



## 牛初乳低温集成干燥造粒装置研究

彭巧云, 李占勇, 徐庆, 耿县如  
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

**摘要:** 研制一种集低温干燥和造粒于一体的集成干燥造粒装置,并给出干燥器主要工艺参数的计算方法. 该实验装置用于温度低于 60 °C 的牛初乳加工,取得了理想的产品. 经检测,干燥后牛初乳中的免疫球蛋白的损失率小于冷冻干燥产品,产品粒度均匀、光滑,无需破碎、筛分工序. 该装置的研制为热敏性物料的干燥提供了新方法.

**关键词:** 牛初乳; 喷雾; 流化; 集成干燥; 造粒; 装置设计

中图分类号: TS252.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510(2011)01-0064-03

## Research on Low-Temperature Drying and Granulating Integrated Device of Bovine Colostrum

PENG Qiao-yun, LI Zhan-yong, XU Qing, GENG Xian-ru

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Drying and granulating integrated device combines low temperature drying technology and granulating technology. Computation method of the main technical parameters of the dryer were given. This device was used to dry bovine colostrums with the temperature below 60 °C, and the ideal product was achieved. The results of tests show that the loss rate of immune globulin in dried bovine colostrum is less than that of the freeze-dried products. Moreover, the granularity of dried product is uniform and smooth. It dispenses with crushing and screening. This device provides a new method to dry the thermal sensitive material.

**Keywords:** bovine colostrums; spray; fluidization; integrated drying; granulating; device design

现代乳品工业认为,牛初乳是健康奶牛分娩后一周内所分泌的乳汁的总称,富含优质蛋白质、维生素和矿物质、免疫球蛋白(Ig,主要为 IgG)、生长因子等组分,能增强人体免疫力,促进组织生长,是一种纯天然的健康食品,应用前景广阔. 由于新鲜牛初乳感官指标低,口感较差,成分复杂,人不能直接食用,故常加工成液态或固态产品后再投放市场<sup>[1-2]</sup>.

现有的牛初乳加工技术有冷冻干燥技术,喷雾干燥技术,膜分离技术、微胶囊技术等. 制备固态产品,如牛初乳粉,常用的是冷冻干燥技术和喷雾干燥技术. 冷冻干燥能够较好地保存牛初乳的原有品质,但制冷系统能耗高,设备及操作的费用投资大,又是间歇操作,干燥时间长,产量低,产品形状不理想,速溶性差. 喷雾干燥具有生产时间短,产品易成型的优

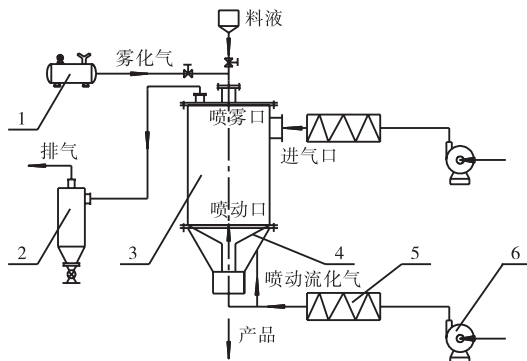
点,但传统的喷雾干燥装置设备体积庞大、操作温度较高,对某些热敏性物料成分的破坏比较严重<sup>[3]</sup>. 故众多学者和企业都在寻求研究一种既能降低生产成本,又可使干燥产品质量接近于冷冻干燥产品的新型干燥技术.

基于以上考虑,本文研制了一种低温集成干燥装置,集喷雾、流化、造粒和干燥于一体,可用于温度低于 60 °C 的牛初乳加工,得到了粒度均匀、品质高的理想产品.

### 1 装置工艺流程

装置工艺流程如图 1 所示. 料液与热空气在气流雾化器中混合,经过喷雾口在塔内并流下降,完成

恒速干燥阶段后到达流化气体分布板, 而后经过喷动气体和流化气体的共同作用, 完成降速干燥阶段, 颗粒的大小由喷动气体流量控制, 达到要求后, 对颗粒进行收集<sup>[4]</sup>.



1. 空压机; 2. 分离器; 3. 喷雾塔; 4. 流化气分布板; 5. 空气除湿加热系统; 6. 风机

图1 集成干燥器工艺流程  
Fig.1 Integrated dryer process

在此过程中, 雾滴的干燥分为两个阶段, 第一阶段为从雾化器喷雾下降到流化板上形成未完全成形的微细颗粒, 第二个阶段为在流化板完成最终干燥并形成所需产品颗粒, 即在第一个阶段完成升速和恒速干燥, 第二个阶段完成降速干燥。以上流程结合了喷雾干燥、流化床干燥及喷动床干燥过程, 充分利用了气流雾化的优势。

## 2 工艺设计

### 2.1 干燥能力

干燥能力根据式(1)计算

$$G_2 = G_1(1+x_2)/(1+x_1) \quad (1)$$

式中:  $G_2$  为干燥后产品产量, kg/h;  $G_1$  为湿物料的处理量, kg/h;  $x_1$  为湿物料的干基湿含量, kg/kg;  $x_2$  为干燥后产品的干基湿含量, kg/kg。

### 2.2 水分蒸发量

水分蒸发量根据式(2)计算

$$W = G_c(x_1 - x_2) = L(y_2 - y_1) \quad (2)$$

式中:  $G_c$  为绝干物料质量流量, kg/h;  $x_1$  为进干燥器物料的干基含水量, kg/kg;  $x_2$  为干燥后产品的干基含水量, kg/kg;  $y_1$  为进干燥器空气的相对湿度, %;  $y_2$  为出干燥器空气的相对湿度, %;  $L$  为绝干空气流量, kg/h。

### 2.3 空气消耗量

空气消耗量根据式(3)计算

$$L(I_1 - I_2) = G_c(I_2' - I_1') + Q_L \quad (3)$$

式中:  $I_1$  和  $I_2$  分别为单位质量进干燥器空气的焓和单

位质量出干燥器空气的焓, kJ/kg;  $I_1'$  和  $I_2'$  分别为进干燥器物料的焓和出干燥器物料的焓, kJ/kg;  $Q_L$  为干燥器的热量损失, 计算公式为

$$Q_L = k \cdot A \cdot \Delta t$$

式中:  $k$  为干燥器壁面与环境间的传热系数,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $A$  为干燥器壁面积,  $m^2$ ;  $\Delta t$  为干燥器壁面与环境间的温差,  $^\circ C$ 。

出干燥器空气的焓为

$$I_2 = (1.01 + 1.88y_2)t_2 + 2490y_2 \quad (4)$$

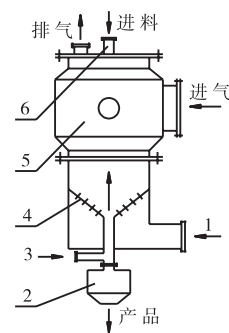
式中,  $t_2$  为空气出干燥器的温度,  $^\circ C$ 。

由式(2)、(3)、(4)联合求出  $y_2$ 、 $I_2$ 、 $L$ , 进而可以求得干燥所需空气量和风机的风量。

## 3 结构设计

### 3.1 装置结构设计

低温集成干燥造粒工艺的核心是低温喷雾干燥装置, 如图 2 所示。利用气流雾化, 待液滴从液态转变为黏稠状, 而未达到玻璃化时, 液滴落在流化床上, 此时遇到低温低湿的流化气体, 迅速固化。当固化颗粒形成时, 又被喷动气体托起向上运动, 小颗粒成长变大。在此循环过程中, 达到所需的颗粒度尺寸和最终水分含量。



1. 低温低湿流化气体入口; 2. 产品收集; 3. 低温低湿喷动气体入口; 4. 气体分布板; 5. 扩散捕集段; 6. 喷雾口

图2 低温喷雾干燥装置示意图  
Fig.2 Schematic of low-temperature spray drying

在喷雾干燥过程中, 随着干燥的进行, 物料会发生从液态向橡胶态, 再到玻璃态的转变<sup>[5]</sup>。对于低温、黏稠的物料, 一般压力喷雾及离心喷雾都难以操作, 而气流喷雾则利用压缩空气达到在喷嘴内充分混合的效果, 结构简单, 不易粘结, 并能调节雾滴的大小。

### 3.2 雾滴干燥所需时间

雾滴干燥所需时间包括第一阶段所需时间  $\tau_1$  和第二阶段所需时间  $\tau_2$ 。

### 3.2.1 干燥第一阶段的时间计算

第一阶段传热的平均温度差为

$$\Delta t_1 = \frac{(t_1 - t'_1) - (t_2 - t'_2)}{\ln[(t_1 - t'_1)/(t_2 - t'_2)]} \quad (5)$$

式中： $t_1$ 为空气进入雾化器前的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t_2$ 为空气第一阶段结束前的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t'_1$ 为液滴进入雾化器前的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t'_2$ 为液滴第一阶段结束前的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

干燥第一阶段所需要的时间为

$$\tau_1 = \frac{\rho_w (D_{av}^2 - D_c^2)}{8\lambda\Delta t_1} \quad (6)$$

式中： $\gamma$ 为水的汽化潜热， $\text{kJ/kg}$ ； $\rho_w$ 为料液的密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\lambda$ 为空气的导热系数， $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； $D_{av}$ 为平均雾滴直径， $\mu\text{m}$ ； $D_c$ 为临界液滴直径，近似等于颗粒最终直径， $\mu\text{m}$ 。

### 3.2.2 干燥第二阶段的时间计算

该阶段对数平均温度差

$$\Delta t_2 = \frac{(t_2 - t'_2) - (t_3 - t'_3)}{\ln[(t_2 - t'_2)/(t_3 - t'_3)]} \quad (7)$$

式中： $t_3$ 为空气的最终温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t'_3$ 为颗粒的最终温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

该阶段所需干燥时间

$$\tau_2 = \frac{\gamma D_c^2 \rho_D (x_c - x_2)}{12\lambda\Delta t_2} \quad (8)$$

式中： $\rho_D$ 为产品的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $x_c$ 为第一阶段末颗粒临界干基湿含量， $\text{kg/kg}$ ； $x_2$ 为产品的干基湿含量， $\text{kg/kg}$ 。故，雾滴干燥所需总时间  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ 。

### 3.3 干燥器直径的计算

在喷嘴孔处的液膜平均速度为  $u_{av}$ ，其分速度为  $u_{xav}$  及  $u_{yav}$ ，液膜是与轴线成  $\frac{\theta}{2}$  角喷出。因此， $u_{av}$  可以分解为径向速度  $u_{xav}$  及轴向速度  $u_{yav}$ 。

$$\begin{cases} u_{xav} = u_{av} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \\ u_{yav} = u_{av} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (9)$$

根据上式求得的雾滴的初始水平分速度  $u_{xav}$ ，利用图解积分法求得雾滴由干燥器中线沿径向运动的半径距离  $S_z$ ，因而干燥器直径  $D=2S_z$ ，计算结果圆整。

### 3.4 干燥器高度的计算

(1) 第一阶段中雾滴的匀速沉降速度为

$$u_f = Re \cdot \frac{\mu_a}{D_{av}\rho_a}$$

式中： $\mu_a$ 为空气黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $\rho_a$ 为空气密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 第一阶段雾滴到达等速运动以前在减速阶段时所需时间的计算：

由前已知雾滴的轴向初始分速度  $u_{yav}$ ，利用图解积分法求出所需时间  $\tau_3$ 。

(3) 计算第一阶段减速运动时间内的雾滴下降距离  $S = \int_0^{\tau_3} u_y d\tau$ 。

即在  $\tau=0 \sim \tau_3$  内雾滴向下的减速行程为  $S$ 。

前面已经求出干燥第一阶段所需的时间为  $\tau_1$ ，扣除减速运动时间  $\tau_3$ ，即为等速沉降运动所需时间，前已求得等速沉降速度  $u_f$ ，故等速沉降距离为  $S' = u_f(\tau_1 - \tau_3)$ 。加上降速沉降距离  $S$ ，喷雾干燥器的有效高度为  $S + S'$ 。

若再考虑其他塔内装置，如进料口、出料口、进气口、排气口等，所得高度即为实际干燥器高度<sup>[6]</sup>。

## 4 实验

### 4.1 实验条件

为保证牛初乳产品的质量，按照我国牛初乳行业规范，把牛初乳原料界定为母牛分娩后 3 d 内所分泌的乳汁<sup>[7]</sup>，实验采用按国家一级奶标准收购的牛初乳为原料<sup>[8]</sup>。

采用本文装置进行实验，实验条件如下：用于喷雾的一次进风温度为  $160^{\circ}\text{C}$ ，用于流化和喷动的进风温度为  $165^{\circ}\text{C}$ ，物料初始温度为  $20^{\circ}\text{C}$ 。

### 4.2 结果与分析

实验得到干燥产品的粒度范围为  $0.1 \sim 0.56 \text{ mm}$ ，其中  $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$  的小粒径颗粒占总质量的  $34.5\%$ ， $0.3 \sim 0.56 \text{ mm}$  的大粒径颗粒占总质量的  $65.5\%$ ，平均粒度为  $0.36 \text{ mm}$ ，所得牛初乳颗粒粒径基本在  $0.3 \sim 0.56 \text{ mm}$ ，粒度均匀，表面光滑。

牛初乳中主要功能性组分为 Ig，其中主要为 IgG，所以 IgG 已成为国际公认衡量初乳和初乳粉的主要质量指标<sup>[8]</sup>。初乳中 IgG 是一种热敏成分，当受热温度超过  $60^{\circ}\text{C}$  后，易变性失活，因此，以牛初乳为原料进行初乳粉及其他初乳制品生产要注意保持制品中较高的 IgG 含量和活性。

经检测，本实验得到产品的 IgG 含量为  $35\%$ ，而目前市场上冷冻干燥得到的牛初乳粉 IgG 含量通常为  $20\% \sim 25\%$ ，采用本装置的产品的 IgG 含量比其高出  $10\%$  以上，可见本装置大大提高了免疫球蛋白的存活率，产品在市场上具有很大的竞争优势。

(下转第 71 页)