

# 大功率可调节等离子点火实验研究与工业应用

朱兴营<sup>1</sup> 陈峰<sup>1</sup> 徐荣田<sup>2</sup> 周法<sup>1</sup>

(1. 航天神洁(北京)环保科技有限公司 电弧等离子应用装备北京市重点实验室, 北京 100074;  
2. 神华国能宁夏煤电有限公司, 宁夏 银川 750000)

**摘要:**以鸳鸯湖电厂660 MW四角切圆煤粉锅炉单只燃烧器为原型,按照1:1比例搭建了等离子点火试验台,对航天等离子点火系统特性进行了实验研究,试验结果表明:对于宁东烟煤,喷枪功率为110 kW时,点火煤粉浓度可以降低到0.13 kg/kg,点火初期较好的一次风速范围为18~22 m/s,煤粉细度 $R_{90}$ 控制在20%~24%范围内为宜;对于宁夏贫煤,提高喷枪功率到350 kW,煤粉浓度达到0.25 kg/kg时,可实现煤粉的等离子点火,点火初期一次风速控制20 m/s以下为宜。在鸳鸯湖电厂660 MW锅炉上的工业应用结果显示,最低点火煤粉浓度仅为0.1 kg/kg,锅炉升温速度 $\leq 1$  °C/min,匹配锅炉设计温升曲线,解决了传统等离子点火初期锅炉升温速度快的问题。

**关键词:** 航天等离子点火; 大功率; 高压旋转; 煤粉浓度; 升温速度

中图分类号: TK223.2 文献标识码: B

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.05.042

## 引言

同传统油枪点火相比,等离子点火具有经济、环保和高效等优点<sup>[1-2]</sup>。近些年来,煤粉锅炉等离子点火在我国得到了快速发展,国内多家企业也都开发出了相对成熟的工业用等离子点火喷枪<sup>[3-4]</sup>。然而,现有的等离子点火系统在实际应用中也碰到一些问题,较为突出的问题为:煤粉浓度较好的适用范围为0.36~0.52 kg/kg,最低不得低于0.3 kg/kg,在此浓度条件下锅炉初期的温升速率较快,易导致厚壁元件热应力超标,水冷壁氧化皮脱落等问题,威胁锅炉的安全运行<sup>[5-7]</sup>,这也是等离子点火技术在国外并没有得到普遍推广的原因之一;等离子喷枪功率多集中在100 kW左右,对于褐煤、烟煤等挥发分较高的煤种容易点燃,而对于贫煤等挥发分较低的煤种则较难点燃,限制了等离子点火技术的进一步应用和推广。

航天等离子喷枪技术源于中国航天飞行器气动

热地面模拟试验采用大功率管状电弧加热器,其工作原理如图1所示<sup>[8-9]</sup>。喷枪功率最大可达500 kW且可以连续调节,同时,由于其独特的高压切向进气方式,一方面实现气旋稳定电弧,省去了传统等离子喷枪磁稳线圈结构,另一方面从枪口喷出的高温等离子体气流呈高速旋转状态,强化了与煤粉气流的混合与换热,更有利于煤粉气流的着火。由于航天等离子喷枪大功率和高压旋转气流的特性,配合电厂磨煤机降低出力的措施,一方面可实现低煤粉浓度条件下锅炉点火,匹配锅炉温升曲线,同时也可以应用于对贫煤等难燃煤种的点火;另外,航天等离子喷枪采用高频电压一键式引弧,启弧成功率接近100%,避免了传统接触式拉弧方式时因拉弧失败而造成电极磨损废弃的问题,降低了等离子点火系统应用过程中的维护费用和因电极烧损灭弧影响锅炉点火的可能性。需要说明的是,100~150 kW级航天等离子喷枪系统成本与市场等离子点火系统成本一致,随着功率增加,提高了对整流电源系统的要求,系统成本也相应增加。因此,航天等离子点火系统需要根据不同的煤种选择合理的喷枪功率范围,控制系统成本。

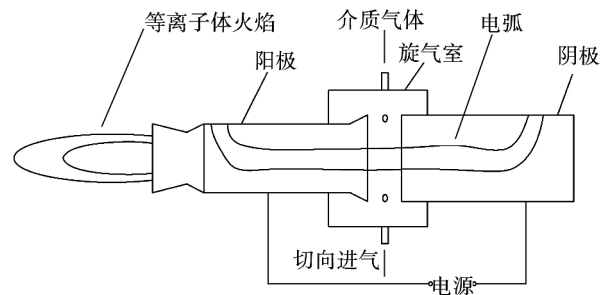


图1 航天等离子喷枪工作原理示意图

Fig. 1 Principle of the aerospace plasma generator

收稿日期: 2014-08-27; 修订日期: 2014-10-02

作者简介: 朱兴营(1988-),男,山东泰安人,航天神洁(北京)环保科技有限公司工程师。

本研究依托于搭建的等离子点火试验台,对航天大功率可调节等离子点火系统在不同煤种、煤粉浓度、风速和煤粉粒度条件下的点火特性进行了试验研究。在此基础上,航天大功率可调节等离子点火系统在神华国能鸳鸯湖电厂 660 MW 煤粉锅炉上进行了工业性应用。

## 1 试验系统

### 1.1 试验台简介

航天大功率可调节等离子点火试验台以 660 MW 四角切圆煤粉锅炉单只燃烧器为原型,按照 1:1 比例搭建,由等离子喷枪系统、制粉系统、给粉称重计量系统、一次风系统、燃烧系统、烟风系统和控制系统组成,试验台系统如图 2 所示。经磨煤机得到试验所需粒度的煤粉进入粉仓储存,试验过程中粉仓内的煤粉经给粉称重计量系统进入一次风管道,经蒸汽换热器预热后的热一次风携带煤粉进入等离子燃烧器,经等离子喷枪着火,在燃烧室内完成燃烧后烟气经过降温与除尘系统由烟囱排出,试验过程通过远程操作系统控制完成。

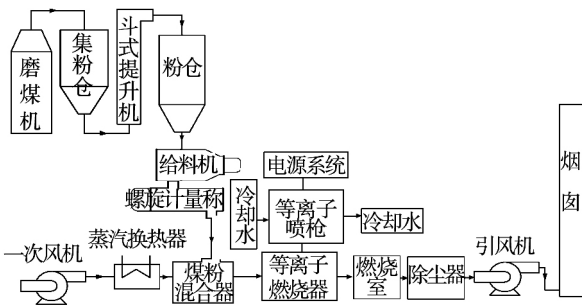


图 2 等离子点火试验台系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the plasma ignition test system

### 1.2 试验方法

试验过程中给粉量通过给料机变频电机和控制

系统之间的实时反馈修正完成。试验台一次风管道上安装有风速测量装置及温度传感器( pt100),用于检测一次风粉气流速度及温度,如图 3 所示。燃烧室燃烧器出口火焰区域对应侧墙上装有图像火检装置和热电偶(0-1300℃),用于观察火焰状态和检测火焰区域温度,通过分析同一试验时刻(点火后 5 min)火焰状态和火焰区域温度,判定等离子点火效果。需要说明的是试验台燃烧室内敷耐火水泥,并不能完全模拟实际锅炉炉膛状态,因此火焰区域温度仅作为该试验条件下的点火效果判定依据,在实际锅炉应用中还需考察更多运行参数。

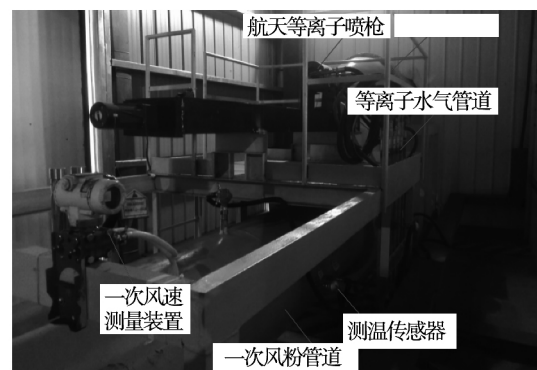


图 3 等离子点火试验台试验段

Fig. 3 Experiment part of the plasma ignition test system

### 1.3 试验工况

本研究进行了不同煤种、煤粉浓度、风速和煤粉粒度条件下的等离子点火试验,试验煤种分别为宁夏宁东烟煤和大坞口贫煤,煤质参数如表 1 所示。试验工况 1-4 为煤粉浓度从 0.09 kg/kg 逐步增加到 0.34 kg/kg 4 个条件下的等离子点火试验,工况 5-8 为风速从 18 m/s 逐步增加到 24 m/s 4 个条件下的等离子点火试验,工况 9-12 为煤粉细度  $R_{90}$  从 10% 逐步增加到 46% 4 个条件下的等离子点火试验,试验工况参数如表 2 所示。

表 1 试验煤种煤质参数

Tab. 1 Coal properties of the experiment

煤种	元素分析收到基/%					工业分析收到基/%				$Q_{net,ar} / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
	C	H	O	N	S	V	A	M	FC	
试验煤种 1(烟煤)	59.0	3.21	10.94	0.61	0.98	24.96	12.30	12.96	49.78	21 870
试验煤种 2(贫煤)	47.37	3.91	1.29	1.23	0.38	12.12	43.22	2.6	41.98	16 280

表 2 等离子点火试验工况表

Tab.2 The drawing of the working conditions of the Dlasma iqnition test system

工况	风速/m · s <sup>-1</sup>	风粉气流温度/℃	煤粉细度 R <sub>90</sub> = /%	给粉量/t · h <sup>-1</sup>	煤粉浓度/kg · kg <sup>-1</sup>	喷枪功率/kW
1	18.2	69.4	20	2	0.09	100 - 350
2	18.1	68.9	20	3.1	0.13	100 - 350
3	18.1	68.3	20	5.8	0.25	100 - 350
4	18	68.1	20	7.8	0.34	100 - 350
5	18	71.8	20	5.8	0.25	100 - 350
6	20	71.8	20	5.8	0.23	100 - 350
7	22	71.8	20	5.8	0.21	100 - 350
8	24	71.8	20	5.8	0.19	100 - 350
9	18	69.4	10	5.8	0.25	100 - 350
10	18	69.4	20	5.8	0.25	100 - 350
11	18	69.4	24	5.8	0.25	100 - 350
12	18	69.4	46	5.8	0.25	100 - 350

## 2 试验结果及分析

### 2.1 煤粉浓度对等离子点火特性的影响

煤种 1 点火试验时,等离子喷枪功率设定为 110 kW,通过图像火检观察燃烧火焰状态,煤粉浓度为 0.09 kg/kg 时,能够看到燃烧火焰,但火焰连续性较差,原因为该煤粉浓度条件下,尽管燃烧器中心筒内煤粉能够被点燃,但煤粉燃烧放出的热量较少,热流密度低,后续煤粉燃烧不充分,煤粉分级燃烧效果不明显,火焰状态差;随着煤粉浓度的增加,火焰连续性和稳定性增强,煤粉浓度为 0.13、0.25 和 0.34 kg/kg 3 个状态下,煤粉着火稳定,火焰连续,中心明亮。煤种 2 点火试验时,等离子喷枪功率提高到 350 kW,煤粉浓度为 0.09 和 0.13 kg/kg 时,只能看到少量火苗,原因为该状态下只有中心筒内等离子火焰周围少量煤粉被高温等离子体气流引燃,无法实现次级和末级煤粉的着火;煤粉浓度增加到 0.25 kg/kg 时,火焰连续,煤粉浓度提高 0.34 kg/kg 时,火焰稳定性明显增强,火焰中心明亮。

图 4 为不同煤粉浓度条件下燃烧器喷口火焰区域温度曲线。整体来讲,随着煤粉浓度的不断增加,火焰区温度不断提高。煤种 1 点火试验,煤粉浓度为 0.09 kg/kg 时,煤粉浓度低,热流密度低,煤粉燃烧不充分,火焰区温度在 492 ℃ 左右。当煤粉浓度增加到 0.13 kg/kg 时,中心筒着火稳定,热流密度增加,燃烧器内煤粉被逐步点燃并充分燃烧,燃烧器出口火焰区温度提高到 698 ℃ 左右,之后随着煤粉浓度的进一步提高,放热量增加,火焰区温度逐步升高。煤种 2 点火试验时,煤粉浓度为 0.09 和 0.13

kg/kg 时,燃烧器中心筒内少量煤粉被点燃,火焰区温度分别为 135 和 192 ℃,当煤粉浓度增加到 0.25 和 0.34 kg/kg 时,着火较好,火焰稳定性、连续性增强,火焰区温度提高到 549 和 685 ℃。

由此可见,在保证火焰连续稳定、煤粉燃烧充分的条件下,煤种 1 点火时等离子喷枪功率设定为 110 kW,点火煤粉浓度可以降低到 0.13 kg/kg;等离子喷枪功率提高到 350 kW,点火煤粉浓度达到 0.25 kg/kg 时可实现煤种 2 的等离子点火。

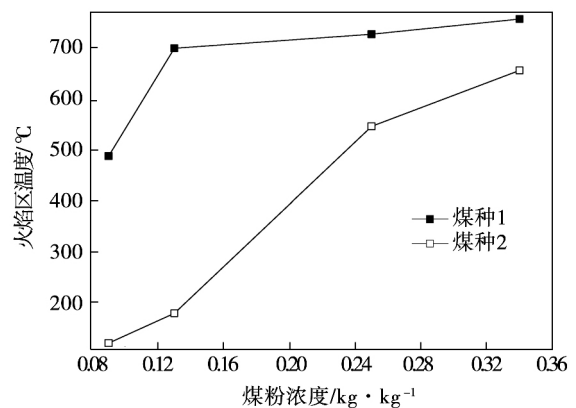


图 4 不同煤粉浓度条件下火焰区域温度  
Fig.4 Temperature of the flame zone with different pulverized coal concentrations

### 2.2 一次风速对等离子点火特性的影响

一次风速从 18 m/s 逐步增加到 24 m/s,通过图像火检都能够观察到明亮连续的火焰,但随着风速的增加,火焰稳定性、连续性变差。煤种 1 点火试验时,一次风速增加到 24 m/s 时,火焰稳定性有所降低;煤种 2 点火试验时,一次风速增加到 22 和 24

m/s 时,火焰稳定性和连续性明显降低。

图 5 为不同风速条件下燃烧器喷口火焰区域温度曲线。从图中可以看出,两种煤种点火试验时,火焰区域温度随一次风速的变化规律是一致的。煤种 1 点火试验时,随着一次风速的不断增大,火焰区域温度从 719 °C 逐步降低到 669 °C,但并没有大幅度的改变,这是由于一次风速增加,燃烧器中心筒内煤粉气流着火稍有延迟,放热量有所降低引起的;煤种 2 点火试验时,风速提高到 22 和 24 m/s 时,火焰区温度降低幅度较大,与火焰变化状态一致,说明在该风速条件下煤粉点火情况不佳。

综合考虑不同风速条件下的着火特性和火焰稳定性,对于煤种 1,等离子点火较好的风速适应范围为 18 - 22 m/s,而对于较难点燃的煤种 2,则点火期间风速控制在 20 m/s 以下为宜。

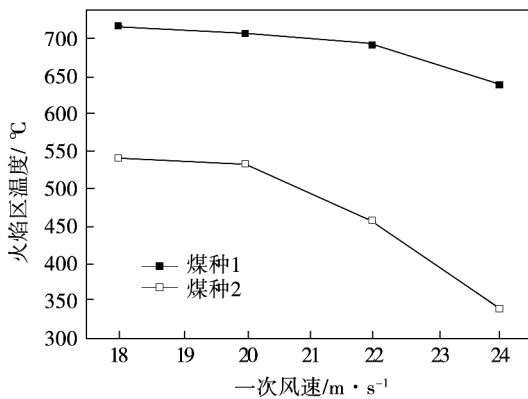


图 5 不同一次风速条件下火焰区域温度

Fig. 5 Temperatures of the flame zone with different wind speeds

### 2.3 煤粉细度对等离子点火特性的影响

煤种 1 和煤种 2 点火试验中,煤粉粒度  $R_{90}$  从 10% 逐步增大到 46%,都能观察到稳定连续的火焰,当煤粉粒度增加到 46% 时,火焰有一定程度的闪烁,分析原因是由于此时煤粉粒径较大,部分煤粉燃烧不充分造成的。

图 6 为不同煤粉细度条件下燃烧器喷口火焰区域温度曲线,从图中可以看出,与一次风速对点火特

性的影响规律一致,煤粉细度  $R_{90} = 10%$  时,点火过程中煤种 1 和煤种 2 对应的燃烧器出口火焰区域温度分别为 734 和 568 °C 左右,随着煤粉粒径的增加,火焰区温度不断降低,当  $R_{90}$  增加到 46% 时,火焰区温度降低到 678 和 477 °C,是由于此时煤粉颗粒较大,较难完全燃烧,放热量减少。

综合考虑磨煤机功耗与煤粉燃尽率,煤粉粒度  $R_{90}$  在 20% - 24% 范围内为宜。

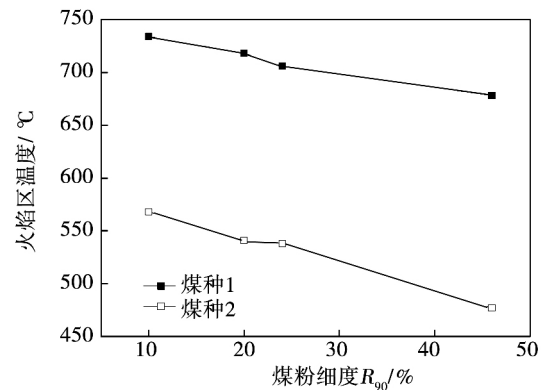


图 6 不同煤粉细度条件下火焰区域温度

Fig. 6 Temperatures of the flame zone with different pulverized coal fineness

## 3 工业性应用

航天等离子点火系统在神华国能鸳鸯湖电厂 1 号锅炉 A 层进行了工业性应用,点火过程中炉膛火焰明亮,图像火检信号清晰。表 3 给出了点火过程中 4 个时刻部分锅炉点火运行参数,按照 A 磨煤机出口煤粉均匀分配到锅炉 A 层四角燃烧器进行计算,单只燃烧器最低点火煤粉浓度仅为 0.1 kg/kg。在点火初期,采用临炉热风对炉膛进行了加热,提高了点火初期炉膛内的温度,增强了点火火焰的稳定性,因此在工业应用中最低点火煤粉浓度相比于试验条件下更低。点火过程中锅炉温升速率  $\leq 1$  °C/min,避免了锅炉无油点火初期因点火煤粉浓度高、给煤量多而引起的锅炉温升速率快的问题。

表 3 锅炉点火过程中部分运行参数

Tab. 3 Operation parameters of the boiler during the process of plasma ignition

时刻	风速 / m·s <sup>-1</sup>	风粉气流温度 / °C	煤粉细度 $R_{90}$ / %	给粉量 (A 磨煤机) / t·h <sup>-1</sup>	煤粉浓度 / kg·kg <sup>-1</sup>	喷枪功率 / kW
1	18	59.5	21	8.0	0.1	110
2	19.2	59.5	21	16.8	0.17	110
3	19.2	59.5	21	25.2	0.25	110
4	21.4	59.5	21	25.2	0.23	110

## 4 结 论

通过试验手段,研究了航天等离子点火技术对煤种、煤粉浓度、一次风速和煤粉细度的适应性,同时,通过工业性应用进行对照和验证,得出以下结论:

(1) 采用航天等离子点火系统对宁东烟煤进行等离子点火试验时,喷枪功率 110 kW,在保证点火成功、火焰连续稳定的条件下,点火煤粉浓度可以由传统的 0.3 kg/kg 降低到 0.13 kg/kg,点火初期较好的一次风速适应范围为 18 - 22 m/s,煤粉细度  $R_{90}$  控制在 20% - 24% 范围内为宜。

(2) 对于宁夏大坞口贫煤,航天等离子喷枪功率提高到 350 kW,煤粉浓度达到 0.25 kg/kg 时,可实现其等离子点火,点火初期一次风速控制在 20 m/s 以下为宜,煤粉细度  $R_{90}$  在 20% - 24% 范围内。

(3) 在工业应用中,配以临炉热风预热炉膛的措施,最低稳定点火煤粉浓度仅为 0.1 kg/kg,锅炉升温速率控制在 1 °C/min 以下,解决了传统等离子点火初期锅炉升温速率快的问题。

### 参考文献:

- [1] Kanilola PM, Kazantsev VI, Rasyuk NI, et al. Microwave plasma combustion of coal[J]. Fuel 2003, 82(2): 187 - 193.
- [2] 陈亦涛, 赵宁宁. 等离子点火燃烧技术在电厂节能和环保方面的应用[J]. 电力环境保护 2007, 23(1): 58 - 60.  
CHEN Yi-tao, ZHAO Ning-ning. Application of plasma ignition combustion technique in the thermal power plant for energy conservation and environmental protection[J]. Electric Power Environmental Protection 2007, 23(1): 58 - 60.
- [3] 张向群, 孙伟, 叶振起. 等离子油点火技术在 600 MW 超临界机组直流锅炉蒸汽吹管中的应用[J]. 热力发电 2006, 09: 24 - 26.  
ZHANG Xiang-qun, SUN Wei, YIE Zhen-qi, et al. Application of plasma oilless ignition technology in blowing pipes with steam for

once-through boiler of 600 MW supercritical unit[J]. Thermal Power Generation 2006, 09: 24 - 26.

- [4] 韩立忠, 曾喜, 陈艳芬. 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 #20.  
HAN Li-zhong, ZENG Xi, CHEN Yan-fen, 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 #20.
- [5] 周俊虎, 石伟, 周志军. 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 Jun-hu, SHI Wei, ZHOU Zhi-jun, 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.
- [6] 毛永清, 梅东升, 孙辉. 600 MW 锅炉采用等离子煤粉点火系统[J]. 华北电力技术 2003, 1: 1 - 3, 17.  
MAO Yong-qing, MEI Dong-sheng, SUN Hui. 600 MW boiler using plasma pulverized coal ignition system[J]. North China Electric Power 2003, 1: 1 - 3, 17.
- [7] 吴磊, 郑占国, 刘斌杰. 大容量机组应用等离子点火技术存在的问题与解决措施[J]. 河北电力技术 2007, 26(1): 17 - 19.  
WU Lei, ZHENG Zhan-guo, LIU Bin-jie, et al. Problems and Measures of Plasma Ignition Technology Applied in Large Unit[J]. Hebei Electric Power 2007, 26(1): 17 - 19.
- [8] 任思根, 徐永定, 李正婉. 实验空气动力学[M]. 宇航出版社, 1996: 58 - 63.  
REN Si-gen, XU Yong-ding, LI Zheng-wan, et al. Experimental Aerodynamics[M]. Aerospace Press, 1996: 58 - 63.
- [9] 兰宇丹, 何立明, 杜宏亮. 直流电弧等离子体点火器射流特性研究[J]. 原子能科学技术 2012, 46(2): 216 - 217.  
LAN Yu-dan, HE Li-ming, DU Hong-liang, et al. Characteristic study of DC electric arc plasma ignitor jet[J]. Atomic Energy Science and Technology 2012, 46(2): 216 - 217.

(单丽华 编辑)

In the light of the problem of current downward exhaust gas cyclone separators having a relatively low separation efficiency, the downward exhaust gas cyclone separator in a CFB boiler was chosen to conduct a reconstruction, slots were provided in the lower part of the exhaust gas pipe and guide plates were additionally installed in the exhaust gas pipe. A numerical simulation was performed of the downward exhaust gas cyclone separator and the ash particles outgoing from the separator and dust removal devices were sampled and analyzed before and after the reconstruction. On this basis, the gas-solid two-phase flow after entering the exhaust gas pipe was studied through a secondary separation. It has been found that the separation device can effectively enhance the separation efficiency of the separator. **Key words:** downward exhaust gas cyclone separator, separation device in an exhaust gas pipe, secondary separation, separation efficiency

电站锅炉给水前置泵双速改造的必要性分析 = **Analysis of the Necessity of the Dual-speed Reconstruction of the Feedwater Booster Pump of a Utility Boiler** [刊, 汉] HU Si-ke, CHEN De, LIU Ru-zhou, WANG Shuo-lin

(College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(5). - 802 - 807

For the current large and medium-sized units, to enhance the cost-effectiveness of boiler feed water systems, the authors put forward for the first time a version to conduct a dual-speed reconstruction of the rated speed of the booster pump and undergo a series coordinated operation with the variable speed main feed water pump. In the meantime, whether or not any cavitation will happen in the system after the reconstruction was argued. Through a comprehensive case contrast and analysis, it has been proven that the reconstruction version is technically feasible, economically rational and operationally reliable, thus offering a reliable theoretical basis for concrete implementation in engineering projects. **Key words:** boiler feedwater, booster pump, main feed water pump, dual speed switch-over, series operation

大功率可调节等离子点火实验研究与工业应用 = **Experimental Study of High Power Controllable Plasma Ignition and Its Application in Industries** [刊, 汉] ZHU Xing-ying, CHEN Feng, ZHOU Fa (Beijing City Key Laboratory on Electric Arc Plasma Application Equipment, Aerospace Shenjie (Beijing) Environmental Protection Science and Technology Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100074), XU Rong-tian (Shenhua Guoneng Ningxia Coal

and Power Co. Ltd. ,Yinchuan ,China ,Post Code: 750000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30( 5) . - 808 - 812

With a single burner in a 660 MW tangential pulverized coal-fired boiler in Yuanyang Lake Power Plant serving as the prototype ,a full scale plasma ignition test rig was set up and the characteristics of aerospace plasma ignition were experimentally studied. The test results show that for Dongning-originated bituminous coal ,when the power of the spray gun reaches 110 kW ,the pulverized coal concentration for ignition can decrease to 0.13 kg/kg and the relatively good adaptable range of the primary air speed falls in a range from 18 m/s to 22 m/s and it is proper to control the pulverized coal fineness in a range from 20% to 24% in the initial stage of the ignition. For Ningxia-originated lean coal ,when the power of the spray gun increases to 350 kW and the pulverized coal concentration reaches 0.25 kg/kg ,the plasma ignition of pulverized coal can be realized and it is proper in the initial stage of the ignition to control the primary air speed in a range below 20 m/s. The industrial application results in the 660 MW boiler in Yuanyang Lake Power Plant show that the minimum ignition pulverized coal concentration is only 0.1 kg/kg and the temperature rise speed is  $\leq 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  ,matching with the design temperature rise curves of the boiler and solving the problem that the temperature rise speed in the initial stage of conventional plasma ignition is quick. **Key words:** aerospace plasma ignition ,high power ,high pressure rotation ,pulverized coal concentration ,temperature rise speed

350 MW 超临界间接空冷汽轮机组调试过程中出现的问题及处理 = **Treatment and Problems Encountered in Unit Debugging of 350 MW Supercritical Indirect Air Cooling Steam Turbine** [刊 ,汉]ZHANG Shi-long ( Huadian Electric Power Research Institute ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310030) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30( 5) . - 813 - 815

The entire turbine start-up debugging ,debugging of small turbine system is an important part of steam turbine generator unit commission. The research has a detailed introduction on the problems encountered in the commission process and debugging of small turbine system of the three  $2 \times 350$  MW supercritical indirect air cooling steam turbine in A power plant. And it describes the process of treatment analysis and sums up the debugging experience and operational experience. **Key words:** Supercritical Turbine ,package start - up debugging of steam turbine ,small turbine system debugging