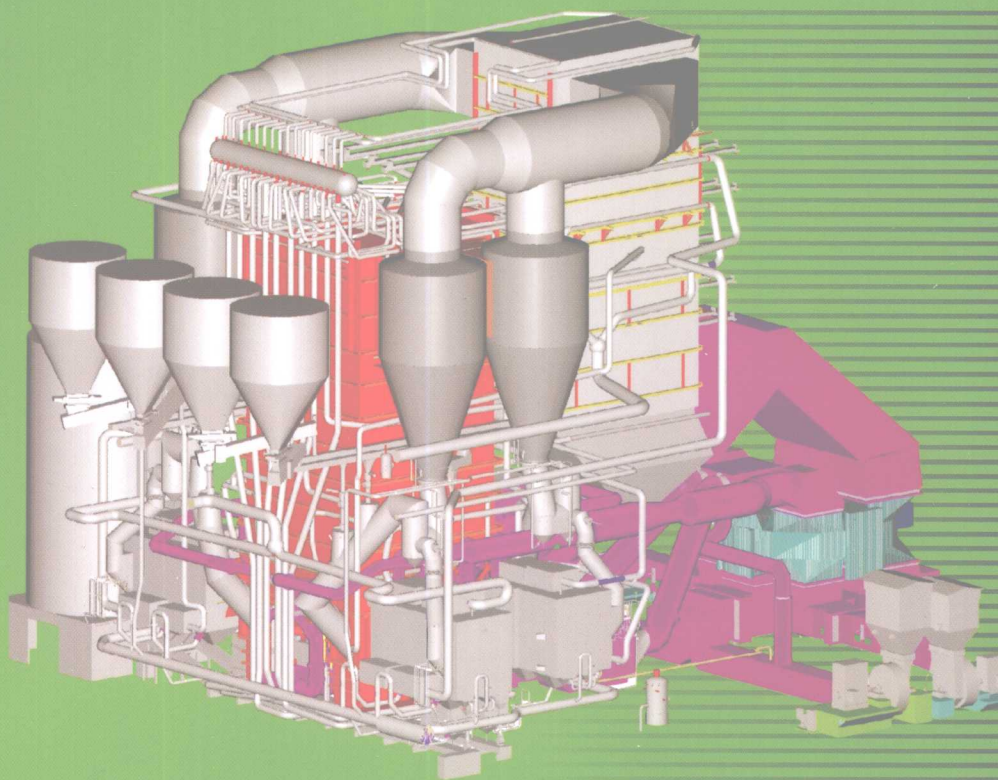




DAXING XUNHUAN
LIUHUACHUANG GUOLU
JISHU YU GONGCHENG YINGYONG

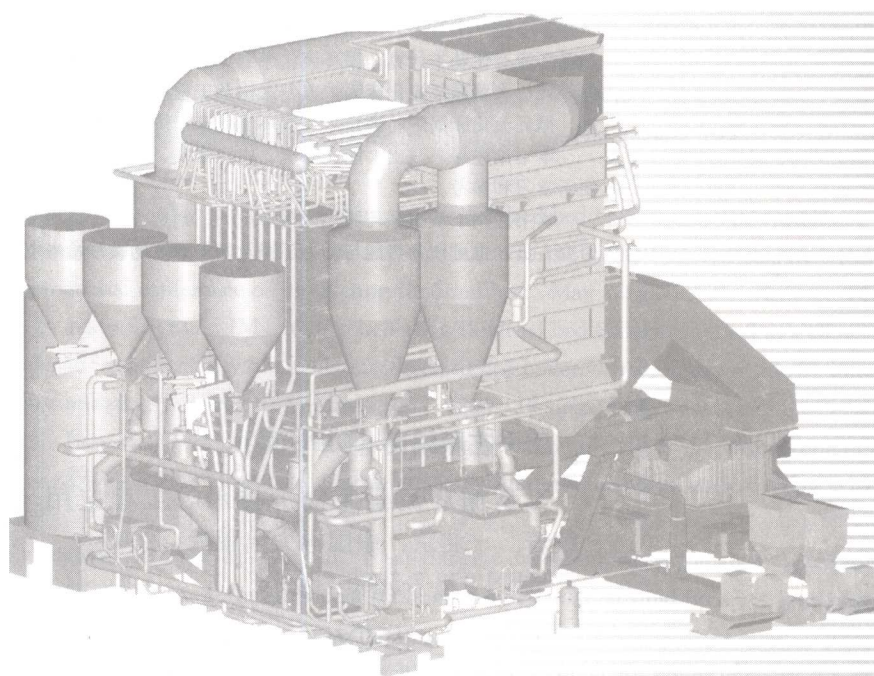
大型循环流化床锅炉 技术与工程应用



● 孙献斌 黄 中 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



DAXING XUNHUAN
LIUHUACHUANG GUOLU
JISHU YU GONGCHENG YINGYONG

大型循环流化床锅炉 技术与工程应用

● 孙献斌 黄 中 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是一本有关大型循环流化床锅炉技术与工程应用的专著。书中内容主要包括循环流态化基本计算、循环流化床锅炉性能计算、循环流化床锅炉总体布置及结构设计、大型循环流化床锅炉典型结构及工程应用、循环流化床锅炉运行与燃烧调整、循环流化床锅炉防磨技术、循环流化床锅炉试验设备与测量技术等。

本书论述深入浅出、图文并茂、内容翔实，具有较强的针对性和工程实用性，便于学习和参考。

本书适用于从事循环流化床锅炉设计、制造、运行工作的专业工程技术人员和研究人员，也可作为热能与动力工程及相关专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型循环流化床锅炉技术与工程应用/孙献斌，黄中
编著. —北京：中国电力出版社，2009

ISBN 978-7-5083-7309-6

I. 大… II. ①孙… ②黄… III. 流化床—循环锅炉
IV. TK229.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 145656 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 1 月第一版 2009 年 1 月北京第一次印刷

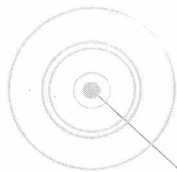
787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.625 印张 584 千字

印数 0001—3000 册 定价 39.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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



前言

大型循环流化床锅炉技术与工程应用

清洁煤发电是我国电力工业的跨世纪导向工程,循环流化床(CFB)锅炉技术是目前应用较广的清洁煤发电技术之一。

循环流化床锅炉具有燃料适用范围广、炉内脱硫效率高、 NO_x 排放量小、燃烧效率高、负荷调节比大及灰渣可综合利用等优点。较之其他的清洁煤发电技术,CFB 锅炉技术是投资与运行成本相对最低,适合我国资源特点,并能满足日益严格的污染物排放标准要求的清洁煤发电技术,特别是在燃用劣质燃料方面,具有不可替代的作用。

国外至今已有设计制造 300MW CFB 锅炉的技术和良好的运行业绩,并已经开始了 460MW 超临界 CFB 锅炉的研制工作。

1996 年,随着国内首台引进的 100MW CFB 锅炉,即内江高坝发电厂引进的芬兰 FWEO 公司的 100MW CFB 锅炉的投入运行,国内 CFB 锅炉的研究开发、设计、制造和工程应用进入了一个大型化发展的新阶段。

国内锅炉制造厂利用国外技术制造的国产化 135MW 级 CFB 锅炉已有 100 余台投入运行。2003 年 3 月,我国开始了 300MW CFB 锅炉的引进工作,首台引进的 300MW CFB 锅炉安装在四川白马 CFB 示范电站,并已于 2006 年 4 月 18 日投入商业运行。随后,十余台国产化 300MW CFB 锅炉先后投运。

我国除了自主开发研制的 100MW CFB 和 210MW CFB 锅炉已成功运行外,首台国产 330MW CFB 锅炉也已顺利投运并进入工程示范阶段,该台 CFB 锅炉为目前世界上已运行的最大容量的 CFB 锅炉。

我国工程技术人员在大型 CFB 锅炉的开发研究、设计、制造及工程应用过程中,已经逐步掌握了 CFB 锅炉的热力计算方法、设计方法等核心技术,研究开发出了许多具有中国特色的 CFB 锅炉,成功地解决了初期应用时经常出现的诸如锅炉出力达不到设计值、炉内水冷壁磨损爆管、连续运行时间短、风室漏渣、排渣温度高等技术难题,积累了许多设计与运行经验。

本书作者长期从事循环流化床锅炉燃烧技术的研究开发、设计及工程化的科学研究及应用研究工作,特别是在承担国家重大装备研制项目和科研项目的过程中,在 CFB 锅炉技术领域积累了较为丰富的工作经验和理论知识,为进一步推动大型 CFB 锅炉技术在我国电力工业中的应用,特编写了本书。

本书由西安热工研究院首席研究员孙献斌主编,编写了第一、第三~第八章及附录,并对全书进行校对和整理,黄中编写了第二、第九章。

本书是在总结分析国内外 CFB 锅炉工程实践经验的基础上编写而成的,融入了作者从事 CFB 锅炉性能设计及试验研究的重要经验,部分内容是作者及同事们近年来的研究成果。同时,还参考了最新出版的相关书籍和文献,综合了最新的研究成果。

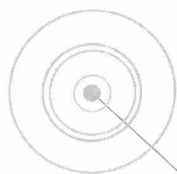
本书全面介绍和分析了大型循环流化床锅炉技术的基础理论，重点总结了炉型结构、关键部件、受热面布置、热力计算方法、启动调试、运行优化与燃烧调整、事故处理分析以及防磨技术，同时对试验设备和测量技术也进行了系统的分析和介绍，并尽可能地反映 CFB 锅炉技术最前沿的研究进展，力求具有一定理论深度，内容主要涉及 100MW 及以上容量的大型 CFB 锅炉技术。

为适应 CFB 锅炉国际交流与合作的需求，本书附录还收集和编译了循环流化床锅炉关键词汇中英文对照表。

限于作者的知识水平和本书涉及的许多新问题，书中可能存在谬误和不足之处，敬请读者给予批评指正。

编者

2008 年 11 月于西安



目 录

大型循环流化床锅炉技术与工程应用

前言

第一章 绪论	1
第一节 循环流化床锅炉的大型化	1
第二节 循环流化床锅炉热效率及环保特性	7
第三节 循环流化床锅炉可用率	11
第二章 循环流态化基本计算	13
第一节 颗粒特性	13
第二节 临界流化速度	19
第三节 流化床图谱	27
第四节 终端速度与气固滑移速度	30
第五节 循环流化床颗粒浓度分布	33
第六节 循环流化床流动模型	40
第三章 循环流化床锅炉性能计算	46
第一节 循环流化床锅炉性能参数	46
第二节 循环流化床锅炉燃烧脱硫计算	47
第三节 循环流化床锅炉热力计算	58
第四节 炉膛及传热计算模型	69
第五节 循环回路性能参数计算	79
第四章 循环流化床锅炉总体布置与结构设计	86
第一节 循环流化床锅炉总体布置与炉型	86
第二节 布风装置	87
第三节 气固分离器	92
第四节 回料器	104
第五节 外置换热器	107
第六节 屏式受热面	113
第七节 循环流化床锅炉放大特性与紧凑化设计	117
第五章 大型循环流化床锅炉典型结构	121
第一节 440t/h 超高压循环流化床锅炉	121
第二节 670t/h 超高压循环流化床锅炉	136
第三节 1025t/h 亚临界循环流化床锅炉	139

第四节	超临界循环流化床锅炉	150
第六章	大型循环流化床锅炉工程应用	163
第一节	循环流化床锅炉应用实例	163
第二节	国产 100MW CFB 锅炉设计与运行经验	184
第三节	国产 210MW CFB 锅炉工程示范	187
第四节	300MW CFB 锅炉特点及应用	191
第七章	循环流化床锅炉运行与燃烧调整	203
第一节	循环流化床锅炉冷态试验	203
第二节	循环流化床锅炉启动	207
第三节	运行优化与燃烧调整	211
第四节	停炉压火及热态启动	217
第五节	事故处理分析	220
第八章	循环流化床锅炉防磨技术	227
第一节	磨损机理和评价准则	227
第二节	循环流化床锅炉磨损因素及数学模型	228
第三节	防磨部位及结构设计	235
第四节	受热面保护措施	241
第五节	耐磨耐火材料性能	246
第六节	耐磨材料的施工与养护	248
第九章	循环流化床锅炉试验设备与测量技术	254
第一节	循环流化床锅炉测量与试验设备	254
第二节	循环流化床锅炉风量测量技术	272
第三节	颗粒特性的取样与分析	278
第四节	循环流化床锅炉流体特性的测量	284
第五节	循环流化床锅炉热效率的测定	305
第六节	循环流化床锅炉污染物排放浓度测定与脱硫效率计算	320
第七节	石灰石反应活性试验	327
第八节	煤种试烧试验	331
附录	循环流化床锅炉关键词汇中英文对照表	336
参考文献		369

绪 论

第一节 循环流化床锅炉的大型化

循环流化床 (Circulating Fluidized Bed, CFB) 锅炉技术是近 20 年发展起来的一种新型清洁煤燃烧技术。20 年来, CFB 锅炉技术得到了迅速发展, 其工程应用已由小型 CFB 锅炉发展到 300MW 的电站级大型 CFB 锅炉, 并在向更大容量和超临界参数方向发展。

CFB 锅炉在工业上的应用始于 20 世纪 70 年代末。1979 年, 芬兰奥斯特龙 (Ahlstrom) 公司开发的世界首台 20t/h CFB 锅炉投入运行。1982 年, 德国鲁奇 (Lurgi) 公司开发的世界首台用于产汽与供热的 CFB 锅炉建成投运, 热功率为 84MW。CFB 锅炉真正达到电站级容量, 是 1985 年 9 月在德国杜伊斯堡 (Duisburg) 第一热电厂投运的 95.8MW (270t/h, 535/535℃, 14.5MPa) 的再热型 CFB 锅炉, 其炉型为带有外置换热器的鲁奇型 CFB 锅炉, 如图 1-1 所示。该 CFB 锅炉的运行经验对其后国际上电站 CFB 锅炉的应用起到了先导作用。目前, 世界上容量为 100~300MW 的 CFB 电站锅炉已有百余台投入运行, 其中容量最大的是美国福斯特·惠勒 (Foster Wheeler, FW) 公司制造, 安装在美国 JEA 电站的 2×

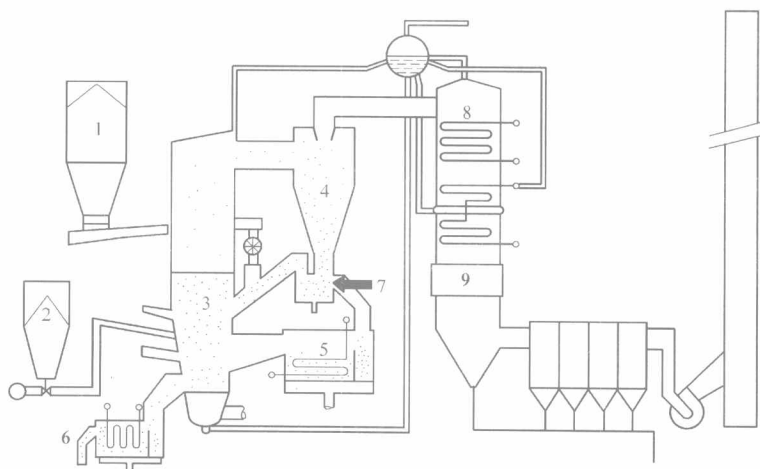


图 1-1 鲁奇型 CFB 锅炉

- 1—煤仓; 2—石灰石仓; 3—炉膛; 4—旋风分离器; 5—外置床;
6—冷渣器; 7—锥形阀; 8—过热器; 9—空气预热器

300MW CFB 锅炉（906/806t/h，17.2/3.8MPa，540/540℃），该锅炉于 2002 年 7 月投入运行，锅炉结构如图 1-2 所示。

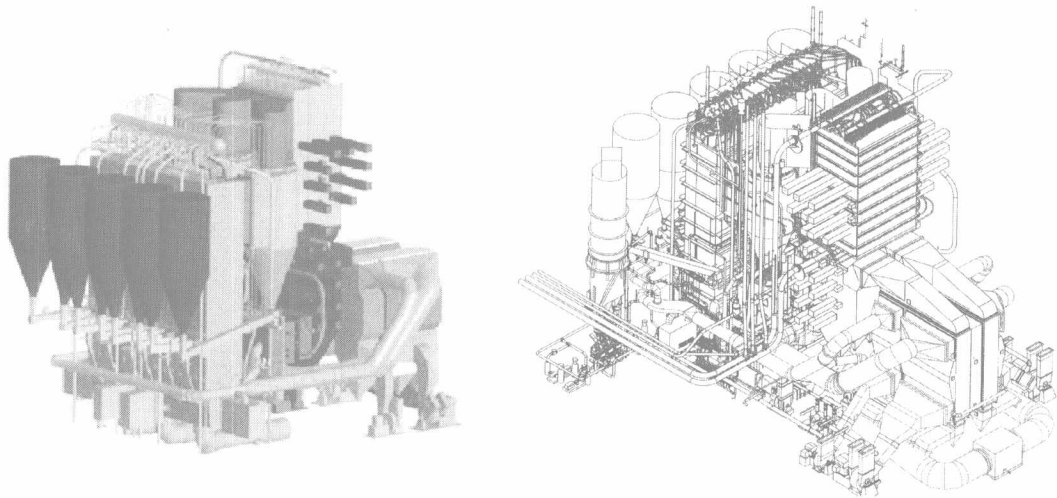


图 1-2 美国 JEA 电站 300MW CFB 锅炉立体图

国外 CFB 锅炉大型化发展迅速，图 1-3 所示为国外 CFB 锅炉炉型及容量发展的概况。目前国外已有 20 台以上容量大于 200MW 的 CFB 锅炉投入了商业运行，技术上比较成熟。

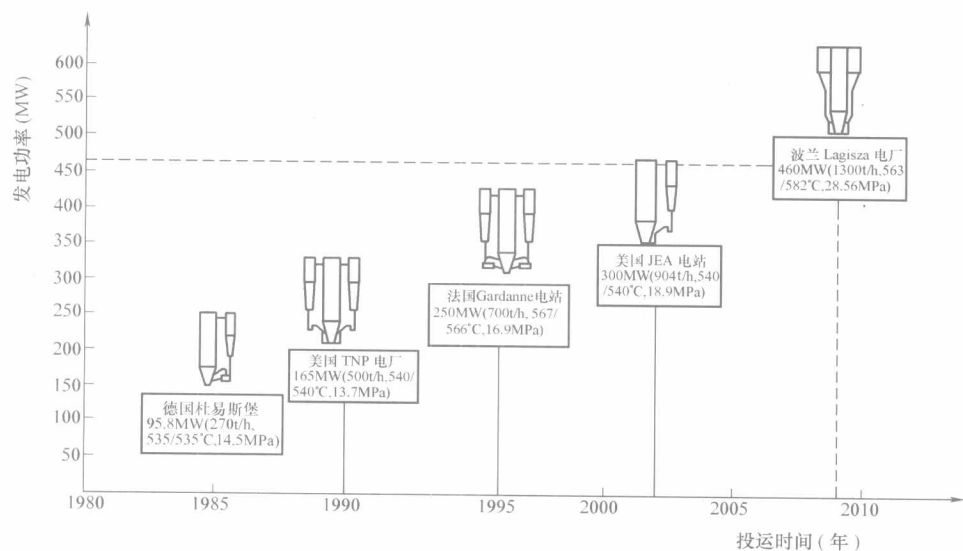


图 1-3 国外大型 CFB 锅炉的发展历程

表 1-1 列出了国外 38 台容量大于 150MW 的典型 CFB 锅炉。
法国阿尔斯通（ALSTOM）公司利用德国 Lurgi 技术制造的 250MW（700/651t/h，16.9/3.73MPa，567/566℃）亚临界再热型 CFB 锅炉于 1996 年 4 月在法国 Gardanne 电站投运，至今已有十多年的运行历史，锅炉布置见图 1-4。

表 1-1

国外典型的大型 CFB 锅炉

序号	电厂名称	发电功率 (MW)	台数	设计制造商	燃料	投运时间 (年)
1	美国 Texas-New Mexico 电力公司	165	2	ALSTOM	褐煤	1990
2	加拿大 Nova Scotia 电力公司	180	1	FW	石油焦和煤	1993
3	法国 Gardanne 电站	250	1	ALSTOM	次烟煤	1996
4	波兰 Zeran 电厂	150	2	ALSTOM/Rafako	烟煤	1996/2001
5	泰国国家电力公司 (NSP)	150	2	FW	无烟煤, 烟煤	1998
6	韩国东海 (Tonghae) 电厂	220	2	ALSTOM	无烟煤	1998/1999
7	波兰 Turow 电站	235	3	FW	褐煤	1998/2000
8	美国 AES Warrior Run 电厂	208	1	ALSTOM	烟煤	2000
9	美国 Bay shore 电力公司	180	1	FW	石油焦	2000
10	匈牙利 AES Borsodi 电厂	150	1	FW	褐煤, 烟煤	2001
11	波兰 Turow 电站	262	3	FW	褐煤	2002
12	美国 JEA 电站	300	2	FW	烟煤, 石油焦	2002
13	美国波多黎各 Guayama 电厂	255	2	ALSTOM	烟煤	2002
14	美国红山 (Red Hills) 电厂	250	2	ALSTOM	褐煤	2002
15	土耳其 Can 电厂	167	2	ALSTOM	褐煤	2004
16	美国西沃德 (Seward) 电厂	290	2	ALSTOM	废烟煤	2004
17	爱尔兰 ESB wes toffaly 电厂	150	1	FW	泥炭	2004
18	美国 Spurlock 电厂 Gilbert3 号	268	1	ALSTOM	烟煤	2005
19	意大利 Sulcis 电厂	320	1	ALSTOM	次烟煤	2006
20	美国 Spurlock 电厂 4 号	290	1	ALSTOM	烟煤	2008
21	美国 Sandow 电厂	315	2	FW	褐煤	2009
22	美国 CLECO 电厂	330	2	FW	石油焦和煤	2009
23	波兰 Lagisza 电厂	460	1	FW	烟煤	2009

自 1998 年起,首批由芬兰 FW 能源公司制造的发电功率为 235MW 的 3 台 CFB 锅炉(665/593t/h, 13.2/2.5MPa, 540/540℃)在波兰 Turow 电站先后投运。3 台锅炉运行参数已达到或超过设计指标,在锅炉热效率、排放指标、负荷适应性和可靠性等方面都显示出良好的运行性能。波兰 Turow 电站另 3 台容量为 262MW 的 CFB 锅炉(720/655t/h, 16.65/3.80MPa, 565/565℃),由美国 FW 公司供货,并于 2002 年下半年先后投运。该锅炉采用紧凑 (Compact) 型结构设计,炉膛两侧共布置 4 个汽冷方形分离器,在 8 个 INTREX 换热器内分别布置中温过热器和高温过热器。

国际上大型 CFB 锅炉技术正在向

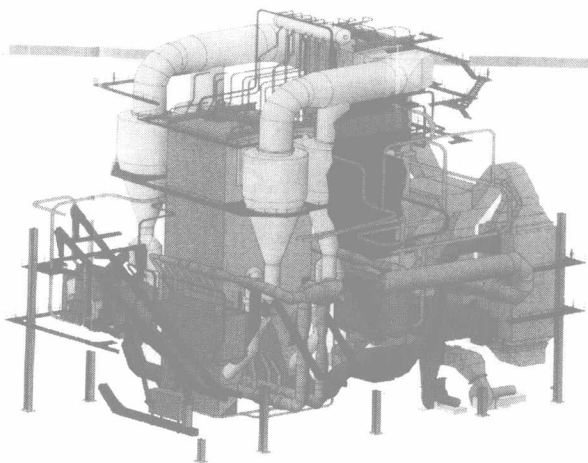


图 1-4 法国 Gardanne 电站 250MW CFB 锅炉立体图

超临界参数方向发展, 法国阿尔斯通和福斯特·惠勒公司已提出 600MW 超临界 CFB 锅炉方案设计。FW 公司还于 2003 年 11 月获得了世界上首台 460MW 超临界 CFB 锅炉的订货, 建于波兰南部的 Lagisza 电厂, 预计 2009 年投运。图 1-5 所示为该超临界 CFB 锅炉的立体图。

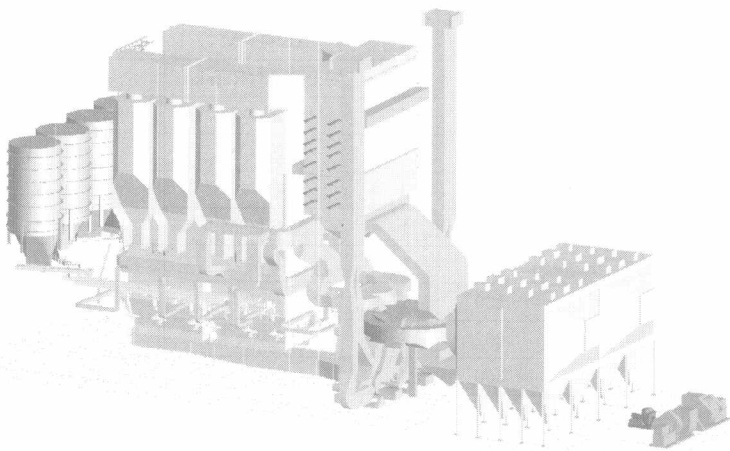


图 1-5 波兰 Lagisza 460MW 超临界 CFB 锅炉立体图

在欧洲, 由西班牙的 Endesa Generación 电力公司、福斯特·惠勒芬兰公司及芬兰、德国、希腊和西班牙共六家公司合作的一项为期三年的 CFB 800 的研究项目也正在进行中, 研究提出的 800MW (2005/1760t/h, 30/4.5MPa, 604/620℃) 超临界 CFB 锅炉概念设计如图 1-6 所示。

自 1989 年 11 月第一台国产 35t/h CFB 锅炉投运以来, 我国 CFB 锅炉技术的开发研究工作进展迅速。西安热工研究院有限公司 (TPRI)、中国科学院工程热物理所、清华大学等单位与锅炉制造厂先后开发出 35~220t/h 的中、小型 CFB 锅炉。2000 年以后, 国内 CFB 锅炉开发研制工作开始向电站 CFB 锅炉迈进, 自主知识产权的 410t/h CFB 锅炉于 2003 年 6 月在江西分宜发电厂投运。由西安热工研究院和哈尔滨锅炉厂合作开发研制的首台自主知识产权的 670t/h CFB 锅炉为带有外置换热器的炉型, 整体结构如图 1-7 所示。该锅炉于 2006 年 10 月在江西分宜发电厂投运。

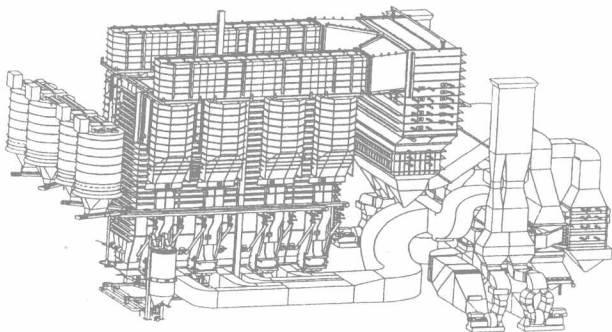


图 1-6 800MW 超临界 CFB 锅炉立体图

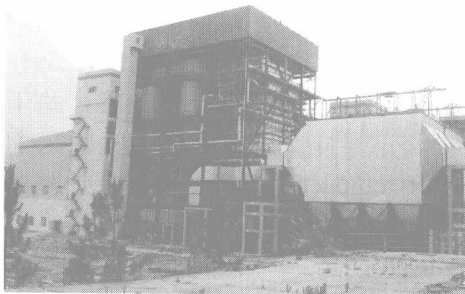


图 1-7 国产 670t/h CFB 锅炉

CFB 锅炉大型化的开发研究,在国家有关部门的支持下,国内研究水平与国外技术的差距已迅速缩小,特别是在研制燃用劣质煤的 CFB 锅炉方面,积累了丰富的经验。由西安热工研究院和哈尔滨锅炉厂开发研制的国产 330MW CFB 锅炉,已于 2008 年 11 月在分宜发电厂成功投入运行。该台目前世界上已运行的最大容量 CFB 锅炉的立体图如图 1-8 所示。国内东方锅炉厂、哈尔滨锅炉厂等大型锅炉制造厂近期还开发了不带外置换热器的 300MW CFB 锅炉,并已开始投入工程应用。总之,通过自主研制,提高自主创新能力,减少对国外技术的依赖,是我国大容量 CFB 锅炉技术的发展方向。

国内首台全套引进的 100MW CFB 锅炉于 1996 年在四川内江高坝发电厂投运,该锅炉为芬兰奥斯龙公司产品,它的成功应用促进了我国 CFB 锅炉的技术发展。目前,通过引进国外技术和国内自行开发研制,我国已有 100 余台 100~210MW CFB 锅炉投入运行,引进的 300MW CFB 锅炉于 2006 年 4 月在四川白马 CFB 示范电站建成投运,该锅炉由阿尔斯通公司设计制造,锅炉布置如图 1-9 所示。燃用云南小龙潭褐煤的 6 台采用引进技术的国产化 300MW CFB 锅炉也于 2006 年 6 月以后分别在红河电厂、巡检司电厂、小龙潭电厂投运,50 余台 300MW CFB 锅炉工程项目正在进行之中。

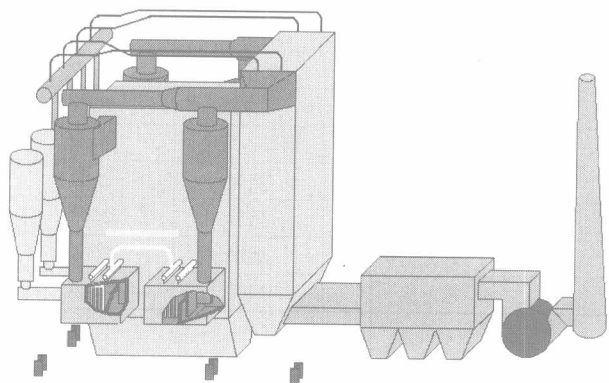


图 1-8 国产 330MW CFB 锅炉立体图

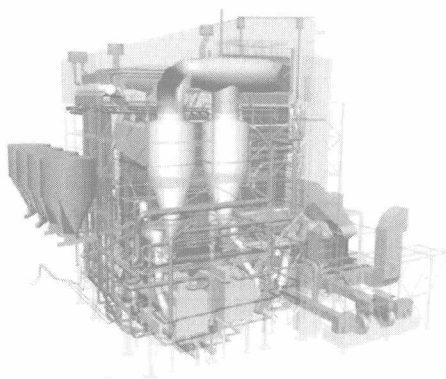


图 1-9 引进型 300MW CFB 锅炉

国内电站级 CFB 锅炉的发展历程如图 1-10 所示。近期国内大型锅炉制造厂和科研单位还在国家科技支撑计划科研项目的支持下,开展了 600MW 超临界 CFB 锅炉的开发研究工作。

在 CFB 锅炉研究和制造方面,国内相关研究单位和锅炉厂经过多年的研究,取得了许多研究成果,国内已具有一支富有 CFB 锅炉试验研究及技术开发经验的科研队伍。

哈尔滨锅炉厂、东方锅炉厂和上海锅炉厂,是我国大型锅炉设备制造企业,已有多台 100~300MW 大型 CFB 锅炉设计制造经验。

国内已得到工程应用的 300MW 级 CFB 锅炉见表 1-2。

表 1-2

国内 300MW 级 CFB 锅炉一览表

序号	电厂名称	发电功率 (MW)	台数	制造商	燃料	投运时间 (年)
1	白马示范电站	300	1	阿尔斯通公司	贫煤	2006
2	云南红河发电有限责任公司	300	2	哈尔滨锅炉厂	褐煤	2006
3	秦皇岛热电厂	300	2	东方锅炉厂	烟煤	2006

续表

序号	电 厂 名 称	发电功率 (MW)	台数	制造商	燃料	投运时间 (年)
4	云南巡检司电厂	300	2	哈尔滨锅炉厂	褐煤	2007
5	云南国电开远发电有限责任公司	300	2	上海锅炉厂	褐煤	2007
6	淮北临涣煤泥矸石电厂	300	2	哈尔滨锅炉厂	煤泥+矸石	2009
7	江西分宜发电厂	330	1	哈尔滨锅炉厂	无烟煤	2008
8	大唐鸡西 B 厂	300	2	哈尔滨锅炉厂	煤矸石	2009
9	大唐国际锡林郭勒电厂	300	2	哈尔滨锅炉厂	褐煤	2009
10	神东电力郭家湾电厂	300	2	哈尔滨锅炉厂	烟煤	2009
11	神东电力萨拉齐电厂	300	2	哈尔滨锅炉厂	烟煤	2009
12	内蒙古蒙西矸石电厂	300	2	上海锅炉厂	劣质烟煤	2008
13	山西平朔电厂	300	2	上海锅炉厂	洗中煤+矸石	2009
14	准格尔大饭铺电厂	300	2	上海锅炉厂	褐煤	2009
15	辽宁调兵山电厂	300	2	上海锅炉厂	烟煤	2009
16	内蒙古能源杭锦发电厂	300	2	上海锅炉厂	烟煤	2009
17	广东宝丽华电厂	300	2	东方锅炉厂	无烟煤	2008
18	广东平石电厂	300	2	东方锅炉厂	无烟煤	2009
19	福建龙岩坑口电厂	300	2	东方锅炉厂	无烟煤	2009
20	福建漳平电厂	300	2	东方锅炉厂	无烟煤	2009
21	京海煤矸石电厂	330	2	东方锅炉厂	烟煤+矸石	2009
22	宜昌东阳光火力发电有限公司	300	2	东方锅炉厂	烟煤	2009
23	内蒙古准能矿电有限责任公司	300	2	东方锅炉厂	烟煤	2009
24	神东电力新疆米东电厂	300	2	东方锅炉厂	烟煤	2009
25	神东电力河曲电厂	300	2	东方锅炉厂	烟煤	2009

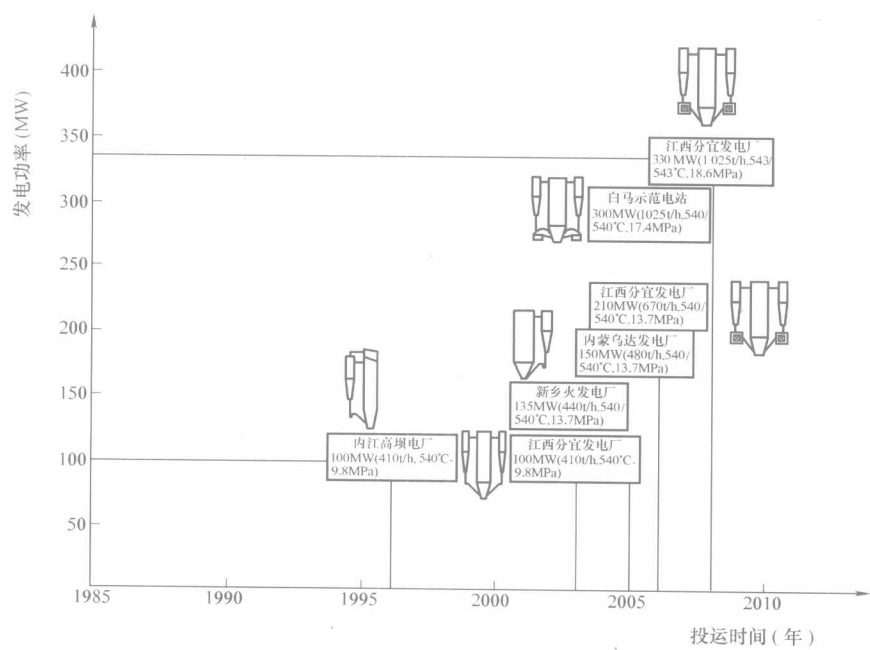


图 1-10 国内电站级 CFB 锅炉的发展历程

第二节 循环流化床锅炉热效率及环保特性

国内、外工程实践经验证明, CFB 锅炉具有能够稳定燃烧煤粉炉难以燃用的各种劣质煤、环保特性好、负荷调节范围广等技术优点, 对于含硫量特别高的燃料, 如石油焦(收到基硫分 $S_{ar} \geq 5\%$) 等特殊的高硫燃料, CFB 锅炉可达到的脱硫效率为 97.5%。

一、CFB 锅炉热效率

CFB 锅炉热效率和所燃用的煤质关系较大, 特别是煤的热值和灰分, 是影响锅炉热效率的主要因素。图 1-11 所示为 CFB 锅炉和煤粉炉适用的煤的热值范围, 煤粉炉一般适合燃烧低位热值大于 16.72MJ/kg (4000kcal/kg) 的煤种, 否则会出现灭火和燃烧不稳定等问题, CFB 锅炉可燃用热值大于 10.45MJ/kg (2500kcal/kg) 的任何煤种, 但目前国内 CFB 锅炉主要用于燃烧劣质煤, 即热值为 16.72MJ/kg 以下的煤种, 因此其热效率低于燃用热值 16.72MJ/kg 以上的煤粉炉的热效率。

图 1-12 所示为煤的低位热值和锅炉热效率的关系曲线, 低热值的劣质煤和高热值煤之间的热效率相差约 8%, 该差值主要是由热损失不同而引起的, 主要差别在于劣质煤的水分引起的排烟热损失和灰渣物理热损失均较大。对于 CFB 锅炉, 炉内脱硫后可允许采用更低的排烟温度, 有利于进一步提高锅炉的热效率。

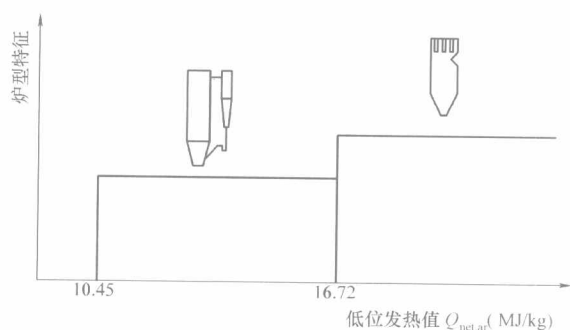


图 1-11 CFB 锅炉与煤粉锅炉适用的煤的热值范围

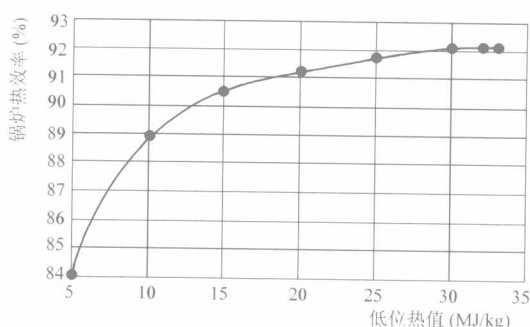


图 1-12 煤的热值和锅炉热效率的关系

表 1-3 列出了一些典型 CFB 锅炉热效率的测试结果, 容量从 100MW 到 300MW。从表中可知, 因煤的热值不同, CFB 锅炉热效率在 89.04%~93.29%之间变化。对于两例燃用褐煤的 CFB 锅炉, 即美国 Red Hills 电厂的 250MW CFB 锅炉和红河电厂的 300MW CFB 锅炉, 其热效率均在 93%以上, 主要是褐煤在 CFB 锅炉内具有极高的燃尽率, 底渣可燃物小于 0.61%, 飞灰可燃物小于 1%, 因此, 褐煤特别适用于 CFB 锅炉。对于 CFB 锅炉, 影响锅炉热效率的另一重要因素是煤的干燥无灰基挥发分 V_{daf} , 如用煤指数 CI 表征, 则 CI 定义为

$$CI = \frac{V_{daf}}{Q_{net, ar, p}} \quad (1-1)$$

式中 CI——煤指数, %/(MJ/kg);

V_{daf} ——煤的干燥无灰基挥发分, %;

$Q_{net, ar, p}$ ——煤的收到基低位发热量, MJ/kg。

表 1-3 典型 CFB 锅炉热效率

电厂及锅炉容量 (MW)	煤低位发热量 (MJ/kg)	煤收到基灰分 (%)	煤干燥无灰基挥发分 (%)	热效率 (%)
内江高坝发电厂 100	25.07	21.62	15.33	90.79
分宜发电厂 100	21.39	30.82	6.1	90.76
豫联电厂 135	21.21	26.97	14.09	90.19
义马电厂 135	17.21	27.71	42.48	92.75
内蒙乌达电厂 150	19.11	29.71	19.21	90.39
大电电厂 135	20.27	28.16	35.57	91.81
法国 Emile Huchet 电厂 125	20.3	28	干煤泥	89.5
分宜发电厂 210	15.42	44.64	16.16	89.04
波兰 Turow 电站 235	8.25	22.5	59.63	91
美国 Red Hills 电厂 250	10.72	14.64	53.86	93
美国 JEA 电站 300	28.61	6.89	64.22	92.6
红河电厂 300	12.43	11.45	50.68	93.26
白马示范电站 300	18.49	35.27	8.55	93.29
开远电厂 300	12.43	11.45	52.70	93.27

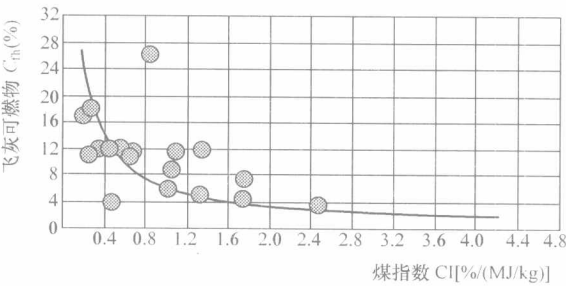


图 1-13 飞灰可燃物与煤指数的关系

多台 CFB 锅炉飞灰可燃物的测试结果与 CI 的关系曲线如图 1-13 所示。煤指数 CI 越大，则飞灰可燃物越低。

对于无烟煤，煤指数小于 0.5，在 CFB 锅炉上燃烧时飞灰可燃物为 10% 左右。降低无烟煤飞灰可燃物的技术措施是在设计 CFB 锅炉时适当提高炉膛温度。该技术措施可不必采用如煤粉炉提高煤粉细度的方法，因此不会带来厂用电率升高的不利

影响。

二、脱硫效率及 NO_x 排放值

石灰石 (CaCO₃) 和白云石 (CaCO₃ · MgCO₃) 是用于 CFB 锅炉的两种主要的二氧化硫脱硫剂。

石灰石在 CFB 锅炉炉内的脱硫过程分两步完成，脱硫原理如图 1-14 所示。石灰石首先要进行煅烧，吸热分解为 CaO 和 CO₂，即



石灰石煅烧时二氧化碳的析出会产生并扩大石灰石中的孔隙，为后续脱硫反应提供更大的反应表面。煤燃烧过程生成的 SO₂ 和 CaO 的反应式为



CFB 锅炉脱硫效率定义为投入石灰石后 SO₂ 脱除量与未投石灰石时煤中硫分完全转化

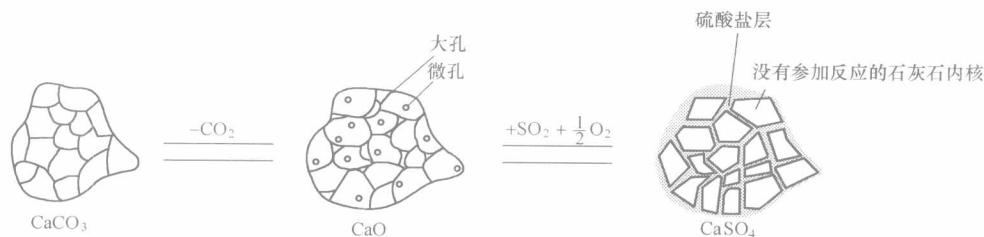


图 1-14 石灰石脱硫原理

为 SO_2 时原始排放值的比值, 即

$$\eta_s = \frac{C_{\text{SO}_2}^0 - C_{\text{SO}_2}}{C_{\text{SO}_2}^0} \times 100 \quad (1-4)$$

式中 η_s ——脱硫效率, %;

$C_{\text{SO}_2}^0$ —— SO_2 原始排放值, mg/m^3 ;

C_{SO_2} ——投入石灰石后 SO_2 排放值, mg/m^3 。

$C_{\text{SO}_2}^0$ 可用式 (1-5) 计算, 即

$$C_{\text{SO}_2}^0 = \frac{2S_{\text{ar}}}{V_{\text{gy}}} \times 10^4 \quad (1-5)$$

式中 S_{ar} ——煤的收到基含硫量, %;

V_{gy} ——标准状况下干烟气的体积, m^3/kg 。

12 台容量为 100~300MW 的 CFB 锅炉脱硫效率及 SO_2 和 NO_x 的排放值列于表 1-4。由表中可知, 对于含硫量 S_{ar} 小于 1% 的煤种, 在 Ca/S 为 2.2 左右时, 其脱硫效率约为 83%, SO_2 排放值可控制在 $400\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。对于含硫量大于 1% 的煤种, 其脱硫效率可达 90% 以上, 最高可达 97.5%。

表 1-4 CFB 锅炉排放特性

电厂及锅炉容量 (MW)	煤的含硫量 S_{ar} (%)	Ca/S	脱硫效率 (%)	SO_2 (mg/m^3)	NO_x (mg/m^3)
内江高坝发电厂 100	3.12	2.4	93.7	268	78
分宜发电厂 100	0.58	2.3	81	386	114
济宁运河电厂 135	0.76	2.3	89.3	322	123
华能济宁电厂 135	2.41	3.9	93.2	392	119
山东华宇铝电有限公司 135	2.05	2.6	97.3	144	95
大屯电厂 135	0.75	2.2	83.74	296.7	51.5
宜宾电厂 150	3.78	2.48	94.5	680	16.6
美国 Red Hills 电厂 250	0.41	3.1	95	123	140
美国 JEA 电站 300	5.34	1.7	97.5	249	86
红河电厂 300	1.66	2.22	94.3	395	126
白马示范电站 300	2.55	1.69	94.7	550	90
开远电厂 300	2.03	1.97	94.5	392.5	93

根据西安热工研究院有限公司 (TPRI) 的研究, 对于同一种煤和石灰石, 其脱硫效率可用式 (1-6) 表示, 即

$$\eta_s = 100 - Ae^{-k(Ca/S)} \quad (1-6)$$

式中 η_s ——脱硫效率, %;

A ——煤的自脱硫能力系数, 对南川煤为 80.8;

k ——石灰石脱硫性能指数, 除与石灰石反应性能有关外, 还与煤中含硫量有关, 在燃用四川南川煤 ($S_{ar}=3.69\%$) 时, 对董家堰石灰石为 0.860 3, 对张家沟石灰石为 0.765 4, 对桥亭子石灰石为 0.790 7。

由式 (1-6) 可知, 脱硫效率随 Ca/S 增加而呈指数规律增大。图 1-15 所示为一典型的石灰石脱硫曲线, 对于特定的煤和石灰石, 适当增加 Ca/S 提高脱硫效率, 是满足更严格的环保排放标准的技术措施之一。内江高坝电厂 100MW CFB 锅炉在 1998 年性能考核时 SO_2 排放值为 $684\text{mg}/\text{m}^3$, Ca/S 为 2.2, 脱硫效率为 90%。进一步的脱硫试验表明, 当 Ca/S 增加到 2.4 时, 脱硫效率为 93.7%, SO_2 排放值为 $268\text{mg}/\text{m}^3$, 达到了 GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》的要求。

以热值为 $21.98\text{MJ}/\text{kg}$ 的煤为例, 对于不同含硫量的煤, SO_2 排放值达到 $400\text{mg}/\text{m}^3$ 时, CFB 锅炉所应达到的脱硫效率如图 1-16 曲线所示, 对于 S_{ar} 为 3% 的煤, 脱硫效率应达到 94.5%。

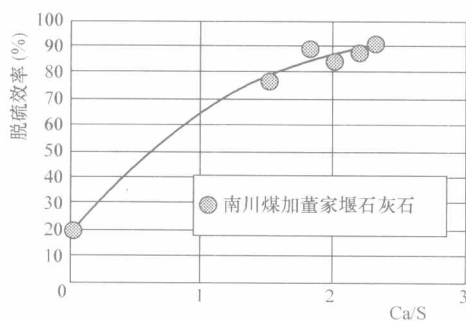


图 1-15 脱硫效率与钙硫比的关系

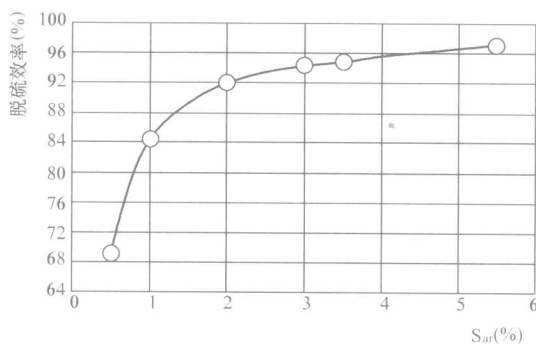


图 1-16 煤的含硫量和脱硫效率的关系

CFB 锅炉脱硫运行成本比煤粉炉尾部烟气脱硫 (FGD) 低 50% 以上, 而投资最多与煤粉炉加 FGD 持平, 在不需采用其他技术措施的条件下, 可将 NO_x 排放值减少至 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 以下。典型的工程实例是分宜发电厂首台国产 100MW CFB 锅炉燃用贫煤时, 其 NO_x 排放值为 $114\text{mg}/\text{m}^3$; 内江高坝电厂 100MW CFB 锅炉燃用贫煤时, 其 NO_x 排放值为 $78\text{mg}/\text{m}^3$; 红河电厂 300MW CFB 锅炉燃用云南小龙潭褐煤时, 其 NO_x 排放值为 $126\text{mg}/\text{m}^3$ 。上述 CFB 锅炉的排放值是目前其他低 NO_x 燃烧技术还难以达到的排放指标, 就目前最具发展潜力的超细粉再燃技术而言, 国内 600MW 燃用褐煤的煤粉炉的工程示范表明, 其 NO_x 排放值可达到的最低值为 $243\text{mg}/\text{m}^3$, 仍高于 CFB 锅炉。

以下两个重要因素影响 CFB 锅炉的脱硫效率, 需在 CFB 锅炉工程应用时予以重视, 否则会影响脱硫效果。

(1) 石灰石的反应活性。石灰石反应活性的差别主要是石灰石的微孔结构不同。非晶体型石灰石是由小块碳酸钙晶体黏结在一起形成的非晶体结构, 煅烧后形成的微孔多, 比表面