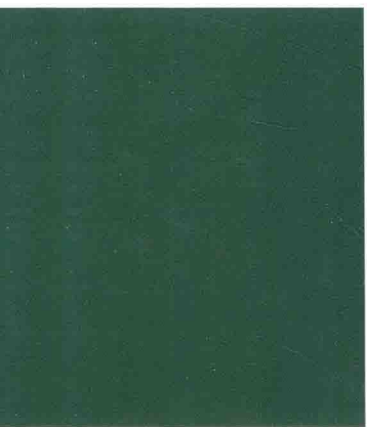




整体煤气化联合循环 (IGCC)发电工程

Integrated Gasification Combined Cycle

许世森 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

整体煤气化联合循环 (IGCC)发电工程

Integrated Gasification Combined Cycle

许世森 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍了 IGCC 发电系统的构成和 IGCC 发电技术的特点,国内外 IGCC 发展现状和趋势,IGCC 关键技术和设备,IGCC 技术参数及优化,IGCC 总体性能特点,IGCC 经济性分析,IGCC 电厂的环保性能,IGCC 电厂煤气化工艺及煤气净化工艺,IGCC 电厂燃气轮机的特点及选择,IGCC 电厂余热锅炉和蒸汽轮机的特点、蒸汽系统的特点与参数选择,IGCC 电厂空分系统的构成、空分参数、技术经济指标,IGCC 电厂控制系统构成及优化,IGCC 电厂冷却系统、水处理系统等辅助系统,以及 IGCC 电厂动态特性,同时对 IGCC 示范电厂、CO₂ 减排潜力和中国的绿色煤电计划也作了简要介绍。

本书可供热能与动力、化工、控制等领域工程技术人员和相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

整体煤气化联合循环(IGCC)发电工程/许世森主编. —北京:
中国电力出版社, 2016. 12
ISBN 978-7-5123-0839-8

I. ①整… II. ①许… III. ①燃气-蒸汽联合循环发电-电力
工程 IV. ①TM611. 31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 175825 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www/.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 33.75 印张 829 千字

印数 0001—1500 册 定价 150.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

我国以煤为主的能源格局决定了发展煤基近零排放发电技术是我国可持续发展、建设美丽中国、实现中国梦的必然选择。整体煤气化联合循环(Integrated gasification combined cycle, IGCC)发电技术以煤为原料,却能达到天然气发电的环保标准,是满足这一要求的有效技术途径。与美国、欧洲等发达国家和地区相比,我国更需要IGCC这样近零排放的煤基发电技术。

IGCC是将煤气化和煤气-蒸汽联合循环发电系统高度整体化的洁净煤发电技术。IGCC的发电效率高,且提升空间大,可实现污染物近零排放,CO₂减排成本低,还可与煤制氢、燃料电池等组成更先进的多元化能源生产系统,是未来煤基近零排放发电的重要方向之一。

IGCC发电技术从20世纪六七十年代开始研发。1984年,美国在冷水电厂建成100MW IGCC机组,验证了技术的可行性。到了90年代中期,美国、荷兰和西班牙建成4座250~300MW IGCC示范电厂,并成功运行至今。2008年,日本建成250MW IGCC示范电厂。据初步统计,全球已经建成包括多联产在内的IGCC电厂30余座,以石油炼厂底料和石油焦为原料的IGCC发电技术已具有商业竞争力。美国、欧洲、日本发展IGCC发电技术有一个共同的特点,那就是将发展IGCC作为能源战略性技术进行研发和示范,核心技术和关键设备无一例外地均来自本国或本地区,示范项目的投资由政府和本国企业共同承担,通过示范带动本国核心技术的商业化,占领制高点,提升未来竞争力。美国GE公司和德国Siemens公司均收购了本国的煤气化技术,加上日本三菱公司,迄今在国际上已形成三大IGCC技术供应商,它们均拥有煤气化和合成气燃气轮机这两大IGCC核心技术。2013年美国建成630MW IGCC电厂。

我国于1994年启动IGCC示范项目前期工作,通过“九五”科技攻关、“十五”和“十一五”863计划的持续支持,煤气化和IGCC系统设计及控制等关键技术取得了快速的发展,具备了煤气化、煤气净化、余热锅炉、蒸汽轮机、空分等系统设备的设计制造能力,也具备了IGCC电厂工程设计和建设的能力。2004年,中国华能集团公司启动“绿色煤电”计划,目标是研发和示范基于IGCC的近零排放煤基发电技术。2009年8月,华能天津250MW IGCC示范电厂正式开工;2012年12月,我国首座IGCC示范电厂——华能天津IGCC电厂正式投产。至此,我国成为继美国、欧洲和日本之后掌握大型IGCC电厂设计、建设和运行技术的国家,标志着我国在这项具有战略意义的洁净煤发电技术方面取得了重大突破,建成了世界上第六个纯发电的IGCC电厂。该电厂采用具有自主知识产权的二段式干煤粉加压气化技术和IGCC设计控制技术,除燃气轮机由Siemens公司提供外,其他主要设备均为国产。IGCC发电技术目前存在系统复杂、比投资较高、可用率较低等问题,随着我

国第一座 IGCC 示范电厂建成并投入商业运行，上述问题会逐步得到解决。

IGCC 发电技术包括煤气化技术、煤气净化技术、燃气轮机技术、余热锅炉和蒸汽轮机技术、系统集成及控制技术等。它将化工和发电领域的多工艺、多系统进行了高度集成。本书为工程技术人员及高等院校师生提供了较为全面、详细的 IGCC 发电的基础知识和工程实践经验，力争使读者了解 IGCC 发电技术的系统总体概念和各子系统的具体特征，在认识和了解 IGCC 发电技术原理、性能、系统、运行控制的同时，也能够掌握这些领域的工程实践经验。

本书主编从 20 世纪 90 年代以来就致力于 IGCC 发电技术研发和工程示范，曾参与完成国家“八五”攻关项目“我国 IGCC 示范电厂的技术可行性研究”，负责完成国家“九五”攻关项目“IGCC 煤气高温除尘工艺和设备的研究开发”和“IGCC 煤气高温脱硫工艺和设备的研究开发”、国家 973 计划课题“煤气高温净化技术”、国家“十五”863 计划课题“干煤粉加压气化技术”和“IGCC 仿真机的研制”、国家“十一五”863 计划课题“2000t/d 干煤粉加压气化技术研发与示范”和“250MW IGCC 系统试验和示范”等，开发出具有自主知识产权的二段式干煤粉加压气化技术和 IGCC 系统设计与控制技术，是中国华能集团公司重点科技项目“绿色煤电关键技术研究开发”的负责人，也是我国首座 IGCC 示范电厂的技术负责人，并主持编写了 DL/T 1223—2013《整体煤气化联合循环发电机组性能验收试验》。本书是在上述研究和工程示范的基础上，结合国内外 IGCC 发电技术的工程实践编著而成。

本书共分为十四章，第一章介绍了 IGCC 发电技术的基本特点、发展现状和趋势，近零排放技术等；第二章介绍了 IGCC 发电系统的构成、关键技术、参数优化及总体性能等；第三章主要对 IGCC 发电技术的造价、成本构成进行了经济性分析，同时指出了降低造价的途径；第四章主要论述了 IGCC 发电技术中的固体、气体、液体及 CO_2 排放和控制特性等；第五章介绍了煤气化工艺构成和特点、技术指标及适用于 IGCC 的技术原则等；第六章介绍了煤气净化技术、参数指标及适用于 IGCC 的技术原则等；第七章介绍了 IGCC 燃气轮机的特点、主要参数及其对 IGCC 系统性能的影响；第八章介绍了 IGCC 电厂余热锅炉及蒸汽轮机的特点、主要参数及其对 IGCC 系统性能的影响；第九章介绍了 IGCC 电厂空分系统的构成、工艺参数、技术指标，并比较分析了整体化、部分整体化、独立空分系统的特点；第十章介绍了 IGCC 控制系统构成、策略及优化等；第十一章全面介绍了 IGCC 系统的冷却、水处理、安全等其他辅助系统的组成及特点；第十二章介绍了 IGCC 各系统的动态特性和整体系统仿真；第十三章介绍了国内外 IGCC 电厂的建设和运行情况；第十四章介绍了 IGCC 与 CO_2 减排及国内外 CO_2 捕集、利用与封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 的发展和计划。

本书由许世森研究员主编，并负责全书内容设置、审阅和统稿。书中前言、第一章由许世森研究员编写，第二章由徐越研究员编写，第三章由白慧峰研究员编写，第四章由危师让教授级高工编写，第五章由任永强研究员、许世森研究员编写，第六章由郜时旺研究员、许世森研究员编写，第七章由王铭忠教授级高工编写，第八章由董卫国教授、白慧峰研究员、郑建涛研究员编写，第九章由郑建涛研究员编写，第十章由王剑钊研究员编写，第十一章由

王保民、李小宇研究员编写，第十二章由孙成贤研究员编写，第十三章由董卫国教授、许世森研究员、程健研究员、刘练波研究员编写，第十四章由黄斌博士、许世森研究员编写。

本书从编写到出版，历时 5 年，感谢所有编写者对本书的贡献，也感谢电力出版社编辑的辛勤劳动。本书编写过程中参阅了大量国内外学术论文及著作，部分章节引用了国内外一些专家学者的宝贵经验、研究成果及观点，对他们的卓越工作，在此致以深切的敬意。

由于编者水平所限，对书中不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 5 月



目 录

整体煤气化联合循环(IGCC)发电工程

前言

第一章 概论	1
第一节 IGCC 发电技术的基本特点	1
第二节 国内外 IGCC 电厂发展现状和趋势	5
第三节 IGCC 与近零排放煤基发电	15
第二章 IGCC 发电系统	17
第一节 IGCC 发电系统概述	17
第二节 IGCC 关键技术和设备	23
第三节 IGCC 技术参数及优化	25
第四节 IGCC 热力学基础和模拟	35
第五节 IGCC 总体性能特性	45
第三章 IGCC 经济性分析	47
第一节 造价及构成	47
第二节 IGCC 电厂的发供电成本和电价比较	55
第三节 IGCC 技术经济评估方法与探讨	56
第四节 敏感性分析	63
第五节 提高 IGCC 电厂经济性的潜力与途径	63
第四章 IGCC 电厂的环保性能	65
第一节 IGCC 电厂环保性能在原理上的优势	65
第二节 采用气流床气化工工艺的 IGCC 电厂的环保性能分析	66
第三节 气化工工艺对 IGCC 环保性能的影响	72
第四节 典型 IGCC 电厂的环保性能	73
第五节 IGCC 发电技术环保性能的比较分析和展望	75
第五章 IGCC 电厂煤气化工艺	81
第一节 IGCC 电厂煤气化工艺的构成及特点	82
第二节 煤气化反应机理及技术指标	83
第三节 水煤浆气流床气化技术	87
第四节 干煤粉气流床气化技术	112
第五节 煤气化技术指标与 IGCC 发电系统性能	141
第六节 IGCC 系统选择煤气化技术的原则	149

第六章	IGCC 电厂煤气净化工艺	151
第一节	IGCC 电厂煤气净化工艺的构成及特点	151
第二节	可供选择的煤气净化技术	157
第三节	IGCC 电厂煤气净化技术指标	186
第四节	IGCC 电厂煤气净化技术的选择	187
第七章	IGCC 电厂燃气轮机	193
第一节	IGCC 电厂燃气轮机概述	193
第二节	IGCC 电厂燃气轮机的改造	194
第三节	IGCC 电厂燃气轮机的选择	200
第四节	可供选择的合成气燃气轮机	203
第五节	IGCC 系统中的燃气轮机特性	230
第八章	IGCC 电厂余热锅炉及蒸汽轮机	239
第一节	IGCC 电厂余热锅炉的特点	239
第二节	IGCC 电厂蒸汽轮机的特点	256
第三节	IGCC 电厂蒸汽系统的特点及参数选择	260
第四节	蒸汽系统对 IGCC 总系统性能的影响	265
第九章	IGCC 电厂空分系统	271
第一节	IGCC 电厂空分系统的构成	272
第二节	空分工艺参数及技术经济指标	294
第三节	整体化空分系统	318
第四节	独立空分系统	323
第五节	部分整体化空分系统	325
第六节	IGCC 电厂空分系统整体化的其他因素	331
第十章	IGCC 电厂控制系统	333
第一节	IGCC 电厂总体控制系统及构成	333
第二节	IGCC 电厂控制系统及策略	337
第三节	IGCC 电厂机组负荷协调控制系统及优化	365
第十一章	IGCC 电厂辅助系统	372
第一节	冷却系统	372
第二节	水处理系统	376
第三节	安全保护系统	381
第四节	火炬系统	390
第五节	其他	394
第十二章	IGCC 电厂动态特性	398
第一节	总体运行特性	398
第二节	气化岛运行特性	398
第三节	发电岛运行特性	400

第四节	IGCC 仿真	403
第十三章	IGCC 示范电厂	432
第一节	美国 Tampa IGCC 电厂	432
第二节	美国 Wabash River IGCC 电厂	445
第三节	荷兰 Nuon Buggenum IGCC 电厂	453
第四节	西班牙 Puertollano IGCC 电厂	460
第五节	日本 IGCC 示范电厂	468
第六节	中国华能天津 IGCC 示范电厂	477
第七节	其他	489
第十四章	IGCC 与 CO ₂ 减排	497
第一节	IGCC 系统 CO ₂ 减排潜力	497
第二节	国际发展概况	506
第三节	中国的绿色煤电计划	514
附录 A	中国、美国、欧洲、日本火电厂大气污染物排放标准对比	517
附录 B	污染物排放值的计算和单位换算	520
参考文献		522

第一章 概 论

第一节 IGCC 发电技术的基本特点

一、IGCC 发电技术

整体煤气化联合循环 (integrated gasification combined cycle, IGCC) 是结合了煤气化与联合循环发电等技术, 采用固体燃料 (煤) 作为热源燃料的新型联合循环发电技术。IGCC 简图如图 1-1 所示。与超临界和超超临界发电技术相比, IGCC 采用了联合循环发电, 发电效率高。400MW IGCC 发电机组的发电效率达到甚至超过 1000MW 超超临界煤粉燃烧发电机组的发电效率 (见图 1-2), 而且, IGCC 发电效率的提升空间大, 未来可达到 50%~60%。IGCC 是在转化过程中治理污染物, 脱除效率高, 可实现煤中污染物的资源化回收。IGCC 发电技术的环保性能优越 (见图 1-3), 可实现包括气体、固体、液体和 CO_2 在内的近零排放, 可处理高硫煤和高硫燃料, 系统节水约 1/3, 可与煤制氢、煤制油、燃料电池等组成更先进的能源多元化生产系统。因此, IGCC 相比传统燃煤发电技术, 具有更高效、更清洁的特点, 是未来具有分离和处理 CO_2 发电技术的基础。

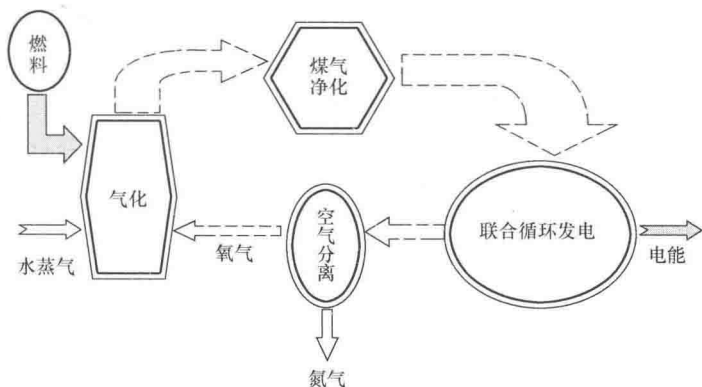


图 1-1 整体煤气化联合循环 (IGCC) 简图

现有燃煤发电技术中, IGCC 是燃煤发电技术的发展方向之一, 能够满足未来社会对煤炭发电更高效、更环保的要求。美国、欧洲和日本等主要发达国家和地区将 IGCC 视为一项具有战略意义的发电技术, 并投入巨资进行重点研发和示范。

从 20 世纪 70 年代开始, 一些工业发达国家就有计划地开展了 IGCC 发电技术的开发和研究。第一个成功进行 IGCC 发电工业性示范的电厂是 1984 年投运的美国 Cool Water 电

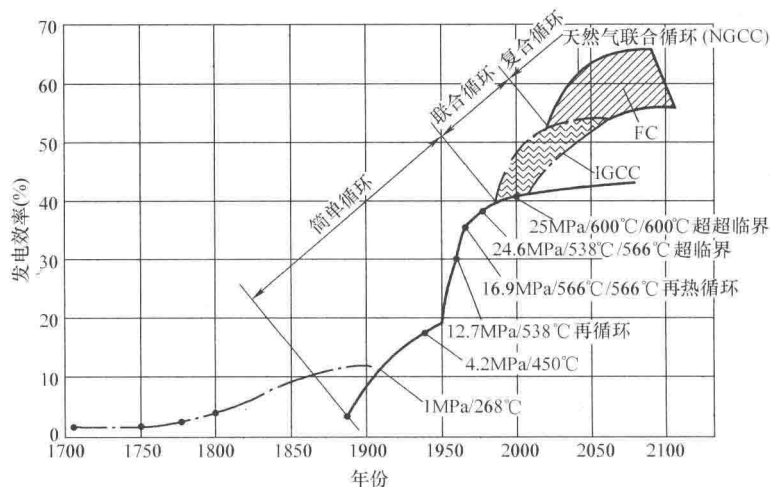


图 1-2 发电效率的发展历史

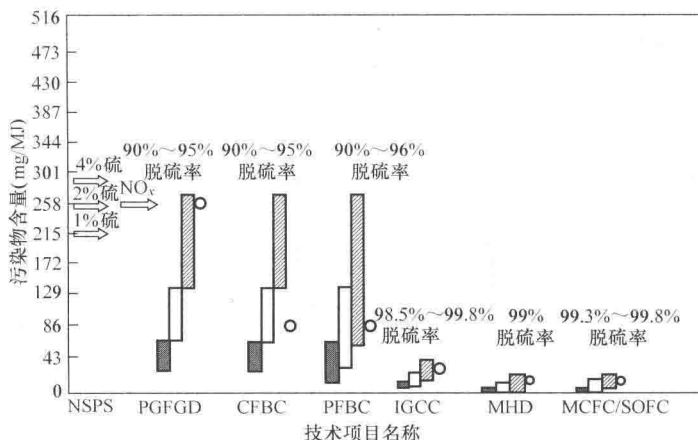


图 1-3 各种燃煤发电技术的环保性能比较

■ SO_x (1%硫); □ SO_x (2%硫); ▨ SO_x (4%硫); ○ NO_x

NSPS—new source performance standards, 新排放源性能标准; PGFGD—partial gasification flue gas desulfurization, 部分气化烟气脱硫技术; CFBC—circulating fluidized bed combustion, 循环流化床锅炉; PFBC—pressurized fluidized bed combustion, 增压循环流化床; MHD—magnetohydrodynamics, 磁流体发电技术; MCFC—molten carbonate fuel cell, 熔融碳酸盐燃料电池; SOFC—solid oxide fuel cell, 固态氧化物燃料电池

厂。该示范电厂的重要意义在于证明了 IGCC 发电技术的可行性以及极好的环保性能，被称为世界上最清洁的燃煤电厂。得益于十余年来燃气轮机技术的迅速发展，目前燃气轮机最大单机功率达到 375MW，燃用天然气的联合循环发电净效率已超过 60%。随着燃气温度的进一步提高和蒸汽循环的优化，将来的联合循环发电效率可望进一步提高。因此，IGCC 发电技术已经大型化，正走向商业化应用。在当前技术水平下，IGCC 发电技术的净效率可达 43%~45%，今后可能达到 52%或更高。

与国外相比，我国的电力工业更加依赖于煤炭，在电力发展中提高效率和降低污染的矛

盾更加突出。IGCC 发电技术是能较好地解决效率和污染两者间矛盾的先进的洁净煤发电技术，符合全面、协调、可持续发展的要求，因而我国更需要该技术。IGCC 发电技术为我国电力工业落实科学发展观、实施可持续发展战略提供了一条有效的技术途径。

二、IGCC 发电系统的构成

IGCC 发电系统由两大部分组成，即气化岛〔煤的气化、净化及空气分离（简称空分）部分〕和发电岛（燃气-蒸汽联合循环发电部分）。

煤经过气化和净化后，可除去煤气中 99% 以上的硫化氢和几乎 100% 的粉尘，将固体燃料转化成燃气轮机能燃用的清洁的气体燃料。燃气-蒸汽联合循环发电结合了高温的燃气布雷顿循环和低温的蒸汽朗肯循环，大大提高了能源的综合利用率。燃气-蒸汽联合循环的形式有多种，最常用的是余热锅炉型联合循环，因为燃气轮机的排气温度高（一般为 500~650℃），在燃气轮机后面安装一台余热锅炉，可利用燃气轮机的高温排气加热给水，产生高温、高压的蒸汽，送到蒸汽轮机中做功，产生一部分电力，从而提高燃料中能量的转换效率。

图 1-4 所示为美国 Tampa IGCC 电厂发电系统。

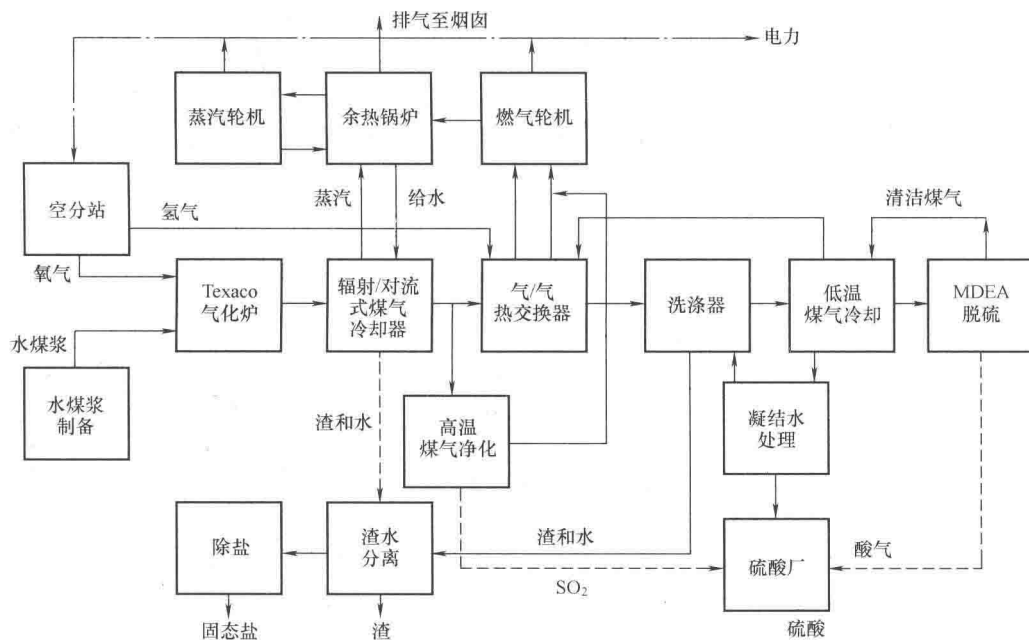


图 1-4 美国 Tampa IGCC 电厂发电系统示意

（一）气化岛

1. 煤气化系统

配置一台德士古（Texaco）气化炉，属水煤浆进料、氧气下吹式气流床气化。气化能力为 2400t/d，水煤浆浓度为 68%，氧气浓度为 95%。气化压力为 2.8~3.0MPa，气化温度约为 1482℃。燃料中的硫转化成 SO₂ 和羰基硫（COS），煤中所含灰分在气化过程中熔融成液态渣。煤被气化为高温煤气（粗煤气），其主要成分为 H₂、CO、CO₂ 和水蒸气，向下流动进入辐射式煤气冷却器，煤气温度降到约 700℃，煤气中的熔融渣在底部水室中淬冷成玻璃状渣。煤气继而进入两个并联的对流式煤气冷却器，继续冷却到 480℃。煤气显热得到

回收,产生 10.4MPa 的饱和蒸汽。气化炉和辐射式煤气冷却器做成一体,外壳直径为 5.185m,高为 39.345m,重约 900t;气化炉炉膛用耐火砖衬里。

积存在辐射式煤气冷却器底部水室中的灰渣,通过一个锁斗装置周期性地排入沉淀池中,锁斗装置约每 0.5h 开启一次。粗渣在沉淀池分离并被捞取送往灰渣场。含有细渣的水被泵送到细渣和水分离系统,首先通过一个沉降池,使细渣得到浓缩,然后用一台旋转鼓式真空过滤器将细渣分离出来,送往灰渣场。含有细渣的水连续送往细渣和水分离系统,分离后的水回到系统中重复使用。Tampa IGCC 电厂可做到废水零排放。

2. 煤气净化系统

经过对流式冷却器的煤气分两路进入煤气净化系统,需要清除煤气中的固体颗粒、硫化物、碱金属盐和卤化物等有害物质,使排气满足环境法规的要求,也满足燃气轮机进气组分要求。Tampa IGCC 电厂设置了高温和常温两套煤气净化系统。

高温煤气净化系统是一套 10% 容量的工业示范装置,采用美国通用电气 (GE) 公司研究开发的脉动式移动床高温脱硫技术,工作温度为 482~538℃。系统采用钛锌脱硫剂吸收 H_2S ,生成浓度约 13% 的 SO_2 ,送往硫酸厂,脱硫效率为 98%。净化后煤气中的 H_2S 和 COS 含量不超过 $30\mu g/g$,吸收剂可再生利用。

90% 的粗煤气进入常温煤气净化系统。高温煤气净化系统停运时,常温煤气系统能处理 100% 的粗煤气。常温煤气净化系统采用文丘里洗涤器湿法除尘和 N-甲基二乙醇胺 (MDEA) 法脱硫,Tampa IGCC 电厂没有采用水解器将 COS 转化为 H_2S ,脱硫效率为 96%。

3. 空分系统

配置一套完全独立的高压空分系统,空气由独立的空气压缩机供给。空分站日产 2100t 纯度为 95% 的氧气和 6300t 纯度为 98% 的氮气。氧气除供气化炉用外,还供给硫酸厂。氮气经压缩并加热后回注到燃气轮机燃烧室,既可降低 NO_x 的生成,又可增大燃气轮机的做功能力。

(二) 发电岛

燃气-蒸汽联合循环:燃气轮机为 MS7001F 型,用合成煤气时,燃气轮机入口初温为 1260℃,额定功率可达 192MW。燃气轮机排气进入一台三压自然循环余热锅炉,煤气冷却系统产生的高压饱和蒸汽也在这里进一步加热成过热蒸汽,驱动一台再热式汽轮机,主蒸汽参数为 10MPa/538℃/538℃。

三、IGCC 发电技术的特点

IGCC 发电技术具有以下特点:

(1) 效率高,且进一步提升的潜力大。IGCC 的高效率主要来自联合循环,联合循环燃气侧参数对循环性能的影响较大,目前联合循环发电净效率可达到 60.7%,并且还可进一步提升。随着燃气初温的进一步提高和其他有关的技术进步,IGCC 的净效率很快能达到 50% 或更高。届时,IGCC 将是大容量燃煤发电技术中发电效率最高的发电技术。

(2) 煤的洁净转化使 IGCC 具有极好的环保性能。IGCC 煤气化后,合成煤气的流量仅是相同容量机组烟气量的 1/6,而且是加压状态,因此,可采用成熟的可再生化工净化及回收工艺处理煤气,粉尘和其他污染物在此过程中一并被脱除,能实现 98% 以上的污染物脱除效率,并可回收高纯度的硫。煤气化后的废物处理量最少,脱硫后生产的元素

硫或硫酸可以出售。灰熔融冷却后形成玻璃状渣,能固化碱金属等有害物质,大大减轻环境污染,而且可用作建筑材料。煤气化过程没有 NO_x 生成,煤气在燃气轮机燃烧过程中,采用低 NO_x 燃烧,可将 NO_x 控制在 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。因此,IGCC 是所有已示范的大容量洁净煤发电技术中最清洁的发电方式。IGCC 电厂的污染物排放,仅为美国国家环保标准的 $10\%\sim 50\%$,可以在较长时间内满足日益严格的环保要求,而且在污染物控制方面还有很大的发展潜力。

(3) 耗水量少。IGCC 电厂的耗水量比常规汽轮机电厂少 $30\%\sim 50\%$,这使它更有利于在水资源紧缺的地区发挥优势,也适于在矿区建设矿口电厂。

(4) 易大型化。目前单机功率可达到 400MW 以上。

(5) 多种技术集成。IGCC 是一个由多种技术集成的系统,煤气化净化技术、燃气轮机技术及汽轮机技术等的发展都为它的发展提供了强有力的支撑。

(6) 多联产。IGCC 能与其他先进的发电技术,如燃料电池、湿空气透平 (humid air turbine, HAT) 循环等结合,形成效率更高的整体煤气化湿空气透平 (integrated gasification-humid air turbine, IG-HAT) 循环等发电方式,具有广阔的发展前景。能和煤化工结合成多联产系统,同时生产电、热、燃料气和化工产品,如便于与生产甲醇、醋酸、合成氨、尿素等化工过程相结合,使煤得到充分的综合利用,有利于降低生产成本,并能与煤制氢、煤制油等组成更先进的能源多元化生产系统。以 IGCC 系统为基础的发电、化工产品、制氢、制油等多联产系统被视为 21 世纪煤化工的重要方向。

(7) 充分综合利用煤炭资源,适用煤种广。IGCC 可燃用多种燃料,充分利用各种煤炭资源,做到物尽其用。

(8) 为处理 CO_2 提供了一条可行的途径。IGCC 为燃煤发电技术处理 CO_2 提供了一条可行的途径,采取目前成熟的工艺即可分离 85% 以上的 CO_2 ,可实现包括 CO_2 在内的燃煤污染物的近零排放。美国能源部的研究表明,若考虑 CO_2 的分离,IGCC 将是最经济的燃煤发电方式。

(9) 易于改造。当天然气和石油枯竭时,可用 IGCC 改造现有燃油、气的联合循环。IGCC 也可用于现有蒸汽电厂的增容改造,又便于实施电厂的分阶段建设,能有效地利用建设资金。

(10) 系统复杂、成本高,但是真正意义上的可持续发展的洁净煤发电技术。同任何技术一样,IGCC 技术也存在不足。与常规发电技术相比,IGCC 系统复杂,不易被电力行业所接受;技术尚处于发展期,成本相对较高。但在相同的排放指标下比较,IGCC 机组的造价将低于常规发电机组。IGCC 是真正意义上的可持续发展的洁净煤发电技术,将在我国中远期 (15~50 年) 的燃煤发电中扮演重要角色,它也是未来煤基能源多元化近零排放系统的核心技术及重要基础。

第二节 国内外 IGCC 电厂发展现状和趋势

一、国内外 IGCC 电厂的发展历程

(一) IGCC 电厂的历史沿革

1972 年,德国 Lünen 170MW 正压锅炉型 IGCC 示范电厂投入运行;

1984 年, 美国 Cool Water 100MW 余热锅炉型 IGCC 示范电厂投入运行;
1987 年, 美国 LGTI 160MW 热电联产型 IGCC 示范电厂投入运行;
1995 年, 美国 Wabash River 297MW (设计发电毛功率) IGCC 电厂投入运行;
1996 年, 美国 Tampa 313MW (设计发电毛功率) IGCC 电厂投入运行;
1998 年, 荷兰 Nuon Buggenum 284MW (设计发电毛功率) IGCC 电厂投入商业运行;

1998 年, 意大利 ISAB 500MW 炼油厂底料制氢多联产发电厂投入运行;
1999 年, 西班牙 Puertollano 335MW (设计发电毛功率) IGCC 电厂投入商业运行;
1999 年, 意大利 API 能源项目 280MW 炼油厂底料制氢多联产发电厂投入运行;
2000 年, 意大利 Sarlux 550MW 炼油厂底料制氢多联产发电厂投入运行;
2001 年, 日本 GSK 500MW 炼油厂底料制氢多联产发电厂投入运行;
2006 年, 意大利 Sardinia 620MW 炼油厂多联产发电厂投入运行;
2008 年, 日本三菱重工 250MW 级空气气化 IGCC 示范电厂 (勿来电厂) 投入商业运行;

2012 年, 中国华能集团公司 (以下简称华能集团) 250MW 级 IGCC 电厂投入商业运行;

2013 年, 美国杜克能源 630MW IGCC 电厂投入商业运行。

(二) IGCC 计划项目和最新进展

1. 美国

美国原计划建设 IGCC 项目 54 个, 其中在 2007~2008 年期间, 有 24 个项目被取消, 有多个项目被暂停或延期, 目前仅有以下项目仍在进行中:

(1) 杜克能源 IGCC 电厂。位于美国印第安纳州的杜克能源 IGCC 电厂是目前世界上规模最大 (630MW) 的 IGCC 电厂, 于 2013 年 6 月投产发电, 采用 GE 煤气化技术及多系列煤气化系统, 日处理 5000t 煤。复杂的商业利益加之美国缺乏建设大型能源电力项目所需的熟练技术人员, 使得该项目的总投资由项目初期的 19.85 亿美元增加到 30 亿美元。

(2) Kemper IGCC 项目。项目于 2010 年 6 月开工, 原计划于 2016 年底投入运行。因项目延期两年多, 预算从计划的 22 亿美元增加到 66.6 亿美元, 总装机容量 582MW [524MW(煤)+58MW(天然气)]。

(3) 莱马能源项目。项目位于俄亥俄州的 lima 城, 由美国合成燃料集团投资, 属 IGCC 联产合成气和氢气。2013 年 11 月开始清理场地, 准备进行工程前期和研发中心建设。

(4) 南部要点煤气化项目。项目位于北达科他州的斯塔克县, 由大北方电力开发联合气公司投资, 联产氢气和 175MW 电力。

(5) 南加州爱迪生犹他 IGCC 电厂。项目位于犹他州埃默里县, 由南加州爱迪生公司投资, 装机容量 500MW, 计划进行 90% 的 CO₂ 捕集和埋存。2012 年 10 月至今仍处于缓慢进展之中。

(6) 德克萨斯州清洁能源项目 Now Gen。项目位于德克萨斯州敖德萨城, 由顶峰电力集团投资, 属 IGCC 多联产项目, 发电功率 400MW。项目可实现 90% 的碳捕集率, 预计 2017 年投入商业运行。

(7) 氢能源加州项目 (HECA)。项目位于 Kern 县, 由 SCS 能源加州有限公司投资,

属 IGCC 和氢气多联产项目, 使用 25% 的石油焦和 75% 的煤的混合物, 产生 300MW 电力。其中, 87% 的 CO_2 捕集用来驱油, 13% 用来生产尿素。2013 年 7 月, 相关部门发布了该项目的环境评估。

2. 英国

(1) 清洁能源项目。英国的清洁能源项目位于苏格兰爱丁堡的格兰奇茅斯, 由顶峰电力集团投资, 计划进行 90% 的 CO_2 捕集, 采用已存在的岸边和海底管道将 CO_2 输送到海底的气田进行永久埋存。

(2) 北基灵霍姆电力 470MW IGCC 项目。项目位于北林肯郡北基灵霍姆, 可能实现 1 万 t CO_2 捕集, 然后储存到北海附近的岩层。电厂处于可行性研究阶段, 计划 2017 年上网发电。

(3) Don Valley CCS 项目。项目位于南约克郡的斯坦福斯, 由 2Co Energy 公司投资, 净发电量 650MW, 计划捕集 500 万 t CO_2 , 并利用管道注入油田, 用来驱油。该项目因没有政府的资金支持, 目前处于延期状态。

(4) 蒂赛德低碳 850MW IGCC 电厂。电厂位于蒂赛德地区, 其中 400MW 用于 CO_2 的捕集和封存 (CCS), 一年将有 250 万 t 的 CO_2 被捕集, 捕集率为 90%, 并利用 200~250km 管道, 将 CO_2 长期储存于北海中心的废弃油田里。项目计划 2018 年投入商业运行。

3. 韩国

韩国 Taean 380MW IGCC 电厂位于韩国 Taean 县, 由韩国西部电力有限公司投资, 为韩国首个燃煤 IGCC 电厂。电厂于 2015 年 9 月 10 日第一次点火, 2016 年 6 月正式启动发电业务。

4. 日本

日本广岛 Cool Gen IGCC 示范电厂由大阪 Coolgen 集团投资, 容量为 166MW, 使用 IGFC 联合循环+CCS 技术实现零排放。第二阶段将包含碳捕集和储存设备。电厂于 2013 年 3 月开始建设, 预计 2017 年完工。

5. 苏丹

苏丹 Jazan IGCC 电厂, 位于苏丹阿拉伯半岛的吉赞 (Jazan) 省, 由苏丹阿拉伯公司投资计划容量 2700MW, 并计划于 2016 年调试前两套机组。西门子公司为该电厂提供 10 台燃气轮机、5 台蒸汽轮机、15 台发电机和 10 台余热锅炉。

6. 印度

印度 Kochi 炼油厂扩建项目位于印度西南部的喀拉拉邦, 由巴卡拉石油集团投资, 装机容量 500MW, 使用石油焦气化, 计划 2017 年建成投产。

7. 南非

南非 Minambula 能源项目由金达尔钢铁电力有限公司投资, IGCC 机组容量为 1200MW, 因财政问题, 该项目处于暂停阶段。

8. 中国

中国曾计划的 IGCC 项目有华能绿色煤电天津 IGCC 项目 (250MW)、烟台 IGCC 项目 (400MW)、中电投廊坊 IGCC 项目 (400MW)、大唐国际沈阳 IGCC 项目 (400MW)、大唐国际天津 IGCC 项目 (400MW)、大唐国际北京 IGCC 项目 (400MW)、大唐深圳 IGCC 项目 (400MW)、杭州华电半山 IGCC 项目 (200MW)、国华温州 IGCC 项目 (300~

400MW)、东莞天明电力 IGCC 项目 (200MW)，目前仅建设和运行的项目为华能绿色煤电天津 IGCC 项目。

2012 年 12 月，中国首座华能天津 IGCC 电厂成功投产发电。电厂装机容量为 250MW，采用中国华能集团自主研发的 2000t/d 的二段式干燥粉加压气化炉。2016 年 7 月，基于 IGCC 的 30MW CO₂捕集装置通过 72h 连续运行。

以上 IGCC 项目的建设和运行，标志着 IGCC 技术已完成概念验证和技术示范运行阶段，目前已进入大容量机组的商业示范阶段。世界上主要的煤气化工艺和燃气轮机技术均进行了示范，煤气化、油气化和煤油混合气化及多种燃料供给方式都有示范经验。

从技术发展的角度划分，可以将 IGCC 技术的发展划分为第一代、第二代和第三代三个阶段，各阶段的主要技术特征列于表 1-1。目前 IGCC 示范项目技术参数见表 1-2。

表 1-1 IGCC 各阶段的主要技术特征

阶段	实现年代	气化炉供煤方式	煤气净化方法	蒸汽循环	燃气轮机初温 (°C)	供电效率 (%)	
						高位热值 (HHV)	低位热值 (LHV)
第一代	20 世纪 80 年代	水煤浆	常温湿法	单压	1066	30~35	
第二代	20 世纪 90 年代	水煤浆或干粉	干法或湿法	双压/再热	1288	42~45	40~43
第三代	至 2020 年	干粉	高温干法	三压/再热	1427	47~49	45~47

表 1-2 目前 IGCC 示范项目技术参数

项目名称		范 围	项目名称	范 围
机组容量 (MW)		100~320	等效可用率 (%)	80~90
净效率 (LHV, %)		40~45		
负荷变化范围 (%)		50~100	计划停用系数 (%)	8
负荷变化速率 (%/min)		3~5		
污染物排放浓度 (标况下, mg/m ³)	SO _x	30~50	燃料适应性	高、低灰分, 灰熔点煤
	NO _x	100		
	粉尘	10	造价 (美元/kW)	1200~1500

(四) 典型 IGCC 电厂

最具代表性的 IGCC 示范电厂分别是美国佛罗里达的 Tampa 电厂、印第安纳州的 Wabash River 电厂，西班牙的 Puertollano 电厂，荷兰的 Nuon Buggenum 电厂以及日本的勿来电厂，其中前 4 个电厂主要完成于 20 世纪 90 年代，勿来电厂也已于 2008 年开始运行。

1. 美国 Tampa 电厂

美国 Tampa 电厂设计发电毛功率为 313MW，在美国能源部的支持下于 1996 年建成，并于 2001 年投入商业运行。采用 GE 公司 Texaco 2000t/d 气化技术，并联用 1 台辐射与对流煤气冷却器、1 台 7FA 型燃气轮机。全厂设计净效率为 42%，实际运行净效率为 39%。机组按煤燃料进行设计，实际运行中通过掺烧 60% 的煤焦油来降低发电成本。表 1-3 所列为美国 Tampa 电厂投运前 5 年的发电量。