

42127 /

国外火力发电设备 技术考察总结

(第一分册)

锅 炉

一机部火电技术工作组编

一机部上海发电设备成套设计研究所印

一九八〇年

T.022-43
3
221

前 言

1979年6月2日至7月26日第一机械工业部火电技术工作组赴美国通用电气公司、燃烧工程公司、瑞士勃朗鲍维利公司、苏尔寿公司、法国阿尔斯通——大西洋公司、斯坦工业公司和西德勃朗鲍维利公司，为引进大型机组制造技术进行了比较深入的技术核查工作。在核查工作过程中，工作组的专业成员也对美、瑞、法等国有关电厂成套设计的技术工程公司和其他制造厂的有关部门进行了参观访问。为了比较深入地核查各有关公司产品的实际运行情况，各制造公司还安排了十几个电站的访问。

为了使技术工作组在技术核查过程中所获得的有关资料，能够迅速在我国进一步发展大型成套火力发电设备的实际工作中得到充分利用，由技术工作组成员和有关单位人员编写了这份“国外火力发电设备技术考察总结”，共有四分册：

- | | |
|------|------------|
| 第一分册 | 锅炉 |
| 第二分册 | 汽轮机 |
| 第三分册 | 发电机 |
| 第四分册 | 电站自动化和成套设计 |

由于“总结”中涉及到一些各制造公司的商业秘密范围以内的考察和数据，请各使用单位作为内部资料予以管理。本“总结”中的某些内容由于条件所限，未能详细核实，各单位引用时应谨慎对待。同时在编写过程中，由于时间紧迫，水平有限，错误在所难免，望读者谅解。

1979年10月

A 791792



目 录

前 言

第 一 章 美国火力发电发展趋势	1
一、发展趋势	1
二、锅炉机组可用率	4
第 二 章 美国燃烧工程公司 (CE) 锅炉	6
一、CE 公司大锅炉生产情况	6
二、CE 公司控制循环锅炉特点	7
三、几台 CE 锅炉实例	22
第 三 章 美国拔柏葛公司 (BW) 锅炉	27
一、产品概况	27
二、产品设计动向	31
三、130 万千瓦机组简介	48
第 四 章 美国福斯特—惠勒公司 (FW) 锅炉	53
一、锅炉生产概况	53
二、锅炉结构特点	54
三、锅炉示例	54
四、现代锅炉设计的若干问题	56
第 五 章 瑞士苏尔寿公司 (Sulzer) 锅炉	59
一、锅炉生产概况	59
二、苏尔寿公司锅炉主要特点	60
三、苏尔寿立式水冷壁全负荷再循环锅炉示例	62
第 六 章 法国斯坦工业公司 (SI) 锅炉	72

一、锅炉生产概况	72
二、SI 公司锅炉特点	72
三、锅炉设计趋向	81
四、SI 公司制粉系统和燃烧设备	81
五、实例	83
 第 七 章 锅炉制造公司简介、设施及工艺	86
一、美国 CE 公司	86
(一)概况	86
(二)锅炉主要部件制造工艺	87
二、美国 BW 公司	106
(一)简介	106
(二)锅炉主要部件制造工艺及设施概况	107
三、美国 FW 公司	113
(一)简介	113
(二)丹斯维尔厂生产车间概况	114
(三)丹斯维尔厂主要工艺设备介绍	115
(四)蒙吞托普工厂概况	118
四、瑞士苏尔寿公司	119
(一)简介	119
(二)锅炉制造工艺及设施概况	119
五、法国斯坦工业(SI)公司	120
(一)简介	120
(二)SI 公司某些专用设备概述	121
 第 八 章 空气预热器	124
一、CE 容克式预热器	124
二、CE 预热器公司简介、设施和工艺	132
三、洛特缪勒 (Rothemühle) 预热器	135
四、洛特缪勒公司简介、设施和工艺	142
 第 九 章 中速磨煤机	145
一、几个国家的中速磨煤机概况	145
二、各型中速磨煤机的主要特点	145

三、中速磨煤机的制造	149
第十章 科研动态与发展	152
一、美国燃烧工程公司(CE)	152
(一) KDL 发展试验室	152
(二) MML 试验室	154
(三) 科研动向	155
(四) 公司计算中心	158
二、美国拔柏葛公司(BW)	158
(一) 科研动向	158
(二) 燃料、灰渣特性方面的研究	159
三、瑞士苏尔寿(Sulzer)公司技术发展部	161
(一) 化学与腐蚀试验研究室	161
(二) 振动、噪音试验研究室	161
(三) 阀门与控制试验室	161
四、法国斯坦工业(SI)公司试验室	161
五、回转式空气预热器试验研究	162
第十一章 结束语	163
一、锅炉设计方面的趋势	163
二、制造及管理方面的趋势	164
附 录	
1. CE 恰塔努加厂厂区面积及设施情况	166
2. CE 东芝加哥厂厂区面积及设施情况	175
3. CE 默诺加希拉厂厂区面积及设施情况	177
4. CE 圣路易厂厂区面积及设施情况	180
5. CE 空气预热器公司威尔斯维尔一厂厂区面积及设施情况	181
6. CE 空气预热器公司威尔斯维尔二厂厂区面积及设施情况	182
7. CE 空气预热器公司马律英厂厂区面积及设施情况	184
8. 生产模数分仓式预热器所需设备	185
9. CE三个厂生产模数分仓式预热器所用面积	186

第一章 美国火力发电发展趋势

一、发展趋势

1. 从电能增长方面

美国从1968年到1977年电能增长速度见图1—1。从图中可以看出,从1968年到1974

年每年增加发电设备功率是较多的, 最高是1973年, 增加功率高达6500万千瓦。从1975年开始订货急剧下降。原子能发电设备的订货与火力发电比例, 从1971年开始, 原子能发电设备功率大于或接近火力发电设备的比例。

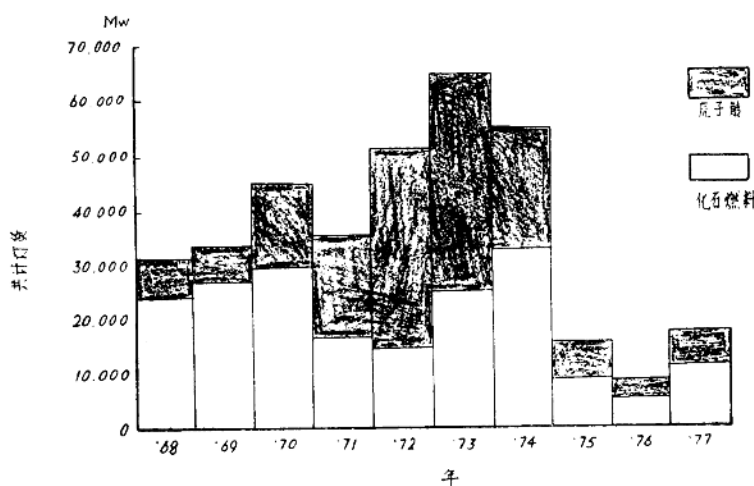


图1—1 美国公用事业电站电能订货容量

2. 从燃料组成方面

图1—2为美国火力发电机组化石燃料的使用分类。从1974年开始, 订货的锅炉几乎全部按煤设计, 而在1974年以前, 油和气的比例占总的燃料消耗量较大, 特别是1970年和1971年, 油和气两者之和高达50~60%。世界性的能源危机严重地影响了火力发电设备的增长, 同时也决定了今后的能源政策。火力发电过渡到燃用劣质燃料。

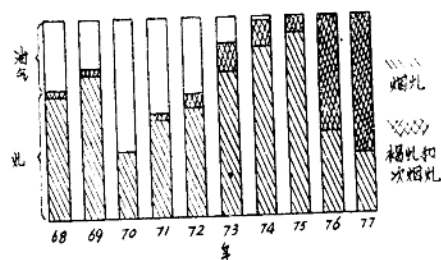


图1—2 化石燃料机组使用燃料的分类

3. 从机组容量方面

图 1—3 为化石燃料机组功率按年份的分类。从1968年以来总的趋势是大机组占的比例较多。60万千瓦机组及大于60万千瓦机

组约占 35~75%。最多的是 1973 年，这一级的机组约占总容量的 75%。其次是 40 万千瓦到 59.9 万千瓦机组占的比例也较大，20 万千瓦以下的机组占不到 10%。目前平均容量为 45~70 万千瓦。

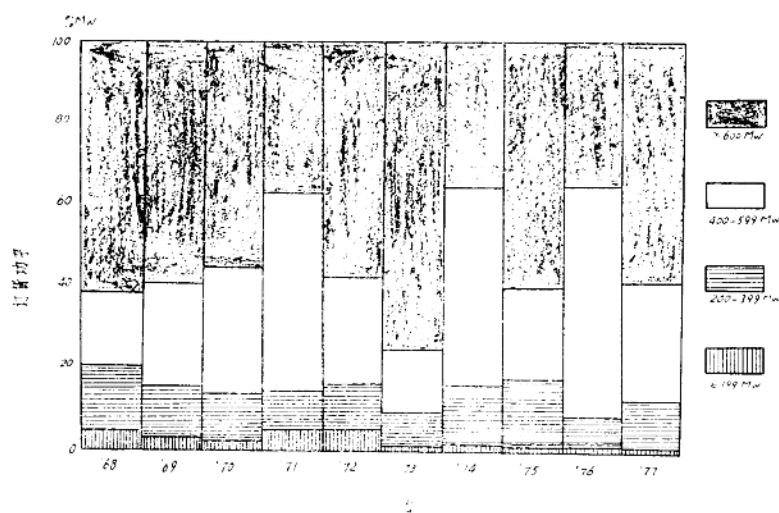


图1—3 化石燃料机组功率分类

4. 从蒸汽压力方面

图 1—4 为化石燃料机组的蒸汽压力分

类。由于原子能电站大量投运，电网中要求有一定数量的火力发电机组作调峰用。因此美国从1970年以来订购了大量参数较低的汽

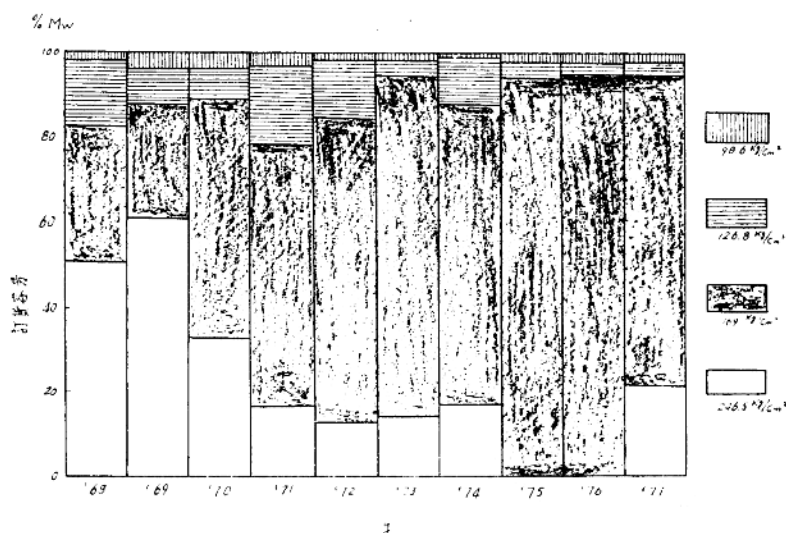


图1—4 化石燃料机组蒸汽压力分类

包锅炉调峰机组。此外, 根据实际运行经验, 超临界机组的可用率较低, 所以近几年来蒸汽压力采用亚临界参数, 169 kg/cm^2 占绝大部分。

5. 从蒸汽温度方面

图 1—5 为化石燃料机组按蒸汽温度分类。目前把发电设备的可靠性放到首要位置, 虽然提高蒸汽温度对热效率有明显的效

果, 但是根据钢材供应情况和性能, 保持在 $538/538^\circ\text{C}$ ($1000/1000^\circ\text{F}$) 是总的发展趋势。

6. 从循环方式方面

图 1—6 为在亚临界压力 (169 kg/cm^2) 下按循环方式的分类。美国从 1972 年以来, 在亚临界压力时很少采用直流炉, 大量采用控制循环和自然循环汽包炉。

此外, 据美国 BW 公司介绍, 由于 UP 锅

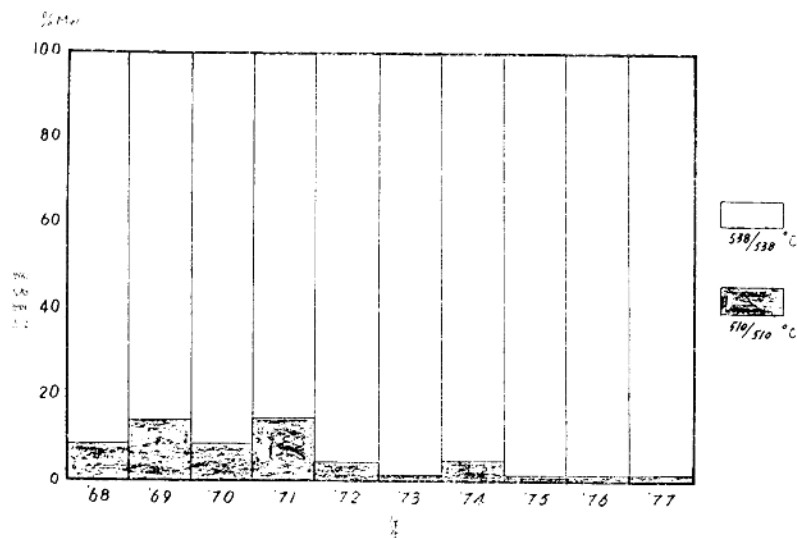


图1—5 化石燃料机组蒸汽温度分类

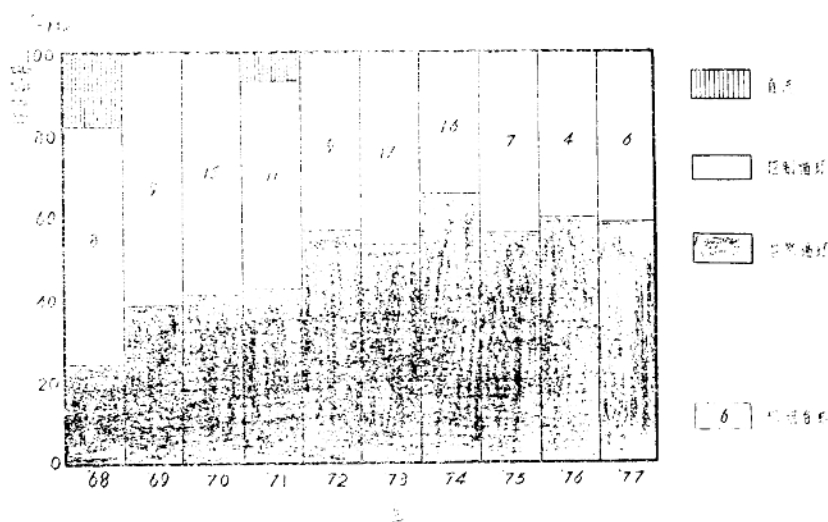


图1—6 压力 169 kg/cm^2 时按循环方式分类

炉制造成本较高和变压运行有困难，因此已不再发展垂直上升的 UP 型直流锅炉。

7. 从炉膛压力方面

图 1—7 为仅 CE 公司统计炉膛负压和

正压的分类。从1972年以来，几乎 CE 公司设计的锅炉均按负压考虑。这是由于微正压燃烧可用率低，对燃油锅炉也一样，而燃煤微正压锅炉运行中问题更多。

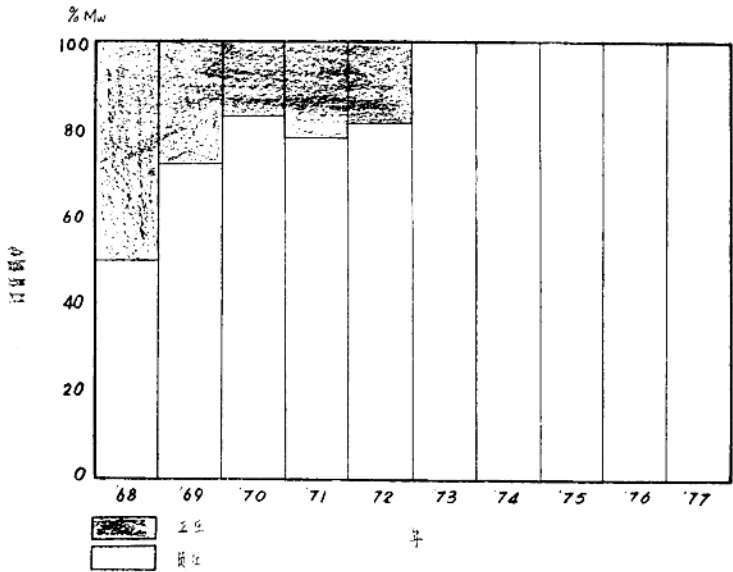


图1—7 CE 公司统计锅炉炉膛压力分类

二、锅炉机组可用率

锅炉机组可靠性用以下方法计算

$$\text{可用率} = \left[\frac{\text{可以使用的小时数}}{\text{周期小时数}} \right] \times 100\%$$

$$\text{强迫停炉率} = \left[\frac{\text{强迫停炉小时}}{\text{使用小时} + \text{强迫停炉小时}} \right] \times 100\%$$

$$\text{维修时间} = \left[\text{维修停炉小时} + \text{计划停炉小时} \right] \div 24 \text{小时/天}$$

汽包炉和直流炉强迫停炉比较见图 1—8。

在美国，直流炉主要是超临界参数，因此上述可用率实际系亚临界汽包炉和超临界直流炉的比较，由于超临界直流炉目前可用率较低，因此在美国国内现在大量订购亚临界的汽包锅炉。

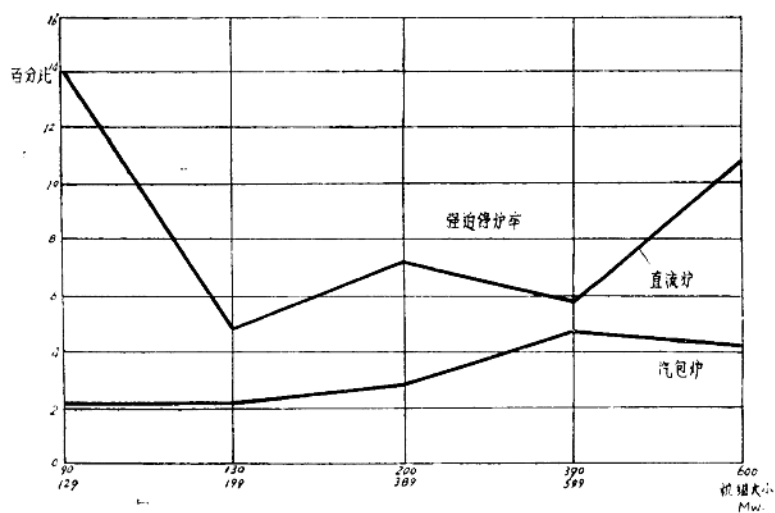


图1—8 汽包炉和直流炉强迫停炉比较

第二章 美国燃烧工程公司(CE) 锅炉

一、CE公司大锅炉生产情况

CE公司生产的功率大于30万千瓦以上的锅炉至78年止合计238台。从32.5万千瓦

到100万千瓦锅炉机组第一台产品的参数、制造和投运年份如下表。

在238台产品中,其中100万千瓦3台,90万千瓦3台,60~89万千瓦77台,其余为30~60万千瓦机组。

功 率 (万千瓦)	参 数 kg/cm ² -℃	制 造 年 份	投 运 年 份
第一台 32.5	351.6—654/565/565	1954	1960
第二台 32.5	140.6—565/565	1955	1958
第一台 50	168.7—567/539	1957	1961
第一台 90	246—539/539	1961	1967
第二、三台 90	246—539/539	1963	1967; 1968
第一台 100	168.7—538/538	1961	1965

锅炉机组功率从60~89万千瓦每年生产台数见图2—1。

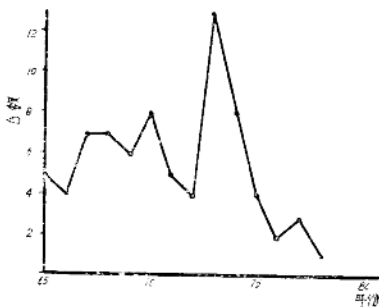


图2—1 CE公司生产的功率60~89万千瓦锅炉每年生产台数

从上面统计数字可以看出以下特点:

1. 第一台32.5万千瓦机组由于选用参数太高,投运时间比第二台降低参数的32.5万千瓦机组投运时间推迟了二年。据资料报导,投运以后,机组事故率较高。

2. 功率大于89万千瓦的机组, CE公司

共生产了6台,从1963年以后生产的机组功率均小于90万千瓦。

3. 从1965年到1978年期间, CE公司共生产了60~89万千瓦锅炉77台,而1973年产量达到了顶峰,共13台。1975年以后大功率机组生产大幅度降低,每年仅生产1~3台。主要原因是受到经济危机以及能源危机的影响,另一方面,由于容量加大后可靠性方面还存在一定问题。

CE公司所生产的大功率机组主要采用控制循环锅炉和复合循环锅炉。在超临界参数时采用复合循环,而亚临界时采用控制循环。据初步统计 CE公司复合循环锅炉共生产了54台。按功率分的台数为:

<60万千瓦	18台
60~70万千瓦	18台
>70<100万千瓦	16台
100万千瓦	2台

复合循环锅炉的参数为:

压力为 255~271 kg/cm²

温度为 538/538~543/570°C

其中有两台锅炉为两次中间再热机组，
其参数为：269—541/544/546；255—541/
554/568。

二、CE 控制循环锅炉特点

CE 公司介绍控制循环锅炉有一系列的
优点，它与其他循环方式锅炉作如下比较。

控制循环和亚临界直流锅炉比较，在投
资方面可以节约。

1. 不需要旁路系统；
2. 不要求全流量除盐的冷凝水；
3. 给水系统压力较低；
4. 冷凝器不需要防止泄漏的特殊结构；
5. 燃烧和给水控制简单；
6. 可以使用蒸汽吹灰器（直流锅炉水质
比较好，采用蒸汽吹灰不经济）；
7. 启动时不需要开动锅炉给水泵。

控制循环和亚临界直流锅炉在运行方面
的比较。

1. 给水泵功率较低；
2. 启动和低负荷旁路热损失较少；
3. 可以降低维修投资；

4. 能够容许给水扰动；
5. 运行简单；
6. 运行可用率较高；
7. 直流锅炉不容许有运行过失。

此外，CE 公司认为，在锅炉启动过程
中，控制循环锅炉由于汽包内部设备采用夹
层结构，上、下壁温差比自然循环汽包炉
大大减小。图 2—2 为自然循环汽包炉启
动时温度曲线。上、下壁温差最大可高达~
200°F (111°C)。

图 2—3 为控制循环汽包锅炉启动时汽
包壁温度曲线。从图中可知，锅炉从启动到
带负荷，汽包上、下壁温度基本上一致。

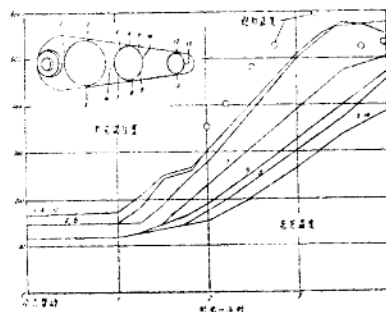


图2—2 自然循环汽包炉启动时汽包壁温曲线

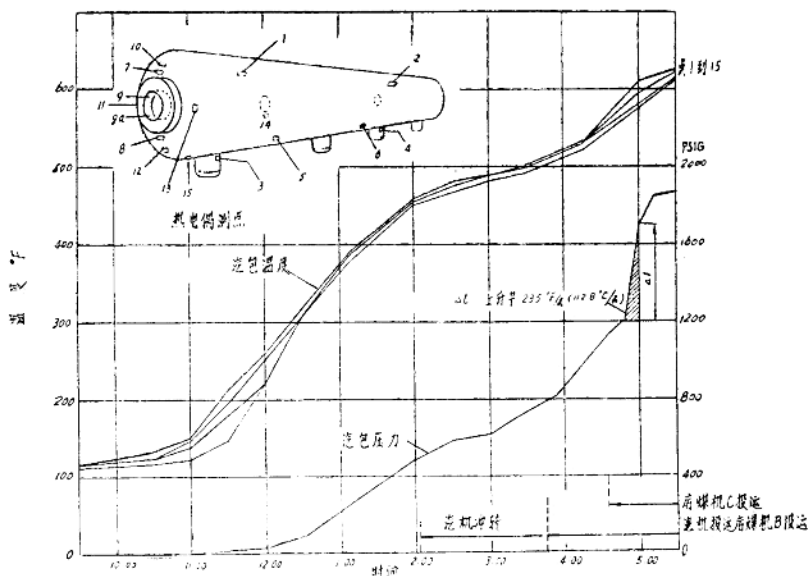


图2—3 控制循环汽包炉启动时汽包壁温曲线

1.CE 锅炉设计数据

(1) 美国典型的煤质分析

美国锅炉的设计煤种主要是烟煤、次烟煤和老年褐煤(Lignite)，主要特性如下：

		东部烟煤	中西部烟煤	次烟煤	Texas 褐煤	North Dakota 褐煤
总水份	%	5	15.4	30	31	39.6
灰份	%	10.3	15	5.8	10.4	6.3
挥发份	%	31.6	33.1	32.6	31.7	27.5
固定碳	%	53.1	36.5	31.6	26.9	26.6
合计		100	100	100	100	100
发热值(工作质)	Kcal/kg	7356	5834	4514	4217	3624
	Btu/lb	(13240)	(10500)	(8125)	(7590)	(6523)
发热值(可燃质)	Kcal/kg	8690	8390	7023	7189	6695
	Btu/lb	(15640)	(15100)	(12650)	(12940)	(12050)
硫	%	1.8	3.2	0.34	0.6	0.75
水份	lb/MBtu	3.8	14.7	36.9	40.8	60.7
灰份	lb/MBtu	7.8	14.3	7.1	13.7	9.7
硫	lb/MBtu	1.36	3.05	0.42	0.79	1.15
哈氏可磨度系数		55	56	43	48	25*

* 在磨煤机入口用水份39.6%，哈氏可磨度系数为20—50。

煤灰的分析数据：

		东部烟煤	中西部烟煤	次烟煤	Texas 褐煤	North Dakota 褐煤
SiO ₂	%	40	46.4	29.5	46.1	23.11
Al ₂ O ₃	%	24	16.2	16	15.2	11.29
Fe ₂ O ₃	%	16.8	20	4.1	3.7	8.48
CaO	%	5.8	7.1	26.5	16.6	23.75
MgO	%	2	0.8	4.2	3.2	5.87
Na ₂ O	%	0.8	0.7	1.4	0.4	7.38
K ₂ O	%	2.4	1.5	0.5	0.6	0.7
TiO ₂	%	1.3	1	1.3	1.2	0.45
P ₂ O ₅	%	0.1	0.1	1.1	0.1	—
SO ₃	%	5.3	6	14.8	12.7	17.69
未计及部分	%	1.5	9.2	0.6	0.2	1.28
B/A率		0.426	0.473	0.784	0.392	1.33
Fe/Ca率		2.9	2.82	0.155	0.223	0.355
灰熔点温度	ID℃	1188	1088	1204	1135	1103
(还原性)	ST℃	1232	1160	1232	1204	1143
	FT℃	1338	1254	1254	1266	1206

美国煤灰熔点温度由图

2—4表示。

图中符号：

2—IT 开始变形温度

3—ST 软化温度 (H = W)

4—HT 半球形温度 (H = $\frac{1}{2}$ W)

5—FT 液化温度

(2) 炉膛设计

CE 公司在设计炉膛尺寸时，主要控制以下几个指标：

(a) 炉膛截面热负荷 NHI/PA。根据固体燃料的不同特性，CE 公司对大容量机组采用从 1.4×10^6 到 2.0×10^6 Btu/ft²h (3.8 ~ 5.4×10^6 Kcal/m²h)。

(b) 从燃烧器上排燃料喷嘴到炉膛出口 (指屏式过热器下方) 距离。这段距离取决于机组的容量和燃料的特性。现在的设计范围从 45 呎 (13.7 米) 开始，对于大机组则大于 60 呎 (18.3 米)。

(c) 炉膛出口温度。CE 公司设计时一般取为 $T_A 1950^\circ\text{F}$ (1066°C)，但必须 $T_A < IT$ 。(见图 2—5)。

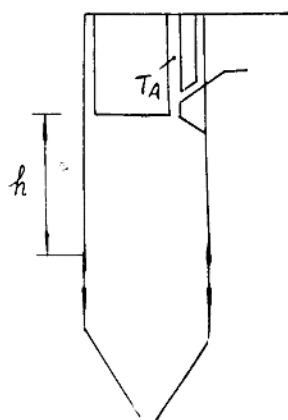


图2—5 炉膛出口温度

美国能源政策近年来逐步趋向于火力发电站采用差的煤质，灰份增加，改变了过去燃油、气和好的烟煤的指导思想。因此目前新设计的锅炉，炉膛截面、炉膛高度及相

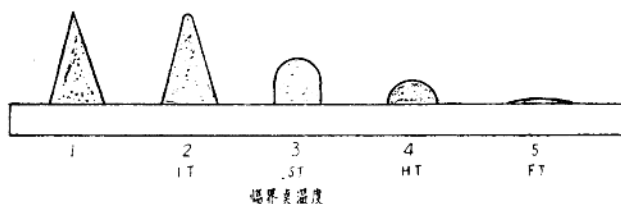


图2—4 灰熔点温度示意图

应的炉膛容积都比以前有所增加。如一台燃煤锅炉1963年和目前设计的比较：

	1963年	目 前
炉膛截面(米)	13.228 × 27.432	13.716 × 27.432
上排喷燃器至炉膛出口高度h(米)	12.192	15.240
冷灰斗至顶棚管高度(米)	50.292	53.340

根据目前的标准，例如50万千瓦燃煤锅炉炉膛比以前：

炉膛受热面要增加 16%

炉膛容积要增加 28%

CE 公司认为锅炉最大的单炉膛截面为 70' × 70' (21.336 × 21.336 m)，主要由于吹灰器长度的限制。当大于 72' (21.945 m) 时，从目前情况看来要采用双炉膛。对于 70' × 70' 的单炉膛，不同的燃料大致可达到以下功率：油炉90万千瓦，烟煤炉70万千瓦，褐煤炉60万千瓦。对于不同煤种的炉膛截面的选择影响较大，图 2—6 为不同煤种60万千瓦锅炉机组的炉膛尺寸。

(3) CE 锅炉采用的烟气速度及受热面节距

(a) 在70万千瓦锅炉中采用的烟速：

油炉为 120呎/秒 (36.6 m/s)

煤炉为 45~65呎/秒 (13.7~19.8 m/s)

(b) 燃煤炉受热面顺排时：

大屏区 15~20m/s

后屏区 12~14m/s

对流受热面区 10m/s

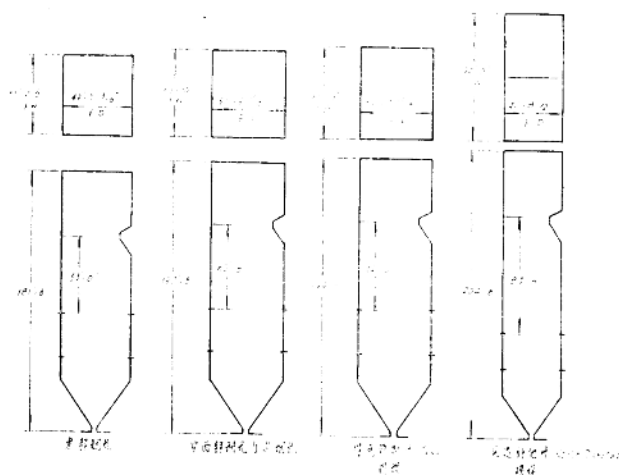


图2—6 不同煤种的60万千瓦炉膛尺寸比较

(c) 煤的含灰量高达40%时:

过热器、省煤器中最大烟速 $W_{\max} = 11$

m/s。

煤的含灰量在14~20%时, 最大烟速为

50~60呎/秒(12.24m/s~18.3m/s)。

CE公司锅炉对流受热面烟道的节距:

(d) 螺旋鳍片管式省煤器:

烟 温 ℃ 区	非 粘 结 煤	易 粘 结 煤
1315—1093	屏—间距22"(558.8mm)	屏—间距22"(558.8mm)
1092—954	管排—间距7"(177.8mm)	屏—间距12"(304.8mm)
953—788	管排—间距3"(76.2mm)	管排—间距5"(127mm)
787—649	管排—间距2"(50.8mm)	管排—间距3"(76.2mm)
648—427	鳞片管省煤器	光管省煤器

最大烟气速度——非粘结煤21.4 m/s

——易粘结煤12.24 m/s

上述烟速系指在每组管排入口处的流速, 我国习惯上按受热面进、出口平均值计算, 两者在数值上有差异。

此外, 上表所给出的不同烟温下的管排间距系指管间距离, 管子节距必须加上管径。

2. CE 控制循环锅炉结构特点

CE 公司典型的控制循环锅炉整体布置见图 2—7 所示。锅炉为双烟道布置, 炉膛上部布满屏式过热器, 省煤器为单级布置,

空气预热器采用回转式。锅炉各部分的结构特点分析讨论如下:

(1) 摆动式燃烧器

CE 公司的锅炉产品除燃用无烟煤外均采用四角布置切圆燃烧摆动燃烧器的燃烧方式。在单炉膛中, 一台磨煤机接对应的同一层燃烧器。四角四个燃烧器同时向上或向下摆动。在双炉膛中, 一台磨煤机接八个燃烧器的同一层喷嘴, 两个炉膛允许单独摆动, 来消除两炉膛的烟气在对流受热面中的偏差。

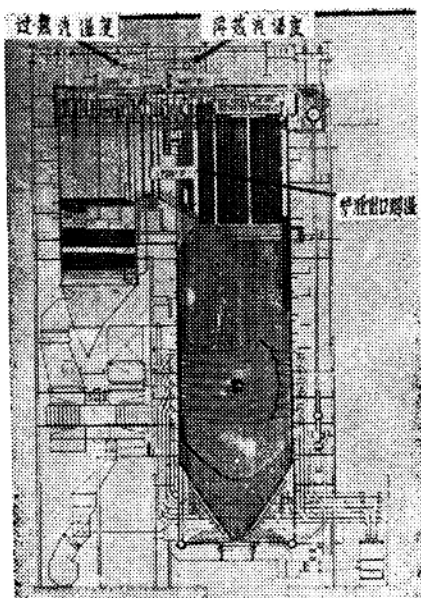


图2-7 CE 控制循环锅炉

CE公司的观点,四角燃烧方式炉内空气动力场和烟气温度的分布都比前墙或前、后墙对冲布置的圆形燃烧器为好。圆形燃烧器火焰温度太高,致使水冷壁局部热负荷很高。

四角切圆燃烧方式适应范围问题,CE公司认为,当煤的灰份不太高时,工质挥发份允许到13%。对于低挥发份的无烟煤必须采用“W型”炉膛。图2-8为一台蒸发量735t/h,温度567/566℃燃用低挥发份煤的锅炉总图。

这种锅炉布置的主要特点是采用双“U型”火焰,提高炉膛燃烧器区域的温度水平,使低挥发份煤的着火和燃烧稳定。

CE公司生产的角式燃烧器,其壳体焊在水冷壁上,随水冷壁一起向下膨胀。在煤粉管及二次风管上装有膨胀节,补偿热膨胀。

目前设计的最高燃烧器有十一层,每层喷咀的输出功率可达10万千瓦负荷。

关于摆动喷咀对 q_4 的影响问题,CE公司认为四角切圆燃烧,煤粉在炉膛中可转

2~8圈,可以达到燃烬。同时在炉膛设计时,将燃烧器上层喷咀中心线到屏下的距离留有足够的高度,延长了煤粉在炉膛中停留的时间。因此认为摆动时对 q_4 无影响。

据CE公司介绍,按高位发热值测得的 q_4 值:

切圆燃烧:烟煤 $q_4 = 0.25\%$

褐煤 $q_4 = 0.15\%$

BW和FW公司前、后墙布置燃烧器:

烟煤 $q_4 = 0.50\%$

摆动燃烧器在向下摆动时,为了避免烟气冲刷灰斗,故燃烧器布置位置较高。在燃烧器和灰斗之间可装设吹灰器。

燃烧器可以上、下摆动各 30° ,设计位置为 0° 。

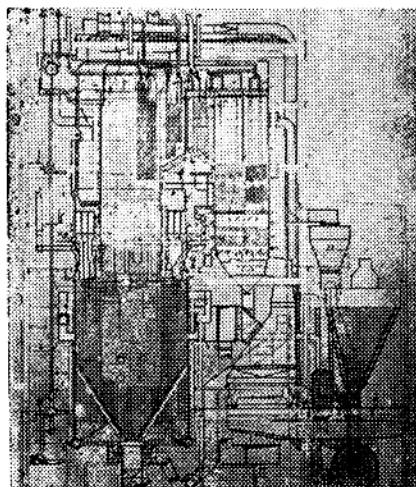


图2-8 735 t/R 锅炉总图

图2-9为燃烧器示意图,在燃烧器上部布置有上二次风(Overfire air),从试验得到证明,上二次风对降低氧化氮的产生是十分有效的。上二次风约为燃烧总空气量的15%。

(2)再热蒸汽调温方式

CE公司除燃用低挥发份的无烟煤时用

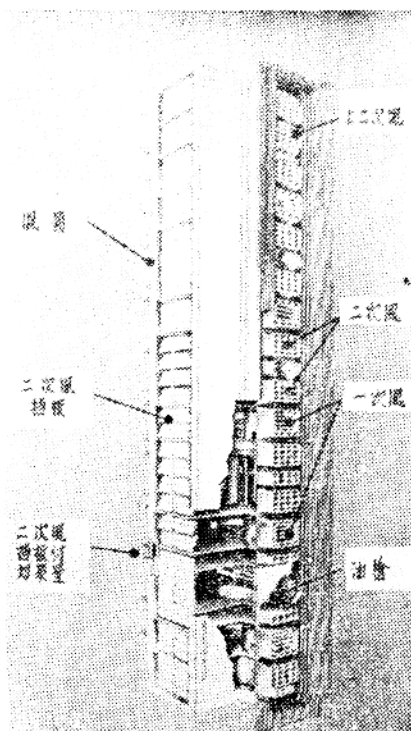


图2—9 燃烧器示意图

挡板+烟气再循环和燃油时用烟气再循环外，其它燃料一般都采用摆动燃烧器调整炉膛中火焰位置来达到调节再热蒸汽温度。当燃烧器从水平位置向上摆动30度时，炉膛出

口烟气温度提高 $\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。燃烧器从水平位置下摆30度时，炉膛出口温度降低 $\sim 38^{\circ}\text{C}$ 。

利用摆动火嘴作为二次汽温调节手段，一般要求再热器受热面布置在高的烟温区。CE公司在采用这种调温方式时均在炉膛出口布置对流再热器和炉膛上部布置辐射式再热器。蒸汽温度调节范围在65~100%负荷内保持额定汽温。

(3) 循环系统的特点

CE公司循环方式见图2—10。即自然循环，控制循环和超临界复合循环。复合循环是CE公司从苏尔寿公司引进直流锅炉技术后发展起来的一种循环方式。

各种循环方式使用于不同的压力：自然循环用于 $\leq 140 \text{ kg/cm}^2$ ；控制循环用于亚临界；复合循环用于超临界机组。控制循环和复合循环在水循环系统中均装有再循环泵。对循环泵运行方式而言，主要差别在于前者锅炉全部负荷范围内均投入循环泵，而后者仅在锅炉负荷约 $\sim 85\%$ D以下时投运。当负荷高于85% D时，循环泵自动切除。

由于循环泵的特性，水冷壁内工质的重量流速在各种负荷下可以保持变化不大，这样能够获得良好的水循环特性。对复合循环来说，在锅炉额定工况时，水冷壁的重量流速选择不必考虑很高，仅保证85~100%范

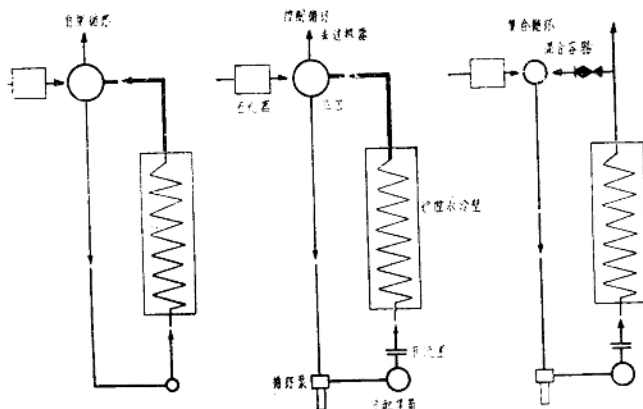


图2—10 CE公司循环方式