

# 第5篇

## 燃 气 轮 机

---

**主编单位** 机械工业部上海发电设备成套设计研究所

**编写单位** 机械工业部上海发电设备成套设计研究所

上海理工大学

清华大学

南京燃气轮机研究所

**主 编** 李建业

**副主编** 林诚杰

**编写人** 李建业 沈炳正 林诚杰 裘昌泳

龚贛文 焦树建 叶柏生 张小薰

范懋谦 冯明之

**主 审** 翁史烈

# 常用符号表

<p><math>A</math>——面积 (<math>m^2</math>)</p> <p><math>a</math>——声速 (<math>m/s</math>) 热扩散率 (<math>m^2/h</math>)</p> <p><math>B</math>——单位时间燃料耗量 (<math>kg/h</math>)</p> <p><math>b</math>——单位功率燃料耗量 [<math>kg/(kW \cdot h)</math>] 叶片弦长 (<math>mm</math>)</p> <p><math>C</math>——速度 (<math>m/s</math>)</p> <p><math>c_p</math>——定压比热容 [<math>kJ/(kg \cdot K)</math>]</p> <p><math>D</math>——直径 (<math>m</math>)</p> <p><math>d</math>——直径 (<math>m</math>)</p> <p><math>F</math>——面积 (<math>m^2</math>)</p> <p><math>f</math>——燃料空气比</p> <p><math>g</math>——重力加速度 (<math>m/s^2</math>)</p> <p><math>H</math>——整机焓降 (<math>kJ/kg</math>)</p> <p><math>H_m</math>——摩尔焓 (<math>kJ/kmol</math>)</p> <p><math>h</math>——级焓降 (<math>kJ/kg</math>)</p> <p><math>i</math>——比焓 (<math>kJ/kg</math>)<sup>⊙</sup> 冲角 (<math>^\circ</math>)</p> <p><math>l</math>——叶片高度 (<math>mm</math>)</p> <p><math>M</math>——力矩 (<math>N \cdot m</math>) 摩尔质量 (<math>kg/kmol</math>)</p> <p><math>Ma</math>——马赫数</p> <p><math>m</math>——质量 (<math>kg</math>)</p> <p><math>n</math>——转速 (<math>r/min</math>)</p> <p><math>P</math>——功率 (<math>kW</math>)</p> <p><math>P_c</math>——机组轴端功率 (<math>kW</math>)</p> <p><math>P_{el}</math>——发电机端功率 (<math>kW</math>)</p> <p><math>p</math>——压力 (<math>Pa</math>)</p> <p><math>p_a</math>——大气压力 (<math>Pa</math>)</p> <p><math>Q</math>——热流量 (<math>kJ/h</math>)</p> <p><math>Q_u</math>——燃料低热值 (<math>kJ/kg</math>)</p> <p><math>q</math>——单位面积热流量 [<math>kJ/(m^2 \cdot h)</math>]</p> <p><math>q_i</math>——热耗 [<math>kJ/(kW \cdot h)</math>]</p> <p><math>q_m</math>——质量流量 (<math>kg/s</math>)</p> <p><math>q_v</math>——容积流量 (<math>m^3/s</math>)</p> <p><math>R</math>——半径 (<math>m</math>) 气体常数 [<math>kJ/(kg \cdot K)</math>]</p> <p><math>r</math>——半径 (<math>m</math>)</p>	<p><math>s</math>——比焓 [<math>kJ/(kg \cdot K)</math>]</p> <p><math>T</math>——温度 (<math>K</math>) 周期 (<math>S</math>)</p> <p><math>T_a</math>——大气温度 (<math>K</math>)</p> <p><math>t</math>——温度 (<math>^\circ C</math>) 节距 (<math>mm</math>)</p> <p><math>u</math>——圆周速度 (<math>m/s</math>)</p> <p><math>V</math>——体积 (<math>m^3</math>)</p> <p><math>v</math>——比体积<sup>⊙</sup> (<math>m^3/kg</math>)</p> <p><math>W</math>——比功 (<math>kJ/kg</math>)</p> <p><math>w</math>——相对速度 (<math>m/s</math>)</p> <p><math>x</math>——速比</p> <p><math>z</math>——级数 叶片数 轴向</p> <p><math>\alpha</math>——绝对速度气流角 (<math>^\circ</math>) 过量空气系数</p> <p><math>\beta</math>——相对速度气流角 (<math>^\circ</math>) 燃料系数</p> <p><math>\gamma</math>——扩张角 (<math>^\circ</math>) 叶型安装角 (<math>^\circ</math>)</p> <p><math>\delta</math>——气流落后角 (<math>^\circ</math>)</p> <p><math>\epsilon</math>——气流转折角 (<math>^\circ</math>)</p> <p><math>\zeta</math>——压损</p> <p><math>\eta</math>——效率</p> <p><math>\eta_e</math>——轴端效率</p> <p><math>\eta_i</math>——内效率</p> <p><math>\eta_m</math>——机械效率</p> <p><math>\eta_u</math>——轮周效率</p> <p><math>\theta</math>——叶型弯角</p> <p><math>\kappa</math>——等熵指数</p> <p><math>\lambda</math>——临界声速比</p> <p><math>\mu</math>——流量系数 动力粘度 (<math>Pa \cdot S</math>)</p>
--	--

⊙ 按 GB3102.4-93 规定, 比焓的符号是  $h$ , 但考虑燃气轮机行业的现状, 暂沿用行业习用符号  $i$ 。

⊙ 过去称为比容。

$\nu$ ——轮毂比  
 运动粘度 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $\xi$ ——损失系数  
 $\pi$ ——圆周率  
 $\pi_c$ ——压气机压比  
 $\pi_T$ ——透平膨胀比  
 $\rho$ ——密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 反动度  
 $\sigma$ ——回热度  
 $\varphi$ ——静叶速度系数  
 流量系数  
 $\psi$ ——动叶速度系数  
 作功量系数  
 $\Omega$ ——减功系数  
 $\omega$ ——角速度

### 上角标

\* —— 滞止参数

### 下角标

0——设计值、额定值、原始值  
 透平静叶进口 (第4章)  
 1——压气机进口参数  
 透平静叶出口或动叶进口参数 (第4章)  
 2——压气机出口参数  
 透平动叶出口参数 (第4章)  
 3——透平进口参数  
 4——透平出口参数  
 a——大气、空气  
 ad——绝热过程  
 B——燃烧室  
 b——动叶 (第4章)  
 c——压气机  
 cr——临界参数  
 d——排气  
 de——设计点  
 el——电机端  
 f——燃料  
 g——燃气、发电机、几何  
 h——叶根  
 i——内  
 $i$ ——变数、轴向序号

$j$ ——径向序号  
 L——负荷  
 M——机械  
 m——平均、中间值、机械  
 mb——动叶  
 n——静叶 (第4章)  
 opt——最佳  
 pol——多变过程  
 R——径向  
 ref——基准值  
 s——等熵  
 s——试验  
 sb——静叶  
 sh——轴的  
 st——级  
 T——透平  
 t——叶尖  
 th——理论  
 u——切向  
 x——变工况  
 z——轴向  
 max——最大  
 min——最小  
 代号  
 B——燃烧室  
 C——压气机  
 HB——高压燃烧室  
 HC——高压压气机  
 HT——高压透平  
 G——发电机  
 IC——中间冷却器  
 L——外负荷  
 LB——低压燃烧室  
 LC——低压压气机  
 LT——低压透平  
 MT——中压透平  
 R——回热器  
 T——透平  
 (C)——压气机特性线  
 (HT)——高压透平特性线  
 (LT)——低压透平特性线  
 (T)——透平特性线

# 第 1 章 概 论

燃气轮机是以连续流动的气体为工质的内燃旋转式热能动力机械。气体在压缩机内压缩,经加热后在透平中膨胀作功,把热能转换为机械能。燃气轮机由压气机、燃烧室和透平三大部件以及相应的控制系统和辅助设备组成。它输出的功率用来驱动发电机、泵、鼓风机、螺旋桨以及车轮等各种负荷。以燃气轮机为动力的涡轮喷气发动机是应用最广泛的飞机动力装置。燃气轮机及其所带负荷一般总称为燃气轮机装置或燃气轮机机组。

本篇主要介绍燃气轮机的工作原理、特点、设计原则以及应用和发展前景。燃气轮机和汽轮机同属透平机械,有关气体动力学、强度、振动和调节等与汽轮机有共性的问题可参见第 3 篇汽轮机。

## 1 燃气轮机的工作原理

开式简单循环燃气轮机工作原理如图 5·1-1 所示。压气机从大气中吸入空气,经压缩到一定压力后进入燃烧室,与喷入的燃料混合燃烧形成高温燃气,高温、高压燃气进入透平膨胀作功,透平转子拖动压气机和外负荷。燃气经透平膨胀作功后压力温度下降,最后排向大气。透平发出的功约 2/3 左右拖动压气机,1/3 拖动外负荷。

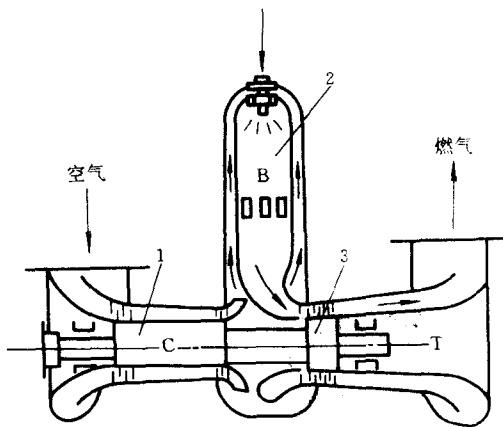


图 5·1-1 开式简单循环燃气轮机工作原理

1—压气机 2—燃烧室 3—透平

闭式循环气轮机与开式循环燃气轮机的主要区别是工质间接地从外界接受热量,并在封闭回路中循环

作功。工质可以是空气、氦气、二氧化碳或其他气体。图 5·1-2 为闭式循环气轮机系统,其特点是可提高工质的基础压力以增大比功率;用工质流量来调节功率以达到较高的部分负荷效率;由于工质干净,通流部分不易污染;适用多种燃料。其缺点是工质加热器和后冷器的结构庞大,使燃气轮机原有结构紧凑的优点有所逊色。

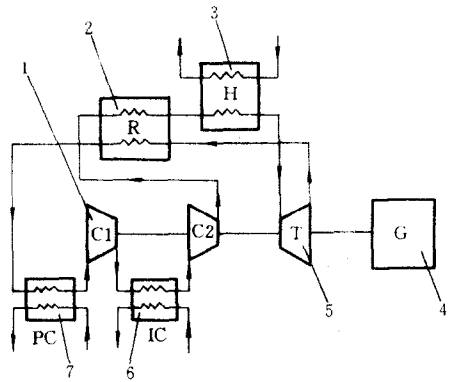


图 5·1-2 闭式循环气轮机系统

1—压气机 2—回热器 3—加热器 4—发电机

5—透平 6—间冷器 7—预冷器

## 2 燃气轮机的特点

燃气轮机有以下优点:

(1) 质量小、体积小、投资省。燃气轮机电站的金属消耗量为同功率汽轮机电站的 1/4~1/6, 厂房占地面积约为 1/3~1/5。其单位质量和体积的比功率高出其他动力机械甚多。尤其是高空性能优越,所以在航空领域占有绝对优势。

(2) 水、电和润滑油消耗量少。燃气轮机只需用少量冷却水,甚至完全不用水。它的辅助设备用电很少,润滑油耗量也低于内燃机和汽轮机,特别适用于缺水、缺电地区。

(3) 起动快、自动化程度高。燃气轮机从冷态起动到满负荷只需 2~20min, 小型燃气轮机仅需数十秒。由于燃气轮机设备简单紧凑,易于实现程控、遥控和集中控制,运行维护方便,便于实现无值守运行,故特别适用作调峰负荷和要求起动迅速的负荷。

(4) 设备简单、易磨损件少,运行可靠,维修方便。

现代先进的开式循环燃气轮机的热效率达42%左右,但排气温度较高,一般达400~600℃,所以热损失大,而且部分负荷时效率显著降低。另外,目前燃气轮机仅能燃用液体和气体燃料。这些缺点使开式燃气轮机的应用受到一定限制。燃气轮机在高温、高压、高速气体流动和高速旋转的条件下工作,对空气动力、燃烧、传热、热应力、热腐蚀和调节控制等技术要求较高,还须注意环境保护问题,如排放物及噪声的控制。

### 3 燃气轮机的应用

燃气轮机在如下经济领域中已得到广泛应用:

(1) 航空。燃气轮机在航空领域的应用占绝对优势,是高空飞行的最佳发动机。以燃气轮机为动力的航空发动机有:涡轮喷气发动机、涡轮螺旋桨发动机、涡轮风扇和涡轮轴等类型的航空发动机。燃气轮机亦可用作航空发动机起动机。

(2) 舰船和交通运输。由于燃气轮机具有比功率大、体积小、质量小、起动快、加速性能好、运转平稳、操作简单、维修保养方便、工作可靠等一系列优点,在舰船和交通运输等方面也得到广泛应用。在舰船上,燃气轮机可以用于水翼艇、气垫船、巡逻艇、高速炮艇、快艇、反潜护卫艇、护卫舰、驱逐舰和巡洋舰等水面舰艇,既可以作为舰艇推进装置的加速机组,又可作为巡航机组。燃气轮机用于机车、汽车和坦克动力亦在研究发展中。

(3) 发电。燃气轮机起动迅速,单机功率大,是承担电网调峰负荷合适的机组。燃气轮机单机功率和效率的进一步提高,尤其是燃气-蒸汽联合循环发电技术的发展,在发电领域中受到越来越多的重视。燃煤联合循环发电技术的发展,使燃气轮机可用煤炭作燃料,扩大了燃气轮机燃料的应用范围,特别是它的高效低污染的发电性能,使其成为21世纪主要燃煤发电的发展方案之一。80年代后期,西方国家燃气轮机和联合循环机组发电容量的增长已超过常规汽轮发电机组。另外,燃气轮机也是紧急备用电站、移动电站的最佳动力之一。

(4) 燃气-蒸汽联合循环。用燃气轮机和蒸汽轮机组成燃气-蒸汽联合循环,是燃气轮机应用的一个重要方面。在燃气轮机排气侧装上余热锅炉回收燃气轮机排气中的热量产生蒸汽以驱动汽轮机。这种用燃气轮机和蒸汽轮机组成的循环称为燃气-蒸汽联合循环。

1929年瑞士BROWN BOVERI COMPANY(BBC公司)研制成功首台增压Velox锅炉联合循环装置,但因当时燃气轮机的功率和效率都较低,联合循环的优越性未能在实践中体现。60年代以后,由于冶金工业以及空气动力和冷却技术的发展,燃气轮机的初温和单机功率都有较大提高,燃气轮机和联合循环发电装置才得到推广应用。

燃气-蒸汽联合循环装置的优点:

1) 热效率高。以石油或天然气作燃料的联合循环装置热效率可达50%以上,先进装置已达到54%~55%,是目前成熟的热力循环方案中效率最高的。

2) 建设周期短、占地面积少、投资低。联合循环电站可以分期建设,一般一年内即可建成燃气轮电站,出力达总出力的2/3。第二年安装余热锅炉和汽轮机建成联合循环电站。与蒸汽轮电站相比,联合循环电站占地降低了20%~25%,投资降低了15%~20%。

3) 联合循环电站比蒸汽轮电站用水少50%以上,对缺水地区有重要意义。

4) 排放污染小。

5) 起动迅速。燃气轮机从冷态到满负荷起动时间仅需2~20min,余热锅炉和汽轮机冷态起动约需2h。整套装置热态起动约需40~50min即可达到满负荷。

(5) 原油和天然气的开发和输送。燃气轮机广泛用于驱动油田增压水泵、压气机以及原油和天然气输送管线的增压机组。燃气轮机用于石油和天然气产地的输送管线可就地燃用石油和天然气,而且用水少、自动化程度高,可以利用燃机排气热量加热原油或供热。所以燃气轮机是油气田最合适的动力设备。

(6) 石油、化工和冶金工艺流程。这些工艺流程中产生大量高温高压或可燃气体,又需要各种类型的动力,燃气轮机可利用高温高压气体驱动透平(称为烟机或膨胀透平),亦可用可燃气体作燃料产生动力。这样与工艺流程相结合,可以节约能源,提高工艺流程的可靠性和经济性。

## 4 燃气轮机技术的发展

### 4.1 燃气轮机发展史

早在公元690年左右,我国张遂曾用燃气推动铜轮。公元959年前后,我国已造出走马灯,这是燃气轮机的雏形。18世纪末开始有人根据热力循环知识设计燃气轮机,如1791年英国的巴贝尔(J. Barber),1900

年德国的司徒尔兹 (F. Stolze) 和法国的拉马尔 (C. Lamale) 以及阿尔芒哥 (R. Armengaud) 等人分别设计试验了一些燃气轮机。但限于当时的技术和材料工艺等水平, 还不能制造出有实用价值的燃气轮机。

20世纪中, 随着空气动力学理论和冶金技术的发展, 逐步具备了设计和生产工业实用燃气轮机的条件。1906年法国涡轮机协会的拉马尔和阿尔芒哥等人设计制造了压比为4、透平前温度560℃的燃气轮机, 效率为3%。同时, 德国的霍尔兹瓦斯 (H. Holzwarth) 设计了37kW 容等燃烧式燃气轮机, 后经不断发展, 直到1920年制成功率370kW 燃气轮机, 效率达13%。它是第一台工业上实际运行的燃气轮机装置。1939年瑞士BBC公司制成第一台发电用开式循环燃气轮机。同一时期, 德国Heinkel工厂制造的第一架用涡轮喷气发动机驱动的飞机试飞成功。1940年Escher Wyss公司制造成功第一台闭式循环燃气轮机。1941年BBC公司制成第一台机车用燃气轮机。

第二次世界大战结束前, 涡轮喷气发动机已在实际中得到应用。在以后的年代中, 航空用燃气轮机得到迅速发展, 航空领域中燃气轮机和涡轮喷气发动机已占绝对优势。

70~80年代是燃气轮机技术大发展时期, 多种大功率、高参数燃气轮机研制成功, 联合循环在发电行业中亦得到广泛应用。80年代陆用燃气轮机初温已达1260℃以上, 开式循环燃气轮机单机功率达100MW以上, 效率最高达42%, 联合循环效率达50%~55%。

#### 4.2 燃气轮机的发展动向

##### (1) 提高效率

1) 研制高温材料。近年高温合金材料的发展, 每年可使燃气轮机进气温度提高10℃左右。但高温合金的耐温极限约为1100℃。温度的进一步提高需要采用冷却或表面涂层等技术, 如表面渗铝、铬、钴及陶瓷涂层等。另外, 发展高温陶瓷材料 (如 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 及 $\text{SiC}$ 等), 或采用复合材料制造燃气轮机高温部件。

2) 发展先进的冷却技术, 对高温部件进行冷却可以进一步提高燃气温度。通过冷却技术的改进, 燃气轮机初温平均每年可提高10~15℃。目前采用的空气气膜和发散冷却, 可使材料温度降低500~800℃。正在研究中的用水和蒸汽作为冷却工质可达到更佳的冷却效果, 但使冷却系统复杂。美国通用电气公司研制的水冷燃气轮机初温可达1560℃; 他们正研制初温1600~1800℃的燃气轮机。

3) 提高压气机压比。采用超跨声速级轴流式压气机级, 级压比达1.5~2.0。级压比为3.5的压气机级正研究中。整台压气机采用可调静叶等技术, 使压气机总压比达30以上。

##### (2) 提高单机功率:

1) 增加通流面积, 研制新型长叶片。

2) 增加流速, 采用跨声速压气机及透平。

3) 增加工质密度, 采用闭式循环增加基础压力。

(3) 燃气轮机节能及热能综合利用。燃气-蒸汽联合循环是成熟的热力循环方案中热效率最高的。目前正研制高参数的燃气轮机以进一步提高循环效率。另外, 各种其他提高循环效率和热能利用率的新方法亦在研究发展中, 如利用燃气轮机排气余热产生蒸汽, 回注到燃气轮机燃烧室中以提高出力和热效率, 这种循环方式称为蒸汽回注式燃气轮机 (STIG)。利用这种方法可使燃气轮机功率提高30%, 热效率提高25%, 现代蒸汽回注式燃气轮机的热效率可达44%左右。这种循环方式比常规联合循环省去了汽轮发电机组, 但因喷入燃烧室的蒸汽不能回收, 需消耗大量处理用水。

中间冷却式蒸汽回注燃气轮机 (ISTIG) 是在蒸汽回注式燃气轮机基础上, 再加上压气机中间冷却, 可将热效率提高到53%。

湿空气透平循环 (HAT Cycle), 这种循环方案是带间冷及回热, 并在压气机中多级喷水 and 蒸汽, 使空气达饱和状态。水蒸气喷入压缩空气中使压缩功由占透平输出功的50%降低到30%, 使输出功增加20%, 试验中的250MWFT4000HAT循环, 热效率超过53%。

化工过程回热燃气轮机与化工工艺过程相结合, 利用化工工艺过程中产生的燃气热量供燃气轮机做功, 以提高化工过程总体热效率。

(4) 采用计算机监控。提高运行自动化程度和运行可靠性, 减少事故及维修工作。

(5) 降低材料和工艺成本。由于燃气轮机叶片型线要求高、高温合金部件价格昂贵、加工困难, 所以材料及加工费用成本很高。为了降低成本, 燃气轮机制造业正研究采用粉末冶金、陶瓷和陶瓷冶金、纤维复合材料、定向结晶、精铸、真空冶炼以及爆炸成型等新工艺、新材料。

(6) 燃煤联合循环发电技术。联合循环发电技术的一个重大发展是燃煤联合循环发电技术。以石油和天然气为燃料的联合循环发电装置已显示了很大优越性。但石油和天然气的蕴藏量远不及煤炭丰富, 煤是热力发电的主要燃料, 提高燃煤发电效率和降低排放污

染是燃煤发电必须研究解决的两大技术关键。自70年代初迄今的研究表明，燃煤联合循环发电技术将是21世纪最有发展前途的燃煤发电新方案之一。

目前发展较成熟的燃煤联合循环发电技术主要有两种形式：一种是整体煤气化联合循环（IGCC），在这种方案中煤经气化净化后作为燃气轮机燃料。其优点是煤在气化净化过程中可以脱硫达99%以上，脱出的元素硫可以回收，排放污染较小。由于制成的煤气较“清洁”，对燃气轮机的磨蚀和腐蚀作用较小，燃气轮机初温不受煤气化工艺过程的限制，随着高温材料和冷却技术的发展可以较大幅度地提高透平进气温度，从而提高循环效率。初温1260℃的燃气轮机已研制成功，1370℃空气冷却和1650℃的水冷燃气轮机也正在研究之中。用这种新型燃气轮机组成的煤气化联合循环，热效率可达50%左右。

燃煤联合循环发电的另一种形式是增压流化床联

合循环（PFBC-CC）。在这种联合循环方案中，煤在流化床锅炉中燃烧并脱硫，由燃气轮机的压气机供给增压锅炉压缩空气，增压锅炉排出的烟气经除尘净化后进入透平做功。由于流化床中炉床内温度不能超过900~950℃，所以燃气轮机的进口温度只能低于900℃，因此限制了燃气轮机循环效率的提高。但增压锅炉可产生高参数的蒸汽，使蒸汽循环的效率较高，这种类型燃煤联合循环的总热效率最高可达40%~43%。

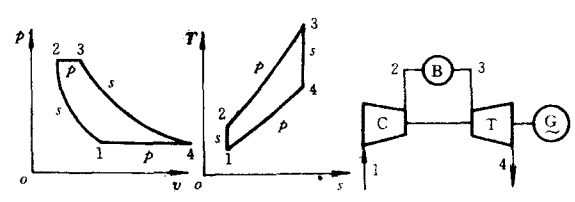
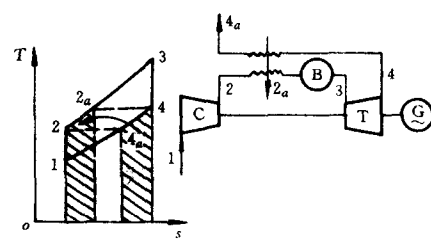
许多国家正开展第二代燃煤联合循环发电技术的研究工作，它将煤气化联合循环和增压流化床联合循环的优点结合起来，用煤部分气化（或干馏）所产生的煤气供给燃气轮机燃烧室作为补燃燃料，将由增压锅炉排出的烟气温度提高到现代燃气轮机初温水平，使燃气和蒸汽循环都达到较高的效率（参见第1篇第3章）。

## 第2章 燃气轮机的热力循环

### 1 燃气轮机循环方式及特性

#### 1.1 各种典型的燃气轮机循环方式及特点（表5.2-1）

表5.2-1 各种典型燃气轮机循环方式及特点

名称	理想循环过程及机组简图	特 点
简单循环	 <p>1—2 压缩，2—3 加热，3—4 膨胀做功</p>	<p>机组简单轻巧，应用最广；实际循环<math>T_3</math>愈高，装置比功、效率愈高；<math>T_3</math>相同，效率最高的压比值大于比功最大的压比值</p>
回热循环	 <p>回热过程：排气4—4<sub>a</sub>，空气2—2<sub>a</sub></p>	<p>回收部分排气热量，代替部分燃料加热工质，故效率提高；循环最佳效率的压比较低；靠拢最大比功的压比；回热器质量大、体积大，且变工况反应迟钝</p>



(续)

名称	理想循环过程及机组简图	特点
间冷循环	<p>间冷过程: 2<sub>LC</sub>—1<sub>HC</sub></p>	<p>间冷减少压缩功, 故净输出比功增加; 2个压气机的压比值相近时, 装置比功最大</p>
开式再热循环	<p>再热过程: 4<sub>HT</sub>—3<sub>LT</sub></p>	<p>再热增加膨胀功, 故净输出比功增加; 两个透平的膨胀压比值相近时, 装置比功最大</p>
复杂循环	<p>回热、间冷、再热三者可以结合两者或三者同用</p>	<p>间冷、再热除增加净输出比功外, 如结合回热, 还能扩大回热温差, 使效率比回热循环还高许多机组复杂, 体积、质量大</p>
闭式循环	<p>本例为炉膛增压系统 1' 2' 3' 4' 加热 闭式循环 1 2 3 4 的工质</p>	<p>主循环工质同外界隔绝, 可采用非空气工质如 He、N 或 CO<sub>2</sub> 等, 使用外燃或其他热源加热; 机组基础压力高, 且可随工况而调节, 故功率大, 体积小, 变工况效率高</p>
半闭式循环		<p>主循环工质采用内燃, 通过增压机组更新部分空气半闭式循环基础压力可调, 性能介于闭式与开式之间</p>

1.2 简单循环特性参数<sup>[1]~[5]</sup>

根据能量方程

$$W + Q = c_p \Delta T$$

每千克吸入的工质空气在压气机中所耗的压缩功

$$W_c = c_{p,c} \Delta T_c = \frac{1}{\eta_c} c_{p,c} (T_{2,c}^* - T_1^*)$$

$$= \frac{1}{\eta_c} c_{p,c} T_1^* \left( \pi_c^{\frac{\gamma_c - 1}{\gamma_c}} - 1 \right) \quad (\text{kJ/kg})$$

(5-2-1)

折合到每千克吸入空气，在透平中所作的膨胀功

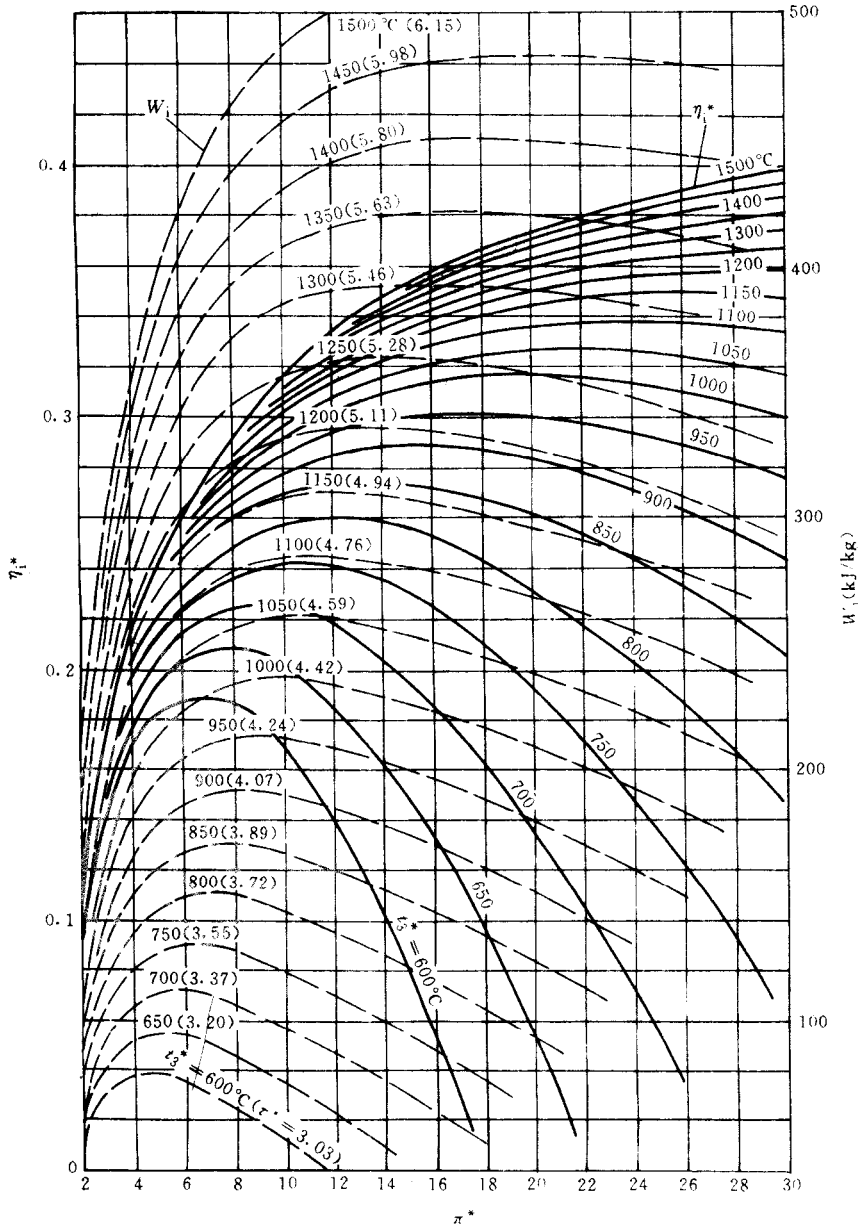


图 5-2-1 简单循环燃气轮机的循环热力特性

$t_a = 15^\circ\text{C}$   $p_a = 101.33\text{kPa}$   $\eta_f = 0.88$   $\eta_c = 0.87$   $\eta_g = 0.98$   
 $\eta_m = 0.99$   $\Delta q/q_m = 0.03$   $\epsilon_1 = 0.01$   $\epsilon_2 = 0.04$   $\epsilon_3 = 0.01$

$$\begin{aligned}
 W_T &= \left(1 + f - \frac{\Delta q}{q_m}\right) c_{p,T} \Delta T_T^* \\
 &= \left(1 + f - \frac{\Delta q}{q_m}\right) c_{p,T} (T_3^* - T_4^*) \\
 &= \left(1 + f - \frac{\Delta q}{q_m}\right) \eta_T^* c_{p,T} T_3^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^* \frac{\kappa_T-1}{\kappa_T}}\right)
 \end{aligned}
 \tag{5.2-2}$$

式中  $q_m$ ——压气机吸入的工质流量 (kg/s);  
 $\Delta q$ ——冷却空气抽气、漏气等。

在燃烧室中

$$Q_B = f H_u \eta_B^* = \left(1 + f - \frac{\Delta q}{q_m}\right) c_{p,B} (T_3^* - T_2^*) \quad (\text{kJ/kg})
 \tag{5.2-3}$$

简单循环的主要特性参数为:

(1) 比功  $W_i$ 。它是机组每千克吸入空气净输出的有效功。 $W_i$  愈大 (即发一定功率所需的工质流量愈小), 机组愈小。因此比功可间接反映机组的尺寸和质量大小

$$\begin{aligned}
 W_i &= \frac{P_i}{q_m} = W_T - W_C \\
 &= \left(1 + f - \frac{\Delta q}{q_m}\right) \eta_T^* c_{p,T} T_1^* \tau^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^* \frac{\kappa_T-1}{\kappa_T}}\right) \\
 &\quad - \frac{c_{p,C} T_1^*}{\eta_C^*} \left(\pi_C^* \frac{\kappa_C-1}{\kappa_C} - 1\right) \quad (\text{kJ/kg})
 \end{aligned}
 \tag{5.2-4}$$

(2) 循环热效率  $\eta^*$ 。反映热能转变为机械功的程度

$$\eta^* = W_i / f H_u$$

假设  $c_p, \kappa$  为常数, 忽略各流道的压损和流量变化等, 则

$$\eta^* \approx \left[ \eta_T^* \tau^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^* \frac{\kappa_T-1}{\kappa_T}}\right) - \frac{1}{\eta_C^*} \left(\pi_C^* \frac{\kappa_C-1}{\kappa_C} - 1\right) \right] / \left[ \tau^* - 1 - \frac{1}{\eta_C^*} \left(\pi_C^* \frac{\kappa_C-1}{\kappa_C} - 1\right) \right]$$

(3) 燃料耗率

$$b_i = 3600 / H_u \eta^* \quad [\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

(4) 热耗

$$Q_i = H_u b_i \quad [\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$$

(5) 机组输出的轴端功率

$$P_e = q_m W_i \eta_i (1 - \Delta \eta_a) \eta_m \quad (\text{kW})$$

式中  $\eta_i$ ——齿轮箱传动效率;

$\Delta \eta_a$ ——辅助设备的耗功系数。

当前实用的简单循环燃气轮机的轴端功率已达 226MW。<sup>⊖</sup>

(6) 机组的轴端效率

$$\eta_e = \frac{3600 P_e}{H_u B} = \eta^* \eta_i (1 - \Delta \eta_a) \eta_m$$

式中  $B$ ——单位时间燃料耗量 (kg/h)。

现代简单循环燃气轮机的轴端效率已可超过 42%。<sup>⊖</sup>

(7) 机组发电机端效率

$$\eta_{el} = \eta^* \eta_i (1 - \Delta \eta_a) \eta_m \eta_g = \frac{3600 P_{el}}{H_u B}$$

式中  $\eta_g$ ——发电机效率;

$P_{el}$ ——电功率 (kW)。

循环热力性能指标  $\eta^*$  和  $W_i$  与循环主要热力参数温比  $\tau^*$  和压比  $\pi^*$  之间的关系示于图 5.2-1。考虑到大气温度  $T_a$  变化的影响, 比功用折合参数由  $\left(\frac{W_i}{T_a} \times 288\right)$  表示。

简单循环燃气轮机最轻巧、起动快、易控制, 用水少 (甚至不用水), 能整体厢装, 故在发电、机械、航空、舰艇等领域应用广泛。

### 1.3 回热循环

在回热循环中, 利用燃气透平排气的余热来提高燃烧室进口的空气温度到  $T_{2,a}$ 。这样, 式 (5.2-3) 应改写成

$$\begin{aligned}
 Q_B &= f H_u \eta_B^* \\
 &= \left(1 + f - \frac{\Delta q}{q_m}\right) c_{p,B} (T_3^* - T_{2,a}) \quad (\text{kJ/kg})
 \end{aligned}$$

燃料空气比  $f$  减小而比功未变, 故能显著提高热效率。

根据传热方程, 回热量

$$Q_R = K A \Delta T_m = q_m c_p \Delta T_a \quad (\text{kJ})$$

式中  $K$ ——总传热系数;

$\Delta T_a$ ——空气温升 (K);

$\Delta T_m$ ——对数传热温差 (K)。

可见大量回热需要很大的传热面积, 要增添一个庞大的回热器。这使机组的尺寸和质量都要增加, 并且由于回热器巨大热容量的影响, 使机组变工况的调节控制性能变差。

排气热量利用的程度用回热度  $\sigma$  表示。

$$\sigma = \frac{T_{2,a}^* - T_2^*}{T_4^* - T_2^*}$$

式中  $T_{2,a}^*$ ——回热器出口空气滞止温度。

结合以上两式可得

⊖ GE 公司 MS9001FA 型。

⊖ Turbo Power 公司 FT4000 型。

$$\frac{KA}{q_m c_p} = \frac{\Delta T_a}{\Delta T_m} = \frac{1}{\chi_T} \frac{\sigma}{1-\sigma}$$

式中  $\chi_T$ ——根据不同传热面结构而定的系数。

可见  $\sigma$  过大, 将使回热器的传热面积  $A$  和体积、质量急剧增加。一般, 回热度  $\sigma$  取在 0.55~0.87 之间。

### 1.4 间冷循环、再热循环和复杂循环

在压缩过程中采用中间冷却是为了降低工质温度以减少压气机的耗功, 见式 (5.2-1); 在膨胀过程中采用中间再热可以提高工质平均加热温度, 增加透平的

做功, 从而都可以增加机组的比功  $W_t$  [见式 (5.2-4)], 来改善机组的热力性能和减小尺寸。

当把它们与回热结合起来构成间冷回热循环, 再热回热循环或间冷再热回热复杂循环时, 间冷或再热都能增加回热温差 ( $T_3^* - T_2^*$ ), 故除能增加循环的比功外, 还能进一步提高热效率, 见图 5.2-2。当然, 机组也就更复杂。其中, 间冷回热循环用于舰艇, 除能提高热效率, 减小机组的流量和尺寸外, 还能降低排烟温度, 故具有增加航程、减小机仓与空气、烟气通道和降低烟气红外辐射等优点。

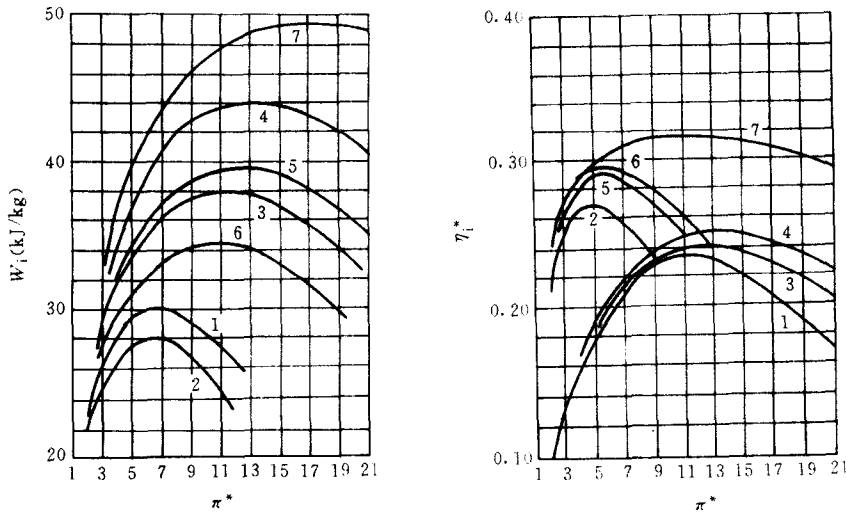


图 5.2-2 各种热力循环燃气轮机的特性

1—简单循环 2—回热循环 3—间冷循环 4—再热循环 5—再热回热循环  
6—间冷回热循环 7—间冷再热回热循环

### 1.5 闭式和半闭式循环

#### 1.5.1 闭式循环

闭式气轮机中循环的工质气体完全同大气隔绝, 先经压气机压缩后, 去气体加热器受到燃料的间接加热, 然后经透平膨胀做功, 透平排气经过预冷器冷却之后, 又重新进入压气机, 周而复始地在机内循环。其特点有:

(1) 工质的基础压力可以采用高于大气压力。气体工质的密度大, 相同的通流面积可通过更多的质量流量, 功率就能大为增加。因此, 闭式循环气轮机的单机功率已可设计到 3000MW, 而开式燃气轮机因通流面积受叶片高温强度所限, 单机功率尚未超过 250MW。

(2) 工质的压力和密度较高, 故传热系数高, 回热度能达到 93%。此时  $T_3^*$  对机组性能的影响就不如在开式循环中那样突出, 因此可采用比较中等的  $T_3^*$ , 从而降低了对叶片材料的要求。而且因工质压力高, 故能采用较复杂的热力循环而不嫌压损太大。采用  $t_3^* = 650 \sim 850^\circ\text{C}$  的闭式气轮机, 循环热效率约为 34%~40%。

(3) 闭式循环可以采用非空气工质。选用相对分子质量小而比热容、比热比、密度、热导率和声速高者, 有利于提高循环性能并减小机组尺寸。氮、氦、二氧化碳较易获得, 且性质比较适宜, 但需有效的气封。

(4) 闭式循环的工质是清洁的气体, 不会磨蚀、腐蚀叶片, 也不会通流部分积垢, 故机组能长期运行而仍保持性能不降低。

(5) 采用间接加热, 可以采用各种燃料, 如煤、核

能等，能直接配合高温气冷式反应堆。

(6) 可用高、低压储气罐调节循环基础压力来适应工况，而维持温比、压比和气流速度三角形角度不变，故变工况时效率不降低。

(7) 主要缺点在于气体加热器庞大、价格昂贵， $T_3^*$  受其材料的限制。如果采用炉膛增压来减小体积，则需添置一套增压系统，且密封问题也更复杂。

1.5.2 半闭式循环

半闭式循环中有一部分为封闭的主循环，另一部分为开口的增压循环，而两部分有互相联通之处。主循环采用内燃， $T_3^*$  可高，另由增压机组更新部分空气并进行基础压力调节。因此，半闭式循环具有闭式功率大、效率佳的优点，而且没有庞大的气体加热器。但它不能采用非空气工质，流道也会有积垢。

1.6 联合循环<sup>[6]</sup>

1.6.1 联合循环的类型

在联合循环中不同工质之间，存在着能量交换，以谋求更优的性能。工质应根据不同工作温度和物性来选配，其中最易获得的是燃气（空气）和水蒸气，故燃气-蒸汽联合循环在发电和热电站中获得了广泛的应用。其他工质的联合循环也有试用，例如正在研制燃气-氨水混气的卡林那（Kalina）循环。

燃气-蒸汽联合循环可有多种方式，见表 5.2-2。

(1) 排气余热式。随着燃气轮机燃气温度的日益提高，其排气所含热量可以用于锅炉中产生蒸汽，故目前联合循环采用最多的为燃气轮机排气余热锅炉（HRSG）的方式，如配合高温燃气轮机更可采用蒸汽再热式余热锅炉，见图 5.2-3。

现代余热锅炉式联合循环中，以燃气轮机部分所发的功率为主，约占 2/3，蒸汽部分约占 1/3。

(2) 补燃式。补燃锅炉方式常用来配合低参数的燃气轮机以提高其排气温度，或是用于水冷壁高温补燃锅炉的新型联合装置中。补燃式联合装置中蒸汽轮机功率可以比余热式中的增加几倍，还可以部分燃煤。

(3) 增压锅炉式。增压锅炉式联合循环，以蒸汽轮机功率为主，其增压燃烧的炉膛既是燃气轮机的燃烧室，又是蒸汽锅炉的炉膛。如果采用流化床，还能烧煤。由于增压，锅炉的传热面积和体积都可减小许多。因此热容量小，在变工况调节时，反应也快。但  $T_3^*$  不能高，以免烧坏部件。

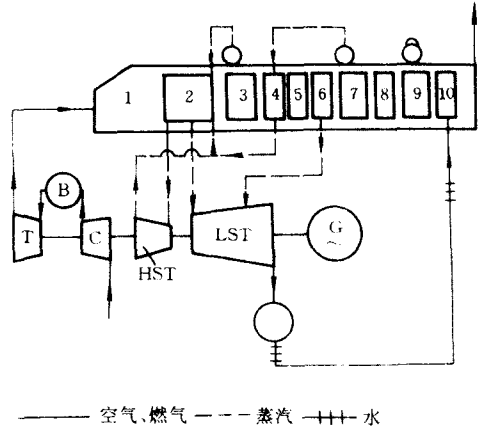


图 5.2-3 GE 余热锅炉蒸汽再热式联合循环  
 1—余热锅炉 2—过热器、再热器 3—高压蒸发器 4—过滤器 5—给水加热器 6—过热器 7—低压蒸发器 8—给水加热器 9—除氧器 10—给水加热器 HST—高压蒸汽轮机 LST—低压蒸汽轮机  $T_3^*=1260^\circ\text{C}$   $T_4^*=593^\circ\text{C}$   
 $T_{31}^*=538/538^\circ\text{C}$   $P=325\text{kW}$   $\eta_c=52\%$

(4) 混合循环。另一种类的燃气-蒸汽联合工作的循环是燃气-蒸汽混合循环，近几年已有许多应用，常称为程（大酋）氏循环或蒸汽回注（STIG）循环<sup>[7]</sup>。其中把余热锅炉蒸汽喷注入燃气，形成混气工质，膨胀做功。这样既省去了蒸汽轮机，又减少了部分压气耗功，故机组功率和效率都能大幅度提高，且设备和调节简化，造价便宜。蒸汽注入燃烧区还能使  $\text{NO}_x$  大为降低， $\text{NO}_x$  含量（质量分数）可降至  $15 \times 10^{-6}$ ，符合环保要求。但回注需用软水，且不能回收，故需扩大水处理设备。图 5.2-4 为带有间冷的蒸汽回注循环（ISTIG），其性能更能提高。湿气透平（HAT）也属此类。

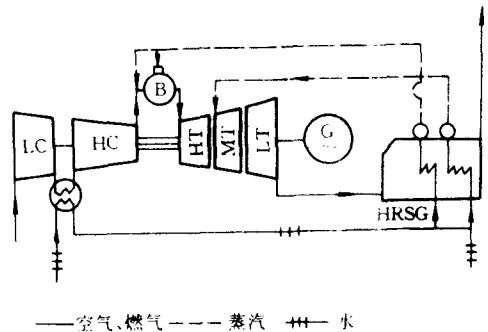
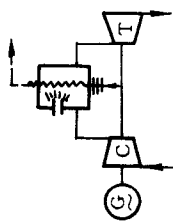
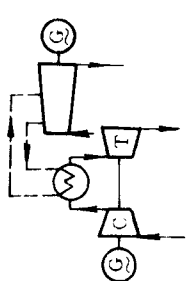
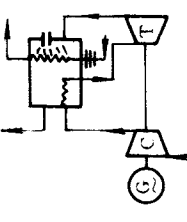
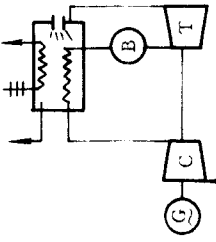


图 5.2-4 带有间冷的蒸汽回注循环  
 H—高压 M—中压 L—低压 HRSG—余热锅炉  
 (5) 燃煤联合循环。示范性的燃煤联合循环机组

表 5-2-2 各式燃气蒸汽联合循环及其特点

序号	联合循环型式	示意图	特点	参数范围				
				$T_3$ (°C)	$T_4$ ( $T_5$ ) (°C)	$T_5$ (°C)	$P_{st}/P_g$	$\eta_{st}$ (%)
1	排气余热		简单, 最常用, 可结合预热给水 (本表序号 3) $T_3$ 高者能产生高压蒸汽, 甚至再热蒸汽 (见图 5-2-3), 但难于直接燃煤	900~1300 1200~1600	400~600 500~950	350~500 450~540	$\approx 1/2$ $\approx 1/3$	35~53 45~58
2	排气补燃		简单, 能提高蒸汽参数, 增加功率, 变工况性能好, 补燃可用煤, 宜于改造旧电站 如 $T_3$ 高, $T_4$ 也高, 可不需补燃。但用高温补燃, 仍能提高功率及效率	800~1000 900~1300	(600~1000) (900~1500)	350~500 450~540	$> 1$ 2~4	35~45 40~55
3	排气预热给水		$P_{st}/P_g$ 小时, 给水预热器小, 可结合其他型式 (如序号 9), $T_3$ 高时, 不如序号 1 型式经济	$< 900$	400~500	350~500	$> 1$	35~45
4	排气预热空气		需加大空气预热器, 不如序号 2 经济, 未见单独采用					

5	<p>增压锅炉</p> 	<p>燃烧室同时作为蒸汽锅炉。炉膛增压，传热快，尺寸小，启动快，但较难密封，<math>T_3</math> 也难提高</p>	<p>&lt; 900</p>	<p>400~500</p>	<p>350~500</p>	<p>2~∞</p>	<p>35~45</p>
6	<p>燃烧室 蒸汽再热</p> 	<p>蒸汽再热就在燃气轮机燃烧室进行，可节省昂贵的再热蒸汽管道，但难适应并列多台燃气轮机，未见单独采用</p>	<p>&lt; 800</p>	<p>350~500</p>	<p>350~500</p>	<p>&gt; 1</p>	<p>30~40</p>
7	<p>热空气透 平后燃</p> 	<p>可燃煤，但空气加热炉易磨损，故 <math>T_3</math> 受限制</p>	<p>&lt; 800</p>	<p>350~500</p>	<p>350~500</p>	<p>&gt; 1</p>	<p>30~40</p>
8	<p>补燃回热 加内燃</p> 	<p>可大部分外燃煤加热工质后，再为加内燃油、气，提高了 <math>T_3</math></p>	<p>900~1600</p>	<p>400~950</p>	<p>350~540</p>	<p>≈ 1/2</p>	<p>35~50</p>

(续)

序号	联合循环型式	示意图	特点	参数范围				
				$T_3^*$ (C)	$T_4^*$ ( $T_5^*$ ) (C)	$T_6^*$ (C)	$P_{a1}/P_g$	$\eta_{el}$ (%)
9	封闭式		<p>气体增压后体积小, 传热快, 故气体冷却器可同给水预热器合并, 气体和蒸汽共用一炉膛, 可以燃煤</p>	<p><math>&lt; 800</math></p> <p>350~500</p> <p>350~500</p> <p><math>&lt; 1</math></p> <p>30~40</p>				
10	整体煤气化 (IGCC)	<p>见图 5·2-5</p>	<p>煤气化联合循环可燃煤、脱硫, 又能综合利用系统热能, 副产氧、煤气、硫等化工产品; 但煤气化设备庞大, 高温煤气净化较困难</p>	<p>900~1300</p> <p>400~600</p> <p>350~540</p> <p><math>&lt; 1</math></p> <p>40~50</p>				
11	增压流化床	<p>见图 5·2-6</p>	<p>增压流化床可燃煤、脱硫, 但 <math>T_3^*</math> 受限, 可用以改造电站</p>	<p><math>&lt; 900</math></p> <p>400~500</p> <p>350~500</p> <p><math>&gt; 1</math></p> <p>32~45</p>				
	2G-PFBC 炭化炉增压流化床		<p>炭化炉的煤气供燃气轮机补燃, 其残余焦炭供流化床增压锅炉燃烧, <math>T_3^*</math> 可提高</p>	<p>900~1500</p> <p>400~600</p> <p>600~700</p> <p>2~4</p> <p>45~52</p>				
12	蒸汽回注		<p>最简单, 余热锅炉蒸汽回注燃气形成混气做功, 省去了蒸汽轮机, 功率和效率都能增加百分之几十, <math>\text{NO}_x</math> 少, 造价低, 控制易, 热电两用可互相调剂负荷变化, 但需大量补充软水</p>	<p>900~1600</p> <p>400~950</p> <p>350~540</p> <p>—</p> <p>35~60</p>				

注: 表中凡有两组参数, 上者为常用, 下者为新型高温循环。



正处在商品化考验阶段，也已有不同型式：

1) 整体煤气化联合循环 (IGCC)。先把煤气化、除尘、净化，然后燃用于燃气-蒸汽联合装置，它的煤气化系统同热力工质系统之间存在着有机联系。联合装置往往还结合制氧、集硫等工艺流程以提高热效率和经济效益。但这类燃煤的联合装置庞大复杂，已相当于

一个能源化工联合体。早期装置例见图 5·2-5。新型的 overall 煤气化联合循环机组功率已达 320MW，效率达到 46%。<sup>③</sup>

2) 燃煤流化床联合循环 (FBC-CC)。通过传热或直接加热工质。按流化床的工作压力进一步分为常压式 (AFBC) 和增压式 (PFBC) 两种，后者见图 5·2-6。

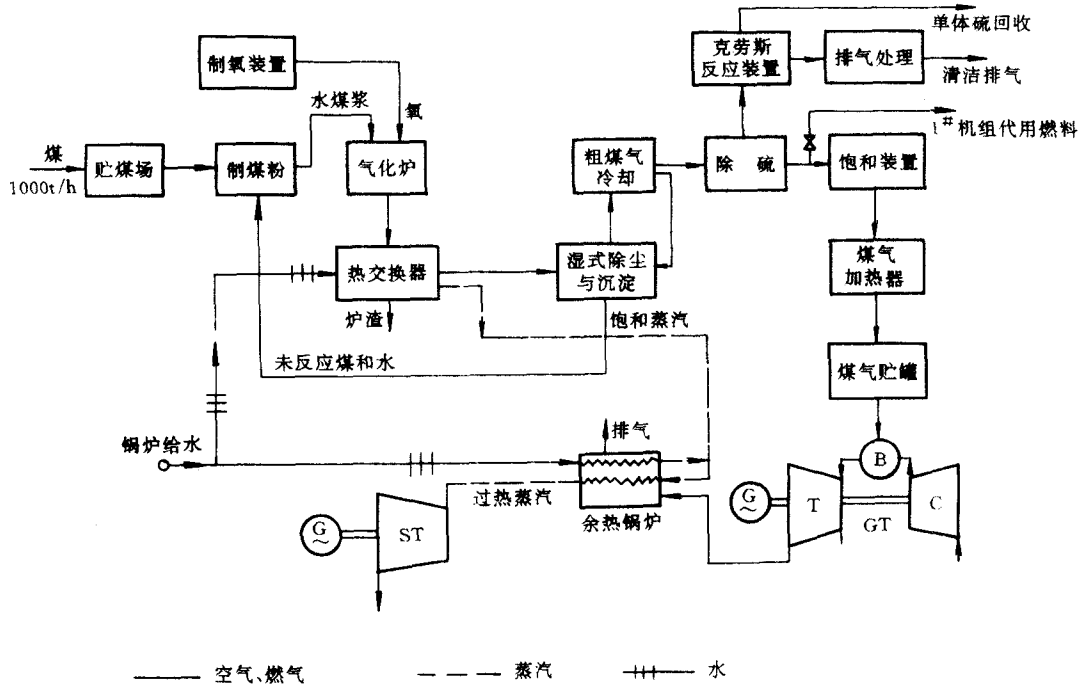


图 5·2-5 Cool Water 整体煤气化联合循环系统 (IGCC)

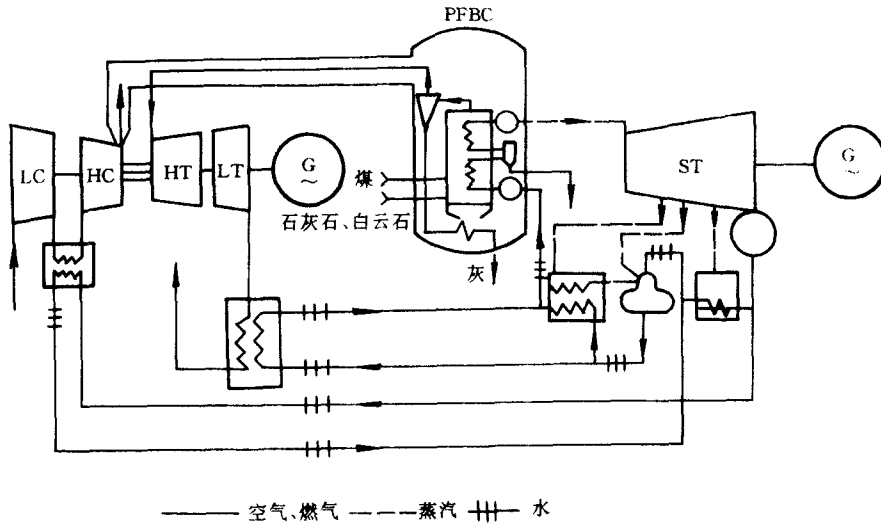


图 5·2-6 基本的增压流化床联合循环系统 (PFBC-CC)

③ Siemens/KWV 的 V94.3 型——B&W 联合装置。