

我国电站锅炉煤粉直接点火技术的发展以及现状

聂欣¹, 周俊虎², 汪洋², 岑可法²

(1. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 能源清洁利用国家重点试验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 对我国现有的各种煤粉直接点火技术的原理、燃烧器结构以及在我国的发展和现状进行了阐述, 并指出其各自的优缺点。总结了现有煤粉直接点火燃烧器普遍存在的有关安全性方面的问题。为了解决现存电力行业的运行安全性与节油两者矛盾, 提出了两类解决手段: 其一, 采用多种调节手段降低煤粉气流着火热; 其二, 将直接点火技术与传统点火油枪两者配合使用。指出高温空气直接点火技术因其灵活的调节手段, 具有较大的技术优势。

关键词: 煤粉; 节油; 直接点火; 运行安全; 着火热

中图分类号: TK223.23

文献标识码: A

引言

我国油资源短缺, 但消耗巨大, 大量需要依靠进口。目前, 石油已成为影响我国能源和经济安全的战略物资^[1], 节约和替代燃料油已成为保证国家能源和经济安全的重要措施。早在 1997 年国家计委“中国能源”白皮书中就开始鼓励全社会开展以煤代油的工作; 国家经贸委从保障国家经济安全, 促进经济可持续发展的宗旨出发, 制定了《节约和替代燃料油“十五”规划》并制定了《节约石油管理条例》。因此, 在锅炉的点火与稳燃过程中, 以煤代油, 发

展电站锅炉的节油稳燃以及煤粉直接点火技术是保障我国经济安全的需要。基于这一需要, 国内许多科研单位进行了大量有关煤粉直接点火技术的研究。

1 我国现有的煤粉直接点火技术

根据点燃煤粉的热量最终来源(激发热源)的不同, 可以将直接点火技术分为两大类: (1) 以某物质的燃烧热作为激发热源, 包括马弗炉点火、少油与微油点火和可燃性气体点火等点火方式; (2) 以电能作为激发热源, 包括电阻加热点火、中频感应加热热壁面点火、等离子体点火和中频感应加热高温空气点火等点火方式。

1.1 马弗炉点火

马弗炉点火是 20 世纪 50 年代, 前苏联发展的一种锅炉无油直接点火方式, 其出现年代最早, 堪称无油点火燃烧器的鼻祖, 已被应用了 40~50 年, 最初采用块煤、劈柴和其它固体可燃物的燃烧热做为点火热源。点火时, 煤粉通过煤粉分配器经过马弗燃烧器被点燃, 炉膛温度升高后, 再切换到主燃烧器, 如图 1 所示。目前还出现了采用“电加热”作外加热源的新型“马弗”无油电加热点

火燃烧器^[2]。马弗炉点火一般仅适用于挥发分较高的煤种, 这种点火方式在我国早期一些“高龄”的中低压锅炉上曾经应用过。

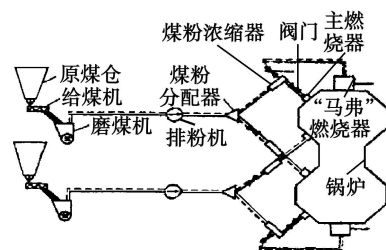


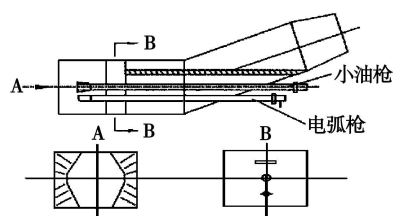
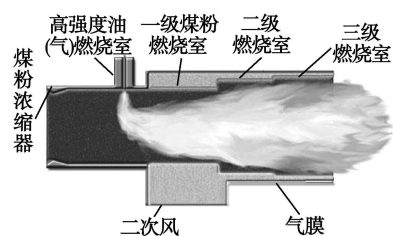
图 1 马弗炉点火系统示意图^[3]

1.2 少油与微油点火

小油枪点火技术是将油枪布置在一次风燃烧器中^[4,6~7], 如图 2 所示, 油枪的发热量全部用于煤粉气流的升温、点火, 因此, 油枪的容量可以比放置在二次风燃烧器中的油枪小得多。在冷炉启动或者锅炉低负荷稳燃时, 投入小油枪。带油运行时, 小油枪煤粉燃烧器的燃油热负荷仅占煤粉燃烧器热负荷的 6%~13%。根据文献[8]其节油效果较显著, 冷炉点火计算节油率大于 72%。但仍然存在需要改进的方面: 相对于其它技术而言, 小油枪点火技术仍需燃用较多的燃料油; 结焦和磨损问题也较严重。对此, 浙江大学等科研单位又进一步开发了微油点火技术。

微油量气化燃烧技术是在小

油枪的基础上发展起来的^[9-10]。它利用压缩空气的高速射流将燃料油直接击碎,雾化成纳米级超细油滴进行燃烧,同时用燃烧产生的热量对燃料进行初期加热、扩容、后期加热,在极短时间内完成油滴的蒸发气化,如图3所示。此项技术耗油率更低。根据文献[11]所述,在205 t/h锅炉上的节油量可达到95%。尽管该技术取得了一定的成功,但由于点火源安装位置位于一次风管内,仍然存在燃烧不易控制,容易结焦和磨损的倾向,其可靠性还有待于实践的进一步检验。

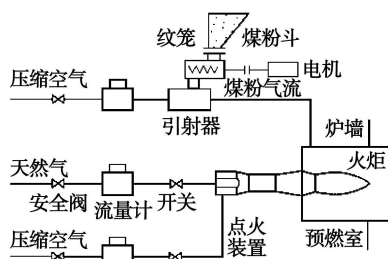
图2 小油枪点火燃烧器^[4]图3 微油点火燃烧器^[9]

1.3 可燃性气体点火

近年来,也有研究者利用天然气、液化气以及沼气等可燃气体作为激发点火源^[12-15],采用强制预混式燃烧方式,先在预燃室中点燃煤粉气流并使之稳定燃烧,再由喷出煤粉火炬去加热炉膛并最终点燃锅炉的主煤粉气流,这样用煤粉预燃室代替了油枪,从而达到了节油目的,并进行了工业试验,取得一定的成功,其点火系统如图4所示。

这种点火方式在一些天然气

资源丰富的地区有一定的应用价值。但由于天然气、液化气的成本较高,而沼气又需要复杂庞大的发生装置,目前应用并不广泛。

图4 可燃气点火系统^[12]

1.4 电阻加热点火

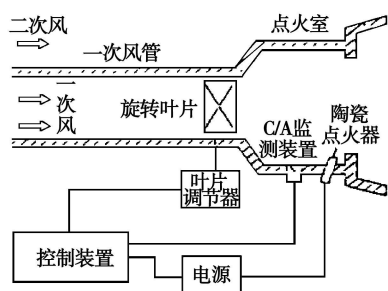
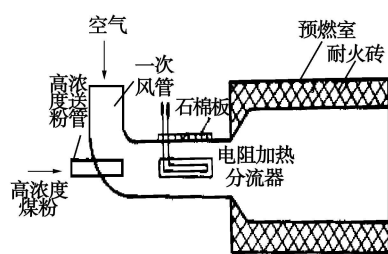
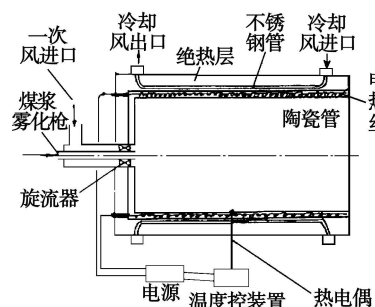
图5 陶瓷点火燃烧器^[16]图6 金属热阻点火燃烧器^[17]

图5是巴布考克日立株式会社开发的一种煤粉点火燃烧器^[16],粉煤和空气混合流送给煤粉燃烧器,经旋流叶片产生浓淡分离,在点火室内表面形成浓度高而流速低的煤粉直接点火区域;煤粉与加热到给定温度1000~1200℃的陶瓷点火器相撞,导致煤粉不断挥发而连续点火。图6是文献[17]所述的一种电阻型

点火燃烧器,这种燃烧器的电阻加热元件,位于煤粉分流器的内部,通过高浓度煤粉对高温金属块(分流器)的冲刷,点燃煤粉。

电热腔点火技术是由浙江大学于1993年研制的^[18-19],其实验装置如图7所示。电热腔点火是以电加热一段一次风管,通过附面层传热使煤粉气流在靠近高温壁面处首先着火,然后火焰传播至整个截面。如果在电热腔之外再套一级一次风管,即可形成两级或多级点火。浙江大学在开发电热腔点火燃烧器的过程中,在如何用尽可能少的能量去点燃更多的煤粉的研究中,率先提出了多级点火的概念。

图7 煤浆/煤粉电热腔点火器简图^[18]

尽管以上3种点火燃烧器的具体结构各异,但它们都是利用电阻丝产生的热量来作为点燃煤粉的激发热源的,在点燃挥发分较高的煤种时,都取得了一定的成功。但它们都存在两个明显的缺陷,一是电阻丝经过多次通电加热后容易断裂;二是这种点火方式都属于热固体壁面点火,容易产生结焦。

1.5 中频感应加热点火

为了解决电阻式直接点火燃烧器中的电阻丝寿命短的问题,浙江大学于1997年提出了感应加热无油点火技术,首次将中频感应快速加热技术应用到煤粉的

直接点火中去。感应加热技术具有加热速度快、功率调节灵敏和可靠性高等优点,其系统结构示意图如图 8 所示。该技术在实验室和电厂的工业试验中,取得了一定的成功,但也存在结焦和燃尽率偏低的问题,故目前还没有得到推广应用。

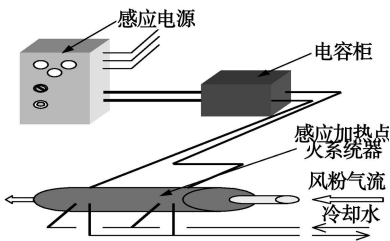


图 8 感应加热系统示意图^[20~21]

1.6 等离子(高能电弧)点火

1978 年,美国的 CE 公司成功研制出世界上第一台高能电弧点火煤粉燃烧器,并在 90 万 kW 的锅炉上成功应用^[23]。这也是世界上最早的等离子点火燃烧器。但该点火燃烧器仅能形成断续的高温电弧来点燃煤粉,故对煤种的适应性差,后经过其他的研究者进行了改进,逐渐演变成现在的可连续引弧的等离子点火燃烧器。

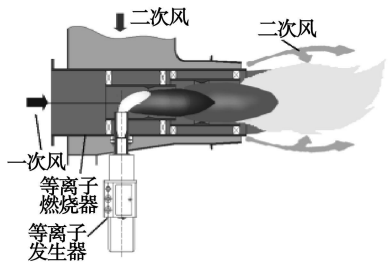


图 9 等离子燃烧器结构示意图^[23]

在我国,从 20 世纪 70 年代中期开始,清华大学、华中理工等院校和哈尔滨锅炉厂、武汉锅炉厂等单位也进行了有关等离子点

火的试验研究,取得了一定的成绩,但因故未能坚持下来。到 2000 年初,烟台龙源公司利用等离子体直接点火燃烧器在烟台电厂 220 t/h 锅炉点火成功,此后等离子体点火燃烧器在全国得到了一定范围的推广应用^[23~28],如图 9 所示。

等离子点火就是利用直流电将以压缩空气为介质的气体电离后产生功率稳定、定向流动的等离子弧,在燃烧室内产生温度达 3 000 ~ 4 000 K 的局部火核,当细小的煤粉颗粒与等离子流接触时,瞬间发生热化学反应,释放出大量的挥发分,使煤粉颗粒破碎、燃烧,从而点燃整股煤粉气流。等离子燃烧系统由点火系统和辅助系统两大部分组成。点火系统由等离子燃烧器、等离子发生器、电源控制柜、隔离变压器和控制系统等组成;辅助系统由压缩空气系统、冷却水系统、图像火检系统和一次风在线测速系统组成。

等离子点火燃烧器是我国目前应用较广泛的直接点火燃烧器,对我国的电站锅炉节油做出较大的贡献,但也暴露出了初期投资大,对外界的要求苛刻(为保证等离子体发生器起弧正常而稳定,要求压缩空气压力稳定,不带水、不带油并且没有杂质;冷却水采用化学除盐水;对风粉的要求较高,若波动较大就会引起断弧或电弧不稳。^[27]阳极易受煤粉污染^[28],阴极寿命低等问题和缺陷。另外,结焦问题也难以完全避免。

1.7 高温热空气点火

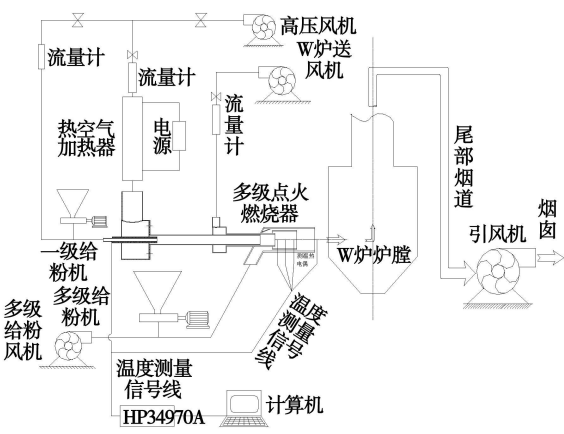


图 10 高温空气多级点火燃烧器试验系统图^[29]

高温空气点火的方式是近几年来有关直接点火研究的一个亮点。目前,除浙江大学(图 10 和图 11)外^[29],北京科技大学、华北电力大学等单位都对其进行了研究^[30~31],并且在少量燃用高挥发分煤种的电厂上取得了成功^[32]。其主要原理是:利用中频电源对冷空气进行加热,产生 700 ℃以上的高温空气点燃冷态煤粉。



图 11 高温空气点火燃烧器出口火焰^[29]

在浙江大学 3.5 MW 实验锅炉上的运行试验表明,高温空气冷炉点火时,尾部烟道取样的煤焦燃尽率可达 70% 以上,挥发分燃尽率可达 90% 以上,并成功地点燃了挥发分较低的贫煤^[29]。

另外,该设备的主要优点还在于:(1) 调节方便,使得其在冷态点火或热态稳燃过程中,根据煤粉燃烧状况灵活调节热风风温

和风量,极大地提高了点火燃烧设备的安全性;(2)热风制粉,由于自带热风加热器,冷炉启动时,可采用旁路向制粉系统供风,直接进行热风制粉。但作为一种新型点火方式,它还处于工业推广应用阶段,其可靠性还有待实践进一步的检验。

2 存在的普遍性问题

在我国电厂,随着发电设备的大型化以及人们对成本、效益认识的深化和对各种煤粉直接点火燃烧方式的深入了解,对直接点火燃烧器的选择和应用上更趋理性,并不单纯地追求节油和理论上的成本降低,而是越来越重视点火燃烧器的可靠性和安全性。

而目前,直接点火燃烧器锅炉安全运行的不利影响因素主要有:(1)冷炉点火时煤粉燃尽率偏低的问题。大部分直接点火装置,在锅炉点火初期都存在煤粉燃尽率过低,容易造成尾部烟道积粉以及煤灰斗积粉自燃和爆炸事故;(2)稳燃时产生的结焦与一次风管烧毁问题。尽管绝大多数点火方式都具有一定的稳燃效果,但大多数都做不到真正的无级调节,特别是当锅炉燃烧状况不够稳定时,大多数直接点火燃烧器的投运容易使得一次风管温度急剧升高,增加结焦和烧毁一次风管的可能性;(3)冷炉启动时设备所受到的热应力问题。锅炉冷炉启动初期,由于煤粉着火需要一定的浓度和流量,所给的燃料量不如传统油枪易于调节和控制,容易使设备由于受到较大的热应力而损坏;(4)点燃低挥发分煤种仍然较困难。在目前,对于各种直接点火方式来说,如

何在冷炉状态下稳定安全地点燃低挥发分的煤种,仍然是一个难点。

3 解决问题的建议

目前,低负荷稳燃燃烧器与传统的点火油枪,仍然是我国大多数锅炉的煤粉点火燃烧设备,传统点火油枪由于其结构简单、反应迅速和易于调节等优点,具有其它点火方式难以达到的可靠性与安全性,但油资源的短缺和油价的快速上涨,使得节油的重要性变得日益迫切。

作者认为,解决这个的矛盾可采用两方面的手段:一方面,继续完善降低煤粉气流的着火热采用的各种手段,例如现在在诸多点火燃烧器上常用的煤粉浓淡分离等措施。同时,采用高浓度热风送粉或煤粉微波加热等预处理手段降低煤粉气流着火热,也不失为一个解决问题的办法。这些措施不但使得煤粉易于点燃,而且也使得煤粉气流着火后更易于调节,提高了点火燃烧系统的安全性。另外,对于挥发分低的难燃煤种,也可以采用高挥发分煤种或混煤作为点火用煤,待炉膛温度升高到一定程度后,再燃用低挥发分煤种的点火措施。另一方面,对于任何一种直接点火燃烧器来说,在各种冷、热态工况下,稳定安全地点燃煤粉并尽可能多地节省点火和稳燃用油是其本质目的。故而,在目前条件下,将传统的点火油枪和直接点火燃烧器配合使用,在保障锅炉安全运行的前提下,优化运行规程,达到尽可能高地节油率的方案也不失为一个可行的解决办法。

在诸多点火方式中,高温热空气直接点火技术具有一定的优

势。不同温度的高温热空气既可以做为送粉风使用以降低着火热,又可用于直接点火,同时,其灵活的调节手段也是其它点火方式所不具备的,具有较高安全性。且随着耐高温金属材料的不断发展,可达到的热空气温度也不断提高,有希望能够稳定安全地点燃贫煤和无烟煤等低挥发分煤种。

参考文献:

- [1] 朱成章. 能源是经济的首要问题[J]. 节能与环保, 2003(10): 12—15.
- [2] 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, 243(10): 13—15.
- [3] 黄少鹏. 国外电站锅炉运用煤粉无油点火燃烧系统的技术特点[J]. 热能技术, 2002(2): 4—7.
- [4] 王永正. 一种用于煤粉锅炉点火和稳燃的煤粉直接点火燃烧器[J]. 动力工程, 1989(2): 44—48.
- [5] 方明泽. 沙角C电厂锅炉微油点火技术应用的试验分析[J]. 广东电力, 2008, 21(4): 54—57.
- [6] 王永正. 锅炉点火和稳燃装置—节油点火燃烧器[J]. 中国电力, 2001, 34(2): 21—22.
- [7] 华峰, 王洪磊, 张立群. 等. 小油枪点火技术在小型电站锅炉上的应用[J]. 山东电力技术, 2005 141(1): 35—37.
- [8] 安恩科, 姜富明, 王启杰. 小油枪煤粉燃烧器在电站锅炉中的应用[J]. 中国电力, 2000, 33(3): 10—12.
- [9] 常征, 陈军, 王生. 小油量气化煤粉燃烧系统在 205 t/h 锅炉上的应用[J]. 黑龙江电力, 2003, 25(6): 418—422.
- [10] 贾永成, 冯婉霞, 王志杰. 等. 微油量气化燃烧直接煤粉燃烧系统在 670 t/h 锅炉上的应用[J]. 黑龙江电力, 2005 27(4): 263—265.
- [11] 郭家辉. 小油量气化煤粉燃烧系统节能改造分析[J]. 节能技术, 2004, 22(6): 47—49.
- [12] 刘圣勇, 张百良, 刘志刚. 等. 电站锅炉天然气点火装置的设计与研究[J]. 热能动力工程, 2002, 17(2): 180—182.
- [13] 刘圣勇, 刘志刚, 李隧亮. 等. 煤粉锅

炉液化气点火装置的理论与实践 [J]. 热能动力工程, 1999, 14(4): 447—449.

[14] 刘圣勇 齐爱琴, 高林朝, 等. 电站锅炉沼气点火装置的研究与设计[J]. 中国沼气, 1998, 16(1): 8—11.

[15] 陈开碇, 刘圣勇, 郭瑞琴. 电站锅炉天然气点火装置的理论与实践[J]. 节能技术 2001, 19(4): 14—16.

[16] 巴布考克日立株式会社. 煤粉点火燃烧器[P]. 中国专利: CN 87 1 06630A.

[17] 常兆麟. 烧褐煤蒸汽锅炉的无油点火 [J]. 宁夏电力, 1992(1): 37—40.

[18] 涂建华. 煤粉/水煤浆的着火理论和无油点火稳燃技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1994.

[19] 邱 瑜. 煤粉锅炉电热多级点火与稳燃技术[D]. 杭州: 浙江大学, 1995.

[20] 石 伟. 中频感应加热直接点火和稳燃技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.

[21] 李文蛟. 感应加热煤粉锅炉无油直接点火燃烧器的基础和试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000.

[22] 吴曙笛. 煤粉锅炉无油直接点火和稳燃技术评述[J]. 西北电力技术, 2001, 2(2): 20—26.

[23] 吴必科. 锅炉等离子点火燃烧器的应用[J]. 广东电力, 2004, 17(3): 77—80.

[24] 郑少亮, 王竹辉, 姚春庄. 等离子点火装置在大港电厂 328 MW 锅炉中的应用[J]. 电力设备, 2006, 7(5): 20—23.

[25] 尚玉琴, 孙新强. 等离子点火技术在锅炉冷态无油启动中的应用[J]. 锅炉技术, 2007, 38(2): 68—72.

[26] 吴永德, 李健胡, 郭 斌, 等. 等离子煤粉点火技术在电厂的应用[J]. 发电设备, 2005(2): 91—93.

[27] 殷立宝, 崔振东, 余岳溪, 等. 等离子无油点火技术应用中存在的问题及应对措施[J]. 热力发电, 2007, 38(2): 65—67.

[28] 李 辉. 等离子体在煤粉清洁燃烧中的基础应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2002.

[29] 聂 欣. 基于中频感应加热原理煤粉直接点火的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

[30] 冯武军, 李 栋, 赵立合, 等. 高温空气煤粉点火的试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 611—613.

[31] 康志忠, 张 伟, 郭永红. 等高温空气煤粉直燃技术的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(2): 163—166.

[32] 袁 德, 李 明. 高温空气无油点火技术研究与应用 //中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集[C]. 北京: 中国科学技术协会, 2004. 77—80.

(编辑 滨)

新技术、新设计

柴油机装置加装余热回收系统和动力涡轮

《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2007 年 9 月号报道, 最新一代用于大型船用柴油机的涡轮增压器的高效率已导致废热能量的“过剩”。这是因为它的涡轮增压系统不需要发动机排气中的全部能量。因此, 船东目前有在余热回收系统中使用这部分能量的选择方案。

以独立配置方式安装的 ABB TPL3200 动力涡轮用于通过减速齿轮箱驱动发电机, 将节省燃料 4%。对于大型集装箱船, 把动力涡轮结合进蒸汽循环能使系统总效率增加约 10%, 每年可节省燃料超过 5 000 t。

最近下水的 Emma Marsk 号集装箱船就是一个实际的例子。该船是当今世界最大的集装箱船之一, 其负载量为 11000 TEU (标准集装箱)。

该船的动力装置是一台 Doosan Waertsilae 14RTflex96C 柴油机, 配备有 4 台 ABB TPL85-B 涡轮增压器, 额定输出功率为 80 000 kW。它的余热回收系统的特点是: 有一台连接到由位于涡轮增压器管路内的一台余热锅炉产生的蒸汽驱动的汽轮机的 TPL3200 动力涡轮。该系统提供了附加的 8 500 kW 输出功率, 相当于主发动机输出功率 10%, 这使得 Emma Marsk 集装箱船成为使用中环境友好的船舶。

(吉桂明 供稿)

我国电站锅炉煤粉直接点火技术的发展以及现状 = **Development and Status Quo of Utility-boiler Pulverized-coal Direct-ignition Technologies in China** [刊, 汉] / NIE Xin (College of Mechanical Engineering, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310038), ZHOU Jun-hu, WANG Yang, CEN Ke-fa (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Sources, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 333 ~ 337

The working principles and burner structures of various pulverized-coal direct-ignition technologies currently available in China as well as their development and application status are expounded along with the respective merits and demerits being pinpointed. Several omnipresent problems concerning the safety of the burners in question are summarized. To solve the contradiction between the operation safety and oil savings now troubling the power generation industry of China, two approaches were proposed: the first approach involves the adoption of multiple regulating means to reduce the pulverized-coal flow ignition heating, and the second is to integrate the use of direct-ignition technology with traditional ignition oil guns. It should be noted that high-temperature air direct-ignition technology enjoys a relatively high technical advantage due to its flexible regulating means. **Key words:** pulverized coal, oil saving, direct ignition, safe operation, ignition heat

PG9171E 型燃气轮机变工况计算模型的建立 = **Modeling for the Calculation of Off-design Operating Conditions of a Model PG9171E Gas Turbine** [刊, 汉] / XIA Di, WANG Yong-hong (Turbo-machinery Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 338 ~ 343

To set up a calculation model for the off-design conditions of a PG9171E gas turbine, it is necessary to identify the compressor characteristics of the gas turbine in question on the basis of the original data provided by the power plant. As the current base-line estimation method was established without considering any experimental data of compressors at high-pressure ratios, in general, it can only be used for the estimation of compressor characteristics at a pressure ratio less than 11. However, the pressure ratio of the PG9171E gas turbine compressor has already approximated to 12. To solve this problem, a section-by-section calculation method was for the first time proposed for the calculation of compressor characteristics. The calculation results show that the accuracy of the above method can meet the requirement of practical applications. In respect of the calculation of thermodynamic properties involved in an off-design condition calculation model, a general-purpose relationship for the thermodynamic properties of air, CH₄ gas, C gas and steam was inducted based on thermodynamic properties table No. 2. This simplifies the calculation process of wet combustion gas enthalpy and logarithmic pressure ratio values when the combustor operates on heavy fuel oil. A comparison of the calculation results of the off-design condition calculation model with the actually measured parameters of the gas turbine shows that the above-mentioned improved method can meet the requirement for the modeling accuracy in practical applications. **Key words:** compressor characteristics, combustion gas thermodynamic properties, off-design condition calculation model

汽轮机凝汽器喉部流动性能的微型模化试验研究 = **Experimental Study of Micro-modeling of Flow Performances in the Condenser Inlet of a Steam Turbine** [刊, 汉] / ZHANG Lei-lei, CUI Guo-min, GAO Xiao-zhong, et al (Thermodynamic Engineering Research Institute, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 344 ~ 347

Under the precondition of ensuring an identical flow state and by using similarity theory and a method under which a model is subjected to a blowdown in a wind tunnel, established was a set of miniature modeling device for a condenser inlet. An experimental study has been conducted of the flow performances at the condenser inlet under different inlet-flow speeds. The test results show that the modeling test device in question can not only reduce the size of the model and the cost of testing, facilitating the conduct of the test, but also achieve a repeatability of the flow conditions in the condenser inlet. It can be used for the experimental study of the flow friction performance and flow conditions of any condenser inlet. **Key words:** condenser inlet, miniature-modeling device, flow friction, similarity theory

随机参数汽轮机叶片频率的随机有限元分析 = **Stochastic Finite Element Analysis of Turbine Blade Frequencies at Random Parameters** [刊, 汉] / AN Li-qiang, WANG Zhang-qi (Mechanical Engineering Department, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 348 ~ 352