

# 国内外燃煤增压流化床联合循环发电技术的现状与前景

许红胜

(东南大学热能工程设计研究院)

〔摘要〕 燃煤联合循环发电技术的种类很多,它们各有自己的特点和发展前景。其中整体煤气化联合循环(IGCC)和增压流化床燃烧联合循环(PFBC-CC)被认为是本世纪末至下世纪最有希望的传统燃煤发电的替代技术。本文介绍了目前发展较快的PFBC-CC发电技术的现状、发展前景以及我国开展此项技术研究的情况和发展该技术对我国的现实意义。

关键词 增压流化床 燃气/蒸汽联合循环 中试电站

分类号 TM611.31

## 1 前言

燃煤电站是 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_2$ 和粉尘污染物排放的大气污染源之一,另外,燃煤产物 $\text{CO}_2$ 引起的温室效应带来地球两极冰山融化使地球陆地越来越小已严重威胁着人类的未来, $\text{SO}_2$ 引起酸雨,会大面积腐蚀材料,毁坏庄稼使农业减产, $\text{NO}_x$ 会破坏臭氧层造成紫外线对地面生物的强烈辐射,对生物产生危机,进入七十年代,人类对环境保护的要求日益提高,发达国家对环境保护的要求更加严格,制订了环境保护法,燃煤引起的大气污染已不单是技术问题,甚至成了政治问题,科学家不断研究开发高效低污染的燃煤发电新技术。自1969年英国开始对PFBC技术进行实验室规模研究以来,PFBC发电技术有了很快的发展,一些发达国家已经过中试开始了商业示范,并朝大容量的实用电站进军,目前已发展到350 MWe的PFBC-CC的商业电站,

在大力发展第一代PFBC-CC发电技术的基础上,进一步开发第二代PFBC-CC发电技术。预计今后十年内第二代PFBC-CC电站可进行商业示范。我国的PFBC-CC的研究起始于八十年代初,在东南大学(原南京工学院)开始进行较全面的试验研究工作,“七五”期间完成了试验室试验阶段,“八五”正在进行中试阶段的设计、研究和调试,为争取“九五”进入商业示范阶段作准备。

## 2 国外的发展情况

**实验室研究阶段** 1969年~1978年,英、美、德和瑞典等国先后开展研究,至1978年向中试过渡。至今仍在进一步的实验室研究工作,其中最具有影响和代表性的是英国Leatherhead实验室。

**中试研究** 1978~1986年,英、美、德和瑞典先后进行中试规模研究,各国已建立

收稿日期 1994-08-27

的中试装置简介见表 1。

表 1 1978 ~ 1986 年 PFBC 中试装置简介

国 名	建 址	规模及主要参数	型 式	建成时间及试验情况
英、美、西德	英国 Grimethorpe	热输入 60 MW, 压力 1.2 MPa, 床面积 2 m × 2 m	蒸汽埋管 PFBC	1977 设计, 1980 运行, 运行时间 4140 h
美 国	美国 Wood Ridge	电输出 13 MW, 压力 0.7 MPa, 床温 899℃	空气埋管	1983 年底建成, 未运行
瑞 典	瑞典 Malmoe Finspong	热输入 15 MW, 压力 1.2 ~ 1.6 MPa, 床温 850℃, 床面积 1 m × 1.25 m	蒸汽埋管 PFBC	1983 年运行, 运行时间 6000 h
西 德	西德 Aachen Technical University	热输入 20 ~ 40 MW, 压力 0.37 MPa, 床面积 3.46 m × 3.46 m	蒸汽埋管 PFBC 透平增压	1984 年运行, 运行时间 800 h
西 德	西德 Baboock	热输入 15 MW, 压力 1.6 MPa, 床温 850℃, 床面积 1.2 m × 1.2 m	蒸汽埋管 PFBC	1988 年运行(冷态) 1989 年开始, 热态试验

商业验证阶段 1986 至今, 中试进展最快的是瑞典 ABB 公司, 1986 年它就宣告转入商业验证阶段, 先后向本国、美国和西班牙售出四套 P200 型 PFBC 联合循环发电装置。1988 年底, 美国能源部又向瑞典 ABB 公司提出订购发电量为 330 MW 的大型 PFBC 燃气/

蒸汽联合循环发电装置, 用来改造美国西弗吉尼亚州的 Phillip Sporn 电站的 3、4 号机组(该机组 50 年代制造, 容量 150 MW), 计划总投资为 5.79 亿美元, 应用当地的高硫煤作电站燃料。表 2 是建造的四套 P200 型 PFBC 装置的简况。

表 2 已建造的 PFBC—CC 商业验证装置简况

电 站 名 目	瑞典斯德哥尔摩凡登(Vartan)电站	西班牙爱斯卡曲(Escatron)电站	美国俄亥俄梯德(Tidd)电站
选用机组	P200 型 2 套	P200 型 1 套	P200 型 1 套
性质	油改煤	旧燃煤电站改造	旧燃煤电站改造, 1976 年环保不合标准, 停业
发电量 MW	包括蒸汽和燃气总计 135	蒸汽 62.5, 燃气 17, 总计 79.5	蒸汽 56.5, 燃气 16.5, 总计 73
供热量 MW	224	—	—
发电效率	—	从原电站 30% 提高至 36%	从原电站 30% 提高至 34.5%
投资 \$	—	1.30 亿	投资费 1.35 亿, 试验费 0.32 亿, 共 1.675 亿
蒸汽电站参数	13 MPa 530℃	9.4 MPa 513℃	9 MPa 496℃
煤种	烟煤	当地褐煤	俄亥俄州高硫烟煤
煤含硫、水、灰	S = 1% A ≈ 15%	S = 6.8%, W = 20%, A ≈ 36%	S = 4% A ≈ 10%
煤的高热值 MJ/kg	—	12	30
建设开始日期	1987 年	1988 年 12 月开始安装	1988 年开始安装
计划投运时间	1990 年	1990 年	1990 年

ABB公司正准备在P200型PFBC装置成功的基础上推出P800型PFBC装置,组成350 MWe规模的PFBC—CC电站作为商用目标,它比已建成的P200型PFBC—CC商业示范电站更为先进,主要有三方面:

(1) 蒸汽发电部分采用有再热的超临界或亚临界参数的蒸汽;

(2) 脱硫效率可望达到95%,并进一步降低Ca/S比;

(3) 采用脱NO<sub>x</sub>技术(在烟气中注入氨等),使NO<sub>x</sub>的排放进一步降低。

这样做的目的是使环保指标更先进,投资和运行费用能够进一步降低,以增强和常规电站的市场竞争力。

新建和筹建的PFBC—CC电站还有:

日本的首座PFBC—CC商业验证电站,建立在Kyushu(九州),是日本电力发展公司(EPDC)所属的Wakamatsu(若松)电站,输出功率71 MWe,采用ABB Carbon公司技术。1989年开始设计,1991年10月签订合同,1993年7月14日首次点火,9月开始燃煤运行。1994年初开始商业试运行。

美国电力公司(AEP)正在对西弗吉尼亚的Mountaineer电站建造350 MWe PFBC—CC电站进行为期两年的工程评估工作。

美国芝加哥电力公司也声称将建立电站规模的PFBC电站,并将于1998年开始运行。

Kyushu(九州)电力公司已向IHI(石川岛播磨重工)订购了350 MWe的PFBC电站,也采用ABB Carbon公司技术,计划1996年运行。

Hokkaido电力公司已经计划建造85 MWe的PFBC电站,向IHI订货,于1996年运行。

捷克于1992年9月和ABB公司签订了建立PFBC电站的合同,建于捷克的Ostrava附近的Trebovice电站,是一个热电联供的

PFBC电站,计划于1996年运行。

为使PFBC技术更具竞争力,瑞典、英国、美国先后提出开发第二代PFBC技术的设想,特点为在原有系统中加一个煤的高温裂解炉(流化床),产生的裂解煤气经净化后,到燃烧室中补燃,使第一代PFBC锅炉中产生的850~900℃的燃气温度提高至1100~1250℃,进入燃气轮机,使联合循环净发电效率提高至(45~48)%。

第二代PFBC装置有:

动力系统开发装置(PSDF)(阿拉巴马州Wilsonville的南方公司),是整体第二代PFBC装置,规模相当于发电8 MWe。

第二代PFBC中间试验装置(新泽西州Livingston,Foster Wheeler公司的中试厂),是第二代循环床PFBC,规模5 MWe。

第二代PFBC商业验证电站(肯塔基州向Calvert城Air Products公司的化工厂供电和蒸汽),发电功率95 MWe。

美国Foster Wheeler等公司开发的典型的第二代PFBC—CC方案已进入中试阶段,预计今后十年内第二代PFBC—CC可能进入商业示范。

### 3 国内的发展情况

**实验室研究阶段** 1981年起,国家科委在东南大学(原南京工学院)列项“燃煤增压流化床燃烧(PFBC)技术试验研究”,首次在我国开始了这项技术的研究工作。

1981~1985年完成了下列主要研究项目:

(1) 建成了热输入1 MW的实验室规模的试验装置;

(2) 通过对各关键技术的分解试验研究,建立各种专项的试验装置,解决了各项关键技术;

(3) 通过各项关键技术分解试验后,加

以总结,热态试验一次成功,并取得良好的技术指标,达到国际同类装置水平;

(4)1985 年底通过国家科委组织的验收,取得高度评价。

1986 ~ 1990 年,该项目列入“国家七·五攻关项目”其研究的主要内容为:

1 MW 的 PFBC 实验室试验装置完成 500 小时累计运行。

考验关键部件结构的合理性及其使用寿命。

整体装置的技术指标和运行稳定性。

对高硫煤及不同热值的烟煤进行试验,并进行变工况试验。

改进某些关键技术。

为测控技术积累经验。

PFBC—CC 电站的经济分析。

现已完成该试验研究计划,经过累计运行 500 小时,主体装置未进行过检修,也未见明显损坏,埋管本身未有明显磨损,各项技术指标均已达到“七·五”攻关合同规定的要求。

**中试研究** 自 1981 年国家科委设立 PFBC 技术研究项目起,经过 10 年的实验室规模的研究取得了很大的成功,在此基础上,国家计委 1991 年决定开展 PFBC—CC 技术中试规模的研究,并列为国家“八·五”重点科技攻关项目。中试电站将是 PFBC—CC 技术走向商业应用的最关键步骤,这一步骤是我国开展燃煤联合循环的里程碑。

**中试电站的研究目标** 取得 PFBC 锅炉和整个中试电站各方面的经验和数据;验证电站的可靠性能及其发电效率;取得放大至商业示范装置设计的直接经验。

**中试电站的规模** 以 PFBC 技术对燃煤凝汽式旧电站加以改造来构成 PFBC—CC 中试电站,改造后的机组总发电量为 15 MWe,其中蒸汽机部分发电 12 MW,燃气轮机部分发电 3 MW。

**厂址选择** 中试电站建在江苏徐州贾汪电厂,该厂是电力系统的老厂,有丰富的经验,该厂现有一台 12 MW 和四台 6 MW 的汽轮发电机组,机组效率低,煤耗高,污染严重,通过 PFBC—CC 改造将有所改善。贾汪电厂地处韩桥煤矿旁,对试验电站提供了较有利的条件,将来有希望能全面改造成为 PFBC—CC 商业示范电站。

**主要技术经济指标** 发电效率比同类凝汽式电站高出 3%;环保指标, $SO_2 \leq 400$  ppm,飘尘浓度  $\leq 200$  mg/Nm<sup>3</sup>, $NO_x \leq 200$  ppm。

**实施计划进度** 1991 年底至 1992 年 10 月完成方案设计和初步设计;1992 年 10 月至 1993 年完成施工设计及大部分设备的制造和定货;1994 年部分制造和安装;1994 年底部分调试;1995 年二季度正式试验,最终完成“八·五”攻关任务。

在“八·五”中试研究的基础上,争取“九·五”自主或和国外合作发展 100 MW 等级的商业验证计划,同时积极开发第二代 PFBC—CC 技术,为中国实现煤的清洁高效发电技术早日作贡献。对于第二代 PFBC 技术,东南大学、上海发电设备成套设计研究所和中国煤炭科学研究院也已进入实验室研究阶段。

## 4 发展 PFBC—CC 技术对我国的现实意义

我国煤炭资源极其丰富,燃煤发电占整个发电容量 80% 左右,目前发电用煤占全国原煤产量 1/3 左右,至 2000 年,将提高至 2/5 左右,所以,开发研究高效、清洁燃煤发电技术是符合我国能源结构和能源政策的。

### 4.1 我国当前环境概况

据 1988 年 10 月 8 日中央台广播,我国五

城市参加国际大气污染评定,在污染最严重的世界十个城市中占了一半,五个城市:沈阳、北京、西安、上海、广州分别位居污染第二、四、九、十名,一些城市大气中悬浮微粒和SO<sub>2</sub>浓度已达到“伦敦烟雾事件”起始值。据全国大气污染防治会议估计,大气污染每年造成的经济损失近百亿元。

由于PFBC锅炉燃烧温度低于950℃,所以在燃烧过程中所形成的NO<sub>x</sub>很少,其次可以在燃烧中加入石灰石(或白云石)为脱硫剂,其脱硫效率可达90%以上,烟气在进入燃机之前经高效除尘,灰含量很少,所以对大气污染程度大为降低。表3为目前PFBC-CC电厂同常规燃煤电厂的排放比较。

表3 PFBC-CC电厂同常规燃煤电厂排放对比

电厂类型及排放物	常规电厂	PFBC-CC电厂
二氧化硫 SO <sub>2</sub>	60 mg/MJ	< 60 mg/MJ
氮氧化物 NO <sub>x</sub>	50 mg/MJ	20 mg/MJ
一氧化碳 CO	无要求	< 10 ppm
氧化亚氮 N <sub>2</sub> O	无要求	< 10 ppm
灰 份	5 mg/MJ	< 1 mg/MJ

PFBC锅炉由于在高压条件下进行燃烧,燃烧效率高,脱硫性能好,所以能燃烧各种含硫、灰份高的煤,甚至褐煤。

PFBC-CC发电很适合于老电厂汽轮机组的改造,不但可使原电厂的热效率明显提高,而且电站发电量可增加20%,环境保护得到明显改善,可达到一箭双雕的效果。

我国是世界最大煤炭生产国和消费国,也是世界上少数几个能源以煤为主的国家之一。1991年原煤产量达1087.4 Mt,消费量1088.0 Mt,占世界的25.0%;煤炭占一次能源总消费量的76.1%,到下个世纪中期煤炭仍将是主要一次能源(表4)。1991年全国火电装机容量达113.6 GW,耗煤325.9 Mt,煤占全国发电能源的74%,发电用煤占煤炭总消费量的30.0%,2000年这一比例将接近40%,根据我国的能源资源条件、技术和经济发展水平及世界能源形势,在未来30~50年内,我国以煤为主的能源结构不会改变,而且煤炭在未来能源系统中的地位将更为重要,煤炭的生产和利用,无论是对大气污染、酸雨等区域性环境问题还是气候变化等全球性环境问题来说都是最主要的影响因素。

表4 我国煤炭占一次能源构成的比例

年份	煤炭 %	石油 %	天然气 %	水能 %	核能 %	新能源 %
1985	72.8	20.9	2.0	4.3	/	/
2000	70	19.5	4.0	6.0	2	/
2050	60~70	5.0	5.0	6.0	10~20	5

由于我国电力生产约3/4来自燃煤,这一比例在2000年前还会有所增加,目前中国燃煤电站的平均效率约为29%,而发达国家为(34~35)%,节约燃煤的潜力很大。由于大量燃煤,SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>和粉尘等的污染严重,已有五个大城市进入世界污染严重大城市的前

十名,我国产煤量位居世界首位,但高硫煤(S>2%)、高灰煤所占比例较大,据我国已探明煤炭储量中,煤的含硫量如表5所示,根据我国现有经济实力,还不能象发达国家那样在现有燃煤电站后部加装脱硫装置,因为它们的投资及运行费用均较昂贵,约占全厂总

投资的 1/4 以上,运行费用增加 5% 以上,故至今甚至大型燃煤电站还基本上未采用。

表 5 我国煤的含硫量

含 硫 量	比 例
< 1%	65 ~ 70%
1 ~ 2%	15 ~ 20%
> 2%	10 ~ 20%

针对我国的国情,PFBC 技术对我国将比发达国家更有现实意义:

(1) 用 PFBC 技术改造 5 ~ 10 万千瓦旧电站,可取得节能和环保方面良好的效果;

(2) 对常规煤粉电站不易利用的高硫煤、劣质无烟煤、贫煤产地优先地采用 PFBC 联合循环发电技术;

(3) 我国有些产煤地区缺水严重,如山西、陕西、内蒙、贵州等地,在这些特定地区采用 PFBC 联合循环发电,可节约用水;

(4) 燃油电站改燃煤在我国有着迫切的市场要求,PFBC 技术由于结构紧凑、效率高、

低污染等优点,比其它改造方案更具竞争力;

(5) PFBC 的灰渣可作为水泥的掺合料,实现灰渣的综合利用,避免了灰渣对环境的再次污染。

目前,PFBC-CC 国际上已进入了商业示范阶段,我国也进入中试阶段,为了节省能源,解决我国面临的严重大气污染问题,煤的清洁高效发电技术自然就提到了重要的战略地位。由于 PFBC 技术发展较快,市场前景又十分广阔。我们相信,随着我国中试阶段的成功,这一新型燃煤发电技术一定会在我国得到蓬勃发展和广泛应用。

### 参 考 文 献

- 1 钟史明、许红胜. 燃煤增压流化床燃气/蒸汽联合循环发电新技术. 中国电力, 1994. (10)
- 2 章名耀、李大骥、蔡宇生. 关于我国发展先进燃煤发电技术的建议. 动力工程, 1994. 14(2)
- 3 Hafer D R, Mudd M J, Zendo M E. Test results from the 70 MW tidd PFBC demonstration plant fluidized bed Combustion. ASME 1993. 2
- 4 Krishna K. Pillai, Kyushu 350 MWe PFBC sets the trend in Japan. Modier Power Systems, 1992(4)

作者简介:许红胜,1963 年生,1985 年毕业于南京东南大学动力工程系。留校从事热能动力工程的设计研究工作。曾先后参加过近三十项工程的可行性研究、初步设计、施工图设计。在国家八五重点科技攻关项目—我国 PFBC-CC 中试电站中承担工程设计负责人的工作。发表论文 8 余篇。现任副主任,工程师。(南京东南大学热能工程设计研究院机务室,邮编 210018)

(梁源 编辑)

向广大读者和朋友们致敬

国内外燃煤增压流化床联合循环发电技术的现状与前景 = The Present Status and Development Prospects of Coal-Fired Pressurized Fluidized Bed-Based Combined Cycle Power Generation Technology Both at Home and Abroad [刊, 中]/ Xu Hongsheng, Zhong Shiming (Thermal Power Engineering Design Institute of Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -343~348

There exist many kinds of coal-fired combined cycle power generation plants with their respective outstanding features and development prospects. Among them the integrated coal gasification combined cycle (IGCC) and pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC) have been considered as the most likely candidates to take the place of the traditional coal-fired power generation plants from the end of this century up to the next century. This paper gives a brief description of the present status and development prospects of the PFBC-CC technology which has at the moment seen relatively intensive development. Also presented is a review of the current research conducted in this field by Chinese engineers and the practical significance to China of developing the said technology. Key words: pressurized fluidized bed, gas/steam combined cycle, power station under intermediate test

国内火电厂热力系统优化运行理论的研究 = A Study of Thermal System Optimum Operation in Domestic Thermal Power Plant [刊, 中]/ Hong Bo, Yang Zifen, Qian Wenhuan (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -349~353

This paper summarizes optimum objects and methods of thermal system of domestic thermal power plant. According to the research and practice experience, it indicates developmental trends and application prospects of optimization technology in thermal power plant. Key words: Thermal System, Optimum Operation, Definite Optimization

稳燃腔煤粉燃烧器对煤粉燃烧稳定和强化的研究 = A Study of the Pulverized Coal Combustion Stabilization and Intensification Role Played by a Combustion Stabilization Cavity Pulverized Coal Burner [刊, 中]/ Qiu Jihua, Chen Gang, Zhang Zhiguo, Li Fujin (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -354~358

From both the theoretical and experimental viewpoints of pulverized coal combustion stabilization and intensification an analysis has been conducted of the role of the said stabilization and intensification played by a combustion cavity pulverized coal burner. In addition, the results of a laboratory study and practical engineering applications are also presented. Key words: combustion, pulverized coal, burner

某船用锅炉联箱在复杂换热条件下的瞬态温度场有限元分析 = The Finite Element Analysis of Transient Temperature Field of a Marine Boiler Header Under Complicated Heat Transfer Conditions [刊, 中]/ Yang Zichun, Huang Yuying (Central China University of Science & Technology), Hu Deming (Naval Engineering Academy) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -359~365

By the use of the basic theory of transient temperature fields and non-linear finite element method a reverse calculation has been successfully conducted of the convection heat transfer coefficient of a marine main boiler header under complicated heat transfer conditions. On this basis a nonlinear finite element analysis of the boiler header three-dimensional temperature distribution has been performed with a colored three-dimensional temperature profile being plotted. Key words: Water/steam header, convection heat transfer coefficient, non-linear finite element method

气液两相流流经突缩再突扩管道的压力降研究 = Investigation of Pressure Drop of a Gas/Liquid Dual-Phase Flow During its Passage through an Abrupt Convergent and an Abrupt Divergent Piping [刊, 中]/ Wu Dongyin (Thermal Engineering Academy of the Ministry of Electric Power), Lin Zonghu (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(6). -366~370