

# 氧化铝碳酸化分解动态过程建模及非线性分析

邓燕妮<sup>1,2</sup>, 桂卫华<sup>1</sup>, 阳春华<sup>1</sup>, 谢永芳<sup>1</sup>

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 武汉理工大学 自动化学院, 武汉 430070)

**摘要:** 研究连续碳酸化分解过程输入输出运行规律, 对其过程进行动态数学描述是实现氧化铝连续碳酸化分解生产过程优化控制的关键。针对实际连续碳酸化分解过程的工艺特点, 将系统设计为 ICSTR 关联连续搅拌槽式反应釜模式。基于碳酸化分解过程物理化学机理, 应用质量守恒定律, 描述反应器中反应物成分浓度和脱硅精液流量和二氧化碳输入量之间的动态变化, 建立了连续碳酸化分解过程系统非线性多重时滞的动态数学模型。通过数值计算及仿真, 列出碳酸化分解过程实际测量值进行比较的结果, 给出连续碳酸化分解各槽  $\text{Al}_2\text{O}_3$  浓度连续变化仿真曲线, 验证模型能较好地体现系统即时变化过程, 并讨论非线性模型解的相关问题。

**关键词:** 氧化铝; 碳酸化分解; ICSTR; 过程建模; 非线性; 多重时滞

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

## Dynamic process modeling and nonlinear analysis for alumina carbonation decomposition

DENG Yan-ni<sup>1,2</sup>, GUI Wei-hua<sup>1</sup>, YANG Chun-hua<sup>1</sup>, XIE Yong-fang<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** A continuous system with the mode of interactive continuous stirred-tank reactor (ICSTS) was proposed according to the processing characteristics of alumina carbonated decomposition. The nonlinear and multiple-time-delay dynamic mathematical model of carbonated decomposition was built up based on the physical and chemical mechanism of carbonated decomposition and mass conservation law. The dynamical relationship among the reactant component concentration in the reactor and the inputs of predesilicate green liquor and carbon dioxide was analyzed. Comparison between the calculated results and simulated ones shows that this model reflects the real process of carbonated decomposition. The simulating curves of the change of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  concentration are given. Lastly the solutions of nonlinear equation were discussed.

**Key words:** alumina; carbonation decomposition; ICSTR; process modeling; nonlinear; multi-time delay

氧化铝是电解铝生产的主要原料, 连续碳酸化分解过程是氧化铝生产关键工艺过程。目前在实际生产过程中, 连续碳酸化分解过程的所有工艺参数均需操作人员凭经验到现场手工调节。而且, 连续碳酸化分解工序由于受上、下游工序生产情况以及  $\text{CO}_2$ 、低压

风等工艺参数波动的影响, 工况极不稳定。这些因素均导致工艺指标不稳定, 容易出现各种工艺故障, 影响产品质量的稳定, 降低设备的使用寿命。造成原材料和能源的消耗大量增加。因此实现碳分生产过程自动控制, 优化关键工艺参数, 成为亟待解决的课题。

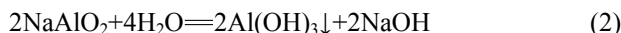
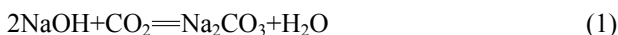
而对连续碳酸化分解生产过程系统数学描述, 是运用计算机控制技术, 实施生产过程自动化、提高产品质量、获得最大收益的前提; 是实现过程优化控制的关键。

近几年, 针对氧化铝碳酸化分解, 王志等<sup>[1-2]</sup>、彭志宏等<sup>[3]</sup>、陈虹等<sup>[4]</sup>、VADIM等<sup>[5]</sup>、方敬东等<sup>[6]</sup>分别研究了碳酸化分解过程的通气时间、分解温度等影响规律。李小斌等<sup>[7-8]</sup>借鉴种分过程动力学模型, 给出其动力学方程, 得出碳酸化分解反应的表现活化能值。这些关于碳酸化分解过程物理-化学机理和动力学机理的研究, 使我们对碳酸化分解形成Al(OH)<sub>3</sub>内部反应过程特性有较深入的理解。但针对连续碳酸化分解生产过程系统实施计算机控制技术所需的系统输入输出运行特性的模型, 还需进一步的研究。

本文作者针对连续碳酸化分解过程, 将连续碳酸化分解过程设计为 ICSTR(Interactive continuous stirred-tank reactor) 关联连续搅拌槽式反应器模式, 有别于通常的 CSTR 连续搅拌槽式反应器, 强调各槽间的关联性。基于碳酸化分解过程物理、化学原理, 依照质量守恒定律等基本关系, 对碳酸化分解过程的输入量和状态变量进行动态的数学描述, 建立连续碳酸化分解过程非线性多重时滞动态数学模型, 给出了输出方程, 讨论非线性模型解的相关问题; 通过数值计算和仿真并参照文献[12]的连续碳酸化分解过程实际工况数据进行比较, 验证该模型对连续碳酸化分解过程中动态运行规律模拟的可行性。

### 1 连续碳酸化分解过程的工艺分析

在碳酸化分解过程中, 连续碳酸化分解过程主要化学反应:



通常认为, CO<sub>2</sub> 气体通入铝酸钠溶液, 中和溶液中游离苛性碱, 使溶液的苛性比值降低, 从而使铝酸钠溶液过饱和度增大, 以至呈现不稳定状态, 于是产生铝酸钠溶液自发分解的析出反应, 从而析出氢氧化铝沉淀。

实际生产中连续碳酸化分解由 6 个连续分解槽组成。经脱硅送来的合格精液首先进入高位槽, 从高位槽底部自压进入 1<sup>#</sup>分解槽, 用低压风提料进 2<sup>#</sup>分解槽, 采用同样方法依次将料提入下一个分解槽。前 5 台槽根据分解率要求通入一定量 CO<sub>2</sub> 进行分解。6<sup>#</sup>槽作为出料槽, 检测合格后由出料泵打到沉降槽, 沉降底流送往氢氧化铝过滤机过滤, 得到氢氧化铝产品。

根据工艺分析, 反应釜的一个输入为串联, 一个输入为并联, 所以将连续碳酸化分解设计为 ICSTR 关联连续搅拌槽式反应器模式如图 1 所示。

经分析, 影响连续碳酸化分解过程产量和质量的主要因素如下: 1) 精液的纯度与浓度, 精液的硅量指数越高(SiO<sub>2</sub>的含量越少)产品质量越好; 2) 分解深度影响, 分解率过低, 会使Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的循环返回量增大, 降低产能, 而分解率过高, Al(OH)<sub>3</sub>质量差, 细粒疏松, 杂质多, 必须使碳酸化深度控制适当; 3) 温度的影响, 碳酸化分解温度取决于通气速度和CO<sub>2</sub>气体的浓度, 要求温度维持在 85 左右; 4) CO<sub>2</sub>气体浓度及通入速度影响, CO<sub>2</sub>气体浓度和速度决定着分解的速度; 5) 加强搅拌有利于分解过程。

根据系统工艺, 本文作者建模时进行如下条件设定。

1) 由于碳分过程温度取决于通气速度与CO<sub>2</sub>气体的浓度, 经脱硅后的铝酸钠溶液一般在 80 左右, 能满足分解过程的温度要求, 故假设碳分过程为一个恒温过程。

2) 反应器的液位根据工艺要求, 不能有太大波动, 故可假设反应液体体积是常数。

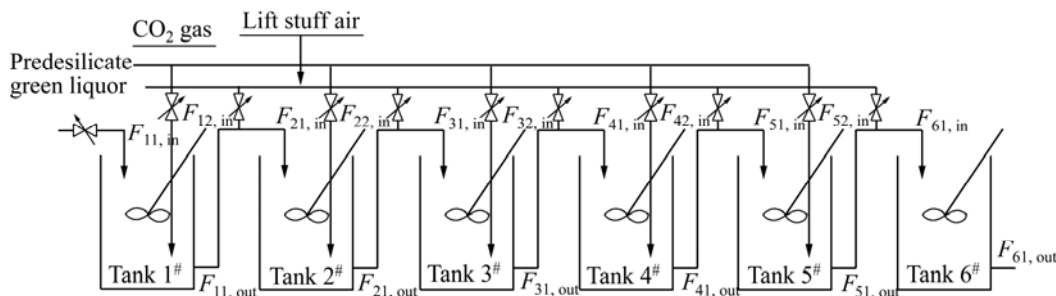


图 1 碳酸化分解连续反应模型

Fig.1 Continuous reaction model for carbonated decomposition

3) 对于碳分过程连续搅拌釜, 搅拌均匀。假设气液两相是理想宏观完全混合, 为均相反应。

## 2 连续碳酸化分解过程的动态建模

考虑到碳酸分解过程涉及一系列复杂的气液固三相反应、结晶、传热与传质等多个相互耦合的物理-化学过程, 机理极为复杂。在分解程度的不同时刻, 气膜传质、液膜反应、铝酸根水解和结晶将分别成为碳酸化分解过程的重要影响因素。根据连续碳酸化分解工艺过程, 对于ICSTR关联连续搅拌槽式反应器是整个容积, 尽管气液固反应器内的过程极其复杂(通常扩散、对流和反应同时进行, 而且气液固对流的本质尚不清楚), 但却可以利用典型而明确的模型去描述它们的特性。这些模型无须大量参数就可有效地解决实际问题<sup>[11]</sup>。

应用全混流模型取整个反应槽体积 $V$ 做物料平衡。 $F_{i1, in}$ 为溶液入口流量, 其中组分 $\text{NaAlO}_2$ 的入口浓度为 $x_{i10}$ , 反应槽出口流量为 $F_{i1, out}$ , 组分 $\text{NaAlO}_2$ 的出口浓度为 $x_{i1}$ , 反应速度( $r_{i1}$ )为

$$r_{i1} = k_2 x_{i1}$$

式中  $k_2$ 为 $\text{NaAlO}_2$ 溶液自发分解反应速度常数, 可根据工业现场实验数据计算确定。

槽内溶液的体积为 $V_{iy}$ 。其中 $i=1, 2, \dots, 6$ , 表示第 $i$ 槽。根据组分 $\text{NaAlO}_2$ 质量平衡原理存在组分 $\text{NaAlO}_2$ 质量平衡方程:

$$V_{iy} \frac{dx_{i1}}{dt} = F_{i1, in} x_{i10} - F_{i1, out} x_{i1} - r_{i1} V_{iy} = F_{i1, in} x_{i10} - F_{i1, out} x_{i1} - k_2 x_{i1} V_{iy} \quad (3)$$

式中  $F_{i1, in}$ 为溶液入口流量;  $F_{i1, out}$ 为反应槽出口流量;  $x_{i10}$ 为组分 $\text{NaAlO}_2$ 的入口浓度;  $V_{iy}$ 为槽内溶液的体积。

同样方法, 对于组分 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 质量平衡方程为

$$V_{iy} \frac{dx_{i2}}{dt} = F_{i1, in} x_{i20} - F_{i1, out} x_{i2} + k_2 x_{i1} V_{iy} \quad (4)$$

式中  $x_{i20}$ 为组分 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的入口浓度;  $x_{i2}$ 为组分 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的出口浓度。

对于气体 $\text{CO}_2$ 入口流量(实际生产中大约是液体流量的200倍)和浓度分别为 $F_{i2, in}$ 和 $x_{i30}$ , 出口流量和浓度分别为 $F_{i2, out}$ 、 $x_{i3}$ , 反应速度为

$$r_{i2} = k_1 x_{i3} x_{i4}$$

槽内 $\text{CO}_2$ 的体积为 $V_{iq}$ , 而气液相有效反应的体积为

$$V_{iqy} = V_{iy} + \gamma V_{iq}$$

式中  $\gamma$ 为有效反应气体体积系数。组分 $\text{CO}_2$ 质量平衡方程为

$$V_{iq} \frac{dx_{i3}}{dt} = F_{i2, in} x_{i30} - F_{i2, out} x_{i3} - k_1 x_{i3} x_{i4} V_{iqy} = F_{i2, in} x_{i30} - F_{i2, out} x_{i3} - k_1 (V_{iy} + \gamma V_{iq}) x_{i3} x_{i4} \quad (5)$$

式中  $k_1$ 为 $\text{CO}_2$ 中和溶液中游离苛性碱反应速度常数。 $x_{i30}$ 为组分 $\text{CO}_2$ 入口浓度;  $x_{i3}$ 为组分 $\text{CO}_2$ 出口浓度;  $x_{i4}$ 为组分 $\text{NaOH}$ 出口浓度。

对于组分 $\text{NaOH}$ 质量平衡方程为

$$V_{iy} \frac{dx_{i4}}{dt} = F_{i1, in} x_{i40} - F_{i1, out} x_{i4} - k_1 (V_{iy} + \gamma V_{iq}) x_{i3} x_{i4} + k_2 V_{iy} x_{i1} \quad (6)$$

式中  $x_{i40}$ 为组分 $\text{NaOH}$ 的入口浓度。

根据工艺过程分析, 可得输出流量为

$$F_{i2, out} = \sigma F_{i2, in} \quad (7)$$

$$F_{i1, out} = F_{i1, in} + (1 - \sigma) F_{i2, in} \quad (8)$$

式中  $\sigma$ 为无效反应气体流量系数, 将其分别代入式(3)、(4)、(5)和(6)并整理, 同时考虑连续碳酸化分解过程是一个长流程、大惯性生产过程。“长流程”、“大惯性”指从原料浆入槽到出料需要3~4 h的时间, 平均每槽需要时间40~50 min, 在时间域把此时间考虑到模型中, 表示这个时间滞后, 将此因素表示出来的碳酸化分解过程动态模型如式(9)~(12)所示:

$$V_{iy} \frac{dx_{i1}(t)}{dt} = F_{i1, in} x_{i10}(t - \tau_{i1}) - (F_{i1, in} + (1 - \sigma) F_{i2, in}) \cdot x_{i1}(t) - k_2 V_{iy} x_{i1}(t) \quad (9)$$

$$V_{iy} \frac{dx_{i2}(t)}{dt} = F_{i1, in} x_{i20}(t - \tau_{i2}) - (F_{i1, in} + (1 - \sigma) F_{i2, in}) \cdot x_{i2}(t) + k_2 V_{iy} x_{i1}(t) \quad (10)$$

$$V_{iq} \frac{dx_{i3}(t)}{dt} = F_{i2, in} x_{i30}(t - \tau_{i3}) - \sigma F_{i2, in} x_{i3}(t) - k_1 (V_{iy} + \gamma V_{iq}) x_{i3}(t) x_{i4}(t) \quad (11)$$

$$V_{iy} \frac{dx_{i4}(t)}{dt} = F_{i1, in} x_{i40}(t - \tau_{i4}) - (F_{i1, in} + (1 - \sigma) F_{i2, in}) \cdot x_{i4}(t) - k_1 (V_{iy} + \gamma V_{iq}) x_{i3}(t) x_{i4}(t) + k_2 V_{iy} x_{i1}(t) \quad (12)$$

式(9)~(12)构成氧化铝碳酸化分解过程系统的动态模型, 是一组状态多重时滞的微分方程。有两个输

入量, 即关联连续搅拌槽式反应器 ICSTR 的铝酸钠溶液流量  $F_{i1, in}$  和  $\text{CO}_2$  气体流量  $F_{i2, in}$ ; 4 个状态变量, 即  $\text{NaAlO}_2$  的浓度  $x_{i1}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$  的浓度  $x_{i2}$ 、 $\text{CO}_2$  气体浓度  $x_{i3}$  和  $\text{NaOH}$  的浓度  $x_{i4}$ 。微分方程反应了 4 个状态动态变化关系。其中  $k_1$  和  $k_2$  分别为分解反应速度常数,  $V_{iy}$  和  $V_{iq}$  分别是反应溶液和气体的体积,  $\gamma$  和  $\sigma$  是碳酸化分解过程反应参数, 为待估计参数。

通过求解方程可得到  $x_{i1}$  和  $x_{i2}$ , 而  $x_{i1}$  是  $\text{NaAlO}_2$  的浓度 (以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的浓度计) 为碳酸化分解过程关键变量, 等同于过程的控制目标——分解率, 即对过程分解率的动态特性的描述体现在  $x_{i1}$  的即时变化上。而各槽的分解率可用公式表示为<sup>[9]</sup>

$$\eta_C = \frac{\rho(\text{Al}_2\text{O}_3)_g - \rho(\text{Al}_2\text{O}_3)_m \times \frac{\rho(\text{Na}_2\text{O}_q)_g}{\rho(\text{Na}_2\text{O}_q)_m}}{\rho(\text{Al}_2\text{O}_3)_g} \times 100\%$$

式中  $\rho(\text{Al}_2\text{O}_3)_g$  和  $\rho(\text{Al}_2\text{O}_3)_m$  分别为精液和碳分母液中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的质量浓度;  $\rho(\text{Na}_2\text{O}_q)_g$  和  $\rho(\text{Na}_2\text{O}_q)_m$  分别为精液和碳分母液中  $\text{Na}_2\text{O}_q$  的质量浓度;  $\eta_C$  为分解率。

因此, 选择与密切相关的  $\text{NaAlO}_2$  的浓度  $x_{i1}$  和  $\text{NaOH}$  的浓度  $x_{i4}$  作为输出量, 则系统输出方程为

$$y_{i1} = \alpha x_{i1}, \quad y_{i2} = \beta x_{i4}$$

式中  $\alpha$  和  $\beta$  为系统待估计参数。

由式(9)~(12)和输出方程系统非线性时滞状态空间模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i1}(t) \\ \dot{x}_{i2}(t) \\ \dot{x}_{i3}(t) \\ \dot{x}_{i4}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_2 x_{i1}(t) \\ k_2 x_{i1}(t) \\ -\frac{k_1(V_{iy} + \gamma V_{iq})}{V_{iy}} x_{i3}(t)x_{i4}(t) \\ -\frac{k_1(V_{iy} + \gamma V_{iq})}{V_{iy}} x_{i3}(t)x_{i4}(t) + k_2 x_{i1}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{V_{iy}} x_{i10}(t - \tau_{i1}) - \frac{1}{V_{iy}} x_{i1}(t) & -\frac{1 - \sigma}{V_{iy}} x_{i1}(t) \\ \frac{1}{V_{iy}} x_{i20}(t - \tau_{i2}) - \frac{1}{V_{iy}} x_{i2}(t) & -\frac{1 - \sigma}{V_{iy}} x_{i2}(t) \\ 0 & \frac{1}{V_{iq}} x_{i30}(t - \tau_{i3}) - \frac{1}{V_{iq}} x_{i3}(t) \\ \frac{1}{V_{iy}} x_{i40}(t - \tau_{i4}) - \frac{1}{V_{iy}} x_{i4}(t) & -\frac{1 - \sigma}{V_{iy}} x_{i4}(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{i1, in}(t) \\ F_{i2, in}(t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y_{i1} \\ y_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1}(t) \\ x_{i2}(t) \\ x_{i3}(t) \\ x_{i4}(t) \end{bmatrix}$$

### 3 系统非线性讨论

方程(9)~(12)是非线性模型, 其解有以下几个特点。

- 1) 在输入变量给定的情况下, 对于式(9)和(10)是线性的可以先解得  $x_{i1}$ , 代入(10)求得  $x_{i2}$ ;
- 2) 对于式(11)和(12), 考虑简化模型:

$$\begin{cases} \frac{dx_{i3}}{dt} = a_1 - b_1 x_{i3}(t - \tau_{i3}) - c x_{i3}(t - \tau_{i3}) x_{i4}(t - \tau_{i4}) \\ \frac{dx_{i4}}{dt} = a_2 - b_2 x_{i4}(t - \tau_{i3}) - c x_{i3}(t - \tau_{i3}) x_{i4}(t - \tau_{i4}) + dx_{i1}(t - \tau_{i1}) \end{cases}$$

由

$$\begin{cases} a_1 - b_1 x_{i3}^*(t - \tau_{i3}) - c x_{i3}^*(t - \tau_{i3}) x_{i4}^*(t - \tau_{i4}) = 0 \\ a_2 - b_2 x_{i4}^*(t - \tau_{i3}) - c x_{i3}^*(t - \tau_{i3}) x_{i4}^*(t - \tau_{i4}) + dx_{i1}^*(t - \tau_{i1}) = 0 \end{cases}$$

可解得  $(x_{i31}^*, x_{i41}^*)$  和  $(x_{i32}^*, x_{i42}^*)$  两个平衡点; 在这两个平衡点附近, 可以考虑其局部指数稳定性;

- 3) 其全局稳态, 则要讨论  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c$ 、 $a_2$  和  $b_2$  的关系, 可能存在周期解;

4) 可以给出  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c$ 、 $a_2$  和  $b_2$  的一些不等式估计, 即确定  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c$ 、 $a_2$  和  $b_2$  的范围使得方程(11)和(12)的全局性态有一个比较清晰的结构。而  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c$ 、 $a_2$  和  $b_2$  是碳酸化分解过程的输入量, 溶液和气体的浓度的初值、反应速度常数及模型体积等参数密切相关。对于  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c$ 、 $a_2$  和  $b_2$  的不等式估计, 可从理论上给出这些量边界条件。

### 4 模型数值计算、仿真与分析

采用试差法<sup>[11]</sup>, 求得反应速度常数  $k_1=0.478h$  和  $k_2=0.193h$ 。数值计算中各变量的初始取值见表 1。这些数据参见文献[12]。此文献给出一些连续碳分各槽溶液浓度实际测量值。应用上述所建的模型解得的模型计算值, 结果和实际值的比较见表 2。

表1 仿真各状态变量的初始取值

Table 1 Original values of every state variable

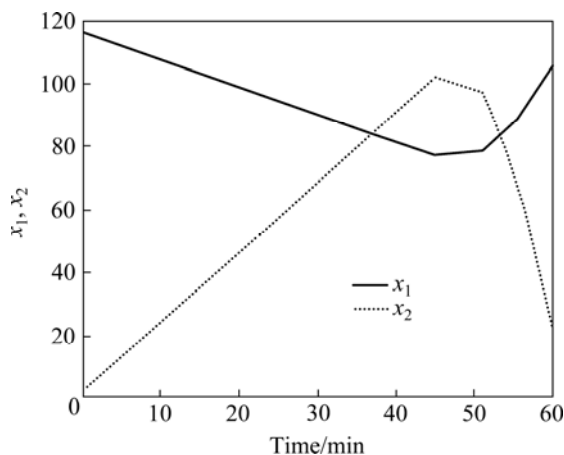
$F_{1, in}/(m^3 \cdot h^{-1})$	$F_{2, in}/(m^3 \cdot h^{-1})$	$x_{10}/(g \cdot L^{-1})$	$x_{20}/(g \cdot L^{-1})$	$V_y/m^3$
247	$4.94 \times 10^4$	116.5	105.6	591

表2 连续碳分各槽溶液 $Al_2O_3$ 浓度的实际测量值与模型计算值Table 2 Measured values and calculated values of  $Al_2O_3$  concentration of each carbonation decomposition tank

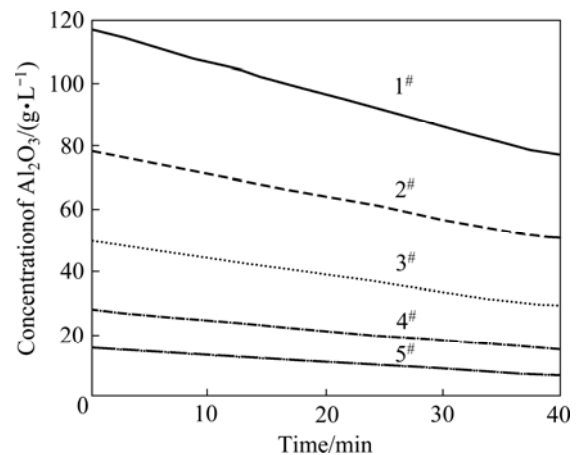
Number	Decomposition liquid	Content of $Al_2O_3/(g \cdot L^{-1})$									
		Output 1 <sup>#</sup>		Output 2 <sup>#</sup>		Output 3 <sup>#</sup>		Output 4 <sup>#</sup>		Output 5 <sup>#</sup>	
		Measured	Calculate d	Measured	Calculate d	Measured	Calculate d	Measured	Calculate d	Measured	Calculate d
1	116.5	77.5	77.97	49.2	49.56	27.5	27.48	15.2	15.24	11.5	10.52
2	118.1	83.3	79.04	52.3	50.24	26.5	27.86	15.8	15.45	10.5	10.69
3	114.2	80.3	76.43	42.8	48.58	15.5	26.94	8.6	14.94	8.5	10.34
Average	116.3	80.4	77.81	48.1	49.46	23.2	27.43	13.2	15.21	10.2	10.52

从比较结果来看,模型能比较好地反映连续碳酸分解过程的变化,有些结果存在一些误差,其原因是两方面的,一方面建模是基于一定的假设条件,比如液位等,模型计算取平均值固定,而实际测量是在一定范围内变化的,且实际值测量本身存在一定误差;另一方面取样时间也有变化范围,而模型计算时间是固定的等因素,但不影响验证模型反映连续碳酸分解过程的变化。

利用Matlab仿真给出 $Al_2O_3$ 和 $Al(OH)_3$ 的动态连续变化趋势曲线见图2,也较好地反映了碳酸分解过程的变化。图3所示为1<sup>#</sup>槽~5<sup>#</sup>槽 $Al_2O_3$ 浓度的连续变化曲线,曲线体现了 $Al_2O_3$ 浓度即时变化的过程。

图2  $Al_2O_3(x_1)$ 和 $Al(OH)_3(x_2)$ 的动态连续变化趋势Fig.2 Dynamic continuous change direction of  $Al_2O_3$  and

$Al(OH)_3$

图3 1<sup>#</sup>槽~5<sup>#</sup>槽 $Al_2O_3$ 浓度的连续变化曲线Fig.3  $Al_2O_3$  concentration continuous change curves of tank 1<sup>#</sup>~ tank 5<sup>#</sup>

## 5 结论

1) 提出描述氧化铝碳酸化分解过程输入输出关系的非线性多重时滞动态模型,给出了非线性时滞动态空间模型,通过数值计算和仿真的结果和实际测量进行比较得到验证。

2) 运用李雅普诺夫稳定性原理研究系统在平衡点附近的渐近稳定性。模型反映系统为多重时滞动态变化关系。

3) 为氧化铝碳酸化分解过程应用先进优化控制理论进行研究和控制系统的设计解决了关键问题。

## REFERENCES

- [1] 王 志, 扬毅宏, 毕诗文, 谢雁丽. 铝酸钠溶液碳酸化分解过程的影响因素[J]. 有色金属, 2002, 54(1): 43-45.  
WANG Zhi, YANG Yi-hong, BI Shi-wen, XIE Yan-li. Influencing factors of sodium aluminate solution carbonation decomposition[J]. Nonferrous Metals, 2002, 54(1): 43-45.
- [2] 王 志, 毕诗文, 扬毅宏, 袁章福. 铝酸钠溶液碳酸化分解过程中氢氧化铝粒度和强度的变化[J]. 现代化工, 2004, 24(3): 28-31.  
WANG Zhi, BI Shi-wen, YANG Yi-hong, YUAN Zhang-fu. Evolution of particle size and strength of  $\text{Al}(\text{OH})_3$  from carbonization in sodium aluminate liquors[J]. Modern Chemical Industry, 2004, 24(3): 28-31.
- [3] 彭志宏, 李小斌, 苟中入, 刘桂华, 周秋生, 丁安平, 李光柱, 李 明. 铝酸钠溶液碳酸化分解产品中的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1285-1289.  
PENG Zhi-hong, LI Xiao-bin, GOU Zhong-ru, LIU Gui-hua, ZOU Qiu-sheng, DING An-pin, LI Guang-zhu, LI Ming. Impurity  $\text{Na}_2\text{O}$  in carbonization precipitation from sodium aluminate solution with high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  concentration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1285-1289.
- [4] 陈 虹, 邹卫平, 孙鹏远. 连续搅拌反应釜浓度的滚动时域估计[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(8): 37-40.  
CHEN Hong, ZOU Wei-ping, SUN Peng-yuan. Moving horizon estimation of concentrations in a continuous stirred tank reactor[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(8): 37-40.
- [5] VADIM A L, VIKTOR I D, ANDREY A K. Special requirements to aluminium hydroxide of non-metallurgical application[C]// Light Metals. Pennsylvania: TMS, 2002: 169-173.
- [6] 方敬东, 吴素芳, 王樟茂. 铝酸钠溶液分解反应研究[J]. 高校化学工程学报, 2002, 16(1): 33-36.  
FANG Jing-dong, WU Su-fang, WANG Zhang-mao. The studies of precipitation reaction of sodium aluminate solution[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2002, 16(1): 33-36.
- [7] 李小斌, 刘祥民, 苟中入, 彭志宏, 刘桂华, 周秋生, 丁安平, 李 明, 刘业翔. 铝酸钠溶液碳酸化分解的热力学[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 1005-1010.  
LI Xiao-bin, LIU Xiang-min, GOU Zhong-ru, PENG Zhi-hong, LIU Gui-hua, ZOU Qiu-sheng, DIN An-pin, LI Ming, LIU Ye-xiang. Thermodynamics of carbonization of aluminate solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 1005-1010.
- [8] 李小斌, 陈 滨, 周秋生, 刘桂华, 彭志宏, 刘祥民. 铝酸钠溶液碳酸化分解过程动力学[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 848-853.  
LI Xiao-bin, CHEN Bin, ZHO Qu-sheng, LIU Gui-hua, PENG Zhi-hong, LIU Xiang-min. Kinetics of carbonation decomposition of sodium aluminate solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 848-853.
- [9] 陈肖虎, 赵 丽, 徐 磊, 张立成. 铝酸钠溶液分解数学模型[J]. 贵州工业大学学报, 2002, 10: 21-24.  
CHEN Xiao-hu, ZHAO Li, XU Lei, ZHANG Li-cheng. The mathematic model of the pregnant aluminate precipitation[J]. Journal of Guizhou Univeersity of Technology, 2002, 10: 21-24.
- [10] BEILUNS M, HOFMANN H, LINCA A. 化学反应工程[M]. 北京:中国石化出版社, 1994.  
BEILUNS M, HOFMANN H, LINCA A. Chemical reaction engineering[M]. Beijing: China Petrochemical Industry Press, 1994.
- [11] 周 游. 化学反应器分析[M]. 北京: 烃加工出版社, 1986.  
ZHOU You. Chemical reaction analysis[M]. Beijing: Hydrocarbon Industry Press, 1986.
- [12] 王新武. 连续碳分 $\text{CO}_2$ 吸收率分析及探讨[J]. 轻金属, 2004(8): 17-19.  
WANG Xin-wu. Studying and discussing  $\text{CO}_2$  absorbance in series carbon precipitation[J]. Light Metals, 2004(8): 17-19.
- [13] 谢雁丽, 吕子剑, 毕诗文. 铝酸钠溶液晶种分解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003: 138-139.  
XIE Yan-li, LU Zi-jian, BI Shi-wen. Seeded precipitation of sodium aluminate solution[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003: 138-139.
- [14] FENG Qi-ming, CHEN Yun, SHAO Yan-hai, ZHANG Guo-fan, OU Le-ming, LU Yi-ping. New technique of comprehensive utilization of spent  $\text{Al}_2\text{O}_3$  based catalyst[J]. J Cent South Univ Technol, 2006, 13(2): 151-155.
- [15] GERHARDT J, KEITH I, CHRISTIAAN P. Modeling and simulation of an electric arc furnace process[J]. ISIJ, International, 1999, 39(1): 23-32.
- [16] MORALES R D, RODRIGUEZ-HERNANDEZ H, GARNCA-GONZALE P. A mathematical model for the reduction kinetics of iron oxide in electric furnace slags by graphite injection[J]. ISIJ International, 1997, 37(11): 1072-1080.

(编辑 龙怀中)