

# 船用增压锅炉强化燃烧三维有限元分析

张国磊<sup>1</sup>, 朱新源<sup>2</sup>, 李彦军<sup>1</sup>, 温 亮<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨电站工程有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150046)

**摘 要:**以增压锅炉为研究对象, 利用 SIMPLE 方法求解  $N-S$  方程, 对燃烧器的燃烧特性及炉膛传热特性进行了数值计算分析。基于 Fluent 软件的计算结果, 分析得出不同压力下炉膛内部温度场、回流区速度和湍流强度的变化规律, 初步揭示了增压强化燃烧的机理。模拟计算结果表明, 随着炉膛压力的升高, 增压锅炉炉膛换热强度增强, 炉膛容积热负荷明显增大, 为进一步确立增压锅炉炉膛热力计算方法打下一定的理论基础。

**关 键 词:** 增压锅炉; 数值模拟; 强化燃烧; 容积热负荷

中图分类号: TK229; O241.82 文献标识码: A

## 引 言

燃烧是一个复杂的化学反应过程, 燃烧过程要受到可燃混合气体本身的压力、温度等各种特性因素的影响<sup>[1]</sup>。增压锅炉炉膛压力的改变不但会影响燃烧化学反应速率的大小, 而且会使在炉膛内形成的回流区、湍流强度也发生变化, 进而影响到燃烧过程, 因而增压锅炉炉膛燃烧及传热计算与常压锅炉有着很大的区别。采用数值模拟的方法研究增压锅炉炉膛压力对燃烧、传热过程的影响, 在工程应用中具有重要的实际意义, 对理解增压强化燃烧的机理, 优化燃烧过程具有指导意义<sup>[2~3]</sup>。

## 1 增压强化燃烧理论

### 1.1 压力对反应速率的影响

对于一般情况, 如果由实验测得的反应速率与反应物  $A_1, A_2, A_3, \dots$  浓度的关系为:

$$w = kC_{A1}^a C_{A2}^b C_{A3}^c \dots \quad (1)$$

反应级数  $n$  即为各浓度方次之和:

$$n = a + b + c + \dots \quad (2)$$

则化学反应速度与压力的关系为<sup>[4]</sup>:

$$w \propto p^{a+b+c+\dots} \propto p^n \quad (3)$$

### 1.2 压力对火焰传播速度 $u_H$ 的影响

根据火焰传播热力理论可导出火焰传播速度

$u_H$  得:

$$u_H \rho_0 \propto w^{1/2} \quad (4)$$

由式(3)可知:

$$u_H \rho_0 \propto p^{n/2} \quad (5)$$

考虑到  $p \propto \rho_0 RT$ , 则:

$$u_H \propto p^{\frac{n}{2}-1} \quad (6)$$

式(6)表明了火焰传播速度与压力的关系<sup>[1]</sup>。

实验表明一般轻质燃料在空气中燃烧时其总反应级数  $n \leq 2$ , 因此当压力增大时,  $u_H$  有所下降, 但流过火焰面的可燃混合气质量流量  $\rho u_H$  却是增加的, 因而在同样大小的火焰锋面内每单位时间内燃烧的燃料量将是增多的, 这对燃烧的稳定是有利的。

## 2 计算模型和数值方法

### 2.1 锅炉结构

以增压锅炉的炉膛为模拟对象, 几何模型采用 1:1 的比例, 增压锅炉结构如图 1 所示。该锅炉前后炉墙各安装 3 只燃烧器, 炉膛右侧为水冷壁, 左侧为烟气通道, 出口位置布置了对流管束。

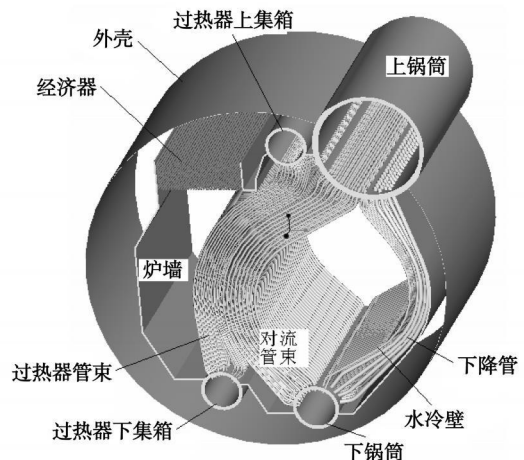


图 1 增压锅炉的结构示意图

模拟计算中, 对水冷壁和尾部受热面进行了筒

化: 由于炉膛水冷壁的管间距很小, 布置在水冷壁后的下降管不受热, 且在下降管区没有烟气的流动, 所以在模拟中将水冷壁面处理成一个光滑的曲面。下降管区没有烟气的出口, 烟气在下降管区没有流动, 故上述的简化是合理的, 且能反应出炉膛的实际情况。同时由于对流管束只对受热面及其周围的流场产生影响, 而对燃烧器周围和水冷壁附近的流场影响不大, 出于只研究燃烧器周围和水冷壁附近的流场的目的, 模型省略了对流管束。最后的炉膛三维计算区域由水冷壁、上下锅筒、前后炉墙及前后各一只燃烧器组成, 计算模型如图 2 所示。

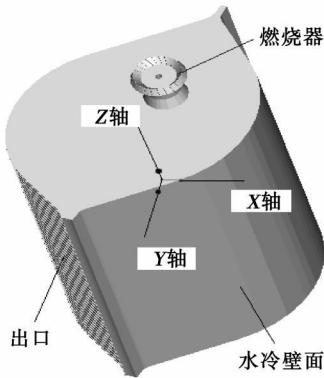


图 2 增压锅炉的三维计算区域

### 2.2 计算网格和数值方法

计算中面网格采用三角形网格, 体网格采用六面体/四面体混合网格, 同时对燃烧器出口附近网格进行了加密, 采用 Fluent 软件进行计算。模拟燃烧

情况下的内部流场分布, 采用 SIMPLE 方法求解  $N-S$  方程。湍流流动的数学模型为标准的  $k-\epsilon$  双方程模型。燃料为重油, 燃油的雾化、加热、蒸发和沸腾的数学模型为离散相模型, 燃油颗粒的轨迹场采用基于拉格朗日的随机轨道方法。采用简单平衡化学反应模型模拟燃油的燃烧反应。

### 2.3 热态模拟计算采用的边界条件

表 1 热态模拟计算的边界条件

	炉膛绝对压力/MPa		
	0.11	0.16	0.28
重油温度/ $^{\circ}\text{C}$	90	90	90
单只燃烧器入口燃油量/ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	0.092	0.214	0.461
过剩空气系数	1.24	1.21	1.15
燃烧器入口空气温度/K	319	358	436

## 3 数值模拟的结果和分析

数值计算模拟了 3 种不同压力下单只燃烧器运行 and 两只燃烧器对冲运行的燃烧情况, 通过模拟炉膛温度、传热量、炉膛内气流的速度分布和湍流度等参数的分布, 初步分析增压强化燃烧的机理。

### 3.1 单只燃烧器模拟结果

#### 3.1.1 单只燃烧器温度场分布

图 3 是  $y=0$  的  $zox$  纵向剖面上 3 种不同压力水平下的燃烧情况, 可以看出: 随着压力的增大炉内温度水平有着显著的提高; 表 2 为单只燃烧器运行模拟计算炉膛最高温度。

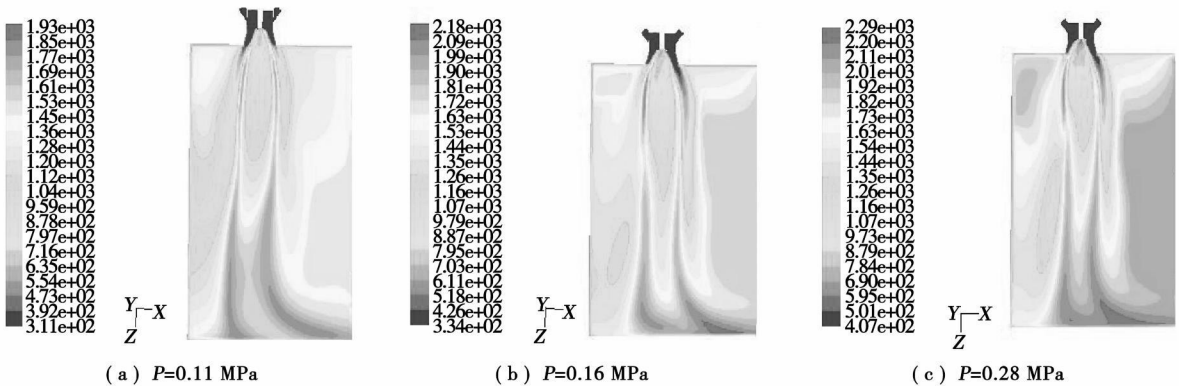


图 3  $y=0$  截面处的温度分布

表 2 单只燃烧器运行模拟计算炉膛最高温度

	炉膛绝对压力/MPa		
	0.11	0.16	0.28
最高温度/K	1 930	2 180	2 290

炉膛温度的升高带来了两方面的好处, 首先温度升高使燃烧的化学反应速度加快, 从而加快了燃烧过程的进行; 其次辐射传热与炉膛温度的四次方成正比, 对流传热与传热温差成正比, 炉膛温度的升

高必然强化传热。

同时在增压条件下, 燃烧室中的压力升高, 供给燃烧的助燃空气量增加, 其流速相应增加, 从而使得空气流与油滴的相对速度增加, 因此增压条件下的燃油颗粒可以雾化得更细, 液滴气化所需时间可缩短, 蒸发速度得到提高, 加快燃烧速度<sup>5~9</sup>。由于液态燃料因压力增加引起的密度变化量很小, 而气态燃料在充足的助燃空气环境中快速燃烧, 因此在增压条件下燃料燃烧得到了强化。

### 3.1.2 单只燃烧器时的速度矢量分布

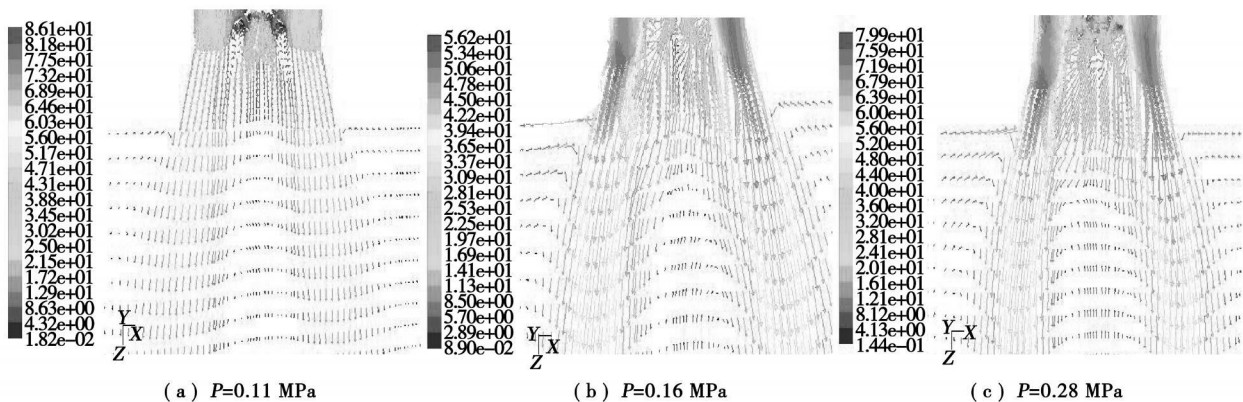


图 4 燃烧器回流区速度矢量分布

从图 4 可以看出, 随着压力的升高, 回流变得越来越大, 回流区也越来越大, 同时回流区的速度有明显的升高。回流区速度的增大, 加大了对混合气体的扰动, 使可燃气体和未燃气体的混合更加均匀; 由于速度的增大, 使对流传热得到了加强, 缩短了油滴蒸发成为油蒸汽的过程, 从而加快了燃烧速度。

由于烟气流动出口方向为燃烧器的左侧, 因而压力不同对燃烧器左侧燃烧回流的影响程度有所不同。从图 3 可以看出, 随着压力的增加, 燃烧器左侧的燃烧回流作用增强, 温度增高。

### 3.1.3 单只燃烧器时水冷壁换热计算

表 3 不同压力下水冷壁换热汇总(单只燃烧器)

炉膛绝对压力 /MPa	总换热量 /MW	炉膛容积热负荷 /MW·m <sup>-3</sup>
0.11	0.58	0.42
0.16	1.46	0.97
0.28	2.69	2.09

采用离散坐标法对水冷壁传热情况进行了计算, 表 3 给出了不同压力条件下单只燃烧器运行时水冷壁换热量和炉膛容积热负荷数值。

从表 3 可以看出, 随着炉膛压力的升高, 水冷壁受热面换热逐渐增强, 炉膛容积热负荷增大。

### 3.2 对冲情况下的模拟结果

#### 3.2.1 对冲情况下的温度分布

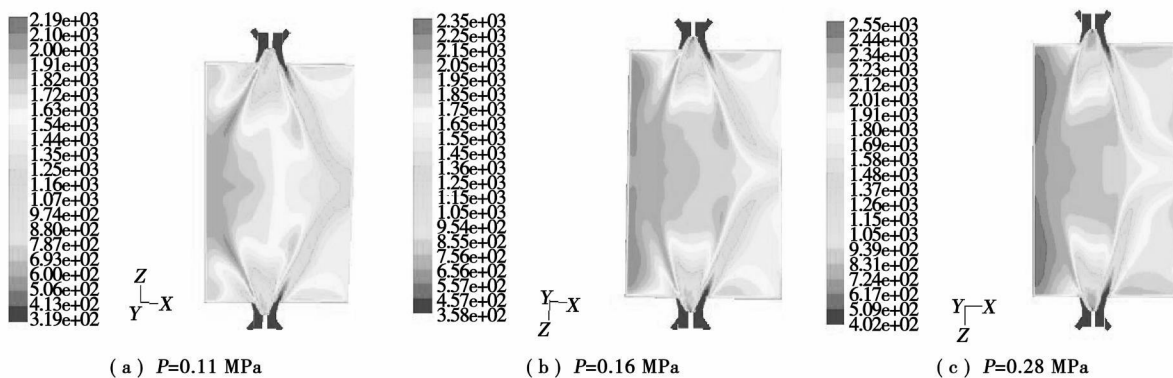


图 5 对冲时 y=0 截面的温度分布

对冲情况下的炉膛最高温度如表 4 所示, 温度水平较单只燃烧器运行有了提高, 且随着炉膛压力?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的升高, 燃烧的温度水平提高。

表 4 对冲情况下运行模拟计算炉膛最高温度

	炉膛绝对压力/MPa		
	0.11	0.16	0.28
最高温度/K	2 190	2 350	2 550

对冲时水冷壁侧的燃烧比单只时要明显, 原因是对冲情况下两股射流在对称界面处相遇, 彼此相互增加扰动, 同时改变了各自射流的传播方向, 使得

水冷壁侧射流的回流更加明显, 回流区的燃烧剧烈而充分。

3.2.2 对冲情况下湍流强度分布

图 6 为对冲情况下在  $y=0$  的  $zox$  纵向剖面上燃烧湍流强度分布。从图中可以看出, 随着炉膛压力的升高, 燃烧器附近区域的湍流程度明显增强。湍流强度的增强, 有利于液体燃料液滴与助燃空气的混合, 同时也利于已燃烟气向燃油蒸气的传热, 使着火提前而强化了燃烧。

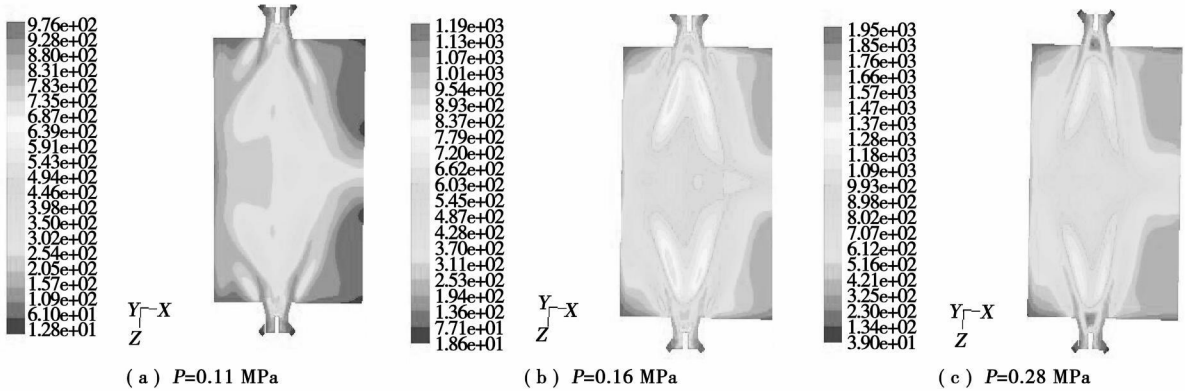


图 6 对冲时  $y=0$  截面的湍流强度分布

3.2.3 对冲情况下水冷壁换热计算

表 5 给出了不同压力下两只燃烧器对冲时水冷壁总换热量及炉膛容积热负荷。

表 5 不同压力下水冷壁换热汇总(两只燃烧器)

炉膛绝对压力 /MPa	总换热量 /MW	炉膛容积热负荷 /MW·m <sup>-3</sup>
0.11	1.38	0.84
0.16	2.61	1.94
0.28	4.76	4.18

同单只燃烧器水冷壁传热情况趋势相同, 随着炉膛压力的升高, 水冷壁换热逐渐增强, 炉膛容积热负荷相应增大。

本文计算模型中未包括炉膛出口对流管束, 因此计算结果与实际情况存在差异, 但能定性反映增压锅炉炉内燃烧与换热趋势。

4 结 论

通过对模拟计算结果的总结分析, 得出以下几点结论:

- (1) 增压条件下, 燃料雾化效果增强; 回流速度

增大促进燃料和空气的混合并强化了对流传热, 促使燃烧速度随着压力的增加而增大, 表现为火焰长度缩短。

(2) 随着炉膛压力的升高, 炉内燃烧气流的湍流强度增强, 利于燃料混合和热量扩散, 使着火提前而强化燃烧; 增压锅炉炉膛的容积热负荷明显增大。

(3) 随着炉膛压力的提高, 炉膛燃烧的最高温度有所提高, 增大传热温差而强化了炉膛传热, 包括辐射传热和对流传热。

参考文献:

- [1] 岑可法, 姚 强, 骆仲决. 燃烧理论与污染物控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [2] 范维澄, 王跃鹏. 流动及燃烧的模拟与计算[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992
- [3] SPALDING D B. Combustion and mass transfer[M]. London: Pergaman Press, 1979.
- [4] 岑可法, 姚 强, 骆仲决. 高等燃烧学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002
- [5] 王 敏, 朱东琦, 姜任秋. 舰用蒸汽锅炉增压燃烧对锅炉性能影响的研究[J]. 应用科技, 2004, 31(9): 45-46.
- [6] 刘顺隆. 流体分子理论及性质[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1994

(编辑 滨)

should be comprehensively considered in order to choose optimum parameters. Among the various operating conditions being calculated, i. e. when for the waste-heat recovery steam generator at the tail portion of the kiln the main steam temperature is 300 °C, the main steam absolute pressure, 1.6 MPa, feedwater temperature, 170 °C, both high and low pressure node temperature differences, 15 °C, and both the high and low pressure approach point temperature differences, 11 °C, the low-pressure steam temperature of the heat-recovery steam generator at the head of the kiln, 180 °C, low-pressure steam absolute pressure, 0.25 MPa, the system feedwater temperature, 50 °C, and the back pressure of the steam turbine, 8 kPa, to sum up, under the condition of all the above items, the power generated by the system will be maximal, reaching 13 791.878 kW. **Key words:** cement production line, waste-heat power generation system, thermotechnical parameters, calculation analysis

**基于规则的冷凝器压力系统协调控制研究 = Study of the Rules-based Coordinated Control of a Condenser Pressure System**[刊, 汉] / ZHANG Wei, CAI He-gao (College of Electromechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), BIAN Xin-qian, XIA Guo-qing (Automation College, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 188 ~ 191

Studied was the application of a rules-based coordinated control method for the pressure control of condensers. According to the conservation law, set up was a dynamic mathematical model for condensers and air extractors. On this basis, through an introduction of pressure change rate signals and condenser average temperature change ones, the rules-based coordinated control method was employed for the control of condenser pressure systems. The control of the pressure systems was accomplished mainly through the controllers of both circulating water pumps and air extractors. The simulation results show that compared with traditional control over pressure systems, in the case of load changes by a big margin, the control effectiveness achieved by the rules-based coordinated control method for the condenser pressure system can boast a conspicuous improvement with the overshoot of the condenser pressure being reduced and the duration to attain a steady state shortened. As a result, the system features a better dynamic performance. **Key words:** condenser, pressure system, regularity, coordinated control, mathematical model

**船用增压锅炉强化燃烧三维有限元分析 = Three-dimensional Finite Element Analysis of the Intensified Combustion in a Marine Supercharged Boiler**[刊, 汉] / ZHANG Guo-lei, LI Yan-jun, WEN Liang (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), ZHU Xin-yuan (Harbin Power Plant Engineering Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 192 ~ 195

With a supercharged boiler serving as an object of study and by using method “SIMPLE” to seek solutions to a  $N-S$  equation, performed was a numerical calculation and analysis of the combustion and in-furnace heat transfer characteristics of the burners. Based on the calculation results obtained from software Fluent, the authors have analyzed and obtained the law governing the change under various pressures of such items as in-furnace temperature field, velocity and turbulent intensity in the back flow zone, tentatively unveiling the mechanism of supercharged and intensified combustion. The simulation calculation results show that with an increase of the in-furnace pressure, the in-furnace heat exchange intensity of the supercharged boiler will be enhanced, and the furnace volume heat release rate, obviously heightened. The foregoing simulation calculation results have laid a definite theoretical basis for further establishing in-furnace thermodynamic calculation methods for the supercharged boilers. **Key words:** supercharged boiler, numerical simulation, intensified combustion, volume heat release rate