

## 切向燃烧锅炉炉膛内旋流数分布的研究

李彦鹏<sup>1</sup>, 徐益谦<sup>1</sup>, 刁永发<sup>2</sup>, 许晋源<sup>2</sup>

(1. 东南大学 热能工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 西安交通大学 热能工程系, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对哈三电厂 600 MW 四角切向燃烧锅炉分别进行了冷态试验与数值模拟, 重点研究了表征气流旋转强度的旋流数的分布规模, 发现炉内实际旋流数远远大于锅炉设计校核时所用的旋流数, 并提出从锅炉结构上减少残余旋转的措施。作者的研究对锅炉的设计校核及残余旋转的防治具有重要意义。

**关键词:** 切向燃烧炉; 三维热膜风速仪; 旋流数; 残余旋转

中图分类号: TK224.1 文献标识码: A

## 1 前言

我国从 20 世纪 80 年代初期开始相继引进美国 CE 公司技术设计制造 300 MW 以上容量的电站锅炉。目前, 机组各项性能基本上均达到了预期的目标。但是近年来, 在一大批采用切向燃烧方式的大容量电站锅炉上, 陆续发现炉膛出口水平烟道左右两侧存在较明显的烟气侧偏差 (Gas Side Energy Imbalance, 简称 GSEI), 危及到受热面的安全运行, 爆管事故时有发生。这一问题已引起了人们的普遍关注。

对烟气偏差的产生原因学术界较一致的看法是由残

余旋转所致<sup>[1]</sup>。对于切向燃烧, 烟侧偏差大小与炉膛出口气流残余旋转强度成正比, 此强度可用残余旋流数来表示。多年来, 美国 ABB-CE 公司一直采用旋流数来评估旋涡的强弱, 目前国内几家大锅炉厂在切向炉设计中都要求核算炉内旋流数<sup>[2]</sup>。可见, 炉内旋流数这一参数日益受到锅炉设计者和研究者的重视, 对它的研究是十分必要的。本文作者通过试验测量与数值模拟两种方式对大型四角切向燃烧锅炉模型中的旋流数分布进行了重点研究。

## 2 试验系统

试验以哈尔滨锅炉厂采用美国 ABB-CE 公司

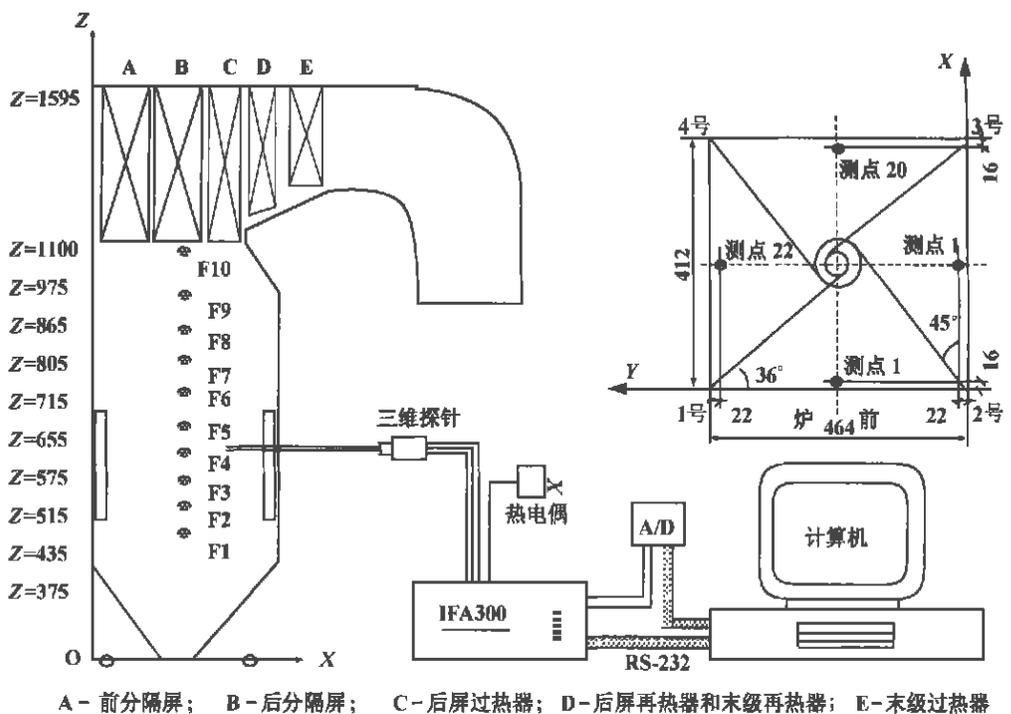


图 1 试验系统和测点布置示意图(单位: mm)

技术制造的 HG-2008/18.2-YM2 型切向燃烧锅炉(哈三工程)为原型,采用 Thring-Newby 模化方法,建立了 1:40 的模型试验台。燃烧器喷口不区分一二次风而制成统窗风,燃烧器作常见的逆时针布置。试验系统与测点布置如图 1 所示。其中,截面 F2~F5 对应于燃烧器一次风喷口,F10 截面为折焰角喉部断面,每一截面沿炉宽方向的中心线等间距(20 mm)布置 22 个测点,沿炉深方向的中心线等间距(20 mm)布置 20 个测点。

气流速度及其湍流特征量采用 TSI 公司生产的 IFA 300 型三维热膜风速仪系统测量。该系统由三维探针、IFA300 恒温式风速计、测温热电偶、高速多通道 A/D 转换板、数据采集与分析软件(TheMalpro 软件包)等组成(如图 1 右下部所示)。系统利用“SmartTune”自动电桥优化技术,对每个通道的线路进行自动调节和优化。系统配有内置式的热电偶测温电路,可自动测量被测流体的温度,以便对速度的测量结果进行实时修正。数据采集和处理过程完全由计算机进行实时控制,过热率的调节和信号调节器的设置可在窗口式 RS232 界面上进行,高速采集的模量电信号由 ADCWIN-16 A/D 转换板转变为数字信号输入计算机,数据的采集和处理可由 THERMAL PRO™ 软件完成。测速探针采用三维热膜探针,利用 1129 型全自动速度标定仪对探针进行标定,得出标定速度和热膜风速仪输出电压的函数关系式,标定精度为 ±0.5%。试验中,热膜风速仪的采样频率 20 kHz,采样时间为 0.0512 s。

试验中保证炉膛内总体上升气流的  $Re$  数要达到第二自模化区才能得到与实际情况较一致的流动结构<sup>[3]</sup>。试验工况为原设计结构,炉内总风量 0.695 m<sup>3</sup>/s,炉内雷诺数  $Re=1.1 \times 10^5$ ,已进入自模化区。

### 3 数值模拟

电站锅炉炉内气体的流动是复杂的三维湍流流动,它由时间平均的质量、动量守恒方程描述,湍流模型选用成熟的  $\kappa-\epsilon$  双方程模型。稳定状态下控制方程的通用形式为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i}) + S_{\Phi} \quad (1)$$

式中,  $\Phi$  代表通用变量,  $S_{\Phi}$  为通用变量  $\Phi$  的源项,  $\Gamma_{\Phi}$  代表了变量  $\Phi$  的有效扩散系数。

数值模拟采用 SIMPLE 方法<sup>[4]</sup>。炉膛壁面处采用

壁面函数进行修正计算。计算区域包括灰斗、折焰角和分隔屏,被划分成 33 × 35 × 43 的不等距网格系统。对于炉膛上部的屏式受热面,采用空度<sup>[5]</sup>方法处理;用 QUICK 格式以减少伪扩散产生的影响。计算工况为试验工况。

## 4 结果及分析

### 4.1 炉内气流速度分布

图 2 示出了由三维热线风速仪测得的 F4 测孔前墙附近某测点处速度的采样图谱。由于炉内四股射流混合强烈,加上风机本身的波动,炉内流场的脉动十分复杂,湍动十分强烈。图中,该点的  $u$  速度分量在测量的 0.0512 s 内,瞬时值的波动范围为 11.80 ~ 22.34 m/s。图中还能看到该系统能够同时给出湍流流场的三个瞬时速度分量,为完整地认识炉内流动提供了方便。

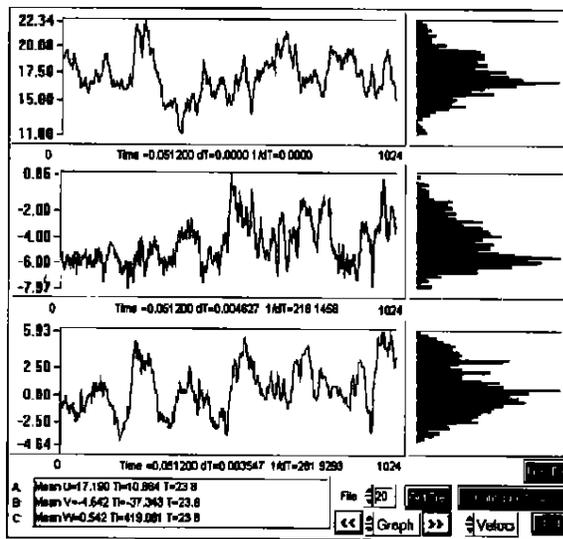


图 2 燃烧器区某点处速度三个分量的采样图谱

图 3 给出了由试验和数值模拟得到的炉膛内三个水平截面上气流切向速度分布。可见两者符合得很好。在燃烧器区域,由于四角射流的相互作用,形成基本对称而均匀的切圆流动;壁面附近有较大的切向速度,表明在原设计结构下气流在燃烧器区域就已经贴壁,致使各截面的实际切圆远大于炉膛的假想切圆。在燃烧器以上,切圆流动扩展,切向速度最大值向边壁区外移,切圆加大,气流贴壁现象明显。图中还可以看到,气流切向速度沿炉膛高度方向逐渐减小,在折焰角下沿平面(F9 截面),气流仍存

在较大的切向速度 (7 ~ 8 m/s), 这说明炉内气流的旋转沿炉膛高度是逐渐减弱的, 在炉膛出口还有明显的逆时针旋转气流, 即残余旋转。

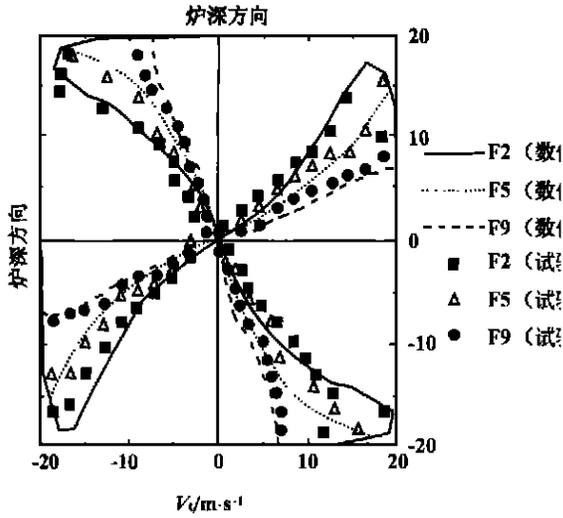


图 3 炉内水平截面切向速度分布

#### 4.2 旋流数分布

图 3 表明气流从四角喷入炉内, 在炉膛中心形成了一强烈旋转的上升旋涡。研究炉内该旋涡的演变规律对掌握和控制炉膛出口残余旋转无疑是非常重要的。因此, 文中引入工程校核常用的旋流数 (Swirl Number, 以  $S_w$  表示) 这一参数来表征炉内旋转气流的旋转强度。其定义为:

$$S_w = \frac{\text{角动量流率}}{\text{竖直动量流率} \times \text{炉膛横截面水力半径}} \quad (2)$$

工程上对锅炉设计校核时, 常常由燃烧器的设计结构来计算旋流数。此时, 输入炉膛的角动量流率可以用燃烧器出口速度和设计力臂计算, 轴向动量流率由烟气质量流率乘以烟气平均上升速度求得, 即

$$G_\phi = \rho_0 V_m^2 \sum f d_0 / 2 \quad (3a)$$

$$G_x = \rho_0 V_m \sum f \bar{w} \quad (3b)$$

式中,  $G_\phi$  为角动量流率 (或切向动量流率矩),  $G_x$  为轴向动量流率,  $V_m$  为燃烧器出口速度,  $d_0$  为假想切圆直径,  $\bar{w}$  为炉内烟气平均上升速度,  $\sum f$  为燃烧器喷口总面积。根据式 (3), 计算得到的哈三电厂 HG-2008/18.2-YM2 型锅炉在原设计结构下燃烧器出口处旋流数为 0.858 6。

上式表明给定锅炉结构其炉内旋流数也就给定。而事实上, 对于切向燃烧锅炉, 以上按燃烧器结构特性所求得的旋流数, 并不能代表炉内旋转射流的实际情况, 因为燃烧器各层的炉膛角动量流率应该用燃烧器一部分出口该层以下的速度和力臂来算, 也即燃烧

器区各层角动量流率是变化的。因此, 当已知炉内截面速度分布时, 通过每一炉膛截面的烟气质量由于旋转而引起的角动量流率, 应由下式计算:

$$G_\phi = \text{旋转气流动量流率} \times \text{实际力臂} \\ = \int_0^R \rho w U \cdot r \cdot 2\pi r dr \quad (4)$$

而轴向动量流率  $G_x$  为:

$$G_x = \int_0^R \rho w \cdot w \cdot 2\pi r dr \quad (5)$$

式中:  $U$  为切向速度分量,  $w$  为轴向竖直速度分量,  $r$  为实际气流旋转半径。从而旋流数应为

$$S_w = \frac{[\sum_{i=1}^n (U_i w_i \Delta r_i \cdot r_i^2) + \sum_{j=1}^m (U_j w_j \Delta r_j \cdot r_j^2)] / 2}{D_e [\sum_{i=1}^n (w_i^2 \Delta r_i \cdot r_i^2) + \sum_{j=1}^m (w_j^2 \Delta r_j \cdot r_j^2)] / 2} \quad (6)$$

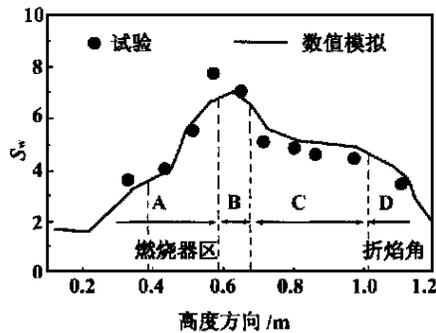


图 4 炉内旋流数沿炉膛高度分布

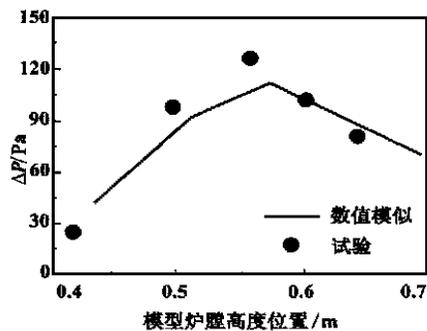


图 5 一号喷口两侧射流压差沿炉膛高度的分布

这里,  $U_i$  和  $U_j$  分别表示炉宽方向和炉深方向各测点的切向速度,  $w_i$  和  $w_j$  分别表示炉宽方向和炉深方向各测点的轴向上升速度,  $r_i$  和  $r_j$  分别表示炉宽方向和炉深方向各测点到炉膛中心的距离,  $\Delta r_i$  为相邻测点距离。

根据试验测量和数值模拟, 由式 (6) 计算得到的

旋流数分布如图 4 所示。图中可以看到, 试验与数值模拟结果基本吻合。而且从两者的结果还可以发现, 炉内旋流数的范围约为 4 ~ 8, 远大于按燃烧器设计结构所得的旋流数 (0.858 6), 约为原设计结构下旋流数的 4 ~ 9 倍。分析其原因, 认为在原设计结构下, 由于燃烧器出口射流受邻角气流冲撞, 补气条件和燃烧器结构特点等多种因素影响, 射流两侧存

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)

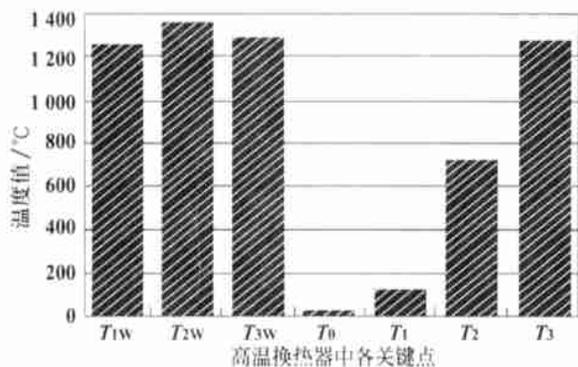


图 5  $P=8000\text{ W}$  时换热器的模拟结果

(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