

组合式干燥系统的分段优化设计方法

王胜玮, 胡仰栋, 安维中, 伍联营

(中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 提出了分离过程的分段设计法: 将一个任务分解为多个子任务, 根据各个子任务的不同特点进行设计. 对干燥过程进行优化设计, 以年费用最小为目标, 将干燥过程表示为最多3段的超结构, 每段有2个干燥设备可以选择, 给出了单元和过程系统的模型和经济模型. 实例研究表明, 当物料含水量大于物料在该条件下的临界含水量时, 宜采用两段干燥的方法, 将回转圆筒干燥器和流化床干燥器组合进行干燥; 当物料含水量低于临界含水量时, 宜采用一段干燥, 将物料直接放入流化床干燥器进行干燥.

关键词: 组合式干燥; 分段设计; 优化; 遗传算法

中图分类号: TQ028.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2006)06-0937-05

1 前言

干燥是化学工程中出现最早、应用最广、也是能耗最多的单元操作之一. 其重要性不仅在于它对产品生产效率 and 总能耗有较大的影响, 还在于它往往是生产过程的最后工序, 直接影响产品质量^[1]. 这些因素都激励着人们在干燥领域进行研究和开发. 经过多年的发展, 干燥技术已日趋成熟和完善.

随着计算机在工业生产中的广泛应用, 人们逐渐开始利用计算机对干燥过程进行设计, 并寻求最佳设计方案, 这样不仅可节约大量的时间、精力, 而且从节能、减少投资方面也有重要意义. Zbicin'ski^[2]用数学模型来描述脉冲燃烧干燥过程, 同时用实验证明了该模型是与真实过程相符的, 并可应用到更复杂的干燥过程中去. Demir^[3], Arinze^[4]和 Fernandez-Pe'rez^[5]分别对不同的干燥过程进行了模拟和优化, 得出最佳干燥条件, 对这些干燥过程的设计起了指导作用. 叶长燊等^[6-9]对回转干燥器和喷雾干燥器建立了优化设计模型, 并进行求解, 考虑干燥器出口温度对总费用的影响, 以年总费用为目标函数对模型进行优化, 得出最佳出口温度, 为干燥器的优化设计提供了更合理更有效的手段.

然而, 由于干燥物料的多样性和复杂性, 有时用单一形式的干燥器干燥物料往往不能达到最终产品要求. 如果把2种或2种以上形式的干燥器组合起来, 可充分利用各自的优点, 优化操作过程, 以降低能耗, 同时对提高产品质量、提高经济效益都具有重要的意义^[10]. 王宝和等^[11]介绍了干燥器的不同组合方式及其优点、使用条件等. 汪智国等^[12]提出将气流干燥器和旋流干燥器组合起来干燥聚氯乙烯, 发现与以往的干燥方式相比,

组合干燥具有能耗低、热效率高、干燥强度大等优点.

本工作以干燥过程的设计为例, 提出了一种新的优化设计方法, 即分段设计法.

2 过程系统的分段设计

2.1 过程系统的分段设计方法

多分离过程由多个操作单元组成, 每个单元完成不同的分离任务. 如多组分精馏系统中包含多个精馏塔, 每个塔完成2个组分或2组组分的分离. 在反渗透海水淡化系统的设计中^[13], 根据产品水质的不同要求和给水浓度不同, 设计不同的方案, 选择一级流程或二级流程. 因此分离过程的设计往往是分段进行的. 下面以干燥过程为例来说明分段设计的普遍性和必要性.

干燥速率是影响干燥过程的一个重要因素, 是指单位时间内单位干燥面积上汽化的水分质量, 即 $U = -G'dX/(Sdt)$. 由图1^[14]所示的物料干燥曲线可以看出, AB段为物料的预热段, 此时物料的含水量随时间变化

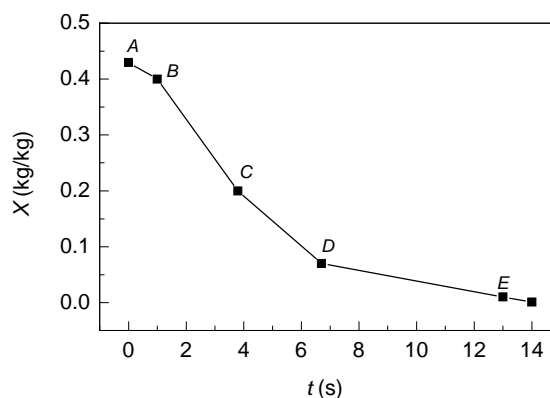


图1 干燥曲线
Fig.1 Drying curve

收稿日期: 2005-09-27, 修回日期: 2006-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 20376078)

作者简介: 王胜玮(1982-), 女, 江苏省南京市人, 硕士研究生, 研究方向为过程系统工程; 胡仰栋, 通讯联系人, E-mail: ydhuhd@mail.ouc.edu.cn.

不大,即斜率 dX/dt 较小. BC 段的斜率 dX/dt 变大,而 X 与 t 基本呈直线关系,因此这段时间内 U 可以看作是不变的,这一阶段称为恒速阶段.进入 CD 段后, dX/dt 逐渐减小,干燥速率也随之降低,这一阶段称为降速阶段.2个干燥阶段的交点称为临界点,对应的含水量称为临界含水量.这两个过程对干燥速率的要求是不一样的,因此对不同的过程应采用不同的设计方法.

因此,本研究提出如下的分离过程分段设计方法:依据分离过程在不同阶段所需推动力的不同而将分离任务分解为若干子任务,每个子任务都可以有不同的设计方案,建立一个包含各种可行方案的超结构数学模型,以总费用最小为目标,采用合适的算法进行优化计算,得到优化的工艺流程方案.具体过程如图2所示.

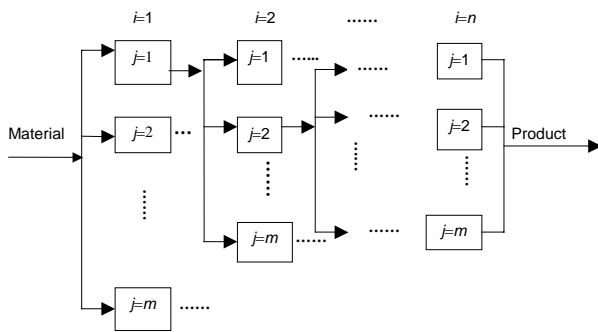


图2 分段设计系统示意图
Fig.2 The sketch of segmented design system

分段设计的概念模型是将优化设计表达为一个混合整数非线性规划(MINLP):

$$\min: \text{OBJ} = \sum C_{Ci} + \sum O_{Ci} + \sum L_{Ci}, \quad (1)$$

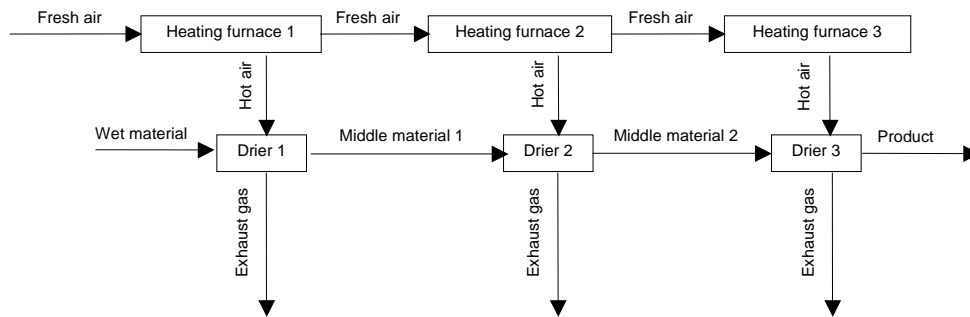


图3 组合式干燥系统示意图
Fig.3 The sketch of combined drying system

2.2.2 经济模型

在干燥系统中,影响干燥费用的因素有设备的投资费用和干燥过程的操作费用.在进行过程设计时,考虑每台干燥器的投资和操作费用,它们之间的权衡决定了最优的干燥系统结构,由此得到的干燥费用是最合理的.

这里用 $i=1, 2, \dots, n$ 表示过程被划分的段数, $j=1, 2, \dots, m$ 表示每一段可能的设计方案数.对于该过程的第 i 段进行设计时,进行如下计算:

$$(\sum F_i)_i = (\sum F_o)_i, \quad (2)$$

$$(\sum Q_i)_i = (\sum Q_o)_i, \quad (3)$$

$$C_{Ci} = x_{ij}(C_{Cj})_j, \quad (4)$$

$$O_{Ci} = x_{ij}(O_{Cj})_j, \quad (5)$$

$$L_{Ci} = x_{ij}(L_{Cj})_j, \quad (6)$$

$$\sum x_{ij} = 1, \quad x_{ij}(1 - x_{ij}) = 0, \quad (7)$$

其中 x_{ij} 为 0,1 变量约束,条件是满足物料衡算、能量衡算、相平衡等等式约束和工艺参数取值范围的不等式约束.

分段设计方法的关键在于超结构模型的确立,模型太大难以求解,太小又无法得到最优的分段方法.因此需要对过程有深入的了解,以确定合理的分段方法,必要时可依据工艺特点和要求总结分段的规则.

2.2 组合式干燥系统的优化设计

下面以组合干燥过程为例说明上述分段设计方法.

2.2.1 系统模型

在干燥过程中,本工作考虑将该过程划分为3段进行优化设计,每段考虑回转圆筒干燥器和流化床干燥器2种设计方案,系统模型如图3所示.各个干燥器之间满足物料平衡、质量平衡、能量平衡的关系.

对于一个干燥系统,年总费用 J (¥/a)包括设备的投资折旧费用和空气预热、风机运转以及干燥器散热损失等操作费用,即

$$J = G_D + G_{\text{heat}} + G_p + G_L, \quad (8)$$

设备的年投资折旧费用 G_D 包括干燥器、加热气、风机和除尘设备的投资折旧费, 当设备材料为碳钢时, 设备年投资折旧费为^[15]

$$G_D = aMbV^c F_c Y, \tag{9}$$

式中, a 为综合指数, 随企业规模、加工能力、产品性能等不同而不同, 通常可取 $a=0.2\sim 0.4$; b 为经验系数, c 为指数, 具体参数见文献[15]; F_c 为设备费用年折旧率, 通常取 0.1; V 为设备的特性参数, 对于不同的设备分别表示为体积或表面积。

对于连续大批量的干燥, 采用煤加热空气比较合适。1 t 标准煤(500 ¥/t)燃烧可提供 3×10^7 kJ 的热量, 而煤加热空气时热量的利用率 η 大约为 65%。空气的预热费用与空气的流量及预热温升有关, 空气的预热费用^[16]

$$G_h = \frac{\eta L t_h C_{H_0} (T_1 - T_0)}{3 \times 10^7}. \tag{10}$$

风机的年运转动力费用 G_p ^[16]可用下式计算:

$$G_p = 0.0004 Q_h t_h. \tag{11}$$

在干燥系统中, 热空气由风机鼓入干燥器内, 其风量 Q_h 为

$$Q_h = L(0.733 + 1.244H)(273 + T)/273. \tag{12}$$

干燥器通过外表面向外界散热, 其热损失与干燥器的外表面积和传热温度差成正比, 散热费用 G_L ^[16]为

$$G_L = \eta K t_h A \Delta T / (3 \times 10^7), \tag{13}$$

式中, ΔT 为传热推动力:

$$\Delta T = (T_1 + T_2)/2 - T_0. \tag{14}$$

以上费用计算中的 t_h 为年生产时间, 一般取 $t_h =$

7200 h/a.

2.2.3 优化设计方法

该干燥过程的设计问题是对于不同的待干燥物料, 以年费用最小为目标, 设计一个干燥系统. 该设计问题可表达为一个混合整数非线性规划(MINLP):

$$\min: J = \sum G_{D_i} + \sum G_{heat,i} + \sum G_{p,i} + \sum G_{L,i}. \tag{15}$$

约束条件是满足过程热力学、设备选型、设计要求的约束, 并且满足 $T_{ij} > T_0$, $T_{ij} > T_{(i+1)j}$, $T_{ij} < 300$, $X_{ij} > X_{(i+1)j}$, $H_{ij} < H_{(i+1)j}$.

用遗传算法来求解混合整数非线性规划问题, 即可确定具体工艺条件下的最佳段数以及最优的这一段干燥的出口物料含水量及温度, 同时还可得出设备参数的最优值, 如每一个干燥器的大小, 以及其他操作参数的最优值, 如每一部分空气的流量、空气进出口温度等. 本研究所用的遗传算法使用 C++ 语言编写, 群体规模 100, 复制率 90%, 杂交率 80%, 变异率 15%, 收敛标志为个体适应度值不再变化, 计算所用机器 CPU 为 Intel 赛扬 2.4 G, CPU 时间为 6.75 s.

3 实例

3.1 实例 1

设计一个干燥系统用于干燥聚氯乙烯, 要求产量为 30 kg/h. 进口物料干基含水率为 30%, 温度为 25 °C; 出口物料干基含水率为 0.2%. 物料的比热为 0.9 kJ/(kg·K), 新鲜空气温度为 25 °C, 湿度为 0.01, 流速为 0.1 m/s. 该物料在回转圆筒干燥器和流化床干燥器中的干燥曲线简图如图 4 所示. 表 1 为优化设计结果, 表 2 为不同条件下设计结果的比较.

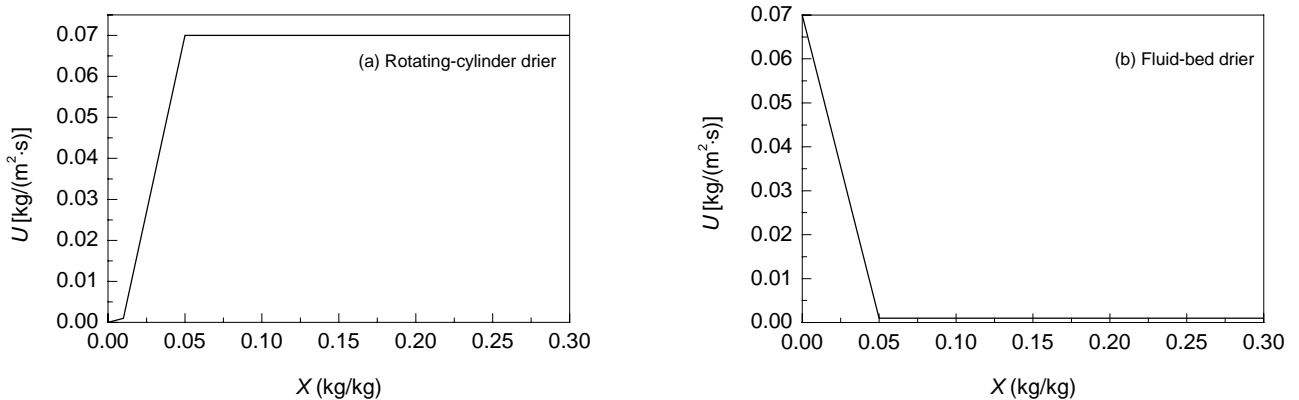


图 4 回转圆筒干燥器和流化床干燥器的干燥曲线
Fig.4 The drying curves of rotating-cylinder drier and fluid-bed drier

表1 设计结果
Table 1 Designed results

Parameter	Result
Number of segment	2
Type of drier of the first segment	Rotating-cylinder drier
Type of drier of the second segment	Fluid-bed drier
Inlet temperature of air of the first segment (°C)	266
Outlet temperature of air of the first segment (°C)	126
Outlet moisture content of air of the first segment	0.063
Outlet moisture content of material of the first segment	0.04
Outlet temperature of material of the first segment (°C)	26.5
Inlet temperature of air of the second segment (°C)	263
Outlet temperature of air of the second segment (°C)	103
Outlet moisture content of air of the second segment	0.057
Diameter of the rotating-cylinder drier (m)	0.74
Length of the rotating-cylinder drier (m)	9.42
Area of the fluid-bed drier (m ²)	2.86
Total expenditure (¥/a)	39376

表2 与其他干燥结果的比较
Table 2 Comparison in drying results

Drying method	Total expenditure (¥/a)
One-segment drying (rotating-cylinder drier)	992089
One-segment drying (fluid-bed drier)	272873
Two-segment drying	39376

3.2 实例2

设计一个干燥系统用于干燥偏钨酸铵,要求产量为20 kg/h. 进口物料干基含水率3.5%, 温度25 °C; 出口物料干基含水率0.3%. 物料的比热0.8 kJ/(kg·K), 新鲜空气温度25 °C, 湿度0.01, 流速1.0 m/s. 该物料的干燥曲线简图如图5所示. 表3为优化设计结果.

由以上两例的设计结果可以看出, 在干燥过程中,

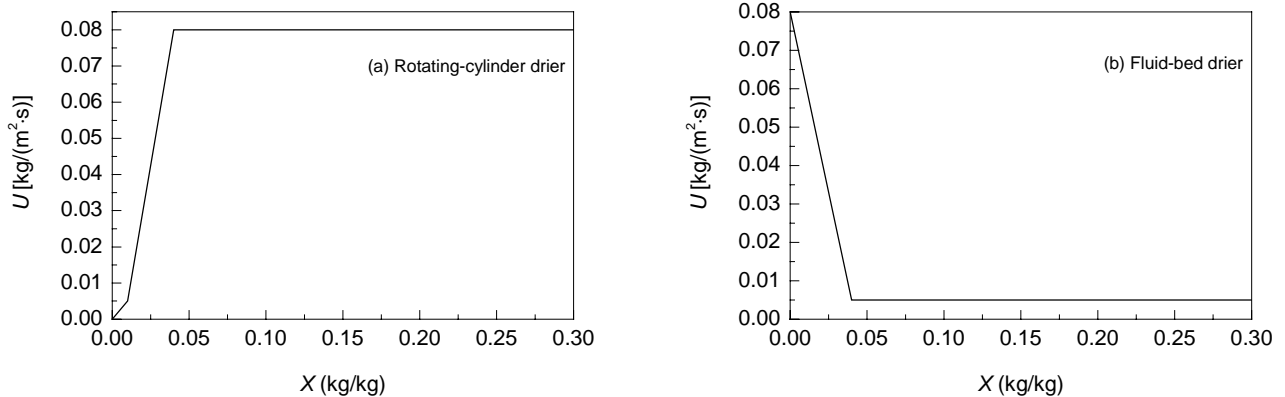


图5 回转圆筒干燥器和流化床干燥器的干燥曲线

Fig.5 The drying curves of rotating-cylinder drier and fluid-bed drier

表3 设计结果

Table 3 Designed results

Parameter	Result
Number of segment	1
Type of drier	Fluid-bed drier
Inlet temperature of air (°C)	299
Outlet temperature of air (°C)	171
Outlet moisture content of air	0.047
Area of the fluid-bed drier (m ²)	0.52
Total expenditure (¥/a)	2732

4 结论

提出了分离过程分段设计方法, 并运用此方法对干燥过程进行了设计, 即根据干燥过程不同部分所需推动力的不同, 将干燥过程表达为一个超结构模型, 以年费用最小为目标, 对干燥过程的段数和每段工艺参数进行优化设计. 实例研究表明, 当物料含水量大于物料在该

当进口物料的含水量高于临界含水量时, 应采用二级干燥流程, 将回转圆筒干燥器和流化床干燥器组合干燥; 含水量低于临界含水量时, 应采用一级干燥流程, 仅用流化床进行干燥即可. 这是由于当物料的含水量高于临界含水量时, 物料表面含有自由水分, 当其完全汽化后, 湿表面则从物料表面退缩, 此时控制速率的是水蒸汽穿过空气-湿分界面的扩散, 此阶段后期湿分界面可能内移, 湿分将从物料内部因毛细管力迁移到表面, 所以干燥速率应为常数, 进行的是恒速干燥. 在这一阶段, 物料的温度近似维持在湿球温度, 物料的平均含水量随干燥时间线性下降, 此时干燥速率完全取决于外部的热质条件, 因此使用回转圆筒干燥器可达到较好的效果. 若采用流化床干燥器进行干燥, 物料中较高的含水量将影响流化床干燥器的正常运行, 成倍地扩大流化床的面积才可避免这些问题, 但这样会产生高额的费用. 当物料的含水量低于临界含水量时, 物料表面会出现干点, 总的物料表面积下降, 所以干燥速率降低, 并且随着热空气的进入, 物料内没有足够的水分蒸发, 因此剩余的热量将使物料升温, 进行降速干燥阶段, 此时干燥速率的控制因素是扩散速率. 从不同干燥器的性能比较来看, 应使用流化床干燥器, 而转筒干燥器若要达到这样的干燥效果, 应增加干燥器的长度, 这样也会产生高额费用. 因此, 采用本工作提出的分段设计方法既可以提高干燥的效果, 又降低了干燥的费用, 从而达到节能的目的.

条件下的临界含水量时, 宜采用两段干燥的方法, 将回转圆筒干燥器和流化床干燥器组合进行干燥; 当物料含水量低于临界含水量时, 宜采用一段干燥, 将物料直接放入流化床干燥器进行干燥。

符号表:

a	综合指数	A	干燥器的外表面积 (m^2)
b	经验系数	c	指数
C_C	投资费用 (¥)	C_{H0}	物料比热容 [$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$]
F_c	设备费用折旧率	F_1	输入物料流量 (kg/h)
F_O	输出物料流量 (kg/h)	G_D	设备投资折旧费用 (¥/a)
G_h	空气预热费用 (¥/a)	G_L	干燥器散热损失 (¥/a)
G'	一批操作中绝干物料质量 (kg)	G_p	风机运转动力费用 (¥/a)
H	空气的湿度 (kg/kg)	J	干燥系统年总费用 (¥/a)
K	总散热系数 [$kJ/(m^2 \cdot ^\circ C)$]	L	绝干空气用量 (kg/h)
L_C	其他费用 (¥)	M	通货膨胀系数
O_C	操作费用 (¥)	Q_h	风机的风量 (m^3/h)
Q_1	进入系统的能量 (kJ)	Q_0	离开系统的能量 (kJ)
S	传热面积 (m^2)	t	干燥时间 (s)
T	物料初始温度 ($^\circ C$)	ΔT	传热推动力 ($^\circ C$)
T_0	空气进入预热器时温度 ($^\circ C$)	T_1	空气离开预热器温度 ($^\circ C$)
T_2	空气离开干燥器时温度 ($^\circ C$)	t_h	年生产时间 (h/a)
U	干燥速率 [$kg/(m^2 \cdot s)$]	V	设备的特性参数 (m^2 或 m^3)
X	物料干基含水率 (kg/kg)	Y	美元对人民币的汇率
η	热量利用率 (%)		
下标			
i	过程被划分的段数	j	每一段可能的设计方案数

参考文献:

- [1] 伍沅. 干燥技术的进展和应用 [J]. 化学工程, 1995, 23(3): 47-57.
- [2] Zbicin'ski I. Calculations of the Pulse Combustion Drying System [J]. Energy Convers. Manage., 2001, 42: 1909-1918.
- [3] Demir V. Mathematical Modelling and the Determination of Some Quality Parameters of Air-dried Bay Leaves [J]. Biosystems Eng., 2004, 88(3): 325-335.
- [4] Arinze E A. Experimental Evaluation, Simulation and Optimization of a Commercial Heated-air Batch Hay Drier—Part 2. Computer Simulation and Optimization of Hay Drier Performance [J]. J. Agric. Eng. Res., 1996, 63: 315-322.
- [5] Fernandez-Perez V. Optimization of the Drying Step for Preparing a New Commercial Powered Soup [J]. Innovative Food Science and Energy Technologies, 2004, 5: 361-368.
- [6] 叶长桑, 阮奇, 黄伟锋, 等. 逆流回转圆筒干燥器优化设计与软件开发 [J]. 浙江工业大学学报, 2001, 19(4): 378-382.
- [7] 施小芳, 叶长桑. 并流回转圆筒干燥器优化设计与软件开发 [J]. 福州大学学报, 2001, 29(2): 119-123.
- [8] 叶长桑, 阮奇, 黄诗煌. 并流喷雾干燥器优化设计数学模型与软件开发 [J]. 南京化工大学学报, 2001, 23(6): 49-53.
- [9] 吴武阳, 叶长桑, 阮奇. 逆流喷雾干燥器优化设计数学模型及其应用 [J]. 吉林化工学院学报, 2002, 19(3): 13-16.
- [10] 张忠杰, 伊晓路, 张莲, 等. 组合干燥工艺技术研究 [J]. 化工设备与防腐蚀, 2004, (2): 24-26.
- [11] 王宝和, 王喜忠. 新型干燥设备—多功能和组合干燥器 [J]. 化学工程, 1998, 26(1): 39-44.
- [12] 汪智国, 汪展文, 李立新, 等. 聚氯乙烯树脂高校组合式干燥系统 [J]. 聚氯乙烯, 1999, (1): 8-14.
- [13] 卢彦越, 胡仰栋, 徐冬梅, 等. 反渗透海水淡化系统的优化设计 [J]. 水处理技术, 2005, 31(3): 9-14.
- [14] 姚玉英. 化工原理, 下册 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999. 242-301.
- [15] 潘永康. 现代干燥技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998. 1225-1231.
- [16] 《化学工程手册》编辑委员会. 化学工程手册, 第 4 卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1991. 370, 381.

Segmented Optimal Design Method for the Combined Drying System

WANG Sheng-wei, HU Yang-dong, AN Wei-zhong, WU Lian-ying

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)

Abstract: A new design method—the segmented design method for drying system was put forward. The primary idea of this method is disassembling one task into several tasks, then designing them based on the different characteristics of each assignment. This method was studied by the optimal design of the drying process. The optimal design was aimed at the minimization of annual total cost, of which the drying process was expressed as a three-segment superstructure at most and two drying equipments could be chosen in each segment. The system models of each unit and process and the economic models were used in this method. The result showed that it was better to apply the two-segment method when the moisture of material was more than the critical moisture under the same condition, with the rotating-cylinder drier and the fluid-bed drier combined to drying; one-segment drying method with materials put into fluid-bed drier directly should be adopted when the moisture of material was less than the critical moisture under the same condition.

Key words: combined dry; segmented design; optimization; genetic algorithm