

再热湿空气循环分析*

王永青 陈安斌 严家禄 (哈尔滨工业大学)

闻雪友 (哈尔滨七〇三研究所)

摘要] 通过对再热湿空气循环 (HAC- Humid Air Cycle)的系统分析和优化计算表明:再热对增进湿空气循环性能效果明显,在现有技术条件下(透平初温 1300°C 、压力 10-30),循环的热效率可达 59.2%-60.2%,比功可达 620-980 kJ/kg 空气。

关键词 湿空气循环 中间再热 系统分析 优化计算

分类号 TK472.5

0 引言

本着改善热力循环性能、提高热力系统能量利用率的,引入化工中的喷雾干燥塔(文中称增湿塔),构造了一个新型燃气轮机循环——湿空气循环(HAC),如图 1所示。循环利用水回收透平低温余热,采用增湿塔作为水的蒸发空间,被雾化的水,在

增湿塔中与空气充分接触,蒸发迅速,不可逆性小,同时增加了透平工质流量,循环结构简单,对应最大效率的最佳压比较低,在透平初温 1300°C 时,循环热效率可达 56%-58%,比功可达 500-750 kJ/kg,是又一个新型高效复合循环。

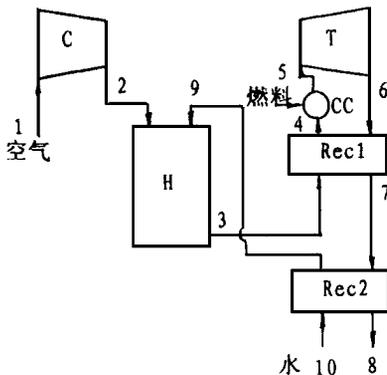


图 1 HAC系统图

C-压气机 H-增湿塔 T-湿空气透平 Rec1-高温回热器
Rec2-低温回热器 CC-燃烧室 RC-再燃室
HT-高压透平 LT-低压透平

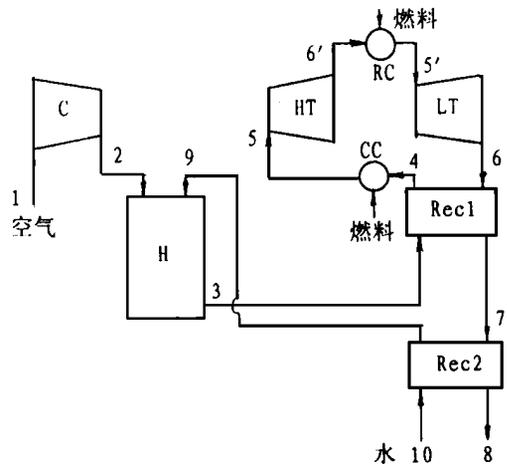


图 2 再热 HAC循环的系统图

C-压气机 H-增湿塔 T-湿空气透平
Rec1-高温回热器 Rec2-低温回热器
CC-燃烧室 RC-再燃室
HT-高压透平 LT-低压透平

* 本课题为国家教委博士点基金资助项目

收稿日期 1996-06-11

本文联系人 王永青 女 1970年生 博士研究生 150001 哈尔滨工业大学 513信箱

回热基础上的分级膨胀、中间再热是改善热力循环性能的传统方法,它使膨胀过程更接近等温膨胀,从而增大透平功,提高循环的效率和输出。本文将这种方法用于湿空气循环,并对循环的性能进行了分析和计算,图 2 为循环系统图。

在再热 HAC 中,空气经压缩机压缩后进入增湿塔,水回收透平排气低温余热后也增入增湿塔,经雾化,水与空气在增湿塔中直接接触,形成的高温空气回收透平排气高温余热后进入燃烧室,燃烧室出来的高温燃气经高压透平、再燃室、低压透平后,再次依次经高、低温回热器回收热量,然后排向大气。

1 循环系统及计算结果分析

1.1 系统分析与优化计算

分析和计算都以 1 kg 压气机进口空气量为基准。

$$Z = W/Q = \frac{(1 + x_m + f_1)(h_{g5} - h_{g6}) + (1 + x_m + f_1 + f_2)(h_{g5} - h_{g6}) - (h_{a2} - h_{a1})}{(f_1 + f_2) \cdot q \cdot \eta_b}$$

$$= Z(X, f, i_m, X, \Delta t_{6-4})$$

由以上分析可知, HAC 的性能与系统温比、压比、水气混合比、中间膨胀比和高温回热端温差有关。

下面对再热 HAC 进行系统优化,计算条件如下:压气机进口空气温度 20℃;压气机绝热效率和透平相对内效率都以 0.9;取增湿塔、燃烧室、再燃室、回热器的压力损失系数分别为 0.02 0.03 0.03 0.02;取燃烧室和再燃室效率为 0.98;同时规定回热器入口和出口冷热流体温差大于所要求的最小温差(气—气换热器取 20℃、水—气换热器取 15℃)排向大气的燃气温度至少高于露点温度 20℃;增湿塔出口的相对湿度 $\Phi \leq 1$;燃烧室和再燃室出口燃气温度相等。

高温回热器热端流体温差 Δt_{6-4} 越小,表明系统对高温余热的回收越充分,对系统的效率和比功越有利。因此,在下面的计算中,我们取 Δt_{6-4} 为计算条件中所规定的气—气换热器的流体温差最低值。

1.2 优化计算的结果

图 3 为各参数优化条件下,循环的最佳效率与压比和初温的关系;图 4 为与最佳效率相对应的比功。两图还示出了相同计算条件下,简单 HAC 循环

压气机耗功: $w_c = h_{a2} - h_{a1}$

透平总功: $w_t = w_{HT} + w_{LT} = (h_{g5} - h_{g6})(1 + x_m + f_1) + (h_{g5} - h_{g6})(1 + x_m + f_1 + f_2)$

循环比功:

$$w = w_t - w_c = w(X, f, i_m, X, \Delta t_{6-4})$$

燃烧室加热量: $Q_1 = f_1 \cdot q \cdot \eta_b$

再燃室加热量: $Q_2 = f_2 \cdot q \cdot \eta_b$

总加热量

$$Q = Q_1 + Q_2 = (f_1 + f_2) \cdot q \cdot \eta_b = Q(X, f, i_m, \epsilon_1, \Delta t_{6-4})$$

循环热效率:

式中,角标 a、g 分别表示空气和湿燃气, q 为燃料的低位发热量, η_b 为燃烧室和再燃室效率, f_1 和 f_2 为燃烧室和再燃室所加燃料的质量, x_m 为水气混合比(系统中水与压气机进口空气的质量比), X 、 f 分别为系统的压比和温比, X 为循环的中间膨胀压比, Δt_{6-4} 为高温回热器热端流体温差。

和注蒸汽(STIG)循环的性能曲线。由图可以看出:

1.2.1 再热对 HAC 循环效果明显,使效率和比功都有显著提高。初温 1300℃、10—30 压比范围内,简单 HAC 循环的效率为 54%—57.6%,比功 520—750 kJ/kg,再热循环 HAC 的效率 59.2—60.2%,比功 620—980 kJ/kg。中间再热对循环性能的改善可以从两方面来解释:其一,中间再热使膨胀过程更接近于等温过程,从而使透平功增加;其二,相同压比和温比下,中间再热使低压透平出口温度上升,即可供回收的热量增加,从而水气混合比增加,工质流量也随之增加。

1.2.2 与简单 HAC 相同,再热 HAC 的最佳压比也较低(低于 10),这就使它比一些最佳压比高的循环(如 STIG)容易实现。

1.2.3 相应于每一温比,再热 HAC 循环在很大的压比范围内热效率变化不大,即此循环存在一个可供选择的非负性压比范围。相对来说,简单 HAC 和 STIG 循环受压比的影响就大一些,尤其是 STIG 循环。

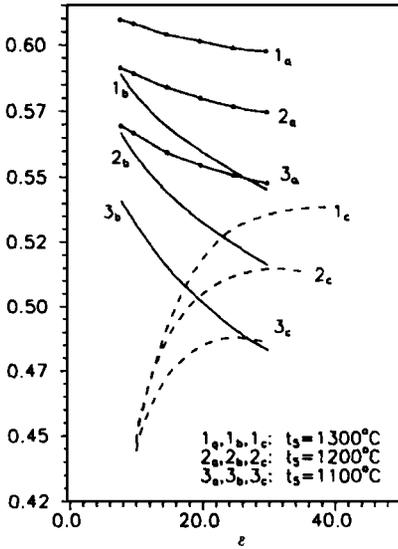


图 3 循环压比、温比与热效率的关系

—·— 再热 HAC ——— HAC - · - STIG 循环

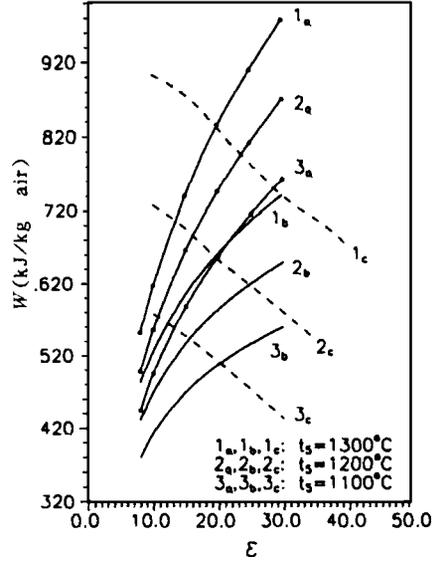


图 4 循环压比、温比与比功的关系

1. 2. 4 随着压比升高, 再热 HAC 的最佳效率降低不大, 但比功增长迅速。 $t_5 = 1300^\circ\text{C}$ 时, 压比由 10 增到 30, 热效率由 60.2% 降到了 59.2%, 比功由 620 增长到了 980 kJ/kg

中间膨胀比是影响循环性能的一个独立参数, 表 1 为初温 1300°C 时, 不同压比下, 与最佳效率相对应的中间膨胀比; 图 5 为压比 15 初温 1300°C 时, 中间膨胀比对性能的影响曲线。由表可知, 再热 HAC 的最佳中间膨胀比比普通再热燃气轮机循环 (压比的几何平均值) 低得多, 这是一个多因素优化的结果。 $X < X_{opt}$ 时, 循环热效率和比功都降低; $X > X_{opt}$ 时, 效率降低, 比功稍有地加, 相应的最佳水气混合比也略有增大 (如图 5, $X = 2.8$ 时, $w = 740 \text{ kJ/kg}$, $x_m = 0.135 \text{ kg/kg}$; $X = 4.0$ 时, $w = 746 \text{ kJ/kg}$, $x_m = 0.138 \text{ kg/kg}$)。但在最佳中间膨胀比附近一个宽广的范围内, X 对循环效率和比功的影响并不太显著。

表 1 初温 1300°C 时, 与最佳效率相对应的中间膨胀比

ϵ	10	15	20	25	30
ϵ_1	2.3	2.8	3.2	3.5	3.8

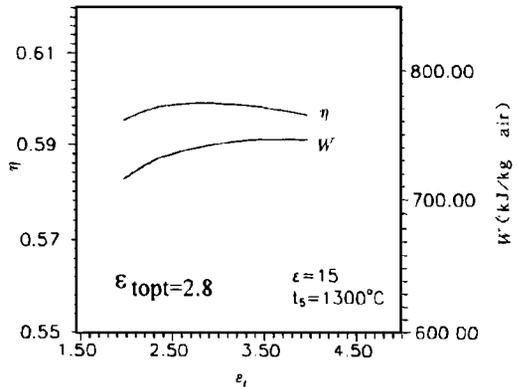


图 5 热效率和比功随中间膨胀比的变化

表 2 为相同计算条件下, 各参数优化时, 再热 HAC 和 STIG 循环的最佳水气混合比。再热 HAC 的最佳水气混合比稍高于 HAC, 但在低压比时, 二者都低于 STIG 循环, 这主要是因为增湿塔出口空气状态 (极限状态为饱和) 限制了水气混合比的增加。水气混合对比比功影响显著, 因此低压比时, STIG 循环的比功高于简单 HAC 和再热 HAC (图 4)。

表 2 初温 1300°C 时, 各循环的最佳水气混合比
(单位: kg/kg 空气)

压比	10	15	20	25	30
再热 HAC	0.104	0.135	0.162	0.183	0.204
HAC	0.101	0.131	0.155	0.176	0.194
STIG	0.391	0.311	0.257	0.213	0.188

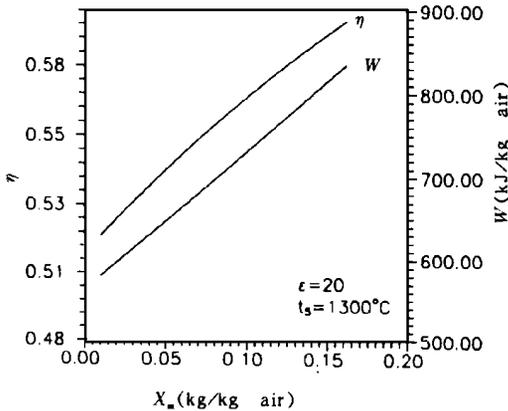


图 6 水气混合比对循环性能的影响

图 6 为压比为 20 初温 1300°C 时, 水气混合比对再热 HAC 性能的影响曲线。可见, 随着 x_m 的提高, 效率和比功都大幅度增长, 因为 x_m 越大, 对系统

余热的回收越充分。

2 结论

本文对再热 HAC 进行了热力学分析, 分析结果表明, 再热对 HAC 提高效率、增大比功效果显著, 可使循环热效率和比功在目前技术条件下分别达到 59.2%—60.2% 和 620—980 kJ/kg 空气。

参考文献:

- 1 Cheng D Y. Regenerative parallel compound dual-fluid heat engine. U. S. patent NO. 4128994
- 2 Ishida M, Zheng D and Akonada T. Evaluation of a chemical-looping combustion power-generation system by graphic exergy analysis energy, 1987, 12 (2)
- 3 Cook D T and Rao A D. HAT cycle simplifies coal gasification power. MPS, May 1991
- 4 化工设备设计全书编辑委员会编. 干燥设备设计. 上海科学技术出版社, 1990
- 5 沈幼庭, 何锦英. 热力系统及设备最优化. 机械工业出版社, 1985

(李乡复 编辑)

市场分析

1996—2005 年电力生产市场预报

据“Turbomachinery International”1996 年 Handbook 报导, 1995—2004 年世界电力生产装机容量总增加值预计为 638 232 MW, 其中汽轮发电机装置占支配地位为 287 490 MW, 占总增加量的 45%, 其次是水电站为 146 111 MW 占 23%, 燃机发电装置排第三位占 22%。

预期在本世纪结束前亚太地区对新汽轮发电机组的需求十分大。由于烧煤, 中国将需要大量汽轮发电机组。但是, 这一进展将在很大程度上取决于世界银行提供资金。

燃气轮机发电装置, 包括简单循环和联合循环近年来受到公众的欢迎。受欢迎的理由之一是其价格急剧降低到 170—200 美元 /kW (简单循环)。由于技术的迅速进展, 一些燃机的效率高达 42% (简单循环) 和 60% (联合循环)。

80 年代每年推出的新型燃机平均不到 2 种, 现在已增加到每年约 6 种, 每 2 个月即有一型新燃机投放市场。

(思娟 供稿)

双炉膛炉内空气动力场的数值模拟研究 = **A Numerical Simulation Study of Aerodynamic Field Characteristics in a Double-Furnace** [刊, 中] /Zhu Tong, Fan Weidong, et al (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 401~ 404

A numerical simulation study is conducted of the aerodynamic field characteristics of a 1000 t/h once-through boiler double-furnace. The results of the simulation study basically agree with the measured results on site. Through analysis it is shown that the front and rear wall rectangular arrangement of impellerless burners in a tangentially fired furnace constitutes a major cause of the water walls being swept by flue gases. The separation of primary air and secondary air can be mainly attributed to a high and narrow primary air nozzle and a thin and wide secondary air nozzle, resulting in a high-temperature corrosion of the water walls on the gas side. **Key words** intra-furnace aerodynamic field, numerical simulation, high-temperature corrosion, boiler, double-furnace

切向燃烧煤粉炉后屏过热器对水平烟道入口烟速分布的影响 = **The Influence of the Rear-Panel Superheater of a Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler on the Gas Speed Distribution at the Inlet of a Horizontal Flue** [刊, 中] /Zhang Wenhong, He Baishu, et al (Xi'an Jiaotong University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 405~ 407

A detailed measurement of the velocity fields in a panel and platen zone as well as at the inlet of the horizontal flue of a tangentially-fired boiler was conducted using a hot-wire anemometer. The influence of the rear-panel superheater on velocity distribution at the horizontal flue was studied, which provides useful reference data for the design and modification of utility boilers. **Key words** rear-panel superheater, speed excursions, tangentially fired pulverized-coal boiler

再热湿空气循环分析 = **Reheated Humid Air Cycle Analysis** [刊, 中] /Wang Yongqing, Chen Anbin (Harbin Institute of Technology) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 408~ 411

The systematic analysis and optimization calculation of a humid air cycle have shown that reheating has a marked effect on enhancing the humid air cycle performance. Under the existing technical conditions (turbine inlet temperature 1300°C, pressure ratio 10~ 30) the cycle thermal efficiency can be as high as 59.2~ 60.2% with a specific power of 620~ 980 kJ/kg air. **Key words** humid air cycle, intermediary reheat, system analysis, optimization calculation

锅筒排污水炉内切向喷雾强化燃烧 = **Tangential Spray Intensified Combustion in a Boiler Furnace with Continuous Blowdown** [刊, 中] /Zhang Yongfu, Li Fangyue (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(6): 412~ 415

With the pressure reduction evaporation of boiler blowdown water serving as a steam spray working medium a tangential circle swirl flow can be formed in the combustion space of the boiler, resulting in an intensified combustion and the improvement of aerodynamic distribution in the furnace. The test and use verification on a UG-35/39 boiler have shown that the fly ash carbon content and boiler slag carbon content are lowered by 25.8% and 11.6% respectively. In addition, a considerable reduction of the fly ash quantity and gas emission concentration is also attained with a simultaneous effective control of SO_x content in the gas emissions. **Key words** blowdown water, evaporation, spray, intensified combustion

电站锅炉应用热管式空气预热器的利弊分析 = **Analysis of the Merits and Demerits of Using Heat Pipe Type**