

# 燃气轮机回注蒸汽装置的研究

闻雪友 金介荣 傅正 邹积国

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕 介绍了我国第一套燃气轮机回注蒸汽整机实验装置及其部件、设计的主要特点以及初步性能试验结果。

关键词 燃气轮机 回注蒸汽 装置

## 1 前言

自国际上第一套双工质平行——复合循环(即回注蒸汽燃气轮机循环 STIG)商用装置于1985年1月正式投入商业运行以来,短短数年间,这种 STIG 装置获得了相当迅速的发展。目前在国外主要用于热电联供装置和发电装置。它的高比功、高效率、以及

在满足热、电负荷平衡方面所具有的高度灵活性和投资费用低的特点使它受到青睐。

美国海军在讨论未来的护卫舰、驱逐舰和巡洋舰的驱动燃气轮机时认为“有两种技术途径将有利于未来航机舰改的商品化,并且在技术上是可行的。其中之一就是直接在燃气轮机内利用余热锅炉产生的蒸汽,即双工质平行——复合循环,以简化 COGAS 的 RAC-ER 设计概念。虽然它对水质的要求

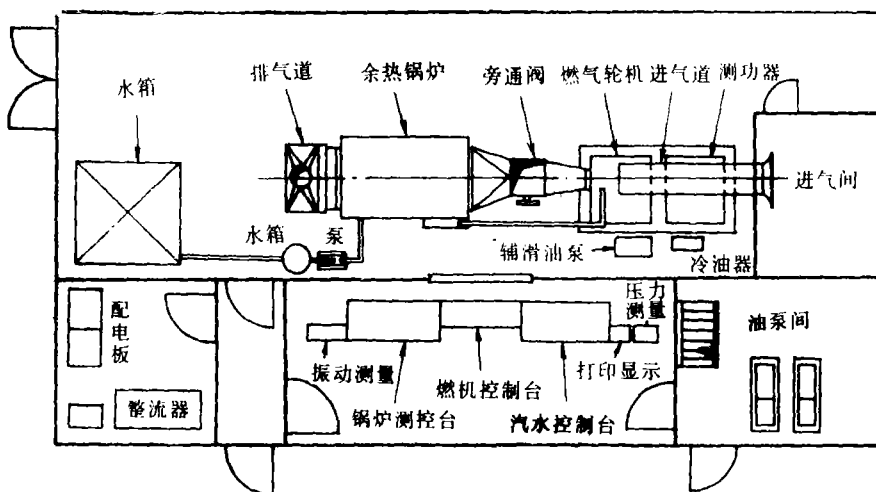


图1 试验装置布置图

收稿日期 1991-02-18

本文联系人 闻雪友 150036

高,但对于这一基本概念的某些方案来说,还不是很大的限制因素”[1]。

哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所和哈船院联合,利用一台工业小燃气轮机,设计配置了蒸汽发生器、蒸汽回注系统、控制系统等,实现了燃气轮机回注蒸汽装置的整机实际运行。

## 2 STIG装置

整个试验装置见图1。一台SIA—02工业燃气轮机与一台蒸汽发生器相组合,将蒸汽发生器产生的蒸汽回注入燃气轮机的燃烧室中,使基础发动机的出力大大增加,循环效率也随之增高。

### 2.1 燃气轮机

基础发动机是日本川崎重工株式会社生产的SIA—02发动机,它是一台持续功率为221 kW,备用功率为228 kW的工业小燃气轮机,由两级离心式压气机和两级轴流式涡轮以及单管回流式燃烧室组成。设计点的压气机压比9,空气流量1.8 kg/s,燃气初温930℃,涡轮转速为53 000 r/min。通过一个两级减速的减速器,由前端输出功率,输出轴转速1500 r/min。发动机调节方式为等转速调节。发动机外形尺寸为1 087×1 067×843 (mm),燃油为柴油,滑油为合成润滑油。在STIG装置上,对发动机的燃烧室外壳做了修改,在与火焰筒主渗混孔相对应的部位设计了三个回注蒸汽接口,并相应地装有蒸汽喷嘴,蒸汽和燃气在渗混区混合后进入涡轮,膨胀作功。

### 2.2 蒸汽发生器

蒸汽发生器利用燃气轮机排气余热产生过热蒸汽,作为燃气轮机另一种工质。

蒸汽发生器为直流式锅炉,无汽包。由预热段、蒸汽段,过渡段和过热段四部分组成。过热段直接位于燃气轮机排气扩压段之

后,在回注前提高蒸汽温度,可减少为使蒸汽温度提高到燃气初温所需输入的燃料量,从而提高发动机的热效率。过渡段、蒸发段和预热段依次排列于后。

整个蒸汽发生器采用卧式布置形式。

### 2.3 烟道

在燃气轮机与蒸汽发生器之间设置旁通烟道,利用排气换向阀可使燃气轮机之排气不经蒸汽发生器而直接从旁通烟道排出,此时燃气轮机的背压亦较低。在蒸汽发生器出口处有主排气烟囱。

### 2.4 水、汽系统

锅炉用水为除盐水。考虑到蒸汽发生器在投入运行前需洗炉,在正常维修保养时需进行冲洗,因此在水系统中设置必要的阀门和管道,以便进行酸洗、碱洗、正冲洗和反冲洗。

图2为蒸汽系统示意图。注入燃气轮机的蒸汽通过主蒸汽管道、压力脉动阻尼器、蒸汽流量孔板、调节阀、速关阀、单向阀、

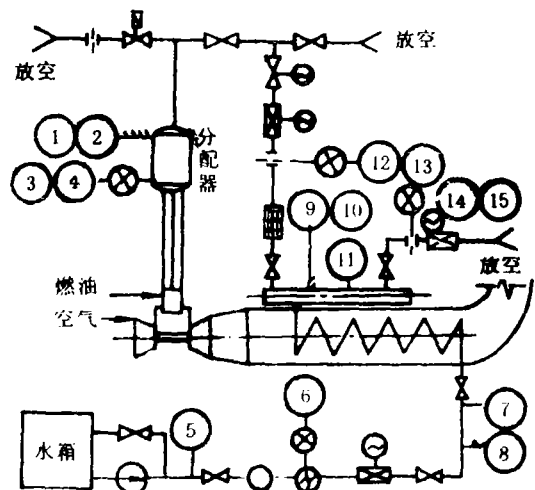


图 2 蒸汽系统图

- |                     |                     |                      |                     |                      |
|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 1. $\frac{T_3}{Z}$  | 2. $\frac{T_3}{JZ}$ | 3. $\frac{P_3}{ZT}$  | 4. $\frac{P_3}{ZT}$ | 5. $\frac{P_0}{Z}$   |
| 6. $\frac{G_1}{Z}$  | 7. $\frac{P_1}{Z}$  | 8. $\frac{T_1}{Z}$   | 9. $\frac{T_2}{Z}$  | 10. $\frac{T_2}{JZ}$ |
| 11. $\frac{P_2}{Z}$ | 12. $\frac{G_3}{Z}$ | 13. $\frac{G_3}{JZ}$ | 14. $\frac{G_2}{Z}$ | 15. $\frac{G_2}{JZ}$ |

蒸汽分配器,最后经过三根金属软管到三个带滤网的蒸汽喷嘴组件而进入燃烧室。为防止凝结水进入燃烧室,在管路上设有加温、吹扫通道,并设置了吹扫阀。蒸汽旁通管路系统由闸阀、蒸汽流量孔板、调节阀等组成。试验装置运行时,旁通系统将蒸汽发生器产生的过量蒸汽排到大气中。

## 2.5 调控监测系统

本试验装置的调控监测系统由两部分组成。

### 2.5.1 燃气轮机调控监测系统

燃气轮机的燃料控制系统为电子模拟式燃料控制系统,主要完成启动加速过程、调速、非正常状态的报警停机控制,以保证燃气轮机在稳定和过渡态等各种运行状态下安全可靠地运行,并设有监测仪表盘。

### 2.5.2 第二工质——水蒸汽调控测量系统

该系统以DDZ—Ⅲ型仪表和必要的接口、转换电路,DJS—033微型计算机完成蒸汽发生器和蒸汽注入系统的操作控制和热工参数的检测、显示(包括系统模拟图)记录、整理和打印等功能。

## 2.6 测功系统

功率吸收和测量由D650型水力测功器完成。

# 3 设计特点

## 3.1 采用直流余热锅炉

此种锅炉与常规的汽鼓锅炉相比,金属耗量小,重量轻,体积小,造价亦低。直流锅炉的接头少,简单、容水量小,而且水和蒸汽的全部容量也较小,增加了安全性。它对负荷变化的响应也较迅速。缺点是它对给水的水质要求较高。

锅炉在设计点下的产汽量为570 kg/h,额定压力为 $1.079^{+0.15}$  MPa,过热蒸汽温度

413℃,锅炉烟气阻力1.5 kPa。在结构上采用了螺旋鳍片管。

## 3.2 注汽方式

针对单管回流式燃烧室的特点,尽量少改动燃烧室结构,采用从燃烧室掺混孔正交喷注的方案。这是一个在熄火特性、燃烧性能,降低NO<sub>x</sub>排放量和废气中的CO及HC含量等各因素间折衷的一个方案。

## 3.3 实验装置的试验基准设计点

由于发动机不允许超负荷运行,涡轮导向器面积不允许调整,而涡轮又基本上是处于临界状态下工作,这些情况限制了SIA—02双工质发动机的可行工作域。因而,要获得高性能是一件困难的事。在高参数下,注入蒸汽的同时,为满足匹配要求,压气机压比势必增大。在定转速运行下,压气机的工作点移向喘振边界。若保持燃气初温不变,则发动机功率将大大超过原机极限功率。所以,在一定的涡轮工作状态下,根据以下三原则:

- (1) 保证压气机有适宜的喘振裕度;
- (2) 注蒸汽后的最大功率为燃气轮机原机的全功率;
- (3) 燃气初温虽必须下降,但不宜太低,确定了SIA—02双工质平行——复合循环装置试验的基准设计点:压比9.2;燃气初温1087 K;蒸汽/空气为0.072。

## 3.4 注汽系统的防水

由蒸汽发生器来的过热蒸汽注入到燃烧室的整个系统中,要防止可能有水进入工作中的燃气轮机,在向燃烧室回注蒸汽之前,管路也必须是热的。单向阀的管路用过热蒸汽来加温,并通过吹扫阀吹除杂质和冷凝水。单向阀后的一段用燃气轮机压气机出口的热空气来加温,热空气通过节流小孔排放至大气,蒸汽注入后该孔由电磁阀关闭。整个注汽

系统用绝热材料包覆。

### 4 性能试验结果

双工质平行——复合循环系统是一个由燃气轮机和蒸汽发生器组成的动力耦合系统，回注过热蒸汽的反馈性质是燃气轮机性能与蒸汽发生器性能间的关键联系。正确的关联可使系统中的各部件在其各自的良好状态下运行。

对发动机功率从1/8到8/8，蒸汽与空气的汽比从2%到8%进行了大量的试验，得到了一系列的试验结果，建立了注蒸汽量、燃气温度、功率、热效率等参数间的关联。

图3a和3b典型地示出了主要试验结果。在一定的燃气初温下，随着注汽量的增加，功率迅速增加，热效率也随之提高。热效率随汽、气比增加而增加的情况一直持续到达到最佳汽/气比，此后汽、气比继续增长，循环效率将下降。另一个特点是随着燃气初温的增高，性能更好，这主要是由燃气轮机的基本特性所决定的。

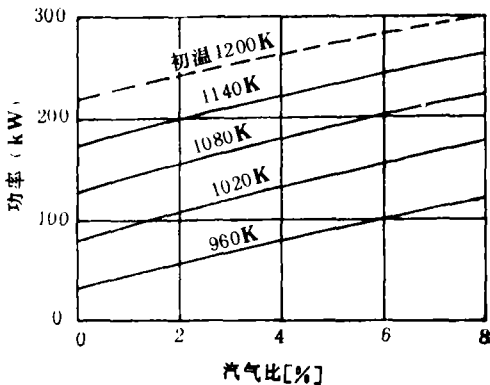


图 3a SIA—02 STIG 的功率与汽、气比之关系

从试验结果可明显看出，双工质平行——复合循环在增加功率、改进循环效率方面的效果是极其明显的。

图 4 示出了设计注汽量 (7.2%)下，

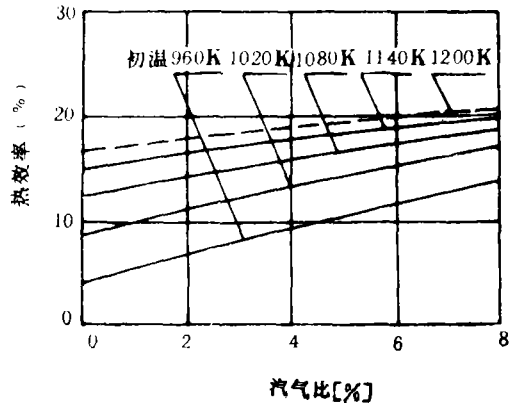


图 3b SIA—02STIG 的热效率与汽、气比之关系

理论计算结果与试验结果的对比，两者在总体上吻合得相当好，得到了预想的结果。

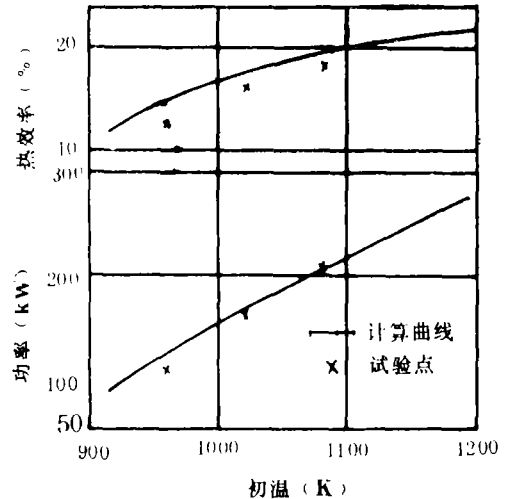


图 4 SIA—02 STIG 变工况性能 (汽、气比: 0.072)

### 5 结束语

双工质平行——复合循环装置的实际运行试验表明：

燃气轮机回注蒸汽实现了预示的功率和循环效率的大幅度提高。回注蒸汽已成为该领域中的一项重要新技术，这一新概念在我国亦已具备了进入工程实践的条件。

(下转第131页)

tent No. 4128994 is a separate patent. patent No. 4248039, Feb. 1981

3 闻雪友, 邹积国. 船用双工质平行一复合循环热机之初探. 轮机协会第三届学会论文, 1986

## A Study of the Extensive Utilization and Adaptation of STIG Cycle in Gas Turbines

Zou Jiguo, Wen Xueyou

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

### Abstract

The STIG cycle, which is characterized by a high efficiency and enhanced specific power together with its system simplicity, has received considerable attention nowadays. This paper presents a practical analysis of the extensive adaptation and utilization of the STIG cycle in some existing single-shaft, double-shaft and triple-shaft gas turbines operating in various industries with some relevant conclusions being drawn.

**Key words:** *gas turbine, compound cycle*

(李乡复 编辑)

(上接第125页)

### 参 考 文 献

1. Baskerville J E. Future propulsion machinery technology for gas turbine powered frigates, destroyers, and cruisers. Naval engineers journal. 1984, 96(2)

2 Cheng D Y. Parallel-compound dual-fluid heat engine. Patent No. 3978661, 1976-09

3 Wen X Y, Zou J G. Application potentiality of parallel compound dual-fluid heat engines on ship. Proceedings of the First International Marine Engineering Conference, Paper 3-2, Shanghai, 1987

(李乡复 编辑)

## A Study of STIG Plants

Wen Xueyou, Jin Jierong, Fu Zheng, Zou Jiguo

(Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute)

### Abstract

This paper describes an engine test rig and its components of the first steam injected gas turbine plant developed in China and presents their main design features as well as preliminary performance test results.

**Key words:** *gas turbine, steam injection, power plant*