文章编号: 1004-0609(2012)09-2699-06

# 圆形蓄热式熔铝炉内非稳态多场耦合 数值模拟与参数优化

周 萍,陈 卓,王晓松,谭易君,闫红杰

(中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 以圆形蓄热式熔铝炉为研究对象,根据熔铝炉的运行特点,应用标准 *k*—*ε* 湍流模型、涡耗散模型、P-1 辐射模型描述湍流燃烧过程,应用等效比热法描述铝料的熔化过程,对熔铝炉内进口与出口边界交替变化的热工 过程进行非稳态多场耦合数值模拟研究。蓄热式熔铝炉基准工况下的数值模拟结果表明:与传统单一烧嘴工作相 比较,两个烧嘴快速切换,铝料温度分布更为均匀,其平均温度在前3h升温较快,随后由于熔化吸热升温速率 逐渐减小。以缩短铝料熔化时间为目标,采用正交试验方案,对影响熔铝炉热工过程的5个参数进行数值模拟优 化,其优化工况为烧嘴高度657 mm、烧嘴倾角25°、烧嘴夹角90°、过剩空气系数1.1、空气预热温度800℃。与 设计工况相比,优化工况能缩短铝料熔化时间1h,可降低能源约20%。 关键词:熔铝炉;正交试验;数值模拟;优化

中图分类号: TK175 \_\_\_\_\_ 文献标志码: A

## Transient multi-field coupled simulation and parameters optimization of cylindrical regenerative aluminum melting furnace

ZHOU Ping, CHEN Zhuo, WANG Xiao-song, TAN Yi-jun, YAN Hong-jie

(School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A numerical model of a cylindrical regenerative aluminum melting furnace was developed according to its operation characteristics. By including the standard  $k-\varepsilon$  model, the species transport model and the P-1 radiation model to describe the turbulent combustion process in the furnace, and applying the equivalent specific heat method to describe the aluminum melting process, a transient and multi-fields coupled simulation was carried out to investigate the thermal alternation processes in the inlet and outlet areas of the furnace. The simulation results of the standard operation case show that, compared with the traditional operation with one burner, a more uniform temperature distribution can be achieved in the switch operation of two burners. In particular, the temperature rises quickly in the first three hours, followed by a slower rising due to heat absorbed by the melting alumina in the furnace. More simulations were carried out based on the orthogonal design to optimize the main five parameters that have significant influences on the process. The results indicate that an optimal operation condition can be achieved with the burner height of 657 mm, the vertical burner angle of 25°, the horizontal angle between two burners of 90°, the excess air coefficient of 1.1 and the air preheating temperature of 800 °C. Compared with the result of the standard operation case, one hour can be reduced in the melting time of the alumina in the optimal condition, which is equivalent to 20% reduction in the energy consumption.

Key words: aluminum melting furnace; orthogonal experiment; numerical simulation; optimization

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2010AA065201)

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2012-02-20

通信作者: 陈 卓, 副教授, 博士; 电话: 13974891750; E-mail: chenzhuo@csu.edu.cn

熔铝炉是铝加工过程的主要熔炼设备,其作用是 熔化铝料,使其质量均匀并达到一定化学成分要求, 为铸造及其他加工过程提供合格的铝液。熔铝炉的能 耗远高于铝加工过程的其他设备<sup>[1-2]</sup>,加强对熔铝炉的 节能研究,有利于降低铝加工过程的总体能耗、提高 企业经济效益。

熔铝炉内燃烧过程以及速度、温度分布直接影响 着铝料的传热速率,进而影响铝料的熔化速率与熔铝 炉的能源利用率,因此,对熔铝炉内传递过程的研究 引起了人们的极大关注。近年来,国内外一些学者应 用数值模拟的方法,对熔铝炉内传递过程进行了大量 研究。其中以 NIECKELE 及其研究团队为代表<sup>[3-7]</sup>, 自 1998 年至 2011 年, NIECKELE 采用数值模拟的方 法分别研究了不同的烧嘴配置方式、不同燃剂及燃料 对矩形熔铝炉内燃烧过程的影响。GOLCHERT 等<sup>[8]</sup> 则分析了矩形熔铝炉内 N<sub>2</sub>及 O<sub>2</sub>浓度对 NO<sub>x</sub>生成的影 响。向寓华等<sup>[9]</sup>对圆形熔铝炉内铝熔体温度场进行了 数值模拟,得到铝熔体纵截面等温线基本呈开口向上 的抛物线分布,最高温度位于熔体中心。周乃君等[10] 采用流固耦合的方法同时计算铝液保温炉燃烧空间及 铝液区域,得到炉内流场、炉膛及铝料温度场分布情 况,并分析了助燃空气温度和过剩空气系数对炉内温 度分布的影响,结果表明,铝液温度随助燃空气温度 的增加而增加,最佳过剩空气系数约为1.25。上述研 究在建立熔铝炉或保温炉的数学模型时,均将炉内热 工过程视为稳态。而实际上,随着蓄热式燃烧技术的 发展以及烧嘴在炉内的交替工作,炉内的热工过程是 一个随时间变化的非稳态过程。

本文作者将熔铝炉内热工过程视为非稳态,将铝 料的熔化热用等效比热法近似处理,用批处理文件的 方法实现进口与出口边界的交替变化,采用数值模拟 方法对影响熔铝炉内热工过程的 5 个主要参数(烧嘴 高度、烧嘴倾角、烧嘴夹角、过剩空气系数和空气预 热温度)进行正交试验研究,获得这些参数对熔铝炉熔 化时间的影响规律,并以缩短铝料熔化时间为目标, 对这些参数进行了优化,为熔铝炉的结构设计与操作 参数优化提供理论指导。

## 1 物理数学模型

## 1.1 物理模型及网格划分

图 1 所示为圆形蓄热式熔铝炉三维模型示意图。 由图 1 可知,熔铝炉炉体结构为圆柱形,炉内空间由 上部的燃烧空间和下部的熔池区域组成。燃烧装置采



图1 熔铝炉三维模型示意图



用一对蓄热式烧嘴(烧嘴 A 和烧嘴 B),当一个烧嘴工 作时,另一个作为主烟道进行排烟和蓄热,更替时间 为 60 s,同时还设有一个辅助烟道。采用直角坐标系, 坐标原点位于熔池上表面的中心处,Z 轴正向指向炉 体顶部,X轴正向指向辅助烟道方向。

采用分块网格划分的方法对计算区域进行离散化 (见图 2),将整个求解区域分成多个小块,然后对每个 小块单独进行网格划分,并在烧嘴处进行局部加密, 网格总数为 38.5 万个。



图 2 网格结构示意图 Fig. 2 Schematic diagram of grid

## 1.2 数学模型

熔铝炉内传递过程可以用非稳态的速度场、温度 场与组分浓度场进行描述,这些场之间通过显性或隐 性方式相互耦合、相互作用,需进行联立求解。传递 过程的控制方程包括连续性、动量、能量以及组分方 程,可写成如下统一形式<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \boldsymbol{u}\varphi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\varphi}\operatorname{grad}\varphi) + S_{\varphi}$$
(1)

式中: φ 为任意独立变量,可以代表速度、温度、组

分浓度等; u 为速度矢量;  $\Gamma_{\varphi}$ 为广义扩散系数,  $S_{\varphi}$ 为 相应的源项。式(1)中各项依次为非定常项、对流项、 扩散项及源项。

炉内气体的湍流流动采用标准 k→ε 湍流模型模 拟;燃烧反应采用涡耗散模型计算;由于光学深度 aL 大于 1,辐射传热选用 P-1 模型描述;忽略铝液的流动, 将其视为静止的固体,炉气与铝料之间的热传递通过 采用流固耦合传热模型实现<sup>[12-14]</sup>,铝料的熔化热处理 为等效比热,即铝料的比热容用分段线性函数表示:

$$c^{*}(T) = \begin{cases} c_{1}(T), T < T_{1} \\ c_{1}(T) + c_{2}(T) \\ \hline 2 \\ c_{2}(T), T > T_{2} \end{cases} + \frac{L}{T_{2} - T_{1}}, T_{1} \le T \le T_{2}$$
(2)

式中:  $c^*$ 为等效比热容;  $c_1$ 为熔化前不计熔化潜热的 比热容;  $c_2$ 为熔化后不计熔化潜热的比热容;  $T_1$ 为熔 化开始时的温度;  $T_2$ 为完全熔化时的温度; L为熔化 潜热。

假定燃烧过程满足简单化学反应系统,天然气主要成分为 CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>,其反应简化为两步式反应,则炉内发生的化学反应如下:

$CH_4+3/2O_2 \longrightarrow CO+2H_2O$	(3)
--	-----

 $C_2H_6+5/2O_2 \longrightarrow 2CO+3H_2O \tag{4}$ 

 $C_{3}H_{8}+7/2O_{2} \longrightarrow 3CO+4H_{2}O \tag{5}$ 

 $CO+1/2CO_2 \longrightarrow CO_2$  (6)

### 1.3 边界条件及初值条件

1)天然气入口:采用速度入口边界条件(Velocityinlet),入口流量为600 m<sup>3</sup>/h,折合速度大小为51.8 m/s, 天然气温度为300 K,入口水力直径为64 mm,湍流 强度为0.035。

2)空气入口:采用质量流量边界条件(Mass-flowinlet),空气入口流量为6780 m<sup>3</sup>/h,折合质量流量为 2.397 kg/s。空气温度为873 K,入口水力直径为457 mm,湍流强度为0.0298。

3) 烟道出口:设置为出流边界(Outflow)。

4) 壁面边界:各壁面材料属性和主要边界条件如 表 1 所列,环境温度设定为 300 K。

5) 初值条件:根据熔铝炉操作特点,炉膛区域初 始温度为1000 K,铝料初始温度为300 K。

值得注意的是,烧嘴 A 与 B 的边界条件随时间变 化,一个为入口边界时,另一个为出口边界,交换时 间间隔为 60 s,用批处理文件的方法实现进口与出口 边界的交替变化。并根据生产现场的生产数据,对相 表1 壁面的材料性能和边界条件

 Table 1
 Material properties and condition settings at wall and boundaries

Property	Wall	Roof	Bottom
Density/(kg $m^{-3}$ )	1 300	1 600	1 200
Specific heat capacity/ $(J kg^{-1} K^{-1})$	1 180	1 046	1 105
Thickness/m	0.61	0.43	0.58
Absorption coefficient	0.65	0.65	-
Thermal conductivity/ $(W m^{-1} K^{-1})$	1.594	2.34	3.46
Heat flux/ $(Wm^{-2}K^{-1})$	11.8	14.5	10.3

关模型与方法的有效性进行了验证[15]。

## 2 正交试验方案

#### 2.1 试验指标

在试验中用来衡量或考察试验效果的特性值,称 为试验指标<sup>[16]</sup>。对于熔铝炉,其主要任务是熔化铝料, 尽量缩短熔化时间、使铝料实现快速熔化是其基本要 求。在防止烧损的前提下缩短熔化时间,有利于降低 熔铝炉能耗、提高生产效率和产品质量<sup>[17]</sup>。因此,本 研究将熔化时间作为考察熔铝炉热工特性的指标。

## 2.2 试验因素及水平

影响熔铝炉热工过程的参数很多,考虑到生产实 践中参数的可操作性,主要考虑烧嘴的安装参数与操 作参数,即:烧嘴安装高度(*h*)、烧嘴安装倾角(*α*)、两 烧嘴间的夹角(β)、过剩空气系数(*n*)及空气预热温度 (*t*air)。根据熔铝炉各因素的实际可调节范围选取相应 试验水平,如表 2 所列。

上述因素和水平构成一个 5 因素 4 水平的正交试验,采用 L16(4<sup>5</sup>)正交表,总共需要进行 16 组试验。

## 3 结果与分析

#### 3.1 基准工况

基准工况下空气入口质量流量为 2.397 kg/s, 预热 温度 600 ℃;烧嘴高度、倾角和夹角分别为 757 mm、 15°和 90°。为了解炉内传热过程及热工特性,对该工 况下两个烧嘴交替工作时的计算结果进行分析。

图 3 为两烧嘴交替工作时炉内温度分布。其中 z=10 mm 截面位于熔池表面上方 10 mm 处。炉内最高

表 2	因素水平			
Table	2	Level of factors		

Table 2	Level of factors				
Level	Height of burner, <i>h</i> /mm	Vertical angle of burner, α/(°)	Horizontal angle between burners, $\beta/(^{\circ})$	Excess air coefficient, <i>n</i>	Air preheating temperature, $t_{air}$ /°C
1	657	10	70	1.1	500
2	757	15	80	1.2	600
3	857	20	90	1.3	700
4	957	25	100	1.4	800



## 图 3 两烧嘴交替工作时炉内温度分布

Fig. 3 Temperature distribution in furnace when two burners working alternately: (a) Temperature distribution of x=0 cross-section when burner *B* working; (b) Temperature distribution of z=10 mm cross-section when burner *B* working; (c) Temperature distribution of x=0 cross-section when burner *A* working; (d) Temperature distribution of z=10 mm cross-section when burner *A* working

燃烧温度为2490K,火焰较长,能到达铝料表面,有 利于增强与炉料的辐射换热。烧嘴 B和烧嘴 A 交替工 作时 z=10 mm 截面形成互相垂直的高温带,在烧嘴快 速切换作用下,使铝料温度比传统单一烧嘴工作时更 均匀。

图 4 所示为炉膛和铝料平均温度随加热时间变化 曲线。由图 4 可知,炉膛温度加热开始时升温较快, 随后升温速率减小,温度在 1 400~1 500 K 的范围内变 化。铝料熔化时间为 5 h,前 3 h 升温曲线近似为一条 斜直线,随后由于大部分铝料处于熔化吸热状态,升 温速率减小,温度曲线为一条斜率逐渐减小的抛物线。

## 3.2 正交试验

分别对 16 组试验工况进行了数值模拟,获得各 试验工况的铝料熔化时间。这 16 组试验工况的具体 参数组合及试验结果如表 3 所列。根据熔化时间试 验结果,计算各因素相应水平的平均指标 k<sub>i</sub>(其中 *i*=1, 2,3,4)和极差 *R*,也列于表 3 中。





## 3.3 优化工况

根据极差分析方法,以熔化时间最短为目标,由表 3 可以得出,优化工况各因素的组合如下: A1B4C3D1E4,即烧嘴高度 657 mm,烧嘴倾角 25°,

#### 表3 正交试验结果

 Table 3
 Results of orthogonal test

T (	А	В	С	D	Е	
No.	Height of	Vertical angle of	Horizontal angle between	Excess air	Air preheating	Melting time/h
	burner/mm	burner/(°)	burners/(°)	coefficient	temperature/°C	
1	1	1	1	1	1	4.87
2	1	2	2	2	2	4.89
3	1	3	3	3	3	4.56
4	1	4	4	4	4	4.42
5	2	1	2	3	4	4.69
6	2	2	1	4	3	4.94
7	2	3	4	1	2	4.68
8	2	4	3	2	1	4.99
9	3	1	3	4	2	5.28
10	3	2	4	3	1	5.38
11	3	3	1	2	4	4.59
12	3	1	2	1	3	4.28
13	4	1	4	2	3	4.79
14	4	2	3	1	4	4.28
15	4	3	2	4	1	5.56
16	4	4	1	3	2	5.10
$k_1$	4.68	4.91	4.88	4.53	5.20	
$k_2$	4.83	4.87	4.85	4.82	4.99	
$k_3$	4.88	4.85	4.78	4.93	4.64	
$k_4$	4.93	4.70	4.82	5.05	4.49	
R	0.25	0.21	0.10	0.53	0.71	

烧嘴夹角 90°, 过剩空气系数 1.1, 空气预热温度 800 ℃。

将优化工况下熔铝炉的多场耦合进行了数值模 拟,铝料平均温度随时间的变化曲线绘制于图 5。由 图 5 可以看出,优化与基准两种工况下铝料平均温度 随时间变化的趋势相似,基准工况熔化时间为 5 h,而 优化工况熔化时间缩短为 4.01 h,且小于正交试验中 的 16 组试验结果中的任意一组,表明该工况能够有效 地缩短铝料熔化时间,其能耗相应降低约 20%。

## 4 结论

1) 基准工况下炉内最高燃烧温度为 2 490 K,炉 内火焰较长,能到达铝料表面;两烧嘴交替工作在铝 料表面上方形成相互垂直的高温带。



图 5 优化工况与基准工况下铝料平均温度随时间的变化 Fig. 5 Changes of aluminum average temperature with time at optimal and basic cases

2) 炉膛平均温度随加热时间的变化基本在1400~1500 K范围内。铝料平均温度在前3h升温较快,随后由于熔化吸热升温速率逐渐减小。

3) 以缩短熔化时间为优化目标,采用正交试验设 计方案,对16组试验工况进行数值模拟,得到优化工 况如下:烧嘴高度657mm,烧嘴倾角25°,烧嘴夹角 90°,过剩空气系数1.1,空气预热温度800℃。

4) 对优化工况进行了数值模拟并与基准工况比较,结果表明优化工况下能缩短铝料熔化时间1h,降低能耗约20%。

## REFERENCES

 [1] 刘 蒙, 柴西林. 中国铝工业炉节能减排分析及展望[J]. 冶 金设备, 2010(3): 67-70.

LIU Meng, CHAI Xi-lin. Analysis and prospect on energy saving and emission reduction of aluminium industry furnace in China [J]. Metallurgical Equipment, 2010(3): 67–70.

- [2] NIECKELE A O, NACCACHE M F, GOMES M S P, KOBAYASHI W T. Numerical investigation of the staged versus non-staged combustion process in an aluminum melting furnace [C]//Proceedings of AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. USA: ASME, 1998: 253–259.
- [3] NIECKELE A O, NACCACHE M F, GOMES M S P, KOBAYASHI W T. The influence of oxygen injection configuration in the performance of an aluminum melting furnace [C]// Proceedings of IMECE: Heat Transfer Division. USA: ASME, 1999: 405–412.
- [4] NIECKELE A O, NACCACHE M F, GOMES M S P, CARNEIRO J N E, ISNARD A A, SERFATY R. Numerical simulation of natural gas combustion process using a one step and a two-step reaction [C]//Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition. USA: ASME, 2002: 37–43.
- [5] NIECKELE A O, NACCACHE M F, GOMES M S P. Numerical modeling of an industrial aluminum melting furnace [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2004, 126(1): 72–80.
- [6] NIECKELE A O, GOMES M S P, NACCACHE M F, MENEZES R C. Influence of the type of oxidant in the combustion of natural gas inside an aluminum melting furnace [C]//Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition. USA: ASME, 2006: 287–296.
- [7] NIECKELE A O, GOMES M S P, NACCACHE M F. Combustion performance of an aluminum melting furnace operating with natural gas and liquid fuel [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5): 841–851.
- [8] GOLCHERT B, RIDENOUR P, WALKER W, GU M, ZHOU C Q. Effects of nitrogen and oxygen concentration on NOx emissions in an aluminum furnace [C]// Proceedings of International Mechanical Engineering Congress and Exposition. USA: ASME, 2006: 323–333.

- [9] 向寓华,周孑民,刘 宏,王计敏. 铝合金保温过程熔体温度 场的数值模拟[J]. 轻金属, 2010(5): 56-59.
   XIANG Yu-hua, ZHOU Jie-min, LIU Hong, WANG Ji-min.
   Study on numerical simulation of aluminium alloy melt temperature field in heat preserving process [J]. Light Metals, 2010(5): 56-59.
- [10] ZHOU Nai-jun, ZHOU Shan-hong, ZHANG Jia-qi, PAN Qing-lin. Numerical simulation of aluminum holding furnace with fluid-solid coupled heat transfer[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 17(1): 1389–1394.
- [11] 周 萍,周乃君,蒋爱华,陈红荣.传递过程原理及其数值仿 真[M].长沙:中南大学出版社,2006:300-301.
  ZHOU Ping, ZHOU Nai-jun, JIANG Ai-hua, CHEN Hong-rong.
  Principle and numerical simulation of transport processes [M].
  Changsha: Central South University Press, 2006: 300-301.
- [12] 李建平, 王伯长, 刘 涛, 毛大恒. 侧喷加热铝材退火炉内流 场与温度场数值模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(1): 166-171.

LI Jian-ping, WANG Bo-chang, LIU Tao, MAO Da-heng. Numerical simulation of flow and temperature field in side-blown aluminum annealing furnace [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1): 166–171.

- [13] 郭 臣, 龙思远, 徐绍勇, 游国强. 燃气镁合金熔化炉内气相 燃烧过程的三维数值模拟[J]. 工业加热, 2008, 37(1): 10-14.
   GUO Chen, LONG Si-yuan, XU Shao-yong, YOU Guo-qiang. Three-dimensional numerical simulation of gaseous combustion process in melting furnace for magnesium alloy of gas [J]. Industrial Heating, 2008, 37(1): 10-14.
- [14] 周 萍,刘 萍,李 刚,闫红杰.再生铜反射炉内热工过程数值仿真及优化[J]. 热科学与技术,2010,9(3):238-243. ZHOU Ping, LIU Ping, LI Gang, YAN Hong-jie. Numerical simulation and optimization for thermal process in reclaimed copper reverberatory furnace [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2010, 9(3): 238-243.

 [15] 谭易君. 圆形蓄热式熔铝炉内多场耦合数值模拟及优化[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
 TAN Yi-jun. Numerical simulation and optimization on coupled multi-field of the regenerative cylindrical aluminum melting

[16] 成 岳,夏光华.科学研究与工程试验设计方法[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005: 24-27.
CHENG Yue, XIA Guang-hua. Scientific research and engineering experiment design [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005: 24-27.

furnace [D]. Changsha: Central South University, 2011.

[17] 唐 剑, 王德满, 刘静安, 赵世庆, 钟 利. 铝合金熔炼与铸造技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 34-39.
TANG Jian, WANG De-man, LIU Jing-an, ZHAO Shi-qing, ZHONG Li. Aluminum smelting and casting technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 34-39.

(编辑 何学锋)