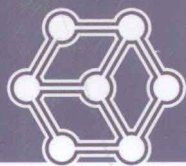


“十一五”
国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤基多联产系统技术 及工艺过程分析

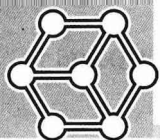
李文英 冯 杰 谢克昌 编著



化学工业出版社

煤基多联产系统技术及工艺过程分析

“十一五”
国家重点图书



现代煤化工技术丛书

谢克昌 主编

煤基多联产系统技术 及工艺过程分析

李文英 冯杰 谢克昌 编著

MEIJI DUOLIANCHAN XITONG JISHU JI GONGYI GUOCHENG FENXI



化学工业出版社

· 北京 ·

《现代煤化工技术丛书》编委会

主任: 谢克昌 中国工程院副院长, 中国科协副主席, 中国工程院院士
李勇武 中国石油和化学工业联合会会长

委员 (以姓氏汉语拼音排序):

陈清如 中国工程院院士, 中国矿业大学教授
房鼎业 华东理工大学教授
俸培宗 化学工业出版社社长
高晋生 华东理工大学教授
金涌 中国工程院院士, 清华大学教授
李大尚 赛鼎工程有限公司, 国家级设计大师
李文英 太原理工大学教授, 长江学者特聘教授
李永旺 中国科学院山西煤炭化学研究所研究员
李勇武 中国石油和化学工业联合会会长
李忠 太原理工大学教授
倪维斗 中国工程院院士, 清华大学教授
潘正安 化学工业出版社总编辑
邱介山 大连理工大学教授, 长江学者特聘教授
王辅臣 华东理工大学教授, 国家“973”项目首席科学家, 长江学者特聘教授
谢克昌 中国工程院副院长, 中国科协副主席, 中国工程院院士
应卫勇 华东理工大学教授
于遵宏 华东理工大学教授
张庆庚 赛鼎工程有限公司董事长兼总经理, 教授级高级工程师
张玉卓 神华集团有限责任公司总经理

《现代煤化工技术丛书》编写人员

丛书主编：谢克昌

各分册编写人员：

《煤化工概论》 谢克昌 赵炜 编著

《煤炭气化技术》 于遵宏 王辅臣 等编著

《气体净化分离技术》 常丽萍 苗茂谦 编著

《煤基炭素功能材料》 邱介山 编著

《煤的等离子体转化》 吕永康 庞先勇 谢克昌 编著

《煤的溶剂萃取与应用》 魏贤勇 宗志敏 等编著

《煤的热解、炼焦和煤焦油加工》 高晋生 主编

《煤炭直接液化》 吴春来 编著

《煤炭间接液化》 李永旺 编著

《煤基合成化学品》 应卫勇 编著

《煤基多联产系统技术及工艺过程分析》 李文英 冯杰 谢克昌 编著

《煤基醇醚燃料》 李忠 谢克昌 编著

《煤化工过程中的污染与控制》 高晋生 鲁军 王杰 编著

《煤化工设计基础》 李凡 李大尚 张庆庚 编著

总 序

2008年,中国的煤炭产量高达27.93亿吨,是1978年6.18亿吨的4.52倍,占2008年世界煤产量的42%,而增量占世界的80%以上。

多年来,在中国的能源消费结构中,煤约占70%,另外两种化石能源石油和天然气分别约占20%和3.5%;中国的电力结构中,燃煤发电一直占主导地位,比例约为77%;中国的化工原料结构中,煤炭占一半以上。中国煤炭工业协会预计到2010年全国煤炭需求量在30亿吨以上,而中国科学院和中国工程院通过战略研究预计,到2050年,煤在中国的能源消费结构比例中仍将高居首位,占40%以上,这一比例对应的煤量为37.8亿吨,比2010年的需求量多26%。由此可见,无论是比例还是数量,在较长的时期内以煤为主的能源结构和化工原料结构很难改变。

事实上,根据2008年BP公司的报告,在化石能源中,无论是中国还是世界,煤的储采比(中国45,世界133)都是石油的2倍左右。因此,尽管煤在世界的能源消费结构中仅占28%,低于石油的36%,但“煤炭在未来50年将继续是世界的主要能源之一”(英国皇家学会主席Martin Rees,路透社2008年6月10日);“越来越多的化学制品公司正在将煤作为主要原料”(美国《化工新闻》高级编辑A. H. Tullo,2008年3月17日)。

但是,由于煤的高碳性和目前利用技术的落后,煤在作为主要能源和化工原料的同时也是环境的主要污染源。据中国工程院的资料,2006年,我国排放的SO₂和NO_x的总量达4000万吨以上,源于燃煤的比例分别为85%和60%,燃煤排放的CO₂和烟尘也分别占到总排放量的85%和70%。至于以煤为原料的焦炭、电石等传统煤化工生产过程,除对大气污染外,其废水、废渣对环境的影响也十分严重。据荷兰环境署统计,2006年中国的CO₂排放量为6.2Gt,而2007年又增加了8%。虽然我国的人均CO₂排放量远低于美国等发达国家,但由于化石能源的碳强度系数高[据日本能源统计年鉴,按吨(煤)计算:煤排放2.66t CO₂,石油排放2.02t CO₂,天然气排放1.47t CO₂]和我国较长时期仍以化石能源为主(中国科学院数据,到2050年,化石能源在中国能源结构中占70%,其中煤40%、石油20%、天然气10%),和其他污染物一样,CO₂的排放与治理也必须高度重视并采取有效措施。

煤炭的上述地位和影响,对世界,特别是对中国,无疑是一种两难选择。可喜的是,“发展煤化工,开发和推广洁净煤技术是解决两难的现实选择”已成为人们的共识并取得重要进展。遗憾的是,在石油价格一度不断飙升的情况下,由于缺乏

政策引导、科学规划，煤化工出现了不顾原料资源、市场需求、技术优劣等客观条件盲目发展的势头。为此，笔者将 20 余年来对煤化工科学发展积累的知识、实践、认识和理解编撰成《煤化工发展与规划》一书，于 2005 年 9 月由化学工业出版社出版发行。与此同时，作为我国化学化工类图书出版之“旗舰”和科技图书出版之“先锋”的化学工业出版社，在原化工部副部长谭竹洲、李勇武的指导下，极具战略眼光，决定在全国范围内组织编写《现代煤化工技术丛书》（以下简称《丛书》），出版社诚邀笔者担任该《丛书》主编，成立了由笔者和李勇武会长（中国石油和化学工业联合会）为主任的编委会，并于 2006 年 4 月 18 日在太原召开《丛书》第一次编写会议。就在编委会紧锣密鼓地组织、协调、推荐作者、确定内容、审定大纲的不到两年间，国内的煤化工又有了强势的发展和规划。据有关方面的粗略统计，2007 年全国煤制甲醇生产、在建、计划产能总计达 6000 万吨，2008 年实际产量 1126.3 万吨；2008 年二甲醚产能约 410 万吨，实际产量 200 万吨；直接和间接液化法“煤制油”的在建和计划产能也超过千万吨；技术尚未成熟的煤制低碳烯烃、醇、醚等化工原料在建和计划项目也此起彼伏，层出不穷。煤化工这种强势的发展与规划不仅面临着市场需求和技术成熟度的有力挑战，而且还受到原料煤、水资源、环境容量等条件很大限制，其中尤以水资源为甚。美国淡水研究权威、太平洋研究所所长称：“当水资源受到限制和污染，或者经济活动不受限制而且缺乏恰当的管理时，严重的社会问题就可能发生。而在中国，这些因素的积聚将产生更为严重、复杂的水资源挑战。”按现有技术，煤制甲醇、二甲醚、油（间接液化）的单位产品水耗（t/t）分别为 15、22、16。虽然，大量的温室气体排放来源于化石能源无节制的使用，特别是燃煤发电和工业锅炉，但目前的煤化工产品生产工艺过程排放的温室气体也不容忽视，英国《卫报》网站说“用煤生产液体燃料的过程所产生的温室气体是常规石油燃料的两倍以上”。至于传统的煤化工产品生产技术，还对原料煤有苛刻的要求，如固定床造气需要无烟块煤或焦炭，而焦化和电石生产的原料煤是焦煤和肥煤，但这些优质煤种的保有储量仅占煤炭资源保有总量的 16.9%（无烟煤）和 3.7%（焦煤和肥煤）。

针对上述情况，2009 年 2 月 19 日，国务院提出“停止审批单纯扩大产能的焦炭、电石等煤化工项目，坚决遏制煤化工盲目发展的势头”，并要求石化产业的调整振兴必须“技术创新、产业升级、节能减排”。这使得煤化工的发展必须要以提高能效、减少能耗、降低排放为目标进行科学规划、优化选择、合理布局。但是，由于成煤物质和成煤年代等差异所导致的煤的复杂性和煤化学工程的学科特性，煤化工具有基础研究学科交叉、工程开发技术复杂、规模生产投资巨大的显著特点。这些特点对以煤气化为基础，以一碳化学为主线，以优化集成为途径，生产各种替代燃料和化工产品的现代煤化工尤其突出。要做到煤化工产业的科学规划、健康发展就必须全面了解、充分把握这些特点。

应运而生的《现代煤化工技术丛书》正是为满足这一需求，力求通过分册组成

合理、学术实用并举、集成精粹结合、内容形式统一的编撰，体现现代煤化工的特点；希冀通过对新技术、新工艺、新产品的研究、开发、应用的指导作用，促进煤化工产业的技术进步；期望通过提供基础性、战略性、前瞻性的原理数据、可靠信息、科学思路推进煤化工产业的健康发展。为此，在选择《丛书》编撰者时，优先考虑的是理论基础扎实、学术思想活跃、资料掌握充分、实践经验丰富的分领域技术领军人或精英。在要求《丛书》分册编写时，突出体现“新、特、深、精”。新，是指四新，即新思路、新结构、新内容和新文献；特，是有特色，即写法和内容都要有特色，与同类著作相比，特色明显；深，是说深度，即基础论述要深，阐述规律要准；精，是要成为精品，即《丛书》不成“传世”之作，也要成业界人士的“案头”之作。

根据上述指导思想和编写原则，《丛书》由以下分册组成。

1. 《煤化工概论》（谢克昌、赵炜编著）：以煤的转化反应为主线，以煤的转化技术分章节，阐述煤化工的基本原理，提供煤化工的总体轮廓。

2. 《煤炭气化技术》（于遵宏、王辅臣等编著）：在工艺过程分析、气化过程原理论述的基础上，比较各种气化过程的优劣，给出自主创新的煤炭气化实例。

3. 《气体净化分离技术》（常丽萍、苗茂谦编著）：以气化煤气净化与分离的科学和技术问题为基础，比较各种净化工艺与技术，以解决现存问题，提供最佳技术选择。

4. 《煤基炭素功能材料》（邱介山编著）：在提炼炭素材料基本理论和保持技术前沿性的前提下，介绍已经工业化的技术，推荐有应用前景的新技术。

5. 《煤的等离子体转化》（吕永康、庞先勇、谢克昌编著）：作为煤的非常规转化的重要组成，以多年的实验工作为基础，介绍等离子体应用于煤转化的主要技术。

6. 《煤的溶剂萃取与应用》（魏贤勇、宗志敏编著）：从分子水平上认识煤及其衍生物中有机质组成结构，突破传统煤化工的囿限，提供实现煤在温和条件下定向转化的途径。

7. 《煤的热解、炼焦和煤焦油加工》（高晋生主编）：以煤的热解为主线，将热解、炼焦和煤焦油加工有机结合，通过新技术的阐述，推动传统煤化工的革新。

8. 《煤炭直接液化》（吴春来编著）：以扎实的理论知识和丰富的实践经验为基础，提出直接液化用煤、生产工艺的优选原则，实现理论性和应用性的并重。

9. 《煤炭间接液化》（李永旺编著）：在介绍费托合成反应基础理论、技术发展的基础上，重点对核心问题——催化剂和反应器的研发做详细阐述。

10. 《煤基合成化学品》（应卫勇编著）：开发煤基合成化学品的新产品、新技术是现代煤化工的重要组成。面向企业，以阐述煤基化学品的生产技术、工艺和应用为主。

11. 《煤基多联产系统技术及工艺过程分析》（李文英、冯杰、谢克昌编著）：

以煤气化为基础的多联产是公认的煤洁净高效利用的主要技术途径，通过非多联产和多联产过程的分析给出多联产的创新优化实例。

12.《煤基醇醚燃料》(李忠、谢克昌编著):作为重要的车用替代燃料,结合国内外的实践,重点介绍甲醇、二甲醚和乙醇燃料的性质、制备和应用。

13.《煤化工过程中的污染与控制》(高晋生、鲁军、王杰编著):在客观分析煤化工过程对环境污染的基础上,通过该过程中有害元素的迁移与控制论述,介绍主要污染物的净化、减排和利用技术。

14.《煤化工设计基础》(李凡、李大尚、张庆庚编著):煤化工新技术、新工艺的产业化离不开整体考虑和合理设计,而设计基础来源于全面的知识和成功的实践。

由以上《丛书》各分册的简介可以看出,各分册独立成册,却内涵相连,各分册既非学术专著,又非设计手册,但发挥之作用却不仅在于科研、教学之参考,更在于应用、实践之指导。鉴于中国石油和化学工业联合会、化学工业出版社对这套《丛书》寄予厚望,国家新闻出版总署将其列为国家“十一五”重点图书,身居煤化工“冷热不均”却舍之不得,仍拼搏奋斗在第一线的诸位作者深感责任重大,均表示要写成精品之作,以飨读者。但因分册内容不同,作者情况有别,《丛书》难以整体同时问世,敬请读者原谅。“纵浪大化中,不喜亦不惧”,煤化工的发展道路可能有起有伏,坎坷不平,但其在中国的地位与作用如同其理论基础和基本原理一样难以撼动,在通过洁净煤技术,实现高碳性的煤炭低碳化利用,并与可再生能源一起,促进低碳经济发展的进程中,现代煤化工必将发挥不可替代的作用。诚望这套立意虽高远、内容难全面、力求成经典、水平限心愿的《丛书》能在煤化工界同仁的“不喜亦不惧”中,成为读者为事业不懈追求的忠实伙伴。



2009年9月9日

前言

据 2010 年 6 月《BP 世界能源统计》报告, 2009 年煤占世界能源消费的比例达 29.4%, 是 1970 年以来的最高值, 同年中国的煤消费量占到世界煤消费总量的 46.9%。尽管中国的煤在化石能源中相对丰富, 由于如此巨大的消费量, 当年煤的储采比 (R/P) 也仅为 38, 大大低于 119 的世界平均值。即使根据中国工程院对中国能源中长期发展战略研究的乐观估计, 到 2020 年煤的需求量仍高达 33.6 亿吨 (事实上到 2010 年底, 已接近这一数量), 占一次能源需求量的 57%; 到 2050 年, 虽然理想比例降为 35%, 但总量仍有 27.3 亿吨。因此, 中国“以煤为主的能源结构在未来较长时期内难以根本改变”。与此同时, 煤作为燃料和原料的转化利用, 由于技术水平所限, 对环境和气候造成的负面影响也将因为其主体地位而成为“祸首”。所以, “推进传统能源清洁高效利用”, 特别是“加强煤的清洁高效综合利用”, 就理所当然是国家的重大需求和煤科学技术界与煤生产消费行业义不容辞的责任。

从广义上讲, 煤的清洁高效综合利用包括煤的安全、高效、绿色开采; 煤利用前的预处理; 煤利用中的污染控制与净化; 新型清洁煤燃烧; 先进煤发电; 先进输电; 煤洁净高效转化; 煤基多联产; 煤利用过程中的节能等主要内容。其中, 煤基多联产是指以煤气化 (和/或煤焦化) 为基础的热-电-化多联产, 这种先进类型的多联产是可以将先进煤发电和煤洁净高效转化所涉及的主要单元过程集成优化, 实现提高效率、降低成本、节能减排, 达到系统整体资源、能源、环境综合效益最佳的煤清洁高效综合利用途径。

单一的燃煤发电是将煤的化学能转化为热能再转换为电能, 最高能效 40% 左右; 煤气化联合循环发电 (IGCC) 是将煤的化学能转化为化学能和热能再转换为电能, 最高能效 45% 左右; 先进的多联产系统是将煤热解、部分气化或完全气化制得合成气/可燃气体, 合成气经催化转化制得液体燃料和化学品, 可燃气体经燃气轮机或燃料电池发电, 同时将可燃气体 (含合成弛放气) 的余热回收, 推动蒸汽轮机发电, 一方面是将煤的化学能经洁净的化学能再转换为电能, 另一方面转化为能量密度更高的替代燃料和价值更大的化学品, 因此, 最高能效可达 60% 左右。早在 Williams 2000 年的世界评估报告中就得到如下的数据: 电、热、气、甲醇单产与四联产相比, 四联产投资可减少 37%, 单位能价下降 27%, 煤耗降低 9.1%。

虽然世界热电联产已有 100 余年的历史, 我国第一座 25MW 高温高压热电厂 1952 年投入运行, 经过 50 多年的发展, 热电联产装机容量已占到全国火电机组容量的 20% 左右, 但自美国的 R. G. Jackson 等人 1988 年提出甲醇与电力的多联产模式以来, 虽然有“Vision 21”、“Future Gen”、“Syngas Park”、“EAGLE”、“清华大学”、“中国科学院工程热物理研究所”、“太原理工大学”等各种热-电-化多联

产模式问世，但至今未有大规模的工业化煤基多联产装置运行。值得欣慰的是，由于煤在我国的影响和地位以及业界的基本共识，在国家的支持下，我国在这方面的技术开发已走在世界的前列，如中国科学院工程热物理研究所与兖矿集团合作，建成了 60MW IGCC 发电和 24 万吨甲醇/年的示范工程；潞安集团 16 万吨合成油/年、30 万吨尿素/年和 11.5MW IGCC 发电的联产装置；太原理工大学以气化煤气和热解煤气为原料，联产甲醇、二甲醚和电力的多联产中试研究等。热-电-化多联产的这种现状是因为其工艺流程长，技术难度大，能量和物质转化过程复杂，对单元过程的技术要求严格，如大型连续封闭式煤的热解焦化技术；大规模、高压、适用煤种广泛，易净化气化技术；高温高压净化、脱硫除尘一体化、宽负荷范围净化技术；大通量、变负荷、一次通过、过程耦合等化学合成技术；先进燃气与蒸汽发电技术；新型制氢技术及有关高效、长寿命催化剂技术等，涉及多联产系统工程的非同性系统优化集成也是有待攻克的难题。

根据上述考虑，虽然《现代煤化工技术丛书》已安排了不同单元过程的专门分册以促进单元过程新工艺、新技术的研究和开发，但作为煤洁净高效转化的集成，《煤基多联产系统技术及工艺过程分析》不仅是《现代煤化工技术丛书》的一本分册，而且有必要结合本分册的需要对“多联产系统技术中的关键工艺单元”单独设章节编述。此外，安排第 1 章介绍“热电联产系统”是为了更好理解第 2 章“热电化多联产系统”的相关内容，第 3 章的核心部分是其中的 3.3、3.4、3.5 节。第 4 章“多联产系统集成优化理论体系”在介绍优化方法和优化理论的基础上，重点以谢克昌团队正在研究开发的“双气头多联产系统”为例，综述其优化与评价。第 5 章“多联产系统效率及对节能减排的作用”从能量、元素的利用率分析多联产系统的经济性和环境效益以使读者加深对煤基多联产系统是实现煤的清洁高效综合利用最佳途径的认识。

本书是课题组多年的工作和集体努力的产物。参与本书编写工作的除编著者李文英（统稿）、冯杰（成文）、谢克昌（统筹）外，依章节顺序还有：易群、褚绮、郝艳红、侯学成、陈晓辉、贾亚龙、李东雄、李静、陈春、王秀红、秦育红、樊明明、李晓红、李军、张淑娇、郭云鹏、郑安庆、薛冰、宋云彩、荆洁颖等。由于时间紧、作者多、水平所限，以及煤基多联产系统仍在研究开发之中，虽然力求本书高质量面世，但定会有不妥之处，真诚希望读者不吝指正，作者将不胜感激。

感谢科技部国家重点基础研究发展计划项目“气化煤气与热解煤气共制合成气的多联产应用的基础研究”资助；感谢化学工业出版社对本书付梓的支持和付出。

编著者
2011 年 3 月
于太原理工大学

目 录

第1章 热电联产系统

1.1 热电联产技术的特点	1
1.2 热电联产技术的发展	3
1.2.1 国外热电联产技术的发展	3
1.2.2 国内热电联产技术的发展	3
1.3 热电联产系统的形式	5
1.3.1 蒸汽轮机热电联产	6
1.3.2 燃气轮机热电联产	7
1.3.3 燃气轮机-蒸汽轮机联合循环热电联产	8
1.3.4 其他类型	11
1.4 我国热电联产发展存在的问题	23
1.5 热电联产发展前景与展望	24
参考文献	26

第2章 热电化多联产系统

2.1 热电化多联产系统的特点	29
2.2 热电化多联产系统的发展	31
2.2.1 国外热电化多联产系统现状和发展趋势	31
2.2.2 国内热电化多联产技术研究现状和发展趋势	34
2.2.3 热电化多联产系统的发展模式	36
2.3 热电化多联产系统的基本类型	37
2.3.1 集成优化与流程结构形式不同的多联产分类及特性	37
2.3.2 行业多联产分类及特性	46
2.4 热电化多联产系统发展中存在的问题	62
2.5 化学产品的选择及其在联产过程中的特点	65
2.5.1 甲醇	66
2.5.2 二甲醚	66
2.5.3 甲酸	67
2.5.4 乙二醇	67
2.5.5 煤制天然气	67
2.5.6 煤制烯烃	67
2.5.7 甲醇制丙烯	68

2.6 典型热电化多联产工程实例——兖矿集团煤气化发电与甲醇 联产系统	68
2.6.1 主要设备及关键技术	70
2.6.2 投运情况与经济效益	76
2.7 热电化多联产系统发展前景与展望	77
2.7.1 世界热电化多联产主要发展趋势	77
2.7.2 我国热电化多联产主要发展趋势	77
参考文献	79

第3章 多联产系统中的关键技术和工艺单元

3.1 煤气化技术	82
3.1.1 煤气化技术发展	82
3.1.2 多联产系统煤气化技术的选择	83
3.1.3 多联产系统煤气化工艺的选择	85
3.1.4 气流床气化技术	89
3.1.5 所选煤气化技术性能对比	122
3.2 高温除尘技术	126
3.2.1 过滤除尘技术	127
3.2.2 旋风除尘技术	132
3.2.3 静电除尘技术	134
3.2.4 高温除尘工艺的综合评估	135
3.3 合成气重整单元	136
3.3.1 合成气转化对能量利用的效果	136
3.3.2 重整反应条件对转化率的影响	136
3.3.3 催化剂	140
3.4 高温脱硫技术	142
3.4.1 高温脱硫在整个多联产系统中的地位	142
3.4.2 高温脱硫技术的新方法、新技术	143
3.4.3 目前高温脱硫技术存在的问题及展望	145
3.5 气体分离技术	146
3.5.1 原料气的分离	147
3.5.2 产品气的分离	148
3.6 化学品合成技术	151
3.6.1 化学品合成在多联产系统中的作用与地位	151
3.6.2 多联产系统中化学品合成的选择	153
3.6.3 多联产系统的化学品合成工艺	155
3.6.4 化学品合成中的问题	168
3.7 煤基燃气热机发电技术及余热利用	170

3.7.1 蒸汽轮机构成	171
3.7.2 燃气轮机及联合循环	186
3.7.3 余热锅炉	197
3.7.4 燃气内燃机及热电联产	205
参考文献	208

第4章 多联产系统集成优化理论体系

4.1 优化方法及工具	215
4.2 优化理论基础	216
4.2.1 联产系统流程的工艺参数优化	217
4.2.2 多联产系统的耦合集成理论研究	218
4.2.3 多联产系统的环境污染控制研究	220
4.2.4 多联产系统经济性的优化	221
4.3 多联产系统中各工艺组合的匹配及优化需考虑的问题	224
4.4 双气头多联产系统的优化与评价	225
4.4.1 二甲醚合成的优化	226
4.4.2 CH_4/CO_2 催化重整反应器操作参数的优化	229
4.4.3 液相一步法二甲醚合成反应器操作参数的优化	231
4.5 三种双气头多联产系统的概念设计与评价	235
参考文献	237

第5章 多联产系统效率及对节能减排的作用

5.1 能量利用效率	239
5.2 元素的循环利用率	240
5.3 多联产系统经济性分析	242
5.3.1 评价体系	243
5.3.2 评价指标	251
5.4 双气头多联产系统模式的经济性评价	267
5.4.1 洁净气化煤气/焦炉煤气合成醇醚燃料流程的经济评价	268
5.4.2 多联产系统和单产系统的经济性比较	273
5.4.3 生产规模对流程经济性的影响	274
5.4.4 产品生产成本敏感性分析	277
5.5 煤炭资源低碳化利用技术	278
5.5.1 低碳经济提出的背景和意义	278
5.5.2 多联产系统的低碳产品及利用	279
5.6 结束语	281
参考文献	281

第 1 章

热电联产系统

1.1 热电联产技术的特点

长期以来,我国主要以火力发电为主,实行热电分产。热电分产^[1]是一种单一能量生产的方式,只提供单一的能量输出,即电能或热能。传统的火力发电方式是利用煤、石油、天然气燃烧时产生的热能,并通过发电动力装置转换成电能的一种发电方式。然而,在发电过程中,由于热交换效率较低的原因,这种发电方式显著降低了能源利用率。

改善这一局面的合理途径就是最大限度地提高热效率,合理有效利用低品位余热,从而提高能源利用效率。从技术上讲,实现低品位余热利用的途径有三方面^[2],即热利用、发电利用和综合利用。随着热电联产技术的提出,在很大程度上改善了能源利用效率问题,可在发电的同时,利用低品位余热供热,实现热能的梯级利用。

热电联产是指同时生产电能(或机械能)和有用热能的能量利用方式^[3]。它把热、电生产有机地结合起来,在构成热、电联产的同时,通过对低品位热量的合理使用和回收,提高系统能量效率。所生产的电能并入公共电网中,因此,当所生产的热能被有效利用时,可以始终在最大负荷下发电。系统多余电能可以按预定的数量并网销售。在热电联产系统中,如果只需要部分热负荷,则应根据热负荷分布图调节发电量。

热电联产作为电能和热能联合生产的一种高效的能源生产方式,目前已是我国电力工业的重要组成部分,是我国城市集中供热的热源。在几十年的热、电联合生产过程中,热电联产表现出以下优势。

(1) 热电联产是增加供电量、提高供热质量的一种联供方式。热电联产的最大特点是在整个发电产热过程中,郎肯循环(Rankine cycle)中存在的冷凝热损失将在热用户中得到充分有效利用^[4]。热电联产技术的应用使热电厂的供电能力、年平均热效率和热电比均有提高。同时,在热电联产技术利用和发展过程中,随着对煤炭品质要求、蒸汽轮机和余热锅炉等机器运行水平以及在此过程中蒸汽参数的稳定性的提高,供热质量不断提高,从而保证了用热的质量。

(2) 热电联产是提高能源利用率、降低能耗的有效途径。同样以煤炭为燃料的热电联产和热电分产进行比较发现^[5],如果产出同样数量的热力和电力,联产方式比分产方式节约 1/3 左右的煤炭,综合效率由 50% 提高到 75% (如图 1-1 所示)。热电联产通过对能量梯级利用,在联产过程中充分利用工业余热的措施,使

热效率大大提高，根据进汽参数的不同，热效率由 30%~40% 在最大供热情况下提高到 80%~90%^[6]。而且，热电联产可以燃烧小型锅炉难以燃烧的劣质煤，为冶金、化工等行业节省了大量优质煤炭^[1]。例如，山东某城市在实现热电联产、集中供热后，通过节能监测发现，中温中压锅炉代替小锅炉后，锅炉工作效率由原来的 60%~80% 提高到 78%，在此条件下每年可节约标煤 $2.5 \times 10^4 \text{ t}$ ，联产发电 $4500 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，据此可明显看出热电联产的节能效果。

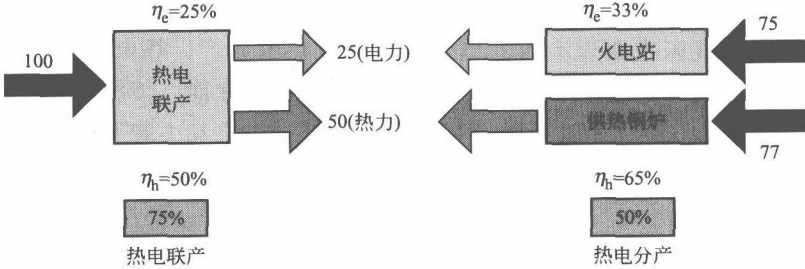


图 1-1 热电联产与热电分产效率比较

(3) 热电联产是改善环境、提高环境质量的有效途径。我国每年所排放的大气污染物中 80% 的烟尘、87% 的二氧化硫、67% 的氮氧化物和 85% 的 CO_2 均来自煤的燃烧^[7]。热电联产后不但可以用煤炭作为燃料，还可利用某些新型燃料，如生物质燃料等可再生能源代替传统燃料，因此热电联产可使原有火力发电产生的环境污染问题得以改善。由于我国一些热电厂大都采用循环流化床燃烧技术 (CFBC)，降低了 CO 、 SO_2 、 NO_x 的排放量，同时采用高烟囱排放、高效静电除尘器和具有脱硫效果的循环流化床锅炉等技术措施，进一步降低了污染物的排放^[8,9]。初步估计，按照当前技术水平，我国因热电联产系统每年可节约 3000 万吨以上标准煤，减少 CO_2 排放 6500 多万吨，减少 SO_2 排放 60 万吨，减少灰渣排放 1300 万吨。

在关注热电联产优点的同时也要认识到其局限性，以使其更好地发展。在环境方面，虽然其可以减少烟气排放，但是如果仅为采暖而采用热电联产就无法达到保护环境的作用，此时需要考虑热电比的问题，只有热电比大于 1 且热电厂的净热效率大于 45% 以上时才可以达到减少环境污染的效果^[6]。

鉴于热电联产的诸多优点及其在某方面的局限，世界各国都在大力发展并改进该技术。目前，我国热电联产模式是以燃煤锅炉-蒸汽轮机为主，部分燃油（气）锅炉-蒸汽轮机辅助。自 20 世纪 80 年代以来，除了建设高效、大容量的燃煤机组以外，对燃气蒸汽联合循环发电及供热已逐步开始应用和推广，积累了一定的建设和使用经验^[10]。世界热电联产的发展呈现诸多趋势，把握这些趋势对谋划各个城市热电联产发展很有益处。本节将结合工程设计实践对热电联产及其燃气轮机蒸汽联合循环的发展和趋势作简要介绍。

1.2.1 国外热电联产技术的发展

早在 19 世纪 70 年代末期,在欧洲一些人口密集的城市,开始出现了由往复式蒸汽机带动的发电机,并对蒸汽机的乏汽(乏汽是指新蒸汽做功后排放的、高温凝结水闪蒸的、物料浓缩蒸发出的各种低温低压蒸汽。乏汽的热焓值接近新蒸汽的热焓值,是非常宝贵的热能资源和水资源)加以利用,这便是早期的热电联产系统^[11]。1905 年英国制造了世界上第一台热电联产汽轮发电机组,开始了汽轮机既发电又供热(供汽)的历史。但鉴于当时单纯发电就可以产生显著的规模效益,因此,热电联产系统没有得到重视和发展^[12]。

20 世纪 70 年代,石油危机给世界带来巨大冲击,促使人们考虑如何更有效地利用现有能源,各国政府都把节约能源提高能源利用率作为本国的能源发展战略,热电联产开始引起人们的重视,特别是欧洲、俄罗斯、美国以及日本,这些国家和地区对多联产技术都很重视。

欧盟在 20 世纪 90 年代支持了 45 项热电联产项目工程,2000 年欧洲热电联产电厂所发出的电力只占总发电量的 9%。美国在 1980~1995 年间,热电联产装机容量由 1.2×10^4 MW 增加至 4.5×10^4 MW,到 2001 年美国热电联产装机容量为 5.6×10^4 MW,年发电量 3100 亿千瓦时,占美国总发电量的 9%,热电联产装置设备年利用小时数达到 5536h,并计划在 2020 年热电联产装机容量占总装机容量的 29%^[13~15]。

俄罗斯对热电联产集中供热一向很重视,其热电联产基本上采用 80~250MW 的高压和超临界蒸汽压力机组,供热燃料耗量占 40%,其燃料的构成中 70%为石油和天然气。至 1998 年底,俄罗斯建成 100 万千瓦以上的大容量火电厂 36 座,其中热电厂 8 座,36 座大电厂的总容量为 6.7656×10^4 MW,占俄罗斯火电厂装机容量的 48.4%。热电厂占火电厂总装机容量的 44%。俄罗斯承接前苏联火电燃料构成的变化趋势,煤和重油的比重下降,天然气的比重上升^[16]。

日本主要是以天然气热电联产为主。截至 2004 年末,天然气热电联产累计已近 2000 项,装机总量达 3.07×10^3 MW。

1.2.2 国内热电联产技术的发展

自 1952 年 9 月我国第一家 25MW 高温高压热电厂投入运行以来,经过长达 50 多年的时间,热电联产电厂得到极大发展。“一五”期间相继建成了富拉尔基、哈尔滨等一批高参数的热电厂,并对其附近工厂需要的工业用热进行热电联产,取得了一定的节能和环保效益,为我国发展热电联产事业奠定了基础^[13]。

1953~1967年间,我国热电联产共建成6MW以上供热机组装机容量总容量 2.95×10^3 MW,占火电机组总容量的20%,其中公用电厂装机容量为2.45MW,占80%以上,奠定了我国热电联产工业的基础^[14]。这一阶段由于以工业为主,绝大多数热电厂选择了抽汽机组,以保证供汽供电。北方的热电厂除了供工业用热外,同时也向企业自管的新建生活区住宅供应采暖用热^[13]。特别是1958年9月20日在北京热电总厂建成投产了我国第一台25MW高温高压汽轮发电供热机组。

在经历了20世纪70年代的石油危机后,热电联产得到了国内外的广泛关注,80年代期间,我国提出了“节约和开发并重、把节约放在首位”的能源政策,积极鼓励热电联产、集中供热,原国家计委把热电联产列为重大节能措施项目。图1-2给出了我国自20世纪80年代以来到21世纪初的热电联产装机容量发展概况^[5]。

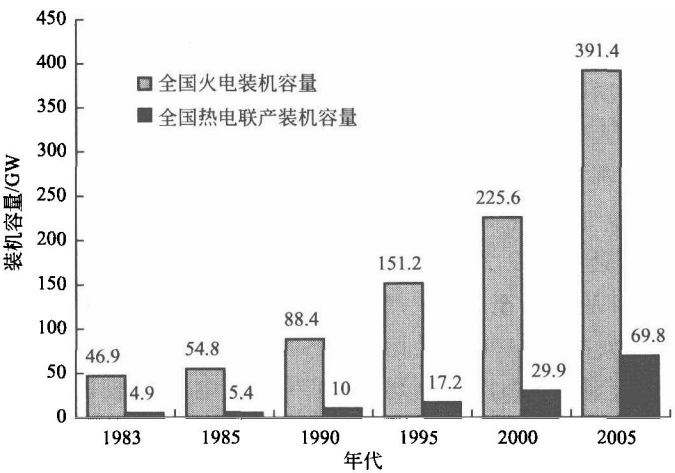


图 1-2 热电联产装机容量发展概况

到2004年底全国6MW及以上供热机组装机已达2302台,总容量 4.81×10^4 MW,占全国火电同容量机组容量的15.62%,占全国总装机容量的12.26%,超过了核电机组的装机容量,年生产蒸汽量占总供热量的81.96%,热水量占26.72%,比分产年节约标准煤4800万吨,减排CO₂ 12480万吨,SO₂ 76万吨,灰渣2064万吨。到2005年底全国6MW及以上供热机组装机总容量 6.98×10^4 MW,占全国火电同容量机组容量的18.31%,占全国总装机容量的13.5%,年供热量 9.26×10^8 GJ,一年新增供热机组装机容量 2.17×10^4 MW,200MW、300MW凝汽采暖两用机成为热电联产主力机组。截至2007年底,全国6MW及以上供热机组装机总容量 1.01×10^5 MW,占全国火电同容量机组容量的18.15%,年供热量 2.6×10^9 GJ。

必须指出,在热负荷不高的情况下,热电联产的节能效果并不明显,甚至还不如相同容量的凝汽式机组,因此我国对于热电联产机组的界定和政策也随着对热电