

章名耀 等编著

JIEJINGMEI FADIAN JISHU
JI GONGCHENG YINGYONG

洁净煤发电技术 及工程应用

2.



化学工业出版社

TM621.2
Z265

章名耀 等编著

JIEJINGMEI FADIAN JISHU
JI GONGCHENG YINGYONG

洁净煤发电技术 及工程应用

TM621.2
Z265



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍了超临界/超超临界发电、循环流化床 (CFB) 发电、烟气脱硫 (FGD)、选择性催化法脱氮 (SCR)、非选择性催化法脱氮 (NSCR)、低 NO_x 燃烧技术和煤气化技术, 同时介绍了正在发展的新技术如燃煤联合循环发电技术 (IGCC, PFBC-CC), 以及目前工业应用尚未成熟、又具发展前途的新技术, 如汞的脱除、细微颗粒物的脱除、 CO_2 捕获等内容。

本书以工程技术问题为主, 兼顾相关的应用基础理论知识, 实用性强。

本书适用于工程技术人员阅读, 也可作为高等院校相关专业的研究生教材或参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

洁净发电技术及工程应用/章名耀等编著. —北京:
化学工业出版社, 2010.3
ISBN 978-7-122-07360-0

I. 洁… II. 章… III. 超临界-火电厂-燃煤锅炉
IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 232280 号

责任编辑: 徐 娟
责任校对: 吴 静

文字编辑: 冯国庆
装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 572 千字 2010 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

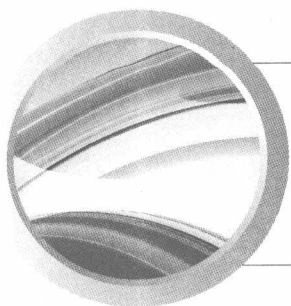
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

编著者名单及分工

第1章	章名耀
第2章	吴履琛
第3章	赵长遂
第4章	章名耀
第5章	章名耀
第6章	章名耀
第7章	章名耀
第8章	仲兆平
第9章	高小涛, 仲兆平
第10章	杨林军
第11章	段钰峰
第12章	肖 睿
第13章	肖 军



前言

我国长期以来以煤为主要能源,至今煤在一次能源消耗中占据将近70%,2008年煤的年产量达到27亿吨,其中用于发电的煤已经达到50%以上,据预测至2030年将达到70%。因此煤的高效洁净发电技术是洁净煤技术中一个最重要的组成部分。自20世纪80年代以来,洁净煤发电技术在全世界得到很大的发展。20世纪后期至21世纪初,由于世界经济快速发展致使化石能源的需求量剧增,造成能源危机频发,全球气温上升加剧,人类生存环境面临愈来愈大的威胁。对于洁净煤发电技术的要求,对于电站排放物的控制问题,已不再限于传统的粉尘、 SO_2 和 NO_x ,对温室气体 CO_2 的排放控制提上了议事日程。1997年通过的《京都议定书》规定我国从2012年起将承担 CO_2 减排任务,燃煤电站烟气中的其他排放物如汞等微量重金属氧化物、细微颗粒物的控制,也逐渐提上了日程。同时高效利用煤炭资源,提高燃煤电站的发电效率也比以往更为迫切。面临这种新形势,近十多年来洁净煤发电技术发展得很快,因此希望通过编写本书对现有的和正在发展的洁净煤发电技术做比较全面的介绍和阐述。

编写本书的指导思想如下。

(1) 尽可能反映已获得大量工程应用的洁净发电现代技术,如超临界/超超临界发电、循环流化床(CFB)发电、烟气脱硫(FGD)、选择性催化法脱氮(SCR)、非选择性催化法脱氮(NSCR)、低 NO_x 燃烧技术和煤气化技术等;兼顾正在发展的新技术如燃煤联合循环发电技术(IGCC, PFBC-CC)等;以及目前工业应用尚未成熟,又具发展前途的新技术,如汞的脱除、细微颗粒物的脱除、 CO_2 捕获等。

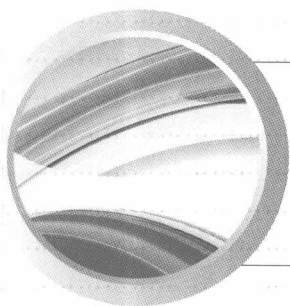
(2) 内容以工程技术问题为主,兼顾相关的应用基础理论知识,并适当介绍一些重大技术的历史发展过程;本书除可供工程技术人员阅读外,还可作高等院校相关专业的教材或参考书。

(3) 洁净煤发电技术涉及的专业知识面很广,本人专业知识十分有限,为保证本书一定的质量,请多位专家合作编写。

本书的编写分工如下:第1、4~7章由章名耀研究员编写;第2章由吴履琛教授级高工编写;第3章由赵长遂教授编写;第8章由仲兆平教授编写;第9章低 NO_x 燃烧技术部分由高小涛高工编写;第9章NSCR、SCR部分由仲兆平教授编写;第10章由杨林军教授编写;第11章由段钰峰教授编写;第12章由肖睿教授编写;第13章由肖军副教授编写。

本书出版得到东南大学能源与环境工程学院及所属热能工程研究所的大力支持,在此深表感谢!并对本书编写中参阅过的著作、文献资料的作者们致谢!本书的不足之处敬请读者不吝指正。

章名耀谨识
2009年9月



目 录

第 1 章 绪言	1
1.1 洁净煤发电技术发展的背景和意义	1
1.2 洁净煤发电技术发展的概况和趋势	2
1.2.1 洁净煤发电技术发展回顾及展望	2
1.2.2 主要洁净煤发电技术发展概况及趋势	4
第 2 章 超(超)临界发电技术	7
2.1 超(超)临界技术发展历程和展望	7
2.1.1 历史的回顾	7
2.1.2 当代技术	8
2.1.3 发展展望	12
2.2 国内超(超)临界发电技术发展概况	14
2.3 超(超)临界锅炉关键技术	15
2.3.1 锅炉耐热钢材	15
2.3.2 水冷壁管圈形式和质量流速的选取	17
2.3.3 启动系统	19
2.3.4 燃烧系统	20
2.4 国产超(超)临界锅炉机组示例	21
2.4.1 乌沙山电厂 600MW 超临界锅炉	21
2.4.2 华能玉环电厂 1000MW 超超临界锅炉	24
2.4.3 华电国际邹县电厂 1000MW 超超临界锅炉	27
2.4.4 外高桥电厂(三期) 1000MW 超超临界塔式锅炉	30
参考文献	31
第 3 章 循环流化床锅炉	33
3.1 循环流化床锅炉的发展背景和状况	33
3.1.1 CFB 锅炉在国外的发展	33
3.1.2 CFB 锅炉在国内的发展	34
3.2 循环流化床锅炉的类型及结构特点	35
3.2.1 Pyroflow 型 CFB 锅炉	35
3.2.2 Lurgi 型 CFB 锅炉	36
3.2.3 FW 型 CFB 锅炉	36
3.2.4 Circofluid CFB 锅炉	37
3.2.5 国内 CFB 锅炉	37

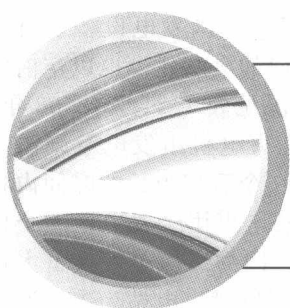
3.3 循环流化床锅炉的原理	38
3.3.1 CFB 技术的流态化原理	38
3.3.2 CFB 锅炉床内气固流动特性	41
3.3.3 煤在 CFB 锅炉中的燃烧过程	42
3.3.4 床层与传热表面间传热	45
3.3.5 CFB 锅炉的污染物排放控制	48
3.4 循环流化床锅炉的关键技术	49
3.4.1 CFB 锅炉的炉膛结构	49
3.4.2 水冷布风板	49
3.4.3 高温旋风分离器的结构形式	50
3.4.4 CFB 锅炉循环灰回送装置	51
3.5 循环流化床锅炉大型化的关键技术	52
3.5.1 锅炉炉膛结构和水冷分隔墙	52
3.5.2 运行床压及其控制	53
3.5.3 旋风分离器结构优化	53
3.5.4 外置式换热器分区设计	54
3.5.5 其他关键技术	54
3.6 循环流化床锅炉大型化的工作参数及设计方案	54
3.6.1 国外超临界 CFB 锅炉的研发现状	55
3.6.2 国内超临界 CFB 锅炉的研发现状	57
3.7 循环流化床锅炉的控制和运行	59
3.7.1 CFB 锅炉运行状况	59
3.7.2 CFB 锅炉存在的主要问题及对策	63
3.8 国内外循环流化床锅炉电站工程实例	64
3.8.1 广东茂名石化公司 100MW CFB 锅炉	64
3.8.2 新乡豫新发电公司 135MW CFB 锅炉	66
3.8.3 法国 Gardanne 电厂 250MW CFB 锅炉	66
3.8.4 四川白马电厂 300MW CFB 锅炉	68
3.8.5 云南开远红河电厂 300MW CFB 锅炉	69
参考文献	70
第 4 章 燃气-蒸汽联合循环发电原理及类型	72
4.1 燃气-蒸汽联合循环发电原理	72
4.2 典型的燃气-蒸汽联合循环方案	73
4.2.1 不补燃的余热锅炉型燃气-蒸汽联合循环	74
4.2.2 补燃型联合循环	76
4.2.3 增压锅炉型的燃气-蒸汽联合循环	77
参考文献	77
第 5 章 增压流化床燃烧联合循环发电技术	78
5.1 增压流化床燃烧联合循环概况	78
5.1.1 PFBC-CC 技术应用背景与典型工艺流程	78
5.1.2 PFBC-CC 技术国际和国内发展情况	79
5.2 增压流化床燃烧的原理	82

5.2.1 PFB 的流体力学特征	82
5.2.2 PFB 的传热特征	84
5.2.3 PFB 的燃烧	85
5.2.4 PFB 脱硫	87
5.3 关键技术及主要设备	87
5.3.1 关键技术	87
5.3.2 PFBC-CC 电站工艺流程的主要设备	87
5.4 应用实例	90
5.5 工业应用前景	92
参考文献	93
第 6 章 整体煤气化联合循环发电技术	94
6.1 发展整体煤气化联合循环的意义及其类型	94
6.1.1 发展 IGCC 的意义	94
6.1.2 IGCC 发电技术的特点	94
6.1.3 IGCC 类型	95
6.2 国外发展情况概述	97
6.2.1 前期的 IGCC 电站	97
6.2.2 近期的 IGCC 电站	98
6.2.3 IGCC 示范电站气化炉的技术特点比较	104
6.3 IGCC 系统的组成	104
6.3.1 燃气轮机系统	105
6.3.2 煤气化系统	105
6.3.3 煤气净化系统	106
6.3.4 空分装置	106
6.3.5 余热锅炉及汽轮机系统	107
6.4 IGCC 电站的发展趋势	107
参考文献	108
第 7 章 煤气化技术及煤气化炉	109
7.1 整体煤气化联合循环发电系统对煤气化炉的要求	109
7.2 煤气化炉的技术特性指标	109
7.3 煤气化过程的化学反应特征和原理	110
7.3.1 煤气化过程的化学反应特征	110
7.3.2 炭的非均相反应及煤气化反应的化学平衡	111
7.3.3 炭的非均相反应动力学问题	113
7.4 气化工艺	116
7.4.1 加压移动床气化炉	116
7.4.2 气流床气化炉	122
7.4.3 流化床气化炉	132
参考文献	137
第 8 章 燃煤电站的脱硫技术	138
8.1 煤中硫的存在形态及其在燃烧过程中的变化	138

8.1.1 煤中硫的存在形态	138
8.1.2 煤中硫在燃烧过程中的变化	139
8.2 燃烧前脱硫技术	141
8.2.1 煤炭物理脱硫技术	141
8.2.2 煤炭化学脱硫技术	141
8.2.3 煤炭生物脱硫技术	141
8.3 燃烧中脱硫	142
8.3.1 流化床燃烧脱硫技术	142
8.3.2 炉内喷钙脱硫技术	151
8.4 燃烧后脱硫	153
8.4.1 石灰石/石灰湿法烟气脱硫技术	154
8.4.2 其他湿法烟气脱硫技术	172
8.4.3 半干法脱硫工艺	179
8.4.4 干法烟气脱硫技术	184
参考文献	186
第9章 燃煤电站的氮氧化物污染控制	188
9.1 氮氧化物的性质与来源	188
9.2 燃烧过程中氮氧化物的形成机理	188
9.2.1 热力型 NO_x	189
9.2.2 瞬时型 NO_x	191
9.2.3 燃料型 NO_x	191
9.2.4 NO_x 抑制	194
9.3 燃煤电站锅炉低 NO_x 燃烧及工业实践	195
9.3.1 实现低 NO_x 排放的技术途径	195
9.3.2 低 NO_x 燃烧技术	196
9.3.3 复合低 NO_x 燃烧技术	199
9.3.4 低 NO_x 燃烧技术的影响因素	199
9.3.5 煤质特性对氮氧化物排放量的影响分析	200
9.3.6 低 NO_x 燃烧器及燃烧系统的运行实绩	202
9.4 选择性非催化还原烟气脱硝	208
9.4.1 还原剂的选择	208
9.4.2 影响因素	210
9.5 选择性催化还原烟气脱硝技术	211
9.5.1 国内外 SCR 烟气脱硝技术的应用现状	211
9.5.2 SCR 过程机理	212
9.5.3 SCR 脱硝反应器的布置方式	213
9.5.4 SCR 烟气脱硝工艺系统	214
9.5.5 影响 SCR 反应的几个因素	219
9.5.6 SCR 脱硝技术小结	222
9.6 烟气同时脱硫脱硝方法概述	222
9.6.1 电子束辐射法	223
9.6.2 脉冲电晕法	224
9.6.3 活性炭吸附脱硫脱硝工艺	224

9.6.4 联合脱硫脱硝技术发展前景	226
参考文献	226
第10章 燃煤细颗粒控制技术	229
10.1 概述	229
10.2 燃煤细颗粒形成机理	229
10.2.1 亚微米颗粒的形成	230
10.2.2 残灰颗粒的形成	230
10.3 团聚控制技术	231
10.3.1 声波团聚技术	231
10.3.2 磁团聚技术	238
10.3.3 蒸汽相变技术	240
10.3.4 电凝并技术	245
10.3.5 Indigo 凝聚器	248
10.3.6 化学团聚技术	248
10.3.7 其他团聚技术	250
10.4 复合式除尘器	250
10.4.1 电-袋复合式除尘器	250
10.4.2 静电颗粒层除尘器	253
10.4.3 静电旋风除尘器	253
10.4.4 静电增强湿式除尘器	254
10.4.5 荷电水雾除尘器	254
参考文献	255
第11章 燃煤电站的汞排放与控制	259
11.1 燃煤电厂汞排放概述	259
11.2 煤中汞的赋存形态	261
11.3 煤燃电厂汞平衡测试	262
11.4 燃煤烟气中汞的形态转化	264
11.4.1 煤燃烧汞的相间转化	264
11.4.2 烟气汞的均相氧化	265
11.4.3 汞吸附及非均相催化氧化	265
11.4.4 燃煤烟气汞形态转化的影响因素	266
11.5 燃煤烟气中飞灰对汞的吸附	269
11.5.1 燃煤飞灰中汞的富集	271
11.5.2 ESP 底灰中汞的富集	272
11.6 燃煤电厂汞控制实用技术	272
11.6.1 洗选煤技术	273
11.6.2 现有污染物控制装置	273
11.6.3 吸附剂吸附脱汞	274
11.6.4 多种污染物联合脱除技术	276
参考文献	277
第12章 燃煤电站二氧化碳捕获技术	282
12.1 概述	282

12.2 燃后捕获	282
12.2.1 化学吸收法	283
12.2.2 吸附法	288
12.3 富氧燃烧	291
12.3.1 燃烧特性	292
12.3.2 传热特性	292
12.3.3 污染物排放特性	293
12.3.4 锅炉设计	293
12.4 燃前捕获	294
12.4.1 碳氢类燃料	294
12.4.2 煤、石油焦和生物质等固体燃料	295
12.5 其他 CO ₂ 减排技术	296
12.5.1 化学链燃烧	296
12.5.2 微藻吸收固化	297
12.5.3 矿石化	297
12.6 经济性比较与分析	297
12.6.1 减排成本计算公式及影响因素	298
12.6.2 燃后捕获	298
12.6.3 燃前捕获	299
12.6.4 富氧燃烧技术	301
12.6.5 三种技术的比较与前景分析	302
参考文献	303
第 13 章 洁净煤电发电系统的技术经济及环境综合评价	304
13.1 洁净煤电发电系统的热力性能计算与评价	304
13.1.1 热力性能计算原理	304
13.1.2 关键设备的计算模型	305
13.1.3 洁净煤电发电系统热力性能分析	313
13.2 洁净煤电发电系统的经济性能计算与评价	315
13.2.1 洁净煤电发电系统的经济性能计算方法与评价指标	315
13.2.2 洁净燃煤发电系统的经济性能分析	317
13.3 洁净煤电发电系统的环境影响分析与评价	318
13.3.1 发电系统环境评价方法	318
13.3.2 单位污染物环境影响成本计算方法	319
13.3.3 IGCC 发电系统的环境影响成本分析	322
13.4 洁净煤电发电系统的综合性能计算与分析	323
13.4.1 IGCC 发电系统的真实成本	323
13.4.2 不同类型燃煤电站综合性能比较	324
参考文献	325



第 1 章 绪 言

1.1 洁净煤发电技术发展的背景和意义

随着世界经济的发展,能源需求也相应随之增长,从表 1.1 中可以看到世界一次能源消耗总量和增长发展的趋势。

表 1.1 世界一次能源消耗总量(油当量)增长

年份	世界总量/Mt	发达国家/%	中国/%	其他/%
1973 年	6128	51.3	7.1	41.6
2005 年	11435	48.5(其中美国 20.5%)	15.2	36.3
2030 年	17100	40.1	19.9	40

煤炭是世界一次能源的重要组成部分,自 19 世纪中叶产业革命到 20 世纪 60 年代,煤炭一直占世界能源消费的首位。目前世界一次能源消费结构中石油居第一位,1997 年占 39.9%,煤炭占据第二位,为 27.0%。图 1.1 是世界能源展望(World Energy Outlook, 2000 年 11 月)统计及预测的 1970~2030 年世界一次能源消耗总量及各种能源构成。预测煤炭以 1.7% 的年增长率,将从目前占 26% 下降至 2020 年的 24%,可见今后煤炭在世界的能源结构中仍占据相当重要的地位。

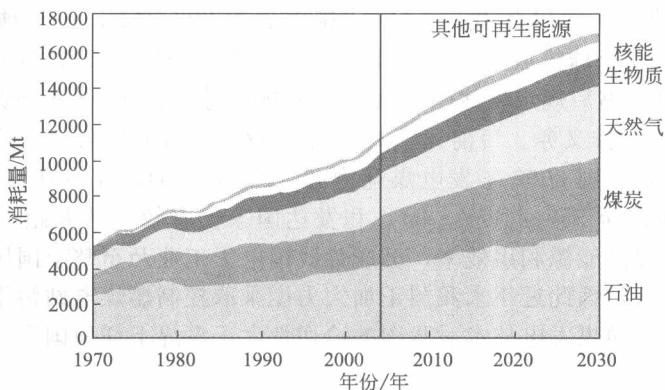


图 1.1 1970~2030 年世界一次能源消耗总量及各种能源构成

我国是世界能源消费大国,居世界第二位。煤炭是我国最主要的能源资源。目前在我国的一次能源消费中煤炭所占比例在 70% 左右,在未来相当长时期内,以煤为主的能源结构不会改变。据专家预测,到 2050 年煤所占据的比例仍将在 50% 左右,煤炭的年产量将达到 30 亿吨以上。煤炭在发达国家主要用于发电,以美国为例,它的煤产量的 90% 用于发电,燃煤发电至今仍占美国总发电量的 50% 左右。火力发电是我国主要发电方式,在电源结构方面,



1990 年以来,火力发电机组(绝大部分为燃煤发电机组)的装机容量占全国发电设备装机容量的份额一直维持在 3/4 左右。近年来,我国国民经济快速发展,相应的电站建设也以空前的速度发展,增长速度已远超出原先的预测,全国电站装机容量具体情况见表 1.2。至 2008 年,全国发电设备容量已达 792GW,其中火电机组装机容量占 75.87%,火电机组发电量则占总发电量的 80.95%,而 2008 年新增装机容量中火电机组占 72.64%;在今后相当长的时间内将继续维持燃煤机组为主导的基本格局。2007 年我国已经有超过 50% 的产煤用于发电,这个比例还将日益提高,根据规划在 2030 年左右有 70% 的煤炭将用于发电。因为燃煤电站具备大规模集中使用煤炭的特点,有利于做到高效、洁净利用。目前新建电站仍以燃煤电站为主,通过电站发展速度也可看出我国发电用煤占煤总产量的比例在快速增长。

表 1.2 全国电站装机容量及发电煤耗

项目	单位	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2010	2020
原预测	$\times 10^4 \text{ kW}$			38800				49400	75000
实际		31900	44000	50000	62400	71000	79200		
供电煤耗	克标煤 /($\text{kW} \cdot \text{h}$)	392(实际)		370(实际)	366(实际)	357(实际)		360(计划)	320(计划)

影响人类生存环境最突出的是水污染、大气污染(粉尘、酸雨、温室效应、臭氧层破坏)、土壤污染等,其中燃煤电站排放物是造成大气污染的主要来源之一。燃煤发电在生产电力的同时也排放大量的污染物,包括 SO_2 、烟尘、 NO_x 和 CO_2 等。燃煤发电排放的大气污染物对环境和生态的影响非常严重。2002 年我国燃煤电站 SO_2 和 NO_x 排放量分别为 820 万吨和 520 万吨,将近占全国总排放量的 1/2,至 2030 年可能占 70%;从我国的环境容量看, SO_2 为 1620 万吨, NO_x 为 1880 万吨,到 2020 年,如不采取措施,两者的排放量将分别达到 4000 万吨和 3500 万吨。 CO_2 是另一种造成温室效应的主要污染气体。20 世纪 90 年代后,随着气候的变化,控制温室气体排放,日益成为世界能源利用与环境控制问题的焦点。1973~2005 年世界 CO_2 排放总量增长 73%,我国由于一次能源消费高速增长和以煤为主的能源结构,增长了 470%,已位居世界第二。1973 年我国 CO_2 的排放量为 892.7Mt,占全球排放总量 15661Mt 的 5.7%;2005 年 CO_2 全球排放总量为 27136Mt,我国已经达到 5101 Mt,占 18.8% (美国为 21.4%)。《京都议定书》规定发达国家温室气体排放总量比 1992 年要减少 5.2%,我国将从 2012 年起开始承担减排义务。目前我国 CO_2 排放量已位居世界第二,减排的压力很大。从电站发电净效率角度,我国 2000 年发电煤耗为 392g/($\text{kW} \cdot \text{h}$),比发达国家同期高出约 70g/($\text{kW} \cdot \text{h}$),2007 年下降至 357g/($\text{kW} \cdot \text{h}$),和发达国家仍有较大的差距。控制燃煤发电引起的污染,以及进一步提高能源利用效率,已成为我国电力工业乃至整个国民经济实施可持续发展战略的重要因素之一,因此近年来我国正加大力度采取控制燃煤电站污染物排放以及提高发电效率的措施,发展洁净煤发电技术对我国的迫切性大于世界上任何国家。

1.2 洁净煤发电技术发展的概况和趋势

1.2.1 洁净煤发电技术发展回顾及展望

洁净煤利用技术包括煤炭洗选加工(洗煤、型煤、水煤浆)、煤炭燃烧、煤炭转化、污染排放控制、废弃物处理、煤层气开发利用等。洁净煤发电技术是其中最主要的内容之一,要求燃煤电站达到洁净、高效发电,实现最大的能量转换效率和最少的污染物排放量。美国是最早

提出洁净煤技术示范计划 (clean coal technical plan) 的国家, 从 1986 年 3 月至 2000 年底共实施了五轮投资计划, 选择了 45 个商业示范性项目, 总投入 71.4 亿美元, 其中有关洁净煤发电技术的投入占总额的 77 % (先进发电系统的占 67 %, 有关 NO_x 和 SO_2 控制技术占 10 %)。欧共体在 20 世纪 80 年代也提出了洁净煤发展计划, 重点是发展整体煤气化联合循环发电, 煤及生物质、城市和农业垃圾的联合气化 (或燃烧), 循环流化床燃烧技术等。日本于 1995 年在新能源开发机构 (NEDO) 内组建了“洁净煤技术中心”, 重点支持研究开发流化床燃烧、整体煤气化联合循环 (IGCC) 发电、煤气化-燃料电池发电、烟气脱硫脱硝等技术项目。

进入 21 世纪, 由于气候变化问题成为人类生存环境中的头号问题, 美国率先提出了 21 世纪能源工厂 (vision 21 energy plants) 计划, 以零排放为目标, 推动更高效、洁净的能源开发、利用计划。目前美国、欧洲、日本等发达国家对今后发展洁净煤发电技术的趋向, 提出两条主线。

第一条主线: 以常规煤粉电站为基础, 发展零排放技术。

在今后 10~20 年, 进一步提高常规超临界燃煤电站的蒸汽参数: 温度 $>650^\circ\text{C}$, 压力 $>30\text{MPa}$; 净发电效率 (LHV) 达到或大于 50 %。在先进的超超临界常规燃煤电站基础上实现零排放。图 1.2 所示是它的发展路线。

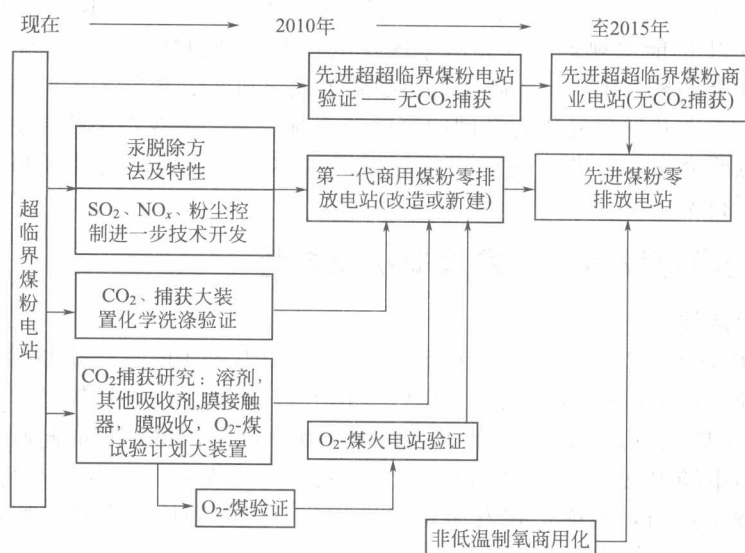


图 1.2 常规煤粉电站高效、洁净化发展路线

第二条主线: 以 IGCC 电站技术为基础, 发展零排放技术。

目前 IGCC 电站建设投资相当高, 关键设备 (如大型煤气化炉等) 的可靠性尚需验证, 市场应用估计还需 15~20 年时间。由于 IGCC 电站能实现燃烧前端脱碳, 和 CO_2 捕获技术相结合, 在技术经济上具有一定的优势, 将来有可能成为洁净煤电站的主导技术。图 1.3 所示是它的发展路线。

上述两条路线图是在 21 世纪初认识基础上的计划或设想, 实现时间表和实际情况会有一些出入。由于应对气候变化, 各国 CO_2 减排必须承担的计划指标, 目前尚未最终确定, 因此与之相关的技术经济政策未能完全出台; 另一方面洁净煤技术, 特别是电站排放的各种污染物的处理技术也在不断发展, 今后的具体发展情况还存在相当大的变数。

我国对于洁净煤技术十分重视, 于 1995 年以原国家计委为组长单位, 成立国家洁净煤技术推广领导小组, 推动开发、研究与实施工作, 有关洁净煤发电技术, 包括大容量循环流化床 (CFB) 锅炉、增压流化床联合循环 (PFBC-CC) 发电技术、先进脱硫技术与整体煤气化联合

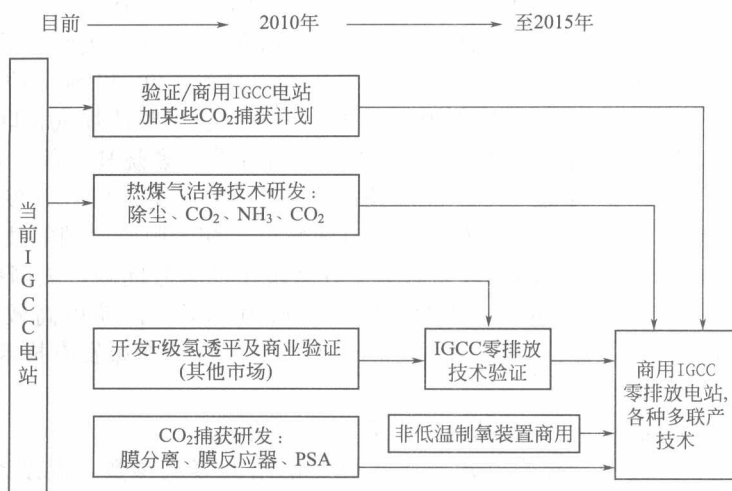


图 1.3 IGCC 电站高效、洁净化发展路线

循环 (IGCC) 发电技术等。进入 21 世纪后, 我国制定的《国家中长期科学和技术发展纲要 (2006~2020 年)》中的能源规划, 有关洁净煤电发电技术部分包括: 重点研究开发重型燃气轮机、整体煤气化联合循环 (IGCC)、高参数超超临界发电机组、超临界大型循环流化床等高效发电技术与装备; 大力开发煤气化为基础的多联产系统技术, 燃煤污染物综合控制和利用的技术与装备等; 重点研究主要行业 CO_2 、甲烷等温室气体的排放控制与处置利用技术, 生物固碳技术及固碳工程技术。

1.2.2 主要洁净煤电发电技术发展概况及趋势

(1) 洁净煤燃烧技术

① 流化床燃烧技术 20 世纪 70 年代至 21 世纪初 CFB 和 PFBC 燃烧技术获得了很大的发展, 为高灰、高硫、高水低质煤的洁净、高效利用开辟了新途径。尤其是 CFB 锅炉的规模, 从 70 年代 20t/h 发展到目前 1100t/h 的大型锅炉, 锅炉的蒸汽参数也向超临界方向发展, 目前在世界燃煤电站市场中已占有少量的份额。由于我国劣质煤较多, CFB 电站已占有约 10%。CFB 技术不仅以煤为燃料, 当前正在发展煤与生物质、煤与固体废弃物 (城市、工业和农业废弃物) 为燃料, 扩大它的应用范围。

② 低 NO_x 燃烧技术的现代大型锅炉 低 NO_x 燃烧技术也是从 20 世纪 70 年代以煤粉电站锅炉为对象兴起的, 该技术已经从单一的低 NO_x 燃烧器发展到现在先进的低 NO_x 燃烧器+低 NO_x 燃烧系统, 使原来的技术只能使锅炉的烟气中 NO_x 排放值降低 20%~40% 提高至 60%~70%, 使现代大型锅炉烟气中 NO_x 排放值 (标准状态) 下降到 200~300mg/m³。因此, 现代大型煤粉电站大型锅炉设计中都具有较完善的实现低 NO_x 燃烧技术的功能。

(2) 超临界/超超临界发电技术 超临界发电技术在 20 世纪 80 年代进入成熟期, 至 90 年代进入新的发展期, 由于耐高温金属材料的进步成功地开发出螺旋管圈水冷壁, 使单机容量达到 1000MW, 蒸汽参数达到 30MPa、605℃/605℃; 目前正在发展 34MPa、645℃/645℃ 更高参数的机组; 未来目标为 37.5MPa、700℃/700℃, 使 CO_2 排放量进一步降低 15%, 发电效率将达到 52%~55%。20 世纪末以来, 由于我国经济高速增长, 燃煤电站建设相应得到快速发展, 近年来新建的绝大部分为超临界/超超临界发电机组, 我国已成为世界上拥有超临界/超超临界机组最多的国家。

(3) 烟气净化技术 燃煤电站排放烟气的污染物脱除包括 SO_2 、 NO_x 、粉尘、汞及重金属

氧化物以及 CO_2 。烟气中脱除 SO_2 和 NO_x 是当前燃煤电站中普遍采用的技术；脱除 SO_2 目前最普遍使用的是石灰或石灰石作为吸收剂的湿法脱硫技术，占 90% 以上，其他有半干法和干法脱除；脱除 NO_x 最多采用的是低 NO_x 燃烧技术、非催化脱氮技术（NSCR）和催化脱氮技术（SCR）。由于技术的不断发展，近 30 年来，在美国燃煤电站烟气脱硫（FGD）设备的每千瓦投资只有原来的 1/4，如图 1.4 所示。现在低 NO_x 燃烧技术已经十分成熟，这种情况在世界其他地区情况也大致相同。这也从另一个侧面增强了常规煤粉电站的竞争力。因此从近期看，超超临界发电技术+FGD 技术是最具竞争力的高效洁净发电技术。我国近十多年来装设了大量燃煤电站 FGD 设备，电站排放的烟气中 SO_2 量基本得到了控制，21 世纪开始，SCR 技术在电站的应用也开始得到关注。

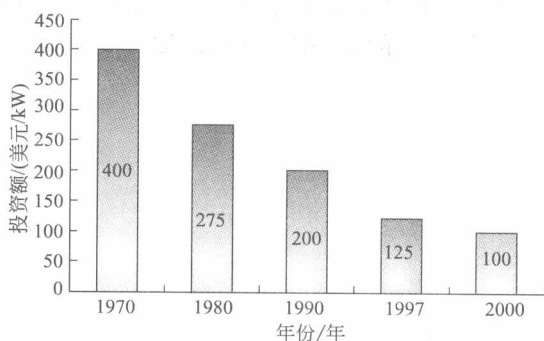


图 1.4 FGD 设备投资在美国逐年下降情况（Brinkmann, 1998）

由于环境保护要求日趋严格，燃煤电站排放物中超细颗粒物和汞的排放控制问题在发达国家首先提上了日程，因此解决这方面问题的技术开发、研究以及工程应用得到了相应的发展。我国在这些方面的研究和应用也得到了很大的重视。

(4) 煤的气化技术 煤的气化技术是洁净煤发电技术中的重要技术手段之一，它是 IGCC 发电的核心技术，也是未来以 H_2 为燃料的燃料电池发电或者氢燃气轮机发电的燃料气来源。当前技术成熟的有三种类型气化炉：固定床气化炉、流化床气化炉、气流床气化炉。其中气流床气化炉由于其高效率（碳转化率和系统热效率高）和大容量（日处理煤量达 2000~3000t），更适用于 IGCC 发电技术等对象。

(5) 燃煤联合循环发电技术 从 20 世纪 80 年代起，各国在发展燃煤联合循环发电技术方面已有相当大的投入，至 20 世纪末，共开发成功四座大型 IGCC 商业验证电站，美国和欧洲各两座；六座中型 PFBC-CC 商业验证电站，日本和欧洲各三座，其中一座大型电站的单机发电容量达 360MW。PFBC-CC 电站商业验证的结果，净发电效率比同参数的超临界参数常规燃煤电站高出两个百分点，投资费用要高出 15%~20%。而 IGCC 电站商业验证结果，以目前的技术水平，电站净发电效率和超临界参数的常规燃煤电站在同一个水平，而电站单位装机容量投资比后者要高出一倍以上。尽管两者经过验证，技术上都获得了成功，但从技术经济角度和常规燃煤电站相比，近期尚缺乏市场竞争力。但从长远角度看，这些通过煤加压燃烧和气化来实现联合循环发电的技术，如果在技术和系统中有新突破，使技术经济指标得到改观，能满足市场需求，例如 IGCC 系统在技术上易于与捕集 CO_2 结合，有利于实现高效发电和 CO_2 零排放的目标，也许能出现新的局面。

(6) CO_2 减排技术 控制温室气体排放，防止全球气候进一步变暖，已成为影响人类生存环境的首要问题。 CO_2 减排包含三方面手段：第一是节能降耗，就我国而言，能源利用效率相对值比世界平均水平低将近 40%，因此提高能源利用效率的潜力是十分巨大的，提高能源利用效率能直接取得 CO_2 的减排效果，相对付出的代价最小；第二是大力发展替代能源，包



括可再生能源和低碳能源,这也是当今世界各国正在大力提倡的事情,可再生能源主要指太阳能和风能;第三就是 CO_2 捕集、输运、埋藏,尽管实施代价将很大,但形势所迫已经提到议事日程,2008 年全世界 CO_2 指标市场交易已达 600 亿美元,从中可见一斑。从 20 世纪末至今, CO_2 捕集已成为世界各国研究、开发的热点。燃煤电站由于其排放总量决定了它成为重点对象,燃煤电站 CO_2 捕集现有主要技术路线有:从电站排出的烟气中通过化学和物理吸收方法捕集;以富氧为助燃剂,实现煤燃烧后产生的烟气中 CO_2 得到浓缩,再加以捕集;煤气化后的燃料气,将其中的 CO 经水汽转换后变成 CO_2 ,和氢分离后捕集等。目前各种技术路线和方法,多数处于实验室规模和中试规模研究阶段,少数开始或计划进行工业试验,至今尚未有商业验证装置投入运行。由于电站 CO_2 捕集的工业应用,将使发电成本有较大幅度增加,比实施 $\text{FGD}+\text{DeNO}_x$ 发电对成本的影响要大得多,因此它不仅是技术问题,而且是重大的技术经济问题。今后首先是从众多的技术路线中,筛选出适合于工业化应用的技术,根据各个国家的经济政策和国情,逐步加以实施。