

注蒸汽燃气轮机最佳注汽量的研究

(上海交通大学) 胡宗军 吴铭岚

[摘要] 文中首先从部件的热平衡角度出发对注蒸汽燃气轮机 (STIG) 循环进行了热力学分析, 建立了相应的热力过程计算模型, 在压比 $\pi = 8 \sim 48$, 透平进口温度 $TIT = 900 \sim 1300^\circ\text{C}$ 的宽广范围内对 STIG 进行了性能模拟, 对最佳注汽量和性能之间的关联进行了广泛深入的研究。

关键词 燃气轮机 蒸汽回注 最佳注汽量 STIG 技术

中图分类号 TK472.5

1 前言

注蒸汽燃气轮机技术 (STIG) 省略了联合循环中的蒸汽轮机装置, 具有结构简单、投资少、操作灵

活等特点, 正成为中小型燃气轮机研究发展的重点。在国内, 703 所已设计建造了我国第一套自行研制的发电用 STIG 装置, 取得了明显的经济效益^[1]。

如图 1 所示的 STIG 循环技术利用燃气轮机高温排气的余热产生蒸汽, 将其注入燃机重新得到利用, 从而使效率提高, 而蒸汽的产量、喷注量多少对 STIG 性能影响很大。有关最佳注汽量的研究早在 STIG 技术投入商业运行之前就已开始^[2], 随后的许多研究工作对此都有所涉及, 从各个侧面进行了探讨^[3~6]。本文从热平衡角度出发对 STIG 循环的最佳注汽量及其相应的效益进行了较全面的研究。

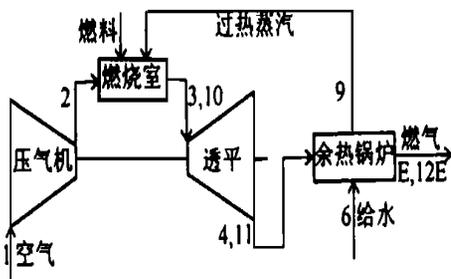


图 1 STIG 热力线图

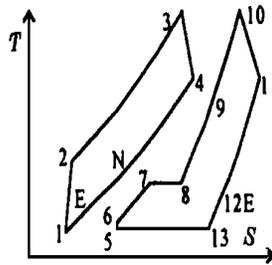


图 2 STIG 温熵示意图

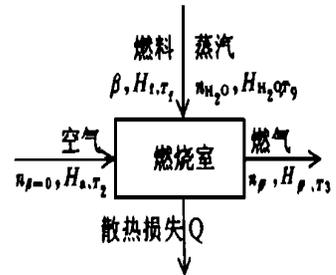
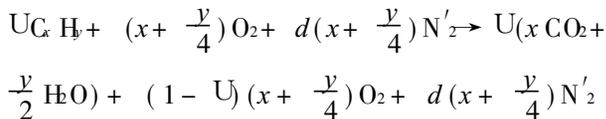


图 3 燃烧室热力学分析

2 主要参数分析及选用

2.1 注蒸汽燃烧室燃料系数的计算

燃料系数为 U 的碳氢燃料 $C_x H_y$ 与空气燃料^[7]:



式中: d 为空气的氮氧比, N'_2 为大气氮 (空气中除氧以外的其它成分)。

定义以下物理量: 理论空气量摩尔数 $n_{L0} = (1$

$+ d)(x + \frac{y}{4})$, 理论燃气量摩尔数: $n_{L1} = n_{L0} +$

$\frac{y}{4}$, 燃料系数为 U 的燃气摩尔数: $n_U = n_{L0} + U \frac{y}{4}$,

蒸汽量的摩尔数: $n_{H_2O} = x' n_{L0} (\frac{1}{a} / \frac{1}{H_2O})$, 其中: $x = m_{H_2O} / m_a$ 为蒸气喷注的汽气比, m_a, m_{H_2O} , 分别为空气和水蒸气的质量流量, $\frac{1}{a}, \frac{1}{H_2O}$ 分别为空气和水蒸气的分子量。

参照图 3, 列出燃烧室的热平衡方程式:

$$U(Z_B Q_L, T' + H_1, T_1 - H_1, T') - Q + n_{L0}(H_a, T_2 - H_a, T') + n_{H_2O}(H_{H_2O}, T_9 - H_{H_2O}, T') = n'(H_U, T_9 - H_U, T')$$

不考虑散热损失, 略去相对较小的燃料焓, 给定进出口温度, 燃烧室的燃料系数为:

$$U = \frac{n_{L_0}(H_{a,T_3} - H_{a,T_2}) + n_{H_2O}(H_{H_2O,T_3} - H_{H_2O,T_9})}{Z_B Q_{L,T'} + n_{L_0}(H_{a,T_3} - H_{a,T'}) - n_{L_1}(H_{L_1,T_3} - H_{L_1,T'})}$$

其中: Z_B 为燃烧效率, $Q_{L,T'}$ 为燃料的低位发热量, T' 为发热值基点温度 (25°C), $H_a, H_{L_1}, H_{L_1}, H_f$ 为空气焓、理论燃气焓、实际燃气焓、燃料焓。下标 a 表示空气, f 表示燃料, H_2O 分别表示水或水蒸气, T_i 表示燃料入口温度, U 表示燃气蒸汽混合物

2.2 余热锅炉对注汽量的影响

注汽量越大, 余热回收越充分, 节点温差 ΔT_P 及出口温度 T_E 就越低 (图 2), 可能低出余热锅炉的工作范围。同时注汽量增大使热端温差 ΔT_H 增大, 可能会使蒸汽过热度过小以至于蒸汽中带有水分, 不能满足注汽要求。在实际工作中 $\Delta T_R, T_E$ 及蒸汽过热度这三种条件限制了注汽量的提高。

本文采用的主要参数如下: 压比 $c = 8 \sim 48$, 透平进口温度 $TIT = 900 \sim 1300^\circ\text{C}$, 压气机效率 0.86, 透平效率 0.88, 燃烧效率 0.98, 燃烧室压损 0.03, 余热锅炉效率 $Z_B = 0.05$; 环境温度、压力分别为 25°C 和 101 kPa; $\Delta T_P = 15^\circ\text{C}$, 热端温差 $\Delta T_H = 50^\circ\text{C}$, 最低出口温度 $T_E = 135^\circ\text{C}$, 燃料为辛烷 (C_8H_{18}), $Q_{L,T'} = 44\,455 \text{ kJ/kg}^{[7]}$ 。

3 计算结果及分析

3.1 STIG循环的典型特点

本文首先分析 $c = 11.6, TIT = 982^\circ\text{C}$ 的燃机注汽量变化时的性能变化。注汽量较小时随着 x 的增大, ΔT_H 保持最小, ΔT_P 降低, T_E 下降, 排气余热利用程度加大, 效率 Z 逐渐上升。在 x 增大至 0.167 时, 效率 Z 达到最高, 余热锅炉的 ΔT_P 和 ΔT_H 达到最小, 余热利用的程度达到最大。 $x > 0.167$ 后, 排气余热已不足以将所有蒸汽加热到最大过热度, ΔT_H 随 x 的增大而大幅上升, 过热度大幅下降, 到一定程度余热锅炉将无法工作。在此过程中, 比功、燃料系数等随 x 的增大而提高, 后者在 x 较大时增幅变大, 这也表明了此时效率的降低。

利用文献 [8] 的实验结果相对

照, 结果表明本文采用的计算方法是可信的。文献 [8] 中循环达最高效率的注汽量为 0.167 (和本文相同), 实验的最高效率为 40.7% (本文为 42%), 其透平压气机功比为 2.1 (本文为 2.12)。

3.2 更广泛范围内三种限制条件对最佳注汽量的不同影响

STIG注汽量受节点温差、最低出口温度以及最低过热度的限制, 本文在 $c = 8 \sim 48, TIT = 900 \sim 1300^\circ\text{C}$ 的范围内对注汽量和燃机性能的关系进行了计算, 图 6 列出了其中两种不同 TIT 条件的计算结果。

从图中看出, 节点温差限制在各种情况下都较过热度限制严格。由于比功输出只由注汽量决定, 一般情况下最大比功输出注汽量受过热度限制, 而最高效率注汽量则受节点温差限制。本文把前者称为最大注汽量, 把后者称为最佳注汽量。压比较小时两者都先后转而受到最低出口温度限制。

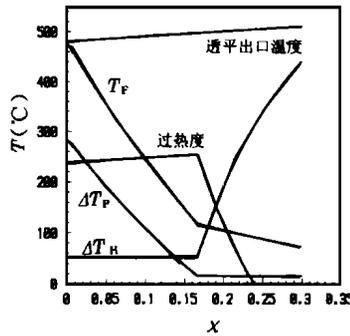


图 4 温度随汽气比的变化

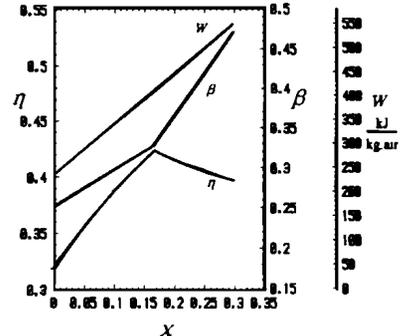
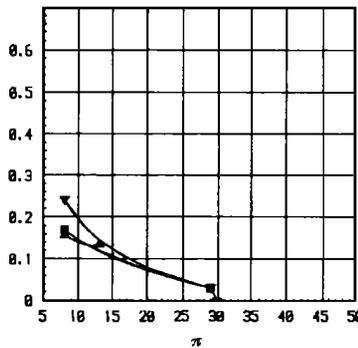
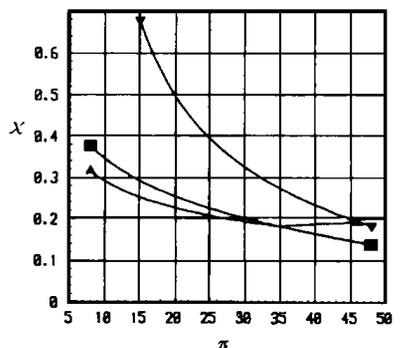


图 5 Z, W, U 随汽气比的变化



(a) $TIT = 900^\circ\text{C}$



(b) $TIT = 1300^\circ\text{C}$

图 6 不同进口温度、压比条件下最大注汽量受限情况

▲最低出口温度 ▼过热度 □节点温差

两种注汽量均随压比的增高而减小,随进口温度的提高而增大。进口温度较低的情况下,压比提高到一定值后,受最低过热度限制,注汽已不可能(图 6(a))

3.3 更广泛范围内的最佳注汽量及其对燃气轮机性能(效率、比功)的影响

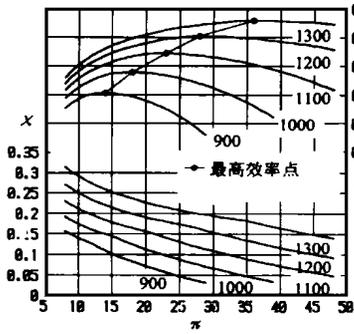


图 7 最佳注汽量及效率

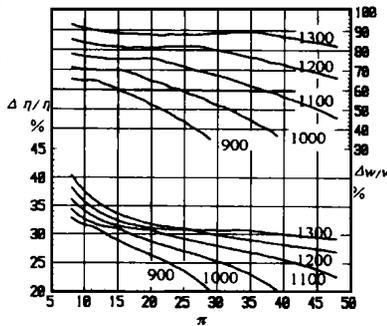


图 8 最佳注汽量下效率比功相对增幅

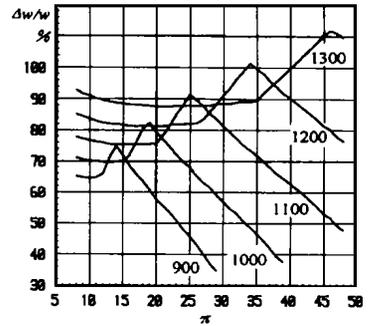


图 9 最大功率增幅

图 7 的效率计算结果表明,在相同的进口温度下,能达到的最高效率先随着压比的提高而增大,达到某一最佳压比后开始下降。最佳压比随着进口温度的提高而增大。效率曲线在低温下峰值较明显,在高温下则较为平坦,最佳压比值并不突出。在压比相同的情况下,进口温度越高,能取得的最高效率越高,和简单循环类似。图 8 表明,比功、效率的相对增幅随进口温度的提高而增大,随压比的提高而有所降低。进口温度越高,压比的影响越弱。总的看来,透平进口温度越高,压比越低,采用 STIG 技术改造提高性能潜力越大。

制线限制最大注汽量减小,向最佳注汽量靠近,比功增幅大大降低。进口温度越高,功率增幅峰值越高。

如果从增大比功的角度采用出口温度和节点温差限定的最大注汽量,则可在效率收益有所牺牲的情况下大大提高比功输出(图 9)。压比较低时,最大注汽量

3.4 单位汽比增量的经济性比较

图 10 比较了采用最佳注汽量时,不同压比、进口温度下,汽比每增加一个百分点所得到的效率、比功的增幅。结果表明针对效率、比功影响的情况是相似的,压比越高,进口温度越低,单位注汽量发挥的作用越大。所以,虽然从性能提高潜力的角度出发,低压比、高入口温度的燃机较有利,但是从蒸汽利用经济性的角度出发,却是高压比、低入口温度的燃机较有利。

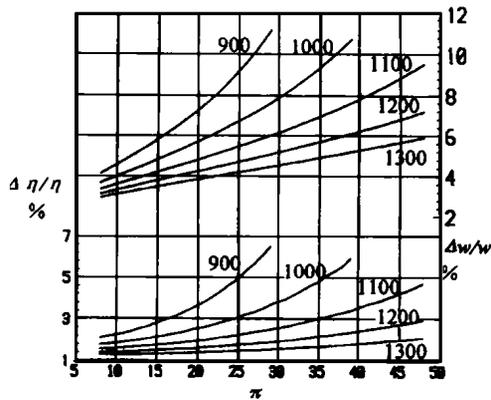


图 10 单位汽比增量对性能的影响

3.5 注蒸汽对燃气轮机容积流量的影响

从图 7、8 中分别按照在最佳注汽量下使效率增长 30% 及比功增大 60% 的原则选取如表 1 所示的两组数据,对注汽后燃机透平中容积流量增幅进行计算,结果如图 11 所示(横坐标表示膨胀压力,纵坐标上段

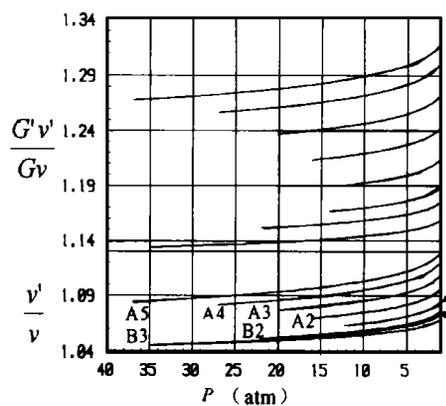


图 11 注汽量对容积流量的影响

近,比功增幅明显上升。经过最高值后,受过热度限制线靠近,比功增幅明显上升。经过最高值后,受过热度限制

据,对注汽后燃机透平中容积流量增幅进行计算,结果如图 11 所示(横坐标表示膨胀压力,纵坐标上段

表示喷注蒸汽后和喷注前容积流量的比值,下段表示相应混合气体比容的比值)。同一燃机中容积流量的增幅随着膨胀过程的进行而增大。效率增幅相同时,进口温度、压比高的燃机需要的注汽量较大,容积流量增幅较大;比功增幅相同时,进口温度、压比低的燃机需要的注汽量较大,容积流量增幅较大。

计算结果中容积流量增大最大可达 32%,因此在实际的设计或改型工作中,为了保证透平有良好的效率值,其通流面需要适应容积流量的变化

表 1 计算点的选择

序号	A效率增幅相同				B比功增幅相同			
	TIT	c	$\Delta Z\%$	x	c	$\Delta w\%$	x	
1	900	13	30.169	0.118	15	59.884	0.103	
2	1000	17	30.023	0.132	24	60.483	0.093	
3	1100	22	30.065	0.146	37	59.748	0.082	
4	1200	29	30.069	0.158				
5	1300	40	30.038	0.164				

4 结 论

(1) 从热力学的角度出发,STIG的注汽量受余热锅炉最低出口温度、节点温差和最低蒸汽过热度的限制。最高效率对应的最佳注汽量在低压比时受最低出口温度限制,在高压比时受节点温差限制。最大功率对应的最大注汽量在低压比时受最低出口温度限制,在高压比时受最低过热度限制。两种注汽量均随压比的提高而减小,随进口温度的提高而增大。

(2) 在透平进口温度一定的情况下喷注蒸汽,

存在使效率最高的最佳压比。进口温度越高,效率越高,最佳压比越高。在压比较高时,最大注汽量高于最佳注汽量,可用牺牲效率的方法提高比功输出。比功增幅峰值随进口温度的提高而增大。

(3) 采用 STIG技术,从提高性能潜力的角度出发压比低、进口温度高的燃机占有优势,但从单位汽气比所能发挥作用的经济性考虑却是压比高、进口温度低的燃机占有优势。

(4) 注汽对透平容积流量的影响主要取决于注汽量的大小。采用最佳注汽量,效率增幅相同时,进口温度、压比高的燃机需要的注汽量较大;比功增幅相同时,进口温度、压比低的燃机需要的注汽量较大。而注汽量越大,容积流量增加越多,对燃机结构的影响也越大。

参 考 文 献

- 1 闻雪友,魏应新. PG5361 STIG装置. 热能动力工程, 1992, 7(4): 169
- 2 Day W H and Kydd P H. Maximum steam injection in gas turbines. ASME Paper No. 72 JPG/GT- 1, 1972
- 3 Fraize W E and Kinney C. Effects of steam injection on the performance of gas turbine power cycles. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1979, 101: 217
- 4 Brown D H and Cohn A. An evaluation of steam injected combustion turbine systems. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1981, 103: 13
- 5 周伏秋,王克光. STIG循环余热锅炉回热限制分析. 热能动力工程, 1994, 9(3): 146
- 6 周伏秋,王克光,严家骥. 燃气-蒸汽混合循环热力学分析. 工程热物理学报, 1992, 13(3): 239
- 7 刘志刚,刘咸定,赵冠春. 工程热物理性质计算程序的编制及应用. 北京: 科学出版社, 1992

船用燃机

打算把 WR- 2用作为电力驱动装置

据“ Gas Turbine World” 1997年 7- 8月号报道,美国海军计划对 WR- 2中间冷却回热式(ICR)船用燃气轮机用作为船上大型发电机驱动装置,该发电机本身又驱动推进电动机用来驱动推进轴的方案进行评估。

海军的综合动力系统(IPS)计划被指定用于先进水面战舰动力机械。

燃气轮发电机组将是用于未来战舰设计的动力和推进系统的一个组成部分。由于初步设计使用了标准的零部件,可以扩大范围地匹配船舶动力需求。它也允许在给定船体内优化燃气轮机发电机组(及其垂直向上管道和下降管道)和推进电动机的布置。

发电机将由 WR- 2燃气轮机驱动。综合动力系统推进机械以及电力生产和配电系统的全尺度试验大纲计划在美国费城海军造船厂的陆上设施上完成。

(思娟 供稿)

面向对象的燃气轮机仿真建模 = **Target-oriented Gas Turbine Simulation and Model Establishment** [刊, 中] / Xie Zhiwu, Chen Delai, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 243~ 246

To give full play to the pivotal role of simulation technology in the whole-life cycle of a gas turbine, it is essential to employ a target-oriented method in the course of turbine simulation and model establishment. Following a review and summing-up of the experiences and lessons in the process mode and process mode modularized gas turbine simulation practice, this paper expounds the necessity of using the target-oriented method in this area and comments on the recent progress in the study of target-oriented gas turbine model establishment with three promising development tendencies being pinpointed. Key words: gas turbine, simulation, model establishment, target-oriented method

燃用褐煤气化燃料的燃气轮机电站 = (Vresova Czech Republic) = **Brown Coal Gasified Fuel-fired Gas Turbine Power Station (Vresova Czech Republic)** [刊, 中] / M. Moliere, P. Carros, E. Deramond (European Gas Turbines S A, GEC Alsthom) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 247~ 253

A comprehensive description is given of the present condition of two model 9E gas turbines installed in an existing brown coal gasification plant in Vresova of Czech Republic with emphasis on such aspects as optimized utilization of energy sources, fuel adaptability, environmental protection and favorable social impact, etc. Key words: integrated coal gas-based combined cycle, gas turbine, combined cycle, gasification of coal

燃煤气的闭式 STIG 循环的热力学分析 = **Thermodynamic Analysis of Coal Gas-fired Closed STIG Cycle** [刊, 中] / Chen Anbin, Wang Yongqing, Shang Demin, Yan Jialu (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 254~ 256, 266

With coal gasification technology being used for a closed cycle steam injected gas turbine a thermodynamic analysis is performed of a coal gasification product-fired closed STIG cycle, which is compared with a coal gas-fired open STIG cycle. In addition, analyzed are also water recovery influencing factors. Key words: coal gasification, water recovery, STIG cycle

注蒸汽燃气轮机最佳注汽量的研究 = **A Study of Optimum Steam Injection Rate for a Steam Injected Gas Turbine** [刊, 中] / Hu Zongjun, Wu Minglan (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 257~ 260

First, a thermodynamic analysis from the viewpoint of components heat balance is conducted of a steam injected gas turbine (STIG) with a corresponding thermodynamic process calculation model being set up. Within a wide range of pressure ratio $\pi = 8 \sim 48$ and turbine inlet temperature $TIT = 900 \sim 1300^\circ\text{C}$ a performance simulation has been carried out for the STIG. An in-depth and comprehensive study is conducted of the correlation of an optimum steam injection rate and gas turbine performance. Key words: gas turbine, steam injection, optimum steam injection rate, STIG technology

锅炉全炉膛火焰数字图象处理与监测系统开发与研究 = **Development and Study of a Boiler Furnace Flame Digital Image Processing and Monitoring System** [刊, 中] / Zou Yu, Lu Zhenzhong, Wang Shimin (South-eastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 261~ 263

In view of the inability to attain a design target in home-made thermal power plant boiler safety protection system with the current furnace safety safeguard system (FSSS) mainly based on the logic discrimination of contact signal magnitudes the authors have come up with a scheme featuring the introduction of an analog quantity into the FSSS. On this basis developed is a new generation of flame detection system based on digital image processing, which is capable of describing furnace flame combustion situation through an analog quantity mode. A detailed analysis has been given of the system scheme design, system configuration and industrial testing. Key words: boiler, furnace, protection, flame detection, image processing, digital treatment, compression