

# 重型工业燃气轮机的新起点

侯宇辉 周顺军

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

〔摘要〕本文阐述了重型燃气轮机技术的发展趋势。详细介绍了GT24/GT26型燃气轮机的设计特点及其性能,尤其是连续燃烧系统的采用,使它们达到了高效率低排放这两个互相矛盾的目标。大功率高效率 and 低排放使这两型机组成为简单循环和联合循环电站用燃气轮机的最佳选择之一。

关键词 燃气轮机 设计 发电装置

分类号 TK47

## 1 前言

过去几十年来燃气轮机技术取得了引人注目的进展,特别是由于海军舰艇推进和电站应用均要求高效率大功率燃机。因而,为满足电力需求的增加,世界上从1985年开始就掀起了研制单机功率超过150MW的重型燃机的热潮。从世界角度看,许多大公司已研制出各种类型的燃机,并投入运行发电。在美

国,最近10年(1990~2000年)将再安装113GW发电容量。其中20GW预期是简单循环燃机,44.7GW将是联合循环基本负荷装置。虽然汽轮机的装机容量占总装机容量的44%,但较前10年已有了明显的减少。在我国,燃气轮机已在大庆、重庆、汕头、深圳、珠海、三亚等地安家落户。从1987年起,在电力生产领域,世界燃机生产总量(MW数)已开始超过汽轮机的生产容量。

表1 典型的重型燃机

型号	首台使用年份	ISO条件下 额定功率 (MW)	热耗率 [kJ/(kW·h)]	压比	涡轮进口温度 (°C)
GT10	1981	24 630	10 308	14.0	1112
PG5371(PA)	1987	26 300	12 650	10.5	963
V64.3	1990	60 500	10 239	16.1	—
V84.3	1992	152 000	9 970	16.1	—
GT24	1994	165 000	9 601	30.0	1 235
V94.3	1993	219 000	9 970	16.1	—
MS9331(PA)	1991	226 000	10 097	15.0	1 288
GT26	1994	240 000	9 527	30.0	1 235

燃气轮机的性能一方面通过航空技术的引进而不断完善,另一方面是对其热力循

环进行开发研究。从下列一些典型机组的研制进程可看出,重型燃机正沿大功率、高效

① 收稿日期 1994-05-10

② 本文联系人 侯宇辉 男 27 助工 150036 哈尔滨 77-7 信箱

率、低排放的趋势发展。

## 2 重型机 GT24/GT26 的技术设计和性能细节

1993年9月8日,ABB公司推出新一代燃气轮机 GT24(60 - Hz,165MW) 和 GT26(50 - Hz,240MW) 用于电力市场。它标志着重型燃机的发展进入了一个崭新的时代。ABB公司采用两个环形燃烧室组成的串联燃烧系统(SCS),实现了高效率 and 低排放这两个相互矛盾目标的统一。GT24/GT26的技术设计和性能细节如下。

### 2.1 高效率

GT24的简单循环效率为 37.5%,GT26的为 37.8%,在使用天然气的简单循环中,其当量热耗率低于 9601kJ/(kw · h)。

### 2.2 再热燃烧

两个环形燃烧室由第一级涡轮叶轮分隔。2/3的燃料在上游燃烧室(EV)中与空气预混并点火燃烧,驱动空气冷却的第一级涡轮。剩余 1/3 燃料在第二个燃烧室(SEV)中与空气预混点火燃烧,联合的热燃气驱动后面的四个涡轮级。

### 2.3 增加温度

虽然,GT24/GT26 较其以往的 ABB 涡轮进口温度设计已有较大提高,但仍略低于“F—技术”1260~1288℃的水平,且其设计的叶片金属温度低于(899℃)。基本负荷排气温度高达 610℃,适合高性能联合循环和热回收应用。

### 2.4 高压比

基本负荷压气机压比为 30.0,高于许多航空改型的压比。除 22 级轴流压缩外,不用跨音速或超音速流动。通过 GT24 的质量流量为 376kg/s(60 - Hz),GT26 的为 542kg/s(50 - Hz)。

与其密切相关的一个规定目标,就是使排放低于而效率超过 GE 和西屋“F—技术”燃气轮机和西门子‘V.3’系列(其涡轮进口温度超过 1288℃),而 GT24/GT26 却并不在上述进口温度下运行。

据悉,新的 ABB 设计的性能水准与超级风扇航空改型设计的性能水平相当,甚至超过。它们或许可与其它先进的循环并驾齐驱,包括 kalina 联合循环、湿空气涡轮以及目前尚处于研究阶段的化学余热利用设计等。

表 2 GT24/GT26 的简单循环特性和设计数据

	GT24	GT26
总输出(KW)	165,000	240,000
热耗,低热值(LHV)[kJ/(kw · h)]	9600	9526
总效率	37.5%	37.8%
压比	30 : 1	30 : 1
转速(r/min)	3600	3000
涡轮进口温度(℃)	1235	1235
排气温度(℃)	610	608
排气质量流量(kg/s)	376	542
No <sub>x</sub> 排放(干)(天然气)(ppmv)	< 25	< 25
No <sub>x</sub> 排放(湿)(馏出物)(ppmv)	< 42	< 42

### 3 GT24/GT26 的特点

#### 3.1 增加了燃气初温

这两种机型是为在涡轮转子进口温度 (TRIT) 低于目前 'F - 技术' 机组下运行而设计的, 可使第一级转子叶片的上游温度低于 1288°C, GT24/GT26 燃机涡轮进口温度为 1235°C, 同时, 保证使部件上最高金属温度不超过 899°C。

传统的提高热效率的方法是增加燃气初温, 但由于采用了 SCS 设计, ABB 公司并未仅仅求助于过高的涡轮进口温度, 而使用连续燃烧的方法得到很高的效率和比功。

另外, 可以避免使用稀有的涡轮材料。其可靠性提高且维护费用降低。对于干式以天然气做燃料的运行, 设计的  $\text{No}_x$  排放低于 25ppmv。

#### 3.2 SCS 解决了 $\text{No}_x$ 排放问题

所谓的“连续燃烧”, 包括安装在单级涡轮叶列上游的一个全环形燃烧室和安装在涡轮下游的第二个环形燃烧室。

首先, 上游的 EV 燃烧室中, 用两个点火器常规点火, 使用丙烷气启动。ABB 应用“涡流分离”原理, 燃烧室里的湍流使燃烧与空气充分混合。火焰不驻滞, 相对说来火焰温度较低, 限制了  $\text{No}_x$  的生成。

其次, “再热”装置 (SEV) 喷射燃料 (气态或液态) 到高温燃气中。并再次利用“涡流分离”原理, 已有的燃气温度使燃料点燃。在第二级燃烧室中  $\text{No}_x$  无明显增加, 因而, ABB 称 SEV 燃烧室为无  $\text{No}_x$  燃烧室, 并打算申请设计专利。该双燃烧系统消除了惯常的环形燃烧器固有的性能问题。低  $\text{No}_x$  排放还是干式贫油预混 EV 燃烧室系统的结果, 它应用于两个燃烧部分。由于使用“涡流分离”技术而导致低的火焰温度和低的含氧量。且加上该燃烧室的几何外形, 就可以产生较低的  $\text{No}_x$  排放。

向再热过程中喷射二次燃料是为了稍稍

提高排气温度, 产生高功率, 带回热的三压蒸汽锅炉是可行的。燃气轮机的排气温度应通过循环效率、压比和点火温度的最优化选择而定。

#### 3.3 成比例的设计

GT24/GT26 相互明显成比例。例如它们在压气机和涡轮部分有相同的转动设备设计规范, 相同数量的翼型级, 相同的总体设计性能。但法兰与法兰间的尺寸不同: GT24 的为 10.058 4 × 6.400 8 米 (长 × 高), 重量为 199 581 kg; GT26 的为 14.0208 × 9.753 6 米 (长 × 高), 重量为 299 371 kg。

除双燃烧室系统外, 它们是典型的 ABB 设计: 单轴压气机 — 涡轮转子、双轴承支承、四周轴向叶片、水平中分机匣、冷端驱动输出、全焊式转子。更具体的特性如下。

##### 3.3.1 转子

标准的 ABB 设计是全焊接的一些锻造扇形件, 它没有中心贯穿的螺栓或拉紧螺栓。使用 12%Cr、NiMoV 铁素体钢材料。GT24 的轴承跨度约为 8.2296 米 (小于该公司目前的 GT13E2 设计)。

##### 3.3.2 压气机

轴流 22 级亚音速设计, 叶尖速度和级负荷在公司经验范围内。为达到良好的部分负荷效率和低排放, 在入口处安排三列可调节静叶。

##### 3.3.3 压气机叶片

转子叶片和静子叶片由含铬量高的钢 (A - 565、A - 705) 制成, 从而不需要给前几级压气机涂上防腐蚀涂层。A - 477 材料使用于第 16 ~ 22 列叶列。具有良好新型气动力性能的叶型是通过先进计算机设计研制的, 并在台架试验上得以证实。

##### 3.3.4 轴承

转子支承由两个椭圆形的轴颈轴承构成, 一个在排气机匣中, 另一个在压气机末端。压气机轴承还包括可倾瓦推力轴承。

##### 3.3.5 环管燃烧室

双层壁结构的热力挠性扇形件由耐盐酸

镍基合金 x 材料构成,采用对流冷却。全环设计取消了联焰管。没有高温燃气机匣,没有薄的过渡段。实际上,所有的冷却空气都是通过燃烧区来循环的。

3.3.6 涡轮

具有前 4 个空气冷却级的五级轴流式涡轮。冷却和材料是根据使用在 GT8C、GT11N2、GT13E2 流行的 ABB 技术。所有叶片均为铸造件。

3.3.7 涡轮静子叶片

第一级 MAR—M247C 具有联合的冲击、对流和气膜冷却,以及低冷却空气消耗。设计的表面温度低于 899℃。

3.3.8 涡轮转子叶片

通过盘旋通道的内部对流空气冷却方式进行冷却。最后三级有装有围带的叶顶,前两级没有围带。第 2 和第 3 级涡轮转子叶片应用了弥散强化(DS)超耐热合金。

3.3.9 涂层

涡轮静子叶片和转子叶片涂有 SV 20(Ni Cr Al Y) 来防止高温腐蚀。

3.3.10 机匣

压气机机匣由 ASTM A — 536 球墨铸铁制成,水平中分。涡轮部分机匣由 A — 536(Gr. 6) 钢和球墨铸铁制成,也是水平中分。

3.3.11 排气机匣

碳钢外壳装有奥氏体不锈钢内衬。

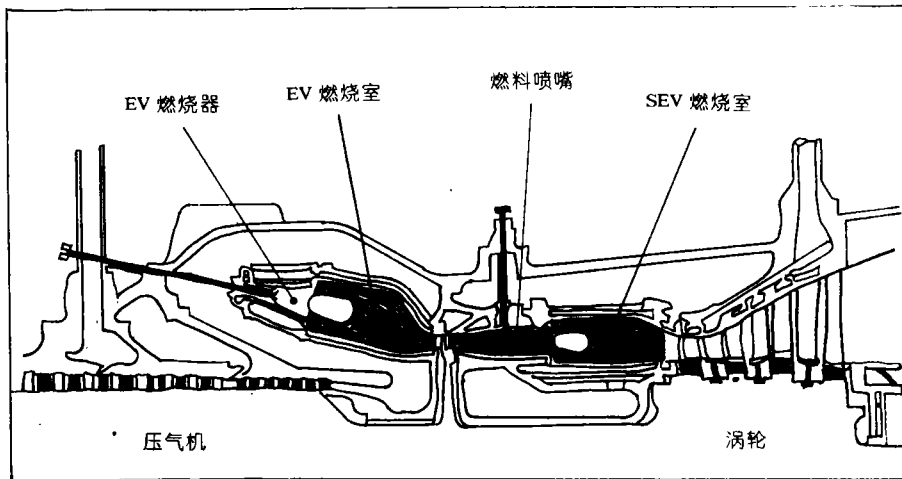


图 1 连续燃烧和空气冷却涡轮

4 单轴联合循环

当使用于简单循环基本负荷和尖峰负荷运行时,新型燃气轮机对于高效率联合循环电厂表现出最佳的特性。该新型 60 — Hz 机组将适用于循环和基本负荷联合循环发电增长的需要。GT26 是目前世界上功率最大的发电用燃机机组,其联合循环 KA26 的总输出达 365MW,效率达 58.5%;GT24 的联合循环 KA24 的总输出达 251MW,效率可达

58%。

两种联合循环电厂是为高于 58% 的总热效率而设计的,使用三压和再热蒸汽循环。其电厂的净热效率可达 57.5%,CCGT 的最终目标为效率 60%。与目前使用三压再热循环的“F — 技术”机组相比,GT24/GT26 CCGT 电厂净效率将提高 2 ~ 3 个百分点。

标准单轴机组包括燃气轮机、双端发电机和安装在独立基座上的冷凝式汽轮机。为便于启动和加载,允许燃机简单循环运行。燃气轮机轴向排气供入标准的立管式 HRSG

中,带三压和再热,没有补燃。也可以使用没有再热和三压的锅炉结构。

标准电厂设备包括排气烟囱、燃机入口空气集流室、蒸汽冷凝器和凝水泵、燃气和燃油橇、润滑油和  $\text{NO}_x$  水橇、主和辅助变压器、发电机断路器和电气控制组件。辅助设备使用模块化的机械/电气设备,类似于 GT11N2 和其它 ABB 机组。ABB 的 Egatrol 300 控制系统将提供全自动遥控、监视、开式和闭路控制、燃机保护和数据检索。

单轴联合循环电厂的投资费约为 500 美元/kw。在典型联合循环中,GT24 可以大大减少燃料的消耗,对于基本负荷设备,每年可以节省燃料费用达 170 美元。

## 5 自身的发展

新型 GT24/GT26 机组的压气机总压比有了明显的提高。设计规范给出的压比为 30:1,与之相比,目前生产线上其它型号机组的压比为 12:1~16:1。

这使权威人士确信,几年前 ABB 技术与罗一罗航空公司的转让合同已对新机组的研制产生了影响。为此,航空发动机设计技术、以及完善的翼型、压气机和燃烧概念将应用到重型燃气轮机的设计中并与之完美结合。

## 6 结论

综上所述,可得出以下结论:

1. 简单循环和联合循环电站的强劲需求,促使重型机向大功率、高效率、低排放的方向发展。

2. 卓有成效的连续燃烧技术使 GT24/GT26 实现了高效率 and 低排放这两个相互矛盾目标的统一。

3. 连续燃烧、高参数、先进的气动设计和冷却技术、性能优异的材料,使 GT24/GT26 成为迄今为止性能最为完善的重型燃机。GT26 是目前世界上功率最大的发电用重型燃机。

4. GT24/GT26 在构成联合循环时,KA24 的功率输出为 251MW(三压),效率为 58%;KA26 的功率输出为 365MW(三压),效率为 58.5%。

## 参 考 文 献

- 1 Robert Farmer. Reheat GTs boost 250 and 365-MW combined cycle efficiency to 58%. Gas Turbine world, 1993, (9-10)
- 2 Gas Turbine world The 1993~1994 Handbook.
- 3 吉桂明. 燃气轮机技应和应用的展望. 热能动力工程, 1992,7,(3)

## 简 讯

### 库兹聂佐夫系列航改机

据“Gas Turbine World”1993年5-6月号报道,ISO条件下额定功率为6到25MW的库兹聂佐夫系列‘NK’航空改型燃气轮机已在俄罗斯煤气管道泵送和电力生产中得到了广泛的应用。这些发动机均是由俄罗斯萨马拉市(原古比雪夫市)“劳动”科研生产联合体研制的。

其中尤为引人注目的是NK-12PT和NK-16PT型燃气轮机,它们大量应用在管道煤气增压中。

由世界上最强有力的11MW NK-12型涡轮螺旋桨发动机改装得到,NK-12PT型燃气轮机在ISO条件下基本负荷额定功率为6.3MW,热效率为26.1%,它是库兹聂佐夫系列的第一型航改机。到目前为止已交付了1600台该型发动机,其中817台仍在乌克兰、俄罗斯的煤气管道压缩机站继续使用。其余的NK-12PT正在波兰、保加利亚和阿根廷运行。

由推力为10419kg的NK-8航空发动机改装,NK-16PT型燃气轮机ISO条件下基本负荷额定功率为16MW,热效率为29.0%。至今已交付了600台NK-16PT供煤气管道泵送用,已运行8百万工作小时。由于其结构紧凑、重量轻,NK-16PT可通过空运被运送到无公路和铁路连结的俄罗斯北部地区。

(学牛 供稿)

structural parameters as porosity, specific surface area, particle size, etc, which has been compared with that obtained on the basis of the test results supplied by Mr. Smith. **Key words:** *Pulverized coal combustion, pore structure and variation, pore model, coal coking reactivity*

(336) **A Study on the Combustion Characteristics of Typical Chinese Anthracite Coals.** Du Meifang (Harbin Teachers University)

This paper presents the basic characteristics of Chinese anthracite coal and some study results concerning their ignition and burn-out conditions, which can serve reference data and materials for relevant design and operational departments. **Key words:** *anthracite coal, ignition characteristics, burn-out characteristics*

(341) **An Experimental Study on a Barchan Dune Vortex Pulverized Coal Burner**.....Wu Jin, Yang Shuichun, Hu Jangen (Zhejiang Electrical Power Engineering Institute)

This paper deals with the experimental study of the air flow field and combustion mechanism of a Barchan Dune (BD) vortex pulverized coal burner. Under the special action of the BD vortex generator there emerged at burner outlet a high-temperature nucleus and high-concentration pulverized coal region, which promotes the ignition and combustion of the pulverized coal, resulting in a speedy ignition of the pulverized coal and significant enhancement of its combustion stability. Practical applications have shown that the BD pulverized coal burner plays a key role in reducing start-up oil consumption during boiler ignition and enhancing the boiler low-load combustion stability, etc. **Key words:** *Pulverized coal combustion, Barchan Dune vortex*

(345) **A Technical Analysis of Crude Oil or Residual Oil-fired Heavy-duty Gas Turbines**.....Luo Sid-ing (Electrical Power Company of Shengli Oil Field Management Bureau)

The author discusses and makes an analysis of the following issues: the adaptability of heavy-duty gas turbines to burn such low-grade fuels as crude oil, residual oil, etc, the damage mechanism of harmful elements in low-grade fuels with respect to gas turbines operating on such fuels, and special measures to be taken for crude oil and residual oil-fired gas turbines. **Key words:** *heavy-duty gas turbine, combustion, low-grade fuel*

(351) **A New Starting Point for Heavy-duty Industrial Gas Turbines**.....Hou Yuhui, Zhou Shunjun (Harbin Machine Boiler & Turbine Research Institute)

The present paper development tendency of heavy-duty gas turbine technology with a description of the design features and performance of GT24 and GT26 gas turbines. A special mention should be made of the use of continuous combustion system, which enables the turbines to attain the contradictory aim of high efficiency and low emissions. High power output, good efficiency and low emissions specific to the above-cited two types of turbines have made them to be listed among the ideal candidates destined for simple cycle and combined cycle utility gas turbines. **Key words:** *gas turbine, design, power generating set*

(356) **The Real-time simulation of a Three-shaft Gas Turbine by Using a Parallel Digital Computer**.....Zhang Bainian, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University)