

文章编号:1007-2853(2002)03-0013-04

逆流喷雾干燥器优化设计数学模型及其应用

吴武阳,叶长燊,阮 奇

(福州大学 化学化工学院,福建 福州 350002)

摘要: 建立以年总费用为目标函数的逆流喷雾干燥优化设计数学模型. 将其应用于牛奶逆流喷雾干燥的优化设计,算例表明:优化设计数学模型为喷雾干燥器的设计提供了较合理、有效的手段. 在逆流喷雾干燥器优化设计中,干燥系统的设备投资费用对优化设计结果的影响显著.

关键词: 喷雾;逆流;优化设计;干燥器;数学模型

中图分类号: TQ 083

文献标识码: A

喷雾干燥在食品、化学药品、医药品、洗涤剂、染料、农药等方面得到广泛应用. 许多研究者对干燥系统的优化设计问题进行了深入的研究^[1~3]. 在前人研究的基础上,本文建立了逆流喷雾干燥器优化设计新的数学模型,该模型中干燥器的造价与干燥器体积成非线性关系,并把干燥过程分为恒速段和降速段,使之更符合工程实际情况.

1 优化设计数学模型

本文在考虑了离心喷雾干燥器、预热器、风机和除尘设备的投资折旧费用和空气预热、风机运转及干燥器散热损失等操作费的情况下,建立了逆流喷雾干燥介质出口温度优化设计数学模型,它以年总费最小为目标函数,年总费用 J (元/年) 为:

$$J = 47_a(M \&SI) V^{0.52} F_C Y + 0.000\ 142\ 3 L T_h C_{H_0} (t_1 - t_0) + 0.000\ 4(L v_{H_0} + L v_{H_2}) T_h + 0.000\ 142\ 3 q_1 W T_h \quad (1)$$

式中第一项为离心喷雾干燥器、加热器、风机和除尘设备的投资折旧费^[2],其中 a 为综合指数 $M \&SI$ 为通货膨胀系数;第二项为空气预热经费,空气预热费用实际上就是消耗蒸汽所需的费用,它与预热空气的流量和预热温度升有关,预热空气量越大、温升越大,则预热费用越大;第三项

为送风机和排风机年运转费用^[4];第四项为干燥系统散热损失费用^[4].

2 工艺分析与模型求解

由目标函数可知干燥系统的年总费用与绝干空气用量 L 和干燥器体积 V 有关. 这两个变量都是空气出口温度的函数,在空气出口温度 t_2 确定的情况下,可以通过工艺衡算求得 L 和 V ,从而求目标是目标函数值. 干燥器不额外补充热量时,干燥器出口空气即废气的状态 (t_2, H_2) 由下式确定^[5]:

$$\frac{t_2 - t_1}{H_2 - H_1} = [-r_0 + C_{ltM1} - q_l - \frac{G_2 C_{M2}(t_{M2} - T_{M1})}{W}] \frac{1}{C_{H_1}} \quad (2)$$

当空气出口温度 t_2 已知时,由式(2)可确定空气出口湿度 H_2 ,然后由 $L = W / (H_2 - H_1)$ 求绝干空气用量 L . 干燥器的体积则采用体积给热系数法^[3]计算,故应先求出干燥过程的传热量 Q 、体积热系数 α 和总对数平均推动力 t_m . 逆流喷雾干燥器不额外充热量时所需的总传热量^[5] Q (kJ/h) 为:

$$Q = [\frac{I_2 - I_0}{H_2 - H_0} + q_l + \frac{G_2 C_{M2}(t_{M2} - t_{M1})}{W} - C_{ltM1}] W \quad (3)$$

收稿日期:2001-05-28

作者简介:吴武阳(1981-),男,福建福州人,福州大学99级本科生,主要从事化学工程方面的研究.

体积给热系数^[3]为:

$$\alpha = 2.01 \times 10^{-3} \frac{\lambda G_1}{\rho_L D^2 d_{cp}^{1.6} (u_c + u_{cp})^{0.8}} \quad (4)$$

喷雾干燥器产生的液滴很小,湿物料预热段的时间短,可以将预热段合并于恒速段中,整个干燥过程则由恒速干燥()和降速干燥()两个阶段组成。由于恒速段与降速段的对数平均推动力 Δt_m 与 Δt_m 有较大的差异;若直接根据空气和湿物料进出口温度计算 Δt_m 则误差较大。故先恒速段和降速段的对数平均推动力 Δt_m Δt_m ,而后由恒速干燥时间^[2] τ 和降速干燥时间^[2] τ 加权求和^[3] 得到总对数平均推动力。

$$\Delta t_m = \Delta t_m \frac{\tau}{\tau} + \Delta t_m \frac{\tau}{\tau} \quad (5)$$

式中 τ 为总干燥时间, $\tau = \tau + \tau$; 但 Δt_m 和 Δt_m 与干燥过程中恒速段与降速段交界处空气与湿物料的状态有关,必须先求得此时物料的临界干基湿含量 X_C 、湿球温度 t_w 和恒速段与降速段交界处空气的湿度 H_C 、温度 t_C 。

喷雾干燥器中的初始液滴直径 D_0 与产品颗粒直径 D_p 的关系^[3] 为:

$$D_0 = [\rho_p(1 + X_1)/\rho_L(1 + X_2)]^{\frac{1}{3}} D_p \quad (6)$$

由于喷雾干燥器中第二阶段液滴大小的变化可以忽略^[6],所以根据液滴大小的变化及水分的物料衡算求得 X_C 和 H_C 分别为:

$$X_C = \frac{1}{1 - W_1} \left[W_1 - \left(1 - \frac{D_p^3}{D_0^3} \right) \frac{\rho_w}{\rho_L} \right] \quad (7)$$

$$H_C = H_1 + [G_1(1 - W_1)(X_1 - X_C)]/L \quad (8)$$

不论干燥过程是否等焓,空气的状态点 (t_1, H_1) 、 (t_2, H_2) 和 (t_C, H_C) 在温度图上近似为一条直线,所以这三点符合下式:

$$(t_2 - t_1)/(H_2 - H_1) = (t_2 - t_C)/(H_2 - H_C) \quad (9)$$

由式(9)可求 t_C 。而对逆流喷雾干燥湿球温度是对应于空气出口状态 (t_2, H_2) 下的湿球温度;对于空气-水系统,湿球湿度和绝热饱和温度近似相等,也就是说湿球温度符合如下关系式^[5]:

$$(H_w - H_2)/(t_w - t_2) = -(C_{H_2}/r_w) \quad (10)$$

式中 H_w 为湿球温度下的空气饱和湿度,饱和蒸汽压 P_s 用安托因方程计算, r_w 与 t_w 的关系根据文献的数据回归得到:

$$r_w = 2514.72 - 2.626 t_w \quad (11)$$

因此式(10)为高度非线性方程,不能直接得到解析解。文献[1]采用手工试差计算,工作量大、效率低。本文编程用计算机求解,为计算机求解方便将式(10)改写成如下形式:

$$f(t_w) = -\frac{H_w - H_2}{t_w - t_2} - \frac{r_w}{C_{H_2}} - 1 \quad (12)$$

该函数 $f(t_w)$ 为单调函数,可将其变换^[7] 转化为单谷函数后用菲波那契法^[8] 求解湿球温度 t_w 。

根据以上工艺计算的分析,在其他条件确定的情况下,喷雾干燥的体积和绝干空气用量均为空气出口温度的函数。换句话说,干燥器优化设计数学模型的目标函数是空气出口温度 t_2 的函数。逆流喷雾干燥过程而言,空气出口温度必然在物料进口温度 t_{M1} 和空气进口温度 t_1 之间。因此,本文采用菲波那契法^[7] 在区间 (t_{M1}, t_1) 内搜索求解干燥器优化设计数学模型。

3 算 例

设计一牛奶逆流喷雾干燥器,产量为 400 kg/h,年工作时间为 300 天;牛奶进口干基含水率为 50%,密度为 1120 kg/m³,将其预热至 40 后进入干燥器;奶粉出口干基含水率为 25%,温度不高于 60,产品颗粒直径为 60 μm,密度为 1073 kg/m³ 奶粉比热为 1.25 kJ/(kg·K);新鲜空气温度为 25,温度不高于 60,干燥进口空气的温度为 160,温度为 0.01,流速为 0.3 m/s,干燥器热损失为 840 kJ/kg。

根据以上已知数据,在 40~160 间确定若干空气出口温度进行常规设计和优化设计,主要结果如表 1 和图 1~3 所示。其中设计序号 5 为优化设计结果,其余为常规设计结果。

表 1 干燥器设计结果

设计序号	$t_2/$	$V/ \text{ m}^3$	$H_2/ (\text{ kg/ kg})$	$t_w/$	$L/ (\text{ kg/ h})$	设备投资费/ (元/ 年)	$J/ (\text{ 元/ 年})$
1	50	191.51	0.045	40.3	5 297.23	459 255.52	513 938.03
2	55	167.73	0.043	40.5	5 549.48	428 526.46	485 401.41
3	60	155.16	0.041	40.7	5 826.96	411 641.70	470 928.00
4	65	148.88	0.040	40.8	6 133.64	402 898.33	464 849.66
5	67.5	147.34	0.039	40.9	6 301.86	400 724.43	464 137.52
6	70	146.71	0.038	41.0	6 474.40	399 830.76	464 743.10
7	80	151.53	0.035	41.4	7 283.69	406 604.05	478 548.35
8	90	167.72	0.032	41.7	8 324.22	428 654.06	509 638.75
9	100	198.39	0.029	42.0	9 711.59	467 767.27	560 805.01
10	110	252.76	0.025	42.4	11 653.91	530 545.37	640 456.41

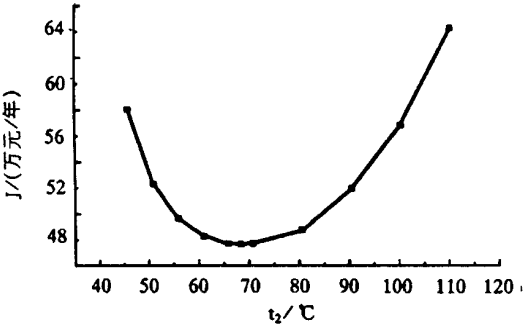


图 1 喷雾干燥系统年总费用

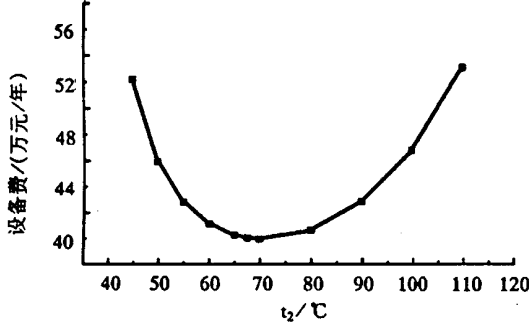


图 2 喷雾干燥系统设备费用

由表 1 可知逆流喷雾干燥器出口温度的变化虽然较大,但对物料的湿球温度影响较小;当空气的出口温度增大,则空气的出口湿度减小,空气用量增大,操作费用增大,干燥器体积和设备投资费先减小后增大;通过优化设计得到空气出口的最佳温度为 67.5,此时干燥系统的年总费用最小为 46.4 万元/年.由图 2 和图 3 所示,当空气出口温度提高时,干燥系统的年总费用和设备投资折旧费均先减小而后增大,且均在 67~70 左右达到最小值.在逆流喷雾干燥优化设计中,设备投资费用、干燥器的体积对优化设计结果的影响显著.

4 结 论

(1) 在改进文献[1]干燥优化设计模型及算法的基础上,建立了新的逆流喷雾干燥器优化设计模型,并利用计算机编程求解.从图 1 可看出:在最佳出口温度 ± 5 的范围内年总费用增加量小于 1%,空气出口温度偏离最佳温度值不大的范围内年总费用的变化较小.在逆流喷雾干燥的优化设计中,设备投资费用与年总费用随空气出口温度的变化趋势一致,设备投资费用对优化设计的结果影响显著.

(2) 以年总费用为目标函数对逆流喷雾干燥器的干燥介质出口温度进行优化设计,能够避免常规设计中凭经验确定空气出口温度,而造成设备费和操作费增加的弊端;使得设计出来的干燥系统年总费用最小,达到优化的目的.优化设计与常规设计相比在一定程度上节省了费用,牛奶逆流离心喷雾干燥规定设计中空气出口温度一般可取为 80~100^[2];若空气出口温度分别取为 80,90,100 进行常规设计时,干燥系统的年总费用将分别为优化设计的 1.03,1.10,1.21 倍.

(3) 利用计算机编程进行逆流喷雾干燥器的优化设计,可以避免繁琐的手工迭代计算;该模型和算法能够合理有效地对逆流喷雾干燥器进行设计,对工程设计人员具有一定的参考价值.

符 号 说 明

C_H 空气的湿比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

C_1	水比热, kJ/(kg·K)
C_M	物料比热, kJ/(kg·K)
D	干燥器直径, m
D_0	液滴初始直径, m
D_P	产品颗粒直径, m
d_{C_P}	液滴平均直径, m
F_C	设备费用年折旧率, 1/a
G_1	进料量(处理量), kg/h
G_2	产品量, kg/h
H	空气的温度, kg 水/kg 绝干空气
I	湿空气的焓, kJ/kg
L	绝干空气用量, kg/h
q_1	干燥器热损失, kJ/kg
r_w	湿球温度下水的汽化潜热, kJ/kg
T_h	年工作时间, h
u_C	干燥器中空气平均流速, m/s
u_{cp}	液滴的平均浮翔速度, m/s
V	干燥器体积, m ³
v_H	湿空气比容, m ³ /kg
t	空气温度,
t_M	物料温度,
W	物料湿基湿含量
X	物料干基湿含量
Y	美元与人民币的汇率
α	体积给热系数, kJ/(h·m ² ·°C)
λ	空气平均导热系数, kJ/(m·h·°C)
Δt_m	对数平均温度差,
ρ_P	产品密度, kg/m ³
ρ_w	水密度, kg/m ³
ρ_L	料液密差, kg/m ³

μ	干燥器中空气平均粘度, m ² /s
下标	
0	空气预热器进口
1	干燥器进口, 空气预热器出口
2	干燥器出口
	表面蒸发段
	加热段

参考文献:

- [1] Happel J, D G J Krdan. Chemical Process Economics [M]. New York: MARCEL DEKKER. INC. 1975. 408 - 417.
- [2] 潘永康. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 1998. 285 - 1231
- [3] 化工设备设计全书编辑委员会. 干燥设备设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社. 1983. 199 - 275.
- [4] 化学工程手册编辑委员会. 化学工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社. 1991. 16 - 370 ~ 16 - 381.
- [5] 谭天恩, 麦本熙, 丁惠华. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社. 1998.
- [6] 郭宜时, 王喜忠, 喷雾干燥(下册). 北京: 化学工业出版社. 1983. 210 - 232
- [7] 阮奇, 叶长燊, 黄诗煌. 化学原理优化设计与解题指南[M]. 北京: 化学工业出版社. 2001.
- [8] 韦鹤平. 最优化技术应用[M]. 上海: 同济大学出版社. 1987.

The optimum design model of countercurrent spray dryer and its application

WU Wu-yang, YE Chang-shen, RUAN Qi

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The optimum design model of countercurrent spray dryer is established with the annual total cost as the objective function. The optimum design model is used to spray dryer design for milk. The practical example shows that the reasonable and effective method is obtained using the optimum design mathematical model. The effect of investment cost of equipment on the result of optimum design is notable.

Key words: spray; countercurrent; optimum design; dryer; mathematical model