

## 50 t 对冲式不换向蓄热式天然气熔铝炉的数值模拟

宋长志<sup>1</sup>, 安丰所<sup>2</sup>

(1.广东省特种设备检测研究院, 广东 广州 510655; 2.阳西海滨电力发展有限公司, 广东 广州 510006)

**摘要:**简述了蓄热式燃烧技术的工作原理, 并对燃料换向蓄热式燃烧技术和燃料不换向蓄热式燃烧技术进行了比较。针对目前大型的 50 t 以天然气为燃料的圆形熔铝炉, 利用 CFD 软件, 对采用对冲式不换向熔铝炉炉内传热、流动以及燃烧进行了三维稳态流动的模拟研究。通过数值模拟得到了炉内气体温度场、流场的分布情况, 为对冲式不换向蓄热式熔铝炉的设计与研究提供了理论基础。最后, 通过实际工程项目的节能效果验证了数学模型及数值模拟的正确性。

**关键词:**熔铝炉; 不换向蓄热式燃烧; 数值模拟; 流场; 温度场; 节能效果

中图分类号: TF806.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-6988(2015)01-0048-03

## Numerical Simulation of 50 t Hedge Type Non-Reversing Regenerative Gas Aluminium Melting Furnace

SONG Changzhi<sup>1</sup>, AN Fengsuo<sup>2</sup>

(1. Guangdong Institute of Special Equipment Inspection and Research, Guangzhou 510655, China;

2. Yangxi Coastal Electric Power Development Co., Ltd, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The working principle of regenerative combustion technology is briefly described, and the fuel reversing regenerative combustion technology and not the reversing regenerative combustion technology are compared. In view of the present large 50 t circular aluminium melting furnace with natural gas as fuel, using CFD software, and adopting hedge type non-reversing aluminium melting furnace to study the three-dimensional steady flow simulation of the heat transfer, flow and combustion in the furnace. The furnace gas temperature field and the distribution of flow field are obtained by numerical simulation, it provides a theoretical basis for hedge type reversing regenerative aluminium melting furnace design and research. Finally, a practical mathematical model and the energy saving effect of the project are verified the correctness of the numerical simulation.

**Key words:** aluminium melting furnace; non-reversing regenerative combustion; numerical simulation; flow field; temperature field; energy saving effect

蓄热式燃烧技术 近十几年在熔铝炉上获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。换向蓄热式燃烧的工作原理见图 1。对于换向式蓄热燃烧系统, 由于燃料换向燃烧, 使用油料, 特别是黏度较高的油料作为燃料时, 烧嘴经常发生堵塞、结焦、断火、不燃等现象; 以天然气为燃料时, 烧嘴也存在爆鸣、爆燃等问题, 给安全生产留下极大的隐患<sup>[2]</sup>。近些年人们提出了燃料不换向蓄热式燃烧技术。其工作原理如图 2 所示。

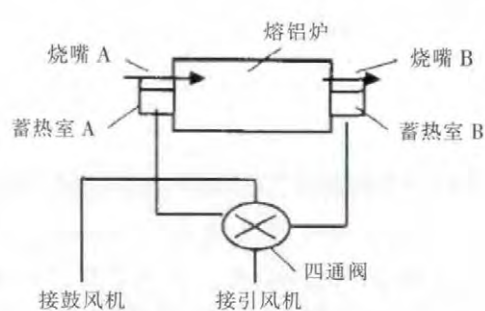


图 1 燃料换向蓄热式燃烧技术工作原理图

收稿日期 2014-07-09, 修回日期 2014-10-29

作者简介: 宋长志 (1971—) 男, 工程师, 主要从事工业锅炉、火力发电厂电站锅炉检验检测工作。

只安装一个烧嘴, 燃料自烧嘴喷入熔铝炉, 不再换向。蓄热室 A、B 内均装有高铝耐火球, 当常温

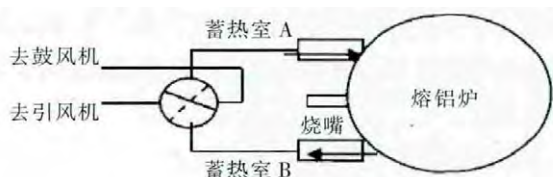


图2 燃料不换向蓄热式燃烧技术工作原理图

空气经过蓄热室A时,蓄热室A耐火球的热量传给了空气,使空气达到1000℃以上的高温,高速喷出后给燃料助燃,燃烧产物(高温烟气)进入蓄热室B将热量传给蓄热室B中的陶瓷球,温度下降到150℃左右后进入引风机。A、B两蓄热室助燃、排烟反复更换,陶瓷球放热、蓄热也伴随变化,助燃空气温度始终保持在1000℃,比炉温低200℃左右,进入引风机排向大气的烟温在150℃左右。

不换向蓄热式燃烧技术只有一个烧嘴,燃料连续燃烧不换向,因此也就不存在烧嘴堵塞、结焦、断火、不燃、爆鸣、爆燃等问题,其使用安全性及寿命均得到极大提高。

此外,对于换向蓄热式,必须安装值班烧嘴(俗称小枪)。利用小枪连续燃烧来点燃换向燃烧的烧嘴(大枪)。因此,无论大枪是否处于燃烧状态,小枪必须长明。在大枪处于不燃烧状态时,小枪燃烧产生的热量无法进入熔铝炉内,而是随排烟流入蓄热室,这样既造成了燃料的无谓浪费,又提高了工人的劳动强度。对于不换向蓄热式,由于燃料供应是连续的,火焰在连续稳定的燃烧,无需安装小枪,自然也就没有小枪产生的热损失,使熔铝炉的热效率得到进一步提高。

但是,对于50t这样的大型熔铝炉来说,炉体长度达到7m以上,远大于5m。如果只在炉体的一侧布置一只烧嘴,火焰难以充满整个炉膛。所以本文提出一种新型对冲式不换向蓄热式烧嘴结构:即在炉膛的两侧各布置一套不换向蓄热燃烧系统,形成对冲式火焰,覆盖整个铝液面,彻底解决因炉膛长度大而导致的火焰不能充满的难题。

由于此种结构的熔铝炉结构复杂,因此对这种对冲式不换向蓄热式熔铝炉进行数值模拟,了解炉内气体流动及温度分布状况,对熔铝炉的优化设计与研究具有重要的理论指导意义。

## 1 计算模型简介

以50t对冲式天然气熔铝炉为研究对象。该炉

由炉体、4个蓄热室、2只烧嘴组成<sup>[3]</sup>。

炉体呈圆柱体,物料从侧面装入。熔池位于熔炼炉底部,烧嘴居中布置,蓄热室均布两侧,烧嘴与水平面呈15°向下倾角<sup>[4]</sup>。

炉内气体的湍流流动采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟,燃烧反应采用涡耗散模型计算<sup>[5]</sup>,边界条件设置如下:

- (1)烧嘴出口天然气速度取12 m/s,天然气温度为300 K,入口水力直径为80 mm;
- (2)烧嘴出口热空气速度取90 m/s,空气温度为1300 K,入口水力直径为220 mm;
- (3)出口设置为压力出口;
- (4)壁面边界底面设为900 K壁温,其它壁面绝热。

## 2 控制方程

### 2.1 质量守恒方程

质量守恒方程是流体流动过程中需要满足的基本条件之一,其主要控制运算过程中流体的连续性。即单位时间内,一个以封闭区域作为控制体的流场中,控制体的质量增量等于体表面(控制面)进出控制体的流体质量之差。其数学关系式为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$$

式中, $S_m$ 为从分散的二级相中加入到连续相的质量。

质量守恒方程对于可压流动和不可压流动均适用。

$$\text{用。积分形式为: } \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{Vol} \rho dx dy dz + \oint_A \rho dA = 0$$

在此关系式中, $Vol$ 为控制体, $A$ 表示控制面。

### 2.2 动量守恒方程

动量守恒方程的定义为作用在微元之上的总外力与控制体的流体动量相对于时间的变化率相等,这一定义对于流体的流动具有重要意义。其基本的方程式为:

$$\delta F = \delta_m \frac{dv}{dt}$$

式中, $F$ 为流体所受力。

### 2.3 能量守恒方程

能量守恒方程主要针对流动过程中的热传递,即单位时间内进出控制体的热量之差加上热源产生的热量与控制体热能增量相等。热传导关系式为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\varphi}{\rho c}$$

式中  $\tau$  为时间  $\lambda$  为气体循环定容增压比  $\rho$  为流体比热  $\varphi$  为热源在单位时间内产生的热量。

对流换热过程的数学关系式为：

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + U \frac{\partial t}{\partial x} + V \frac{\partial t}{\partial y} + W \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

式中  $U, V, W$  分别为  $x, y, z$  轴方向的变量参数。

运用在 Fluent 模拟计算中的能量方程式为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j' h_j' J_j' + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}} \right) + S_h$$

式中  $k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_j' h_j' J_j' + u_j(\tau_{ij})_{\text{eff}}$  为热量传导、组分传输和黏性耗散造成的能量传动  $h$  为比焓  $S_h$  表示黏性耗散带来的能量输运项,包括化学反应热及其它控制体热源项  $k_{\text{eff}}$  为有效传热系数  $J_j$  是组分  $J$  的扩散流量。在上式中：

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$$

理想气体的显焓数学关系式为：

$$h = \sum_j' m_j' m h_j'$$

在上式中  $m_j$  是组分  $J$  的质量分数,其满足关系式：

$$h_j' = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,j}' dT$$

### 3 数值模拟结果与分析

#### 3.1 温度场模拟结果及分析

温度场是燃烧及传热数值计算中最重要的一个物理场,是衡量炉内状况的重要依据。图3是熔铝炉内的温度分布情况。



图3 熔铝炉内的温度场分布图

由温度场分布可看出,炉内火焰较长,几乎贯穿整个炉膛,燃烧温度较高,有利于铝料的熔化。烧嘴倾斜一定的角度,使高温气流冲向熔池液面中心,大

大加强了炉内气体与铝料的对流传热,炉内火焰充满度较好,温度场分布均匀,能够加快熔池内铝料的熔化速度。

#### 3.2 速度场模拟结果及分析

从图4可以看出,炉内气体流动方向与火焰方向一致,沿烧嘴倾斜方向向前流动,从铝液表面流过,遇到炉膛末端壁面后形成回流,延长了高温气体在炉内的停留时间,有利于增强炉内换热。炉内温度分布与炉内速度分布相对应,炉内气流速度较高的区域其温度也较高,这是因为速度较高的区域内气体对流传热效果明显,炉内流场分布是合理的,满足设计要求。

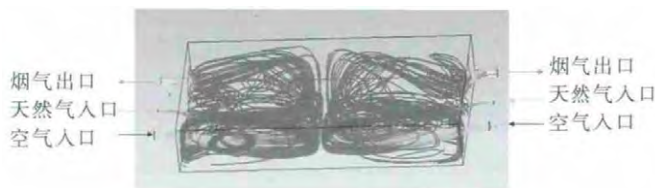


图4 熔铝炉内的速度场分布图

### 4 应用效果

为验证其效果,采用不切换蓄热式燃烧技术对佛山一台50 t熔铝炉进行了节能改造,效果显著。吨铝天然气消耗由原来的70 m³下降到63 m³,下降10%。目前,天然气价格为4元/m³,吨铝可节省天然气费用28元;按50 t熔铝炉年产铝棒5万t计算,每年可节省天然气费用140万元。改造费用大约70万元,投资回收期6个月。

燃料不切换蓄热式燃烧技术在50 t熔铝炉上的应用可节省10%的燃料,按年产50 000 t铝计算,每年可节省天然气费用140万元,值得在同行业中大力推广。

#### 参考文献：

- [1] 周明艳,杨明德,党杰.蓄热式热氧化器处理挥发性有机化合物[J].环境保护,2001(11):16-19.
- [2] 周怀春,盛锋,姚宏,等.高温空气燃烧技术——21世纪关键技术之一[J].工业炉,1998(1):19-27.
- [3] 曹丰平,刘江.蓄热式燃烧技术实际应用中几个问题的探讨[J].工业炉,2002,24(4):20-22.
- [4] 唐剑,王德满,刘静安,等.铝合金熔炼与铸造技术[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [5] 罗启全.铝合金熔炼与铸造[M].广州:广东科技出版社,2002.
- [6] 岑可法,樊建人.燃烧流体力学[M].北京:水利电力出版社,1991.