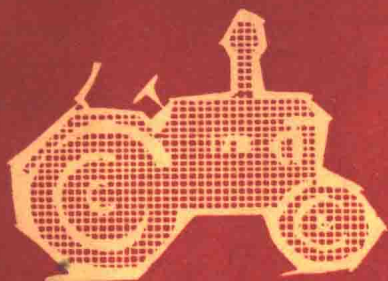


燃气轮机及其应用

楊光海編著



机械工业出版社

本书討論的是非航空用燃气輪机。书中首先叙述了燃气輪机的热力循环和基本结构,并简单介绍了世界各主要工业国家生产的燃气輪机的特点;接着重点闡述了燃气輪机在电力、石油、冶金、化工、铁路、船舰、汽車、拖拉机以及輔助动力等各个领域内的应用情况和运行特点;最后討論了燃气輪机技术中的几个关键問題和燃气輪机发展的趋向。

本书主要讀者对象为动力机械制造部門和电力、石油、交通、化工等使用部門中对內燃机、汽輪机有一定了解而对燃气輪机不够熟悉的一般工程技术人員,以及具有一定工程基础知識的技术管理干部。

燃 气 輪 机 及 其 应 用

楊 光 海 編 著

*

机械工业出版社出版 (北京苏州胡同 141 号)

(北京市书刊出版业营业許可証出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印張 $12 \frac{4}{16}$ · 插頁 3 · 字数 315 千字

1966 年 4 月北京第一版 · 1966 年 4 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,900 · 定价(科六)1.90 元

*

統一书号: 15033 · 3945

目 次

绪论	1
第一章 燃气轮机的热力循环和性能	7
§ 1-1 基本工作原理	7
§ 1-2 最简单的理想热力循环	8
§ 1-3 实际的热力循环	9
§ 1-4 提高燃气轮机效率的途径	11
§ 1-5 回热式燃气轮机循环	12
§ 1-6 再热式和中间冷却式燃气轮机	15
§ 1-7 结构因素对效率的影响	17
§ 1-8 热力循环对空气流量的影响	20
§ 1-9 变工况性能和机组各种布置方案	21
第二章 基本类型和结构	29
§ 2-1 基本类型	29
§ 2-2 基本结构概述	32
§ 2-3 透平	36
§ 2-4 压气机	48
§ 2-5 燃烧室	57
§ 2-6 回热器	70
第三章 各国燃气轮机简介	80
§ 3-1 概述	80
§ 3-2 瑞士	80
§ 3-3 英国	89
§ 3-4 美国	94
§ 3-5 苏联	98
§ 3-6 其他国家	104
第四章 燃气轮机的应用	116
§ 4-1 燃气轮机和柴油机、汽轮机动力装置的比较	116
§ 4-2 燃气轮机在电力工业中的应用	123

IV

一 固定电站	123
二 流动电站	135
§ 4-3 燃气轮机在石油工业中的应用	145
一 增压站	145
二 炼油厂	154
§ 4-4 燃气轮机在冶金和化学工业中的应用	159
一 冶金工业	159
二 化学工业	171
§ 4-5 燃气轮机在铁路机车方面的应用	174
§ 4-6 燃气轮机在船舶动力方面的应用	193
§ 4-7 燃气轮机用于汽车、拖拉机、发动机和小型辅助装置	207
一 汽车和拖拉机	207
二 小型辅助装置	216
第五章 燃气轮机技术中的几个问题	223
§ 5-1 材料	223
§ 5-2 冷却	236
§ 5-3 燃料	250
一 液体燃料	251
二 固体燃料	261
第六章 燃气轮机的发展	271
§ 6-1 发展简史	271
§ 6-2 燃气轮机的发展趋向	275
§ 6-3 燃气轮机向大功率发展的途径	281
§ 6-4 蒸汽-燃气联合循环	290
§ 6-5 封闭式燃气轮机及它在原子能动力中的应用	310
附录	328
主要参考文献	388

緒 論

燃气轮机是一种新型动力装置。从 1939 年第一台 4000 千瓦电站燃气轮机在瑞士新堡城 (Neuchâtel) 正式运行算起, 至今不过二十五年^①。姑不论已有 200 年历史的蒸汽机, 就是同十九世纪末叶发展起来的汽轮机和往复式内燃机相比, 燃气轮机要算是年轻的。但由于它具有重量轻、体积小、操作灵活、维护简便、可以不用冷却水、建设费用低等重要优点, 所以问世以来, 发展非常迅速。据不完整的统计, 1952 年几个主要工业国的非航空燃气轮机拥有量约为 60 万千瓦; 到 1957 年就猛增为约 300 万千瓦; 到 1962 年更跃为约 800 万千瓦。十年之内增加了 12 倍强, 平均每年递增约 30%, 相当于世界发电设备年增长率的 4 倍。而在 1962 到 1963 年的一年之内, 这个增长率又提高为 40%, 使世界燃气轮机总容量超出了 1100 万千瓦 (1964 年初统计)^②。

当今至少有 20 个国家, 包括各主要工业国的 100 多个企业从事燃气轮机的生产。

燃气轮机的应用几乎已遍及各个主要国民经济部门。可以说没有别种原动机有燃气轮机那么多多样化的使用方式。除去在航空部门已经取代了往复式内燃机成为最主要的航空发动机而外, 在本书所阐述的陆用和船用领域内, 燃气轮机有以下几项主要用途:

(1) **电力工业中** 燃气轮机广泛用作尖峰负荷和备用机组, 以及移动式发电装置如列车电站、快装电站等。利用其废气取暖、供热的热电两用燃气轮机, 在中小型热电站中承担基本负荷的也不鲜见。根据 1962、1963 两年统计资料来看, 新装机组容量 60% 以上用于这个领域。

(2) **石油 (天然气) 工业中** 燃气轮机广泛用于:

A. 拖动石油 (天然气) 管线增压设备——增压油泵和天然

① 该机由瑞士布朗·波维利公司 (Brown Boveri Co. 简称 BBC) 制造。

② 参考美 Gas Turbine 1963, 7/8 月; 1964 年 4 月。

气压缩机等；

B. 拖动油井高压注水泵或高压压气机；

C. 炼油厂中拖动压气机供给流程所需大量压缩空气，并燃用流程产生的气体燃料——作为“流程”燃气轮机。

随着世界石油（天然气）工业的不断发展，这个领域内使用的燃气轮机数量正在迅速增加。据近两年的统计，新装机组容量约有12%以上用于此。

（3）冶金和化学工业中 主要作为“流程”燃气轮机使用。在冶金工业中，有燃用高炉煤气、拖动高炉鼓风机的燃气轮机；在化学工业中，大多用在化学流程中需耗用大量压缩空气同时流程中又能产生大量高温气体或气体燃料的场合，如氮肥工业中制备弱硝酸的某些流程。

（4）铁道运输业中 作为大功率的机车动力装置已经获得一定的成功。虽然目前台数不多，但有一定的发展前途。

（5）船舶业中 用作快速舰艇的加速机组或主机已相当普遍。特别是近两年来有飞速的发展，新装机组容量中近10%用于这个目的。

（6）汽车和小型辅助动力 1962年装备着燃气轮机的小轿车已经问世。有人甚至预言，80年代的汽车将是燃气轮机的天下。燃气轮机拖拉机也正在试用。作为小型辅助装置的燃气轮机数以千计，它们的用途多种多样，难以尽述，如起动航空发动机、拖动消防泵、高频发电机、小型压缩机、钻井装置等等。其容量估计占总数的15%左右。

以上是国外的现况。至于我国燃气轮机生产，目前还刚开始。我国石油的基本自足，为我国燃气轮机的发展提供了牢固的物质基础。随着石油和天然气采集和炼制事业的迅速扩大，在石油工业中使用燃气轮机的前景也是良好的；为了满足国内大型建设工地的电力需要，建立移动式燃气轮机电站是比较理想的办法；而在东北、西北等寒冷或缺水的地区，采用燃气轮机车作干线货运

也有其独到的长处；至于作为尖峰或备用发电设备，随着电网的扩大，负荷不均率的增加，在不少地区都是紧迫需要的。

燃气轮机技术近十年来突飞猛进。从以下主要指标可以反映出当前燃气轮机技术的世界水平。

(1) **单机容量** 已制成的最大机组是 5 万千瓦电站燃气轮机，由苏联哈尔科夫透平厂制造。正式运行的最大机组则是瑞典斯塔尔·拉伐尔公司生产的 4 万千瓦电站燃气轮机。正在设计或试制的最大机组要推美国柏莱特·惠尼飞机公司用 8 台 J-75 型喷气发动机拼装而成的 14 万千瓦备用发电机组(预定 1965 年投入运行)，和苏联列宁格勒金属厂设计中的 10 万千瓦发电燃气轮机。

最大的燃气轮机电站设在加拿大的孟港 (Port Mann)，总容量为 10 万千瓦，由四台瑞士 BBC 2.5 万千瓦机组组成。

最小的燃气轮机功率只有几千瓦，像美国生产的一种透平迈特型 (Turbo mite) 高频发电机组，功率为 7 千伏安。

(2) **温度水平** 使用寿命较短 (500~1000 小时以下) 的小型装置中，燃气初温有高达 950°C 的，像美国爱立生 250-C2 型 250 马力燃气轮机^①。在长寿命 (5000~10000 小时以上) 的较大机组中，燃气初温限于 850°C 以下。

(3) **运行可靠性** 燃气轮机被认为运行不可靠的时期已成过去。记录表明，燃气轮机运行可靠性不仅胜过柴油机，甚至还优于蒸汽动力装置。像产量最大的美国通用电气公司的燃气轮机，凡作长期运行的，其设备利用率平均为 98%，强迫停机时间不到 0.5%。英国电气公司的产品，设备利用率达到 99%。而在现代大型汽轮电站中，设备利用率一般很难超出 95%。

燃气轮机已经有累计运行 10 万小时的记录，它是 BBC 安装在美国炼油厂的雏型燃气轮机所创造的。较大型的装置中，像美国西屋公司的第一台燃气轮机和 BBC 为卢森堡某钢厂生产的一台 5400 千瓦高炉煤气轮机，都已累计运行了 6 万小时以上。

① Allison Div. 是通用汽车公司的分公司。

4

(4) **单位重量** 燃气轮机的重量随用途、结构设计、热力系统的不同而有很大差别。大体上,短寿命的轻型机组,单位重量约在 0.5~2 公斤/千瓦左右;而长寿命的机组,则为 5~20 公斤/千瓦。跟同容量、同用途的汽轮动力装置(包括锅炉、汽轮机)相比,燃气轮机往往要轻50%以上;比柴油机也轻很多。

(5) **操作性能** 小型燃气轮机通常可在 15 秒到 2 分钟之内由冷态起动到满载;大型机组则约需 10~30 分钟。

由于系统比较简单,需要控制的参数较少,燃气轮机运行操作人员一般要比汽轮动力装置少一半以上,因而也比较容易实现自动化。早在 50 年代中期,全盘自动化的燃气轮机电站就开始出现。上述孟港的 10 万千瓦电站就是从几十公里外的地方遥控的,平日电站厂房经常锁上。

(6) **维护性能** 从维护费用看,燃气轮机由于磨损件少、检修间隔很长、润滑油耗量极少,所以要比柴油机省得多。一般约需 0.0075~0.025 美分/千瓦·时^①,只及柴油机的 1/10。从检修间隔看,像上述瑞典 4 万千瓦机组预定的大修间隔为 3 万小时,一般大型固定机组,也在 1~2 万小时之谱。

(7) **建设费用** 正常生产的燃气轮机,如果采用简单循环,其造价随机组容量的不同,变化于 50~120 美元/千瓦之间;采用复杂循环的机组,造价要高一些。但由于所需厂房小,辅助设备少,所以整个厂的建设费用通常仍低于同类汽轮动力厂或柴油机动力厂。

(8) **冷却水消耗** 简单的燃气轮机可以完全不耗用水。这在缺水地区是有特殊意义的。采用中间冷却的机组,其冷却水耗量一般在 40~80 公斤/千瓦·时,约为汽轮动力站的 1/3~1/5。

(9) **效率** 目前燃气轮机已达到的最高效率水平是 30~31% (净发电效率),像 BBC 的 13000 千瓦电站燃气轮机。苏联已制成的 5 万千瓦发电机组的设计效率高达 33.5%,某些封闭式燃气轮机也接近这个水平。跟柴油机相比,燃气轮机的效率是不

^① 見“第四届国际内燃机会议论文集”1959年版,第5頁。

高的，特别像一般简单循环的燃气轮机，效率约为15~20%，更显得落后。同现代巨型汽轮电站相比（最高效率在40%左右），燃气轮机也还有相当一段差距。但如果跟同容量的中、小型汽轮电站相比，则燃气轮机在效率上并无逊色。

(10) 燃料适应性 燃气轮机最适于用清洁的气体燃料，像天然气，其次是蒸馏油如柴油、重柴油，还有原油。采取某些措施后，它也能相当满意地燃用质地较好的重油。不过，有关问题尚未彻底解决。至于燃用固体燃料，除去封闭式机组而外，还没有完全成功的例子。

由上述各点可见，燃气轮机虽然有着众多的优点，但也存在着一些不足之处。效率和燃料就是当前燃气轮机技术上两个主要薄弱环节。

为了提高效率，最有效的办法是提高燃气初温。而要想提高温度，首当其冲的是材料问题，即如何解决各种耐高温材料的问题。由于冶金工业的进展，目前已发展了成分复杂的各种镍基、钴基合金。它们在高温条件下，仍能保持足够的机械性能和抗氧化等性能，适用于950~1000℃下短寿命的或者800~850℃下长寿命的燃气轮机。至于更高的温度水平，目前着力于金属陶瓷材料的研究，一些高温试验性燃气轮机（1200℃以上）正在进行金属陶瓷叶片等高温零件的运行试验。

提高燃气初温的另一条途径是采用冷却技术，降低高温部件的温度。事实上，德国在30年代末试制的第一批航空喷气发动机上就试用了空气冷却叶片。到现在，空气冷却技术在燃气轮机中已广泛使用。至于液体冷却，虽然冷却效果高得多，但由于结构、工艺和运行上的困难，目前大都还未脱离试验阶段。

燃料问题上，燃气轮机要想比柴油机处于更有利的竞争地位，首先要彻底解决燃用廉价重油的技术。因为柴油机特别是中速以上的，一般只能燃用价格数倍于重油的柴油。经过多年研究之后，现在可以说，只要油质不过分低劣，成分稳定，采取清洗、掺一

定的附加剂等措施后，在燃气轮机中燃用重油一般不会引起严重的后果。不过，能适合于任何重油的万灵药方则还有待探索。至于固体燃料，为了想和汽轮动力装置争胜，世界各主要工业国都曾一度十分热衷于发展燃煤的燃气轮机（开口式）。近年来，虽然在燃煤所遇到的主要技术关键上有了突破，纯粹从技术角度看，燃煤的问题已基本过关；但由于它需要较庞大的处理设备和费用，取消了燃气轮机简单、便宜的最主要优点；因此，除两三个例外，各国的燃煤试验装置都先后停闭。

材料、冷却技术和燃料，将是本书第五章阐述的主题。

燃气轮机目前正处于少年时代，未来的发展趋势，现在还难于断言。从现有的一些迹象看，大致存在着两条不同的发展路线。

（1）简化结构、降低造价、扩大使用范围——这是资本主义国家大多数厂家目前采取的主要路线。其具体表现有：

A. 利用成熟的航空喷气发动机作为燃气发生器，配上动力透平成为既轻便又便宜的新型动力装置。除上述美国14万和10万千瓦机组外，英国一批4~7万千瓦的备用机组也采用了这种办法。

B. 利用较成熟的标准部件（压气机、透平、燃烧室等），构成不同型式的“积木式”燃气轮机，以适应各种用途。

C. 根据所谓“总体能量概念”，全面利用燃气轮机的动力和废热，满足整个生活环境（如整个学校、大建筑物）的全部需要。

（2）探索新的热力循环和热力系统，以创造更高效率的大型动力装置——这是苏联和其他国家一些厂家努力的主要方向。其表现有：

A. 积极发展高效率的大型燃气轮机。

B. 积极发展大型蒸汽-燃气联合循环装置。

C. 探索封闭式循环的燃气轮机用于未来大型原子能动力厂的可能性。

鉴于这三个题目牵涉到新的热力循环和新的结构原理，拟在本书的末章分三节专门加以阐述。

第一章 燃气輪机的热力循环和性能

§ 1-1 基本工作原理

燃气轮机，又称燃气涡轮机或燃气透平装置。这个名称是由它产生动力的最主要部分——透平（涡轮）而来的。和蒸汽透平（汽轮机）一样，燃气透平是由圆周转有叶片的转轮所组成。燃气（工质）从固定的喷嘴吹到叶片上，推动叶片转动，带动转轮进行工作（图1-1）。和蒸汽透平所不同的是，蒸汽透平的工质是由锅炉产生的高压、高温的蒸汽；而燃气透平的工质是高温、并具有一定压力的燃气。燃气的压力是由压气机产生，而高温则主要是在燃烧室中因燃料燃烧得到。

压气机、燃烧室和透平，是组成燃气轮机最基本的三大部分。图 1-2 是一台拖动发电机的最简单的

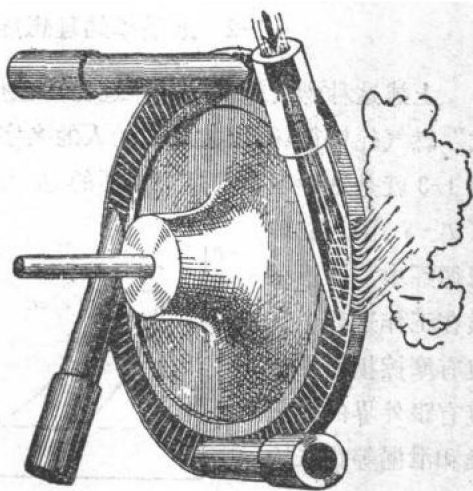


图1-1 透平工作原理图。

燃气轮机示意图。空气在压气机 1 中压缩（出口一般不低于 3 绝对大气压），此时温度相应升高到 100°C 以上，然后进入燃烧室 2，与喷入的燃料（油或可燃气）在一定压力下混合燃烧，成为高温燃气（温度通常高于 600°C ），再流入透平 3 膨胀做功，最后排入大气。从图中还可看到，压气机是由透平直接拖动的。透平发出

的功率（设为100%），减去压气机消耗的功率（约占65~75%），就是这台燃气轮机的有效利用功率（约占25~35%），大体上也就是发电机4的功率。

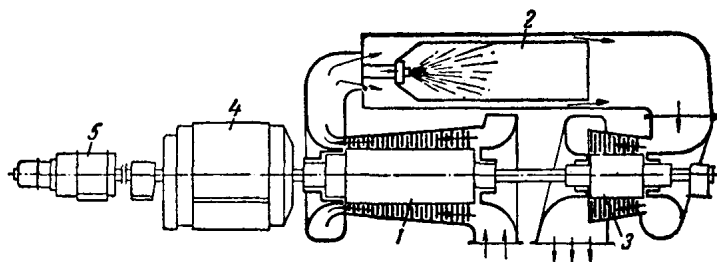


图1-2 最简单的燃气轮机：

1—压气机；2—燃烧室；3—燃气透平；4—发电机；5—起动电机。

§ 1-2 最简单的理想热力循环

上述这种燃气轮机的工作过程，在热力学上属于“等压加热式”燃气轮机循环；或按照创始人的名字，叫做焦耳循环 (Joule)。图 1-3 就是这种理想的热力循环的压力比容 ($P-V$) 和温熵 ($T-S$) 图。在理想循环中，假设工质在工作过程中既没有摩擦损失，也没有跟外界的热交换和泄漏等损失。

图中点 1——

工质进入压气机的状态；曲线 1—

2——工质在压气机中绝热（等熵）压缩的过程；点 2——压气机出口工质的状态（压力达到最高）；曲线 2—3——工质在燃烧室中等压加热的过程；点 3——工质在燃烧室出口、透平进口处的状态（温度最高）；曲线 3—4——工质在透平中绝热（等熵）膨胀

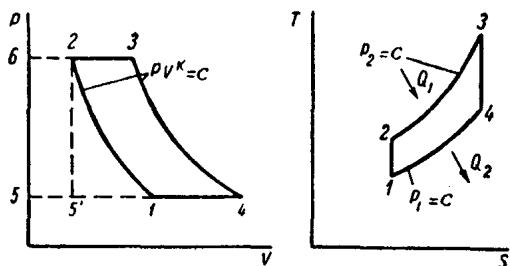


图1-3 等压加热式燃气轮机循环图
(焦耳循环图)。

到大气压的过程；点4——透平出口工质的状态；曲线4—1——透平废气排入大气后的等压放热过程^①。

由图可见，燃气轮机的热力循环和柴油机的热力循环（笛塞尔Diesel循环）是相近的。所不同的是，柴油机中限于气缸容积，工质不能完全膨胀，只膨胀到点1的容积位置，就开始排气。

大家知道，理想气体的绝热工作过程，是以 $PV^k = \text{常数}$ 为特征的。因此焦耳循环效率 η_0 可由下式算出：

$$\eta_0 = 1 - \frac{1}{\phi^{\frac{k-1}{k}}} \quad (1)$$

式中 ϕ ——压缩比， $\frac{P_2}{P_1}$ ；

k ——工质的绝热指数（空气的 $k=1.40$ ，一般燃气的 $k=1.33$ 。通常使用公式（1）时以空气作为唯一工质，得出“空气标准”的循环效率）。

从公式（1）可见，理想的燃气轮机循环的效率主要与压缩比 ϕ 有关：压比愈大，效率愈高。图1-4就是 η_0 与 ϕ 的关系曲线。

从公式上看，燃气轮机理想循环效率似乎和温度 T 没有关系。其实不然，因为压比和温度是密切相关的。压比增大，压缩终点2的温度 T_2 也就相应增高，直到 T_2 等于 T_3 ，这时压缩比再也不能提高，循环效率也达到最高值了。工质最高温度 T_3 就这样限制了理想循环所能达到的最高效率。

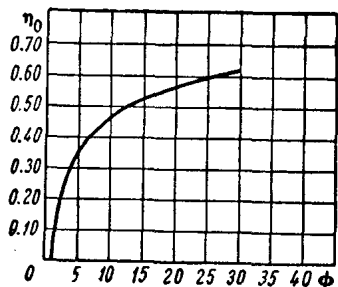


图1-4 燃气轮机理想循环效率对压缩比的关系曲线。

§ 1-3 实际的热力循环

在理想循环中，我们假设压气机和透平的相对内效率都是

① 这里把“绝热”就看作是“等熵”。

100%；而实际上即使设计得很完善，由于不可避免的摩擦、泄漏等各种热力损失，它们的相对内效率最高也不过92%左右。在这种情况下，整个燃气轮机的热效率和压比的关系不再像图1-4中那样简单了。

先用图1-5说明压气机和透平中的损失对整个装置有效功率的严重影响。

由图可见，在实际的热力循环中，燃气轮机的实际功率要比在没有损失的理想循环时小得多。

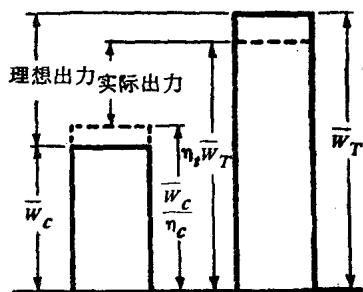


图1-5 功率图解。

在理想循环中，功率等于理想透平（内效率 $\eta_t=100\%$ ）出力 $\bar{W}_T$ 减去理想压气机（内效率 $\eta_c=100\%$ ）所耗功率 $\bar{W}_c$ 。

而在实际循环中，透平出力只有 $\eta_t \bar{W}_T$ ；压气机所耗功率却要增加到 $\frac{\bar{W}_c}{\eta_c}$ 。因此实际功率将等于 $\eta_t \bar{W}_T - \frac{\bar{W}_c}{\eta_c}$ 。即：

$$\frac{\text{实际功率}}{\text{理想功率}} = \frac{\eta_t \bar{W}_T - \frac{\bar{W}_c}{\eta_c}}{\bar{W}_T - \bar{W}_c} \quad (2) \text{①}$$

因此，实际热力循环的热效率是：

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{\eta_t \bar{W}_T - \frac{\bar{W}_c}{\eta_c}}{\bar{W}_T - \bar{W}_c} \times \left(1 - \frac{1}{\phi \frac{k-1}{k}} \right) \\ &= \frac{\eta_t \eta_c K - 1}{\eta_c (K-1)} \times \left(1 - \frac{1}{\phi \frac{k-1}{k}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

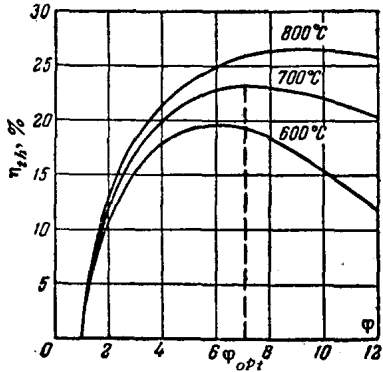
式中 $K = \frac{\bar{W}_T}{\bar{W}_c} = \frac{\text{透平出力(理想)}}{\text{压气机耗功(理想)}} = \text{功比}$ 。

由于功比 K 也相当于透平进口温度 $T_{\max}(T_3)$ 对压气机出口温度 T_2 之比，所以实际的燃气轮机的热效率就和燃气初温（最高温度）直接有了关系。如果压比不变， $T_{\max}$ 愈高， η_{th} 也愈高。一般

① 这里忽略了燃烧室损失和管道损失等次要因素。

$T_{\max}$ 每增高 10°C , η_{th} 约改善 1.5% (参看图 1-9)①。而这时, η_{th} 和压比的关系则起了变化。如 $T_{\max}$ 不变, ϕ 大到一定程度, η_{th} 就达到极大值, 超过这个程度, η_{th} 反而下降。这是因为如果压比增高, K 将变小, 压气机所耗功的增长率将迅速超过透平出力增长率。

图 1-6 就是这种最简单的实际燃气轮机在不同 $T_{\max}$ 下, η_{th} 和 ϕ 的关系曲线。设计中, 假设 $\eta_c = \eta_t = 85\%$, 大气温度 T_a 为 15°C 。相当于最高热效率点的压比叫做最佳压比 ϕ_{opt} 。



从图 1-6 可见, 即使 $T_{\max} = 800^{\circ}\text{C}$, 简单循环的效率 η_{th} 最高也只有 26~27%。

§ 1-4 提高燃气轮机效率的途径

提高燃气轮机的效率可从两方面着手: (1) 改善它的热力循环, 提高它的循环效率; (2) 改善机器结构, 降低工作过程中的各项损失。

1. 在提高循环效率方面。前面已经说过, 提高燃气初温 $T_{\max}$, 适当提高压比 ϕ 都是基本的途径。但 $T_{\max}$ 的提高首先受到材料性能的限制, 其次还有热应力的问题。普通碳钢在温度大于 400°C 时, 强度就会显著降低。一般低合金钢也只能承受 600°C 以下的温度。超出 600°C 就要采用含多量稀贵合金元素像镍、铬、钴的奥氏体钢或高级合金。而且即使这些材料, 也极少能在 800°C 以

① 这里假设气温 T_a 保持不变。如果气温改变, 则将影响 T_2 , 这时, η_{th} 就将取决于“绝对温升比”, 即 $\frac{T_{\max}}{T_a}$ (以绝对温度计) 或称“温比”。

上的高温下长期使用的。这也就是，直到现在，使用寿命较长的燃气轮机中， $T_{\max}$ 还没有超出 850°C 的原因。

降低燃气轮机出口废气的温度是提高循环效率的另一种方法。像锅炉中装设空气预热器和省煤器来降低烟气的出口温度那样，来减少废气带走的热量并予以有效的利用，从而提高热效率。

在燃气轮机中往往使用回热器。这种热力循环称为回热式循环。此外，在采用了回热器以后，还可以像大型蒸汽发电站中那样，采用中间再热，提高工质加热的平均温度，增加工质可用热降，构成再热式循环。也可以采用一般压缩机中常用的中间冷却（分段压缩）以减少压缩所耗功率，从而提高机组功率和效率。

2. 在改善机器结构方面。首先是提高透平和压气机的内效率，其次是减少外部泄漏，减少联接管道中的损失，减少燃烧损失等。

下面就分别叙述使用这些方法后的效果。

§ 1-5 回热式燃气轮机循环

图 1-7 是一台采用回热式循环的燃气轮机的示意图。回热器通常由管子或薄板构成。管、板的一侧流过透平排出的高温废气，另一侧则是压气机输出的温度较低的压缩空气。这样，废气的热量

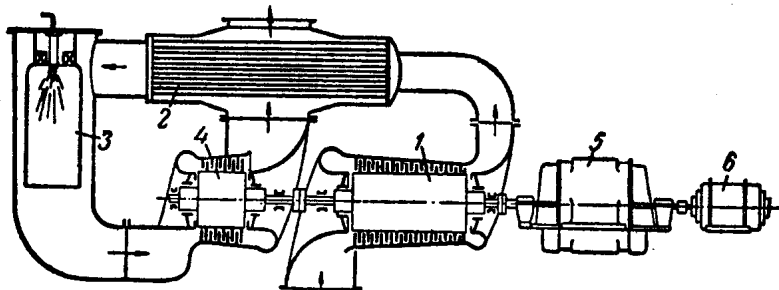


图1-7 回热式燃气轮机示意图：

1—压气机；2—回热器；3—燃烧室；4—透平；5—发电机；6—起动电机。

就通过管、板传给压缩空气，使它以较高温度进入燃烧室。因而不需耗用原先那么多的燃料，就能达到没有回热器时的燃气初温，从而节约了燃料。由于透平出口温度较高（通常在400℃左右），废气所含热量往往占燃料释放热量的一半以上，现在通过回热器回收一部分，对于机组经济性裨益很大（一般要比无回热时节省燃料25~40%）。

回热对效率影响的程度首先取决于回热度 μ ，即压缩空气被预热的程度。回热度的定义是：空气在回热器中实际获得的热量对废气所能给它的最大热量之比。由于空气和废气的流量、比热均可设为相等，通常用下列公式计算回热度：

$$\text{回热度 } \mu = \frac{T'_2 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (4)$$

式中 T_2 ——进入回热器的压缩空气温度（约等于压气机出口的
空气温度）；

T_4 ——进入回热器的透平废气温度（约等于透平出口的废
气温度）；

T'_2 ——压缩空气离开回热器时加热达到的温度。

显而易见， T'_2 不可能大于 T_4 ，所以 $\mu < 1$ 。通常选取 $\mu = 0.60 \sim 0.85$ 。过高的回热度意味着 T'_2 很接近于 T_4 ，即燃气和空气间的温差很小，因而传热很慢，这就需要很大的传热面积，回热器将变得笨重庞大、价格昂贵。

图1-8是 $T_{\max}$ 分别为550和650℃时，不同回热度下压比对机组热效率的关系曲线。它是根据 $\eta_i = 87\%$ ， $\eta_c = 84\%$ ，气温+15℃，不计其它损失而绘制的。有回热以后，热效率的提高是显而易见的。

由图可见，当 ϕ 增大而 $T_{\max}$ 不变时，不同回热度下的效率 η_{th} 却渐趋一致了。这是因为这时进入回热器的空气温度 T_2 相应增高，而废气温度 T_4 则相应降低，因而显著地缩小了回热的作用。所以，在压比较低，废气和空气温差较大的机组中，采用回热的裨益最大。