

# 载热气化燃煤联合循环性能研究

徐向东 钊 丽 朱为民

(清华大学热能工程系)

〔摘要〕 本文对新型燃煤联合循环方案——载热部分气化燃煤联合循环方案的性能作了较全面的分析。为选择合理的系统配置,利用已有部件的数学模型,计算了各种配置下的系统参数,得出了一些有用的结论,从中选择了较优化的方案,为今后该系统的研制与实现奠定了可靠的理论基础。

关键词 载热气化 联合循环 差速循环流化床 空气埋管

分类号 TM611.3

## 1 研究背景

在最近的二十年中,燃煤的燃气—蒸汽联合循环发电装置正以较快的速度发展,它能显著提高供电效率,有效地控制污染物的排放。在现有各类燃煤联合循环发电技术中,最具代表性的为以下三种:增压流化床联合循环(PFBC—CC),整体煤气化联合循环(IGCC)和常压空气流化床联合循环(AFBC—CC)。

PFBC—CC 技术可提供较高的效率和良好的污染控制,但第一代 PFBC 技术由于床温受到限制而导致较低的供电效率。第二代 PFBC 采用了一个煤气发生器(炭化炉),以其产生的煤气补燃来提高透平入口燃气温度,但将使系统更复杂,设备更庞大。IGCC 目前已引起世界同行的广泛关注,并已有若干装置正在发展,它是将来固体燃料发电技术中最有吸引力的选择之一;但目前仍存在许多难题,如气化过程中的能量损失,为避免常规低温净化过程中的热损失而采用的高温净化

装置以及所产蒸汽参数的限制等,需要进一步研究。至于 AFBC,其优点是结构简单、投资少、供电效率相对较高,缺点是空气埋管极易腐蚀和磨损,频繁更换会降低其可运行性和经济性。

大型燃煤电站在我国电力供应中占有重要地位。目前现有电站均采用单纯的蒸汽循环,其效率低且污染严重,因此有必要以联合循环电站取而代之。

自 80 年代初以来,清华大学成功地研制了各种规模的循环流化床锅炉。1992 年,清华大学申报了差速循环流化床和飞灰造粒回燃两项专利,同时,对载热气化技术也进行了深入研究,并随之提出了载热部分气化燃煤联合循环发电技术。该项设计综合了现有的联合循环技术的优点,与其它技术相比,更易实现,是一种投资低、效率较高、污染较低的新型燃煤发电技术。

## 2 系统描述

本文为国家攀登 B 项目

收稿日期 1995-05-15 修改稿 1995-07-12

载热部分气化燃煤联合循环(CGCC)主要有以下特点:

- (1)煤在固体颗粒载热炉膛中部分气化,其主要热源为循环灰所携带的热量;
- (2)焦炭剩余物在炉膛内燃烧以加热物料、压缩空气,并提供产生蒸汽的热量;
- (3)压缩空气在低速换热区内被加热;
- (4)透平排气进入流化床,作为燃烧用气。

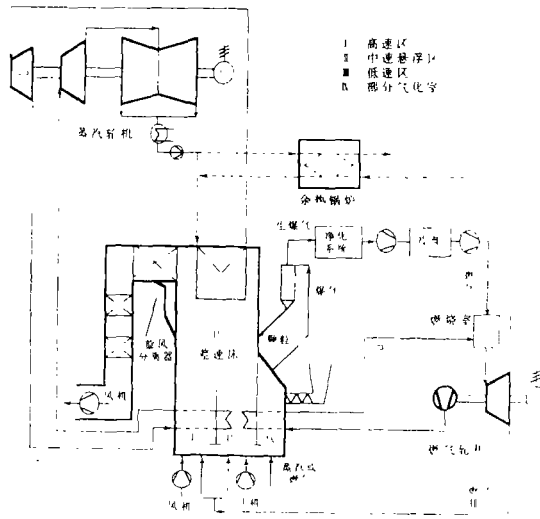


图1 载热部分气化联合循环系统图

图1 燃煤部分气化联合循环系统图

**气化和燃烧** 在现有循环流化床燃烧技术及其锅炉设备的基础上,利用不同气速下飞灰携带率的巨大差异,使燃烧室内形成三个不同的气速区,促使飞灰在燃烧室的内循环,构成差速循环流化床锅炉(DFBC)。在此基础上,在高温分离器和低速换热区(Ⅲ区)之间增设一个煤气化区(Ⅳ区)。以煤气或蒸汽为流化介质,直径小于1.5mm的煤颗粒进入煤气化区后与分离器分离下来的高比例的循环灰混合;煤气化区中密相床温为850~900℃,流化速度为0.8~1.2m/s,可使原

煤中的挥发份析出,并引起部分水煤气反应,产生煤气。附加的空气进入到气化室的顶部,使其温度增加到1000~1050℃。高温及蒸汽和灰颗粒的存在将完全去掉焦油。粗煤气经过旋风分离器,分离下来的颗粒返回反应区。煤气进入换热器,温度降至200℃,其中残留的灰与硫和钠盐皆可由湿法去除。清洁的煤气被压缩到高于燃气轮机燃烧室的压力,这取决于燃气轮机压气机的压比及压缩空气预热回路中的压力损失。最后,压缩过的煤气进入燃气轮机燃烧室,用作清洁的燃料煤气。

煤中大约有40%的能量转化成低或中热值的煤气。焦炭剩余物的显热以及离开气化区的载热飞灰在流化床燃烧区内被重新利用。煤在气化室经过分解之后,煤和焦炭或半焦的混合物进入到差速流化床的Ⅲ区,并为埋设在Ⅲ区的换热器提供热量。根据压力平衡原则,灰与焦炭(半焦)的混合物可由连通孔从Ⅲ区流向Ⅰ区,与部分原煤一起燃烧。产生的蒸汽推动蒸汽轮机作功。最后,差速床的排气由引风机抽出排入大气。

**燃气轮机** 从燃气轮机压气机出来的压缩空气在差速循环流化床Ⅲ区内的空气埋管中被预热,其温度上升到550~700℃,然后在燃气轮机燃烧室内与载热部分气化所产生的煤气一起燃烧。煤气在燃烧室中的燃烧将产生高温燃气,其温度应相应于燃气透平的入口温度。燃气通过透平膨胀级以驱动压气机与发电机。透平排气作为燃烧用气被引入流化床,流化床温度保持在900~950℃之间以保证脱硫和去氮。在某些系统配置下,由于煤气化份额的不同,燃气透平的排气不能为锅炉内的燃烧提供足够的氧,这时则需安装鼓风机来补充所需部分空气。在另一些情况下,由于煤气化的份额较

高,则透平排气所能提供氧多于锅炉燃烧所需的量,则多余燃气部分可引入余热锅炉(HRSG)以加热蒸汽轮机给水或产生蒸汽。

**污染控制** 首先在差速流化床燃烧区添加脱硫剂,硫通过化学反应被吸收,形成固硫产物。利用此种方法可去除 90% 的硫。由于流化床燃烧温度较低,则 NO<sub>x</sub> 的产量较少;差速床的排气可经过旋风分离器除掉固体颗粒。

对于煤气,其净化要求就是要符合电站环境污染排放标准并达到保护透平叶片的要求。在 CGCC 系统中,煤气化区相对少的炭转化使其在脱硫方面比一般煤气化过程所要求的要简单。离开煤气化室的煤气经分离器后除去大部分固体颗粒,但还会有一些焦炭颗粒、脱硫剂、飞灰颗粒以及碱氯化物等;一般来说,若采用湿法净化,则会因为热损失而降低装置的效率,但商业化的湿式低温煤气净化系统可以达到很好的净化效果。在 CGCC 中,由于煤气需压缩到燃气轮机燃烧室所需压力,则压缩初温不能太高,而经过湿法净化正可达到这一要求,因而不失为一简单实用的优选方案。

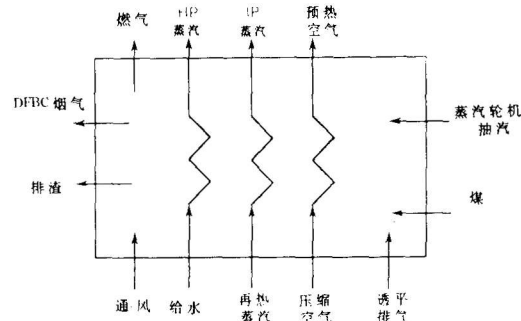
**蒸汽轮机** 过热蒸汽在差速循环床炉膛内的换热器中产生,由高压蒸汽轮机排出的蒸汽经 III 区内的再热器再热后进入中压蒸汽轮机作功。部分气化方案可使焦炭在流化床内燃烧,以确保高质量的蒸汽循环条件以及高效率的循环。

### 3 系统模型

为准确地预测系统性能,我们建立了联合循环系统的全工况数学模型。其中,燃气轮机和蒸汽轮机采用详细的全工况模型,而其它部件的模型以质量和能量平衡来描述。各种损失在模型中都作了一定的估计。

燃气轮机和蒸汽轮机的全工况性能计算已是较为成熟的技术,不再赘述。值得一提的是差速循环流化床的模型,虽然其原理较为简单,且作过一些简化,但作为联合循环性能计算中至关重要的一环,它通过各项输入、输出量将联合循环中的各部件的计算有机地结合起来,使之成为一个整体(该模型为本文作者率先提出的)。

考察差速循环床,图 2 表示了差速床能量平衡的各输入、输出项。完全的热平衡应包括除燃料燃烧外锅炉排渣的焓,但由于排渣的确切成分无法确定且所含能量较少,故可忽略这一项。



差速床燃烧室的热平衡可表示为:

$$Q_{in} = m_{coal} h_u \cdot \eta_{cb} + m_{ds} \cdot H_{ds} + m_{da} \cdot h_{da} + m_s \cdot h_{rw} + m_{sr} \cdot H_{sr} + m_a \cdot h_a^n + m_g^4 \cdot h_g^4$$

$$Q_{out} = m_{fg} (h_{uf} + h_f) + m_s \cdot H_{hp} + m_{sr} \cdot H_{ip} + m_a \cdot h_a^{out} + m_g^5 \cdot h_g^5$$

$$Q_{in} = Q_{out}$$

在建立了余热锅炉及各辅机的全工况模型后,可通过合理组织各子模型的计算顺序,依照联合循环工作机理将这些子模块的工作过程有机地结合起来。

### 4 系统性能计算与分析

为找出各关键因素对系统性能的影响,选择优化方案,我们共研究了八种系统配置方案,其中包括两种燃气轮机,两种气化过程和空气埋管出口温度。通过对结果的比较和分析,得出了一些有用的结论。

各种方案过程参数值如表 1 所示。其中两种燃气轮机为 PG-6531B 和 FT-8,其压比分别为 11.8 和 20.3。两种不同的空气埋管出口温度也包括在性能计算中,其结果可反映空气埋管温度对系统性能的影响。

表 1 CGCC 系统配置的各种参数比较

方 案	1	2	3	4	5	6	7	8
环境温度 °C	15	15	15	15	15	15	15	15
环境压力 MPa	0.1013	0.1013	0.1013	0.1013	0.1013	0.1013	0.1013	0.1013
压气机压比	11.7	11.7	11.7	11.7	20.3	20.3	20.3	20.3
空气流量 kg/s	136.4	136.4	136.4	136.4	85.4	85.4	85.4	85.4
煤气	A	A	B	B	A	A	B	B
空气埋管出口温度 °C	700	600	700	600	700	600	700	600
空气埋管压力损失 %	18.0	13.5	18.0	13.5	15.7	12.0	15.7	12.0
透平入口燃气温度 °C	1104	1104	1104	1104	1160	1160	1160	1160
高压蒸汽温度 °C	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0
高压蒸汽压力 MPa	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
中压蒸汽温度 °C	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0	550.0
高压蒸汽压力 MPa	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29	2.29
烟气温度 °C	143.0	143.0	143.0	143.0	143.0	143.0	143.0	143.0

联合循环系统的各方案设计工况计算结果列在表 2 中,其供电效率是在电站净功率输出基础上得到的。

表 2 计算结果(各方案的设计工况)

方 案	1	2	3	4	5	6	7	8
煤气流量 kg/s	3.569	4.417	1.681	2.081	2.374	2.866	1.129	1.361
透平出口温度 °C	573.0	565.8	570.9	563.2	469.9	465.5	467.1	462.1
透平出口流量 kg/s	138.60	139.50	136.72	137.12	86.92	87.41	85.68	85.91
进差速床透平排气 kg/s	138.6	139.5	80.89	105.09	86.92	87.41	55.19	69.42
进余热锅炉排气 kg/s	0.0	0.0	55.83	32.03	0.0	0.0	30.49	16.49
耗煤量 kg/s	24.85	30.76	10.22	12.65	16.53	19.953	6.863	8.271
输入能量 kW	531510	657857	218535	270584	3531519	426790	146800	176910
燃机输出功率 kW	31736	33740	31057	32877	225 92	23700	21998	22976
汽机输出功率 kW	179100	223515	61725	81149	118470	144291	41268	52598
辅机功率								
煤气压缩机 kW	3022	3740	2518	3117	2541	3068	2150	2592
鼓风机 kW	721	1079	0	0	507	719	0	0
引风机 kW	2366	2931	776	1007	1576	1903	529	657
净功率输出 kW	204727	249506	89488	109902	136438	162301	60586	72325
供电效率(%)	38.52	37.93	40.95	40.62	38.59	38.03	41.27	40.88

**压比的影响** 计算结果表明,联合循环供电效率受压比的影响很小。一般来说,由于燃气轮机压比较高,则联合循环的效率会由于压缩空气埋管加热过程中的压损减小以及燃气轮机效率的提高而有所增加。但是,我们必须将煤气压缩至略高于燃气轮机燃烧室的压力,则燃气轮机压比的提高会引起煤气压缩功的提高。结果,压比对系统性能的影响很小。例如:方案1中系统效率为38.52%,而在其余条件相同的情况下,方案中的效率为38.59%。

**煤气质量的影响** 载热气化联合循环系统对于煤气的量和质敏感程度极高。对于同一种部件配置而言。系统的性能随煤气组成和热值的不同而变化很大。例如:比较方案1与方案3。这两种方案的区别是采用的气化工艺不同,因而气化程度不同。当采用挥发份较高的煤种并在煤气作流化介质的条件下气化时,所产煤气的能量占煤的总能量的份额较大,因而,燃气轮机作功的份额增大,而蒸汽轮机作功的份额减少。由于燃气轮机的效率比蒸汽轮机的高,因而功率由蒸汽轮机向燃气轮机的转化导致了系统效率的提高。同时,转化到煤气中的能量会由于透平排气的回收而得到再利用。因而也会提高系统产率。煤气的流量在各方案中都不一样,这是为了便于特定的透平需得到设定工况下的透平入口燃气温度。由于煤气流量和组分不同,透平排气可进行不同处理。在方案1中,每单位质量煤中所产煤气量较低,因而更多的焦炭剩余物需更多的氧来燃烧,因而可用鼓风机来补充差速循环床燃烧所需要的空气。在方案5中,较高的气化份额使得透平排气中的氧对于焦炭剩余物的燃烧来说反而过多,因此,可采用余热锅炉来利用剩余的透平排气。

**空气埋管出口温度的影响** 尽管在空气埋管加热器中的压力损失会增大,较高的空气埋管温度仍能提高系统的供电效率。因为

压缩空气的预热会由于其热量通过透平排气得以再利用,因而使系统效率得到净提高。压缩空气温度变化越大,系统效率也就越高。如结果所示,空气埋管出口温度由600℃增至700℃,则系统效率可提高(0.4~0.6)%。

## 5 结论

载热部分气化过程可将部分煤转换成供燃气轮机用的清洁煤气,其固体残渣(焦炭)可在差速炉膛中燃烧。载热部分气化可在不发生燃烧的情况下进行,从而可减少气化过程中的能量损失,并阻止焦油的产生。燃气轮机压缩空气在炉膛中的预热可提高系统效率,这是因为该项热量可通过透平排气进入炉膛而得到再利用。空气埋管设置在差速循环床的低速区内,可避免在流化床环境中的磨损。对CGCC系统而言,污染也得到较好地控制。

本文计算了联合循环系统的八种方案性能。结果表明装置的供电效率在(37.9~41.3)%范围内。不同的系统安排可导致不同的功率输出和供电效率。在优化系统配置方面,CGCC系统具有很大潜力。系统效率高干目前常规的燃煤电站,而仅略低于较先进的系统,如IGCC,第二代PFBC等。与其它联合循环系统相比,CGCC系统具有较强的竞争力,因其技术难度小,投资费用较低,其中大部分部件目前已发展成熟。此外,CGCC的污染控制也是令人满意的。该项技术尤其适合在我国发展。

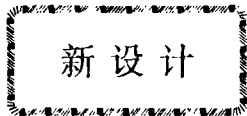
## 参 考 文 献

- 1 Weisman J, Eckart L E. Modern power plant engineering. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. 1985
- 2 Odgers J, Krestschmer D. Gas turbine fuels and their influence on combustion. ABACUSPRESS. Cambridge, Mass. . 1986

<p>3 Pillai K K Operating Experience from Coal-fired Combined Cycle(PFBC)Power Plants. Proceedings the First International Conference on Combined Cycle Power Generation, India, Jan. 1994</p> <p>4 焦树建. PFBC 燃气—蒸汽联合循环发展的现状与趋势. 燃气轮机技术, 1992, 5(3)</p> <p>5 赵士抗. 燃气轮机循环及变工况性能. 清华大学出版社, 北京: 1993</p> <p>6 冯俊凯, 深幼庭. 锅炉原理及计算, 科学出版社, 北京: 1992</p>	<p>7 蔡颂年. 蒸汽轮机装置. 机械工业出版社, 北京: 1982</p> <p>8 Bevc F P and Haywood R. Westing-house Rolls-Royce Advanced Coal-fueled Combined Cycle Technology Programs. Proceedings the First International Conference on Combined Cycle Power Generation, Calcutta, India, 994</p> <p>9 Bannister R L, Garland R V, Carl G, Datsko S C, Turek D. G. Cogeneration with a fluidized bed Air heater. Proceedings the 1991 International Conference on Fluidized Bed Combustion, Montreal, Canada, 1991</p>
---	--

(渠源 编辑)

**作者简介** 徐向东 清华大学教授, 博士生导师 现任清华大学热能工程系动力工程及控制教研室主任。主要研究领域: 热力系统建模与控制。1990 年获国务院学位委员会“做出突出贡献的中国博士学位获得者”奖励。曾在德国从事合作研究近四年, 并两次获德国洪堡奖学金(通讯处 100084 清华大学热能系)



## 先进的排气流增强器

据“Gas Turbine World”1996 年 3~4 月号报道, 美国加利福尼亚州的 Sunlaw Energy 公司在 Long Beach 运行了一台装有排气流增强器现场额定功率为 22MW 的 LM2500 联合生产联合循环装置, 借助于“光滑”排气流和降低背压, 该增强器可以增加燃气轮机的输出功率和热效率。

已取得专利的排气集流器内的三维曲面构件是由六块主要件制成的, 全是不锈钢构件, 其设计寿命为 20~30 年。

使用排气增加器的得益是:

- 增加输出功率。取决于 LM2500 箱装体的结构和运行方式, 可增加输出功率 1%~5%。
  - 提高热效率。取决于箱装体的结构和运行方式, 可提高热效率 1%~5%。基本负荷下热耗率降低 1%, 部分负荷运行时可降低 5%。
  - 降低背压。取决于箱装体结构, 动力涡轮出口背压最多可降低 50%。
  - 减小噪音。减小达 4~18dBA(部分负荷到全负荷)。也感受到减小了一些振动。
- 预期的其它一些收益是:
- 热部分修理的时间间隔最长可达 6000 小时(在降低 10℃ 燃烧温度运行时)。
  - 减少了管道的维护。
  - 较小的振动疲劳。
  - 减少了排气通路内其它设备维护的工作量。

(学生 供稿)

载热气化燃煤联合循环性能研究 = A Study on the Performance of Heat-Carrying Gasification Coal-Fired Combined Cycle [刊, 中]/Xu Xiangdong, Zhao Li, Zhu Weimin (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 1996, 11(6): 337~342

A relatively comprehensive analysis is given of the performance of a new-type coal-fired combined cycle version, i. e. a heat-carrying partial gasification coal-fired combined cycle version. To select a rational system configuration, the authors used the mathematical model of existing components and calculated the system parameters under various configurations. From some useful conclusions thus obtained a relatively optimized version has been selected, which can eventually provide a reliable theoretical basis for the development and realization of the above-cited system. Key words: heat-carrying gasification, combined cycle, differential speed circulating fluidized bed

用于循环流化床的鳍片管束惯性分离器流动特性的研究 = A Study on the Hydrodynamic Characteristics of a Finned Tube Bank Inertial Separator Used for a Circulating Fluidized Bed [刊, 中]/Li Xiaodong, Shen Yueliang, Yan Jianhua, Li Yangxin, et al. (Thermal Power Engineering Institute of Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(6): 343~347

By employing laser Doppler velocity measurement and numerical simulation method the authors have conducted a study on the hydrodynamic characteristics of a finned tube bank inertial separator used for a circulating fluidized bed, thereby obtaining the distribution of such parameters as the gas velocity flowing around the finned tubes, and the turbulent flow intensity, etc. In addition, the test and calculation results were analysed and discussed, which will provide a solid basis for the further optimization study of the finned tube bank impact separator. Key words: measurement, hydrodynamic characteristics, separator

DEH 转速测量系统的故障树分析 = Fault Tree Analysis for a DEH Rotating-Speed Measurement System [刊, 中]/Ma Fangmei, Zhang Jiace, Hei Yingxia, et al. (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(6): 348~353

Through the use of a Monte Carlo method-based fault tree theory the reliability simulation of a digital electro-hydraulic (DEH) speed measurement system of a 300 MW steam turbine was performed and the system reliability studied along with a fault analysis of the system. On the basis of the above some observations were given. Key words: fault tree, reliability simulation, DEH measurement system

能量系统的烟经济学分析通用模型及其在电厂中的应用 = A General Model for the Exergy Economics Analysis of an Energy System and its Use for an Electric Power Plant [刊, 中]/ Yang Yongping, Wang Jiakuan (Beijing Postgraduate Department of North China Electrical Power Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, -1996, 11(6): 354~359

During the operation of an electric power plant it often happens that some main parameters deviate from their design values. The study of the effect of such deviations on the economic operation of a