

# 中冷再热 STIG循环的焓分析

王永青 赵鸿斌\* 周伏秋 严家豪

(哈尔滨工业大学)

**〔摘要〕** 对中冷再热注蒸汽燃气轮机 (STIG) 循环焓分析结果表明: 中冷再热 STIG 循环比简单 STIG 循环的焓效率显著提高。同时, 分析了设备性能和各循环参数对焓效率的影响, 分析了各种不可逆损失产生的部位, 得出了与热平衡本质不同的结论。

**关键词** 中冷再热 STIG 循环 不可逆损失 焓效率  
**分类号** TM611.31

## 0 引言

STIG 循环是一种特殊回热循环, 它将 Brayton 循环和 Rankine 循环并联起来, 具有较高的热效率和较大的比功输出<sup>[1]</sup>。分级压缩、中间冷却和分级膨胀、中间再热是改善燃机性能的两个重要手段, 本文分析的就是引入了中冷和再热措施的 STIG 循环。图 1 为循环的系统图。

$Q_{E,1}$  (焓  $L_E$ ) 排向大气, 水在余热锅炉中回收的热量  $Q_B$  (焓  $E_B$ ) 在系统中被循环利用。

## 1 系统分析

循环的热效率:  $Z_T = W / Q_0$

循环的焓效率:  $Z_E = W / E_0$

对气态烃类燃料, 可以近似地认为燃料的化学焓等于燃料的低位发热量, 即  $e_0 = q_0 = H_L^{[2]}$ , 从而有:

$$Z_T = Z_E$$

即循环的热效率和焓效率相等。虽然二者相等, 但损失的意义不同。下面利用热力学第二定律来分析系统的各种不可逆损失。分析时将空气和混合燃气视为理想气体; 水蒸气回注前作实际气体考虑; 产生的蒸汽全部回注; 不考虑压气机漏气。设注蒸汽比 (注蒸汽质量与压气机进口空气质量之比) 为  $x$ , 燃烧室和后燃室的燃料比 (燃烧质量与压气机进口质量之比) 为  $f_1, f_2$  分析以 1 kg 压气机进口空气量为基准。

### 1.1 压气机和透平的焓损

低压压气机:

$$L_{LC} = T_0 \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT - R_a \ln c_c$$

$c_{LC}$  为低压压气机的压比, 即中间压缩压比  $c_c$

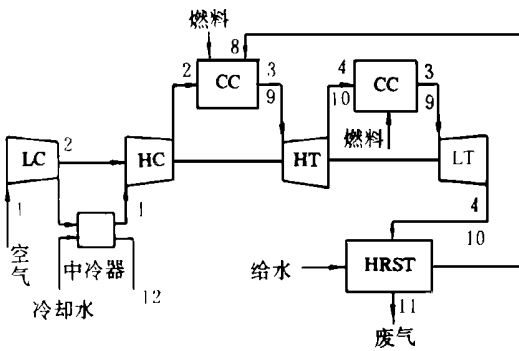


图 1 中冷再热 STIG 循环系统图

在循环中, 加入燃烧室和后燃室的化学能分别为  $Q_{01}$  (焓  $E_{01}$ )、 $Q_{02}$  (焓  $E_{02}$ ), 燃烧室和后燃室的损失分别为  $Q_{e1}$  (焓  $L_{e1}$ )、 $Q_{e2}$  (焓  $L_{e2}$ ), 绝大部分热量为混合工质所吸收, 其中一部分转化为功  $W$ , 另一部分

收稿日期 1994-07-07 收修改稿 1996-10-14

本课题为中船总公司青年科技发展基金资助项目 \* 哈尔滨 703 研究所工程师

高压压气机:

$$L_{hc} = T_0 \left( \int_{T_1'}^{T_2} \frac{C_{mp}}{T} dT - R_a \ln c_{hc} \right)$$

$c_{hc}$  为高压压气机的压比

压气机的焓损:  $L_C = L_{LC} + L_{hc}$  依此类似,可以得到透平的焓损  $L_e$

### 1.2 中冷器和余热锅炉的焓损

中冷器中空气的熵变:

$$\Delta S_a = \int_{T_2}^{T_1'} \left[ \frac{C_{mp}}{T} dT - R_a \ln(1 - X_p) \right]$$

$X_p$  为中冷器的压损率,  $X_p = (P_2 - P_1) / P_2$

冷却水的熵变:

$$\Delta S_w = x_{ic} [S_w(T_{w1} P_0) - S_w(T_0, P_0)]$$

$x_{ic}$  为冷却水的质量

从而得中冷器的不可逆损失:  $L_{ic} = T_0 (\Delta S_a + \Delta S_w)$  与此类似,可以得到余热锅炉的焓损  $L_B$

### 1.3 燃烧室和后燃室的焓损

燃烧室的焓损  $L_{c1}$  由两部分组成: 由于燃料不完全造成的焓损和由于温差传热和混合引起的焓损, 详细推导见文献 [3] 后燃室的焓损  $L_{c2}$  与此相似。

### 1.4 排气焓损

$L_E = (1 + x + f_1 + f_2) [(h_{g11} - h_{g0}) - T_0 (S_{g11} - S_0)]$  角标 g 代表燃气, "0" 状态指混合燃气与环境达到压力、温度和组分平衡时的状态。

全系统的焓平衡方程:

$$(f_1 + f_2)e_0 = L_C + L_{ic} + L_1 + L_{c1} + L_{c2} + L_B + L_E$$

## 2 计算结果与分析

计算条件如下: (1) 大气温度  $20^\circ\text{C}$ , 大气压力 0.101 325 MPa, 并等于压气机入口状态; (2) 压气机绝热效率和透平相对内效率均取 0.9; (3) 燃烧室和后燃室效率均取 0.98; (4) 中冷器、燃烧室、后燃室和余热锅炉的压损率分别取 0.01 0.05 0.05 和 0.03; (5) 中冷器出口空气温度  $t_{1'} = t_1 + 20^\circ\text{C}$ ; (6) 最低允许排气温度  $150^\circ\text{C}$ ; (7) 余热锅炉最低允许节点温差  $20^\circ\text{C}$ 。

### 2.1 初温、压比对焓效率的影响

图 2 图 3 分别为中冷再热 STIG 循环和简单 STIG 循环在其它热力参数优化条件下焓效率  $Z_E$  与压比  $c$  初温  $t_3$  的关系曲线。从曲线可以看出: 中冷再热 STIG 循环的焓效率比简单 STIG 循环显著提高; 压比和初温是影响中冷再热 STIG 循环焓效率的重要因素。压比一定时, 焓效率随初温的提高而增大,

在高压比时尤其明显; 初温一定时存在一最佳压比, 此最佳压比随初温的升高而增大。由图还可以看出, 中冷再热 STIG 循环更适于在高压比下运行。

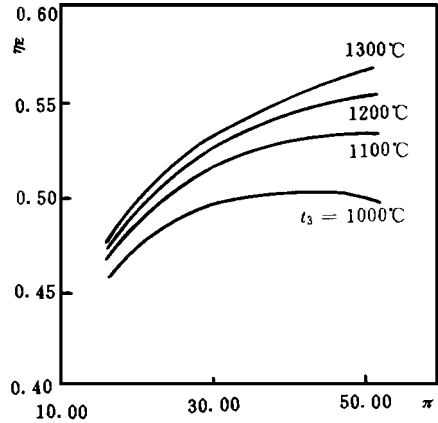


图 2

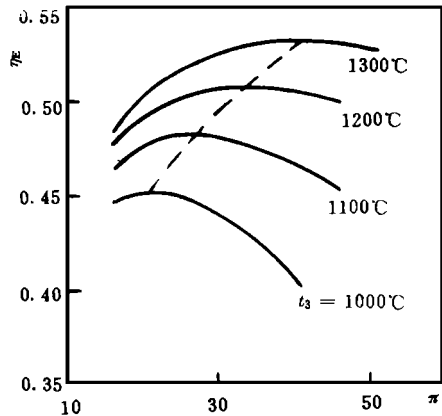


图 3

### 2.2 中间压缩压比 $c_c$ 和中间膨胀压比 $c_1$ 对焓效率的影响

图 4 是初温  $t_3 = 1300^\circ\text{C}$ , 压比  $c = 40$ , 其它条件优化时焓效率  $Z_E$  与  $c_c$ 、 $c_1$  的关系曲线, 可以看出: 中间压缩压比  $c_c$  和中间膨胀压比  $c_1$  的选择及二者的匹配也是影响焓效率的重要因素。例如,  $c_c = 1.7$ ,  $c_1 = 1.8$  时,  $Z_E = 55.6\%$ ; 而当  $c_c = 4.9$ ,  $c_1 = 4.2$  时,  $Z_E$  下降为 52%。所以如何优化匹配  $c_c$  和  $c_1$  是提高系统焓效率的一个关键问题

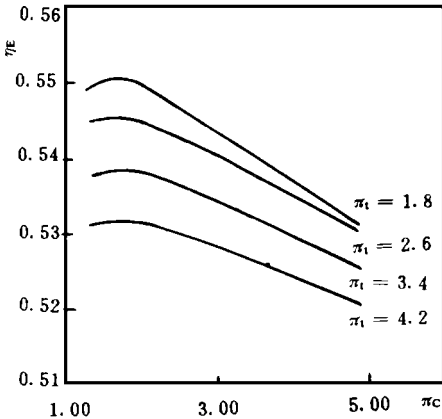


图 4

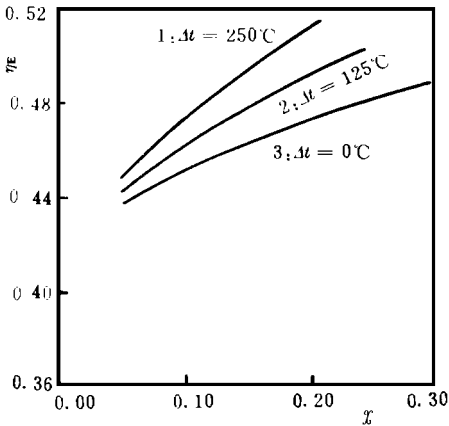


图 5

### 2.3 注蒸汽压力和温度对焓效率的影响

注蒸汽压力  $P_S$  对循环性能的影响很小,只要满足  $P_S > P_3$  即可<sup>[4]</sup>。

图 5 所示为初温  $t_3 = 1300^\circ\text{C}$ 、压比  $c = 28$ ,其它条件优化时,焓效率与注蒸汽过热度  $\Delta T$  注蒸汽比  $x$  的关系。可以看出,注蒸汽的高过热度对应于循环的高焓效率,在高回注比时其影响尤其明显。其它条件相同时,可用于使蒸汽过热的热量是一定的,过热度高时,最佳注蒸汽比降低,虽然如此,但蒸汽过热度对焓效率的影响超过了工质流量对焓效率的影响,因此焓效率仍然上升。

此外,还计算了部件压力损失和压气机及透平效率对焓效率的影响,计算表明:压力损失是影响焓

效率的又一重要因素,这是因为压力损失降低了膨胀压比,从而减少了透平功的缘故;压气机绝热效率  $Z_c$  和透平相对内效率  $Z_t$  对焓效率的影响非常显著,在其它条件相同时,若取  $Z_c = Z_t$ ,则二者每升高 0.01,  $Z_c$  增长 1% 左右,所以改善压气机和透平的性能是获得高焓效率的重要手段。

表 1 焓平衡和热平衡计算结果

项 目	$c = 28$		$c = 34$		
	$Q E W$ kJ/kg 空气	%	$Q E W$ kJ/kg 空气	%	
热平衡	输入热量	1910.18	100.00	1798.90	100.00
	压气机耗功	481.89	25.22	525.22	29.21
	燃烧损失	38.20	2.00	35.98	2.00
	透平作功	1485.84	77.77	1496.77	83.21
	排气热损失	868.03	45.45	791.68	44.01
	回收热量	892.92	46.75	798.03	44.36
系统热效率	52.55		53.99		
焓平衡	输入焓	1910.18	100.00	1798.90	100.00
	净功	1003.95	52.55	971.25	53.99
	压气机焓损	22.35	1.17	23.15	1.29
	中冷器焓损	1.00	0.05	1.00	0.06
	燃烧焓损	592.74	31.03	551.65	30.67
	透平焓损	49.65	2.60	52.23	2.90
	余热锅炉焓损	129.66	6.78	100.96	5.61
	排气焓损	110.83	5.82	98.96	5.48
	回收焓	359.81	18.84	326.77	18.17
系统焓效率	52.55		53.99		

### 2.4 焓平衡和热平衡计算结果比较

表 1 为  $c = 28$  和  $34$   $t_3 = 1300^\circ\text{C}$ ,其它条件优化时的热平衡和焓平衡的计算结果。可以看出,焓分析和热分析的结果不同。虽然所得到的热效率和焓效率相等,但二者意义不同。在系统中, $c = 28$  时,燃烧室和后燃室的热损失仅为 2%,而焓损失很大,为 31.3%,尤其是燃烧室的焓损,可达 27.67%;热平衡中,

排气热损失可占系统总热量的 45.45%,相应的焓损失要小得多,为 6.97%;在余热锅炉中回收的热量很多,可以达到 46.75%,而回收的焓为 18.7%,比回收的热量少得多;在热分析中,压气机和透平中不存在损失,而焓分析中,因为绝热压缩和膨胀过程的不可逆性,压气机和透平处均有焓损失。在热分析中,排气热损失最大,可占系统热量的 40%~50%,其它热损失只有燃烧损失,占 2%;在焓分析中,燃烧焓损失最大,可占 30%多,其次是排气焓损失和余热锅炉焓损失。

### 3 结 论

本文对中冷再热 STIG 循环进行了焓分析,主要结论如下:

- (1) 中冷再热 STIG 循环的焓效率比简单 STIG 循环显著提高;
- (2) 初温和压比是影响系统焓效率的重要因素;
- (3) 合理选择中间压缩压比和中间膨胀压比是

获得高焓效率的关键问题;

(4) 提高注蒸汽比和回注蒸汽的过热度是提高焓效率的重要手段;

(5) 压气机和透平的效率以及各设备的性能对焓效率有显著影响,应力图改善;

(6) 系统中燃烧焓损最大,其次是排气焓损和余热锅炉焓损。

### 参 考 文 献

- 1 林汝谋等.注蒸汽燃气轮机循环及其特点分析.工程热物理学报,1986,7(3)
- 2 Rant Z. Allg. Warmerch, 1961
- 3 周伏秋,王克光,严家騷.注蒸汽燃气轮机燃烧室不可逆损失计算方法.中国工程热物理学会第八届年会,庐山:1992
- 4 周伏秋,王克光,严家騷.燃气-蒸汽混合循环热力学分析.工程热物理学报,1992,13(3)

(渠源 编辑)

作者简介 王永青,女,1970年生,现为哈尔滨工业大学工程热物理专业博士生。目前的研究方向为先进热力循环。(通讯处:150001 哈尔滨工业大学 513信箱)

## 民 用 型 船 用 斯 贝

据 "Diesel & Gas Turbine Worldwide" 1996 年 5 月号报导,英国罗尔斯—罗伊斯公司推出了民用型船用斯贝燃气轮机,其母型是广泛应用于军舰的斯贝发动机。

在其高速渡船应用中,此双转子燃气轮机被设计成额定输出功率为 18 MW,输出轴转速为 5000 r/min。该发动机具有优异的燃料消耗特性、结构紧凑和重量轻的特点。

供商船应用的整个船用斯贝推进箱装体的重量为 17.5 t,比其舰用型约轻 6 t。罗公司声称,重量的减少并不是通过修改燃气发生器、动力涡轮或任何辅助系统而达到的。所有这些部套和系统均保持与已得到证实的舰用型通用。

随着渡船要求的功率增大,燃气轮机或柴油机与燃气轮机联合推进系统(CODOG或CODAG)将继续是一种具有吸引力的方案。燃气轮机比柴油机的耗油率和初投资费用高的缺点,已被 20 年来的燃气轮机发展逐步克服,并进一步开发中间冷却回热式(ICR)燃气轮机预期可将其燃料消耗带入柴油机油耗范围,甚至在部分负荷运行时也是这样。

(学牛 供稿)

联产机组供热单耗的“单耗分析”方法 = "Unit Consumption Analysis" of CHP Heat Supply [刊, 中] / Song Z. P., Zhang G. (North China University of Electric Power) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -1- 4

On the basis of a paper entitled "Unit consumption analysis model of a heat supply system" and by utilizing modern energy saving theory the authors have set up a generalized discrete model for the unit consumption of a cogeneration turbine set heat supply. This not only provides a basis for developing further a continuous model but also by way of calculating specific examples makes it possible to investigate the multifarious factors affecting the unit consumption of CHP heating on the basis of a totally new quantitative index analysis. Practice has shown that this is a useful study, enlightening authors in the creation of a new mode of combined heat and power generation. **Key words** heat supply, unit consumption, cogeneration, energy-saving, exergy

管簇结构腔体式吸收器总热阻所受环境条件的影响 = The Influence of Environmental Conditions on the Total Heat Resistance of Solar Cavity Receiver with a Tube Bundle Construction [刊, 中] / Chou Qiaoli, Ge Xin-shi, et al. (Chinese University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -5- 7

An analysis is conducted of the thermal performance of a novel solar cavity receiver with a bundle of tubes serving as an absorber. On the basis of a heat resistance network and the general control equations of solar energy a numerical analysis is performed of the influence on the heat resistance of such environmental conditions as solar direct irradiation, ambient temperature and wind velocity. **Key words** solar cavity receiver with a tube bundle as its absorber, solar energy, heat resistance, boundary condition

双燃料煤粉流化床复合燃烧锅炉的物质平衡与热量平衡 = The Material and Heat Balance of a Dual-fuel Pulverized Coal-fired Fluidized Bed Multiple Combustion Boiler [刊, 中] / Zhao Guangbo, Zhu Qunyi, Yun Xiaoyin, et al. (Harbin Institute of Technology), Ren Youbao, Ye Jiyi (Jiamusi Paper Making Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -8- 10

An analysis is made of the material and heat balance for a dual-fuel pulverized coal-fired fluidized bed multiple combustion boiler. Obtained are a material balance equation for the boiler furnace and air heater, a heat balance equation for the fluidized bed and the pulverized coal-fired furnace and a calculation formula for furnace outlet excess air factor, unburned flue gas heat loss and unburned carbon heat loss. **Key words** mixed fuel, multiple combustion, material balance, heat balance

中冷再热 STIG 循环的焓分析 = Exergy Analysis of an Intercooled Reheat STIG Cycle [刊, 中] / Wang Yongqing, et al. (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -11- 14

The exergy analysis of an intercooled reheat steam injected gas turbine cycle has shown that such a cycle has a significantly higher exergy efficiency as compared with a simple STIG cycle. Also analysed in this paper are the effect on exergy efficiency of the equipment performance and various cycle parameters, and the locations where various kinds of irreversible losses took place. As a result, intrinsically different conclusions in respect of heat balance are obtained. **Key words** intercooled reheat STIG Cycle, irreversible loss, exergy efficiency

220 t/h 百叶窗分级循环流化床投资成本分析 = Investment Cost Analysis of a 220 t/h Louver Stepped Cycle Fluidized Bed [刊, 中] / Chen Yulin, Li Yuying (Jiamusi Thermal Power Station) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -15- 18

This paper deals with the investment cost of a 220 t/h louver stepped cycle fluidized bed installed at Jiamusi