

关于加快发展我国先进超超临界 燃煤发电技术的战略思考

张晓鲁

(中国电力投资集团公司,北京 100033)

[摘要] 我国一次能源的结构特点决定了我国电力供应以燃煤发电为主的格局。为了推动燃煤发电的清洁、高效发展,电力工业大力开发并推广运用超超临界燃煤发电技术,优化了装机结构,推动了节能减排。实践证明发展先进燃煤发电技术是电力工业又好又快发展的重要保障。本文通过对我国超超临界燃煤发电技术研发的回顾,总结分析了该项目的成功经验。结合当前国情,并参考欧盟与美国先进超超临界技术的研究现状,提出了我国研发更高参数、更高效率的先进超超临界发电技术的发展思路和相关建议。

[关键词] 先进;超超临界;燃煤发电;技术;战略思考

[中图分类号] TM611 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)04-0091-05

1 前言

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,也是世界上少数几个以煤炭为主要一次能源的国家之一。电力工业煤炭消耗量占工业部门煤炭消耗总量的一半以上,燃煤发电量长期占全国总发电量的80%左右,我国以燃煤发电为主的发电格局在相当长的时期内将难以发生根本改变。燃煤发电的清洁高效利用潜力巨大。IEA的研究结果表明,如果全球化石燃料发电都能够达到现行最佳效率,每年可节能 $7.16 \times 10^8 \sim 9.89 \times 10^8$ t标准煤,减排 $1.8 \times 10^9 \sim 2.5 \times 10^9$ t CO₂,其中燃煤发电可节能 $5.12 \times 10^8 \sim 7.16 \times 10^8$ t标准煤,减排 $1.4 \times 10^9 \sim 2 \times 10^9$ t CO₂。

因此,提高能源利用效率、保护环境与资源是我国电力技术发展的永恒主题,也是我国电力可持续发展的根本保证。电力工业必须依靠科技进步提升自己的技术水平,关键在于能够快速研发可供电力行业升级换代用的大容量、高参数、高效率、低污染的先进燃煤发电技术。从能源资源、环境、发电技术和可持续发展几个方面综合考虑,积极开发超超临界发电技术,同时配套开发烟气排放污染物

控制技术是实现燃煤发电可持续发展的重要环节。

2 开发先进燃煤发电技术的战略选择

蒸汽参数越高,热力循环效率越高,这是郎肯循环的基本原理。提高燃煤发电机组的蒸汽参数是提高机组效率的重要手段。超超临界发电技术就是将水蒸汽的压力、温度提高到超临界参数以上,从而大幅度提高机组的热效率、降低供电煤耗、减少污染物排放。表1是不同参数煤电机组的热效率和供电煤耗的比较,可以明显地看出超超临界机组在技术经济性方面比原有的亚临界机组有较大的提高^[1]。

电力行业是装备型行业,电力行业技术水平的提升必须与电站装备制造行业的技术进步携手共进。根据我国发电行业快速发展急需更高效率燃煤发电机组的迫切需求,2000年以开发可供电力行业升级换代用的清洁高效发电设备为攻关目标,启动了“超超临界燃煤发电技术”的研究工作。在研究之初的技术选型研究阶段,从环保性能、可靠性、技术成熟度、经济性、与国内原有技术的继承性等几个方面,对超超临界技术、循环流化床技术、增压

[收稿日期] 2013-01-15

[作者简介] 张晓鲁(1952—),女,山东掖县人,教授级高级工程师,研究方向为发电工程和科技管理研究;E-mail:zx1@cpicorp.com.cn

表1 不同参数机组的效率和供电煤耗
Table 1 The efficiency and coal consumption of power units with different parameters

机组类型	蒸汽压力 /MPa	蒸汽温度 /°C	热效率 /%	供电煤耗/(g·(kW·h) ⁻¹)
亚临界	16.7	538/538	~38	~324
超临界	24	538/566	~41	~300
超超临界	25~28	600/600	~45	~280
700 °C	35	欧盟 700/720 美国 730/760	~52	~241

注:供电煤耗是指燃煤发电厂每生产供应1 kW·h电能,所消耗的标准煤量

流化床技术、煤气化联合循环技术和燃气联合循环技术等几项当时有代表性的先进发电技术进行了综合比选,得出配有烟气污染控制技术的超超临界技术是最具技术继承性,技术难点较少,最有条件在短时间内实现规模化生产和优化火电装机结构,使我国电力工业快速跨越式发展的一项战略性关键技术。

科学决策是重大技术攻关成功与否的关键,而科学决策的基本依据是正确认识客观事实,合理确定技术经济目标,统筹部署各项研发工作与示范工程建设。为了能够全面、准确地判断我国超超临界技术研发的可行性,科学确定各项技术目标,满足我国电力工业的技术经济需求,我们通过对国际上超超临界技术的研发进展,国内超超临界技术的研发基础,及可利用的资源与市场条件进行了调研,在认真分析了各种影响因素后,提出了我国当时超超临界技术研发任务的定位及技术选型。

3 超超临界技术选型研究

欧盟与美国自20世纪90年代就启动了超超临界技术的研究。欧洲自1998年启动了700 °C等级超超临界参数的“AD700计划”,目标是于2015年建成效率超过50%,具备高可靠性、经济性的35 MPa/700 °C/720 °C等级超超临界示范电站。1998—2004年期间开展了AD700的技术可行性和材料性能试验,选择了合适的材料并对材料进行试验研究,同时确定最优的热动力循环系统并对锅炉和材料进行设计。

美国将其先进超超临界计划(A-USC)的目标定位在主蒸汽温度为700~760 °C,热效率达到

50%,而其材料技术的发展目标定位在760 °C,主要研究镍基合金材料及其制造、焊接技术。A-USC的主要特点是:a.比欧盟700 °C计划更高的温度目标意味着要对更多的合金材料进行评估与研究;b.针对美国高硫煤种研究抗腐蚀性;c.为了让ASME标准接受新材料而提供相关数据;d.锅炉部分包括富氧燃烧技术。

可以看出,两个计划都将新型耐热合金材料作为研发的关键内容。

在我国,材料技术是弱项,尤其是电站用钢材材料,由于批量小、开发难度大,冶金企业的积极性不高,当时的主力机组—亚临界机组所用高温高压合金钢材料尚需从国外进口。要保证研发新型电站装备获得成功,必须研究制定适合我国国情的技术路线。针对我国当时已加入WTO的国情,提出了从国际市场采购已进入商业化应用的新型耐高温合金钢材料,国内攻关重点放在超超临界发电技术研发、设计、制造、示范电站建设与运行上。在系统分析并评价了主汽/再热参数、机组容量、锅炉与汽轮机的主要结构形式、烟气净化及污染物控制等各项参数、各种系统布置方案对总体方案的影响,确定了我国开发超超临界技术选型方案,即机组容量1 000 MW和600 MW级,压力25~28 MPa,温度600 °C/600 °C,一次中间再热,配套建设脱硫、脱硝装置。并以此为依据,制定了锅炉关键技术、汽轮机关键技术、烟气净化技术、设计与运行技术等4个子课题的研发目标,以及示范工程的技术经济目标^[2,3]。

上述研发工作涉及电力、机械两大行业,科研、设计、制造、建设、生产运行等多个领域,尤其是电力体制改革后,各单位之间没有直接的联系,如何团结各方实现协同创新进而实现既定的攻关目标是摆在面前的一大难题,我们探索采用“用户牵头,产学研用联合攻关”的体制与机制,提出“以示范工程的商业化运营为导向、以工程项目管理的责任体系为前提、集中全国的优势单位,形成企业负责,研究机构支撑”的管理思路^[1],组织国内电力企业、三大动力设备制造企业和科研院所、设计院、高等院校等23家国内权威单位共同攻关。

电力工业的快速发展需要大批参数指标先进、价格合理的先进超超临界机组,但三大动力制造企业受原有技术转让知识产权壁垒限制无法联合研发,如果不解决这一难题,就无法满足电力快速发

展对超超临界机组的大量需求。要创造条件促进三大动力制造企业共同联合攻关,为此,采用“原型机”的研发模式,组织三家制造企业共同开展研究设计计算、材料选用和主要结构等共性难点问题,成果共同分享,再依据各自企业特点,进行工艺开发,从而形成主流技术一致,各具特色的3种超超临界发电设备,三大动力制造企业通过市场竞争推动了技术进步,使得超超临界机组迅速成熟,满足了电力快速发展对超超临界发电技术的需求。

4 我国超超临界燃煤发电技术的示范与推广运用

4.1 我国超超临界燃煤发电技术的研发成果

经过努力,研发任务于2005年成功完成。该项目将现代超超临界机组设计技术、高温材料技术、加工工艺技术及热工理论等先进技术与理论相集成,形成了具有我国自己特色的3种不同型式的600 MW级和1 000 MW级超超临界锅炉、汽轮机的设计开发、制造软件包研制和材料加工性能研究;系统地分析了我国现有火力发电厂设计规程规范对超超临界电站的适应性,自主设计了超超临界机组电站;研究超超临界机组运行特性并自主调试了1 000 MW机组、600 MW机组;开发出配套大机组的选择性催化还原法(SCR)烟气脱硝装置;配套开发了全部辅机以满足大规模推广的需要^[4]。

研发的技术成果在示范阶段就表现出先进的性能。浙江玉环2×1 000 MW示范工程的供电煤耗为282.6 g/(kW·h),仅约为2006年全国平均值(366 g/(kW·h))的77.21%,NO_x排放270 mg/m³,SO₂排放17.6 mg/m³,仅为国家标准的60%和4.4%。同时江苏崑山2×600 MW示范工程的供电煤耗达到284.6 g/(kW·h),NO_x排放249.8 mg/m³,SO₂排放51 mg/m³。

目前,超超临界机组已成为我国新建燃煤发电站的首选装备,其装机容量和机组数量均已跃居世界首位,技术水平居世界前列,大大优化了我国电力装机结构。

4.2 我国超超临界燃煤发电技术的推广运用效果

在21世纪的第一个十年中,中国电力工业发展成果显著。装机结构明显优化,全国燃煤发电装机容量由2000年的2.38×10⁸ kW增长至2010年的7.07×10⁸ kW,60万千瓦级以上机组占比由5%快速增长至37%。节能减排成效明显,2010年,全

国平均供电煤耗比2000年下降59 g/(kW·h),达到333 g/(kW·h)。主要污染物排放浓度大幅下降,全国平均单位发电量SO₂排放量由2000年的8.03 g/(kW·h)下降至2.87 g/(kW·h),NO_x排放量由2000年的4.25 g/(kW·h)下降至2.78 g/(kW·h),烟尘排放量由2000年的2.7 g/(kW·h)下降至0.5 g/(kW·h)。我国电力工业在满足国家经济高速增长对电力需求的同时,将污染物排放基本控制在了2000年的水平。

这些成绩与推广高效率、低污染、配套建设脱硫脱硝装置的超超临界机组密切相关。“十一五”期间,全国累计关停小火电机组7.683×10⁷ kW,新增超超临界机组5.77×10⁷ kW,占此期间全国新增600 MW以上燃煤发电机组总容量的51.99%。

此外,通过大批超超临界电站的开发建设,还大幅提高了我国大型关键设备制造、设计和电站设计、建设、安装的精细化程度,加快了电力自动控制技术、环保技术的发展,积累了丰富的大型燃煤发电工程建设与运行经验,提高了大型工程管理水平,培养一大批高端技术人员,并同步提高基层建设、运行人员的技能与素质,为下一阶段的电力技术进步积累了丰厚的技术储备与人才储备。经过几年来材料工业和制造行业的共同努力,超超临界机组所需的关键耐热金属材料,如T91、T92、P92、SUPER304和HR3C等材料开始实现国产化和批量化,并已在国产超超临界机组中使用,填补了国产电站用钢的空白。

5 继续加快技术创新

2011年,我国电力装机容量已经达到1.056×10⁹ kW,其中燃煤发电装机容量达到7.65×10⁸ kW。预计到2015年全国电力装机容量将达到1.4×10⁹ kW左右,其中燃煤发电装机容量9.33×10⁸ kW;2020年,全国电力装机容量有望达到1.8×10⁹ kW左右,其中燃煤发电装机容量1.2×10⁹ kW,继续占总装机容量的2/3左右。在这期间,还将有一大批在役的参数较低、煤耗高、污染严重的亚临界机组运行寿命达到退役要求,未来还有相当大的对更高参数的燃煤发电机组的需求空间。因此现在必须为下一阶段的电力发展做好技术储备,通过效率的提高,进一步降低煤炭资源的消耗,减少CO₂、SO₂等污染物的排放。

5.1 欧盟与美国超超临界技术发展现状

放眼国际,欧盟的700℃计划取得了相应的进

展。选取了CCA 617作为主要材料,通过对燃料选择、除渣、堵塞和排放控制的研究,最终确定锅炉参数,也研究了生物质和煤混烧的可能性。由于镍基合金价格过高,考虑使用紧凑设计方案,使蒸汽管线缩短,蒸汽出口联箱更靠近汽轮机。

完成了初步设计,通过设计优化,进一步减少镍基合金用量,并研究了锅炉水冷壁、过热器和较厚管壁的焊接、汽轮机进气阀、锻造转子、焊接转子、动叶片、静叶片和压力容器的螺栓连接。在德国Scholven电站进行了全尺寸部件现场挂炉试验,试验部件包括新材料炉膛管屏、过热器,还有一个安全阀和一个汽轮机进气阀。

德国E.ON公司对建设AD700示范电站进行了可行性研究,计划建设500 MWe容量,一次再热,直流锅炉采用螺旋盘管技术。但由于后壁部件和蒸汽管道材料CCA 617的挂炉试验结果未达到要求,材料和造价的问题无法解决,E.ON公司推迟了示范电站的建设。

美国的研究工作也取得了进展。美国A-USC计划认为:由于材料将限制最大可应用温度,而经济性将决定最佳的应用温度,所以选择760℃的原因是可以最好地获得良好的技术经济性能。与700℃材料相比,760℃材料将使部件的壁厚更薄,从而降低重量、减少材料消耗,获得更薄的截面,易于焊接和安装,承受负荷调整而变化参数的能力也会更强。因此美国A-USC计划选取铬镍铁合金740H作为主要材料。与CCA 617(欧盟700℃计划选用材料)进行对比,在700℃时740H的允许压力接近150 MPa,而617的允许压力在80 MPa左右,所以使用740H的管材壁厚只有617的一半,使得使用740H的管道系统材料成本比617的低一半多。

在锅炉方面,已完成了1个参数为35 MPa/730℃/760℃的锅炉原型概念设计,在概念设计中考虑了空气燃烧和富氧燃烧2种类型,这2种类型锅炉设计中的材料选取没有发生主要变化。目前,正在进行另外2个原型概念设计。已经完成不同材料在620℃下、历时3 000 h的蒸汽侧氧化试验,正在进行10 000 h以上的长周期试验。在使用高硫煤的锅炉中完成了中等温度条件下(低于760℃)的第一个烟气侧管排腐蚀试验,正在进行最大温度条件下(760℃)、历时12~18个月的第二个烟气侧管排腐蚀试验。从当前的试验数据来看,740H的各项性能都超过其他候选材料。

在汽轮机方面,完成了焊接转子材料、非焊接转子材料、抗腐蚀性、抗氧化性、铸造性能等研究,并挤压出世界上第一个740H管道,尺寸为外径381 mm、内径203 mm、长10.4 m,比CCA 617的挤压长度(8.9 m)更长。2011年9月,740H已被ASME认定最大使用温度为800℃,并确定了化学、热处理、焊接、焊接后热处理、冷成型等准则,目前正在进行进一步扩展740H最大应用温度的额外研究。选定了用于缸体、阀体铸件合金材料Haynes 282(主选材料)和263,试制出500 kg重、300 mm长的Haynes 282铸件,开展了镍基合金焊接、焊接缺陷修复的研究。

下一步,A-USC将开展更多的现场烟气侧腐蚀试验,完成富氧燃烧设计研究,研究在富氧燃烧环境下的烟气侧腐蚀,开展大型化的汽轮机(含转子和缸体)锻造,研究焊接缺陷修复性能。

总结上述两项计划,由于先进超超临界锅炉与蒸汽轮机的设计与常规机组类似,高温应用的主要困难在于镍基合金。美国、欧洲和日本的主要供货商都参与了先进高温材料的开发,并且在确定材料特性、开发制造工艺方面取得了重大进展。

5.2 加快我国先进超超临界发电技术发展的战略思考

在国际上开始研究700℃计划时,我们立足于国情提出在国际市场采购已成熟的高温高压合金钢为基础,完成了600℃超超临界燃煤发电机组的研发与推广工作,提升了国内电站设计、制造、建设、运行队伍的整体水平。但是,不应该满足于已取得的成绩,应看到存在的不足与差距,继续组织国内各方力量,瞄准最先进目标开展联合攻关,加快700℃计划的研发力度^[9]。

在600℃计划的研发过程中,我国电力行业与机械制造业合作开展联合攻关,取得了优异的成绩,满足了国家经济发展对电力的需求。从目前国际700℃计划的研究结果看,与600℃计划相比,700℃在发电装备的布局上差别不大,真正的考验是材料,需要耐受更高温度、更大压力,而材料科学正是我国的短板。因此在700℃计划的研发中,电力行业、机械制造业还需加强与冶金行业的合作,联合攻关材料技术。同时视野应该更开放一些,考虑与欧美开展材料技术的国际合作。

尽管在材料领域的基础研究相对较弱,但是我们在超超临界其他领域的经验与水平都处于国际

前列。在攻关材料技术的同时,还应该加快 700 ℃ 计划工程示范的进度,推进示范电站的选址、技术选型和技术经济可行性研究等工作,为更高效的超超临界机组早日投入实际运行而努力!

参考文献

[1] 张晓鲁. 超超临界燃煤发电技术的研究[C]// 中国科学技术协会 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学会 2004 年学术年会论文集. 博鳌, 2004.

- [2] 张晓鲁. 600 MW 超超临界燃煤机组的经济技术性能分析[C]// 清洁高效燃煤发电技术协作网 2008 年会. 南京, 2008.
- [3] 张晓鲁. 重大装备研发成果转化为生产力的理论与实践[J]. 中国工程科学, 2011, 13(8): 50-54.
- [4] 张晓鲁. 国家 863 课题“燃煤超超临界发电技术”研究结果简述[C]// 中国超超临界火电机组技术协作网第二届年会. 青岛, 2006.
- [5] 张晓鲁. 关于先进超超临界燃煤技术未来发展目标的思考[C]// 科技创新促进中国能源可持续发展——首届“中国工程院、国家能源局能源论坛”. 北京, 2010.

Some consideration about the future development strategy of advanced ultra supercritical coal-fired power generation technology

Zhang Xiaolu

(China Power Investment Corporation, Beijing 100033, China)

[Abstract] The primary energy portfolio in China decides that Chinese power supply is mainly made up of coal-fired power. To optimize coal-fired power structure, promote energy conservation and emission reduction and develop coal-fired power in a clean and efficient way, great efforts have been made by the power industry to energetically develop and apply ultra supercritical coal-fired power generation technology. Practices have proved that developing advanced coal-fired power generation technology is an important guarantee for solid and fast development of the power industry. This paper reviews the R&D process of the domestic ultra supercritical coal-fired power generation technology, and concludes the success experiments. Given the current situation in China and current research statues of EURO and U.S., it proposes the development and suggestions for developing higher parameters and higher efficiency advanced ultra supercritical coal-fired power generation technology.

[Key words] advanced; ultra supercritical; coal-fired power generation; technology; strategy