

文章编号: 1004-0609(2003)04-1021-05

用标量电位法与双标量磁位法计算铝电解槽三维磁场^①

姜昌伟, 梅 焱, 周乃君, 徐顺生
(中南大学 热工设备仿真与优化研究所, 长沙 410083)

摘 要: 以商业软件 ANSYS 为开发平台, 采取标量电位法和双标量磁位法相结合的方法开发了铝电解槽电场与磁场计算模块, 并应用到 154 kA 铝电解槽磁场计算。磁场计算结果表明: 水平磁场基本上形成一个顺时针的漩涡, 而垂直磁场呈现较好的反对称关系; $|B_x|_{\max}$ 、 $|B_y|_{\max}$ 和 $|B_z|_{\max}$ 的计算值与测试值误差分别为 0.7%、8.8% 和 6.7%; 各个测点的磁感应强度分量 B_x 、 B_y 和 B_z 计算值与测试值绝对平均误差分别为 14.8%、7.8% 和 14.9%。计算值与测试值比较接近, 表明该方法可以满足铝电解槽母线设计时的磁场仿真计算的要求。

关键词: 铝电解槽; 磁场; 标量电位法; 标量磁位法

中图分类号: TP 801.3

文献标识码: A

铝电解槽磁场分布的好坏对铝电解槽的生产操作和电流效率有着重要的影响^[1-3], 这使得对铝电解槽磁场的计算研究愈显重要。国内外铝冶金工作者对铝电解槽磁场的设计已作了大量的工作, 但是现有的电解槽磁场设计的计算方法仍不够完善, 还存在着一些不足。尤其是在计算铁磁材料对磁场的影响方面争议较多, 这使得计算结果与实际测量结果有较大的差距, 不能完全满足电解槽母线设计的要求。因此, 人们在一直不断地努力完善铝电解槽磁场的计算方法, 以便在铝电解槽磁场的设计中, 尽可能精确地计算出铝电解槽的磁场分布, 并通过优化母线配置, 使磁场的不良影响降低到最低。

铝电解槽的磁场构成可以分为 4 部分: 1) 母线电流产生的磁场; 2) 阴极碳块、阳极碳块及熔体中电流产生的磁场; 3) 铁磁材料被磁化后产生的磁场; 4) 阴极钢棒产生的磁场。铝电解槽的磁场由上述 4 部分磁场迭加而成。在铝电解槽磁场的计算中, 对 1)、2) 部分磁场, 一般用毕奥-萨伐定律的线积分和体积分进行计算^[4-7]; 对第 3) 部分磁场的计算, 人们运用了不同的计算方法, 比如磁化强度积分方程^[8]、磁偶极子法^[9, 10]、磁标量位法^[11]、表面磁荷法^[12]等, 但不同方法得到的结果有很大的差异; 对第 4) 部分磁场的计算, 即阴极钢棒产生的磁场的计算基本没有报道。因此, 本文作者对铝电解槽的磁场进行了系统的计算研究: 对母线、阴极碳块、熔体及阳极碳块电流的磁场采用毕奥-萨伐

定律计算, 对铁磁物质槽壳的磁场采用全标量磁位法进行计算, 对阴极钢棒产生的磁场采用简化标量磁位法和毕奥-萨伐定律相结合的方法进行计算。所得计算结果较为精确, 这为大型铝电解槽和新槽型的设计提供了一种新方法。

1 数学模型

1.1 电流场计算数学模型

对于导电区域阳极、熔体(电解质和铝液)、阴极、母线系统电流场采用标量电位法进行数值计算。由于铝电解槽的电流场属于静态电场, 场量与时间无关, 因此铝电解槽内导电系统部分导电微分方程如下所示:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\sum V = \sum I \cdot R \quad (2)$$

式中 V —标量电位, V; I —电流, A; R —电阻, Ω 。可见铝电解槽内导电系统电位分布满足拉普拉斯方程, 可用有限元法离散进行数值计算。

1.2 磁场计算数学模型

把铝电解槽磁场计算场域划分为 3 个部分: Ω_1 、 Ω_2 和 Ω_3 。其中 Ω_1 为铝电解槽槽壳钢板区, Ω_2 为不包括磁性材料的源电流区(母线系统、阳

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064900-3-2)

收稿日期: 2002-09-12; 修订日期: 2002-12-30

作者简介: 姜昌伟(1973-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 梅 焱, 教授; 电话: 0731-8876554; E-mail: cwjiang@163.com

极、电解质、铝液、阴极碳块), Ω_3 为有源电流的磁性材料阴极钢棒区。

显然, 在 Ω_1 中, 由于

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (3)$$

因此可以定义全标量磁位 φ :

$$\mathbf{H} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

在 Ω_2 中

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_s = \mathbf{J}_s \quad (6)$$

式中 $\mathbf{H}_s$ 为源电流区域产生的磁场强度, $\mathbf{J}_s$ 为源电流区域电流密度。式(6)中源电流区域产生的磁场强度可以由毕奥-萨伐定律直接积分计算:

$$\mathbf{H}_s = \frac{1}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J}_s \times \mathbf{r}}{r^3} dV \quad (7)$$

式中 $\mathbf{r}$ 为源点到场点的径向矢量; r 为场点到源点的距离。

而在 Ω_3 中

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s + \mathbf{H}_0 \quad (8)$$

式中 $\mathbf{H}_0$ 为阴极钢棒产生的磁场强度, $\mathbf{H}$ 为总磁场强度。由式(6)可有

$$\nabla \times \mathbf{H}_0 = 0 \quad (9)$$

由此可定义简化标量磁位 ϕ :

$$\mathbf{H}_0 = -\nabla \phi \quad (10)$$

代入式(8)得

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_s - \nabla \phi \quad (11)$$

因此

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J}_s \times \mathbf{r}}{r^3} dV - \nabla \phi \quad (12)$$

2 边界条件与网格划分

计算对象为 154 kA 侧部四点进电铝电解槽, 图 1 所示是铝电解槽的结构示意图, 图 2 所示是磁场计算区域网格划分图。

电流场计算边界条件: 4 个斜立柱母线电流分布取实测值; 阴极碳块上铝液表面取角部一点电位为 0, 作为电位基准点。磁场计算边界条件: 铝液下表面角部一点磁位为 0, 作为磁位基准点。由于阴极碳块内的阴极钢棒温度超过居里点温度, 因此可以认为是顺磁物质, 而槽壳外阴极钢棒与槽壳钢板为铁磁物质, 其 $B-H$ 曲线如图 3 所示。

计算时先用标量电位法计算出母线系统、阳极、阴极、熔体及阴极钢棒的电流密度分布, 然后应用毕奥萨伐定律、全标量磁位法和简化标量磁位法分别计算出各部分的磁感应强度, 最后综合各部

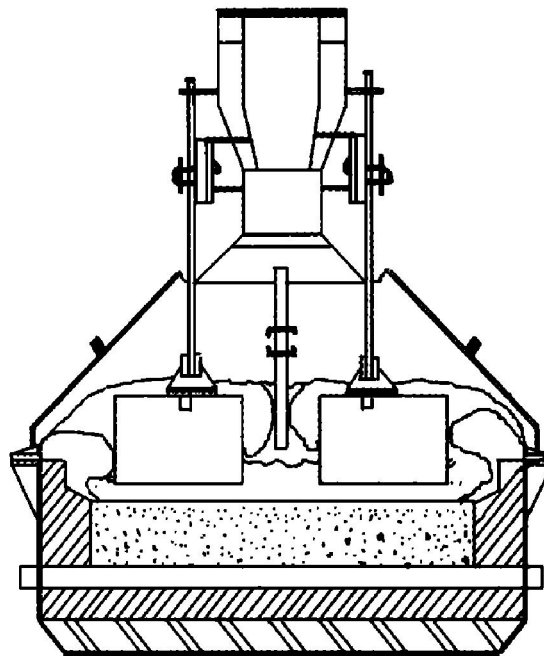


图 1 铝电解槽结构示意图

Fig. 1 Sketch of aluminum reduction cells

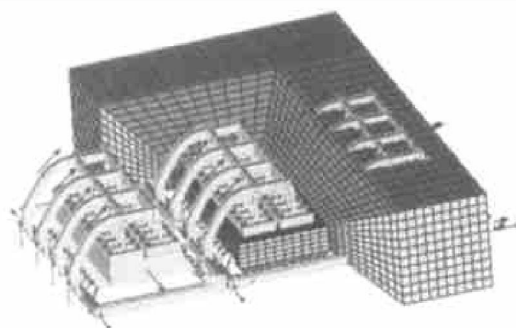


图 2 154 kA 预焙铝电解槽计算区域网格划分图

Fig. 2 Chart of gridding partition in 154 kA prebaked aluminum reduction cells

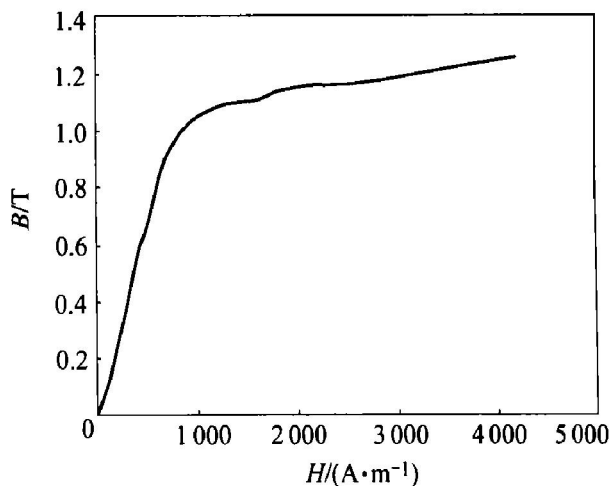


图 3 钢的 $B-H$ 曲线

Fig. 3 Curve of B vs H of steel

分的磁感应强度, 得出所计算区域任一点的磁感应强度。

3 计算结果与分析

计算时将坐标原点选定在槽壳的中部, 考虑了铁磁物质和相邻电解槽的影响, 并将计算结果绘制成三维图形。这里给出铝液高度为 10 cm 平面的磁场分布。

3.1 计算结果

图 4 所示是铝液层电流密度分布; 图 5 所示是 x 方向磁感应强度 B_x 的分布; 图 6 所示是 y 方向磁感应强度 B_y 的分布; 图 7 所示是 z 方向磁感应强度 B_z 的分布; 图 8 所示是三维磁感应强度矢量图。

3.2 计算结果分析

图 4 是铝液层电流密度分布。可见铝液电流密度呈 A、B 两侧对称分布, 4 个角部的电流密度最大, 达到 $22\,214\text{ A/m}^2$ 。另外, A、B 两侧阳极碳块处电流密度基本上与平均阳极电流密度相一致。

由图 5 可以看出, x 方向的磁感应强度沿短轴呈对称分布, 沿长轴呈反对称分布, 从 A 侧到 B 侧变化幅度较大, 极值出现在大面(A 面和 B 面)靠近槽壳处。

由图 6 可以看出, y 方向上的磁感应强度沿短轴呈反对称分布, 极值出现在电解槽四个角部。

由图 7 可以看出, z 方向的磁感应强度沿短轴呈反对称分布且沿长轴也呈反对称分布, 极值出现在电解槽的 4 个角部。

由图 8 的三维矢量图可以看出, 水平磁场基本上形成一个顺时针的漩涡, 两个大面的磁感应强度较大, 中间的磁感应强度较小; 垂直磁场基本上呈现较好的反对称关系, A 侧出铝端与 B 侧烟道端磁

感应强度方向指向上方, 而 A 侧烟道端与 B 侧出铝端磁感应强度方向指向下方, 磁场的变化梯度较小, 这有利于改善槽内铝液流动状态。

总的看来, 槽中心部分的磁场分布较为均匀, 且值较小, 在 4 个角部磁感应强度较大。

4 计算结果的验证

测量磁场采用美国 BELL 公司三维高斯计 MODEL9950, 并将计算结果与测量结果进行了比较, 见表 1。

根据表 1 中测量结果与计算结果的比较, 从铝液磁感应强度的最大值和绝对平均值来看, B_x 、 B_y 和 B_z 的最大计算值与测试值 非常接近, 其误差分别为 0.7%、8.8% 和 6.7%; 而对于 B_x 、 B_y 和 B_z 的绝对平均值, 计算值与测试值相差较大。由于测试过程中, 测点位置都是靠近槽壳处磁感应强度比较大的位置, 而对于磁感应强度比较小的槽中心, 由于操作困难没设测点, 因此, 铝液磁感应强度平均计算值小于其测试值。从每个测点的磁感应强度来看, 铝液 3 个磁感应强度分量计算值与测试值的方向相同。所测点磁感应强度分量 B_x 、 B_y 和 B_z 计算值与测试值绝对平均误差分别为 14.8%、7.8% 和 14.9%, 计算值与测试值比较接近。因此可以认为计算结果与测试结果基本吻合。

经分析, 产生误差的主要原因有: 测量点的定位并非十分精确; 测试期间电流与电压有波动; 槽膛内形的不规整对计算结果有影响; 铝液运动的影响。从计算结果反映的分布规律与变化趋势来看, 本计算结果是能较好地反映实际情况的。

以上分析表明, 铝电解槽磁场计算结果与测试

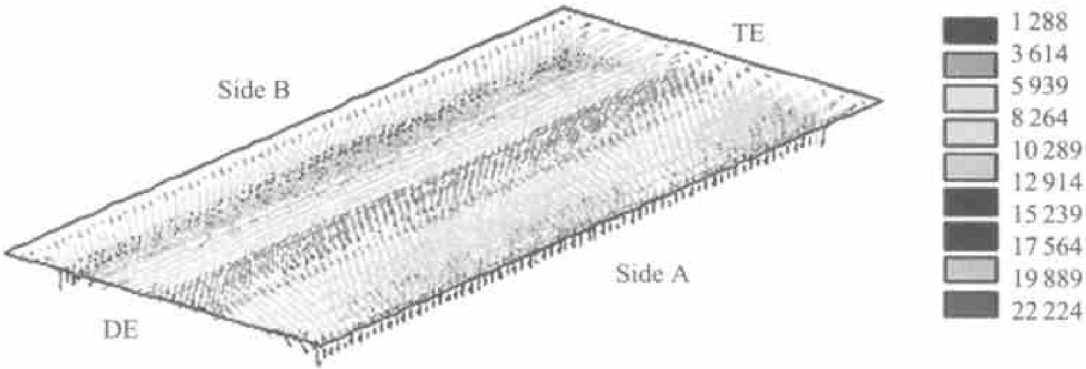


图 4 铝液电流密度分布图(A/m²)

Fig. 4 Distribution of current density in aluminium liquid(A/m²)

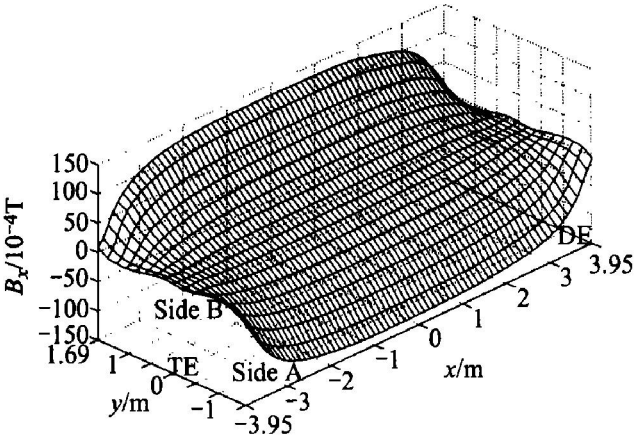


图 5 槽内磁感应强度 B_x 分布图

Fig. 5 Distribution of magnetic field B_x

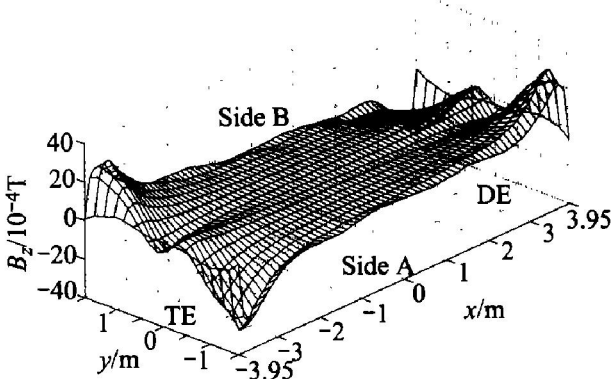


图 7 槽内磁感应强度 B_z 分布图

Fig. 7 Distribution of magnetic field B_z

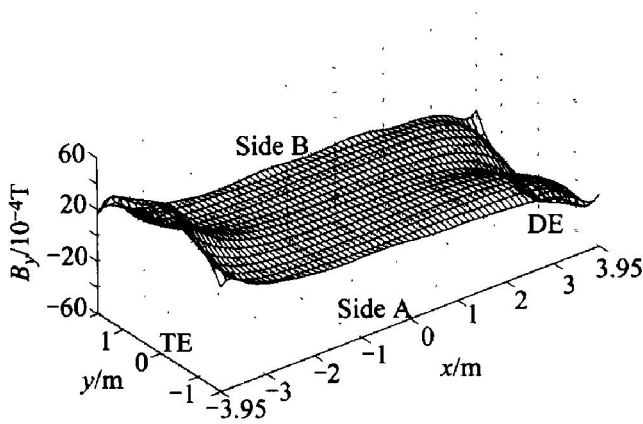


图 6 槽内磁感应强度 B_y 分布图

Fig. 6 Distribution of magnetic field B_y

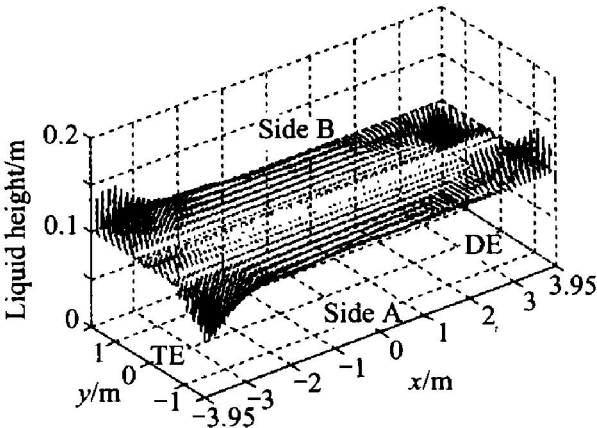


图 8 槽内三维磁场矢量图

Fig. 8 Vectorgraph of magnetic field

表 1 磁场测量与计算结果比较

Table 1 Comparison of measured and calculated magnetic fields

Point	Point coordinate/m			Measured result/ 10^{-4} T			Calculated result/ 10^{-4} T		
	x	y	z	B_x	B_y	B_z	B_x	B_y	B_z
1	-2.45	-1.69	0.946	-126.2	38.6	-7.1	-121.3	37.67	-6.82
2	-0.35	-1.69	0.946	-135.0	42.2	-5.8	-136.0	44.78	-3.14
3	1.75	-1.69	0.946	-130.1	-48.5	5.4	-127.9	-44.94	5.37
4	3.11	-1.69	0.946	-85.6	-25.5	6.0	-95.04	-18.44	4.48
5	-2.45	1.69	0.946	101.0	7.5	15.6	105.97	5.02	13.59
6	-0.35	1.69	0.946	88.6	17.5	21.7	111.06	14.23	22.52
7	1.75	1.69	0.946	106.7	-42.6	-39.2	107.6	-43.53	-36.45
8	3.11	1.69	0.946	115.5	-2.5	-27.2	94.25	-5.49	-25.72
9	-3.89	1.15	0.946	53.8	-7.4	-9.6	42.82	-6.34	-5.21
10	-3.89	0	0.946	18.6	15.5	-5.3	5.94	21.2	-3.42
11	-3.89	-1.15	0.946	-45.8	18.8	-5.4	-40.62	18.18	-7.01
12	3.89	1.15	0.946	54.7	-20.3	-9.3	43.22	-22.86	-6.73
13	3.89	0	0.946	-3.4	-18.1	13.3	-1.14	-19.06	13.36
14	3.89	-1.15	0.946	-54.3	9.1	3.1	-41.46	8.72	2.78
Magnetic field				Measured result/ 10^{-4} T			Calculated result/ 10^{-4} T		
$ B_x _{\max}$				135.0			136.0		
$ B_x _{\text{ave}}$				80.0			50.18		
$ B_y _{\max}$				48.5			53.2		
$ B_y _{\text{ave}}$				22.4			7.45		
$ B_z _{\max}$				39.2			36.74		
$ B_z _{\text{ave}}$				12.7			3.30		

$|B_x|_{\max}$, $|B_y|_{\max}$ and $|B_z|_{\max}$: maximal magnetic field in direction x , y and z ; $|B_x|_{\text{ave}}$, $|B_y|_{\text{ave}}$ and $|B_z|_{\text{ave}}$: average magnetic field in direction x , y and z .

结果吻合良好,因此可以用它来指导铝电解槽磁场设计。母线配置和进电方式对磁场有重要影响,本文作者计算的大面四点进电的母线配置具有较小的 B_y 和 B_z ,而作者通过计算154 kA端部两点进电铝电解槽磁场表明其具有较大的 B_y 和 B_z ,因此侧部4点进电铝电解槽具有较好的磁场分布。

REFERENCES

- [1] Evans J W, Zundelovich Y, Sharma D. A mathematical model for prediction of currents, magnetic fields, melt velocities, melt topography and current efficiency in Hall-Heroult cells [J]. Met Transaction, 1980(12B): 10 - 15.
- [2] 邱竹贤. 霍尔-埃鲁法在最近五十年内的重要进展[J]. 轻金属, 1995(11): 23 - 28.
QIU Zhuxian. Progress of Hall-Heroult method in the last 50 years[J]. Light Metals, 1995(11): 23 - 28.
- [3] 梅 炽, 周子民, 彭小奇. 有色冶金炉窑仿真与优化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. 131 - 144.
MEI Chi, ZHOU Jie-min, PENG Xiao-Qi. Simulation and Optimization of Metallurgical Furnaces for Non-ferrous Metals [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001. 131 - 144.
- [4] Ziegler D P, Kozarek R L. Hall-Heroult cell magnetic measurements and comparisons with calculation[J]. Light Metals, 1991: 381 - 391.
- [5] da Mota G E, de Andrade G J. Magnetic compensation project at ALBRAS smelter[J]. Light Metals, 2001: 413 - 417.
- [6] Sele T. Computer model for magnetic fields in electrolytic cells including the effect of steel ports [J]. Light Metal, 1991: 393 - 398.
- [7] Buiza J I. Electromagnetic optimization of the V-350 cell[J]. Light Metal, 1989: 211 - 214.
- [8] Chiampi M, Repetto M, Chechurin V. Magnetic modeling and magneto-hydrodynamic simulations of an aluminium production electrolytic cell [J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 1999, 18(3): 528 - 538.
- [9] Urata N. Magnetic and metal pad instability[J]. Light Metals, 1985: 581 - 591.
- [10] 曾水平, 蔡祺风, 梅 炽. 铝电解槽熔体中电磁力场的计算机仿真[J]. 北京科技大学学报, 1995(12): 65 - 70.
ZENG Shui-ping, CAI Qi-feng, MEI Chi. Computer simulation of the electric magnetic force field in alumina reduction cell [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1995(12): 65 - 70.
- [11] Segatz M, Vogelsang D. Effect of steel parts on magnetic fields in aluminum reduction cells[J]. Light Metals, 1981: 353 - 360.
- [12] SUN Yang, FENG Naixiang, LIANG Fanghui. Magnetic field measurement and calculation for 160 kA prebake cells in the Guizhou aluminum smelter[J]. Light Metals, 2001: 433 - 437.

Computation of 3 D magnetic field in prebaked cells using scalar voltage potential method and two scalar magnetic potentials method

JIANG Chang-wei, MEI Chi, ZHOU Naixun, XU Shu-sheng
(Institute on Simulation and Optimization of Pyro-installations,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: On the basis of commercial software ANSYS, the scalar voltage potential method and two scalar magnetic potentials method were used to establish a calculating module of magnetic field and electric field in aluminum reduction cells. The calculated results indicate that the horizontal magnetic field forms a clockwise swirl and the vertical magnetic field presents the relation of reversed symmetry in 154 kA prebaked anode aluminum reduction cells. By the comparison between calculated results and measured results, it is shown that the errors of $|B_x|_{\max}$, $|B_y|_{\max}$ and $|B_z|_{\max}$ are less than 10% and the average errors of B_x , B_y and B_z in every point are less than 15%. These indicate that the results calculated by applying the scalar voltage method and two scalar magnetic potentials method are comparatively precise and meet the need of designing aluminum reduction cells' bus-bar.

Key words: aluminum reduction cells; magnetic field; scalar voltage potential method; scalar magnetic potential method

(编辑 何学锋)