

燃气轮机循环的新技术

强国芳 (哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

[摘要] 本文根据最近六年的国外技术资料, 全面系统地分析介绍了工业及船用燃气轮机在循环方面的各种新技术。

关键词 燃气轮机 循环 综述

分类号 TK472

1 前言

根据近期燃气轮机市场分析, 国际上燃气轮机在各个领域中的应用越来越广泛。这是由于燃气轮机性能不断提高, 环境保护指标不断改善以及热电联产的需求不断增长等诸多因素造成的^[1-3]。各种型式的燃气轮机复杂循环、联合循环以及相关的新技术在近六、七年间的的发展更是特别引人注目。

本文以最近六年“燃气轮机世界”杂志^[4]的各种报道为主, 对燃气轮机循环方面的各种新技术及其相关细节, 作一较全面和系统的分析介绍。但对国内研究报道较多的整体煤气化联合循环(IGCC)、增压流化床燃烧联合循环(PFBC)以及蒸汽回注循环(STIG)则基本从略, 以避免不必要的重复。

2 较常规的燃气轮机复杂循环和联合循环

所谓的常规燃气轮机复杂循环, 无非是压气机中间冷却(IC)和燃气中间再热(IR, R为reheat)两类。随着技术和工艺、材料的进步, 目前压气机中间冷却技术不论对陆用还

是船用, 都已进入实用阶段, 并且常与其它技术措施联合应用, 而中间再热则新的报道较为少见。

至于较常规的燃气轮机联合循环则是指回收燃气轮机排气余热用来加热给水使之产生蒸汽以供热或作功。这样的循环或称朗肯循环能量回收(RACER), 或称燃蒸联合循环(COGAS)。从温-熵图来看, 燃气轮机是构成顶部循环, 蒸汽轮机则属底部循环(SBC)。这种联合循环在陆用电站和前苏联等国的舰船上都有实际应用(图1)。

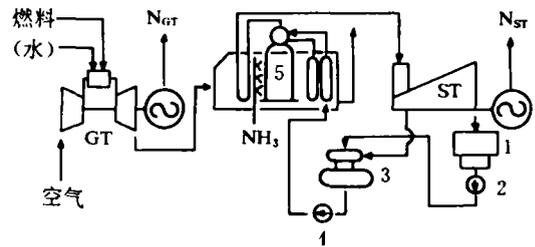


图1 常规的燃气轮机联合循环(RACER)

1. 凝汽器 2. 凝水泵 3. 除氨器 4. 锅炉给水泵
5. 余热蒸汽锅炉(有降低NO_x措施) GT. 燃气轮机 ST. 蒸汽轮机

收稿日期 1993-07-21 修改定稿 1993-08-23

本文联系人 强国芳 男 59 研究员级高工 214151 无锡荣巷中荣 110 号 303 室

3 几种典型的燃气轮机循环新技术

以后,循环是泛指,不再具体说明是简单、复杂还是联合循环。

3.1 底部循环的改进

3.1.1 空气底部循环(ABC)

这是相对于蒸汽底部循环(SBC)而言的。如图2所示,空气底部循环根本不需余热锅炉和蒸汽轮机以及凝汽器、泵及水处理等附属设备(连同有关的运行人员),而是用压气机和空气涡轮取代它们。在热交换器中,燃气轮机排气将压缩空气加热到482~538℃,后者即进入空气涡轮膨胀做功,显然这样的循环简单、便宜,但功率可增大(30~35)%,效率约可提高25%,这是GE公司的一项专利技术。

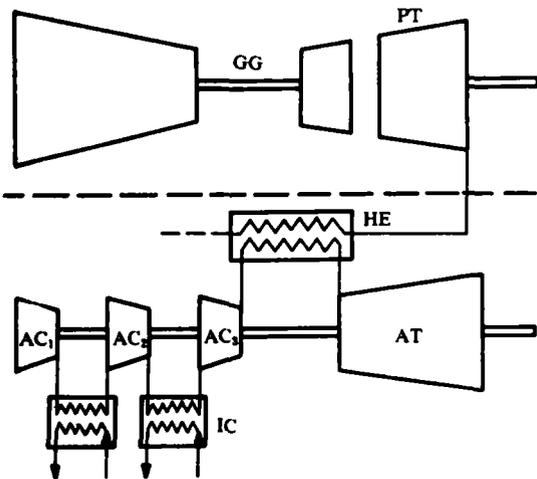


图2 空气底部循环(ABC)

GG. 燃气发生器	PT. 动力涡轮	HE. 热交换器
AC. 空气压缩机	IC. 中间冷却器	AT. 空气涡轮

3.1.2 氨汽底部循环(KBC)

这是前苏联 A. I. Kalina 博士自 1978 年移民到美国后为克服朗肯循环的不足而提出的新循环。经过 MIT 能源专家的分析证实确实是一个先进的热力循环。对于 200 MW 等级的卡林纳循环联合电站,热效率可达(55~60)%的水平,比朗肯循环高出 25% 以上。

如图 3 所示,卡林纳循环是用水蒸汽和氨气的混合物作为工质的,并且在透平与凝汽器之间加上一个蒸馏—冷凝装置。

上述蒸馏—冷凝装置的原理则示于图 4。蒸馏过程应用吸收制冷原理,工质(混合物)在再进入锅炉 1 之前,经历了分离、吸收、冷凝和再重新结合的过程。

结合图 3 和图 4,双流体混合物在锅炉 1 中可在不同的温度下沸腾,大部热能引入透平中做功(70%的氨蒸汽)。而在加热器 2 中,透平排气的余热用来蒸馏低沸点的工质氨,使其与高沸点的水分离。在气化池 3 中,高浓度和低浓度的溶液分离开了。在吸收器 4 中,低浓度溶液被冷凝,而在凝汽器 5 中,高浓度溶液被冷凝并回入锅炉 1 中。

RACER 循环系统的关键缺陷是燃气轮机排气温度为 540℃ 上下,而亚临界锅炉中水在 260~370℃ 的温度下即变成蒸汽。可见两者的温差太大。卡林纳循环用水—氨混合工质,形成可变温度的沸腾过程,便可把此温差降低到只有 2.2~2.8℃。

蒸馏—冷凝子系统(DCSS)中经历了复杂的过程,最终结果是形成低的透平背压,以增大透平的膨胀功。它实际上代替了普通朗肯循环中的冷凝器。而气化池的作用则是把受热和加压 42% 氨的混合物分离成 97% 的富氨蒸汽和 33% 的贫氨液体。在 DCSS 系统中,有 5 种不同浓度的氨溶液(气):70 氨/30 水(工作溶液),42 氨/58 水(中间溶液),33 氨(贫氨)溶液,97 氨(富氨)蒸气及冷却水(无氨)。具体工作过程内容另文专述。

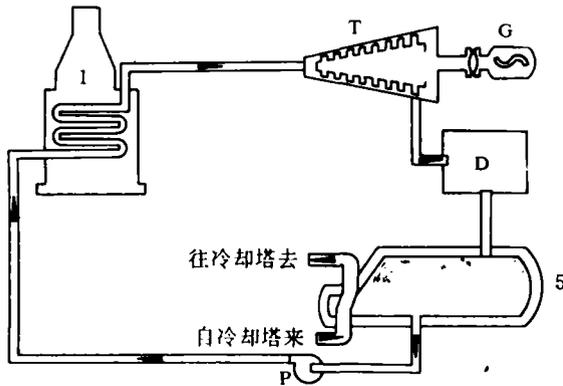


图 3 卡林纳循环

- 1. 锅炉 T. 透平 G. 发电机 P. 凝结泵
- D. 卡林纳蒸馏冷凝系统 5. 凝汽器

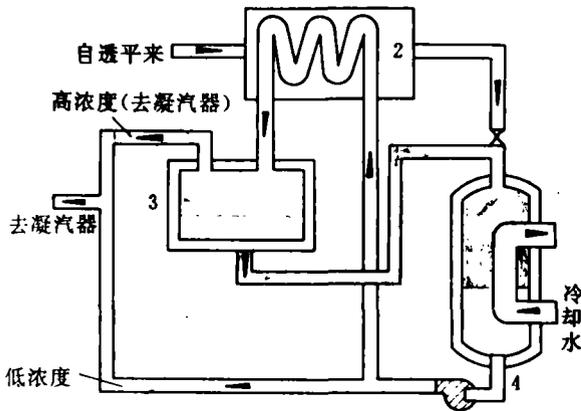


图 4 卡林纳循环的蒸馏—冷凝系统

- 2. 加热器 3. 气化池 4. 吸收器

卡林纳循环的优点众多,除了效率高、启动快、投资省以外,还不存在低压长叶片级湿蒸汽侵蚀的问题。因为当初压 16.55MPa 及背压 0.1655MPa 时,卡氏循环透平的膨胀比为 100 : 1,而在 12.4MPa 初压及背压 0.006673 MPa 时,汽轮机的膨胀比为 1800 : 1,因此卡氏循环的末级叶片短,而且是“干”蒸汽。

* 关于 HAT 循环,本刊将持续系统报导。

据报道,1995 年有可能建成 200 MW 的联合循环,其中卡氏底部循环可发 90 MW 功率。一个 3.2 MW 的卡氏底部循环示范电站已于 1991 年底在美国加州投运,热效率为 29.6%,而相当的蒸汽轮机电站只有 25%。根据最新报道,GE 公司已于今年年初签订了购买全部专利的协议,他们认为采用卡氏循环后,当今联合循环效率还可提高 2% 以上而达到(57~59)%的水平。

3.2 顶部循环的改进

这是指对燃气顶部循环而言的。

3.2.1 压气机“进气冰冷”(“iced” inlet)

这项技术措施的实质是:对于发电用的燃气轮机,当低峰负荷时,利用低价电力制冰,到高峰时,利用所生产的冷媒水来冷却燃气轮机的进口空气,从而提高机组效率,增大输出功率(标准条件下约 20%~25%),并以较高价格出售给用户。

美国内勃拉斯加州林肯电力公司的洛克贝电站,对 GEMS7001B 机组,除改烧天然气和改进进口导叶外,还采用了所谓的“热能储存系统”(TES——thermal energy storage),通过氨制冷系统制冰。该系统有半地下式的巨大冰罐,并配有制冰机和进口空气冷却器。冷却器的进口冷媒水温度略高于 0℃,出口约 6.7℃。在该系统中,制一吨冰约耗电 24kW·h,可使 4.54 kg 的空气从 37.8℃ 冷至 4.4℃,而进气温度每降低 0.56℃,机组功率可增加 0.38%。通过空气冷却器,进气压力损失低于 124.5 Pa。

3.2.2 燃烧室进口空气湿化*(HAT——humid air turbine)

近几年出现的 HAT 循环,实际上乃是从燃烧室喷水的技术演化而来。图 5 为美国 Westinghouse 公司 W501D5“蒸发·回热”循

环的示意图。可以看出它是HAT的雏型。

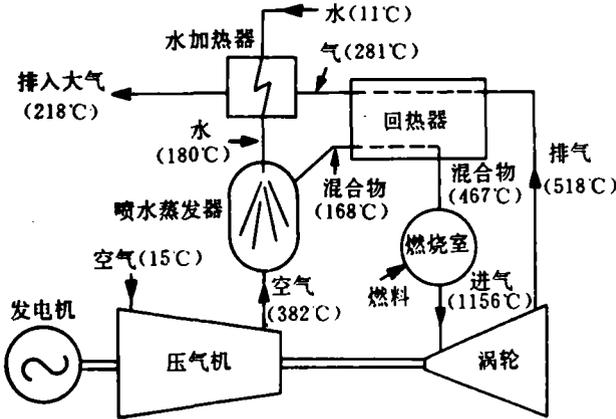


图5 早期的湿空气透平循环示意图 (图中有关温度数据系原文如此,恐有误)

如图5所示,水与压气机出口空气混合后,在回热器中得到了有效的加热,进入燃烧室后,显然通到涡轮中作功的工质流量增加了,而压气机的空气流量并未增加,所以,涡轮功率增加1%,相当于机组输出功率加大3%(考虑到水的比热要比空气的大得多,增大还要多一些)。

HAT循环常与压气机中间冷却及涡轮排气回热等措施联用,如再与煤气化结合起来,更具发展前景,NO_x和硫的排放量也能降低。

据文献报导,压缩空气与热水掺混,除图5的喷淋蒸发器外,还有一种多级的逆流饱和器(saturator)。

前已报道,FT-4000机的效率为42%,采用HAT循环后,设计效率高达53%,估计1997年可投入商业运行。与蒸汽回注相比,整个循环中没有过热蒸汽甚至高压蒸汽,因此,设备投资是简省了。

3.2.3 化学回热燃气轮机(CRGT)

在CRGT循环中,燃气轮机排气不进入余热锅炉而是通到所谓的“甲烷重整器”,其余热使天然气被重整为氢和其它气体供燃气轮机燃烧(见图6)。此循环的特点是NO_x和CO等排放水平极低,可以不用局部催化还原装置。热效率也很高。这是美国加州能源委员会所研讨的一个方案。据估算,如果CRGT再加上间冷和再热,即IR-CRGT,那么对GE的CF6-80C₂改型机,热效率甚至可达60%,为所有方案之冠。

由图可见,常规的余热锅炉(HRSG)为余热蒸汽重整器(HRSR)所代替,温度也由538C左右提高到663-677C。此外,此CRGT方案乃是间冷(IC)和再热(R)循环,高压涡轮进气温度达1371C,动力涡轮进口气温经再热后高达1260C,因此动力涡轮叶片亦是冷却结构(蒸汽冷却)。

3.3 利用垃圾能的联合循环(CCWTE)

城市固体垃圾的利用涉及节能和环保实属一举两得。常规的垃圾电站用的是朗肯循环RACER系统,由垃圾焚烧炉、燃气轮机、余热锅炉及蒸汽轮机等组成,其致命弱点是燃烧产物(气体及灰渣)中的氯化物对合金钢材料腐蚀厉害,而且水蒸汽温度低,效率不高。有时城市垃圾很潮湿,除循环本身给以加热干燥外,还得添加正规燃料才能促使它完全燃烧。

美国奥克拉荷马州三家公司的CCWTE联合循环电站,利用5只垃圾焚烧炉及三台501KB燃气轮机,共发电32MW,是以天然气为主燃料,固体垃圾为辅燃料。如图7所示,该系统有几个特点:一是位于燃气轮机排气道中的外置式过热器,工作更可靠;二是设置了余热蒸汽锅炉,万一燃机排气超出垃圾焚烧炉的需要时它投入工作(但设计时按焚烧炉维修停运时的情况考虑)。垃圾焚烧炉每台容量为100-120吨垃圾/日,其热量90%以上均可回收,对于天然气资源丰富而垃圾

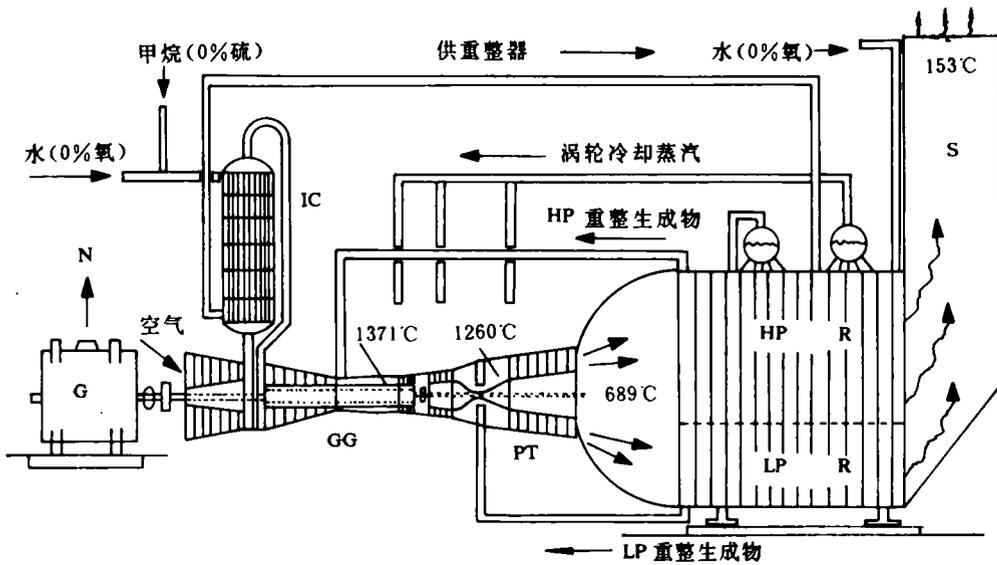


图 6 化学回热燃气轮机(CRGT)

IC. 中间冷却器 R. 重整器 S. 烟囱

又多的场合,这个方案颇有吸引力。

3.4 压缩空气储能电站(CAES)

世界第一座 CAES 电站 1978 年建于德国的 Huntorf,以色列、日本和卢森堡等国也均已开始或正筹建,美国的阿拉巴马州和田纳西州均已建设或投运。

这种循环运行方式的特点是在晚上及周末低峰时发电储气,高峰时再利用储气罐之压缩空气燃烧发电供网。这里不存在常规燃气轮机装置中涡轮与压气机的匹配问题,因为两者并不直接连接。据报道,这种电站的可靠性好,部分负荷效率高(50%负荷时效率下降 0.6%,25%负荷时效率只下降 0.9%),装置费用也省。由于 NO_x 排放量与燃机总功率成正比,故 CAES 电站的 NO_x 量只有常规燃机电站的三分之一左右。

CAES 也可以与蒸汽回注相结合(CAES SI)或者与空气湿化连用(CASH),而 CASH

又可与整体煤气化过程结合起来,即 IG/CASH。图 8 示有 IG/CASH 的系统简图。由于空气湿化,功率可大大增加,煤气化厂的规模也比 IGCC 缩小很多。

已建立的两座 CAES 电站的有关参数见下表:

	德国 Huntorf 电站	美国 Alabama 州电站
功率 N	290 MW	110 MW
压缩空气舱罐容积 V	152 710 m ³	538 000 m ³
压缩空气压力 P	7.4 MPa	7.26 MPa
投运年代	1978 年	1991 年

储存的压缩空气温度一般低于 50°C,压缩空气反充发电起动时间为 9—13 分钟。

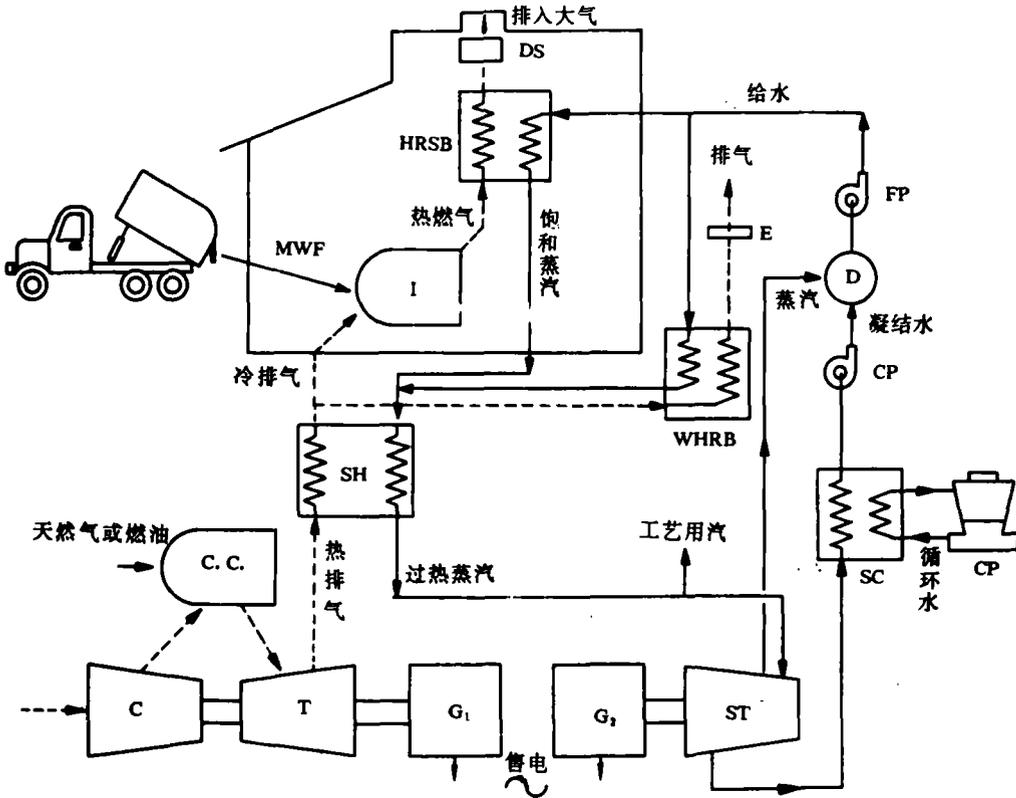


图7 利用垃圾能的联合循环(CCWTE)

C. 压气机 C.C. 燃烧室 CP. 凝水泵 D. 除氧器 DS. 干式除尘器 E. 经济器 G. 发电机 HRSB. 余热蒸汽锅炉 I. 垃圾焚烧炉 MWF. 城市垃圾燃料 SC. 表面式凝汽器 WHRB. 余热回收锅炉

用于储存压缩空气的舱罐可以是废弃的矿井,或油气田、注水井,也可以是盐或岩石的孔穴等。

据预测,美国有可能有10%的电力进行泵汽、泵水,甚至包括进行蓄电池及超导储磁等蓄能工作。

3.5 舰用间冷回热循环(ICR)

现在我们反过来讨论美国海军为21世纪新舰艇而由R-R及西屋公司联合研制的WR-21 ICR燃气轮机。由于这方面已有所报道,故介绍尽量从简。

由图9所示的系统可以看出,由于动力涡轮采用变几何喷嘴,提高了气动性能,而且

大大改进了变工况特性。回热器的采用,还降低了排烟的红外信号,以至可以不用既重又贵的红外线抑制系统。针对战斗需要,间冷器和回热器都考虑了旁通系统。与LM2500相比,在30%工况下,WR-21 ICR的油耗为233 g/(kW·h),而LM2500为340.7 g/(kW·h)。且WR-21的功率可进一步加大到21600 kW。

该工程项目的先进设计阶段自1992年到1995年,而全尺寸研制阶段则为1996年到1999年。

4 结束语

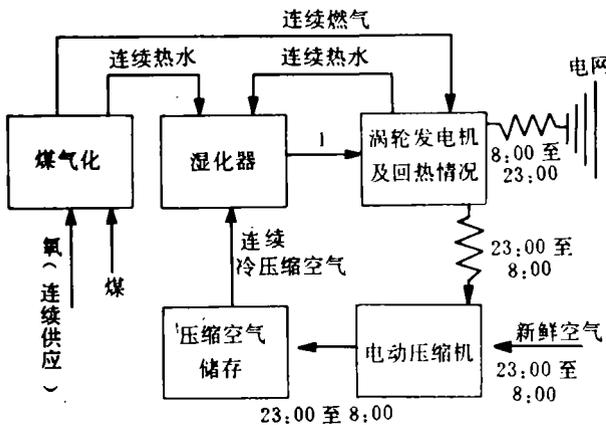


图8 IG/CASH 工作流程示意图

1. 连续热湿压缩空气

通过前面的介绍,我们可以看出这几年来国外燃气轮机的研究和应用发展很快,而节能与环保乃是促进各种循环新技术发展的动力,但是它们又是以先进的发动机及相关的设备为基础的。

结合中国的情况,我们一方面要密切注

视和跟踪国外的发展,另一方面,针对国内已经引进投运的燃气轮机电站等设备进行局部的改进,也是有好处的现实的。特别是我国疆土辽阔,南北温差很大,各种联合循环如能自小到大,逐步发展,将带来不少综合效益。

最关键也是最艰难的是燃气轮机本身的研制水平,我们不能睁眼看着我们与国外本来已不小的差距越来越大。

卡林纳循环在前面讨论过的各种新技术中,最为新颖而吸引人,特别值得有关高校和研究机构从机理上先开始研究,其它则主要是工程实践的问题。

参 考 文 献

- 1 强国芳. 国外燃气轮机技术市场分析. 燃气轮机技术, 1992. (1)
- 2 陈福湘. 发电用燃气轮机世界市场综述. 燃气轮机技术, 1992. (3)
- 3 Kiyomi TESHIMA. The current situation of gas turbine cogeneration in Japan and its trend in the future. bulletin of GTSJ. 1992
- 4 Gas turbine world. 1987~1993

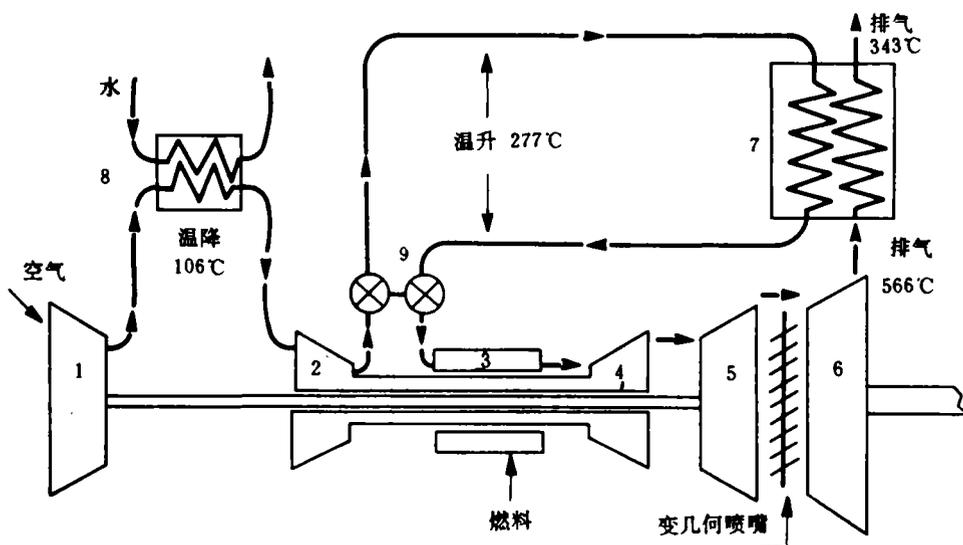


图9 WR-21 间冷回热循环(ICR)

1. 低压压气机 2. 高压压气机 3. 燃烧室 4. 高压涡轮 5. 低压涡轮
6. 动力涡轮 7. 回热器 8. 间冷器 9. 旁通阀

**JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL
ENERGY AND POWER**
1993 Vol. 8 No. 6

CONTENTS

- (283) New Developments in Gas Turbine Cycles Qiang Guofang (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

Based on current foreign technical literature this paper presents a comprehensive and systematic overview and analysis of a variety of new techniques used in configuring various industrial and marine gas turbine cycles. **Key words:** *gas turbine, power plant cycle, overview*

- (290) Power Turbine Casing Cooling and Evaluation of Casing Temperature Field Zhang Longbao (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

This paper deals with an integrated type of power turbine casing cooling system, presenting a method for the evaluation of the casing temperature field and also a test piece version. Practical examples are given for comparison and analysis. **Key words:** *casing load-bearing elements, cooling system, temperature field evaluation*

- (294) The structural Design of a Long-Life Power Turbine for a Light-Weight Gas Turbine Xiao Lide, Zhang Longbao, Li Yongqi (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

The design method and research/development results of a long-life power turbine are given in the present paper. Two power turbines based on the proposed new design have been manufactured to replace the old turbines and have completed a 150-hour operation period to test their performance characteristics. The measured temperature and stress values of the main components are in basic agreement with the design and calculated ones. The operation parameters attained and the test results have shown that the power turbines have met the design requirements. The proposed power turbine construction is applicable to various kinds of stationary and mobile gas turbines, especially for power turbines of aeroderived gas turbines. **Key words:** *gas turbine, power turbine, construction, design*

- (297) The Application of Y-type Steam Atomizing Oil Burners on Utility and Naval Boilers He peiao (*Harbin power plant Equipment Design and Research Institute*)

The author presents the main specific features, structural parameters and design/calculation methods of Y-type steam atomizing oil burners. A brief account of their application on utility