

燃气轮机变工况对 IGCC 系统性能的影响

陈雷¹, 张忠孝¹, 李振中^{1,2}, 谢浩¹

(1. 上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093; 2. 国家电站燃烧工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 采用成熟的商业软件 Thermoflex 对拟在国内建设的 200 MW 等级 IGCC 示范机组进行模拟, 并对其进行物质和热平衡的核算。降负荷过程中采用目前联合循环燃气轮机较为常用的 IGV(压气机进口可转导叶)调节等 T_3 (透平前温)的调节方式, 分析了这种调节方式下燃气轮机负荷率对 T_3 、 T_4 (排气温度)、 Q_{Ge} (燃气轮机排气流量)系统的效率、功率、燃料量和蒸汽侧主要参数的影响, 得到了 IGCC 系统变工况特性及各主要参数变化的一般规律, 对系统在变工况时的安全性和经济性进行了必要的分析。结果表明: 调节方式直接影响系统的变工况性能, 在 IGCC 系统变工况的过程中为了保证系统的经济性和可靠性, 尽量使燃气轮机在 IGV 调节的范围内调控。

关键词: 整体煤气化联合循环; 燃气轮机; 变负荷; 变工况性能

中图分类号: TK472 文献标识码: A

引言

IGCC 是一个由多种技术、多个设备组成的复杂系统。虽然, 近年来各国学者从不同角度、用不同方法对其进行研究, 但至今理论研究仍不充分, 且多数侧重于设计工况^[1]。而变工况方面的研究则更加复杂, 目前虽然已经进行了一些关于 IGCC 系统或子系统变工况方面的研究: 段立强、林汝谋等人研究了燃气轮机 3 种调负荷方式对 IGCC 系统变工况性能的影响, 分析了 IGCC 循环系统变工况特性^[1~3]; 赵士杭、吕泽华等人就双压、三压再热蒸汽循环 IGCC 的变工况特性对蒸汽侧变工况进行了分析^[4~5]; Johnson, M. S 研究了合成气燃气轮机的额定和变工况特性和燃气轮机的性能参数对 IGCC 系统的影响^[6~7]; 朱宝田、徐越进行了 IGCC 动力岛的变工况特性分析并比较了变工况下汽轮机滑压和定压运行对蒸汽参数的影响^[8]。在前面的研究基础上, 本文从整个系统的角度出发, 针对现阶段发展 IGCC 的

现状, 以国内 200 MW 等级 IGCC 示范机组为研究对象, 采用成熟的商业软件 Thermoflex 计算分析了燃气轮机变工况对 IGCC 系统燃料量、效率、功率、耗功和蒸汽侧主要参数的影响。

1 系统概述与分析

以拟在国内建设的 200 MW 等级 IGCC 示范机组为研究对象, 采用 Thermoflex 软件建立包括 200 MW 级、空分系统(整体化系数为 30%)、带辐射和对流两级废锅的水煤浆气化、低温湿法煤气净化系统、 N_2 不回注、合成气加湿饱和系统、合成气燃气轮机(GE9171E 级)、余热锅炉(三压、再热、卧式、无补燃、自然循环)和三压再热蒸汽轮机等设备组成的流程图, 在满足系统的质量和能量平衡和各部件之间的耦合的条件下, 以燃气轮机负荷的变化(40%~100%)为因变量进行计算。

由于本系统采用低压空分工艺, 空分后获得的 N_2 压力只有 0.11 MPa 略高于大气压, 回注 N_2 所需要的压缩功会很大, 经济性差, 因此不回注 N_2 。同时由于技术上的原因, 燃气轮机的通流部分暂不考虑改造, 因此不回注 N_2 也有通流的考虑。系统采用 30% 整体空分(压气机抽气约为 6%)且 N_2 不回注, 合成气加湿饱和降低 NO_x 即可达到 NO_x 指标($NO_x < 80 \text{ mg/m}^3$ (16% O_2))也可以满足燃气轮机通流。同时针对煤气湿饱和和回注 N_2 两种降 NO_x 方案, 文献[9]指出, 煤气湿饱和降 NO_x 可以避免因燃烧低热值煤气而带来的种种困难, 并且给出建议在满足环保要求的前提下, 尽可能采用第一种方案。

当采取完全整体化空分系统时, 即空分系统所需要的压缩空气完全取自燃气轮机的压气机, 即使空分后所得到的 N_2 完全回注燃气轮机, 在燃气轮机改烧合成气后, 流经燃气透平的燃气流量与从压气

机吸入的空气流量的比值只比烧天然气时增多 2%，此时燃气轮机的通流部分就无需进行改造，就能满足改烧合成煤气的需要。Siemens 公司的 V94.2 和 V94.3 机组上改烧合成气时采用这样方法。但是，这种方法将使 IGCC 的空分系统难于启动，机组的负荷难于调节。

经过综合考虑本系统采用 30%部分整体化率

的空分系统，合成气经湿饱和后，热值约为 8.27 MJ/m³。经计算，燃气轮机通流欲度可以满足燃气流量的增加，无需改型设计压气机和燃气透平的通流能力，且能达到 NO_x 排放要求。

图 1 为系统主要部件的流程。其中，合成气净化单元简化表示，并省略了常规岛、湿饱和器和一些换热器。

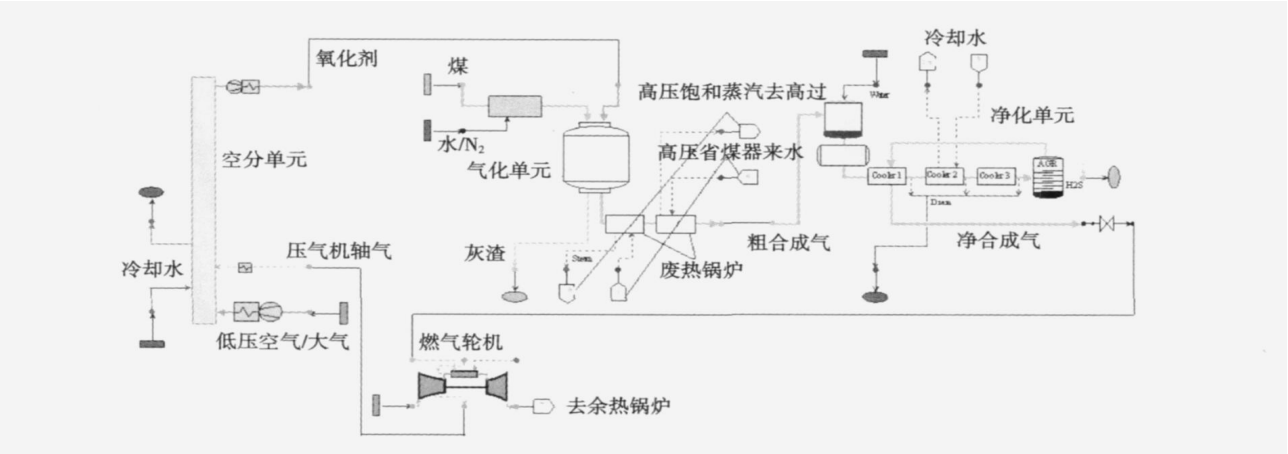


图 1 IGCC 系统简图

2 设计工况参数及指标

系统中设计工况参数及指标如表 1 所示。

表 1 设计工况参数及指标

指标	
设计煤种	内蒙满世煤
大气温度/℃	17
大气压力/kPa	101.32
相对湿度/%	79
发电效率(LHV)/%	48.41
气化炉容量/t·d ⁻¹	2 000
气化压力/MPa	3.6
气化温度/℃	1 311.7
水煤浆浓度/%	60.5
碳转化率/%	98
水—煤比	0.366 9
氧—煤比	0.739
空分整体化率/%	30
燃气轮机型号	GE9171E ID311
燃气轮机功率/MW	126.5
燃气轮机压比	12.4
燃气轮机排气流量/t·h ⁻¹	1 525.3
燃气轮机排气温度/℃	559
高压蒸汽参数(℃/MPa)	538/ 95.75
中压蒸汽参数(℃/MPa)	300/ 27.41
再热蒸汽参数(℃/MPa)	508/ 25.38
低压蒸汽参数(℃/MPa)	217/4.04
蒸汽轮机功率/MW	110.2

3 变工况模型

IGCC 燃气轮机负荷波动引起系统的变工况是指当燃气轮机总体技术方案和设计额定工况参数确定，且蒸汽系统与煤气化和煤气净化系统以及空分系统的物质、能量交换关系也已明确等的情况下，由于燃气轮机负荷(出力)变化引起的变工况。

变工况模型:

空 分: 保持 30%空分整体化率;

气化炉: 部分负荷下平衡压力、平衡温度保持不变，气化炉气化生成的粗煤气成份不变;

废热锅炉和净化单元: 合成气出口温度不变，换热量与合成气量成正比;

燃气轮机: 参数按选择燃气轮机特性曲线和调节方式确定;

汽轮机: 滑压运行;

余热锅炉: 工作压力由汽轮机的平衡运行来决定。

4 计算结果与分析

4.1 燃气轮机负荷波动对燃气轮机透平前温、排气温度和通流流量的影响

通常,燃气轮机的调节方式有 3 种:IGV 不调节、IGV 调节等 T_3 调节和 IGV 调节等 T_4 调节^[4]。

图 2 为燃气轮机降负荷时,透平前温和排烟温度的变化特性,本系统燃气轮机(GE9171E ID311)采用等透平前温 T_3 的调节方式,控制 T_3 不变和 T_4 不超温,然后再降低 T_3 继续减负荷。

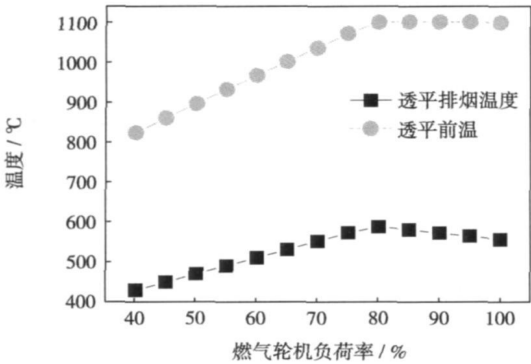


图 2 燃气轮机负荷率对透平前温和燃气轮机排烟温度的影响

其中透平前温即为燃烧室出口温度,可由燃烧室热平衡算出:

$$T_3=\frac{G_2C_{p2}T_2+G_f(Q_u\eta_B+h_f)}{C_{p3}(G_2+G_f)}\tag{1}$$

式中: G_2 —燃烧室进口空气流量; T_2 —燃烧室进口空气温度; G_f —燃料消耗量; Q_u —燃料低位发热量; η_B —燃烧效率,在变工况时可近似看作不变; h_f —燃料物理比焓; C_{p3} —燃气定压比热容, $C_{p3}\approx 1\,154\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。在变负荷过程中可认为式(1)中只有 G_2 和 G_f 是变量。

排气温度 T_4 可由等熵膨胀公式和透平效率计算:

$$T_4=T_3\left[1-\eta_t\left[1-\frac{1}{(\varepsilon^{\circ}a_1^{\circ}a_2^{\circ}a_3^{\circ})\left(\frac{k-1}{k}\right)}\right]\right]\tag{2}$$

式中: η_t —透平效率; k —空气等熵指数 $k=1.4$; a_1 、 a_2 、 a_3 —压气机、燃烧室和透平排气总压恢复系数; 变负荷过程中 η_t 、 a_1 、 a_2 、 a_3 可视为不变, ε —压气机压比。

从图 2 和图 3 中可以看出,燃气轮机在 100%~80%负荷时,采取了关小压气机进口可转导叶来降负荷,这时压气机进气流量相应的降低,压气机的压缩比 ε 也降低。由式(2)可知, T_3 不变, ε 降低,燃气轮机排气温度开始上升。当燃气轮机负荷下降到 80%时,燃气轮机的排气温度从额定工况下的 559℃升高到 591.2℃,由于排气温度 T_4 已经到达上

限,此时在关可转导叶的同时,必须采用降低透平前温的方式来继续降低燃气轮机的负荷率。此后透平前温和排气温度都开始下降,当燃气轮机负荷降低到 78%时,压气机进气流量从额定工况下的 1 455.7 t/h 降低到 1 194.8 t/h,为了防止压气机发生喘振,此时压气机可转导叶关到最小,压气机流量也不再降低。

图 3 给出了燃气轮机负荷对燃气轮机排气量 Q_{Ge} 、压气机进气量 Q_{Ci} 和透平进气量 Q_{Ti} 的影响关系。其变化关系可由 IGV 调节引起的压气机进气流量的改变和燃气轮机通流的质量守恒方程得到:

$$Q_{Ci}+Q_F=Q_{Ge}+Q_B=Q_{Ti}+Q_c+Q_B\tag{3}$$

式中: Q_F —燃烧室进口合成气量; Q_B —压气机抽气量; Q_c —冷却透平叶片的冷却空气量。

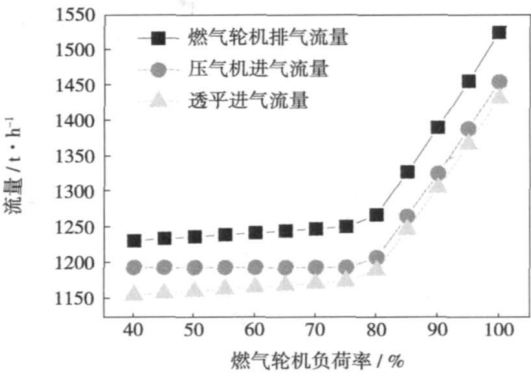


图 3 燃气轮机负荷率对燃气轮机通流流量的影响

4.2 燃气轮机负荷率对效率的影响

图 4 为余热锅炉过热器和汽轮机允许进气超温的条件下燃气轮机负荷率改变对系统及燃气轮机效率的影响。由图可知,随着负荷率的降低,燃气轮机的效率下降,但是系统效率却有先稍微升高而后降低的趋势。这是由于在 80% 负荷以前通过调节压气机进口可转导叶保持 T_3 不变和 T_4 升高,使得余热锅炉进口烟气温度和出口的主蒸汽温度升高,提高了蒸汽侧的循环效率,从而有利于联合循环效率的提高。系统效率是由燃气轮机效率和蒸汽侧效率综合作用的结果,但是在实际运行中,由于部分负荷下系统偏离原来设计的最佳工况点且在大部分情况下汽轮机不允许进气超温,因此系统效率一般不会升高,只是在 IGV 调节时降低缓慢,赵士杭、叶海文在研究压气机静叶可调对燃气—蒸汽联合循环变工况性能的影响时得出在部分负荷下 IGV 调节比不调节系统效率约提高 2%^[10]。即使在汽轮机不允许进气超温时,也可以保证在燃气轮机负荷下降到 70%

时保证主蒸汽温度不降低。

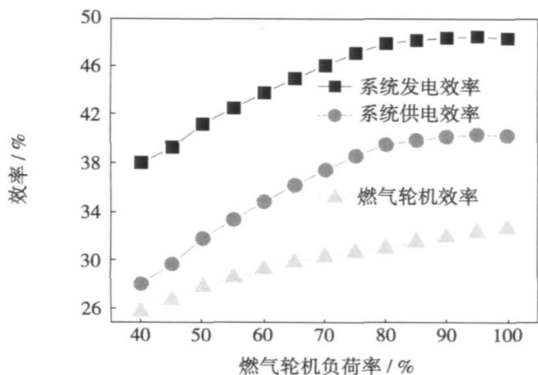


图 4 燃气轮机负荷率对效率的影响

4.3 对系统做功和耗功的影响

图 5 给出了燃气轮机负荷率对燃气轮机、汽轮机和系统发电功率的影响, 可以看出燃气侧功率与蒸汽侧功率比值为 1.15:1, 远小于常规联合循环。通常, 在联合循环中燃气轮机的功率与汽轮机的比值为 2:1, 但在 IGCC 中它们的比值为 (1.3~1.5):1^[11], 有的甚至更低, 美国“冷水”电站为 65/55(MW)=1.19:1, 这与采用的空分形式(空分整体化率)有关。文献[12]指出, 通常在独立空分系统的 IGCC 电站中燃气轮机功率约占电站功率的 60%~65%, 而在整体化空分系统约占 55%~57%。这与常规联合循环相比, IGCC 联合循环在气化岛的煤气冷却器中产生大量的高、中压饱和蒸汽, 导致余热锅炉的蒸汽流量比常规联合循环要大, 因此蒸汽侧功率较大。

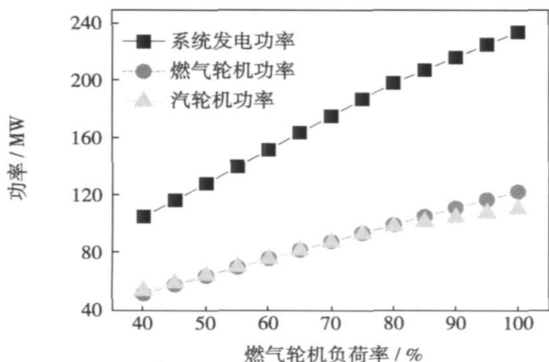


图 5 燃气轮机负荷率对功率的影响

理论上烧天然气的燃气轮机在改烧合成气时因燃料流量的增大, 燃气轮机的出力会增加。文献[9]指出, 烧天然气的燃气轮机在燃烧煤气时, 其出力可增加 15%~20%, 整个联合循环的出力可增加 20%~30%。但是功率增大必须受制于燃气轮机的设计

强度, 燃气轮机后接三压余热锅炉, 其背压必然比原设计的额定工况高, 通常, 燃气轮机背压每增加 1 kPa, 其功率下降 0.6%~0.7%^[12]。对于本系统, 由于燃气轮机通流并没有改造, 虽然燃料流量增大, 而空气流量减少(6%的抽气), 同时由于偏离原来的运行工况点, 可能导致燃气轮机的效率降低, 因此本系统燃气轮机仅从烧天然气时的功率为 124.1 MW 增大到 126.5 MW。

从图 5 中可以看到, 由于是以燃气轮机负荷率为因变量的, 因此燃气轮机功率是线性下降的。在 100%~80%燃气轮机降负荷时, 虽然燃气轮机排气流量有所减小, 但是排气温度和焓值则有所升高, 因此排气传递给余热锅炉的热量降低比较缓慢, 汽轮机做功降低也比较平缓。燃气轮机在 80%负荷时汽轮机功率为额定负荷的 87%, 因此燃气轮机在 100%~80%负荷波动时对余热锅炉和汽轮机的稳定和安全运行是非常有利的。在 80%~40%负荷时, 由于燃气轮机的排气温度和流量均相应的减小, 汽轮机和燃气轮机的降低趋势基本相同, 均快速下降。

图 6 为 IGCC 系统中的主要耗功部件随燃气轮机负荷的变化情况。辅机耗功主要包括空分装置, 水煤浆制备及输送, 蒸汽侧的给水泵和循环水泵等的耗功, 从图中可以明显看出, 空分是 IGCC 系统中的主要耗功部件, 大约占了电站厂用电的 70%。由于本系统采用水煤浆气化, 在气化岛中煤浆泵是耗功的主要设备。随着燃气轮机负荷的降低气化炉所需要的燃料和氧气也相应的减少, 因此空分中的空压机和氧压机耗功和气化炉辅机耗功也是呈下降趋势的。

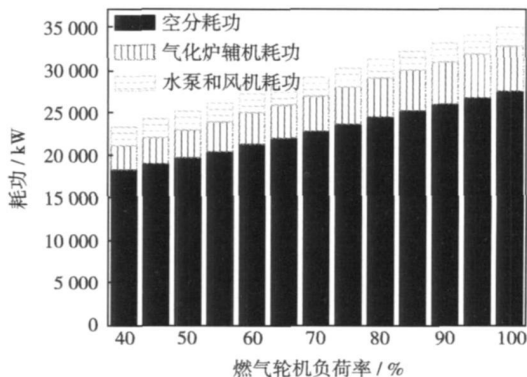


图 6 燃气轮机负荷率对系统耗功的影响

4.4 对所需要的燃料量和氧量的影响

图 7 为系统所需的燃料量和氧气量随燃气轮机

负荷率变化关系图,在 IGCC 系统变负荷的时候,一般假定当煤种不变时,气化炉在部分负荷下平衡压力和平衡温度保持不变,气化炉气化生成的粗煤气成份不变,也就是保证氧—煤比不变,本系统氧—煤比为 0.739。所以在燃气轮机变负荷的情况下由于氧煤比保持不变,气化炉进煤量和进氧量的变化趋势是完全一样的,即在变负荷过程中: $Q_o = 0.739Q_c$,其中: Q_o —消耗的氧量, Q_c —消耗的煤量。其下降趋势由系统热耗率和功率决定。

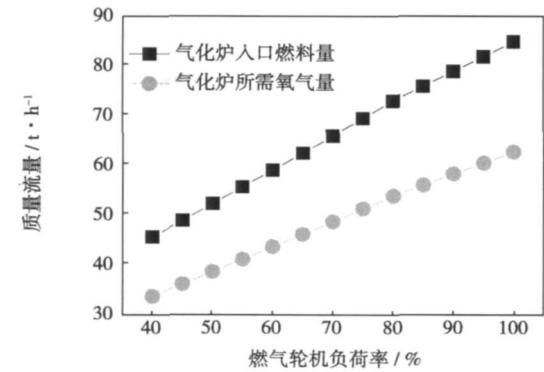


图 7 燃气轮机负荷率对气化炉所需燃料和氧气量的影响

4.5 对废锅和高中低压汽包产气量的影响

图 8 给出了蒸汽产量随燃气轮机负荷的变化关系,可以看出,不管是在额定工况还是在部分负荷下,都以废热锅炉的蒸发量为最大。一般气化炉和废锅产生的高压蒸汽约占总高压蒸汽的 50% ~ 60%^[12],因此使得 IGCC 余热锅炉具有过热器大、蒸发器小的特点,引入废热锅炉对于提高 IGCC 系统效率具有非常重要的作用。

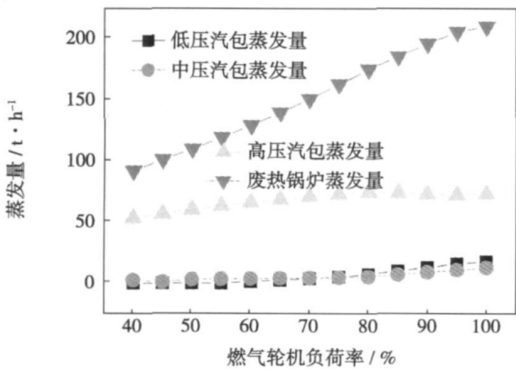


图 8 燃气轮机负荷率对蒸汽产量的影响

燃气轮机在 100% ~ 80% 负荷范围内,由于是

通过关小可转导叶来降低燃气轮机负荷,燃气轮机的排气流量降低,这从图 2 中可明显看出。同时由于 T_3 不变, T_4 升高,在这两个因素的交叉影响下,可以从能量传递方面来分析蒸汽量的变化关系。

表 2 燃气轮机排气与高压汽包间的换热量

燃气轮机负荷 / %	换热量 / MW
100	27.34
95	27.30
90	28.04
85	28.89
80	29.70

从表 2 中可以得出在 100% ~ 80% 负荷时高压汽包从烟气中的吸热量波动很小,高压汽包蒸发量也变化不大,因而有利于增加汽轮机高压缸的功率,进而增大整个系统的出力。对于中压和低压汽包,由于变负荷过程中进入中压汽包的烟气温度变化不大,因此烟气流量的降低导致中压和低压汽包的产气量线性降低。

当燃气轮机负荷低于 80% 负荷时, T_4 开始下降,虽然在低于 78% 负荷后压气机进气量不再减少,但是由于燃料量继续减少,燃气轮机排气量仍小幅降低,因此高压汽包的蒸发量减少幅度加快。为此造成高压给水流量减少,使得高压给水在余热锅炉内的吸热量减少,这样留给中低压蒸汽的热量相对升高,中低压蒸汽的蒸发量降低减慢。但是由于中低压汽包的产气量本来就很小,当负荷过低时有可能导致中低压汽包失去作用,因此应避免长期在低负荷区间运行。

在过去的工业过程中许多余热是未加以充分利用即行浪费掉的,例如高炉炉气(约 1 500 ℃)、需要冷却的化学反应工艺气(300 ~ 1 000 ℃)等,这些余热既是废热。随着工业的发展和能源供求的紧张,工程技术人员对于这些过去废弃不用的余热加以重视,利用它来产生压力蒸汽,以获取经济效益^[13],利用废热产生蒸汽的锅炉即为废锅。本文 IGCC 系统采用低温湿法煤气净化系统,净化系统的工作温度比较低,如脱硫系统的工作温度一般在 40 ℃ 以下,因此气体必须从气化温度为 1 311 ℃ 的高温降低到净化单元的工作温度,在以前的化工生产过程中这部分热量被采用激冷等形式所浪费掉。本文研究系统采用辐射和对流两级废锅来回收这部分热量。

废热锅炉的热量来自于粗合成气和排渣,前面已经分析过在部分负荷时,气化炉的平衡温度不变,

气化炉产生的粗煤气成份不变,净化系统各个设备的换热量是煤气量的线性函数。因此废锅中煤气与高压给水的换热量在变工况下随着煤气量的变化也呈线性变化,废锅产生的高压蒸汽量也随之改变。朱宝田等人利用 GT-MASTER 软件计算得到的双压再热 IGCC 系统的蒸发量变化趋势与本文研究是基本相同的^[8]。

4.6 对蒸汽参数的影响

图 9 给出了余热锅炉汽包压力随燃气轮机负荷的变化关系,在负荷降低到 50% 时,余热锅炉的高、中、低压汽包压力因滑压运行降至各自设计值的一半以上。高于最低允许工作压力(设计值一半),因此 IGCC 负荷降到 50% 负荷过程中蒸汽侧可全处于滑压运行区域^[4]。

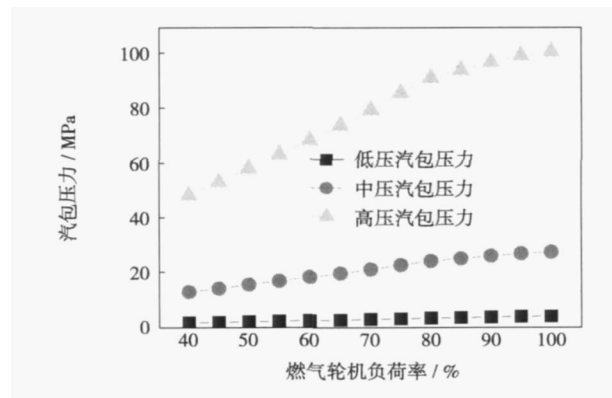


图 9 燃气轮机负荷率对高/中/低压汽包压力的影响

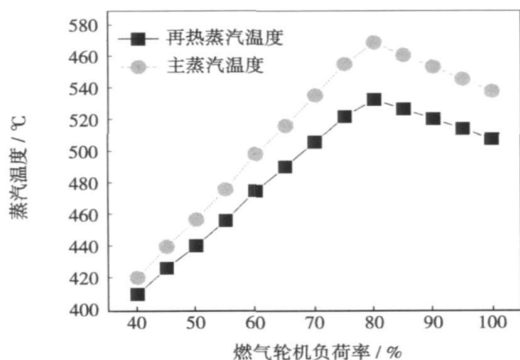


图 10 燃气轮机负荷率对主蒸汽和再热蒸汽温度的影响

图 10 给出了燃气轮机负荷率对主蒸汽温度和再热蒸汽温度的影响,可以看出随着燃气轮机排气温度的升高,主蒸汽温度从额定工况下的 539 °C 升高到 569.8 °C。这有助于提高蒸汽循环的效率,但

是在汽轮机不允许进汽超温的条件下,高压过热器出口要加装减温器。

图 11 给出了低压缸蒸汽透平排气干度 x 随燃气轮机负荷变化的关系,在 IGV 调节时 x 随负荷降低而上升,这是由于燃气透平排气温度升高导致再热蒸汽温度上升的缘故,并且在 40% 负荷的时候仍为 0.9,这就有利于系统在调负荷的过程中降低汽轮机的湿气损失和保证汽轮机末级叶片的安全运行。

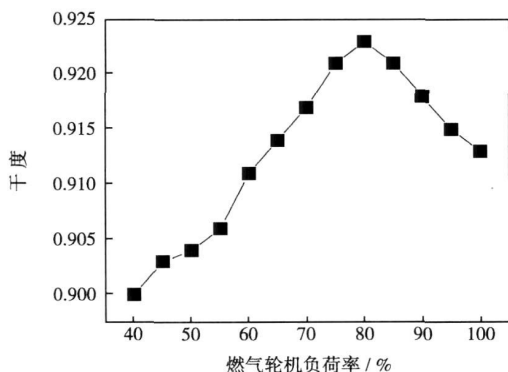


图 11 燃气轮机负荷率对低压蒸汽透平排气干度的影响

5 结 论

本文计算了燃气轮机变负荷引起的 IGCC 系统的变工况特性,对系统在部分负荷下的经济性和安全性进行了必要的分析,计算的结果表明:

(1) 变工况过程中对燃气轮机负荷进行调节,将使透平前温、燃气轮机排气能量和品质发生改变,这对系统的变工况性能有很大的影响。本文以 IGV 调节等 T_3 调节来分析。

(2) 在不考虑气化炉气化效率的前提下,系统效率是由燃气轮机效率和蒸汽侧效率综合作用的,随着燃气轮机负荷率的降低,燃气轮机及其联合循环的效率均下降,但变化率不同,联合循环的效率减小得要比燃气轮机平缓,特别是在 100% ~ 80% 负荷时这种差别更加明显。系统所需的燃料量和氧量成比例下降。

(3) 随着燃气轮机负荷降低,废热锅炉产生的蒸汽量降低,高压汽包产生的蒸汽量先变化不大后明显降低,中压和低压汽包产生的蒸汽量变化不大。主蒸汽和再热蒸汽温度变化趋势与 T_4 相同,都呈先增加后降低的趋势,IGV 调节有利于蒸汽侧的安全稳定运行。

致谢:感谢上海理工大学何翔、王婧硕士和国家电站燃烧中心的庞克亮博士、陈晓利硕士为本文写作提出的宝贵意见。

参考文献:

[1] 段立强,林汝谋,金红光等.整体煤气化联合循环(IGCC)系统变工况特性[J].热能动力工程,2001,16(6):586—590.

[2] 林汝谋,段立强,邓世敏,等.IGCC 联合循环系统全工况特性分析研究[J].燃气轮机技术,2003,16(1):1—9.

[3] 段立强,林汝谋,金红光,等.整体煤气化联合循环 IGCC 底循环系统变工况特性[J].中国电机工程学报,2002 22(2):26—30.

[4] 赵士杭,吕泽华,孙华祥.双压再热蒸气循环 IGCC 变工况性能[J].动力工程,2001,21(2):1156—1160.

[5] 吕泽华,赵士杭,尚学伟,等.三压再热汽水系统 IGCC 的变工况性能[J].燃气轮机技术,1999 12(4):1—7.

[6] JOHNSON M S. Prediction of gas turbine on— and off— design perfor

— Mance when firing coal— derived syngas[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992 114(4): 380— 385.

[7] JOHNSON MARK SCOTT, PJ. D. The effects of gas turbine characteristics on integrated gasification combined— cycle power plant performance [D]. Stanford: Stanford Universty, 1990.

[8] 朱宝田,徐 越.整体气化联合循环(IGCC)动力岛变工况性能研究[R].会议记录 ID: 6332973 西安:国家电力公司热工研究院,2001.

[9] 陆 勇.IGCC 系统中燃气轮机选型原则分析研究[J].电力设备,2002.3(4):70—73.

[10] 赵士杭,叶海文.压气机静叶可调对燃气轮机和联合循环变工况性能的影响[J].热能动力工程,1990,5(6):1—4.

[11] 焦树建.整体煤气化燃气—蒸汽联合循环(IGCC)[M].北京:中国电力出版社,1996.

[12] 中国 IGCC 示范项目可行性研究课题组.整体煤气化联合循环(IGCC)发电示范项目技术可行性研究.内部报告[M].1998.

[13] 古大田,方子风.废热锅炉[M].北京:化学工业出版社,2002.

(编辑 伟)

新技术、新产品

22 380 kW 输出功率和 40%效率的 Titan250 燃气轮机

据《Gas Turbine World》2008 年 11—12 月号报道, Solar Turbine 公司的 Titan250 燃气轮机的功率密度、效率和质量流量与具有同样底座的 Titan130 燃气轮机比较, Titan 250 输出功率增加 50%,效率提高 10%,空气质量流量增加 40%。

•电功率。用于 50/60 Hz 基本负荷电力生产,以天然气作为燃料, Titan 250 额定输出功率为 21 745 kW,效率为 38.9%。

•机械驱动装置。作为压缩机驱动装置,以天然气作为燃料, Titan 250 额定输出功率为 22 380 kW,效率为 40%。

•HRSG 蒸汽。基于 68 kg/s 燃气轮机排气流量和 463 ℃排气温度,不补燃的 HRSG(余热锅炉)可以生产高达 35 698 kg/h 蒸汽;在补燃的情况下, HRSG 的蒸汽产量增加到 88 542 kg/h。

Titan 250 设计基于 Mercury 50 的燃烧技术、Taurus 65 的高温部分技术和涡轮空气动力学、Titan 130 的模块维护和高温部分的耐久性(材料和涂层)。

两轴燃气轮机基本上由燃气发生器和自由动力涡轮组成。16 级轴流压气机装有进口可转导叶,前 5 级压气机装有可转导叶,以便于启动和部分负荷控制。

压气机压比为 24:1,进口空气流量为 67.3 kg/s,燃气发生器轴最大转速为 10 500 r/min。燃气发生器涡轮是 2 级轴流反动式设计,第一级静叶和动叶、第二级静叶具有内部空气冷却。涡轮部分静叶和动叶具有贵金属扩散的铝化物涂层。

Titan 250 在基本负荷输出功率下的燃烧温度是 1 177~1 204 ℃,这是一个相对保守的温度。它具有贫预混 DLE(干式低排放)燃烧系统设计,由 14 个单独可拆卸的燃烧火焰筒和具有火炬点火系统的 14 个燃料喷嘴组成。

自由动力涡轮是动叶带冠的三级轴流反动式涡轮,运行的最大连续转速为 7 000 r/min。燃料类型包括天然气或双燃料(天然气/馏出油),可自动切换燃料。

(吉桂明 供稿)

电容法测量蒸汽湿度的可行性研究= **Feasibility Study of the Capacitance Method for Measuring Steam Wetness**[刊, 汉]/NING De-liang, LIU Xin-quan, GAO Lei (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)LIANG Yi (Equipment Tools Subsidiary, Harbin Measuring and Cutting Tools Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(3). — 300 ~ 304

By combining dielectric theory with water and water steam properties, the variation tendency of the static relative permittivity of water and water steam with the change of pressure and temperature was studied and the causes of the change of water and water steam permittivity were analyzed. The research results show that the influence of temperature on water permittivity is far greater than that of the pressure while the influence of pressure on steam permittivity is stronger than that of the temperature. As the permittivity of water differs very greatly from that of steam, on the basis of the capacitance-method measurement theory, a wetness measurement experiment was performed by using a self-designed cylindrical capacitance transducer. The test results indicate that the capacitance method for measuring saturated wet steam wetness is feasible. **Key words:** permittivity, water, water steam, capacitance method

燃气轮机拉杆转子有限元模型研究及临界转速计算= **A Study of a Finite Element Model for a Gas Turbine Tie-rod Rotor and its Critical Speed Calculation**[刊, 汉]/GAO Rui, YUAN Qi, GAO Jin (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(3). — 305 ~ 308

Modern gas turbine rotors mainly consist of tie-rod ones, and their forms can be classified as either central single tie rod type or circumferential multiple tie rod ones. No matter what form they assume, the tie-rod rotors are no longer of a continuous structure and the contacting surface between the wheel disks will influence the kinetic characteristics of rotors. The authors first analyzed the force bearing condition of the tie rod rotor, and then considered the influence of the contact surface rigidity on rotor kinetic characteristics. The traditional finite element method has been improved, and a corresponding calculation program, prepared. Finally, a bare shaft, a pair of contacting disk sample and the critical speed of the tie rod rotor of a certain type gas turbine were calculated. The calculation results were compared respectively with those obtained from the traditional and three-dimensional finite element method as well as the measured results, thus verifying the correctness and validity of the improved finite-element model. **Key words:** gas turbine tie-rod rotor, tie-rod rotor, critical speed, normal contact stiffness, finite element method

膜片式气动逻辑元件特性试验研究= **Experimental Study of the Characteristics of Membrane Type Pneumatic Logic Elements**[刊, 汉]/QI Hong-wei (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), HE Ru, CHEN Lin, WEI Wei (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2009, 24(3). — 309 ~ 312

The membrane-type pneumatic logic element under discussion is a key item in a turbocharged unit for compressor surge control and steam turbine overspeed protection. The authors have described the structure and working principle of the surge protection device. Regarding various test items, such as the response characteristics, working characteristics and pressure difference flow characteristics of the surge protection device, a detailed description was given of the test principles, methods and processes. The test results show that the response time of the surge protection device is 250 ms, the working characteristic curves agree well with the standard ones, and the actual pressure-difference flow characteristic curves at the outlet of the valve assume a variation tendency identical with that of the theoretical ones. All the characteristic tests display a good stability and repeatability. **Key words:** membrane type pneumatic logic element, surge protection device, characteristic test

燃气轮机变工况对 IGCC 系统性能的影响= **Influence of Gas Turbine Off-design Operating Conditions on the Performance of an IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) System**[刊, 汉]/CHEN Lei, ZHANG Zhong-xiao, XIE Hao (College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), LI Zhen-zhong (National Research Center of Power Plant Combustion Engineering Technology, Shenyang,

China, Post Code: 110034) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 313 ~ 319

By using the proven commercial software Themoflex, a simulation was performed of an IGCC (integrated gasification combined cycle) demonstration unit rated at 200 MW, which is to be built in China. A mass and heat balance calculation of the unit was also conducted. By adopting an IGV (inlet guide vane) regulation mode during a load reduction featuring a constant T3 (temperature before a steam turbine), which is currently often used by combined cycle gas turbines, the authors have first analyzed the changes of T3, T4 (exhaust gas temperature) and QGe (gas turbine exhaust gas flow rate) caused by gas turbine off-design operating conditions under the present control mode and then calculated the influence of the change of T3, T4 and QGe on the efficiency, power output, fuel consumption of the system as well as on the main parameters at the steam side. As a result, the off-design characteristics of the IGCC system and a general law governing the change of its main parameters were obtained. A requisite analysis of the safety and cost-effectiveness of the system operating under off-design conditions was performed. It has been found that the regulation modes can directly affect the off-design performance of the IGCC system. To ensure the cost-effectiveness and safety of the IGCC system when it is operating under off-design conditions, the gas turbine should be controlled as much as possible within the IGV regulation limits. **Key words:** integrated gasification combined cycle (IGCC), gas turbine, load variation, off-design condition performance

F-T 燃料/电联产系统集成特性分析 = **An Analysis of the Integrated Characteristics of a F-T (Fischer-Tropsch) Fuel/Electricity Cogeneration System** [刊, 汉] / YUE Chen, SHI Yi-xiang, CAI Ning-sheng (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Power Engineering, Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 320 ~ 325

Established was a model for coal gasifiers, F-T (Fischer-Tropsch) synthetic reactors and power generation units. A thermodynamic performance calculation was conducted of a coal-gasification-based pure IGCC (integrated gasification combined cycle) power generation system, a F-T fuel synthetic system and a F-T fuel/electricity cogeneration system, and the integrated characteristics of the F-T fuel/electricity cogeneration system were analyzed. The results of the analysis indicate that the F-T fuel/electricity cogeneration system can improve the stepped utilization of thermal energy by decreasing the averaged heat-exchange temperature difference in a waste heat boiler, thus enhancing the energy utilization of the cogeneration system. The F-T synthetic unit in the tail gas circulation process has been simplified, facilitating the pressure matching between the gasification unit and the power generation unit and also effectively expanding the regulation range of the chemical/electricity ratio up to 2.3. **Key words:** coal gasification, fuel/electricity cogeneration system, Fischer-Tropsch synthesis, power generation unit, integrated characteristics

负荷与燃尽风对 NO 影响的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Influence of Loads and Burn-out Air Flow on Nitrogen Oxide** [刊, 汉] / GAO Zheng-yang, CUI Wei-chun, YANG Yi-li, SONG Wei (College of Energy Source and Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 326 ~ 331

To study the concerted action regularity of loads and burn-out air flow on NO emissions, a numerical simulation was performed of the combustion process of a 1025 t/h pulverized coal boiler. The distribution characteristics of the in-furnace temperature, thermodynamic type NO and fuel type NO were analyzed under different operating conditions when the burn-out air flow was put into use and disused. The calculation results were compared with the actual measured ones. The research results show that for the boiler under investigation, the burn-out air flow can more effectively control the emissions of fuel type NO, and at 100% load, the effectiveness is more conspicuous. At 80% load, the burn-out air flow can also reduce the NO emissions of the thermodynamic type. At 100% load, the burn-out air feed has a notable influence on the O₂ and CO in the furnace, while at 80% load, the burn-out air flow exercises a more conspicuous influence on the temperature field. **Key words:** pulverized coal boiler, load, burn-out air flow, numerical simulation, nitrogen oxide

空气物理参数对电厂风量测量的影响 = **Influence of Physical Parameters of Air on Power Plant Air Flow Measurement** [刊, 汉] / QIN Le, LI Ming-liang, ZI Yun-jiang, YAN Zheng-bo (Electric Power Research Institute, Yunnan