

# 增压流化床 联合循环 发电技术

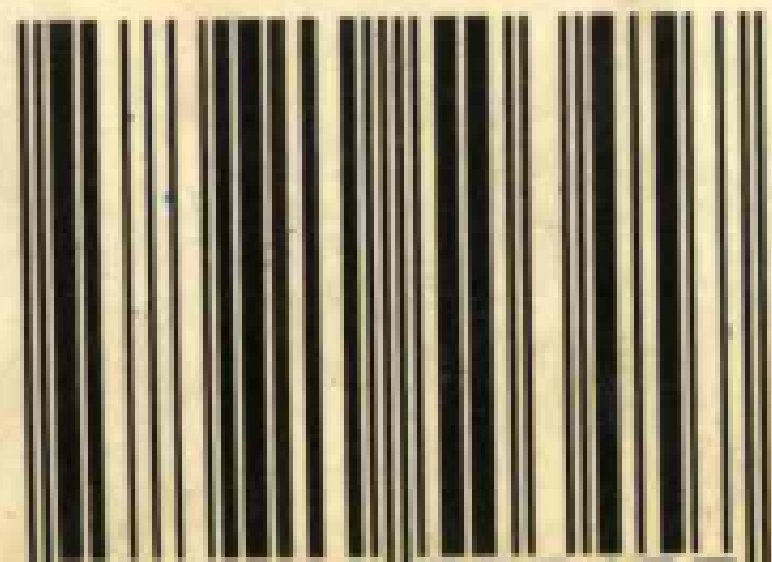
章名耀 等 著

东南大学  
出版社

全国高技术丛书

ZENGYA  
LIUHUACHUANG  
LIANHE  
XUNHUAN  
FADIAN  
JISHU

ISBN 7-81050-345-6



9 787810 503457 >

ISBN 7-81050-345-6  
TK · 3 定价: 39.00元

全国高技术丛书

# 增压流化床联合循环发电技术

刘前鑫 李大骥 时铭显  
沈湘林 金保升 赵长遂 著  
章名耀 蔡宁生

(按姓氏笔划为序)

东南大学出版社

## 内 容 提 要

洁净煤燃烧、发电技术的重要方面之一——增压流化床联合循环(PFBC-CC)发电技术,是一项正在发展并逐步投入实用的新技术,本书系统地介绍了此项技术。内容包括 PFBC-CC 发电技术的原理、国内外发展的背景和过程,流化床燃烧、流动、传热、脱硫等过程的基本原理,PFBC-CC 发电技术中的锅炉、固体添加排放、高温除尘、燃气轮机等有关的特殊问题和技术,以及 PFBC-CC 电站的技术经济分析。

本书阐述的流化床过程的一般原理以及特殊技术,对于从事动力、化工、冶金、石油等方面工作的工程技术人员、科研工作者、教师、高等工科学校的学生、研究生等有重要的参考价值。

### 增压流化床联合循环发电技术

章名耀等 著

\*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

江苏省新华书店经销 南京五四印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 22.75 字数 571 千

1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-81050-345-6/TK·3

定价:39.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

# 全国高技术重点图书 出版指导委员会

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲 卢鸣谷

委员：(以姓氏笔划为序)

王大中 王为珍 王守武 牛田佳 卢鸣谷

叶培大 刘 仁 刘 杲 朱丽兰 孙宝真

师昌绪 任新民 杨牧之 杨嘉墀 陈芳允

陈能宽 张钰珍 张效详 罗见龙 周炳琨

欧阳莲 赵忠贤 顾孝诚 谈德颜 龚 刚

梁祥丰

总干事：罗见龙 梁祥丰

# 全国高技术重点图书 新能源技术领域编审委员会

主任：王大中

委员：严陆光 陈叔平 吴绪模

陈克强 鲍公樵

# 前 言

煤炭是世界主要能源之一,90年代初期,煤炭占世界总能源消费28%,在我国占76%左右。但是煤炭利用会造成对环境的污染和温室效应,因而成为国际上十分关注的问题。从70年代开始,兴起了洁净煤技术的研究和开发。燃煤联合循环发电技术是洁净煤燃烧技术的重要方面。燃煤联合循环有多种技术路线,最有代表性的是增压流化床燃烧联合循环(PFBC-CC)和整体煤气化联合循环(IGCC)。众所周知,以油和天然气作为燃料的联合循环发电技术,在近十多年来得到了蓬勃的发展,发电净效率比同类燃料的凝汽式电站有了大幅度的提高。例如以天然气为燃料,于1996年推出的G系列高温燃气轮机,由其构成简单循环的电站净效率为38.5%,联合循环效率将达到58%。以煤为燃料的联合循环发电技术,尽管由于技术和经济两方面的原因,目前尚处于商业示范阶段或商业应用的初期,但是随着一些技术难题的逐步解决和材料工业的发展,进入21世纪,该项技术将得到快速的发展,这已经成为国际之共识。甚至有人预测,到2040年,燃煤联合循环电站的市场占有率将达到新建燃煤电站的50%左右。主要原因是燃煤联合循环将在大幅度减少环境污染、节约能源消耗及降低发电成本等方面显示出它的优越性。因此,从70年代初期起,发达国家如瑞典、美国、英国、日本、荷兰、西班牙、德国等对PFBC-CC发电技术先后进行积极的研究和开发。我国对此项技术的发展也十分关注,并在80年代初立项研究和开发,目标是使此项技术能早日在我国得到商业应用。

本书是首次在我国对PFBC-CC发电技术进行系统的介绍,内容包括PFBC-CC发电技术的基本原理,系统组成,国内外的的发展情况,流化床的流体动力学,燃烧、传热、脱硫、脱硝原理;另外,对增压流化床锅炉、煤制气的燃气轮机、高温除尘、燃料和脱硫剂的添加、灰渣排放等方面的技术问题也作了较全面的介绍;最后对于PFBC-CC电站的技术经济问题进行了分析。书中内容也包含作者及其合作者们十多年来的研究结果。虽然目前国外已建成四座80MW<sub>e</sub>等级的PFBC-CC商业示范电站,我国也正在建设15MW<sub>e</sub>的中间试验电站,但总体上说还是处于技术发展和逐步完善阶段,许多方面还不成熟。本书旨在通过较全面的介绍,对我国发展该项技术有所推动。此外,流化床技术不仅在动力工业的燃烧方面,而且在其它工业的煅烧、干燥、催化裂化、煤气化等方面都已得到广泛的应用。因此,本书对动力工作者以外的化工、冶金、石油、环境工程等方面的科技工作者、研究生、大学生也将有重要的参考价值。作者们由于学识所限,以及该项技术正处于发展过程中,书中局限性和片面性在所难免,敬希读者指正。

本书的作者所负责撰写的章节分别为:第1章、第4章的燃烧部分、第9章、第10章——章名耀,第2章——刘前鑫,第3章——李大骥,第5章——赵长遂,第6章——金保升,第3章、第4章的部分内容、第8章——沈湘林,第9章——时铭显,第11章——蔡宁生。

作者  
1998年1月

# 目 录

<b>1 PFBC 技术的综述</b> .....	1
1.1 煤的高效洁净发电技术 .....	1
1.1.1 发展煤的高效、洁净发电技术的动因 .....	1
1.1.2 各国对于电站排放物的排放标准 .....	3
1.1.3 煤的高效清洁发电技术的发展方向 .....	4
1.2 PFBC-CC 的原理和技术类型 .....	7
1.2.1 PFBC-CC 的原理 .....	7
1.2.2 PFBC 技术的技术类型 .....	8
1.3 PFBC-CC 的关键技术 .....	11
1.4 PFBC 技术的发展展望 .....	13
参考文献 .....	14
<b>2 PFBC-CC 系统研究与开发</b> .....	15
2.1 实验室规模研究系统 .....	15
2.1.1 英国 Leatherhead 装置 .....	17
2.1.2 中国东南大学 1MW <sub>t</sub> 装置 .....	19
2.1.3 美国 FWDC 装置 .....	24
2.2 中间试验规模研究系统 .....	28
2.2.1 IEA Grimethorpe 装置 .....	29
2.2.2 美国 Curtiss-Wright 装置 .....	32
2.2.3 瑞典 15 MW <sub>t</sub> CTF 装置 .....	34
2.2.4 德国 Aachen 装置 .....	35
2.2.5 德国 Babcock 装置 .....	36
2.2.6 中国东南大学 15 MW <sub>e</sub> 装置 .....	39
2.2.7 芬兰 Karhula 装置 .....	42
2.2.8 美国 Wilsonville APFBC 装置 .....	44
2.3 商业规模研究系统 .....	46
2.3.1 瑞典 ABB Carbon P200 型装置 .....	47
2.3.2 瑞典 ABB Carbon P800 型装置 .....	51
2.3.3 美国 DMEC-1 PCFB 电站 .....	53
2.3.4 美国 DMEC-2 PCFB 电站 .....	54
参考文献 .....	56
<b>3 流化床流体动力学</b> .....	59

3.1	流化床流体动力学的宏观性状	59
3.2	流化颗粒的分类	60
3.3	气泡特性及压力对气泡的影响	61
3.4	流化床压降与临界流化速度 $u_{mf}$	66
3.5	颗粒的终端速度	67
3.6	湍动流态化	73
3.7	快速床流态化和稀相输送	74
3.8	压力对流动及流型转变的影响	75
3.8.1	压力对主要流动特性的影响	76
3.8.2	压力对流型转变的影响	78
3.9	夹带与扬析	80
3.9.1	夹带与扬析机理	81
3.9.2	扬析速率常数	87
3.9.3	扬析速率常数和 TDH 值的经验关系	87
	参考文献	90
<b>4</b>	<b>煤的流化床燃烧</b>	<b>92</b>
4.1	煤的脱挥发分过程概述	92
4.2	煤中挥发分的析出	92
4.2.1	温度对挥发分析出的影响	94
4.2.2	加热速率对挥发分析出的影响	95
4.2.3	压力对挥发分析出的影响	96
4.2.4	煤粒尺寸的影响	98
4.3	流化床燃烧中煤脱挥发分过程的理论模型	99
4.3.1	动力学模型	99
4.3.2	流化床燃烧中单煤粒脱挥发分模型	100
4.4	碳粒燃烧的一般机理	101
4.4.1	概述	101
4.4.2	碳颗粒的化学动力反应速率	104
4.4.3	碳颗粒纯扩散控制的反应速率	105
4.5	流化床内燃烧	107
4.5.1	气流和粒子的质交换	108
4.5.2	碳粒内部燃烧的影响	110
4.5.3	相间气体的交换	111
4.5.4	流化床内碳粒的燃烬时间	113
4.5.5	燃烧引起的变化	114
4.5.6	磨损引起的变化	115
4.5.7	燃烧粒子的温度	116
4.5.8	压力对于燃烧过程的影响	117



4.6	流化床燃烧(FBC)模型	118
4.7	燃烧效率	120
	参考文献	125
<b>5</b>	<b>流化床传热</b>	<b>128</b>
5.1	概述	128
5.2	固体颗粒与气体间的传热	128
5.3	床层和受热面间的传热	129
5.3.1	影响传热的因素	129
5.3.2	埋管局部放热系数	136
5.3.3	流化床传热机理和模型	140
5.3.4	自由空间传热	145
	参考文献	148
<b>6</b>	<b>脱硫和脱硝机理</b>	<b>149</b>
6.1	脱硫的化学过程	149
6.1.1	硫氧化物的生成	149
6.1.2	脱硫剂的煅烧反应	150
6.1.3	硫(酸盐)化反应	151
6.2	脱硫剂特性对固硫过程的影响	154
6.2.1	孔隙率	154
6.2.2	孔隙尺寸分布	155
6.2.3	结焦	155
6.2.4	破碎与磨损	156
6.2.5	杂质	156
6.3	运行参数的影响	156
6.3.1	钙/硫摩尔比	156
6.3.2	脱硫剂种类	157
6.3.3	床层温度	159
6.3.4	床深和流化速度	160
6.3.5	床层压力	160
6.3.6	脱硫剂粒径	163
6.3.7	过剩空气系数	163
6.3.8	燃料种类	163
6.4	氮氧化物的生成机理	163
6.4.1	由燃烧空气中固定氮生成氮氧化物机理	164
6.4.2	由燃料中结合氮生成氮氧化物机理	165
6.5	氮氧化物排放的影响因素	170
6.5.1	床层(或系统)压力的影响	170

6.5.2	过剩空气量的影响	171
6.5.3	燃烧温度的影响	172
6.5.4	床层高度的影响	173
6.5.5	煤质特性的影响	174
6.5.6	煤颗粒尺寸的影响	176
6.5.7	添加脱硫剂的影响	176
6.5.8	流化床型式的影响	177
6.6	降低氮氧化物排放的方法	179
6.6.1	分级燃烧法	179
6.6.2	无催化还原法(SNCR)	180
6.6.3	氨选择性催化还原法(SCR)	182
	参考文献	183
<b>7</b>	<b>增压流化床锅炉</b>	<b>188</b>
7.1	增压流化床锅炉的设计	188
7.1.1	PFB锅炉的参数选择	188
7.1.2	增压流化床锅炉的结构	189
7.1.3	压力容器	193
7.1.4	锅炉水循环选择	194
7.1.5	布风板结构	196
7.2	增压流化床锅炉的启动和停炉	197
7.2.1	PFB锅炉的启动	197
7.2.2	PFB锅炉的停炉	198
7.3	PFB锅炉的负荷调节	199
7.3.1	锅炉负荷调节的方法	199
7.3.2	增压床负荷调节的手段	200
7.3.3	锅炉部分负荷运行时对燃烧室性能的影响	202
7.4	PFB锅炉的动态特性	204
7.4.1	燃料量和风量减少	205
7.4.2	改变床高	205
7.5	埋管的磨损及其研究	207
7.5.1	埋管的磨损机理	207
7.5.2	影响磨损的主要因素	210
7.5.3	埋管的材料和工作温度	213
	参考文献	214
<b>8</b>	<b>煤、脱硫剂的添加及灰渣排放</b>	<b>215</b>
8.1	煤及脱硫剂的添加	215
8.1.1	煤及脱硫剂的干法添加	215

8.1.2	煤及脱硫剂的湿法添加 .....	217
8.2	灰渣排放系统 .....	222
8.2.1	PFBC 的底渣排放系统 .....	222
8.2.2	PFBC 连续排渣系统实例 .....	222
8.2.3	PFBC 飞灰排放系统 .....	224
	参考文献 .....	225
<b>9</b>	<b>高温燃气的除尘 .....</b>	<b>227</b>
9.1	概述 .....	227
9.2	旋风分离器 .....	228
9.2.1	旋风分离器的基本原理 .....	229
9.2.2	切流式旋风分离器的性能计算与设计方法 .....	237
9.2.3	高温切流式旋风分离器的结构与应用 .....	242
9.3	多管式旋风分离器及其它 .....	252
9.3.1	立管式多管旋风分离器 .....	252
9.3.2	卧管式多管旋风分离器 .....	259
9.3.3	旋流式分离器 .....	263
9.3.4	其它新型旋风分离器的研究进展 .....	265
9.4	高温过滤器 .....	267
9.4.1	高温过滤器的特点 .....	268
9.4.2	陶瓷过滤器 .....	269
9.4.3	高温颗粒层过滤器 .....	284
	参考文献 .....	288
<b>10</b>	<b>燃气透平 .....</b>	<b>294</b>
10.1	PFBC-CC 系统燃气透平的特征 .....	294
10.1.1	燃煤燃气透平的早期研究 .....	294
10.1.2	动力回收燃气透平 .....	294
10.1.3	PFBC-CC 系统应用的燃气透平工作条件 .....	294
10.2	燃气透平的参数对系统热效率的影响 .....	295
10.3	燃气透平叶片的磨损 .....	298
10.3.1	磨蚀的一般情况 .....	298
10.3.2	燃气透平的磨蚀 .....	302
10.4	腐蚀作用 .....	306
10.4.1	高温热腐蚀过程 .....	306
10.4.2	低温腐蚀的过程和机理 .....	307
10.4.3	燃气中 K, Ca, Cl <sub>2</sub> 的作用 .....	308
10.4.4	腐蚀和材料成分的关系 .....	309
10.4.5	采用涂层和包覆防止腐蚀、磨损 .....	310

10.5	磨损、腐蚀综合作用的试验 .....	313
10.5.1	用油和天然气为燃料的试验例证一 .....	313
10.5.2	用油为燃料的磨蚀综合试验例证二 .....	313
10.5.3	整体的燃油透平、燃气透平的试验 .....	317
10.5.4	PFBC 工作环境的叶片磨损、腐蚀 .....	318
10.5.5	用煤为燃料的整机试验例证 .....	322
10.6	燃气透平的寿命 .....	323
10.6.1	影响透平寿命的因素 .....	323
10.6.2	清洁燃料透平的寿命 .....	324
10.6.3	PFBC 透平膨胀机转子的寿命 .....	324
10.7	燃气轮机叶片的沉积 .....	326
10.7.1	沉积的原因 .....	326
10.7.2	沉积物对透平性能的影响 .....	327
10.8	燃气轮机的调控要求 .....	328
	参考文献 .....	329
<b>11</b>	<b>PFBC 系统的技术经济分析 .....</b>	<b>331</b>
11.1	概述 .....	331
11.2	PFBC-CC 发电系统的热力性能计算分析 .....	331
11.3	PFBC-CC 发电系统的经济性评估 .....	339
11.4	PFBC-CC 与其它清洁燃煤发电技术的技术经济性比较 .....	344
	参考文献 .....	349

# 1 PFBC 技术的综述

## 1.1 煤的高效洁净发电技术

### 1.1.1 发展煤的高效、洁净发电技术的动因

煤炭是我国的主要能源,1992年我国原煤产量达11.2亿吨,在一次能源中占74.9%。它提供了76%的发电能源、75%的工业燃料和动力、80%的民用能源、60%的化工原料。表1.1列出了世界上能源消耗较大的国家在1992年的一次能源消费结构。

表 1.1 1992 年一次能源消费结构\* (%)

国 别	总消费量 (Mtce)**	消 费 结 构				
		石 油	天 然 气	煤 炭	核 电	水 电
美 国	2 801.1	39.8	26.1	24.3	8.6	1.2
前苏联	1 770.7	26.9	46.2	21.9	3.5	1.5
中 国	1 089.0	18.0	2.0	74.9	-	5.1
日 本	644.3	57.4	11.2	17.2	12.6	1.6
德 国	478.7	40.1	16.8	30.5	12.2	0.4
法 国	333.9	40.4	12.2	7.7	37.5	2.2
英 国	302.1	39.0	24.9	28.0	7.9	0.2
加拿大	298.0	36.6	28.2	12.1	10.1	13.0
印 度	279.3	31.7	7.4	57.0	0.9	3.0
意大利	218.4	61.6	26.9	8.9	-	2.6
韩 国	163.0	62.4	4.0	20.4	12.8	0.4
波 兰	138.7	14.6	8.2	77.1	-	0.1
世界总计	11 134.6	40.1	22.9	27.8	6.8	2.4

\* BP世界能源的统计评论,1993.6。

\*\* ce 当量标煤。

中国是世界最大煤炭生产国和消费国,1992年原煤产量占世界的24.4%<sup>[1]</sup>。国家科委中国科技促进发展研究中心于1990年对我国的能源结构作了预测,具体数据如表1.2所示。从表1.2可看出,到下世纪50年代,煤炭仍将是我国主要的一次能源。但是,煤炭在应用过程中对于环境污染十分严重,我国各种生产活动造成的大气污染,大部分是在煤炭的转化过程(主要是燃烧)中造成的,其中SO<sub>2</sub>占全国总排放量87%,CO占71%,NO<sub>x</sub>占67%,粉尘占70%。以SO<sub>2</sub>为例,随着煤层开采深度的增加,煤中的含硫量将逐年增大,加上煤炭产量的逐年提高,总的SO<sub>2</sub>年排放量也将逐年增大,表1.3说明了这种增长趋势。从表1.3同时可看到,火

力发电站的 SO<sub>2</sub> 排放量占全国总排放量的比例也逐年提高。表 1.4 为我国至 2030 年电力和能源生产总量的预测。从表 1.4 可见,电能占一次能源消耗的比重将愈来愈大,而煤炭作为发电能源的比例即使到 2030 年,仍将占 60%左右。

表 1.2 煤炭占一次能源构成的比例 (%)

年 份	煤 炭	石 油	天 然 气	水 能	核 能	新 能 源
1985	72.8	20.9	2	4.3	-	-
2000	~70	19.5	4	6.0	2	-
2050	~60~70	5	5	6	~10~20	5

表 1.3 我国 SO<sub>2</sub> 年排放数据

年 份	全 国			火 电 站		
	煤耗量/10 <sup>8</sup> t	平均硫/%	硫排放量/10 <sup>4</sup> t	煤耗量/10 <sup>8</sup> t	平均硫/%	硫排放量/10 <sup>4</sup> t
1982	6	1.25	1 200	1.1	1.6	230
1986	8.9	1.26	1 800	1.6	1.72	400
2000	14	1.60	3 600	4.0	2.00	1 400

表 1.4 我国至 2030 年电力和能源生产总量预测

项 目 名 称	年 份			
	1990	2000	2020	2030
总装机容量/煤电装机容量/MW	125 000/90 000	290 000/226 000	700 000/490 000	1 040 000
发电量/((10 <sup>8</sup> kW·h)·a <sup>-1</sup> )	6 300	15 100	36 400	54 100
发电煤耗(标煤)/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	400	350	300	280
电力生产折合煤耗量(标煤)/(10 <sup>8</sup> t·a <sup>-1</sup> )	2.50	5.30	10.90	14.10
一次能源总需量(标煤)/(10 <sup>8</sup> t·a <sup>-1</sup> )	10.0	14.6	24.9	30.7
电能占一次能源比重/%	26	36	44	46
电力生产年均增长率/%	9.1	4.5	4.0	4.0
能源生产年均增长率/%	4.3	2.7	2.3	2.0
煤电占的比重/%	~70	~78	~70	~60

以上数据,说明我国以煤为主要能源的结构将长期存在,而造成的环境污染问题十分严重。煤炭引起的环境问题已经成为影响中国经济和社会发展的制约因素,也已受到国际社会的关注。1992 年在巴西里约热内卢召开的全球环境发展会议,已经把环境保护问题提高到全球发展问题。据《中国日报》上发表的一份报告说,1991 年估计仅酸雨一项给全国农作物、森林和建筑物造成的损失就达 28 亿美元。空气污染给人类的健康也带来了严重的危害。重庆市肺癌死亡率很高,10 万人中有 47 例;在 32km 以外的北碚,空气要好些,10 万人中也有 20 例。中国北方的许多城市,空气污染超过世界卫生组织的规定标准的 4~5 倍。

进入 70 年代,人类对环境保护的要求和认识日益提高,发达国家先后制订了环境保护法规。大气污染在现代已不单是环境问题,可能形成政治问题。例如 1985 年 3 月,加拿大政府正式向美国提出,美国政府能否控制住酸雨对加拿大造成的危害,已经成为两国政治关系的关

键。这促使美国政府和国会制订了清洁煤利用技术研究的发展部署,1986年美国能源部受命制订了清洁煤技术计划 CCTP(Clean Coal Technology Program),计划由美国政府和工业部门共同投资,以煤炭洁净利用新技术为背景进行商业示范试验,至1993年底,已经实施了40个示范项目,总投资已达69亿美元。同样,日本和我国其它周边国家也十分关切中国的大气污染对他们国家造成的影响。根据日本1993年发布的资料,认为来自中国大陆的气流采样中的污染物含量高出日本东方气流采样浓度的6~7倍。综上所述,我国必须发展洁净煤利用技术。随着进一步的工业化,煤炭用于发电的比重将愈来愈大,因此洁净煤的发电技术将占有重要的地位。

### 1.1.2 各国对于电站排放物的排放标准

表1.5和表1.6为欧洲共同体及美国、日本、加拿大等国规定的燃煤电站排放标准。

表1.5 欧共体规定的燃煤电站排放极限<sup>[2]</sup>

电站规模	SO <sub>2</sub> /(mg·Nm <sup>-3</sup> )		NO <sub>x</sub> /(mg·Nm <sup>-3</sup> )		粉尘/(mg·Nm <sup>-3</sup> )
	1985.1.1起	1996.1.1起	1985.1.1起	1996.1.1起	
> 300 MW <sub>e</sub>	<400	<250	<650	<200	<50
100~300 MW <sub>e</sub>	<1 200	<1 200	<800		<50
<100 MW <sub>e</sub>	<2 000	<2 000	<800	<400	<50

注 表中N——表示“标准”意思,Nm<sup>3</sup>——表示标准立方米,全书同。

表1.6 美国、日本、加拿大规定的燃煤电站排放极限<sup>[3]</sup>

项目名称		美国	日本	加拿大
SO <sub>2</sub>	kg/GJ	2.5 (2000年) 5.8 (1995年)		
	mg/Nm <sup>3</sup>	1 140 (2000年) 2 380 (1995年)	430 <sup>k</sup> 170 <sup>l</sup>	700
	mg/MJ	479 (2000年) 1 000 (1995年)		258 <sup>f</sup>
	要求脱除效率/%	90	74 90	90 <sup>g</sup>
NO <sub>x</sub>	kg/GJ	1.173 <sup>a</sup> 0.93 <sup>b</sup> 1.05		
	mg/Nm <sup>3</sup>	426 <sup>j</sup>	360 <sup>k</sup> 120 <sup>l</sup>	614 <sup>h</sup> 405 <sup>i</sup>
	mg/MJ	179 <sup>j</sup>	151 <sup>k</sup> 50 <sup>l</sup>	258 <sup>h</sup> 170 <sup>j</sup>
微粒	mg/Nm <sup>3</sup>	31	100	100
	mg/MJ	13	42 <sup>j</sup>	42 <sup>j</sup>

注 a.烟煤 b.次烟煤、褐煤 f.热输入为258~2 580 mg/MJ的机组 g.热输入>2 580 mg/MJ的机组 h.1995年1月1日前运行的机组 i.1995年1月1日后运行的机组 j.mg/Nm<sup>3</sup>和mg/MJ间的转换系数为420 m<sup>3</sup>/GJ k.厂址在东京,烟囱高度300 m,k=1.17(老厂) l.厂址在东京,烟囱高度300 m,k=3(新厂)

我国1992年制订的国家标准,中小型锅炉:煤的含硫 S≤2,SO<sub>2</sub>排放≤1 200 mg/Nm<sup>3</sup>;S

>2, SO<sub>2</sub> 排放 ≤ 1 800 mg/Nm<sup>3</sup>。台湾从 1990 年 7 月 1 日起,规定 SO<sub>2</sub> 排放 ≤ 2 145 mg/Nm<sup>3</sup>; 1993 年 7 月 1 日起,规定 SO<sub>2</sub> 排放 ≤ 1 430 mg/Nm<sup>3</sup>。

### 1.1.3 煤的高效清洁发电技术的发展方向

常规煤粉电站在发展中遇到两个突出的问题,首先是电站效率的提高,需付出愈来愈大的代价,其次是排放的烟气处理的代价较高昂。

#### 1) 电站效率

我们从表 1.7 中可看到,常规电站在提高其工作参数时,发电效率的提高愈来愈少,而代价愈来愈大。从高压蒸汽参数电站至超高压蒸汽参数电站,效率提高十分显著;从亚临界参数提高到超临界参数,效率仅提高 1.6%,而制造的成本却大幅度增加。我国现在还正在为制造超临界电站设备进行着努力。但是,尽管如此,人们仍在发展高超临界蒸汽参数的电站,目前国际上最先进的已达到 32 MPa、595℃ 的过热蒸汽温度,到下世纪还计划使过热蒸汽温度达到 640℃ 左右。因此,随着单一的蒸汽循环发电的电站效率趋于饱和,要进一步提高电站的发电效率,只有走联合循环发电的道路。燃油和燃用天然气的联合循环电站,世界上已经大规模商品化,它的发电效率达到了 52%~54%,不久的将来将能达到 58%,这是单纯蒸汽发电所不能比拟的。对于燃煤电站,由于技术上的原因,还需要有一个发展的过程,但是它的发展方向已经愈益为世人所肯定。

表 1.7 常规煤粉电站的发电效率

电站级别	高压 MPa/℃	超高压 MPa/℃/℃	亚临界 MPa/℃/℃	超临界 MPa/℃/℃	高超临界 MPa/℃/℃
蒸汽参数	9.0/535	13.5/550/550	16.5/550/550	22.5/565/565	32.0/595/595
发电效率/%	30.5	37	38~39	40 强	~43~44

#### 2) 清除 NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 的设备投资和运行费用高

常规电站消除 SO<sub>2</sub> 的设备投资和运行费用都比较高,例如最普遍为发达国家所采用的湿式洗涤工艺设备,每千瓦的投资为 160~240 美元,占常规电站投资的 15%~20%。它的占地面积也比较大,占电站总面积 1/6 左右。按国际能源机构煤炭研究组织的调查,1992 年末全世界 17 个国家的燃煤电站安装了各种电站烟气脱硫设备 FGD(Flue Gas Desulphurization)646 套,总装机容量达 167 GW,其中美国 308 套,德国 208 套,日本 51 套。湿式脱硫工艺包括我国珞璜电厂<sup>[3]</sup>占世界安装 FGD 的机组总容量的 81.8%,美国政府从 70 年代颁布大气净化法以来,电力公司采用烟气脱硫(FGD),总计投资了 420 亿美元(包括 10 年的运行费用在内),改造了 4 千万 kW 燃煤电站。80 年代美国尚有 1 亿 kW 装机容量的高硫煤电站需要加以改造,预算费用超过 1 000 亿美元,此项费用相当于可建造美国今后 30 年所需的新电站的投资之四分之一。另外,因脱硫使电站发电效率下降 1~2 个百分点。

由于上述两个原因,世界上从 70 年代开始,着手研究和发展高效、清洁的煤燃烧和发电技术,它的最重要的方面为:

(1) 常规煤粉电站 + 烟气处理(烟气脱硫和催化脱氮): PC(Pulverized Coal) + FGD(Flue Gas Desulphurization)(图 1.1);

(2) 循环流化床锅炉: CFB(Circulating Fluidized Bed)(图 1.2);



(3) 增压流化床燃烧联合循环：PFBC-CC(Pressurized Fluidized Bed Combustion-Combined Cycle)(图 1.3)；

(4) 整体煤气化联合循环：IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)(图 1.4)。

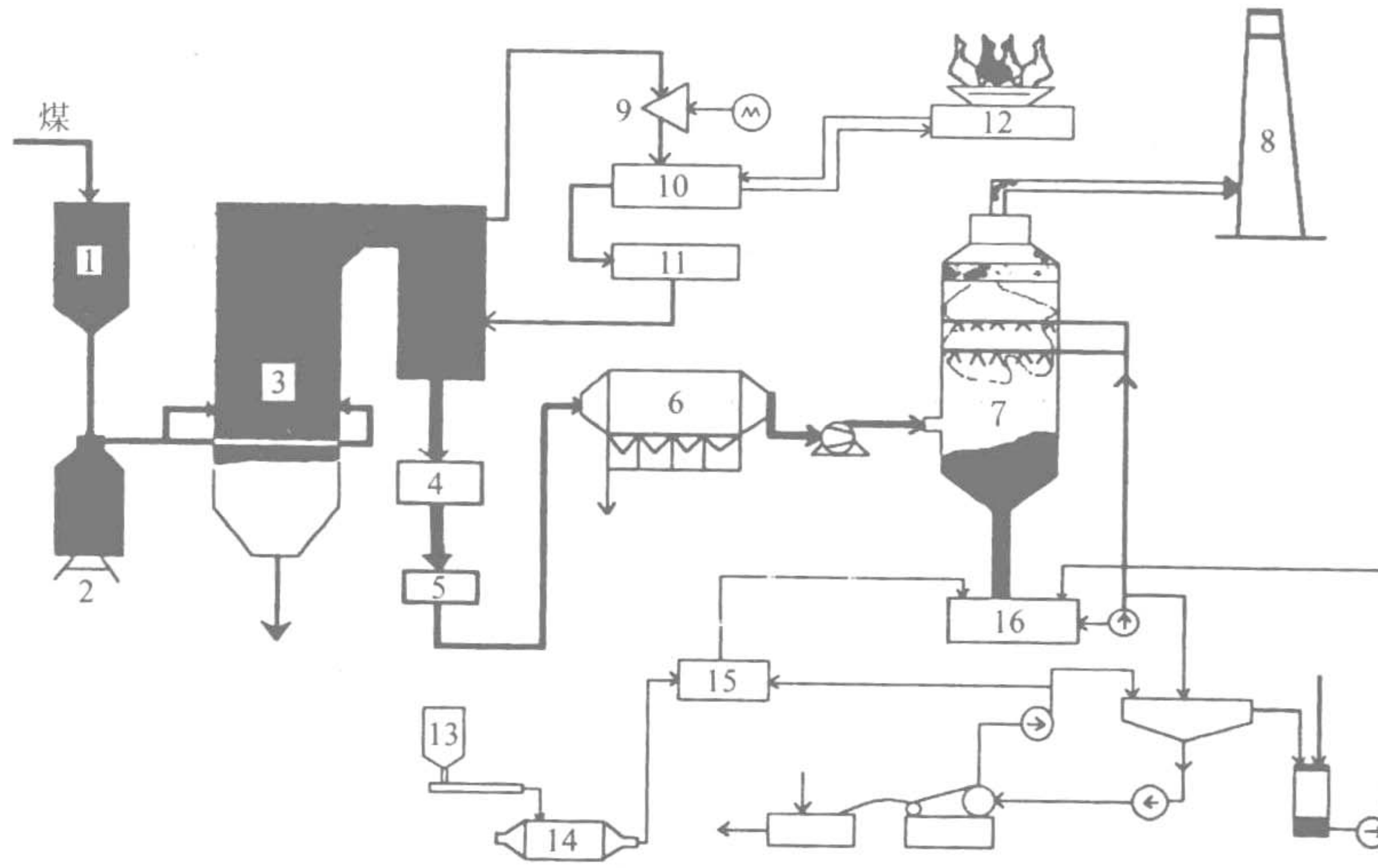


图 1.1 常规煤粉电站(PC) + 烟气脱硫(FGD)系统图

- 1-煤斗 2-磨煤机 3-煤粉锅炉 4-省煤器 5-空气预热器 6-袋滤器  
7-湿法除硫塔 8-烟囱 9-蒸汽轮机 10-冷凝器 11-水处理 12-冷却塔  
13-石灰石斗 14-球磨机 15-料浆箱 16-废液储箱

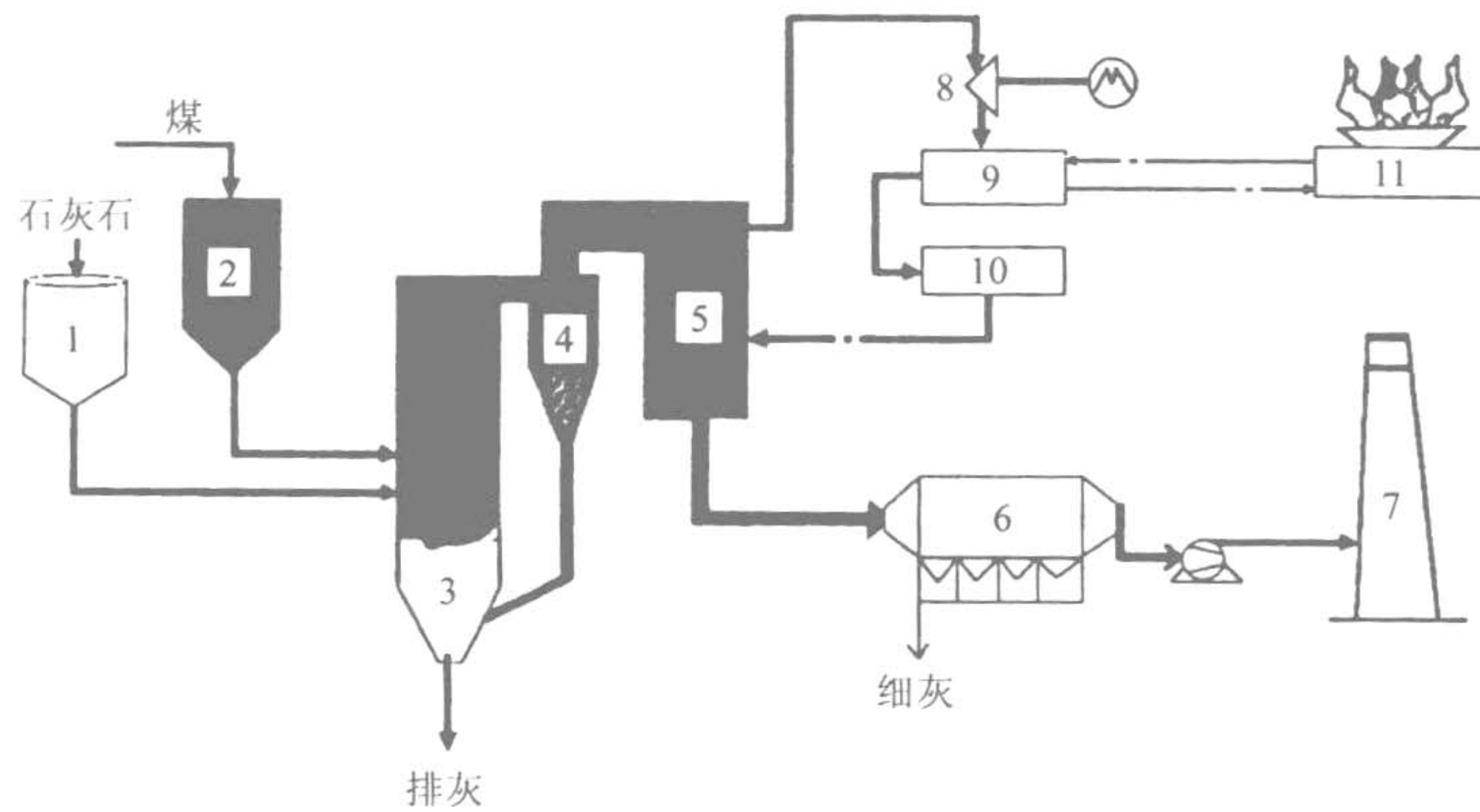


图 1.2 循环流化床锅炉电站系统图

- 1-石灰石斗 2-煤斗 3-循环流化床锅炉 4-高温除尘器 5-尾部受热面  
6-袋滤器 7-烟囱 8-蒸汽透平 9-冷凝器 10-水处理 11-冷却塔