

铝电解槽磁流体的两相模拟及其界面追踪

周子民¹, 李茂¹, 蒋胜矩²

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 西安兵器工业 203 所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 采用商业软件 ANSYS 与 CFX 相结合的方法, 运用有限元及有限体积法与两相流模型对 300 kA 铝电解槽导电磁流体的铝液、电解质两相湍流流动进行研究, 并耦合 VOF 算法追踪铝液界面波动, 模拟计算正常工况及角部换极下的稳态流场。研究表明: 铝液流场基本呈现为 2 个大的漩涡, 流场计算值与测试值比较接近; 而在角部阳极更换后铝液中水平电流密度显著增大; 在新阳极下方的铝液中形成较大速度涡旋, 对流场的较大扰动导致界面波动幅度增加, 极距减小; 通过适当提升新极安装高度可增强磁流体的稳定性。

关键词: 铝电解槽; 两相模拟; 界面追踪; 数值计算

中图分类号: TF821; TF804.4; TF351 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7207(2007)02-0267-04

Two-phase simulation and its interface tracking of fluid flow in aluminum electrolysis cell

ZHOU Jie-ming¹, LI Mao¹, JIANG Sheng-ju²

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. No.203 Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the two commercial packages ANSYS and CFX, the electromagnetic driven flow field in the aluminum electrolysis cell was studied by finite element method and finite volume method. The flow field was simulated with the derived electromagnetic forces while two phase model and VOF method were employed to model the melt-bath mixture and its interface tracking. From the modeling it is shown that there are two vortexes in the liquid metal pad, and the disturbed horizontal current has significant effect on the magnetic field after corner anode changes and an eddy with larger velocity appears under the new anode while ACD decreases and magnetohydrodynamic instability increases.

Key words: aluminum electrolysis cell; two-phase simulation; interface tracking; numerical computation

铝电解槽的磁流体是电解铝生产中非常重要的一个物理场, 对极距及其电流效率等工艺指标参数影响显著。然而, 由于槽中流场运动十分复杂, 涉及高温电解质、熔融铝液以及气泡搅拌下复杂的物理化学反应, 实验研究比较困难。研究者大多采用数值模拟的方法研究铝电解槽中导电磁流体的运动, Segatz 等^[1-2]

基于线性化的 MAXWELL 和动量方程求解特征值来模拟界面波动; Zikanov^[3]在二维浅水方程近似下研究铝液流动及其界面波动; Droste 等^[4-5]利用 PHOENICS 比较研究了不同母线配置下的铝液流动形态及铝液-电解质界面问题; 吴建康等^[6-8]分别运用 ANSYS 与自编程序求解界面变形问题, 且认为垂直方向速度相对

收稿日期: 2006-10-28

基金项目: 国家教育部博士点基金资助项目(20010533009)

作者简介: 周子民(1948-), 男, 山东济南人, 教授, 从事热物性测试与热能工程设备仿真优化研究

通讯作者: 周子民, 男, 教授; 电话: 0731-8836936; E-mail: zhujm@mail.csu.edu.cn

水平速度较小,可以忽略;周萍等^[9]对比分析了应用不同湍流模型的数值结果及其工业实验, $k-\varepsilon$ 模型及哈特曼数能较好地描述电解槽内磁流体运动特征。上述研究或者由近似数学模型下求得特征波模式,或将铝液与电解质都作为单相流处理,在扁平界面假设下分别求解两者的动量方程、连续性方程,界面形状则在求解流场后通过电解质、铝液压强连续与静力平衡的计算实现,没有充分考虑铝电解槽中电解质熔体与铝液的上下叠置、多相混合搅拌的耦合作用及其界面变化的影响。为此,本文作者在两相流模型下研究磁流体的运动及界面追踪。

1 数学模型

1.1 两相流模型

将电解槽中铝液与电解质熔体视为均匀连续介质,假设两相处于热力学平衡状态(即等温且饱和),忽略相间传质及其阳极底掌上气泡对电解质运动的影响,则两相流模型可以由基于欧拉-欧拉多相流的均相流模型^[10-11]描述。

通用变量输运方程的一般形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\phi - \Gamma\nabla\phi) = S; \quad (1)$$

连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\phi) = 0; \quad (2)$$

动量方程即为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U} \cdot \mathbf{U} - \mu(\nabla\mathbf{U} + (\nabla\mathbf{U})^T)) = S_M - \nabla p. \quad (3)$$

其中: ϕ , N_p , ρ_α , \mathbf{U}_α , Γ_α , S , r_α 和 μ_α 分别为通用输运变量、相数、各相物质密度、相速度,输运系数、源项、体积分数(相分率)和粘性系数。

$$\rho = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha, \quad \mathbf{U} = \frac{1}{\rho} \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \rho_\alpha \mathbf{U}_\alpha, \quad \Gamma = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \Gamma_\alpha,$$

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha = 1, \quad \mu = \sum_{\alpha=1}^{N_p} r_\alpha \mu_\alpha.$$

1.2 VOF 界面追踪

由Hirt等^[12]提出的VOF(volume of fluid)法在对输运界面的追踪上已经得到广泛应用。其基本思想是将运动界面在空间网格内定义为一种流体体积函数,并建立控制体中流体体积比函数 C 的输运方程,从而随着主物理场的模拟过程,通过流体输运精确地确定运动界面的位置和形状,对不可压流体,有:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}C) = 0. \quad (4)$$

其中: $C = \frac{\tau(\sigma)}{\tau_{\text{gross}}}$,为目标流体在控制体单元所占的比

值。含有运动界面追踪问题的控制方程一般由具体的运动介质物理场的数学模型(基本控制方程)和上述流体体积函数方程构成,可采用高分辨率的数值格式耦合求解。

2 计算及分析

首先运用ANSYS计算电解槽总体电流场、磁场,再通过电流密度与磁通密度的叉积计算出搅拌铝液、电解质运动的源泉-电磁力,作为流场计算的动量源,通过自编程序实现2个软件之间的数据交换,然后,导入到CFX中,采用两相流模型与 $k-\varepsilon$ 湍流模型结合VOF自由面追踪算法求解两相稳态湍流流场及其界面形状,以铝液相的体积分数等于0.5的几何位置确定为两相之间的界面。取电解质上表面为滑移壁面,其他固体壁面无滑移并忽略界面张力影响。假设初始界面水平,界面下铝液所占体积分数设为1,电解质所占体积分数设为0。

2.1 300 kA 铝电解槽的计算

以某厂300 kA铝电解实验槽为研究目标,其阳极为40个,大面5点进电,计算区域包括铝液层与电解质层,其中包含阳极周边以及阳极间的电解质部分,网格节点共计35 844个,单元有29 330个,如图1所示(图1所示为 z 方向相对 x, y 放大了10倍的图形),主要工艺物性参数见表1所示。

水平电流分布左、右基本对称,而在 A 侧角部以及 B 侧中部水平电流较大(图2),铝液流场呈现为2

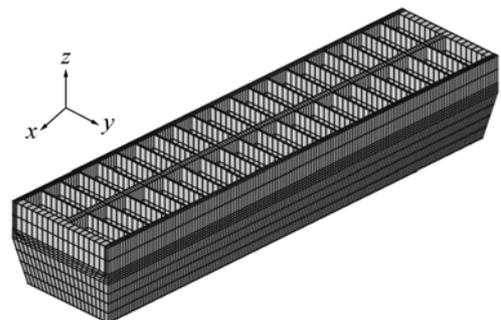


图1 铝电解槽的计算区域及网格划分

Fig.1 Computation geometry and mesh of aluminum electrolysis cell

表1 铝电解槽的主要工艺物性参数

Table 1 Primary parameters of aluminum electrolysis cell			
工艺参数	数值	物性参数	数值
电流强度/kA	300	铝液密度/(kg·m ⁻³)	2 300
槽电压/V	4.143	电解质密度/(kg·m ⁻³)	2 100
电解质水平/cm	18.6	铝液黏性系数/(Pa·s)	6×10 ⁻⁴
铝水平/cm	22.8	电解质黏性系数/(Pa·s)	4×10 ⁻³
电解质温度/°C	949.9	铝液电导率/(S·m ⁻¹)	4.17×10 ⁶
铝液温度/°C	947.0	电解质电导率/(S·m ⁻¹)	2 200
极距/cm	5.0		

个较大的方向相反的漩涡(图3), 最大的流速区位于大侧面靠近烟道端, 界面形状如图4所示(z 方向相对水平方向放大20倍), 在达到稳定状态后, 铝液的最大波高为3.8 cm, 铝液最大流速为28.4 cm/s, 平均流速为11.5 cm/s。

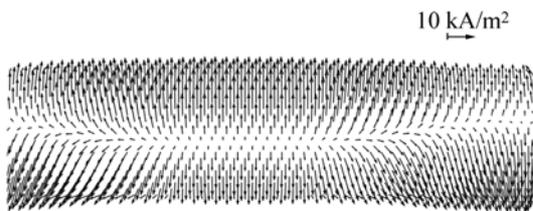


图2 铝液中中部水平电流密度分布

Fig.2 Horizontal J_s distribution in the middle aluminum pad

2.2 角部换极的仿真计算及分析

当角部阳极刚更换时, 由于在其外部形成一层较厚的凝结电解质, 可以认为新阳极基本不导电, 因此熔体内电流分布有较大的变化, 从而对熔体运动以及极距产生较大的影响。重新计算换极后的电磁场并导出电磁力场数据后计算流场, 下面给出上游进电侧角部阳极换极的模拟计算结果。图5所示为换极后铝液层中部断面的水平电流密度分布, 图6和图7所示分别为换极后的铝液中部流场与界面形状。图6中矩形方框表示更换的阳极位置, 两相界面由体积分数等于0.5的单元位置确定。显然, 换极后该新阳极下铝液层电流密度增大幅度较大, 电流分布的非均匀性导致电磁力场分布出现较大差异, 从而激发电解槽内磁流体的不稳定性, 换极处的铝液中呈现较大速度的涡旋, 形成较大的流场扰动源, 与图2所示的稳定状态下的流动有明显差异, 铝液层最大速度为33.1 cm/s, 比未

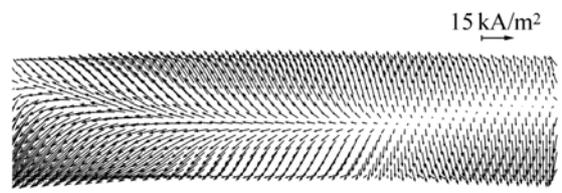


图5 换极后的水平电流密度分布

Fig.5 Horizontal J_s distribution in the metal pad after anode change

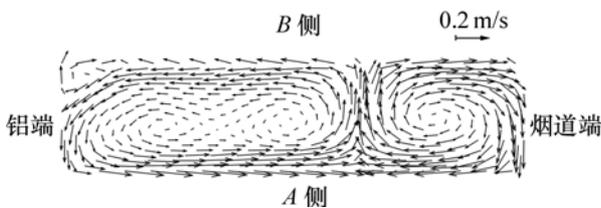


图3 铝液中中部水平流场

Fig.3 Horizontal flow field in the middle of aluminum pad

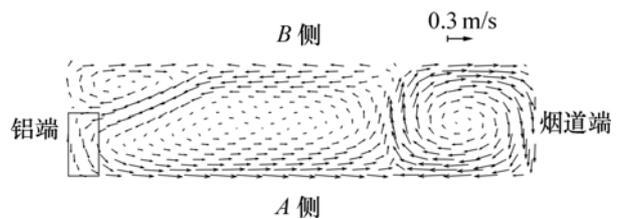


图6 换极后铝液中中部水平流场

Fig.6 Horizontal flow field in the middle metal pad after anode change

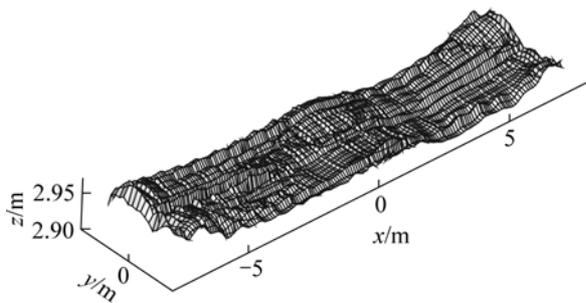


图4 铝电解槽中铝液-电解质界面形状

Fig.4 Interface of the metal-bath in aluminum electrolysis cell

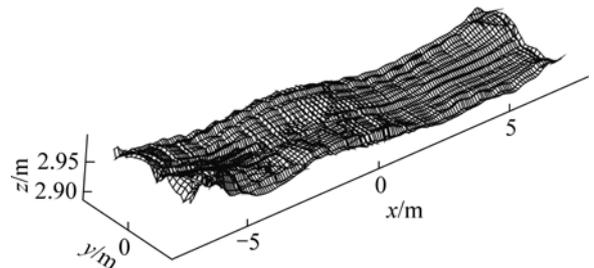


图7 换极后的铝液界面

Fig.7 Interface of the metal-bath after anode change

换极时明显增大; 铝液平均流速为 13.1 cm/s, 增加幅度较小, 与文献[13-14]中结果一致, 换极后界面最大波高为 4.6 cm, 换极处周边阳极下的极距明显减小, 对电解槽操作造成不利影响。考虑到新极导电的滞后性, 在实际操作中, 将新极安装位置比残极位置适当提高 1~2 d 的铝液消耗量有利于槽况稳定。

2.3 流场测试结果

流场测试采用的是铁棒溶蚀法^[15], 测试结果如图 8 所示, 流场水平方向构成左、右 2 个较大的涡旋, 与图 2 所示的计算值相比流场形态基本相符, 较大流速区域位于 A 侧靠近铝端, 测试所得的最大速度为 29.80 cm/s, 各点测试值与计算值大部分相吻合。

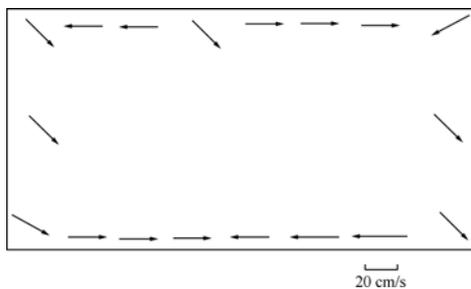


图 8 流场测试结果

Fig.8 Measurement of flow field

3 结论

a. 结合 ANSYS 和 CFX 商业软件, 采用两相流模型并耦合 VOF 算法计算不同工况下 300 kA 铝电解槽的三维磁流体湍流运动并精确追踪电解质铝液界面, 计算所得流动形态和速度与测试结果基本相符, 说明两相流模型的应用是有效可行的。

b. 换极后显著增大的水平电流与垂直磁场的相互作用导致磁流体流速加大, 并引起界面波动幅度加大、极距降低, 导致磁流体稳定性下降, 因此, 适度抬高新极安装高度有利于增强磁流体稳定性。

参考文献:

[1] Segatz M, Droste C. Analysis of magnetohydrodynamic instabilities in aluminum reduction cells[C]// Mannweiler U. Light Metals. Warrendale, Pennsylvania: TMS, 1994: 313-322.

[2] Segatz M, Volgelsang D, Droste C. Modelling of transient magneto hydrodynamic phenomena in Hall-Heroult cells[C]// Subodh K D. Light Metals. Warrendale, Pennsylvania: TMS, 1993: 361-368.

[3] Zikanov O, Thess A, Davidson P A, et al. New approach to numerical simulation of melt flows and interface instability in Hall-Heroult cells[J]. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2000,

31(6): 1541-1550.

- [4] Droste C. Phoenics application in the aluminum smelting industry[J]. The PHOENICS Journal, 2000, 13(1): 70-81.
- [5] Potocnik V. Modelling of metal-bath interface waves in Hall-Heroult cells using ESTER/PHOENICS[C]// Campbell P G. Light Metals. Warrendale, Pennsylvania: TMS, 1989: 227-235.
- [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): 246-249.
- WU Jian-kang, HUANG Ming, HUANG Jun, et al. Computation of flow field of electrolyte aluminium liquid and surface distortion of aluminum liquid in reduction cell[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(1): 246-249.
- [7] 黄俊, 吴建康, 姚世焕. 铝电解槽磁流体流动的数值计算[J]. 有色冶炼, 2002, 12(6): 81-83.
- HUANG Jun, WU Jiang-kang, YAO Shi-huan. Numerical computation of the fluid flow in the aluminum reduction cell[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metallurgy, 2002, 12(6): 81-83.
- [8] 黄兆林, 杨志峰, 吴江航. 铝电解槽内湍流流动与界面波动的数值模拟[J]. 计算物理, 1994, 11(2): 179-184.
- HUANG Zhao-ling, YANG Zhi-feng, WU Jiang-hang. Numerical simulation of turbulent flow and melt topography in aluminum reduction cells[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1994, 11(2): 179-184.
- [9] 李贺松, 梅焱, 廖爱华, 等. 铝电解槽焦粒焙烧过程中热应力场数值模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(5): 778-782.
- LI He-song, MEI Chi, LIAO Ai-hua, et al. Numerical simulation of thermal stress field of aluminum reduction cell during coke preheating[J]. Journal of Central South University: Natural and Science, 2004, 35(5): 778-782.
- [10] 郭烈锦. 两相与多相流动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- GUO Lie-jin. Two phase and multi phase fluid dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [11] Dagoberto S S, André F S. Modelling of magnetohydrodynamics of aluminum electrolysis cells with ANSYS and CFX[C]// Kvannd H. Light Metals. San Francisco, California: TMS, 2005: 475-480.
- [12] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary[J]. Computational Physics, 1981, 39: 201-225.
- [13] 戚喜全, 冯乃祥, 崔建忠. 阳极更换及铝液高度对电解槽内铝液流速场的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(3): 485-489.
- QI Xi-quan, FENG Nai-xiang, CUI Jian-zhong. Effect of anode change and metal height on flow field of metal pad in aluminum reduction cells[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(3): 485-489.
- [14] Tarapore E D. The effect of some operating variables on flow in aluminum reduction cells[C]// Campbell P G. Light Metals. Warrendale, Pennsylvania: TMS, 1983: 341-355.
- [15] Potocnik V, Laroche F. Comparison of measured and calculated metal pad velocities for different prebake cell designs[C]// Rooy E L. Light Metals. New orleans, LA: TMS, 2001: 419-425.