

文章编号: 1004-0609(2003)06-1528-06

环式阳极焙烧炉热工过程的数值模拟^①

张立麒, 郑楚光, 徐明厚

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 通过对环式阳极焙烧炉的热工过程进行系统理论分析, 建立了焙烧炉热工过程的数学模型。对焙烧炉进行模拟计算的结果表明: 焙烧过程中阳极内部温差最大的地方主要集中在炉顶, 应采取相应的措施减少炉顶的热损失以保持阳极焙烧温度的均匀性; 同时, 不同的火焰循环时间和空气渗漏对焙烧的能耗影响较大, 降低火焰循环时间将导致能耗增加, 而降低空气渗漏量则可极大地降低能耗。

关键词: 焙烧炉; 热工过程; 数值模拟

中图分类号: TF 803

文献标识码: A

焙烧是铝电解工业生产预焙阳极的重要工序, 也是阳极生产过程中成本最高的生产步骤。焙烧过程直接决定焙烧阳极的质量, 从而影响到电解时阳极的消耗、电流效率、电耗等。一般电解厂每生产 1 t 铝, 要消耗大约 0.5 t 的阳极。对于年产 25 万 t 铝的电解厂, 阳极消耗量每增加 1%, 每年的经济损失就达 142 万美元^[1]。因此, 对阳极的焙烧过程进行系统理论的研究, 进一步提高阳极质量就成为电解厂降低能耗节约成本的重要措施。

阳极的焙烧过程是一个包含许多热工现象的复杂热工过程, 包括燃料(煤气或重油)的燃烧、热量的传递(辐射、对流和传导)与损失、挥发分的逸出与燃烧、填充焦的燃烧、烟气的流动以及空气渗漏等。加上焙烧炉炉体庞大、焙烧周期长(一个月左右), 依靠试验测试工作来研究各焙烧参数对阳极质量的影响是十分困难的。因此, 对其进行数值模拟研究就显得格外重要。国外早在 20 世纪 80 年代初就已经开始了这方面的工作^[2], 并在近 20 年来发展了两类模型: 第一类是火道模型, 这类模型侧重借助大型的商业 CFD 软件对焙烧炉的火道流场结构进行研究优化^[3,4]; 第二类是热工过程模型, 这类模型侧重对焙烧的整个过程进行研究^[5,6]。我国在这方面的起步较晚, 仅中南大学在火道的结构仿真方面做过一定工作^[7], 而在热工过程的研究方面几乎还是空白。对焙烧炉内部复杂热工现象

缺乏系统理论分析, 必然会直接影响焙烧制品的质量和性能, 这也是我国焙烧炉普遍存在能耗高、阳极质量差的原因之一。因此, 对阳极焙烧炉的热工过程进行系统研究, 特别是借助数值模拟的强大优势研究焙烧炉的结构因素、工艺因素和生产因素对焙烧炉运行情况的影响, 具有十分重要的意义。

1 研究对象

本文的研究对象为敞开式环型阳极焙烧炉。它是由若干个结构相同的炉室(一般为 18~90 个)组成, 每个炉室又被火道分隔成若干个料箱, 生阳极分层堆放在料箱内。在阳极与阳极、阳极与炉墙之间, 以及阳极上下均用石油焦填充作为保护介质。图 1 所示为国内某大型铝厂焙烧炉 1 个火焰系统的运转示意图。该焙烧炉每个炉室有 8 个火道、7 个料箱, 焙烧过程的预热段包括 4 个炉室、加热段 2 个炉室、冷却段为 4 炉室。运行时, 每隔 1 个火焰循环时间, 燃烧架、鼓风机架和排烟架同时向前移动 1 个炉室, 相应应有 1 个炉室进入预热段、1 个炉室进入自然冷却, 这样环式运转。冷风从鼓风机架进入火道, 经冷却段将焙烧阳极冷却的同时被预热到一定温度进入燃烧室参与燃烧, 出燃烧室的高温烟气最后在预热段将热量传递给阳极由排烟架排出。整个焙烧过程类似于一个半连续的逆流热交换器。

① 收稿日期: 2002-11-04; 修订日期: 2003-01-07

作者简介: 张立麒(1972-), 男, 博士研究生, 讲师。

通讯联系人: 张立麒, 博士研究生; 电话: 027-87542417-8316; E-mail: lqzhang@hust.edu.cn

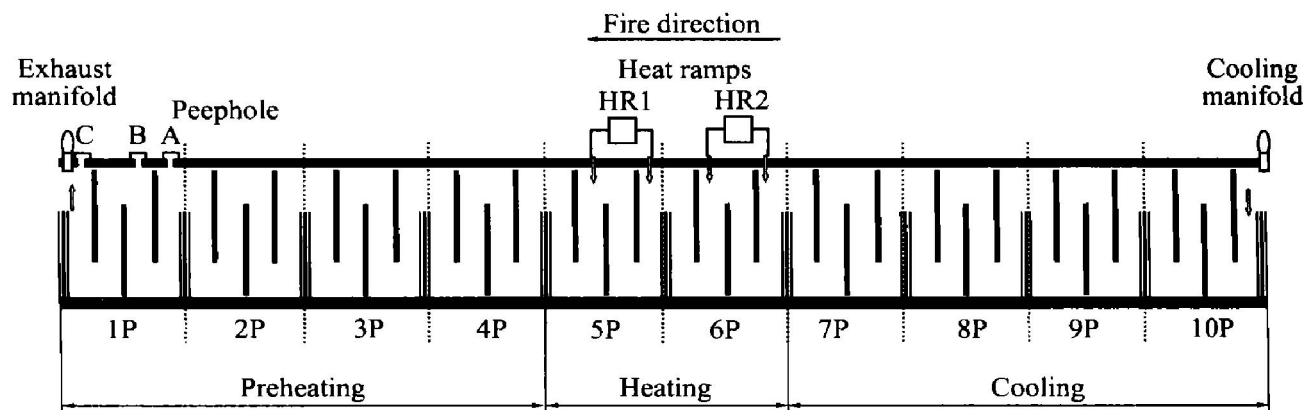


图1 焙烧炉1个火焰系统运转简图

Fig. 1 Longitudinal view of one furnace fire group

2 数学模型

2.1 控制体积及模型化条件

基于对称性原理, 计算的控制体积在 x 方向取火道的中心线到相邻料箱中心线距离, y 方向取料箱的顶部到底部距离, z 方向则为炉长方向从冷风进口到排烟架出口的距离。

由于整个焙烧过程十分类似于一个半连续的逆流热交换器, 因此, 计算时只要炉长方向(z 方向)的节点划分足够细, 就可以将焙烧炉的料箱(包括火道墙、填充焦和阳极)与相应火道假设成一个连续的逆流热交换器^[5]。计算中阳极、填充焦以及火道墙的热物性都假设为温度的函数。料箱的传热则只讨论二维情况(x, y 方向)。

2.2 数学模型

能量平衡方程^[5]:

$$m_g c_{p,g} \frac{dT_g}{dz} - 2h_T R(T_g - T_s) + m_f H_f + \frac{dm_g}{dz} c_{p,g}(T_g - T_0) + m_v H_v + m_c H_c - L = 0 \quad (1)$$

式中 m_g —火道中烟气的质量流率, kg/s ; $c_{p,g}$ —烟气定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T_g —烟气温度, $^\circ\text{C}$; h_T —烟气总传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; T_s —料箱温度(包括火道墙、填充焦和阳极), $^\circ\text{C}$; R —火道高, m ; T_0 —环境温度, $^\circ\text{C}$; m_f 、 m_v 、 m_c —每米炉长上燃料、挥发分和填充焦的质量流率, $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$; H_f 、 H_v 、 H_c —燃料、挥发分和填充焦的热值, J/kg ; L —每米炉长的热损失, W/m ; z —炉长方向节点。

传热方程^[8]:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式中 ρ_s —火道墙、填充焦和阳极密度, kg/m^3 ; $c_{p,s}$ —火道墙、填充焦和阳极比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; λ_s —火道墙、填充焦和阳极导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$

动量方程^[6]:

$$\frac{d(\rho_g v_g^2)}{dz} + \frac{dp}{dz} + \rho_g f \frac{v_g^2}{2D_e} = 0 \quad (3)$$

式中 ρ_g —烟气密度, kg/m^3 ; v_g —烟气流速, m/s ; p —火道压力, Pa ; D_e —火道当量直径, m ; f —达西因子。

2.3 边界及初值条件

传热方程式(2)的边界为第三类边界, 烟气和炉体间的对流换热以及辐射换热计算采用文献[8]的方法。

动量方程式(3)主要用于计算火道的空气渗漏及负压情况, 其初值条件采用文献[5]给定的负压与空气渗漏关系式。

能量平衡方程式(1)中挥发分的释放量可由生阳极的热重试验给出。

2.4 模型计算方法

对上述方程进行有限差分离散, 然后用迭代法和追赶法耦合求解, 可得到焙烧炉炉体内的温度场、烟气温度以及燃料使用量等参数。图2所示为具体的求解框图。

首先假设一个烟气温度(T_g), 利用给定的负压与空气渗漏关系式, 用迭代法求解动量方程式(3), 可得火道内的负压和烟气流率(m_g); 再解传热方程式(2), 可得炉体内各部分的温度场; 代入能量平衡方程式(1), 可得到一个新的 T_g^* 和燃料使用量 m_f^* ; 比较 T_g 和 T_g^* , 如果差值大于 15°C , 重新返

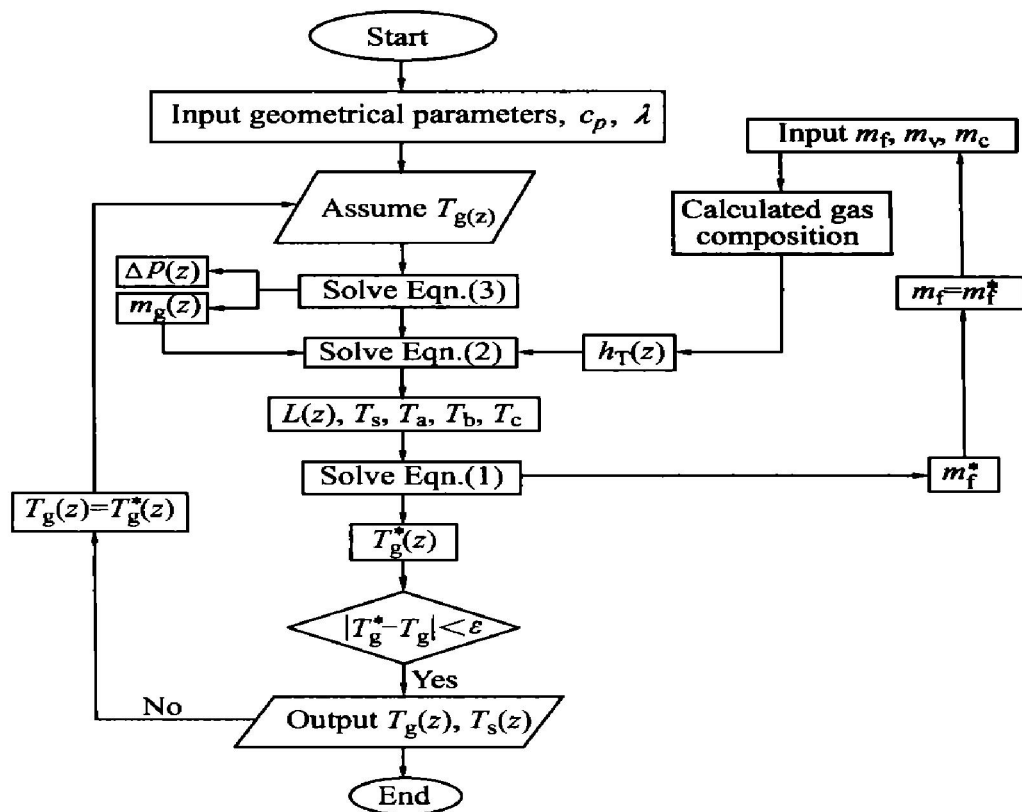


图 2 焙烧炉参数的计算框图

Fig. 2 Computational scheme for determining parameters of baking furnace

回计算, 否则计算结束, 输出 T_g 、 T_s 、 m_f 等值。

整个计算过程只计算炉气从鼓风机进入到从排烟架排出这一过程, 即焙烧的预热段、燃烧段和冷却段。

3 模拟结果与讨论

3.1 模型验证

模型模拟的可靠性在很大程度上依赖于模型建立时进行的简化同工程实际的相差程度。为了验证所建立的数学模型的可靠性, 本文作者对国内某大型铝业公司 90 室敞开式焙烧炉进行了综合测试工作^[9]。图 3 和图 4 所示为烟气温度 T_g 和阳极温度 T_a 的计算值与测定值焙烧时间的关系。图中显示, 计算值与测定值的符合情况较好, 挥发分燃烧区的计算值与测定值具有一定的误差, 这是因为模型中挥发分的释放量是由热重试验获得的, 得到的值是一个总量。实际上, 阳极焙烧时释放出的挥发分包含 3 种组分: 氢气、甲烷和焦油^[5]。这 3 种组分的释放温度各不相同, 其动力学参数也不相同, 模型中只考虑了一个总量, 必然会有所误差。从总体来说, 该模型的预测结果是令人满意的。

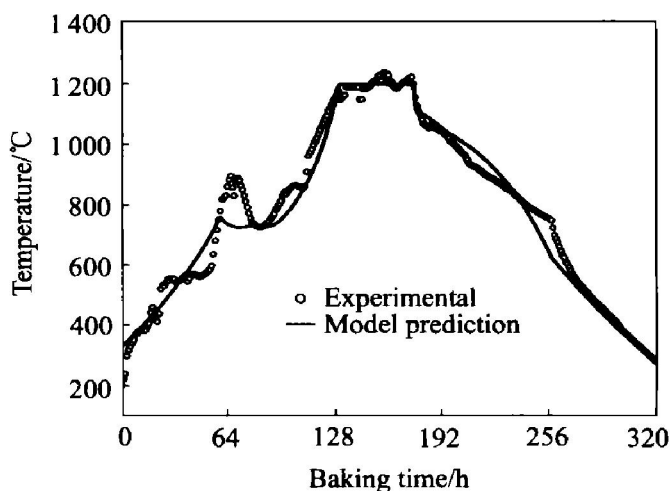


图 3 烟气温度与焙烧时间的关系

Fig. 3 Relationship between gas temperature profile and baking time

3.2 模拟结果

3.2.1 阳极内部温度场

焙烧阳极的质量很大程度上依赖于焙烧温度的均匀性和稳定性。以上述 90 室焙烧炉的结构性能及焙烧工况为例, 进行了模拟计算。图 5 所示为阳极内部 x 、 y 方向的温度分布图, 其中图 5(a) 所示为焙烧进行到 32 h 的情况, 图 5(b) 所示为焙烧 192 h (即燃烧终了) 的情况。由图 5 可知, 阳极在焙烧

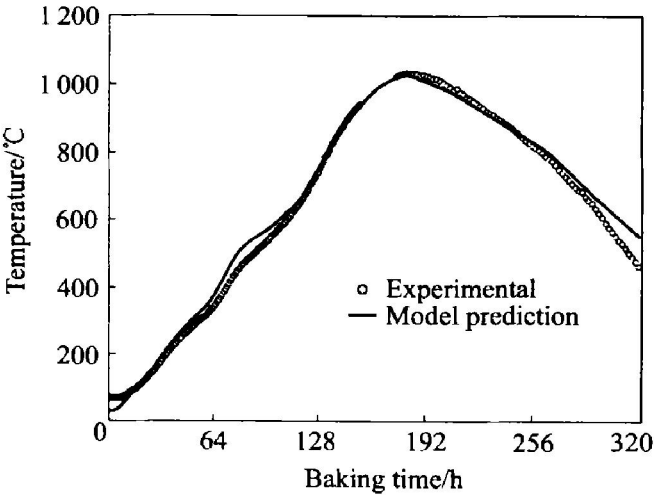


图 4 阳极温度与焙烧时间的关系

Fig. 4 Relationship between anode temperature profile and baking time

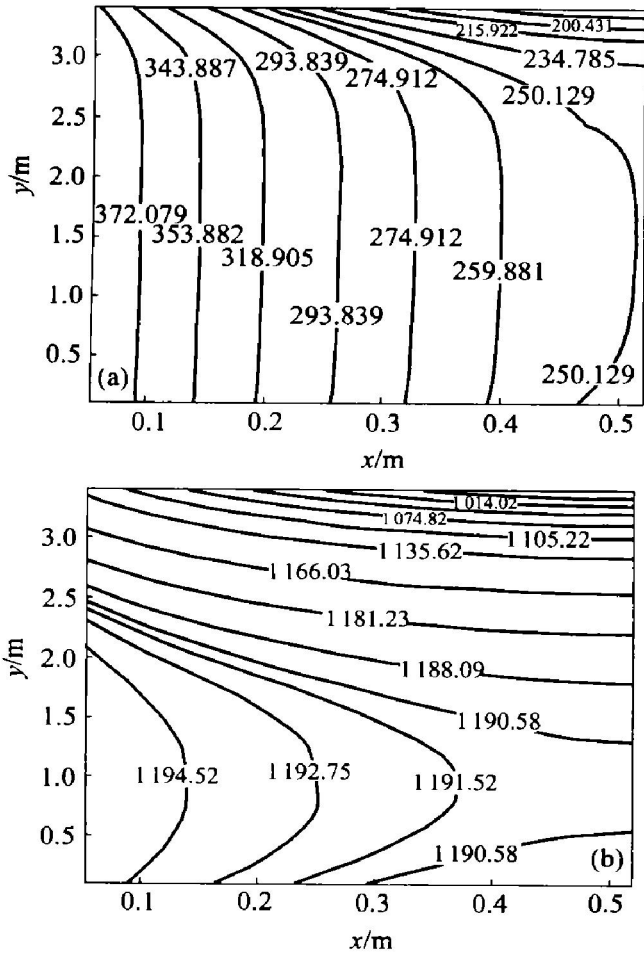


图 5 不同焙烧阶段时阳极内部温度分布

Fig. 5 Temperature contours inside anode at different baking stages
(a) —Baking for 32 h; (b) —Baking for 192 h

的温差最大。敞开式阳极焙烧炉的炉顶一般都是敞开直接面向空气, 阳极顶部的保温只能依靠阳极上面覆盖的填充焦层, 加上焙烧炉都是负压操作, 大量的空气从炉顶渗入火道, 这必然会增加阳极顶部的温差。因此, 要保证阳极焙烧温度的均匀性就必须降低焙烧炉炉顶和炉底的热损失, 特别是炉顶的热损失。一般可适当增加阳极上部填充焦层来实现炉顶保温的目的。同时, 在炉顶加盖炉盖可减少炉顶的热量辐射和空气渗入, 亦可大幅降低阳极上部的温差^[10]。

3.2.2 焙烧曲线

焙烧曲线的制定一般遵循“两头温升快, 中间温升慢”的原则, 即低温预热阶段和高温烧结阶段的加热速率要快一些, 而挥发分大量逸出的中温阶段加热速率要控制慢一些。为此, 在其它工况相同的情况下, 对不同火焰循环时间下的焙烧进行了模拟计算, 其计算结果如图 6 和表 1 所示。

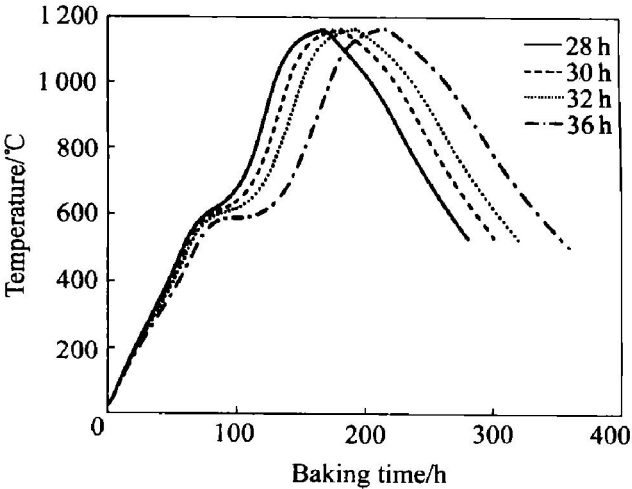


图 6 不同火焰循环时间下阳极的焙烧曲线

Fig. 6 Anode temperature profiles after different firing cycle times

图 6 所示为 4 种火焰循环时间下阳极的焙烧曲线, 表 1 则对这几种情况下的温升速率情况及持续时间进行了比较。由图 6 和表 1 可看出, 在计算的几种火焰循环时间下, 阳极的焙烧曲线基本都能符合“两头快, 中间慢”的原则, 但随着火焰循环时间的降低, 各温度范围内的阳极升温速率会升高, 而阳极的保温时间则随火焰时间的降低而减少。同时, 我们对各火焰循环时间下的能耗情况进行了比较, 结果发现: 相对于 32 h 的情况, 火焰时间取 36 h 时能够节能 6.1%, 而 30 h 时需要多耗能 6.4%, 28 h 时则需多耗能 20.6%, 即能耗会随着火焰时间的降低而增大。这是因为在其它条件不变的情况

过程中其内部温度场大部分区域还是比较均匀的, 主要的温差集中在阳极的顶部和底部, 其中以顶部

表 1 不同火焰循环时间下焙烧曲线比较

Table 1 Comparison of different firing cycle times

Temperature/ °C	Mean anode heating rate/(°C·h ⁻¹)				Continuing time/h			
	28 h	30 h	32 h	36 h	28 h	30 h	32 h	36 h
30– 250	8.15	7.86	7.59	7.10	27	28	29	31
250– 700	5.92	5.29	4.89	4.09	76	85	92	110
700– 1 080	10.86	10.27	9.74	9.27	35	37	39	41
> 1080	–	–	–	–	30	30	32	34

下,要在较短的时间内达到预定的焙烧指标,必然要耗费更多的能量,也就是说,火焰时间的降低是以牺牲能耗为代价的。应该指出,焙烧时间的缩短意味着生产能力的提高。上述结论证实了提高生产能力与节约能耗的矛盾,这对于焙烧炉焙烧曲线的制定具有指导性的参考意义。

3.2.3 不同漏气工况的模拟

焙烧炉一般为负压操作。负压操作的优势是可以很好地将燃烧段热量吸入到预热段,使燃烧热得到充分利用;但负压不可避免会造成空气渗漏,特别是对于敞开式炉型,由于负压而带来的空气渗漏是很严重的^[9,10]。渗入的空气少量可以弥补进气的不足,保证燃料和挥发分的充分燃烧,但大量的渗入空气将直接影响焙烧的能耗,迫使能耗增加。图7所示为不同漏气情况下的烟气升温曲线。由模拟计算可知,当漏气量减少为50%时,能耗将降低26.6%,当漏气量降为0时,可使能耗降低47.9%,这与文献[9]和文献[10]的试验结论是一致的。随着漏气量的增加,挥发分燃烧的位置也会随着变化,逐渐向排烟架移动。这是因为,空气的渗入量与负压大小成正比关系,空气渗入量大了,此时火道内的负压较大,最终导致挥发分的燃烧区向排烟

架移动,从而降低了热效率。

4 结论

1) 通过对敞开式焙烧炉的热工过程进行系统的理论分析,建立了焙烧炉热工过程的数学模型,该数学模型用于模拟焙烧炉的热力行为是可行的,模拟结果与试验测定结果符合很好。

2) 对焙烧过程中阳极内部温度场模拟的结果表明,阳极内部温差最大的地方主要集中在炉子的顶部,采取相应的措施减少炉顶的热量散失将有助于保持阳极焙烧温度的均匀性和稳定性,从而提高阳极焙烧质量。

3) 不同的火焰循环时间和空气渗漏量对焙烧的能耗影响较大。降低火焰循环时间将会导致能耗增大,而减少空气渗漏则会降低能耗。同时,阳极焙烧时的温升速率也会随着火焰循环时间的降低而增大。这对于焙烧炉的设计运行具有科学的理论参考价值。

4) 模型还可用于模拟不同的火道尺寸、料箱尺寸以及阳极指标等条件下的焙烧情况,这为敞开式焙烧炉的优化设计提供了一种新的思路。

REFERENCES

- [1] Fischer W F, Keller F, Parruchoud R C. Interdependence between anode net consumption and pot design, pot operating parameters and anode properties [J]. Light Metals, 1991. 681–686.
- [2] Furman A. A mathematical model simulating an anode baking furnace[J]. Light Metals, 1980. 545–552.
- [3] Stevenson D T. Anode baking furnace hydrodynamic flue modeling[J]. Light Metals, 1988. 307–314.
- [4] Jacobsen M, Melaaen M C. Numerical simulation of the baking of porous anode carbon in a vertical flue ring furnace[J]. Numerical Heat Transfer: Part A Applications, 1998, 34(6): 571–598.

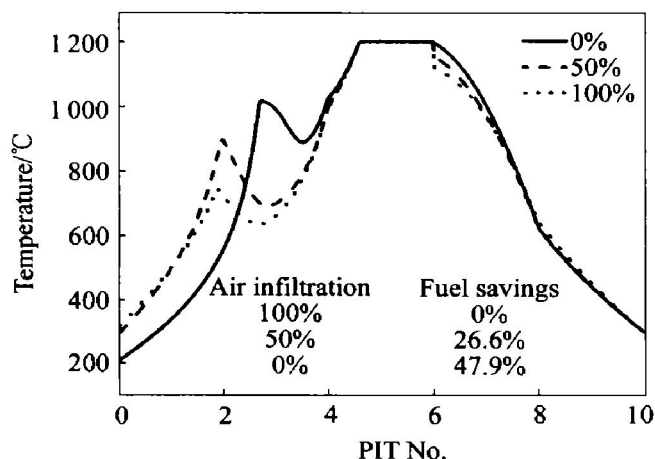


图7 不同漏气情况下的烟气升温曲线

Fig. 7 Flue gas temperature profiles of different air infiltration

- [5] Bui R T, Darnedde E, Charette A, et al. Mathematical simulation of a horizontal flue ring furnace[J]. Light Metals, 1984. 1033 - 1040.
- [6] Ouellet R, Jiao Q, Chin E, et al. Anode baking furnace modeling for process optimization[J]. Light Metals, 1995. 653 - 662.
- [7] 李欣峰, 梅 焱, 殷志云. 阳极焙烧炉结构仿真与优化[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 282 - 286.
LI Xin-feng, MEI Chi, YIN Zhi-yun. Structure simulation and optimization of anode baking furnace[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 282 - 286.
- [8] Kreith F, Black W Z. Basic Heat Transfer[M]. New York: Harper and Row, 1980: 239.
- [9] 张立麒, 郑楚光, 徐明厚, 等. 敞开式环型焙烧炉的综合测试分析[J]. 轻金属, 2002(6): 51 - 56.
ZHANG Li-qi, ZHENG Chu-guang, XU Ming-hou, et al. Analysis by synthesis test of horizontal ring baking furnace[J]. Light Metals, 2002(6): 51 - 56.
- [10] Crowell W F, Peacey J G, Whitmore P. Anode baking furnace developments at noranda aluminum[J]. Light Metals, 1981. 583 - 595.

Numerical simulation of heat transfer process of ring anode baking furnace

ZHANG Li-qi, ZHENG Chu-guang, XU Ming-hou

(National Laboratory of Coal Combustion,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Through the systematic analysis of ring anode baking process, a mathematical model was developed. Several simulation runs were then made. The simulated results indicate that the maximal temperature gradient is focus on the top of anodes. In order to preserve the uniformity and stability of the baking temperature in anodes, some relevant measures to reduce this heat loss should be taken. It is also found that the fuel consumption increases with the decrease of firing cycle time, and cutting down the air infiltration will be helpful for saving fuel.

Key words: baking furnace; heat transfer; numerical simulation

(编辑 何学锋)