

铝电解槽电解质-铝液流动及铝液表面变形计算^①

吴健康¹, 黄珉¹, 黄俊², 姚世焕²

(1. 华中科技大学力学系, 武汉 430074; 2. 贵阳铝镁设计研究院, 贵阳 550004)

摘要: 在 ANSYS 平台上采用有限元法和 $k-\epsilon$ 湍流模型求解粘性不可压缩流体三维雷诺平均的 Navier-Stokes 方程, 计算在电磁力作用下铝电解槽液体流动。对电解质和铝液的流场分别求解, 然后利用分层液体界面压强连续条件计算铝液表面变形。230 kA 电解槽的计算结果表明电解质和铝液流动为近似水平的两个旋涡, 其中一个旋涡的中央区铝液表面上升, 另一个旋涡中央区铝液表面下降。流动速度从旋涡中心向外增加, 最大速度发生在电解槽边壁附近, 并迅速减少为零。这种速度特性表明电解槽边壁某些部分承受较大摩擦力。计算结果与 230 kA 电解槽在运行 5 个半月后的实测数据基本一致。

关键词: 铝电解槽; 磁流体力学; 有限元法

中图分类号: TF 821

文献标识码: A

铝工业的“霍尔-埃鲁特”电解技术总体上已经成熟。为了获得更大的经济效益和保护环境, 铝工业正在寻求电解技术的新突破, 因此研究开发先进技术以解决有关的难题, 对我国的铝工业生产有十分重要的意义。铝电解槽是铝电解技术的核心。近二十多年来, 随着计算机技术的发展, 国际铝电解槽数学模型的研究有很大的发展。包括电、热、磁、流体运动和结构分析的数学模型及实验研究^[1~6]和计算机软件已在铝电解槽设计和生产控制中发挥巨大的作用。在铝电解槽的关键技术中, 电解质和铝液流动是最重要的问题之一。它对提高电流效率、改善工作条件、保护环境和延长电解槽寿命有重要的影响。文献[7]对电解槽磁流体运动作了综述。电解槽的电流经过阳极碳、熔化电解质层、铝液层到达阴极。电解质的密度比铝液小 10% 左右, 浮在铝液上方。在运行的铝电解槽中存在电磁力, 它是电流密度和磁感应强度相互作用而产生的一种驱动力。电磁力驱动融化的电解质和铝液在电解槽内作近似水平的分层环流运动。电解质和铝液的流动特性与铝液表面的变形、波动稳定性^[8]、电解槽边壁磨损、氧化铝在槽中的对流扩散^[9]、电解槽热传导等关键技术问题均与电解槽液体流动、电磁场和热传导密切相关。文献[10]通过测量阳极电流波动计算稳定态流场。长期以来, 计算结果与实际测量数据往往吻合不好, 有时差别甚大。其原因是多方面的: 一是电解槽在使用一段时间后, 槽的状态

发生变化, 与设计槽不一样; 其二是数值计算也会有各种误差。以往自编程序在解的收敛性判断方面难以控制, 貌似收敛, 其实不然。本文作者的计算工作选择在 ANSYS 平台上进行, 就是为了尽量避免数值计算上的误差, 计算压强的收敛误差一般可达到 10^{-8} 。ANSYS 商业软件包是比较成熟的力学计算工具, 在流体力学模型以及边界处理正确的条件下, 其计算结果应该具有较高可信度。作者在预先没有数据的提示下, 得到重要的流动特征, 计算结果与实测数据吻合较好, 这对电解槽设计和生产在线控制很有意义。

1 控制方程和边界条件

电解槽的内部结构如图 1 所示。由于电解质的密度比铝液小, 浮在铝液上面, 在电磁力作用下形成稳定的分层流动。实际观测表明, 两液体层之间的对流扩散与液体层自身的流动速度相比非常微小。可以认为在满足分界面连续条件下, 两层液体流动是独立进行的, 因此两液体层的流动可以分别计算, 然后通过分界面连续条件对分界面高度进行修正, 得到铝液表面的变形高度。粘性不可压缩流体运动的连续方程和 Navier-Stokes 方程表示如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + (\nu_x + \nu_y) \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

① 收稿日期: 2002-02-27; 修订日期: 2002-05-24 作者简介: 吴健康(1946-), 男, 教授, 博士
通讯联系人: 吴健康, 华中科技大学力学系, 电话: (027) 87543238; E-mail: Wujkang@hust.edu.cn

式中 ν 是物理粘性系数; ν_t 是湍流涡粘性系数; 体积力 f 是电磁力, 通过电流密度和磁感应强度计算: $f = J \times B$ 。电解质层流动的边界条件描述如下: 由于粘性作用, 电解槽的四周边界以及电解质层上表面(阳极底部)的速度为零。电解质的下表面与铝液交界。由于不考虑两层液体扩散渗透作用, 电解质的下表面的法向速度为零。对铝液层, 四周边界和底部边界速度为零。铝液层上表面与电解质交界, 法向速度为零。

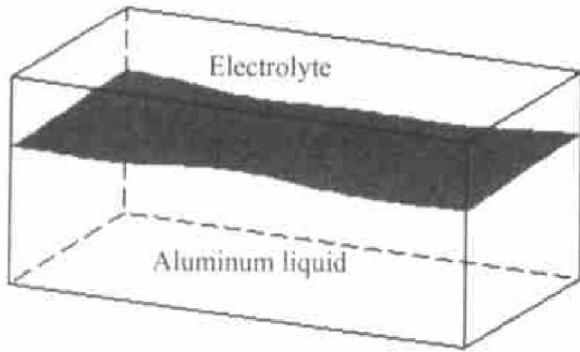


图1 电解槽分层液体示意图

Fig. 1 Sketch of stratified liquids of aluminum reduction cell

计算中采用 $k-\epsilon$ 湍流模型。Navies-Stokes 方程中的湍流涡粘度表达为

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

式中 k 是湍流动能, ϵ 是湍动能耗散率。它们分别满足以下方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\nu_t \frac{\mathbf{V}}{\rho_k} \nabla k \right] + \frac{G_k}{\rho} - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\nu_t \frac{\mathbf{V}}{\rho_\epsilon} \nabla \epsilon \right] + \frac{G_{\epsilon 1} \epsilon}{\rho_k} G_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

湍流动能生成项 G_k 为流体变形速率张量 S_{ij} 的内积:

$$G_k = 2\rho\nu_t S_{ij} S_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

方程(3)~(6)中的经验系数为:

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.01, \quad \rho_k = 1.0, \quad \rho_\epsilon = 1.3$$

对两层液体流动分别在 ANSYS 平台上计算, 得到两层液体水平流动速度和压强。在完成电解质和铝液的流场计算后, 利用分层液体交界面的压强连续条件, 对铝液表面高度进行修正。铝液表面变

形计算如下:

$$\zeta(x, y) = \frac{p_1(x, y) - p_2(x, y)}{g \nabla \rho} + c \quad (7)$$

式中 p_1, p_2 分别为交界面上, 铝液和电解质层的压强。因为两液体层的流动是分别求解的, 在分界面的两边压强不相等。必须调整交界面的高度, 以满足压强连续条件。由于铝液是不可压缩流体, 铝液的体积保持不变。方程(7)中的常数从以下积分式计算:

$$\int \zeta(x, y) dx dy = 0 \quad (8)$$

2 230 kA 电解槽算例

电解槽的数据给出如下: 电解槽内部空间长 $L = 11.224$ m, 宽 $B = 11.224$ m, 铝液深 $h_1 = 0.18$ m, 密度 $\rho_1 = 2300$ kg/m³, 粘度 $\mu_1 = 6 \times 10^{-4}$ Pa·s, 电解质厚(极距) $h_2 = 0.05$ m, 密度 $\rho_2 = 2100$ kg/m³, 粘度 $\mu_2 = 4 \times 10^{-3}$ Pa·s。电磁力由 ANSYS 计算。电解槽每层液体空间离散为 61(长) × 23(宽) × 2(高) = 2806 个六面体网格。从阳极向下观察, 水平电磁力表示在图 2, 3 中, 计算的水平速度分布表示在图 4, 5 中。

从计算结果看出水平流动形成两个反向涡流。从电解槽的阳极向下看, 左边涡流是反时针方向, 右边涡流顺时针方向。从电磁力矢量图 2, 3 发现:

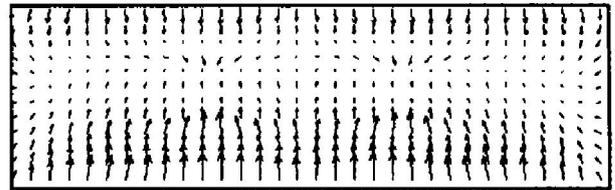


图2 230 kA 电解槽电解质层水平电磁力分布

Fig. 2 Distribution of horizontal electro-magnetic force of electrolyte layer in 230 kA reduction cell

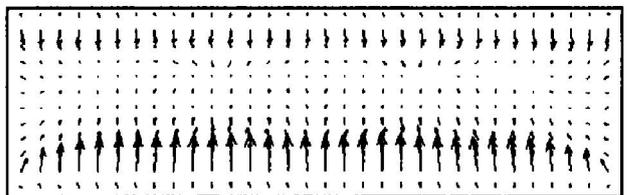


图3 230 kA 电解槽铝液层水平电磁力分布

Fig. 3 Distribution of horizontal electro-magnetic force of aluminum liquid in 230 kA reduction cell

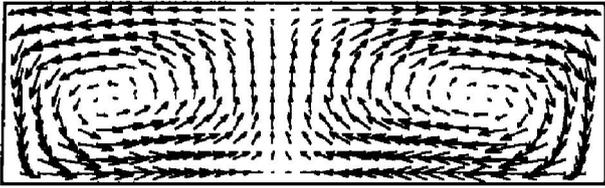


图 4 电解质层水平速度分布

Fig. 4 Calculated horizontal flow velocities of electrolyte layer in 230 kA reduction cell

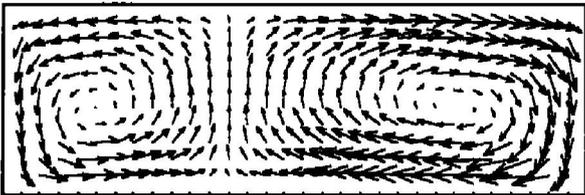


图 5 铝液层水平速度分布

Fig. 5 Calculated horizontal flow velocities of aluminum liquid in 230 kA reduction cell

电磁力驱动液体向槽中央挤压, 下半区域的向上电磁力大于上半区域的向下电磁力, 所以在槽的中间区域, 液体向上流动, 经过上槽壁的反射, 液体分成两股, 形成左右两个涡流。计算的涡流方向与电磁力的作用效果是一致的。电解质层的两个涡流差别不大, 铝液层的两个涡大小不对称。所以两层液体的压强在分界面上不同, 从而导致分界面上升或下降。涡流中央的速度最小, 向外逐渐增加。在接近槽壁处, 速度最大。计算的最大速度分别为 0.1835 m/s (电解质层) 和 0.2167 m/s (铝液层)。实测的铝液最大速度为 0.2298 m/s , 与计算结果一致。由于粘性作用, 槽壁速度为零, 所以边界层效应很强。在边壁的某些部分承受较大的摩擦力, 可能腐蚀严重。这里的电解质流动速度较大, 有利于氧化铝的扩散, 可以考虑设置加料点。计算的电解质和铝液在深度方向最大速度分别为 $7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 和 $2.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 与水平速度相比, 可以忽略不计。

铝液表面变形表示在图 6 中。可以看出在一个涡流的中央区域表面上升, 另外一个涡流中央区表面下降。由于液体向槽中央挤压, 在接近上下槽壁附近, 铝液表面略微下降。铝液表面变形从 -2.16 cm (最大下降高度) 到 1.1 cm (最大上升高度)。230 kA 电解槽在运行 5 个半月后实测铝液表面变形表示在图 7 中。可以看出计算结果与实测形状基本一致。实测的铝液表面波动范围小于 2 cm , 这与计算结果大小一致。

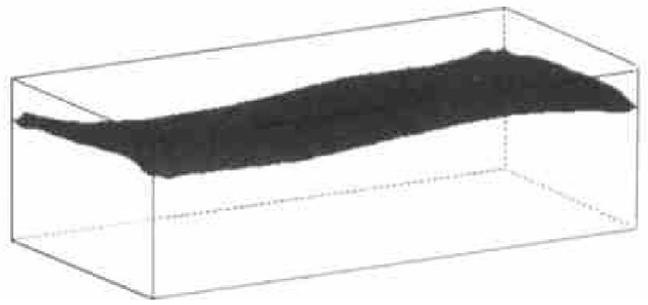


图 6 计算的 230 kA 电解槽铝液表面变形图

Fig. 6 Calculated distortion profile of aluminum liquid surface in 230 kA reduction cell
($\zeta_{\max} = 1.1 \text{ cm}$, $\zeta_{\min} = -2.16 \text{ cm}$)

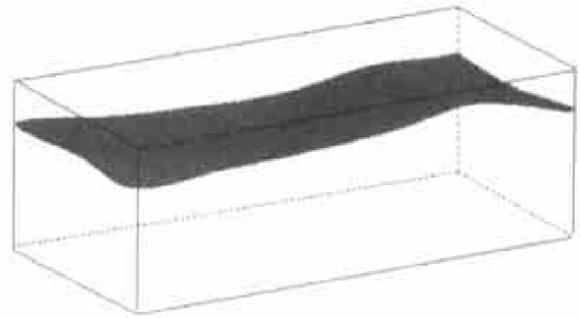


图 7 230 kA 电解槽铝液表面实测变形图

Fig. 7 Measured distortion profile of aluminum liquid surface in 230 kA reduction cell ($1 \text{ cm} \leq \zeta \leq 2 \text{ cm}$)

3 讨论

在 ANSYS 平台上采用有限元法求解了三维雷诺平均的 Navier-Stokes 方程, 计算了电解槽在电磁力作用下电解质和铝液流场以及铝液表面变形, 得到合理的结果。在预先没有实测数据的情况下, 230 kA 电解槽的计算结果与实测数据基本一致。这些结果对电解槽稳定性研究和热传导分析有重要意义。液体流动和铝液表面变形会改变初始电流密度和磁场分布, 进而改变电解质和铝液的受力。改变的电磁力又进一步修正液体流动和铝液表面变形。电磁场和流场是相互耦合的两个重要变量。本文作者的工作不仅对电解槽优化设计和生产在线控制有意义, 而且对进一步深入研究电磁场和流场的耦合作用也有重要意义。

REFERENCES

- [1] Vogelsang D, Segatz M, Droste C, et al. Development of a 300 kA reduction cell: application of simulation tools

- for the conceptual design[J]. *Light Metals*, 1994: 245 - 251.
- [2] Vogelsang D, Segatz M. Simulation tools for development of high-amperage reduction cells [J]. *Light Metals*, 1991: 375 - 379.
- [3] 游旺, 王前普, 李欣峰, 等. 铝电解槽膛内形在线动态仿真理论研究[J]. *中国有色金属学报*, 1998, 8(4): 695 - 699.
- YOU Wang, WANG Qianpu, LI Xinfeng, et al. On-line dynamic simulation of freeze profile in aluminium electrolysis[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1998, 8(4): 695 - 699.
- [4] 李洪, 梅炽, 王前普, 等. 铝电解槽壳散热模型[J]. *中国有色金属学报*, 1996, 6(4): 56 - 61.
- LI Hong, MEI Chi, WANG Qianpu, et al. Models for heat transfer from aluminium reduction cell shells[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1996, 6(4): 56 - 61.
- [5] 伍洪泽. 大型铝电解槽槽壳位移研究[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(2): 65 - 68.
- WU Hongze. Displacement study of the shell of an aluminium electrolyzer[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(2): 65 - 68.
- [6] 伍洪泽, 夏春, 危育蒲, 等. 180 kA 大型铝电解槽力场测试与分析[J]. *中国有色金属学报*, 1996, 6(2): 23 - 27.
- WU Hongze, XIA Chun, WEI Yupu, et al. The test and analysis of stress field in 180 kA aluminium electrolyzer[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1996, 6(2): 23 - 27.
- [7] Daniel K A. The hydrodynamics of the Hall-Heroult cell: an overview[J]. *Light Metals*, 1985: 593 - 607.
- [8] Davidson P A, Linsay R I. A new model of interface waves in reduction cells[J]. *Light Metals*, 1997: 437 - 442.
- [9] Bilek M M, Zhang W D, Stevens F J. Modeling of electrolyte flows and its related transport processes in aluminium reduction cells[J]. *Light Metals*, 1994: 323 - 331.
- [10] Antille J, Flueck M, Romerio M V. Steady velocity field in aluminum reduction cells derived from measurements of the anode current fluctuation[J]. *Light Metals*, 1994: 305 - 312.

Computation of flow field of electrolyte-aluminium liquid and surface distortion of aluminum liquid in reduction cell

WU Jian-kang¹, HUANG Min¹, HUANG Jun², YAO Shihuan²

(1. Department of Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
2. Guiyang Aluminum-Magnesium Design and Research Institute, Guiyang 550004, China)

Abstract: Using finite element method and $k-\varepsilon$ turbulence model, liquid flows and surface distortion of aluminum liquid in a reduction cell are calculated based on three-dimensional Reynolds averaged Navier-Stokes equation. The calculation is carried out on ANSYS platform. In general, the vertical flow on interface of two liquid layers is much weaker than the horizontal flows driven by electromagnetic forces. Flow fields of molten electrolyte and aluminum liquid are solved separately. The surface distortion of aluminum liquid is calculated from the pressure difference on the liquid interface based on pressure continuous condition. Numerical example of 230 kA reduction cell is presented. The numerical results indicate that the horizontal flows approximately consist of two vortices. The surface rises up in central area of one vortex, the surface sets down in central area of another vortex. The flow velocity increases outwards from vortex center. The flow velocity reaches maximum at close to cell wall and rapidly decreases to zero. The order of magnitude of flow velocity computed and the interface distortion profile computed are in agreement with measured data of 230 kA reduction cell that has been operated for five months.

Key words: aluminum reduction cell; magnetohydrodynamics; FEM

(编辑 吴家泉)