

内热式多级连续真空炉 动态数学模型线性化与仿真^①

冯丽辉 陈 雯

(昆明工学院自动化系、冶金系, 昆明 650093)

摘 要 欲使真空炉达到优质、低能耗、长炉寿的最佳工况, 需实现真空炉的最优控制。为了能应用线性最优控制理论, 探寻真空炉的最优控制规律, 本文在已获得真空炉动态简化机理模型的基础上, 对其进行了线性化处理。经计算机仿真, 其结果是令人满意的。由此表明, 可用该动态低阶线性模型来代替原动态高阶机理模型寻优。

关键词 真空炉 动态简化机理模型 线性化 仿真

昆明工学院和云锡公司共同发明的内热式多级连续真空炉具有先进的工艺技术, 多年来已广泛而成功地应用于有色冶金工业, 并成为分离二元合金的重要设备之一。目前, 在应用此型炉子最多的云锡公司, 炉子作业仅凭经验操作, 先进的工艺与落后的人工控制极不相称。在当今能源紧缺的状况下, 除需保证产品的优质、高产和长炉寿外, 降低能耗已迫在眉睫。为此, 有必要实现真空炉的计算机优化操作。由于炉子在真空状态下运行, 炉子呈封闭状态且在高温下作业, 要想在线地检测炉内各级蒸发盘的温度极为困难, 而要测知盘内合金液的成分则几乎是不可能的事情。因此, 要实现真空炉的最优控制, 只有借助于炉子的动态数学模型。

为此, 笔者已建立了用于处理焊锡(Sn-Pb二元合金)的内热式多级连续真空炉的动态机理模型^①(称为原模型, 已通过云南省科委的鉴定)。但由于原模型是一个多输入、多输出、高阶非线性模型, 直接利用它来进行计算机离线寻优较为困难, 而要实现计算机实时最优控制就更难了。

从控制论的角度出发, 必须将原模型进行降阶处理。为此, 笔者又采用分段集结法获得了炉子的简化机理模型^[2]。简化机理模型的阶次虽然降低了(由36阶降到12阶), 但仍具有非线性。从最优控制的角度来看, 非线性的优化控制理论尚未成熟。而要应用线性最优控制的理论成果, 还需将简化机理模型进行线性化处理。

故本文从线性化的角度出发, 对简化机理模型进行了线性化处理, 以获得炉子的动态低阶线性模型。

1 线性模型的获取

1.1 真空炉的结构、原理及原模型

用于处理焊锡的工业真空炉由12级蒸发盘、3层冷凝罩、进出料管、供电系统、水冷系统、抽真空系统等组成。如图1所示。

真空炉以电为能源, 经石墨电柱转换为热能, 用以加热进入炉内的焊锡熔体。当炉内达到一定的温度和真空度时, 合金液中的Pb将逐级不断地蒸发并到达冷凝罩, 凝结为液相并

^① 云南省应用基金资助 收稿日期: 1994-02-28

汇入集铅盘，经与之相连的排铅管排出，作为粗铅产品。与此同时，残留物的含 Pb 量则逐级减少，最后由末级蒸发盘产出粗锡产品，最终达到分离 Sn-Pb 二元合金的目的。

经分析得知：真空炉为一个多输入、多输出(MIMO)系统，如图 2 所示。系统的输入量为进料量 $Y(\text{kg/h})$ ($A_y(\%)$ 、 $T_y(\text{K})$) 以及入炉电功率 $W(\text{kW/h})$ ；而输出量为粗锡量 $x(\text{kg/h})$ ($A_x(\%)$) 和粗铅量 $Z(\text{kg/h})$ ；状态变量为各级蒸发盘中合金液的滞留量 $M_i(\text{kg})$ 、及其含 Pb 量 $A_i(\%)$ 和温度 $T_i(\text{K})$ ， $i = 1 \sim 12$ 。 A_y 、 T_y 分别为 Y 中的含 Pb 量及其温度， A_x 为 x 中的含 Pb 量。

根据物料、质量、能量平衡定律，以每级蒸发盘为研究单元，列出其动态方程，当 $i = 1 \sim 12$ 时，即可得到原模型^[1]。

1.2 原模型的简化

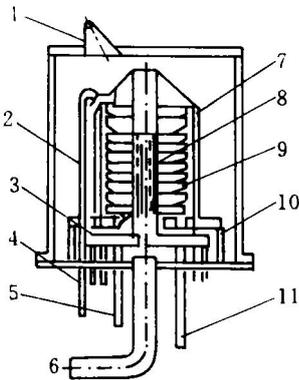


图1 真空炉结构示意图

- 1—观察孔；2—进料管；3—底座；
- 4—电极；5—排铅管；6—抽真空；
- 7—冷凝罩；8—电柱；9—蒸发盘；
- 10—集铅盘；11—排锡管

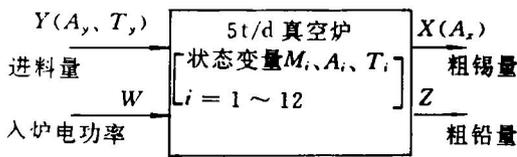


图2 真空炉输入-输出示意图

因原模型为高阶、非线性模型，直接用它来寻优极为困难，需进行降阶和线性化处理。

为此，采用分段集结法对原模型进行降阶处理。根据原模型仿真及实地考察的结果，认为将 12 级蒸发盘组成的蒸发系统分为 4 段较为合适，如图 3 所示。

每段包含 3 级蒸发盘，每段可视为一级虚拟蒸发盘。而且，各段均有明确的物理含义：第 I 段为进料段，第 II 段为预热段，第 III 段为蒸发段，第 IV 段为出料段。

同理，以段为研究单元，根据物料、质量、能量平衡定律，可列出 R 段的动态方程，当 $R = 1 \sim 4$ 时，即可得炉子的动态简化模型^[2]。

1.3 简化模型的线性化处理

简化模型的阶次虽然较原模型低，但模型本身仍存在非线性，还需进一步做线性化处理。

为此，设线性化模型的增量化结构为^[3]：

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u + D\Delta u_d \quad (1)$$

就真空炉而言，状态变量 $\Delta x = [\Delta M_R^T \Delta A_R^T \Delta T_R^T]_{3R_m \times 1}^T$ 且 $\Delta M_R = [\Delta M_1 \Delta M_2 \Delta M_3 \Delta M_4]$ ， $\Delta A_R^T = [\Delta A_1 \Delta A_2 \Delta A_3 \Delta A_4]$ ， $\Delta T_R^T = [\Delta T_1 \Delta T_2 \Delta T_3 \Delta T_4]$ 。 ΔM_R 、 ΔA_R 、 ΔT_R 分别为 M_R 、 A_R 、 T_R 的增量； M_R 、 A_R 、 T_R 分别为 R 段中合金液的滞留量、含 Pb 量和温度。

系统矩阵 A 为 $3R_m \times 3R_m$ 阵，输入矩阵 B

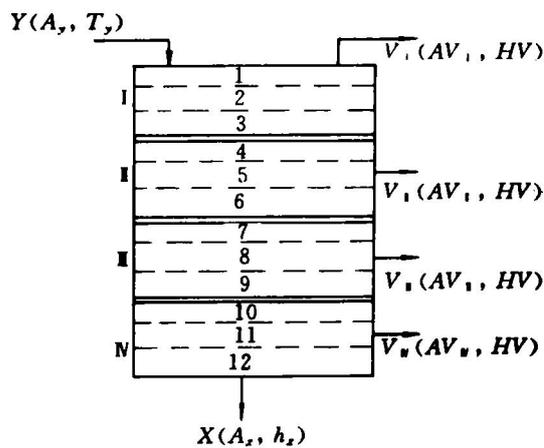


图3 蒸发系统分段示意图

为 $3R_m \times 1$ 阵, 扰动矩阵 D 为 $3R_m \times 3$ 阵, $R_m = 4$ 。

输入量(称控制量) $\Delta u = \Delta W$ 为入炉电功率的增量; 由于 Y 难以自动检测和控制, 视 Y 为扰动量之一; A_y 随批料的不同而变化; T_y 随熔化锅的温度变化而波动, 故扰动量 $\Delta u_d = [\Delta Y \ \Delta A_y \ \Delta T_y]^T_{3 \times 1}$, ΔY 、 ΔA_y 、 ΔT_y 分别为 Y 、 A_y 、 T_y 之变化量。

显然, 只要确定了(1)式中矩阵 A 、 B 、 D 中各元的值, 线性模型也就随之确定了。

因此, 首先令简化模型^[2]为:

$$\begin{cases} \frac{dM_R}{dt} = L_{R-1} - L_R - V_R = F_{R1} \\ \frac{dA_R}{dt} = [L_{R-1}(A_{R-1} - A_R) - V_R(AV_R - A_R)]/M_R = F_{R2} \\ \frac{dT_R}{dt} = [L_{R-1}(H_{R-1} - H_R) - V_R(HV - H_R) + Q_R]/M_R CP_R = F_{R3} \\ R = 1 \sim 4 \end{cases}$$

式中 L_{R-1} 、 L_R —流入、流出 R 段合金液的流量(kg/h); A_{R-1} 、 A_R —流入、流出 R 段合金液中的含 Pb 量(%); V_R 、 AV_R 、 HV — R 段的蒸发量(kg/h)及其含 Pb 量(%)和热焓(kJ/kg); H_{R-1} 、 H_R —流入、流出 R 段合金液的热焓(kJ/kg); CP_R — R 段合金液的比热(kJ/kg·K); Q_R — R 段所获得的有效加热量(kJ/h) = $3600W\eta \cdot \lambda_R$, η 为热效率, λ_R 为权系数。

$$\left. \begin{aligned} \text{则有: } \dot{x}_i &= F_{Ri}(x, u, u_d) \\ i &= 1 \sim 3, R = 1 \sim 4 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 i —方程的个数, R —段数。

将式(2)在稳定工作点 S 处按 Taylor 级数展开且取其线性项, 增量化后即可得式(3):

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{x}_i &= \frac{\partial F_{Ri}}{\partial x} \Big|_S \Delta x + \frac{\partial F_{Ri}}{\partial u} \Big|_S \Delta u + \frac{\partial F_{Ri}}{\partial u_d} \Big|_S \Delta u_d \\ i &= 1 \sim 3, R = 1 \sim 4 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

令:

$$A = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial x} \Big|_S = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} 3R_m \times 3R_m$$

$$\text{其中, } \begin{cases} A_{i1} = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial M_R} \Big|_S - R_m \times R_m \\ A_{i2} = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial A_R} \Big|_S - R_m \times R_m \\ A_{i3} = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial T_R} \Big|_S - R_m \times R_m \\ i = 1 \sim 3, R_m = 4 \end{cases}$$

令:

$$B = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial u} \Big|_S = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} 3R_m \times 1$$

且 $B_{i1} - R_m \times 1, i = 1 \sim 3, R_m = 4$

令:

$$D = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial u_d} \Big|_S = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} 3R_m \times 3$$

$$\text{且, } \begin{cases} D_{i1} = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial Y} \Big|_S - R_m \times 1 \\ D_{i2} = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial A_y} \Big|_S - R_m \times 1 \\ D_{i3} = \frac{\partial F_{Ri}}{\partial T_y} \Big|_S - R_m \times 1 \\ i = 1 \sim 3, R_m = 4 \end{cases}$$

于是, 式(3)可表示为式(1), 即:

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u + D\Delta u_d \quad (1)$$

因 Δx 为 x 的增量, 取 $\Delta x(0) = [0]_{3R_m \times 1}$, $R_m = 4$ 。

取 10 组数据, 即 Y 和 W (来自生产现场正常工作情况下的台账记录) 的平均值, 作为求取稳态工作点 S 的输入量, 也就是 $Y_s = \bar{Y} = 208.12$ (kg/h), $W_s = \bar{W} = 58.337$ (kW/h)。将 Y_s 和 W_s 输入到简化机理模型的仿真程序中, 即可计算出炉内各段的 M_R 、 A_R 、 T_R 等变量的稳态值, 由它们的值也就可确定矩阵 A 、 B 、 D 各元之值。

2 模型的验证

为检验此线性模型是否可用, 我们采用了四阶龙格-库塔法求解(1)式, 应用 True Basic 语言, 编写了其仿真程序。

一般, 对同一批原料而言, A_y 可视为定

值, T_i 亦可通过控制趋于恒定, 故只要输入任意一组 Y 和 W , 即可由此线性模型的仿真程序计算出炉内纵向 Pb 含量及温度分布和产品粗锡中的含 Pb 量(衡量产品质量是否合格的指标)。将其分布同原模型、简化模型得到的分布相对照, 见图 4 和图 5。由图可看出, 线性模型的分布较简化模型的分布更接近原模型。尤其在炉子的出料段, 线性模型与原模型的分布几乎重叠, 吻合较好。

为了充分证明此线性模型, 将来自现场台账记录值中的 10 组 Y 和 W 分别输入到原模型、简化模型、线性模型的仿真程序中, 可依次得到产品粗锡中含 Pb 量的计算值 A_x 、 A_{rx} 、 A_{lx} , 它们之间的比较见附表。

由附表可看出: A_{lx} 与 A_x 、 A_{rx} 相差不大, 且

A_{lx} 更接近 A_x 。由二者均方差可看出此点, 即:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (A_{rx}^k - A_x^k)^2}{(10 - 1)}} = 0.5069$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (A_{lx}^k - A_x^k)^2}{(10 - 1)}} = 0.4959$$

附表 A_x 、 A_{rx} 、 A_{lx} 结果比较表

J	1	2	3	4	5
$Y/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	202.60	200.80	205.50	202.90	21.60
W/kW	56.00	56.51	57.00	57.54	58.08
$A_x(\%)$	6.58	5.87	6.35	5.35	6.56
$A_{rx}(\%)$	6.22	6.17	6.89	5.68	7.00
$A_{lx}(\%)$	6.89	5.92	6.58	5.38	5.74
J	6	7	8	9	10
$Y/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	208.50	216.50	201.70	213.70	213.80
W/kW	58.54	59.09	59.49	60.00	61.12
$A_x(\%)$	5.66	6.85	3.44	5.26	5.58
$A_{rx}(\%)$	6.02	6.42	4.06	5.76	5.92
$A_{lx}(\%)$	6.73	7.15	3.09	5.43	5.64

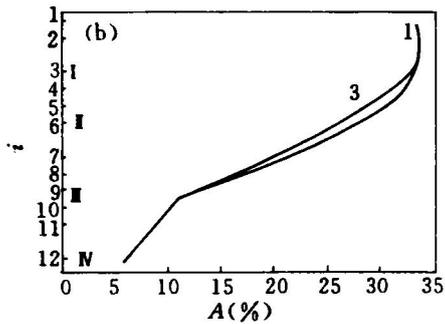
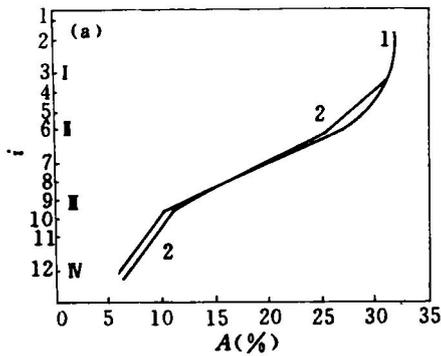


图 4 炉内含 Pb 量的分布曲线

($Y = 208.5 \text{ kg/h}$; $W = 58.54 \text{ kW}$)

(a)— A_i 与 A_R 分布曲线;

(b)— A_i 与 A_L 分布曲线

- 1—原模型的 A_i 或 T_i 分布曲线 $i = 1 \sim 12$;
- 2—简化模型的 A_R 或 T_R 分布曲线 $R = 1 \sim 4$;
- 3—线性模型的 A_L 或 T_L 分布曲线 $L = 1 \sim 4$

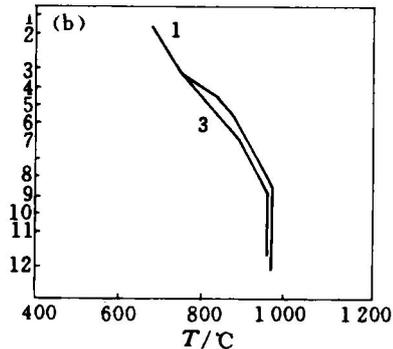
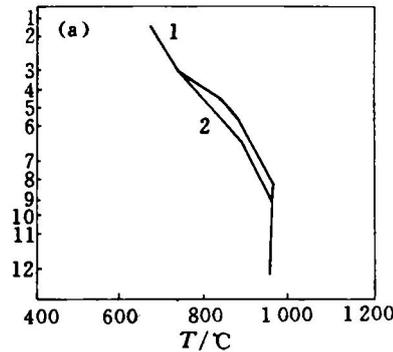


图 5 炉内温度分布曲线

($Y = 208.5 \text{ kg/h}$; $W = 58.54 \text{ kW}$, 1, 2, 3 同图 4)

(a)— T_i 与 T_R 分布曲线; (b)— T_i 与 T_L 分布曲线

(下转 46 页)

由铁橄榄石和铁尖晶石构成的絮状物(图中灰色部分)部分或完全消失。因此,在二次电子背散射图象很少出现 Fe、Al、Si 集合体,即铁晶粒和渣相间存在有明显的分界面,如图 10 所示。

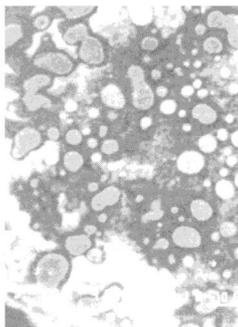


图 10 配入白云石贫铁矿还原团块的二次电子背散射图象

(1050 C, 60 min; 抛光, $\times 1000$)

3 结论

(1) 贫铁矿煤基直接还原过程中,铁橄榄石和铁尖晶石的生成过程主要可能是还原过程生成的金属铁先被矿石中残余氧化成 FeO,进而扩散至固态反应物界面的固相反应过程。

(2) 还原过程中生成的铁橄榄石和铁尖晶石充当了成核剂,使得金属铁晶粒成核位垒降低;同时,铁橄榄石和铁尖晶石表面形成的金属铁层将还原剂同它们隔开,使得前者的还原变得更加困难。

(3) 还原过程中存在碱性氧化物效应,即强碱性氧化物(如 Na_2O 、 CaO 、 MgO)能从铁橄榄石和铁尖晶石中置换出 FeO 以提高 FeO 的活度,使得贫铁矿的还原条件大为改善。

参考文献

- 1 孙宗毅. 矿冶工程, 1992 年增刊, 9-20.
- 2 王 俊等译. 相图集. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- 3 金国庭, 孙宗毅. 矿冶工程, 1992 年增刊, 215-218.
- 4 梅贤恭. 中南工业大学博士论文, 1993.

(上接 41 页)

显然, $\sigma_2 < \sigma_1$ 。

线性模型的仿真结果较简化模型好是因为在研究过程中,线性模型的仿真算法采用的是四阶龙格-库塔法;而简化模型因其非线性的因素,仿真算法采用的是欧拉法。众所周知,对同样的输入量,四阶龙格-库塔法的求解精度远高于欧拉法。其它原因则尚待查明。

综上所述,线性模型较接近于原模型,说明用它来代替原模型寻优是可行的,且有较高的精度,这正是我们所期望的。

3 结论

(1) 可用线性模型来代替原模型。由此线性模型可得到炉内蒸发系统各段合金液的含

Pb 量及温度分布,以便操作人员及时了解炉内动态作业状况。故所获线性模型仍属机理模型,它揭示了炉子的内在运行规律。

(2) 有了此线性模型,为下一步寻优工作的开展奠定了理论基础。

参考文献

- 1 冯丽辉. 见:中国科协首届青年学术年会执行委员会编,首届中国科协青年学术年会论文集工科分册上册. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- 2 冯丽辉, 陈 雯. 见:第三届全国青年冶金学术会议暨国家自然科学基金委员会冶金学科第二届青年学术研讨会论文集. 昆明, 1994.
- 3 李国平等编. 数学模型与工业自动控制第一卷总论与模型的建立. 武汉: 湖北人民出版社, 1978.