

7-31-2020

Numerical Simulation about Fuel Injection Source Location Impacting on Turbulent Combustion Process

Sun Hui

1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500 China; ;

Guangcheng Cai

1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500 China; ;

Jiang Lin

1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500 China; ;

Shibo Wang

2. Faculty of Materials and Metallurgy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation about Fuel Injection Source Location Impacting on Turbulent Combustion Process

Abstract

Abstract: Fuel injection source location has very important influence on combustion process. It determines the location of the furnace flame. The three dimensional model of the furnace was established by the numerical simulation method. Under different conditions, the fuel injection source location on the temperature field within the furnace, the pollutant concentration field, and the flow field distribution inside the furnace combustion process were investigated. *The results were compared and analyzed. After analysis, the results show that the fuel injection source location from 1.1 ~ 1.5 meter process of change, the average temperature within the furnace continue to rise, the concentration of pollutants Nitric oxide increased first and reduced after.* This will help to explore the fuel injection source location effecting on combustion process, which makes a further understanding on optimization and heat transfer inside the furnace, and this has significance for improved combustion model.

Keywords

numerical simulation, combustion, fuel injection source location, temperature field, pollutant concentration field

Recommended Citation

Sun Hui, Cai Guangcheng, Jiang Lin, Wang Shibo. Numerical Simulation about Fuel Injection Source Location Impacting on Turbulent Combustion Process[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1474-1479.

燃油喷射源位置影响湍流燃烧过程的数值模拟

孙辉¹, 蔡光程¹, 姜麟¹, 王仕博²

(1. 昆明理工大学理学院, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650500)

摘要: 燃油喷射源位置对燃烧过程有着很重要的影响, 它决定了炉膛中火焰的位置。采用数值模拟的方法, 建立三维燃烧器模型, 在不同工况下考察了燃油喷射源位置对炉膛内温度场、污染物浓度场、燃烧过程中炉膛内的流场分布的影响, 并对计算结果进行了比较分析。经分析表明: 燃油喷射源位置由 1.1~1.5 m 变化的过程中, 炉膛内的平均温度不断升高, 污染物 NO 的浓度先升高后降低。这将有助于探索燃油喷射源位置对燃烧过程的影响, 对炉内的传热和优化有进一步认识, 对改进燃烧模型有重要的意义。

关键词: 数值模拟; 燃烧; 燃油喷射源位置; 温度场; 污染物浓度场

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 07-1474-06

Numerical Simulation about Fuel Injection Source Location Impacting on Turbulent Combustion Process

Sun Hui¹, Cai Guangcheng¹, Jiang Lin¹, Wang Shibo²

(1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500 China;

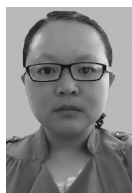
2. Faculty of Materials and Metallurgy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Fuel injection source location has very important influence on combustion process. It determines the location of the furnace flame. The three dimensional model of the furnace was established by the numerical simulation method. Under different conditions, the fuel injection source location on the temperature field within the furnace, the pollutant concentration field, and the flow field distribution inside the furnace combustion process were investigated. *The results were compared and analyzed. After analysis, the results show that the fuel injection source location from 1.1 ~ 1.5 meter process of change, the average temperature within the furnace continue to rise, the concentration of pollutants Nitric oxide increased first and reduced after.* This will help to explore the fuel injection source location effecting on combustion process, which makes a further understanding on optimization and heat transfer inside the furnace, and this has significance for improved combustion model.

Keywords: numerical simulation; combustion; fuel injection source location; temperature field; pollutant concentration field

引言

燃烧是一个非常复杂的化学-物理过程, 结合



收稿日期: 2014-06-26 修回日期: 2014-09-04;
基金项目: 昆明理工大学人才基金(2008-72); 云南省自然科学基金(2011FZ025);
作者简介: 孙辉(1981-), 女, 山东阳谷人, 硕士生, 讲师, 研究方向为计算数学, 冶金过程数值模拟; 蔡光程(1965-), 男, 云南文山山人, 博士, 教授, 研究方向为数值图像处理、科学计算。

了反应、流动、传热、传质等多种复杂过程相互作用的综合现象^[1-2], 燃烧的效率主要取决于燃烧所具备的化学条件和物理条件。对于大型的锅炉而言, 炉膛内的燃烧的安全性, 可靠性, 经济性, 火焰的稳定性, 燃烧过程的每一个环节都要设计好, 火焰才能稳定, 燃烧效率才能提高, 否则会导致燃烧效率下降, 燃烧不稳定, 并且产生更多的噪声和污染物等。工业炉窑的优化改进主要靠实验,

<http://www.china-simulation.com>

• 1474 •

由于实验受到各种条件的约束和限制, 比如流场扰动、模型尺寸、高温高压等。工业炉窑是工业生产中的排放和耗能大户, 所以降低能耗, 提高燃烧效率, 减少 NO 等有害物质排放等, 是现代工业生产的重要目标^[3]。炉膛内的燃烧过程是个近似黑箱的系统。随着计算机技术水平的提高, 利用模拟仿真软件对燃烧过程进行定性和定量分析已经成为工业生产过程中的辅助设计、故障诊断等环节不可或缺的手段^[4-8]。利用 CFD 软件进行仿真模拟可以定量分析燃烧过程中温度场和污染物的生成和排放问题^[9-10]。本文基于 CFD 平台^[11], 利用 FLUENT 软件进行数值仿真, 模拟出燃油喷射源位置在燃烧过程中对温度场、NO 的浓度场及流场分布规律的影响。据模拟结果和经验数据, 采用相应的工程技术, 针对性的对燃烧的各项指标进行优化改进, 从而可以达到高效充分燃烧、低氮排放, 提高热效率的目的。

1 物理模型和计算模型

1.1 物理模型

简化物理模型。燃烧器的网格是利用 CFD 前处理软件 Gambit 非结构化网格生成技术生成, 对生成的体网格的每个面网格的进行质量检测, 控制 equisize skewness 在 0.5 之内, 得到的体网格质量较高, 有利于后期的计算中减小误差。模型的全局以及网格系统局部网格形态如图 1 所示。

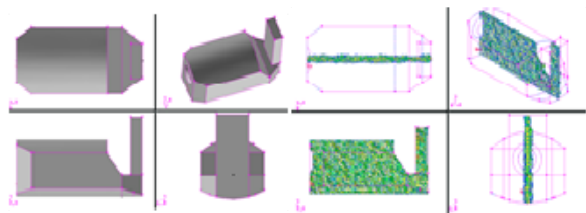


图 1 三维全局及网格划分图

燃烧器内的所有气流具有完全不规则的瞬息万变的特点, 所以全都视为湍流反应流, 但稳定火焰的生成过程具有很大的随机性, 所以把整个燃烧过程的平均流视为稳态流动。关键研究火焰稳定后的一个稳态过程。

1.2 计算模型

1.2.1 湍流模型

标准的 $k-\varepsilon$ 模型是工程流场计算中主要的工具, 合理的精度使它在热交换模拟和工业流场中有着广泛应用。模拟采用的湍流模型为标准的 $k-\varepsilon$ 模型, 该模型针对强烈逆流压力的边界流动及复杂的二次流可以得到相对较好的计算结果。

所引入的计算 C_μ 的方程为:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$

式中: A_0 , A_s , U^* 分别在建立方程进行计算。

1.2.2 辐射传热模型

炉膛内的辐射传热过程光学深度比较大, 采用 $P-1$ 模型来计算是比较适合的。 $P-1$ 模型主要研究的是扩散效应, 其本身就是是一个扩散方程。为了降低计算过程复杂度, 模型只用了展开式的前四项, 同时考虑到颗粒相与气相之间的相互辐射因素, 得到能量方程如下:

$$-\Delta \cdot q_{rad} = -4\pi \left(a \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right) + (a + a_p) I_m$$

式中: a 为介质吸收率; σ 为玻尔兹曼常数; T 为当地热力学温度; E_p 为颗粒等效辐射强度; a_p 为颗粒等效吸收率; I_m 为入射强度, 以上这些参数都是对有限体积内的所有颗粒加和求得。

1.2.3 燃烧模型

诸如有限反应速率、污染物的生成等湍流燃烧问题, 利用 PDF(概率密度函数)方法解决是非常有效的^[12]。PDF 方法能够以封闭形式给出化学反应源项来求解 PDF 输运方程, 并且不需要对它进行模拟, 所以 PDF 方法非常适合解决湍流燃烧过程中的诸多相关问题。近年来国内外很多学者利用 PDF 方法对相关问题进行了数值模拟和实验研究^[13]。根据燃料的燃烧特性, 选择混合分数/PDF 化学平衡模型来模拟燃油在炉膛内的燃烧过程。

2 边界条件设置

燃油液滴由离散相蒸发进入系统,由喷射源在固定位置射入炉膛,然而空气做为连续相由喷嘴入口吹入炉膛。所以在燃油入口处定义离散液滴,由管道中心根据一定的角度喷射入到管道内。轨迹所形成的角度可以由 Y 方向和 Z 方向的速度来表征,从而可以观察和追踪到液滴的运动轨迹。根据燃烧的性质,设置化学组分,以燃料的初始温度、空气的初始温度、燃油和气体的入口的速度等作为入口的边界条件。炉膛壁面采用无滑移定温壁面,给定温壁面一个适当的初始高温,能够给炉膛的辐射传热提供合适的初始计算条件,才能进一步展开模拟计算。炉膛和烟道出口的边界条件采用压力出口,定义压力出口处的出口温度 1 800 K,这是回流的条件,这个条件只是在流动从出口处重新返回计算区域时才用的到,可知定义合理的高温压力出口可以用来避免求解过程中在流动出口的某些点返回,从而可以达到一个连续性计算的目的。

假设液滴喷射时将不会和相对较大的燃烧室炉壁产生碰撞。喷雾过程中油颗粒直径在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-6}$ m 是比较适宜的范围,因为油颗粒直径过大容易产生大的焦粒与烟粒,所以选择燃油喷雾由直径为 1.0×10^{-6} m 的液滴组成。

3 喷射源参数设置

喷射源位置离炉底越近说明火焰和下方炉料的接触面积越大,炉膛下方熔池的传热就越充分,但是会使高温区火焰距炉顶的相对距离拉大,则会影响到炉顶的辐射传热,就会使整个炉膛不能提供足够的热量给熔池,所以选择合理的喷射源位置,可以保证在与炉料充分接触的同时又不影响炉顶的辐射传热,从而达到优化燃烧的目的。

如图 2 考察喷射源位置分别为 X=0, Y=1.1, Z=0; X=0, Y=1.3, Z=0; X=0, Y=1.5, Z=0 时炉内的温度场和排烟口处 NO 浓度场的变化,考察炉顶、炉壁等的辐射传热对温度场和污染物 NO 浓度场的影响。

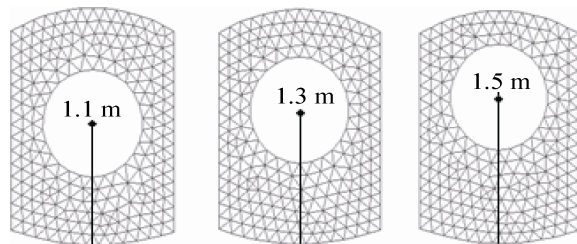


图 2 燃油射流喷射源位置

4 结果与分析

4.1 温度场比较分析

考察燃油喷射源位置分别为 1.1 m, 1.3 m, 1.5 m 时温度场的变化规律。具体数据在表 1 中详细给出。

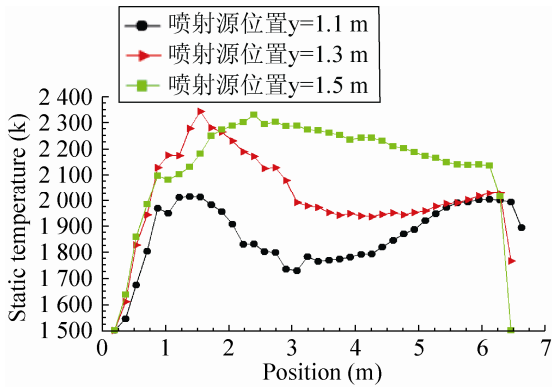
表 1 燃油喷射源位置不同时的温度分布计算结果

喷射源位 /m	最高温 /K	平均温度 /K	炉顶平均 温度/K
1.1	2 247.46	1 665.51	1 727.87
1.3	2 341.14	1 668.91	1 731.18
1.5	2 041.82	1 743.48	1 821.81

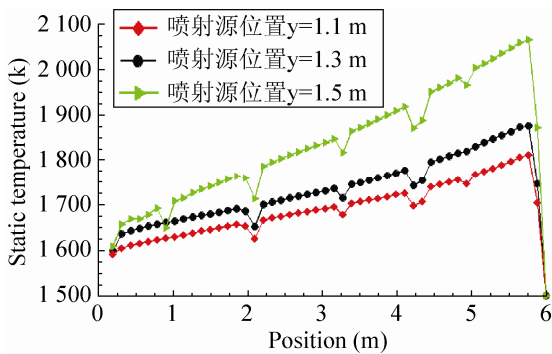
表 1 中详细描述了炉膛内的最高温度、平均温度、炉顶平均温度的变化规律。炉膛的最高温度在 2 300 K 的基础上出现小的波动,这是因为离散相模型对于报告单点的物理量方面有着比较大的随机性,所以造成的误差,但从统计性更强的加权平均温度来看,炉膛平均温度明确地随着燃油喷射源位置的升高而升高,平均温度升高了 78.97 K。这是因为喷射源位置越高燃烧生成的高温区就越接近炉顶,从而炉顶的平均温度也随之升高,炉顶的平均温度升高了 93.94 K,炉顶和炉膛内的平均温度的升高是相互对应的。炉顶温度升高,使高温炉顶对整个炉膛内的辐射传热起到主导作用,所以炉顶温度的升高是造成整个炉内的平均温度升高的一个重要因素,两者相互影。

图 3(a)为燃烧过程中不同喷射源位置与炉膛喷射源平面轴向温度的关系曲线,通过截取的炉内特殊位置的轴向直线观察其温度变化,可以发现随着喷射源位置的升高炉内的平均温度也不断升高的。图 3(b)为燃烧过程中不同喷射源位置与炉顶轴

线温度之间的关系曲线, 与表 1 对比分析, 结果是相互吻合的, 可以直接观察到喷射源位置越接近炉顶, 炉顶处的平均温度就越高。但是, 并不是炉顶的温度越高, 炉膛平均温度越高就表明燃烧效率越高, 这不是一个正比关系, 炉顶的温度过高会造成高温对整个炉膛顶部材料的损坏, 从而影响整个炉子的使用寿命。另一方面, 如果喷射源位置过低, 虽然可以更好的保护膛, 但是炉顶的温度达不到预想效果, 使得整个炉顶对炉膛燃烧火焰的辐射起不到更好的作用, 燃烧效率下降。所以要从多方面考虑, 选择适当的燃油喷射源位置, 才能更好的提高燃烧效率。



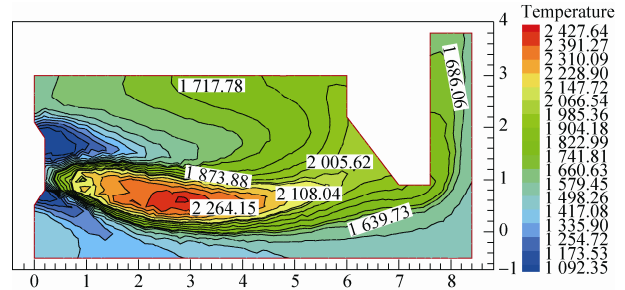
(a) 炉膛喷射源平面轴向温度分布曲线



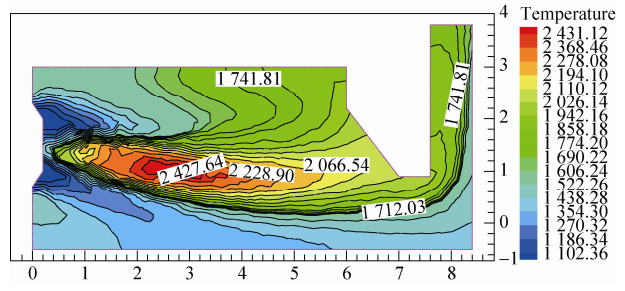
(b) 炉顶轴向温度分布曲线

图 3 炉膛喷射源平面及炉顶轴向温度分布曲线

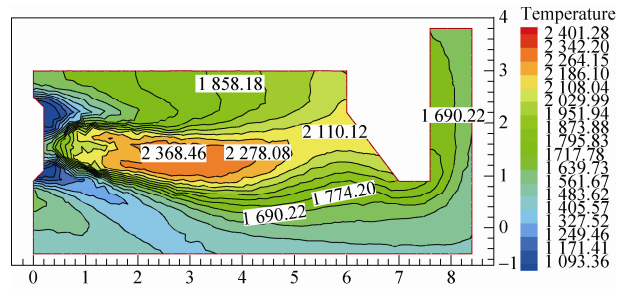
由图 4 可以更加直观详细的观察到, 喷射源位置在分别为 1.1 m, 1.3 m, 1.5 m 时典型炉膛纵截面 $Z=0$ 时的温度场的变化规律分布图。通过三维的炉膛燃烧数值模拟可以得到更多更详细炉膛内燃烧过程中温度场信息。



(a) $Y=1.1$ m 时截面 $Z=0$ 温度分布图



(b) $Y=1.3$ m 时截面 $Z=0$ 温度分布图



(c) $Y=1.5$ m 时截面 $Z=0$ 温度分布图

图 4 不同喷射点位置 $Z=0$ 截面时温度分布规律图

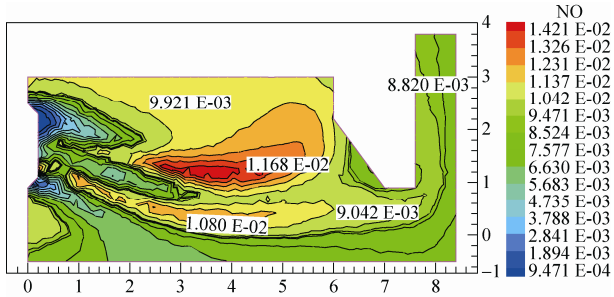
4.2 炉膛烟气出口热力型 NO 浓度场比较分析

考察燃油射流喷射源位置在分别为 1.1 m, 1.3 m, 1.5 m 时炉膛出口处污染物 NO 浓度的分布规律。具体数据在表 2 中详细给出。

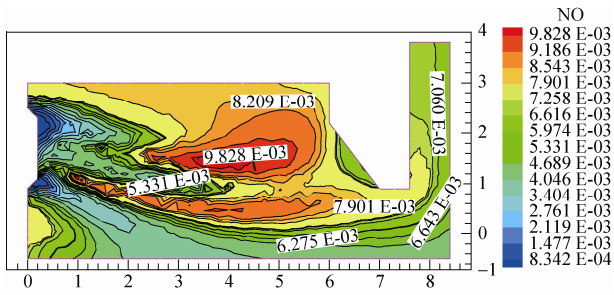
图 5(a), (b), (c), 详细描述了喷射源位置分别为 1.1 m, 1.3 m, 1.5 m 时的典型截面 $Z=0$ 的热力型 NO 分布情况, 计算结果符合燃烧规律。

表 2 燃油喷射源位置不同时热力型 NO 浓度分布计算结果

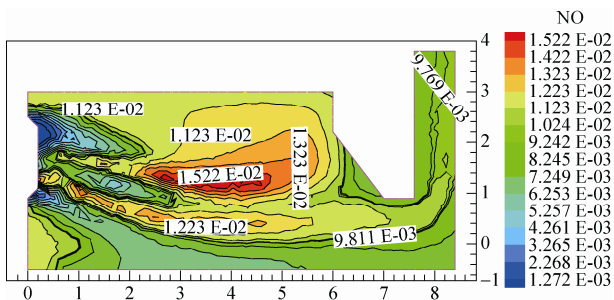
喷射位置 /m	烟气出口 平均温度/K	炉膛出口处热力型 NO 浓度/ppm
1.1	1 557.90	2 954.55
1.3	1 563.71	2 808.36
1.5	1 589.13	2 882.09



(a) 喷射源位置 1.1 m 时热力型 NO 浓度分布



(b) 喷射源位置 1.3 m 时热力型 NO 浓度分布



(c) 喷射源位置 1.5 m 热力型 NO 浓度分布

图 5 喷射源位置不同时截面 Z=0 热力型 NO 分布图

根据表 2 及图 5, 由模拟结果可知, 燃油喷射源位置在 1.1 m~1.3 m 变化时, 烟气出口的平均 NO 浓度越来越小, 平均浓度小了 146.19 ppm, 燃油喷射源位置在 1.3 m~1.5 m 变化时, 烟气出口 NO 浓度又迅速增加, 平均浓度增加了 73.73 ppm, 这是因为根据炉膛的具体形状, 炉顶的温度迅速升高, 造成离炉顶较近的炉膛出口的温度迅速升高, 这时出口的温度对 NO 的排放浓度占优势, 所以炉膛出口的 NO 的排放浓度又有升高的趋势, 随着喷射源位置的升高, 出口的温度的升高对炉膛出口处的 NO 浓度的变化影响降低, 可知热力型 NO 的浓度不仅与喷射源的位置有关, 还与很多其它因素有着密切的关系, 比如, 氧浓度, 燃油入口的喷射速度,

燃油的预热温度等存在一定的对应关系。因此, 针对本物理模型, 为了满足工程需要, 减少 NO 的排放量, 提高燃烧效率, 应该将燃油喷射源位置控制在 1.3 m 左右。

4.3 流场分析

由图 6 可以观察到炉内的流场分布规律图, 图中可以观察到典型截面的多个旋流区域, 这些区域是由炉膛靠近炉壁的气流与火焰中心的高速气流的速度滑移的相互作用形成的, 气流产生的大尺度的旋流把燃烧过程中产生的巨大热量迅速传递给熔池, 达到强化冶炼提高燃烧效率的目的。

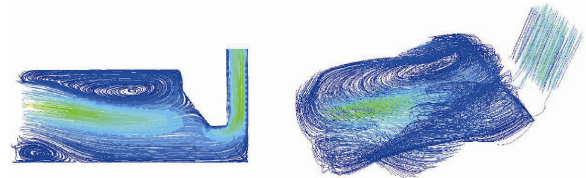


图 6 流场分布规律图

5 结论

通过数值模拟计算分析表明: 并不是燃油喷射源的位置越靠上越好, 原因有 2 个: (1) 炉膛内的热气流受浮力的影响向炉顶方向上浮, 当强度很大的热气流冲向炉顶时, 由于炉顶自身的耐火材料都有一定的高温限制, 此时炉子会受到很大的冲击, 降低了整个炉膛的性能, 缩短了炉子的寿命, 也降低了燃烧效率; (2) 炉顶的辐射作用固然重要, 还是要考虑高温区火焰和下方熔池的传热问题; (3) 炉膛出口处 NO 的浓度随着喷射源位置的不同发生变化, 随着喷射源的位置变化, NO 的浓度先降低后升高。经研究分析, 要综合考虑炉顶辐射、高温区和火焰直接接触、排烟口的 NO 排放浓度 3 个方面, 确定合理的燃油喷射点位置, 才能使整个炉膛内的辐射传热更充分, 并保证污染物排放浓度合理。

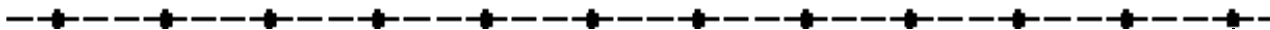
通过对不同燃油喷射源位置的炉膛内燃油燃烧数值模拟比较分析, 有助于探索燃烧过程, 更进一步了解燃烧过程的基本规律和机理, 对改进燃烧

模型有重要的意义。

作为实验研究与理论探索的桥梁及纽带, CFD 技术能够以较低的研究成本实现较为复杂的模型仿真预测及模拟工作, 在工程领域得到越来越广泛的应用。

参考文献:

- [1] 岑可法, 姚强, 骆仲泱, 等. 燃烧理论与污染控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 36-108.
- [2] P J Coelho. Numerical simulation of the interaction between turbulence and radiation in reactive flows [J]. *Progress in Energy and Combustion Science* (S0360-1285), 2007, 33(4): 311-383.
- [3] 岑可法, 程军, 池涌, 等. 高效低污染燃烧及气化技术的最新研究进展 [J]. *动力工程*, 2005, 25(2): 153-159.
- [4] Knudsen E, Pitsch H. Capabilities and limitations of multi-regime flamelet combustion models [J]. *Combustion and Flame* (S0010-2180), 2012, 159(1): 242-264.
- [5] 孙辉. 反射炉燃油雾化燃烧 CFD 数值模拟研究 [J]. *冶金能源*, 2010, 29(2):31-34.
- [6] 隋春杰, 周力行, 林博颖. 湍流非预混燃烧数值模拟的代数二阶矩模型 [J]. *化工学报*, 2014, 65(2): 415-421.
- [7] Luo Kun, Wang Haiou, Fan Jianren, *et al.* Large eddy simulation of a swirl combustor with a combined flamelet model [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (S0253-231X), 2012, 1(1): 145-150.
- [8] 孙辉, 王华, 王仕博, 等. 重力加速度对燃烧过程影响的数值模拟研究 [J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(11): 2723-2727.
- [9] 刘敦禹, 秦明, 刘辉, 等. 深度空气分级条件下炉内氮氧化物生成的数值模拟 [J]. *燃烧科学与技术*, 2011, 17(5): 469-475.
- [10] Masayukit, Kenjiy, Hironobuk, *et al.* A reduced NOx reaction model for pulverized coal combustion under fuel-rich conditions [J]. *Fuel* (S0016-2361), 2002, 81(3): 363-371.
- [11] 温正, 石良辰, 任毅如. FLUENT 流体计算应用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [12] 徐江荣, 周俊虎. 两相湍流流动 PDF 理论与数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [13] K Gkagkas, R P Lindstedt. Transported PDF modelling with detailed chemistry of pre- and auto- ignition in CH₄/air mixtures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute* (S1540-7489), 2007, 31(1): 1559-1566.



《系统仿真学报》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 以美国汤森路透 Web of Science 收录的 1.2 万余种期刊为引文统计源, 首次研制发布了 2012 《中国学术期刊国际引证年报》(CAJ-IJCR 年报)。第一次给出了我国 5600 余种中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 并采用了新的国际影响力综合评价指标 CI 对期刊排序, 发布了“中国最具国际影响力学术期刊”(排序 TOP5%)和“中国国际影响力优秀学术期刊”(排序 TOP5-10%), 在国内外学术界产生了较大反响。之后, 2013 年版年报, 将引文统计源期刊扩展到 1.44 万多种。目前, 2014 版国际、国内年报与 TOP5%和 TOP5-10%期刊的遴选业已完成, 《系统仿真学报》被列入“2014 中国最具国际影响力学术期刊”行列。

我学报连续 2 年被列入 TOP5%国内一流的中国最具国际影响力学术期刊, 走向世界, 进入国际一流, 指日可待!