

78.5536
7JG

78.5536
7JG

《国外机械工业基本情况》参考资料

燃 气 轮 机

第一机械工业部科学技术情报研究所

内容简介 本资料为《国外机械工业基本情况》的燃气轮机部分。内容主要介绍了国外燃气轮机的产品水平、制造工艺、科研工作、应用的技术经济效果以及美、苏、日、英、瑞士等国燃气轮机制造业的生产组织概况。此外，附有国外燃气轮机的性能指标参数等。可供燃气轮机制造业及有关应用部门的科技人员、教学工作者参考。

燃 气 轮 机

燃气轮机基本情况编写组
(内部资料)

*

第一机械工业部科学技术情报研究所编辑出版
机械工业出版社印刷厂印刷

北京市中国书店 上海市科技书店 重庆市新华书店
经 售

*

1980年10月北京

代号：79-57·定价：1.55元

出版说明

党中央向全国人民提出了新时期的总任务，全国从上到下一心一意搞四个现代化。机械工业要适应“四化”的要求，必须为国民经济各部门提供现代化的技术装备。为此，需要研究和学习国外机械工业的先进技术和经验。在这种形势下，我们组织有关单位编写一套《国外机械工业基本情况》参考资料。这项工作第一次开始于1973年，1975年基本完成。这次是第二轮，在内容和范围上都比上次有所充实和扩大。

这套参考资料按专业分册出版。本书为《燃气轮机》部分。主编单位是南京汽轮电机厂（编写第一章综述、第三章产品）、一机部第二设计院（编写第二章主要企业、第四章制造工艺）、上海汽轮机研究所（编写第五章科研工作）。参加编写的单位有：上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂、清华大学等。主要执笔人员是马定秋、方洪祖、徐群照、刘堂炜、程守焘、罗陞汉、冯桐笙、周德震、许仕圣、陈由辛等同志。

一机部科学技术情报研究所

目 录

第一章 综述	1
第一节 燃气轮机技术发展的主要特点	1
第二节 科研重点和发展动向	9
第二章 主要企业	12
第一节 美国通用电气公司	12
第二节 美国西屋电气公司	18
第三节 瑞士BBC公司	26
第四节 英国罗尔斯·罗伊斯公司	28
第五节 西德电站设备联合制造公司	31
第六节 美国索拉公司	34
第七节 美国寇蒂斯·莱特公司	35
第八节 瑞士苏尔寿公司	37
第九节 法国阿尔斯通公司	38
第十节 英国约翰·勃朗燃气轮机工程公司	40
第十一节 日本的燃气轮机制造厂	40
第十二节 苏联的燃气轮机制造厂	42
第十三节 英国燃气轮机叶片精锻厂	43
第三章 产品	47
第一节 产品水平	47
第二节 产品发展的技术政策	55
第三节 典型燃气轮机机组	61
第四章 制造工艺	76
第一节 叶片	76
第二节 转子	82
第三节 气缸	86
第四节 持环和喷嘴组	88
第五节 火焰筒和过渡段	89
第六节 高速重载精密齿轮	90
第七节 加工技术的自动化	94
第八节 装配试验	96
第九节 理化计量检测	104
第五章 科研工作	109
第一节 现代化的科研基地	109
第二节 测试技术	110
第三节 关键技术的研究	111

第四节 高温材料.....	120
第五节 煤气化/燃气——蒸汽联合循环	122
附表1 国外燃气轮机主要性能指标.....	124
附表2 世界船用燃气轮机一览表.....	142
参考资料	154

第一章 综 述

燃气轮机是由压气机、燃烧室、透平三大部件，以及起动、调节、润滑、燃料等辅助系统组成的成套动力装置。从1937年瑞士制造世界第一台工业燃气轮机以来，已有40多年的历史。由于它具有一系列的优点，得到广泛的应用和发展。特别是六十年代中期以后，高温材料、冷却技术、空气动力学研究成果的采用，使其发展更为迅速。据统计，到1976年底，世界工业燃气轮机装机总容量已达22000万千瓦，从1964~1976年，平均年增长率约30%。但近几年在能源危机下发展速度减慢，1976年仅增加5%。其历年增长情况见表1-1。

表1-1 国外工业燃气轮机装机容量增长情况 (万千瓦)

年 份	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
装机总容量	950	1240	1760	2250	3600	5000	6700
年 份	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1980
装机总容量	8400	~11500	~14500	18100	21000	22000	~26000

第一节 燃气轮机技术发展的主要特点

一、向高性能和大功率机组发展，生产以中小功率机组为主

七十年代，各主要厂生产有代表性的大中型燃气轮机见表1-2。

单机功率:	10万千瓦以上
燃气初温:	950~1260℃
压比:	10~30
机组效率:	30~37% (简单循环)
起动时间:	5~10分钟
比重量: 重型	2~4公斤/千瓦
轻型 (航机改型)	<1公斤/千瓦

此外，机组多采用先进的模拟——数字组合调节控制系统，自动化程度高，可远距离操纵，机组的保护系统是双重的，甚至是三重以上，运行安全可靠，可用率达95%以上（调节控制系统的电子化自动化，是七十年代燃气轮机高性能化的重要标志之一）。机组通常是组装成套，运到现场后，可在1~2个月内安装完毕，投入运行。每千瓦装机造价为80~135美元。有的采用单元组装结构，应用孔探仪“视情维护”，检修方便。大修间隔期，航机改型机组达2万小时，工业型机组达5万小时。

国外燃气轮机高性能化和大型化采取的主要措施是：

1. 提高透平初温。

在一定压比配合下，机组的功率和效率随透平进口温度的提高，如图1-1所示。

表1-2 若干先进大中型燃气轮机主要参数

制造厂家	机组型号	额定功率 (万千瓦)	效率 (%)	初温 (°C)	压比	转速 (转/分)	启动 时间 (分)	热力 循环 形式	机组重量		备注
									总重 (吨)	比重 (公斤/千瓦)	
美国GE公司	PG7981	7.16	31.7	980	11.5	3600	10	单轴简单	329	4.6	
	PG9111	8.52	30.8	1005	9.6	3000	15	单轴简单	268	3.14	
	LM2500	2.75万马力	34.4	1260	18	3600	1	分轴简单	6.75	0.25 公斤/马力	
	LM5000	3.93	37	1260	30	3000/3600		三轴简单	25	0.64	
美国WH公司	W501G	8.69	30	924	12.1	3600		单轴简单	125	1.45	
	W1101G	9.79	30.6	1083	11.8	3000	20	"	197	2	
	W1501	14.6	30		15	3000		"			
	TG50	9.26	31	1088	12	3000		"	157	1.7	由意大利 菲亚特制
瑞士BBC	130	7.94	30	950	10.4	3000	15	"	295	3.71	
西德KWU	V94-2	11.4	31.6	950	10.1	3000	4~7	"	302	2.67	
美国UTC	FT50	10.4	35.8	1150	16	3600	5~10	三轴简单	125	1.2	由瑞典斯达- 拉伐尔制
	GT200	9.0	32.5	1115	16	3000	5~10	"	125	1.39	
	FT9	3.3万马力	35.7	1150	18	4000		"			
英国RR	Spey	1.38万马力	34	1030	18	5000		"	9.1	0.66 公斤/马力	
	RB211-24	2.96万马力	34.7	101	18	3000		"			
	Olympus-593	5.5万马力	≈33	≈1200	13	3000		"	40.6	0.74 公斤/马力	
苏联LM3	ГТ-100-750	10	28.6	750	26.5	3000	40	双轴复杂	590	5.9	

提高初温的有效方法，是发展耐高温材料，采用有效的冷却方式及高温保护层。目前广泛用的高温合金(FSX414、N155、In738、X45、U500、U700、U710等)都有较好的高温强度，工艺性和抗氧化性，再配合有效冷却或附加涂层就可进一步提高初温。如美国的PW公司和瑞典的斯达-拉伐尔公司合制的FT-50/GT200机组，用In738合金制成的透平动叶进行空气对流和气膜综合冷却后，透平初温提高为1150°C。据称，即使初温提高为1370°C，其叶片表面温度也不超过815°C。美国GE公司的LM2500机组，对透平1~2级动静叶片采用冷却并涂以钴铬铝钼涂层，把初温提高到1260°C。

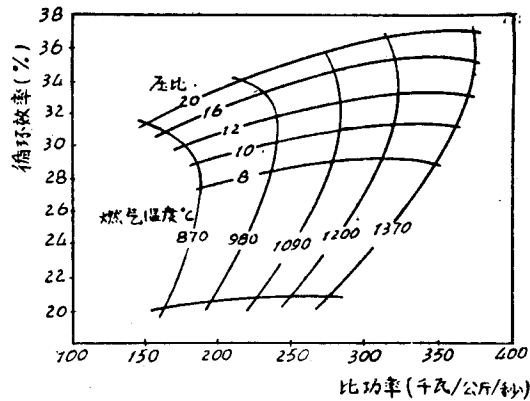


图1 燃气轮机比功、效率和初温压比的关系

2. 提高压比

各主要厂都是在性能良好的模型级和母型压气机的基础上，模化放大和前后加级。七十

年代以来,为进一步增大级压比,防止级数太多,发展跨超音级,将级压比提高为1.4~1.7,机组压比达16~30。为协调高压比压气机各级的气动匹配,往往把压气机前几级静叶设计为可调机构。如LM2500前6级导叶是可调的,改善了压气机变工况性能,扩大了机组平稳运行范围。协调高压比压气机级与级气动性能的另一措施,是根据航空发动机的成熟经验,采用双转子压气机结构,高低压压气机分别用两个转速变化特性各不相同的透平来带动,FT 50机组压比为16, FT9机组压比18, LM5000机组压比高达30等,都是通过上述手段实现的。苏联FT-100-75.机组采用双轴机组,两个单缸压比较低的压气机串联运行,把压比提高为26.5。

3. 采用多燃料、高效率、长寿命的燃烧室

各主要厂的燃烧室,都用自行设计的传统结构型式(单管、双管、分管、环管和环形),通过模化放大或增多燃烧室个数的方法,来适应机组大型化的发展,如GE公司从MS7000系列发展为MS9000系列,把分管燃烧室从10个增为14个。改善火焰筒的材料和冷却效果是提高燃烧室使用寿命的主要措施。鱼鳞孔、挂片式的冷却结构以及在火焰筒内嵌以陶瓷衬砖和使用高温涂层等,可使燃烧室高温元件的寿命大大增加。如FT9初温1150℃,燃烧室火焰筒采用镍基合金(Hastelloyx),内表面涂有金属陶瓷涂层,这种所谓“热障”涂层采用等离子喷涂,外部陶瓷涂层为镁稳定氧化锆,金属部份为钴铬铝钒合金。目前,许多机组的燃烧室,都设计成可燃用天然气、轻油、重油等多种燃料,且可使气体和液体燃料同时燃烧,也可根据运行需要,自动切换。烧重油需进行处理和改善雾化条件。

国外在发展高性能新机组的同时,还注意对原有机组不断完善。如西德KWU公司,透平经920~980℃的试验,把V93-1和V94型机组初温提高了70~80℃,并改进结构,提高机组的功率和效率,如表1-3所示。

表1-3 KWU公司V93、V94型机组的完善

型 号	功 率 (万千瓦)	透平初温 (℃)	压 比	流 量 (公斤/秒)	效 率 (%)	排气温度 (℃)
V93-1	6.71	870	8.8	343	29.4	439
V93-2	7.62	950	9.5	343	29.9	482
V94	9.79	880	10	482	31.1	420
V94-1	10.97	950	10	482	31.4	463
V94-2	11.4	950	10.1		31.6	

应该指出的是,在发展大功率机组的同时,各国对中小型燃气轮机的高性能化也很重视。目前,中小功率机组的用途广,订货多,生产批量大。很多厂家都按高效率、轻型、长寿命、多燃料、多用途的要求进行设计和研制,也用较高的透平初温和压比(已和大型机组相近)以提高机组的功率和效率。索拉公司功率为7900千瓦的火星号机组,透平初温采用982℃,压比为16,效率达32.6%,达到这类机组的先进水平。另外,有些机组(如索拉公司的土星号、人马座机组,苏尔寿公司的S3型机组等)设计成单轴与分轴可方便变换的结构,单轴用于发电,分轴用于驱动,分轴动力透平的转速与压气机透平轴的转速极为接近,如果用于发电,

二轴可合而为一，而透平通流部分几乎不变，这适应了多用途的要求。若干先进的中小功率机组情况列于表1-4。

表1-4 国外若干中小功率机组情况

公司名称	机组型号	轴式	用途	功率 (马力)	初温 (℃)	压比	效率 (%)	重量 (公斤)
索拉公司	MD-4000人马座	单双轴	驱动、发电	3830	871	8.3	25.9	2500
	MD-10000火星号	双轴	驱动	10600	982	16	32.6	7700
苏尔寿公司	S3型	单双轴	驱动、发电	7100	950	8.1	27	27000
航空研究制造公司(美)	JE990-50B	双轴	船用、发电	5600		12	28.8	3170
石川岛播磨	IM300	双轴	船用	2980		12.7	28.6	365
国际工业透平公司	GT601	双轴	卡车	550	1010	7	35.8(回热)	988

二、用途的广泛性

随着燃气轮机向高性能和大型化发展，到七十年代，已作为具有强大生命力的动力机械广泛用于国民经济各部门。燃气轮机和其他动力机械相比，有体积小、重量轻、起动快、造价低、安装周期短、可无电源起动、少用和不用冷却水等一系列优点。目前，除航空发动机全部用燃气轮机外，陆、海领域的应用如表1-5所示。

表1-5 陆海领域燃气轮机的广泛应用

部门	应用项目
国防部门	①舰艇动力；②坦克发动机；③军用紧急备用动力和电源等
电力工业	①应急电站；②调峰电站；③移动电站；④蒸—燃联合循环电站；⑤改造老蒸汽电站；⑥空气蓄能电站
燃化工业	①发电；②输油、输气增压；③天然气液化；④海上钻采平台；⑤油田动力；注水、注气钻井动力等；⑥油气利用；⑦化工流程动力；⑧化工废气余热利用
交通运输	①气垫船、水翼船、集装箱船、油船等动力；②高速机车动力；③重载卡车动力
冶金工业	高炉鼓风、热能综合利用、应急备用动力和电源等
轻纺工业	流程动力、热能综合利用等
企事业单位	机关、学校、医院、电讯、公共场所的应急动力，试验动力，备用电源

据1978年统计，世界上正在运行的3000马力以上的燃气轮机在各工业部门的应用比例为：公用事业发电55%，工业发电7%，工业驱动8%，管线驱动26%，运输（非航空）4%。

在燃气轮机的应用中，发电用的比例最大，发展也很迅速。发电用燃气轮机约占总装机容量容量的50%，而美国又约占其中的一半。目前，美国发电用燃气轮机已约5000万千瓦，占发电总容量近10%，其增长情况见表1-6。

表1-6 美国发电用燃气轮机增长情况

年 份	1971	1972	1973	1974	1975	1980	2000
发电总装机容量 (万千瓦)	36613	39504	43817	48075	52005	66500	
其中燃气轮机容量 (万千瓦)	2196.8	2804.8	3373.9	3977.9	4321.9	6900	
燃机所占比例 (%)	6	7.1	7.7	8.27	8.32	~10 (计划)	20 (计划)

发电用燃气轮机目前主要作为应急备用电源、电网调峰以及满足油田及边远地区的电力需要。在燃料价格便宜的产油区也作为基本负荷机组。由于能源危机石油价格上涨以后，发展趋势是发展热效率较高的燃气——蒸汽联合循环装置。这是提高电站经济性，降低造价和减少大气污染的有效方法，是近年新建电站的常用方式，日益受到重视。联合循环装置的效率可达40~55%，（典型机组见附表1）。

使老的蒸汽电站现代化，国外也采用联合循环装置，有用废热锅炉型的（即将燃气轮机排气进入废热锅炉，产生蒸汽供汽轮机使用）也有用一般锅炉型，充分利用燃气轮机排气的剩余氧气（15~17%），代替助燃用的予热空气进入锅炉炉膛，这种型式适用于蒸汽参数较高的电厂，不需对原有蒸汽电站作大的改动，蒸汽部分和燃气部分可分开运行，锅炉燃料仍可保持固体燃料，是老电站提高出力和效率的简易而廉价的措施。

近年来，燃气轮机用于油气工业和油气输送日趋广泛。在油气工业中，燃气轮机大体上40%用于发电，60%用于直接传动，直接传动主要是管线增压输送，油田注水注气，钻井动力，油井压裂和其他机械传动等。如英国新开发的北海油田，就有近200台燃气轮机投入运行，总功率在106万千瓦以上；为开发西伯利亚等地天然气，苏联先后与西德、英、美等国进行巨额交易，从1974至1977年苏联从国外购进303台功率达332万千瓦的燃气轮机装备增压站。目前用于油气工业直接传动的燃气轮机多为双轴机组和航机改型机组。

燃气轮机用于油气工业多的原因，除它能就地采用丰富的油气当燃料等优点外，另一方面，由于一些传统产油国（如科威特、伊朗等）决定将油田中的油气重新压入油田以最大限度采油或加以利用，不象过去将油气烧掉；1973年至1974年，原油价格上涨了三倍，激发了石油输出组织成员国以外的地区，如北海、墨西哥等展开寻找开发新油气源的活动。特别是近年来有些国家都致力于开发大陆架及海上油气田，北海开发122~152公尺深的海域，海上采油平台每天产油20~40万桶已成现实，现拟进行468~610公尺深的海域作业。予期燃气轮机对更高级、更复杂的海上平台，将发挥更重要的作用；目前以天然气液化来解决出口和运输问题；伊朗、伊拉克、阿尔及利亚等国都在建造液化厂，此外，油气工业中的废气、余热的综合利用等，都扩大了燃气轮机市场。因此，就是在能源危机以后，中东等产油地区的燃气轮机需要量始终是稳定的增长。

从六十到七十年代，苏联、英国、美国和西德等海军装备都朝着舰艇推进燃气轮机化的方向发展。这是由于燃气轮机作为舰艇推进机组有机动性能好，功率大，航速高，振动及水

下噪音小，操纵维护方便，机舱人员少等独特优点。七十年代以后，已由加速机组向全燃化机组过渡。苏联燃气轮机装舰总功率居世界第一位，（1978年约为890万马力），1971年服役的“克里瓦克”导弹驱逐舰，装有8台14000马力的燃气轮机，其“巡航——加速”的推进方式为“燃气轮机+燃气轮机”(COGAG)，航速高达38~40节，被称为“世界最快驱逐舰”。英国于1968年即正式宣布，水面舰艇除“布里斯托尔”号驱逐舰继续采用蒸——燃动力装置外，全部采用燃气轮机推进系统，首先跨入所谓“海军轮机工程的新时代”。美国也认为，不采用燃气轮机，则舰艇性能会远远落后于苏联，1968年以来，也先后宣布100多艘舰艇采用燃气轮机推进。据统计，到1978年止，三十多个国家拥有728艘燃气轮机舰船，装机总数1955台，总功率约2363.6万马力。目前，国外舰用燃气轮机已有40多型，多为航机改型或移植燃气轮机。

三、形成相当规模的生产能力

随着燃气轮机应用的日趋广泛，为适应日益增长的需要，很多国家对发展燃气轮机制造业十分重视。据统计，世界上已有二十多个国家一百多家厂家生产近千种型号的燃气轮机。由于相互竞争兼并，形成了若干个跨国的生产集团。实际上，工业型燃气轮机绝大部分由美国通用电气公司(GE)、西屋公司(WH)和瑞士勃朗·鲍维利公司(BBC)三大集团所垄断。航机改型机组发展也很快，GE公司飞机发动机分部，美国联合技术公司(UTC)和英国的罗尔斯·罗伊斯公司(RR)发展成为控制航机改型燃气轮机的生产集团。据1975年统计，UTC和RR公司的产量仅次于GE公司分别跃居世界第二位和第三位。除上述五大生产集团外，西德电站设备联合制造公司(KWU)和美国的索拉公司(Solar)等也占重要地位。

据报导，目前世界每年燃气轮机的生产能力可达3000万千瓦。应该指出，近年来由于能源危机，各国燃气轮机产量的增长趋势有所减慢，有些工厂的生产能力尚未充分发挥，如GE公司的格林维尔工厂，生产能力为年产60台大型机组，总功率可达300万千瓦以上，但只有1973年生产过59台，而1974年只生产47台；西屋公司的园石工厂生产能力为年产大型机组50台，总功率在400万千瓦以上，而1974年只生产20台，功率仅为160万千瓦。

各国发展燃气轮机生产力，提高劳动生产率的主要措施是：

1. 专业化生产、配套协作和科学管理。

生产专业化是现代化生产的普遍途径，它有利于组织批量生产，采用先进工艺和高效设备，易于加强管理，从而提高劳动生产率和产品质量。各国燃气轮机的专业化生产程度不一，主要按产品、零件、工艺进行专业化生产。近年来为了产品专业化，有些国家投资新建燃气轮机专业厂，如GE公司的格林维尔工厂和依文达尔航机改型工厂，西屋公司的园石工厂，法国的阿尔斯通公司新建大型燃气轮机车间，苏联在伯力边区新建燃气轮机专业厂等。各制造厂家，一般主要进行燃机本体零部件（如气缸、持环、转子、轴承、燃烧室、叶片等）的机加工，主辅机的总装成套，机组的工厂试验等工作，而铸锻毛坯（叶片毛坯、转子锻件、气缸铸件等）则通过协作关系，由本公司专业厂或外公司提供。如GE公司的气缸铸件由铸造中心厂协作，西屋公司的铸件由伯利恒钢铁公司供应，而这两个公司的燃气轮机锻件和叶片精铸毛坯也都集中由休斯顿锻造公司和米斯科精铸公司分别供应。西屋公司还新建温斯顿-西林叶片专业厂。西欧各国的燃气轮机叶片较多的由奥地利鲍勒公司提供，苏联列宁格勒金属工厂的铸钢件分别由涅瓦工厂和乌拉尔重机厂供应等。

国外燃气轮机多为组装式快装机组，即把机组部件和配套产品都安装于集装箱内，以整台或分若干组件的形式提供用户，以缩短安装周期，降低电站造价和提高运行可靠性。这种快装机组的配套产品，如发电机，负荷齿轮箱，进排气消音器，以及起动、滑油、液压油控制、燃料、调节保安等系统的配套产品，种类繁多，均按其专业生产条件由很多工厂进行配套生产，有时甚至跨国供应。

为提高生产效率，分工越来越细，越来越趋于专业化生产。但象燃气轮机这样复杂的成套产品，牵涉到很多专业和部门的协作。专业化分工和生产配套协作中产生的矛盾，依靠科学管理解决之。国外认为，“专业化+协作+科学管理”，才能应付复杂的情况。科学管理非常重要，有时甚至起着决定性作用，有人称为是“科学中的科学”。科学管理工作包括制订计划，确定重点研究课题和主攻方向，协调各研究部门的研究活动，组织生产协作，保证物质供应，学术交流，成果鉴定，搞好情报工作及培养人材等。管理体制是否合理，关系到企业管理的好坏，是各国经济学者注意的中心问题之一。近年来美国最流行的是所谓“矩阵规划结构”。在这种管理体制中，既有按指挥——职能的垂直领导关系（如研究、工程技术、合同、调度等），又有按规划——目标的水平领导关系，即每一产品或某一规划设有一主任负责，管理人员受双重领导。1971年GE公司实行体制改革，实行“执行部制”的管理体制。

科学管理目前已成为一门科学，也是一项很复杂的工作。许多厂家已用电子计算机、信息、和数据处理进行管理。美国西屋公司园石工厂以生产控制线和商业计算机系统来完成生产计划、材料流通监督等工作。还有一个中心计算机系统（DNC），直接控制厂内21台数控机床，中心计算机能按零件编制和存储加工程序，然后送往各机床的数控装置，能告诉工人合理安装零件、选用刀具，采用切削规范以及停车检验加工质量等，工人则可使用设在每台机床旁的阴极管电视机与中心机对话。GE公司的格林维尔工厂也装有管理信息计算机系统，可供销售、生产管理、物资管理、存货控制及会计记帐等，大大强化生产调度和管理，保证生产计划的认真执行。

2. 现代化的技术装备和先进工艺的采用

七十年代以来，制坯技术，加工装配工艺，厂房设施，检测技术等都有较大的发展变化，以适应生产发展的需要。

① 不断改进制坯技术，大搞制坯精化。

叶片毛坯的精化，目前主要采用精锻，精轧，精铸等，形成了一套比较完整的精密制坯技术，能生产无余量和小余量的叶片毛坯，使叶片材料的利用率，从五十年代的20~30%提高到70%左右，机械加工量减少为原来的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{6}$ ，节省了大量的切削加工设备和工艺装备。美国米斯科精铸公司采取一系列措施（如严格控制模具精度，采用专用蜡料，用原子吸收法检查微量元素等）提高精铸叶片质量，透平动叶表面光洁度达 $\nabla 7$ ，静叶达 $\nabla 4$ ，保证了叶型部分的尺寸精度和获得很高的合格率，动叶的合格率达85~88%，一级导叶的合格率达97%。英国RR公司达比精铸厂是西欧目前最大的精铸厂，叶片平均合格率也在85%以上。

燃气轮机叶轮、轴等大型锻件，国外一般采用6000~45000吨的模锻压力机锻造。大型锻压设备对毛坯精化虽有一定效果，但投资大，建造周期长。故国外发展了多向模锻、高温及等温锻造、粉末等温超塑性锻造，以及联合制坯等新工艺。美国休斯顿公司安装的二万吨多向模锻压力机，对燃气轮机叶轮等大锻件，只需一次加热，就可一次锻造成型，加工余量

控制在6毫米以下。多向模锻是挤锻结合的变形工艺方法,尤其适合于形状复杂的锻件和锻造温度范围窄的难变形合金。美国PW公司以1N-100高温粉末合金,锻造航空发动机的高压压气机轮盘和涡轮盘,其优点是,能锻造用普通方法难以锻造的高强度低塑性铸造合金,锻造尺寸精确,表面光洁等。

② 广泛采用数控和专用机床设备,提高工效和质量,实现生产自动化。

七十年代以来,数控机床在燃气轮机制造厂广泛应用,如美国GE公司的格林维尔厂的数控机床,占金切机床的36%;西屋公司在莱斯特老厂和园石新厂生产燃气轮机部份,备有数控机床62台。除叶片外,燃气轮机的生产方式主要是单件小批,对实现生产自动化,数控技术起了重要的作用。在国外,轴、叶轮、气缸等的加工很多厂家都采用数控车床,数控铣镗床,既实现生产自动化,又提高加工质量和加工效率。GE公司压气机和透平叶轮均用数控立车加工,精度达0.025毫米;加工工时为普通机床的1/3;西屋公司的园石工厂,采用十几台数控机床组成叶轮和轴的加工中心,叶轮型面采用专用数控双头卧式端面车床,压气机叶轮加工每只只需4小时;为适应薄壁轮盘的生产需要,防止加工变形,最近西德生产DPK 1250型数控双面车床,盘的整个型面在一次装夹中即可加工完毕,加工一个盘约5~10小时。以铣镗床组成的气缸数控加工中心,已广泛应用,如英国RR公司共有五台加工中心。用OM3五座标加工中心加工RB211的中机匣,17小时可完成一件,为普通机床加工时间的1/6,机床的重复定位精度可达0.005毫米。

叶片加工也用专用高效加工机床和组织流水线生产。如RR公司所建八、十、十二、十九工位的压气机叶根自动拉削生产线五条,实现了叶片加工自动化,生产率为120件/小时。透平纵树形叶根各国多用强力成型磨削,自动化程度较高。西屋公司采用全自动流水线加工纵树形叶根和叶顶,流水线由十台数控机床组成,由一台电子计算机集中控制,每小时加工12~20片。英国RR公司采用电解加工代替传统的叶片型面加工方法,每只叶片的加工时间从1小时缩短为9分钟,加工精度达 ± 0.25 毫米。此外,气冷透平叶片小孔的加工,各国以电解打孔,电脉冲打孔,电子束和激光打孔等新工艺。RR公司以计算机控制的电子束打孔机,可打直径0.076毫米的孔。

在装配工艺方面,也广泛用电子计算技术和数控装配。叶片在叶轮上的装配位置,以及叶轮在转子上的最佳装配位置,由电子计算机计算确定,以使整个转子的残余不平衡量最小。西屋公司采用转子数控装配台,转子套装时,从电炉取出叶轮到把叶轮红套在轴上,都用机械手来完成。

在检测方面,随着电子技术应用的扩大,自动化程度也大大提高。1977年美国本迪克斯公司为美国空军大修厂提供的叶片荧光检验自动线,每小时可检验300个叶片。自动线由一台微型计算机控制,装有摄像机对叶片扫描,扫描数据用计算机处理,评价,判定叶片质量并自动剔出不合格的叶片。用计算机控制的三座标测量机,大大提高了复杂零件精度检测的效率,如一个齿轮箱的检查,用传统的方法需用5小时,而用计算机控制的带有数据处理的三座标测量机仅需27分钟。

此外,国外一些新建制造厂,还有车间大面积的空调,机床间设有气垫运输平台,以及自动排屑装置等。

第二节 科研重点和发展动向

各国的主要厂家，为提高产品的竞争能力，都很重视试验研究工作，而新建和扩建了试验研究基地。如GE公司的斯坎奈克特迪燃气轮机专业研究室，西屋公司的莱斯特大型燃气轮机发展中心等，采用先进的测试技术，开展关键技术的试验研究。在能源危机 and 环境保护的严格要求下；国外关键技术的研究，主要是如何进一步提高机组效率，燃用多种燃料，减少环境污染以及增大功率，简化操作维修等。

为了进一步提高机组效率，研制高温材料，改进冷却技术以提高燃气初温，研制高压比的跨超音级，改善级间匹配，以提高机组压比，以及对回热，联合循环，能量综合利用等进行研究；为了使燃料多样便宜，同时限制污染和腐蚀，对重油处理，煤的气化，使用核燃料闭式循环，低污染燃烧室，注汽以降低排气中的 NO_x 的含量等进行研究；为了简化操作，提高可靠系数，很重视调节控制系统的研究。发展控制概念，试验和发展调节系统的敏感元件和测试设备。对采用电子计算机进行燃机状态分析，主要部件事故报警处理系统和最佳功能控制进行研究等。这些研究课题，牵涉到设计，工艺，材料等许多部门和行业。因此，对一些综合性很强的研究课题，国外往往组织公司内外，甚至是国际间的协作。

燃气轮机发展的若干技术动向如下：

1. 高温材料

燃气轮机高温部件——涡轮叶片材料系由镍基，钴基或钛基等高温合金制造。其工作温度用到 $900\sim 950^\circ\text{C}$ 左右。为了进一步提高它们的工作温度，近几年来，各国十分重视高温材料的研究，项目有：限制微量有害元素的含量；定向凝固共晶合金；耐剥落的高温合金涂层；高温难熔纤维和基体金属结合之复合材料；粉末冶金制造工艺以及高温陶瓷材料等。

陶瓷材料作为叶片等高温部件，有原料来源丰富，价格便宜，耐高温，抗氧化腐蚀等优点。目前研制较成熟的为氮化硅(Si_3N_4)和碳化硅(SiC)等。据报导，这种材料在不用冷却时，可把透平初温提高为 1370°C 。已发展脆性材料零件的设计计算方法，及热模压法，反应烧结法等制造工艺。日本东芝综合研究所制成的高温高强度陶瓷氮化硅，采用钇氧化物和氧化铝组合的烧结助剂。在 1800°C 左右加压到 $300\sim 500$ 气压烧结成型，晶粒致密。对 $3\times 3\times 30$ 毫米的新陶瓷进行三点弯曲强度试验结果，在常温下的强度为 123.7 公斤/毫米²，在 1000°C 下为 113.3 公斤/毫米²，在 1200°C 下为 100 公斤/毫米²，在 1900°C 下为 90 公斤/毫米²。日本丰田汽车工业公司和东京芝浦电气公司共同试制成的陶瓷叶片，尺寸为宽 13 毫米，高 12.5 毫米。（是对汽车低污染燃气轮机进行研究计划的一部分）美国能源发展署ERDA1977年的陶瓷研究规划，以造出商用陶瓷零件的燃气轮机为目标。西屋公司已对氮化硅和碳化硅制成的全尺寸动叶在 1200°C 和 1375°C 下做了模拟透平工况的静态试验，计划于1980年在燃气轮机中应用。PW公司也拟在FT9机组中采用空心的陶瓷静叶和金属陶瓷涂层动叶，并把透平初温提高为 1370°C ，叶片寿命超过 10000 小时。

2. 冷却技术

研究高温材料的同时，各国普遍重视透平冷却技术的研究。空冷技术已广泛应用。美国PW公司指出，采用叶片发散冷却，透平初温可提高到 1800°C 。美国CW公司从1950年开始研究叶片发散冷却，从理论上和工艺上都获得成功。然而叶片水冷技术，尤其动叶水冷，因

为密封难以解决，还处于试验研究阶段。

有人认为，初温 1370°C 以上时，高温水冷燃气轮机比用陶瓷来防护高温腐蚀，更有商用价值。采用水冷（或液态金属冷却方式）希望能使燃气初温提高到 2000°C 左右。目前对叶片的冷却结构，工艺及热应力进行广泛试验研究。GE公司制订了水冷叶片的远期规划。1973年该公司制成初温为 $1600\sim 1900^{\circ}\text{C}$ ，压比为16，2000千瓦水冷透平试验装置。试验表明，动叶水冷结构采用开或循环（即冷却水经叶片冷却通道后流入主气道），有利于叶片冷却通道的布置和应力状态。该公司计划在1981年试制全尺寸水冷透平，开展台架试验；并计划于1980年设计高温水冷联合循环燃气轮机，初温为 1450°C ，设计效率可达50%以上。

3. 煤气化燃气——蒸汽联合循环

根据能源选择研究部（WAES）的报告，在1973年前的十年中，世界石油平均增长率约为6%，1975年的增长率约为3%，预计从1978~2000年为1.5~2.5%；到2000年石油需要量可达7500~9300万桶/天，而世界上石油的可采埋藏量估计为20000亿桶以上。WAES认为，勘查出的埋藏量每年也有所增加，其增加率为1000~2000万桶/年，从需要的增长和勘查埋藏量增长的分析，可以得出这样的结论：从1985~1995年世界的石油生产量将达到顶点，且石油的供给量总会感到不足。天然气是一种洁净、使用方便的燃气轮机燃料，世界的埋藏量丰富，约645000亿立方米。预计今后25年产量不会达到高峰（1977年世界产量约为14700亿立方米）。WAES认为，其增长率缓慢，主要是天然气产地离消费地甚远，输送成为技术的关键。而煤的世界储量为20~30万亿吨，按目前世界年产量30亿吨及开采增长速度计算，可供开采5400年以上。故煤是长期能量供应的大型能源。

近年来，石油价格猛涨，利用煤气化作为燃气轮机的燃料深为人们所重视。有人认为：如果煤能作为燃气轮机的燃料，燃气轮机就能成为能量供应的主要动力机械。1972年西德罗能的凯勒门电站，采用7.4万千瓦燃机和9.6万千瓦汽机的联合电站，为世界上第一个用煤化气的电厂，至1976年已运行7300小时，起动了500多次。煤气化由五台鲁奇气化装置产生，适合燃气轮机工作。这种电厂为燃气轮机采用煤作为燃料开辟了新的途径，引起了普遍注意，已成为当前研究的重点课题之一。美国、西德、日本和英国都积极的开展这方面的研究工作。美国能源研究发展署制订的庞大科研计划中，1978~1980年由政府投资4000万美元进行26个项目的研究。参加该项研究计划的负责单位还有西屋公司、寇蒂斯-莱特公司（CW）和UTC公司等，计划1981年功率为87.5万千瓦的三级沸腾气化炉燃气——蒸汽联合循环电站投入运行，电站效率为41%。CW公司还负责设计100万千瓦煤气联合发电装置，燃气初温采用 1757°C ，电站效率为50.6%。日本也进行20万和50万千瓦级的装置设计。据称，从效率数据说明其经济意义极大。煤炭技术研究所受通产省的委托，进行煤气炉的机能和效率的试验研究。

直接烧煤的“流化床”（沸腾床）燃烧系统用于燃气——蒸汽联合循环也很引人注目。在流化床燃烧器中，煤加压燃烧产生的燃气直接带动燃气轮机，并加热蒸汽轮机所需的蒸汽。这种系统的优点是：加入流化床的石灰石或白云石能除去燃料中90%的硫，且燃烧发生于相对较低的温度，灰份挥发较少， NO_x 的排出物也较低，符合目前环境保护的规定。

4. 燃气轮机高温气冷反应堆

据统计，至1977年底，全世界核电站的装机容量已超过1亿千瓦，占各种电站总容量的6%左右，每年可节煤约3亿吨。正在建造和订货的核电站共达6亿多千瓦。预计到2000年

全世界核电站装机容量将达13~16.5亿千瓦,占那时电站总容量的35%以上。美国、日本原子能电厂发展计划如表1-7所示。美国至2000年,核电站将占电站总容量的37.8%。

表1-7 美国、日本原子能电厂发展计划 (万千瓦)

国 别	1967	1977	1980	1985	1990	2000
美 国	190	4245	8220	20500	38500	100000
日 本	17	743	1700	4900	8400	15700

核能资源丰富。虽然目前核电站中主要用铀²³⁵作燃料,由于铀²³⁵在铀中仅占0.7%,故在经济上合算的铀矿石资源只和石油资源差不多,但随原子能利用研究的深入,钠冷快中子增殖堆以及重氢的核聚变的应用不断取得新成果。据计算,把地球上铀所含的裂变能充分利用,按每年用500亿吨煤计算,可用几十万年。如充分利用海水中重氢所含的聚变能,足够人类用上一亿年。因而核能是长期大规模代替有机燃料的能源。

燃气轮机高温气冷反应堆,是六十年代末期发展起来的。它是由高温气冷反应堆和闭式循环氦气轮机的联合装置,燃气轮机循环中工质的氦气就是反应堆的冷却剂。由于这种核反应堆的热效率高,没有一、二次回路之间的大型热交换器,燃气轮机的尺寸可做得较小,以及氦气不易感染放射性和腐蚀燃气轮机元件等。因此,国外认为:今后原子能发电动力,有可能向燃气轮机高温气冷反应堆的方向发展。因而受到各国的高度重视。据报导,欧洲对燃气轮机高温气冷反应堆有广泛的规划,参加西德和瑞士研究规划的,有六个厂家和两个国家研究中心。美国通用原子能公司也参加签订协议。该公司已得到美国能源研究发展署,几家电气公用事业公司和厂家的参加和支持。当前的工作正由通用原子能公司,联合技术公司和联合工程建筑部门协同完成。其联合设计的干冷式燃气轮机高温气冷堆的参数为:反应堆的功率为300万千瓦,透平初温825℃,压比2.5,发电功率120万千瓦,电厂效率为40%。

5. 磁流体发电和高温燃气轮机热能综合系统

据报导,日本拟于1978年发展燃气初温为1500℃的高温燃气轮机,是日本工业技术院1978年执行的节能技术发展规划——“月光计划”的核心问题。该院计划将目前正在发展的磁流体发电系统与高温燃气轮机,蒸汽发电装置,介质发电装置,以及公用空调系统联系起来。磁流体发电的高温气体的温度计划为2700℃,其废气约1500℃排入高温燃气轮机作功,燃气轮机的排气温度约700~800℃供给蒸汽发电装置,然后废气的温度降到300℃左右,再用于介质发电设备,空调系统和热水供应系统。据称,这种系统的效率可达70%,比目前热电站的效率75%。

第二章 主要企业

第一节 美国通用电气公司

美国通用电气公司简称GE公司，是世界上生产燃气轮机最大的公司。它有生产航机改型燃气轮机的飞机发动机分部（俄亥俄州辛辛那堤）和生产重型燃气轮机的燃气轮机分部。燃气轮机分部设在纽约州斯克奈克特迪市，下设两个燃气轮机专业厂，一个是老厂，即斯克奈克特迪厂，主要生产MS5000系列以下中等功率的燃气轮机；另一个是新厂，即南卡罗莱纳州的格林维尔厂，主要生产MS7000系列以上大功率的燃气轮机。此外，还有五个燃气轮机服务修理工厂，分别设在得克萨斯州豪斯登城，犹他州盐湖城，俄亥俄州辛辛那堤城，宾夕法尼亚州费城，伊利诺斯州芝加哥市。另外，在纽约、盐湖城和豪斯登城设有燃气轮机仓库。

GE公司1945年开始以TG-180（J35）航空发动机为母型设计和制造工业燃气轮机。三十多年来已建立完整的产品系列。燃气轮机分部的产品有MS9000、MS7000、MS5000、MS3000、MS1000、五个系列。飞机发动机分部的产品有LM1500、LM2500、LM5000等。这些产品采用高参数、简单循环、大焓降的冲动式透平级、有效的空气冷却技术，使机组具有效率高、结构简单、运行可靠等优点。

GE公司与国外许多燃气轮机公司结成“制造伙伴”，如法国阿尔斯通公司、意大利新庇隆公司、西德AEG公司、日本日立公司、英国约翰·勃朗公司、荷兰汤姆逊公司、挪威克瓦奈布鲁公司、日本三井造船及石川岛播磨等都是GE公司的“制造伙伴”。GE公司与这些公司签订技术合作协议的内容主要包括：

（1）GE公司向“制造伙伴”公司“免费”提供所有软件，即生产图纸、说明书、总性能、各种标准、指导手册、外协件定单、工艺资料、质量控制文件、材料检验标准、现场安装资料、零件更新手册、建议备件等等。

（2）GE公司负责向“制造伙伴”公司提供硬件，其中包括转子及所有叶片和轮控盘等关键部件。这些部件由GE公司控制生产，每套硬件出售给“制造伙伴”公司的价格为整套机组价格的25%~30%，其中也包括软件费、提成费、研究费和专家费。

（3）“制造伙伴”在生产过程中必须接受GE公司的产品质量检验，燃气轮机试车的数据需报给GE公司，由该公司确定产品是否合格。

除生产上建立协作关系外，GE公司还与一些“制造伙伴”，进行产品设计的技术合作，如与日本日立公司合作，在MS7001单轴60赫5万千瓦发电用燃气轮机基础上发展了MS7002分轴5~6万千瓦燃气轮机，可作为50赫发电和其他动力用。MS7002型燃气轮机在美国不生产，由日本日立生产，但转于生产仍然控制在GE公司手里。GE公司还与法国阿尔斯通公司共同设计了MS9001单轴50赫功率8.5~9万千瓦的发电用燃气轮机，法国阿尔斯通公司生产90%的零部件并总装试车，而美国GE公司则控制10%的关键零件。除以上两个特例外，其余产品均为GE公司单独设计。