

# 超临界压力 火力发电技术

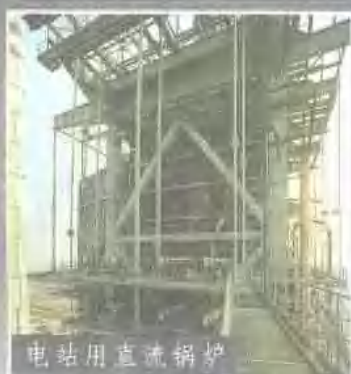
杨立洲 主编



燃气/蒸汽联合循环发电装置



苏尔寿爱雪维斯公司制造的蓄能发电水轮机



电站用直流锅炉



海上天然气平台的燃气轮机式压缩机



火力发电站用锅炉给水泵



热电站高压旁路系统

上海交通大学出版社

T.M 611  
Y20

01.1441

# 超临界压力火力发电技术

杨立洲 主编

## 作 译 者

杨立洲 陈尚文 伍能一 郑云之 张忠义  
徐仁德 虞月瑾 吉留林 刘文进  
乐海南 麦春生 何家宝 张 凯 钟林龙

审

杨立洲 宋光裕 唐国栋 龙祖培  
陈鉴瑜 葛友康 金 强 王秉治



上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书介绍了国际上有关超临界压力火力发电机组的发展、设计、金属材料、传热性能、水处理、自动控制、旁路系统、滑压运行、阀门和正在研制的新产品、新技术等，同时还介绍了国内有关超临界机组发展的情况，包括技术经济的、宏观的可行性分析；开发的可能性和必要性意见，以及对2000年到2050年经济增长和发电设备发展的预测及其和超临界压力火力发电机组的联系等。



超临界压力火力发电技术

出版：上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发行：新华书店上海发行所

印刷：崇明永南印刷厂

开本：787×1092(毫米) 1/16

印张：22.75

字数：563000

版次：1990年5月 第1版

印次：1990年6月 第1次

印数：1—1400

科目：221—304

ISBN7—313—00557—1/TM·6

定价：14.00元

## 序 言

热力学理论和国际上火力发电设备发展的历史事实指明：火电机组一般总是朝着高参数、大容量的方向发展的。随着燃料价格的日渐上升和技术的不断前进，工业先进国家如联邦德国、美国、苏联和日本，都先后掌握了先进的超临界压力技术。目前最积极的国家是苏联和日本。苏联在开始试制超临界压力机组时，技术上并不成熟，经过不断的改进和提高，一直坚持着超临界机组的生产。日本开始是引进美国的设备，经过自行研究和发展，很快掌握了超临界机组技术。现在苏联的 300~1200MW 机组，日本的 450~1000MW 机组，都全部是超临界压力的，所以苏联和日本是国际上火电设备平均煤耗最低的国家。

联邦德国和美国是最早开发超临界机组的国家。联邦德国战后开始生产的不少超临界压力机组，功率都较小，仅有 85MW 左右，在发现这种小功率超临界或甚至特超临界压力机组在经济上并不合算后，便将蒸汽压力降低到 190~200 巴，但后来还是明确了大容量超临界机组对提高经济性的必要性。美国在开始试制超临界机组时采用的参数偏高，容量的增长过快，生产的进程过急，以致在设计上犯了错误，降低了机组的可用率。两国由于经过曲折过程，又未及时坚持加以改进，已经影响到超临界机组的顺利发展。

这四个国家的不同经验和教训都值得我国借鉴，虽然日本的经验 and 我国情况最接近。

我国在 60 年代曾自行设计试制过一台 50MW 和两台 125MW 的直流锅炉机组以及两台超临界压力锅炉试验台；早在 1962 年上海市机械工程学会年会论文集中曾提出过：“我国如掌握直流锅炉技术，便能早日从中压为主的动力工业转到以超高压、超临界压力为主，使我国在向高参数、大容量发电机组的进展途中，减少了材料供应的困难，提高了整个电厂经济性的水平，也是在赶向世界最先进目标的途中，大胆地采取的捷径。”说明当时上海已发现直流锅炉技术的先进性和对我国具体生产情况上的适应性，致使文革期间，上海能够在条件很差的情况下，独立自主地试制出 300MW 的直流锅炉—亚临界压力机组，在困难时期为国家提供了大量电力。但以后在准备发展以直流锅炉为主要关键设备的超临界压力机组的问题上便产生了意见分歧。经过在各种场合下的多次争论，终于在 1986 年 6 月，得到前国家计委副主任、现能源部黄毅诚部长的签发，下达了在上海石洞口二厂，用技贸结合方式，建造两台 600MW 的进口超临界压力机组，并带进技术的文件，约在 1990~1991 年投运；同时也决定从苏联进口更多的超临界压力设备。这样，我国要不要发展超临界机组的问题已经肯定。

然而，国内毕竟还缺乏对超临界机组的具体感性认识，国外的信息，又随着设计、制造和运行经验的不同而有差异，影响到国内各部门不同人员对我国在 90 年代如何发展超临界机组，存在着不同意见。为了能较好地总结和借鉴国外生产和发展超临界机组的经验教训；为了能利用国际上已经成熟和正在发展的超临界和特超临界技术；为了能统一认识，共同协作，更快、更好、更省地建设先进的超临界压力火电厂，充分满足国家对电力的需要，特在 1984 年出版了《超临界参数锅炉》，现在又继续出版本书，供有关制造厂、电厂、设计科研单位、高、中等院校和主管政府各部门的领导、科技人员、干部和职工、教师和学生参考。

本书在选编的 25 篇论文中，除 2 篇是以汽轮机为主题外，其余都系锅炉及其辅机的技

术。9篇是著作稿，其中5篇是评述超临界机组的发展和其可行性及必要性分析，4篇是综合性报道，包括日本超临界直流锅炉考察报告、近15年来苏联超临界压力电站锅炉的发展和有关特超临界压力的锅炉，另有1篇是介绍上海石洞口二厂600MW超临界机组直流锅炉的概况。在17篇翻译稿中，内容主要有：美国开发先进的超临界压力电站规划、超临界变压运行锅炉的设计及运行经验、苏尔寿超临界压力技术的选编材料问题、水冷壁支承结构的特性、综合数控系统、试验研究、化学清洗实绩、阀门和水泵等，对日本最近投运的松浦火电站垂直管型超临界变压运行锅炉和川越火电站两次再热的特超临界压力锅炉的设计也各有1篇报道。另外还有一篇对美国、日本和联邦德国化石燃料电厂发展前景的苏联的报道。

本书在出版过程中得到上海锅炉厂厂长徐域栋、上海电站辅机厂厂长毛瑞和的大力协助外，还得到上海石洞口二厂厂长、华能国际电力开发公司上海分公司副总经理汪祖鑫等的大力支持。另外，上海交通大学吉留林副教授提供了译稿并在校阅、出版等方面，给予了大力协助。在此，一并表示衷心的感谢。

主编 杨立洲

## 目 录

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| 2000年中国火力发电设备的发展方向 .....                         | 1   |
| 试论我国发展超临界机组问题 .....                              | 13  |
| 超临界参数大型汽轮机组的发展 .....                             | 19  |
| 超临界压力锅炉的发展 .....                                 | 30  |
| 我国发电设备的发展战略目标 .....                              | 44  |
| 日本超临界直流锅炉考察报告 .....                              | 58  |
| 近 15 年来苏联超临界压力电站锅炉的发展 .....                      | 118 |
| Sulzer 超临界直流锅炉技术上海石洞口二厂 600MW 超临界机组直流锅炉的概况 ..... | 131 |
| 特超临界压力电站锅炉 .....                                 | 136 |
| 美国电力研究所开发先进的超临界电厂的规划 .....                       | 141 |
| 常磐勿来 8 号 600MW 煤油两用超临界变压运行锅炉的设计及运行经验 .....       | 152 |
| 锅炉内螺旋管的传热性能——超临界压力水的试验结果分析 .....                 | 171 |
| 火电厂锅炉及管道在制造和运行中的材料问题 .....                       | 185 |
| 松浦水电站 1 号机组燃煤垂直管型超临界压力变压运行锅炉的设计 .....            | 198 |
| 超临界压力锅炉改进为滑压控制 .....                             | 209 |
| 变压运行超临界压力直流锅炉均匀荷载型水冷壁支承结构的特性 .....               | 215 |
| 超临界机组运行得怎么样? .....                               | 225 |
| 700MW 燃煤电站综合数控系统 .....                           | 234 |
| 对国际上超临界汽轮机调峰能力之综述 .....                          | 253 |
| 超临界压力锅炉水垢导热系数的研究 .....                           | 261 |
| 超临界压力锅炉化学清洗方面的实绩 .....                           | 269 |
| 第一部分：炉膛热负荷分布及金属温度随时间变化的情况 .....                  | 269 |
| 第二部分：化学清洗期间实情及化学判别要素的研究 .....                    | 295 |
| 苏尔寿超临界直流锅炉技术 .....                               | 319 |
| 中部电力公司川越水电站 1、2 号机组燃天然气特超临界压力锅炉的设计 .....         | 329 |
| 特超临界压力电站锅炉设备用高温材料的长时间实机验证试验 .....                | 341 |
| 美国、日本和联邦德国建造化石燃料发电厂的发展前景 .....                   | 352 |
| 附录 常用法定计算单位符号及换算 .....                           | 358 |

# 2000年中国火力发电设备的发展方向

杨 立 洲

## 一、科技理论指出的火电设备发展方向

火力发电设备是将煤的化学能,经过热能转换成机械能和电能的复杂机械。转换效率的高低按能量品位的高低而异。水位能、机械能和电能属于高品位能,转换效率一般可大于90%。热能属于低品位能,转换时要受热力学第二定律的约束。火力发电中的主要环节是热能的转换和传递,目前效率仅40%左右,60%的能量变成低温余热,最后散失到空气中去。将蒸汽参数提高至超临界或“特超临界”状态,便提高了其可用能品位,提高了热能转换效率,热能的梯级利用也变得更为有利。这是大容量火力发电机组提高热效率现实可行的主要方向。其具体设计变量包括:蒸汽压力、汽温、再热次数、抽汽级数等。

从设计、制造、运行和管理技术上提高火力发电设备效率和性能的方法有:改进热力系统及设备、部组件和辅机的结构,使效率提高、启停安全与损失减少、负荷变化灵活、低负荷运行的经济性能高;采用先进的自控设备,对整个电厂的经济性、安全可靠连续监督、查核和及时处理;减少热能的“跑、冒、滴、漏”等外部损失和内部损失,如排烟损失、辐射热损失、烟气的蒸汽的电的阻力损失,节流损失,不完全燃烧损失;以及充分利用低品位能等。

另外,设备投资的大小、发电成本的高低、机组的可用率和寿命、运行和维修的经济性和简便性等都直接和间接与电厂的经济性有关,在设计和经营管理上应予以注意。

上述各方面是相互有关的。各国制造的设备,虽然参数、容量相等,但由于设计、制造和运行的方法不同,设备的总效率水平可以相差较远;或者虽然设备的参数有亚临界、超临界之别,但由于设计和其他方面的不同,结果,设备的总效率水平反而接近。但影响效率的主导因素还是蒸汽参数(见表1),不把机组的参数提高到超临界或“特超临界”,要较多地提高机组的热效率是很困难的。不认识这一基本观点,就会在混淆不清的效率数据面前产生错觉。

表1 超临界参数设计方案研究结果汇总表<sup>[1]</sup>

| 主 汽 压 力<br>kg/cm <sup>2</sup> (MPa) |         | 设 计 方 案     |             |             |             |             |
|-------------------------------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                     |         | 基 本         | 1           | 2           | 3           | 4           |
|                                     |         | 246(24.1)   | 281(27.6)   | 316(31)     | 352(34.6)   | 387(38)     |
|                                     | 温 度(°C) | 538/552/566 | 566/566/566 | 593/588/566 | 649/598/566 | 649/593/593 |
| 电厂                                  | 蒸汽参数    | 0           | 60.2        | 79.9        | 119.7       | 128.5       |
| 热耗                                  | 度能利用    | 0           | 28.7        | 28.7        | 28.7        | 28.7        |
| 改进                                  | 汽轮机     | 0           | 24.2        | 43.6        | 43.6        | 66.3        |
| 值(大                                 | 锅炉系统    | 0           | 38.3        | 38.3        | 34.8        | 80.9        |
| 卡/度)                                | 发电机     | 0           | 8.1         | 10.6        | 10.6        | 12.1        |
|                                     | 总 计     | 0           | 157.5       | 189.1       | 237.4       | 316.3       |

• 本文原刊登在中国机械工程学会35周年年会论文集中(1988.9),现已作部分修改。

(续表)

| 主 汽 压 力<br>kg/cm <sup>2</sup> (MPa) | 设 计 方 案     |             |             |             |             |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                     | 基 本         | 1           | 2           | 3           | 4           |
|                                     | 246(24.1)   | 281(27.8)   | 316(31)     | 352(34.6)   | 387(38)     |
| 温 度(°C)                             | 536/552/566 | 566/566/566 | 593/566/566 | 649/566/566 | 649/593/593 |
| 电厂热耗(大卡/度)                          | 2303        | 2140        | 2088        | 2036        | 1965        |
| 开发研究费(10 <sup>6</sup> 美元)           | 0           | 7~9         | 14~17       | 17~24       | 40~50       |
| 设备费(10 <sup>6</sup> 美元)             | 472         | 506         | 518         | 581         | 608         |
| 其中: 锅炉                              | 89          | 86          | 89          | 111         | 117         |
| 汽轮发电机                               | 45          | 50          | 58          | 90          | 113         |
| 其他                                  | 294         | 310         | 310         | 320         | 317         |
| 废能利用                                | 0           | 10          | 9           | 19          | 11          |
| 烟气脱硫                                | 53          | 51          | 51          | 51          | 50          |
| 相对热效率                               | 100         | 107.1       | 109.3       | 111.6       | 115.6       |
| 相对设备费                               | 100         | 107         | 110         | 123         | 129         |
| 订货年份(假定1980年<br>4月开始试研)             | 1980        | 1982~1984   | 1982~1984   | 1983~1986   | 1986        |

注: 1. 电厂热耗是以汽轮机理想热耗为基础, 用其他热耗改进值修正后得出, 还包括辅助动力的影响在内。

2. 费用系按 1978 年美元值估算, 机组额定容量为 75 万千瓦。

## 二、国际上火力发电设备的发展史和总趋势

随着燃料价格的不断上涨, 常规火力发电设备的发展是逐渐提高蒸汽参数和增大机组容量, 以提高热效率和降低成本。这种趋势, 必然导致工业先进国家向超临界参数、大容量的机组发展。美国火力发电设备的功率和参数发展简史见表 2。

表 2 美国火力发电设备功率和参数发展简史<sup>[2]</sup>

| 20 世纪(年代)                 | 30     | 40     | 50      | 60      | 70      |
|---------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 机组功率(万千瓦)                 | 3.5~10 | 7.5~15 | 20~45   | 50~100  | 100~130 |
| 蒸汽压力(kg/cm <sup>2</sup> ) | 24~82  | 95     | 140~153 | 169~317 | 169~255 |
| 蒸汽温度(°C)                  | 382    | 482    | 530~566 | 566~649 | 538~621 |

超临界直流锅炉的专利方案, 是由移居英国的捷克人马克·本生在 1919 年提出的, 1923 年德国西门子公司按他的专利建成了第一台试验性超临界机组。从 30 年代至 60 年代, 联邦德国、美国、苏联和日本, 先后对超临界机组试验台进行试验, 发现不仅超临界机组的效率, 而且超临界蒸汽也有其一定的优越性。因而吸引着生产发展速度快、电力需求急、竞争能力较强的国家如美国、苏联和日本, 大步向前发展超临界机组。

1. 美国在 50 年代还在生产超高压机组, 但到 60 年代, 便同时生产了亚临界和超临界参数的机组。美国第一台超临界机组, 压力为 315kg/cm<sup>2</sup>(30.9MPa), 主汽和两次再热汽温度为 621/566/538℃, 功率为 12.5 万千瓦, 1957 年投运。1960 年, 艾迪斯顿电站又投运了一台 1 号机组, 功率为 32.5 万千瓦, 主汽压力为 352kg/cm<sup>2</sup>(34.6MPa), 主汽和两次再热温度为 649/566/566℃的超临界参数机组。美国一开始便试制这样高参数的特超临界机组,

不可避免地发生了频繁的事故,出现如过热器的高温腐蚀、高压汽缸的蠕变变形等难于解决的问题,故不得不降低参数运行。后来制造的大多数超临界机组,便采用  $246\text{kg/cm}^2$  ( $24.1\text{MPa}$ ),  $538/538^\circ\text{C}$ 。美国早期发展超临界机组的积极性很高,速度很快。仅 B & W 公司一家,自 1957 年投运第一台机组后,到 1974 年的 17 年间,共制造超临界机组 71 套,总计 4520 万千瓦,平均每套机组功率为 63.6 万千瓦,最大的为 130 万千瓦。由于对前几台机组未进行全面总结,便设计制造容量更大的机组,使缺陷未能及时反馈和修正,造成机组事故率偏高,订货大幅度下降。通过爱迪生电气研究所对大容量火电设备可靠性的专门调查、统计和分析,逐步明确了大容量超临界火电设备的可靠性,并不比汽包锅炉的亚临界机组差<sup>[3, 4]</sup>。70 年代末期,在美国电力研究所的资助下,对以提高蒸汽参数为主要手段的、改善电站热耗的各种节能方法,进行了大量研究(具体内容简略汇总于表 1),认为先进的超临界机组是燃煤火电厂提高效率的主要方向。由于它采用的是大部分已经得到验证的技术,故试研费用不大,与煤的气化或同沸騰炉燃烧相结合的蒸汽燃气联合循环机组相竞争时,在热效率、可靠性和成本方面处于有利的地位。这说明美国在经过一番曲折后,正拟向高一级的超临界机组发展。

2. 苏联从 50 年代以来一直积极地发展超临界发电机组。1963 年投运了第一台 30 万千瓦机组,锅炉参数为  $255\text{kg/cm}^2$  ( $25\text{MPa}$ ), 主汽和再热汽温为  $570^\circ\text{C}$ 。除 20 万千瓦机组是超高压参数外,从 30 万到 120 万千瓦机组全部是超临界压力的。在苏联的国家标准中根本没有亚临界压力参数。在发展 30 万千瓦机组初期,由于采用立式上升下降管圈,管子金属和焊接质量欠佳等原因而经常发生爆管等事故。通过较长时期的改进后,可用率达到了自然循环汽包炉超高压参数机组的水平,最好的可用率达到  $96\%\sim 99\%$ 。锅炉的参数已改变成  $250\text{kg/cm}^2$  ( $24.5\text{MPa}$ ),  $540/540^\circ\text{C}$  (或  $545/545^\circ\text{C}$ )。

3. 日本是缺乏能源资源的国家,对研制热效率高的高参数大容量机组不遗余力。1958 年还 100% 地制造  $127\text{kg/cm}^2$  ( $12.5\text{MPa}$ ) 的超高压火力发电设备,但在掌握了亚临界压力机组技术后,1960~1970 年,很快就用它替换了超高压机组。从日立公司向美国 B & W 公司引进第一台超临界压力机组于 1967 年在姉崎电厂投运后,日本其他公司也分别引进了美国和联邦德国的超临界技术,从 1976 年到 1985 年超临界机组的订货合同,每年平均占火电机组订货总功率的 80%,已基本上替代了亚临界参数<sup>[5]</sup>。

当日本发现引进的美国超临界机组技术,不能在广泛的范围内滑压变负荷运行和快速经济地启停时,便在 70 年代后期,果断地从欧洲引进了水冷壁管螺旋盘绕上升的本生超临界直流锅炉技术,同时,不惜停止生产已经掌握的美国超临界参数机组。由于消化吸收了引进的技术,又与自行研究发展相结合,并全面注意设计、制造、维修和运行,日本超临界机组的可用率平均在 90% 以上,事故率小于 1%。从 1967 年引进第一台机组以来至 1981 年的 14 年期间,日本共投运超临界机组 3615 万千瓦,平均每年制造 258 万千瓦。日本已签订了两台 70 万千瓦,  $316\text{kg/cm}^2$  ( $31\text{MPa}$ ) 汽压,  $566^\circ\text{C}$  汽温,两次再热的机组合同,发电效率可达 43%,将分别于 1989 年和 1991 年投运。日本电力开发公司、三菱公司正在进行具体的研究,计划将超临界机组的参数,推进到  $352\text{kg/cm}^2$  ( $34.6\text{MPa}$ ),  $649/593/593^\circ\text{C}$ ,这样,发电效率估计可达到  $44\%\sim 45\%$ ,并准备在 1989 年前进行试验与开发、1989~1991 年进行设计、1995 年投入运行。日本发展特超临界机组的压力范围定为  $316\sim 352\text{kg/cm}^2$  ( $31\sim 34.6\text{MPa}$ ),容量范围主要为 70~100 万千瓦。日本电力开发公司也认为燃煤的特超临界机组,

在与煤气化的蒸汽燃气联合循环机组相竞争中将处于有利的地位<sup>[6]</sup>。

美国、苏联和日本曾是世界上工业发展速度快、需电很急迫的工业大国，与我国目前的情况相似，其发展火力发电设备的经验值得我国借鉴。

### 三、我国火力发电设备的基本情况、差距和发展方向

建国以来，我国火力发电设备制造从无到有，由小到大，发电设备制造厂发展迅速，现已遍布全国。从发电量的增长看，1949年到1984年，增长约88倍，平均每年增长13.6%。1984年共有装机容量8012万千瓦，国产的约占70%，总发电量为3770亿度。从技术成长的过程看，50年代，我国先后从捷克引进了功率为6000千瓦的中压机组，从苏联引进了功率为5~10万千瓦的高压机组，使我国发电设备行业的水平，由制造低压设备，上升到中压和高压，由只能仿制，上升到能够根据标准规范设计计算，进行完整的工艺准备。60年代，在与外界隔离的情况下，我国工程技术人员，发扬自力更生精神，成功地试制成双水内冷发电机、5万千瓦高压直流锅炉、5万千瓦超高压再热机组，为60年代后期制成12.5万、20万千瓦的超高压再热机组和70年代制成30万千瓦亚临界压力直流锅炉的再热机组打下了基础。我国自制的12.5万千瓦、20万千瓦汽包锅炉机组和30万千瓦直流锅炉机组已经成批生产，一般年运行可达6000~7000小时，价格便宜，为我国电力工业建设作出了一定的贡献。在设计、试制、制造、安装、维修和运行管理方面积累了不少经验，为我国进一步设计、制造大容量超临界参数机组奠定了基础。80年代初期，我国引进了美国WH-CE集团的30~60万千瓦亚临界压力机组技术，使火电设备的设计、制造和电厂的自动控制水平有了较大的提高。该机组的锅炉是强制循环汽包炉，汽轮机的汽耗比较先进，可在1986~1987年投运。经过消化、吸收、改进和批量生产后(包括主辅机和主要的自控仪表和元件)，我国的火电设备，将出现新的面貌。

但我国的火力发电设备与国际先进水平相比，依然存在较大的差距。现将几个先进工业国家近期产品的平均技术经济水平与我国水平作一粗略比较(见表3)，并估计了差距。

表3 国内外火电设备的技术经济水平比较

|                            |    | 国外水平    |         | 国内水平    |            | 估计差距<br>(年数) |
|----------------------------|----|---------|---------|---------|------------|--------------|
|                            |    | 70年代    | 80年代    | 70年代    | 80年代       |              |
| 单机容量(万千瓦)                  | 平均 | 30~60   | 35~60   | 10~20   | 12.5~30    | ~15          |
|                            | 最大 | 100~130 | 100~130 | 20~30   | 30~60      | 15~20        |
| 蒸汽压力(kg/cm <sup>2</sup> )  | 平均 | 169~246 | 169~280 | 100~170 | 140~186    | ~15          |
|                            | 最高 | 316     | ≥316    | 170     | 140~246    | ~15          |
| 蒸汽温度(°C)                   | 平均 | 538~566 | 538~566 | 540     | 540        | ~10          |
|                            | 最高 | ~821    | ~821    | 550     | 566        | 15~20        |
| 超临界机组在制比重(%)               |    | 10~80   | 30~80   | 0       | 试制         | ~20          |
| 发电煤耗(g/kWh)                |    | 340~302 | 330~296 | 366~340 | 356~316*   | ~15          |
| 全国平均供电煤耗(g/kWh)<br>(1980年) |    | 339~328 | —       | 448     | 432(1984年) | ~20          |
| 可用率(%)                     |    | 80~90   | 85~95   | 70~80   | 80~90      | ~10          |
| 大修间隔期(年)                   |    | 3~5     | 4~7     | 1~2     | 3~4        | ~10          |
| 小修间隔期(年)                   |    | 1~1.5   | 1~3     | 0.5~1   | 1~1.5      | ~10          |
| 年强迫停机次数(年平均)               |    | 5       | 3       | 15      | 6          | ~15          |
| 滑压变负荷运行性能                  |    | 部分适应    | 完全适应    | 适应差     | 部分适应       | ~10          |
| 燃料适应性                      |    | 部分适应    | 完全适应    | 受限制     | 部分适应       | ~10          |
| 运行灵活性(每分钟变负荷速度)            |    | 3%~5%   | 5%~8%   | 2%      | 5%         | ~10          |

\* 假定80年代我国已试制了先进的超临界机组。

从表3中可以看出：国内外水平存在差距的主要项目是超临界机组的在制比重。火电设备技术水平较高的国家，不仅超临界机组的在制功率每年平均占火电机组在制总功率的80%，而且还在试制更先进的特超临界机组；而我国火力发电设备中超临界机组还是空白，至少落后20年。从全国平均供电煤耗看，最先进的是日本(339g/kW·h)和苏联(328g/kW·h)，他们正是超临界机组在制比重最多的国家，而我国的供电煤耗多出100余g/kW·h，也就是说，以当前的年总发电量计，我国每年比先进国家要多消耗约6000万吨煤，相当于10个年产600万吨原煤的大型煤矿的产量。缩短这一差距的捷径，是早日发展国际上已经成熟可靠的超临界机组。这是我国在1962年便开始提出的设想，现在看起来是必要的途径<sup>[7]</sup>。

## 四、我国发展超临界火电机组的可行性分析

### 1. 超临界机组的可靠性问题

火电厂的可靠性，对其经济性影响甚大。美国早期的超临界机组由于可靠性差，使订货率由60年代占总订货量的50%以上，下降到70年代的10%以下。这对国际上超临界机组的发展很不利，甚至我国还有不少人，据此反对发展超临界机组。

表4 燃煤的火电机组事故率(%)比较

| 功率(千瓦) | 30~60万 |       | 80万   |       |
|--------|--------|-------|-------|-------|
| 参 数    | 亚 临 界  | 超 临 界 | 亚 临 界 | 超 临 界 |
| 锅 炉    | 6.7    | 10.5  | 7.6   | 11.5  |
| 汽 轮 机  | 1.9    | 3.3   | 2.9   | 4.0   |
| 冷 凝 器  | 0.1    | 0.1   | 0.1   | 0.2   |
| 辅 机    | 0.8    | 0.6   | 2.8   | 2.8   |
| 其 他    | 4.8    | 4.6   | 6.6   | 6.6   |
| 总 计    | 14.1   | 19.3  | 20.1  | 25.1  |

美国爱迪生电气研究所在1967~1976年期间，对电厂的大容量火电设备可靠性专门进行了详细的调查和统计，分期得出以下结论：

#### 1) 初期的火电机组可靠性分析和结论。

由于对参加统计的机组，没有区别是新产品还是老产品、是否采用微正压炉膛、是否错误地采用了过大的容积和断面热负荷、是烧好烟煤还是易结渣的劣煤、事故率高的原因是否与超临界参数直接有关，故机组事故率的可比性和准确性不足。结果详见表4。

2) 对54台功率为60~82.5万千瓦燃煤机组的可用率有区别地分类统计和分析的结果详见表5和图1<sup>[4]</sup>，可见：

表 5

| 类 别 | 参 数                                    | 台 数 | 平均使用年数 | 平均容量(万千瓦) | 平均可用率(%) |
|-----|----------------------------------------|-----|--------|-----------|----------|
| 1   | 169kg/cm <sup>2</sup><br>538/538°C     | 19  | 5.6    | 63.5      | 72.9     |
| 2   | 246kg/cm <sup>2</sup><br>538/538°C     | 25  | 5.2    | 70.4      | 71.8     |
| 3   | 246kg/cm <sup>2</sup><br>538/562/566°C | 10  | 7.5    | 71.5      | 77.5     |

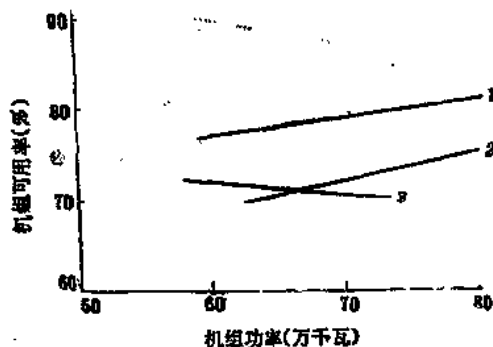


图1 54台燃煤机组的可用率倾向

1. 246—538/652/566(先进技术)
2. 246—538/538(中等技术)
3. 169—538/538(较低技术)

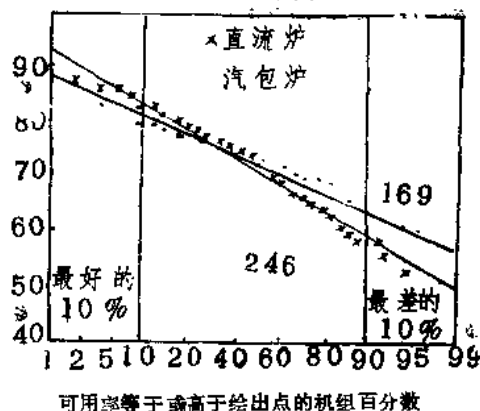


图2 可用率分布图

(1) 大容量两次再热的超临界机组, 由于设计和自动控制的水平的提高, 可用率较小容量的亚临界机组和一次再热的超临界机组高;

(2) 超临界机组的可用率曲线, 随着容量的加大而升高, 但亚临界机组的曲线, 随着容量的加大而降低。

3) 对燃煤的55台超临界机组和20台亚临界机组(其容量都等于或大于60万千瓦)进行可用率分布图分析(见图2)<sup>[8]</sup>可见:

(1) 中等以上可用率水平的机组, 超临界与亚临界几乎是相等的;

(2) 可用率最佳的10%是超临界机组, 比最佳的汽包炉机组好; 可用率最差的10%也是超临界机组。如果能将最差的10%超临界机组设法加以改善, 超临界机组的可用率水平便可以高于亚临界汽包锅炉机组。

上述三个阶段的分析结果说明, 超临界机组的可用率不低于亚临界机组。

日本的超临界机组, 一般可用率在90%以上, 事故率在1%以下; 苏联的超临界机组可用率水平, 现在也不低于较小容量的汽包锅炉机组。

## 2. 超临界机组的热耗问题

在提高蒸汽参数、降低机组的热耗值方面, 各公司由于系统设计、部件结构等的不同而各有差异<sup>[9, 10, 11, 12]</sup>。现以文献11为主加以整理, 得出下列倾向性数据。它是以亚临界机组169kg/cm<sup>2</sup>(16.6MPa), 538/538℃为基准进行计算的。

当汽压在169~316kg/cm<sup>2</sup>(16.6~31MPa), 汽温在535~600℃时, 汽压每升高10kg/cm<sup>2</sup>, 电厂热耗可降低0.18%~0.29%, 下降值随着汽压的升高而减少, 随着汽温的升高而升高;

当汽压在169~316kg/cm<sup>2</sup>(16.6~31MPa), 汽温在535~600℃时, 汽温每升高10℃, 电厂热耗可降低0.24%~0.36%, 下降值随着汽压的升高而升高, 随着汽温的升高而减少;

当过热蒸汽由一次再热增加至两次再热时, 电厂热耗可降低1.7%~2.4%, 随着汽压升高而升高, 随着汽温升高而减少。只有超临界机组才可能采用两次再热。

上述数据说明了在正常情况下,超临界机组的热耗是明显地比亚临界机组为低。

例如,一台两次再热,  $246\text{kg/cm}^2(24.1\text{MPa})$ ,  $538/552/566^\circ\text{C}$  的超临界机组,比基准亚临界机组的电厂耗热,降低约 5%。这是一个效益很大的数值(见表 7)。

### 3. 技术的可行性分析

我国由于工农业生产和人民生活水平的迅速提高,电力生产未能跟上实际需要,造成全国性严重缺电,影响经济建设和人民生活水平的进一步提高。超临界机组是适应我国具体生产条件的生产快、性能好、投资省、节约煤炭的发电设备。热力学理论、国际上迅速发展起来的历史和我国已有多年设计试制亚临界压力直流锅炉的经验足以说明我国当前发展超临界机组是可行的。兹具体分述如下:

1) 当汽轮机的进汽压力升高,机组热效率便随着升高,但由于给水泵的耗功和泄漏损失同时也加大,以及蒸汽容积流量的相应减少,压力继续升高却使机组效率反而降低(见图 3)。因此,相当于某功率机组效率的最高点有一汽压最佳值。当机组容量加大,汽机的泄漏损失和容积流量效应便相对减小时,此最佳汽压却提高。故机组容量的加大总是伴随着汽压的升高发展的。也说明大容量机组比同参数的较小容量机组效率有所提高。根据国外竞争力强的先进国家经验:火力发电设备容量在达到 60 万千瓦时都采用超临界机组。和两台同参数的 30 万千瓦机组相比,它投资可节约 10%~20%,检修费用低 40%,占地面积减少 20%,热耗降低 0.5%,制造和安装周期亦有所缩短。

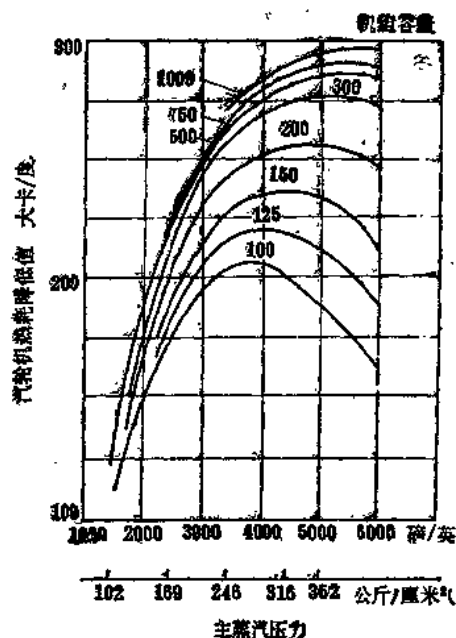


图 3 主汽压力和机组容量对汽轮机热耗的影响

2) 大容量发电设备的使用,要受电网容量的制约。我国现有 12 个大于 100 万千瓦装机容量电网。其中有 4 个大于 1200 万千瓦容量,可以采用 60 万千瓦或更大容量机组。到 90 年代可以容纳大容量机组的地区将更多。我国电网中还有 1200 万千瓦中、低压小型机组,煤耗高达  $550\text{g/kW}\cdot\text{h}$  以上,其他较小容量的国产机组,在煤耗、技术和可用率水平、自动控制和监督的程度上比较落后,还在继续生产,使近年来全国平均供电煤耗还停留在

430g/kW·h 的水平上,比国际上先进国家要高 100g/kW·h,改善的进度很慢。是到了使用大容量超临界机组,淘汰中、低压小型机组,逐步代替较小容量机组以求迅速改善我国平均煤耗、尽快满足电力需要的时候了。

3) 当大容量火力发电设备的蒸汽温度不变,汽压由 169kg/cm<sup>2</sup>(16.6MPa) 上升至超临界压力 246kg/cm<sup>2</sup>(24.1MPa) 时,热耗可改善 1.5%~2%;当汽压进一步升高到 316kg/cm<sup>2</sup>(31.0MPa) 时,热耗又可降低约 1.5%;当超临界压力机组利用压力的优势而两次再热时,则热耗还可再降低 1.7%~2.4%,总的热耗降低量是很可观的。惟压力升高对给水泵、阀门、高加等的要求也提高。上述压力是在国际上发电设备制造的技术水平许可范围内。为了适应我国技术现状,建议开始发展超临界压力机组时采用一次再热,初压为 24.5MPa。

4) 如果汽压不改变,主汽或再热汽温由 538℃ 上升至 566℃ 时热耗可改善 0.75% 左右,这时末级过热器或再热器的管壁温度会  $\geq 620^{\circ}\text{C}$ ,管子材料须使用昂贵的奥氏体钢,既增加初投资,还带来了奥氏体钢的异种钢焊接和高温腐蚀问题,这是国际上还不曾很好解决的难题,会降低机组的可用率水平。为此苏联的过热、再热汽温,已由早期的 585/570℃ 下降到 540/540℃,联邦德国甚至由 600℃ 左右降低到 530℃。建议我国在发展超临界机组时,当材料和焊接工艺未经过长期验证前,过热和再热汽温以采用 540℃ 为宜。

5) 我国目前白天和夜晚电网的峰谷差,在用人力的方法减少偏差后,仍有 30%~50%。由于大容量发电机组有 30 年或甚至更长的寿命,我国发展 60 万千瓦超临界机组时,既应考虑机组在近期内可带基本负荷,更应考虑将来能适应滑压运行、有良好的低负荷运行经济性和变负荷运行的灵活性。炉膛水冷壁螺旋回绕的本生型锅炉,能够同时适应这两方面的要求,而且管径即使较粗,不用节流圈和内螺纹管仍能保持管内较高的重量流速,不致产生膜态沸腾或伪膜态沸腾所引起事故;炉膛中、下部不用复杂的中间集箱系统仍可保持管内工质温度比较均匀;即使燃烧劣质煤粉时,锅炉仍有一定的安全可靠。惟螺旋回绕水冷壁在配合炉膛四角燃烧时,结构复杂程度增加,设计、制造和安装工时增加;如配合前、后墙对冲的旋流式燃烧器则制造上便和一般的垂直水冷壁管没有多少差别。

6) 上海地区从 60 年代开始便自行设计制造 5 万千瓦和 12.5 万千瓦的螺旋回绕水冷壁直流锅炉,以后又生产十余台 30 万千瓦的亚临界 UP 型直流锅炉,为试制变压运行超临界的 60 万千瓦机组莫立了技术基础。在中国的生产情况下,厚钢板与重型设备缺乏、厚壁容器的热加工和焊接工艺也比较困难,因此,对 60 万千瓦这样的大容量机组来说,制造超临界直流锅炉反比制造亚临界汽包炉还简单方便。在 60 万千瓦这一容量级内增加超临界压力这一参数可以加快我国电力建设的速度,加大电站的容量,降低煤耗,它具有显著的优势,是当前我国急切地需要的机组。惟变压运行的超临界锅炉设计难度大,国内还缺乏经验,为了加速发展,应该用技贸结合的方式引进技术<sup>[14]</sup>。

至于汽轮机和发电机,超临界的技术问题比较少。因为超临界 60 万千瓦汽轮机内比较复杂庞大的中、低压汽缸和整台发电机,基本上可以借用已引进的亚临界 60 万千瓦汽轮发电机图纸,仅超临界压力汽缸需要新设计或引进图纸和资料。其他如阀门、自动控制设备、水处理设备、水泵、高加和旁路等是超临界机组中有特点的部分,需要引进设备和技术,在运行、维修、管理等方面对第一台机组需要在国外妥善培训。

我国在“七五”期间要用大量外汇买进 30~60 万千瓦的发电设备,以补充国内生产能力之不足。在使用有限的外汇时,应重点用在引进关键设备和先进技术。用技贸结合方式买

进先进的变压运行超临界 60 万千瓦机组并带进其图纸、技术资料,可以一举两得,为我国加速发展和自制超临界机组准备条件。

为了更好地消化吸收和发展国外的经验,在技贸结合引进和仿制的同时,还应自行试验研究和不断开发,包括开发新钢种,为我国提高超临界机组的可用率、进一步发展技术水平创立稳固的基础。只要处处当心,认真对待,超临界机组的技术一定可以掌握好。

7) 当我国已经掌握一次再热的超临界机组后,进一步发展经济效益更佳的两次再热超临界机组也是必然趋势,它对解决本世纪末及其以后的煤炭供应不足和在煤价较贵地区使用是很合适的。过去一般人认为两次再热机组的管道布置复杂、自动控制系统困难的问题,现在国际上已是成熟的技术。从长远考虑,我国应在本世纪末前发展 80 万千瓦、31.0MPa 两次再热的特超临界大容量火电机组。用引进第一台的方法较妥。

8) 为了超临界机组能够在我国顺利发展,建议暂时采用下列蒸汽参数和功率标准系列初步规范。

表 6 火电机组蒸汽参数和功率标准系列初步规范

| 蒸汽参数<br>机组功率, MW | 主蒸汽初压<br>MPa | 过热器温度<br>°C | 再热器温度*<br>°C                 |
|------------------|--------------|-------------|------------------------------|
| 125~200          | 13.7         | 540         | 540                          |
| 300~600          | 16.7         | 540         | 540(566)                     |
| 600~800          | 24.5         | 540         | 540(566)<br>540/540(550/566) |
| 800~1000         | 31.0         | 540         | 540/540(550/566)             |

\* 在国产钢材和其焊接工艺、高温腐蚀试验经过长期验证合格后,再热汽温可采用括弧内温度。

#### 4. 经济的可行性分析

超临界机组在我国还是空白。不容易准确掌握有关它的初投资等数据,同时由于政府补贴,国内的煤价、电价偏低,而金属价格偏高,在取用这些数据来计算超临界机组的发电成本和电厂投资回收年限时,不易取得肯定的结论。本文在进行经济可行性分析时,采取了国外的技术经济数据与国内实际情况相结合的原则,表 7 便是这样拟定的。表中将亚临界机组方案 1 作为基础与超临界机组对比,其中方案 1、4、5 的热耗值和投资增值取自美国资料<sup>[8, 13]</sup>;方案 2、3 是由前述热耗经验数据和内插法计算得出。亚临界 60 万千瓦机组的每千瓦投资取 810 元,相当于 30 万千瓦机组投资为 932 元(假定容量价差为 17.5%),与国内现行价格是接近的。机组年运行时间取用国内实际使用的 7000 小时,煤价取 70 元/吨标煤与 110 元/吨标煤两种。根据计算,投资增加额的回收年限,用低煤价计算为 1.8~2.6 年,用高煤价计算为 1.1~1.7 年。每台机组在 30 年寿命期间的总节煤量约为 79~362 万吨标煤。由此可见,我国发展超临界机组在经济上是很有利的。在选取的煤价水平下,方案 4 是适应我国情况的最佳机组,方案 3、5 是次佳的。

但为了技术的可行性,还是取方案 2 较妥(见前节)。

表7 不同蒸汽参数的60万千瓦机组经济分析比较表

| 方 案<br>项 目     | 1                    | 2                    | 3                    | 4                        | 5*                       |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
|                | 16.7MPa<br>538/538°C | 24.1MPa<br>538/538°C | 24.1MPa<br>538/566°C | 24.1MPa<br>538/550/566°C | 31.1MPa<br>538/550/566°C |
| 电厂总投资, 元/千瓦    | 810                  | 818                  | 820                  | 825                      | 843                      |
| 投资增额, 元/千瓦     | 0                    | 8                    | 10                   | 15                       | 33                       |
| 电厂净热耗, 大卡/度    | 2478                 | 2434                 | 2416                 | 2357                     | 2277                     |
| 年节煤量, 吨标煤/千瓦   | 0                    | 0.044                | 0.062                | 0.121                    | 0.201                    |
| 年节约人民币, 元/千瓦   | 0                    | 3.1~4.8              | 4.3~6.8              | 8.5~13.3                 | 14.1~22.1                |
| 投资增额回收期, 年     | 0                    | 2.6~1.7              | 2.3~1.5              | 1.8~1.1                  | 2.3~1.5                  |
| 投资增加率, %       | 0                    | 1.0                  | 1.2                  | 1.9                      | 4.1                      |
| 热耗降低率, %       | 0                    | 1.8                  | 2.6                  | 5.1                      | 8.8                      |
| 机组寿命期节煤量, 万吨标煤 | 0                    | 79                   | 112                  | 218                      | 362                      |

\* 热耗的改进较多是由于在原有热力系统中增加了节能措施<sup>[13]</sup>。

## 5. 宏观可行性分析

发电设备的技术经济可行性分析, 一般是以电厂为核算单位进行的。前节经济可行性分析中, 除表列项目外, 还应仔细计算利息、货币的膨胀率和折旧率等。对于国外经营电厂的资本家来说是要慎重核算, 以预测电厂将来经济上的得失。在社会主义国家, 则不仅要有这种“微观”的经济可行性分析, 同时更要有宏观的分析, 以考虑整个国家的得失, 也就是说, 要把思考的范围扩大, 用近代系统工程的思维逻辑, 去研究有关问题。发电设备的选择, 不仅是一个小电厂的利润盈亏问题, 更重要的, 它关系到整个国家生产总值翻两番和人民生活达到小康水平的大问题, 也关系到一次能源和材料的节约与供应、外汇的节省、资源的储备和环保生态的影响等, 这对一个社会主义国家是不能不慎重思考的。具体分析如下:

1) 只要超临界机组的参数、结构型式、燃烧器型式选得恰当, 设计、制造和运行的准

表8 超临界和亚临界机组宏观比较表\*

| 比较项目<br>机组类别<br>(万千瓦) | (又 快)               |                | (又 好) |                    |            | (又 省)           |                                 |
|-----------------------|---------------------|----------------|-------|--------------------|------------|-----------------|---------------------------------|
|                       | 单位千瓦<br>机组的生<br>产速度 | 进口<br>国外<br>材料 | 可 用 率 | 变负荷<br>经济性、<br>灵活性 | 发 展<br>倾 向 | 供电煤耗<br>(g/kWh) | 单位千瓦投<br>资和容量价<br>差综合数 $\Delta$ |
| 30万亚临界直流炉机组           | 较快                  | 不必要            | 相等或较差 | 一般                 | 老产品        | 340~365         | 贵                               |
| 30万亚临界引进机组            | 慢                   | 必要             | 相 等   | 较好                 | 老产品        | 322~342         | 最 贵                             |
| 60万亚临界引进机组            | 慢                   | 必要             | 相 等   | 较好                 | 老产品        | 320~335         | 廉                               |
| 60万超临界机组              | 较快                  | 不必要            | 相等或较好 | 最好                 | 有发展前途      | 312~328         | 廉                               |

\* 机组参数同表7方案1, 2。

$\Delta$  容量价差指同参数同结构机组容量大一倍投资降低10%~20%。

备工作做得充分,将能又快、又好、又省的提供适合我国国情的火电设备,见宏观比较表(表8)。

2) 60万千瓦超临界锅炉和同容量亚临界汽包炉相比,省略掉250吨级重型汽包和大口径下降管,无需用外汇买进200毫米厚钢板和下降管等材料或毛坯,省去了加工这些重型部件所需要的大型厂房、重型加工设备、起吊运输工具,减免了高温锻压、热处理和焊接等费时间、费能源的复杂工艺。所以在我国的生产条件下,制造超临界60万千瓦锅炉反比制造同容量的亚临界锅炉简便,生产周期短,材料可基本上立足于国内,可见发展超临界机组,可加快我国火电设备的生产速度。据权威人士估算,我国由于电力严重缺乏,使国民生产总值降低20%,假设2000年前由于大力发展超临界机组,使电力充足,能提高国民生产总值20%的话,那便相当于年增产值5000亿元以上,利润约1000亿元。

3) 从初投资上看:60万千瓦亚临界机组比30万千瓦亚临界机组的单位千瓦投资少约15%。象60万千瓦这样大容量机组,由于生产周期短、煤耗低,宜采用超临界压力而不利采用亚临界压力。(如苏联和日本)虽然60万千瓦超临界比60万千瓦亚临界机组贵1%~3%(假设),但考虑到容量价差(15%)其单位千瓦投资应比30万千瓦亚临界机组少12%以上。

4) 超临界机组的煤耗比同容量同温度的亚临界机组可降低2%,随着两次再热的利用和特超临界机组的发展,还可进一步降低到5%~10%以上,不仅提高了经济效益,还有利于煤炭资源的储备和空气污染的减轻。

5) 设计制造得好的超临界机组,其可用率比最好的亚临界汽包炉机组要好。容量愈大,这种趋向越明显;

6) 锅炉用螺旋回绕水冷壁管的变压运行超临界机组,不仅可经济方便地滑压运行至较低的负荷,在低负荷仍能安全可靠,而且可较广泛适应我国各地的煤种。

可见,从全社会和长远的利益着想,发展超临界机组,不是可有可无,经济效益不大,而是在宏观上对国家的政治、经济和社会环境关系很大,利益很多,应早日发展,不能再犹豫不决。

## 五、2000年我国火电设备发展的其他方面

1. 热电联供火电设备的技术要求不难,热效率较高,若与城市和村镇规划结合起来,集中热用户,规划区域热网,可发挥机组热效率高的优势,争取2000年时其容量占火电机组的20%~30%。

2. 沸腾锅炉具有热负荷高,能适应多煤种燃烧,可经济地除硫去硝,防止空气污染等优异的作用。进一步发展循环沸腾炉,还可增大容量,与煤粉炉相竞争。为此,应建立沸腾炉研究中心,加强试验发展工作。

3. 利用油田上丰富的天然气源,作为蒸汽燃气联合循环兼热电联供机组的燃料,可提供高效价廉的电源和热源,值得发展。

上述是对我国火力发电设备进一步发展的方向性意见,其中最主要的是超临界参数机组,其总的发展费用不大而能够又快、又好、又省地制造出适应我国生产特点的火电设备。