

六角燃烧锅炉同心双切圆流场的数值模拟研究

赵玉晓¹, 李瑞扬¹, 吕薇², 王士军¹

(1. 哈尔滨工业大学 能源学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨理工大学, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:应用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型和颗粒随机轨道模型, 对燃烧器采用墙式布置的锅炉燃烧器区域的流场进行数值模拟, 将上层燃烧器一、二次风射流布置成同心双切圆形式, 通过对流场特性变化的分析, 研究原型受热面的结渣原因, 寻求解决方案。

关键词: $k-\epsilon$ 双方程湍流模型; 颗粒随机轨道模型; 同心双切圆

中图分类号: TK224 文献标识码: A

1 前言

切向燃烧炉膛内的气流流动是带有强回流的三维湍流流动, 其机理非常复杂, 国内外对于四角切圆燃烧的研究已初具规模^[1-2], 但六角切圆燃烧炉膛的特性不能由其它类型的试验所得, 国内学者做的研究在工程应用中效果并不理想。

虽然模化试验是探索复杂气流流动规律的一种十分有效可行的手段, 但进行模化试验需要大量的人力、物力和资金, 试验周期长, 而且模化试验总是在一定的范围内进行, 受到许多客观因素的限制; 另外, 将试验结果外推本身就是一种近似。随着计算机运算速度的迅速提高, 计算传热学、计算流体力学等学科的不断完善, 数值模拟技术与试验研究日益结合起来, 数据模拟是对试验研究成果的检验和补充。

2 数值模拟概述

数值模拟的对象为某 670 t/h 六角切圆燃烧煤粉炉的冷态试验模型, 原型的六组燃烧器分别布置在炉膛四壁, 前后墙各两组, 两侧墙各一组。借鉴四角切圆燃烧煤粉炉解决受热面结渣问题的经验, 提出将上层燃烧器一、二次风改为同心双切圆布置形式, 应用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型模拟空气动力场、颗粒随机轨道模型模拟颗粒的湍流扩散^[3-9], 通过改

进前后燃烧器区域流场特性的对比分析, 得出解决六角切圆燃烧煤粉炉受热面结渣的措施, 为工程实际提供指导。

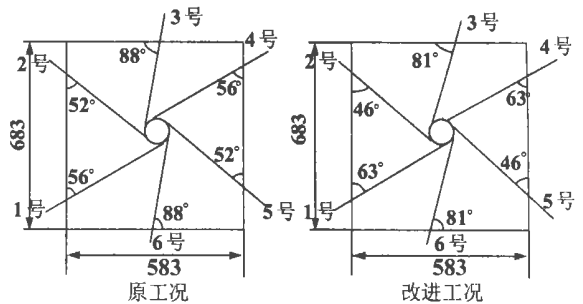


图1 试验方案示意图

试验方案:将上层燃烧器的二次风射流的假想切圆直径由 1 000 mm 加大到 1 500 mm, 即 1 号和 4 号燃烧器二次风射流中心线与前后墙夹角由 56° 增大到 63° , 2 号和 5 号燃烧器二次风射流中心线与前后墙夹角由 52° 减小到 46° , 3 号和 6 号燃烧器二次风射流中心线与侧墙夹角由 88° 减小到 81° , 如图 1 所示。

对计算区域采用交错、非均匀网格 ($46 \times 100 \times 41$), 把燃烧器及固体壁面附近区域划分得密集一些, 且在燃烧器区域, 网格划分尽量使每个喷口及间距各为一个网格, 以便于按节点取截面数据, 而把其它区域划分得较稀疏, 这样既能保证计算精度又能缩减计算时间和计算内存的占用。为了避免非线性问题的发散, 采用欠松弛迭代的变松弛系数法。

3 数值模拟结果分析

3.1 一号角区域

图 2 和图 3 分别为原工况和改进工况一号角区域中层 + 30 mm 截面气相速度矢量图。可见, 沿炉膛深度方向, 射流速度不断衰减, 损失能量而使射流刚性降低, 同时受到上游气流的冲击, 开始发生偏

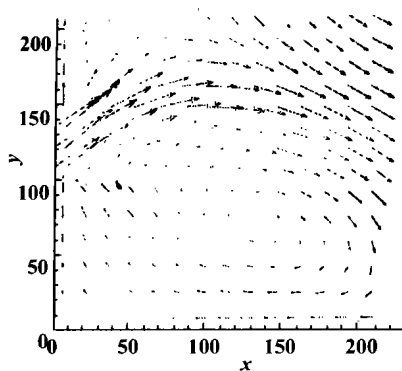


图 2 原工况 一号角中层+30 截面气相速度矢量图

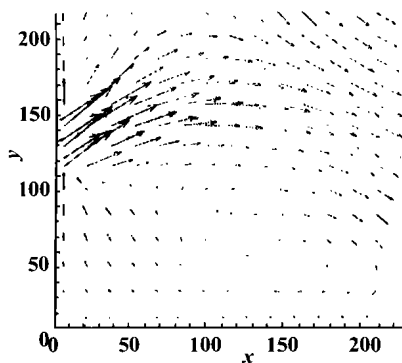


图 3 改进工况 一号角中层+30 截面气相速度矢量图

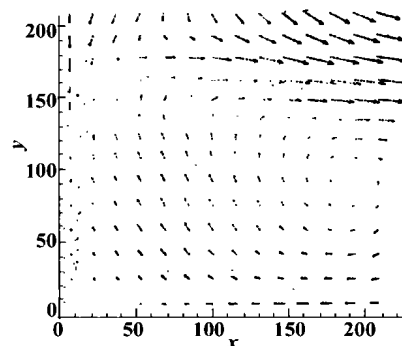


图 4 原工况 一号角上层+80 截面气相速度矢量图

壁面附近基本上不会出现还原性气氛, 大大有利于抑制结渣现象的发生; 整个 1 号燃烧器根部旋涡的旋转强度明显减小, 旋转动量降低。

图 4 和图 5 分别为原工况和改进工况一号角区域上层+80 mm 截面固相速度矢量图。由于颗粒相具有较大的惯性, 其旋转要强于气相, 气相更容易受到主旋转气流的卷吸。由于角部二次旋涡消耗了许多能量, 主旋转气流的旋转强度沿炉膛高度方向衰

转。扩散射流对侧墙燃烧器射流的冲击较强, 部分扩散射流在与侧墙燃烧器撞击前的速度方向为水平方向, 动量较大, 碰撞后, 其中大部分与侧墙燃烧器射流一起溶入主旋转气流, 少部分被侧墙燃烧器射流反弹回来, 动量衰减较大。由于燃烧器采用墙式布置, 炉膛角部存在较大的自由空间, 从而在炉膛角部形成了一定旋转直径的二次旋涡(相对于炉膛中心主旋涡而言)。改进前后的矢量图对比可见, 改进后射流初期的直段长度增加, 偏转较晚; 二次风旋转动量矩增大, 炉内旋转强度增加; 左侧墙近壁处气流速度大大降低, 对壁面的冲刷程度减轻, 使锅炉在热态运行时,

减加快, 旋转较弱。在热态情况下, 由于轴向速度比冷态大, 切向速度比冷态小, 主旋转气流轴向上升速度快, 但旋转要弱于冷态, 因此煤粉颗粒在炉膛内停留时间比冷态更短, 影响了煤粉颗粒的燃尽。对比改进前后的矢量图, 能够发现流场形式发生了很大变化, 二次旋涡已被炉内旋转气流挤碎, 不能够形成明显的旋转, 破碎后的大部分含粉气流被卷吸进入主旋转气流, 大大减少了不参与炉内旋转而直接贴壁上到炉膛出口的煤粉颗粒的数量; 角部旋涡几乎消失, 炉膛中央气流切圆直径加大, 炉膛充满度变好。可见, 适当加大假想切圆直径, 使上游邻角过来的火焰气流更靠近射流根部, 加强混合, 对煤粉的着火、燃烧和燃尽都有利, 炉膛中的火焰充满度好。但应注意, 过大的切圆直径会使射流冲击炉墙, 含粉气流贴壁的可能性增大, 增大了结渣趋势。

3.2 二号角区域

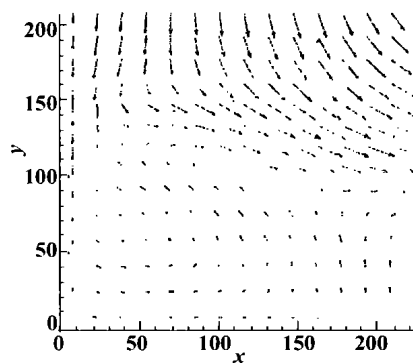


图 5 改进工况 一号角上层+80 截面气相速度矢量图

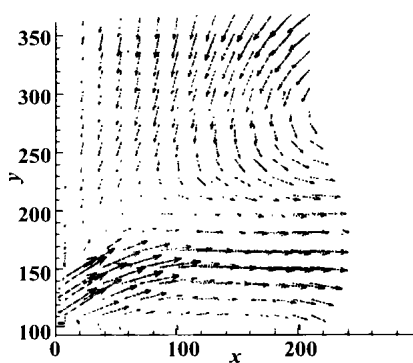


图 6 原工况二号角上层 00 截面气相速度矢量图

图 6 和图 7 分别为原工况和改进工况二号角区域上层 00 mm 截面气相速度矢量图。可见, 由于各燃烧器射流刚性的差异, 炉内主旋转气流并非一动态切圆, 而是呈椭圆形, 二次旋涡内的部分煤粉不参与炉内主气流的螺旋上升运动, 直接被短路到炉膛出口, 势必增大了不完全燃烧热损失和炉膛出口结渣的可能性。改进方案通过加大上层燃烧器二次风假想切圆直径, 炉内主旋转气流旋转较强, 二次风射流刚性增强, 而且二次风与一次风之间有一夹角, 对一次风射流的偏转起到拦截作用, 因此, 一号角上一次风射流抵抗主旋转射流

和上游来流的混合冲击能力加强; 气流旋转曲率半径明显增大, 即炉内切圆直径加大; 2 号燃烧器气流流向左侧墙, 与 1 号燃烧器射流充分接触, 有利于 1 号燃烧器射流接受上游热量, 易于着火。

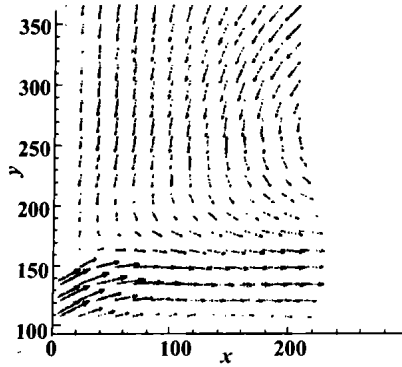


图 7 改进工况二号角上层 00 截面气相速度矢量图

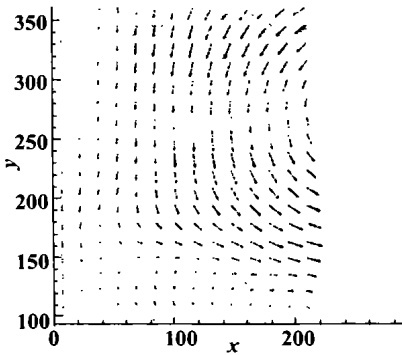


图 8 原工况二号角上层 +115 mm 截面固相速度矢量图

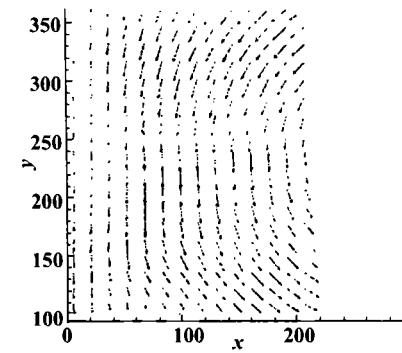


图 9 改进工况二号角上层 +115 mm 截面固相速度矢量图

图 8 和图 9 分别为原工况和改进工况二号角区域上层 +115 mm 截面固相速度矢量图。可见, 贴壁区含粉气流速度下降较快, 容易受到主旋转气流的卷吸; 由于大量含粉气流贴壁, 削弱了主旋转气流的旋转动量, 使主旋转气流在燃烧器上部区域的旋转较弱, 衰减较快, 颗粒在炉膛内的螺旋上升的行程变短; 贴壁区的大量颗粒冲向壁面, 增加了与前墙壁面碰撞后贴壁上升至炉顶的数量。改进后的矢量图与原工况图对比可见, 炉内气流在燃烧器上部区域的旋转速度比原工况大大增强, 旋转曲率半径增大, 旋转动量矩增大, 旋转强度大, 从而能够携带更多的颗粒; 颗粒在前墙边壁

区的衰减速度明显减慢, 在边壁区的速度矢量方向偏向于主旋转气流, 并随其一起旋转, 沿前墙壁面上升的含粉气流进一步减少, 含粉气流对壁面的冲击

减弱。

4 结论

针对上层燃烧器二次风假想圆直径加大前后两种工况, 分别对六角燃烧器出口区域气固两相流场进行数值模拟, 分析这个区域速度场的分布规律, 得出了以下有益结论:

炉内主旋转气流呈动态椭圆形, 气固两相速度很接近, 流场形态相似。加大上层燃烧器二次风假想切圆直径后, 燃烧器及其上部区域炉内主旋转气流的旋转强度和旋转速度有所提高, 并增强了对边壁区域和角部死区颗粒的卷吸能力, 使炉膛充满度变好。颗粒旋转速度明显增加, 大量煤粉颗粒由偏向炉墙方向转向, 加入到主旋转气流中。一、二次风的射流刚性增强, 射流偏转情况和一、二次风相分离现象均有很明显的改善, 有利于抑制结渣现象的发生。

角部二次旋涡内积存了大量的物质和能量, 容易增大不完全燃烧热损失。改进后, 角部二次旋涡的旋转直径和旋转强度都有所减小, 从而减少了不参与炉内旋转而直接贴壁上升到炉膛出口的煤粉颗粒的数量, 即减少了对炉内主气流物质和能量的占用。

由于数值模拟的网格划分得较密, 数值模拟的图线能够更好地反映流场特性, 尤其在细节的地方体现得较清晰。并且能够看出, 数值模拟方法是可行的, 模拟结果是可靠的。

参考文献:

- [1] KAWAGUCHI T. Quasi 3-D numerical simulation of gas-solid two-phase flows [A]. *Proceedings of the International Symposium on Multiphase Flow* [C]. ISMP, Int Acad Publ, 1997. 287-292.
- [2] APSLEY D D. A new low-reynolds-number nonlinear two-equation turbulence model for complex flows [J]. *Int J Heat and Fluid Flow*, 1998, 19(3): 209-222.
- [3] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [4] 张会强. 改进的随机轨道模型 [A]. 中国工程热物学会燃烧学学术会议论文集 [C]. 北京: 中国工程热物学会, 1998. IV72-79.
- [5] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [6] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.

(渠源 编辑)

burning test rig. The measuring and test results are presented. **Key words:** charge-coupled device, temperature measurement, genetic algorithm

基于火焰图像处理的炉膛辐射能信号的检测及分析= **Flame Image Processing-based Detection and Analysis of Furnace Radiation Energy Signals** [刊, 汉] / ZHANG Shi-shuai, ZHOU Huai-chun (Power Engineering Department, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), PENG Min, LIU Wu-lin (Central Testing Institute under the Hunan Provincial Electric Power Bureau, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 166 ~ 168, 182

An on-site detection test was conducted on a 300 MW coal-fired boiler of Xiangtan Power Plant by the use of a flame image processing-based detection system of furnace radiation-energy signals. In addition, an analysis has been performed on the relationship between the furnace radiation energy signals and the boiler main operating parameters. The results of the analysis indicate that the furnace radiation energy signals can to a certain extent not only forecast the actual output of the boiler, but also reflect the combustion conditions in the boiler. **Key words:** coal-fired boiler, flame image, furnace radiation energy, detection method

六角燃烧锅炉同心双切圆流场的数值模拟研究= **Numerical Simulation Study of the Concentric Double-tangential Circular Flow Field of a Hexagonal-fired Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Yu-xiao, LI Rui-yang, WANG Shi-jun, QIN Yu-kun (Energy Source College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LU Wei (Thermal Energy Engineering Department, Harbin University of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 169 ~ 171

By the use of a $k-\epsilon$ dual-equation turbulent flow model and a particle random trajectory model a numerical simulation is conducted of the burner-zone flow field of a boiler, which adopts wall-installed burners. The primary and secondary air jet flow of the upper layer burner has been arranged in the form of a concentric dual-tangential circle. Through an analysis of the variation of flow field characteristics the cause of slag formation on prototype heating surfaces is investigated and a method for resolving the issue sought out. **Key words:** $k-\epsilon$ dual equation turbulent flow model, particle random trajectory model, concentric dual-tangential circle

导热规律服从 $q \propto (\Delta T)^n$ 广义不可逆卡诺热机的最优性能= **Optimal Performance of a Generalized Irreversible Carnot Engine with Heat Conduction Law Subordinate to $Q^{\mu}(DT)^n$** [刊, 汉] / ZHOU Sheng-bing, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (No. 306 Teaching and Research Department under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 172 ~ 175, 179

Taking into account the thermal resistance losses between a working medium and heat source a constant term is used to express heat leakage loss and a constant factor term to express other irreversible items in a cycle plant with the exception of the heat resistance and heat leakage. As a result, set up is an irreversible Carnot engine model. On the basis of another kind of relatively universal heat conduction law, i. e., $Q^{\mu}(DT)^n$ derived is the optimal characteristic relationship between the heat engine power and efficiency. Through detailed numerical calculations an analysis is performed of the effect on the optimal performance of a generalized irreversible heat engine by the heat leakage, internal irreversibility and heat conduction law. **Key words:** finite-time thermodynamics, heat engine, performance optimization

贴体坐标系下求解复杂几何域内的单相流动= **The Solution of a Single-Phase Flow in a Complicated Geomet-**