

带有水回收的新型燃氢燃机循环性能分析

王永帅 张会生 陈金伟

(上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室 , 上海 200240)

摘 要: 为了改进现有的燃氢燃机循环性能, 提出一种利用冷凝器对燃机尾气降温水进行回收的新型燃机循环。利用 IPSEpro 软件, 分别模拟了水回收系统对以氢为燃料的简单循环、联合循环和注蒸汽循环系统的影响, 以及水回收系统效果, 并对比分析了水回收在 3 种循环中的适用性。结果表明: 在简单循环中, 水回收可以增加系统输出功率, 提高系统效率; 在联合循环中, 水回收会降低系统输出功率和效率; 在主蒸汽循环中, 虽然水回收会部分降低系统输出功率, 但是却解决了注蒸汽循环耗水量过大的问题, 实现循环水的自给自足。

关 键 词: 燃氢燃机; 水回收; 冷凝; 循环效率; 水回收量

中图分类号: TK479⁺. 22 文献标识码: A

DOI: 10. 16146/j. cnki. rmdlgc. 2016. 02. 007

引 言

随着地球上石油资源和可利用水资源的减少以及环境污染的加重, 氢气作为一种热值高, 无污染, 来源范围广泛的新型能源, 成为从根本上解决全球环境和能源及水资源问题的一种优先选择。

目前使用氢气作为燃料的燃氢燃气轮机循环在理论上已经得到了广泛的研究, 各种新型的燃氢循环不断被提出。KATO 和 NOMURA 利用涡轮增压机改装的燃机进行了燃氢特性的实验研究^[1]。俞頔秦提出了利用金属氢化物进行氢气的储运, 并指出了预冷燃氢燃气轮机的优越性^[2]。罗马大学的能源科学技术学院提出了利用氢气/空气的先进混合循环(AMC), 并研究对比分析了使用煤、天然气等原料制取氢气对整个系统的影响^[3-6]。Charles Forsberg 提出了核能氢气的联合循环, 以满足电网的基本负荷和调峰的要求^[7]。华北电力学院的郭晓丹等人对简单燃氢循环进行改进以提高系统效率, 并对系统进行了能量和焓的分析^[8]。希腊的 Francisco 和 Antonio 提出了以氢为燃料的微型燃机的热电联产技术, 并对系统进行了热力学分析^[9]。

根据文献发现, 前人提出新型燃氢循环的主要目的在于增大系统输出功率或提高循环效率, 很少有文章侧重于尾气中水蒸气的回收。而燃氢循环的尾气中一般都含有大量的水蒸气, 直接排空会造成大量水资源的浪费。

因此, 本研究提出了带有水回收的新型燃氢燃机循环。以冷凝器作为水回收设备, 分别分析了冷凝器对带有水回收的燃氢简单循环、燃氢联合循环和燃氢注蒸汽循环的循环性能影响和水回收效果。同时对比分析了水回收在 3 种循环的适用性。

1 新型的燃氢燃机循环

根据现有燃氢循环, 通过增加水回收设备改进成新型的燃氢循环, 分别为带水回收的燃氢简单循环、带水回收的燃氢联合循环和带水回收的燃氢注蒸汽循环。注蒸汽循环比联合循环仅多了注蒸汽过程, 因此仅给出了简单循环和注蒸汽循环流程如图 1、2。

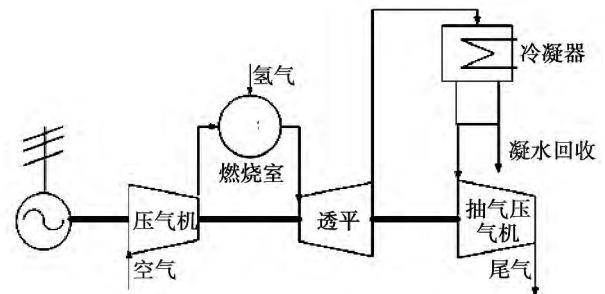


图 1 带有水回收的简单循环

Fig. 1 Simple cycle with water recovery

由于简单循环和联合循环基本过程都包括在注蒸汽的循环中, 因此以注蒸汽循环为例介绍整个循环过程。

收稿日期: 2015 - 03 - 27; 修订日期: 2015 - 05 - 21

作者简介: 王永帅(1988 -), 男, 山东枣庄人, 上海交通大学硕士研究生。

压缩空气、水蒸汽和氢气在燃烧室混合燃烧，产生的高温混合气体首先在透平中做功发电。尾气进入双压余热锅炉产生蒸汽，最后尾气排入冷凝器。通过冷凝回收尾气中富含的水蒸汽，残余的低压气体通过抽气压机抽出。双压锅炉产生的高压蒸汽进入高压缸做功，同时抽取一部分蒸汽注入燃烧室，在降低燃烧室温度的同时增加燃气流量，余下的蒸汽与低压蒸汽混合后进入低压缸做功，排气进入冷凝器，以实现朗肯循环。然而由于部分蒸汽被注入燃烧室，因此冷凝器后要补入等量的水。其仿真系统如图3所示。

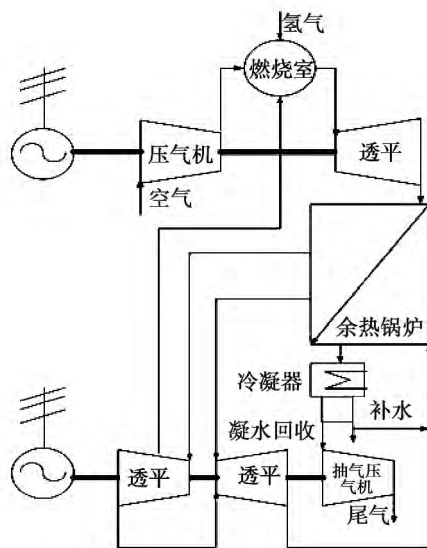


图2 带有水回收的注蒸汽燃气蒸汽联合循环
Fig.2 Steam-injected combined cycle with water recovery

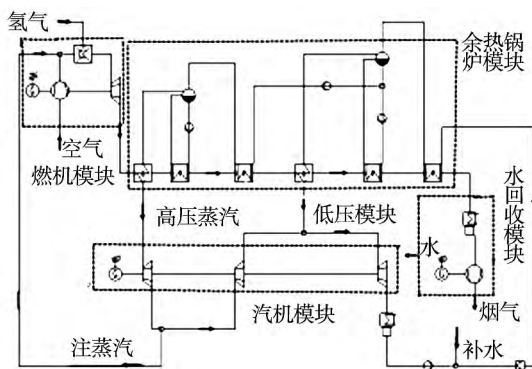


图3 注蒸汽循环的仿真系统图
Fig.3 Simulation system diagram of steam-injected cycle

虽然简单循环和联合循环过程基本都包括在注蒸汽的循环中，但是水回收设备的引入对循环的影响应该大不相同。

在未加水回收设备的情况下，简单循环的排气温度较联合循环和注蒸汽循环要高很多，可利用焓值还很高，增加水回收设备在回收水蒸汽的同时可以增加循环出功。对于联合循环和注蒸汽循环而言，其可利用焓值已经很小，水回收设备的增加可能不会增加系统出功，甚至由于抽气压机的存在有可能导致循环出功的下降。相比于联合循环，注蒸汽循环由于循环工质的增加会使循环出功更多，但注蒸汽循环的效率由于注蒸汽过程的存在要比联合循环低，同时注蒸汽循环回收的水量更多。

2 仿真计算的假定条件

该仿真计算中压气机和涡轮参数是基于某F级重型燃机机组设定的。燃烧室出口温度为1250℃，是根据其它燃氢循环文献[6]及为控制NO_x生成设定的。此外做以下假定：

- (1) 所有换热器特性都是固定不变的(换热面积、换热系数和压降)；
- (2) 燃烧室内氢气完全燃烧，忽略燃烧室压降；
- (3) 燃气中含水量不会对涡轮造成任何影响；
- (4) 忽略燃机和汽机的汽封及抽气冷却。

各部件参数设定如下表：

表1 各部件参数设定值

Tab.1 Set points for parameters of each part

参数	数值
空气入口流量/kg·s ⁻¹	631.9
空气入口温度/℃	25
空气入口压力/MPa	0.1013
氢气入口流量/kg·s ⁻¹	5.609
氢气入口温度/℃	25
氢气入口压力/MPa	3.1
换热器压降/MPa	0.0005
高压蒸汽压力/MPa	8.5
低压蒸汽压力/MPa	0.8
注蒸汽量/kg·s ⁻¹	40

以上假定条件及设定参数对于3种循环的仿真计算均适用(氢气入口流量适用于简单循环和联合

循环,为保证燃烧室出口温度一致,注蒸汽循环的入口氢气多加 0.905 kg)。

3 冷凝器对循环性能和水回收的影响

3.1 冷凝器对带水回收的燃氢简单循环性能的影响

3.1.1 冷凝参数对效率和循环功的影响

由图 4 分析可以得出,同一冷凝温度下,随着冷凝压力的升高,冷凝气体达到饱和的含湿量下降,冷凝气体的流量减小,而且抽气压力机的压比减小,导致系统耗功减小,同时冷凝压力的升高会导致燃机排气压力的升高(低于大气压),燃机出功减小。由于涡轮和压气机等熵效率的存在,使系统效率随冷凝压力升高的变化表现为:先升高,后下降,存在效率最高点 46.7%。

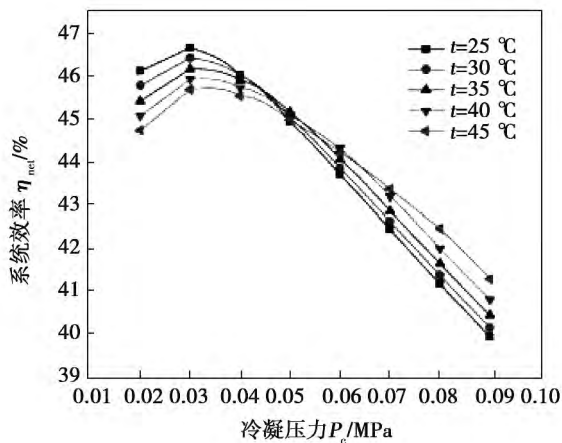


图 4 简单循环中系统效率随冷凝压力和冷凝温度的变化

Fig. 4 Variations of system efficiency with condensation pressure and temperature in simple cycle

在同一冷凝压力下,随冷凝温度的升高,冷凝气体达到饱和的含湿量会升高,冷凝气体的流量会增大,抽气压力机耗功增加,同时冷凝温度的升高会导致燃机排气压力的下降,燃机出功增加。由于涡轮和压气机等熵效率的存在,使系统效率随冷凝温度升高的变化表现为:低于某临界冷凝压力时,系统效率下降,高于该压力时,系统效率上升。

由图 5 可以看出,燃氢简单循环中加入水回收系统可以增加系统输出功率,这是由于燃机排气温

度比较高,可利用焓值较大,通过降低燃机排气压力,可增大涡轮输出功率,从而增加系统输出功率。

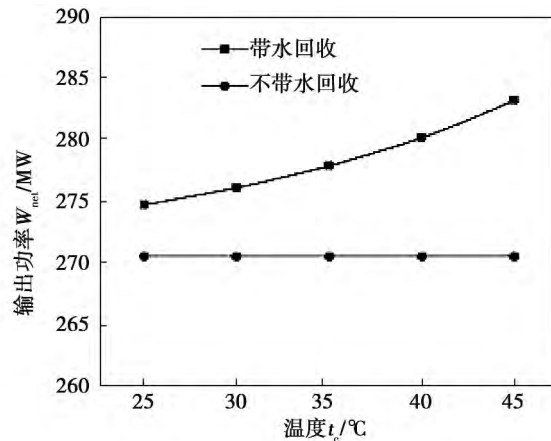


图 5 带有水回收(冷凝压力为 0.08 MPa)和不带有水回收(燃机出口压力为 0.101 3 MPa)的简单循环输出功率对比

Fig. 5 Comparison between simple cycles with ($P_c = 0.08$ MPa) and without ($P_a = 0.1013$ MPa) water recovery

3.1.2 冷凝参数对水回收量的影响

由图 6 分析可以得出,同一冷凝温度下,随着冷凝压力的升高,冷凝气体达到饱和的含湿量下降,冷凝得到的水量呈现增加的趋势,当冷凝温度比较高而冷凝压力较低时,不会出现凝水现象,无法实现水回收。

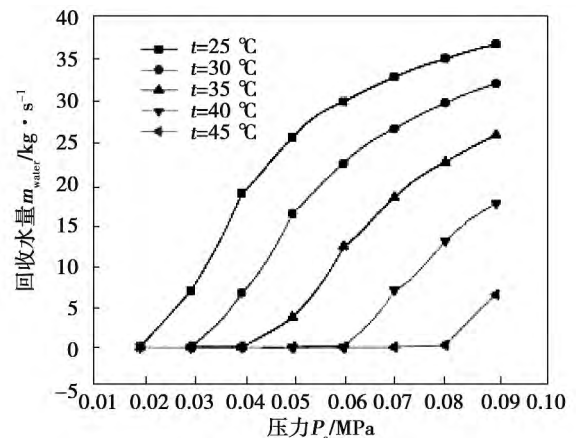


图 6 简单循环中回收水量随冷凝压力和冷凝温度的变化

Fig. 6 Variations of recovered water flow rate with condensation pressure and temperature in simple cycle

在同一冷凝压力下,随冷凝温度的升高,凝气体达到饱和的含湿量会升高,冷凝得到的水量呈现减小的趋势,当冷凝温度很高时不会出现凝水现象,无法实现水回收。

当冷凝压力为 0.09 MPa,冷凝温度为 25 °C 时,即冷凝压力最高,冷凝温度最低时,回收水量为 36.77 kg/s,达到尾气中含水量的 70% 以上。

3.2 冷凝器对带水回收的燃氢联合循环性能的影响

3.2.1 冷凝参数对效率和循环功的影响

由图 7 分析可以得出,在联合循环中系统效率随冷凝参数的变化规律与简单循环中的基本一致,只是系统效率的最高点移动到压力更高一些的区域。同时由于余热锅炉和汽机系统的加入,导致了系统效率的整体升高,最高效率也达到 57.6%。

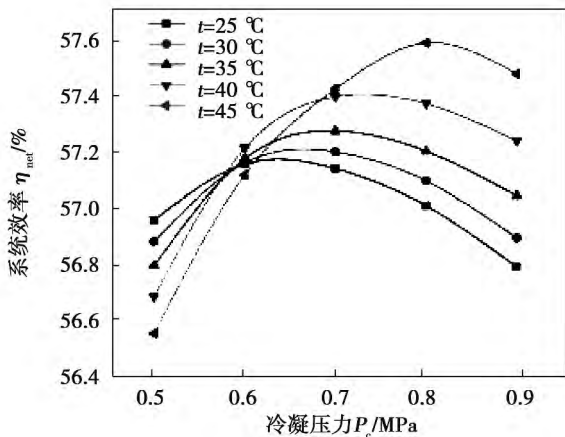


图 7 联合循环中系统效率随冷凝压力和冷凝温度的变化

Fig. 7 Variations of system efficiency with condensation pressure and temperature in combined cycle

由图 8 对比图 5 可以看出,水回收系统的加入导致联合循环系统出功的下降,这是由于在联合循环中,燃机排气的焓已被蒸汽循环充分利用,燃机和汽机的整体出功基本不变,而抽气压缩机却在不断的耗功,导致系统出功低于不带水回收的联合循环。

和简单循环相比,联合循环的系统功率和效率都要高很多,但是水回收系统的加入对联合循环系统性能的作用是消极的。

3.2.2 冷凝参数对水回收量的影响

由图 9 可以看出在联合循环中,水回收量随冷

凝参数的变化规律与简单循环中一致,最大水回收量也为 36.77 kg/s。

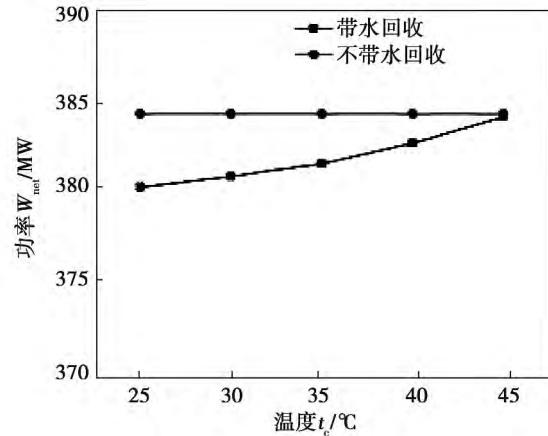


图 8 带有水回收(冷凝压力为 0.08 MPa)和不带有水回收(燃机出口压力为 0.104 3 MPa)的燃氢联合循环出功对比

Fig. 8 Comparison between combined cycles with ($P_c = 0.08$ MPa) and without ($P_4 = 0.1043$ MPa) water recovery

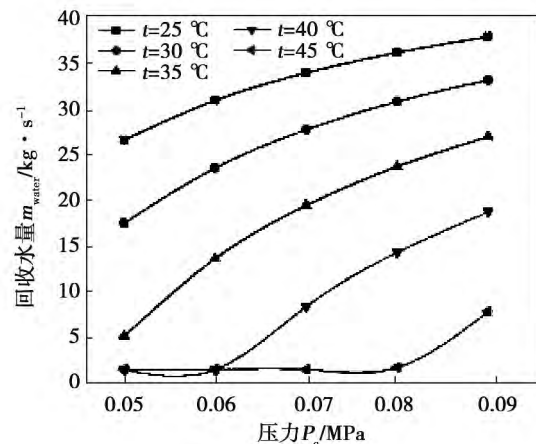


图 9 联合循环中回收水量随冷凝压力和冷凝温度的变化

Fig. 9 Variations of recovered water flow rate with condensation pressure and temperature in combined cycle

3.3 冷凝器对带水回收的燃氢注蒸汽循环性能的影响

3.3.1 冷凝参数对效率和循环功的影响

由图 10 分析可得出,在注蒸汽循环中系统效率随冷凝参数的变化规律与简单循环中的基本一致,

只是最高效率点和曲线变化幅度发生了改变。这是由于注蒸汽导致燃机排气中水蒸汽的含量增大, 冷凝参数对系统的影响也变大。同时由于注蒸汽的存在导致系统效率最大值比联合循环中下降约 2.5%, 最大效率为 55.2%。

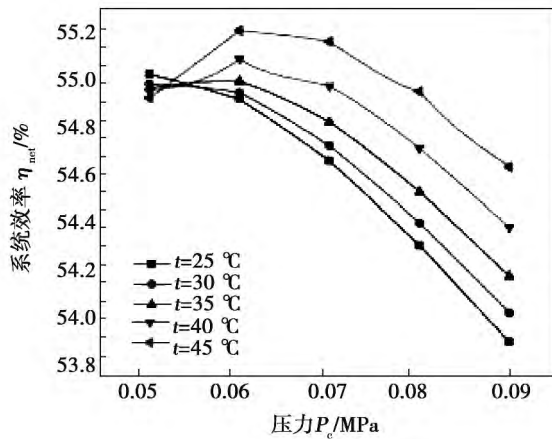


图 10 注蒸汽循环中系统效率随冷凝温度和冷凝压力的变化

Fig. 10 Variations of system efficiency with condensation pressure and temperature in steam-injected cycle

由图 11 对比图 8 可以看出, 水回收系统的加入导致注蒸汽循环系统出功的下降。这是由于在注蒸汽循环中, 燃机排气的焓已被蒸汽循环充分利用, 燃机和汽机的整体出功基本不变, 而抽气压缩机却在不断的耗功, 导致系统出功一直低于不带水回收系统的注蒸汽循环。

和联合循环相比, 注蒸汽循环系统功率更大, 但效率稍低。水回收系统的加入对二者的影响是一样的, 都会导致系统出功的减少, 系统效率的下降。

3.3.2 冷凝参数对水回收量的影响

由图 12 可以看出, 在注蒸汽循环中, 水回收量随冷凝参数的变化规律与简单循环中基本一致, 但是由于注蒸汽导致燃机排气中水蒸汽的含量增加, 回收水量同样增加。当冷凝压力为 0.08 MPa, 冷凝温度为 30 °C 时, 即冷凝压力最高冷凝温度最低时, 回收水量为 84.93 kg/s, 达到尾气中含水量的 85% 以上。但是循环中需要补入 40 kg/s 的循环水, 因此要实现循环水的自足要求回收水量大于 40 kg/s。

和联合循环相比, 水回收系统可以消除注蒸汽耗水量大的缺点, 实现循环水的自足。

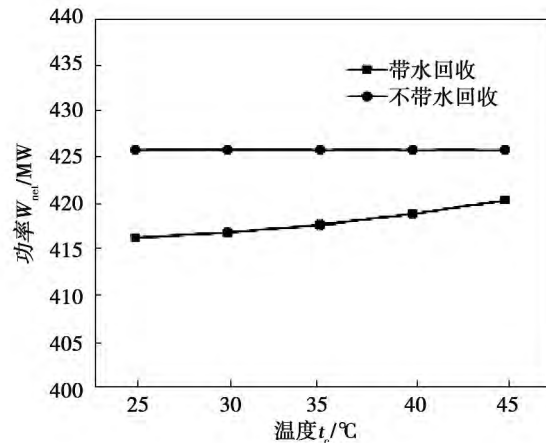


图 11 带有水回收(冷凝压力为 0.08 MPa)和不带有水回收(燃机出口压力为 0.104 3 MPa)的注蒸汽循环出功对比

Fig. 11 Comparison between steam-injected cycles with ($P_c=0.08\text{ MPa}$) and without ($P_4=0.1043\text{ MPa}$) water recovery

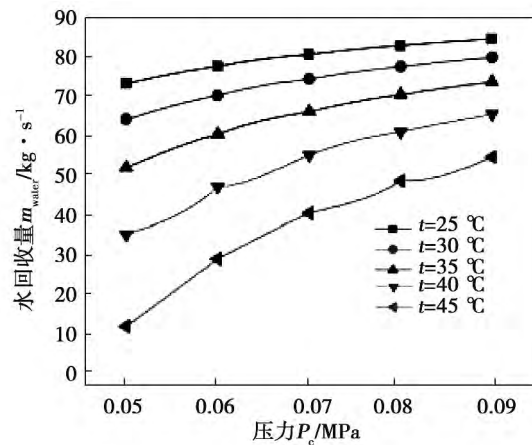


图 12 注蒸汽循环中回收水量随冷凝压力和冷凝温度的变化

Fig. 12 Variations of recovered water flow rate with condensation pressure and temperature in steam-injected cycle

4 结 论

(1) 在简单循环中, 水回收系统在实现燃机排气中水蒸汽回收的同时, 可以增加系统出功, 提高系统效率。

(2) 在联合循环中, 水回收虽然实现了燃机排

气中水蒸汽的回收,但是减少了系统出功,降低了系统效率,对循环的经济效益产生不利影响。

(3) 在注蒸汽循环中,水回收系统虽然在一定程度上降低了系统出功,但是水回收的实现解决了注蒸汽循环耗水量过大的问题,使注蒸汽技术在燃氢燃机循环中的应用成为可能。

参考文献:

[1] S. KATO ,N. NOMURA. Hydrogen gas-turbine characteristics and hydrogen energy system scheme [J]. Energy Convers , Mgmt Vol (38) : 1319 - 1326.

[2] 俞颐秦. 燃氢燃气轮机热力学特性分析[J]. 河北工程大学学报, 1986(1) : 7 - 17.
YU Yi-qin. Analysis of hydrogen gas-turbine thermal characteristics [J]. Journal of Hebei engineering academy ,1986(1) : 7 - 17

[3] Gambini M. ,Guizzi G. L. ,Vellini M. . Advanced H2/Air cycles based on coal gasification [J]. Proceeding of AMSE Turbo Expo 2004 Power for land ,sea ,and air ,June 14 - 17 2004.

[4] Gambini M. ,Vellini M. . Comparative analysis of advanced H2/Air cycle power plants based on different hydrogen production systems from fossil fuels [J]. Proceeding of AMSE Power 2004 ,March 30

- April 1 2004.

[5] Gambini M. ,Vellini M. . Overall performance of advanced H2/Air cycle power plants based on coal decarbonisation [J]. Proceeding of PWE 2005 ASME Power ,April 5 - 7 2005.

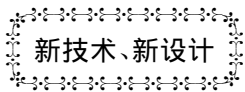
[6] Gambini M. ,Vellini M. . Performance optimization of advanced H2/Air cycle power plants based on natural gas partial oxidation [J]. Proceeding of GT 2006 AMSE Turbo Expo 2006: Power for land ,sea ,and air ,May 8 - 11 2006.

[7] Charles Forsberg. An air-brayton nuclear-hydrogen combined-cycle peak and base-load electric plant [J]. Proceeding of IMECE 2007 ASME international mechanical engineering congress and exposition ,November 9 - 11 2007.

[8] Guo Xiaodan ,Xu Hong ,Jing Rulin. Energy and exergy analysis of hydrogen-fueled combined cycle [J]. International conference on energy and environment technology 2009.

[9] Fransico Toja-Silva ,Antonio Rovira. A first and second thermodynamics law analysis of a hydrogen-fueled microgas turbine for combined heat and power generation [J]. Journal of engineering for gas turbine and power ,February 2014 ,Vol. 136.

(姜雪梅 编辑)



SGT800 工业燃气轮机的升级改进

据《Gas Turbine World》2015 年 5 - 6 月刊报道 ,Siemens 已宣布了它的 SGT800 工业燃气轮机的升级改进方案。

燃气轮机升级改进方案是基于发动机实物尺寸的验证实验和大范围的实际运行以及来自现场 50.5 MW 装置运行信息的反馈而作的。

通过优化和重新分配压气机的前面几级(这既增加了效率也增加了质量流量)、优化涡轮静叶的冷却设计并调整涡轮第 1 级和第 2 级的间隙,达到了新的 53 MW 额定输出功率。

已要求对 4 个静止部件的机加工作少量的变化,以便改进涡轮部分的性能。铸件或材料未作任何变化并且燃烧室出口温度保持与现有燃机相同。所有改进的部件都完全是通过现有的 50.5 MW 系列翻新改进而得到的。

在简单循环应用中,升级改进的 SGT800 的输出功率为 53 MW,电效率为 39%。在 2 × 1 联合循环配置中,输出功率为 150 MW,净效率超过 56%。

(吉桂明 摘译)

基于运行数据的 IGCC 电站燃气轮机性能分析 = **Analysis of IGCC Gas Turbine Performance Based on Field Data** [刊, 汉] TANG Ting, ZHU Min (Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), ZHANG Xu, WANG Er-xing (Huaneng (Tianjin) Coal Gasification Co., Ltd. post Code: 300452) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(2). - 172 - 178

Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) is a complex thermal system and its operating condition is affected by various parameters. Based on field data, a mathematical model has been established to analyze the impacts of the ambient temperature, the syngas LHV and the turbine outlet temperature on the performance of gas turbine. The results show that when ambient temperature decreases from 35 °C to -15 °C, the thermal efficiency increases rapidly, the turbine inlet temperature increases, the first stator blade temperature decreases, and the turbine cooling is enhanced. The compressor IGV opening and pressure ratio, however, is sensitive to the ambient temperature change. When syngas LHV decreases from 8.31 MJ/kg to 7.05 MJ/kg, the unit thermal efficiency, the turbine inlet temperature and blade temperature remain stable. Additionally, to avoid surge, the pressure ratio can be maintained stably with large syngas LHV variation by using a relatively small IGV opening. As turbine outlet temperature increases, the turbine inlet temperature increases rapidly, the first stator blade temperature increases, and the turbine cooling declines. But too low turbine outlet temperature can also result in deterioration of engine thermal efficiency. When the variation of turbine outlet temperature is large, IGV opening can guarantee the changes in compressor pressure ratio and the air mass flow. **Key words:** IGCC, gas turbine, syngas LHV, ambient temperature, turbine outlet temperature

带有水回收的新型燃氢燃机循环性能分析 = **Performance Analysis of a Novel Hydrogen-fueled Gas-Turbine Cycle with Water Recovery** [刊, 汉] WANG Yong-shuai, ZHANG Hui-sheng, CHEN Jin-wei (Shanghai Jiao Tong University, Key laboratory for power machinery and engineering of ministry of education, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31(2). - 179 - 184

In order to improve the performance of existing hydrogen-fueled gas-turbine cycles, a novel gas-turbine cycle is put forward with adding a condenser to recover water by cooling exhaust gas. With the help of IPSEpro, the corresponding effects in performance of simple cycle, combined cycle and steam-injected cycle fueled with hydrogen were in-

investigated and the effectiveness of water recovery and feasibilities of water recovery in these three different cycles were analyzed. Results shows that water recovery can improve the engine output power and system efficiency in simple cycle ,while it deteriorates them in combined cycle. For steam-injected cycle ,however ,it effectively addresses the problem pertaining large amount of water consumption with slightly reduced engine output ,and self-sufficiency of recycling water is accomplished. **Key words:** gas-turbine ,water recovery ,condensation ,efficient of the cycle ,recovered water flow

小翼安装角对分离涡旋特性的影响研究 = **Study on the Effect of Winglet Installation Angle in Vortex Characteristics of Separation Vortex** [刊 汉]HU Hao ,LI Xin-kai ,WANG Xiao-dong ,KANG Shun (North China Electric Power University ,Key Laboratory of CMCPE Ministry of Education ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2) . -185 -192

In order to study the effect of installation angle (β) of delta winglet in the separation vortex characteristics on the leading edge a delta wing aircraft with corresponding experimental data was first used to verify the numerical methods employed in this paper. Then five typical winglet installation angles $\beta = 10^\circ$ to 30° with an increment of 50° were selected to study the effect of installation angle by analyzing vortex flow on the wing surface streamline topology in the cross section ,the vortex intensity in the winglet downstream and radial motion trajectory. Results shows that in downstream of $X/H < 20$ (X-flow displacement and H-winglet height) ,vortex intensity increases with the installation angle. When $X/H = 20 \sim 80$ $\beta = 250^\circ$ has maximum vortex intensity. When $X/H > 80$ $\beta = 20^\circ$ has maximum vortex intensity. **Key words:** winglet ,installation angle ,separation vortex ,vortex characteristics

低比转速离心泵叶片加厚非定常特性分析 = **Unsteady Characteristic Analysis of Thickened Centrifugal Pump Blade with Ultra-low Specific-speed** [刊 汉]JIN Yong-xin ,SONG Wen-wu ,FU Jie ,XU Yao-gang (School of Energy and Power Engineering ,Xihua University ,Chengdu ,China ,Post Code: 610039) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(2) . -193 -198

In this paper a centrifugal pump of specific speed $ns = 58$ was used to investigate the blade outlet actual thickness effects on the performance and unsteady characteristics by changing impeller blade outlet actual thickness and using CFD technique. The simulation results show: Increasing blade outlet actual thickness will increase the head of cen-