

# PFBC 联合循环中燃气轮机的变工况性能

赵士杭 徐福生 (清华大学)

陈晓平 (东南大学)

〔摘要〕 本文以某增压流化床燃烧联合循环(PFBC—CC)为例,建立了增压流化床锅炉及燃气轮机系统变工况性能计算的数学模型,并对 PFBC 系统中燃气轮机的变工况性能进行了分析。

关键词 增压流化床 PFB 锅炉 燃气轮机 变工况

分类号 TK472.6,229.6

## 1 前言

自 70 年代初发生了石油危机后,燃气轮机中以煤作为燃料的工作在世界范围内又重新开展起来。后来该项工作的开展又与提高煤的利用效率及“清洁煤技术”工作紧紧地结合在一起,获得了更为强大的发展推动力。这期间 PFBC—CC 是一个重要的发展方面,经过了长期的试验研究,在 80 年代获得了重大的进展,基本解决了燃烧后烟气除灰及对透平叶片的侵蚀、腐蚀问题,进入了工程实用阶段。自 1991 年起,先后已有三座 PFBC—CC 电站投入了商业化运行。我国自 80 年代中期开始 PFBC 的试验研究工作,在掌握了这方面技术的基础上,现正建立一座 PFBC—CC 中试电站。

鉴于 PFBC—CC 的发展,研究其变工况性能就提到日程上来了,这当中较为突出的问题是燃气轮机的变工况性能与 PFB 锅炉在变工况运行时相匹配的问题,如匹配不当,有可能导致 PFB 锅炉中燃烧不稳定乃至熄灭的严重故障。本文旨在探讨这方面的问题,

以得到在这种相匹配条件下燃气轮机和联合循环装置的变工况性能。

## 2 PFBC 联合循环

国外投入运行的 PFBC—CC 中燃气轮机均采用双轴燃气轮机。为节省投资和缩短周期,我国正在建立的 PFBC—CC 中试电站采用了单轴燃气轮机,其原则性热力系统见图 1。系统总发电量为 15 MW,其中汽轮机发电 12 MW,燃气轮机发电 3 MW,与之相匹配的 PFB 锅炉的蒸汽产量为 60 t/h,蒸汽初参数为 435℃,3.4 MPa。

单轴燃气轮机用于发电时的一个特点是转速不变,导致功率降低时空气流量不仅不减少,而是略有增加。显然,这样的变化规律与 PFB 锅炉在部分负荷下要求燃烧用空气流量降低的性能不匹配,因而必须采取措施,使燃气轮机在部分负荷下空气流量下降其变化状况能与 PFB 锅炉的要求相适应。为达到这一要求,压气机采用了多级可调静叶,以使静叶的安装角随负荷的降低而关小,减少空

收稿日期 1994—06—21

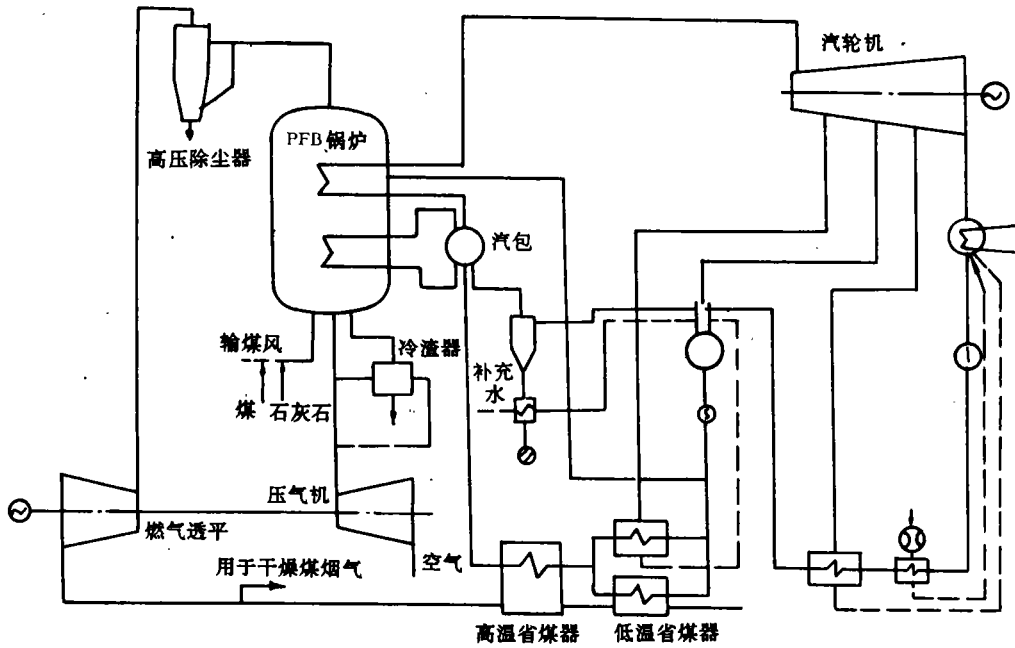


图1 PFBC—CC 原则性热力系统图

气流量。故本文是分析采用多级可调静叶压气机的单轴燃气轮机用于 PFBC—CC 中的变工况性能。

### 3 燃气轮机的变工况计算方法

#### 3.1 计算原则

燃气轮机系统是实现 PFBC—CC 技术的关键设备,它不同于常规的燃气蒸汽联合循环中的燃气轮机那样集压气机、燃烧室及透平为一整体。PFBC 中的燃气轮机系统实际上是燃气轮机家族中的变体,只包含压气机和透平,而增压流化床(PFBC)集燃气轮机燃烧室与蒸汽发生器于一身,所以,必须将压气机、增压流化床及透平联系起来考虑,分别建立各个部件的模型,在满足诸平衡条件的基础上进行燃气轮机的变工况计算。

#### 3.2 各个部件的模型

##### 3.2.1 压气机

为准确地表达压气机的性能,一般均以压气机的性能曲线来描述。本文中压气机的性能曲线见图 2。图中  $\gamma$  角为可调静叶的安装角,当它关小后,压气机空气流量  $G_c$  就减少,  $P_2$  为压气机出口压力,此外还示有压气机效率  $\eta_c$ 。图 2 是大气温度  $t_a = 14.5^\circ\text{C}$  时的性能,还有其它  $t_a$  时的曲线(文中未画),这样就完整地表达了压气机的性能。

应用时,将不同  $t_a$  时的性能曲线用拟合公式来表达,在已知  $P_2$ 、 $G_c$  和  $t_a$  时,可用拉格朗日三点插值法求得这时的  $\eta_c$  和  $\gamma$  值。

##### 3.2.2 增压流化床

增压流化床的变工况热力计算采用校核计算的方法,假定床内过热器出口蒸汽温度、飞溅区出口烟气温度、沸腾层温度及悬浮段出口烟气温度,分别由床内过热器热平衡、飞溅区热平衡、沸腾层热平衡及悬浮段热平衡来修正这四个假定温度,计算中控制以下几个参数:

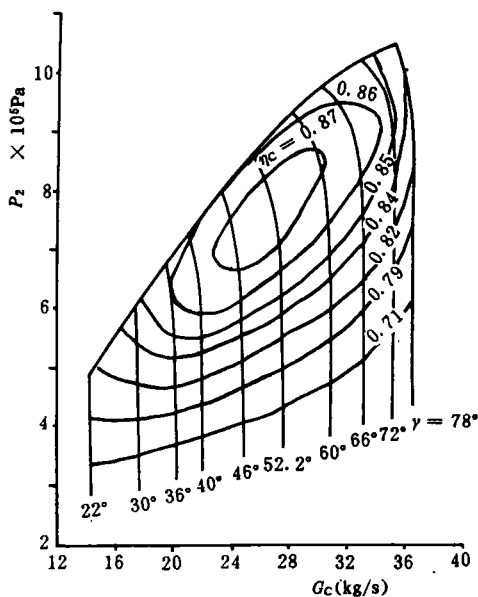


图 2 压气机性能曲线

- (1) 流化速度不小于 1 m/s;
- (2) 流化数不小于 2.5;
- (3) 床温控制在 900 ± 1℃。

飞溅区传热公式选用:

$$h = h_0 \cdot \exp\left(\frac{-1.5xu_{mf}}{L(u - u_{mf})}\right)$$

式中,  $h_0$  为床内受热面的传热系数,  $x$  为飞溅区高度,  $L$  为特征尺寸,  $u, u_{mf}$  分别为流化速度和临界流化速度。在计算中, 采用积分平均方法, 计算出飞溅区各受热面的平均传热系数。

这样在给定增压流化床锅炉进口空气温度、压力、燃料量及沸腾层过剩空气系数的情况下, 即可进行增压流化床锅炉的变工况计算, 得到透平进口的燃气流量、温度、压力、过剩空气系数、锅炉蒸汽产量及炉内各项热力参数。

### 3.2.3 透平

对于恒速运行的透平, 可用 Flügel 公式来近似代表透平的流量特性:

$$\frac{G_T}{G_{T_0}} = \frac{p_3^*}{p_{30}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_{30}^*}{T_3^*}} \cdot \sqrt{\frac{1 - (p_4/p_3^*)^2}{1 - (p_{40}/p_{30}^*)^2}}$$

式中,  $G_T$  为透平进口燃气流量,  $p_3^*, T_3^*$  分别为透平进口燃气压力和温度,  $p_4$  为排气压力, 下标 '0' 表示设计工况数值, 后同。

透平效率  $\eta_T$  用抛物线方程计算:

$$\eta_T = \eta_{T0} \cdot \sqrt{\frac{H_{TS0}}{H_{TS}}} \left(2 - \sqrt{\frac{H_{TS0}}{H_{TS}}}\right)$$

式中,  $H_{TS}$  为透平等熵焓降。

### 3.3 变工况计算方法

燃气轮机系统的变工况数学模型主要由以下三个平衡关系组成:

功率平衡:  $N_{GT} = N_T \cdot \eta_m \cdot \eta_e - N_c$

其中  $\eta_m, \eta_e$  分别为机械效率和电机效率。

压力平衡:  $\pi_T = \pi_c \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_4$

流量平衡:  $G_{pfb} = G_c - G_{gy} + G_{iz}$

$G_{pfb}$  为 PFB 锅炉进口空气流量,  $G_c, G_{gy}, G_{iz}$  分别为压气机出口空气流量、工业用气量及冷渣风量。

计算中假定锅炉给水温度、汽包压力、冷渣风温及各处压力保持系数不变; 假定工业用气量、冷渣风量与压气机进口空气流量比值保持不变; 假定增压流化床锅炉出口到透平进口燃气温差的相对值保持不变。

计算的顺序为压气机 → 增压流化床 → 透平, 给定环境温度  $t_a$  和压力  $p_a$ , 给定燃料量  $D_f$  及沸腾层过剩空气系数  $\alpha$ , 假定压气机压比  $\pi_c$ , 得到锅炉进口各项参数, 然后进行 PFB 锅炉的变工况计算, 得到透平进口各项参数, 由透平的变工况计算得到排气参数, 最后由压力平衡修正假设的  $\pi_c$ , 直至收敛, 得到燃气轮机系统及增压流化床锅炉的各项热力参数。

## 4 变工况计算结果及分析

4.1 图3是  $t_a = 14.5^\circ\text{C}$  时画在压气机工况图上的平衡运行线。从图上可以看出,压气机运行的喘振裕度较大,且随着负荷降低,喘振裕度增大。这说明机组在可调静叶调节的状态下,能在广阔的范围稳定运行。

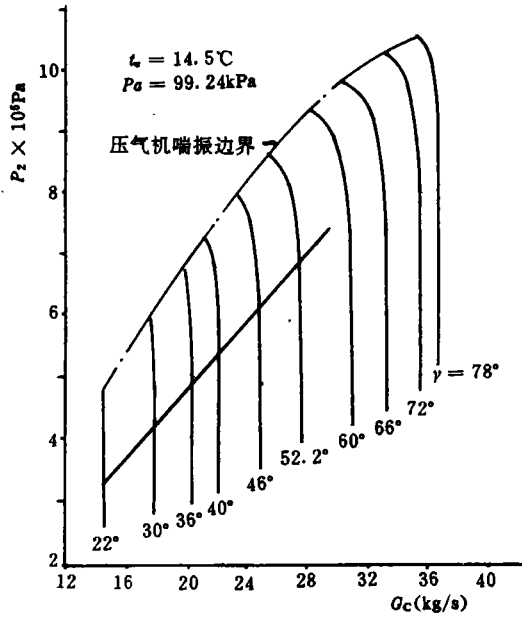


图3  $t_a = 14.5^\circ\text{C}$  时燃气轮机的平衡运行线

4.2 在环境温度不变的情况下,随着燃料量增加空气流量增加,见图4。显然,常规的发电用单轴燃气轮机不能满足这一要求,必须采用有可调静叶的压气机来调节空气流量,在负荷升高时,开大可调静叶安装角,增加空气流量,使燃气轮机的变工况与PFB锅炉的要求相适应,见图5。燃气轮机输出功率、蒸汽产量,透平前温度都随着燃料量增加而增加,分别见图6、图7和图8。

4.3 从图3至图8还可以看出环境温度变化对燃气轮机工况和PFB锅炉蒸汽产量的影响。在燃料量不变时,随着环境温度的升高,进入PFB锅炉的空气温度升高,比焓增加,为

保持沸腾层温度为  $900^\circ\text{C}$ ,要求增大空

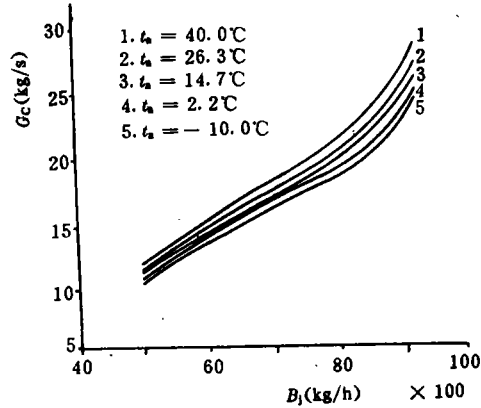


图4 燃料量  $B_1$  与空气流量  $G_c$  关系曲线

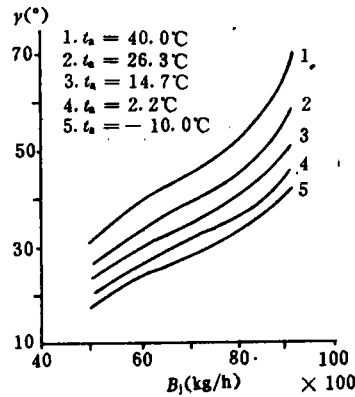


图5 燃料量  $B_1$  与可调静叶角度  $\gamma$  关系曲线

气流量,即要求开大压气机可调静叶,具体的变化见图4与图5。鉴于空气流量增加,削弱了环境温度升高对燃气轮机出力下降的影响,使其功率随环境温度升高的降低程度明显小于一般的燃气轮机,见图6。从图7看出,随着环境温度升高,PFB锅炉的蒸汽产量略有增加,但变化很小,这表明汽轮机的出力基

本不变。由于 PFBC—CC 中汽轮机输出功率占 4/5 左右,故环境温度变化对整个装置出力的影响较小,由此形成了 PFBC—CC 变工况性能的一个特点。

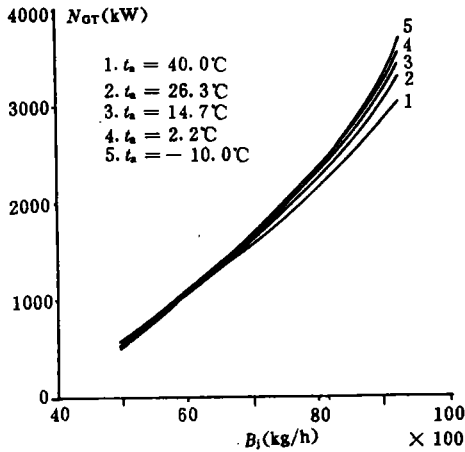


图 6 燃料量  $B_1$  与燃气轮机输出功率  $N_{GT}$  关系曲线

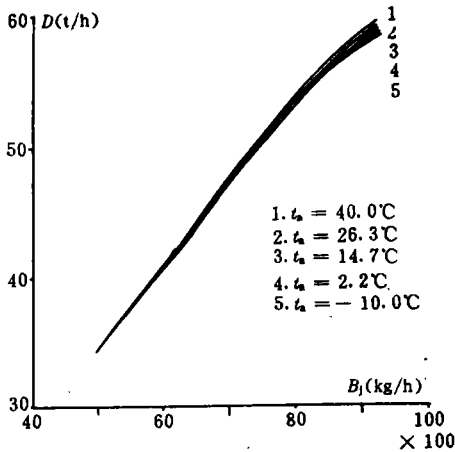


图 7 燃料量  $B_1$  与蒸汽产量  $D$  关系曲线

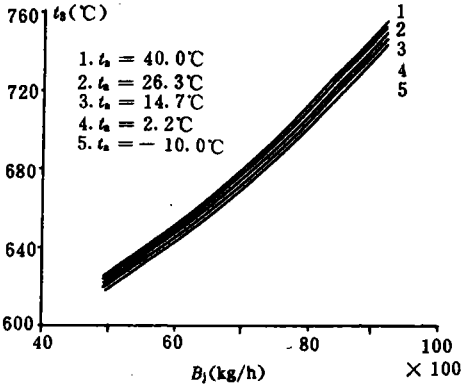


图 8 燃料量  $B_1$  与透平前温度  $t_3$  关系曲线

### 5 结论

在 PFBC—CC 中应用单轴燃气轮机是可行的,但必须采取措施使空气流量随负荷的降低而减少,且变化的程度与 PFB 锅炉的要求相适应。本文的压气机采用了多级可调静叶,实现了这一目的,使部分负荷下压气机有足够的喘振裕度,且运行线靠近压气机的最佳工况线,获得了满意的结果。完全可付诸工程应用。

### 参 考 文 献

- 1 赵士杭. 燃气轮机循环与变工况性能. 清华大学出版社, 1993. 7
- 2 Dyrness A. Heat transfer in the splash zone of a bubbling fluidized bed, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1992. 35(4): 847-860
- 3 焦树建. 烧煤的燃气—蒸汽联合循环装置. 清华大学, 1993. 3
- 4 章名耀等. 贾汪增压流化床燃烧联合循环中试电站的设计概念. *东南大学学报*, 1992. 9

作者简介: 赵士杭, 1934 年生, 1957 年毕业于交通大学动力机械系, 长期在清华大学任教, 现为热能工程系教授。从事燃气轮机热力循环、变工况性能和结构, 热能动力系统及其优化等方面的教学科研工作, 已出版《燃气轮机结构》和《燃气轮机循环与变工况性能》两本著作, 发表学术论文近 40 篇。

PFBC联合循环中燃气轮机的变工况性能=The Off-design Performance of a Gas Turbine in a PFBC Combined Cycle [刊,中]/Zhao Shihang, Xu Fusheng(Tsinghua University), Chen Xiaoping (Southeastern University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):65~69

With a pressurized fluidized bed combustion combined cycle (PFBC-CC) serving as an example set up was a mathematical model for the off-design performance calculation of a pressurized fluidized bed boiler and gas turbine system. In addition, an analysis was conducted of the off-design performance of the gas turbine in the PFBC system. **Key words:** pressurized fluidized bed, PFB boiler, gas turbine, off-design performance

双室内循环流化床煤气化系统的冷态实验研究=A Cold-state Experimental Study on a Gasifier with Two Fluidized Beds [刊,中]/Li Zhi, Xu Guoliang, Qian Renzhang(Huazhong University of Science & Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):70~74

This paper describes the setting-up of a cold-state model of a gasifier with two fluidized beds. An experimental study was performed of the two major factors affecting the operation of the gasifier, i. e. particle circulation technique between the two beds and fluidized bed expansion characteristics. As a result, obtained were the characteristics of the particle circulation between the two beds and the fluidized bed expansion under different operating conditions. Also analyzed were the various factors which influence the gasifier operation, such as fluidization speed, bed static height, auxiliary gas flow rate, etc. **Key words:** twin fluidized bed, coal gasification, bed expansion, particle circulation

MPS磨新型静动叶结合组合式旋转煤粉分离器=A Study on a New Type of Pulverized Coal Classifier with Static Flaps and Rotating Blades for a MPS Mill [刊/中]/Kong Wenjun, Luan Qingfu, Zhang Minchun, Cheng Shangmo, Han Caiyuan (Huazhong University of Science & Technology), He Jishan, Yan Peihong (Bei Jing Electrical Power Equipment General Works)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):75~80

Described in this paper is a new concept for designing a rotary type pulverized coal classifier, featuring the combination of static flaps and rotating blades. Model tests of the classifier with different mounting directions of static and rotary blades have been completed. The test results justify the design principle adopted, thus providing a theoretical basis for the development of a new type of classifier, **Key words:** pulverized coal preparation, rotary type classifier, static flaps and rotating blades, pulverized coal fineness

稳燃腔煤粉燃烧器对不同煤种燃烧稳定性的研究=A Study of the Combustion Stability of Pulverized Coal Burners with a Combustion stabilization Cavity When Firing Various Kinds of Coals [刊/中]/Chen Gang, Qiu Jihua, Zhang Zhiguo, Li Fujin, Sun Xuexin (Huazhong University of Science & Technology)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996,11(2):81~84

With the help of a three-dimensional particle dynamic analyzer a measurement was performed of the return flow zone flow field of a pulverized coal burner equipped with a combustion stabilization cavity and a comparison was made of the return flow zone characteristics at various locations of a bluff body. The authors practice has shown that through an adjustment of the location of the bluff body and the change of some structural dimensions of the abovesited burner it is possible to achieve a significant improvement of the combustion stability when burning various kinds of coals. **Key words:** boiler, pulverized coal burner with a combustion stabilization cavity, coal property variation

高浓度水煤浆流动的滑移现象及其管内流动特性的影响=The Slip Phenomenon of Coal Water Mixture