果膜是完美的半透膜,那么溶质就不会通过膜进入到细胞中。然而,由于食品中缺乏半透膜,总有一些溶质扩散到食品中,而食品中的一些内溶物流出,因此,渗透干燥中的物质传质实际上是水和溶质同时进行的连续的传质过程(Panagiotou, Karathanos, & Maroulis, 1998; Rahman & Perera, 1999; Raoult-Wack, 1994a)<sup>[10]</sup>。

渗透脱水与传统干燥方法的不同主要表现在

两点(Raoult-Wack, 1994a),首先,一个浸泡过程实现了脱水和配方加工的双重效果。第二,渗透脱水本身不能使产品达到品质稳定的低含水量,因此,经过渗透处理的产品需要进行进一步的加工,例如,热风、冷冻或者真空干燥等来达到产品品质要求,或者作为罐藏、冷藏和最低限度加工的预处理过程。最近,由于消费者对最低限度加工产品需求,使的渗透脱水过程受到了更多的关注<sup>[11]</sup>。

渗透脱水可以用来克服热加工对产品品质的不良影响(Farkas, Lazar, 1969)。研究表明,空气或者冷冻干燥的果蔬产品的品质可以通过在干燥过程中增加一步渗透干燥预处理来加以改善(Dixon, Jenn, Paynter, 1976; Flink, 1975, 1979)。然而,只有当渗透液是产品的必需物质,渗透过程不浪费时间的情况下,渗透脱水才能作为空气干燥的预处理。据Mazza (1983)报道,当浸泡胡萝卜块的蔗糖溶液的质量浓度从5 g/dL增加到60 g/dL时,水分的传质速率有所下降。这可能是由于溶解的蔗糖引起水蒸汽压下降造成的。另外,由于空气干燥过程中蔗糖的结晶,引起产品内水蒸汽扩散速率的下降。据Sankat, Cas taigne, 和 Maharaj (1996)报道,渗透处理过的香蕉片,随着蔗糖含量的升高干燥速率下降。氯化钠被认为是蔬菜的一种很好的渗透介质,由于氯化钠具有很高的水分活度,只要在渗透液中假如少量的氯化钠就会大大提高干燥过程的驱动力,同时也降低了水果的甜度(Adam-bounou, Cas taigne, Dillon, 1983; Lerici, Pinnavaia, Rosa, Bartolucci, 1985)。在空气干燥前,对胡椒粉用蔗糖和氯化钠联合进行局部渗透脱水,将对其保存品质有潜在的影响<sup>[11]</sup>。

## 5 卤素干燥

卤素干燥是在红外干燥的基础上发展起来的。卤素灯加热提供了近似的红外辐射(波长0.7~5 μm),比发射中波红外线的典型的红外源的穿透深度要深。在烤箱中用卤素灯加热,辐射主要集中在食品的表面,这样有助于从表面移走水分,防止了干燥产品的返潮<sup>[12]</sup>。当然,这种方法对挥发性物料存在一定的风险,然而,可以通过改变红外干燥参数的方法使产品的损失率达到其它干燥方法所能达到的水平。卤素灯—微波联合干燥结合了微波干燥省时的特点和卤素灯加热表面水分迁移的特点,是一项很有前景的干燥技术<sup>[13]</sup>。

## 6 流化床干燥(FBD)

在一个典型的流化床系统中,热空气被强制以

高速穿过床层,克服颗粒状物料重力的影响,使颗粒暂时处在一个流化状态。流化床干燥已经被证明是一个在有限干燥体积下实现最优化的有效方法。

流化床干燥已经在食品颗粒状物料、陶瓷、医药和农产品的干燥中得到了实际的应用。流化床干燥容易操作而且具有以下优点(Mujumdar, Devahastin, 2000):1. 由于气体和颗粒状物料充分接触,实现了最佳的热、质传质效率,从而得到了较高的干燥速率;2. 节省空间;3. 较高的热效率;4. 设备购置、维护费用低;5. 工艺条件容易控制。很多食品物料都适合于流化床干燥,例如,豆类、块状蔬菜、水果颗粒、洋葱片和果汁粉等(Jayaraman, Das Gupta, 1995)<sup>[1]</sup>。

## 7 冷冻干燥

冷冻干燥,也就是通常说的冻干法,广泛的应用在食品工业中来改善维生素等不稳定成分的稳定性和耐储藏性。冷冻干燥的产品不仅具有较好的稳定性,而且运输储藏方便。但是,冷冻干燥又是一个耗时、耗能的操作,如果工艺条件得不到优化的话,完成干燥过程可能需要几天甚至几周时间。所以,干燥产品的稳定性及耐储性和工艺时间是实现冷冻干燥工艺最优化的两个考虑的主要因素<sup>[14]</sup>。

由于设备昂贵,而且工艺周期长、操作费用高,所以经济性是冷冻干燥最主要的缺点。已经做了很多尝试去降低冷冻干燥的费用,例如与真空干燥联用,使用空气冷冻干燥(Boch-Ocansey, 1984, 1985; Goldblith et al., 1975; Mellor, 1978)。在减少干燥时间和费用方面, Hanson (1961)提出了快速冷冻干燥法(AFD)。这种方法是通过加大压入

产品内部的金属片,对产品两面同时加热来实现的<sup>[15]</sup>。

据 Ponting et al. (1966)、Farkas 和 Lazar (1969)报道,在冷冻干燥前先进行渗透干燥,可以脱除产品 50% 的水分,从而降低操作费用。Yang et al. (1987)利用渗透和冷冻联合干燥生产葡萄干获得了成功<sup>[16]</sup>。

微波技术在冷冻和真空干燥中的应用已经被多方报道。大部分微波冷冻干燥的研究都集中在建立热、质传质模型来评价微波冷冻干燥肉片的微结构和风味上。Chen et al. (1993)研究了冷冻干燥食品中易挥发物质的稳定性。Arsem and Ma (1990)建立了一个数学模型,用来发展微波辐射冷冻干燥机。Rahman (1978) and Rahman et al. (1978)研究了一个热处理过程,将易碎的冷冻的干燥水果和蔬菜在压摸前进行微波加热来提高它的可塑性。这个方法是先将食品微粒冷冻干燥到含水质量分数 35%, 然后进行一个短时的微波加热,紧接着压缩到原体积的 5~50%, 最后用空气和真空干燥法将压缩后的食品干燥到最终水分质量分数 5%<sup>[16]</sup>。

## 8 前景与展望

各种干燥技术既有各自的优点,又有其不同的局限性。因此,在不断完善各种干燥技术自身技术方法和设备的同时,根据物料的特点,将两种或两种以上的干燥方法优势互补,分阶段进行的联合干燥技术的研究已经成为一大趋势。这是一项很有潜力的新技术,它的理论的建立、完善和应用将向着更深更广的方向发展。

## 参考文献:

- [1] Chua K J, Chou S K. Low-cost drying methods fro developing countries[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2003 (14):519-528.
- [2] Wang J, Xi Y S. Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005,68,505-511.
- [3] Medeni Maskan. Microwave/air and microwave finish drying of banana[J]. *Journal of Food Engineering*, 2000,44,71-78.
- [4] Medeni Maskan. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001,48:177-182.
- [5] Dilip Jain; Pankaj B Pathare. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices[J]. *Biosystems Engineering*,2004, 89 (3), 289-296.
- [6] Sharma G P, Verma R C. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices[J]. *Journal of Food Engineering*, 2005,67:

361—366.

- [7] Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002,55:147—156.
- [8] Rosana G, Moreira. Impingement dring of foods using hot air and superheated steam[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001,49:291—295.
- [9] Louise M Braud, Rosana G Moreira, M Elena Castell-Perez. Mathematical modeling of impingement drying of corn torillas[J]. *Jorunal of Food Engineering*, 2001,50: 121—128.
- [10] Shyam S Sablani, M Shafiur Rahman, Dawood S Al-Sadeiri. Equilibrium distribution data for osmotic drying of apple cubes in sugar-water solution[J]. *Journal of Food Engineering* 2002,52:193—199.
- [11] Ade-Omowaye B I O, Rastogi N K, Angersbach A, et al. Combined e. ects of pulsed electric. eld pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying[J]. *Journal of Food Engineering*,2003,60:89—98.
- [12] Petra Heinze, Heinz-Dirter Isengard. Determination of the water content in different sugar syrups by halogen drying[J]. *Food Control*, 2001(12):483—486.
- [13] Gulum Sumnu, Elif Turabi, Mecit Oztop. Drying of carrots in microwave and halogen lamp-microwave combination ovens [J]. *LWT*, 2005,38: 549—553.
- [14] Xianlin(Charlie) Tang, Michael J Pikal. Design of freeze-drying processes for pharmaceuticals; practical advice[J]. *Pharmaceutical Research*, 2004,21(2).
- [15] Litvin S, Mannheim C H, Miltz J. Dehydration of carrots by a combination of freeze drying, microwave heating and air or vacuum drying[J]. *Journal of Food Engineering* 1998,36: 103—111.

(责任编辑:杨 萌)

(上接第 114 页)

- [61] 倪德江,陈玉琼,谢笔钧,等. 乌龙茶多糖 OTPS2-1 的光谱特性、形貌特征及热特性研究[J]. *高等学校化学学报*, 2004, 25(12):2263—2268.
- [62] 周杰,丁建平,王泽农,等. 茶多糖对小鼠血糖、血脂和免疫功能的影响[J]. *茶叶科学*, 1997,17(1):75—79.
- [63] 江和源,郑高利. 茶多糖降小鼠血糖功能的实验研究[J]. *食品科学*, 2004,25(6):166—169.
- [64] 倪德江,陈玉琼,谢笔钧,等. 绿茶、乌龙茶、红茶的茶多糖组成、抗氧化及降血糖作用研究[J]. *营养学报*, 2004,26(1): 57—60.
- [65] 陈建国,王茵,梅松等. 茶多糖降血糖、改善糖尿病症状作用的研究[J]. *营养学报*, 2003,25(3):253—255.
- [66] 王元凤,金征宇. 茶叶中多糖的分离及降血糖活性的研究[J]. *中草药*. 2005,36(10):1453—1457.
- [67] 朱力军,王淑如. 脂蛋白脂酶的制备及茶叶多糖对该酶的影响[J]. *中国药科大学学报*, 1992,23(5):287—289.
- [68] 王淑如,王丁刚. 茶叶多糖的抗凝血及抗血栓作用[J]. *中草药*, 1992,23(5):254—256.
- [69] 王丁刚,王淑如. 茶叶多糖心血管系统的部分药理作用[J]. *中草药*, 1991,2:4—5.
- [70] 汪东风,谢晓凤. 粗老茶中的多糖含量及其保健作用[J]. *茶叶科学*, 1994,14(2):73—74.
- [71] 江秀丽,金涌,李俊,等. 几种茶叶多糖对佐剂性关节炎大鼠免疫指标的影响[J]. *安徽医药*, 1998,2(2):15—17.
- [72] 杨敏,赵文华,王书奉,等. 粗老茶中的茶多糖对免疫功能的影响[J]. *时珍国医国药*, 1997,8(4):310—311.
- [73] 杨光,李发胜,罗红,等. 茶叶多糖对小鼠激发态免疫功能影响的研究[J]. *中医药学刊*, 2004,22(12):2294—2295.
- [74] 刘立军,韩驰,陈碧石. 茶叶防癌有效成份的短期细胞生物学筛选[J]. *卫生研究*, 1998,27(1):53—56.
- [75] 祁禄,韩驰. 茶叶防癌有效组分对 NAD(P)H-醌还原酶的诱导作用[J]. *卫生研究*, 1998,27(5):323—326.
- [76] 邓俊林,许平. 茶叶多糖对小白鼠红细胞内 SOD 活性的影响[J]. *渝州大学学报:自然科学版*, 1998,15(4):30—32.
- [77] 倪德江,陈玉琼,宋春和,等. 乌龙茶多糖对糖尿病大鼠肝肾抗氧化功能及组织形态的影响[J]. *茶叶科学*, 2003,23 (1):11—15.
- [78] 聂少平,谢明勇,罗珍. 茶叶多糖的抗氧化活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2005,17(5):549—552.
- [79] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

(责任编辑:朱 明)