

铝电解槽膛内形在线动态仿真理论研究^①

游 旺 王前普 李欣峰 梅 焱

(中南工业大学应用物理与热能工程系, 长沙 410083)

摘 要 通过分析熔体特性与槽膛内形的关系以及参数随时间变化的规律, 将影响槽膛内形的诸多工艺参数分为静态影响因素和动态影响因素两类; 详细分析了动态影响因素的影响作用, 并给出了多个动态影响因素对槽膛内形的数值估算方法。在此基础上, 提出了能初步应用于现场的槽膛内形在线动态仿真技术方案。

关键词 铝电解 槽膛内形 动态仿真

中图法分类号 TF111.52

槽膛内形对电流分布、熔体流动、电流效率、吨铝能耗和槽寿命等均有显著的影响。现场常常出现相同性能的槽而生产指标却相差很远的现象, 其原因大多是由于炉膛不规整导致槽子发生摆动, 使操作和控制难以正常进行所致。以往的研究主要是电解槽的设计和改造, 难以为操作和管理人员提供操作决策依据和在线监控模型。因而槽膛内形的在线动态仿真研究就非常迫切, 工程应用价值大。本文从铝电解工艺理论角度研究了实现槽膛内形在线动态仿真的可行性。

1 槽帮消长影响因素

工艺参数对槽膛内形的影响除了电解质工作温度这一综合指标之外, 主要是通过改变熔盐电解质体系的特性, 接着再通过熔体参数来影响槽膛内形。集中表现为热量的积累与耗散及槽内熔体“水当量”的变化。槽帮在熔体周围的消长过程是一个非常复杂的动态过程, 涉及体系中如下4个方面:

(1) 熔体热力学参数: 包括熔体熔点(初晶点)、熔池水当量、熔体表面张力等, 这些因素直接影响晶核的形成和结晶析出。

(2) 熔体动力学参数: 包括熔体粘度、扩散系数、导热系数、导电率和离子迁移数等。

(3) 槽体结构参数: 包括内衬结构、阳极尺寸、槽壳结构、加工面宽度和母线结构等, 其中内衬结构是决定电解槽设计时基准热平衡和初期槽膛内形的重要外因。槽体结构对槽膛内形的影响除内衬材料的热物性性质随槽龄增长有所改变外(慢时变过程), 其它都是固定不变的, 对于生产中的定型槽这些因素对槽帮的消长不再有影响。

(4) 外界环境条件: 包括环境温度和空气流速, 尽管两者对槽帮的消长也有影响, 但不是主要因素。

依据参数随时间变化的规律, 可将影响槽膛内形的因素分为“静态影响因素”和“动态影响因素”两类。

静态因素是指对槽膛内形虽有影响, 甚至是比较大的影响, 但在生产中已不再随时间发生变化, 或随时间的变化很小, 或虽有变化, 但在一定时间段内仍保持不变, 在各不同时间段内均能用常数代表的因素。动态因素是指在电解生产中随时间不断发生变化和波动的因素。显然, 槽体结构参数是静态影响因素, 其它都是动态影响因素。

① 国家经贸委资助课题 收稿日期: 1997-09-05; 修回日期: 1998-02-12 游 旺, 男, 29岁, 博士

2 静态影响因素

内衬材料的热物性参数随槽龄增长虽有一定的变化,但在一段时间内可视为相对稳定,对槽膛内形的影响属于慢时变的稳态过程。可将内衬材料的热物性参数按槽龄分为多个时间段,在每一时间段内认为热物性参数是常数,段与段之间的取值可以相同也可以不相同。更好的办法应该是建立内衬材料各槽龄段热物性参数数据库,但这个方面的研究工作相当耗时耗力,到目前为止还很少见国内外有完整的报道。其他结构参数都是定型参数,只要在生产中保持不变,对槽膛内形就不会再有影响。

3 动态影响因素

生产中随时变化且又影响熔体热力学和动力学特性的因素是工艺技术参数和操作参数。具体地说是:

工艺技术参数:系列电流、槽电压、极距、电解质温度、铝液温度、分子比、电解质和铝液水平、阳极效应系数;

常规操作作业:加料、换阳极、出铝、调整极距、边加工。

3.1 电解温度、电流、电压

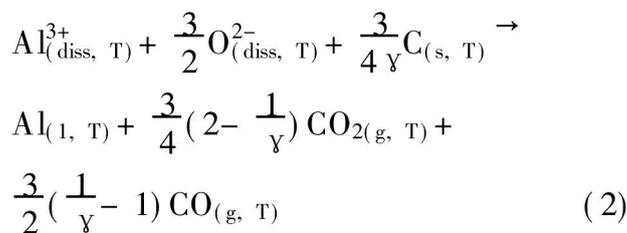
电解温度是影响槽膛内形的综合因素,是槽子动态热平衡的结果与体现。研究采用基于能量收支估算的热平衡估算模型来估算电解温度,并定期用现场实测温度校正。以电解槽整体作为计算体系,并以电解温度作为计算基础,考察槽热平衡式中的4项可得动态热平衡方程式为^[1,2]:

$$A_{\text{供电}} = A_{\text{电解}} + A_{\text{加热}} + A_{\text{热损}} + A_{\text{导线}} \quad (1)$$

$A_{\text{供电}}$ 可直接由槽电压(V)和系列电流(I)的在线采样值计算,即: $A_{\text{供电}} = V \cdot I$ 。

$A_{\text{电解}}$ 可通过应用热力学数据从电化学反应式出发推导建立起与系列电流的关系。涉及

电流效率的铝电解总反应为:



式中 γ 代表电流效率,可按槽出铝量换算。取电解温度为 $T = 1228 \text{ K}$, 推导可得:

$$A_{\text{电解}} = (0.441 + 1.131\gamma)I$$

$A_{\text{导线}}$ 可通过设定导线电阻($R, \mu\Omega$) 为电流 I 的函数来解决,即: $A_{\text{导线}} = RI^2/1000$ 。

忽略阳极气体在离开计算体系前的物理显热对槽热平衡状态的影响,并令

$Q = A_{\text{供电}} - A_{\text{电解}} - A_{\text{导线}}$, 则 Q 就可视为输入电解槽内的发热功率。由以上推导可知,

$$Q = VI - (0.441 + 1.131\gamma)I - RI^2/1000 \quad (3)$$

$A_{\text{加热}}$ 取决于加入槽内的原料种类和重量,在槽正常运行过程中, Al_2O_3 的加热和熔解是 $A_{\text{加热}}$ 的主要部分。添加 Al_2O_3 是影响槽温最显著的因素。加料对槽温的影响一是由加入的冷料在被加热和部分立即熔解过程中吸收大量热量而导致的电解质温度短时的急骤变化,这可视作动态热平衡被暂时打破;另一方面是由(平均)加料速率不足或过量而导致的电解质温度(相对)缓慢的变化,这种变化可视作电解质温度动态热平衡温度的变化,也即热平衡状态的变化,由此即可计算出动态热平衡温度变化的增量 ΔT , 然后再对电解槽作非稳态传热解析即可估算出槽膛内形。

3.2 极距及其调整

极距及其调整有两个目的,一是维持正常的极距,二是通过调整极距来改变铝电解槽的能量输入,实行对槽热平衡状态的控制。其直接结果是引起槽电压的波动,准确地说,是焦耳电压的波动,因此对槽膛内形的影响实质上就是槽电压对槽膛内形的影响。这可以直接通过在线采集得到的系列电流和槽电压来计算。

3.3 出铝

出铝是影响槽膛内形的周期性因素。其影

响主要是改变了槽内熔池水当量, 同时使得铝液层上下两面之间的温度差减小, 铝液层下表面温度升高, 从而引起热平衡和槽膛内形的变化。出铝瞬间对热平衡的影响可近似等效于一次额外下料约 $30 \text{ kg}^{[2]}$, 将其影响转换为槽电压的变化。出铝后铝水平降低, 至下一次出铝之前铝水平对槽膛内形的影响可按如下方法进行估算。

(1) 铝液层温度变化的估算^[3]

铝液内的温度并非均匀一致, 而是在上下两面之间存在一温度差。根据经验, 可设定铝水平最高时电解质与铝液层平均温度的差值 (ΔT) 为 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 最低时为 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。这样, 出铝后铝液层温度随铝水平变化关系可用式(4)计算。

$$T'_M = \eta \cdot T_B \quad (4)$$

式中 T_B —电解质温度, K; η —估计函数,

$$\eta = 1 - \frac{\Delta T}{T_B}。$$

ΔT 用式(5)估算:

$$\Delta T = 3 + 2(H_i - H_D) / \Delta H \quad (5)$$

忽略槽帮斜度导致的铝液面积和体积的增量, 任意时刻的铝水平可由电流强度、电流效率、时间和槽膛容积以及铝液密度来估算。

$$H_i = H_D + \Delta G / \rho S_0 \quad (6)$$

式中 H_i —任意时刻铝水平, cm; H_D —出铝后铝水平(最小值), cm; ΔH —出铝前后铝水平的高度差, cm; ρ —铝液密度, kg/m^3 ; $S_0 - H_D$ 时对应的铝液面积, cm^2 ; ΔG —电解槽铝产量的增量, kg, 可由下式计算:

$$\Delta G = 3.356 \times 10^{-4} I r \tau \quad (7)$$

式中 I —电解槽的电流强度, A; r —电解槽的电流效率, %; τ —出铝后运行时间, h。

(2) 熔池水当量变化的估算

由式(7)即可求出铝液质量的增量。将之代入到水当量的计算式中, 即可求出对应铝水平下的水当量。

然后将 T'_M 作为铝液温度以及水当量代入槽况解析, 就能达到对铝水平对槽膛内形影响的动态估计。

3.4 熔体流动

熔体流动对槽帮的消长有两种影响, 一是流动对槽帮的机械冲蚀, 二是影响熔体与槽帮之间的对流换热速率。流动对槽帮的机械冲蚀, 主要表现在增大新凝固层的表观过热度^[3]。熔体流动对熔体与槽帮结壳之间的对流换热系数的影响可由经验公式计算求出^[4-6]。

3.5 分子比

分子比是影响熔体热力学的根本因素, 是确定能否形成槽帮的决定性判据之一。分子比的变化即电解质成分的变化使得槽帮结壳初晶点发生变化, 引起槽帮结壳密度和导热系数的变化, 从而影响槽膛内形和槽内热平衡。分子比对初晶点的影响可用实验式估算求出^[7, 8]。正常生产中, 分子比在一定时间内不可能有大的变化, 其波动可通过现场定期分析得到。

3.6 边加工(电解槽边部打壳下料)

边加工是影响槽膛内形最大、最难估计的因素。边加工对槽膛内形的影响主要体现在以下几个方面。边加工时, 槽内电解质中被打入大量的结壳与 Al_2O_3 粉末。一方面打入电解质中的冷料融化需要吸收大量的热, 同时槽壳散热增多破坏了电解槽原有的能量平衡; 另一方面冷料融化后, 电解质质量也发生了变化, 影响了槽内电解质的水当量 W (kJ/K)。水当量 W 可由下式估算。

$$W = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_{pi} \quad (8)$$

式中 m_i 为槽内不同物质的质量, c_{pi} 为对应物质的热容。

电解槽水当量的变化比较复杂, 与电解质和铝液的质量、电解质成分、电解温度以及边加工、出铝、槽帮熔化等因素有关。若加工前后电解槽吸收的能量保持不变, 即

$$Q_{吸, 加工前} = Q_{吸, 加工后}$$

亦即

$$W' \cdot T' = W'' \cdot T'' \quad (9)$$

若边加工前后的槽内水当量发生了变化, 由式(9)可知, 加工前后的电解温度必然要发生相应的变化。此外, 边加工对电解质成分也

有一定的影响。上述几方面的影响均会引起电解槽热场发生变化。实际生产中，由于边加工量的多少随现场操作情况而变化，无法进行准确测量，因此每次边加工量是个随机的不可知量。研究中首先设定边加工量为一常数，然后在模态校验中根据实际情况逐步修正。

3.7 更换阳极

更换阳极是影响槽膛内形的周期性因素。对换极的影响处理如下：

- (1) 假定更换 1 块阳极需砸开 3 块阳极的宽度。如果换极在边部，则取为两块阳极的宽度加 40 mm 再加烟道端或出铝端的距离。
- (2) 计算残余阳极带走的热量；
- (3) 新换阳极被加热所吸收的热量；
- (4) 换极过程中打入槽膛内的结壳和粉末被加热所吸收的热量；
- (5) 槽壳散热增量，水当量增量。

换极对槽膛内形的强影响是区域性的，如采用“切片模型”并能在线采集到各阳极块上的电流分布，解析结果是比较准确的。

3.8 阳极效应

阳极效应是一种特殊现象，发生时槽电压短时间内上升到 20~ 50 V，因而能量消耗增加到 5~ 12 倍。效应分摊的电压($\Delta V_{\text{效应}}$)可用式 (10) 计算。

$$\Delta V_{\text{效应}} = k(V_{\text{效应}} - V_{\text{槽}})t/1440 \quad (10)$$

式中 k 为效应系数，次/日； $V_{\text{效应}}$ ， $V_{\text{槽}}$ 分别为发生效应时与正常运行时的槽电压； t 为每次效应持续时间，min。

阳极效应对热平衡的影响是以脉冲形式表现的。对电解质温度有很大影响，但对槽膛内形的影响却滞后很大。研究中一方面监视阳极效应，另一方面对电解质温度进行时间序列分析和平均(滤波平滑处理)，消除强脉冲项。

4 动态仿真技术方案

通过对上述动态影响因素的在线采集和估算，就能估算出电解槽的热平衡和温度变化的增量(ΔQ 和 ΔT)，将之代入关于槽膛内形的非稳态导热微分方程进行解析并对 ΔQ 和 ΔT 以及槽膛内形进行循环校验就能得到各时间段

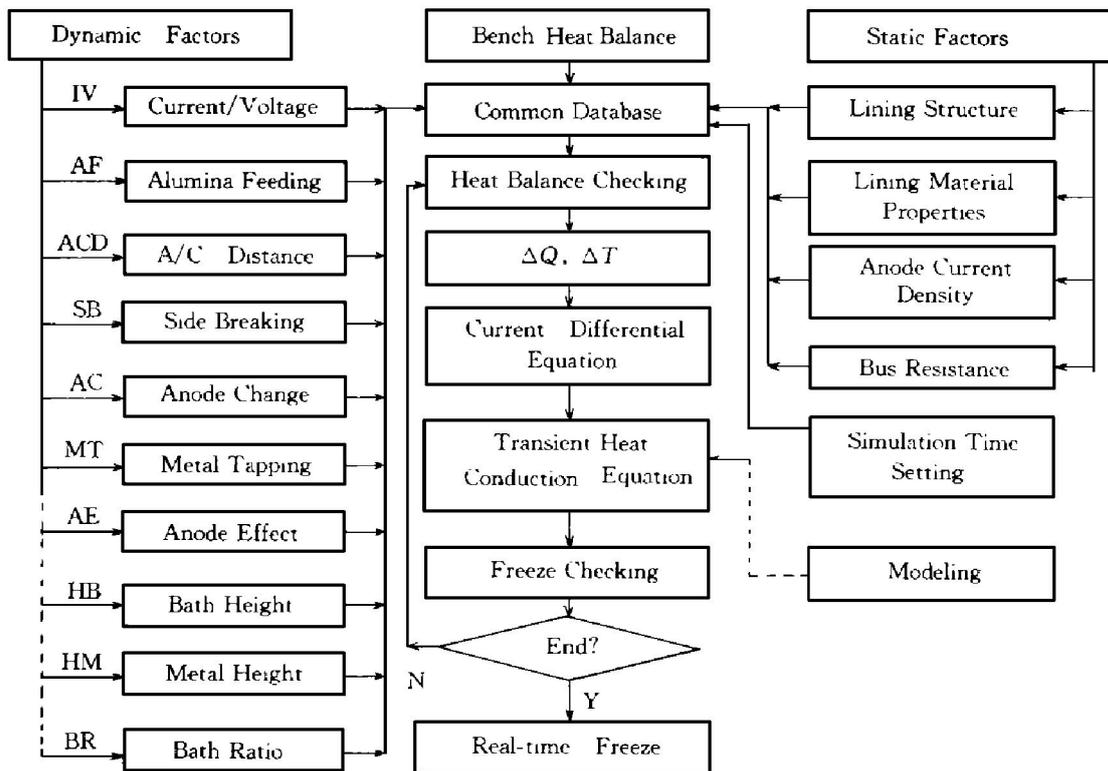


图 1 槽膛内形动态仿真技术方案

Fig. 1 Technical scheme for freeze dynamic simulation

的槽膛内形, 其技术方案如图 1 所示。

5 结语

按该方案设计的槽膛内形在线动态仿真软件经实践初步证明, 以电流、电压为主变量, 其他动态因素为辅变量, 以热平衡核算为基础确定的槽膛内形在线动态仿真技术方案, 比较实际地反映了实际生产中槽膛内形的消长情况, 把握了槽膛内形变化的本质, 能较准确地反映实际生产中槽膛内形的变化趋势。具有较大的工程应用价值。

REFERENCES

1 Qiu Zhuxian(邱竹贤). Prebaked Aluminium Elec-

trollysis (预焙槽炼铝). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980: 6.

2 Li Jie (李 劼). PhD thesis. Changsha: Central South University of Technology, 1993.

3 You Wang(游 旺). PhD thesis. Changsha: Central South University of Technology, 1997.

4 Dervedde E and Cambridge L E. Light Metals, 1975: 111- 122.

5 Haupin W E. TMS-AIME, Annual Meeting Paper. New York, 1971.

6 Mei Chi(梅 焱) *et al.* Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy(中南矿冶学院学报), 1986, 52(6): 29- 37.

7 Rostum A, Solheim A and Sterten A. Light Metals, 1990: 311.

8 Skybakmoen E, Solheim A and Sterten A. Light Metals, 1990: 317.

ON-LINE DYNAMIC SIMULATION OF FREEZE PROFILE IN ALUMINIUM ELECTROLYSIS

You Wang, Wang Qianpu, Li Xinfeng and Mei Chi

Department of Applied Physics and Heat Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

ABSTRACT By means of analyzing the relationship between the molten electrolyte properties and the freeze profile as well as the laws of factors affecting the freeze profile with respect to time, the technological factors affecting the freeze profile were classified into two types, i. e., static factors and dynamic factors, for the first time. Based upon the detailed research on the dynamic factors and their numerical solution approaches, a technical proposal of establishing an on-line dynamic simulation which can be used in commercial practice was made.

Key words aluminium electrolysis freeze profile dynamic simulation

(编辑 袁赛前)