

80 kA 上插棒式自焙铝电解槽熔体中 电磁力场的计算与分析^①

刘业翔 梅 焜 曾水平

(中南工业大学有色冶金系, 长沙 410083)

摘 要 介绍了铝电解槽中电场、磁场和电磁力场的计算模型及计算程序, 结合我国自焙阳极铝电解工业实践, 分析了铝液中各点的电磁力, 并用计算机绘制了电解槽中电流分布、磁场和电磁力场图, 为工业铝电解槽的设计和炉膛内形的优化提供了参考。

关键词 铝电解 电磁力 数学模型 计算机模拟

从六十年代开始, 国外围绕大型铝电解槽的热、电、磁、流场做了大量的工作, 但很少有关于计算方法和数学物理模型的详细报导。从最近的报导结果^[1-3]来看, 国外在热电磁流的综合研究方面, 取得了一些进展, 但计算结果不尽人意^[4, 5]。国内从八十年代开始进行这一领域的研究^[6, 7], 本文采用有限差分法的基本原理并与电磁学中的基本定律相结合, 导出了槽中电流分布和磁场的计算模型, 在电流分布和磁场计算的基础上进一步计算了电磁力场, 并用计算机绘出了电流分布、磁感应强度、电磁力场图。

1 电流分布的计算模型

电解槽的电流从阳极通过熔体流向阴极。由于槽子结构的对称性, 可以假设槽内电流流动对称于槽的长轴和短轴。

整个求解域离散成 n 个单元, 假设单元内电阻率、电势恒定。任取一内部单元用沿坐标方向的电流束等效熔体单元中电流, 与其有电流交换的单元共 6 个, 如图 1 所示。

由欧姆定律和基尔霍夫定律可以得到:

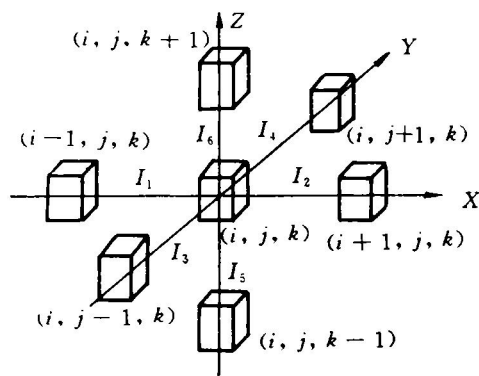


图 1 单元间电流交换示意图

$$I_1 = \rho_1(\varphi_i - \varphi_{i-1}) \quad (1)$$

$$I_2 = \rho_2(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \quad (2)$$

$$I_3 = \rho_3(\varphi_j - \varphi_{j-1}) \quad (3)$$

$$I_4 = \rho_4(\varphi_{j+1} - \varphi_j) \quad (4)$$

$$I_5 = \rho_5(\varphi_k - \varphi_{k-1}) \quad (5)$$

$$I_6 = \rho_6(\varphi_{k+1} - \varphi_k) \quad (6)$$

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 = 0 \quad (7)$$

式(1~7)中 $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ 分别为图 1 所示电流; $\varphi_i, \varphi_j, \varphi_k, \varphi_{i,j,k}$ 均为单元 (i, j, k) 的电位; $\varphi_{i-1}, \varphi_{i+1}, \varphi_{j-1}, \varphi_{j+1}, \varphi_{k-1}, \varphi_{k+1}$ 分别为图 1 对应单元的电位; $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6$ 分别为图 1 对应电流通道的

① 收稿日期: 1995-05-16; 修回日期: 1995-09-26 第 1 作者 刘业翔, 男, 66 岁, 教授, 博士生导师

电导。

对于任一内部单元有一组类似(1)~(7)方程,对于边界单元施加一定的边界条件也有对应的一组方程,对于 n 个单元有 $(n-1)$ 组独立方程,选择一个单元为参考点时,方程组可以唯一地确定电位分布和电流分布。上述模型最终是一个 n 维方程组的求解问题,可方便地编成计算程序,当采用系数矩阵的压缩存储和分步计算时,可计算当 n 值很大时的单元电势值及电流密度。

2 磁场的计算模型

电解槽中的磁场计算分两部分,一是槽内外电流产生的磁场,二是铁磁物质磁化后产生的磁场,第一部分采用 Biot-Savart 定律计算如

$$\mathbf{B}_{1p} = \mu_0 / 4\pi \int_v (\mathbf{J}_q \times \mathbf{r}^0 / r^3) dv \quad (8)$$

第二部分采用等效磁偶极子模型^[8]计算,先计算出每个磁偶极子的磁化强度,则铁磁元件产生的磁感应强度计算式为:

$$\mathbf{B}_{2p} = \mu_0 / 4\pi \sum_{i=1}^n S_i \mathbf{M}_i \times (\mathbf{r}_{1i} / r_{1i}^2 - \mathbf{r}_{2i} / r_{2i}^2) \quad (9)$$

槽内 p 点的总磁感应强度为

$$\mathbf{B}_p = \mathbf{B}_{1p} + \mathbf{B}_{2p} \quad (10)$$

上二式中 $\mathbf{B}_p$, $\mathbf{B}_{1p}$, $\mathbf{B}_{2p}$ 分别为槽内 p 点的总磁感应强度,电流产生的磁感应强度,铁磁元件产生的磁感应强度; $\mathbf{J}_q$ 为 q 点电流密度; v 为电流分布区域; $\mathbf{r}^0$ 为 p 点到 q 点的径向矢量; r 为 p 点到 q 点的距离; $\mathbf{r}_{1i}$, $\mathbf{r}_{2i}$ 分别为第 i 个磁偶极子正端和负端到 p 点的距离; $\mathbf{r}_{1i}$, $\mathbf{r}_{2i}$ 为对应径向矢量, S_i 为第 i 个磁偶极子的截面积; $\mathbf{M}_i$ 为第 i 个磁偶极子的磁化强度。

3 电磁力场的计算

根据安培定律可知,单位体积中的电磁力为电流密度和磁感应强度的矢量积

$$\mathbf{F} = \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad (11)$$

式(11)写成标量式为

$$\begin{cases} F_x = j_y \cdot B_z + j_z \cdot B_y \\ F_y = j_x \cdot B_z + j_z \cdot B_x \\ F_z = j_x \cdot B_y + j_y \cdot B_x \end{cases} \quad (12)$$

这样可以根据前面的计算结果很方便地计算出电解槽中各点受力情况。

4 程序设计

当电解槽结构参数确定,槽外电流及炉膛形状一定时,上述模型可以计算出槽内任一点的电流密度,磁感应强度及电磁力,计算软件程序框图见图 2。虽然某些电解槽母线配置及进电比是对称的,但计算时仍需考虑所有母线电流和铁磁物质,当考虑邻槽电流的影响时,槽内磁场求解域遍及整个炉膛区域。

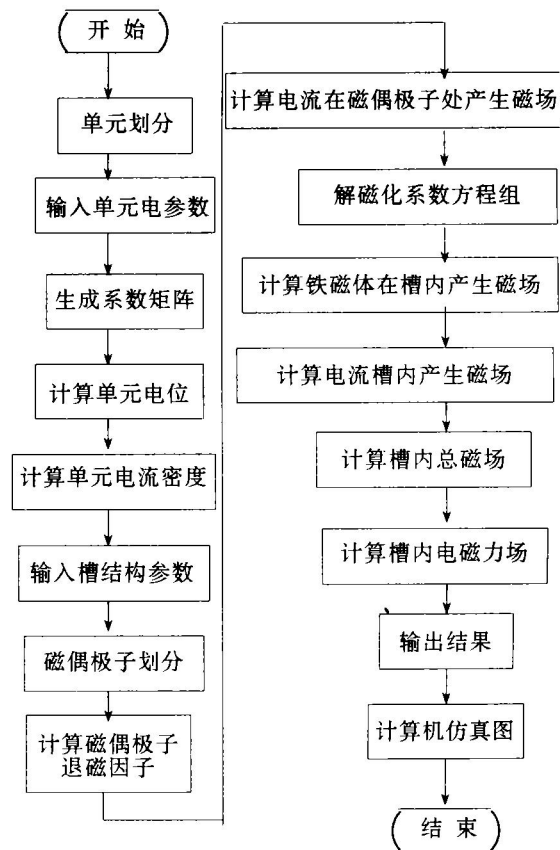


图 2 计算程序框图

5 计算结果及分析

在所有的计算机绘制的仿真图中, x 轴和 y 轴未标明单位长度。这里采用完全等同的坐标, 矩型框表示槽膛, 在 x 方向单元中心距为 14 cm、在 y 方向为 46 cm。铝液镜面取为 $z = 0$, 采用左手坐标系。

应用前面的计算模型对我国 80 kA 上插棒式自焙阳极铝电解槽的电流分布和磁场以及电磁力进行了计算。

5.1 电流分布计算结果

电解槽内的电流分布主要受槽内物质的电参数及边界条件的影响。计算时分二种情况: 第一, 炉帮伸腿恰好至阳极底掌投影的边缘; 第二, 炉帮伸腿在 y 方向至阳极底掌投影内 45 cm, 在 x 方向为 14 cm。计算时假设:

(1) 炉帮电阻率大于 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, 槽膛侧部不漏电; (2) 95% 的电流通过阳极底掌并均匀进入电解质; (3) 铝液水平 30 cm, 极矩 4.5 cm, (4) 阳极底掌下部电解质由于阳极气泡存在, 电阻率为 $0.5 \Omega \cdot \text{cm}$, (5) 铝液表面的电

解质电阻率为 $0.35 \Omega \cdot \text{cm}$, 其他影响因素趋于理想化。

图 3 为计算机模拟出的第二种炉膛形状的电密度线。从计算结果和图可以得出如下结论: 炉帮伸腿对电流分布有很大影响, 伸腿越严重, 铝液中水平电流密度越大。水平电流和垂直电流在伸腿处都较大, 在槽中心附近水平电流较小。结果还表明, 电解槽长轴和短轴的水平电流密度具同等的重要性。

5.2 磁感应强度计算结果

槽内磁场主要受槽结构参数影响, 而受熔体内电流分布的影响较小。这里只给出第一种炉膛时的计算结果, 计算时铁磁物质的影响仅考虑了本槽的槽壳和阳极框架, 外电流考虑了邻槽的影响。

图 4 为计算机模拟的磁力线, 图 4(b) 中单位长度矢量大小为图 4(a) 中一半。这些图可以说明: 槽内磁场没有严格对称关系, 中部磁场分布比边部好, 且绝对值也好, 槽长轴方向的磁场比较理想, 另外二个方向的磁场无论是均匀性还是大小都不理想。总而言之, 从磁场来说, 这种槽子的母线配置存在问题, 有进一

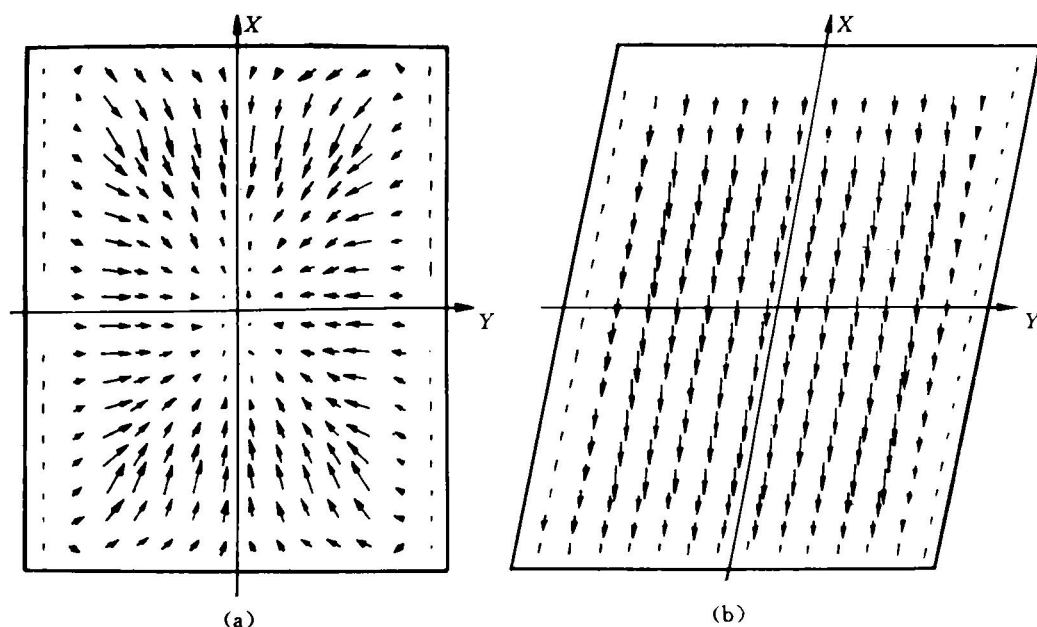


图 3 第二种情况电流分布示意图

(a)—水平电流; (b)—垂直电流

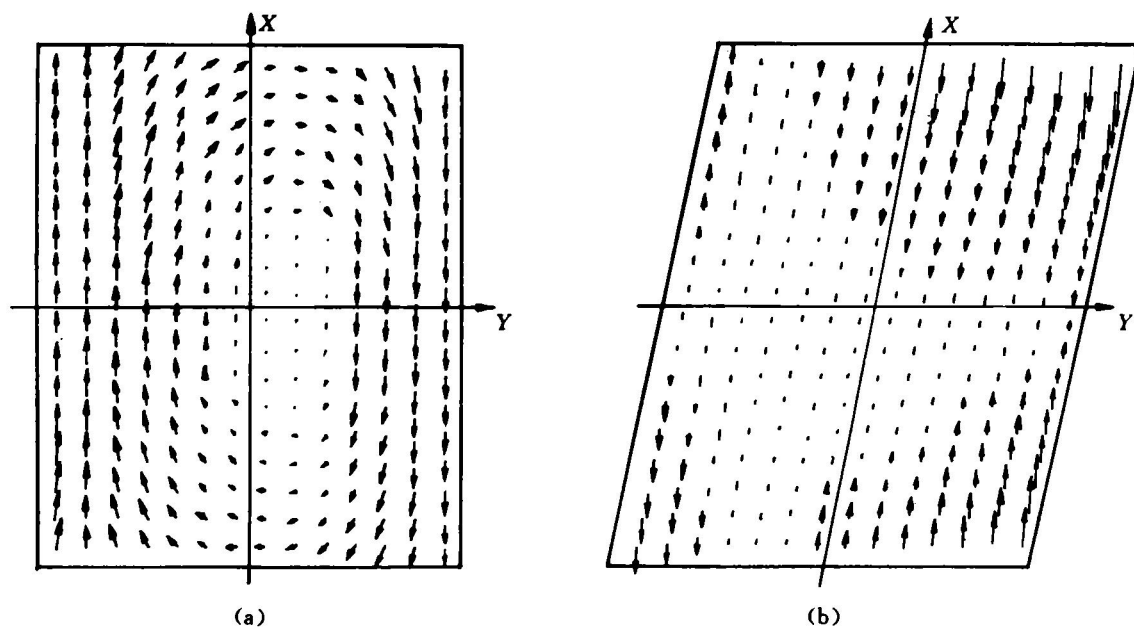


图4 槽内磁场仿真图

(a)—水平磁场; (b)—垂直磁场

步优化的必要。

5.3 电磁力场的计算结果

应用前面电流分布和磁场的计算结果, 计算了自焙上插槽现行母线配置下二种形状时铝液中电磁力场, 图5及图6为计算机模拟的电磁力场图。从这些图可以得出以下结论: 伸腿越严重, 铝液中水平电磁力和垂直电磁力越大; 在伸腿处铝液受的电磁力大于其它位置。伸腿越严重, 铝液中电磁力场越不均匀。图5未给出垂直力场图, 是因为此种情况下垂直力很小。

6 结语

上面的计算虽然只考虑了一些主要影响参数, 没有考虑动态的电磁感应, 但仍然可以给工业铝电解过程优化槽膛内形提供参考。我们的观点是: 在铝电解操作过程中应设法控制炉帮伸腿, 如能使伸腿恰至阳极底掌边缘为最

佳。由于熔体中电流密度及电磁力还很难测定, 我们的结果还有待于今后进一步的验证。

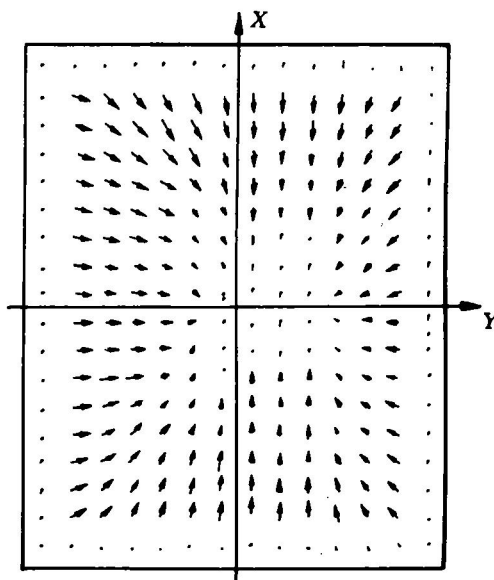


图5 第一种情况电磁力场示意图

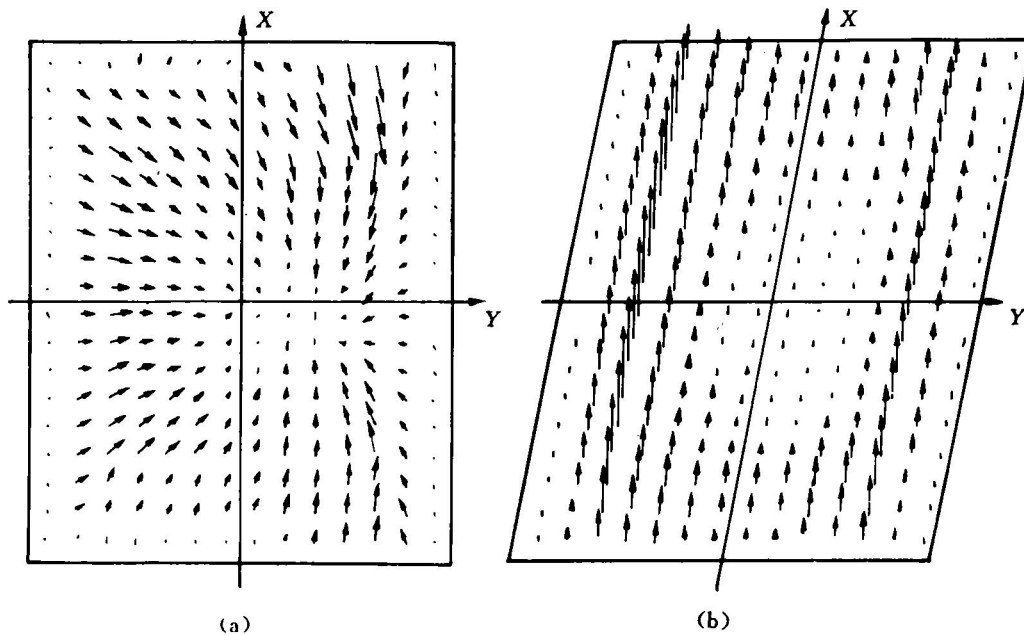


图6 第二种情况电磁力场示意图

(a)—水平力场; (b)—垂直力场

参考文献

- 1 Alton T T. *Light Metal*, 1993: 6—10.
- 2 Vogelsang D *et al.* *Light Metal*, 1994: 245—251.
- 3 Antille J *et al.* *Light Metal*, 1994: 305—312.
- 4 Donald P Z *et al.* *Light Metal*, 1991: 381—391.
- 5 Segatz M *et al.* *Light Metal*, 1994: 323—331.
- 6 梅 炽等. 中南矿冶学院学报, 1986, 17(6): 29—37.
- 7 李国华等. 有色金属, 1993, 45(4): 55—59.
- 8 曾水平等. 中国有色金属学报, 1995, 5(增刊1): 34—38.

COMPUTER SIMULATION OF ELECTRO-MAGNETIC FORCE FIELD ON THE MELT IN ALUMINA REDUCTION CELL

Liu Yexiang, Mei Chi, Zeng Shuiping

*Department of Non-ferrous Metallurgy,**Central South University of Technology, Changsha 410083*

ABSTRACT The mathematic model for calculation of electricity distribution, magnetic flux density and electromagnetic force field were constructed, and the computer program was given. The electromagnetic force field of 80 kA Söderberg cell with some kinds of cell ledge was calculated using the given program. The schematic illustration of the magnetic field and electromagnetic force field were drawn with computer. On the basis of the analysis of the force field, some suggestions on cell design and optimization of the cell ledge were given.

Key words aluminium electrolysis electromagnetic force mathematic model computer simulation

(编辑 吴家泉)