

火电发展的关键技术及质量

◆ 国家电监会安委会 杨富

1 中国电力工业的发展历程和现状

我国电力工业已经有120多年的发展历程。从1879年在中国第一次使用电能,1882年创办第一个火电厂,到1949年末,全国电力总装机容量仅为184.86万kW,列世界第21位。新中国成立以来,特别是改革开放以来,中国电力工业有了很大的发展,全国电力总装机容量到1980年底达到6500万kW,1987年达到1亿kW,1995年达到2亿kW,2000年达到3亿kW,2005年达到5.17亿kW,2006年达到6.22亿kW,2007年达到7.13亿kW,2008年达到7.9亿kW。2009年末全国装机容量已达8.7407亿kW。2006~2009年连续4年,年装机容量为8000万~11000万kW,打破了美国在20世纪70年代创造的年装机容量4700万kW的世界纪录。

2006年是中国电力发展史上最辉煌的年份之一。全年投产超临界600MW机组26台,超超临界1000MW机组3台,这标志着我国电站设备设计、制造、安装和火电单机容量、蒸汽参数、环保技术等均达到了世界先进水平。

从全国电力装机总容量和年发电量看,我国已成为世界第二电力大国。但是我们还应该清醒地看到,我国人均电力只有0.6kW左右,远远低于发达国家人均水平,而且离中等发达国家人均1kW的水

平,也还有相当的差距。因此,发展仍然是电力工业首要的和长期的任务。

2 中国发电设备制造业的发展

我国电力工业取得的显著成就,离不开发电设备制造业的国产化程度和水平的日益提高。它是推进电力工业可持续发展的强劲支撑。中国的发电设备制造业从1953年起步,采用捷克技术,于1955年在上海生产出首台6MW火电机组;采用前苏联技术,于1958年在哈尔滨生产出首台25MW火电机组,同时建成了上海和哈尔滨两大制造基地。1974年在四川建成东方制造基地。除上述三大制造基地外,还有北京和武汉制造基地。首台100MW高压机组、125MW和200MW超高压机组、300MW亚临界机组分别于1967年9月在高井电厂、1969年9月在吴泾电厂、1972年12月在朝阳电厂、1974年11月在望亭电厂投运。引进美国CE和WH公司技术生产的首台300MW、600MW亚临界机组分别于1987年7月在石横电厂和1989年11月在平圩电厂投运。与国外公司合作制造的首台600MW超临界机组于2004年11月在沁北电厂投运。首台1000MW超超临界机组于2006年11月28日在玉环电厂投运。有关信息见表1。

表1 不同参数与容量的首台机组的有关信息

单机容量/MW	参数/(MP/°C/°C)	投运电厂	锅炉制造厂	安装单位	投运时期
6	3.5/435	田家庵电厂	上海锅炉厂	华东电业管理局 修建工程局	1956年4月
25	9.0/535	闸北电厂	上海锅炉厂	上海电建公司	1958年12月
50	9.0/535	辽宁电厂	哈尔滨锅炉厂	东电一公司	1959年11月
100 (进口)	9.0/535	北京一热电厂	原苏联	北京电建公司	1959年10月
100 (国产)	9.0/535	高井电厂	哈尔滨锅炉厂	北京电建公司	1967年2月
125	13.5/550/550	吴泾电厂	上海锅炉厂	上海电建公司	1969年9月
200	13.0/535/535	朝阳电厂	哈尔滨锅炉厂	东电一公司	1972年9月

续表1

单机容量/MW	参数/(MP/°C/°C)	投运电厂	锅炉制造厂	安装单位	投运时期
300 (国产)	16.5/535/535	望亭电厂	上海锅炉厂	上海电建公司	1987年7月
300 (引进型)	17.0/538/538	石横电厂	上海锅炉厂	东电二公司	1994年3月
超临界320 (进口)	25/545/545	南京热电厂	俄罗斯斯塔干罗格锅炉厂	江苏电建一公司	1982年11月
350 (进口)	16.5/538/538	宝钢电厂	日本三菱	上海电建公司	1991年11月
500 (进口)	16.5/538/538	神头二电厂	捷克斯柯达公司	山西二公司	1995年12月
超临界500 (进口)	25/545/545	盘山电厂	俄罗斯波多尔斯克、奥尔 忠尼启则机器制造厂	北京电建公司	1985年12月
600 (进口)	18.5/538/538	元宝山电厂	德国斯坦缪勒	东电一公司	1989年11月
600 (引进型)	17.0/538/538	平圩电厂	哈尔滨锅炉厂	安徽二公司	1992年6月
超临界600 (进口)	24.1/538/566	石洞口二厂	美国CE.瑞士苏尔寿公司	上海电建公司	1996年6月
660 (进口)	18.2/538/538	沙角C电厂	美国CE公司	广州火电公司	2000年4月
700 (进口)	18.2/538/538	珠海电厂	日本三菱	广州火电公司	1999年12月
超临界800 (进口)	25/545/545	绥中电厂	俄罗斯斯塔干罗格锅炉厂	东电三公司	2004年4月
超临界900 (进口)	25.76/542/568	外高桥电厂	德国阿尔斯通	上海电建公司	1999年12月
超临界600 (国产)	24.2/566/566	泌北电厂	东方锅炉厂	东电一公司	2004年11月
超超临界10000 (国产)	26.25/600/600	玉环电厂	哈尔滨锅炉厂	浙江火电公司	2006年11月

3 超超临界机组是我国火电发展的必然趋势

电力是一种应用广泛、使用方便的清洁能源。电力是二次能源,是由煤炭、石油、天然气、水力、核能以及风力等转换而成的。电力在终端能源总构成中所占的比例已成为衡量一个国家现代化程度的重要标志。

我国一次能源结构的特点是:“富煤、贫油、少气”。我国能源以煤炭为主,煤炭消费占一次能源的70%,远高于世界平均水平(约30%)。预计全国发电装机容量到2020年为15亿kW,其中,火电将从目前的75%左右下降为66%,水电占22.7%,核电、风电等新能源约占11.3%。

从以上电源结构发展情况可以看出,火电比重随核电、可再生能源比重的增加而减少,但是在2020年前,我国以火电为主的电源结构不会发生根本性改变,火电将在相当长的时期内占据主导地位。

由于我国的一次能源以煤炭为主,所以我国的能源发展政策是:煤为主体,电为中心,保障社会经济的可持续发展。

我国电力发展的基本方针是:提高能源效率,保护生态环境,加强电网建设,大力开发水电,优化发展煤电,积极发展核电,适度发展天然气发电,鼓励新能源发电。优化发展煤电,主要是提高燃煤发电机组的效率和减少污染物的排放。

发展燃煤发电机组,烟气排放中会有更多的SO_x、NO_x和CO₂,并排出大量的灰渣和污水,给人类带来4大环境问题:温室效应、酸雨、臭氧层破坏和大气污染。

优化发展煤电,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(USC)。但是,CFBC、PFBC、IGCC等技术目前还处于试验或示范阶段,近期要广泛发展是不现实的。

从技术难度和现实性看,SC和USC配以常规的烟气净化装置已公认是一种洁净煤发电技术,是优化煤电结构的主要方向,符合当前中国的实际情况,所以超(超)临界机组是我国火电机组的主要发展方向。

国家科技部863计划“超超临界燃煤发电技术”课题研究结论:推荐现阶段我国发展超超临界机组,其参数为 $P=25\text{MPa}\sim 28\text{MPa}$, $T=600^\circ\text{C}/600^\circ\text{C}$,一次再热。

我国在运的21台1000MWUSC机组的实践已充分证明我国大力发展USC机组的必然性和正确性。

4 发展USC机组的关键技术——新型耐热钢的开发、焊接及热处理

USC机组就是通过提高火电机组锅炉的蒸汽

温度、压力等参数来提高机组效率的。温度对效率的影响更为显著。而提高蒸汽参数遇到的关键问题是金属材料的耐高温、耐高压及焊接和热处理问题。

我国正在建设的USC机组大量采用的新型铁素体耐热钢为SA213-T23、T91、T92；SA335-P91、P92、P122；新型奥氏体耐热钢为A213M-S30432(SUPER304H)、TP310HCbN(HR3C)。SC/USC锅炉承压部件用钢选择，如表2所示。

为了更好地发展SC、USC机组，在大量引进国外先进的新型耐热钢的过程中，要加快国产新型耐热钢的开发。为了确保USC机组的稳步发展，应开展以下几方面的试验研究工作。

(1)新型耐热钢合金化机理、力学性能、强韧化机理、高温持久强度、抗烟气腐蚀、抗蒸汽氧化及寿命评估方面的研究工作。

(2)新型耐热钢经过长期高温运行后，钢材显微组织及性能变化规律的研究。

(3)新型耐热钢异种钢焊接接头早期失效机理的研究。

(4)进一步研究和掌握P91钢管的合金化、强韧性强化机理和生产制造、热处理工艺，使国产P91钢管质量稳定，完善管径、壁厚、品种、规格，形成批量生产。

(5)T/P92钢材的国产化的基础研究，生产制造工艺的试验。尽快实现国产化。

(6)加速A213M-S30432(Super304H)、TP310HCbN(HR3C)钢国产化的生产制造和挂炉试用工作。

(7)与T/P91、T/P92、A213M-S30432(Super304H)、TP310HCbN(HR3C)钢相匹配的焊接材料的国产化工作。

焊接及热处理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。目前我国已开始大力发展的SC、USC火力发电机组，所采用的新型耐热钢与传统的低合金耐热钢有质的区别。电站焊接工作者必须转变传统的低合金耐热钢形成的观念，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。

5 火电锅炉质量评述

火电锅炉制造、安装的主要加工工艺为焊接，因此火电锅炉的质量主要反映在焊接质量方面。火电锅炉的安装实际上是锅炉制造的继续，但是由于目前我国火电锅炉设计、制造、安装和运行在体制上的分隔，造成了我国火电锅炉质量方面的一系列问题，如：

(1)由于USC锅炉本体焊缝位置设计不合理，在安装过程中遇到大量“镜面焊”焊口，给锅炉安全运行带来很大的隐患。

(2)由于USC锅炉过热器出口蒸汽管道和炉外主蒸汽管道选材不同，造成不合理的异种钢焊缝，给安全运行带来质量隐患。

(3) USC锅炉水冷壁T23钢管泄漏。

(4) USC锅炉大直径厚壁集箱焊缝产生裂纹。

(5)由于锅炉制造过程中所执行的焊接工艺规范、质保体系不严格所造成的焊接质量隐患。

(6)锅炉制造厂对分包商质量失控所造成的质量隐患。

(7)安装施工单位对焊接工艺评定执行不严所造成的焊接质量问题。

表2 SC/USC锅炉承压部件用钢

承压部件	超临界	超超临界
水冷壁	T1, T2, T11	T1, T2, T11; T23/T24
过热器 再热器	T12, T22, T23, T91, TP304H, TP347H	T12, T22, T23, T91, T92, TP310HCbN(HR3C), A213M-S30432(SUPER304H)
主汽	P91	P92/P122/E911
再热冷段	A1672B70CL32	A691Cr1-1/4CL22
再热热段	P91	P91/P92
给水管道	WB36	WB36

(8) 安装施工单位使用焊缝检验一次合格率不合理所造成的焊接质量问题。

(9) 由于安装施工单位热处理控温不准确而造成的焊接质量问题。

(10) 安装施工单位对分包商质量失控、人员资质控制不严所造成的焊接质量问题。

6 2006年以来, 火电厂出现的典型锅炉质量事故案例

(1) 某电厂6号锅炉蒸汽管道焊口出现裂纹。

该机组为320MW亚临界机组, 2005年9月18日投入运行, 于2006年4月18日发现锅炉厂外委某管件厂焊接的焊缝泄漏, 管材为P91, $\phi 457 \times 45\text{mm}$ 。如图1所示。裂纹产生的原因: 锅炉厂对外委厂的质量控制失控, 焊接及热处理工艺不当。



图1 锅炉蒸汽管道焊口裂纹

(2) 某电厂2号机组主蒸汽管道开裂。

该机组为300MW亚临界机组, 2005年9月15日投入运行, 2006年6月22日8时发现12m标高处的横向P91主蒸汽管出现长80mm的裂纹, 累计运行4800h。如图2所示。



图2 用主蒸汽管道开裂

主蒸汽管道开裂的原因: 主蒸汽管道材料P91钢不合格, 选材不当。

(3) 某发电厂2号机组主蒸汽管道爆裂事故。

该机组为300MW亚临界机组, 主蒸汽管材料为P91钢, $\phi 456.2 \times 43\text{mm}$, 2006年10月17日首次点火最高参数为 $P=13.36\text{MPa}$ 、 $t=483^\circ\text{C}$, 2006年10月31日21:10调试锅炉严密性试验及安全门调整时, 在17m高处主蒸汽管道立管发生爆裂, 造成2死1伤人身事故。如图3所示。

主蒸汽管道开裂的原因: 主蒸汽管道P91材料不合格, 选材不当。

(4) 2006年10月某电厂600MW机组大板梁发生断裂。

大板梁发生断裂的原因: 锅炉厂对钢结构的



图3 主蒸汽管道爆裂

分包厂质量失控; 钢板质量不合格, 焊接工艺不当。如图4所示。



图4 大板梁发生断裂

大板梁发生断裂的原因: 锅炉厂对钢结构的分包厂质量失控, 钢板质量不合格, 焊接工艺不当所致。

(5) 2008年7月某电厂1000MW机组水冷壁下联箱, 材质12Cr1MoV, 壁厚96.9mm与直径168mm插管角焊缝, 整圈开裂, 如图5、图6所示。

焊缝开裂的原因: 焊接及热处理工艺不当。



图5 焊缝开裂



图6 焊缝开裂

7 结束语

由于电力生产的本质技术特征是发电、输电、配电和用电的过程同时瞬间完成。电力生产的特征决定了发电设备制造、安装过程中必须保证“质量第一”, 电力生产必须保证“安全第一”。电力事故如果处理不当, 从一个小事故可以发展成为一个大事故, 会给用户和社会带来不可估量的损失。因此, 为了保证发电设备的安全, 特别是USC机组的安全运行, 必须尽早对USC机组安全运行的关键技术——新型耐热钢及其焊接与热处理开展深入的研究和金属监督工作。■

作者简介:

杨富(1940—), 男, 教授级高级工程师, 国际焊接工程师; 曾任电力部、国家电力公司处长, 中国焊接学会第六届理事会常务理事, 中国电机工程学会第七届理事会理事; 现被聘为电力行业“锅监委”顾问, 国家电监会电力安全专家委员会材料专家, 中国电力企业联合会司法鉴定中心专家。

长期从事火力发电厂锅炉监察、焊接施工、科研和技术管理工作。发表论文数十篇。

