

小型燃气轮机热电联供系统性能计算和分析

武建强, 刘宝兴, 关 欣

(上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 基于热力学第一、第二定律和化学燃烧理想配比, 提出小型燃气轮机热电联供系统性能参数的计算和分析方法, 围绕装置循环效率、燃料利用效率和第二定律效率, 对压气机压比、透平进口温度、工艺物流压力和窄点温差等重要参数对性能的影响等方面进行计算分析。用 200 kW 燃气轮机系统进行案例分析, 提出了小型 CHP 系统合理设计的实用可行方法和参考数据。

关 键 词: 小型燃气轮机; 热电联供; 性能计算; 理想配比

中图分类号: TM611; O642 文献标识码: A

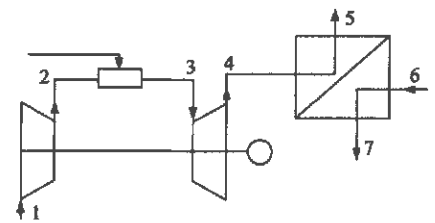
1 引 言

在日益密切地关注热电联供系统的今天, 研究小型燃气轮机热电联供系统的性能参数的计算和分析方法显得格外重要。对于商业大楼, 采用热电联供装置作为能源是最标准的设计方法, 特别是对于那些重要场所, 诸如国际机场、旅馆、政府办公大楼、通信局、大型超市等等。这种小型装置能就地生产电和热而没有能量传递损失。在电力生产过程中产生的废热被用来生产工艺热能, 用于空间采暖和吸收式制冷, 提供蒸汽和热水远比常规发电方法有效。对于环境保护, 采用没有 NO_x 和 SO_x 的 CHP 系统也是降低燃烧矿物燃料排放 CO_2 的主要途径。为了改进联供系统的性能, 研究性能参数的计算和分析方法是很重要的, Rice、Huang、Rosen 等人已做了许多工作。Rice 开发了表明有关参数相互关系的图解法^[1]。Huang 提出了基于热力学第一和第二定律的性能计算方法^[2]。Rosen 考虑了热、电和区域制冷的联合系统并分析了整个系统的效率^[3]。本文的目的是提出基于热力学第一、第二定律和化学燃烧理想配比法的性能计算分析方法, 直接针对小型燃气轮机热电联供系统的装置循环效率、燃料利用效率和第二定律效率, 重点关注压气机压比、透平进口温度、工艺物流压力和窄点温差等重要参数对性能参数的影响, 进行了 200 kW 燃气轮机系统案例分析并提供了小型 CHP 系统合理设计的实用可行方法和

参考数据。

2 系统和参数

燃气轮机热电联供系统示于图 1。空气在压气机中被压缩后进入燃烧室与送入的燃料构成燃气以驱动



1-压气机进口; 2-压气机出口; 3-燃气轮机进口; 4-燃气轮机出口; 5-余热锅炉排气出口; 6-余热锅炉回水进口; 7-余热锅炉蒸汽出口;

图 1 系统示意图

一组透平和发电机。电被用于冷冻机、电器设备、照明和 HVAC 系统。热排气在余热锅炉中加热来自用户的回水以生

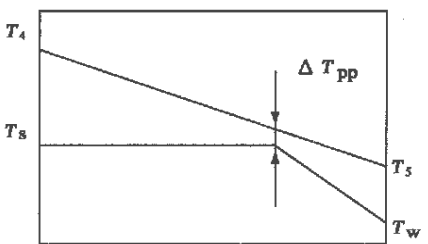


图 2 余热锅炉中的温度分布

产饱和蒸汽。蒸汽用于吸收式制冷、空间采暖和热水供应。就能量平衡来说, 燃料能量消耗在电力输出和工艺热能, 而余下部分损失掉。工艺热能的数量和质量取决于排气温度 T_4 和产生蒸汽的饱和压力 P_s , 对于相同的窄点温差 ΔT_{pp} 和饱和压力 P_s , 如果排气温度较高, 如图 2, 那么工艺蒸汽量 m_w 就较多。所以, 我们能预计这两项参数对电热比 R_{ph} 、燃料利用效率 η_1 、和第二定律效率 η_2 有十分重要的影响。

压气机和燃气轮机的比功 w_c 和 w_t 的方程式分别为

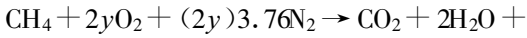
收稿日期: 2002-06-25; 修订日期: 2002-10-08
作者简介: 武建强(1976-), 男, 山西临县人, 上海理工大学硕士研究生。

$$w_c = C_{p,a} T_1 [r \exp((k-1)/k) - 1] / \eta_{pc}$$

$$w_t = C_{p,g} T_3 [1 - (1/r) \exp((k-1)/k)] \eta_{pt}$$

其中: $r = p_2/p_1$ 是压气机的压比。 η_{pc} 和 η_{pt} 分别是压气机和透平的多变效率。 $C_{p,a}$ 和 $C_{p,g}$ 分别是空气和燃气的定压比热。

燃料甲烷(CH₄)的燃烧反应方程式是



其中: y 是在燃气轮机进出口温度已确定下的实际空气流量和理论空气流量的比值,它由燃烧反应能量平衡来确定,即,反应物的焓必须等于生成物的焓^[4]。

装置比功输出为 $w_e = (1+f)w_t - w_c$

其中: f 是燃料质量流量 $q_{m,f}$ 和实际空气流量 $q_{m,a}$ 的比值。

燃料释放的热量为 $Q_f = q_{m,f} LHV$

其中: $q_{m,f}$ 可由 $q_{m,a}$ 来确定,而 LHV 是燃料的低热值。

工艺热量为 $Q_p = q_{m,w} (h'' - h_w)$

其中: $q_{m,w}$ 是水流量或蒸汽流量,它可由余热锅炉的蒸发段的能量平衡来确定, h'' 是饱和蒸汽焓, h_w 是回水焓。

燃料利用效率 η_l (即第一定律效率) 为

$$\eta_l = (W_e + Q_p) / Q_f$$

装置热效率是 $\eta_c = W_e / Q_f$

电量和工艺水热量之比 R_{ph} 表达为

$$R_{ph} = W_e / Q_p$$

工艺水热量的可用能 A_p 为

$$A_p = q_{m,w} [(h'' - h_w) - T_0(S'' - S_w)]$$

电力输出和工艺水热量的可用能之比 R_{pa} 为

$$R_{pa} = W_e / A_p$$

第二定律效率 η_2 被定义并表达为

$$\eta_2 = (W_e + A_p) / A_f = \eta_c (1 + 1/R_{pa})$$

其中: 假定燃料可用能 A_f 近似等于 $q_{m,f} LHV$ 。

3 计算结果

计算过程如下:

(1) 计算压气机出口温度 T_2 和比功 w_c 。

(2) 固定透平进口燃气温度 T_3 , 并求出燃气出口温度 T_4 。

(3) 计算实际空气流量与理论空气流量之比 y 。

(4) 计算燃气混合物的比热、多变指数和透平

比功 w_t 。

(5) 计算燃料空气比 f 和装置比功 w_e 。

(6) 计算空气流量 $q_{m,a}$ 、燃料流量 $q_{m,f}$ 、燃料热量 Q_f , 并检验 T_3 。

(7) 选择工艺蒸汽的饱和压力 P_s 和回水温度 T_w 。

(8) 选择窄点温差 ΔT_{pp} , 并求出水流量 $q_{m,w}$ 。

(9) 计算余热锅炉的排烟温度 T_5 。

(10) 计算工艺热量 Q_p , 以及输出电量与工艺热量之比 R_{ph} 。

(11) 计算装置热效率 η_c 和热量利用效率 η_l 。

(12) 计算工艺水热量的可用能 A_p 以及输出电量与工艺水热量的可用能之比 R_{pa} 。

(13) 计算第二定律效率 η_2 。

现在选择一个系统运行状态作为计算案例,以 200 kW 的小燃气轮机作为系统的主要部件。空气的状态参数是 $p_1 = 101$ kPa 和 $T_1 = 288$ K。压气机压比 $r = 4$ 。压气机和透平的多变效率分别是 $\eta_{pc} = 0.85$ 和 $\eta_{pt} = 0.87$ 。透平出口温度是 $T_4 = 941$ K。饱和蒸汽压力是 $P_s = 0.198$ MPa, 温度是 $T_s = 120$ °C。回水温度是 $T_w = 50$ °C。窄点温差是 $\Delta T_{pp} = 50$ °C。

按照计算步骤并用上述已知数据可得结果如下: 压气机出口温度 $T_2 = 427$ K, 压气机比耗功 $w_c = 174.13$ kJ/kg (air), 燃气轮机进口温度 $T_3 = 1306.4$ K, 过量空气系数 $y = 2.731$, 多变指数 $n = 1.311$, 燃气轮机输出比功 $w_t = 393.33$ kJ/kg (gas), 燃料空气比 $f = 0.02139$, 装置比功输出 $w_e = 227.61$ kJ/kg (air), 空气流量 $q_{m,a} = 0.8787$ kg/s, 燃料流量 $q_{m,f} = 0.01879$ kg/s, 甲烷 CH₄ 的低热值 $LHV = 50010$ kJ/kg (fuel), 燃料输入热量 $Q_f = 939.69$ kW, 余热锅炉水流量 $q_{m,w} = 0.23$ kg/s, 余热锅炉排烟温度 $T_5 = 371.85$ K, 余热锅炉水的总吸热量 $Q_p = 573.97$ kW, 第一定律效率 $\eta_l = 82.36\%$, 装置效率 $\eta_c = 21.28\%$, 电热比 $R_{ph} = 0.348$, 锅炉工艺水热量可用能 $A_p = 148.31$ kW, 发电功率与锅炉工艺水热量可用能之比 $R_{pa} = 1.348$, 第二定律效率 $\eta_2 = 37.06\%$ 。

4 分析

现在分析压比 r 、饱和压力 P_s 和窄点温差 ΔT_{pp} , 对装置热效率 η_c 、燃料利用效率 η_l 第二定律效率 η_2 以及电量和工艺水热量之比 R_{ph} 的影响。

(1) 图 3 表示 r 对 η_c 、 η_l 、 η_2 和 R_{ph} 的影响。燃料利用效率 η_l 随压比 r 的增加而减小。当压比近似等于 15 时, 装置热效率和第二定律效率有一个最大

值。在 $r \approx 18$ 处, R_{ph} 曲线也有一个最大值。三个效率一般变化不大, 但 R_{ph} 曲线随 r 的变化较大。

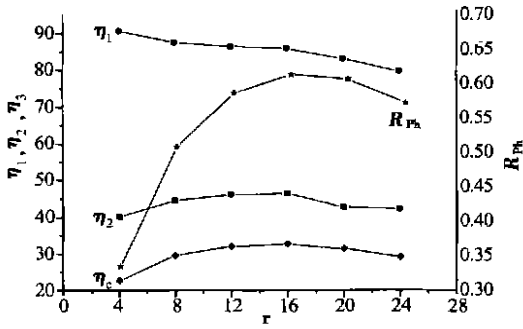


图3 压比 r 对系统性能 η_c 、 η_1 、 η_2 和 R_{ph} 的影响, $P_s = 0.1985 \text{ MPa}$, $\Delta T_{pp} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

(2) 图 4 表示工艺水蒸气压力 P_s 对燃料利用效率 η_1 的影响, 用压比 r 作为参变量。

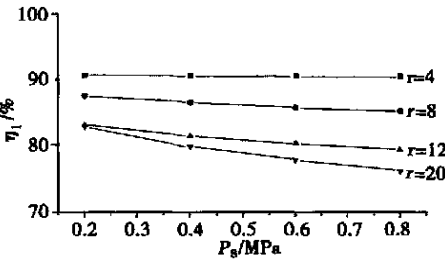


图4 工艺水蒸气压力 P_s 对燃料利用效率 η_1 的影响, $\Delta T_{pp} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

燃料利用效率随工艺水蒸气压力的增加而略微减小。它随压比的减小而增加并且在 P_s 值较大时较明显。 r 值越大, η_1 随 r 的变化越小(即曲线间间距减小)。

(3) 图 5 表示工艺水蒸气压力 P_s 对第二定律效率 η_2 的影响, 用压比 r 作为参变量。第二定律效率随工艺水蒸气压力的增加而略微增加。

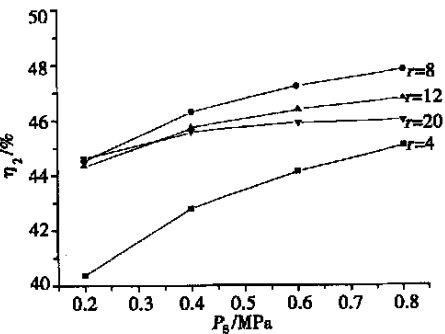


图5 工艺水蒸气压力 P_s 对第二定律效率 η_2 的影响, $\Delta T_{pp} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

在 $r = 8$ 时它显示出最大值。在 r 值大时, η_2 随 r 的变化不明显(即曲线间间距减小)。

(4) 图6表示蒸汽压力 P_s 对 R_{ph} 的影响, 用压比 r 作为参变量。由图可见 R_{ph} 的增加而增加, 特别是

在 r 较大时。 r 值越大, R_{ph} 值也越大。

(5) 图 7 给出窄点温差对系统性能的影响。可以看出 η_1 和 η_2 随 ΔT_{pp} 的增加而减少, 但这个变化不大, 特别是对 η_2 。 R_{ph} 随 ΔT_{pp} 的增加而增加。

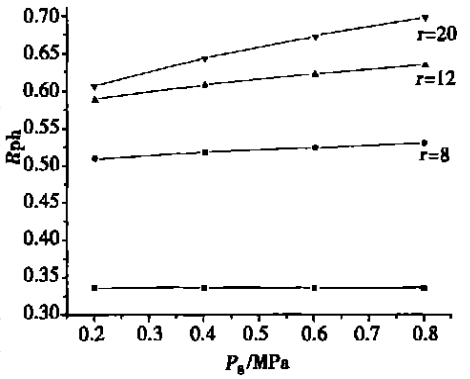


图6 工艺水蒸气压力 P_s 对 R_{ph} 的影响

5 结束语

在热力学第一和第二定律的基础上提出了小型燃气轮机热电联供系统性能计算的详细方法和简明分析, 阐明了压比、窄点温度、装置热效率、燃料利用效率、第二定律效率以及电量和工艺水流量之间的耦合关系及相互影响, 对于小型燃气轮机热电联供装置的选取和优化具有重要参考价值。

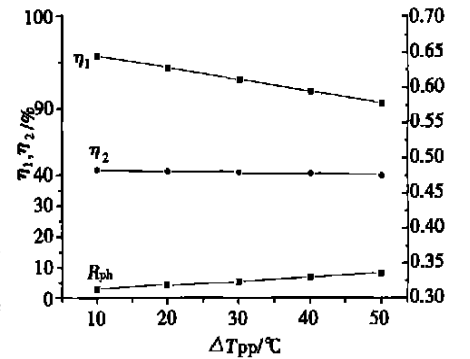


图7 窄点温差 ΔT_{pp} 对 η_1 、 η_2 和 R_{ph} 的影响

参考文献:

- [1] RICE I G. Thermodynamic evaluation of gas turbine cogeneration cycle [J]. ASME J of engineering for gas turbines and power, 1987, 109: 1-7.
- [2] HUANG F F. Performance evaluation of selected combustion gas turbine cogeneration systems based on first and second law analysis [J]. ASME J of engineering for gas turbines and power, 1990, 112: 17-21.
- [3] ROSEN M A. Efficiency measures for processes integrating heat and power and district cooling [J]. AES Thermodynamics and the Design Analysis and Improvement of Energy Systems, 1995, 35: 23-34.
- [4] BEJAN A. Advanced Engineering Thermodynamics [M]. North Carolina: Duke Uni, 1988.

(辉 编辑)

&Power. — 2003, 18 (3) . — 248 ~ 251

Electric propulsion represents a main propulsion mode for future ships. After a brief description of the status quo and future prospects of electric propulsion units the authors have proposed an approach for the research and introduction of integrated all-electric propulsion systems on board naval vessels. In connection with a university-installed test rig for combined diesel and gas turbine power plants a combined power plant is assumed as an electric propulsion prime-mover module and a series of problems are explored and investigated, such as power distribution, single and parallel operation, etc.

Key words: combined power plant, electric propulsion

水蒸气对液体燃料高温分解碳黑形成影响的研究 = **An Investigation of the Influence of Water Vapor Injection on Soot Formation During Liquid Fuel Pyrolysis** [刊, 汉] / HU Sheng-teng, FU Wei-biao (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), XING Gui-ju (Anshan Iron & Steel Institute, Anshan, China, Post Code: 114002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 252 ~ 255

The influence of water vapor injection on soot formation during liquid fuel pyrolysis is investigated. By directly measuring the mass of soot deposited on a solid wall surface it was found that water vapor can suppress the formation of soot particles. Some characteristics concerning the deposition of soot on a solid wall surface were ascertained. Meanwhile, by using software "Fluent" the soot particle concentration field was simulated under two kinds of experimental operating conditions, making it possible to confirm the relevant experimental conclusions. Finally, a calculation formula is given. When suitable parameters to be determined are selected, the results of calculation agree quite well with those of tests. **Key words:** soot, pyrolysis

小型燃气轮机热电联供系统的性能计算和分析 = **Performance Calculation and Analysis of a Small Gas Turbine-based Cogeneration System** [刊, 汉] / WU Jian-qiang, LIU Bao-xing, GUAN Xin (Institute of Power Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 256 ~ 258

On the basis of the first and second law of thermodynamics as well as stoichiometric combustion proposed is a method for calculating and analyzing the performance parameters of a small gas turbine-based cogeneration system. The method under discussion mainly involves such aspects as power plant cycle efficiency, fuel utilization rate and second law efficiency, etc. with emphasis on identifying the impact on plant performance of some major parameters, such as compressor pressure ratio, turbine inlet temperature, steam process pressure and pinch-point temperature difference, etc. A case study was conducted of a 200kW gas turbine, which provided a practical and feasible method as well as reference data for the rational design of small gas turbine-based cogeneration systems. **Key words:** small-sized gas turbine, cogeneration, performance calculation, stoichiometry

气体横扫单管强制对流换热的大涡模拟 = **Large Eddy Simulation of Forced Convection Heat Exchange by Gases Sweeping Across a Single Tube** [刊, 汉] / WEI Ying-jie, HE Zhong-yi (College of Municipal and Environmental Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18 (3) . — 259 ~ 262

By using a method of large eddy simulation combined with a second-order full-developed ETG finite element discrete scheme a numerical simulation was performed of the forced convection heat exchange by gases sweeping across a single tube. The temperature fields in the case of a circular tube and a square tube being swept by gases were calculated separately. As a result, an average heat-exchange factor for tube walls was obtained. Numerical results agree relatively well