

瑞典增压流化床联合循环 (PFBC-CC) 发电技术的发展现状

李大骥

(东南大学热能工程研究所)

[摘要] 1996 年 4 月下旬中国工业科技代表团对瑞典的增压流化床联合循环 (PFBC-CC) 发电技术进行了实地考察。对瑞典的增压流化床联合循环发电技术的研究历史和现状有了较为全面的了解和认识。本文介绍了瑞典 ABB Carbon 公司的小试、中试、商业示范和商业应用三种类型的 PFBC 装置。

关键词 瑞典 增压流化床 联合循环 发展

中图法分类号 TM611.31; TK229.66

1 瑞典 ABB Carbon 公司在芬 斯堡的两套 PFBC 试验装置

瑞典 ABB Carbon 公司的前身 ASEA PFBC 是 ASEA 集团公司中 ASEA Stal 的子公司。ASEA Stal 自 1893 年起就开始开发和制造蒸汽轮机、燃气轮机和其它能量转换设备。ASEA 研究 PFBC 始于 1970 年, 1983 年在马尔默 (Malmo) 建成了一座热输入为 15 MW 的 PFBC 部件试验装置 CTF (Component Test Facility), 是用来对 PFBC 电站中各关键部件进行试验和考核的中试装置。其外壳直径为 4 米, 高 12 米。系统布置如图 1 所示。基本参数和试验结果分别列于表 1 和表 2。其加料方式有两种: a) 气力输送煤和脱硫剂的混合物; b) 膏状煤-水加气力输送脱硫剂; c) 膏状煤-水-脱硫剂。负荷主要由床高控制。全负荷时, 蒸发段和过热段管束均在流化床内。通常床温为 850°C , 由加煤速度

控制。共设有 900 个测量点。1986 年底, 完成了 4500 多小时的试验运行后, 迁到芬斯堡至今。ABB Carbon 公司据此装置上得到的数据, 设计和制造了 P200 和 P800 两种模块, 输出功率分别为 80 MW 和 350 MW, 建设两种模块的商业示范电站和商业化电站。因此说, CTF 中试装置对 PFBC 商业化进程起了十分重要的作用。

为了对多种煤种和不同的脱硫剂进行试验, 以适应扩大市场的需要, 1994 年又在芬斯堡建立了一台热输入 1 MW, 直径 1 m, 高 12 m 的小型 PFBC 过程试验装置 PTF (Process Test Facility), 进行了多次试验。图 2 为 PTF 的系统图。至 1996 年 4 月 18 日为止, 合计运行了 1435 小时。共对 8 种燃料和两种脱硫剂进行了试验, 表 3 和表 4 分别为其基本参数和试验结果。PTF 正在为 PFBC 中试电站和商业应用电站不断提供数据和经验。

表 1 CTF的基本参数

燃烧室 压力 M Pa	床温 °C	流化速度 m /s	热输入 MW	蒸汽 参数	流化床高 m	床面积 m ²
1.7 (最高)	900 (最高)	1 (自由空间)	15 (最大)	535°C 10.5M Pa	4	1.25(布风板) 2(自由空间)

表 2 CTF的试验结果

	燃烧效率 %	尾气中 NO _x mg /MJ	Ca /S*	尾气中 SO ₂ * mg /M J	尾气中 CO ppm	POM /PAH
典型值	99	70- 150	1.6	≤ 50	< 100	低于测量极限
最佳值	99.8	12	1.2	< 1	< 1	低于测量极限

* 脱硫效率为 90% 时的钙硫化 ** 指煤中含硫量为 1% 时测出的 SO₂ 量

表 3 PTF的基本参数

基本参数	
燃烧室压力	最高 1.7 M Pa
床 温	最高 900°C
流化速度	m /s(自由空间)
热 输 入	1 MW
床 高	最高 4.5 m
床 面 积	0.09 m ² (布风板) 0.09 m ² (自由空间)

表 4 PTF的试验结果

燃料种类	脱硫剂	热值 (HHV, MJ/kg)	试验时间 (h)	燃烧效率 (%)
波兰煤	瑞典 白云石	28	295	99.4
德国褐煤	德国 石灰石	19	53	> 99.9
以色列油 页岩	无	3	262	> 99.5
碎焦	瑞典 白云石	34	215	99.5
波兰煤+ 木屑	瑞典 白云石	28+ 19	60	未测
波兰煤+ 橄榄种	瑞典 白云石	28+ 19	75	未测
波兰煤+ 棕榈坚果壳	瑞典 白云石	28+ 19	64	未测
无烟煤	瑞典 白云石	34	168	

2 凡登电站的 PFBC-CC 装置

2.1 概况:

Vartan 电站建于 1903 年,是一个老厂。由于区域供热网迅速扩建,瑞典的环保标准又极严,因而斯德哥尔摩能源公司决定投资 14 亿克朗,在该厂兴建两套 P200 型 PFBC 示范装置,电热输出为 135 MW /224 MW,该厂除 PFBC 外,还有一台供电 220 MW 供热 330 MW 的燃油机组;五台燃油供热锅炉,总供热功率为 750 MW;一台燃油燃气透平发电机组,供电 54 MW;两个热电站,供热 280 MW。另外尚有几台备用的电热锅炉,严寒时可供热 330 MW。此外,还有一个容积为 4 万 m³ 的热水贮罐。

2.2 PFBC-CC 工程情况

PFBC 工程由 ABB Carbon 公司负责交钥匙工程。该项目于 1987 年 4 月破土动工,两套 PFBC 装置,先后于 1989 年末及 1990 年初建成并投入试运转,仅在每年 10 月至下一年 5 月运行,只供热,不发电。截至 1996 年 5 月,这两套装置已运转了 3 万小时。

因系老厂改造项目,PFBC 工程中两个增压流化床锅炉就建在原来燃煤锅炉的位置,各配一台 GT35P 燃气轮机,合用一台

ABB Stal 的额定电功率为 114 MW 的蒸气轮机。此外,还有高效袋式过滤器,燃料及脱

硫剂贮罐等装备。

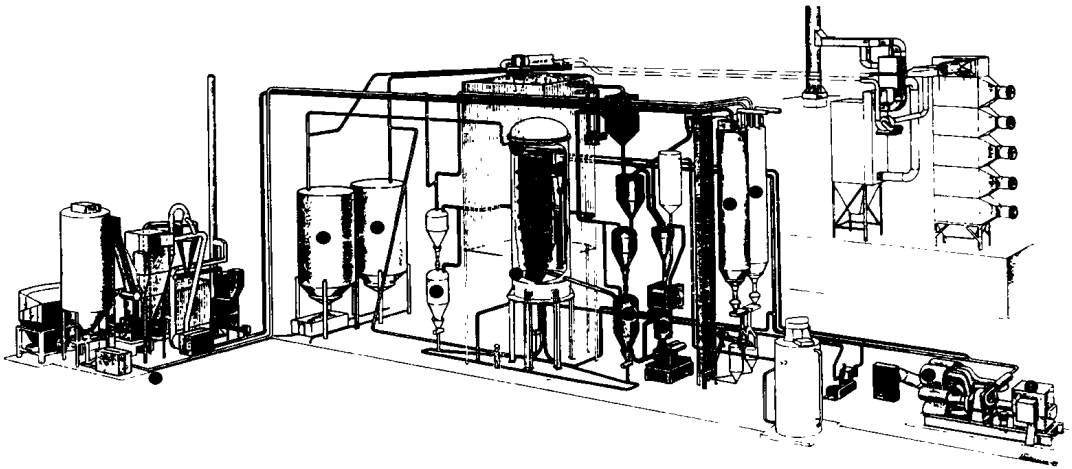


图 1 CTF 装置系统图

1. 增压流化床 2. 压力壳 3. 旋风分离器 4. 电动机 5. 离心压气机 6. 煤与脱硫剂气力加料罐 7. 膏状物加料罐
8. 干态脱硫剂储罐 9. 煤制系统 10. 常压煤储罐 11. 常压脱硫剂储罐 12. 石灰罐 13. 旋风器灰罐

该电厂燃用含硫量为 1% 以下的进口煤,脱硫剂为瑞典自产的石灰石或白云石。冬、冬供热高峰时,整个电厂每天用煤量约 5000 t,用脱硫剂量约 1000 t。燃料由船运至电厂自备码头,然后用传送带送到地下仓库。煤经辊式破碎机粉碎至 0~8 mm,脱硫剂经锤式粉碎机粉碎至 0~3 mm 后,与水混合制成含水为 25% 的膏状物,用 6 台活泵平行输送,经雾化后喷入锅炉燃烧室。燃料在床内停留时间仅为 4 秒,故流化床内的床料主要是灰分。

PFBC 工艺流程中有三个部位脱除灰渣。首先是从床层底部排灰,这部分灰不到总灰量一半。多半的灰是从七组并联的旋风分离器中分出,每组旋风分离器包含一级及二级分离器各一个,分别排灰。从旋风分离器中排出的灰渣中含炭量为 1%~3%,半负荷操作时,由于在床层中停留时间短,灰分中含炭量就高,可达 6%~8%。经过旋风分离器除尘后,燃气先进入燃气透平的高压缸,驱动高

压空气压缩机及发电机 (17 MW),再进入燃气透平,驱动低压空气压缩机,低压部分的转速是可变的。燃气经燃气透平后进入选择性催化反应器 (SCR),使燃气中的 NO_x 被还原。在 Vartan 电厂中还使用了选择性非催化反应器 (SNCR) 技术,将氨喷入自由空间及旋风分离器使 NO_x 还原。经上述处理后,尾气从烟囱排放,在排出前对尾气中的 NO_x 、 SO_x 含量进行连续监控。燃气余热用于预热锅炉给水及区域供热水。表 5 和表 6 分别列出了 Vartan 电厂燃用煤种情况及 PFBC 装置的各项技术参数,表 7 为 1992~1994 年度排气中 NO_x 、 SO_x 的年平均值。

表 5 Vartan 电厂燃用煤

烟煤	性 能
热 值	22.4~29.0 MJ/kg, LH
硫含量	0.1%~1.5%
灰分量	8%~21%
含水量	6%~15%

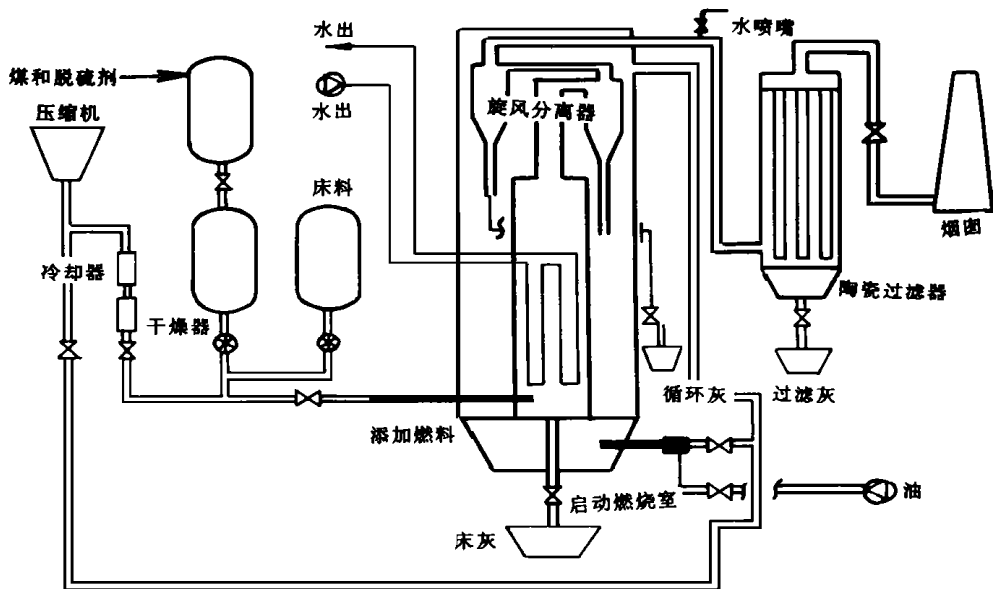


图 2 PTF系统图

表 6 Vartan 电厂 PFBC 装置技术参数

项 目	参 数
装置型号	2× P200, CHP
燃气透平	2× GT35P
净输出 (电 热)	135 MW / 224 MW
效 率	89%, LHV
加煤方式	膏状煤、水、脱硫剂
加煤速度	2× 8.4 kg / s
脱 硫 剂	白云石
加脱硫剂速度	2× 0.5 kg / s
灰分排出速度	2× 1.6 kg / s
燃烧温度	860°C
蒸气压力 / 温度	13.7 MPa / 530°C
冷凝器压力	0.035 MPa / 0.065 MPa
环境温度	5°C
尾气中 SO _x	30 mg / M J LHV
尾气中 NO _x	50 mg / M J LHV
尾气中尘粒	5 mg / M J LHV

表 7 1992- 1994 年度 PFBC 排放气中 NO_x、SO_x 逐年平均含量 单位: mg / M J

	PFBC- 1		PFBC- 2		总 量	
	NO _x	SO _x	NO _x	SO _x	NO _x	SO _x
1992年	67	10	64	16	65	14
1993年	36	14	40	12	38	13
1994年	41	15	56	16	48	16

3 PFBC- CC 已开始进入商业化阶段

PFBC- CC 是洁净煤技术中最有发展前景的技术之一。瑞典 ABB Carbon 公司经多年研究开发,小试、中试及商业示范机组试验,均取得了成功。目前世界上已有该公司负责的四座电站,五套 P200 型机组正在运行。至 1996 年 5 月,瑞典 Vartan 电站的 2 套已分别运行了 13 478 和 16 157 小时,西班牙 Esoatron 电站的 1 套已运行了 20 930 小时,美国 Tidd 电站的 1 套已运行了 11 413 小时,日本 Wakamatsu 电站的 1 套已运行了 4832 小时。总运行时间近 7 万小时。日本 Kanita 安装一套 P800 输出功率为 350 MW PFBC- CC 商业电站也将于 1998 年底或 1999 年初投运。在芬斯堡,我们还参观了 ABB Stal 公司为日本 Kanita PFBC- CC 商业电站制造的 GT140P 燃气轮机。1996 年中开始就地安装调试,计划 1997 年中运抵日

本。就在我们访问期间,德国向 ABB 购买了一套 P200 装置,计划将它安装在德国的 Cottbus, 燃用德国东部褐煤。所有这些都标志着 PFBC-CC 技术日臻成熟,也标志着瑞典 ABB Carbon 公司在这一领域处于世界领先地位。

4 中国 PFBC-CC 的发展概况及与瑞典的合作前景

1981 年由国家科委立项,作为“六五”攻关项目,在东南大学建设一套热输入为 1MW 的 PFBC 试验装置,1984 年 10 月建成,试验过含灰量高达 57% 的劣质煤;“七五”期间,继续作为国家攻关项目,又在此试验台上试验过多种中等含硫量的煤,总共累计运行了 700 多小时,掌握了 PFBC 中的多项关键技术,取得了大量设计运行数据和经验。1991 年 10 月,《增压流化床联合循环发电技术及装置研究》,代号 85-205 的攻关课题,由国家计委立项,作为国家“八五”科技攻关项目,东南大学为技术总负责单位。项目共分两个课题,13 个专题,50 多个子专题。一方面在江苏徐州贾汪发电厂建设一台电功率为 15 MW 的 PFBC-CC 中试电站,一方面继续在 1 MW 试验台上攻关。全国有 23 个单位和 270 多名科技人员参加了中试攻关。15MW PFBC-CC 中试厂目前主体设备已接近安装完毕。全部建成后,将成为继英国

Grimethorpe 瑞典 CTF 美国 Curtiss-wright 和德国 LLB 之后的世界上第五个中试电站。而且,与前四个不同的是,这是一座燃气-蒸汽真正联合循环,可连续运行的中试电站(前四个是燃气、蒸汽分别试验),具有明显的特点。

ABB 公司热情地接待了我们代表团,表示愿意和我国合作,并同意接受我国科技人员前往短期学习和参加工作。以东南大学 1 MW PFBC 试验装置和贾汪 15 MW PFBC-CC 中试电站为研究开发基地,共同发展这项先进的洁净煤技术。

由于 PFBC-CC 技术既能用于改造旧电站,又能用于建设新电站。我国现有 100 MW, 125 MW 和 200 MW 的燃煤机组数百台,还将新建大批燃煤电站,以满足经济发展的需要。因此,PFBC 技术在我国有着广阔的市场前景。

根据中央关于引进、消化、吸收,最终实现国产化的方针,在全国洁净煤技术开发、推广利用领导小组统一规划和领导下,由国家计委、科委、电力部、机械部共同支持,组织全国科技队伍,开展与瑞典的合作,将引进、消化吸收和自主开发紧密结合起来,实现国产化,形成我国自己的知识产权,一定会加快此项技术在中国的发展和推广应用,为我国的节约能源和环境保护作出重大的贡献。

(复 编)

瑞典增压流化床联合循环发电技术的发展现状 = (**The Present Status of Development of Swedish Power Generation Technology Involving the Use of a Pressurized Fluidized Bed Combined Cycle Unit**) [刊, 中] / Li Daji (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(1). 1- 5

An on the spot survey of Swedish power generation technology involving the use of a pressurized fluidized bed combined cycle unit (PFBC-CC) was made in late April 1996 by a Chinese Delegation of Industrial Science & Technology. As a result, a comprehensive understanding has been gained of the research history and present status of the above-cited technology. This paper gives a brief description of the three types of PFBC plants of Swedish ABB Carbon Co. in respect of its preliminary test, intermediary test, commercial demonstration and application. **Key words** pressurized fluidized bed, combined cycle, Sweden, development

Stirling 发动机燃烧及换热分析 = (**Analysis of a Stirling Engine Combustion and Heat Exchange**) [刊, 中] / Shen Jianping, Jin Donghan, Gu Genxiang (No. 711 Research Institute under the China State Shipbuilding Corp.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(1). 6- 10

On the basis of a calculation of hydrocarbon fuel combustion chemical equilibrium reaction obtained are the temperature and component ingredients of the combustion products. Following this the combustion gas physical properties were calculated and based on this the convection heat exchange factor, radiation heat exchange factor and rear row heat exchange pipe rib heat transfer of a heat engine outer combustion system heating pipe were also calculated. A contrast computation is conducted of the two combustion conditions, air combustion and liquid oxygen combustion. Also computed are the various factors which have an influence on combustion with an analysis and discussion performed for the calculation results. The valuable conclusions obtained can serve as a guide for the structural design of the heat engine outer combustion system. **Key words** heat engine, heat exchange factor, combustion, chemical equilibrium

给水泵液力调速系统的特性及其非线性改善分析 = (**Analysis of the Characteristics of a Feedwater Pump Hydraulic Speed Governing System and Its Non-linear Improvement**) [刊, 中] / Wang Liwen (China National Civil Aviation Institute), Yan Guojun, Zhu Ruibin, Yang Huipu (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 11- 14

After an analysis of the regulating characteristics of the fluid coupling feedwater pump speed regulating system this paper gives a brief account of the principle of a variable function generator used for improving the serious nonlinearity of regulating characteristics and also the software and hardware design method. By way of an experimental analysis a scoop pipe-drive method is proposed for the improvement of a high-power variable speed fluid coupling. **Key words** variable speed fluid coupling, feedwater pump, nonlinearity

凝汽式汽轮机乏汽凝汽器强化的研究 = (**A Study of the Exhaust Steam Condenser Heat Transfer Enhancement of a Condensing Steam Turbine**) [刊, 中] / Lu Yingsheng, Zhuang Lixian, Deng Xianbe, Chen Guanghui, Chen Mulin (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 15- 18

On the basis of an experimental study and analysis on the intensification mechanism of a high-efficiency heat transfer element (transversally corrugated tube) and its heat transfer and fluid mechanics conducted is the industrial application-oriented performance test of a 1500 kW condensing turbine condenser comprising glossy tubes and transversally corrugated tubes. The application prospects of the condensers made of transversally corrugated tubes are also given. **Key words** steam turbine, condenser, transversally corrugated tube, heat transfer intensification

煤粉气流火焰稳定性条件分析 = (**Analysis of Pulverized Coal Current Flow Flame Stability Conditions**) [刊, 中] / Ma Xiaoqian (South China University of Science & Technology), Jin Sijun, Si Xuefeng, Qian Ren-