

文章编号: 1004- 0609(2000) 02- 0274- 04

160 kA 预焙铝电解槽区域电流效率^①

曾水平¹, 刘业翔²

(1. 北方工业大学 自动控制研究所, 北京 100041; 2. 中南工业大学 有色冶金系, 长沙 410083)

摘 要: 论述了区域电流效率的意义, 利用电流效率综合机理模型和区域参数估计模型计算出了 160 kA 预焙槽的区域电流效率。结果表明, 160 kA 预焙槽中各区域的电流效率很不均匀, 最大值与最小值相差 20% 以上, 阳极底掌下的区域电流效率相差可达 4% 以上。采用区域电流效率的观点, 分析了某厂 160 kA 预焙铝电解槽电流效率的特点, 认为低电流效率区域的存在和面积偏大导致电解槽平均电流效率偏低, 并由此提出了提高电流效率的途径。

关键词: 铝电解; 电流效率; 预焙铝电解槽

中图分类号: TF821

文献标识码: A

铝电解槽中各部位的工作状况有所差别, 大型铝电解槽尤其如此。目前所说的电流效率通常为槽子在一段时间内各部位电流效率的平均值, 即空间和时间的均值。这个平均值对于考查某台槽子的工作情况既方便又实用, 但存在某些不足, 它掩盖了槽中各处特征的差异, 无法了解槽中某一区域或某块阳极的工作状态, 难以挖掘槽子的潜力。目前的研究表明, 同一槽中各阳极下的极距相差 1~ 2 cm, 熔体流速相差 10 cm/s 以上, 电解质温度相差达 8~ 10 ℃, 各阳极底掌下电流效率相差可达 10% 左右^[1]。鉴于这种情况, 分区域来讨论大型铝电解槽的电流效率是很有必要的, 这将有利于分析电解槽内部工作状态, 充分发挥槽内各处的最大效益, 为进一步寻找某些电解槽电流效率低的原因, 寻求提高电流效率的途径打下了基础。

1 区域的划分

对于一台预焙槽的区域划分有一定的任意性, 一般根据问题的需要来划分。区域划分越细, 就越能细致地分辨槽中各处的工作情况, 但却会增加许多工作量, 对于实际问题的解决也不是十分必要; 区域划分太大, 又达不到分析解决问题的目的。因此, 本文的区域划分遵循下列原则: 1) 区域内磁流条件相差不大; 2) 区域内部是连续的, 跨度尽可能小; 3) 计算机处理方便; 4) 对铝电解生产操作条件的优化及提高电流效率有利。

本研究把某厂 160 kA 预焙阳极电解槽划分成 9 个区域, 相邻的三个阳极为一个区域, 24 个阳极分成 8 个区域, 电解槽边部为一个区, 见图 1。

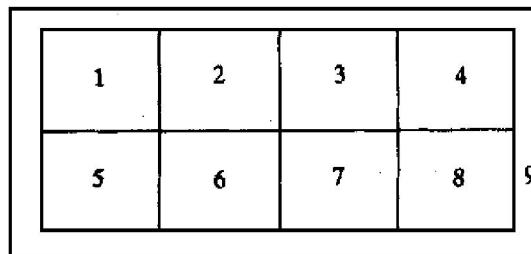


图 1 160 kA 预焙槽区域划分示意图

Fig. 1 Partition of 160 kA prebake cell

2 区域电流效率的计算

2.1 计算方法

电解槽中铝的损失主要受传质过程的影响, 而对于在整个传质过程中哪一阶段是律速阶段, 一些研究者有不同的观点, 因而导致有不同计算电流效率的机理模型建立^[2~ 4]。

这里采用充分考虑整个传质过程影响的综合机理模型^[5, 6], 此模型表达为:

$$\left. \begin{aligned} E_c &= 100 - 219 d_{en}^{-1} D_{me}^{0.67} \mu^{-0.5} u_e^{-0.83} \cdot \\ &\quad d^{-0.17} \rho^{1.5} C_{Al}^* (1 - f) \\ f &= c_m / c_m^* \\ D_{me} &= D_m (\sigma_r / \sigma)^{0.5} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 59974001
作者简介: 曾水平(1961-), 男, 博士, 副研究员

收稿日期: 1999- 05- 10; 修订日期: 1999- 11- 22

式中 E_c —电流效率的百分数, %; d_{em} —阴极电流密度, kA/m^2 ; D_{me} —校正界面张力时的等效扩散系数; μ —电解质粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; u_e —电解质相对铝液的平均流速, m/s ; d —极距, m ; ρ —电解质密度, kg/m^3 ; C_{Al}^* —电解质中 Al 的饱和浓度; f —金属浓度比例系数; c_m —电解质主体的金属浓度; c_m^* —电解质中金属的饱和浓度; D_m —扩散系数; σ_r —对应于扩散系数 D_m 时的界面张力; σ —铝和电解质界面张力。

各区域的温度采用区域平均温度的估计模型计算, 对于 160 kA 电解槽实测期间的温度估计模型为^[6]:

$$T = 965 + 0.65\bar{d}(\bar{d} - 3) \quad (2)$$

式中 T —温度, K; $\bar{d}$ —电解质中平均的电流密度, A/m^2 。换阳极时, 此区域的温度需特殊处理。

各区域的极距采用区域平均极距的估计模型计算。对于 160 kA 电解槽各区域的极距估计模型为^[6]:

$$L_i = 0.81/I_i \quad (3)$$

式中 L_i —区域的平均极距, m ; I_i —区域流过的电流, kA 。

各区域的界面张力平均值估计模型为:

$$\sigma_{\text{界}} = 550 - 110d_c \quad (4)$$

式中 $\sigma_{\text{界}}$ —铝和电解质界面张力, $10^{-3}\text{N}/\text{m}$; d_c —区域平均阴极电流密度, A/cm^2 。

比例系数 f 值的估计模型为

$$f = 0.5 - 0.5d_a \quad (5)$$

式中 d_a —区域阳极平均电流密度, A/cm^2 。

计算过程所用到的物理化学参数参考文献[7]的取值。

2.2 计算结果

利用式(1)~(5), 并结合铝电解槽中物理场的计算模型, 计算了各区域电流分布均匀时 160 kA 电解槽各区域的电流效率, 计算结果见图 2。

图 2 中“10”对应的电流效率为整个电解槽的平均电流效率计算值。由于区域电流效率的测定比较困难, 必须在对应区域的阳极上直接钻孔取 CO_2 气体进行分析。鉴于条件所限, 我们只校验了平均电流效率, 结果表明对于一周内的平均电流效率计算值与实测值的误差小于 0.6%。

3 讨论

3.1 160 kA 预焙槽电流效率的特征

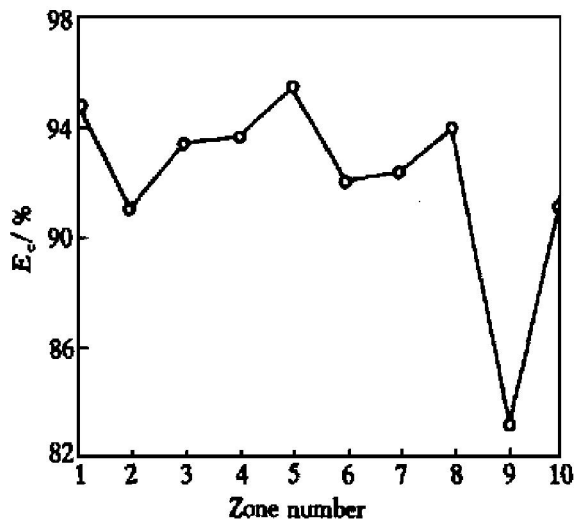


图 2 电流效率与电解槽中区域的关系图

Fig. 2 Variation of current efficiency with zone

从上面的计算结果可知, 电解槽中各区域的电流效率是不相同的, 最大值与最小值相差 20% 以上, 阳极底掌下的区域电流效率相差可达 4% 以上。1, 5 和 8 区域属高电效区域; 2, 3, 4, 6 和 7 区域属中等电效区域; 9 区域即边部区域属低电效区域, 这与该区域的磁流条件和电流分布是一致的。

某厂 160 kA 预焙槽电流效率除具有铝电解生产的一般规律外, 还具有下列特征。

1) 槽周边(阳极底掌投影外围)的电流效率比槽平均电流效率低 15% 左右, 主要原因是这个区域电流密度小, 熔体流速大。

2) 各阳极底掌下的局部工作状况很不一致, 区域平均电流效率相差不等, 相差最大者达 4% 以上。这主要是由于母线配置造成槽内各处磁场条件不同^[8], 以及各阳极导电情况不同所致。

3) 通过计算可知, 换阳极所引起的平均电流效率损失超过 1%, 这是因为新阳极在很长时间达不到额定电流值, 大大增加了熔体内水平电流, 而导致熔体流速增加。另外换阳极的区域垂直电流密度大大减少。

4) 在相同操作条件下, 并非所有阳极导电严格相等, 电流效率最高。这是由于槽子设计造成各处磁场条件不同, 而不均等的电流分布能在一定程度上补偿磁场不均匀的影响。

5) 槽内有的区域电流效率高达 96%, 但槽平均电流效率却低于 90%, 这说明低电流效率的区域占面积较大, 槽子的设计和操作方面有待改进。

3.2 提高电流效率的途径

提高电流效率的途径有过许多一般性论述^[7,9], 本文针对 160 kA 槽的实践和区域电流效率

的计算结果进行了讨论。

1) 缩小铝液镜面的表面积

区域电流效率计算表明, 电流效率最低的区域是周边区域。这个区域电流效率比阳极底掌下区域电流效率低 10%~15% 左右, 而目前电解槽的设计和操作使这一区域的面积占阴极表面总面积的 15%~20%, 这是使槽平均电流效率低的一个重要原因。据粗略估计, 若能使这个区域面积缩小一半, 平均电流效率可提高 1%~2%, 160 kA 槽子工作时, 炉帮最薄处恰好在铝液与电解质界面附近, 这显然是不合理的。改进的办法有:

a. 槽子设计时采用窄炉面操作, 减少阳极至槽壁空间, 从而减小阴极表面。

b. 槽子设计和大修时, 重新考虑保温材料的布置, 使电解质/铝液界面处炉帮增厚, 使铝液表面积尽可能小, 这可以通过电解槽热平衡的精确计算和内衬优化设计来实现。

2) 减少伸腿长度

研究表明, 金属-电解质界面处的伸腿厚度对电流效率有较大的影响^[10]。目前 160 kA 预焙槽伸腿长度一般在 20 cm 左右, 伸腿处还有一些软沉淀的存在。铝液中水平电流有较大的值, 前面曾经指出, 炉帮伸腿一般在阳极底掌投影的边缘最合适, 伸腿的长短主要由电解槽的热场来决定, 欲使伸腿位置最佳, 除可以在操作过程中人工消减伸腿外, 主要应通过改进电解槽的热场设计来实现。如果伸腿能从目前状况改进到伸腿长度为 5 cm 以内, 可使熔体流速降低 15%~20%, 电流效率可相应提高 1% 左右。

3) 优化母线配置

阳极底掌下不同区域电流效率差别的主要原因之一是磁场条件不一致, 改善磁场条件的手段是改造母线设计。某厂 160 kA 预焙槽的母线配置存在一定问题, 这是导致设计电流效率不高(87.5%)的主要原因之一。如果能把现行 160 kA 槽中高电流效率区域的磁场条件强加于全槽, 据粗略估计电流效率可提高 2%~3%。

4) 阳极设置高度的最佳化

目前认为阳极设置高度对生产有一定的影响, 但阳极本身有自我调节功能。当某一阳极消耗过快时, 局部极距增加会使该阳极导通电流减少, 其消耗速度自动下降; 而当某种原因导致某一阳极消耗速度减慢时, 局部极距减小会使该阳极导通电流增加, 其消耗速度也随之增加。这样似乎不用强调阳极设置高度的严格性, 生产过程也不用人工干预,

阳极本身的自调节功能使生产正常进行, 然而正是阳极在自调节过程中引起电流效率的损失。

阳极设置高度的最佳化有过专门报道^[11], 它基本是从阳极预热和导电性方向来论述, 没有从电流效率的角度去分析, 得出的结论是安装新阳极的底掌应高于工作阳极底掌 0.5~1 cm。从电流效率的角度分析, 阳极应尽快达到其额定电流, 达到额定电流的时间越短, 电流效率损失越小。这样在有条件时阳极的安装应分二次完成, 第一次安装高度低于工作阳极底掌 2 cm 左右, 待导电达额定电流时, 进行第二次安装, 从而缩短新阳极不正常导电的时间, 这样可以使换阳极引起的电流效率损失降低约 20% 左右。

5) 阳极个别调整

电解过程中, 由于某种原因如接触不好、阳极质量差异、阳极长包等, 导致某一阳极工作不正常, 长时间偏离额定电流值, 有时需要人工处理, 有时它能自己恢复正常工作。这种情况在实际生产过程中一般靠阳极的自调节性能恢复正常工作。由于阳极的自调节功能有限, 会引起电流效率的损失。我们认为, 出现这种情况时, 在适当处理使阳极故障消失后, 应采用调整个别阳极高度的方法, 使其迅速达电流额定值, 从而提高电流效率。当然, 调整个别阳极必须是在有条件的厂房才能实现, 并且需精确控制, 否则调整个别阳极会有不良后果。

6) 延长高电流效率区域的工作时间

电解槽各区域的正常工作时间, 就是对应区域阳极的正常导电时间。阳极的导电性能主要由阳极本身的温度和质量决定, 实际生产过程中换上去的冷阳极在 15 h 内不能正常导电^[9], 由此造成电流效率损失。如果在换阳极时用充分预热好的新阳极, 则完全可以使其在 1 h 内正常导电, 这将大大改善槽内熔体的电流分布, 对提高本区域的电流效率和相邻区域的电流效率都有利。另外, 在没有条件预热阳极时, 为了保证更高电流效率区域工作时间, 可以考虑在高效区需换新极时, 先把低效区的工作阳极移植到高效区, 把冷的新阳极换在低效区。当各区域电流效率差别较大时, 这在经济上是合算的, 但此方案需经工业实践来证明其可行性。

4 结论

1) 本文以电解槽中溶解金属传质过程的综合

机理模型为基础, 结合实际情况, 计算了电解槽中各区域的电流效率, 首次对大型铝电解槽采用区域电流效率的观点进行了分析和讨论。

2) 现场测量和计算了某厂 160 kA 预焙铝电解槽电流效率, 给出了铝电解槽中各区域电流效率的分布图。

3) 针对某厂 160 kA 预焙铝电解槽电流效率和电流分布的特点, 分析了电流效率低的原因, 提出了提高电流效率的方法。

REFERENCES

- [1] Alcorn T R, Mcminn C J and Tabereaux A T. Current efficiency in aluminium electrolysis by anode gas analysis [J]. *Light Metals*, 1988: 683~ 695.
- [2] Dorreen M M R, Hyland M M and Welch B J. Current efficiency studies in a laboratory aluminium cell using the oxygen balance method [J]. *Light Metals*, 1998: 483~ 489.
- [3] Lillebuen B and Mellerud T H. Current efficiency and alumina concentration [J]. *Light Metals*, 1985: 637~ 645.
- [4] Dewing E. Loss of current efficiency in aluminium electrolysis cell [J]. *Metallurgical Transaction B*, 1991, 22B: 177~ 182.
- [5] ZENG Shuiping, LIU Yexiang and MEI Chi. Mathematical model for continuous detection of current efficiency in aluminum production [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 1998, 8(4): 683~ 687.
- [6] ZENG Shuiping(曾水平). 铝电解槽电磁场计算及电流效率连续监测的研究[D]. Changsha: Central South University of Technology, 1996.
- [7] Grjotheim K, Krohn C, Malinovsky M, et al. Aluminum electrolysis(2nd Edition) [M]. Aluminum-Verlag, Dusseldorf, 1982.
- [8] ZENG Shuiping(曾水平), CAI Qifeng(蔡祺凤), MEI Chi(梅 焱), et al. 铝电解槽内磁场的计算 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*, 1995, 5(Suppl. 1): 34~ 38.
- [9] QIU Zhuxian(邱竹贤). Aluminum Electrolysis in Prebake Cell(预焙槽炼铝). Beijing: Metallurgy Industry Press, 1988, 6.
- [10] Torstein Haarberg T, Solheim A, Johansen S T, et al. Effect of anodic gas release on current efficiency in half-heroult cells [J]. *Light Metals*, 1998: 475~ 481.
- [11] Utigard T. Optimum of anode setting height [J]. *Light Metals*, 1991: 273~ 280.

Zone current efficiency in 160 kA prebake aluminum electrolysis cell

ZENG Shuiping¹, LIU Yexiang²

1. Institute of Automatic Control, North China University of Technology, Beijing 100041, P. R. China;

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

Abstract: The zone current efficiency for prebake aluminum electrolysis cell was investigated. The comprehensive mechanism model for aluminum loss and some semi-empiric equations for calculating the parameters in the cell were used to compute the zone current efficiency in aluminum electrolysis on the basis of previous work. The uneven current efficiency of the whole cell is so obvious that the gap between different zones is over 20%, which varies with the different partitions of zone. According to the analysis of both calculation and measurement, some suggestions were put forward to improve the cell operation and to raise the current efficiency for prebake aluminum production cell.

Key words: aluminum electrolysis; current efficiency; prebake aluminum electrolysis cell

(编辑 何学锋)