

知识介绍

# 冷冻干燥速率强化技术

刘永忠

(西安交通大学环境与化学工程学院, 西安 710049)

**摘要:**从冷冻干燥过程内部速率控制影响因素出发, 阐明了冷冻干燥速率强化技术的现状和发展, 评述了各种速率强化方法的实施要点和需要解决的问题。

**关键词:**冷冻干燥; 干燥速率; 过程强化

中图分类号: TQ028

文献标识码: A

## Process intensification technology in freeze-drying

LIU Yong-zhong

(School of Environmental & Chemical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Current situation and research advances in technologies of drying process intensification are illustrated from view of internal flux control. The keys of implement in kinds of process intensification are reviewed and the problems that must be resolved are also brought forward.

**Key words:** freeze-drying; velocity of drying; process intensification

虽然“冷冻干燥”并未在化学工程学科的教科书中作为基本单元操作出现, 但是目前化学工程、生物工程、制药工程、医学工程、食品加工和精细材料制备等对冷冻干燥的强烈依赖<sup>[1,2]</sup>, 使冷冻干燥已经成为化学工程领域中传统分离方法的重要补充和特殊方法之一。干燥速率低、干燥时间长、干燥过程能耗高和干燥设备投资大等缺点成为冷冻干燥技术大规模工业应用的技术瓶颈。因此, 有效地提高冷冻干燥过程速率、降低冷冻干燥过程能耗、提高冷冻干燥过程经济性是冷冻干燥技术的理论研究和开发应用的目标。

冷冻干燥过程经济性的提高依赖于 3 个层面的研究与发展: ①冷冻干燥的基础理论; ②冷冻干燥的操作工艺; ③冷冻干燥设备。冷冻干燥基础理论和操作工艺的研究是冷冻干燥的技术支撑和重要基础, 而冷冻干燥设备投资与运行经济性的提高则依赖于先进制冷、真空和加热技术的利用。为了解决真空冷冻干燥经济性差的问题, 已经出现了真空冷冻干燥的部分替代技术<sup>[3,4]</sup>。虽然这些替代技术在

一定程度上可降低干燥制品的生产成本, 但是干制品品质的降低使得这些技术目前还无法完全取代真空冷冻干燥。因此, 真空冷冻干燥速率强化方法的研究对冷冻干燥技术的大规模工业化应用具有重要的现实意义。

真空冷冻干燥的干燥速率取决于干燥设备的外部速率控制过程和物料干燥的内部速率控制过程, 物料干燥的内部速率控制过程是冷冻干燥的关键因素。笔者从真空冷冻干燥过程中干燥速率的物料内部控制因素出发, 阐述冷冻干燥过程速率强化技术的方法与途径。

## 1 冷冻干燥过程的速率控制因素

冷冻干燥过程主要由物料冻结、维持系统真空、升华干燥和升华蒸气凝结等 4 种操作组成。各种操作能量消耗占冷冻干燥总能量消耗的份额如图 1 所示<sup>[5]</sup>。由图可见物料冻结的能耗所占份额是很小的。干燥过程中维持系统真空的能耗与捕集升华蒸气的能耗相当, 而升华干燥过程的能耗占到了整个

收稿日期: 2001-11-28

基金项目: 西安交通大学在职博士基金及西安交通大学科学研究基金资助项目

作者简介: 刘永忠, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 从事化学工程领域的研究。

干燥过程能耗将近一半。因此,在冷冻干燥过程中,强化升华干燥过程速率对提高冷冻干燥过程的经济性具有重要影响和作用。

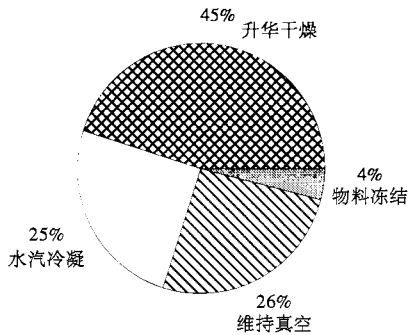


图 1 冷冻干燥过程的能量消耗份额分配

在干燥过程中,物料内部由冰发生升华相变的升华界面将物料划分为两个性质完全不同的区域,即多孔干燥区和均相冻结区。随着干燥过程的进行,热量不断地传递到升华界面,使冻结的水分升华为蒸汽,并经干燥层逸出物料,物料的干燥区不断扩大,冻结区逐渐退缩。当升华界面消失后,半干物料开始解析干燥。因此,在整个干燥过程中,不断地发生着热量和质量的耦合传递过程。

干燥过程涉及物料内部的传热、传质和升华相变过程,干燥速率受到物料内热量与质量耦合传递过程的控制。在一定操作条件下,物料冷冻干燥过程的特性主要取决于被干燥介质的热物理性质,如干燥层和冻结层的密度、导热系数、比热容、孔隙率和升华热以及物料干燥层的有效传质系数等因素。因此,物料本体性质决定了干燥过程的基本特性,而外部操作条件与物料特殊性质的匹配决定了冷冻干燥过程的干燥速率的控制与强化方法。

## 2 速率强化的方法与途径

### 2.1 物料冻结方式、冻结速率和冻结温度水平的控制

被干燥物料的冻结方式与冻结速率是影响冻结物料内冰晶形成的形状和尺寸的关键因素,冻结温度则影响物料中的水分冻结率。固体物料与液体物料的冻结特性存在显著差异。

对于固体物料,冻结速率快,在冻结物料中可形成较小的冰晶颗粒,因而冰晶升华后,物料内形成的孔隙尺寸较小,干燥速率低;慢冻方式可在冻结物料中形成大颗粒的冰晶,冰晶生长形成的较大尺寸连通孔隙有利于干燥后期升华水蒸气的逸出。然而慢

速冻结方式将导致物料内溶质的重新分布和局部浓缩效应,冰晶的成长还可能造成物料骨架的机械损伤,引起冻干制品不可逆的质量损失。通常采用折衷的物料冻结方式,即半快速冻结法<sup>[6]</sup>。对于保留物料生物活性物质要求较高的物料,冻结速度不宜太低,应在综合考虑保留活性物质和冻干速率基础上,确定出最佳冻结速率<sup>[7]</sup>。冻结温度越低,物料中水的冻结率越高。由于未冻结水在解析干燥阶段脱离,未冻结水的分数愈大,则解析干燥时间愈长。因此,选择物料的适宜冻结温度水平也是在强化干燥速率中需要考虑的因素之一。

由于液态物料在冻结前都没有固有的骨架结构,冻结后浓缩的液体基质或赋形剂构成了干物料固体骨架,慢速冻结容易形成大颗粒的冰晶,冰晶升华后形成的水气逸出通道尺寸较大,有利于提高干燥速率。然而,液体物料在冻结过程中容易形成玻璃态结构,这将产生阻碍干燥的不利影响,使干燥时间延长,并导致产品品质降低。因此,在冷冻干燥操作中,物料冻结温度必须低于玻璃态转化温度,或者干燥前,需要采用在液体物料中加入添加剂或泡沫化液体物料等方法进行预处理,以避免物料中玻璃态结构的形成。对于不同种类的赋形剂、玻璃态转化温度对干燥过程的影响以及干制品品质的影响还需深入研究<sup>[8]</sup>。

因此,针对不同的物料,必须在保证产品品质的前提下选择和优化冻结速率和冻结温度水平,不能仅仅只从强化干燥速率处入手。

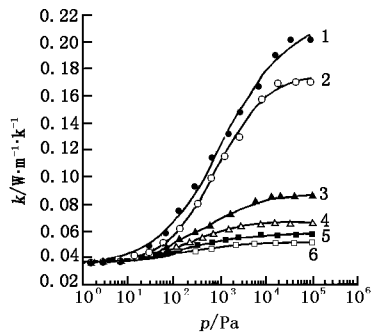
### 2.2 干燥层传热与传质速率的强化

在干燥过程中,通过物料干燥层向升华界面传递升华所需热量是冷冻干燥的常用加热方式,干燥层也是升华水蒸气逸出的必由之路。因此,提高物料干燥层的有效导热系数,增强干燥层传质性能就成为提高冷冻干燥速率的重要因素。

#### 2.2.1 气体置换法

图 2 示出冻干牛肉的有效导热系数与孔隙中所填充的气体种类和气体压力之间的关系<sup>[9]</sup>。可见在通常冷冻干燥操作的压力范围内,轻质气体(如 He、H<sub>2</sub>)可明显地提高物料干燥层的导热系数。

因此,在冷冻干燥过程中,如果物料干燥层的有效导热系数较小,可采用轻质气体填充物料干燥层,替代物料孔隙中的水蒸气和空气,以提高物料干燥层的有效导热系数。在实际使用中,需要考虑附加气体装置和循环使用轻质气体的成本以及操作安全性等问题。这种方法一般用于升华热量主要来源于



1—H<sub>2</sub>; 2—He; 3—Ne; 4—N<sub>2</sub>; 5—CO<sub>2</sub>; 6—R<sub>22</sub>

图2 冻干牛肉的有效导热系数与气体种类和气体压力的关系

干燥层传热的情形。

### 2.2.2 最佳压力法

对于冰的升华过程,压力越低,升华速率越大。但是对于实际多孔物料而言,干燥室压力升高,物料多孔干燥层有效导热系数增加,加强了干燥层的热量传递;干燥室压力降低,水蒸气在多孔干燥层内的扩散系数增加,将有利于升华水蒸气的逸出。干燥室压力对冷冻干燥过程具有正反两方面的影响。

如果冷冻干燥是传热控制过程,则干燥速率随着干燥室压力升高而提高。然而在某一干燥室压力下,冷冻干燥过程可能由传热控制转变为传质控制,再提高干燥室的压力将导致干燥速率降低。因此,干燥速率最大值所对应的干燥室压力应是使干燥过程由传热控制转变为传质控制的压力值。

冷冻干燥过程的速率控制步骤与被干燥物料的种类、环境气体种类、物料孔隙结构特性、物料加热方式以及冷冻干燥设备等因素有关。由于物料种类、操作条件实现方法和冻干设备的差异,使得在某一具体冷冻干燥设备得到的最佳干燥室压力值未必可移植于其他冻干设备的冷冻干燥操作。最佳压力法的实施有赖于对物料性质、冻干过程限制条件以及冻干设备的特性的全面了解和掌握,可以通过冷冻干燥实验数据分析和数学模拟进行探索。

### 2.2.3 循环压力法

循环压力法是在冷冻干燥过程中周期性地升高和降低干燥室压力以提高干燥速率的方法<sup>[9]</sup>。在干燥室压力升高期,物料干燥层的有效导热系数和物料外部气体对流传热系数增加,通过干燥层的传热量增加,物料升华界面温度和水气分压也相应提高;随后压力突然降低,使升华界面与表面之间形成较

大压力差,导致物料干燥层孔隙内气体快速逸出。如此交替变化操作压力,即构成了循环压力冷冻干燥过程。

研究和实践表明<sup>[9~11]</sup>,与恒定压力的冷冻干燥过程相比,循环压力法可缩短干燥时间 1/5 ~ 1/4;在循环压力法中,存在最佳的循环压力波幅、循环压力周期和循环压力波形,Litchfield<sup>[12]</sup>研究发现,改变循环压力周期和维持高压时间对冻干时间几乎没有影响,而压力波形的变化则对冻干时间产生显著的影响,方波波形的压力变化比斜坡波形需要更长的干燥时间。循环压力法与优化恒压法<sup>[13,14]</sup>的对比和分析结果表明,从有效性和经济性方面考虑,循环压力法并不优于干燥室压力优化的恒压法。其原因是无论何种操作参数的循环压力冷冻干燥都是偏离最优操作条件的冷冻干燥过程的,而且在循环压力冷冻干燥过程中,升高操作压力未必总是强化物料干燥层的传热,有时干燥室压力的升高反而会阻碍干燥层传热。

应用循环压力法要求冷冻干燥过程必须是传热控制过程,若干燥过程是传质控制或操作压力对物料多孔干燥层的有效导热系数影响很小,则循环压力法就失去了应用价值。另外,增加压力循环波动调节和控制装置也增加了干燥设备的复杂性。

### 2.2.4 极限表面温度法

在干燥过程中,使物料表面温度始终维持在物料所容许的最高表面温度的加热方法,称为极限表面温度法。这种方法的实质是在物料内部最大限度地提高温度梯度以增强传热。

在传热控制过程的前提下,如果使物料的冻结层表面和干燥层表面都达到了物料的极限容许温度,则外部向升华界面提供的热量达到最大值,此时物料的干燥速率也最大。然而在传质控制的冷冻干燥过程中,极限表面温度操作方法有可能使物料升华界面温度接近或超过物料的共熔点温度限制,这时就要根据物料的冷冻干燥特性对加热温度参数进行折衷和调整,以满足物料容许温度的限制<sup>[15,16]</sup>。

在应用极限表面温度时,需要考虑干燥室压力与加热温度的最优配合以及初始干燥阶段物料升温控制等方面的因素。

## 2.3 冻结层传热的强化

在冷冻干燥过程中,物料冻结层导热系数比干燥层有效导热系数高 1 ~ 2 个数量级,通过干燥层导热传至升华界面的热量是有限的,如果同时通过干燥层和冻结层加热物料,则传热控制冻干过程的干

干燥速率将大大提高。

涂伟萍<sup>[17]</sup>以土豆和胡萝卜的冷冻干燥研究表明,与单纯辐射加热方式相比,辐射与冻结层导热组合的加热方式可以有效缩短干燥时间,通过冻结层的传热量是表面辐射传热量的 10.3 倍,但搁板加热温度不宜太高,干燥室压力应维持在系统可以达到的最低压力值。Nastaj、Sharma 等人的实验研究<sup>[18,19]</sup>也表明了冻结层传热强化干燥速率的可行性。

尽管通过冻结层传热可明显提高干燥速率,然而冻结层与加热面保持良好的热接触以及控制冻结表面的干燥层形成是应用这种方法的最大挑战。Luikov 曾对直径为模型毛细管内冰在辐射加热和接触加热条件下的升华过程进行了可视化实验研究<sup>[20]</sup>,研究表明接触导热加热方式可使加热板与模型物料之间形成了气垫层,在气垫层上的温差有 12℃ 之多,气体层阻碍了物料与加热面的接触。

目前,通过冻结层加热法仅见于冷冻干燥实验研究报道。保持冻结层与加热面良好的热接触以及控制冻结表面的干燥层形成是应用这种方法需要解决的关键问题。

#### 2.4 升华界面的传热强化-体积热源的应用

微波加热方法是在物料中施加高频交变电场,以离子传导和偶极子转动的形式在物料内部产生热量。鉴于微波加热具有加热速度快、物料内部的温度梯度小和加热选择性强等优点,微波加热冷冻干燥已成为冷冻干燥研究的热点方向之一<sup>[21~23]</sup>。

从理论上讲,微波加热是冷冻干燥的一种理想加热方法,因为它不需要借助增大物料内部的温度梯度来强化传热,冻结层具有较高的导热系数使得物料的升华干燥温度可以维持并接近冻结物料允许的最高温度。与常规加热方法相比,可缩短干燥时间 60% ~ 75%<sup>[5]</sup>。

尽管在提高加热效率方面,微波加热法具有常规加热所无可比拟的优点,然而目前微波加热冷冻干燥法仍未在工业上获得广泛应用,应用微波加热法的最大限制是在干燥制品质量控制上的困难。在 13.3 ~ 666.6 Pa 的干燥压力下,微波加热容易引起“辉光放电”现象,该现象将使产品品质降低。为了避免“辉光放电”,干燥室压力必须降至 6.7 Pa 以下,在此压力下,水汽凝结器温度则必须维持在更低的水平上,这无疑增加了水汽捕集的能耗。同时微波加热干燥过程控制要求很高,一旦输入物料的能量过剩,将导致升华界面上部分冰的熔化,而液态水的介电常数远高于固态冰,水将吸收更多的热量,从

而引起冰的进一步熔化,产生一个类似于“多米诺骨牌”的崩溃效应,最终将导致冷冻干燥的失败。由于被干燥介质的组织是非均匀的,采用微波加热可能造成物料内部的局部过热,导致物料的热损伤。

因此,以目前的技术水平,微波加热法在设备的投资、装置的运行与维护以及干燥制品成品率等方面的费用有可能抵消在缩短冻干时间上的收益,同时,在被干燥物料的种类范围上微波加热也受到较大限制,但工业化微波加热仍然是一种具有发展潜力的强化冷冻干燥速率方法。

### 3 结语

真空冷冻干燥过程干燥速率的提高取决于干燥设备的外部速率控制过程和物料干燥机理的内部速率控制过程,强化内部速率控制过程是解决冷冻干燥过程经济性问题的关键。

内部速率控制过程涉及干燥过程中物料内部的传热过程与传质过程以及升华相变过程的耦合。各种强化干燥速率的方法均有其优势和局限性。因此,对于冷冻干燥过程速率强化方法的选择,需根据被干燥介质的特性选择不同强化干燥速率的方法,或者需对几种速率强化方法进行组合和改进。冷冻干燥物料的多样性和干燥过程的限制条件决定了冷冻干燥过程速率强化方法的复杂性和多变性。从物料冷冻干燥的基础机理出发,研究冷冻干燥速率强化方法是冷冻干燥技术实践和探索的重要研究方向,这对真空冷冻干燥技术的大规模工业化应用具有重要的现实意义。

#### 参考文献

- [1] Liapis A I, Bruttini R. Freeze drying. In: Mujumdar A S. Handbook of industrial drying. 2nd ed. [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1995
- [2] 潘永康, 王喜忠. 现代干燥技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998
- [3] Elia A M, Barresi A A. Intensification of transfer fluxes and control of product properties in freeze drying [J]. Chemical Engineering and Processing, 1998, 37: 347 ~ 358
- [4] 李云飞, 华泽钊, 刘宝林. 食品真空冻干节能技术研究 [J]. 低温工程, 1997, 4: 51 ~ 56
- [5] Ratti C. Hot air and freeze-drying of high value foods [J]. J. of Food Engineering, 2001, 49: 311 ~ 319
- [6] 高福成, 刘志胜, 李修梁. 冻干食品 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998
- [7] 成坚, 王琴, 曾庆孝. 冷冻干燥速率的强化措施 [J]. 食品科学, 1999(4): 6 ~ 8

(下转第 64 页)

## 国外动态

### 沸石在压力作用下发生膨胀

沸石因具有特异性质而闻名。已经观测到它们在受热时收缩,在受压时能膨胀。虽然已进行与温度相关的研究,但沸石的多孔性框架结构和实验的复杂性阻碍了观察压力引起的变化的努力。一个国际研究小组现在已经克服了这些困难[J. Am. Chem. Soc., 2001 年 123 期 12732 页]。该小组着重于研究钠沸石  $\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 。将此试样置入金刚石砧的内充满水和酒精混合物的小室内。Lee 等人用同步回旋加速器使 X 射线穿过金刚石小室,同时逐渐增大压力。得到的衍射花样显示,压力开始时如所预料那样压缩沸石,但当压力上升到 0.8 ~ 1.5 GPa 时,观察到沸石的结构变化使水合值由 16 增至 32,引起沸石膨胀。当压力超过 15 GPa 时,沸石试样又重新收缩。这一试验结果揭示可微调沸石的催化性能。这种现象还可用于俘获化学污染物和放射性废物。

C&EN, 2001, 77(42):28

### 韧性最强的陶瓷

日本名古屋大学的坂公恭教授等将喷射硬化法与热处理法相配合,研究成功用简单操作就能增韧陶瓷的“陶瓷韧化法”。陶瓷脆裂的原因是陶瓷表面受到负载变形时产生了微细裂纹,此陶瓷

韧化法是在实施喷射硬化中在高温下烧成钝化处理消除这些裂纹。用此法已将氮化硅的韧性值提高到 15.2,约是未作处理的氮化硅的 2.5 倍,比高韧化陶瓷的代表韧性二氧化硅的韧性值(约 10)还高。此法的开发在喷射硬化法的硬件方面得到新东ブレーター公司的支持,在软件和陶瓷方面得到新东陶瓷公司的支持。今后,这两家公司将进行此法的实用化开发。

工业材料(H), 2001, 49(8):10

### 氢激活纳米开关

法国蒙特彼利埃大学(University of Montpellier)和美国加利福尼亚-埃文大学(University of California-Irvine)的科学家在《科学》(“Science”)杂志报道,他们已研制出一系列钨纳米导线,此纳米导线可能用作氢激活开关和传感器,这些开关和传感器可能应用于微型燃料电池。他们称,这些纳米导线吸收氢时发生作用,氢使纳米导线膨胀,变得更容易导电。

Chemical Week, 2001, 163(36):37

### 纳米级硅结晶球体链制造法

日本大坂大学竹田精治教授等成功地制造出直径为 2 ~ 3 nm 的硅结晶纳米球体链。硅结晶球体链是硅结晶球由非晶态二氧化硅连结成环状的,具有半导体与绝缘体交替相连的结构。此次研究成功的制法将蒸镀有金的硅基板放入石英管封闭入真空并在 1 000℃ 加热,金微粒一点一点吸入硅,基板侧冒出硅针

状结晶即自行组织成纳米链。一般结晶生长装置是分子束外延生长装置,此制法不使用该装置就能比较简便地批量生产纳米链。预期此纳米链可能用于纳米大小的发光体和单电子半导体管。

工业材料(口), 2001, 49(10):11

### 不同温度发射不同颜色激光的多色激光器

意大利非线性光谱学欧洲实验室的科学家宣布,他们已研制成一种“无规”激光器,这种激光器能按不同温度改变其发射的激光的颜色。大多数激光器只发射一种波长的激光。这批研究人员在本国的“Nature”杂志上报道了他们的研究成果,称这种性质使激光器可用于温度敏感显示器、光屏和远距离温度传感器。

Chemical Week, 2001, 143(46):33

### 室温高磁热效应新磁体

日本京都大学的和田裕之助教授等研制成功室温下具有很高磁热效应的新磁体。此次研制成的磁体是锰、砷和锡的化合物。置入磁场时,可沿磁力线方向释出热量,取消磁场时吸收热量,可望用于磁冷冻。显示温度下降的程度的磁熵变化为迄今主要磁冷冻材料钆混合物的 2 倍。绝热温度的变化程度可以显示吸热到什么程度,磁冷冻能力取决于磁熵和绝热温度变化,是今后大有发展前途的化合物。在不使用超导磁石的情况下就可能只用磁石实现磁冷冻。

工业材料(H), 2001, 49(12):11

(上接第 62 页)

- [8] Liapis A I, Pikal M J, Bruttini R. Research and development needs and opportunities in freeze drying[J]. *Drying Technology*, 1996, 14(6): 1265 ~ 1300
- [9] Mellor J D. *Fundamentals of freeze-drying* [M]. London: Academic Press, 1978
- [10] 齐锡龄, 邓霄燕, 方承超, 等. 液状制品循环压力真空冷冻干燥的实验研究[J]. *制冷学报*, 1995(4): 35 ~ 39
- [11] 罗同林, 林秀诚. 食品的循环压力冻干[J]. *制冷学报*, 1991(1): 14 ~ 20
- [12] Litchfield R J, Farhadpour F A, Liapis A I. Cyclical pressure freeze drying[J]. *Chemical Engineering Science*, 1981, 36(11): 1233 ~ 1238
- [13] Liapis A I, Litchfield R J. Optimal control of a freeze dryer (I): Theoretical development and quasi steady state analysis[J]. *Chemical Engineering Science*, 1979, 34(7): 975 ~ 981
- [14] Litchfield R J, Liapis A I. Optimal control of a freeze dryer (II): Dynamic analysis[J]. *Chemical Engineering Science*, 1982, 37(1): 45 ~ 55
- [15] Aguilera J M, Flink J M. A combined experiment-computer technique for determining heating programs for batch and continuous freeze dryers [J]. *J of Food Technology*, 1974, 9: 329 ~ 344
- [16] Lombrana J I, Diaz J M. Coupled vacuum and heating power control for freeze drying time reduction of solutions in phials[J]. *Vacuum*, 1987, 37(5 ~ 6): 473 ~ 476
- [17] 涂伟萍, 程江, 杨卓如, 等. 食品冷冻干燥过程的模型及影响因素[J]. *化工学报*, 1997, 48(2): 186 ~ 192
- [18] Nastaj J F. Some aspects of freeze drying of dairy biomaterials[J]. *Drying Technology*, 1996, 14(10): 1967 ~ 2002
- [19] Sharma N K, Arora C P. Influence of product thickness, chamber pressure and heating conditions on production rate of freeze-dried yoghurt [J]. *Int J of Refrigeration*, 1995, 18(5): 297 ~ 307
- [20] Luikov A V, Lebedev I. P. Study of the ice sublimation process[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1973, 16: 1087 ~ 1096
- [21] Nijhuis H H, Torringa H M, Muresan S, et al. Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1998(9): 13 ~ 20
- [22] Arsem H B, Ma Y H. Simulation of a combined microwave and radiant freeze dryer[J]. *Drying Technology*, 1990, 8(5): 993 ~ 1016
- [23] Litvin S, Mannheim C H, Miltz J. Dehydration of carrots by a combination of freeze-drying[J]. *J of Food Engineering*, 1998, 36(1): 103 ~ 111