

文章编号: 1004- 0609(2000) 02- 0282- 05

阳极焙烧炉结构仿真与优化^①

李欣峰, 梅 焱, 殷志云

(中南工业大学 物理及热能工程系, 长沙 410083)

摘 要: 采用计算流体力学、计算传热学和计算燃烧学的原理和模型, 在 ALPHA250 工作站上编程计算, 得到了阳极焙烧炉燃烧室内的流场、温度场和浓度场, 并通过多次数学模拟提出了结构优化的方案, 使流场和温度场有了明显的改善, 并将焙烧温度提高了 13 K, 这将十分有利于提高阳极质量和提高产率。

关键词: 阳极焙烧; 计算机仿真; 结构优化

中图分类号: TF055

文献标识码: A

铝电解时有高达几十或者几百千安的电流通过阳极, 因此阳极电阻强烈影响电耗, 阳极上的电耗占整个铝电解的 10% 左右, 阳极质量的变化可使电阻变化 20% ~ 30% 左右^[1]; 另一方面, 阳极的冷热直接影响电解质的温度。因此, 进一步提高阳极质量是提高铝电解电流效率、降低电耗的重要手段之一。

影响阳极质量的因素有许多, 但是主要为焙烧温度的均匀性和稳定性, Thonstad 撰文指出, 阳极焙烧温度每提高 100 °C, 铝电解时的阳极消耗将减少 9%^[2]。阳极焙烧炉现场情况复杂, 难以全面观察和准确测量, 进行全面测试是不可能的, 因此进行数值仿真研究就显得十分重要。国外在 80 年代初开始研究阳极焙烧炉的数学模型和仿真^[3], 如今已经大规模地应用到阳极焙烧炉的现场模拟和结构改造之中^[4~7], 而我国在这个方面所进行的研究还刚刚起步^[8]。因此, 利用计算机技术提高我国阳极焙烧的质量, 并赶上国外先进水平就成为我们的当务之急。

1 研究对象及物理模型

本文研究对象为敞口阳极焙烧炉火道, 图 1 为某铝厂阳极车间焙烧炉一个焙烧炉室的单边燃烧室剖面示意图。该段火道尺寸长 × 宽 × 高为 3 360 mm × 440 mm × 4 000 mm, 三个隔板尺寸均为 110 mm × 440 mm × 2 400 mm。燃烧室顶部安装两个煤气喷嘴, 喷入的煤气量相同。

模型化条件如下:

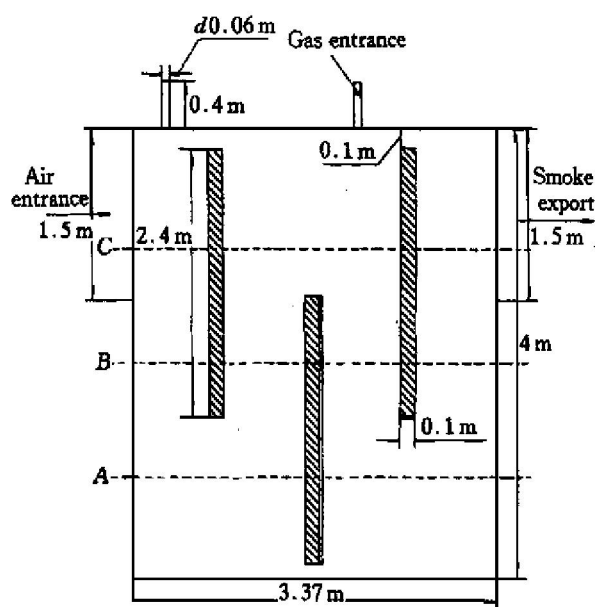


图 1 阳极焙烧炉燃烧室结构图

Fig. 1 Structure of anode baking furnace chamber

- 1) 各入口速度均匀;
- 2) 燃烧方式为即混即燃, 燃料和氧气不共存;
- 3) 壁面考虑为第三类边界条件;
- 4) 不考虑气体浮力;
- 5) 从焙烧室渗出的挥发份设为沿壁面均匀分布, 并及时完全燃烧。

2 数学模型

- 1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

式中 ρ , $\mathbf{U}$, t 分别为气体密度, 速度和时间。

2) 动量方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + \nabla \cdot [\mu_{\text{eff}} (\nabla \mathbf{U})^T] \quad (2)$$

其中校正压力:

$$p' = p + \left[\frac{2}{3} \mu - \xi \right] \nabla \cdot \mathbf{U} \quad (3)$$

式中 p 是静压力, ξ 是体积粘性系数。本文 ξ 取 $0^{[2]}$ 。

μ_{eff} 的定义式为

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_T \quad (4)$$

式中 μ 为层流粘性系数, μ_T 为湍流粘性系数, 在 k - ε 模型中取

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

而湍动能 k 和动能耗散率 ε 的传输方程分别为:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] = \rho P - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \varepsilon) - \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] = C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中

$$p = \mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U} \cdot [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{U} (\mu_{\text{eff}} \nabla \cdot \mathbf{U} + \rho k) \quad (8)$$

燃烧过程可以用单步不可逆反应来表征:

1 kg 燃料 + i kg 氧化剂 = $(1 + i)$ kg 产物

我们定义质量混合分数 f 为

$$f = \frac{x - x_0}{x_F - x_0} \quad (9)$$

$$x = m_F - \frac{m_0}{i} \quad (10)$$

式中 m_F 和 m_0 分别为燃料和氧化剂的质量组分分数, x_F 和 x_0 分别为 1 和 $-1/i$ 。

$$\left. \begin{aligned} m_F &= \frac{f - 1/(1+i)}{1 - 1/(1+i)}, \quad m_0 = 0, \\ m_P &= 1 - m_F \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

如果 $f < 1/(1+i)$, 那么混合物中只有氧化剂和燃烧产物。

$$\left. \begin{aligned} m_F &= 0, \quad m_0 = 1 - f(1+i), \\ m_P &= 1 - m_0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 m 为质量分数, 下标 F 代表燃料, O 代表氧气, P 代表燃烧产物。

平均混合组份 $\bar{f}$ 满足如下方程:

$$\frac{\partial \rho \bar{f}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \bar{f}) - \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu_T}{\sigma_T} + \frac{\mu}{\sigma_L} \right) \nabla \bar{f} \right] = 0 \quad (13)$$

为了书写方便将 $\bar{f}^{1/2}$ 记为 g , 则 g 满足如下方程:

$$\frac{\partial \rho g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} g) - \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu_T}{\sigma_T} + \frac{\mu}{\sigma_L} \right) \nabla g \right] = C_{g_1} \mu_T (\nabla F)^2 - C_{g_2} \rho \frac{\varepsilon}{k} g \quad (14)$$

式中 σ_L , σ_T 分别为层流普朗特数和湍流普朗特数。 C_{g_1} 和 C_{g_2} 为模型常数。

由以上方程我们就分别得到了 $\mathbf{U}$, k , ε , $\bar{f}$ 和 g 。

3) 能量方程

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \mathbf{U} H - \left(\frac{\lambda}{C_P} + \frac{\mu_T}{\sigma_H} \right) \nabla H \right] = \frac{\partial p}{\partial t} + Q_R \quad (15)$$

$$H = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (16)$$

式中 H 为焓, λ 为导热率, C_P 为定压比容, Q_R 为源项, h 为滞止焓, p 为压力, σ_H 为焓普朗特数。各个方程中的基本常数如表 1, 且有

$$\sigma_\varepsilon = \frac{k^2}{(C_1 - C_2) \sqrt{C_\mu}} \quad (17)$$

表 1 基本参数表

Table 1 Basic parameters

C_μ	σ_k	C_1	C_2	C_{g_1}	C_{g_2}	σ_H
0.09	1.0	1.44	1.92	2.0/0.9	2.0	0.9

3 边界及初始条件

1) 根据现场提供的条件, 煤气压力 2 500 Pa, 流量 $0.0661 \text{ m}^3/\text{s}$, 温度为 300 K, 热值为 $4.803 \times 10^6 \text{ J/m}^3$, 两个煤气入口气流量比为 1:1。

2) 空气流量为煤气流量 1.06 倍。空气流经上游燃烧室(此时处于冷却阶段)时被预热, 温度随时间变化如表 2(据实际测量经验值)。

表 2 不同时间入口空气温度

Table 2 Temperature at different times

Time/h	0	16	32
Temperature/K	1 433	1 318.4	1 212.9

3) 空气入口处 f 为 0, 煤气入口处 f 为 1。墙体的温度按第三类边界条件处理。入口处的 k 和 ε 的初值分别按 $k_{\text{ini}} = 0.002 \times U_{\text{ini}}^2$, $\varepsilon = k_{\text{ini}} / (0.3 \times D)$ 来处理, 其中 D 为当量直径。采用贴体网格,

在煤气入口和气固边界我们加密网格, 共有 10 888 个网格, 采用混合差分法离散控制方程。

4 计算结果及分析

本文将一个燃烧室作为一个整体解析空间进行解析。在 DEC-ALPHA250 工作站进行运算, 解出不同时刻的流场、温度场和浓度场。为了便于分析, 我们将阳极焙烧炉燃烧室沿高度方向剖出三个具有代表性的截面 A, B 和 C。三个截面离燃烧室底部的距离分别为 1, 2 和 3 m (如图 1 所示)。在时间上在整个火焰燃烧周期的运算结果中取 0, 16, 32 h 三个时间点分别列出计算结果。

图 2、图 3 和图 4 分别为 0, 16 和 32 h 时刻点火道中温度分布曲线。图 5 和图 6 为 0 时刻氧含量分布曲线和燃烧产物浓度分布曲线。因为氧含量分布曲线和燃烧产物浓度分布曲线以及流场随时间变

化不大, 所以 16 h 和 32 h 时刻点的氧含量分布曲线和燃烧产物浓度分布曲线以及流场不再单独列出。因为 32 h 时刻比较能够反映燃烧结束前的最终温度分布情况, 所以我们仅仅列出 32 h 时刻的结构改造后的温度场和流场, 图 7 为结构优化之后的 32 h 的温度曲线, 图 8 为燃烧室 0 时刻流场, 图 9 为结构优化后流场曲线。计算结果分析如下:

1) 仿真

a. 由图 2~ 4 分析可知, 离燃烧室顶部距离越近, 温度波动越大。原因是气流温度直接受煤气燃烧的影响, 在喷口区迅速上升, 并在出口处受到次高温区的影响温度迅速下降。因而造成上层温度分布不均。火道中的高温区在煤气喷口区附近, 第一喷口区的温度高于第二喷口区的温度, 主要原因是第一喷口区的氧气质量分数大于第二喷口区的氧气质量分数。

b. 由图 8 分析我们可以发现在燃烧室底部存在两个较大的回流区, 从图 2~ 4 可知相应的此两处

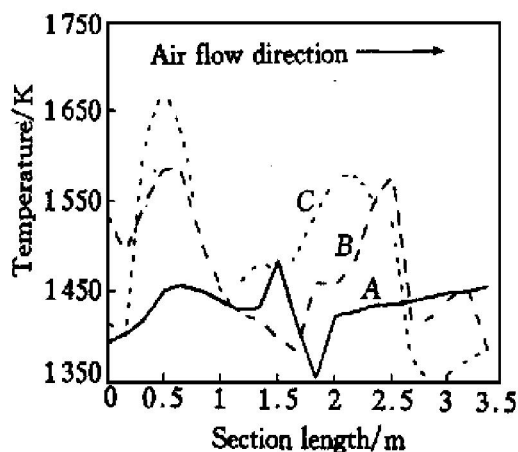


图 2 0 时刻温度曲线

Fig. 2 Temperature curves at 0 time
A, B, C —Sections in Fig. 1

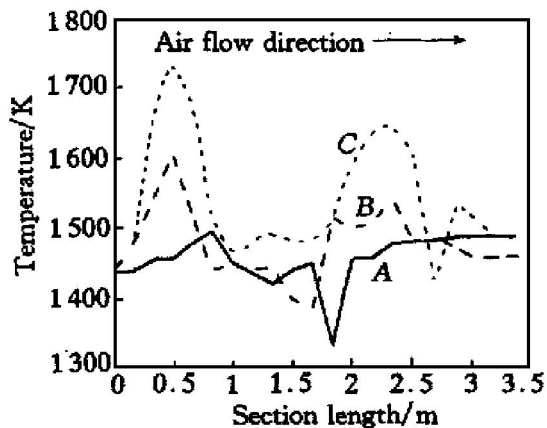


图 3 16 h 时刻温度曲线

Fig. 3 Temperature curves at 16 h
A, B, C —Sections in Fig. 1

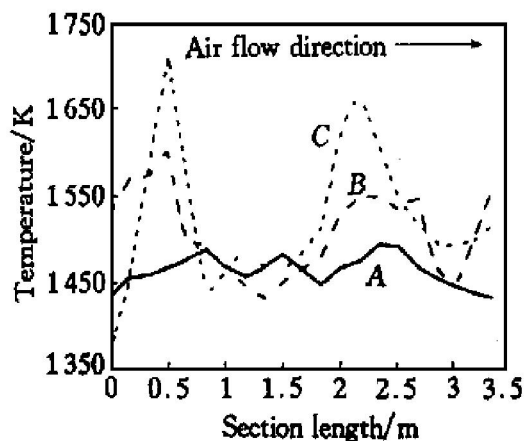


图 4 32 h 时刻温度曲线

Fig. 4 Temperature curves at 32 h
A, B, C —Sections in Fig. 1

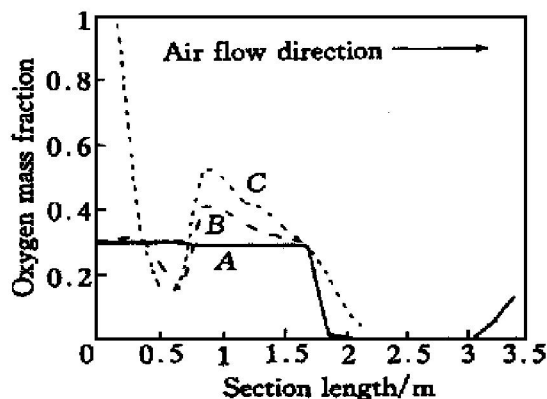


图 5 氧含量曲线

Fig. 5 Oxygen content at furnace
A, B, C —Sections in Fig. 1

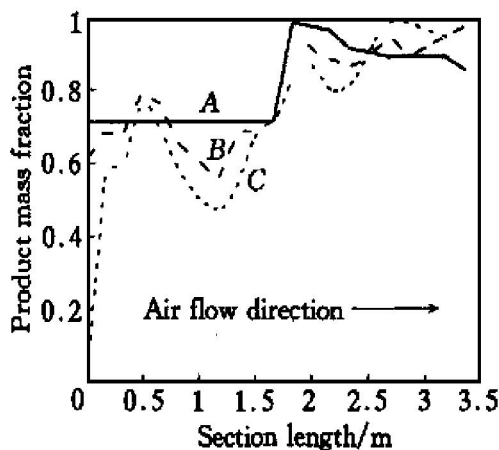


图 6 产物含量曲线

Fig. 6 Product content (mass fraction) in furnace
A, B, C —Sections in Fig. 1

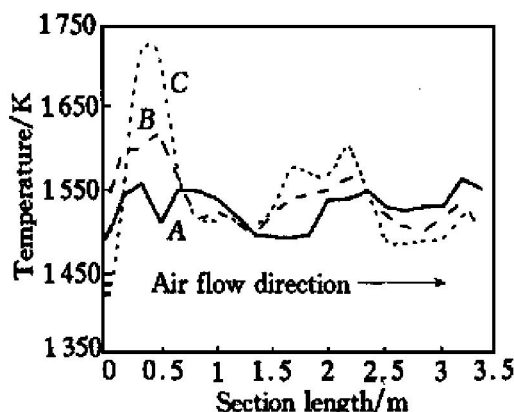


图 7 优化后 32 h 时刻温度曲线

Fig. 7 Temperature curves in 32 h
after optimization
A, B, C —Sections in Fig. 1

的温度有明显下降。

c. 由图 2~4 分析我们还可以发现: 随着时间的延长, 燃烧室内温度趋于平均, 从较能反映燃烧室真实状况的 A 和 B 截面来看, 其温差明显减小。A 截面从 0 时刻的 129 K 和 16 h 的 128 K, 降为 32 h 时刻点的 69 K; B 截面温差从 0 时刻的 213 K 和 16 h 的 213 K 降为 138 K。

d. 由图 5 和图 6 分析可知, 出口处的燃烧产物占 97% 以上, 空气占 2% 左右, 所以我们可以得出空气和煤气配比为 1: 1.06 时, 煤气能够完全燃烧又不致空气过量而带走过多热量的结论。

2) 优化

a. 从图 8 和图 9 中我们可以发现: 结构改造后流场明显得到改善, 表现为死区消失或死区变小, 流速均匀, 减少了对壁面的严重冲刷。

b. 从图 4 和图 5 中我们发现: 改变结构时, 不但 A 水平温度更加均匀, 而且 B 和 C 两截面除入

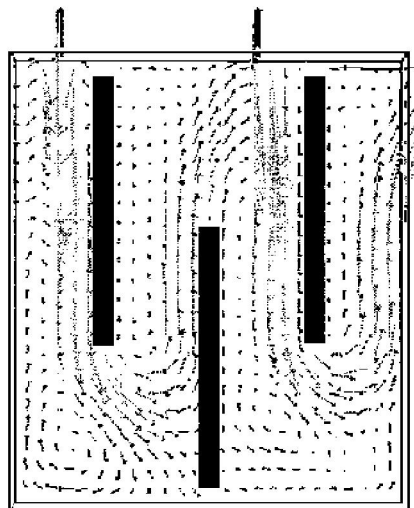


图 8 优化前流场曲线

Fig. 8 Fluid field before optimization

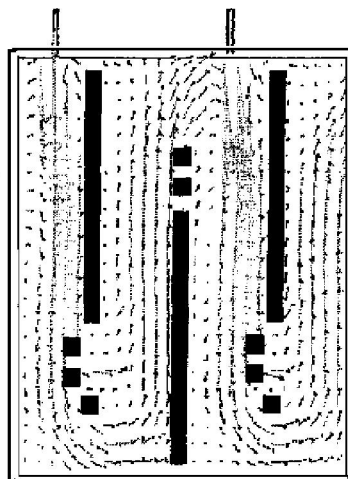


图 9 优化后流场曲线

Fig. 9 Fluid after optimization

口处温度较高, 其他地方温度也较为均匀, ΔT_{B1} 为 86 K, 比优化前温差减小 52 K, ΔT_{C1} 为 120 K 左右 (不包括入口部分), 比优化前温差减小 86 K, 达到了优化的目的。

c. 优化结构后, 整体焙烧温度提高 13 K, 从而可以使每吨铝电解电耗下降 1%。

5 结论

1) 本文系统研究了阳极焙烧炉内流场、准动态温度场和浓度场, 开辟了用计算机仿真研究焙烧炉的新思路。

2) 通过计算机仿真与优化, 我们使阳极焙烧炉内的温度更加均匀, 这十分有利于提高阳极的质量, 达到了进行计算机仿真与优化的目的。

3) 按照 Ttonstad 的观点, 这将显然可以提高

阳极质量, 大大降低电解能耗, 提高电解过程电流效率。

REFERENCES

- [1] Velitskus D L. Effect of petroleum coke calcination temperature [J]. *Light Metals*, 1992: 581.
- [2] KUANG Zhan-ling, et al. Effect of baking temperature and anode current density on anode carbon consumption [J]. *Light Metals*, 1994: 667.
- [3] Furman A. A mathematical model simulation at anode baking furnace [J]. *Light Metals*, 1980: 545.
- [4] Bui R T. Mathematical simulation of a horizontal flue ring furnace [J]. *Light Metals*, 1984: 1033.
- [5] Thibault M A. Simulation the dynamics of the anode baking ring furnace [J]. *Light Metals*, 1985: 1144.
- [6] Bourgeois T. Computer simulation of a vertical ring furnace [J]. *Light Metals*, 1990: 307.
- [7] Ouellet R. Anode baking furnace modelling for process optimization [J]. *Light Metals*, 1995: 653.
- [8] LI Xin-feng(李欣峰). 阳极焙烧炉燃烧室动态仿真 [J]. *Journal of Central South University of Technology* (中南工业大学学报), 1998, 29(5): 438.

Structure simulation and optimization of anode baking furnace

LI Xin-feng, MEI Chi, YIN Zhi-yun

*Department of Applied Physics and Heat Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China*

Abstract: By means of the principle and model of computational fluid dynamics, computational combustion and computational heat transfer, the fluid field, temperature field and concentration field in the combustion chamber of an anode baking furnace were calculated in DEC-Alpha 250 workstation, and analyzed anode baking furnace flue in detail. A reliable accurate, rapid and economical method was provided for optimizing structure of anode baking furnace flue and operation parameters. At the same time the temperature in combustion chamber of baking furnace was increased. It is very useful for improving the quality of baking anode and efficiency of electroanalysis.

Key words: anode baking furnace; computer simulation; structure optimization

(编辑 何学锋)