

# TH - FD55 × 2 食品真空冷冻干燥机加热系统

童建民, 徐 光

(清华大学 核能技术设计研究院, 北京 100084)

**摘 要:** 介绍了 TH - FD55 × 2 真空冷冻干燥机加热系统。该系统以饱和蒸汽为热源, 采用将热媒通入空心加热板的辐射加热方式, 用热媒加热罐蓄能和稳压, 通过三通调节阀和板式换热器精确调节加热板温度。具有加热均匀、热效率高、控温精确、可靠性高的特点。

**关键词:** 真空冷冻干燥; 加热系统; 调节阀; 板式换热器

中图分类号: TQ051.5; TB65

文献标识码: A

文章编号: 1006 - 7086(2001)01 - 0038 - 03

## HEATING SYSTEM OF TH-FD55 × 2 FOOD VACUUM FREEZE DRYING MACHINE

TONG Jian-min, XU Guang

(INET, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The heating system of TH - FD55 × 2 food vacuum freeze drying machine uses the saturated steam as the heating source, the heating medium is input through the hollow plate in the radiation heating manner, the heating medium tank is used to store energy and stabilize pressure, the three-way control valve and the plate heat exchanger are used to accurately adjust the temperature of the heating plate. The system has the properties of well-distributed heating, high heating efficiency, accurate temperature controlling and high reliability.

**Key Words:** vacuum freeze drying; heating system; control valve; plate heating exchanger

### 1 引 言

在食品冻干过程中, 升华、解析干燥和冷阱捕冰同时进行, 是食品冻干的主要阶段, 也是决定冻干生产率、冻干产品质量、干品残余含水率、不合格品率、单位产品能耗的关键过程。加热系统的作用是在保证干燥仓内稳定的工作真空度条件下, 对食品持续供给升华热, 精确控制食品各部分温度, 使食品达到最终要求的残余含水率和合格品率<sup>[1]</sup>。

### 2 食品冻干工艺对加热系统的要求

食品在干燥仓中的干燥过程大致可分为 3 个阶段:

(1) 匀速升华或最大加热功率阶段(*a*)。此时要求加热系统持续提供足够的升华热, 该阶段时间约占整个干燥周期的 30%, 而脱水量却达 70%, 是提高干燥效率、缩短干燥周期的重要阶段, 该阶段的结束以食品上表面温度接近食品崩解温度为标志。

(2) 降速升华或加热功率递减阶段(*b*)。该阶段要求食品已干层温度低于最高允许温度, 冻结层温度不超过升华温度, 仓内真空度在允许范围内。该阶段约占整个干燥周期 40% 的时间, 脱去约 25% 的水分, 以食品最低温度达到 0℃ 为结束标志。该阶段要求加热系统能精确控制加热板输出功率、加热板热惯性小、控温精确、加热均匀性好。

(3) 解析干燥或最小加热功率阶段(*c*)。此时食品中冰的升华已结束, 少量未冻结的结合水将通过解

析干燥除去, 最终达到要求的干品残余含水率和合格品率, 该阶段约占整个干燥周期的 30%。

在(a)、(b)干燥阶段, 如果加热板对食品加热不均匀, 即在托盘总有效干燥面积上加热热流密度不均匀, 同一层面上的食品干燥速率就不均匀, 使各部分食品达到干燥终点的时间相差较大。为保证产品质量和合格品率, 就必须延长(c)阶段干燥时间, 从而降低了生产率, 提高了能耗和成本。因此, 加热均匀性是加热系统非常重要的指标。图1是食品冻干曲线示意图, 其中 $T_{p\max}$ 、 $T_{p\min}$ 是加热板最高、最低温度,  $T_{f\max}$ 、 $T_{f\min}$ 是食品最高、最低温度, 曲线1、2、3分别为食品上表面、下表面、中部的温度曲线。

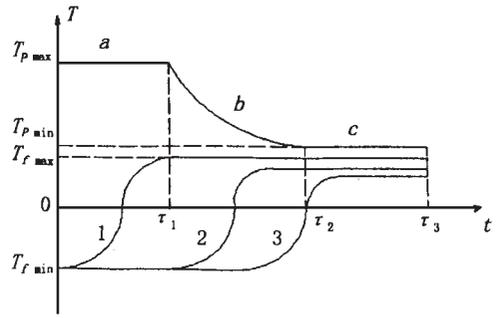


图1 食品冻干曲线示意图

### 3 加热系统组成及特点

#### 3.1 加热系统组成

本系统以饱和蒸汽为热源, 以一种水性热媒为载体, 通过特殊制造的中空铝合金加热板以非接触辐射加热方式对食品加热。系统组成示意图如图2所示。

#### 3.2 加热系统主要技术参数

加热板数量: 26 块/仓; 托盘总有效干燥面积: 55 m<sup>2</sup>/仓; 加热板工作温度: 室温 ~ 120 ℃; 加热罐工作温度: 130 ~ 140 ℃; 加热罐工作压力: 0.4 ~ 0.5 MPa; 加热板最大输出功率: 1.8 kW/m<sup>2</sup>(托盘面积); 加热板最大升温速率: 15 min 内从 30 ℃ 升到 120 ℃; 加热板最大降温速率: 25 min 内从 120 ℃ 降到 30 ℃; 加热板控温精度: ±1 ℃。

#### 3.3 加热系统运行及特点

为满足冻干工艺对加热系统的要求, 本系统具有以下特点:

(1) 热媒加热罐作为加热系统蓄能和稳压装置, 由蒸汽通过高效双纹管换热器将热媒预先加热到 130 ~ 140 ℃ 并恒温控制, 同时通过控制氮气的通入及排放保持罐内压力恒定, 以稳定热媒的热工水力学特性, 避免热媒在循环回路内汽化。在匀速升华阶段, 加热罐内热媒能使加热板迅速升温到 120 ℃, 并提供加热板最大加热功率; 在解析干燥阶段, 加热罐能蓄积多余热能, 供下批次干燥使用。

(2) 特殊设计和特种工艺制造的中空铝合金加热板<sup>[2]</sup>, 表面阳极氧化处理, 内部多流程、低流阻设计; 每仓 26 块加热板分成 2 套各 13 块对称布置、上下排列的加热板组件, 竖联箱采用均流设计; 在加热板组件暴露在仓壁和冷阱的区域装有镜面不锈钢反辐射板, 减小加热板热辐射损失; 每块加热板中的热媒循环采用大流量、小温差设计, 使加热板输出最大功率时, 进出口热媒温差小于 3 ℃; 该加热板内部换热系数是普通板式换热器的近 20 倍, 且板层薄 (仅 12.7 mm) 热容量小。因此, 加热板在全部托盘总有效干燥面积上热辐射均匀、热流密度大、热惯性小。

(3) 用智能定位器控制三通调节阀<sup>[3]</sup>, 调节来自加热罐的新鲜热媒和加热板回流热媒的混合比, 并控制板式换热器冷却水电磁阀的开闭, 精确调节干燥仓出口热媒温度, 从而精确控制加热板温度。

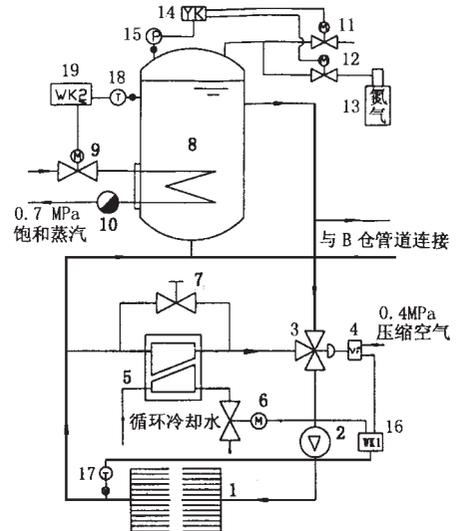


图2 加热系统组成示意图

1. 加热板组件; 2. 热媒循环泵; 3. 三通调节阀; 4. 智能电气阀门定位器; 5. 板式换热器; 6. 电磁阀门; 7. 截止阀; 8. 加热罐; 9. 蒸气电磁阀; 10. 疏水阀; 11、12. 电磁阀; 13. 氮气瓶; 14. 压力控制器; 15. 压力变送器; 16. 可编程温度控制仪; 17、18. 温度传感器; 19. 温控表。

## 4 加热系统性能测试

### 4.1 最大加热功率测试

用纯冰作为试验对象(可忽略冰的升温和升华阻力),测试加热板的最大加热功率,考察加热板的升温速率和加热罐的加热能力。具体试验过程如下:将3台小车推入速冻库并固定平稳,将托盘加满水,然后开启速冻库对水速冻,速冻2 h后,刨去托盘中凸起的冰,然后对每一个托盘称重并记录,称重完毕将小车推入速冻库再速冻0.5 h;将3台小车推入干燥仓,抽空;加热板迅速升温至120℃并控温,期间控制冷阱温度和真空度;干燥4 h后,停止加热并充气,将小车拉出干燥仓并对每一个托盘称重。

算出总脱水量,并假设加热板输出功率有90%用于冰的升华热,即可算出加热板的加热功率。试验结果如下:(1)加热板温度为120℃时加热功率达1.8 kW/m<sup>2</sup>(托盘面积);(2)加热板从室温升到120℃约12 min;(3)加热罐能持续提供加热板的最大加热功率,并恒温控制在130℃;(4)控温精度达±1℃。

### 4.2 加热均匀性测试<sup>[4]</sup>

用均匀锯屑作为试验对象,(因为锯屑颗粒小、尺寸均匀、含水率均匀,可排除颗粒不均、层厚不均带来的不均匀性影响),考察冻干机加热均匀性。具体试验过程如下:将锯屑过筛后搅拌均匀,将288个托盘每盘装2 kg锯屑和4 kg水,搅拌并浸泡均匀,将锯屑抹平,使每盘层厚均匀,然后装到6台小车上;将6台小车分两批间隔2 h推入-35℃速冻库中速冻3 h;将3台小车推入A干燥仓,抽空,冻干,加热板升温至120℃后逐步降温,控制料层上表面温度不超过45℃,期间控制冷阱温度为-33~-40℃,真空度40~60 Pa;A仓抽空1 h后,将另3台小车推入B干燥仓,然后按A仓相同的过程操作;B仓干燥9 h(同时A仓已干燥10 h)后,同时停止A、B仓加热,充气后拉出6台小车,对288个托盘编号,并逐一称重。

算出每个托盘的脱水量,分别对A、B仓绘出上下12层、左右2列、前后6列三个方向的平均脱水量分布,如图3所示。

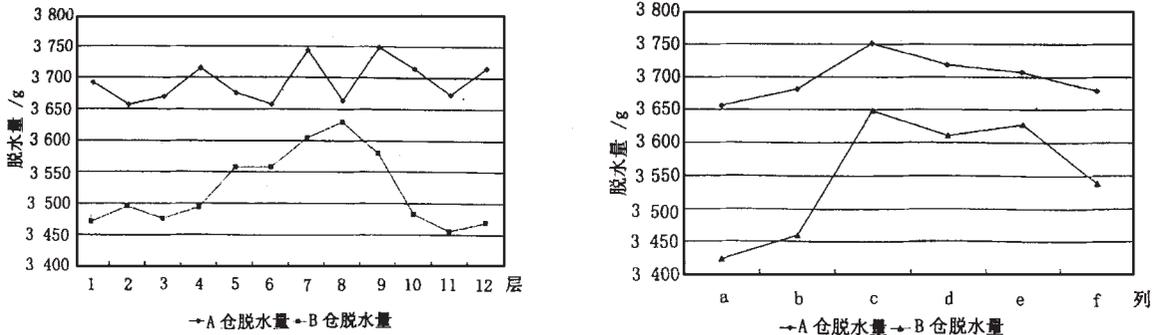


图3 A、B干燥仓上下、前后方向平均脱水量分布图

试验结果如下:(1)A仓左右两侧托盘平均脱水量偏差为0.23%,B仓左右两侧托盘平均脱水量偏差为1.01%,说明左右两侧加热对称性很好;(2)A仓上下12层间平均脱水量偏差为2.60%,B仓上下12层间平均脱水量偏差为5.10%;(3)A仓前后6列间平均脱水量偏差为2.60%,B仓前后6列间平均脱水量偏差为6.70%;(4)冷阱前后、上下冷管结冰均匀,总捕水量超过指标。

## 5 结论

(1)该加热系统以饱和蒸汽为热源,利用热媒强制循环和加热板辐射加热提供冻干升华热,系统设计合理、紧凑,运行稳定、可靠,易操作,易维护。

(2)通过加热罐蓄能和稳压,用三通调节阀和板式换热器控制加热板温度,控制特性好,控温精度可达±1℃,通过纯冰试验测得加热板最大加热功率达1.8 kW/m<sup>2</sup>(托盘面积)。

(3)由均匀性试验可见,在满负荷运行时,加热板在全部托盘面积上的加热均匀性良好,能有效缩短干燥周期,提高生产率,降低能耗。

了两种锥形脉管结构——渐缩型和渐扩型的锥形脉管结构。计算和实验研究表明,在一定条件下,这两种锥形脉管结构对于改善制冷机的性能均有利。

参考文献:

- [1] 许成名,何雅玲,陈钟欣. 多截面脉管制冷机——一种新型脉管制冷机[J]. 工程热物理学报,1996,17(2):504.
- [2] Zhu S-W, Wu P-Y, Chen Z-Q. Double inlet pulse tube refrigerator: An important improvement[J]. Cryogenics, 1990, 30: 514 ~ 520.
- [3] EUU SOO JEONG. Secondary flow in basic pulse tube refrigerator[J]. Cryogenics, 1996 36: 317.
- [4] OLSON JR, SWIFTGW. Acoustic streaming in pulse tube refrigerator: tapered pulse tubes[J]. Cryogenics, 1990, 37: 769.
- [5] SWIFT G, ALLEN M, WOOLAN J J. Performance of a tapered pulse tube [R]. NTIS, No: DE98003368/XAB.
- [6] GAO CH-M, HE Y-L, CHEN ZH-Q. Numerical simulation of convergent and divergent tapered pulse tube cryocoolers and experimental verification[C]. JSJS6, Lanzhou, China, 2000, 8: 65.
- [7] XU M-Y, HE Y-L, Gao Ch-M. *et al.* Experimental research of non-uniform cross-sectional pulse tube cryocooler[C]. JSJS6, Lanzhou, China, 2000, 8: 264.

(上接第40页)

参考文献:

- [1] 高福成. 食品的干燥及其设备[M]. 北京:中国食品出版社,1987.
- [2] 施俊良. 调节阀的选择[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [3] 阎皓峰. 新型换热器与传热强化[M]. 北京:宇航出版社,1991.
- [4] 杨真. TH-FD55×4 食品冻干机自控系统设计及设备性能实验[C]. 清华大学硕士论文,2000.

## 会议消息

全国第六届冷冻干燥学术交流会由华中科技大学(原华中理工大学)与上海浦东冷冻干燥设备厂及上海东富龙科技有限公司共同负责组织,于2000年11月26日至28日在上海华南宾馆召开,到会60余人。会议由华中科技大学郑贤德教授主持。会上就国内外冻干技术的现状及发展趋势、冻干机理、冻干工艺、冻干设备等方面的20余篇论文进行了交流,讨论并编印出论文集。经过与会的几位专家认真研究,评选出了4篇优秀论文,分别是华中科技大学赵鹤皋等人撰写的“国产医药用冻干机面临的挑战及技术探讨”,华南理工大学程江等人撰写的“瓶装物料的冷冻干燥研究”;上海理工大学刘占杰等人撰写的“冷冻干燥过程中保护剂对脂质体粒径影响的实验研究”;东北大学郑文利等“冻干大鼠皮肤的实验研究”。

会议还组织参观了上海浦东冷冻干燥设备厂和上海东富龙科技有限公司。

(东北大学徐成海供稿)