

# 一种新型空气加热器的研究

李文蛟<sup>1</sup>, 李玲<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 动力系, 辽宁 大连 116023; 2. 大连建筑设计研究院, 辽宁 大连 116021)

**摘要:**介绍了一种新型、高效的空气加热器, 对其进行了理论分析, 并编制了数值计算程序, 其结果得到试验验证。

**关键词:**加热器; 强化换热; 数值计算

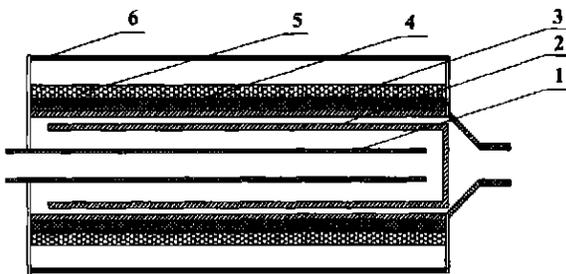
中图分类号: TG307 文献标识码: A

## 1 引言

高温空气在暖通、锅炉等领域都有特殊重要的作用。作者就一种新型空气加热器, 做了理论及试验研究。

## 2 新型空气加热器

高温空气加热器主要由中心管、电发热体、刚玉管组成。电发热体的加热功率可调。空气从中心管的左端进入, 经其右端折回, 流经由中心管及电发热体管形成的环行管后, 再折回进入由电发热体管及刚玉管形成的环行通道后, 从出口排出。从其结构来看, 这是一种紧凑的高温空气加热器(见图1)。



1—中心管; 2—感应管; 3—刚玉管; 4—保温层; 5—线圈; 6—外壳

图1 高温空气加热器简图

## 3 理论研究

用理论计算的方法进行换热过程计算, 掌握其中的换热规律, 发现可能出现的传热恶化区, 对高温空气加热器的设计、选择高温换热器的材料都很有

必要。

### 3.1 各换热面间的辐射传热

在工程意义上, 温度沿中心管和电发热体径(轴)向分布均匀(除前后端部各150 mm)。这是基于如下考虑:

(1) 电发热体发热功率分布均匀;

(2) 高温空气加热器呈横置式长圆柱型, 相对于轴向为无限长;

(3) 中心管或电发热体内外壁换热, 左(右)段内(外)为低温空气, 而左(右)段外(内)为相对高温空气, 使得沿径向向钢管壁面与空气的换热量接近;

(4) 钢管的导热系数较大(钢管: 800 °C时,  $\lambda = 32.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )。

现在分析由电发热体、中心管外壁及前后端盖组成的准密闭空腔里的辐射传热。

空气可以认为是一种透明介质。

由于,

$$2 \times F_d / F_{1W} = 0.044$$

式中,  $F_d$  为该空腔的端盖面积,  $F_{1W}$  为中心管外表面积。

这样, 可忽略空腔体中与端盖发生的辐射换热。电发热体与中心管之间可以认为是两个灰体间的辐射换热:

$$Q_{2 \rightarrow 1} = \epsilon_s F_{1W} \cdot 5.67 \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right]$$

式中,  $T_1$  为中心管壁温;  $T_2$  为电发热体壁温;  $\epsilon_s$  为系统黑度。

同样可获得电发热体与刚玉管内表面之间的辐射换热公式。

### 3.2 空气流与高温壁面之间的强迫对流换热

空气流在高温空气加热器中, 经历了三种换热过程: 其一, 在中心管内的强迫对流换热; 其二, 在由电发热体内壁、中心管外壁组成的环管中的对流换热; 其三, 由电发热体外壁及刚玉管组成的环管中的

对流换热。

本计算模拟的最小空气流量为  $V_{g,293K} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$ , 通过一些计算, 所设计工况应该进入强湍流区。

空气流在高温空气加热器中的第一个换热段, 属于恒壁温湍流换热。

在此换热段, 可采用以下换热准则方程:

$$Nu_f = 0.027Re_f^{0.8} Pr_f^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

由此所得的换热系数, 应再乘以管长修正系数  $\epsilon_1$ 。

对于空气流在高温空气加热器中的第二、三个换热段, 作为近似, 可用下式计算:

$$Nu_D = 0.023Re_D^{4/5} Pr^n$$

对于加热情况,  $n = 0.4$ , 对于冷却情况,  $n = 0.3$ 。

3.3 高温空气加热器与外围的散热

由于前后端盖处做了很好的保温处理, 空气从此处的散热可忽略。

高温空气加热器沿径向的散热, 可如下计算:

$$Q_s = KF(T_3 - T_c)$$

式中,  $K$  为传热系数,  $F$  为径向散热面积,  $T_3$  为刚玉管内壁温度,  $T_c$  为保温层外侧温度。

3.4 高温空气加热器各高温换热面及空气流主要点温度计算

考虑到高温空气加热器各高温换热面及空气流各阶段的能量守恒, 可形成以下六个方程:

$$Q_{d11} = H_1 - H_0$$

$$Q_{d12} + Q_{d21} = H_2 - H_1$$

$$Q_{d22} + Q_{d31} = H_3 - H_2$$

$$Q_{f21} = Q_{d11} + Q_{d12}$$

$$Q^* = Q_{f21} + Q_{f23} + Q_{d21} + Q_{d22}$$

$$Q_{r23} = Q_{d31} + Q_s$$

式中,  $H_0, H_1, H_2, H_3$  分别为空气流道中各关键点的焓值;  $Q_{d11}$  为中心管内侧与空气流的对流换热量,  $Q_{d12}$  等类似;  $Q_{f21}, Q_{r23}$  分别为发热管与中心管及刚玉管之间的辐射换热。  $Q^*$  是发热管的功率。空气的焓值可拟合为温度的函数。上述方程包含六个待求量: 中心管、电发热体管及刚玉管壁温  $T_{1w}, T_{2w}, T_{3w}$ ; 空气流关键点  $T_1, T_2, T_3$ 。这是一组带有复杂隐含关系的闭合方程。

作者为此进行了数值计算。

4 试验研究

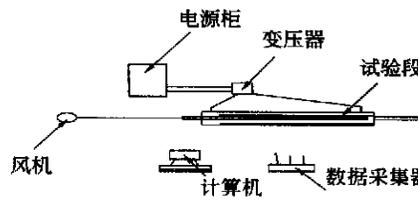


图 2 高温空气加热器试验系统图

图 2 为试验系统。

试验系统包括: 电源柜、变压器、高温换热器以及由数据采集器、

计算机组成的数据采集系统。数据采集采用: HP34970A DATA ACQUISITION/SWITCH UNIT, 它可间隔扫描多达 50 000 个带有时间标记的读数; 带有用于 Microsoft Windows 的 Benchlink data logger 程序软件; 每台仪器有 60 个通道(120 个单端通道)。

高温空气加热器中测点布置见图 1。

5 数据计算与试验结果

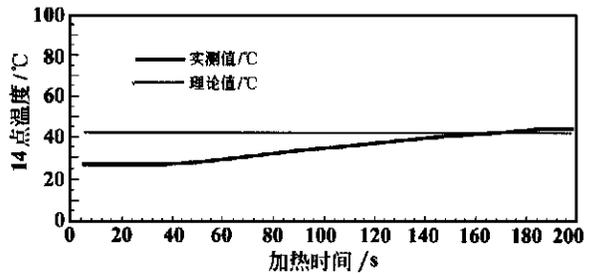


图 3 空气流道 14 测点温度实测值与数值计算结果比较

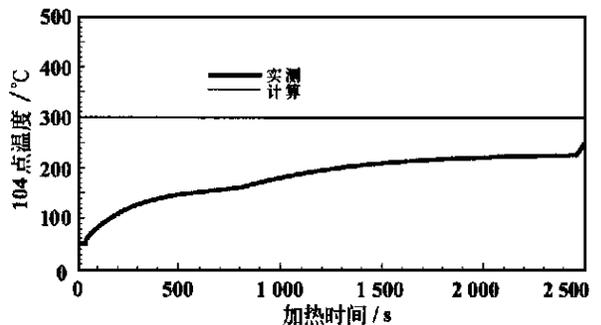


图 4 空气流道 104 点实际测温与理论值的对比

6 结语

(1) 这是一种新型高效换热器;

(下转第 480 页)

在较大的压差, 导致射流并不沿假想切圆轨迹运动而向炉膛外侧偏转直至贴壁, 致使实际力臂增大, 从而促使输入角动量流率增加, 进而导致旋流数大大增加。图 5 为一号喷口射流两侧压差沿炉膛高度的分布(静压的测量使用了自制的圆盘型静压探针)。正是这样的压差分布造成了实际射流的偏转, 导致了旋流数的增加。这一发现对锅炉的设计校核具有重要的指导意义。

从图 4 中还可以看到, 炉内气流旋转强度( $S_w$ )在燃烧器区呈现出沿高度方向两端低、中间高的分布特点:(1)在燃烧器的中下部(A区), 旋流数随炉膛高度逐渐增加直至在燃烧器的中部达到最大值。在这个区域, 旋涡生成并加强, 这对切向炉煤粉射流的着火与燃烧非常有利;(2)在燃烧器中上部以上区域(B-D)区, 气流旋转强度逐渐衰减, 在前半段(B区)衰减较快, 而后(C区)趋于平缓, 在折焰角处(D区)衰减又加快; 由试验数据可得, 从燃烧器中上部到折焰角端头, 旋流数从最大值 7.92 衰减到 3.41, 只衰减了 57%, 从数值模拟结果计算, 衰减是 49.9%。虽然两者有一些差别, 但都清楚地表明直到水平烟道底部截面仍然有未完全衰减的气流旋流强度, 即通常所说的残余旋转。该残余旋转导致了水平烟道入口截面左右侧的速度偏差, 进而造成该部位的烟温偏差。

对气流旋流数分布规律的分析可知, 残余旋转的强度与炉内最大气流旋转强度在燃烧器中上部以上区域被衰减的程度有关。因此, 以下措施可以用来从锅炉结构上减少残余旋转:(1)在燃烧器的上部采用顶部风或二次风反切, 可以加速主旋转气流的衰减而且对燃烧器下部区域流场影响较小;(2)适当增加炉膛高度使旋转气流的衰减过程加长;(3)适当

改变折焰角的结构(如加深折焰角), 使在折焰角区旋流数的衰减被加快。

### 5 结论

通过冷模试验与数值模拟均发现, 对应于 HG—2008—YM2 型锅炉的原设计工况, 在燃烧器区, 射流两侧存在较大的压差, 致使射流偏转贴壁, 实际切圆增大, 旋转气流角动量流率增加, 从而导致炉内实际旋流数远远大于按燃烧器设计结构所得的旋流数, 约为原设计结构下的 4~9 倍。同时, 旋流数在炉内呈现为两端低、中间高的分布特点。在燃烧器的中上层旋流数达到最大值, 然后随炉膛高度增加逐步衰减, 但其衰减较慢, 在水平烟道底部截面还存在较强的残余旋转, 这是导致水平烟道入口截面烟气偏差的主要原因。本文的发现在工程上对锅炉的设计校核和残余旋转的防治具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 张文宏, 许晋源. 切向燃烧煤粉炉的回顾和展望[A]. 中国动力工程学会锅炉燃烧技术学术会议论文集[C]. 武汉: 中国动力工程学会, 1996. 8; 51—53.
- [2] 陈济榕, 华洪渊. 300 MW 亚临界锅炉的研制、改进与发展[A]. 见: 机械工业部重大装备司主编. 300 MW、600 MW 火电机组引进技术总结文集[C]. 杭州: 机械工业部, 1996: 79—88.
- [3] 岑可法. 锅炉燃烧试验研究方法及测量技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [4] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [5] 李彦鹏, 许晋源. 大型锅炉屏区三维流场的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 1999. 19(2): 106—108.

( 辉 编辑 )

(上接第 476 页)

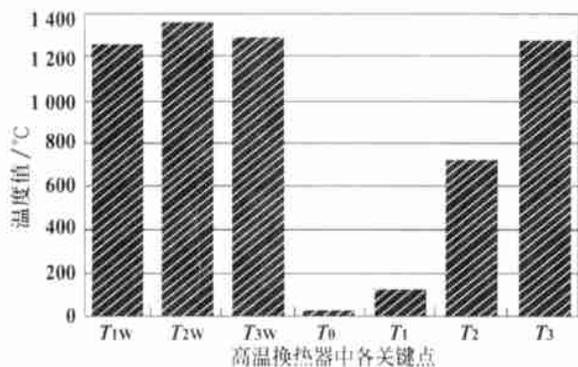


图 5  $P=8000\text{ W}$  时换热器的模拟结果

(2) 所建立的数值计算方法可信, 可用于该型加热器的设计;

(3) 产品设计时, 应注意电发热体的强度及寿命。

### 参考文献:

- [1] 屠传径. 高温传热学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1993.
- [2] 江尧忠. 工业电炉[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [3] SUSUMU KOTAKE, KUNIO HIJIKATA. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow on a personal computer[M]. TOKYO: ELSEVIER 1993.

( 辉 编辑 )

国外全自动燃油燃气燃烧机现状及发展趋势= **The Present Status and Development Trend Worldwide of Full-automatic Oil Combustion Engines** [刊, 汉] / HUANG Si-ming (Hunan Provincial Machinery Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 467 ~ 470  
A description is given concerning oil combustion engines in respect of their product standardization, comprehensive automation and assembly-line production. In addition, the above-cited engines are also analyzed with a focus on the following aspects: atomization mechanism, combustion air distribution, air fan design, air-oil ratio, energy savings potential, environmental protection, automatic control system and engine operation safety and protection. The engine development trend is also briefly discussed with regard to combustion techniques and multi-fuel firing capability, etc. **Key words:** fuel oil, fuel gas, full-automatic combustion engine

水处理固体废物用作燃煤脱硫添加剂的实用性= **The Practical Use of Solid Waste from Water Treatment as a Desulfurization Additive During Coal Combustion** [刊, 汉] / RAN Jing-yu, ZHANG Li, CUI Yan-peng (Energy and Environment Research Institute under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 471 ~ 474  
An experimental research is conducted of the mechanism of using solid waste from water treatment as a desulfurization additive during coal combustion. The experimental research results show that the above-mentioned solid waste can effectively catalyze a desulfurization reaction and lower the  $\text{CaSO}_4$  decomposition speed under high temperatures. As a result, the optimum desulfurization temperature during coal combustion can be made to further approximate the coal burning temperature, thereby enhancing the desulfurization efficiency during coal combustion and increasing the utilization rate of calcium. The use of the solid waste from water treatment as a desulfurization additive involves a simple implementation system and flow process. It is conducive to a decrease in emissions of solid waste from water treatment, thus alleviating pollution to water body. In addition, the emissions of  $\text{SO}_2$  during coal burning can also be effectively diminished. **Key words:** solid waste from water treatment, coal burning, desulfurization additive, usage practicality

一种新型空气加热器的研究= **A Study of a New Type of Air Heater** [刊, 汉] / LI Wen-jiao (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 110000), LI Ling (Dalian Institute of Architectural Design & Research, Dalian, China, Post Code: 110000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 475 ~ 476, 480  
A novel and high-efficiency air heater is presented along with its theoretical analysis and numerical calculation. The results of the calculation were verified through relevant tests. **Key words:** heater, intensified heat exchange, numerical calculation

切向燃烧锅炉炉膛内旋流数分布的研究= **An Investigation of the Distribution of Swirl Numbers in the Furnace of a Tangentially Fired Boiler** [刊, 汉] / LI Yan-peng, Xu Yi-qian (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), DIAO Yong-fa, Xu Jin-yuan (Thermal Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 477 ~ 480

With regard to a 600 MW tangentially fired boiler cold-state tests and numerical simulation were conducted with an in-depth study on the distribution law of swirl numbers, which characterize gas flow swirl intensity. It has been found that the actual swirl numbers in the boiler are by far greater than those selected during the design verification of the boiler. Some measures are proposed for lessening residual swirl flow from the viewpoint of boiler structural design. The present study can be of immense help for boiler design verification and the prevention of residual swirls. **Key words:** tangentially fired boiler, three-dimensional hot-film anemometer, swirl number, residual swirl