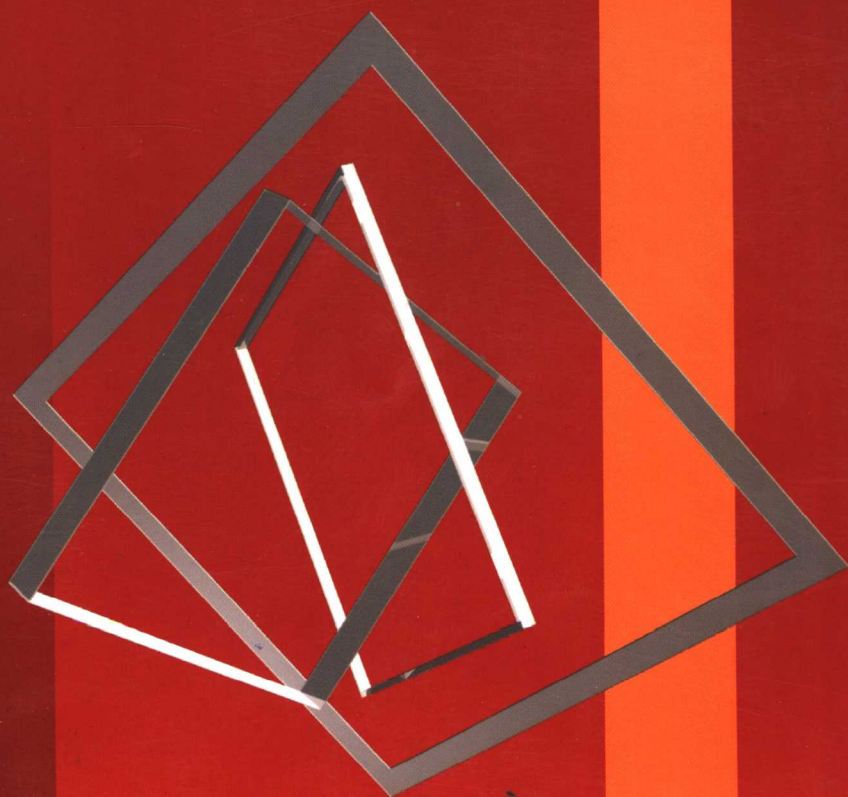


新型耐热钢焊接

杨 富 章应霖 任永宁 李为民 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书由我国电力工业的发展沿革, 锅炉用新型耐热钢发展现状, 细晶强韧型铁素体耐热钢的冶金特点及其焊接性, SA213-T23、SA213-T24 钢的性能及焊接, SA213-T91/SA335-P91 钢的性能及焊接, SA213-T92/SA335-P92 钢和 E911 钢的性能及焊接, SA213-T122/SA335-P122 钢的性能及焊接, 锅炉用新型奥氏体耐热钢及其焊接以及电站管道异种钢焊接等 9 章组成。

本书汇集了国内外大量的新资料, 实际应用性较强, 适用于从事火力发电厂设计、制造、安装、检修、焊接和金属等广大技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型耐热钢焊接/杨富等编著. —北京: 中国电力出版社,
2006

ISBN 7-5083-4365-4

I. 新… II. 杨… III. 耐热钢-焊接 IV. TG457.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 045956 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>)

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 7 月第一版 2006 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.625 印张 334 千字

印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言 ■

根据党的十六大确定的全面建设小康社会的经济发展目标, 2020 年全国装机容量将达到 9.5 亿千瓦, 其中火电装机容量仍然占 70% 以上, 即今后 15 年将投产 3.5 亿千瓦左右的火电机组。火电建设将主要发展高效率、低污染的超临界 (SC) 和超超临界 (USC) 机组。建设上述机组的主要关键技术是锅炉蒸汽压力及温度等参数提高后所须采用的锅炉用新型耐热钢的材料评价、使用性能研究和焊接技术等问题。

目前, 我国发展超临界和超超临界火电机组所需的新型耐热钢大部分是从国外进口的, 它们都是 20 多年来耐热钢技术快速发展过程中的新材料。对上述新型耐热钢, 除 T23、T91/P91 钢之外, 其余的在国内尚无使用经验, 更缺乏相应的焊接、热处理等加工工艺评定及实际操作技能的工艺参数, 这些都将给机组的安装和运行后检修带来很大的困难。在我国电力行业对 T91/P91 钢的应用过程中, 也证实了这一点。为了适应我国火电建设的需要, 在充分了解和掌握国外先进技术的同时, 应尽快确立我国的 SC、USC 锅炉用新型耐热钢系列及其焊接、热处理等加工工艺。

焊接是现代火电锅炉制造、安装和检修中最重要的加工工艺技术, 与锅炉用钢有着密切关系, 两者共同构筑了火电锅炉运行的可靠性。为此, 我们收集了国外 SC、USC 锅炉用新型耐热钢的发展历程、合金化原理、冶金特点、组织和性能、焊接和热处理工艺及服役后性能变化等资料, 并结合国内应用 T23、T91/P91 钢的焊接经验编写了该书, 以供从事火力发电厂设计、制造、安装、检修、焊接和金属等广大技术人员使用。

全书共分九章, 第一~二章由杨富编写, 第三章、第八~九章由章应霖编写, 第四章由任永宁、杨富编写, 第五章由任永宁编写, 第六~七章由李为民、杨富编写。全书由武汉大学章应霖教授统稿, 清华大学陈伯鑫教授主审。

在编写本书过程中, 收集了大量来自国内电力建设、生产、科研院校、锅炉制造单位以及国外钢材、焊接材料供应商等提供

的宝贵资料；同时也得到了华北电网有限公司焊接技术培训部的大力帮助和支持；苗文光、蔡科玲同志也为编写做了一定的工作，在此一并表示感谢！

无论在国内还是国外，书中所涉及的新型耐热钢的使用时间还都不长，公开发表的有关加工和运行的学术研究文献也较少，再加上时间仓促和水平所限，书中难免存在不足与疏漏之处，恳请读者指正。

编 者

2005 年 8 月于太原

目 录

前言

第一章 我国电力工业的发展沿革	1
第一节 中国电力工业的发展历史和现状	1
第二节 提高火力发电厂效率的方法	2
第三节 超(超)临界机组是我国火电发展的最佳选择	6
第二章 锅炉用新型耐热钢发展现状	13
第一节 超(超)临界锅炉用新型耐热钢发展历史	13
第二节 超(超)临界锅炉承压部件对钢材的要求和选择	21
第三节 新型耐热钢的应用概况	28
第三章 细晶强韧型铁素体耐热钢的冶金特点及其焊接性	32
第一节 细晶强韧型铁素体耐热钢的由来	32
第二节 强韧型铁素体耐热钢的化学成分和力学性能特点	35
第三节 钢的强韧化	38
第四节 强韧型铁素体耐热钢的焊接性	44
第五节 工程中值得商榷和调整的几个习惯认识	64
第四章 SA213-T23、SA213-T24 钢的性能及焊接	68
第一节 T23、T24 钢的化学成分及其主要物理性能	69
第二节 T23、T24 钢的力学性能和抗氧化性能	72
第三节 T23/P23、T24/P24 钢的焊接	79
第五章 SA213-T91/SA335-P91 钢的性能及焊接	87
第一节 T91/P91 钢的化学成分和主要物理性能	88
第二节 T91/P91 钢的力学和抗氧化腐蚀性能	90
第三节 T91/P91 钢的焊接	93
第六章 SA213-T92/SA335-P92 和 E911 钢的性能及焊接	102
第一节 T92/P92 钢的化学成分及热处理工艺的确定	103

第二节	T92/P92 钢的性能	105
第三节	T92/P92 钢的焊接	113
第七章	SA213-T122/SA335-P122 钢的性能及焊接	124
第一节	T122/P122 钢的开发过程	124
第二节	T122/P122 钢的性能	127
第三节	T122/P122 钢的焊接	133
第四节	T122/P122 钢服役后的性能	139
第八章	锅炉用新型奥氏体耐热钢及其焊接	143
第一节	TP347HFG 钢的细晶化及其性能	144
第二节	Super304H 钢的强化及其性能	151
第三节	HR3C (25Cr-20Ni-Nb-N) 钢的强化及其力学性能	158
第四节	20Cr-25Ni1.5MoNbTiN (NF709) 钢的强化途径及其力学和工艺性能	163
第五节	新型奥氏体耐热钢的焊接	167
第六节	TP347HFG、Super304H、HR3C、NF709 钢的弯曲加工性能	174
第九章	电站管道异种钢焊接	176
第一节	电站管道异种钢接头的早期失效	176
第二节	异种钢焊接接头的热应力	181
第三节	奥氏体钢和铁素体钢异种钢接头	184
第四节	铁素体钢和铁素体钢的异种钢接头	187
附录一	Böhler Thysson 焊接技术集团公司用于电力设备的焊接材料	196
附录二	瑞士 OERLIKON 公司用于电力设备的焊接材料	202
附录三	英国 METRODE 公司用于电力设备的焊接材料	206
参考文献		210

第一章

我国电力工业的发展沿革

第一节 中国电力工业的发展历程和现状

一、中国电力工业发展的历程

自 1882 年我国建设第一座发电厂到现在, 中国的电力工业经过了 120 多年的发展历程。解放前, 由于殖民和封建统治, 国内连年战乱, 电力工业发展速度缓慢。到 1911 年辛亥革命时, 全国装机容量约为 25MW, 1936 年抗日战争爆发前为 1040MW, 1945 年抗日战争胜利前为 2480MW, 抗日战争胜利后, 前苏军拆走发电设备 970MW, 到 1949 年末全国解放时, 仅为 1848.6MW。

新中国成立后, 国家大力发展电力工业。从第一个五年计划开始, 在原苏联援助的 156 项重点工程中, 有 24 项是发电厂, 并从原捷克和原苏联引进了发电设备制造技术。第一台国产 6、12、25、50MW 火电机组, 相继于 1956~1959 年在淮南田家庵、重庆、闸北和辽宁发电厂投运发电。国产第一台 100、125、200、300MW 火电机组, 又于 1967~1974 年间在高井、吴泾、朝阳和望亭发电厂投产发电。截至 1980 年, 全国装机容量为 65000MW, 是 1949 年的 35 倍。

党的十一届三中全会后, 在以经济建设为中心和改革开放方针政策的指导下, 我国的电力工业发生了迅猛的发展。1981 年, 电力工业率先从美国 CE 公司引进亚临界 300、600MW 火电机组制造技术和电厂设计技术, 使火电设备走上了更新换代的发展之路。1987 年, 第一台引进型国产 300MW 机组在山东石横电厂投入运行; 1989 年, 第一台引进型国产 600MW 机组在安徽平圩电厂投入运行。1987 年、1995 年和 2000 年全国装机容量分别突破 1 亿千瓦、2 亿千瓦和 3 亿千瓦; 至 2004 年底, 全国总装机容量达到了 4.407 亿千瓦, 全年总发电量达 21870 亿千瓦时, 全国总装机容量和全年总发电量均居世界第二位。

二、中国火力发电的现状

从 1949 年至今, 在各个发展时期的电源结构中, 火力发电都占到 70% 以上的比例。到 2004 年底, 全国火电总装机容量为 3.249 亿千瓦, 占全国总装机容量的 73.72%; 火电全年发电量为 18073 亿千瓦时, 占全国全年总发电量的 82.64%。

随着电力工业的迅速发展, 目前 300、600MW 的亚临界火电机组已成为中国各大电网中的主力机组。到 2004 年底, 全国装机容量达到 1000MW 及以上的发电厂有 116 座, 其中火力发电厂有 91 座。单机容量为 300~399MW 的火电机组 328 台; 500~900MW 的火电机组 62 台。

自 20 世纪 80 年代末, 我国开始重视发展超临界机组, 并先后从国外引进 20 台超临界机组, 分布在上海石洞口二厂等 8 个电厂。单机容量最大的机组是上海外高桥电厂的 900MW 超临界机组。各种类型和规模的火力发电厂遍布全国, 如点点繁星, 镶嵌在祖国的大地上, 成为中国经济建设和人民生活的动力之源、光明之源。

三、中国火力发电机组蒸汽参数发展历程

图 1-1 所示为中国火力发电机组汽轮机入口蒸汽参数的发展历程。

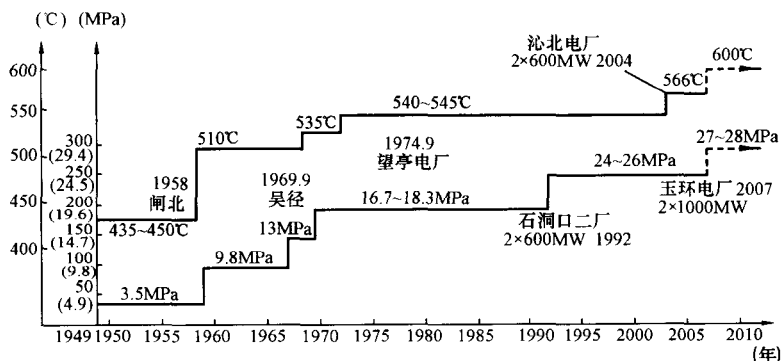


图 1-1 中国火力发电机组蒸汽参数的发展历程

1956 年以前，中国的火力发电机组均为低温低压和中温中压机组，蒸汽参数均低于 3.8 MPa 和 450°C，容量仅为 6~12MW。

1956 年至 20 世纪 60 年代末，是中国高温高压火电机组起步发展的阶段。其中的代表机组为：1958 年在上海闸北电厂投产的 25MW 机组以及 1959 年在辽宁发电厂投产的 50MW 机组，它们的蒸汽参数均为 9.8 MPa 和 510~535°C；1967 年在北京高井电厂投产的 100MW 机组，蒸汽参数为 9.8 MPa 和 540°C，以上机组均为无中间再热机组。

20 世纪 60 年代末至 70 年代初，国产超高压中间再热机组投入运行。其中代表机组为：1969 年 9 月在上海吴泾热电厂投产的 125MW 机组以及 1972 年 5 月在辽宁朝阳发电厂投产的 200MW 机组，它们的蒸汽参数均为 13.7 MPa 和 540/540°C（125MW 机组原为 555°C，后降为 540°C）；1974 年 9 月在望亭发电厂投产的 300MW 机组，锅炉为直流 UP 炉，蒸汽参数为 16.7 MPa 和 540/540°C（原为 555°C，后降为 540°C）。

20 世纪 80 年代末，国产亚临界 300、600MW 机组投入运行。其中代表机组为：1987 年 6 月在山东石横发电厂投产的 300MW 机组和 1989 年 11 月在安徽淮南平圩发电厂投产的 600MW 机组，蒸汽参数均为 18.29 MPa 和 540/540°C。

20 世纪 90 年代初，开始从国外引进超临界机组，至 2004 年共引进 20 台超临界机组。其中代表机组为：1992 年 6 月、12 月在华能上海石洞口二厂投产的 1 号、2 号 600MW 机组，蒸汽参数为 25.4 MPa 和 538/566°C。

从国外引进设计、制造技术而生产的 1000MW 级超超临界机组，将分别安装在华能国际玉环电厂和华电国际邹县发电厂，计划 2007 年投入运行，届时中国火力发电机组的蒸汽参数将达到 26.25 MPa 和 600/600°C 的世界先进水平。

第二节 提高火力发电厂效率的方法

根据党的十六大所确定的全面建设小康社会的经济发展目标，2020 年全社会用电将达到 39400~43200 亿千瓦时左右，需要装机 8.2~9.5 亿千瓦。因此，今后 20 年，我国在

“大力发展水电，优先发展煤电，积极发展核电”方针的指导下，为保证电力的高速发展，必须全方位搞好资源优化配置，优先发展建设周期短、投资回报率高的高效率火力发电，满足我国经济发展和人民生活水平提高的需要，具有重大而深远的意义。

一、火电锅炉蒸汽压力、温度参数与机组效率的关系

日本 IHI 公司和三菱公司提供的蒸汽参数与机组效率的关系分别见表 1-1 和图 1-2。

表 1-1 蒸汽参数与机组效率的关系 (IHI 提供)

型 式		亚临界变压	超 临 界		
			定 压	变 压	
满负荷蒸汽参数		16.6MPa 538/538℃	24.1MPa 538/538℃		24.1MPa 538/538℃
效 率	100%负荷	基 准	+1.7%	+1.7%	+2.4%
	50%负荷	基 准	+0.4%	+2.3%	+3.0%

由表 1-1 和图 1-2 可知，在同样的温度条件下 (538/538℃)，超临界压力锅炉比亚临界压力锅炉机组的效率 1.7%；在同样的压力条件下 (24.1MPa)，蒸汽温度由 538/566℃ 提高到 600/610℃，机组效率可提高 3.5% 左右。由此可见，提高火电机组锅炉蒸汽温度、压力等参数是提高火电厂效率的最有效方法之一，特别是温度对效率的影响更为显著。

国外火电机组蒸汽参数的发展过程见表 1-2；IHI 公司和三菱公司对蒸汽参数选用的发展历史分别见图 1-3 和图 1-4。

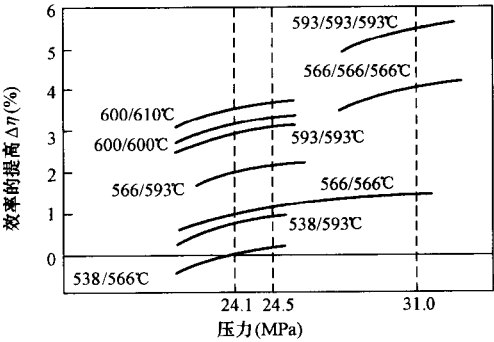


图 1-2 蒸汽参数与机组效率的关系 (三菱提供)

表 1-2 国外火电机组蒸汽参数的发展过程

年代 (20 世纪)	初 期	30 年代	40 年代	50 年代		60 年代	80 年代末~ 90 年代初	90 年代末
蒸汽温度 (℃)	250~370	400~430	480~500	500~538	538~566	538~566	566~593	600~610
蒸汽压力 (MPa)	0.8~1.0	1.5~3.0	3.0~8.0	8~14	亚、超临界	亚、超临界	超超临界	超超临界
再热次数					一次， 甚至两次	一次， 多为两次	两次	两次

由图 1-3、图 1-4 和表 1-2 可知，早在 20 世纪 50 年代末至 80 年代，大型火电锅炉的蒸汽压力就已分别达到超临界压力 (24.1 MPa) 和超超临界压力 (31.0 MPa)，但蒸汽温度却受锅炉用耐热钢发展的制约，一直在 566℃ 以下徘徊。直到 20 世纪 80 年代中期，由于具有划时代意义的 T91/P91 钢的研制成功，到 20 世纪 90 年代初和 90 年代末，电站锅炉的蒸汽温度分别达到 593 和 610℃，使机组的效率得到更进一步的提高。显而易见，火电锅炉用耐热钢发生的这一场质的变革，必将促进电站焊接技术的发展。

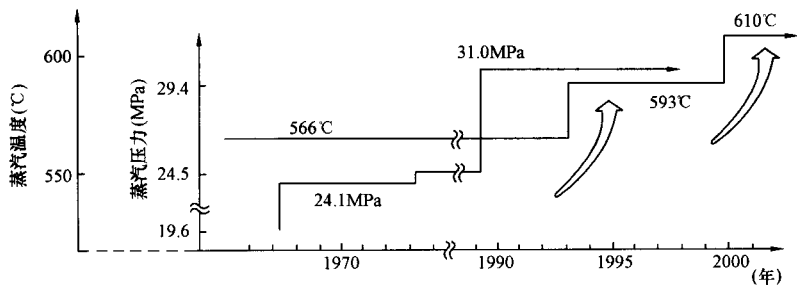


图 1-3 IHI 公司锅炉蒸汽参数发展历史

二、提高火力发电机组效率方法的分析

我国电力以煤为主要燃料，且这种发电格局在今后相当长的时期内不会改变。而以煤电

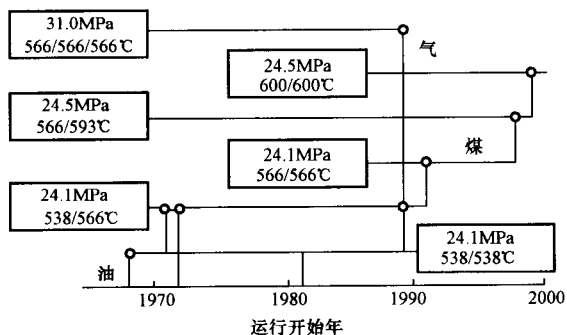


图 1-4 三菱重工公司锅炉蒸汽参数发展历史

为主，必然要带来巨大的环境压力。排放的烟气中含有 SO_x 、 NO_x 、 CO_2 ，并有大量的灰渣和污水。我国当前电力供应十分紧张，据不完全统计，2005 年夏天已有 23 个省、市拉闸限电。电力的发展显现出明显滞后于国民经济发展和人民生活水平提高的要求，要加快电力发展的步伐，就面临着要加快电力结构调整的速度。而最现实、最可行的途径就是加快建设超（超）临界机组，并配备以常规的烟气脱硫系统。

从目前世界火力发电技术水平来看，提高火电机组效率、减少污染的洁净煤发电技术有：循环流化床（CFBC）、增压流化床（PFBC）、整体煤气化联合循环（IGCC）及超临界（SC）与超超临界技术（USC）。但是，CFBC、PFBC、IGCC 等技术仍处于试验或示范阶段，在大型化方面还有很长的路要走，这在我国近期广泛发展是不现实的，只能作为新的发电技术进行研究和示范工程实践。从技术难度和现实性看，超（超）临界技术并配备以常规的烟气脱硫技术较易实现，且超（超）临界机组在国际上已经是商业化的成熟发电技术，其可利用率、可靠性、运行灵活性和机组寿命等方面已经可以和亚临界机组相媲美。

超超临界压力参数火力发电是有效利用能源的一项新技术，其蒸汽的压力、温度均超过以往任何参数的机组，从而可大幅度提高机组热效率。主蒸汽温度每提高 1°C ，热效率值上升 0.029%；再热蒸汽温度每提高 1°C ，热效率值上升 0.021%。超临界机组效率可比亚临界机组提高 2% 左右，而超超临界机组的效率比超临界机组又提高 4% 左右。如丹麦诺加兰德电厂 3 号超超临界机组，效率高达 47%。因此，目前提高火力发电厂效率的主要途径是提高蒸汽的压力和蒸汽的温度，即发展超临界机组和超超临界机组。发展超临界机组和超超临界机组，不但可大幅度提高火电厂效率，还具有更大的经济和环保意义。蒸汽参数与火电厂效率、供电煤耗的关系见表 1-3。

从表 1-3 中的数据可以看出，随着蒸汽温度和压力的提高，电厂的效率在大幅度地提高，供电煤耗在大幅度地下降，而提高蒸汽参数遇到的主要技术难题是金属材料耐高温、高

压及焊接问题。

表 1-3 蒸汽参数与火电厂效率、供电煤耗的关系

机组类型	蒸汽压力 (MPa)	蒸汽温度 (°C)	电厂效率 (%)	供电煤耗[g/(kW·h)]
中压机组	3.5	435	27	460
高压机组	9.0	510	33	390
超高压机组	13.0	535/535	35	360
亚临界机组	17.0	540/540	38	324
超临界机组	25.5	567/567	41	300
高温超临界机组	25.0	600/600	44	278
超超临界机组	30.0	600/600/600	48	256
高温超超临界机组	30.0	700	57	215
超 700°C 机组		超 700	60	205

注 发电煤耗用标准煤量统计, 标煤量是一个统计折算标准, 1kg 标准煤的发热量为 29308kJ。

三、提高火力发电机组效率的关键技术

开发耐高温性能更好的耐热钢是发展高效率的超临界、超超临界火力发电机组的关键技术之一, 目前世界先进国家普遍采用的是新型细晶强韧化铁素体耐热钢和新型奥氏体耐热钢, 我国正在建设的 300MW 及以上的亚临界、超临界火电机组, 已经采用了这种新型细晶强韧化铁素体耐热钢系列中的 SA213-T23、SA213-T91、SA335-P91; 将要建设的 USC 火电机组还要大量采用这种新型细晶强韧化铁素体耐热钢系列中的 SA213-T23、T24、T91、T92、T122, SA335-P91、P92、P122 及 E911; 新型细晶奥氏体耐热钢 Super304H、TP347HFG 和高铬镍奥氏体钢 HR3C、NF709、SAVE25 等。

为了更好地发展我国的 SC、USC 机组, 在大量引进国外先进的新型耐热钢的过程中, 要加强技术协作, 协同攻克“关键技术”, 并大力开展以下几方面的试验研究工作, 确保 SC、USC 机组的安全运行。

- (1) 新型耐热钢的合金化原理、冶金特点。
- (2) 新型耐热钢的常温及高温性能。
- (3) 新型耐热钢的焊接性及焊接工艺、焊后热处理、异种钢焊接工艺。
- (4) 新型耐热钢的热加工性能及工艺。
- (5) 新型耐热钢服役后组织及性能的变化规律及寿命评估。

焊接是保证火电建设质量和发电设备安全运行的重要基础专业。我国已开始大力发展的 SC、USC 火力发电锅炉所采用的新型耐热钢与传统的低合金耐热钢有质的区别, 广大电站焊接工作者有必要在掌握这些新材料特点的基础上调整几十年来在焊接传统的低合金耐热钢时所形成的观念。需要对这种新型耐热钢的强化机理、焊接性、焊接工艺、热处理工艺、检验方法、焊工培训及焊接管理等方面进行深入的研究和实践, 加大电站焊接科研力度, 加大对焊接及相关专业人员的技术培训, 进一步提高专业技术素质, 以保证我国电力发展目标的实现。

第三节 超（超）临界机组是我国火电发展的最佳选择

一、超（超）临界机组概述

常规亚临界火电机组的蒸汽参数：压力 p 为 16~19 MPa，温度 t 为 540/540℃，发电机组效率约为 38%~39%。当汽轮机进口蒸汽参数超过水临界状态点的参数（压力为 22.129 MPa、温度为 374.12℃）时，统称为超临界机组，以 SC（Supercritical）表示。一般超临界机组的蒸汽参数：压力 p 为 24~26 MPa，温度 t 为 540/540℃、540/566℃、566/566℃，相应的机组效率约为 41%~42%。超超临界参数实际上是在超临界参数的基础上进一步提高蒸汽压力和温度，国际上通常把主蒸汽压力在 24.1~31 MPa，主蒸汽温度/再热蒸汽温度在 580~600℃/580~610℃的机组定义为高效超临界（high efficiency supercritical）机组，即通常所说的超超临界机组，以 USC（ultra supercritical）表示。但各国（甚至各公司）对超超临界参数起始点的定义有所不同，如日本定义的为压力大于等于 24 MPa 或温度大于 566℃；丹麦定义的为压力大于 27.5 MPa；西门子公司认为，应从材料的等级来区分超临界和超超临界；我国电力百科全书则将超超临界定义为蒸汽压力高于 27 MPa 的机组。国内正在建设的 USC 机组的蒸汽参数：压力 p 为 25~26.5 MPa、温度 t 为 600/600℃。

二、国外超（超）临界机组的发展历程

自 20 世纪 50 年代开始，世界上以美国和德国等为主的工业化国家就已经开始了对超临界和超超临界发电技术的研究。经过近半个世纪的不断进步、完善和发展，目前超临界和超超临界发电技术已经进入了成熟和商业化运行的阶段。

世界上超临界和超超临界发电技术的发展过程大致可以分成三个阶段：

第一个阶段，是从 20 世纪 50 年代开始，以美国和德国为代表。当时的起步参数就是超临界参数，但随后由于电厂可靠性的问题，在经历了初期超超临界参数后，从 20 世纪 60 年代后期开始，美国超临界机组大规模发展时期所采用的参数均降低到常规超临界参数。直至 20 世纪 80 年代，美国超临界机组的参数基本稳定在这个水平。

第二个阶段，大约是从 20 世纪 80 年代初期开始。由于材料技术的发展，尤其是锅炉和汽轮机材料性能的大幅度改进及对电厂化学方面认识的深入，克服了早期超临界机组所遇到的可靠性问题。同时，美国对已投运的 170 多台机组进行了大规模的优化及改造，到 1985 年，可靠性和可用率指标已经达到甚至超过了相应的亚临界机组。通过改造实践，形成了新的结构和新的设计方法，大大提高了机组的经济性、可靠性和运行灵活性。期间，美国又将超临界技术转让给日本（GE 向东芝、日立，西屋向三菱），联合进行了一系列新超临界电厂的开发、设计。这样，超临界机组的市场逐步转移到了欧洲及日本，涌现出了一批新的超临界机组。

第三个阶段，大约是从 20 世纪 90 年代开始，进入了新一轮的发展阶段。这也是世界上超超临界机组快速发展的阶段，即在保证机组高可靠性、高可用率的前提下，采用更高的蒸汽温度和压力。其中主要因为国际上环保要求日益严格，同时新材料的开发成功和常规超临界技术的成熟等，也都为超超临界机组的发展提供了条件。

目前，全世界已投入运行的超临界及以上参数的发电机组大约有 600 多台，其中美国有

170 多台，日本和欧洲各约 60 台，俄罗斯及原东欧国家 280 余台。目前，发展超超临界技术较领先的国家主要是日本、德国和丹麦等，世界范围内属于超超临界参数的机组大约有 60 余台。

1. 美国

美国是世界上发展超临界火电机组最早的国家，早在 20 世纪 50 年初就开始了超超临界发电技术的探索和研究。目前，美国拥有 9 台世界上最大的超临界机组，单机容量为 1300MW，见表 1-4。

表 1-4 美国现役单机容量最大的 1300MW 火电机组

电 站	锅炉制造商	锅炉蒸发量 (t/h)	运行方式	主蒸汽压力 (MPa)	主/再热蒸汽 汽温 (℃)	投 运 时 间
Cumberland 1、2 号	B&W	4535	定压	24.2	539/539	1972/1973
Amos 3 号	B&W	4433	定压	26.5	543/538	1974
Gavin 1、2 号	B&W	4433	定压	26.5	543/538	1974/1975
Mountaineer 1 号	B&W	4433	定压	26.5	543/538	1980.9
Rockport 1 号、2 号	B&W	4433	定压	26.5	543/538	1984/1989
Zimmer	B&W	4433	定压	26.5	543/538	1990

美国也是世界上发展超超临界火电机组最早的国家之一。美国俄亥俄州 Philo 电厂 6 号机于 1957 年投产，这是世界上第一台超超临界机组。容量为 125MW，蒸汽压力为 31 MPa，蒸汽温度为 621/566/538℃，二次中间再热。汽轮机由 GE 公司生产，锅炉由 B&W 公司制造。1959 年，Eddystone 电厂 1 号机投产，这是一台容量为 325MW，蒸汽压力为 34.5 MPa，蒸汽温度为 649/566/566℃的二次中间再热机组，热耗为 8630kJ/（kW·h）。当时，该机组同时打破了火力发电机组最高出力、最高压力、最高温度和最高效率 4 项纪录，该机组由 CE 和 WH 公司设计制造。在设计参数下运行了 8 年后，因锅炉过热器高温腐蚀和汽轮机高压缸蠕变变形等材料问题，自 1968 年起将参数降为 32.2MPa/610/560/560℃，至今还在运行，仍然是蒸汽压力和蒸汽温度最高的机组。

EPRI（美国电科院）还对超超临界机组蒸汽参数和容量等进行了优化研究，认为超超临界机组采用的蒸汽压力为 31MPa，温度在 566～593℃，二次中间再热，容量在 700～800MW 时为最佳，并重新开发了蒸汽参数为 31MPa/593/593/593℃的二次再热超超临界机组。但是由于美国更倾向于大力发展高效的燃气-蒸汽联合循环，超超临界技术发展计划没有得到实施。

近期，GE 公司为日本制造一台蒸汽温度超过 593℃的 1000MW 等级机组和一台蒸汽参数为 26.6 MPa/577/600℃的 750MW 的机组，还设计了蒸汽参数为 25 MPa/600/610℃的机组。美国目前正在进行新一代（760℃）的用于超超临界参数机组的锅炉材料研究计划，以开发蒸汽温度和压力更高的机组。

2. 日本

日本资源缺乏，非常重视发电机组效率的提高，从 20 世纪 60 年代中期开始发展超临界机组。虽然其起步较晚，但吸收了美国和欧洲的最新技术，发展快、收效大。到目前为止，已有 60 多台超临界以上参数的机组运行。日本在成功发展超临界机组的基础上，采取引进、

仿制、创新的技术路线，进一步开发了超超临界机组。在 20 世纪 80 年代末，投运了川越电厂两台 31MPa/566/566/566℃超超临界机组，由于受当时耐热钢材的限制，只是提高了主蒸汽压力，而未提高主蒸汽温度。为了避免汽轮机末级蒸汽温度过高，故采用了两次再热。两次再热技术虽然是成熟的，但系统复杂，设计难度大，使成本显著提高。为了降低制造成本，日本各公司近年来并不是一味地提高蒸汽的初压力，而是从超超临界机组的高效性入手，尽量提高蒸汽温度，以期“用足”现有材料的耐高温特性，以最低的制造成本获得最大的热效益。故近年来日本各生产厂商将蒸汽参数的压力降为 24~25 MPa，温度由 566/593℃稳步上升为 600/600℃及 600/610℃的超超临界机组发展方向，取得了显著的成功。

近年来日本投运的主要超超临界机组见表 1-5。

表 1-5 日本 1990 年以来投运的主要超超临界机组

电 厂	电力公司	容量 (MW)	蒸汽参数 (MPa/℃/℃/℃)	投 运 时 间
川越 KAWAGOE 1 号	中部电力	700	31/566/566/566	1989-6
川越 KAWAGOE 2 号	中部电力	700	31/566/566/566	1990-6
碧南 Hekinann 3 号	中部电力	700	24. 6/538/593	1993-4
能代 Noshiro 2 号	东北电力	600	24. 6/566/593	1994-12
七尾太田 Nanao-Ohta 1 号	北陆电力	500	24. 6/566/593	1995-3
苓北 Reihoku 1 号	九州电力	700	24. 1/566/566	1995-7
原汀 Haramachi 1 号	东北电力	1000	25/566/593	1997-7
松浦 Matsuura 2 号	电源开发	1000	24. 6/593/593	1997-7
三隅 Misuumi 2 号	中部电力	1000	25/600/600	1998-6
原汀 Haramachi 2 号	东北电力	1000	25/600/600	1998-7
七尾太田 Nanao-Ohta 2 号	北陆电力	700	24. 6/593/593	1998-7
碧南 Hekinann 4 号	中部电力	1000	24. 6/566/593	2002-11
碧南 Hekinann 5 号	中部电力	1000	24. 6/566/593	2001-11
敦贺 Tsuruga 2 号	北陆电力	700	24. 6/593/593	2000-10
橘湾 Tachibana-wan	四国电力	700	24. 6/566/566	2000-7
Karita 1 号 (PFBC)	九州电力	350	24. 6/566/593	2000-7
苓北 Reihoku 2 号	九州电力	700	24. 6/593/593	2003-7
橘湾 Tachibana-wan 1 号	电源开发	1050	25/600/610	2000-7
橘湾 Tachibana-wan 2 号	电源开发	1050	25/600/610	2001-7
矶子 Isogo 新 1 号	电源开发	600	25/600/610	2002-4
苫东厚真 4 号	北海道电力	700	25/600/600	2002-6
常陆那珂 Hitachinaka 1 号	东京电力	1000	24. 5/600/600	2003
舞鹤 Maizuni 1 号	关西电力	900	24. 5/593/593	2004
舞鹤 Maizuni 2 号	关西电力	1000	24. 1/593/593	2010

日本的冶金技术处于世界领先地位，下一步的开发目标是采用奥氏体钢和镍基合金，将蒸汽初压提高到 35. 5MPa，初温提高到 625~640℃。

3. 欧洲

在欧洲大约有 60 台超临界机组，大部分在德国、意大利、荷兰和丹麦。近期在欧洲投运的超超临界机组列于表 1-6。

德国也是发展超临界技术最早的国家之一，早在 20 世纪 50 年代和 60 年代就已经和美国同步地开展了超临界机组的研究工作。1956 年投运了一台蒸汽参数为 34MPa/610/570/570℃，容量为 88MW 的超超临界机组。1972 年投运了一台 430MW，参数为 24.5MPa/535/535℃的超临界机组。1979 年投运了一台两次再热的 475MW，参数为 25.5MPa/530/540/530℃的超临界机组。

德国开发了螺旋管式水冷壁的锅炉，实现了锅炉的滑压运行，这类锅炉目前在日本和欧洲的全滑压运行超临界机组中广泛采用。德国近年来很重视发展超临界机组，德国已投运和在建的超临界机组近 20 台，其中具有代表性的超临界机组为：1992 年 8 月在 Staudinger 电厂投运的 500MW、参数为 25 MPa/540/560℃的超临界机组；1999 年在 Lippendorf 电厂投运的 933MW，蒸汽参数为 26.7 MPa/554/593℃的超超临界机组；2000 年在 Niederaubem 电厂投运的 965MW，蒸汽参数为 26.9 MPa/580/600℃的超超临界机组；在 Hessler 电厂投运的 700MW，蒸汽参数为 30 MPa/580/600℃的超超临界机组。

Siemens 公司在 1997~2001 年期间制造了 8 套功率在 750~1000MW、蒸汽参数为 25 MPa/580/600℃的蒸汽轮机。在 20 世纪末设计的超超临界机组，容量在 400~1000MW 范围内，蒸汽参数为 27.5 MPa/589/600℃，机组净效率在 45%以上。

丹麦史密斯公司和 GEC-Alstom 公司研究开发的前 2 台超超临界机组，容量为 411MW，过热蒸汽出口压力为 29 MPa，二次中间再热，过热蒸汽和再热蒸汽温度为 582/580/580℃，机组效率为 47%。然后开发了参数为 30.5 MPa/582/600℃、容量为 430MW 的超超临界机组，该机组采用一次中间再热，机组设计效率为 49%，从而成为迄今为止世界上报导过的热效率最高的火电机组。

表 1-6 近期在欧洲投运的超超临界机组

电 厂	国 家	燃 料	容 量 (MW)	蒸汽参数 (MPa/℃/℃/℃)	投 运 日 期
Skaerbaek 3 号	丹麦	气	411	29/582/580/580	1997
Nordjyllands 3 号	丹麦	煤	411	29/582/580/580	1998
Avedore	丹麦	气/煤	430	30/580/600	2000
Schwarze Pumpe A, B	德国	褐煤	874	28.3/544/560	1997-8
Boxberg Q, R	德国	褐煤	910	25.8/541/580	1999-2000
Lippendorf R, S	德国	褐煤	930	26.0/550/580	1999-2000
Bexbach 2 号	德国	煤	750	25/575/595	1999
Niederausexm K	德国	褐煤	1025	26.5/576/599	2002

欧洲 COST522 计划，有 16 个国家参加了这个研究项目，计划开发应用铁素体钢的蒸汽参数为 29.4 MPa/620/650℃的超超临界机组。欧共体的 Thermie “700℃计划”是开发蒸汽参数达 37.5 MPa/700/700℃的超超临界机组，其效率可达 52%~55%。该项目计划成功完成后，将大大增加欧洲电力设备供货商的市场竞争能力。

三、我国超（超）临界机组的现状与发展

1. 我国超临界机组的现状与发展

从 20 世纪 80 年代末至今，我国从国外进口超临界机组共 20 台，总容量 11400MW（见表 1-7）。其中，最大单机容量为 900MW，最长的运行时间已近 13 年，积累了丰富的运行经验，形成了一批掌握超临界机组安装、调试和运行的技术队伍。

表 1-7 我国超临界机组容量蒸汽参数

序 号	电厂名称	机组号	容 量 (MW)	主/再热蒸汽温度 (°C)	主蒸汽压力 (MPa)	引进国家	投产日期 年月日
1	外高桥	5、6	900	538/566	25.7	德国阿尔 斯通	5 号 2004.04.20 6 号 2004.09.22
2	石洞口二 厂	1、2	600	538/566	25.4	美 国 CE 公司	1 号 1992.06.12 2 号 1992.12.26
3	南京电厂	1、2	300	545/545	25.0	俄罗斯	1 号 1994.03.17 2 号 1994.10.20
4	营口电厂	1、2	300	545/545	25.0	俄罗斯	1 号 1996.01.23 2 号 1996.12.21
5	盘山电厂	1、2	500	545/545	25.5	俄罗斯	1 号 1995.12.31 2 号 1996.12.15
6	伊敏电厂	1、2	500	545/545	25.5	俄罗斯	1 号 1998.11.09 2 号 1999.09.15
7	绥中电厂	1、2	800	545/545	25.0	俄罗斯	1 号 2000.07.06 2 号 2000.09.23
8	漳州厚石 电厂	1~6	600	538/566	24.6	1~4 号日 本三菱 5~6 号阿 尔斯通 CE	1 号 2000.03.15 2 号 2000.09.16 3 号 2002.03.15 4 号 2003.03.01 5 号 2003.10 6 号 2004.06

我国通过华能石洞口二厂引进的 600MW 超临界机组，采用技贸结合带引进技术的方式，引进了大部分超临界技术。不仅取得了主要设计计算软件，而且通过联合设计培训了一批设计技术人员。一些制造厂已拥有国外的整套技术，锅炉本体和辅机国产化率达 85%，为我国超临界机组国产化打下了一定基础。

华能沁北电厂 2×600MW 超临界机组，为国产化依托项目，其蒸汽参数为 25.4 MPa/566/566℃，锅炉蒸发量为 1950 t/h，机组技术指标先进、高效、节能、环保，设计供电煤耗为 297.3 g/(kW·h)，1 号机组已于 2004 年 11 月 23 日投入商业运行。目前，国内各发电公司已向国内发电设备厂商订购了容量为 600MW、蒸汽参数为 25.4 MPa/566/566℃或 25.4 MPa/538/566℃的超临界机组 100 多套，预计这些机组将在 2015 年前陆续投入运行。

2. 我国发展超超临界机组及国产化的意义

(1) 拉动我国国民经济发展的需要。随着我国亚临界 300、600MW 机组以及常规超临

界 600MW 机组相继实现国产化后,继续发展国产化超超临界机组,有利于进一步提高我国电站设备的设计和制造水平,有利于我国电站设备制造企业持续深入的发展。由于超超临界机组所采用的新材料和新工艺,还能推动我国钢铁业、电子业、电力建设业等相关工业的发展。另外,还能全面拉动电厂所在地区的国民经济高速增长。

(2) 电源结构调整的需要。到 2004 年底,全国发电设备总装机容量达到 4.407 亿千瓦,但火电机组平均容量不到 10 万千瓦,有相当一部分的火电机组为高压、超高压蒸汽参数机组,亚临界 300MW 及其以上机组占火电总装机容量也不到 50%,平均供电煤耗为 381g/(kW·h)。火电机组本身结构的不合理,严重影响了电力工业的整体技术、经济效益。并且,由于我国能源分布不均匀,南水电、北火电,能源储藏集中于西部,故调峰任务重。而超超临界火电机组的技术、经济性能十分适合于调峰,发展超超临界机组将有利于改善我国电源结构和稳定经济调度。

(3) 提高火电机组水平、实现我国电力工业技术跨越式发展的需要。发展超超临界机组,是提高我国火电机组技术水平最有效又现实的措施。随着科学技术的进步,新一代大容量超超临界机组已具备了优良的经济性能、启动调峰运行性能和良好的环保性能,是当代燃煤火力发电厂实用技术的代表。从我国国情出发,发展超超临界燃煤机组有利于机组热效率的提高,降低发电煤耗。一台超超临界燃煤机组的供电煤耗仅为 275g/(kW·h),比我国亚临界机组平均供电煤耗 345g/(kW·h)还要低 70g/(kW·h),且大幅度减少了 CO₂ 和 NO₂ 的排放量。有利于电网调峰的稳定性和经济性;有利于保护生态环境,提高环保水平;有利于实现我国电力工业技术跨越式发展。

(4) 保护环境、节约一次能源的需要。目前国际上超超临界机组的发电效率可达 45%~47%,比亚临界机组提高 6%,比常规超临界机组提高 4%。目前的增压循环流化床(PFBC)机组的效率一般在 38%~41%,整体煤气化联合循环(IGCC)机组效率一般在 42%~45%。如超超临界配以脱硫装置,其本身就是一个洁净煤的发电工程。同时,其在节约一次能源结构,减少温室气体排放方面的作用,甚至超过 PFBC 和 IGCC。

(5) 缓解电力供应紧张局面、满足工业和居民生活用电的需要。随着我国经济的高速发展,人民生活水平的不断提高,工业基础和居民生活用电急剧增长,全国电力供需矛盾日趋紧张,发展大容量超超临界机组,可以加快我国电力装机容量的增长速度,缓解电力供应紧张局面,满足工业和居民生活用电的需要。

3. 我国首台 1000MW 级超超临界机组概况

由原国家电力公司和中国华能集团公司负责的国家高技术研究发展计划,即 863 计划中的“超超临界燃煤发电技术”(2002AA526010)课题,在第一阶段的研究结论是:现阶段我国发展超超临界机组的容量为 600 和 1000MW 等级,汽轮机进口蒸汽参数为 25~28 MPa/600/600℃,一次再热。华能玉环电厂 4×1000MW 超超临界机组,作为国家“863 计划”的依托工程,确定机组容量为 1000MW,汽轮机入口蒸汽参数为 26.25 MPa/600/600℃,所选参数与“863 计划”中的“超超临界燃煤发电技术”课题组推荐值一致。华能玉环电厂确定使用的机组参数,在压力上高于日本,在温度上高于欧洲的同类机组,尤其又是单轴,目前世界上并无一台完全相同的机型可供借鉴。

锅炉为变压垂直管圈直流炉、一次再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构 Π 型炉。炉膛断面尺寸为:66.40m(高)×32.08m(长)×15.67m(宽),炉膛容积