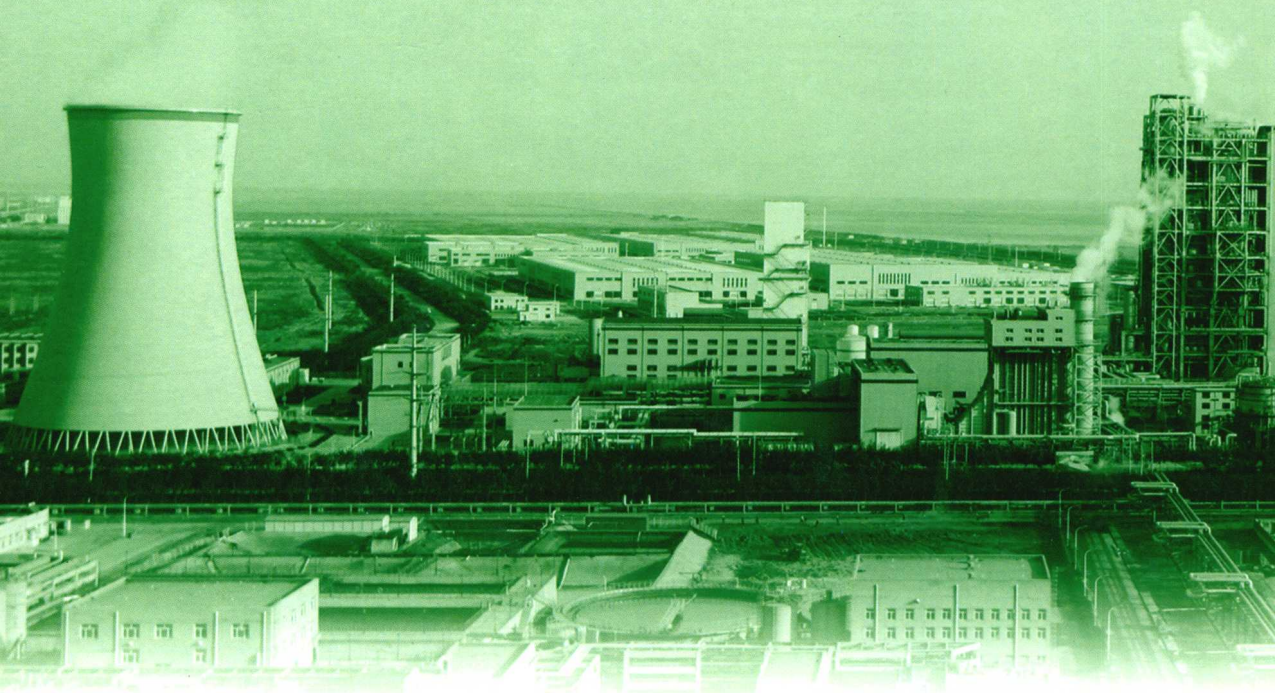


整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC) 的工作原理 性能与系统研究

焦树建 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC) 的工作原理 性能与系统研究

焦树建 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书详细介绍了整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC) 的工作原理和性能, 并对 IGCC 的各组成部分 (煤气化炉、粗煤气净化设备和系统、燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机、制氧空气分离系统、调节控制系统等) 逐项进行了分析; 给出了某些 IGCC 电站与多联产企业的运行实况与经验教训、NGCC 电站改造成为煤基 IGCC 电站的实施方案、IGCC 多联产技术在煤化工和石化企业中的应用、煤制天然气的 IGCC 工程、利用 IGCC 技术捕集和封存二氧化碳的工艺流程, 以及 IGCC 电站原则性系统的设计与热力参数的计算和 IGCC 电站的经济性评估; 最后还给出了其他先进的洁净煤发电技术展望。

本书可供从事能源和发电工程的科学研究工作者、联合循环设备和工程的设计工作人员, 以及相关专业的在校院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC) 的工作原理、性能
与系统研究 / 焦树建编著. —北京: 中国电力出版社, 2014. 7
ISBN 978-7-5123-6204-8

I. ①整… II. ①焦… III. ①燃气—蒸汽联合循环发电—
研究 IV. ①TM611.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 155623 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 7 月第一版 2014 年 7 月北京第一次印刷

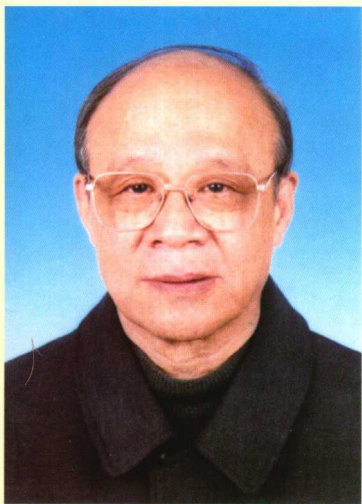
787 毫米×1092 毫米 16 开本 50.25 印张 1240 千字 1 插页

印数 0001—3000 册 定价 148.00 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



焦树建

原清华大学热能工程系教授
原国家科委 IGCC 项目专家组成员

Shujian Jiao
Former professor of Tsinghua University
Former member of the expert team for IGCC
Project led by SSTC

焦树建教授生于 1933 年，1955 年毕业于清华大学动力机械系，留校任教，历任助教、讲师、副教授和教授。20 世纪 90 年代兼任原国家科委 IGCC 项目专家组成员。1995 年退休。历任华东理工大学和内蒙古电力学院兼职教授，以及中国进出口总公司燃气轮机技术引进项目招标团顾问。一直从事燃气轮机、燃烧技术和燃气—蒸汽联合循环（包括 IGCC 和 PFBC）等方面的教学和科研工作。自 1978 年以来获得由全国第一届科学大会、国家教委和电力部颁发的科技进步奖和优秀学术著作奖 5 次，并获美国 ABI 颁发的 1997 年度“成就金奖”。现已出版《燃气—蒸汽联合循环的理论基础》《燃气轮机燃烧室》和《整体煤气化燃气—蒸汽联合循环（IGCC）》等学术著作 10 部，发表学术论文 120 余篇，享受国家政府津贴。

Professor Jiao, born in 1933, graduated from the “Department of Power Engineering” at Tsinghua University in 1955, then he became a teacher as an assistant, lecturer, associate professor and professor gradually. In 1990’ s he was also a member of the expert team for an IGCC Project planned to set up in China and funded by the former State Science &Technology Commission. He had retired in 1995. Now, he was a concurrent professor at East China University of Science and Technology and at Electric College of the Inner Mongolia Autonomous Region, as well as a consultant for “Gas Turbine Power Plant Construction & Technology Transfer” project, CNTIC. He had been devoting to teaching and researching works on gas turbine, combustion technology and combined cycle, including IGCC and PFBC for more than 30 years. He had won five times of “advanced award of science and technology”, issued by the first conference of Science and Technology in 1978, by the Ministry of Electric Power and by the State Educational Commission. In addition, a “Gold Record of Achievement” prize from ABI US, was also awarded to him in 1997. Till now, 10 kinds of academic books, such as “The Theoretical Basis of Gas-Steam Combined Cycle”, “Gas Turbine Combustors”, “Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)” etc. and more than 120 academic papers had already been published. Otherwise, he is also a winner of “National Special Allowance”.



前言

众所周知：煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC) 是 20 世纪 70 年代初才开始研发的一种洁净煤发电技术，其英文全名是 “Integrated Gasification Combined Cycle”，通常称为 IGCC。顾名思义，它主要是由“煤的气化与净化设备”与“燃气—蒸汽联合循环装置”两大部分组成的。煤在“气化与净化设备”中首先气化成为粗煤气，进而经净化处理后，被送到燃气—蒸汽联合循环装置中去燃烧、膨胀和做功，以便实现煤的清洁和高效发电的目的。该装置的最大优点是：排气中污染排放量非常少，能够长时期地满足美国发电厂污染排放新标准 (NSPS) 的要求，而且还具有提高循环热效率的最大潜力。此外，粗煤气的气化与净化设备可与其他动力设备相匹配，由此派生出许多洁净煤技术的新系统，如：整体煤气化燃料电池 (IGFC)，整体煤气化 HAT 循环 (IGHAT)，整体煤气化蒸汽循环 (IGSC)，以及整体煤气化 CO_2 捕集、利用与封存系统 (IGCCUS，或 IGCC+CCUS) 等。

1996 年，作者曾以《整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC)》为书名，向读者介绍了当时人们还不太熟悉的这种洁净煤发电新技术。那时，这种新技术刚刚试验成功，一些技术发达的国家（主要是美国和欧洲）正在掀起一股研究和开发 IGCC 技术的高潮，其目的是：“以提高 IGCC 的净热效率和运行可用率，同时降低比投资费用和发电成本为目标，力求对气化技术和燃气轮机的改造工作实现突破，并通过示范工程来掌握 IGCC 电站的运行规律，以便为今后推广使用该技术准备条件”。

在此后的 10 多年内，世界上总共建立了 IGCC 电站和多联产能源系统 26 项。但总功率只有 4250MW。目前还在运行的大约尚有 16~17 项，其中纯发电的 IGCC 电站只有 5 座，其余都为建在石化企业中的 IGCC 多联产项目。总的来说，IGCC 技术发展得并不迅速，主要原因是比投资费用和发电成本较高，运行可用率偏低（仅 85% 左右），而这三个矛盾又长期没能获得解决。

在 2005 年左右，由于世界范围内天然气价格的飙升（由上世纪 80~90 年代的 3.2~3.5 美元/GJ 增为 2005 年左右的 8~10 美元/GJ），由于煤制天然气工程经济效益的改善，以及由于人们发现 IGCC+CCUS 方案可能在减排 CO_2 方面颇具竞争力，再加上实践的证明：IGCC 在煤化工和石化部门的使用确实具有明显的经济效益和环保效益。这就为 IGCC 技术的发展提供了一个极好的机遇。因此，目前在世界范围内又掀起了一个发展 IGCC 的新高潮。这次高潮的目标似乎是：在国家的鼓励 and 政策的支助下，力求使 IGCC 技术正式转化为生产力，具体表现有以下几方面特点：

(1) 随着各国政府对碳污染问题的日益重视，发展 IGCC 的积极性有了很大提高，投资建设 IGCC 的费用增加了。许多国家制订了要求很高的发展计划，如拟建设热效率为 45%~50% 的 IGCC 电站；要求脱除 CO_2 并制 H_2 供燃料电池发电，且选用 Fr7FA 和 Fr7G 级燃气轮机作为 IGCC 电站的母型机，以提高电站的效率。

(2) 使 IGCC 的设备制造商与电站的设计单位组成联合体, 向市场提供 600MW 等级的参考电站的设计与设备, 且承包 IGCC 的交钥匙工程, 借以减少投资费用并缩短建设周期 (使从工程设计、设备采购与安装到全电站投运的周期, 由 5 年减为 3.5~4 年)。

(3) 由国家给政策, 鼓励和促使 IPP 和公用事业电力公司等自费建设 IGCC 电站, 以便与煤化工和石化企业一起, 形成相对稳定的用户群体, 逐渐培养起 IGCC 设备的市场供求关系。

(4) 据截止到 2007 年 2 月的不完全统计表明: 世界范围内准备新建的 IGCC 电站和多联产能源系统共 81 项, 其总功率超过 20GW, 其中 37 项是多联产技术, 它们除了生产电能外, 还生产蒸汽、氢气、甲醇、二甲醚、尿素、合成氨、酸和液体燃料等。另外 11 项则生产煤制人造天然气, 其中包括在我国正在兴建的福建炼油厂的多联产乙烯工程。

鉴于我国的一次能源是以煤炭为主, 又是世界上的产煤大国和耗煤大国。据估算: 到 2050 年时, 我国还将累计消费 1000 亿 t 标准煤, 这就要求我国必须从“能源与环境协调发展”, 并从“高效和清洁利用煤炭”这两个角度出发, 坚持走洁净煤技术的道路。可以预计: IGCC 这种先进的洁净煤技术必将在我国的煤化工和石化企业、煤制人造天然气行业以及发电行业中逐渐获得使用。当然它必须依靠“技术进步”、“规模经济”、“批量生产”、“国产化与本地化生产”等方法, 确实把比投资费用和发电成本降下来, 同时把运行可用率提高上去。

面对这样的形势, 为使更多的能源工作者能尽快掌握 IGCC 技术的基本知识, 作者把多年来收集到的相关资料, 结合自己的研究成果与心得, 汇编成册, 贡献给广大读者参考。

本书共有二十章, 另有附录。第一章论述了 IGCC 的本质、优缺点、关键技术和发展历史以及实际使用情况, 并结合我国能源的现状和特点, 探讨了在我国发展 IGCC 的必要性。第二章和第三章中根据作者研究获得的理论, 详细地介绍了燃气—蒸汽联合循环及 IGCC 的工作原理与特性。自第四章起顺序地对 IGCC 的各个组成部分, 如煤的气化炉、粗煤气的净化设备和系统、燃气轮机、余热锅炉、蒸汽轮机及空分制氧系统与设备, 进行逐个介绍, 并分析它们的特点和工作性能, 以便读者能具体掌握这些主要部件的工作原理与特性。第十章中则以作者研究获得的理论为指导, 对世界上实际使用的若干座 IGCC 电站的工作系统及三座 600MW 等级的 IGCC 参考电站的设计思想和特点进行了分析, 并从中总结出一些合理设计 IGCC 工作系统的基本原则和方向。第十一章简单地介绍了 IGCC 电站的调节控制系统。第十二章尽可能详细地介绍了几座 IGCC 电站和多联产工程在实际运行过程中发生的故障, 并从中总结出能指导其运行工作的若干经验与教训。第十三章中则讨论了烧天然气的燃气—蒸汽联合循环 (NGCC) 或常规燃煤电站改造成为 IGCC 电站的几种可能的方案, 进而在第十四~十六章中, 对煤化工用 IGCC、煤制人造天然气的 IGCC 工程及 IGCC 工程中 CO_2 捕集、利用和封存技术的工作原理和工艺流程的特点, 进行了分析和详细介绍。此外, 在第十七章和第十八章中简要地介绍了 IGCC 电站热力系统的模块化建模与最优化设计的原理与方法, 以及这类电站的全工况性能与变工况特性。在第十九章中较详细地讨论了 IGCC 工程项目 (包括电站和多联产系统) 的经济性评估方法和示例。在第二十章中则介绍了目前正在开发研究之中的另外三种整体煤气化发电技术——IGHAT、IGFC (IGSOFC+IGMCFC) 与 IGSC 的工作原理、开发水平与发展前景。这三种新技术有望在 IGCC 技术发展成熟的基础上, 使洁净煤发电技术更上一层楼, 在此特为读者提供这些新技术的最基本的理论知识, 以

便为它们今后的进一步开发作些准备。

本书的编写是以国内外近 10~20 年内在研发 IGCC 技术方面所取得的丰富的实践经验和教训为基础的,涉及的内容比较广泛,既有关于 IGCC 工作系统优化设计的理论探索和计算,也有关于某些关键部件(如煤的气化炉、粗煤气的净化方法以及燃气轮机改型设计等)的研发和试验,更有关于 IGCC 技术在发电和多联产能源领域中实际运行与维护的经验、教训和改进的方向与措施。为此,作者尽可能广泛地参阅了国内外相关的文献和研究报告,力求能深入地理解问题的实质,并把这些知识、经验和教训加以总结,最后系统地以学术著作的形式呈献给广大读者。因而在本书的编写中必然会直接引用国内外有关单位和学者们的研究论文、学术专著,甚至于技术报告的内容和论点,敬请读者和相关论文的作者见谅。特别应该指出的是:中国科学院工程热物理研究所的同仁们,在“能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统”的理论研究方面作出了卓越贡献;华东理工大学的师生们在研究和开发对置式多喷嘴喷流床气化炉方面取得了突出的成果,为我国的煤气化事业奠定了基础;而我国石化和电力工业部门的员工们则为我国切实掌握 IGCC 发电和多联产技术的运行和维护工作,积累了宝贵的经验,提供了卓有成效的改进措施(这些经验和改进措施已在 2010 年 5 月,于江苏宜兴举办的“第二届多喷嘴对置式煤气化技术推广及应用研讨会”的论文集中得到了体现)。他们的许多观点和成果都将在本书的相关章节,特别是在第四、十七章和第十八章中得到充分的反映。借此机会,作者对所有为本书的编写提供了信息资源的同仁们表示衷心的感谢。严格地讲,本书基本上是一本精选的文献汇编,但经过作者的消化、吸收与提炼,使它成为能够比较系统地介绍 IGCC 的工作原理、性能、主要装置的构成与功能,以及整体热力系统的设计与运行经验的参考书,编著者期望通过本书能较迅速把读者引进 IGCC 的知识海洋,以便共同来参与对该技术的研究和探索。

限于作者的理论水平和实践经验,书中难免存在疏漏与不足之处,恳请读者不吝批评和指教。

编著者

2014 年 6 月于清华园



目 录

前言

第一章 绪论..... 1

 第一节 目前世界各国煤炭资源与 CO₂ 的排放现状 1

 第二节 整体煤气化燃气—蒸汽联合循环机组的基本概念..... 4

 第三节 整体煤气化燃气—蒸汽联合循环机组的发展过程、现状与趋势 13

 第四节 整体煤气化燃气—蒸汽联合循环机组的优缺点 25

 第五节 目前整体煤气化燃气—蒸汽联合循环技术的水平 29

 参考文献 33

第二章 常规的余热锅炉型燃气—蒸汽联合循环性能的理论分析 35

 第一节 概述 35

 第二节 热效率与功率比计算关系式的推导 35

 第三节 各种参数的选择 39

 第四节 各种参数对 η_{ccf}^N 和 η_{cc}^N 值的影响 42

 第五节 补燃式和非补燃式联合循环特性的比较 44

 第六节 计算实例 46

 参考文献 57

第三章 燃煤的整体煤气化燃气—蒸汽联合循环性能的理论分析 58

 第一节 概述 58

 第二节 以空气为氧化剂的 IGCC 热效率与功率比的计算关系式 58

 第三节 以氧气为氧化剂的 IGCC 热效率与功率比的计算关系式 65

 第四节 一种计算 IGCC 供电效率的简化式 71

 第五节 各种参数的选择 71

 第六节 各种参数对 η_{cc}^N 的影响关系 76

 第七节 计算实例 80

 第八节 设计 IGCC 电站时燃气轮机的选取原则 88

 第九节 发展 IGCC 必须研发的关键技术 95

 参考文献 96

第四章 在 IGCC 中使用的煤气化炉	97
第一节 IGCC 技术对煤气化炉的要求	97
第二节 煤气化炉的技术特性指标	97
第三节 煤气化过程的化学反应特征	99
第四节 喷流床气化炉	100
第五节 流化床气化炉	161
第六节 输运床气化炉	174
第七节 固定床气化炉	178
第八节 新型高温紧凑式 PWR 气化炉的开发	187
第九节 煤气化工艺对煤炭性质的要求	189
第十节 几种不同类型的气化炉工作特性的比较	194
第十一节 水煤浆的制备与输送系统	201
第十二节 干煤粉的制备与输送系统	205
第十三节 喷流床气化炉的若干运行问题	207
第十四节 气化炉煤气成分的预测	213
参考文献	216
第五章 在 IGCC 中使用的粗煤气的净化设备和系统	219
第一节 概述	219
第二节 IGCC 电站中污染物排放控制流程综述	221
第三节 粗煤气的常温湿法净化系统	223
第四节 粗煤气的高温干法净化系统	235
第五节 粗煤气的中温干法净化系统	243
第六节 废水及其处理系统	244
第七节 除汞系统	246
第八节 减排 NO_x 的对策	246
参考文献	247
第六章 在 IGCC 中使用的燃气轮机	249
第一节 概述	249
第二节 改烧煤制合成气时燃气轮机需要进行的改造	249
第三节 改烧氢气或富氢气体燃料时, 燃气轮机需要进行的改造	261
第四节 改烧甲醇燃料时燃气轮机需要进行的改造	263
参考文献	266
第七章 在 IGCC 中使用的余热锅炉	268
第一节 概述	268
第二节 在 IGCC 中使用的余热锅炉的特点	270
第三节 余热锅炉的类型与分类	272

第四节	余热锅炉设计时节点温差和接近点温差的选择	275
第五节	余热锅炉的汽水系统	278
第六节	余热锅炉蒸汽参数的优化选择	284
第七节	多压力级余热锅炉型联合循环性能的比较	289
第八节	余热锅炉的变工况特性	294
第九节	余热锅炉的结构	296
第十节	设计余热锅炉时必须考虑的若干问题	300
第十一节	余热锅炉停备用时的保养方法	303
	参考文献	304
第八章	在 IGCC 中使用的蒸汽轮机	305
第一节	概述	305
第二节	蒸汽轮机蒸汽参数的选择	306
第三节	蒸汽轮机的结构特点	310
第四节	在 IGCC 或联合循环中燃气轮机、蒸汽轮机和发电机的轴系布局关系	321
第五节	凝汽器的真空除氧功能	327
第六节	汽轮机的运行特性	329
第七节	扩容改造电站中原有蒸汽轮机的问题	330
	参考文献	331
第九章	在 IGCC 中采用的制氧空气分离系统及其设备	332
第一节	概述	332
第二节	在 IGCC 中可能采用的几种制氧空分系统	332
第三节	IGCC 电站中厂用电耗率 η_e 与空分系统方案的关系	342
第四节	IGCC 电站中燃气轮机的做功能力与空分系统方案的关系	345
第五节	IGCC 电站中 NO_x 的控制与空分系统方案的关系	346
第六节	IGCC 电站中空分系统的调控特性	347
第七节	目前有关空分系统设计的一些新观点	349
第八节	IGCC 电站中空分系统的能耗	351
第九节	深度冷冻法制氧的基本原理与流程	352
第十节	一种利用离子转移膜技术的制氧设备	360
	参考文献	364
第十章	IGCC 工作系统的分析	365
第一节	概述	365
第二节	对采用水煤浆喷流床气化炉的 IGCC 工作系统的分析	367
第三节	对采用干粉喷流床气化炉的 IGCC 工作系统的分析	377
第四节	对采用流化床气化炉的 IGCC 工作系统的分析	388
第五节	对采用液态排渣固定床气化炉的 IGCC 工作系统的分析	395

第六节	对几种拟商业化生产的大型 IGCC 参考电站设计方案的分析	396
第七节	对若干座 IGCC 电站中某些部套特征参数的核算	407
第八节	综合分析和评论	411
参考文献		414
第十一章	IGCC 电站的调节控制系统	416
第一节	概述	416
第二节	Puertollano IGCC 电站的控制原理	417
第三节	Buggenum IGCC 电站中 SHELL 气化炉的启动与负荷调节	422
第四节	采用 Texaco 气化炉的 IGCC 电站控制系统简介	424
参考文献		430
第十二章	某些 IGCC 电站和多联产项目的实践经验与教训	431
第一节	概述	431
第二节	某些 IGCC 电站的实践经验与教训	431
第三节	某些 IGCC 多联产项目的实践经验与教训	450
第四节	我国自行设计的多联产 IGCC 项目的初步实践经验	455
第五节	西班牙 Elcogas 公司对某座 IGCC 项目的评估意见	457
第六节	有关 IGCC 电站和 IGCC 多联产项目中若干运行和设计经验与教训的 初步总结	463
参考文献		465
第十三章	NGCC 电站或某些燃煤电站改造成为 IGCC 电站的实施方案	467
第一节	概述	467
第二节	第一种 IGCC 改造方案的工艺流程	469
第三节	一个拟把 NGCC 电站改造成为 IGCC 电站的示例	470
第四节	用 IGCC 技术把燃煤电站改造成为“公用工程岛”的动议	475
参考文献		479
第十四章	IGCC 多联产技术在煤化工和石化企业中的应用	480
第一节	概述	480
第二节	煤化工技术	481
第三节	对某些典型的用于煤化工或石化企业的 IGCC 多联产方案的分析	495
第四节	IGCC 多联产系统的技术经济特性和污染排放特性	510
参考文献		515
第十五章	煤制天然气的 IGCC 工程	517
第一节	概述	517
第二节	“甲烷化反应”的基本原理与能量的转换关系	520

第三节	电/SNG 联产的工艺流程	521
第四节	甲烷化反应器	523
第五节	大平原煤制天然气工程	525
参考文献		532
第十六章	应用 IGCC 技术捕集、利用和封存 CO₂ 的工艺流程	533
第一节	概述	533
第二节	应对气候变化对策的科学依据	535
第三节	有关研究 CO ₂ 排放问题的若干指导思想	540
第四节	何谓 CCUS 技术	541
第五节	因捕集 CO ₂ 导致的 IGCC 之能量损失以及捕集率对其性能参数的影响	550
第六节	IGCC 电站中 CO ₂ 捕集率的合理选择	555
第七节	为实现 CO ₂ 的捕集, IGCC 电站和燃气轮机必须进行的改造	556
第八节	有关 CO ₂ 减排成本的计算	559
第九节	CCUS 技术的现状和今后发展中必须思考和解决的问题	573
第十节	有关在世界范围内开展 CCUS 技术的研发和试点工作的动议	577
第十一节	结束语	578
参考文献		579
第十七章	IGCC 电站中原则性热力系统的设计、建模与优化	580
第一节	概述	580
第二节	IGCC 热力系统优化设计的思路	580
第三节	IGCC 电站中某些热力系统的设计经验与参考数据	588
第四节	IGCC 热力系统的综合优化	595
第五节	IGCC 热力系统的建模	601
第六节	IGCC 热力系统整体综合优化的示例	630
参考文献		637
第十八章	IGCC 电站的全工况特性与变工况特性分析	639
第一节	概述	639
第二节	IGCC 联合循环系统变工况特性的研究方法	640
第三节	IGCC 电站中燃气侧顶循环子系统的变工况特性	640
第四节	IGCC 电站中蒸汽侧底循环子系统的变工况特性	644
第五节	IGCC 联合循环系统的全工况特性规律	648
第六节	小结	651
参考文献		652
第十九章	IGCC 工程项目的经济性评估	653
第一节	概述	653

第二节 经济指标及其计算方法..... 655

第三节 估算 IGCC 发电成本的简化方法 657

第四节 计算 IGCC 经济性指标的 IGCC Model 667

第五节 IGCC 多联产系统的经济性分析 678

第六节 有关煤制天然气方案的经济性分析..... 684

第七节 IGCC 电站是否实施 CCUS 技术时经济指标的变化关系 689

第八节 降低 IGCC 发电成本和比投资费用的途径 693

参考文献..... 696

第二十章 对其他几种整体煤气化联合循环发电技术的简介..... 698

第一节 概述..... 698

第二节 湿空气透平联合循环（HAT）与 IGHAT 698

第三节 燃料电池与 IGMCFC 和 IGSOFC 724

第四节 整体煤气化的蒸汽透平循环系统（IGSC） 732

参考文献..... 743

附录..... 745

一、国际单位制（SI）及其换算关系..... 745

二、英制与公制单位的变换关系..... 748

三、我国的煤炭分类与各煤种的性质及特性..... 750

四、国外常用的某些典型动力煤种的有关数据..... 758

五、不同基准成分时煤组分的换算关系..... 758

六、煤粉或喷雾液滴颗粒尺寸的分布特性..... 760

七、燃烧过程和气化过程的热平衡计算..... 762

八、固体、液体、气体燃料发热量的经验数据..... 769

九、有关低热值煤气燃烧产物热工参数的计算..... 771

十、HRSG 中燃气酸露点的计算 776

十一、为煤的气化所提供的压气机抽气量的计算..... 777

十二、烟气中污染排放物含量单位的换算关系..... 778

十三、有关液化天然气与管输天然气流量之间的换算关系..... 779

十四、超（超）临界煤粉蒸汽发电机组的发展概况 779

十五、某些国家规定的新建燃煤电站中大气污染物的排放限值..... 786

参考文献..... 787

结束语..... 789

绪 论

第一节 目前世界各国煤炭资源与 CO₂ 的排放现状^[1~5]

众所周知：人类的活动、社会的进步，以及人们生活水平的提高，在很大程度上都与能源资源的开发和利用有着密切的关系。但是当能源在为人类社会和经济的发展作出巨大贡献的同时，却也为自然环境的污染和破坏敞开了方便之门。

目前，世界上化石能源占到能源需求量的 80%，其中煤占 25%，天然气占 21%，石油占 34%，核能占 6.5%，水电占 2.2%，生物质能源和废弃物能源占 11%，地热、太阳能和风能在全球能源需求中所占的比例仅 0.4%^[4]。

由于煤的成本低廉（煤价：0.95~1.9 美元/GJ，石油和天然气价：5.7~11.4 美元/GJ）而且储量丰富，煤炭资源遍布全球各个地区，特别是中国、美国和印度，所以在可以预见的未来，全球必将继续大量使用煤炭。表 1-1 给出了当采用“碳的捕集利用与封存技术”（CCUS, Carbon Capture Utilization and Sequanstration）和不采用 CCUS 的情况下，在 2000 年和 2050 年时，全球煤炭使用量的预测数据。

表 1-1		2000 年和 2050 年时全球煤炭使用量的预测数据 ^[5]					EJ
使用情况		基准情况		2050 年有限使用核能时		2050 年扩大使用核能时	
年代与使用条件		2000 年	2050 年	采用 CCUS 时	不采用 CCUS 时	采用 CCUS 时	不采用 CCUS 时
煤炭 使用量	全球煤炭使用量	100	448	161	116	121	78
	美国煤炭使用量	24	58	40	28	25	13
	中国煤炭使用量	27	88	39	24	31	17

图 1-1 给出了我国 2010-2050 年间一次能源的消费预测，由图可知：2050 年时我国要求达到的一次能源的总量为 63.5 亿 t/a，即在这 40 年间总的耗煤量将累计达到 1110 亿 t/a^[5]。

表 1-2 中给出了世界上一些主要国家的发电能源中煤炭所占的比例关系。

表 1-2		世界上一些主要国家的发电能源中煤炭所占的比例											
国别	世界	中国	美国	英国	法国	俄罗斯	日本	印度	德国	澳大利亚	加拿大	韩国	巴西
比例 (%)	41	80.2	49.8	38.8	4.6	18.0	27.0	68.3	48.0	81.9	17.1	38.0	2.4

世界上已探明煤的可采储量为 9842 亿 t，可供开采 150~200 年。

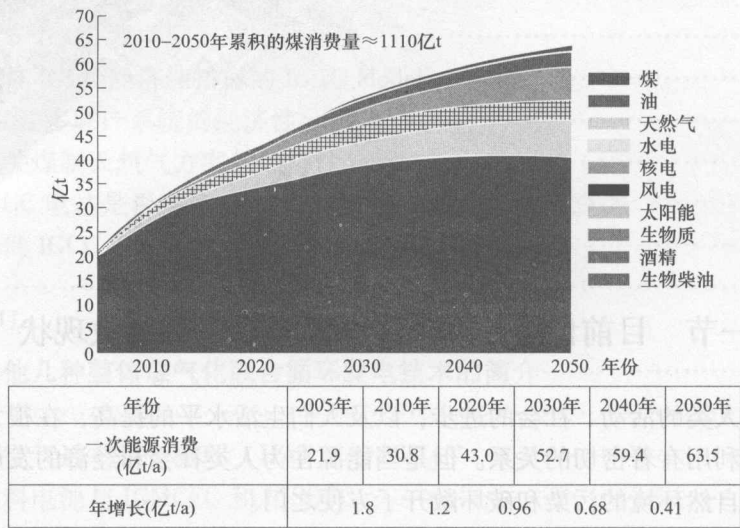


图 1-1 中国在 2010-2050 年期间对一次能源消费的预测^[5]

我国已探明的储煤量为 1.007 07 万亿 t（1998 年国家统计局提供）；煤的可采储量为 1650 亿 t（世界第 3 位）；2010 年煤的产量已达 30 亿 t，相当于 21.4 亿 t 标煤，但全国人均储煤量只有世界人均储量的 45%。

我国能源资源储量的结构是：原煤 87.4%，原油 2.8%，天然气 0.3%，水能 9.5%。
由此可见：煤炭是我国最重要的能源资源，生产量和消费量都很大，这个局面在短时期内很难改变，因而现在和将来煤炭必然是我国能源的主力。虽然在一次能源中它所占的比例已从 70% 逐渐降为 50%，但煤用于发电的比例却越来越大，它将从目前的 50% 上升到 70%。

与此同时，就美国而论，煤也是其国内的主要能源，对经济的增长也起到重要的作用。美国拥有 5000 亿 t 的储煤量，其中一半储量是可以开采的，按现在的使用速率计算，煤可以再使用 250 年。美国煤的储量占全球储量的 28%，位居世界第 1 位。在过去的 10 年内，近 50% 的发电耗能都取之于煤，在每年生产的总能量中煤占 32%。预计在今后会有更多的煤用来发电，2030 年时其比例可能会达到 47%，在美国采煤的劳动生产率很高（50 年前需要 33.5 万名煤矿工人才能生产 4.46 亿 t 煤，而如今大约 8.3 万名矿工就能年产煤 10 亿 t），并且价格低廉（煤价为 1.460 美元/GJ，天然气价为 7.774 美元/GJ，石油价为 6.143 美元/GJ），也为今后选用煤为原料和燃料提供了条件。

但是在使用煤的过程中却会造成严重的环境污染，而且由于煤炭中的含碳量很高，就会产生大量的温室气体 CO₂，引起全球范围内的气候逐渐变暖的问题，这就要求人们在利用煤炭这种能源的同时，必须要处理好它所具有的污染环境和排放大量温室气体——CO₂ 的负面效应。

表 1-3 给出了 2000 年和 2050 年时，在采用或不采用 CCUS 情况下，全球 CO₂ 排放量的变化关系。

表 1-3 2000 年和 2050 年时采用或不采用 CCUS 情况下，
全球 CO₂ 排放量的变化^[5]

CO ₂ 排放量	基准情况		2050 年有限使用核能时		2050 年扩大使用核能时	
	2000 年	2050 年	2000 年	2050 年	2000 年	2050 年
全球的 CO ₂ 排放量 (Gt/a)	24	58	40	28	25	13
因煤而引起的 CO ₂ 之排放量 (Gt/a)	9	32	5	9	3	6

表 1-4 和表 1-5 给出了由日本东京大学工业科学研究所提供的世界上 CO₂ 排放量与国别以及不同产源的变化关系。

表 1-4 世界上若干国家 CO₂ 排放量在全球 CO₂ 排放总量中所占的份额
(全球 CO₂ 的总排放量为 266 亿 t)

国别	美国	中国	俄罗斯	日本	印度	德国	英国	加拿大	韩国	意大利	法国	澳大利亚	巴西	其他
比例 (%)	22.0	22.0	5.8	4.7	4.5	3.0	2.2	2.0	1.7	1.7	1.5	1.4	1.6	25.8

表 1-5 世界上若干生产部门 CO₂ 排放量在全球 CO₂ 排放总量中所占的份额

生产部门	煤炭火力发电	钢铁	水泥	交通运输	其他
比例 (%)	27.3	6.2	5.6	17.1	43.8

表 1-6 给出了 2020 年和 2050 年时我国碳排放量的预测数据。

表 1-7 则给出了我国 2010 年和 2020 年时，因煤炭生产和消费而对环境造成影响的预测结果。

表 1-6 我国碳排放量的预测^[2]

年份	化石能源预计的消费量		碳排量 (亿 t)	备 注
	消费量 (亿 t)	占总量 (%)		
2020 年	32.7 (38.25)	81.25 (85)	88.8 (92.3)	其中煤炭 21.3 (26.8) 亿 t
2050 年	32 (49)	58.2 (70)	94 (113)	其中煤炭 18 (28) 亿 t

注 括号内的数据是另一组消费量和排放量的估计值。

表 1-7 我国煤炭生产与消费对环境影响的预测^[2]

污染物	2010 年	2020 年	备 注
CO ₂ (万 t C)	92 285	106 850	
CH ₄ (亿 m ³)	152	176	未考虑回收利用
SO ₂ (万 t)	3420	3960	按年减排量 2% 计算，平均含 S 量为 1%
烟尘 (万 t)	702.6	218.4	
土地塌陷面积 (hm)	28 620	31 320	按每采 1 万 t 煤塌陷 0.2hm 计算
水资源破坏 (亿 t)	39.8	43.5	按开采 1t 煤损失 2.5t 水计算

通过以上诸图表所示的数据, 可以看到。

(1) 在火力发电领域用煤比例高的国家, 如美国和中国, 其 CO_2 排放量必然也就大, 在全球的 CO_2 总排放量中美国和中国各占 22%。

(2) 世界上 CO_2 排放量的 30% 来自以煤炭为燃料的火力发电厂, 因而治理 CO_2 排放量的问题从火电厂抓起是完全正确的。

(3) 目前, 我国因煤炭生产与消费所导致的对环境与生态的影响已经非常严重了。据统计: 我国 SO_2 和 CO_2 排放总量已成为世界第一, SO_2 和 NO_x 的排放量都超越了环境的自净能力。 CO_2 的排放已使我国面临着巨大的国际压力。为了满足国民经济发展的需要, 据预测得知: 从现在到 2050 年期间, 我国还需累计消费煤炭 1000 亿 t 标准煤 (相当于原煤 1500 亿 t)。以下这些现实是我们必须面对的, 即:

1) 我国目前正处于 CO_2 排放的上升期, 面对国际上对我国 CO_2 排放峰值出现时间和绝对排放量的限定 (如 2030 年允许最高达 80 亿 t, 2035 年达 90 亿 t, 2040 年达 100 亿 t)。在大力强化节能和发展核能及其他再生能源的同时, 要求实现这些 CO_2 减排指标是有难度的, 由此可见, 应对全球的气候变化, 国际上可能留给我国的 CO_2 排放空间已经非常小了, 我国应尽早主动应对, 而不能停留在被动减排状态。

2) 显然, 提高煤炭的利用效率是减排 CO_2 最合理和最有效的措施; 与此同时, 探索减排 CO_2 的其他途径也是必须考虑的。

3) 针对我国是世界上最大的产煤国和耗煤国, 在今后相当长的一段时期内, 煤炭仍将是我国最重要的一次能源, 而且煤炭具有严重污染环境的弊端, 为此, 我们必须从“能源与环境协调发展”及“高效、洁净地利用煤炭”这两个高度出发, 坚持走“洁净煤技术”的道路^[2]。

4) 当然, 洁净煤技术的内容和道路是多种多样的, 本书中只拟就“整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC)”这个专题进行研讨, 因为相对于其他洁净煤发电技术而言, IGCC 技术已比较成熟了, 有望正式进入社会生产力的行列。

5) 即使发达国家承诺减排 80% 的 CO_2 , 但从整体上来看, 发展中国家仍需在 2005 年的基础上减排 36% 的 CO_2 , 负担是沉重的。

第二节 整体煤气化燃气—蒸汽联合循环机组的基本概念^[7]

众所周知: 一个国家的经济实力及其发达程度与这个国家拥有的能源资源及其对资源的利用情况密切相关, 而把能源资源转化为电能, 是能源利用工作中最为重要的一项工作, 因而有“电力工业的发展水平是标志着一个国家工业先进程度”的说法。

以往, 燃煤的蒸汽轮机电站是发电的主要形式。在这方面, 人们一直围绕着以下两个问题进行着工作, 即: ① 提高燃煤电站的供电效率并降低其发电成本; ② 解决因燃煤所带来的环境污染严重的问题。

改善燃煤汽轮机电站供电效率的主要方向是: 提高蒸汽的初参数并改进其热力循环系统的设计, 也就是说, 使主蒸汽的参数向亚临界、超临界, 甚至超超临界的方向发展, 同时采用多级的再热循环系统和热电联供方案。目前, 亚临界煤粉蒸汽电站 (PC-Sub) 的供电效率为 37%~38%, 超临界煤粉蒸汽电站 (SCPC) 的供电效率为 40%~42%, 而超超临界煤粉蒸