

我国的燃气—蒸汽联合循环发电技术前景良好

(西安交通大学, 陕西 西安 710049) 屠珊 毛靖儒 孙弼

摘要: 针对我国能源结构和能源政策, 指出燃气—蒸汽联合循环是提高发电效率和解决环境污染的重要途径, 尤其是国际公认的最有发展前途的两种燃煤联合循环发电技术: IGCC 和 PFBC-CC。文中简要地介绍了这两种联合循环发电技术。

关键词: 燃气—蒸汽联合循环;
增压流化床联合循环;
新能源; 发展

中图分类号: TM611.31

文献标识码: A

1 前言

随着材料和冷却技术的发展, 目前燃气轮机初温已达到 $1\ 370\ ^\circ\text{C}\sim 1\ 500\ ^\circ\text{C}$, 排气温度约为 $450\ ^\circ\text{C}\sim 600\ ^\circ\text{C}$, 大量的热能随高温燃气排入大气。而对蒸汽动力循环来说, 由于材料耐温耐压程度的限制, 汽轮机进汽温度一般只有 $540\ ^\circ\text{C}\sim 560\ ^\circ\text{C}$, 循环放热平均温度却很低, 一般为 $30\ ^\circ\text{C}\sim 38\ ^\circ\text{C}$, 如果把燃气轮机循环和蒸汽轮机循环联合起来组成燃气—蒸汽联合循环, 则有较高的平均吸热温度和较低的平均放热温度, 循环热效率将进一步提高。

我国电力以火电为主, 在总装机容量中, 火电占 75%; 在年发电量中, 火电占 80%。火电以燃煤为主, 其中烧煤粉的中低参数小容量机组占很大比例, 平均

供电能耗高 ($427\ \text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$), 供电效率低 (28.8%)^[1]。尤其是中小功率燃煤机组, 普遍存在效率低下、污染严重等问题(小火电的煤耗是大火电的 2 倍以上, 而污染物排放量达 20 倍以上)。对于燃煤电站同时存在提高供电效率和解决污染问题。提高供电效率的主要方式之一是: 主蒸汽参数向亚临界、超临界甚至超超临界方向发展。目前亚临界参数电站供电效率为 38% 左右, 超临界参数电站供电效率为 40% 左右, 超超临界参数电站供电效率也不超过 46%^[2]。可见采用超临界蒸汽参数以提高电站效率的效果是有限的, 提高幅度不大, 而初期投资却增加不少, 运行维护也比较困难。另一条提高电站效率的方法是采用燃气—蒸汽联合循环, 供电效率远远超过燃煤汽轮电站, 达 45%~54%。与此同时, 我国由于大气污染每年造成的经济损失近百亿元^[3]。采用联合循环后, 无粉尘, NO_x 、 SO_x 和 CO_2 都很少, 污染物排放问题解决得彻底。同时还可用于电站的调峰^[4]、燃煤旧电站的改造^[5] 以及热电联供系统(CHP)等。

在燃气—蒸汽联合循环中, 与目前燃煤电站具有竞争力的、使用洁净煤燃烧技术的、最有发展前途的联合循环型式是整体煤气化联合循环(IGCC)和增压流

化床联合循环(PFBC-CC)。

2 IGCC 发电技术

第一次世界大战后, 由于石油和天然气的发展, 燃烧液体燃料或天然气的燃气—蒸汽联合循环发展迅速, 而煤气化技术的研究开发进展缓慢。自 1973 年中东石油战争后, 煤气化技术的研究发展加快, 已出现了 30 多种新方法。整体煤气化燃气—蒸汽联合循环(IGCC; Integrated Gasification Combined Cycle)就是把煤通过气化炉进行气化, 成为中热值煤气(热值为 $10\ 467\sim 20\ 943\ \text{kJ}/\text{m}^3$)或低热值煤气(热值为 $4\ 187\sim 10\ 467\ \text{kJ}/\text{m}^3$), 然后通过净化设备, 把煤气中的固体灰粒和含硫物质除净, 进而送到增压锅炉或燃气轮机的燃烧室中去燃烧, 在燃气—蒸汽联合循环中间接地使用了固体燃料煤。IGCC 中的燃气轮机、余热(或增压)锅炉以及蒸汽轮机都是常规的和成熟的, 只增加了煤的气化和净化设备。

最早从事 IGCC 研究和示范性试验的是德国 Lunen 的斯蒂克电厂, 1972 年投入试运, 是在增压锅炉型燃气—蒸汽联合循环的基础上设计的。总发电容量 170 MW, 燃气轮机发电 74 MW, 蒸汽轮机发电 96 MW, 安装了 5 台鲁

奇气化炉。但由于问题过多,最后停运了。世界公认试运成功的IGCC是建于美国加州Daggett的冷水电厂,建成于1984年5月。采用2台以水煤浆为燃烧的德士古气化炉,燃机功率65 MW,汽机功率55 MW,整厂功率120 MW。通过五年(1984~1989年)27 100小时试运行考核,电厂的污染排放情况极其良好,被称为“世界上最洁净的燃煤火电厂”。早在十多年前,中国曾两次考虑建立IGCC示范电站,均因技术和资金困难未能实现,但相关的技术研究和应用开发工作一直在进行。另外还进口了多套不同用途的煤气化装置,如鲁南化肥工程的350 t/d和渭河合成氨厂的2×820 t/d的Texaco炉等。

1.1 IGCC发电技术的优点^[1,9]

(1)具有提高供电效率的最大潜在能力。目前供电效率可达42%~45%,21世纪可达50%~52%;

(2)宜大型化。单机容量已能做到300~600 MW等级;

(3)优良的环保性能,解决污染问题最彻底,可使用高硫煤,废物处理量最小;

(4)充分利用煤炭资源,组成多联产系统,同时生产电、热、燃料气和化工产品;

(5)耗水量较少,是常规电站耗水量的50%~70%,适宜于缺水地区,也宜于建坑口电站;

(6)基本技术已趋于成熟,示范装置运行可用率达80%以上,能满足商业化运行的要求;

(7)促进先进工业和高科技产业的发展,如亚临界或超临界蒸汽参数的IGCC,整体煤气化湿空气透平联合循环(IGHAT),整体煤气化燃料电池联合循环(IGFC-CC)等;

(8)便于分段建设电站(燃气轮机→燃油气联合循环→IGCC);

(9)当天然气和石油资源枯竭或价格昂贵时,IGCC用于改造联合循环电站,还可用于对现有蒸汽轮机电站进行增容改造。

1.2 IGCC发电技术的缺点^[1,9]

(1)比投资费用和发电成本比较高,目前为1 400~1 600美元/kW(21世纪1 000~1 200美元/kW),所以其装置功率较大(如300~600 MW)为好;

(2)要求先进的技术,如高效、大容量的气化炉,高性能的燃气轮机,高温净化技术等;

(3)厂用电率高。气化炉类型有喷流床气化炉(包括Texaco炉、K-T炉、PRENFLO炉、SHELL炉、CE炉等)、固定床气化炉(包括鲁奇炉及液态排渣鲁奇炉等)和流化床气化炉(包括KRW炉、U-gas炉和温克勒炉等)。三种气化炉各有利弊,都正在发展中。另外,为提高气化炉产气率,IGCC电站经常专门设置制氧空气分离系统及其设备,用以提供纯氧或富氧作为气化剂。这样,厂用电率就高达10%~13%。如果采用压缩空气作气化剂或部分整体化的空分系统,厂用电率可降至5%。国外正在研究空分装置不同整体化程度的新技术用以提高IGCC系统性能^[7]。国内也作过研究^[8]。

虽然现在主要由于经济因素,IGCC尚不能进入商业化阶段,但无论如何,在2000年后,除增殖反应堆外,IGCC可能是一种最有发展前途的发电方式。

2 PFBC-CC发电技术

PFBC-CC是增压流化床联

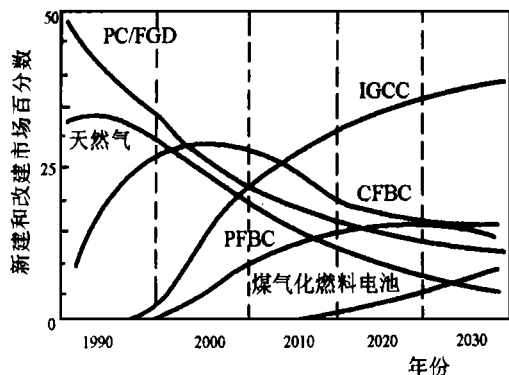
合循环(Pressurized Fluidized Bed Combustion Combined Cycle),其中最关键的是流化床燃烧技术。流化床燃烧是一种把煤和吸收剂(石灰石或白云石)以一定的比例掺混,加到燃烧室的床层中,从炉底鼓风使床层上的物料悬浮,进行流化态燃烧的先进技术。由于流化形成的湍流混合条件良好,能使煤与空气及物料间发生强烈的相对运动,使煤与氧气接触并增加逗留时间,能强化和稳定燃烧并提高燃烧效率。在煤燃烧的同时,脱硫剂吸附SO₂生成硫酸钙,由溢流管道排出或送入再生装置。流化床燃烧有鼓泡床燃烧和循环床燃烧两大类型,又可分为常压流化床燃烧和增压流化床燃烧。增压流化床燃烧联合循环(PFBC-CC)正是以一种增压的(0.6~1.6 MPa)流化床燃烧室为主体,以燃气—蒸汽联合循环为特征的新型热力发电技术。

PFBC-CC的思想是1974年由ASEA STAL的英国公司提出的。此后,1976年美国AEP参加了STAL的研究计划,要求旧电站改造成能高效低污染地燃烧高硫而多灰的煤。1983年在瑞典建成了ASEA PFBC-CC部件试验厂,对各种设备进行试验,取得实效结果以保证PFBC-CC电站有很高的可用性和可靠性。随后,瑞典、美国和西班牙也各建一个示范电站,运行情况良好。我国徐州贾汪PFBC-CC中试电站作为国家“八五”重点科技攻关项目,对原有中压参数凝汽式汽轮发电机组(12 MW)进行改造,新建一台60 t/h的增压流化床锅炉。燃机发电功率3 MW,组成15 MW燃气—蒸汽联合循环规模^[3]。

由于PFBC-CC的特点,适应

的煤种广泛;增压燃烧后结构紧凑,安装周期短,成本下降;运行方式和常规电站接近,系统简单;燃气轮机进口温度较低时也能获

果用 PFBC-CC 来加以改造,不仅发电效率可提高约 3 个百分点(节煤 10%),发电能力增加 20%,环保问题也同时得以解决。



PC/FGD—带有尾气脱硫装置的燃煤汽轮机电站

PFBC—增压流化床联合循环电站;

CFBC—常压流化床汽轮机电站

图 1 几种发电设备市场分配情况的变化趋势

得较高的联合循环效率;尤其是环保特性较好,由于床温只有 $850\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$,所以 NO_x 和 SO_x 生成量很小,不用附加的设备就能达到较低的排放标准。此外,由于循环效率较高,所以 CO_2 排放量也很低。

正是 PFBC-CC 的高效无污染优点使其成为国际公认的最有前途的两种燃煤联合循环发电技术之一。我国由于有 10%~20% 的中高硫煤、高灰煤(烟煤和褐煤)以及一部分无烟煤,常规电站不适用,而 PFBC-CC 电站能够燃用这些煤种。所以 PFBC-CC 是新建电站的采用方案。与此同时,我国用 PFBC-CC 改造旧电站的市场潜力巨大,因为我国有大量的 100~200 MW 蒸汽轮机发电机组,占全国火电装机容量的 44.22%^[9]。这部分机组发电效率偏低(32%~35%),且基本上没有脱硫脱硝装置,绝大多数不符合环境排放允许标准。这部分机组不可能很快淘汰,如

由于 PFBC-CC 的床温限制,燃气轮机初温不能过高,供电效率只能达到 41%~42%。所以在此基础上又发展了第二代 PFBC-CC,增加了一个碳化炉(或部分气化炉)和燃气轮机的顶置燃烧室,使燃气初温提高到 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,效率可达 45%~50%,功率也可提高。

但是 PFBC-CC 的单位造价较高,约 1 300~1 400 美元/kW,虽然比 IGCC 的低近 10%,但仍比常规电站的(1 160~1 400 美元/kW)高近 10%^[11]。只有在达到规模经济容量水平和批量生产后,单位造价才会大幅度下降。

3 结束语

电力工业的发展影响着国家的经济实力和发达程度。我国有大量中小燃煤火电机组在效率偏低、环境污染严重的情况下运行,采用燃气-蒸汽联合循环确实是解决发电效率不高和环保问题的重要途径。尤其是可与常规燃煤电站竞争的 IGCC 和 PFBC-CC 电站。虽然二者在当前主要由于经济性因素而缺少一定的商业竞争力,但随着规模的增大和技术的成熟,单位造价会大幅度下降。预计 21 世纪初就可以进入商业化生产和运行阶段。如图 1 所示^[6]。

参考文献:

- [1] 林汝谋,王应时. IGCC 技术在中国的发展前景——基于中美专家报告的综评[J]. 燃气轮机技术, 1997, 10(3): 1-7.
- [2] 焦树建. 我国的燃气轮机工业该何时启动[J]. 燃气轮机技术, 1997, 10(1): 1-8.
- [3] 许红胜,钟史明. 我国 15MWe PFBC-CC 中试电站的总体设计[J]. 电站系统工程, 1995, 11(4): 26-32, 36.
- [4] 赵士杭,吕泽华,田立峰. 发展调峰用燃气轮机和联合循环电站的分析[J]. 燃气轮机技术, 1996, 9(4): 1-8.
- [5] 左鸿恕,陈卫星. 上海闸北发电厂采用燃气-蒸汽联合循环改造的决策[J]. 中国电力, 1997, 30(7): 49-51.
- [6] 焦树建. 整体煤气化燃气-蒸汽联合循环(IGCC)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [7] Anand A K, Cook C S, Coman J C, Smith A R. New technology trends for improved IGCC system performance [J]. Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996 118: 732-736.
- [8] 刘泽龙,林汝谋. 用于 IGCC 的燃气轮机技术方案与性能预测[J]. 工程热物理学报, 1997, 18(3): 285-287.
- [9] 蔡宁生,章名耀. PFBC-CC 发电技术及其发展[J]. 电站系统工程, 1995, 11(4): 12-16, 43.

注:文中单位 kJ/m^3 为千焦每标准立方米。

(复 编辑)

大型汽轮机控制系统的技术现状及发展= **Technical Status Quo and Development Trend of Control Systems of Large-sized Steam Turbines** [刊, 汉] / WENG Yi-wu (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 333 ~ 335, 359

This paper describes the current technical level of control systems of large-sized steam turbines and analyzes some existing issues to be dealt with. With a variety of proposals offered for their resolution the author forecasts the development trend of the above-mentioned control systems. **Key words:** large-sized steam turbine, control system, digital electro-hydraulic control system

我国的燃气—蒸汽联合循环发电技术前景良好= **Bright Prospects for the Development of Gas and Steam Turbine Combined Cycle Plant-based Power Generation Technology in the People's Republic of China** [刊, 汉] / TU Shan, MAO Jing-ru, SUN Bi (Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 336 ~ 338

In connection with the energy-source structure and energy policy of the People's Republic of China the authors point out that the construction of gas and steam turbine combined cycle plants represents a major and cost-effective avenue for enhancing electrical power generation efficiency and resolving environmental pollution-related issues. This is especially so in the case of an integrated gasification gas-steam combined cycle (IGCC) plant and a pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC) plant, the two types of coal-fired combined cycle power generation technology universally recognized as having the best potential for further development. The present paper briefly covers the major aspects of each type of the above-mentioned technology. **Key words:** combined cycle plant, gas and steam turbine combined cycle plant, supercharged fluidized bed combined cycle plant, new energy sources, development

燃气轮机的技术和应用: 现状和展望= **Current Status and Future Prospects of Gas Turbine Technology and Its Applications** [刊, 汉] / Ji Gui-ming, LIU Chang-he (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 339 ~ 343, 347

Based on a broad overview of the recent developments of gas turbine technology and its applications the authors give a comprehensive and systematic account of the state-of-the-art advances of the said technology in various engineering sectors. Analyzed is the trend of its technical development and applications, specifically, likely advances and prospects of development in the People's Republic of China. Some decisive steps for the development and consolidation of the gas turbine industry in China are also proposed and briefly discussed. **Key words:** gas turbine, design, technology, applications, power engineering

燃生物废料流化床锅炉= **Biomass-fired Fluidized Bed Boilers** [刊, 汉] / BIE Ru-shan, LI Bing-xi, LU Hui-lin, et al (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 344 ~ 347

This paper depicts the current status of development and utilization of biomass both at home and abroad and methods for the selection of biomass-fired boiler types. The measures adopted for resolving the agglomeration problems related to biomass-firing are proposed along with a brief description of a series of biomass-fired fluidized bed boilers developed by the Harbin Institute of Technology as well as their operation experiences. **Key words:** biomass, fluidized bed boiler, agglomeration

高温空气燃烧新型锅炉及特性分析= **A New Type of High Temperature Air-fired Boiler and An Analysis of Its Specific Features** [刊, 汉] / JIANG Shao-jian, PENG Hao-yi, AI Yuan-fang, et al (Department of Applied Physics and Heat Engineering, China National Southern University, Changsha, Hunan, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 348 ~ 351