

H-25 型燃气轮机及国内技术引进应用

郑陆松¹, 张晓蕊¹, 沈 健², 汤忠滨¹

(1. 中国船舶集团第七〇三研究所 哈尔滨广瀚燃气轮机有限公司, 哈尔滨 150078;

2. 华润电力(泰州)有限公司, 江苏 泰州 225453)

摘 要: 基于 H-25 型燃气轮机发展历程和技术特点, 结合国内燃气轮机发展现状及节能减排需求, 阐述 H-25 型燃气轮机技术引进的必要性和重要意义。在国内 H-25 型燃气轮机成功应用的基础上, 通过引进燃气轮机核心技术, 实现 H-25 型燃气轮机国产化生产和集成配套, 弥补国产工业型燃气轮机在 30 ~ 40 MW 功率等级的空白, 优化燃气-蒸汽联合循环系统, 降低区域型分布式能源系统的初投资和运行成本, 打破国外供货商对燃气轮机及售后维护的技术垄断, 同时为推进国家能源结构调整、实现节能减排奠定基础。

关 键 词: H-25 型燃气轮机; 技术引进; 国内应用; 分布式能源; 燃气-蒸汽联合循环; 节能减排

中图分类号: TK471

文献标志码: A

文章编号: 1009-2889(2023)04-0011-09

燃气轮机是一种高速旋转的叶轮式动力机械设备, 广泛应用于航空发动机、船舶动力、工业发电及油气管道增压输送等领域^[1]。燃气轮机技术水平是一个国家科技和工业整体实力的重要标志之一, 关系到国家安全和国民经济发展^[2], 因此, 燃气轮机产业发展一直受到发达国家的高度重视。20 世纪 80 年代以来, 由于冶金、高温材料、冷却技术、高温涂层以及 3D 打印技术的创新和突破^[3-5], 燃气轮机联合循环技术得以迅速发展。燃气轮机单机容量和性能不断提高, 最大容量已超过 500 MW, 最高燃气温度达到 1 600 °C 以上, 燃气轮机单机效率已超过 40%, 联合循环纯凝发电效率已达到 60% 以上^[6]。燃气轮机以效率高、占地面积小、快速启动及节能环保等优点正在成为一种大规模商业发电设备, 并在不断地向高参数、高性能、大型化方向发展^[7]。

1 国内燃气轮机发展现状

1.1 重型燃气轮机发展现状

我国燃气轮机技术起步于 20 世纪 60 年代初期, 国内汽轮机厂曾立足于自行设计和生产, 初步具备 10 MW 以下燃气轮机生产能力。80 年代, 由于国家能源政策及经济政策调整, 国内燃气轮机市场

严重萎缩, 导致我国燃气轮机设计和生产处于停滞状态, 直到 90 年代后期我国燃气轮机产业才逐渐得到恢复和发展^[8]。燃气轮机技术的发展断层, 致使我国在燃气轮机核心技术方面与发达国家拉开了差距, 也是导致我国至今仍未形成完整燃气轮机产业链的原因。目前国际上燃气轮机技术和市场高度垄断, 基本形成以通用电气 (GE)、西门子 (Siemens)、三菱重工 (MHI)、阿尔斯通 (Alstom) 为主导的格局^[9]。为了缩短差距, 加快燃气轮机产业发展, 我国曾采用“打捆招标”的方式^[10], 进行燃气轮机技术引进, 但成果并不显著, 国内合作商初步实现了燃气轮机装配制造技术的国产化, 核心技术仍掌握在国外企业手中。我国在燃气轮机核心设计技术、热端部件制造、控制技术 & 售后维保技术等方面仍落后于国际先进水平^[11]。

1.2 中小型燃气轮机发展现状

国内中小型燃气轮机发展以技术引进和自主研发两条路线为主。燃气轮机自主研发一般是基于国外引进的燃气轮机技术, 通过对核心机结构、高温材料、性能参数、技术特点等改进和优化, 推出新型燃气轮机的过程^[12]。目前, 国内具有自主研发燃气轮机技术能力的厂家较少, 暂未形成完整的燃气轮机产业链。中国船舶集团第七〇三研究所 (703 所) 自

20 世纪 90 年代开始引进乌克兰某型 25 MW 级燃气轮机技术,现已具备 100% 自主设计和生产能力,并在原机型基础上进行全面技术优化和改进,开发出具有完全自主知识产权的 CGT25/30 系列燃气轮机。目前该系列燃气轮机已成功应用于船舶动力、天然气长输管线及海上平台发电等领域,正在向工业发电领域发展和前进^[13]。南京汽轮电机(集团)有限责任公司在 20 世纪 90 年代与 GE 合作生产 MS6001 燃气轮机,初步掌握了燃气轮机设计、制造技术,但核心技术仍由 GE 掌控^[14]。中国航空发动机集团有限公司沈阳发动机研究所在与 P&W 公司合作生产 FT8 基础上进行改进,研发出 40 MW 等级 QC400 型燃气轮机,该型燃气轮机目前暂未量产^[15]。东方电气集团东方汽轮机有限公司基于三菱重工燃气轮机合作经验,自 2009 年至 2020 年自主研发 50 MW 级 G50 燃气轮机,完成燃气轮机整机、压气机、燃烧室及涡轮设计,分别建立核心部件试验台和整机试验台,并于 2020 年完成首台机组整机试验^[16],正在开展示范应用。

燃气轮机技术引进主要依托于 GE、Siemens 及 MHI 等公司的机组系列^[17-18],通过结成合作伙伴关系,采用核心机进口、附属设备国内成套的方式,并在工业发电、热电联产、分布式能源领域进行推广应用^[19]。2011 年中国华电集团与美国通用电气(GE)签署战略合作协议,成立华电通用轻型燃机设备有限公司,推广 LM2500、LM6000 等系列航改型燃气轮机。2006 年西门子通过与株洲南方航空动力有限公司合作进行 SGT 系列燃气轮机的组装生产。2016 年西门子与杭州汽轮动力集团股份有限公司合作推广 SGT-100 ~ SGT-800 系列燃气轮机在工业发电领域的应用。2013 年 703 所与西门子签署战略合作协议,推广 SGT 系列燃气轮机在油气领域的应用,并在天然气终端站和油气平台取得显著业绩。2009 年 703 所与三菱日立电力系统株式会社签署合作协议,推广 H-25 型燃气轮机在工业发电及分布式能源领域的应用,目前该型燃气轮机在国内已有 10 多台的项目业绩。

在项目合作过程中,国内厂家逐步掌握了燃气轮机生产制造、集成配套的技术,但燃气轮机核心设计技术一直由国外厂家垄断。适用于工业发电领域的燃气轮机技术引进有待在核心部件设计及国产化制造取得实质性进展。

根据中国燃气轮机技术发展现状,为响应国家

“十四五”规划和重大技术装备示范应用号召,打破国外工业型燃气轮机技术垄断,填补国内 30 ~ 40 MW 功率等级燃气轮机技术空白,703 所通过与三菱日立电力系统株式会社(MHPS)多年合作,在 H-25 型燃气轮机国内推广应用的基础上,于 2019 年签署了 H-25 型燃气轮机核心机设计、制造技术引进合同。目前 703 所正在开展 H-25 型燃气轮机国产化研制和示范应用。H-25 型燃气轮机技术引进和国产化应用将为打造完整燃气轮机产业链奠定基础。

2 H-25 型燃气轮机

2.1 H-25 型燃气轮机发展历程

H-25 型燃气轮机最初是由日立制作所基于美国 MS5001 生产经验独立开发的同级别高效率燃气轮机。首台 H-25 型燃气轮机于 1988 年开始商业运行,额定功率为 28 MW,压比为 14.7,燃气初温为 1 260 °C,热效率为 34.2%,相比于同类型燃气轮机效率提高约 20%^[20-21]。

通过 30 多年不断的技术革新,H-25 型燃气轮机功率等级由 28 MW 提升至 41 MW,效率提升至 36.2%,燃烧初温提升至 1 300 °C,压比提升至 17.9,H-25 型燃气轮机发展历程见图 1。截止到 2022 年,H-25 型燃气轮机已有约 200 台运行业绩,累积运行时间约 750 万 h,技术可靠性已在商业运行中得到充分验证。

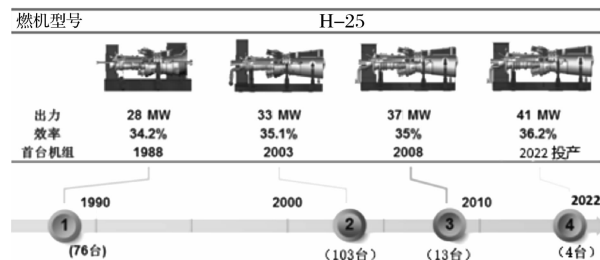


图 1 H-25 型燃气轮机发展历程

H-25 型燃气轮机广泛应用于工业发电领域,燃烧天然气、轻质油及富氢尾气等多种燃料,能在高效率及稳定性的情况下保持较宽的运行范围。其紧凑的结构布局、可现场维护的特点以及高可靠性使之成为工业发电领域理想的燃气轮机产品之一。

2.2 H-25 型燃气轮机组成

H-25 型燃气轮机为单轴工业型燃气轮机,结构组成见图 2。燃气轮机整体采用水平中分结构,拥有 17 级轴流式压气机,涡轮机匣前端 10 缸回流式

燃烧室环绕布置,涡轮由 3 级动力涡轮级组成。机组运行过程中,空气通过进气导流通道进入压气机,被压缩至设计的温度和压力,由压气机导流叶片排出。一部分空气回流上升进入燃烧器提供助燃空气并以气膜的形式冷却燃烧器衬套。另一部分空气通过转子连接段进入动力涡轮区域用于冷却涡轮叶片。燃料通过喷嘴进入燃烧器燃烧,产生高温高压燃气,推动涡轮转动实现热能向机械能转化。涡轮产生的机械能一部分带动压气机转动,另一部分通过输出轴驱动负载设备。做功后的烟气通过排气扩压段排向大气。H-25 型燃气轮机早期曾采用侧排气、热端输出形式。为了减小排气阻力,提高效率,排气段改为直排形式,通过前端输出轴带动负载设备。

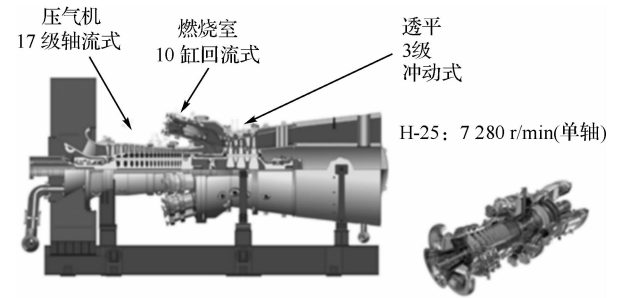


图 2 H-25 型燃气轮机结构组成

2.2.1 压气机

压气机为轴流式,由压气机转子和带定子的缸体机匣构成,结构见图 3,主要包括进气机匣、压气机机匣、排气机匣等部件。

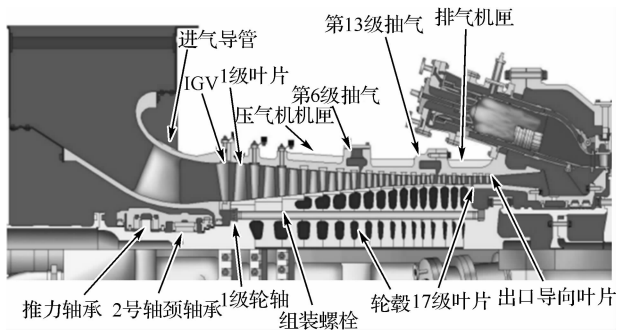


图 3 H-25 型燃气轮机压气机结构图

(1) 进气机匣

进气机匣包括进气管、推力轴承、2 号轴颈轴承、轴承气封等部分。2 号轴颈轴承承载转子径向力,推力轴承起到平衡转子轴向力的作用。

(2) 压气机机匣

第 1 ~ 13 级定子叶片安装在压气机机匣上,该段机匣与进气机匣及下游的排气机匣分别通过法兰

螺栓连接。压气机机匣采用水平中分结构,上下机匣通过法兰螺栓连接。压气机机匣设计两种抽气接口用于压气机防喘振、涡轮叶片冷却及轴承密封。其中第 6 级抽气从位于第 6 ~ 7 级静叶之间的机匣位置抽取,分别引至 2 号轴承密封、排气缸冷却,并通过防喘放气阀排至尾部烟道。第 13 级抽气从位于压气机机匣和排气机匣之间的位置抽取,通向涡轮机匣和排气段,用于冷却第 2 级、3 级涡轮叶片,并通过防喘放气阀排至尾部烟道。

(3) 排气机匣

第 14 ~ 17 级静叶片及出口导向叶片安装在排气机匣上。压气机排气一部分进入后部的环形通道并被引至燃烧器,用作助燃空气。另一部分压缩空气通过转子连接段进入涡轮区域用于冷却涡轮转子叶片。

(4) 进气导流叶片 (IGV)

基于压气机防喘振及平滑加速的目的,进气机匣安装进气导流叶片 (IGV)。IGV 通过调整叶片开度控制空气流量及压比。在起机阶段,IGV 保持在 25.8°开度;75% 额定转速后,叶片开度由燃气轮机转速和环境温度计算的预定曲线控制;额定转速时,IGV 开度达到 58 ~ 60.8°范围并根据负荷的增加逐渐增大;额定负荷状态下,IGV 开度达到 80.1 ~ 82.5°范围。在起机过程中,燃气轮机排气温度也会随着转速、负荷及 IGV 开度等因素的变化升降,最后达到稳定状态。排气温度与 IGV 开度的变化关系见图 4。

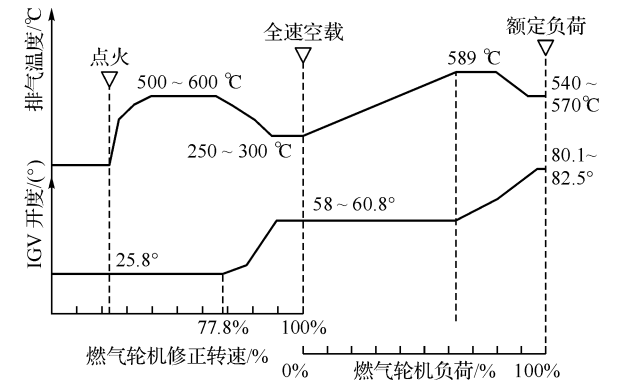


图 4 排气温度和 IGV 开度关系曲线

IGV 开度通过液压执行机构和控制环调节。液压执行机构通过液压油实现导杆的直线运动,并通过曲柄将导杆的直线运动转化为控制环的转动。控制环与叶片通过齿轮组合在一起,齿条齿轮在控制环的驱动下做直线运动,同时带动与之粘合的叶片

行星齿轮转动,从而实现叶片开度的调节。IGV 执行机构见图 5。

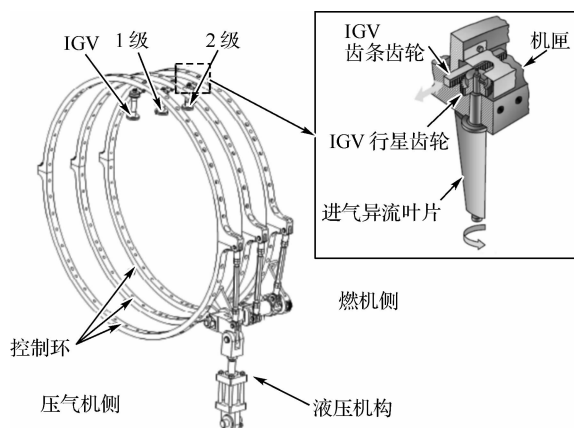


图 5 IGV 执行机构图

2.2.2 燃烧系统

燃烧系统由燃料控制阀、喷嘴和燃烧器组成。燃料经过管道由喷嘴供给燃烧器,在燃烧器内与压缩空气混合燃烧。

(1) 燃料控制系统

燃料由串联布置的速比阀(SRV)和燃料控制阀(GCV)共同控制。燃料首先通过 SRV 调节压力,之后分成五路进入 GCV。GCV 包括控制扩散燃烧的 F1 及控制预混燃烧的 F2-1 至 F2-4,其作用是根据燃气轮机转速及外界负荷要求不断改变阀门开度,进而控制燃料流量。燃料通过 GCV 后分别进入相应的管道,并通向对应的预混及扩散喷嘴燃烧。燃烧系统原理见图 6。

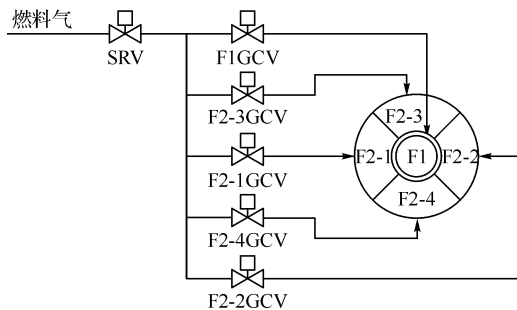


图 6 燃烧系统原理图

(2) 低氮燃烧器

H-25 型燃气轮机配备 10 个低氮燃烧器,环绕压气机排气机匣周向布置,燃烧器间通过交叉火焰管连通。火花塞分别安装在编号为 9 和 10 的燃烧器上,燃料首先由火花塞点燃,随后通过交叉火焰管传播至未燃烧的燃烧器。为了控制和监测涡轮段的排气温度,燃料和空气分别通过 GCV 和 IGV 进行控制,并通过排气道周向布置的热电偶(18 个温度测

点)进行火焰监测。

H-25 型燃气轮机标准低氮燃烧器配有 5 个燃烧喷嘴,分别与 GCV 对应。燃烧器中间位置的扩散燃烧喷嘴对应 F1,作为值班气路,围绕 F1 分布的四个预混燃烧喷嘴对应 F2-1 至 F2-4。燃烧器内部结构见图 7,针对预混燃烧喷嘴,设计预混器和火焰稳定器,以提高燃烧火焰的稳定性。压缩空气进入排气机匣的环形空间后,回流进入燃烧器,首先通过介于衬套与外缸之间的环形空间进入燃烧器,同时进入冷却衬套的外壁和燃烧器外缸的内壁。空气通过衬套孔和缝隙冷却孔进入衬套以冷却衬套内壁,并与燃料混合作为助燃空气。从衬套上游来的空气为燃烧的一次风,下游来的二次风与燃烧完全后的高温气体混合以调节涡轮进口温度。

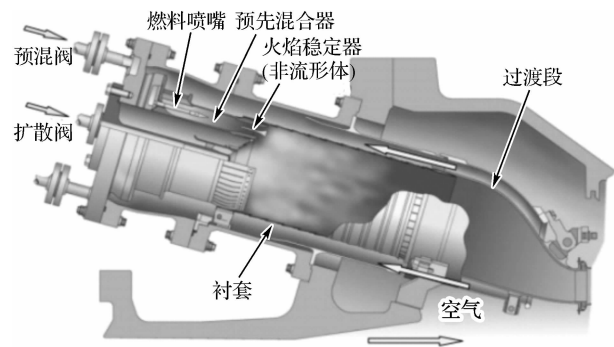


图 7 H-25 型燃气轮机标准低氮燃烧器

(3) GCV 切换过程

燃气轮机在冷吹结束后点火,经过 F2-2 点火和 F2-1 启动加速之后进入空载扩散燃烧状态。当机组运行稳定后,进行发电机并网带载,并通过逐渐增加燃料量(FSR)升负荷。当燃料量超过 F2-1 流量设定点(KD1)时,F2-1 开启,燃烧器增加了 F2-1 喷嘴的预混燃烧。与此相似,当燃料量超过 F2-2 流量设定点(KD2)时,F2-2 开启,随着燃料量的不断增加,F2-3、F2-4 相继开启,直到燃气轮机达到额定负荷状态。正常停机时,GCV 切换流程与起机过程相反,随负荷降低,燃料量不断减少,F2-4 ~ F2-1 相继关闭,直至 F1 切断燃料供应,燃气轮机停机。甩负荷时,F2 直接关闭,燃气轮机空载运行。GCV 切换流程见图 8。

燃料喷嘴按照以下燃烧模式点燃,见图 9,在 GCV 的每一个切换点,预混阀 F2 的开启均会引起扩散阀 F1 气体量减小,造成瞬间的空燃比失调,从而引起燃烧不稳定。燃烧调整目的是在扩散燃烧和预混燃烧之间寻找最佳平衡点使燃烧稳定,同时通

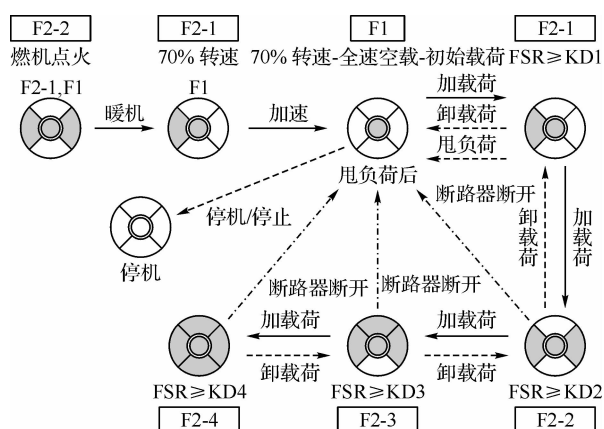
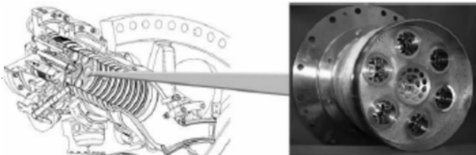
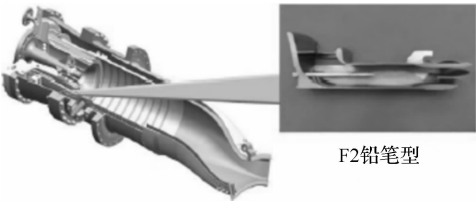


图 8 GCV 切换流程

过控制预混及扩散燃烧的比率降低 NO_x 排放。

为适应多种燃料,H-25 型燃气轮机除了标准低氮燃烧器外,还配备其他多种类型燃烧器,包括多丛簇型、圆锥丛簇型和常规扩散型。燃烧天然气时, NO_x 排放量 $\leq 50 \text{ mg/m}^3$ 。燃烧器类型及特性见表 1。

表 1 燃烧器类型

燃烧器类型	适用燃料	NO _x 排放量/(mg · m ⁻³)	燃烧器结构
多丛簇型	天然气	30	 低 NO_x 和基于快速混合火焰稳定性
	石油气	148	
圆锥丛簇型	天然气	50	
	轻质石油	148	
标准低氮燃烧器	天然气	50	 F2铅笔型
常规扩散型	天然气	50	 双燃料(天然气/轻油) 扩散(石油气)
	轻质石油	600	
	石油气	148	

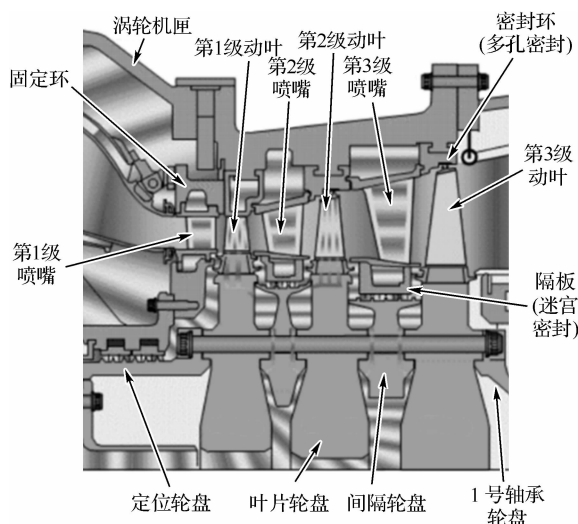


图 10 动力涡轮组成

叶片由压气机排气冷却,压气机排气首先由护环上的孔进入喷嘴,通过喷嘴叶片的中空体和后端冷却槽冷却喷嘴,再从冷却槽排出至热通道。

第2级喷嘴和隔板集成在第1~2级涡轮盘之间,第3级喷嘴和隔板集成在第2~3级涡轮盘之间。喷嘴和隔板均分为24段,每段由前、后端护环支撑,并通过涡轮机匣上的定位销沿周向固定。隔板位于喷嘴内部,正对涡轮转子间隔轮盘面,形成迷宫式密封,起到密封喷嘴的作用,并将气流分为热气体通道和冷却区域,转子轮盘之间的区域分为高压区和低压区,且均可通过冷却空气进行冷却。第2、3级喷嘴和叶片的冷却空气均来自压气机第13级抽气,冷却空气冷却喷嘴叶片后通过喷嘴及隔板上的气孔进入热通道。

动力涡轮转子第1、2级叶片由压气机排气进行冷却。冷却空气首先进入转子内部空腔,再从转子中心孔沿径向穿过叶片轮盘及间隔轮盘之间的缝隙,进入叶片内部冷却气道,最后从叶片顶端排至热通道。高温燃气通过动力涡轮做功后,与来自压气机第6级冷却空气混合,控制排气温度,并从排气段排至大气。涡轮叶片冷却气流图见图11。

2.2.4 转子和轴承

(1) 转子

H-25型燃气轮机转子为单轴结构,包括压气机转子、涡轮转子和中间转子连接件,见图12。压气机转子包括转子叶片和轮盘等部件。第1级转子轮盘与2号轴颈一体,轴颈用于配合滑动轴承、推力轴承、导油器密封、低压气密封组装。第1~17级转子轮盘由周向均布的16个连接螺栓组装在一起。转

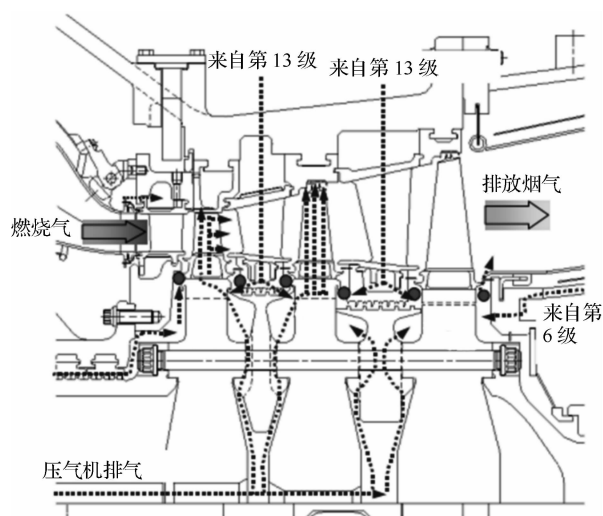


图 11 涡轮叶片冷却气流图

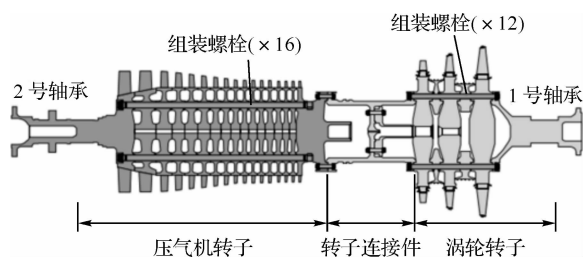


图 12 燃气轮机转子结构

子叶片采用燕尾结构安装到轮盘槽内,并与安装在压气机机匣上的定子叶片交错布置形成空气压缩通道。

动力涡轮转子由叶片轮盘、动叶及间隔轮盘组成,叶片榫头固定在轮盘的树形槽内,叶片轮盘、间隔轮盘及1号轴承轮盘由12个周向均布螺栓组装。动力涡轮转子通过中间转子连接件与压气机转子连接。

(2) 轴承

转子由1号和2号两个滑动轴承及推力轴承支撑,轴承位置见图13。滑动轴承和推力轴承均采用可倾瓦结构用于固定转子位置并承受转子载荷。1号轴承位于排气支撑位置,2号轴承在压气机前部支撑位置,均与转子轴颈配合安装。推力轴承承受高温燃气的喷射推力并在轴向上固定转子位置。

轴承由润滑油进行润滑,润滑油通过供油管进入轴瓦和轴颈,对转子和轴承进行润滑和冷却,并通过机匣导油管进入回油管道。轴承内部壳体上装有挡油板,并通过每个轴承末端的迷宫式油封防止滑油泄漏。

2.3 H-25型燃气轮机技术特点

目前,中小型燃气轮机市场需求主要集中在30

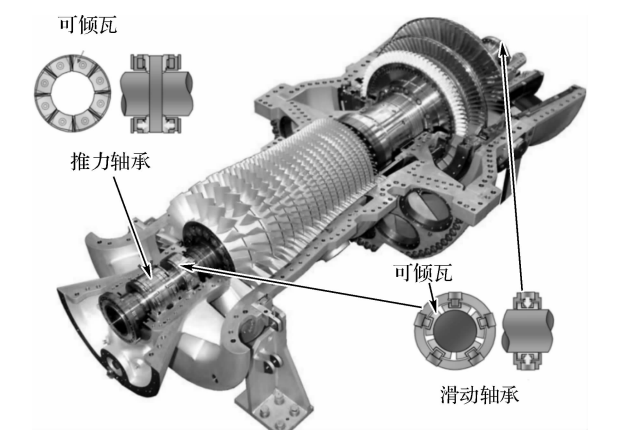


图 13 H-25 型燃气轮机轴承位置图

~40 MW 功率等级,主要机型除 H-25 型燃气轮机外,还包括 GE 公司的 LM2500 系列和 LM6000 系列、Siemens 公司的 SGT-700 和 A35 系列。各机型

表 2 各机型技术参数表^[13,22]

燃气轮机 型号	供货商	燃气轮机 类型	功率/kW	发电 效率/%	热耗率/(kJ· kWh ⁻¹)	燃料量/ (m ³ ·h ⁻¹)	排气 温度/℃	排气流量/ (kg·s ⁻¹)	NO _x 排放量/ (mg·m ⁻³)	输出转速/ (r·min ⁻¹)	大修期/h
H-25 (32 MW)	MHI	工业型	32 115	34.49	10 439	9 656	575	95.5	30	7 280	64 000
H-25 (42 MW)	MHI	工业型	39 832	35.60	10 112	12 306	577	113.5	30	7 280	64 000
SGT-700	Siemens	工业型	31 153	36.12	9 968	8 944	543	95.0	30	6 500	60 000
A35-RB211	Siemens	航改型	32 135	39.40	9 137	8 457	504	94.3	50	4 850	60 000
LM2500G4	GE	航改型	35 324	39.30	9 153	9 312	549	92.9	50	3 600	50 000
LM6000PF	GE	航改型	46 405	40.87	8 808	11 773	453.9	131.4	50	3 600	50 000

H-25 系列燃气轮机的特点如下:(1) 工业型设计,满足连续可靠运行的要求;(2) 排气温度高,更能适用于天然气分布式能源系统及热电联产领域;(3) NO_x 排放满足国标 50 mg/m³ 的要求,最新开发的低排放技术可达到 30 mg/m³;(4) 维护间隔周期长,可现场维护保养;(5) 机组按照模块化设计,安装周期短。

3 H-25 燃气轮机国内技术引进应用

3.1 国内应用业绩

H-25 型燃气轮机首台机组应用于山西清徐县景源热电厂的焦炉煤气热电联产项目中,额定功率为 28 MW,以焦炉煤气为燃料,采用侧排气方式连接余热锅炉,蒸汽量为 60 t/h,综合热效率达 80%。目前,机组累积运行已超过 80 000 h,并现场完成了中修和大修。

2014 年三菱重工整合日立发电事业部成立三菱日立电力系统株式会社(MHPS),703 所与 MHPS 签署 H-25 型燃气轮机的合作协议,并促成了 H-25 (35

燃气轮机在工业发电和石油化工等领域有着广泛的应用,机组累计运行时间均在百万小时以上,机组的可靠性已得到充分的验证。各主力机型的性能对比情况见表 2。

通过技术参数对比可见,相比于航改型燃气轮机,H-25 型燃气轮机发电效率偏低,热耗率较高,基本与同属工业型的 SGT-700 相当。相比于同级别机组,H-25 型燃气轮机排烟温度高,流量大,NO_x 排放可低至 30 mg/m³,更适用于天然气分布式能源系统及热电联产领域。H-25 型燃气轮机采用单轴水平中分结构,生产制造成本低,可以现场拆装,降低了燃气轮机维护费用和时间。大修间隔期在同档机组中最长,达到 64 000 等效小时(EOH),机组的稳定性较好。

MW) 机组在浙江宁波科丰燃机热电厂的应用。该项目采用 H-25 型燃气轮机替换原 6B 机组,以天然气为燃料,直排形式配套双压余热锅炉和纯凝汽轮机组成分布式能源系统,为周边厂区提供电力、蒸汽负荷,起到调峰电厂的作用。自 2015 年 8 月投入运行以来,机组已稳定运行 60 000 h,并完成现场中修。

2016 年以来,703 所携手 MHPS,分别与青岛高新热电有限公司、华润电力(泰州)有限公司、华润电力(珠海)智慧能源有限公司、东莞理文造纸厂有限公司、东莞德永佳纺织制衣有限公司等签订了共 12 台套不同功率等级的 H-25 型燃气轮机发电机组供货合同,2021 年后已有 5 台机组陆续投入商业运行,运行稳定性和效率均达到国际先进水平。H-25 型燃气轮机国内应用情况见表 3。

3.2 技术引进

2019 年 3 月,MHPS 和 703 所下属中船重工龙江广瀚燃气轮机有限公司签订了 H-25 型燃气轮机技术转让合同,内容为 H-25 系列燃气轮机许可证转让,包括 32 MW、42 MW 两种功率等级。许可证授

表 3 H-25 型燃气轮机国内应用统计

年份	燃气轮机型号	运行时长/h	用户	地点	数量
2010 年	H-25 (28 MW)	约 80 000	景源热电厂	山西清徐	1 台套
2014 年	H-25 (32 MW)	—	琥珀(安吉)燃机电厂	浙江安吉	1 台套
2015 年	H-25 (35 MW)	约 60 000	宁波科丰燃机热电厂	浙江宁波	1 台套
2016 年	H-25 (32 MW)	—	青岛能源高新热点公司	山东青岛	2 台套
2018 年	H-25 (32 MW)	约 10 000	华润电力(泰州)有限公司	江苏泰兴	2 台套
2018 年	H-25 (42 MW)	约 3 000	华润电力(珠海)智慧能源有限公司	广东珠海	2 台套
2018 年	H-25 (32 MW)	约 4 000	东莞理文造纸厂有限公司	广东东莞	1 台套
2021 年	H-25 (42 MW)	—	东莞德永佳纺织制衣有限公司	广东东莞	1 台套
2021 年	H-25 (32 MW)	—	大唐睢宁天然气分布式能源项目	江苏徐州	2 台套
2021 年	H-25 (42 MW)	—	岳阳城陵矶天然气分布式能源项目	湖南岳阳	2 台套

权范围包括:燃气轮机的组装、生产、采购、检查、安装、调试、销售及售后服务。通过此次技术转让,可以实现 H-25 系列燃气轮机 100% 国产化,包括国内生产、装配、检测、售后、维修等工作。

H-25 型燃气轮机技术转让工作已经完成技术转化,首台国产 H-25 型燃气轮机完成了整机的国产化制造、总装和样机试验。2022 年 703 所完成了首台国产化 H-25 型燃气轮机样机整套生产和质量见证,并完成整机性能考核试验,目前正在依托国内市场进行示范应用推广。通过 H-25 型燃气轮机技术引进,不但弥补了我国工业型燃气轮机设计、制造技术的短板,而且满足了国内30~40 MW 区域式分布式能源系统的需求。H-25 型燃气轮机及附属设备的国产化生产周期明显缩短,设备生产、制造成本显著降低,机组售后服务也将会摆脱国外厂家的限制。

H-25 型燃气轮机对低热值燃料的适用性强,燃烧技术的引进可为我国自主研发低热值燃气轮机进行技术积累,对全面掌握燃气轮机研发与设计技术具有重要意义。同时 H-25 型燃气轮机 NO_x 排放量为 30 mg/m³,这是化解环境约束、改善大气质量、实现绿色低碳发展的有效途径,同时对推动节能减排具有重要意义。

H-25 型燃气轮机有利于提高天然气分布式能源梯级利用技术,高品位的一次能源发电,低品位的烟气、热水余热用于二次发电和供热制冷,可在一个区域内同时满足用户对电、热、冷等多种用能需求,能源利用率显著提高。目前,703 所基于近年来 H-25 系列燃气轮机发电机组良好的成套业绩,结合 H-25 系列燃气轮机技术转让的有效实施,在国内分布式能源应用需求日益扩大的背景下,推进国产 H-25

型燃气轮机示范应用,H-25 型燃气轮机必将有广泛的应用前景。

4 结论

根据燃气轮机技术发展现状,揭示了国内燃气轮机技术与国际先进水平的差距。在国家能源结构调整背景下,中小型燃气轮机技术引进对打破国外燃气轮机技术垄断、建设现代能源体系及实现节能环保具有重要意义,同时也为打造我国完整的燃气轮机产业体系奠定基础。

根据 H-25 型燃气轮机技术特点和国内应用情况,得到结论如下:

- 1) H-25 型燃气轮机结构简单、效率高,适用于区域分布式能源系统及热电联产等工业发电领域。
- 2) H-25 型燃气轮机能适用于多种燃料,且 NO_x 排放指标低至 30 mg/m³,满足我国节能减排和环境保护的要求。
- 3) H-25 型燃气轮机在国内有大量应用业绩,机组可靠性及稳定性已得到充分验证。
- 4) H-25 型燃气轮机技术引进,补充了国内 30~40 MW 功率等级燃气轮机技术空白,同时机组的国产化生产供货显著降低了设备初投资和运行维护成本。H-25 型燃气轮机将会在国内拥有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 伍赛特. 重型燃气轮机研究现状与技术发展趋势展望[J]. 机电产品开发与创新,2019,32(2):65-67.

[2] 徐慧宁,董洁,殷国富,等. 燃气轮机产业现状与技术发展趋势[J]. 机械工程学会,2016,13(增刊):1-6.

[3] KONTER M, THUMANN M. Materials and manufacturing of

advanced industrial gas turbine components [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117 (3) :386-390.

[4] 李晓堂. 燃气轮机的发展及中国的困局[J]. 航空发动机,2011, 37(3):1-7.

[5] 蒋洪德,任静,李雪英. 重型燃气轮机现状与发展趋势[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5096-5102.

[6] 刘帅,刘玉春. 重型燃气轮机发展现状及展望[J]. 电站系统工程,2018,34(2):61-63.

[7] 王如房. 浅谈燃气轮机发电机组的现状与发展趋势[J]. 能源与节能, 2013,10:83-84.

[8] 娄马宝. 我国燃气轮机工业的现状与展望[J]. 燃气轮机技术, 2001,14(2):2-7.

[9] MAEKAWA A. Evolution and future trend of large frame gas turbine of power generation[J]. Journal of Power and Energy Systems, 2011, 5(2):161-170.

[10] 王平. 燃气-蒸汽联合循环发电系统的现状分析及展望[J], 内燃气轮机与配件,2018, 10:68-70.

[11] 罗亮,肖程波,陈晶阳,等. 工业燃气轮机涡轮叶片用铸造高温合金研究及应用进展[J],材料工程,2019,47(6):34-41.

[12] 牟思南,胡清. 燃气轮机自主研发需国家支持[N]. 中国能源报,2014-12-22(019).

[13] 郭刚,高仕玉. CGT25D 国产管道燃气轮机事故分析及隐患处理[J]. 燃气轮机技术,2019,32(1):43-44.

[14] 刘瑞同. 从 PG6431A 到 PG6581B:简介 MS6001B 燃气轮机的发展历程[J]. 燃气轮机技术,2001,14(4):29-31.

[15] 周建华,刘英. 中国航发燃气轮机发展现状[J]. 航空动力, 2019,4: 25-27.

[16] 孔祥林,田晓晶,程国强,等. 中国首台 F 级 50 MW 重型燃气轮机的自主研制[J]. 天然气工业,2020,40(12):12-17.

[17] 杨强. 中小型双燃料燃气轮机发展现状及应用前景分析[J]. 舰船科学技术,2019,41(2):1-8.

[18] 马强. 中小型燃气轮机应用发展概述[J]. 技术研究,2016,5: 135-137.

[19] 翁一武, 闻雪友. 燃气轮机技术及发展[J]. 自然杂质,2017, 39(1):43-47.

[20] 丁垣. 日本日立公司的新型 H-25 燃气轮机问世[J]. 发电设备, 1989(9):43-44.

[21] 田彦梅. 日立的 H-25 型高效率燃气轮机[J]. 燃气轮机技术, 1990,3(4): 44-45.

[22] 景倩. LM2500 + G4 型燃气轮机在分布式能源系统中的应用[J]. 华电技术, 2013, 35(12):14-15.

H-25 Gas Turbine and Domestic Technology Introduction and Application

Zheng Lusong¹, Zhang Xiaorui¹, Shen Jian², Tang Zhongbin¹

(1. Harbin Guanghan Gas Turbine Co., Ltd., China State Shipbuilding Corporation 703 Research Institute, Harbin 150078, China;
2. China Resources Power (Taizhou) Co., Ltd., Jiangsu Taizhou 225453, China)

Abstract: Based on the development history and technical characteristics of H-25 gas turbine, combined with the development status of domestic gas turbines and the demand for energy conservation and emission reduction, this paper expounds the necessity and significance of H-25 gas turbine technology introduction. On the basis of successful application of H-25 gas turbine in China, domestic production and integration of H-25 gas turbine are realized by introducing core technology of gas turbine, which makes up for the blank of domestic gas turbine in 30-40 MW power level, optimizes the combined cycle system of gas turbine and steam turbine, reduces the initial investment and operation cost of regional distributed energy system, and breaks the technical monopoly of foreign suppliers on gas turbine and after-sales maintenance at the same time, lays the foundation for promoting the adjustment of national energy structure and realizing energy conservation and emission reduction.

Keywords: H-25 gas turbine; technology import; domestic application; distributed energy; gas-steam combined cycle; energy conservation and emission reduction