

铝电解槽热场和流场的测试分析和数值模拟

王 怡^{1,2}, 邓胜祥^{1,2}

(1. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院能源与动力工程系, 上海 201620;

2. 上海工程技术大学 新能源与节能新技术研究所, 上海 201620)

[摘要] 随着电流强度不断增大, 铝电解槽产生的热场和流场情况更为复杂, 基于 COMSOL Multiphysics 三维模拟软件, 建立热场切片模型和流场整槽模型, 对某厂家 400 kA 铝电解槽的热场和流场进行研究, 并通过现场测试数据对比测试结果和模拟结果, 验证了该模拟准确性以及该厂家设计合理性。在数值模拟基础上验证了铝电解槽侧部和底部增加纳米材料, 铝电解槽最高温度由 978 °C 升至 985 °C, 具有良好的保温效果; 并研究了 260 ~ 310 mm 铝液层高度的铝电解槽流场, 发现铝液层高度在 270 ~ 280 mm 范围内铝电解槽较稳定。

[关键词] 铝电解槽; 数值模拟; 热场测试; 流场测试; 热场分布; 流场分布

[中图分类号] TF821

[文献标志码] A

[文章编号] 1672-6103(2023)05-0112-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.05.013

如今铝电解槽工业的槽电流强度不断增加, 逐渐发展到 300 kA、400 kA、500 kA 等槽型^[1]。铝电解槽具有几何形状复杂、体积庞大等特点, 采用数值模拟的方法可以降低铝电解槽测试工作的难度, 提高测试效率, 同时可依据数值模拟结果提出铝电解槽优化方案, 为生产提供指导^[2-3]。

铝电解槽各个物理场互相作用、互相影响。铝电解槽内热场分布的情况是槽工况表现的重要特征, 合理的热场状态有利于槽膛内形稳定, 使炉帮形成状态良好, 不易发生破损; 同时, 热损失是衡量整个电解槽能量平衡及能量利用率的重要指标^[4]。铝电解槽内铝液和电解质运动是铝电解槽稳定性的一个很重要的因素^[5-9], 一个热场稳定的电解槽可以增加铝电解的产量和电流效率, 从而延长槽寿命^[10-12]。

前人对铝电解槽热场和流场等物理场进行了研

究, 周乃君等^[13]模拟 156 kA 铝电解槽并应用实测数据进行验证。肖忠良等^[14]探究 240 kA 铝电解槽改变电解槽工艺参数对槽内温度的影响; 刘妮^[15]基于 FLUENT 研究 320 kA 铝电解槽的流场仿真; 刘正华^[16]以 175 kA 铝电解槽为模型, 在铝电解槽电磁流耦合计算模型的基础上对熔体流场进行了稳态计算, 分析研究不同工况条件对铝电解槽熔体流动的影响; 刘冠祚等^[17]通过电磁流顺序耦合, 在 ANSYS 平台上数值模拟仿真 300 kA 铝电解槽, 得到其流场分布情况。目前对于 400 kA 及以上铝电解槽研究内容较少, 本文应用 COMSOL 软件分析研究 400 kA 铝电解槽物理场状态, 对某厂家的 400 kA 铝电解槽的表面及熔体温度等进行热场测试。采用铁棒溶蚀法^[18-22]对某厂家的 400 kA 铝电解槽进行铝液层流场测试, 并运用 COMSOL 三维仿真软件数值模拟热场切片模型和流场整槽模型, 探讨了铝电解槽的热场温度分布状况和铝液层运动流向的变化, 验证铝电解槽的设计结果, 进而为铝工业生产发展提供技术支持和理论依据。

1 铝电解槽数学模型

1.1 热场数学模型

1.1.1 控制方程

电解槽温度在短时间内是稳定的, 可认为是稳

[收稿日期] 2023-03-20

[第一作者] 王怡(1998—), 山西运城人, 硕士研究生, 主要研究方向为铝电解槽热场、流场。

[通信作者] 邓胜祥(1970—), 湖南涟源人, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源与节能新技术、可视化仿真与智能控制。

[基金项目] 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0605902); 上海市Ⅲ类高峰学科-材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造)。

[引用格式] 王怡, 邓胜祥. 铝电解槽热场和流场的测试分析和数值模拟[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(5): 112-120.

态,适用拉普拉斯方程,见式(1)。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{\text{vol}} = 0 \quad (1)$$

式中: λ_x 、 λ_y 、 λ_z 分别为 x 方向、 y 方向、 z 方向的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; q_{vol} 为单位体积的生热率, W/m^3 , 非导电部分为0; T 为温度, K 。

1.1.2 边界条件

1) 电解质和铝液层为等温区,其温度会根据外界扰动引起热平衡的变化来自行调节。电解质和铝液与槽帮和槽内衬的传递热量服从牛顿换热公式。

2) 切片模型除上部、侧面和底部外均为绝热面,切片模型绝热面之间不会发生热量的传递^[23]。

3) 槽周围环境温度为定值,取车间实测的环境温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

4) 槽体外表面对流热损失 Q_c 的计算公式见式(2)。

$$Q_c = a_c (t_1 - t_0) A \quad (2)$$

式中: a_c 为对流换热系数, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$; t_1 为槽外壁温度, $^\circ\text{C}$; t_0 为环境温度, $^\circ\text{C}$; A 为散热面积, m^2 。

5) 槽体外表面辐射热损失 Q_r 的计算公式见式(3)。

$$Q_r = \varepsilon \kappa \varphi [(t_1 + 273)^4 - (t_0 + 273)^4] A \quad (3)$$

式中: ε 为槽壳散热表面的黑度; κ 为史蒂芬-玻尔兹曼常数; φ 为辐射表面与相邻表面相互辐射角度系数; t_1 和 t_0 分别为辐射物体壁面温度和周围环境温度, $^\circ\text{C}$; A 为辐射物体的辐射表面积, m^2 。

查找资料得,铝电解槽表面粗糙氧化钢的槽壳,黑度可取0.8,覆盖料黑度可取0.4,铝导杆黑度取0.07。角度系数取1^[24]。

电解槽热场计算的边界条件需要进行壁面条件的设置,热对流传热方式设置为热通量模型,热辐射传热方式设置为表面对环境辐射模型,铝导杆顶部端头处设为均匀电流,通过电磁热进行多物理场耦合得到热场分布结果。

1.2 流场数学模型

1.2.2 流体动力学控制方程

铝电解槽中铝液和电解质的湍流多相流运动的雷诺时均 Navier-Stokes 方程组见式(4)~(5)。

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (r_a \rho_a) + \nabla \cdot (r_a \rho_a U_a) = 0 \quad (4)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (r_a \rho_a U_a) + \nabla \cdot (r_a (\rho_a U_a \times U_a)) = \\ - r_a \nabla P_a + \nabla \cdot (r_a \mu_{\text{aeff}} (\nabla U_a + (\nabla U_a)^T)) + S_{Ma} + M_a \end{aligned} \quad (5)$$

式中: r_a 为 a 相的体积分,%; ρ_a 为 a 相的密度, kg/m^3 ; U_a 为 a 相的流速, m/s ; P_a 为 a 相的压力, Pa ; μ_{aeff} 为流体的有效黏度, m^2/s ; S_{Ma} 为作用于 a 相的外部体积力, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$; M_a 为其他流动相对 a 相的内部表面作用力, $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ 。

铝电解槽内铝液流动为不可压缩湍流流动,当特征尺寸为铝电解槽一半时,雷诺数的量级为 10^5 ,本文数值模拟铝电解槽流场模型使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型确定,见式(6)。

$$\mu_{aT} = C_\mu \rho_a \left(\frac{\kappa_a^2}{\varepsilon_a} \right) \quad (6)$$

式中: μ_{aT} 为湍流黏度, m^2/s ; κ_a 为 a 相的湍动能; ε_a 为 a 相的湍动能耗散速率。

1.2.1 电磁场控制方程

电磁场计算得到的电磁力,是铝电解槽熔体内的电流流经磁场而产生的洛伦磁力,为电场和磁场的耦合结果。根据电流守恒定律和欧姆定律对电场模块电位和电流进行计算,见式(7)~(8)。

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (7)$$

$$-\sigma_i \nabla \phi = J \quad (8)$$

式中: J 为电流密度; ϕ 为标量电位; σ_i 为电导率。

铝电解槽内的磁场问题满足稳态麦克斯韦方程组,见式(9)~(10)。

$$\nabla \times H = J \quad (9)$$

$$B = \mu H \quad (10)$$

式中: ∇ 为哈密顿算符; H 为磁场强度; J 为电流密度; B 为磁感应强度; μ 为磁导率。

1.2.3 边界条件

分析铝电解槽内物质运动方式,无法设置铝电解槽的进、出口边界,只能固定壁面与自由表面边界。根据黏性流动分析,确定边界条件如下:固定壁面处采用无滑移边界条件,即垂直于壁面的速度 u_n 和切向速度 u_τ 都为0,即式(11)。

$$(u_n)_w = (u_\tau)_w = 0 \quad (11)$$

并且由于固定壁面上无法湍动,故 $k_w = 0$,并得式(12)。

$$\left(\frac{\partial k}{\partial x_n}\right)_w = 0 \quad (12)$$

式中： x_n 表示垂直于固定壁面的方向。

铝电解槽流场分布在多物理场耦合中需要设置 2 个多物理场耦合，在 COMSOL 中通过静态电流密度分量关系来耦合电流与磁场，通过洛伦兹力关系来耦合磁场和流场。

2 铝电解槽数值模拟

2.1 热场

2.1.1 切片模型

铝电解槽结构复杂，尺寸较大，根据铝电解槽热传递的特点，将 400 kA 铝电解槽进行模型简化，得到阳极、阴极左右对称的切片模型，其物理模型如图 1 所示。

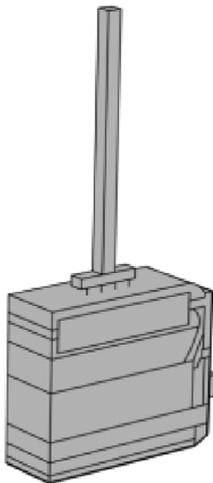
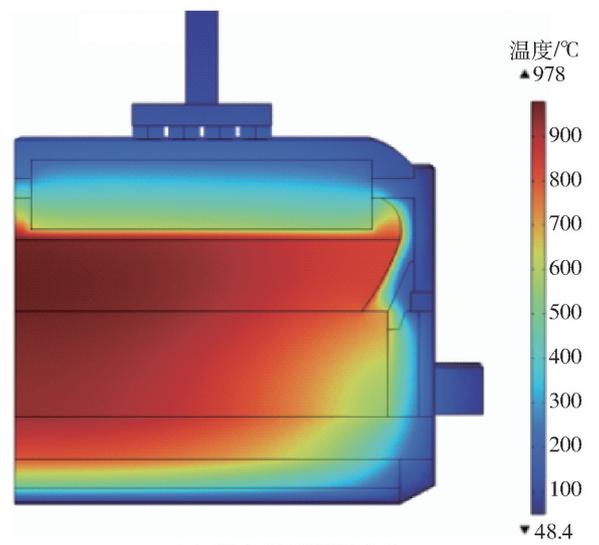


图 1 400 kA 铝电解槽热场模拟模型

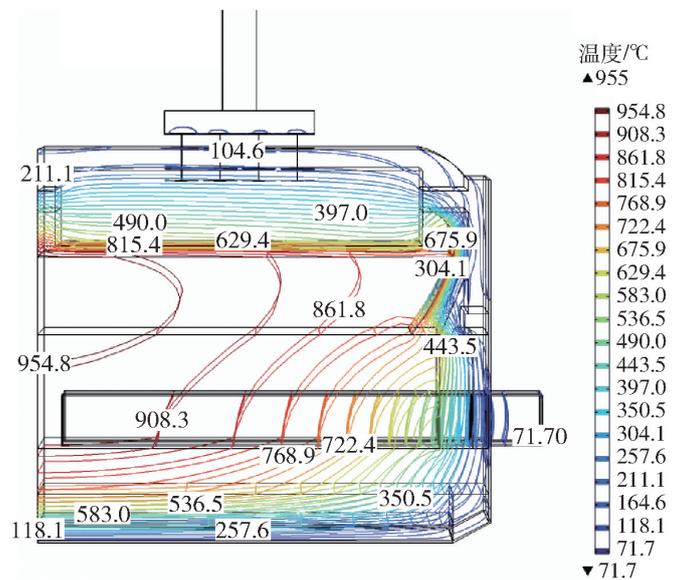
Fig.1 Thermal field simulation model of 400 kA aluminum reduction cell

2.1.2 模拟结果

通过热电耦合，得到 400 kA 铝电解热场切片模拟结果，如图 2 所示。图 2(a) 为该厂家 400 kA 铝电解槽温度分布图，符合铝电解槽运行规律，其中最高温度为 978 °C，电解质温度最高为 970.94 °C。由于在铝电解槽的槽上部、侧部及底部设有热交换，导致边部温度低于中部温度。同时观察得到保温层内温度梯度较大，可以保证良好的保温效果，且保温砖温度在 500 °C 以下，可以保证其不易被破坏。图 2(b) 为该厂家 400 kA 铝电解槽等温线分布图，从内衬结构温度分布的角度来看，其等温线分布合理，基本沿内衬结构分布，侧部较陡峭，底部较平滑，表明该电解槽炉帮形成状态较好，该电解槽内衬设计较为合理。



(a) 铝电解槽温度分布



(b) 等温线分布

图 2 400 kA 铝电解热场切片模拟结果

Fig.2 Simulation results of thermal field slice of 400 kA aluminum electrolysis

2.2 流场

2.2.1 整槽模型

影响铝电解槽内熔体流动的因素众多，在不影响计算结果的前提下，对铝电解槽与模拟的无关结构进行简化，故在建模过程中对铝电解槽中的电解质层和铝液流动做出以下假设，所建物理模型如图 3 所示。

- 1) 将铝液和电解质的运动考虑为不可压缩黏性牛顿流体。
- 2) 忽略固体颗粒沉降和析出气体浮升作用的影响。
- 3) 忽略熔体内部存在的温度梯度、浓度梯度，将电解质和铝液视为恒温、均质的流体。
- 4) 忽略在生产过程中阳极炭块形状的变化，阳

极炭块底面视为平面。

5) 忽略熔体中间和底部可能存在的炭渣等固体颗粒物。

6) 铝液和电解质的界面视为理想状态, 铝液流动视为稳态不可压缩流体。由于密度不同, 铝液位于电解槽的下部, 2层熔体互不掺杂。

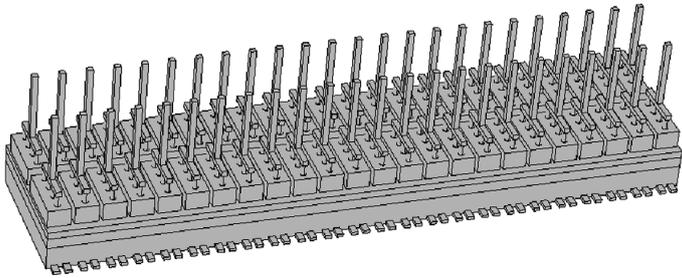


图3 400 kA 铝电解槽流场模拟模型

Fig.3 Flow field simulation model of 400 kA aluminum reduction cell

2.2.2 模拟结果

本文在电磁耦合的基础上, 通过 COMSOL 计算得到电解槽铝液层的流场。图4为该厂家400 kA铝电解铝液层流场模拟图, 其中图4(a)为铝液层数值模拟结果, 图4(b)为 x 分量方向下铝液速度图, 图4(c)为 y 分量方向下铝液速度图, 图4(d)为 z 分量方向下铝液速度图。图5为该铝电解槽流场数值模拟中电磁力分布图, 其中图5(a)为 x 分量方向下电磁力分布图, 图5(b)为 y 分量方向下电磁力分布图, 图5(c)为 z 分量方向下电磁力分布图。

图4(a)中数值模拟的铝液层流速平均值为 8.18 cm/s , 最大值为 16.5 cm/s , 整体铝液速度分布较均匀。出铝端和烟道端各存在2个较大漩涡和1个较小漩涡, 且中间的2个漩涡基本呈中心对称分布, 表明该铝电解槽运行较稳定。可以看出, 整个电解槽的流场分布大致呈现为4个漩涡形状, 从左到右依次为逆时针、逆时针、顺时针和逆时针方向, 而铝液层中大涡是由电磁力作用引起的, 表明此时电磁力在铝电解槽靠近两端的侧壁面处较大; 在电解槽角部还有2个大小不一的小漩涡; 最大流速出现在铝电解槽壁面处, 可达 14 cm/s 以上; 漩涡中心的流速反而较小。其中, 出铝端和烟道端速度约为 $8\sim 12\text{ cm/s}$; A面B面中间流速分布较均匀, 为 $5\sim 9\text{ cm/s}$ 。

从图4(b)可以看出, x 分量方向铝液速度靠近

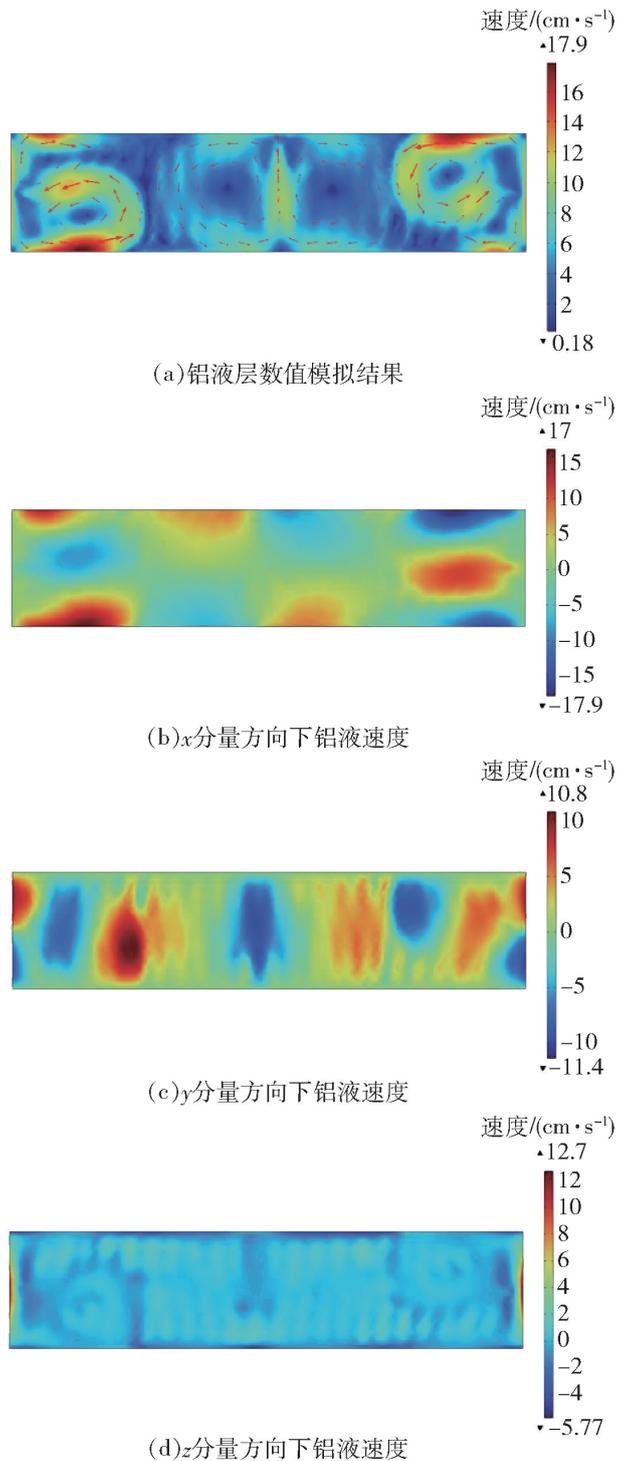


图4 400 kA 铝电解铝液层流场模拟

Fig.4 Flow field simulation diagram of 400 kA aluminum electrolytic aluminum liquid layer

壁面区域流速较大, 在出铝端和烟道端的靠近壁面处速度方向相反, 中心部分铝液流速较均匀。 x 分量方向电磁力在出铝端和烟道端偏大, 且电磁力方向相反, 如图5(a)所示, 造成该方向速度场波动。从图4(c)可以看出, y 分量方向铝液流动变化波动较大, 方向交替分布。 y 分量方向电磁力在铝电解槽靠近两侧壁面处偏大, 且电磁力方向相反, 如图5(b)所示, 造成该方向速度场波动。从图4(d)

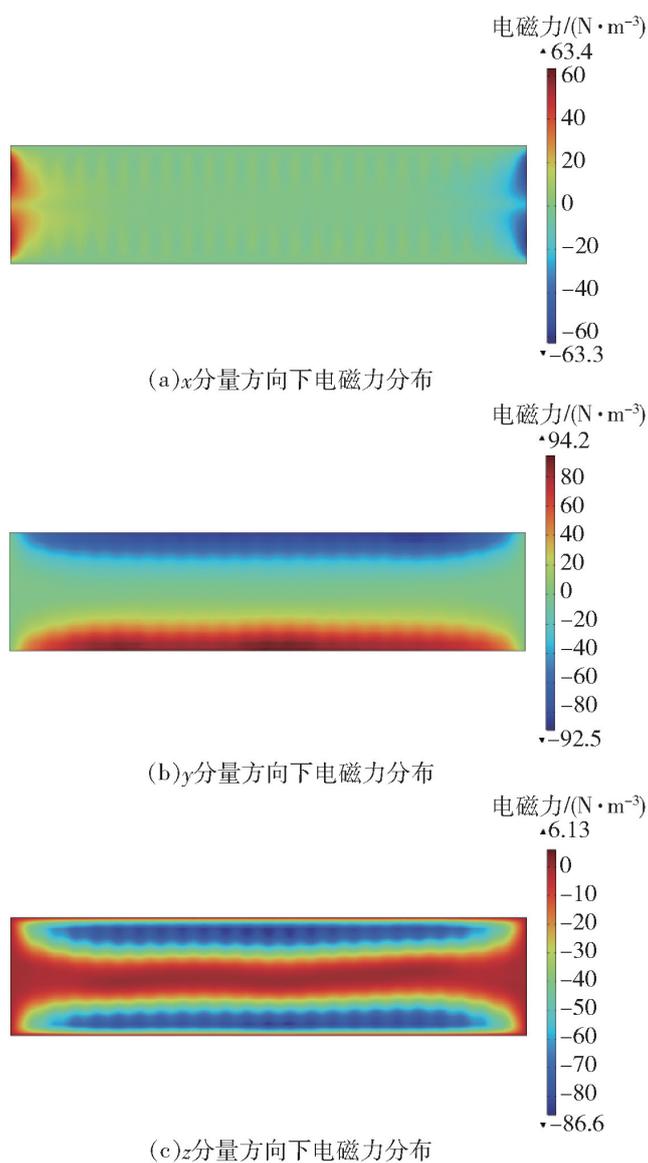


图5 各分量方向下电磁力分布图

Fig. 5 Distribution of electromagnetic force in each component direction

可以看出, z 分量方向铝液流速整体分布均匀, 除出铝端和烟道端小部分流速偏大, 其余区域流速分布在 $0 \sim 2 \text{ cm/s}$ 范围内。 z 分量方向电磁力在铝电解槽靠近两侧壁面处小部分值偏大, 整体图像中电磁力方向变化不大, 如图 5(c) 所示, 该方向对速度场影响较小, 可以认为 z 方向上铝液层流场分布均匀稳定。由图 4 和图 5 结果综合看出, 水平方向上磁场和垂直方向电流作用所产生的电磁力决定了铝液层的流动形态。

3 测试结果

为验证模拟的准确性, 对该厂家 400 kA 铝电解槽分别进行了热场测试和流场测试。

3.1 热场测试结果

对该厂家的一台试验槽进行了能量平衡测试, 计算结果与测试结果对比见表 1, 并在测试结果的基础上对该铝电解槽的散热损失进行了详细的分析, 见表 2。

表 1 计算结果与测试结果对比表

Table 1 Comparison between calculation results and test results

对比项	计算值/ $^{\circ}\text{C}$	测试值/ $^{\circ}\text{C}$	误差/ $\%$
熔体区最高温度	276	292	5.48
熔体区平均温度	242	256	5.47
阴极炭块区最高温度	162	150	8
阴极炭块区平均温度	131	124	5.65
保温层最高温度	128	123	4.06
保温层平均温度	95	98	3.06

从表 1 可以看出, 铝电解槽内热场分布中熔体区、阴极炭块区和保温区的最高温度与平均温度计算值与测试值的误差均不超过 10%, 表明此次该厂家的 400 kA 铝电解槽的模拟与测试结果较吻合, 证明模拟是有效的, 能真实反应铝电解槽热场情况。

散热损失可以衡量整个铝电解槽的能量平衡及能量利用率, 从表 2 看出, 该铝电解槽能量平衡测试与计算的误差为 1.28%, 在误差所允许的范围内。槽总散热损失折合电压为 2.122 V, 占电解槽能量总收入的 52.96%; 反应能耗折合电压为 1.834 V, 占电解槽能量总收入的 45.78%, 收入和支出占比差距较小, 表明该厂铝电解槽收支较为平衡。

利用该模型对铝电解槽的能量平衡进行优化分析, 在其侧部和底部增加厚度为 10 mm 的纳米材料, 得到的模拟结果如图 6 所示。可以看到保温效果明显提高, 最高温度为 $985 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 底部保温效果也明显提升。

3.2 流场测试结果

某厂 400 kA 铝电解槽的铝液流速值如表 3 所示, 铝液的流动图像如图 7 所示。

结合表 3 和图 7 的测点位置及结果可以看出, 铝液流速靠近烟道端和出铝端较大, 最大值出现在 B18、B19、B20、B21、B22、B23、B24 这一连续区域, 另外 B4、B3、B2、B1 这一区域流速也较大。全槽平均流速为 8.25 cm/s , 最大值为 17.37 cm/s , 全槽流速均匀。从图 7 可看出, 测试铝电解槽有 4 个漩涡, 每

表2 某厂家400 kA铝电解槽测试槽槽体系能量平衡表

Table 2 Energy balance of 400 kA aluminum electrolytic cell test cell system of a manufacturer

分类	参数项	散热量/(kJ·h ⁻¹)	折合功率/kW	折合电压/V	占比/%
能量收入	电能收入	5 686 413.8	1 579.559 4	4.007	100
	总收入	5 686 413.8	1 579.559 4	4.007	100
能量支出	铝电解反应能耗	2 603 113.2	723.09	1.834	45.78
	CO/CO ₂ 气体带走热	20 197.6	5.61	0.014	0.36
	产物铝液带走热	184 734	51.32	0.130	3.25
	残极带走热	7 518.4	2.09	0.005	0.13
	钢爪带走热	6 834.24	1.90	0.005	0.12
	换块散失的热	25 568.4562	7.10	0.018	0.45
	烟气带走的热	1 298 804.33	360.78	0.915	22.84
	槽体系散热	1 466 884.761	407.47	1.034	25.80
	槽壳侧部	767 151.642	213.10	0.541	13.49
	槽壳底部	241 534.75	67.09	0.170	4.25
	槽沿板	137 860.3265	38.29	0.097	2.42
	槽罩	90 216.28	25.06	0.064	1.59
	水平罩	127 763.356	35.49	0.090	2.25
	阴极棒	67 754.858	18.82	0.048	1.19
	铝导杆	34 603.548	9.61	0.024	0.61
	总支出	5 613 654.986	1559.35	3.956	98.72
能量收入与支出差额		72 758.814	20.21	0.051	1.28

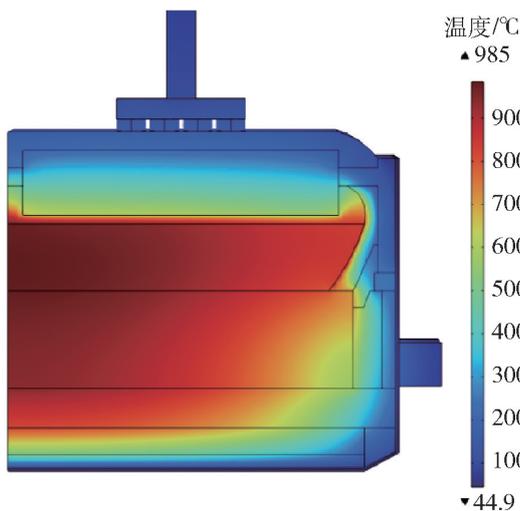


图6 增加10 mm厚纳米材料的铝电解槽温度分布
Fig.6 Temperature distribution of aluminum reduction cell with 10 mm thickness nano material added

构成的漩涡呈顺时针方向流动,漩涡并不是对称的,B面较宽,A面较窄。A22~A24和B22~B24构成的漩涡呈逆时针方向流动。

测试结果表明,铝液流速方向与模拟结果基本符合,测试得到的速度与模拟结果的速度基本一致。由于模型简化,电磁力场的计算以及在实际生产等影响因素存在一定误差,但是在可接受范围内,即铝液流场计算结果与测试结果基本吻合,模拟是有效的,能真实反应铝液层流场情况。

在上述模拟的基础上,进一步探究不同铝液层高度的铝电解槽对铝液层流速的影响。对铝电解槽进行重新建模,进行电磁力的计算,并将计算结果导入流场模块进行数值模拟,再将得到相应的流场模拟结果进行分析,得到铝液层高度变化与铝液层流速变化的关系,如图8所示。

从图8可以看出,随着铝液高度的变化,铝液平均流速逐渐增大,从6.108 5 cm/s增加到6.254 7 cm/s;铝液层高度在270~300 mm范围内变化较小,为该槽铝液层高度的合适范围。最大流

个漩涡大小不同。A1~A6和B1~B6构成的漩涡呈逆时针方向流动。A8~A15和B8~B15构成的漩涡呈逆时针方向流动。A17~A20和B17~B21

表3 某厂家400 kA铝电解槽测点流速表

Table 3 Flow rate of 400 kA aluminum electrolytic cell measuring point of a manufacturer $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$

测点编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
速度	7.78	7.58	7.91	1.20	3.60	9.49	11.10	5.92	8.61	7.96
测点编号	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#	19#	20#
速度	10.64	17.37	11.06	9.30	6.16	5.52	3.74	11.44	10.07	8.55

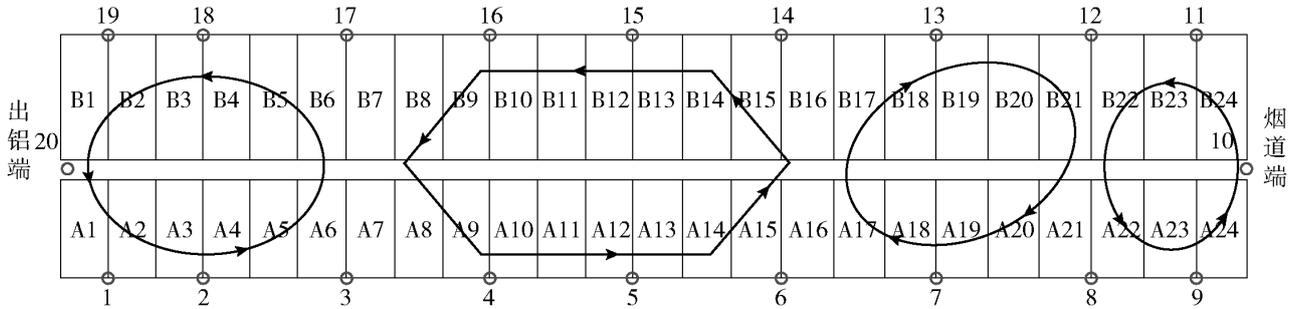


图7 某厂家400 kA铝电解铝液层流场测试图

Fig. 7 Flow field test diagram of 400 kA aluminum electrolytic aluminum liquid layer of a manufacturer

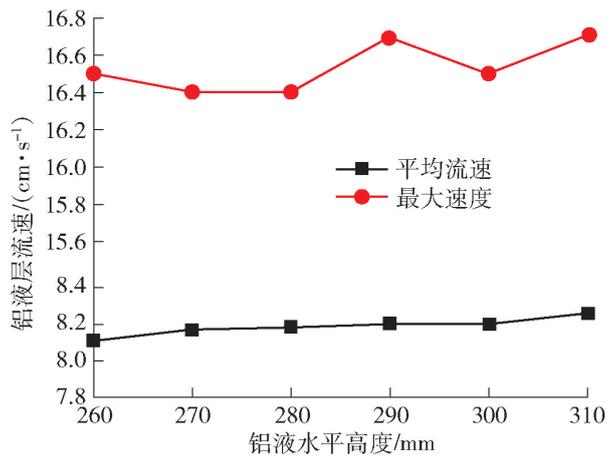


图8 铝液层高度变化时铝液层流速的变化

Fig. 8 Variation of flow velocity of aluminum liquid layer with the change of aluminum horizontal height

速总体呈现增大趋势,变化范围大于平均流速的变化范围,从 16.4 cm/s 增加到 16.7 cm/s ,表明铝液层高度变化对铝液层最大速度影响较大,铝电解槽的铝液层高度维持在 270 ~ 280 mm 范围内效果较好。

4 结论

1) 本文对某厂家 400 kA 铝电解槽在正常生产条件下的热场和流场进行了数值模拟,模拟结果展现出了 400 kA 铝电解热场槽切片温度分布图和整槽流场速度分布图。

2) 热场模拟结果显示,保温层内温度梯度较大,具有良好的保温效果;等温线分布合理,基本沿

内衬结构分布,表明该电解槽炉帮形成状态较好,内衬设计较为合理。流场模拟结果显示,铝液层内速度分布较均匀,有利于铝电解槽稳定运行。

3) 本次模拟验证铝电解槽侧部和底部增加厚度 10 mm 纳米材料,能够提高保温效果;得到铝液层高度维持在 270 ~ 280 mm 范围内效果较好,该结果为铝电解稳定生产提供了科学依据。

感谢上海市 III 类高峰学科—材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造)对本论文的支持。

[参考文献]

[1] K Grjotheim, M Krohn. Aluminium electrolysis[M]. Aluminium Verlag Marketing & Kommunikation, Germany, September, 2002.

[2] 白斌. 铝电解槽电热场仿真分析在实践生产中应用的研究[J]. 有色冶金节能, 2012, 28(2): 25-28.
BAI Bin. Research on application of numerical stimulation of thermo-electric field in aluminum reduction cell[J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2012, 28(2): 25-28.

[3] 闫淑君. 粉煤灰所产新型氧化铝电解过程中流场仿真研究[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(2): 39-43.
YAN Shujun. Simulation and analysis of flow field in electrolysis process of new alumina produced by fly ash[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2023, 39(2): 39-43.

[4] 张思源. 低电压下铝电解槽物理场仿真优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
ZHANG Siyuan. The research on the optimization of aluminum reduction cell physical fields' simulation under low voltage [D]. Changsha: Central South University, 2014.

- [5] 曾水平,王沙沙,王蓉娟. 300 kA 预焙阳极铝电解槽物理场的计算机仿真[J]. 系统仿真学报,2015,27(5):935-942.
ZENG Shuiping, WANG Shasha, WANG Rongjuan. Simulation of physical field of 300 kA prebaked aluminum reduction cell [J]. Journal of System Simulation,2015,27(5):935-942.
- [6] Yongsen Wei, Senkai Lu. 3D finite element method study on magnetic field in 300 kA aluminum reduction cells [C] // Proceedings of 2012 2nd International Conference on Mechanical, Industrial, and Manufacturing Engineering (Volume 1 · 2012), 2012:216-221.
- [7] Najun Zhou, Xiaoxia Xia, Fuqiang Wang. Numerical simulation on electrolyte flow field in 156 kA drained aluminum reduction cells [J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(1):42-46.
- [8] 孙阳,冯乃祥,崔建忠. 铝电解槽磁场的三维数值计算[J]. 计算物理,2002,19(4):325-328.
SUN Yang, FENG Naixiang, CUI Jianzhong. Three-dimensional numerical calculation of magnetic fields in aluminum reduction cells [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2002, 19(4):325-328.
- [9] 刘正华. 铝电解槽熔体流动和稳定性研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
LIU Zhenghua. Research on fluid flow and stability of melt in Aluminum reduction cells [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [10] 徐宇杰,李劫,尹诚刚,等. 铝电解槽电-热场强耦合建模计算方法[J]. 中国有色金属学报,2014(1):239-245.
XU Yujie, LI Jie, YIN Chenggang, et al. Method of strongly coupled modeling and computing for thermal-electrical field in aluminium reduction cells [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014(1):239-245.
- [11] 李劫,张翻辉,张红亮,等. 大型铝电解槽电解质流场涡结构的数值模拟[J]. 中国有色金属学报,2012(7):2082-2089.
LI Jie, ZHANG Hehui, ZHANG Hongliang, et al. Numerical simulation on vortical structures of electrolyte flow field in large aluminium reduction cells [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012(7):2082-2089.
- [12] 刘业翔,李劫. 现代铝电解[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
LIU Yexiang, LI Jie. Modern aluminum electrolysis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [13] 周乃君,崔大光,周正明,等. 铝电解槽电热场1/4槽模型有限元解析方法及应用[J]. 轻金属,2006(11):37-40.
ZHOU Naijun, CUI Daguang, ZHOU Zhengming, et al. Numerical simulation and application on thermal-electric field of a quarter of aluminum reduction cell [J]. Light Metals, 2006(11):37-40.
- [14] 肖忠良,刘丹,湛雪辉. 不同电解工艺条件对铝电解槽温度场分布影响的计算机模拟[J]. 矿冶工程,2009,29(2):66-69.
XIAO Zhongliang, LIU Dan, ZHAN Xuehui. The computer simulation of effect of different electrolysis conditions on temperature field of aluminum reduction cell [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(2):66-69.
- [15] 刘妮. 320 kA 铝电解槽电-磁一流场耦合仿真及性能评估方法[D]. 长沙:中南大学,2012.
LIU Ni. Simulation and performance evaluation method for electrical magnetic flow field coupling in a 320 kA aluminum electrolytic cell [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [16] 刘正华. 铝电解槽熔体流动和稳定性研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
LIU Zhenghua. Research on fluid flow and stability of melt in Aluminum reduction cells [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [17] 刘冠祚,李贺松,文超. 300 kA 铝电解槽电磁流场数值计算研究[J]. 金属材料与冶金工程,2018,46(1):49-54.
LIU Guanzuo, LI Hesong, WEN Chao. Simulation and study of electromagnetic flow field in 300 kA aluminum electrolytic cell [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2018, 46(1):49-54.
- [18] Pat A, Langille A, well M. Measurement of liquid metal flow velocities in electrolytic cells; test of the iron rod method [C] // Light Metals. Warrendale: AIME, 1986:541-550.
- [19] Potocnik V Laroche F. Comparison of measured and calculated metal pad velocities for different prebake cell designs [C] // Light Metals. New Orleans: TMS, 2001:419-425.
- [20] Doheim M A, EI-Kersh A M, Kobt N A, et. Modeling and measurements of meal pad velocity in 208 kA end to end prebaked cells [C] // Light Metals. New Orleans: TMS, 2008:419-424.
- [21] Joranson A R. Metal pad velocity measurements in aluminum reduction cells [C] // Light Metals. New York: AIME, 1978:45-58.
- [22] 邱竹贤. 预焙槽炼铝[M]. 北京:冶金工业出版社,2005:168.
Qiu Zhuxian. Pre baked cell aluminum smelting [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005:168.
- [23] 李尚玮,邓胜祥. 500 kA 铝电解槽热场数值模拟及测试分析[J]. 轻金属,2021(8):17-21.
LI Shangwei, DENG Shengxiang. Numerical simulation and test analysis of thermal field in 500 kA aluminum pot [J]. Light Metals, 2021(8):17-21.
- [24] 张红亮,李劫. 现代大型预焙铝电解槽仿真优化与实践[M]. 长沙:中南大学出版社,2019:196.
ZHANG Hongliang, LI Jie. Simulation optimization and practice of modern large pre baked aluminum electrolysis cells [M]. Changsha: Central South University Press, 2019:196.

Test analysis and numerical simulation of thermal field and flow field in aluminum reduction cell

WANG Yi^{1,2}, DENG Shengxiang^{1,2}

(1. Department of Energy and Power Engineering, School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Science, Shanghai 201620, China;

2. Institute of New Energy and New Energy Saving Technology, Shanghai University of Engineering and Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: With the increasing current intensity, the thermal field and flow field generated by the aluminum reduction cell are more complex. Based on the COMSOL Multiphysics 3D simulation software, the thermal field slice model and the flow field full cell model are established. The thermal field and flow field of a 400 kA aluminum reduction cell of a manufacturer are studied. The accuracy of the simulation and the rationality of the manufacturer's design are verified by comparing the test results and simulation results with the field test data. On the basis of numerical simulation, it is verified that nano materials are added to the side and bottom of the aluminum reduction cell, and the maximum temperature of the aluminum reduction cell is from 978 °C to 985 °C, which shows that the aluminum reduction cell has a good thermal insulation effect. The flow field of the aluminum reduction cell with a height of 260 ~ 310 mm aluminum liquid layer is studied, and it is found that the aluminum level is relatively stable within the range of 270 ~ 280 mm.

Key words: aluminum electrolytic cell; numerical simulation; thermal field test; flow field test; thermal field distribution; flow field distribution

中国恩菲设计的津巴布韦萨比星锂矿项目投产

8月31日,中国恩菲工程技术有限公司设计的津巴布韦马尼卡兰省萨比星锂矿项目举行投产仪式,标志着这座备受关注的锂矿山正式转入生产运营阶段。

该项目设计采选规模为年处理锂矿石100万吨,露天开采,采用三段两闭路+一段球磨+锂钽混合浮选+磁重选锂钽分离的工艺流程,获得锂精矿和钽铌精矿。2021年10月,中国恩菲开始参与该项目的可研及设计;2022年2月,该项目进入施工图设计阶段。该公司采用二维与三维相结合的设计方式,高效快速推进出图;2022年5月20日,该项目正式开工建设;2023年6月13日,该项目全线带料投产一次性成功,当天产出第一批商品级锂精矿。

该项目建成投产后取得了锂回收率达世界领先水平的优异成果,创造了津巴布韦百万吨级锂矿选厂建设时间、效率、生产指标的新纪录,充分展现了中国恩菲在采选领域的技术优势,丰富了在新能源产业领域的业绩,同时促进了中津之间的友好合作。

(资料来源:中国恩菲)