超临界蒸汽参数对燃气蒸汽联合循环

性能的影响

赵子东，阎维平，屈柯楠

（华北电力大学 能源与动力机械工程学院，河北 保定 071003）

**摘 要：**为进一步提高联合循环效率，参考现有燃气蒸汽联合循环12.5 MPa/568 ℃亚临界蒸汽参数，提出了27 MPa/585 ℃超临界蒸汽参数，根据燃气蒸汽联合循环计算模型，以397 MW燃气轮机联合循环机组为例，计算了超临界蒸汽参数与2种亚临界蒸汽参数的底循环效率和联合循环效率，并分析对比了3种蒸汽参数的底循环效率对联合循环效率的贡献。研究表明：对于同一燃气轮机，超临界和亚临界中低压蒸汽参数不同时，超临界蒸汽参数的底循环效率比亚临界提高4.3%，蒸汽底循环输出功率占联合循环机组输出功率百分比由30.21%增加到32.62％，联合循环净效率增加2.21%，联合循环机组的输出功率增加20.38 MW；中低压蒸汽参数相同时，超临界蒸汽参数的底循环效率比亚临界提高2.87%，蒸汽底循环输出功率占联合循环机组输出功率的百分比由31.16％增加到32.62％，联合循环净效率增加1.44%，联合循环机组的输出功率增加12.5 MW。

**关键词：**联合循环；超临界；亚临界；蒸汽参数；循环效率

**中图分类号：**TK221 **文献标识码**：A

**Study of the Influence of the Supercritical Steam Parameters on the Performance of a Gas-steam Combined Cycle**

ZHAO Zidong, YAN Weiping, QU Kenan

(College of Energy and Power Machinery Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003)

**Abstract:** To further improve the efficiency of a combined cycle under the condition of an increasing temperature of the exhaust gas from gas turbines, with the subcritical steam parameters 12.5MPa/568℃ of a gas-steam combined cycle serving as the reference, supercritical steam parameters 27MPa/585℃ were proposed. According to a gas-steam combined cycle calculation model, with a 397 MW gas turbine combined cycle unit serving as an example, the efficiencies of the bottom cycle and combined cycle at supercritical steam parameters and two kinds of subcritical steam parameters were calculated and the contributions to the efficiency of the combined cycle made by the efficiency of the bottom cycle at three kinds of steam parameters were analyzed and compared. It has been found that for a same gas turbine, when the supercritical and subcritical intermediate and low pressure steam parameters are different, the efficiency of the bottom cycle at the supercritical steam parameters will increase by 4.3 percentage points compared with that at the subcritical steam parameters, the output power of the bottom steam cycle will occupy a percentage of that of the combined cycle unit from 30.21% to 32.62%, the net efficiency of the combined cycle will increase by 2.21 percentage points and the output power of the combined cycle unit will increase by 20.38MW. When the intermediate and low steam parameters are identical, the efficiency of the bottom cycle at supercritical steam parameters will increase by 2.87 percentage points compared with that at the subcritical steam parameters, the output power of the bottom steam cycle will occupy a percentage of that of the combined cycle unit from 31.16% to 32.62%, the net efficiency of the combined cycle will increase by 1.44 percentage points and the output power of the combined cycle unit will increase by 12.5MW.

**Key words**: combined cycle, supercritical, subcritical, steam parameter, cycle efficiency

引言

目前，国外燃气蒸汽联合循环发电技术的研究经过了几十年的发展，美国、英国、日本等许多发达国家的燃气蒸汽联合循环发电技术比较成熟，其循环效率已达到58%以上 [1~3]；但随着燃气轮机排烟温度的不断提高，国外已着手开发研制直流余热锅炉[4]，该锅炉在设计上采用低压端自然循环系统与中高压段本生式直流强制循环系统相结合的设计原理；英国Cottam电厂的余热锅炉蒸发系统采用了直流蒸发器并取消了汽包，蒸汽参数为亚临界 [5]。

**收稿日期：**2016-06-11；**修订日期：**2016-07-25

**基金项目：**中央高校基本科研业务费资助项目（2014MS107）

Fund-supported Project: Central Government-affiliated Colleges and Universities Basic Scientific Research Business Expenditure Supported Project (2014MS107)

**作者简介：**赵子东（1990-），男，河北张家口人，华北电力大学硕士研究生 .

收稿日期：2017-06-11；修订日期：2017-07-28

基金项目：国家自然科学基金（51270060）

Fund-supported Project：National Natural Science Fund（51270060）

作者简介：赵子东（1990-），男，河北张家口人，华北电力大学硕士研究生.

我国燃气蒸汽联合循环的使用时间虽然较短，但对这种发电技术的底循环已有大量研究。焦树建对双压再热和三压无再热联合循环余热锅炉与汽轮机的匹配问题做了大量研究，优化蒸汽参数的匹配关系[6~11]；李扬以燃气蒸汽联合循环底循环功率为目标函数进行蒸汽参数的匹配研究 [12~13]。已经投入商业运行的燃气蒸汽联合循环底循环均为亚临界蒸汽参数[14~15]，尚无燃气蒸汽联合循环的底循环采用超临界蒸汽参数。

本文提出燃气蒸汽联合循环的底循环采用三压再热超临界直流蒸汽系统，高压蒸汽采用27 MPa/585℃超临界蒸汽参数，中低压仍然采用亚临界自然循环蒸汽参数，以397 MW燃气轮机为顶循环的燃气蒸汽联合循环机组作为研究对象，通过建立热工模型计算了燃气蒸汽联合循环超临界蒸汽参数与亚临界蒸汽参数的底循环效率和联合循环效率，并对比分析超临界蒸汽参数与亚临界蒸汽参数底循环对联合循环效率的贡献。

1系统介绍

1.1燃气轮机参数

选定型号GE9HA的397 MW燃气轮机为燃气蒸汽联合循环的顶循环，燃气轮机具体的性能参数与排气成分如表1~表2所示。

表1 燃气轮机性能参数

Tab1. Gas turbine performance parameters

|  |  |
| --- | --- |
| 参 数 | 数 值 |
| 型号 | GE9HA |
| 燃料 | 天然气 |
| 燃机出力/MW | 397 |
| 效率/% | 41 |
| 转速/r·min-1 | 3 000 |
| 燃气初温/℃ | 1 430 |
| 排气流量/t·h-1 | 2 989 |
| 排气温度/℃ | 625 |

表2燃气轮机排气成分（%）

Tab. 2 Composition of the exhaust gas from the gas turbine（%）

|  |  |
| --- | --- |
| 排气成分 | 含 量 |
| N2 | 73.25 |
| CO2 | 3.23 |
| H2O | 10.11 |
| O2 | 12.53 |
| Ar | 0.88 |

1.2底循环汽水系统设计方案

根据选定的397 MW燃气轮机参数提出两种不同的蒸汽系统：（1）超临界直流蒸汽系统，高压蒸发系统采用直流蒸发管束取消了汽包结构，中低压蒸发系统仍然采用汽包结构；（2）亚临界自然循环蒸汽系统，高中低压蒸发器均采用自然循环汽包结构。蒸汽动力循环汽水系统如图1~图2所示。



图1 超临界直流汽水系统图

Fig. 1 Diagram of a supercritical DC steam-water system



图2 亚临界自然循环汽水系统图

Fig. 2 Diagram of a subcritical natural circulation steam-water system

1.3底循环蒸汽参数

基于以上不同的蒸汽动力循环设计方案，燃气蒸汽联合循环余热锅炉和蒸汽轮机选取3种蒸汽参数进行对比：（1）超临界蒸汽参数；（2）亚临界1蒸汽参数，高中低压蒸汽参数均不同于超临界高中低压蒸汽参数；（3）亚临界2蒸汽参数，高压蒸汽参数不同于超临界高压蒸汽参数，中低压蒸汽参数与超临界中低压蒸汽参数相同。3种底循环设计参数如表3所示。

表3 余热锅炉参数对比

Tab.3 Comparison of waste heat boiler parameters

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 参 数 | 超临界 | 亚临界1 | 亚临界2 |
| 高压蒸汽流量/kg·s-1 | 95 | 102 | 99.7 |
| 高压蒸汽压力/MPa | 27 | 13.5 | 13.5 |
| 高压蒸汽温度/℃ | 585 | 585 | 585 |
| 再热蒸汽流量/ kg·s-1 | 109.6 | 118.6 | 109.8 |
| 再热蒸汽压力/MPa | 6 | 3.2 | 6 |
| 再热蒸汽温度/℃ | 585 | 585 | 585 |
| 中压蒸汽流量/kg/s | 14.6 | 16.6 | 10.1 |
| 中压蒸汽压力/MPa | 6.4 | 3.4 | 6.4 |
| 中压蒸汽温度/℃ | 360 | 360 | 360 |
| 低压蒸汽流量/ kg·s-1 | 30 | 17.4 | 29 |
| 低压蒸汽压力/MPa | 0.59 | 0.37 | 0.59 |
| 低压蒸汽温度/℃ | 295 | 295 | 295 |

在燃气蒸汽联合循环发电装置中,超临界蒸汽参数与亚临界蒸汽参数的蒸汽轮机高、中、低压缸的效率分别为86%、88%、87%；蒸汽轮机机械效率为99%；蒸汽轮机发电机效率为98.5%。

2 计算模型

2.1余热锅炉热工模型

蒸汽系统选用三压再热余热锅炉，余热锅炉采取整体除氧器的布置结构，低压汽包产生的饱和蒸汽，一部分用于除氧，另一部分进入低压过热器，然后进入蒸汽轮机低压缸做功。

余热锅炉整体热平衡方程：

（1）

余热锅炉对流换热面的热平衡方程：

 （2）

余热锅炉效率是余热锅炉的余热利用率，是输出热量和输入热量之比[10]：

 （3）

近似地：

 （4）

式中：*G*—燃气轮机排气流量，kg/s；*D*1、*D*2、*D*3—余热锅炉高中低压过热蒸汽流量，kg/s；*I*in、*I*out—进出换热面烟气焓值，J/g；*I*1—燃气轮机排气焓值，J/g；*I*2—余热锅炉排气焓值，J/g；*i*in、*i*out—进出换热面工质焓值，J/g；*i*0—蒸汽轮机高压缸排汽焓值，J/g；*i*1—进余热锅炉低压省煤器水焓值，J/g；*i*2、*i*3、*i*4—余热锅炉低中高压过热器出口蒸汽焓值，J/g；*i*5—余热锅炉再热器出口蒸汽焓值，J/g；*η*h—余热锅炉效率，%；*Cp*1、*Cp2*—余热锅炉燃气进出口定压热容，J/(g·℃)；*t*g1、*t*g2—余热锅炉燃气进出口温度，℃；*Cp*a—环境空气定压热容，J/(g·℃）；*t*a—环境空气温度，选取20℃；*φ*—余热锅炉保温系数，选取98.5；%。

2.2蒸汽轮机热工模型

计算模型采用高中低三缸补汽式汽轮机，从汽轮机的进汽口到出汽口，不仅没有抽汽，而且蒸汽的流量是增加的。

蒸汽轮机高压缸做功：

 （5）

蒸汽轮机中压缸做功：

 （6）

蒸汽轮机低压缸做功：

（7）

蒸汽轮机输出的电功率：

 （8）

蒸汽轮机的循环效率：

 （9）

式中：*P*st—蒸汽轮机输出的电功率，kW；*P*0—蒸汽轮机轴端做功功率，kW；*P*1、*P*2、*P*3—蒸汽轮机高中低压缸做功功率，kW；*i*01、*i*02、*i*03—蒸汽轮机高中低压缸排汽理想等熵焓，J/g；*η*st—蒸汽轮机的循环效率，%；*Q*in—离开燃气轮机的排气热量，kW；*Q*out—离开余热锅炉的蒸汽热量，kW。

2.3联合循环机组厂用电率

燃气蒸汽联合循环的厂用电设备主要包括凝结水泵、循环水泵、给水泵等辅机的耗电，泵的耗电量占到了全厂耗电量的75%～80%左右[16~20]，厂用电率是联合循环机组厂用电量与联合循环机组发电量的比值：

 （10）

水泵的耗电功率：

 （11）

式中：*P*e—联合循环机组厂耗电功率，kW；*P*—泵耗电功率，kW；*ρ*—水密度，1 000 kg/m3；*g*—重力加速度，9.8 m/s2；*Q*—水流量，m3/h；*H*—水的扬程，m；*η*4—泵的效率，%；*η*5—电机效率，%。

2.4联合循环效率

根据联合循环动力装置的能量输入与输出，联合循环效率计算公式：

（12）

式中：*η*cc—联合循环效率，%；*P*gt—燃气轮机输出的电功率，kW；*Q*gt—进入燃气轮机热量，kW；*ε*e—联合循环机组厂用电率，%。

3计算结果及分析

在设计工况下，根据已建立的燃气蒸汽联合循环计算模型及设计的主要参数，对3种不同蒸汽参数的燃气蒸汽联合循环机组进行计算与对比，如表4所示。

（1）在余热锅炉排烟温度和效率相同的条件下，超临界与亚临界中低压蒸汽参数不同时，超临界蒸汽参数余热锅炉比亚临界自然循环余热锅炉蒸发量减少2.12%；超临界蒸汽参数比亚临界自然循环蒸汽轮机出力增加11.86%，蒸汽轮机循环效率提高4.97%，底循环效率提高4.3%，同时蒸汽底循环输出功率占联合循环机组输出功率百分比由30.21％增加到32.62％；超临界蒸汽参数比亚临界自然循环联合循环机组厂用电率增加0.48%，联合循环发电功率增加了20.38 MW，联合循环净效率增加了2.21%。

表4联合循环性能对比

Tab.4 performance comparison of combined cycle

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 参 数 | 超临界 | 亚临界1 | 亚临界2 |
| 余热锅炉蒸发量/kg·s-1 | 249.2 | 254.6 | 248.6 |
| 余热锅炉排烟温度/℃ | 93.6 | 93.6 | 93.6 |
| 余热锅炉效率/% | 86.52 | 86.52 | 86.52 |
| 汽轮机内功率/MW | 197.1 | 176.2 | 184.28 |
| 汽轮机机械功率/MW | 195.13 | 174.44 | 182.44 |
| 汽轮机出力/MW | 192.2 | 171.82 | 179.7 |
| 汽轮机循环效率/% | 40.01 | 35.04 | 36.7 |
| 底循环效率/% | 34.62 | 30.32 | 31.75 |
| 联合循环效率/% | 61.43 | 58.89 | 59.73 |
| 联合循环发电功率/MW | 589.2 | 568.82 | 576.7 |
| 厂用电率/％ | 1.89 | 1.41 | 1.5 |
| 联合循环净效率/％ | 60.27 | 58.06 | 58.83 |

（2）在余热锅炉排烟温度和效率相同的条件下，超临界与亚临界中低压蒸汽参数相同时，超临界蒸汽参数余热锅炉比亚临界自然循环余热锅炉蒸发量增加0.24%；超临界蒸汽参数比亚临界自然循环蒸汽轮机出力增加6.96%，蒸汽轮机循环效率提高3.31%，底循环效率提高2.87%，同时,蒸汽底循环输出功率占联合循环机组输出功率百分比由31.16％增加到32.62％；超临界蒸汽参数比亚临界自然循环联合循环机组厂用电率增加了0.39%，超临界蒸汽参数比亚临界自然循环联合循环发电功率增加12.5 MW，联合循环净效率增加1.44%。

4 结 论

提出燃气蒸汽联合循环的底循环采用27 MPa/585 ℃超临界蒸汽参数，高压蒸发系统采用直流蒸发管束并取消了汽包结构，中低压蒸发系统仍然采用汽包结构，以397 MW燃气轮机为燃气蒸汽联合循环顶循环，分别采用超临界直流蒸汽参数27 MPa/585℃和2种亚临界自然循环蒸汽参数13.5 MPa/585 ℃为燃气蒸汽联合循环的底循环，对3种蒸汽参数的燃气蒸汽联合循环性能进行了计算与比较：

（1）超临界和亚临界中低压蒸汽参数不同时，超临界蒸汽参数底循环效率比亚临界自然循环底循环效率提高4.3%，同时,蒸汽底循环输出功率占联合循环机组输出功率的百分比由30.21％增加到32.62％；超临界蒸汽参数联合循环机组比亚临界自然循环联合循环机组厂用电率增加0.48%，联合循环净效率增加2.21%，联合循环机组的输出功率增加了20.38 MW。

（2）超临界和亚临界中低压蒸汽参数相同时，超临界蒸汽参数底循环效率比亚临界自然循环底循环效率提高2.87%，同时蒸汽底循环输出功率占联合循环机组输出功率的百分比由31.16％增加到32.62％；超临界蒸汽参数联合循环机组比亚临界自然循环联合循环机组厂用电率增加0.39%，联合循环净效率增加1.44%，联合循环机组的输出功率增加了12.5 MW。

（3）比较2种亚临界自然循环蒸汽参数，在高压蒸汽参数相同而中低压蒸汽参数不同时中低压蒸汽参数高的联合循环机组比中低压蒸汽参数低的联合循环机组净效率增加0.77%，机组的输出功率增加了7.88 MW。

参考文献：

[1]臧向东.燃气蒸汽联合循环余热锅炉的发展和研究[J].浙江电力，2005，24(2)：5-9.

ZANG Xiangdong. Development and research of HRSG of gas-steam combined cycle [J]. Zhejiang Electric Power, 2005, 24(2): 5-9.

[2]阎维平.洁净煤技术[M].北京：中国电力出版社，2008.

YAN Weiping. Clean coal technologies [M].Beijing: China Electric Power Press, 2008.

[3]HUBERT N, REINHARD P. Developments in HRSG Technology[M]. MAB Anlagenbau GmbH & Co, 2001.

[4]吴亦三. 新颖直流余热锅炉在国外首次成功运行[J].余热锅炉，2002(2)：17-24.

WU Yisan. For-the-first-time successful operation of a novel heat recovery steam generator in abroad [J]. Heat Recovery Steam Generator, 2002(2): 17-24.

[5]周 钰, 陈 群, 张晓辉，等. 英国生物质分布式能源系统的研究以及对我国的启示[J]. 节能技术, 2015，33(4)：332-339.

ZHOU Yu, CHEN Qun, ZHANG Xiaohui, et al. Biomass District Heating System in the UK and its Implication to China [J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33(4): 332-339.

[6]JU Y, MARUTA K. Microscale combustion: technology development and fundamental research [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(6): 669-715.

[7]MAIDMENT G G, TOZER R M. Combined cooling heat and power in supermarkets [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(6): 653-665.

[8] ATTILA K, SZTANKÓ K. Reduction of pollutant emissions from a rapeseed oil fired micro gas turbine burner [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 134: 352-359.

[9]徐 纲, 俞 镔, 雷 宇，等. 合成气燃气轮机燃烧室的试验研究[J]. 中国电机工程学报，2006，26(17)：100-105.

XU Gang, YU Bin, LEI Yu, et al. Experimental research on gas turbine combustor for burning syngas [J]. Proceedings of Electric Machine Engineering, 2006, 26(17): 100-105.

[10]汪凤山, 孔文俊, 王宝瑞，等. 微型燃气轮机燃油燃烧室燃烧特性的模化试验研究[J]. 热能动力工程，2010，25(1)：8-11.

WANG Fengshan, KONG Wenjun, WANG Baorui, et al. Experimental study of the modeling of the combustion characteristics of a micro gas turbine oil-fired combustor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(1): 8-11.

[11]WANG Shuli, BAKKER P C, SOMERS L M T. Effect of air-excess on blends of RON70 partially premixed combustion [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2016, 96(2): 309-326.

[12]王国忠, 吴少华, 刘 辉，等. 主燃区过量空气系数对再燃区速度场影响的试验研究[J]. 动力工程学报，2006， 26(1)：125-129.

WANG Guozhong, WU Shaohua, LIU Hui, et al. Effect of main combustion zone's stoichiometric-ratio on velocity fields in the reburning zone [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(1): 125-129.

[13]陈 立, 李祥晟, 杨 诏,等. 气流入口条件对低旋流燃烧火焰稳定性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2016，50(5)：114-119.

CHEN Li, LI Xiangsheng, YANG Zhao, et al. Effects of inlet conditions on low swirl combustion flame stability [J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2016, 50(5): 114-119.

[14]薛以泰. 燃气蒸汽联合循环发电的市场前景与余热锅炉技术发展[J].余热锅炉，2002(1)：1-5.

XUE Yitai. Market prospects of gas-steam combined cycle power generation and development of the technologies for heat recovery steam generators [J]. Heat Recovery Steam Generator, 2002(1): 1-5.

[15]焦树建. 论余热锅炉型联合循环中双压再热式余热锅炉的特性与汽轮机特性的优化匹配问题[J]. 燃气轮机技术，2001，14(2)：14-23.

JIAO Shujian. On optimization of properties between dual-pressure HRSG and ST in CC of HRSG type [J].Gas Turbine Technology, 2001, 14(2): 14-23.

[16]焦树建. 论余热锅炉型联合循环中三压无再热的余热锅炉之特性与汽轮机特性的优化匹配问题[J].燃气轮机技术，2001，14(3)：10-16.

JIAO Shujian. On the question of optimal characters matching between triple pressure non-reheat HRSG and ST in CC of HRSG type [J].Gas Turbine Technology, 2001, 14 (3)：10-16.

[17]李 扬.燃气—蒸汽联合循环底循环系统参数匹配及分析[D].大连：大连理工大学，2015.

LI Yang. Parameter matching and analysis of a gas-steam combined cycle bottom cycle system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.

[18]郑炯智，张国强，许彦平，等. 顶底循环参数对燃气–蒸汽联合循环全工况性能影响分析[J]. 中国电机工程学报，2016，36(23)：6418-6431.

ZHENG Jiongzhi, ZHANG Guo-qiang, XU Yan-ping, et al. Analysis of topping and bottoming cycle parameters on the performance of the combined cycle at design/off-design condition [J]. Journal of Chinese Electric Machinery Engineering, 2016, 36(23)：6418-6431.

[19]焦树建. 燃气—蒸汽联合循环的理论基础[M]. 北京：清华大学出版社，2003.

JIAO Shujian. Fundamentals of gas-steam combined cycles in theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[20]俞彩孟，汪忠德，施静波. F级燃气—蒸汽联合循环机组降低厂用电率措施[J].华东电力，2014，42(4)：783-786.

YU Caimeng, WANG Zhongde, SHI Jing-bo. Measures of reducing auxiliary power ratio by F gas-steam combined cycle units [J]. East China Electric Power, 2014, 42(4): 783-786.