

· 综 述 ·

燃气蒸汽联合循环技术的发展

(上海交通大学) 程应军 邹介棠 陈 鹰

[摘要] 讨论燃气蒸汽联合循环的发展历程,并介绍若干种先进的联合循环,有助于人们把握联合循环技术发展的趋势。

关键词 燃气轮机 联合循环 发展

中图分类号 TK01; TK16

1 回顾

联合循环是由不同工质的热力循环组成的联合工作系统,是总能系统的一种常见形式。联合循环起源于本世纪初期,1925年,Emmet提出了一个“汞-蒸汽”装置,整个装置的效率达到 54%,由于该装置中汞的昂贵和有损性,该循环没有获得推广。

1960年,Seippel和 Bereuter提出了燃气轮机和蒸汽轮机七种可能的组合,其中如 Seippel/Bereuter combined cycle^[1]就发展成了现代燃气蒸汽联合循环的主要形式。

由于燃气轮机参数较高时,补燃带来的效率得益很小,考虑无补燃时的简单联合循环,可得到联合循环的总效率:

$$\eta_{CC} = \frac{W_H + W_L}{Q_B} = \eta_{H+} (Z_0)_L - \eta_H (Z_0)_L \quad (1)$$

$$(Z_0)_L = Z_0 Z_L$$

式中 Z_B 为两循环热交换过程中的锅炉效率:

$$Z_B = Q_L / Q_{HR}$$

2 研究现状

目前联合循环的发展途径主要有:

2.1 提高燃气轮机的平均加热温度

一般可以采用下列三种方法:

2.1.1 提高燃气透平的入口温度 (TIT)

通过研制高温材料和改进冷却技术,提高透平

的 TIT 温度,从而改善循环的效率。顶循环比功随 TIT 温度的提高也有同样的趋势。对于某一给定的 TIT 温度,为使联合循环的效率最高,涉及到一个压比的选择问题,选用的压比一般远小于顶循环最高效率时的压比,而稍大于顶循环最大比功时的压比。

2.1.2 补燃燃气轮机的排气

当燃气轮机参数较低时,补燃有助于提高联合循环的效率。但随着 TIT 温度的提高,补燃带来的得益越来越小。目前补燃除用于运行峰值载荷外,一般很少采用。

2.1.3 燃气透平膨胀过程中进行再热

ABB公司的 GT24/26型燃气轮机就在燃气高压透平 HP和燃气低压透平 LP之间采用了再热。燃气在 HP中膨胀后,返回燃烧室再热到循环最高温度,然后进入 LP进行膨胀。该装置如保持燃气透平排气温度不变,可采用较大的压比,其值 (30) 接近于顶循环最高效率时的压比。

2.2 减小余热锅炉热传递中的不可逆损失

顶、底循环匹配的理想目标是:尽量使排气放热线和底循环吸热线平行,减小节点温差,争取最小的平均传热温差,底循环的 $T-S$ 图呈“三角形”形状,如图 1

双压锅炉和三压锅炉能缩小循环放热线和吸热线间的平均传热温差,有效地减小了余热锅炉中的不可逆损失,从而提高了蒸汽循环的可用效率。但它对联合循环效率的提高不是很大,如从单压锅炉变到双压锅炉循环效率提高 4%。

Kalina循环采用变浓度的氨/水混合工质,在吸热过程中,工质为变温蒸发,改善了热源和工质的匹配性能,降低了排烟温度。

空气底部循环 (ABC循环),采用空气这一工作温度区内无相变的工质,就无节点温差问题,但它对顶循环排气热的利用率受到自身压气机出口空气温

收稿日期 1997-05-12 收修改稿 1997-09-28

本文联系人 邹介棠 男 1944年生 教授 200030 上海交通大学 动能工程学院

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

度的影响,为提高 ABC 循环的排气热利用率,需要对其压气机进行间冷。

2.3 减小顶、底循环间的热损失 Q_{UN}
热损失 Q_{UN} 是排烟温度的函数,降

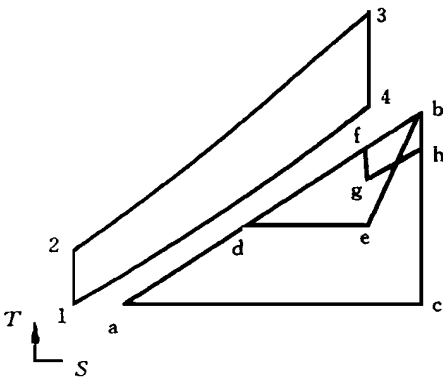


图 1

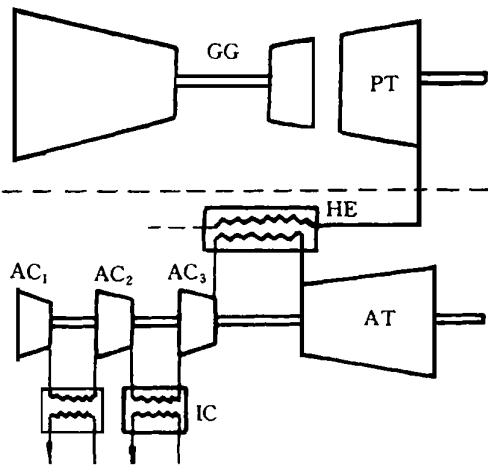


图 2 空气底部循环 (ABC)

低排烟温度能减小蒸汽循环的给水温度。在联合循环效率计算式 (1) 中, $(Z_0)_L$ 的大小对效率影响很大。

减小热损失 Q_{UN} 能提高锅炉效率 Z_B , 从而在蒸汽循环效率 Z_L 较低时保持联合循环的总效率不变。

3 经济性分析

联合循环的经济性以装置的单位发电价格为标准。装置的年总投资费用 P_E

$$P_E = CAP + M + OM \quad (2)$$

$$CAP = UC_0 \quad M = aFH$$

式中: CAP — 装置总资本的年消耗

M — 燃料的年消耗

OM — 装置运行和维护的年费用

U — 装置总资本的年消耗率

C_0 — 装置总资本

a — 燃料单位能量的价格

F — 燃料能量的供应率

H — 装置的年运行小时数

可得出单位发电价格:

$$Y_E = \frac{P_E}{WH} = \frac{UC_0}{WH} + \frac{a}{Z_{cc}} + \frac{OM}{WH} \quad (3)$$

式中: W — 装置的发电功率 (kW)

对比联合循环和核装置的单位发电价格 Y_E , 联合循环中 CAP 项的值较小, 而 M 项的值较大; 核装置中 CAP 项的值较大, 而 M 项对应的值较小。因此, 联合循环的优点就在于其装置的建造资本较小, 但由于燃料的消耗较大, 需要提高循环的效率。为保证效率提高时装置的单位发电价格不至升高, 应有下式:

$$\frac{\partial Y_E}{\partial Z_{cc}} = \frac{U}{WH} \frac{\partial C_0}{\partial Z_{cc}} - \frac{a}{Z_{cc}^2} \leq 0$$

得

$$\frac{\partial C_0 / W}{\partial Z_{cc}} \leq \frac{aH}{UZ_{cc}^2} \quad (4)$$

可见, 效率提高时, 装置的投资费用的提高有一个限制。因此, 在改进联合循环效率时, 需要考虑装置投资费用的提高程度。

4 展望

现代联合循环已经有了很高的效率, 但由于燃料价格上涨和环保要求的提高, 进一步刺激了改善联合循环的效率。目前已经提出了很多新颖的联合循环

4.1 蒸汽冷却循环

利用蒸汽冷却燃气透平, 冷却后蒸汽进入蒸汽透平做功, 该循环在较高 TIT 温度时效率可超过 60%。

4.2 并联型联合循环

4.2.1 注蒸汽 STIG 循环

示意图见图 3, 该循环利用燃气轮机的高温排气产生蒸汽, 回注到燃烧室, 生成高温燃气 / 蒸汽混合工质, 然后进入透平膨胀做功。STIG 循环在压缩功增长极其有限的情况下大大增加了透平的工质流量, 提高了循环的效率和比功, 且和常规联合循环相比, 省略了蒸汽轮机及其系统, 简化了设备。但它的耗水量较大, 而且 Larson 和 Williams 预言, 比它更复杂的间冷 STIG (ISTIG) 循环的效率都有可能被下一代先进的常规联合循环的效率所超过。

4.2.2 湿空气透平 (HAT) 循环

HAT 循环利用系统内的余热和废热产生热水, 再用热水湿化手段增加透平工质流量, 相对地降低

了工质压缩耗功,且采用回热形式回收透平排热,传热过程

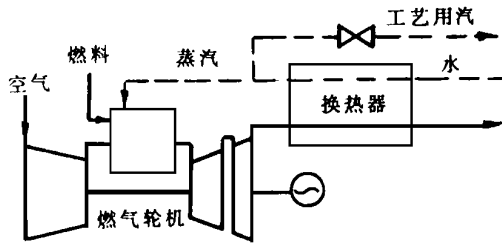


图 3 注蒸汽燃气轮机循环示意图

中工质无相变,平均传热温差小,循环放热温度低(70℃~90℃),较好地体现了能的梯级利用原理。

HAT循环的效率可突破 60%,其循环示意图见图 4。

4.3 化学热回收 (CRGT) 和化学链燃烧系统 (CLCPS)

这类循环借助化工技术,环境污染较低。

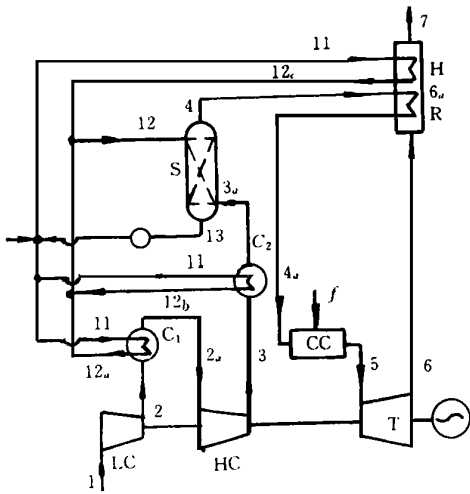


图 4 HAT 循环热力系统示意图

- LC 低压机
- HC 高压压机
- C 空气间冷器
- C₂ 后冷器
- S 蒸发饱和器
- CC 燃烧室
- T 湿空气透平
- R 回热器
- H 排气给水预热器
- 1~7 为空气的循环流程
- 11~13 为水的循环流程

的总发热量

化学链燃烧系统见图 5,它利用 NiO 作为中间介质,通过两级化学链反应释放化学能,系统效率较高。

4.4 借助液态氢 (LH₂) 的氦循环 (He)

由于液态氢的高焓值和可再生性,选用液态氢作为一种新型能源,氢的液相温度为 20 K,对氢加热产生氢蒸汽就能对外做功。选用氦循环作为氦循环的顶循环,是由于氦的临界点温度相当低(4.125

K),且没有爆炸的危险

该循环示意图见图 6,燃气循环作为氦循环的顶循环,氦循环作为氦循环的顶循环,三个循环的最高点温度分别为 1500 K 770 K 120 K 由于氦循环在很低的温度下做功,当不考虑氦循环做功时,循环的效率可达到 74%。

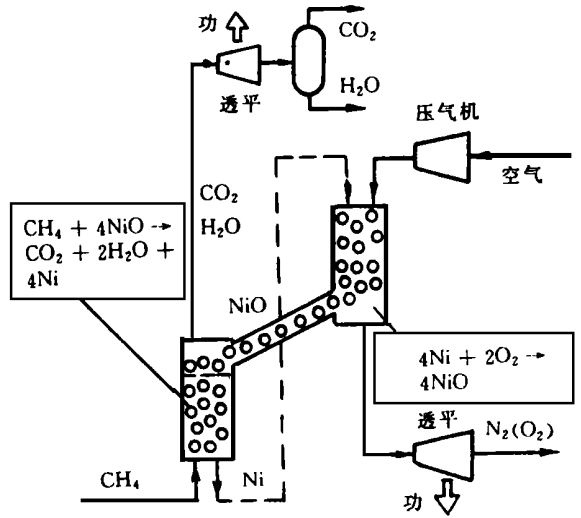


图 5 化学链反应燃烧动力系统 (CLCPS)

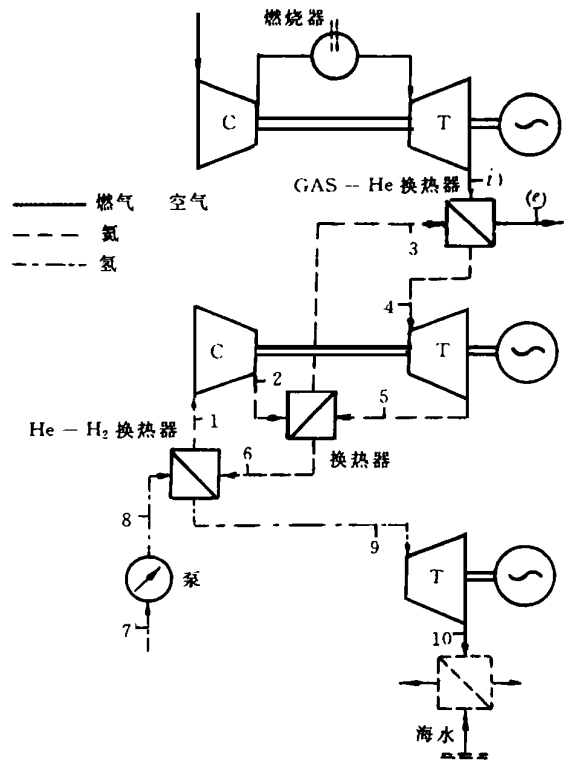


图 6 借助液态氢的氦循环系统
1~6 为氦的循环流程 7~10 为氢的循环流程

4.5 新型燃煤系统

由于天然气价格昂贵,可采用便宜燃料煤作为能源。我国是世界产煤大国,煤炭资源极为丰富,最适宜发展燃煤系统。燃煤联合循环是把洁净的燃煤技术与高效率的燃气蒸汽联合循环系统结合在一起的先进技术,它将彻底改变能源供需和消费结构,有利于生态平衡和环境保护,因而成为当今世界发电设备注意的焦点和发展方向。目前性能较好的燃煤系统有:

4.5.1 增压流化床联合循环 (PFBC)

PFBC与常规燃煤系统的差别是以PFBC的锅炉岛取代常规锅炉,由于采用锅炉增压,炉体容积较小,且其燃烧效率较高。

4.5.2 整体煤气化联合循环 (IGCC)

IGCC由煤气化炉、净化装置(除尘脱硫)、燃气轮机发电机组、余热锅炉和蒸汽轮机发电机组等系统组成。该技术可提供脱硫98%~99%,NO_x接近烧天然气的水平,CO₂量较常规燃煤系统略有减少,而且,IGCC还是供热、供电、供煤气和供化工产品的多联供系统,它较PFBC为优。

4.6 燃生物量联合循环 (BIG/GTCC)

生物量是农田、森林、工业过程中所产生的固体残废物。生物量作为一种新能源有其独特的特点。它能克服矿物燃料有限的缺点,因为生物量具有可再生性,从而能够作为一种长期、稳定的能源供应;其次,它能减少引起温室效应的CO₂的排出,因为新生物量的生长能吸收燃烧旧生物量产生的CO₂,而且生物量

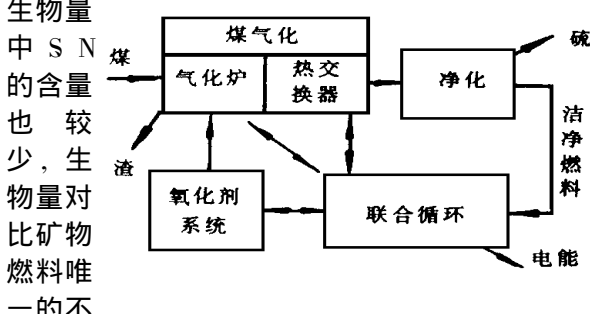


图8 整体煤气化联合循环

中S、N的含量也较少,生物量对比矿物燃料唯一的不足是单位重量和单位体积的能量含量低。由于生物量的高燃烧效率、低费用和低环境污染,生物量作为一种新型能源具有相当的竞争力,尤其是用于航空改型燃气轮机中。

生物量煤气化联合循环 (BIG/GTCC) 首先把生物量煤气化,然后进行煤气冷却,煤气清洁,最后进入燃气轮机燃烧。蒸汽底循环则利用上述各过程的余热产生蒸汽。

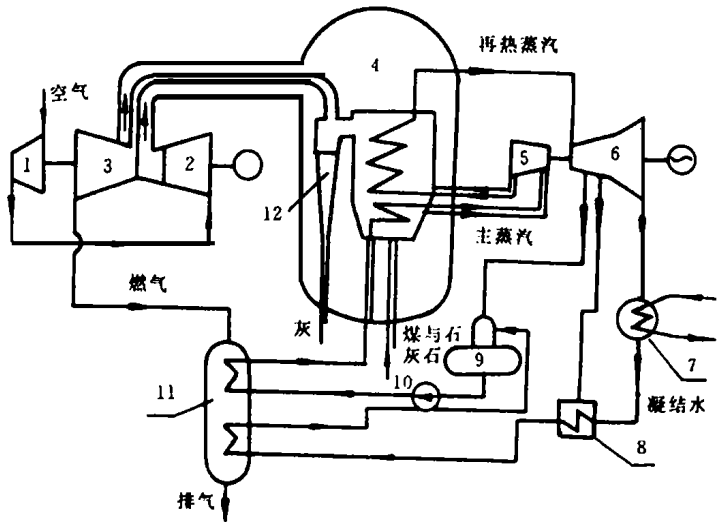


图7 增压流化床燃气-蒸汽联合循环的热力系统图

- 1. 低压压气机 2. 高压压气机 3. 燃气透平 4. 增压流化床锅炉
- 5. 高压蒸汽透平 6. 低压蒸汽透平 7. 凝汽器 8. 给水加热器
- 9. 除氧器 10. 水泵 11. 省煤器 12. 旋风分离器

很大程度的环境污染。在IGCC中,高压小流量的煤气流中H₂S很容易去除,NO_x产生量也可以通过先进的燃烧技术减少,CO₂虽然可以通过化工过程回收,但这将引起很大程度上的投资费用的增长,ETSU宣称回收CO₂是一个没有前途的技术。

5 小结

联合循环的发展依赖工程技术和热力学基本理论的发展,新型热力系统的提出受到经济性和环境保护两方面的制约。目前燃气蒸汽联合循环的目标是发展高效、燃煤而又具有最小环境污染的机组。

参考文献

- 1 Horlock J H Combined power plants - past, present, and future. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117(4): 608~ 616.
- 2 Bolland O. A comparative evaluation of advanced combined cycle alternatives. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1991, 113(2): 190~ 197.
- 3 Bisio G, Massardo A and Agazzani A. Combined helium and combustion gas turbine plant exploiting Liquid Hydrogen (LH₂) physical exergy. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(2): 257~ 263.
- 4 Consonni S and Larson E D. Biomass - Gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles Part A - Technologies and performance modeling. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118(3): 507~ 515.
- 5 林汝谋,张世铮,蔡睿贤.燃气轮机火电动力技术发展.燃气轮机技术,1995,8(3).
- 6 沈炳正,黄希程.燃气轮机装置.机械工业出版社,1990年.

(复 编)

燃气蒸汽联合循环技术的发展 = **The Development of Gas-Steam Turbine Combined Cycle Technology** [刊, 中] /Cheng Yingjun, Zou Jietang, Chen Ying (Shanghai Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 311~ 314

The authors discuss the evolutionary course of development of gas-steam turbine combined cycles and give a brief description of certain types of advanced combined cycles. It is hoped that the paper will be helpful for those interested in grasping the development tendency of such combined cycles. **Key words** gas turbine, combined cycle, development

利用出口几何结构改善循环流化床锅炉性能 = **The Improvement of Circulating Fluidized Bed Boiler Performance Through the Use of Exit Geometric Structures** [刊, 中] /Jin Yan, Zheng Qiayu (Qinghua University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 315~ 316

The exit geometric structures of a circulating fluidized bed boiler exercise a tremendous influence on its in-boiler gas-solid dual-phase flow behavior and heat transfer characteristics. This is called the exit end effect of a circulating fluidized bed boiler. Test results have shown that the use of a rational exit geometric structure is conducive to the enhancement of particle internal circulation and in-boiler heat transfer. **Key words** circulating fluidized bed boiler, exit geometric structure, internal circulation

动力装置与主锅炉匹配的初步研究 = **A Preliminary Study of the Matching of a Power Plant and its Main Boiler** [刊, 中] /Chen Qiduo, Shen Zhigang, Liu Changcheng, et al (Harbin No. 703 Research Institute) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 317~ 318

This paper dwells on the matching of a power plant and its main boiler as well as their interrelationship. It can serve as a guide during the design of a naval steam power plant and its main boiler. **Key words** power plant, main boiler, matching

石灰石静态煅烧特性的研究 = **A Study of Limestone Static Calcination Characteristics** [刊, 中] /Zheng Ying, Shi Xuefeng, Zhou Yingbiao, et al (Huazhong University of Science & Engineering) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 319~ 321

With the help of a laboratory ASAP2000 specific surface area measuring instrument studied are the CaO microstructure characteristics obtained after the calcination of two kinds of limestone. Discussed is the influence on CaO specific surface area and average pore diameter of calcination time, calcination temperature and limestone particle diameter. **Key words** limestone, calcination, pore characteristics

稻壳与石英砂及煤粒的流化与混合特性研究 = **A Study of the Fluidization and Mixing Characteristics of Rice Husk, Quartz Sand and Pulverized Coal** [刊, 中] /Chen Guanyi, Fang Mengxiang, Luo Zhongyang, et al (Zhejiang University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 321~ 324

On a small-sized test stand studied is a rice husk-fired fluidized bed boiler with respect to such key techniques as fluidization and mixing characteristics of multi-component materials like rice husk, silicon sand and coal, etc. A series of practical and instructive conclusions are obtained, which can serve as a theoretical basis and guidelines for the design and operation of rice husk-fired fluidized bed boilers. **Key words** rice husk, fluidized bed, fluidization characteristics, mixing characteristics, experimental study