

# 微波真空冷冻干燥装置设计与试验\*

曹有福 韩清华 李树君 杨炳南 赵庆亮 马季威

(中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

**【摘要】** 阐述了微波真空冷冻干燥装置的总体结构、工作原理以及微波冻干仓的设计要点,详细分析了微波谐振腔、微波真空屏蔽结构和玻璃真空罩的设计,确定了主要工作部件的具体结构和相关参数。冬枣冻干试验研究表明,整机结构合理,性能稳定,安全可靠;与普通真空冷冻干燥相比,在产品质量相同的条件下,干燥时间节省了40.9%,能耗降低55.86%。

**关键词:** 微波 真空冷冻干燥 设计 试验

**中图分类号:** TQ028.6<sup>+</sup>77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0105-04

## Design and Experiment on Microwave Vacuum Freeze Drying Equipment

Cao Youfu Han Qinghua Li Shujun Yang Bingnan Zhao Qingliang Ma Jiwei

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

### Abstract

The overall structure, working principle and design points of microwave vacuum freeze drying equipment were described. A detailed analysis on microwave syntony cavity, microwave shielding structure and the design of glass vacuum cover was made. The specific structure and related parameters of main working parts were determined. The study on freeze drying of winter Chinese date showed that the equipment had the characteristics of rational structure, stable performance, and safe and reliable running process. Compared to the ordinary vacuum freeze-drying technology, it could produce the same quality product while saving 40.9% drying time and 55.86% energy.

**Key words** Microwave, Vacuum freeze drying, Design, Experiment

### 引言

微波真空冷冻干燥是一种新型的真空冷冻干燥技术,采用微波干燥介质整体加热,无需其他传热媒介的辐射传能,具有速度快、干燥时间短、效率高、能耗低的技术优势<sup>[1-2]</sup>,提供真空冷冻干燥过程中所需的升华潜热,避免了传导过程中的传热阻力和热量损耗,因此缩短了冻干时间,降低了干燥成本,克服了常规真空冷冻干燥存在的干燥时间长、能量消耗大、干燥成本高的缺点<sup>[3-5]</sup>。本文设计一种微波真空冷冻干燥装置,将微波冷冻干燥与常规冷冻干燥集于一体,两种冷冻干燥方式既可以单独操作,也

可以同时进行,并利用该装置以红枣为原料进行整机性能验证试验。

## 1 主要结构与设计要点

### 1.1 主要结构

微波真空冷冻干燥装置由微波系统、真空系统、制冷系统和控制系统等组成,该装置分设常规冻干与微波冻干两个仓体,共用一套真空系统和制冷系统,用截止阀将两仓连接,截止阀关闭时只能完成常规冻干,当截止阀打开,两种干燥方式可同时完成,如果只要进行微波冻干,则关闭红外加热装置即可。微波真空冷冻干燥装置结构示意图如图1所示。该

机的微波真空冷冻干燥工作机理是由冷阱捕获升华出的水蒸气,真空泵抽除不凝结气体,制冷系统与真空系统配合作用,来维持干燥仓内完成升华所需的真空状态(30~100 Pa),微波系统提供冰晶升华所需的升华潜热,保证物料中水分经预冻后形成的冰晶不断升华。控制系统是整个装置的控制中枢,装置完成的一切功能均由控制系统操纵完成。

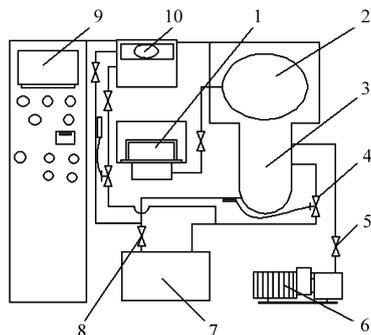


图1 微波真空冷冻干燥装置结构示意图

Fig.1 Schematic drawing of microwave freeze drying equipment

- 1.微波冻干仓 2.常规冻干仓 3.冷阱 4.热力膨胀阀 5.隔膜阀  
6.真空泵 7.压缩机 8.截止阀 9.控制系统 10.速冻仓

## 1.2 微波冻干仓

微波冻干仓是微波真空冷冻干燥装置最关键的部件。微波冻干仓的结构如图2所示,分为内外两层,外层是微波谐振腔,内层是由玻璃真空罩和不锈钢真空仓体组成的真空仓,玻璃真空罩起到了既透微波又密封真空的作用,真空罩外表面是常压环境,内表面为真空环境,真空罩是真空和常压环境的临界面。在玻璃真空罩和不锈钢真空仓体之间放置微波屏蔽板,将微波屏蔽在玻璃罩内,避免微波进入不锈钢真空仓体内。如何有效解决微波真空放电、微波真空屏蔽以及微波场均匀性的问题,是微波冻干仓的设计关键。

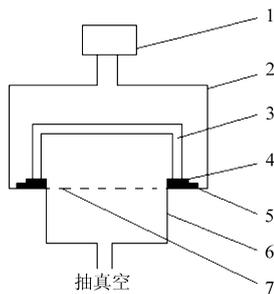


图2 微波冻干仓结构示意图

Fig.2 Schematic drawing of microwave freeze drying chamber

- 1.磁控管 2.微波谐振腔  
3.玻璃真空罩 4.硅胶垫  
5.密封法兰 6.不锈钢真空仓体 7.微波屏蔽板

## 2 主要部件设计

### 2.1 微波谐振腔

微波冻干仓按批次冷冻干燥200g鲜枣,鲜枣含水率80%,冻干枣含水率按4%计算,升华158g水分需要吸收能量446.48kJ,按升华时间6h计算,

因此配备的微波输出功率计算值为20.69W,考虑加热效率和微波转换效率,微波输出功率设计为41.37W。选用MY1000S型可调微波功率源,磁控管型号为M24FB-210A,微波功率源在0~750W范围内可任意调节。

根据微波功率最大值750W,常压环境的最大功率耗散密度确定为 $10^6 \text{ W/m}^3$ ,可计算出微波谐振腔的最小体积为 $7.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ,考虑物料系数、机械结构及微波均匀性等因素,确定微波谐振腔为矩形腔,腔体外形尺寸为 $0.33 \text{ m} \times 0.33 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ ,体积为 $0.02178 \text{ m}^3$ ,远大于腔体最小体积的要求,满足设计要求。

微波谐振腔结构示意图如图3所示。为了提高谐振腔内微波场的均匀性,采用微波搅拌器增加腔内微波的模式,较多模式的电磁场叠加使得整个腔体微波场比较均匀。微波能通过波导馈入谐振腔,在波导馈入口处放置小电动机,通过传动轴带动搅拌器转动,微波幅射到搅拌器表面,会按照光反射规律发生反射,随着搅拌器的匀速转动,微波振荡模式在整个谐振腔内转动变化、相互重叠,从而达到相对均匀分布的效果。谐振腔采用4mm陶瓷板将其分为上下两层,微波对陶瓷板具有穿透性,陶瓷板不会吸收微波能,保证微波能作用于下层的物料,也保证上层的微波导入部分不会进入水蒸气、灰尘等杂质,影响微波能的转换效率。

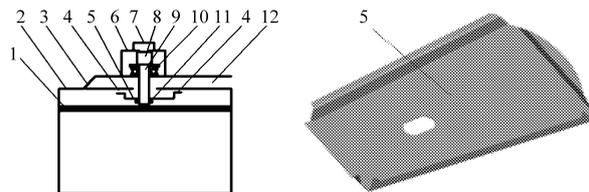


图3 微波谐振腔结构示意图

Fig.3 Schematic drawing of microwave syntony cavity

- 1.陶瓷板 2.谐振腔壁 3.波导壁 4.转动微波入口 5.搅拌器  
6.保护罩 7.电动机 8.联轴器 9.传动轴 10.推力轴承  
11.螺母 12.波导

利用二氯化钴结晶体在不同温度条件下水分子含量不同呈现不同颜色的特征,对微波场的均匀性进行了测试,其具体测试方法见文献[6~8],测试结果见图4。从测试结果可以看出,与转盘式微波炉相比,设计的微波谐振腔温度分布基本均匀,表明微波场的均匀性较好,达到预期设计目标。

### 2.2 微波真空屏蔽结构

微波真空屏蔽结构如图5所示。密封法兰与谐振腔底部接触,不锈钢真空仓体靠自重悬吊在谐振腔外部,密封法兰的表面加工精度较高,表面非常光滑平整,保证密封法兰底面与微波谐振腔底部紧密

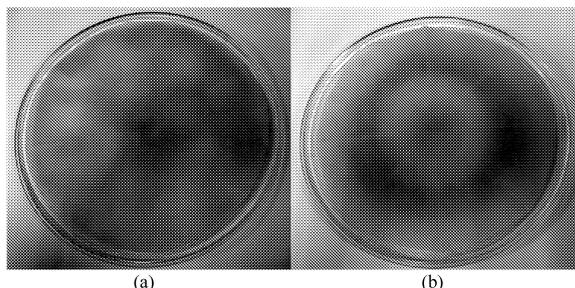


图 4 干燥仓的温度场分布图

Fig. 4 Mapping of the temperature distribution in drying chamber

(a) 冻干机谐振腔 (b) 微波炉

接触,微波完全屏蔽在谐振腔内,不会造成微波泄漏。在法兰中间焊有一块 2 mm 厚的微波屏蔽板,均匀分布孔径为 2.5 mm,孔间距为 7 mm 的孔阵。该孔阵可以将微波屏蔽在玻璃真空罩内,防止微波辐射到不锈钢真空仓体内,还可使物料升华的水蒸气通过小孔经真空管抽吸到冷阱而被捕获。

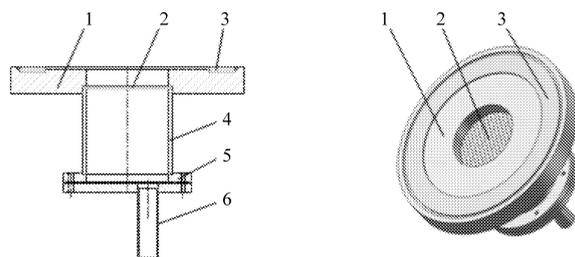


图 5 微波真空屏蔽结构示意图

Fig. 5 Schematic drawing of microwave shield structure at lower pressure condition

- 1. 密封法兰 2. 微波屏蔽板 3. 硅胶垫 4. 不锈钢真空仓体
- 5. 下法兰 6. 真空管

密封法兰设有一圈凹槽,放置耐高温硅胶垫,截面积尺寸为 15 mm × 4 mm,玻璃真空罩放置于硅胶垫上部,与不锈钢真空仓体组成真空仓,硅胶垫起到真空密封的作用,防止真空仓内真空泄漏而导致真空度的降低。

### 2.3 玻璃真空罩

在真空状态下,由于真空度提高,降低了空气的击穿场强,使气体分子易被电场电离,从而出现气体击穿、拉弧放电现象<sup>[9-10]</sup>。玻璃罩是真空和常压环境的分界面,最易发生微波真空放电现象,同时玻璃真空罩还应满足压力容器的设计要求和规范。

微波真空放电是一个相当复杂的过程,受到真空压力、微波能馈入面积和物料质量等因素的影响。选取成熟度一致、无霉变的冬枣为原料,清洗后去核切成 8 mm 枣片,在 -25℃ 的速冻仓内进行预冻,分别选择质量 120、160、200 g 的枣片,在微波馈入面积为 37 cm<sup>2</sup> 和 350 cm<sup>2</sup> 的条件下,选取不同的压力梯度进行微波放电试验,读取放电点所对应的微波最低功率值。

表 1 是馈入面积为 350 cm<sup>2</sup>,物料质量为 200 g 的特定工况条件下,放电点微波最低功率值随压力的变化关系,从表 1 可以看出,随着压力升高,放电点微波最低功率逐渐增大,压力在 0.05 ~ 0.2 kPa 之间,放电点微波最低功率值为 175 W,当压力上升到 0.2 ~ 0.4 kPa 之间,放电点微波最低功率值增加到 225 W,当压力达到 2.7 kPa 时,放电现象消失。可见压力越低,气体分子越容易电离,微波放电的概率越高。

表 1 馈入面积 350 cm<sup>2</sup>、物料质量 200 g 时,不同压力下放电点微波最低功率

Tab. 1 Minimum power values of discharge point at different absolute pressures, when microwave input port area is 350 cm<sup>2</sup> and the date weight is 200 g

真空压力/kPa	0.05 ~ 0.2	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.6	0.6 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 2.6	2.7
放电点微波最低功率/W	175	225	290	365	405	450	520	645	750	不放电

表 2 是馈入面积分别为 37 cm<sup>2</sup> 和 350 cm<sup>2</sup> 时,在 0.05 ~ 0.2 kPa 相同压力条件下,不同物料质量对应放电点微波最低功率值的分布规律。表 2 可以看出,馈入面积为 37 cm<sup>2</sup> 和枣片质量为 120 g 的放电点微波最低功率值为 48 W。馈入面积为 350 cm<sup>2</sup> 和枣片质量为 200 g 时,放电点微波最低功率增加了 2.6 倍,达到 175 W,因此放电点微波最低功率值与馈入面积和枣片质量呈正相关,馈入面积越大,放电点微波最低功率值越大,馈入的能量越高,放电现象产生的概率越小。枣片质量越大,放电点微波最低功率值越高,放电产生的概率也越小。

表 2 相同压力下,馈入面积分别为 37 cm<sup>2</sup> 和 350 cm<sup>2</sup> 时,不同枣片质量对应放电点微波最低功率

Tab. 2 Minimum power values of discharge point corresponding to different data weights at the same pressure, when microwave input port area is 37 cm<sup>2</sup> and 350 cm<sup>2</sup> respectively

物料质量/g	馈入面积/cm <sup>2</sup>	
	37	350
120	48	82
160	72	121
200	105	175

通过上述分析可知,设计玻璃真空罩时,玻璃真空罩的馈入面积越大,馈入到真空罩内的微波能越多;物料进行微波真空冷冻干燥时,要保证有足够多的物料量,以防止微波放电现象的产生。考虑微波谐振腔的结构,确定玻璃真空罩的内径为 250 mm,高度为 120 mm。玻璃真空罩属于压力容器,筒体的设计压力应小于许用外压力,即

$$p_s < [p]$$

$$[p] = \frac{B}{D_0/\delta_i}$$

式中  $p_s$ ——设计压力,MPa

$[p]$ ——许用外压力,MPa

$D_0$ ——圆筒外径,mm  $B$ ——系数

$\delta_i$ ——圆筒的计算壁厚,mm

筒体材料为玻璃,圆筒的计算壁厚为 10 mm,查相关压力容器设计手册可得各参数,计算出许用外压力  $[p] = 4.74047$  MPa,设计压力  $p_s$  为 0.1 MPa,因此  $[p] > p_s$ ,满足设计条件。通过压力校核,确定真空罩的实际壁厚为 10 mm。该玻璃真空罩的馈入面积为 1433 cm<sup>2</sup>,压力在 50 ~ 200 Pa 范围内,枣片质量为 200 g 时放电点微波最低功率可达到 347 W,可以满足微波真空冷冻干燥所需要提供的微波能要求。

### 3 冬枣冻干试验

选用新鲜冬枣为原料对该机进行性能验证试验,将冬枣去核后切成 8 mm 厚的枣片,各取 200 g 经 -18℃ 预冻后,分别采用微波真空冷冻干燥和常规真空冷冻干燥两种方式进行干燥。其中,微波冻干工况:真空度 60 ~ 70 Pa,微波功率(120 ± 20) W,干燥时间 6.5 h,冬枣成品含水率为 4.3%。常规冻干工况为:真空度设为 60 ~ 70 Pa,在干燥初期,干燥温度为 80℃,干燥时间为 1 h,然后在 1 h 内将干燥温度缓慢降至 70℃,持续干燥 3 ~ 4 h,进入干燥末期,在 1 h 内将干燥温度缓慢降至 50℃,持续干燥 5 ~ 6 h,干燥冬枣的含水率为 4.5%。

试验结果表明:微波冻干加工的冬枣在产品质量上与常规冻干产品相近,保持了新鲜冬枣原有的形态和组织结构,为海绵状多孔组织,外形收缩率

小,有较强的复水性和持水能力;常规真空冷冻干燥的总干燥时间为 11 h,微波冻干节省了 40.9% 的干燥时间。由于微波冻干期间的平均功率为 1382 W,干燥时间 6.5 h 内的总能耗是 8.983 kW·h,常规冻干期间的平均功率为 1850 W,干燥时间 11 h 内的总能耗是 20.35 kW·h,与常规冻干相比微波冻干节省能耗 55.86%。本微波真空冷冻干燥试验台的试验性能参数如表 3 所示。由此可见,微波冻干装置的结构设计合理,参数选择正确,操作方便,性能稳定,其各项指标符合相关标准,达到设计要求。

表 3 微波真空冷冻干燥装置性能参数

Tab.3 Performance parameters of microwave freeze drying equipment

参数	设计值	测定值
生产能力(以鲜料计)/kg·批 <sup>-1</sup>	0.2	0.2
冻干时间/h·批 <sup>-1</sup>	6 ~ 8	6.5
真空度/Pa	< 100	30 ~ 90
微波输出功率/W	0 ~ 500	0 ~ 500
微波泄漏量/mW·cm <sup>-2</sup>	< 1	< 1

### 4 结论

(1) 微波冻干仓采用外层微波谐振腔,内层由玻璃真空罩和不锈钢真空仓体组成真空仓的分体布局结构,有利于解决微波屏蔽和真空密封的问题。

(2) 微波谐振腔采用微波搅拌器增加腔内的微波模式,较多模式的叠加提高了腔内微波场的均匀性;微波屏蔽板采用均匀分布孔阵结构将微波屏蔽在谐振腔内,不会造成微波泄漏。

(3) 分析真空压力、馈入面积和枣片质量对放电点微波最低功率的变化影响,得出放电点微波最低功率与真空压力、馈入面积和枣片质量成正相关,玻璃真空罩的馈入面积越大,馈入到真空罩内的微波能越多,从而确定玻璃真空罩的结构和尺寸。

(4) 冬枣的冻干试验表明,微波冻干装置的结构设计合理,参数选择正确,操作方便,性能稳定,其各项指标符合设计要求。微波冻干加工的冬枣在产品质量上与常规冻干产品相近,干燥时间比常规冻干节省了 40.9%,能耗降低 55.86%。

### 参 考 文 献

- 1 汤大卫,张天使. 微波真空干燥技术的应用和前景[J]. 医药工程设计杂志,2000,21(5): 195 ~ 198.  
Tang Dawei, Zhang Tianshi. Application and future of microwave vacuum drying technology[J]. Pharmaceutical Engineering Design,2000,21(5): 195 ~ 198. (in Chinese)
- 2 Reza G Askari, Zahra Emam-Djomeh, Mohammad Ali Mousavi. Effect of drying method on micro-structural changes of apples [C]//IDS 2004 Proceedings, Brazil,2004: 1435 ~ 1441.

- 'Kensington Pride' mango fruit[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1999,39(3):345~349.
- 11 Zhang H, Hashinaga F. Effect of high electric field on quality of Satsuma mandarin fruits[J]. J. Soc. High-Tech. Agri., 1997,9(2):107~113.
- 12 Shivashankara K S, Isobe S, Al-Haq M I, et al. Fruit antioxidant activity, ascorbic acid, total phenol, quercetin, and carotene of Irwin mango fruits stored at low temperature after high electric field pretreatment [J]. J. Agric. Food Chem., 2004,52(5):1281~1286.
- 13 Bajgai T R, Hashinaga F, Isobe S, et al. Application of high field on the shelf-life extension of emblic fruit (*Phyllanthus emblica* L.) [J]. J. Food Eng., 2006,74(3):308~313.
- 14 范美华,张昆宁,平慧敏. 高压静电场对豌豆荚的保鲜实验初探[J]. 云南大学学报,1998,20(增刊):25~26.  
Fan Meihua, Zhang Kunning, Ping Huimin. A tentative experiment of pea pods preserved under the circumstances of high electrostatic field [J]. Journal of Yunnan University, 1998,20(Supp.):25~26. (in Chinese)
- 15 富田節雄. 電場付予による青果物の鮮度保持[J]. 農産物流通技術会報,1992(21):10~16.
- 16 王愈,李里特. 高压电场处理对贮藏番茄活性氧代谢的调节[J]. 农业工程学报,2009,25(1):255~259.  
Wang Yu, Li Lite. Regulation of high voltage electric field on metabolism of active oxygen species in tomato fruits during storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(1):255~259. (in Chinese)
- 

(上接第108页)

- 3 王朝晖. 微波冷冻干燥过程的传热传质机理[D]. 南京:东南大学,1996.  
Wang Zhaohui. Heat and mass transfer during microwave freeze-drying [D]. Nanjing: Southeast University, 1996. (in Chinese)
- 4 Copson D A. Microwave heating[M]. New York: AVI Publishing Co. Inc., 1975.
- 5 钱鸿森. 微波加热技术及应用[M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1985.
- 6 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[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2007.  
Han Qinghua. Study on the mechanism & quality of microwave vacuum and drying & puffing apple slices and machine design [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2007. (in Chinese)
- 7 Plaza Gonzalez P, Monzo Cabrera J, Catala Civera J M, et al. New approach for the prediction of the electric field distribution in multimode microwave-heating applicators with mode stirrers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004,40(3):1672~1678.
- 8 白向钰,吴苏,鹿安理,等. 陶瓷材料微波加工用高均匀度多模谐振腔的研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(2):37~39.  
Bai Xiangyu, Wu Su, Lu Anli, et al. Study on the multimode cavity with high uniformity used for microwave processing of ceramics [J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology, 1998,38(2):37~39. (in Chinese)
- 9 韩清华,李树君,马季威,等. 连续式微波真空干燥设备的研究[J]. 农业机械学报,2006,37(8):136~139.  
Han Qinghua, Li Shujun, Ma Jiwei, et al. Study on continuous microwave vacuum drying equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(8):136~139. (in Chinese)
- 10 张兆镗,钟若青. 微波加热技术基础[M]. 北京:电子工业出版社,1988.