

# 动力循环研究的新近概貌 及未来的发展动向

杨玉顺 周伏秋 于清

(哈尔滨工业大学动力工程系)

[摘要] 本文概述了大型动力循环研究领域的基本面貌和最新进展;对动力循环研究的未来发展方向进行了扼要介绍。

关键词 联合循环 注蒸汽燃气轮机循环 燃煤增压流化床联合循环  
煤气化联合循环 空气湿化回热循环

分类号 TK14

## 1 引言

动力循环是动力装置发展的基础。追求优越的循环性能,实现热能→机械能的有效转换,是动力循环研究的首要和基本目标。

对于大型火电,经典的单一的动力循环主要有两类:Rankine 循环和 Brayton 循环,近50年来,火力发电厂采用了超高参数,中间再热、大型化、自动化等措施,使供电热效率由30%提高到40%。但是要进一步提高蒸汽发电的热效率则在技术上极其困难,经济上也不合算。由于压气机本身功耗甚大,燃气发电的热效率停留在30%左右。供电热效率的提高处于停滞状态。

总能系统概念的提出,使得动力循环研究领域的面貌焕然一新。人们认识到单一动力循环的局限性,从而不再计较单一动力循环的优劣,转而去研究把不同循环有机结合起来的各种新的联合循环,以求获得更优越

的循环性能。

本文将就大型动力循环研究领域的基本面貌和最新进展作一概述。并就其未来发展动向作扼要介绍。

## 2 燃气—蒸汽联合循环—CC(图1)

它是 Brayton 循环与 Rankine 循环的串联结合,也即通常意义上的联合循环。它以常规 Brayton 循环作为其顶循环;第一工质燃气经透平后,具有较高温度的透平排气进入余热锅炉,其余热被第二工质水/蒸汽所回收;蒸汽进入蒸汽透平后,由冷凝器冷凝回收,构成封闭的 Rankine 底循环,通过选择合适的底循环,顶循环的高温排气余热可得到很好的回收。因而具有优越的循环性能。

关于常规联合循环,目前已有成熟的技术,并已得到大量的商业应用。它最适宜于配

收稿日期 1993 09 03 收修改稿 1993 10 05

本文联系人 杨玉顺 男 48 副教授 150006 哈尔滨工业大学 230 教研室

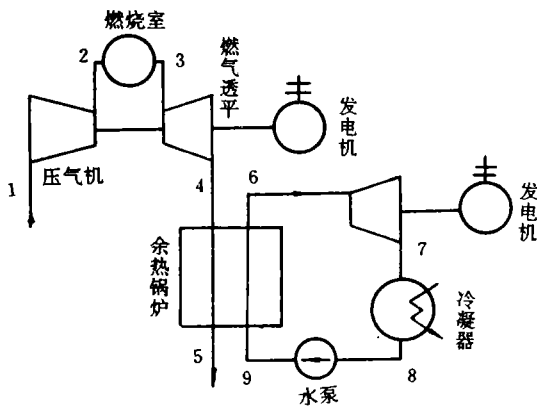


图1 余热锅炉式联合循环

备基本负荷,目前投入运行的各类大型火力电站中它的热效率是最高的。目前,国际上燃油和天然气的联合循环发电净效率为(48—49)%,如BBC目前商品化“KA”系列联合循环发电厂,KABE-2发电净效率已达到(47.9—49.8)%。日本政府投入巨资,对新一代性能更为优越的燃气—蒸汽联合循环进行开发和研究,预计其循环热效率将高达55%。它已成为设计大型电站和改造已有电站的首要选择,并成为未来二、三十年内动力循环基本的发展方向之一。

### 3 注蒸汽燃气轮机循环—STIG或DFC(图2)

注蒸汽 Brayton 循环是 Brayton 循环与 Rankine 循环并联的代表。与联合循环相区别,余热锅炉产生的蒸汽不是进入蒸汽轮机膨胀做功,而是回注燃烧室,与第一工质燃气混合形成“湿燃气”,然后一起进入燃气透平,从而构成一开式注蒸汽 Brayton 循环。回注蒸汽量作为控制变量,可用来调节功率输出。同时由于蒸汽回注使燃烧室火焰温度降低,抑制了NO<sub>x</sub>的生成,排气中NO<sub>x</sub>的ppm浓度

可减少90%以上。此外,还可用回注蒸汽代替部分或全部压气机抽气冷却高温部件,冷却效果更好。同时可节省压缩功耗,改善循环性能。

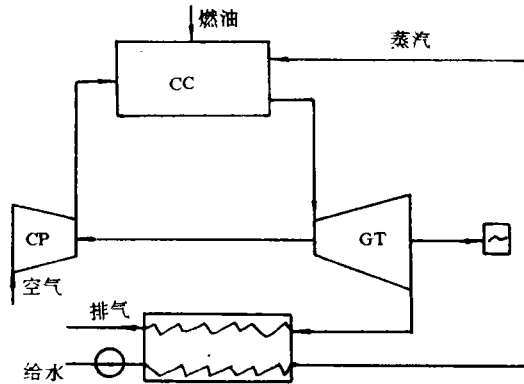


图2 注蒸汽燃气轮机循环

概言之,注蒸汽燃气轮机循环是在 Brayton 循环高温优势的基础上,利用第二工质水/蒸汽有效地回收透平排气余热,将 Brayton 循环与 Rankine 循环有机地结合起来,形成具有特色的热力循环。它以现有的燃气轮机技术为基础,具有比功大、效率高、变工况性能好、系统结构简单、排气污染小等特色。若采用高温高压技术,其循环性能可与联合循环相比美,自80年代以来,它已成为燃气轮机复合循环研究领域的热点之一。

首套STIG装置于1985年在美国正式投入商业运行。国内自行研制的首套STIG装置,于1991年3月在深圳市南山热电厂正式通过鉴定,在功率和耗油率方面的收益令人印象深刻,功率增长了30%,耗油率降低了15%。

它特别适宜于用作移动式动力装置,或者用作电站调峰或备用电站。用作热电联供时,它具有比较宽广的热电匹配范围。

### 4 燃煤联合循环

自 70 年代中东石油危机以来,许多国家纷纷把燃油火电厂改为燃煤电厂。但直接燃煤火电越来越不能满足日益严格的环保要求。在此背景下推动了各种煤的清洁化技术的研究和开发。在这些技术的基础上,形成了多种燃煤联合循环。

燃煤的联合循环分为两类。即煤气化燃气—蒸汽联合循环(IGCC 图 3)和沸腾燃烧的燃气—蒸汽联合循环(图 4)。它们可以将各种劣质煤气化(或沸腾燃烧),经脱硫,除尘净化成“清洁燃料”供联合循环发电用,是一种对环境污染极小的发电装置。

当前,国际上煤的气化技术已取得了很大进展,用于联合循环发电,既可以获得较高的热效率,又能结合城市煤气化,供给化工煤气原料,综合考虑城建规划;特别是它具有优良的环保特性(能减少 99% 以上的 SO<sub>2</sub> 排放,并能大大减少 NO<sub>x</sub> 的排放),是一种很有发展前途的能量转换装置。

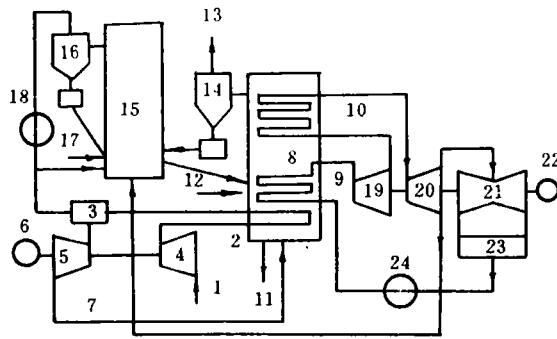
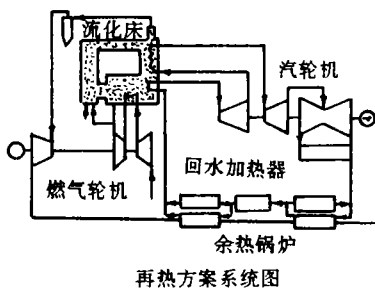
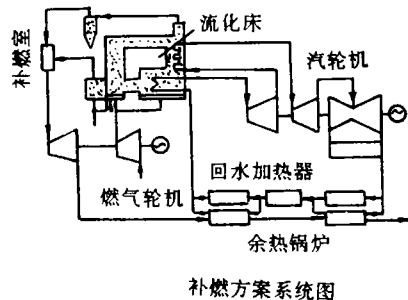


图 3 煤气化联合循环

1. 空气 2. 空气管 3. 燃气轮机燃烧室 4. 压气机 5. 膨胀透平 6. 发电机 7. 燃气轮机余气 8. 循环流化床锅炉 9. 蒸发器 10. 蒸汽过热器 11. 灰渣 12. 给煤与石灰石 13. 排烟 14. 旋风分离器 15. 煤气化器
16. 旋风分离器 17. 给煤与石灰石 18. 煤气压缩机 19. 高压蒸汽透平 20. 低压蒸汽透平 21. 低压蒸汽透平 22. 发电机 23. 冷凝器 24. 给水泵



再热方案系统图



补燃方案系统图

图 4 增压流化床燃气蒸汽联合循环

煤的沸腾燃烧技术可使煤直接用于联合循环发电。流化床燃烧(FBC)技术包括常压流化床燃烧(AFBC)技术和增压流化床燃烧(PFBC)技术两部分。目前 AFBC 技术比较成熟,电力部门使用 AFBC 技术更新设备能严格控制 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的排放量,同时还可提高发电能力。AFBC 技术包括常压泡床燃烧、常压循环流化床燃烧(CFBC)。泡床—循环流化

床组合燃烧和媒体流化床燃烧技术。其中以 CFBC 技术尤受重视。因为这项技术具有燃烧效率高、环保特性好、便于大型化和煤种适应性强等一系列特点。泡床燃烧技术与 CFBC 技术旗鼓相当。我国在研究开发泡床技术方面已经取得了相当的进展。

增压流化床燃烧技术具有燃烧效率高、体积小,占地少,投资少等特点。目前美、英、

德等国家主要是在研究增压流化床的联合循环。我国也已把它列为国家重点科研课题。

目前,燃煤联合循环热效率已达(40~42)%,未来可望达到(45~50)%。在美国,煤气化联合循环发电方案已发展到商业化的示范阶段。建在加利福尼亚州洛杉矶附近的 10 万千瓦级的 Cool Water 电站,经两年的运行证明其性能良好,环保特性更为突出。日本三菱重工设计的增压流化床锅炉联合循环发电设备,其输电端效率达(40~41)%(高热值),NO<sub>x</sub> 降到 70 ppm 以下,除硫率达 90%以上。

### 5 HAT 循环(图 5)

这是新近刚提出的一种并联热力循环,水在中冷器 C1,后冷器 C2 及热水器 H 中被加热升温,混合后从饱和器 S 顶部喷进;压气机出口的高压空气经冷却后,从底部通入。在饱和器内空气和热水逆流接触,空气被加热和湿化,水降压并被冷却和部分蒸发,从饱和器出来的湿空气[含(10~45)%水蒸汽],到回热器吸收透平排热而预热,燃烧室出来

的高温湿燃气到透平膨胀做功,透平排气通过回热器和热水器逐步降温,最后排向大气。

HAT 循环与注蒸汽 Brayton 循环很相似。它利用透平排热加热湿空气以节约燃料和加热水以产生热水用于空气湿化。原则上也可看作是一种回热 Brayton 循环。它利用空气湿化手段增加透平工质流量,以相应减少压缩耗功和大幅度增加输出功率,而湿化只需较低温度的热水,这样它可以更充分地利用系统内各种低温热能。因此,HAT 循环具有很高的热效率,比注蒸汽 Brayton 循环要高 5%绝对值左右,比余热锅炉型联合循环还高(2~3)%。利用现有的燃气轮机技术( $\tau = 5.5, \pi = 20 \sim 30$ ),HAT 循环效率可达(55~58)%。若再利用外热增大湿化热量,则可望突破 60%。

此外,由于 HAT 循环有低温的高压空气和湿空气,将使原燃机热部件冷却条件大为改善,在相同的硬件条件下,透平初温可提高 80~100℃。而且,进入燃烧高温区的是高湿度空气,NO<sub>x</sub> 排放量较低,至少比目前燃煤电站要低一个数量级;又因效率高,CO<sub>2</sub> 排放量也成比例下降,同时它还具有良好的变工况性能。

由于效率、污染以及成本等方面的优势,HAT 循环很有发展前景,也许是一种跨世纪的新颖热力循环。

### 6 其它

#### 6.1 燃煤磁流体发电(MHD)(图 6)

磁流体发电机是将热能直接变换为电能的一种装置,在这种装置中并不需要经过变换为机械能的中间过程。最简单的磁流体发电机如图 7 所示,它由通道,磁场线圈和电极组成。导电流体依靠压力梯度沿通道流过磁场,使之感应出电动势,并由电极引出电流。

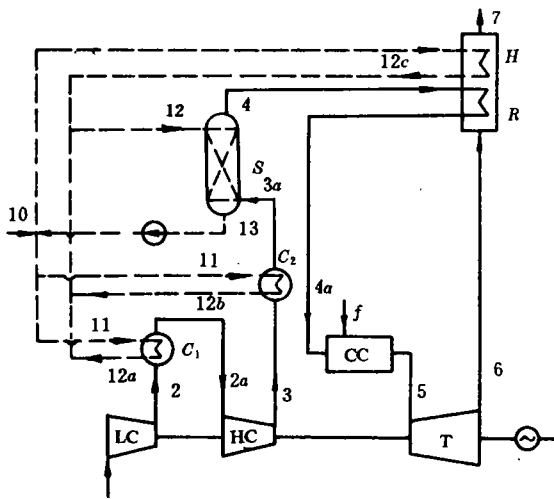


图 5 HAT 循环

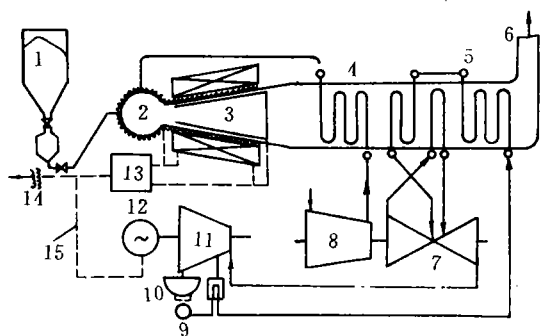


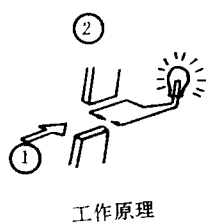
图6 燃煤磁流体—蒸汽联合电站系统简图

1—煤斗;2—燃烧室;3—发电机;4—预热器;5—锅炉;6—烟道;7—高压透平机;8—压缩机;9—泵;10—冷凝器;11—低压透平机;12—发电机;13—逆变器;14—输出;15—电线

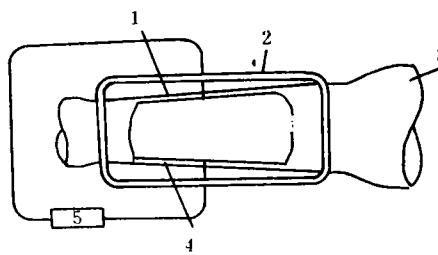
磁流体动力循环的初温约为 3000 K,大大高于蒸汽或燃气循环的初温(800~1600

K),因此,磁流体发电方式具有效率高的潜在能力。利用煤作燃料的磁流体—蒸汽联合循环电站的效率可望达到 60%。此外它还具有环境污染小的特点。由于磁流体发电中需要添加的钾、铯化合物作为种子,它们具有与硫的强烈化学聚合性,即具有自动脱硫的作用。因此在排烟中几乎没有 SO<sub>2</sub> 那样的有害物质。

燃煤磁流体发电的核心技术是磁流体发电燃煤燃烧室的开发。目前一些发达国家正在进行这方面的研究和开发。早在 70 年代,美国能源部即开始资助液态排渣燃烧室的研究。80 年代已建成 5 万千瓦级燃烧室,并已完成总体实验。我国也正积极从事 MHD 燃烧室的研制,但与国际先进水平相比尚有一定差距。



工作原理



简图

图7 磁流体发电机的工作原理及简图

①—气流;②—磁流体发电机

1—阴极;2—磁场线圈;3—通道;4—阳极;5—负荷

### 6.2 高温燃气轮机

众所周知,Brayton 循环热效率随涡轮入口温度的提高而增加,但涡轮入口温度的提高受设备所能承受的最高温度的限制,为了使燃气轮机能在更高的温度下运行,日本开发了先进的镍基合金耐热叶片和分层的燃烧室。并进行了一系列的特性实验,如:在 1400 C 下的运行试验,蒸汽喷入试验以及对叶片的蒸汽冷却试验。日本电力中央研究所

和日立公司开发了耐高温的静叶材料。它由碳化硅族的陶瓷和金属铁心组成。由于在其中间设置了空气遮热层,耐热性和机械强度均有提高,可承受高达 1600 C 的高温。三菱重工在美国西屋公司的协助下,在 1250 C 级高温燃气轮机的基础上,又开发了 1350 C 的 501F 型燃气轮机,容量 150MW,并于 1989 年完成了工厂负荷试验,单独运行时热效率为 35%。三菱重工还在研制 1500 C 的高温燃气

轮机。可以预料,将来以高温燃气轮机技术为基础构成的联合循环,将具有更加优越的循环性能。

### 7 结 束 语

综上所述,近 20 年来大型动力循环的研究已取得相当的进展。在“总能系统”这个大框架下,有机地把各种单一动力循环结合起来,彼此取长补短,发展了多种各具特色的联合循环,使动力循环性能提高到一个新的水平。从对单一动力循环的研究到对各种广义的联合循环的研究,标志着人类认识的一次质的飞跃。

日益严重的环境污染作为工业化的一个不可避免的副产物,已引起全球性的关注和重视。面对日益严格的环保要求,动力循环的研究在追求优越的循环性能的同时,必须更多地注重有效地降低环境污染。以煤的清洁化技术为基础的各种燃煤联合循环,以及其它各种高效率、低污染的联合循环,将具有广阔的发展前景。

### 参 考 文 献

- 1 Giglio R S. A thermodynamical performance analysis of a combined cycle engine. S. M. Thesis, M. I. I. Dept. of Mechanical Engineering, June, 1986
- 2 El-Masri M A. Exergy analysis of combined cycles—Part 1: Air—Cooled Brayton cycle gas turbines. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1987, 109(2)
- 3 Chin W and El-Masri M A. Exergy analysis of combined cycles—Part 2. Analysis and optimization of two—pressure steam bottoming cycles. ASME Journal of Engineering for

- Gas Turbines and Power, 1987, 109(2)
- 4 Rice I G. The combined reheat gas turbine/steam turbine cycle. Part 1- A Critical analysis of the combined reheat gas turbind/steam turbine cycle. ASME Journal of Engineering for Power, 1980,102(1)
- 5 乐海南. 日本火电设备的技术发展. 电力系统工程, 1992.8(1)
- 6 Cheng D Y. Parallel—compound dual fluid heat engine. U. S. Patent, №3978661, 1976,9,7
- 7 Cheng D Y. Regenerative parallel compound dual fluid heat engine. U. S. Patent, №. 4128994, 1978,12,12
- 8 Cheng D Y. Regenerative parallel compound dual fluid heat engine. Continuation of patent №. 4128994 is a separate patent, U. S. Patent, №. 4248039, 1981. 4. 3
- 9 闻雪友等. 燃气轮机回注蒸汽装置的研究. 热能动力工程. 1991,6(3)
- 10 吉桂明. 燃气轮机技术和应用的展望. 热能动力工程, 1992,7(3)
- 11 周伏秋,王克光,严家驹. 燃气—蒸汽混合循环热力学分析. 工程热物理学报, 1992. 13(3)
- 12 闻雪友,魏应新. PG 5361 STIG 装置. 热能动力工程, 1992,7(4)
- 13 林汝谋等. HAT 循环性能分析研究. 工程热物理学报, 1993,14(2)
- 14 Cook D T. Mc Danial J E, Rao A D. HAT Cycle simplifies coal Gasificaitln Power. MPS, May, 1991.
- 15 Linden S. Future power and markets and turbine technologies. World Cogen. , 1991,3(1)
- 16 钟史明. 积极开发研究燃煤(煤气化)/燃气—蒸汽联合循环发电技术. 煤炭综合利用, 1990, (4)
- 17 张世铮. 燃煤增压流化床燃气—蒸汽轮机联合循环的热力性能. 工程热物理学报, 1988,9(1)
- 18 Bajura R A. Simulation of a PFBC combined cycle power plant. U. S. DOE, Paper at AIChE Meeting, 1982
- 19 Berman P A. High efficiency pressured fluid bed system. ASME, 83—GT—166
- 20 Bajura R A, Webb H A. The marriage of gas and coal. Mechanical Engineering, 1991 (9)

CONTENTS

- (130) **Cogeneration Technology in England and Europe-- the Second in a Series of Reports Concerning Cogeneration** .....Qiang Guofang(*Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute*)

Through a brief, comprehensive and systematic description of the current status, state-of-the-art, cost effectiveness, development prospects and management formats of CHP (combined heat and power) engineering in England this paper attempts to arouse the keen interest in cogeneration technology of the broad ranks of power engineering workers as well as other related organizations and departments and thereby induce them to apply ever greater efforts in striving for the further advancement of this power generation cycle. **Key words:** *combined heat and power, district heating, independent energy producers*

- (137) **A New Outlook on the Study of Power Plant Cycles and Their Development Trends** ..... Yang Yushen, Zhou Fuqiu, Yu Qing(*Harbin Institute of Technology*)

This paper briefly describes the basic outward features of and recent advances in the research of high capacity power plant cycles. A concise presentation is also given of the future development trends of such cycles. **Key words:** *combined cycle, steam injected gas turbine cycle, coal fired PFBC combines cycle, gasification combined cycle, HAT cycle*

- (143) **Some Research Findings Concerning the Surge Characteristics of Axial Compressors** ..... Wu Yangjie(*Wuxi Division of Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute*)

The author has summed up the experimental test results of several types of compressors, presenting some research findings concerning surge boundaries. The use of these findings can not only be conducive to reducing the number of times of tests but also serves a useful purpose during the calculation of the related parameters on surge boundaries. **Key words:** *compressor, surge characteristics*

- (146) **An Analysis of the Regeneration Restriction of STIG Cycle Heat Recovery Boilers** ..... Zhou Fuqiu, Wang Keguang, Yan Jialu (*Harbin Institute of Technology*)

To make an analysis of the regeneration restriction of heat recovery boilers for steam injected gas turbine cycles, a simulation calculation has been performed of a STIG cycle in the temperature range of 1000~3000 C and pressure ratio range of 8~42. The results of the said calculation show that the type of regeneration restriction which took place on the heat recovery boiler will first of all depend on the given specific conditions and is subject to the influence of injected steam temperature. In addition, the regeneration restriction has also been found to be related to the selected value of the minimally allowable pinch-point temperature difference. **Key words:**