

实验型喷雾干燥机低温干燥牛初乳粉的干燥性能

于华宁^{1,2}, 阿地里江², 龙薇运², 李云飞^{2,3*}

(1. 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200240; 2. 上海交通大学农业与生物学院食品科学与工程系, 上海 200240; 3. 上海交通大学陆伯勋食品安全研究中心, 上海 200240)

摘要: 为了提高牛初乳粉的回收率, 该文选择输入气体温度、压缩气体流量以及干燥气体流量为影响因素, 通过测定出口气体温度和牛初乳粉在干燥器各部件中的损失量以及产品的回收量, 对牛初乳低温喷雾干燥过程的热效率和牛初乳粉的收集指标进行试验研究。结果表明: 出口气体温度与3个影响因素均成正比关系, 总的热效率和蒸发热效率的范围分别为 47.23%~66.68%、58.59%~82.76%, 二者均随干燥气体流量和压缩气体流量的增加而减小; 牛初乳粉的黏壁率较大, 且随干燥气体流量的增加而增加, 随压缩气体流量的增加而减少, 牛初乳粉的回收率较小, 且随压缩气体流量和干燥气体流量的增加呈下降趋势。3个因素对牛初乳粉的黏壁率、损失率和回收率均有显著影响。在试验范围内, 较佳的工艺参数组合为输入气体温度为 110℃, 压缩气体流量为 300 L/h, 干燥气体流量为 0.78 m³/min。该试验为牛初乳粉的工业化生产提供了相关的基础性数据。

关键词: 干燥, 参数评估, 回收率, 牛初乳, 黏壁率, 热效率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.10.060

中图分类号: TS252.4, S226, TS218

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-10-0361-06

于华宁, 阿地里江, 龙薇运, 等. 实验型喷雾干燥机低温干燥牛初乳粉的干燥性能[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 361-366.

Yu Huaning, Ardil Abdukerim, Long Weiyun, et al. Low-temperature spray drying performance of laboratory spray dryer for bovine colostrum powder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 361-366. (in Chinese with English abstract)

0 引言

牛初乳是母牛分娩后 7 d 内分泌的乳汁^[1], 其中不仅含有常乳具有的营养组分, 还含有大量的免疫因子和生长因子, 如免疫球蛋白、乳铁蛋白、溶菌酶、类胰岛素生长因子、表皮生长因子等, 具有免疫调节、改善胃肠道、促进生长发育、改善衰老症状、抑制多种病菌等一系列生理活性功能^[2-3], 被誉为“21 世纪的保健食品”, 是近 20 年来国内外功能性乳品开发的热点, 已经成为一些婴幼儿配方奶粉及其他保健品中的重要添加成分^[4]。

喷雾干燥是将料液喂入干燥器, 被雾化器雾化成小雾滴喷入热的干燥介质(通常采用热空气)中, 雾滴中的水分被迅速蒸发, 最后通过分离器回收得到粉末状产品的过程。喷雾干燥仍属于热风干燥, 但与其他热风干燥方式相比, 喷雾干燥过程中物料与热风接触的时间较短, 其温升较小, 营养成分损失很小, 许多热敏性的生物活性物质也得到较好的保护, 因此该技术在热敏性食品物料的制粉过程中得到广泛应用^[5]。目前在富含糖类和酸类食品物料的干燥过程中物料颗粒的黏壁问题仍然是

喷雾干燥技术应用中面临的主要难题, 例如番茄^[6]、南瓜^[7]、浓缩果汁^[8-9]等。在上述物料的干燥过程中, 因低熔点成分(如糖类和酸类)的存在, 使物料颗粒在较低的温度下即显示较强的黏性, 极易黏附在干燥器内壁上, 并且随干燥过程的进行, 黏壁料层加厚, 加上长时间暴露在高温环境下, 极易烧焦, 当累积到一定的厚度, 颗粒层会在气流或重力作用下落入收集器, 与收集器中的未烧焦的产品混合, 从而不仅会降低产品品质, 也会降低回收率。如果周期性的停机清洗, 势必会增加运行成本 and 影响生产进度^[5]。

产品回收率和热效率表征喷雾干燥器的运行性能。喷雾干燥器的总热效率被定义为蒸发消耗的热量与总热量的比值。由于干燥器的干燥容量与输入和输出干燥腔的气体温度的差值成正比, 因此若要获得较高的热效率, 只能通过最大限度地提高输入气体的温度和降低出口气体的温度。产品的回收率是由收集装置的收集效率决定的, 干燥损失则归因于雾滴或干颗粒的黏附较多以及旋风分离器对细小颗粒回收能力不足。

在确定牛初乳喷雾干燥的最佳干燥工艺条件之前, 掌握干燥过程中各个因素对牛初乳粉黏壁量和干燥器的热效率的影响至关重要, 本文对脱脂牛初乳进行喷雾干燥, 研究输入气体温度、干燥气体流量和压缩气体流量 3 个影响因素对干燥机的运行性能和产品回收率的影响, 为脱脂牛初乳粉的工业化生产提供相关的基础性数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

收稿日期: 2010-05-14 修订日期: 2010-09-26

基金项目: 南方大城市郊区牛场环境控制技术及奶牛应激综合防控技术研究
与产业化示范国家科技支撑计划(2006BAD04A14)

作者简介: 于华宁(1981-), 男, 山东荣成人, 博士研究生, 主要从事食品低温储藏方面的研究。上海市东川路 800 号 上海交通大学, 200240。
Email: yuhuaning1981@sjtu.edu.cn

*通信作者: 李云飞(1954-), 男, 吉林大安人, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品贮藏与加工技术的研究。上海市东川路 800 号 上海交通大学农业与生物学院食品科学与工程系, 200240。Email: yfli@sjtu.edu.cn

新鲜牛初乳由光明乳业集团奶牛场提供,均为母牛产犊后 7 d 内产的初乳,其总固形物质量分数 10.99%^[10],脂肪^[10]2.28%,蛋白质^[10]4.93%,乳糖^[10]2.96%,灰分^[11]0.956%。初乳的相对密度^[12]为 1.037 g/mL,动力黏度为 1.573 mPa·s (32℃),pH 值为 6.44 (25℃),滴定酸度^[12]为 26.3°。

1.2 试剂和仪器

1) 试剂:氢氧化钠(分析纯),上海国药试剂有限公司;试验用水为去离子水,电阻率 $\geq 18\text{ M}\Omega$ 。

2) 主要仪器设备

GPW120-II 型微型喷雾干燥机(山东天力干燥设备有限公司);SE 02.0V 离心机(意大利 Seital 公司);APV1000 均质机(丹麦 APV 有限公司);MilkoScan Minor 4 小型乳品成分分析仪(丹麦福斯分析仪器有限公司);电热恒温干燥箱(上海跃进医疗器械厂)。

1.3 试验方法

1.3.1 工艺流程

新鲜牛初乳(由农场运到实验室后,迅速放入-60℃超低温冷柜存放,脱脂前在室温下解冻)一净乳(使用医用纱布除去原料乳中的机械杂质和灰尘等非乳成分)一离心脱脂(转速为 10 000 r/min)一均质(压力为 30 MPa)一杀菌(72℃, 15 s)一预热(32℃持续搅拌)一喷雾干燥一冷却一包装,低温(4℃)贮藏。

1.3.2 喷雾干燥

本试验采用的 GPW120-II 型微型喷雾干燥机的构造及主要部件见图 1。该机采用二流体喷嘴雾化器,喷嘴内径为 0.47 mm,输入气体温度和输出气体温度由热电偶测定。根据预试验的结果,将雾化器的压力,喂入速率以及喂入料液的温度等设定为常量,取值分别为(0.7±0.01)MPa, (160±20)mL/h, (32±1)℃。以输入气体温度 T_{inlet} 、干燥气体流量 Q_a 和压缩气体流量 Q_c 为因素,进行 3 因素 3 水平全因素试验,共 27 组,每组试验做 2 次。

1.3.3 性能指标及测定方法

每组试验中喂入的牛初乳经干燥后分为 2 部分,即回收的牛初乳粉和损失的牛初乳粉,回收部件见图 1 中旋风分离器和料杯部件,损失的牛初乳粉又包括黏在干燥腔和旋风分离器壁面上的黏壁累积损失和废气携带的颗粒而造成的损失 2 部分。

本试验采用产品回收率 $n_{product}$ 、由废气中携带颗粒而造成的产品损失率 n_{loss} 和产品的黏壁率 $n_{residue}$ 来表征喷雾干燥机的干燥性能。

$$n_{product} = \frac{\text{回收的牛初乳粉的固形物质量}}{\text{喂入干燥机的牛初乳固形物质量}} \times 100\%$$

$$n_{loss} = \frac{\text{被废气带走的牛初乳粉的固形物质量}}{\text{喂入干燥机的牛初乳的固形物质量}} \times 100\%$$

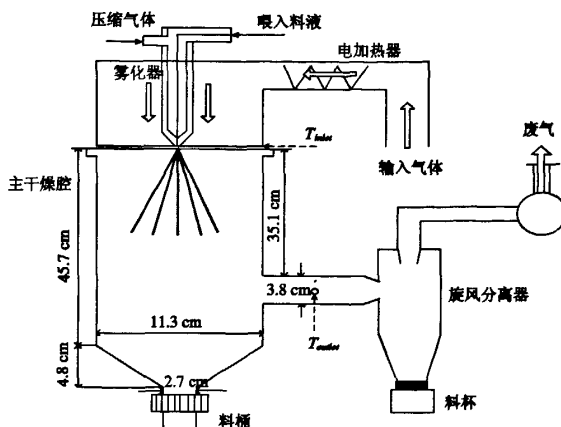
$$n_{residue} = \frac{\text{黏附干燥腔和旋风分离器内壁牛初乳粉固形物质量}}{\text{喂入干燥机的牛初乳固形物质量}} \times 100\%$$

本试验采用 2 种干燥效率来表征干燥机的热量利用效率^[5],即总热量利用率 η_1 和蒸发效率 η_2 。

$$\eta_1 = \frac{T_{inlet} - T_{outlet}}{T_{inlet} - T_{room}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{T_{inlet} - T_{outlet}}{T_{inlet} - T_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中, T_{inlet} 为输入干燥腔内的气体温度,℃; T_{outlet} 为输出干燥腔的气体温度,℃; T_{inlet} 、 T_{outlet} 见图 1 所示; T_2 为 T_{inlet} 对应的绝热饱和温度,℃; T_{room} 为环境大气的温度,℃。



注: T_{inlet} 为输入干燥腔内的气体温度; T_{outlet} 为输出干燥腔的气体温度

图 1 GPW120-II 型微型喷雾干燥机示意图

Fig.1 Schematic diagram of GPW120-II mini spray dryer

1.3.4 数据分析方法

应用统计分析软件 SAS9.2 对数据进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 出口气体温度及干燥效率

在喷雾干燥过程中,设定的输入气体温度与干燥气体的实时温度存在偏差,实时气体温度在设定值附近波动,若实际气体温度波动过大,将直接影响干燥数据的精度和准确度。因此,对每组试验的输入气体温度的实时值取平均值,并与设定值进行相关性分析,得出相关性为 0.9995,据此认定输入气体温度精度符合试验准确度的要求。喷雾干燥试验中 3 个因素的设定值和每个试验测量的出口气体温度见表 1。

从表 1 中看出,出口气体温度随输入气体温度的增加而增加,这主要是因为输入的能量大于物料中水蒸气蒸发需要的热量,干燥过程属于传质控制过程,在消耗的能量大致相同的情况下,输入的能量越多,剩余的能量就越多,出口气体温度自然较高。出口气体温度也随干燥气体流量的增加而增加,这是因为在喂入物料流量固定的情况下,干燥气体流量的增加,干燥气体与喂入液体的比率增加,每个雾滴接触的干燥气体就随之增加,在相同输入气体温度下,输入的总能量就越大,消耗的能量相同,出口气体温度就随之增加。

在压力喷嘴的雾化过程中,在压缩气体压力和物料的黏度不变的情况下,雾滴颗粒的大小与喂入物料的速度

率成正比，与压缩气体的流动速率成反比^[5]。通常来说，增加压缩气体的流动速率，会导致单位雾滴体积下表面面积的增加，从而增加雾滴的干燥速率，最终会引起出口气体温度的降低。但此次试验结果与该理论恰恰相反，出口气体温度与压缩气体流量成正比，主要是因为本试验中，干燥气体与雾滴的接触面积不同。随着压缩气体流量增加，料液被雾化成较小的雾滴，雾滴越小，其惯性越小，在干燥腔内径向的运动距离就越短，最终的结果是，较小的雾滴形成较小的喷雾圆锥，其体积就较小^[13]，与干燥气流接触的面积就变小，干燥速率也随之下降，最终引起出口气体温度升高。

表 1 喷雾干燥试验因素及出口气体温度
Table 1 Experimental factors of spray drying and outlet air temperature

试验号	$T_{inlet}/^{\circ}\text{C}$	$Q_a/(\text{m}^3\text{min}^{-1})$	$Q_c/(\text{t/h}^{-1})$	$T_{outlet}/^{\circ}\text{C}$	$T_2/^{\circ}\text{C}$
1	110	0.78	300	45.7±0.65	29
2	125	0.78	300	48.9±.30	33
3	140	0.78	300	54.8±.65	37
4	110	1.04	300	50.9±0.89	29
5	125	1.04	300	58.6±0.70	33
6	140	1.04	300	63.5±2.00	37
7	110	1.30	300	55.7±.81	29
8	125	1.30	300	65.5±.15	33
9	140	1.30	300	69.2±.85	37
10	110	0.78	600	46.5±.15	29
11	125	0.78	600	50.4±0.75	33
12	140	0.78	600	56.7±.22	37
13	110	1.04	600	51.6±0.25	29
14	125	1.04	600	61.2±2.35	33
15	140	1.04	600	64.5±.47	37
16	110	1.30	600	58.8±.62	29
17	125	1.30	600	67.5±.30	33
18	140	1.30	600	71.8±.10	37
19	110	0.78	900	47.8±.30	29
20	125	0.78	900	52.3±.45	33
21	140	0.78	900	59.4±.75	37
22	110	1.04	900	53.2±.57	29
23	125	1.04	900	61.5±2.10	33
24	140	1.04	900	68.9±0.55	37
25	110	1.30	900	61.2±.36	29
26	125	1.30	900	71.1±2.06	33
27	140	1.30	900	76.4±.50	37

注： T_{inlet} 为输入气体温度； Q_a 为干燥气体流量； Q_c 为压缩气体流量； T_{outlet} 为输出气体温度； T_2 为 T_{inlet} 对应的绝热饱和温度。

在试验过程中，湿空气作为干燥介质，其绝对湿度为每千克干空气含 5 g 水蒸气。为了衡量干燥过程的热量利用效率，通常假设在喷雾干燥过程中，干燥腔隔热良好，热量损失相比总热量很小，可以忽略，干燥腔内的热交换为理想的绝热过程，干燥介质的温度沿着绝热冷却线下降^[5]。若干燥气体流量是恒定的，只有出口气体达到饱和状态，获得水蒸气的蒸发量才能达到最大。事实上，饱和过程只能无限制的接近，永远无法达到，因此，实际干燥过程中出口气体温度都会高于其对应的饱和温

度。另外，处于饱和状态的干燥气体本质上是不可取的，当气体热量继续损失，就会引起气体温度的降低，从而导致水蒸气冷凝的出现。对表 1 中数据进行方差分析可知，3 个因素对 T_{outlet} 的影响均极显著 ($p<0.01$)。

由公式 (1)、(2) 分别计算干燥机总的热效率 η_1 和蒸发效率 η_2 ，其结果见表 2。 η_1 表示水蒸气蒸发过程消耗的能量与总输入热量的比值，其变化范围为 47.23%~66.68%，从表 2 中看出热量损失较大，可回收的能量依然存在，通过优化工艺参数和改进干燥设备的设计还有提高热量利用效率的空间。

表 2 干燥器的总热量利用率和蒸发效率
Table 2 Overall thermal efficiency and evaporative efficiency of spray dryer

试验号	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$	试验号	$\eta_1/\%$	$\eta_2/\%$
1	64.86±0.66	79.38±0.80	15	58.47±.14	73.30±.43
2	66.68±.14	82.72±.42	16	51.65±.61	63.21±.97
3	65.98±.28	82.76±.60	17	50.38±.14	62.50±.41
4	59.62±0.88	72.96±.08	18	52.81±0.85	66.21±.07
5	58.18±0.62	72.17±0.76	19	62.75±.31	76.79±.61
6	59.24±.55	74.27±.94	20	63.70±.27	79.02±.58
7	54.78±.81	67.04±2.21	21	62.42±.36	78.25±.70
8	52.13±.01	64.67±.25	22	57.30±.58	70.12±.94
9	54.83±.43	68.74±.80	23	55.64±.84	69.02±2.29
10	64.06±.16	78.40±.42	24	55.06±0.43	69.03±0.53
11	65.36±0.66	81.09±0.82	25	49.23±.37	60.25±.67
12	64.51±0.95	80.87±.19	26	47.23±.81	58.59±2.24
13	58.91±0.27	72.10±0.32	27	49.25±.16	61.75±.46
14	55.90±2.06	69.35±2.55			

注： η_1 为总的热效率； η_2 为蒸发效率。

蒸发过程能量的利用效率 η_2 ，表示干燥过程的热介质的实际蒸发能力与干燥废气处于饱和态的理想状态下获得的蒸发能力的比值。本试验中， η_2 的变化范围为 58.59%~82.76%，表征了出口气体温度偏离理想绝热饱和温度的程度。

从表 2 可以看出，总的热效率与蒸发热效率均随压缩气体流量以及干燥气体流量的增加而减小，这主要是因为 T_{outlet} 随压缩气体流量和干燥气体流量的增加而升高，因此提高喷雾干燥过程的热利用效率，要在保证干燥产品品质和含水率的情况下，尽可能降低出口气体的温度。对表 2 中数据进行方差分析可知，除 T_{inlet} 对 η_1 影响不显著外，其他因素对 2 个效率的影响均极显著 ($p<0.01$)。

2.2 干燥条件对产品回收率、损失率和黏壁率的影响
2.2.1 干燥条件对黏壁率 $\eta_{residue}$ 的影响

在试验过程中，牛初乳的黏壁现象非常明显，大大降低了牛初乳粉的回收率。表 3 给出了试验过程中牛初乳黏壁率随喷雾干燥条件的变化情况，其值变化范围是 66.10%~83.06%。

从表 3 可以看出，黏壁率随干燥气体流量的增加呈上升趋势，这与文献[14]的结论相反。本试验中干燥气体流量 (0.78~1.3 m³/min) 较大，导致回旋气流的影响较

小,干燥腔内的黏壁量差异不大。而大流量的干燥气体易于将物料颗粒带入旋风分离器中,此时旋风分离器的黏壁量变成主导因素。表 3 给出了旋风分离器中的黏壁量占干燥腔及旋风分离器黏壁总量的比例,从中明显看出随着干燥气体流量的增加,旋风分离器中的黏壁量随

之增加,在 1.04 m³/min 和 1.3 m³/min 处,旋风分离器中的黏壁量均超过黏壁总量的 1/2。随着干燥气体流量的增加,进入旋风分离器中的物料颗粒增加,此时粉末的温度较高,黏性较大,因此粉末在旋风分离器内壁上的黏壁率随之增加,总黏壁率也随之增加。

表 3 干燥条件对产品回收率、黏壁率以及损失率的影响

Table 3 Effects of drying conditions on product recovery, residue accumulation and loss

试验号	$n_{product}/\%$	$n_{residue}/\%$	$n_{loss}/\%$	黏壁累积占总损失的比例/%	废气携带占总损失的比例/%	旋风分离器黏壁比例/%
1	10.91±0.09	69.51±0.57	19.58±0.37	78.02±0.18	21.98±0.20	35.48±1.25
2	11.43±0.04	67.35±0.07	21.22±0.31	76.04±0.25	23.96±0.3 0	50.29±0.34
3	8.19±0.13	68.20±0.28	23.61±0.16	74.28±0.05	25.72±0.04	50.80±0.56
4	7.28±0.11	75.39±0.55	17.33±0.06	81.31±0.06	18.69±0.05	51.00±0.32
5	8.48±0.14	72.66±0.09	18.86±0.09	79.39±0.06	20.61±0.07	53.69±0.48
6	6.09±0.06	74.34±0.01	19.57±0.03	79.16±0.02	20.84±0.01	54.52±0.52
7	5.77±0.68	83.06±0.09	11.17±0.07	88.15±0.05	11.85±0.04	57.83±0.12
8	5.94±0.14	82.16±0.03	11.90±0.01	87.35±0.01	12.65±0.02	59.17±1.03
9	4.54±0.08	82.72±0.03	12.74±0.20	86.65±0.18	13.35±0.2 0	59.74±0.04
10	8.31±0.07	68.34±0.06	23.35±0.07	74.53±0.04	25.47±0.05	34.94±0.35
11	9.68±0.14	66.67±0.01	23.65±0.07	73.82±0.05	26.18±0.06	47.24±0.47
12	6.79±0.28	67.06±0.09	26.15±0.01	71.95±0.02	28.05±0.01	49.88±1.30
13	6.74±0.07	72.35±0.50	20.91±0.07	77.58±0.06	22.42±0.07	47.20±0.45
14	8.12±0.09	70.64±0.23	21.24±0.23	76.88±0.13	23.12±0.14	49.68±0.32
15	5.70±0.28	71.82±0.03	22.48±0.11	76.16±0.08	23.84±0.09	50.19±0.42
16	5.04±0.09	81.71±0.16	13.25±0.10	86.05±0.07	13.95±0.06	59.30±0.36
17	5.70±0.28	80.16±0.03	14.14±0.07	85.01±0.06	14.99±0.05	61.21±0.21
18	3.63±0.13	81.03±0.04	15.34±0.34	84.08±0.29	15.92±0.31	62.50±0.52
19	8.06±0.10	67.05±0.28	24.89±0.09	72.93±0.01	27.07±0.02	36.57±0.45
20	8.73±0.35	66.10±0.42	25.17±0.28	72.42±0.09	27.58±0.08	37.93±0.63
21	6.19±0.11	66.72±0.03	27.09±0.13	71.12±0.09	28.88±0.11	39.64±0.21
22	6.29±0.21	71.05±0.07	22.66±0.01	75.82±0.01	24.18±0.02	47.97±0.32
23	6.57±0.21	69.88±0.11	23.55±0.20	74.79±0.13	25.21±0.12	49.12±0.34
24	4.84±0.16	70.23±0.10	24.93±0.04	73.84±0.01	26.20±0.02	49.94±0.54
25	4.40±0.71	80.87±0.01	14.73±0.04	84.59±0.03	15.41±0.04	59.10±1.04
26	5.43±0.04	78.97±0.10	15.60±0.01	83.50±0.01	16.50±0.02	59.74±0.65
27	3.52±0.04	79.16±0.09	17.32±0.57	82.05±0.46	17.95±0.5 0	59.98±1.21

注: $n_{product}$ 为产品回收率; $n_{residue}$ 为产品黏壁率; n_{loss} 为废气携带损失率。

从表 3 可以看出,黏壁率随压缩气体流量的增加呈下降趋势。在二流体喷嘴的雾化过程中,雾滴的大小随压缩气体流量的增加而减小,雾滴越小,其惯性就越小,雾滴在径向的运动距离就变小,形成锥角较小的锥形喷雾,撞击到干燥腔内壁的几率就变小,即使部分雾滴在干燥腔的底部撞击到内壁上,但此时雾滴的含水率较低,黏性较小,因此黏壁率降低。

由于牛初乳中的固形物含量较低,且乳糖等低分子量成分的存在,导致在每次试验中,黏壁明显。食品物料喷雾干燥脱水后的产品一般处于无定形态,无定形态是不稳定态,极易吸湿而变得有黏性。无定形态物料出现黏性的临界温度称为黏性点温度(sticky-point temperature),黏性点温度取决于物料的温度和含水率^[15]。黏性点温度与材料的玻璃化温度 T_g 密切相关,当物料在干燥过程中,其表面温度比 T_g 低 10~20℃,物料一般不显示黏性^[16],此时物料即使与内壁发生接触,也不发生

黏附。输入气体温度从 110℃ 上升到 125℃,黏壁率呈下降趋势,而从 125℃ 升高到 140℃,黏壁率呈现出上升趋势。在第一个温度升高过程中,随着温度升高,物料颗粒的含水率降低,相比含水率高的颗粒,当撞击到内壁上,黏附到内壁的几率变小,黏壁率降低;而升高到 140℃ 时,出口气体温度很高($T_{outlet}>60^{\circ}\text{C}$),可能超出了物料颗粒出现黏性的临界温度,导致颗粒的黏性变大,黏壁率增加。对表 3 中黏壁率进行方差分析,得出 3 个因素对黏壁率的影响均极显著($p<0.01$)。当输入气体温度为 125℃,压缩气体流量为 900 L/h,干燥气体流量为 0.78 m³/min 时,牛初乳粉的黏壁率较小。

2.2.2 干燥条件对产品回收率 $n_{product}$ 的影响

牛初乳粉的回收率占喂入牛初乳的 3.52%~11.43%,其随喷雾干燥条件的变化趋势如表 3。从表 3 中可知,牛初乳粉的回收率随压缩气体流量和干燥气体流量的增加都减小,而随输入气体温度的增加则先增加后减小,其

变化趋势正好与黏壁率的趋势相反。表 3 中显示黏壁累积和废气携带损失分别占总损失的比例, 可以看出牛初乳喷雾干燥过程中的超过 70% 的损失来自于干燥腔和旋风分离器壁面上的黏壁累积损失。因此, 可以得出, 干燥参数对产品回收率的影响主要由物料雾滴和颗粒黏附在干燥腔和旋风分离器的内壁上的累积量来决定。若要提高产品的回收率, 最有效的方法是通过干燥参数的优化和设备设计的改进来减小产品的黏壁率。对表 3 中的产品回收率进行方差分析, 得出 3 个因素对产品回收率的影响均极显著 ($p < 0.01$)。当输入气体温度为 125℃, 压缩气体流量为 300 L/h, 干燥气体流量为 0.78 m³/min 时, 牛初乳粉的回收率较大。

2.2.3 干燥条件对废气携带损失 n_{loss} 的影响

在试验中, 牛初乳粉除了黏壁累积损失 $n_{residue}$ 外, 还有牛初乳颗粒被废气带走损失 n_{loss} , 主要是旋风分离器分离能力不足造成的。通常使用的旋风分离器对气固两相混合物中的大颗粒分离效果明显, 一般情况下, 旋风分离器可以将气固两相中直径超过 20 μm 的颗粒中的 97%~98% 从气相中分离出, 而直径超过 10 μm 的颗粒的回收率只能达到 90%^[17]。但是对一些细小颗粒, 例如粒径小于 5 μm 的颗粒, 其被从气相中分离出来很困难, 经常被排出的废气带走^[18]。喷雾干燥条件对废气携带造成的损失 n_{loss} 的影响见表 3。从表中可以看出, n_{loss} 变化范围为 11.17%~27.09%, 损失率较大, 原因之一是喂入的牛初乳的固形物含量 (10.99%) 较低, 致使雾化后形成的一系列粒度较小的雾滴, 经过与热空气混合干燥后, 变成直径较小的颗粒很难从气相中分离出来。另一个原因是, 粒径较大的雾滴, 有可能在干燥过程中因温度的上升和雾滴内压力的突然释放导致颗粒的破裂, 产生粒度较小的颗粒。这些情况都会导致粒度较小的颗粒的出现, 小颗粒在分离过程会被废气带走, 造成产品的损失。从表 3 还可以看出, 压缩气体流量越大, n_{loss} 也越大, 这主要是因为压缩气体流量越大, 在喂入物料流量恒定的条件下, 雾化形成的雾滴的粒度越小, 旋风分离器的分离越困难, 废气携带的细小颗粒越多, 损失自然增加。相反, n_{loss} 随干燥气体流量的增加反而减小, 这是因为干燥气体流量越大, 旋风分离器的分离能力越强, 损失的牛初乳粉就越少。

n_{loss} 随输入气体温度的升高呈增加的趋势, 分析其原因, 可能是随着输入气体温度的增加, 大粒径雾滴的内部气泡在温度上升的过程急剧膨胀, 发生破裂, 形成了多个小颗粒, 其平均粒径变小^[5], 被废气带走的小颗粒就增多, n_{loss} 也随之增加。对表 3 中的损失率进行方差分析, 得出 3 个因素对 n_{loss} 的影响均极显著 ($p < 0.01$)。当输入气体温度为 110℃, 压缩气体流量为 300 L/h, 干燥气体流量为 1.30 m³/min 时, 牛初乳粉的废气携带损失较小。

3 结 论

1) 出口气体温度随压缩气体流量、输入气体温度和干燥气体流量的增加均升高, 且高于对应的饱和状态下的气体温度的估计值。

2) 总的热量利用效率 η_1 和蒸发热效率 η_2 均与压缩气体流量和干燥气体流量成反比, 热量利用效率还有较大的提高空间。

3) 产品的黏壁率 $n_{residue}$ 和产品的损失率 n_{loss} 两者之和占喂入物料的比重大, 而产品的回收率 $n_{product}$ 占喂入物料的比重很小, 表明需要进一步优化干燥工艺参数来提高产品的回收率。

4) 产品的黏壁率 $n_{residue}$ 与干燥气体流量成正比, 与压缩气体流量则成反比; 产品的损失率 n_{loss} 随输入气体温度和压缩气体流量的增加而升高, 随干燥气体流量的增加而降低; 产品的回收率 $n_{product}$ 与干燥气体流量和压缩气体流量均成反比。各个指标的方差分析显示, 3 个因素对产品的回收指标 产品的黏壁率 $n_{residue}$ 、产品的损失率 n_{loss} 和产品的回收率 $n_{product}$ 的影响均极显著。

5) 综合考虑热量的利用效率和产品的回收情况, 当输入气体温度为 110℃, 压缩气体流量为 300 L/h, 干燥气体流量为 0.78 m³/min 时, 牛初乳粉的产品回收率较大, 总的热效率也较大, 因此, 认为此参数组合是试验范围内较佳的组合。由于牛初乳粉中的热敏性营养成分, 例如免疫球蛋白, 易于遭受热破坏而含量降低, 使牛初乳粉的营养价值降低, 故而在后续的研究中应将营养成分的保留程度作为评价指标对喷雾干燥工艺进行全面的优化。

[参 考 文 献]

- [1] 李云飞, 王成芝, 吴明. 奶牛初乳冻干时间组合设计试验研究[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2): 78—82.
Li Yunfei, Wang Chengzhi, Wu Ming. Optimal freeze drying study of colostrums with composite design[J]. Transaction of the CSAM, 1998, 29(2): 78—82. (in Chinese with English abstract)
- [2] 曹劲松, 王晓琴. 牛初乳功能性食品的开发现状和前景[J]. 食品科学, 1995, 20(5): 14—17.
Cao Jinsong, Wang Xiaoqin. Recent development and prospect of functional foods of bovine colostrum[J]. Food Science, 1999, 20(5): 14—17. (in Chinese with English abstract)
- [3] 高丽霞, 郭爱萍, 雒亚洲. 牛初乳中的活性成分及其开发利用[J]. 农产品加工: 学刊, 2010, (4): 45—54.
Gao Lixia, Guo Aiping, Luo Yazhou. The active substances and the development of bovine colostrums[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2010, (4): 45—54. (in Chinese with English abstract)
- [4] Gapper L, Copestake D. Analysis of bovine immunoglobulin G in milk, colostrum and dietary supplements: A review[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, 389(1): 93—109.
- [5] Masters K. Spray Drying Handbook, Fifth ed[M]. Longman Scientific and Technical, England, 1991.
- [6] Goula A M, Adamopoulos K G. Effect of maltodextrin addition during spray drying of tomato pulp in dehumidified air: ii. powder properties[J]. Drying Technology, 2008, 26(6): 726—737.

- [7] 刘文慧, 王颀, 王静, 等. 喷雾干燥南瓜粉生产工艺研究[J]. 食品科技, 2007, (9): 62–65.
Liu Wenhui, Wang Jie, Wang Jing, et al. Study on the technology of spray drying for pumpkin powder[J]. Food Science and Technology, 2007, (9): 62–65. (in Chinese with English abstract)
- [8] Papadakis S E, Gardeli C. Spray drying of raisin juice concentrate[J]. Drying Technology, 2006, 24(2): 173–180.
- [9] Roustapour O R, Hosseinalipour M. An experimental investigation of lime juice drying in a pilot plant spray dryer[J]. Drying Technology, 2006, 24(2): 181–188.
- [10] AOAC Official Method 972.16, 1998, Fat, lactose, protein, and solid in milk[S].
- [11] GB/T5009.4–2003, 食品中灰分的测定[S].
- [12] GB/T5009.46–2003, 乳与乳制品卫生标准的分析方法[S].
- [13] Liang B C, King J. Factors influencing flow patterns, temperature fields and consequent drying rates in spray drying[J]. Drying Technology, 1991, 9(1): 1–25.
- [14] Goula A M, Adamopoulos K G. Spray drying performance of a laboratory spray dryer for tomato powder preparation[J]. Drying Technology, 2003, 21(7): 1273–1289.
- [15] Mitsuiki M, Yamamoto Y. Glass transition properties as a function of water content for various low-moisture galactans[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(9): 3528–3534.
- [16] Bhandari B R, Howes T. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 40(1/2): 71–79.
- [17] Farrall A W. Evaporating and drying equipment. In Engineering for Dairy and Food Product[M]. 2nd Ed. New York: Krieger Publishing Co, 1980: 410–414.
- [18] Heldman D R, Hartel R W. Dehydration. In Principles of Food Processing[M]. New York: Chapman Hall, 1997: 210–232.

Low-temperature spray drying performance of laboratory spray dryer for bovine colostrum powder

Yu Huaning^{1,2}, Ardil Abdukerim², Long Weiyun², Li Yunfei^{2,3*}

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Department of Food Science and Technology, School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. Bor S. Luh Food safety Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To improve product recovery of bovine colostrum powder, spray dryer's thermal efficiencies and collection conditions of bovine colostrum powder during low-temperature spray drying were investigated, by choosing inlet air temperature, compressed air flow rate and drying air flow rate as independent variables, and measuring outlet air temperature, residue accumulation on different parts of dryer and product recovery. It could be concluded that outlet air temperature was directly proportional to three independent variables, overall thermal efficiency and evaporative efficiency varied from 47.23% to 66.68%, from 58.59% to 82.76%, respectively, and they decreased as drying air flow rate and compressed air flow rate increased. Results also indicated that residue accumulation increased as drying air flow rate increased and compressed air flow rate decreased; product recovery decreased as compressed air flow rate and compressed air flow rate increased. Residue accumulation, product recovery and product loss were significantly affected by three drying parameters. The optimal drying process parameters obtained were as follows: inlet air temperature of 110°C, compressed air flow rate of 300 L/h, and drying air flow rate of 0.78 m³/min in this experiment. The results were expected to provide some fundamental data for the industrial production of bovine colostrum powder.

Key words: drying, parameter estimation, recovery, bovine colostrum, residue accumulation, thermal efficiency