

超超临界机组的参数选择

山东电力工程咨询院 赵树成 胡亦工

【内容摘要】 该文综述了国外超超临界机组的研究和发展历史以及今后的发展方向,介绍了国内超超临界机组的技术引进和技术开发情况,并对超超临界机组的参数进行了初步分析,对超超临界机组的了解、研究和设计具有一定的参考价值。

【关键词】 超超临界 研发 参数 选择

1 概述

随着社会的进步,国家经济的发展,电力建设蒸蒸日上。火电机组从小容量、低参数发展到大容量、高参数,并形成了以亚临界、300MW和600MW为主力机型的电力市场格局。为保持经济的可持续发展,充分利用资源,就必须提高机组的效率和降低热耗从而降低单位发电煤耗。众所周知,提高蒸汽的初参数是首选的措施之一。目前,超临界机组在国内得到较快的发展,不仅建成了进口的上海外高桥900MW机组、石洞口600MW机组和国产的河南沁北600MW等机组,而且一大批国产的超临界机组正在设计、制造和建设之中;可喜的是,超超临界机组在国内也已开始建设,1000MW机组的有华能玉环电厂、华电邹县电厂,600MW机组的有徐州阚山电厂、辽宁营口电厂。

对于超超临界的定义,目前国内外没有统一的规定,因国家和公司而异。本文介绍了国际超超临界机组的研发历史,对国内的超超临界机组参数进行了初步分析。

2 国外超超临界发电技术的发展与应用

2.1 发展历程和现状

从上个世纪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,是从上个世纪50年代开始,以美国和德国等为代表。当时的起步参数就是超超临界参数,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,大约是从上个世纪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,及对电厂水化学方面的认识的深入,克服了早期超临界机组所遇到的可靠性问题。同时,美国对已投运的机组进行了大规模的优化及改造,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、运行灵活性。其间,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世纪九十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。其主要原因在于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也为超超临界机组的发展提供了条件。主要以日本(三菱、东芝、日立)、欧洲(西门子、阿尔斯通)的技术为主。这个阶段超超临界机组的技术发展具有以下三方面的特点:

蒸汽压力取得并不太高,多为 25MPa 左右,而蒸汽温度取得相对较高,主要以日本的技术发展为代表。近期欧洲及日本生产的新机组,大多数机组的压力保持在 25MPa 左右,进汽温度均提高到了 580 ~ 600 左右。

蒸汽压力和温度同时都取较高值(28MPa~30MPa,600 左右),从而获得更高的效率。主要以欧洲的技术发展为代表,在采用高温的同时,压力也提高到 27MPa 以上。压力的提高不仅关系到材料强度及结构设计,而且由于汽轮机排汽湿度的原因,压力提高到某一等级后,必须采用更高的再热温度或二次再热循环。近年来,提高压力的业绩主要来源于欧洲和丹麦一些设备制造厂家。

开发更大容量的超超临界机组以及百万等级机组倾向于采用单轴方案。为尽量减少汽缸数,大容量机组的发展更注重大型低压缸的开发和应用。日本几家公司和西门子、阿尔斯通等在大功率机组中已开始使用末级钛合金长叶片。

为了发展高效率的超超临界机组,从 80 年代初开始美国、日本和欧洲都投入了大量财力和研究人员开展了各自的新材料研发计划,这些材料分别针对不同参数级别的机组,如 593 (包括欧洲的 580 机组和日本的 600 机组)级别、620 级别、650 级别和正在研发之中的更高温度级别的机组。新开发的耐热材料在投入正式使用之前进行了大量的实验室和实机验证试验。到目前为止欧洲已经成功投运了主汽温度为 580 的超超临界机组,日本投运了主汽温度为 600 的机组,从材料的实机验证结果来看,国际上目前成熟的材料已经可以用于建造 620 的机组,而据日本最新的报导称已经可以提供 650 机组所需的关键部件材料。

据统计,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。其中在美国有 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。近年来在日本和欧洲投运的主要超超临界机组见表 2-1 和表 2-2。

表 2-1 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/ / /	投运日期
川越 KAWAGOE #1	Chubu	700	31/566/566/566	1989-6
川越 KAWAGOE #2	Chubu	700	31/566/566/566	1990-6
碧南 Hekinann #3	Chubu	700	24.6/538/593	1993-4
能代 Noshiro #2	Tohoku	600	24.6/566/593	1994-12
七尾太田 Nanao-Ohta #1	Hokuriku	500	24.6/566/593	1995-3
Reihoku #1	Kyushu	700	24.1/566/566	1995-7
原汀 Haramachi #1	Tohoku	1000	25/566/593	1997-7
松浦 Matsuura #2	EPDC	1000	24.6/593/593	1997-7
三隅 Misumi #1	Chugoku	1000	25/600/600	1998-6
原汀 Haramachi #2	Tohoku	1000	25/600/600	1998-7
七尾太田 Nanao-Ohta #2	Hokuriku	700	24.6/593/593	1998-7
碧南 Hekinann #4	Chubu	1000	24.6/566/593	2001-11

电 厂	电力公司	容量 MW	蒸汽参数 MPa/ / /	投运日期
碧南 Hekinann #5	Chubu	1000	24.6/566/593	2002-11
敦贺 Tsuruga #2	Hokuriku	700	24.6/593/593	2000-10
橘湾 Tachibana-wan	Shikoku	700	24.6/566/566	2000-7
Karita #1(PFBC)	Kyushu	350	24.6/566/593	2000-7
苓北 Reihoku #2	Kyushu	700	24.6/593/593	2003-7
橘湾 Tachibana-wan #1	EPDC	1050	25/600/610	2000-7
橘湾 Tachibana-wan #2	EPDC	1050	25/600/610	2001-7
Isogo (新#1)	EPDC	600	25.5/600/610	2002-4
常陆那珂 Hitachinaka #1	Tokyo	1000	24.5/600/600	2002
舞鹤 Maizuni #1	Kansai	900	24.1/593/593	2003
舞鹤 Maizuni #2	Kansai	900	24.1/593/593	2003

表 2-2 近期在欧洲投运的超超临界机组

电 厂	国 家	燃 料	容量	蒸汽参数 MPa/ / /	投运日期
Skaerbaek #3	丹麦	气	411	29/582/580/580	1997
Nordjyllands #3	丹麦	煤	411	29/582/580/580	1998
Avedore	丹麦	气/煤	410	30/580/600	2000
SchoPau A, B		褐煤	450	28.5/545/560	1995-6
Schwarze Pumpe A, B	德国	褐煤	874	25.3/544/560	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	德国	煤	750	25/575/595	1999
Niederausem K	德国	褐煤	1025	26.5/576/599	2002

分析国外超超临界机组发展历程和现状，可以得到非常有益的结论：

早期（50年代末）以美国为代表，更注重提高初压（30MPa或以上），并采用两次再热。使结构与系统趋于复杂，运行控制难度趋于提高，机组可用率下降。因此，美国早期只生产了三台超超临界机组之后便停止生产。到80年代，又退回到超临界参数。

中期（80年代末）以日本由川越电厂 31MPa/566 /566 /566 超超临界为代表，走的

是一条从引进到自主开发，有步骤、有计划的发展之路。

近期(90年代始)，日本由川越电厂 31MPa/566 /566 /566 超超临界参数，压力调整为(24~25)MPa，温度由 566 /593 稳步上升为 600 /600 的发展方向，取得了显著的成功。

德国等欧洲国家(丹麦除外)超超临界机组的压力在(25~28)MPa 范围，温度也上升为 580 /600 及 600 /600 。

丹麦的超超临界机组追求技术上可能达到的最高效率，压力接近 30MPa，温度为 580 /580 /580 或 580 /600 ，目前又倾向于采用一次再热。

采用二次再热的超超临界机组，除了早期美国的三台机组外，只有日本川越两台(1989年)和丹麦的机组。采用两次再热可使机组的热效率提高 1%~2%，但也造成了调温方式、受热面布置、结构等的复杂性，成本明显提高。因此，除早期投运的少数超超临界机组外，无论是日本还是欧洲都趋向于采用一次再热。

90年代中期以来，世界上已建和在建的超超临界机组的参数和容量的发展有两个特点：一是欧洲的国家在建设大容量火力发电机组时以追求机组的高效率为主要目标，在提高蒸汽温度的同时，蒸汽压力也随之提高，主蒸汽压力为(25~28)MPa，主蒸汽温度为 580 居多，再热蒸汽温度为(580~600) ，大多采用一次再热。日本的超超临界机组在大幅度提高机组容量的时候，主要是提高机组的蒸汽温度，而蒸汽压力基本保持在 25MPa，日本这种对超超临界机组蒸汽参数(较低的蒸汽压力和较高的蒸汽温度)的选择主要是基于技术经济方面的考虑。

锅炉布置型式按各公司传统，有 型布置及半塔型布置。日本超超临界锅炉全部采用 型布置，德国、丹麦全部采用塔式布置，这主要是各自的传统技术所决定的。

燃烧方式按各公司传统，有切圆燃烧和对冲燃烧。日本 IHI、日立公司制造的超超临界 型炉均采用了前后墙对冲燃烧方式，三菱重工的锅炉燃烧方式为单炉膛或双炉膛燃烧方式，两种燃烧方式都可以减少炉膛出口烟温偏差。欧洲的超超临界塔式炉不存在烟温偏差问题，燃烧方式既有四角切圆燃烧，又有对冲燃烧，还有个别的双切圆燃烧和八角单切圆燃烧。

水冷壁型式为垂直管屏和螺旋管圈二种型式共存。美国早期为垂直管屏，欧洲为螺旋管圈；90年代后，除日本三菱公司新开发了内螺纹垂直管屏外，其余全部采用螺旋管圈。

已投运的 1000MW 级超超临界机组以双轴机组居多，但随着汽轮机超长末级长叶片的开发应用，大容量单轴机组已成为发展的趋势。

2.2 发展计划

材料的发展水平决定了不同时期的火电站的运行参数。70年代能源危机的出现和电力市场竞争的加剧导致了80年代初开始的一系列发展超临界和超超临界发电技术的合作研究和计划。

为进一步降低能耗和减少污染物排放，改善环境，在材料工业发展的支持下，超临界机组正朝着更高参数的超超临界的技术方向发展。目前在超临界机组中容量最大的已达到 1300MW，效率最高的已达到 49%，充分显示了超临界和超超临界技术的成熟性和推广前景。国外超超临界机组参数发展的近期目标主汽压力为 31MPa，蒸汽温度为 620 ，并正在向更高参数的水平发展。

一些国家和制造厂商已经公布了发展下一代高效超临界机组的计划，主汽温度将提高到 700 ，再热汽温达 720 ，相应的主汽压力将从目前的 30MPa 左右提高到 35~40MPa。根据英国贸工部对超临界蒸汽发电的预测，今后 5年内，超临界机组蒸汽温度将达到 620 。到 2020年，蒸汽温度将达到 650 ~ 700 ，循环效率可达到 50%~55%。

从1983年开始，欧洲实施了COST 501计划和COST 522计划，其目标分别是建立29.4MPa/600 /600 、29.4MPa/600 /620 的机组和开发应用铁素体钢的蒸汽参数为29.4MPa/620

/650 的超超临界机组。

欧共体最近几年来正在进行的“Thermie 700 计划”的目的是论证和准备发展具有先进蒸汽参数的未来的燃煤电厂型式，其中关键部件将采用镍基高温合金。Thermie 700 计划的目标是使下一代超超临界机组的蒸汽参数达到 37.5MPa/700 /700 ，从而效率可达 52% - 55%（对海水冷却方式可达 55%，对内陆地区和冷却塔方式可达 52%），使温室气体 CO₂ 的排放降低 15%，并降低燃煤电厂投资。该计划预期在 2014 年完成，能否实现上述目标取决于技术方面的发展。

从 2002 年开始美国能源部又开始了一个用于燃煤电厂超临界和超超临界机组的高温高强度合金材料研究项目（VISION 21 计划的一部分）。主要研究用于燃煤电厂超临界和超超临界机组的高温高强度合金材料，以增强美国锅炉制造业在国际市场中的竞争力。该研究项目的五个主要目标是：

- (1) 确定哪些材料影响了燃煤电厂的运行温度和效率；
- (2) 定义并实现能使锅炉运行于 760 的合金材料的生产、加工和涂层工艺；
- (3) 参与 ASME 的认证过程并积累数据为成为 ASME 规范批准的合金材料做好基础工作；
- (4) 确定影响运行温度为 871 的超超临界机组设计和运行的因素；
- (5) 与合金材料生产商、设备制造商和电力公司一起确定成本目标并提高合金材料和生产工艺的商业化程度。

日本电力（J-Power，原为 EPDC）在日本通商产业省支持下，从政府得到 50% 的补助金，与其它单位共同组织超超临界技术的开发。第一阶段目标是：第一步用铁素体钢达到 593 ，第二步用奥氏体钢达到 649 。第二阶段目标是用新型铁素体钢达到 630 。日本三大设备制造公司对转子、汽缸、法兰、螺栓等主要部件进行了相应参数下的实物中间试验，50MW 功率的中间实验机组已经投运。

3 超超临界机组可靠性与经济性

3.1 可靠性

与亚临界及超临界机组比较，超超临界机组的可靠性不存在任何问题，超超临界机组在国外已有多台机组拥有多年的运行业绩，表 3-1 为三菱公司超超临界机组运行业绩：

表 3-1 三菱公司超超临界机组运行业绩

序号	国家	用户名称	电厂名称	机组	容量 MW	压力 MPa	温度 /	排汽压力 kPa	末叶长度 inch	投运时间
1	日本	中部电力	碧南电厂	#3	700	24.2	538/593	5.07	40	1993
2	日本	北陆电力	七尾大田电厂	#1	500	24.2	566/593	5.07	31	1995
3	日本	电源开发	松浦电厂	#2	1000	24.2	593/593	5.07	46	1997
4	日本	中国电力	三隅电厂	#1	1000	24.6	600/600	5.07	46	1998
5	日本	电源开发	橘湾电厂	#2	1050	25	600/610	5.07	46	2000
6	日本	东京电力	广野	#5	600	24.6	600/600	5.07	48	2004
7	日本	关西电力	舞鹤	#1	900	24.6	595/595	5.07	46	2004

3.2 经济性

超超临界机组的经济性明显优于亚临界和超临界机组。表 3-2 为国内某汽机厂典型机组热耗比较：

表 3-2

典型机组热耗比较表

	热耗 kJ/kw.h	相对值
亚临界	7825	基准
超临界	7530	-3.77%
超超临界	7424	-5.12%

4 国内超超临界机组的引进与技术开发

国内三大动力基地都已有超超临界机组的订单,哈尔滨汽轮机厂 600MW 等级超超临界机组与日本三菱公司合作,已有徐州阚山和辽宁营口四台订单,锅炉为哈尔滨锅炉厂生产;上海汽轮机厂 1000MW 等级超超临界机组与西门子公司合作,已有华能玉环四台订单,锅炉为哈尔滨锅炉厂生产;东方汽轮机厂 1000MW 等级超超临界机组与日立公司合作,已有邹县电厂两台订单,锅炉为东方锅炉厂生产。

5 国内超超临界机组参数选择

5.1 超超临界机组的订单参数

超超临界机组的参数,目前国际上没有统一的规定,不象亚临界和超临界那样有比较一致的数值,而是因设备制造公司的不同而不同。

除丹麦外,日本和欧洲等主要国家的超超临界参数大多选择 25~28MPa,温度为 600/600。国内三大锅炉厂和汽轮机厂的超超临界技术都是引进技术,在引进的基础上进行开发,因此主汽参数的选择基本上依赖于合作公司的情况。

华能玉环 4×1000MW 机组和华电邹县 2×1000MW 机组的主汽参数不相同,就是因为汽轮机的合作方不相同。上海汽轮机厂与西门子合作,汽轮机主汽门前参数为 26.25MPa,600/600,相应锅炉主汽参数为 27.46MPa,605/603;东方汽轮机厂与日立公司合作,汽轮机主汽门前参数为 25MPa,600/600,相应锅炉主汽参数为 26.25MPa,605/603。

至于超超临界 600MW 机组,目前只有哈尔滨汽轮机和哈尔滨锅炉厂有订单,汽轮机主汽门前参数为 25MPa,600/600,相应锅炉主汽参数为 26.25MPa,605/603。

5.2 超超临界机组的参数选择

目前,针对超超临界,国内有两种压力等级的参数选择或者说技术开发:一种是 25MPa 等级,一种是 28MPa 等级,温度都是 600/600。

汽轮机的进汽压力 25MPa 对应的锅炉出口压力为 26.25MPa,汽轮机的进汽压力 28MPa 对应的锅炉出口压力为 29.25MPa。主蒸汽压损分别为 5%和 4.5%,这是从锅炉的设计压力和设计温度对电厂总投资影响综合考虑的,设计压力超过 28MPa 选择主蒸汽压损 4.5%是较为合理的。

对于锅炉来说,两种压力等级的锅炉吸热量与受热面变化值小于 1%;锅炉外形尺寸、受热面布置、汽水系统基本相同;受压件壁厚约增加 7%,锅炉受压件总重约增加 3.5%;受压件材质、一次汽侧阻力、水冷壁系统水动力可靠性基本相同。

对于汽机来说,28MPa 比 25MPa 的主汽调节阀和高压导汽管以及高压的疏水系统、通风系统、监测系统阀门设计等级要提高、壁厚要增加,以满足强度要求;调节级、高压内缸、高压通流部分等进行设计优化,以满足效率和焓降要求。

就经济性而言,考虑辅助系统后,以 2×600MW 机组电厂为例,28MPa 等级比 25MPa 等级一次性投资增加 4400 余万元,因机组效率的提高和热耗的降低而减少运行成本约 400 万元。

从上述来看,28MPa 方案与 25MPa 各有优缺点,经济性从长期运行分析,差别也不是很大。

6 结束语

国内超超临界机组的设计、制造刚刚起步,各制造商的技术路线和技术标准也存在一定差异。超超临界机组,无论对电力行业、机械行业还是电力设计行业和投资方,都是一个全新的课题。有关各方应加强交流和研究,使设计、制造尽快国产化,催动超超临界机组在国内的快速发展,使其发挥应有的作用。

注:本文发表在《热机技术》2005 年第 1 期。