

文章编号: 1004-0609(2004)04-0681-05

预焙铝电解槽电流效率与阳极电流分布的数学模型^①

曾水平, 张秋萍

(北方工业大学 现场总线与自动化重点实验室, 北京 100041)

摘 要: 在复杂的综合数学模型的基础上, 利用正交多元回归法研究了预焙电解槽中电流效率与阳极电流分布的关系, 得到一个代数方程式, 同时, 用这个代数方程式分析了阳极电流分布与电流效率的关系。分析结果表明: 阳极电流分布与电流效率都随时间和空间而改变; 阳极电流分布的改变引起电流效率的改变; 在 Kuhn Tucker 理论的基础上, 还讨论了系列电流不变时的最佳电流效率, 由于电解槽中磁场、流场分布不均匀等原因, 并非严格均匀的阳极电流分布才能得到最高的电流效率。

关键词: 铝电解; 正交多元回归; 电流效率; 电流分布

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

Mathematical model of current efficiency with anode current distribution in aluminum production

ZENG Shuiping, ZHANG Qiuping

(Field Bus & Automation Key Lab, North China University of Technology,
Beijing 100041, China)

Abstract: On the bases of the comprehensive mathematical model, the relation between current efficiency and anode current distribution in aluminum production was examined through using orthogonal regression design method. An algebraic equation was developed under some reasonable simplification, and based on it, the variation of current efficiency and anode current distribution was analyzed. The results show that both current efficiency and current distribution change with time and position. By use of the Kuhn Tucker' theory, the optional current efficiency under given total serial current was discussed. Not strictly smooth anode current distribution results in optional current efficiency because of the uneven physical fields distribution.

Key words: current efficiency; aluminum electrolysis; current distribution; orthogonal regression design

铝电解槽中电流分布瞬息万变, 在不同的时间和空间有不同的值, 是电解过程中最难掌握的参数。电流效率是铝电解过程最重要的技术经济指标, 在铝生产中有很多因素影响电流效率, 例如: 温度, 电流强度, 电流密度, 金属流动, 电解质组成, 极间距离, 槽龄等。通过分析可以发现几乎所有与电流效率有关的因素都与电流分布有关, 或者直接或间接地影响电流分布^[1, 2], 金属流动与电流

分布有关, 温度及其分布通过改变炉膛形状来改变电流分布, 电解质成分也可以由电流分布的变化来反映, 极间的距离和铝水平也影响电流分布。由于在任何情况下, 外部电流分布及其变化比其他任何参数更容易测定。因此, 研究电流分布与电流效率之间的关系非常有意义, 也是电流效率连续监测的基础。

国内外这一方面的工作报道较少, 但研究电流

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59974001); 北京市现场总线与自动化重点实验室资助项目

收稿日期: 2003-08-07; 修订日期: 2003-12-01

作者简介: 曾水平(1961-), 男, 工学博士, 研究员。

通讯作者: 曾水平, 电话: 010-88803092; E-mail: zshp@ncut.edu.cn

分布和研究电流效率的报道很多, 这些研究对本文研究具有重要的参考意义^[3-6]。

预焙电解槽物理场的特征在许多文章中有描述, 针对某厂 160 kA 预焙电解槽, 我们也做过一系列的工作^[7-10]。结论如下: 现行的母线配置下垂直磁场较大且严重不均匀, 某一电解槽区域垂直磁场达到 4×10^{-3} T, 金属流动速度较快且不均匀, 平均流动速度为 8 cm/s, 最大流动速度大于 20 cm/s。电解槽内的电流分布受炉帮和单个阳极电流的影响, 水平电流随炉帮的变化而变化, 如果炉帮延伸到阳极底掌投影下, 则水平电流增加, 引起铝液明显上下波动, 这就导致电流效率很低。

1 电流效率的计算模型

1.1 电流效率的综合数学模型

有关电流效率的机理模型和经验模型有许多报道, 但都不能满足分析电流分布与电流效率关系的需要。在 Lillebuen 模型基础上^[11], 充分考虑整个传质过程中的所有因素, 通过重新定义及重新计算模型中的一些变量, 推导了一个铝电解过程中电流效率的综合数学模型。下面仅给出方程式, 模型的推导和参数的物理意义见文献^[12]。

$$\begin{cases} \eta = 100 - 219 A I^{-1} D_{me}^{0.67} \mu^{-0.5} \\ f = c_m / c_m^* \\ D_{me} = D_m (\sigma_r / \sigma)^{0.5} \end{cases} \quad (1)$$

进一步研究模型中的变量, 可知它们由下述工作参数决定, 即温度 (T), 电流密度 (J_c), 熔体流动速度 (u), 阴阳极间距离 (d), 界面张力 (σ), 金属饱和度分数 (f)。已知这些参数就可以通过方程 (1) 计算出电流效率, 如果电解槽炉帮形状变化不是很快的话, 这些参数可以由电流分布直接计算得到或者由半经验公式粗略决定。熔体流动速度 (u) 主要取决于电磁力和重力, 随着时间变化的电磁力只取决于磁场和电流分布, 因此, 通过解关于热场、电场、磁场和流场的方程组, 即可求得熔体流动速度。电流密度 d_c 由直接解电场方程组决定, T , d , σ 和 f 等参数由半经验公式 (2) 计算得到^[13]:

$$\begin{cases} T = T_0 + B J_e (J_e - G) \\ J_i = C_i / I_i \\ \sigma = C_0 - C_2 J_c \\ f = f_0 - C_4 J_a \end{cases} \quad (2)$$

这里 T_0 , B , G , C_i , C_0 , C_2 , f_0 , C_4 是实验结果计算得到的常量。 J_e , J_c , J_a 分别是电解质电流密度, 阴极电流密度和阳极电流密度, 即电流分布。所以方程式 (1)、(2) 给出了电流效率和电流分布的关系, 如果已知电流分布, 就可以计算出电流效率。由于在大型电解槽中电流分布不均匀, 因此电流效率也不一致。采用区域参数对应的是区域电流效率, 采用平均参数对应的就是平均电流效率。本文作者采用二氧化碳分析法和铜稀释法, 仅仅用整个电解槽的平均电流效率验证模型。实验结果表明, 一周时间内电流效率的计算值和测量值相对误差为 0.5%。因此, 方程式 (1)、(2) 可以分析电流分布与电流效率的关系, 但从方程组知道电流分布与电流效率是通过很复杂的物理场计算模型联系起来, 计算工作量大而且通过表达式很难分析它们之间的关系。为了解决这个问题, 我们采用正交多元回归法简化模型。

1.2 电流效率的代数方程模型

以 160 kA 预焙电解槽为例, 此方法可以推广到其他电解槽。将 160 kA 预焙电解槽划分成 9 个区域^[11], 其中 8 个区域有垂直电流, 而另一个没有垂直电流, 除第 9 区域外, 其余每个区域由 3 个阳极组成, 区域划分见图 1。当然区域可以任意划分, 但若在同一区域内有一致的物理场, 分析会更方便。如果区域划分更细, 结果更精确, 但计算却更复杂。

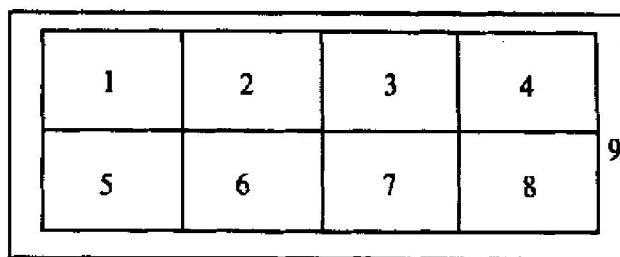


图 1 160 kA 预焙电解槽的分区

Fig. 1 Zone distribution of 160 kA prebake cell

从区域的划分得知, 共有 8 个区有电流进入, 方程式中应包含 8 个变量。可用 8 元正交回归方法解决这个问题, 建立代数方程直接显示每区电流对平均电流效率的影响。正交多元回归法是设计实验、建立模型的有效方法。首先选点计算基于复杂模型的一系列电流效率值, 然后用这些值得到一个代数方程式。

建立回归模型所需的电流效率值的数目为^[14]:

表 1 正交回归的表头设计

Table 1 Head design for orthogonal regression table

x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	x_5^2	x_6^2
x_7^2	x_8^2	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_1x_5	x_1x_6	x_1x_7	x_1x_8	x_2x_3	x_2x_4	x_2x_5	x_2x_6	x_2x_7	x_2x_8
x_3x_4	x_3x_5	x_3x_6	x_3x_7	x_3x_8	x_4x_5	x_4x_6	x_4x_7	x_4x_8	x_5x_6	x_5x_7	x_5x_8	x_6x_7	x_6x_8	x_7x_8
$x_1x_2x_3$														

表 2 因子水平编码表

Table 2 Level code for factors

x_i	+ 2. 045	+ 1	0	- 1	- 2. 045
I	24 135	21 000	18 000	15 000	11 865

$N = 2^p + 2p + 1 = 2^8 + 2 \times 8 + 1 = 273$

中心常数为:

$K = (2^p / N)^{1/2} = 0. 968\ 4$

星号臂为:

$r = (2^{p-2}N)^{1/2} - 2^p - 1 = 2. 045$

上述方程式中, N 是需要计算的点数目; p 是因素的数目; k 是中心常数; r 是星号臂。

如果全盘考虑所有项, 即包括所有因素的相互作用, 则方程式中会出现很多项, 那样太复杂而且没必要。从实际应用和分析中, 我们可以忽略大多数高次幂项。这里我们只采用一次项和二次项, 且只用一个三次项比较其重要性。稍后检查出的重要性表明所有三次项不严重影响电流效率。

电流与因子的转换关系为:

$x_i = (I - 18\ 000) / 3\ 000$

式中 I 为电流强度, 0 水平为 18 kA, + 1 水平为 21 kA。实验期间, 电解铝厂的系列电流大约在 150 kA 左右。当然, 建立的电流效率和电流分布的关系可以延伸到更宽的范围。

电流效率和区域电流的代数表达式如下:

表 3 用回归方程(3)计算平均电流效率的系数表

Table 3 Coefficients for computation of even current efficiency by Eqn. 3

Coefficient	Value	Coefficient	Value	Coefficient	Value	Coefficient	Value	Coefficient	Value
a1	0. 256	b3	0. 021	c16	0. 052	c35	0. 008	c58	0. 081
a2	0. 183	b4	- 0. 045	c17	0. 041	c36	0. 048	c67	- 0. 047
a3	- 0. 074	b5	0. 003	c18	0. 017	c37	- 0. 006	c68	0. 005
a4	0. 076	b6	- 0. 030	c23	0. 034	c38	- 0. 040	c78	0. 025
a5	0. 191	b7	- 0. 034	c24	- 0. 025	c45	0. 036	c123	0. 001
a6	0. 032	b8	- 0. 042	c25	- 0. 001	c46	0. 017	B0	0. 863
a7	0. 069	c12	- 0. 024	c26	0. 007	c47	0. 067		
a8	- 0. 062	c13	- 0. 004	c27	0. 049	c48	- 0. 101		
b1	- 0. 051	c14	0. 025	c28	0. 059	c56	- 0. 031		
b2	- 0. 069	c15	0. 000	c34	- 0. 027	c57	0. 024		

$$\eta = B_0 + \sum a_i x_i + \sum b_i x_i^2 + \sum (x_i \sum c_{ij} x_j) \tag{3}$$

因为很难测量区域电流效率来验证得到的数学模型, 我们仅考虑整个电解槽的平均电流效率。用于计算平均电流效率的 B_0 , a_i , b_i 和 c_{ij} 在表 3 中给出。实验期间, 电解质成分的分子比为 2. 4, Al_2O_3 3%, MgF_2 3%, CaF_2 3% 左右, 系列电流为约 150 kA。表 3 的系数可能会随操作环境的不同而不同。

为了测试正交多元回归模型的精确度, 任选一些点分别用正交回归模型和综合模型计算电流效率。结果如图 2 所示。从图 2 的结果来看, 我们认为正交回归模型可代替复杂综合模型来分析电流分布对电流效率的影响。

2 电流分布对电流效率的影响

由式(3)很容易计算出平均电流效率和区域电流效率, 图 3 所示为各个区域电流对平均电流效率的影响, 曲线上的数(如 1, 2 等)表示相关区域。

图 3 中, 整个电流被固定在 153 kA。我们使区域电流从 10 kA 变化到 30 kA, 这是符合铝电解过程阳极作业的特点。在实验期间, 实际区域电流变化在 13~ 24 kA 范围。在图 3 的分析中, 只让一个

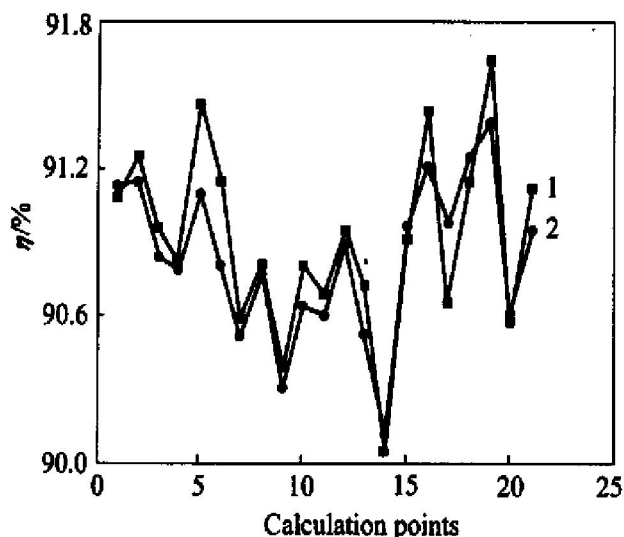


图2 回归模型和综合模型的计算结果比较

Fig. 2 Calculation results for both comprehension model and regression model

1—Results for comprehension model;

2—Results for regression model

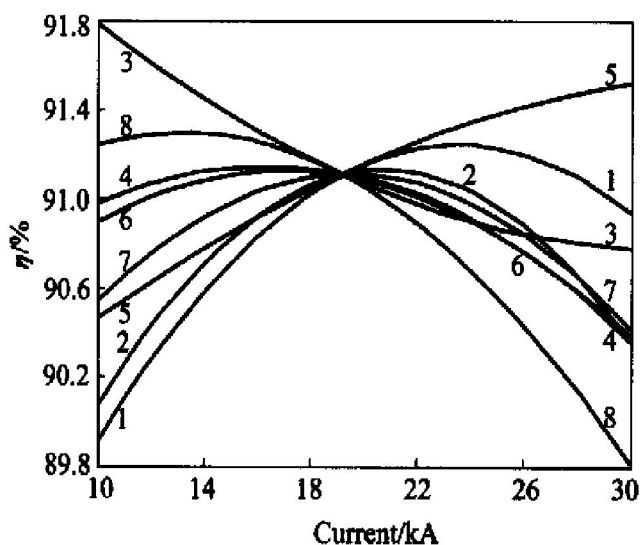


图3 电流分布对电流效率的关系图

Fig. 3 Relation between current distribution and current efficiency

区域的电流变化,总电流保持连续,剩下的电流平均分布在其他区域。图3结果表明,对大多数区域,在考察的范围内存在最大电流效率,但有些区域,例如3和5,电流效率在给定范围内一直增加(曲线5)或一直减少(曲线3)。我们认为各区域的电流分布对电流效率有不同的影响,多数区域存在最佳电流分布,这是一个普遍存在的规律。当然,各种电解槽的定量关系不相同,这与电解槽构造有关,与电解槽物理场分布密切相关。

由方程式(3)出发,也很容易作出二元图和多

元图。下面就最佳的电流效率作一简要描述。

3 最佳电流效率

什么是最佳的电流效率,怎样的电流分布能得到最高的电流效率?这些问题很难精确解答,很可能是一个多门学科的综合而归结为一个数学难题。在表3中,最高电流效率为91.78%,这不是在整个范围和多因素综合考虑的最大值,只是在特定条件下的最佳值。虽然很难得到整个区域中的最高电流效率,但易知对所有阳极均匀分布的电流得不到最大电流效率。如果所有阳极电流是相等的,则电流效率等于91.12%。

基于Kuhn Tucker理论^[15],能得到当 $\sum x_i = 3$ (总电流153 kA)时电流效率的区域最大值,过程如下:引进函数 $\varphi(x_i, \lambda) = -\eta(x_i) + \lambda(\sum x_j - 3)$

$$\begin{cases} \partial \varphi / \partial \lambda = 0 \\ \partial \varphi / \partial x_i = 0 \end{cases}$$

所以

$$\begin{cases} \sum x_j - 3 = 0 \\ -a_i - 2b_i x_i - \sum C_{ij} x_j + \lambda = 0 \end{cases}$$

解上述方程得 $x_1 = 0.788$; $x_2 = 0.653$; $x_3 = 1.885$; $x_4 = -1.245$; $x_5 = 1.284$; $x_6 = 0.845$; $x_7 = -1.241$; $x_8 = 0.31$ (注: $I = 3000 \times x_i + 18000$;例如: $x_4 = -1.245$, $I = 14265A$)。在这种情况下,平均电流效率为91.17%,比电流平均分布在各个区域时的电流效率大0.05%。而在图3中,有许多点的电流效率都大于91.12%。这似乎与传统的观点有点矛盾。由于电解槽中存在不平衡的磁场分布,不均匀的电流分布部分补偿了不均匀的磁场分布,减少了电磁力对熔体的作用,从而减低了金属流动速度,提高了电流效率。如何才能达到最佳的电流效率?由于电流分布明显地影响电流效率,因此从电流分布的观点,应该尽量接近最佳电流分布。新换的阳极不能象其他阳极一样导电,而要在10 h以后才能正常工作。如果新阳极能设置在最佳电流分布很低的地方,而且在它正常导电时移到别处,那么电流效率就能增加。这样操作可能会增加人力成本,但若每区的最佳电流分布差别很大的话,这是值得的。另外,组装阳极后,按组装质量分级,在安装阳极前,把导电性好的阳极安装在最佳电流分布较高的区域。如果条件许可,电

解槽上安装调节装置, 也是一种有效的方法。

4 结论

以 160 kA 预焙电解槽为例, 应用铝电解过程电流效率的综合模型通过正交多元回归方法对电流效率的计算, 得到一个正交多元回归模型, 此模型直接描述了预焙铝电解槽电流效率与电流分布间的关系。同时, 应用简单的正交多元回归方程式分析了电流分布对电流效率的影响。结论为: 在某些限定条件下, 对大多数阳极的电流分布有一个最佳电流效率值; 但在不同条件下最佳电流分布值不一样, 这与电解槽结构和物理场分布相关; 且在电解槽投入生产后, 对特定的电解槽, 建立特定的电流分布对电流效率的关系方程, 对于指导电解槽作业, 提高生产效率有参考意义。

REFERENCES

- [1] 邱竹贤. 预焙槽炼铝[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 6.
- QIU Zhuxian. Aluminum Metallurgy with Prebake Cell [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [2] Grjotheim K, Krohn C, Malinovsky M, et al. Aluminum Electrolysis[M]. (2nd ed). Dusseldorf: Aluminium-Verlag, 1982.
- [3] Aureliu P, Augustin M, Gheorghe D, et al. Analysis of the phenomena at the start-up of aluminum electrolysis cell by the visualization of the current distribution[A]. Proceedings of the Technical Sessions at the 131st Annual Meeting[C]. 184 Thorn Hill Road Warrendale, Pennsylvania, Washington: A Publication of TMS, 2002. 389 - 396.
- [4] Arkhipov G V, Pingin V V. Investigating thermoelectric fields and cathode bottom integrity during cell preheating, start-up and initial operating period[A]. Proceedings of the Technical Sessions at the 131st Annual Meeting[C]. 184 Thorn Hill Road Warrendale, Pennsylvania, Washington: A Publication of TMS, 2002. 347 - 354.
- [5] ZHOU Ping, ZHOU Nanjun, MEI Chi, et al. Numerical calculation and industrial measurements of metal pad velocities in Hall-Heroult cells[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(1): 208 - 212.
- [6] 吴建康, 黄珉, 黄俊, 等. 铝电解槽电解质-铝液流动及铝液表面变形计算[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(1): 241 - 244.
- WU Jiankang, HUANG Min, HUANG Jun, et al. Computation of flow field of electrolyte-aluminum liquid and surface distortion of aluminum liquid in reduction cell [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 241 - 244.
- [7] 曾水平, 彩祺凤, 梅 焱, 等. 铝电解槽内磁场的三维数值分析[J]. 中南工业大学学报, 1995, 26(5): 618 - 622.
- ZENG Shuiping, CAI Qifeng, MEI Chi, et al. Calculation and analysis of the magnetic field in alumina reduction cell[J]. Journal of Central South University of Technology, 1995, 26(5): 618 - 622.
- [8] 曾水平, 刘业翔, 梅 焱. 铝电解槽内三维电流分布数值模拟[J]. 有色金属, 1996, 48(3): 88 - 92.
- ZENG Shuiping, LIU Yexiang, MEI Chi. 3-D current distribution in alumina reduction cell[J]. Nonferrous Metals, 1996, 48(3): 88 - 92.
- [9] 刘业翔, 梅 焱, 曾水平. 铝电解槽内三维力场的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(1): 27 - 31.
- LIU Yexiang, MEI Chi, ZENG Shuiping. Computer simulation of electromagnetic force field on the melt in alumina reduction cell[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(1): 27 - 31.
- [10] ZENG Shuiping. Effect of current distribution on current efficiency in 160 kA prebake cells[A]. Proceedings of the Technical Sessions at the 131st Annual Meeting[C]. 184 Thorn Hill Road Warrendale, Pennsylvania, Washington: A Publication of TMS, 2002. 503 - 510.
- [11] Haupin W E. Production of Aluminium and Alumina [M]. London: London Press, 1987.
- [12] ZENG Shuiping, LIU Yexiang, MEI Chi. Mathematical model for continuous detection of current efficiency in aluminum production[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(4): 683 - 687.
- [13] 曾水平, 刘业翔. 160 kA 预焙铝电解槽区域电流效率[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 274 - 277.
- ZENG Shuiping, LIU Yexiang. Zone current efficiency in 160 kA prebake aluminum electrolysis cell[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 274 - 277.
- [14] 汪锡孝. 实验研究方法[M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1989.
- WANG Xixiao. Experimental Methods[M]. Changsha: Hunan Science Technology Press, 1989.
- [15] Fox R L. 工程设计最优方法[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- Fox R L. Optimum in Engineering Design[M]. Beijing: Science Press, 1984.

(编辑 李艳红)