

# HM型等离子燃烧器多级燃烧特性数值模拟

张孝勇<sup>1</sup>, 王雨蓬<sup>2</sup>, 郭永红<sup>1</sup>, 孙保民<sup>1</sup>, 黄其励<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学动力工程系, 北京市 昌平区 102206;

2. 烟台龙源电力技术有限公司, 山东省 烟台市 264006)

## Using CFD to Simulate Lignite Plasma Ignition Burner Stage by Stage Combustion Feature

ZHANG Xiao-yong<sup>1</sup>, WANG Yu-peng<sup>2</sup>, GUO Yong-hong<sup>1</sup>, SUN Bao-min<sup>1</sup>, HUANG Qi-li<sup>1</sup>

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Yantai Longyuan Electric Power Technology Co.,Ltd, Yantai 264006, Shandong Province, China)

**ABSTRACT:** A simulation investigation into the combustion feature in a lignite plasma burner is presented. The numerical simulation focuses on some ignition factors such as the combustion section temperature, combustible component and the burner combustion efficiency. The result shows that the first stage pulverized coal powders are ignited quickly in the distance about one diameter of the first chamber, and the volatile is ignited first; after passing through the plasma area, the center temperature of the chamber decreases first from the ignition area and then increases. The second stage pulverized coal powders are ignited in the distance about two diameters of the 2nd chamber. The left pulverized coal powders go into the furnace along with the two stages flame; being heated by the flame, the temperature of the third stage pulverized coal powders increase and the third stage powders are ignited in the furnace about 2 meters afar from the out of the burner, with a ball shape flame where the coal combustion efficiency is more than 46%.

**KEY WORDS:** Thermal power engineering; Pulverized coal boiler; Plasma ignition burner; Plasma ignition; Numerical simulation

**摘要:** 用 Fluent 软件对 HM 型等离子燃烧器的点火燃烧特性进行了二维数值模拟, 计算了煤粉空气混合物从等离子点火区到炉膛内主要断面的温度场、着火过程成分变化和煤粉进入炉膛初期的燃尽率等。结果表明: 一级燃烧筒内的煤粉在离开等离子体点火区距离约  $D_1$  (一级筒直径) 的部位挥发分开始着火; 一级燃烧筒中心线上的温度从点火区开始首先降低然后升高; 二级煤粉在距离二级燃烧筒入口约 2 倍  $D_2$  (二级燃烧筒直径) 处开始着火, 二级燃烧筒断面温度中部高四周低; 三级煤粉在距离二级燃烧筒出口约 2m 处开

始着火, 并形成稳定的火球状火焰。计算结果还表明: 燃烧器燃尽率较高, 当形成稳定的火焰时, 挥发分已经完全燃烧, 碳的燃尽率达到 46% 以上。

**关键词:** 热动力工程; 煤粉锅炉; 等离子燃烧器; 等离子点火; 数值模拟

## 1 引言

电站煤粉锅炉等离子点火与稳燃技术已经成功应用于 100 多台不同容量、不同燃烧方式、燃用不同煤种的锅炉, 其中有 20 多台 600MW 机组的基建锅炉机组已经成功应用该技术。采用等离子点火技术可大大节约燃油, 以内蒙古大唐托克托发电有限责任公司 1 号 600MW 新建机组为例, 该机组在基建调试初期即应用该技术, 仅调试期间节油超过 7000t, 获得经济效益 2000 万元以上, 取得了良好的经济效益<sup>[1]</sup>。该点火装置中, 等离子燃烧器的点火燃烧特性一直是倍受关注的焦点。本文用数值仿真软件 Fluent 对其点火特性进行了模拟, 分析了内燃式等离子燃烧器的燃烧特性, 并与热态点火实验和工程应用的结果进行了比较。

## 2 等离子体的点火特性与等离子燃烧器的基本原理

### 2.1 等离子体对煤粉的点火特性

高温等离子体作为煤粉空气混合物的点火热源有着不同于常规油枪点火的机理和特点。主要表现在: 等离子体的高温特性, 对煤粉的热化学作用可以再挥发分、生成低着火点的双组分燃料; 等

离子体能加速热化学转换,强化煤粉空气混合物的燃烧,并促使燃料完全燃烧;等离子体能以较低的点火功率实现大功率的点火效果<sup>[2]</sup>。

由于等离子体的高温作用,使煤粒二次破碎形成了更多的细煤粒、产生了自由活化基以及加速化学反应的碳氧化物。煤粒的二次破碎增大了煤粉的着火表面积,使煤粉着火更加容易;自由活化基的产生使反应速度加快,活化能降低使反应更加易于进行;碳氧化物的生成使燃烧速度加快<sup>[3]</sup>。在用等离子体点燃煤粉空气混合物时,测试和分析煤-等离子体相互作用功率和热化学特性表明:点燃相同质量的煤粉,使用等离子体的能耗按照热当量计算仅为油、气所需能耗的10%左右<sup>[4]</sup>。

## 2.2 等离子燃烧器的基本原理

等离子煤粉燃烧器属于内燃式燃烧器,套筒式HM型等离子燃烧器的点火热源为DLZ200型等离子发生器,其功率为150~200kW,并连续可调。等离子燃烧器的设计采用了“以小点大、逐级点火”的方式,也就是让等离子体首先点燃小部分煤粉(第一级煤粉,又称中心筒煤粉),待这部分煤粉稳定燃烧后再去点燃第二级煤粉,进而再用这两级煤粉火焰去点燃余下的煤粉。这样,就形成了逐级点火、分级燃烧的着火环境,提高了点火能力,确保实现大型锅炉的安全无油点火和稳燃。

等离子燃烧器与一般定义的角度式直流切圆燃烧器不同之处在于部分一次风煤粉混合物在进入炉膛之前已被点燃,相同之处是含粉气流的主要燃烧是通过与其它角度式直流燃烧器形成的切圆燃烧完成,或者与旋流燃烧器组织的墙式燃烧等燃烧方式完成。由于内燃式燃烧器工作在高温煤粉火焰环境中,与煤粉预燃室煤粉燃烧器有一定的相似之处,分析煤粉空气混合物在燃烧器内的点火(着火)特性,对掌握其内燃特点,确保燃烧器的安全具有重要意义。

经过等离子煤粉燃烧器的煤粉空气混合物,其整个燃烧过程可以分为在等离子燃烧器内部点火(着火)阶段和进入锅炉炉膛的继续燃烧燃尽两个阶段。因进入炉膛后的燃烧特性与锅炉燃烧的组织(切圆燃烧或墙式燃烧)、流动的传热与混合特性等有关,即进入炉膛后,流动和传热的边界条件与HM等离子燃烧器内部并不相同。本文着重分析在等离子燃烧器内部点火(着火)阶段,并将炉膛简化为一个空间的燃烧室,忽略炉内其他燃烧器的

影响,分析从等离子燃烧器喷口到形成稳定燃烧的火焰的燃烧过程。并侧重计算分析等离子燃烧器内煤粉着火位置、沿燃烧器中心轴线的温度变化、断面温度分布以及煤粉燃烧析出物成分的变化等。

## 3 等离子燃烧器燃烧特性数值模拟的意义

为了设计性能良好的等离子燃烧器,通常采用首先在试验室针对不同容量不同煤种的等离子燃烧器进行冷态模化、热态点火实验,并在此基础上设计各型等离子燃烧器的方式。工程实践表明,该方案是可行的,目前多个燃煤发电厂已成功应用了采用这种方式设计的等离子燃烧器。然而,由于受到测试手段等限制,对于等离子燃烧器的着火、燃烧特性的了解仍然有限,使等离子燃烧器的设计更多地停留在设计经验的基础上。为了进一步分析了解其燃烧特性,本文用数值仿真软件Fluent对其点火特性进行了模拟<sup>[5-6]</sup>。

## 4 等离子燃烧器点火特性的数值模拟

### 4.1 模拟条件

本文模拟的等离子燃烧器为圆筒型、逐级点火、分级燃烧式的燃烧器。由于煤粉燃烧过程的模拟是一个复杂的过程,包括挥发分析出、焦炭燃烧、辐射传热、颗粒运动、气相流动和燃烧等<sup>[7-9]</sup>。为了简化计算,视其流动为轴对称,燃烧筒内气相的湍流流动选择标准的k-epsilon模型,煤粉颗粒相流动采用随机轨道法,计算中追踪了100×10个粒子(取100个直径,每个直径取10个粒子)。气相湍流反应使用Two mixture fraction/PDF模型,挥发分析出模型为Two-competing-rates模型,燃烧模型是kinetics/diffusion-limited模型。辐射传热选用P1模型。燃烧筒的数值模拟采用第一类边界条件,给定了壁面的温度。湍流流动的近壁面采用标准壁面函数。并假定等离子燃烧器与一个大空间的燃烧室为一体,忽略炉内其他燃烧器的影响<sup>[10]</sup>。

### 4.2 问题描述

圆筒型等离子燃烧器简化的二维计算区域见图1,其中,等离子燃烧器区域是按照实物尺寸进行模拟的,而炉膛则视为一大空间的燃烧室。燃烧器入口处的风粉混合物速度均匀分布,速度为 $u$ 。按照线喷方式进入燃烧器的各级燃烧区。为了提高一级点火筒的点火效果,在燃烧器入口前段设计安装了煤粉浓缩装置,经两相流实验测得:一级点火筒煤粉浓度为0.46kg/kg;进入二级燃烧筒的煤粉浓

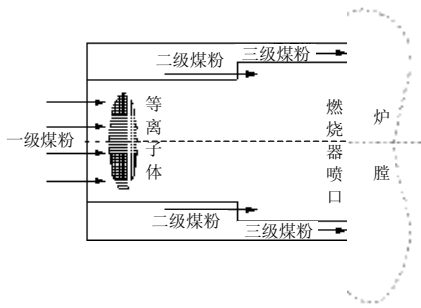


图1 等离子燃烧器简化的二维计算区域  
Fig.1 Simplified 2-dimensional calculation zone of a plasma burner

度为 0.11kg/kg; 直接进入炉膛的三级煤粉浓度为 0.11kg/kg<sup>[11]</sup>。该煤粉一次风速度为 18~28m/s, 本文以 25m/s 的一次风速度为例, 对等离子燃烧器的燃烧特性进行数值模拟。取磨煤机出口煤粉空气混合物的温度为 350K (此为中速磨煤机磨制煤粉的典型温度), 一次风管道风速为 25m/s。经过等离子点火区的煤粉空气混合物受高温等离子体加热后的温度, 按照热平衡初步估算为 2000K 左右<sup>[12]</sup>。

本文模拟的煤粉为褐煤, 其煤质分析如表 1 所示。

表 1 燃煤特性表

Tab.1 Combustion characteristics of coal

元素分析/%					工业分析/%			$Q_{ar.net}/(kJ/kg)$
$C_{ar}$	$H_{ar}$	$O_{ar}$	$N_{ar}$	$S_{ar}$	$A_{ar}$	$M_{ar}$	$V_{ar}$	
36.3	2.35	8.51	0.47	0.70	26.39	25.28	21.19	13207

假设煤粉直径分布遵循 Rosin-Rammler 规律, 范围从 70~260 $\mu m$ , 平均直径为 160 $\mu m$ <sup>[13]</sup>。假设气体的导热系数和粘度为常数, 这在湍流输运占主要地位的系统中是合理的。燃烧计算中, 炉内气体的辐射吸收系数和散射系数分别按 wsggm-cell-based 和  $0m^{-1}$  (认为各向同性) 计算<sup>[14-16]</sup>。

### 4.3 网格划分

使用 Gambit 软件对上述问题划分网格, 共划分了 80500 规则四边形网格<sup>[17-19]</sup>。

## 5 计算结果与分析

在上述边界条件下, 用 Fluent 软件对等离子燃烧器的点火、燃烧特性进行了模拟。

图 2 显示的是等离子燃烧器一次风入口速度  $u=25m/s$ ,  $T=350K$  工况下 (即: 从磨煤机出口煤粉空气混合物的温度为 350K, 一次风管道风速为 25m/s), 煤粉进入等离子燃烧器着火后的火焰温度特性分布图。该图表明等离子燃烧器的内部温度较高, 而筒式燃烧器的外壁温度却较低, 这样的工况

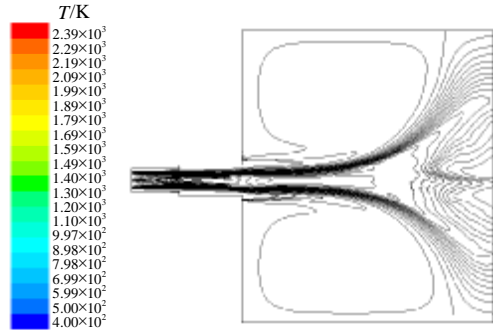


图 2 等离子燃烧器煤粉火焰温度特性分布图  
Fig. 2 Flame temperature distribution in a plasma burner

对延长等离子燃烧器的寿命是有利的。

图 3 为一级点火筒内, 煤粉火焰的温度分布图。从图中可见: 一级筒煤粉在  $L_1/D_1=1$  附近 ( $L_1$  指从一级筒入口沿燃烧器出口方向的长度,  $D_1$  为一级筒的直径), 煤粉已经开始着火。在  $L_1/D_1=2$  附近, 一级煤粉火焰高温区域增大, 煤粉燃烧加快。

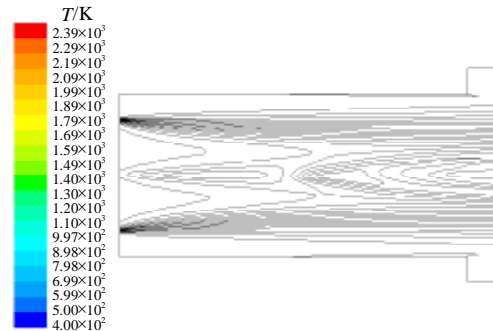


图 3 一级点火筒内煤粉火焰温度分布图  
Fig. 3 Flame temperature distribution in the first stage burner

图 4 为一级点火筒内中心线上温度变化曲线, 从图中可见, 一级筒煤粉的温度首先降低, 然后逐渐升高, 在  $L_1/D_1=1$  附近, 煤粉着火, 温度迅速升高。分析其原因是: 一级煤粉吸收等离子体的热量后, 使混合物温度首先降低, 而煤粉的温度则逐渐升高, 一部分挥发分析出后, 燃烧放热, 致使整体

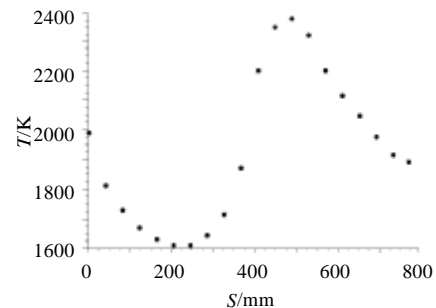


图 4 一级点火筒内中心线上温度变化曲线  
Fig.4 Flame temperature varying along the first stage burner center axis

温度升高。

图4表明含煤粉气流进入一级点火筒后其温度首先从2000K降至1600K(0~200mm),其主要原因是含粉气流的显热被煤粉水分吸收并气化,因此带走大量热量;同时,煤粉挥发分的析出,以及加热灰分、固定碳等也都是一个吸热过程。这些因素的综合作用导致混合物温度首先降低。

由于位于中心部位的煤粉首先着火,形成的高温火焰主要通过对流、辐射方式向外围、径向四周的大量煤粉空气混合物释放热量;此时,外围煤粉着火消耗大量氧气,而中心线上的煤粉形成局部缺氧区,其少量余碳的燃烧受到抑制。因此,在 $L_1/D_1 > 1$ 后(即 $S=500\text{mm}$ 后)温度迅速降低(从2400K降到1900K)。

图5为二级点火筒中心线沿喷口方向的温度变化曲线,从图中可见,二级筒煤粉的温度虽然也有一个先降低然后升高的过程,但其幅度明显比一级筒的温度变化小。一级燃烧筒内,中心部位的煤粉空气混合物温度降到1600K左右后开始升高(见图4),而二级燃烧筒内,中心部位的煤粉空气混合物温度降到1780K左右就开始升高(见图5)。表明二级燃烧筒内着火工况优于一级燃烧筒,而且整个二级筒内的温度比较均匀。分析其主要原因是:与一级燃烧筒相比,用于加热二级煤粉的热量占二级燃烧筒总热量较少,被等离子加热进而迅速燃烧后释放出的热量,被进入二级燃烧筒的煤粉吸收热量的份额相对较小,而且,因一级煤粉中的碳在二级燃烧筒继续燃烧,不断释放热量,从总体上提高了二级燃烧筒的温度水平。

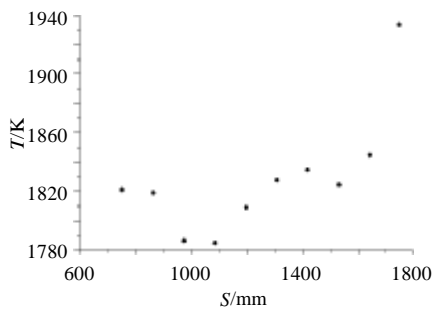


图5 二级点火筒中心线沿喷口方向的温度变化  
Fig.5 Flame temperature varying along the second stage burner center axis

从图5可以看出,当二级煤粉进入高温煤粉火焰后,由于处于良好的高温环境,二级煤粉迅速着火燃烧。在二级燃烧筒区域,煤粉火焰中心温度较高,而二级燃烧筒近壁处温度偏低,形成了粉包火

的燃烧工况。

图6为二级点火筒内,煤粉火焰的温度分布图,从图中可见,在二级筒入口处,一级筒内已经点燃的煤粉继续燃烧,由于受到二级煤粉的影响,总体温度有一个升高的幅度不大。在 $L_2/D_2=2$ 附近( $L_2$ 为从二级筒的入口沿燃烧器出口方向的长度, $D_2$ 为二级筒的直径),二级煤粉开始着火,二级筒中心高温区扩大。在 $L_2/D_2=2.5$ 附近,二级煤粉火焰温度达到最大值。

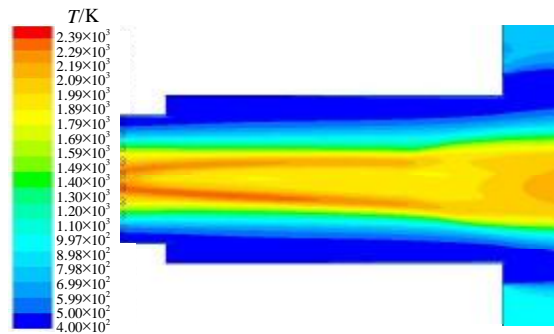


图6 二级点火筒内煤粉火焰温度分布  
Fig.6 Flame temperature distribution in the second stage burner

图7显示了二级燃烧筒出口的温度分布曲线。

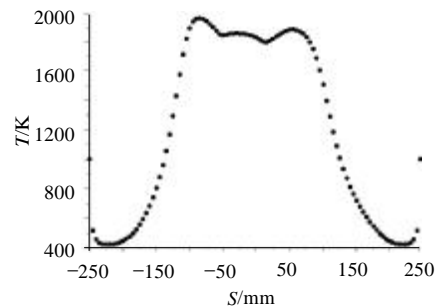


图7 二级燃烧筒出口的温度分布曲线  
Fig.7 Temperature curve at outlet of the second stage burner

图7表明:二级燃烧筒出口有个环状高温区,四周温度低。燃烧筒内壁的温度在允许的范围,燃烧器是安全的。图8为元宝山发电厂3号锅炉启动初期,等离子燃烧器壁温变化曲线(该曲线由等

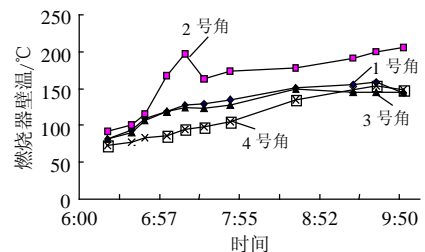


图8 元宝山发电厂3号锅炉等离子燃烧器壁温变化曲线  
Fig.8 Wall temperature varying curve of yuanbaoshan No.3 boiler plasma burner

离子燃烧器壁温监控系统记录)。从图中可以看出,燃烧器壁温基本上呈现出均匀上升的趋势,且在整个点火启动阶段,燃烧器壁温最高温度为315℃,低于燃烧器耐热钢允许的最高温度。工业运行结果与计算结果基本一致。

图9为从等离子体点燃一级筒煤粉到全部煤粉着火燃烧的温度变化曲线,从图中可以看出:在前两级煤粉火焰的加热作用下,其温度逐渐升高,在距离燃烧器喷口约2m处着火燃烧,形成稳定燃烧的火焰。从燃烧器喷口到高温燃烧的火球的整个燃烧过程中,煤粉火焰温度首先下降,然后再升高。分析其主要原因是由于刚进入炉膛的火焰被从四周进入的三级煤粉气流吸热,同时又向炉膛释放热量所致。而高温燃烧的火球就是被加热的煤粉达到着火点后迅速燃烧的结果<sup>[20-21]</sup>。

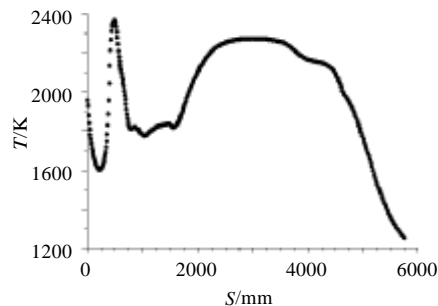


图9 一级燃烧筒入口到炉膛内形成稳定火焰的全部煤粉着火燃烧的温度变化曲线

Fig.9 Flame temperature varying curve from the first stage inlet to steady combustion flame center in the furnace

表2给出了对煤粉沿点火过程的追踪结果。数

表2 挥发分和焦炭的燃尽率

Tab.2 Burn-out rate of volatiles and carbon

挥发分			焦炭		
$U/(kg/s)$		转化率/%	$U/(kg/s)$		转化率/%
开始时刻	结束时刻		开始时刻	结束时刻	
0.3176	$5.393 \times 10^{-15}$	100	0.4068	0.2198	46.19

注:开始时刻是指从本计算域开始计算的时刻,即一级燃烧筒入口等离子体加热煤粉的时;结束时刻是指本计算域出口,即煤粉火焰在大空间炉膛形成稳定火焰后的时刻。

据显示,从一级燃烧筒入口的等离子体点火区,到煤粉空气混合物在大空间炉膛形成稳定火焰为止,挥发分全部发生了反应,碳的燃尽率已经达到46.19%。说明该型等离子燃烧器具有较高的燃尽率。

## 6 结论

结合煤粉锅炉等离子燃烧器的燃烧特点,用数值仿真软件Fluent对套筒式HM型等离子燃烧器的点火燃烧特性进行了二维数值模拟。结果表明:一

定数量的煤粉在一级燃烧筒受等离子体高温热化学作用后,在离开等离子体点火区距离约 $D_1$ ( $D_1$ 为一级筒直径)的部位,首先着火。在一级燃烧筒出口,加入二级煤粉在二级燃烧筒内受热升温,在距离二级燃烧筒入口 $2D_2$ ( $D_2$ 为二级燃烧筒直径)处开始着火燃烧。三级煤粉伴随二级燃烧筒出口的煤粉火焰进入炉膛,在距离二级燃烧筒出口约2m处开始着火,并形成稳定的火球状火焰。在等离子燃烧器喷口形成了“粉包火”的着火工况。计算结果还表明:燃烧器燃尽率较高,当形成稳定的火焰时,挥发分已经完全燃烧,碳的燃尽率达到46%以上;燃烧器内壁温度较低,等离子燃烧器可长期安全运行。该模拟结果与热态点火试验和现场工业运行得到的等离子燃烧器点火特性基本一致。

由于该型等离子燃烧器的喷口呈现“粉包火”的工况,因此,现场点火时,发现等离子燃烧器喷口处火光较弱属于正常现象,但并非燃烧效果欠佳。虽然燃烧器壁温不高,但其燃烧效率是较高的。该模拟为等离子燃烧器现场运行提供了参考。

## 参考文献

- [1] 任渺, 刘建华, 许尧, 等. 等离子煤粉点火在双调风旋流燃烧器上的应用[J]. 华北电力技术, 2005, (1): 50-52.  
Ren Miao, Liu Jianhua, Xu Yao, et al. Application of Plasma Ignition Technology in DRB-XCL Burner[J]. North China Electric Power, 2005, (1): 50-52.
- [2] Kanilova P M, Kazantseva V I, Rasyuk N I, et al. Microwave plasma combustion of coal. Fuel[J], 2003, 82(2): 187-193.
- [3] 韩立忠, 曾喜, 陈艳芬, 等. 等离子点火系统在燃气轮机上的应用[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 415-416, 420.  
Han Lizhong, Zeng Xi, Chen Yanfen, et al. The use of plasma ignition systems in gas turbines. Journal of engineering for thermal energy and power[J]. 2003, 18(4): 415-416, 420.
- [4] 田发珍. 煤粉锅炉等离子体点火稳燃技术[M]. 西北电业管理局, 1992.
- [5] 彭艳, 唐必光, 赵无非. 高温空气燃烧实验研究与数值模拟[J]. 锅炉制造, 2003, 11(4): 7-10.  
Peng Yan, Tang Biguang, Zhao Wufei. Experimental research and mathematical modeling of high temperature air combustion[J]. Boiler Manufacturing, 2003, 11(4): 7-10.
- [6] 李永华, 陈宏伟, 刘吉臻, 等. 煤粉燃烧排放特性数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 166-169.  
Li Yonghua, Chen Hongwei, Liu Jizhen, et al. Numerical simulation on emission characteristics of pulverized coal combustion [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 166-169.
- [7] 向军, 熊友辉, 郑楚光, 等. PDF-ARRHENIUS 方法模拟煤粉燃烧氮氧化物生成[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 156-160.  
Xiang Jun, Xiong Youhui, Zheng Chuguang, et al. Using PDF-ARRHENIUS to simulate 3-Dimensionally  $NO_x$  formation during coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 156-160.

- [8] 张永福. 直流煤粉燃烧器壁温分布的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 85-88.  
Zhang Yongfu. Mathematical model of wall temperature distribution for pulverized coal flat burner[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 85-88.
- [9] 韩才元, 徐明厚. 煤粉燃烧[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001.
- [10] 曹子栋编著. 锅炉测试技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
- [11] 张孝勇, 陈学渊, 罗泽斌, 等. 等离子点火技术在烟煤锅炉上的应用[J]. 中国电力, 2002, 35(12): 15-18.  
Zhang Xiaoyong, Chen Xueyuan, Luo Zebin, et al. Application of plasma igniting technology in the bituminous coal-fired boilers [J]. Electric Power, 2002, 35(12): 15-18.
- [12] 许晋源, 徐通模. 燃烧学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- [13] 孔杏凡. 等离子体及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [14] 蒋绍坚, 彭好义, 艾元方, 等. 高温空气燃烧新型锅炉及特性分析[J]. 热能动力工程, 2000, 15(7): 348-351.  
Jiang Shaojian, Peng Haoyi, Ai Yuanfang, et al. High temperature air combustion boiler and its performance analysis[J]. Journal of engineering for thermal energy and power[J]. 2000, 15(7): 348-351.
- [15] 田子平, 缪正清, 吴国江, 等. 高温空气燃烧技术的最新进展[J]. 锅炉技术, 2000, 31(3): 16-20.  
Tian Ziping, Miao Zhengqing, Wu Guojiang, et al. Latest development of high temperature air combustion[J]. Boiler technology, 2000, 31(3): 16-20.
- [16] 黄少鹏. 俄罗斯电站锅炉无油电加热煤粉点火燃烧技术[J]. 节能, 2002, (10): 13-15.  
Huang Shaoe. Ignition and combustion technology in russia pulverized coal boiler with oil-free electric heating[J]. Energy conservation, 2002, (10): 13-15.
- [17] 李永华, 李松庚, 冯兆兴, 等. 褐煤及其混煤燃烧  $\text{NO}_x$  生成的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 34-36.  
Li Yonghua, Li Songgeng, Feng Zhaoxing, et al. Experimental study on the formation of  $\text{NO}_x$  of brown and brown-blending coal combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 34-36.
- [18] 姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 粉煤颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 142-145.  
Jiang Xiumin, Yang Haiping, Liu Hui, et al. Analysis of the effect of coal powder granularity on combustion characteristics by thermogravimetry[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 142-146.
- [19] 郭永红, 孙保民, 刘彤, 等. 褐煤的超细粉再燃中  $\text{NO}_x$  的生成与还原的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 94-98.  
Guo Yonghong, Sun Baomin, Liu Tong, et al. Numerical simulation of  $\text{NO}_x$  formation and deoxidization with micro-pulverized coal reburning technology for lignite[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 94-98.
- [20] 郭永红, 孙保民, 康志忠. 超细煤粉再燃低  $\text{NO}_x$  燃烧技术的数值模拟[J]. 动力工程, 2005, 25(3): 422-426.  
Guo Yonghong, Sun Baomin, Kang Zhizhong. Numerical simulation of low  $\text{NO}_x$  recombustion technique with micro-pulverized coal [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(3): 422-426.
- [21] 周俊虎, 石伟, 周志军, 等. 煤粉浓度对煤粉高温热壁点火影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 208-211.  
Zhou Junhu, Shi Wei, Zhou Zhijun, et al. Experimental study of effect of pulverized coal concentration on coal ignition with hot wall [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 208-211.

收稿日期: 2005-10-09。

作者简介:

张孝勇 (1967-), 男, 博士研究生, 现为烟台龙源电力技术有限公司工程师, 研究方向为电站锅炉等离子点火与稳燃技术;

王雨蓬 (1948-), 男, 教授, 研究方向为电站锅炉等离子点火与稳燃技术;

郭永红 (1975-), 女, 博士研究生, 研究方向为电站锅炉炉膛燃烧及污染物排放的数值模拟;

孙保民 (1959-), 男, 博士生导师, 研究方向为燃烧理论、污染物控制;

黄其励 (1941-), 男, 中国工程院院士, 研究方向为高效清洁燃烧及环境污染控制。

(责任编辑 车德竟)