

开发推广先进燃煤发电技术 支撑电力工业可持续发展

张晓鲁

(中国电力投资集团公司,北京 100033)

[摘要] 我国正处于加快转变经济发展方式的关键时期,能源需求持续增长,生态环境保护和气候压力对社会经济可持续发展的约束日渐严重。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,而燃煤发电既是用煤大户也是用水大户,同时还是污染物排放大户。优化煤电发展,向集约化、环保化发展转变是电力工业的战略调整。本文论证了我国煤电技术向清洁化发展的战略思路,简要回顾了超超临界技术和大型空冷技术的研发成果与产业化推广现状,论述了这两项先进煤电技术对电力工业发展转型的支撑作用。

[关键词] 燃煤发电;超超临界;空冷;集约化;环保化;发展

[中图分类号] TM611 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)12-0052-06

1 前言

发电行业按照一次能源的类型可以分为燃煤、燃气燃油、核电、水电、新能源(如风电、太阳能)发电。我国电力工业的发展需要合理的能源结构。由于环境的限制和减排 CO₂ 的要求,近一段时期,在发电行业发展中突出了核电和新能源的作用。然而我国一次能源结构的特点决定了以燃煤发电为主的发电格局在相当长的一段时间内不会发生根本性改变。发展先进的燃煤发电技术是应对我国转变经济发展方式、满足能源的需求、保护环境和实现可持续发展最有效、最根本的措施。

经济社会发展的需要是科技创新的引领,科技创新同时也会极大地推动经济社会的发展。电力工业的快速发展迫切需要开发先进的燃煤发电技术,超超临界燃煤发电技术的研发及产业化推广使得我国电力工业实现了跨越式发展,煤耗指标快速接近国际先进水平。但是,为了满足我国加快转变经济发展方式提出的更高要求,不断提高燃煤发电机组的效率、降低污染物排放依然是燃煤发电技术进步

的主题。需要政府相关政策的支持和科研工作者的不懈努力。

2 我国煤炭资源和燃煤发电状况

我国煤炭资源丰富,2 000 m 以浅的预测煤炭资源量为 5.6×10^{12} t,能源剩余可采总储量中原煤占 58.8%。我国煤炭分布不均衡,与经济发展呈逆向格局,结构性矛盾突出。在已探明的保有储量中,华北和西北地区煤炭资源所占比例高,山西、内蒙古、陕西和新疆 4 省区就集中了全国近 76% 的煤炭储量。而东北、华东和中南地区煤炭储量所占比例低,经济最发达的江苏、浙江、山东、辽宁等 10 省市的保有储量仅占全国的 5%,煤炭产量极为有限。

根据《中国环境统计年鉴 2010》数据,2009 年电力部门煤炭消耗量占工业部门煤炭消耗总量的一半以上,SO₂ 排放量占全国排放总量的 55%。根据 IEA 数据,如果全球化石燃料发电都能够达到现行最佳效率(按技术可行性估算),则每年可节能 $7.16 \times 10^8 \sim 9.89 \times 10^8$ t 标煤,减排 $18 \times 10^8 \sim 25 \times 10^8$ t CO₂,其中潜力最大的当属燃煤发电(可节能

[收稿日期] 2012-09-01

[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;E-mail:zxl@epicorp.com.cn

$5.12 \times 10^8 \sim 7.16 \times 10^8$ t 标煤,减排 $14 \times 10^8 \sim 20 \times 10^8$ t CO_2)。

我国东部和中部地区为保障经济发展,建设了大批燃煤发电机组,形成了西煤东送的格局。按电煤输入口径计算,2009 年华中地区的豫鄂湘赣 4 省和华东地区的输煤输电比例分别为 13:1 和 48:1,运煤占用铁路运力的比重已高达 51.2%,公路交通也压力巨大,长距离运输中的煤炭损耗也很高。

至 2011 年底,我国电力装机容量达到了 1.056×10^9 kW,其中燃煤发电容量 7.65×10^8 kW,占 72.5%;全国发电量达到了 4.7217×10^{12} kW·h,其中燃煤发电量 3.8975×10^{12} kW·h,占 82.54%。根据对电力工业“十二五”规划的相关研究预测,到 2015 年全国电力装机容量将达到 1.4×10^9 kW,其中燃煤发电 9.33×10^8 kW;2020 年,全国电力装机容量有望达到 1.8×10^9 kW,其中燃煤发电 1.2×10^9 kW。燃煤发电机组将长期占据我国电力工业的主力军地位。

2.1 燃煤发电布局的基本思路

2009 年,我国提出 2020 年非化石能源在一次能源消费中的比重要达到 15%,单位 GDP CO_2 排放量比 2005 年下降 40%~45% 的目标。对电力工业提出的任务是,优化煤电发展,向集约化、环保化方式转变。

主要发展方式有:a. 推行煤电一体化开发,优化综合能源运输体系。贯彻落实国家西部大开发战略,加快在山西、陕西、内蒙古、宁夏、新疆等煤炭资源丰富地区布局建设大容量、高效率的燃煤发电机组,建成一批大型燃煤电站集群,形成若干个大型煤电基地。坚持输煤输电并举,利用特高压电网架向东中部地区供应电力。b. 推行煤电清洁开发,全面应用先进燃煤发电技术。西部和北部地区主要布局建设低污染、节水的燃煤发电机组。合理控制东部地区煤电装机规模,东中部电力受端地区适量布局建设起负荷支撑作用的大容量、高效率、低污染的

清洁煤发电机组。

这样的发展方式有 3 个好处:a. 在西部地区建设一批高效、节水、低污染的煤电一体化基地,可以实现煤炭就地规模化利用,减少煤炭外运量,在保护当地生态与环境的同时,提高全国整体煤炭利用效率,形成集约化发展。b. “西电东送”可以大幅降低“西煤东送”给全国带来的运输压力、生态破坏与环境污染,优化综合能源运输体系,带动全国能源供应体系向环保化发展。c. 在东中部地区建设清洁煤发电机组,既满足了当地基本电力需求、保证电网安全稳定运行,又减少了东中部地区的生态破坏和环境污染,形成环保化发展。

实现上述发展方式转变的关键在于快速研发并产业化推广大容量、高效率、低污染、低水耗的先进燃煤发电技术。

2.2 先进燃煤发电技术的战略选择

目前,国际上正在研发、推广的先进燃煤发电技术主要有配有污染物排放控制技术的超超临界燃煤发电技术、大型火电机组空冷技术,以及整体煤气化联合循环发电技术(IGCC)^[1]。其中,IGCC 技术还处于商业化试验阶段,技术经济性能有待进一步验证。配有烟气污染控制技术的超超临界燃煤发电技术和大型火电机组空冷技术已在我国取得重大突破,并快速推广普及。

2.2.1 超超临界燃煤发电技术

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。一直以来,提高燃煤发电机组的蒸汽参数都是提高机组容量与效率的重要手段。超超临界燃煤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,可见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^[2]。

表 1 不同参数机组的热效率和供电煤耗

Table 1 The efficiency and the coal consumption of different parameter units

机组类型	蒸汽压力/MPa	蒸汽温度/℃	热效率/%	供电煤耗/(kg·(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℃	35	700/720/720	51	241
超 700℃	—	>700	60	205

注:供电煤耗是指燃煤发电厂每生产供应 1 kW·h 电能,所消耗的标煤量

2.2.2 大型火电机组空冷技术

传统上火电机组采用湿式冷却方式,即用水来冷却汽轮机排汽。由于冷却塔的蒸发、风吹和排污损失,耗水率偏大。空冷技术采用机械通风方式,直接用空气来冷却汽轮机排汽,与湿冷机组相比可节水 80% 以上,但由于背压高、用电驱动冷却风机,使得空冷机组的效率略低于湿冷。这实际上是“用煤换水”的技术。直接空冷技术具有传热效果好,传热面积小,占地面积小,初投资相对较低,运行灵活,防冻性能好等特点,适合我国北方“富煤缺水”地区大规模建设火电厂。表 2 是直接空冷技术与湿冷技术耗水率的比较。

表 2 两种冷却技术的耗水率

Table 2 Water consumption rate between two cooling technologies

冷却类型	耗水率/($\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)
直接空冷技术	~0.36
湿冷技术	~2.5

因此,从能源资源、环境、发电技术和可持续发展的几个方面综合来看,配有烟气污染控制技术的超超临界技术和直接空冷技术是我国发展先进燃煤发电技术的长远战略选择,上述技术的开发可使我国发电行业实现跨越式发展。

3 我国先进燃煤发电的技术水平

3.1 超超临界燃煤发电技术

电力行业是装备型行业,电力行业科技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。笔者在国家电力公司科技司工作期间,运用系统工程理论指导电力重大装备研制工作,起到了很好的成效。通过制订“九五”、“十五”电力科技发展战略和发展规划,每年发布《科技项目指南》引导电力、机械两个部门的科研单位开展发电技术的基础研究;根据我国发电行业快速发展、急需升级换代更高效率燃煤发电机组的迫切需求,“十五”初期启动了超超临界燃煤发电技术及示范工程的可行性研究工作,提出“瞄准国际最先进水平进行攻关,科研工作与示范工程结合,示范工程实现商业化运行”的攻关目标,并获得了国家 863 计划支持。

科学决策是重大技术攻关成功的关键。笔者在进行超超临界技术攻关路线的顶层构架设计时,通过对国际国内两种资源与两个市场的调研,制定了新型耐高温合金钢材料在国际市场采购,国内攻关

工作的重点放在超超临界技术研发、设计、制造、建设与运行上的方案,以为发电行业提供可供升级换代用的清洁高效发电设备为攻关目标;在科研管理方面发挥协同创新优势,按照“用户牵头,产学研联合”管理机制,“以示范工程的商业化为导向、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^[3],组织国内电力企业、三大动力设备制造企业和研究院所、设计院、高等院校等 23 家国内权威单位共同攻关,走出去、引进来,实现集成创新。正是通过这样的管理创新,使得研发任务于 2005 年成功完成,技术成果快速推广应用。

该项目首次提出了我国发展超超临界机组的技术选型方案,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,形成了具有我国特色的 3 种不同型式的 1 000 MW 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;首次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;首次研究了超超临界机组运行特性并自主调试了 1 000 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^[4]。

研发出来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%、4.4%。江苏阚山 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。

通过全力推广,具有自主知识产权的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。

3.2 大型火电机组直接空冷技术

该项目同样是“从经济社会发展需求中找准科技创新主攻方向”的典型。从 2004 年开始,中国电力投资集团公司与中国电力工程有限公司、哈尔滨空调股份有限公司、西安热工研究院有限公司等单位根据我国“三北”地区电力发展迫切需要节水的发电机组的需求,共同承担国家重大装备研制项目“大型空冷火电机组成套设备研制”,顺利完成了通

辽三期电站和霍林河坑口电站工程等示范工程,于2008年成功完成研发任务。

该项目首次提出了大型国产空冷系统的设计原则,系统地研发了大直径负压排汽管道强度及稳定性等关键技术的设计与计算方法;成功研制出适用于大型空冷系统的单排管换热元件、大直径轴流风机等关键设备与制造工艺;针对北方高寒地区条件,系统研究和掌握了整套机组的启动、运行规律,得出了空冷机组的运行动态规律,制定了整套的启动、运行和检修维护规程^[5]。

3台国产600 MW空冷示范机组的各项性能指标均达到国际先进水平,但造价比国外同等设备降低了30%(3600万~4800万元/台)。至2010年底,采用本成果技术的空冷机组总装机容量达 1.46×10^7 kW,每年可节水约 3.2×10^8 m³。

图1标示出了超超临界技术和大型空冷技术的已应用范围,可以清晰地看出超超临界技术已成为我国华北、华中、华南、东南等地区的主力机型,大型空冷技术也在西北、华北区域快速推广,推动我国电力工业向集约化、环保化方式转变。

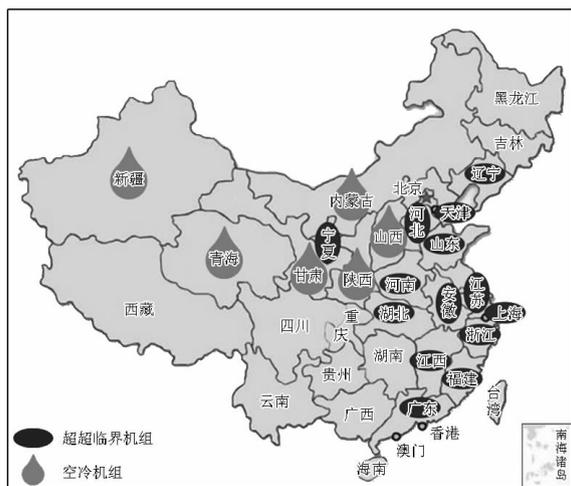


图1 2010年底超超临界机组和空冷机组的装机分布
Fig.1 The installed distribution of ultra super critical units and air-cooling units by the end of 2010

4 先进燃煤发电技术对电力工业发展转型的作用

4.1 支撑大型煤电基地的建设与布局

超超临界机组单机容量可以达到 1×10^6 kW,煤耗比亚临界机组降低了14%,土地使用面积与亚临界机组基本相当。并且由于单机容量大幅提高,

在烟气净化装置单体投资增加不大的情况下,大幅降低了每千瓦发电容量需要投入的节能环保投资。新一代的超超临界燃煤电站普遍按照4台机组配置,一个电站总装机规模可以达到 4×10^6 kW,相当于以往的4个亚临界电站,而土地使用面积和节能环保投资却节省了3倍,煤耗也降低了七分之一。随着大型空冷技术在我国西北、华北地区的快速推广, 6×10^5 kW等级的空冷机组耗水率仅为湿冷机组的15%。采用空冷装备的大型燃煤发电站在节煤、省地、降低污染的基础上,还可以大幅度节约水资源。

因此,超超临界机组和大型空冷机组是在西部和东中部地区建设大型煤电集群的最佳装备,通过集中布局充分发挥规模化效益,一举实现高产、省煤、节地以及环保、节能投资的大投入等多项集约化社会效益。由超超临界电站和大型空冷电站集群组成的煤电基地,构成了特高压输电电网骨架的电源支撑点,满足了“西电东送”对重点电源点和电网结构的要求,推动我国综合能源运输体系从原来的“输煤为主”向“输煤输电并举”的发展方式转变。

4.2 推动发电行业污染物减排

“十一五”期间,发电行业节能减排取得巨大的成绩。煤电机组平均供电煤耗累计下降37 g/kW·h;全国电力SO₂排放 9.56×10^6 t,比2005年降低约29%;单位发电量烟尘排放量降低约37.5%,为0.5 g/kW·h。这些成绩与推广高效率、低污染、配置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 7.683×10^7 kW,至2010年底,已投入运行的超超临界机组总装机容量达 5.77×10^7 kW,占此期间全国新增600 MW以上燃煤发电机组总装机容量的51.99%。如果这些机组建设同等容量亚临界机组,每年就要多耗煤800多万t,增加排放CO₂约 2.1×10^7 t,SO₂约 1.5×10^5 t。

4.3 推动燃煤发电技术进步

以超超临界技术为例,在其研发过程中,掌握了大型汽轮机、锅炉所需要的设计与制造技术,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。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,已经实

现了国产化和批量化,并已在国产超超临界机组中实用,填补了国产电站用钢的空白。通过大批超超临界电站的建设,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,培养了一大批高端技术人员,并同步提高了基层建设、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。

4.4 促进国民经济发展

截至2011年9月底,我国累计投产超超临界机组85台共 6.929×10^7 kW,直接增加国内制造业产值约750亿元。截至2011年底,国内外共有 2.806×10^7 kW空冷机组采用了大型空冷技术成果,其中还有 2.66×10^6 kW的空冷设备出口至意大利和印度,直接增加国内制造业产值近20亿元。与国外空冷系统相比,国产化的空冷系统工程造价约降低100元/kW,直接节省国内大型空冷机组工程投资近30亿元。通过这两项先进燃煤发电技术的推广与应用,有效拉动了内需,促进了国民经济发展。

5 我国先进燃煤发电技术的最新进展

5.1 不断提高超超临界燃煤发电技术水平

国产化超超临界燃煤示范电站项目考虑首台首套因素,所制订的机组参数为25 MPa、600 °C / 600 °C,一次再热结构,机组的设计效率为45%,供电煤耗283 g/kW·h。在上海漕泾 $2 \times 1\,000$ MW电站的设计中注重了机组结构设计、制造工艺、安装调试等技术的优化,采用全寿命周期理念确定设备性能,提高工程建设管理水平,使供电煤耗达到277.8 g/kW·h,比示范工程低4.8 g/kW·h。

为了实现超超临界技术的不断进步,在上海漕泾二期 $2 \times 1\,000$ MW工程中,试验研究了更高参数、系统结构更加复杂的超超临界技术,蒸汽参数将达到31 MPa、600 °C / 620 °C / 620 °C,并采用二次再热形式,机组的效率将达到48%,供电煤耗降至255.94 g/kW·h。该项目已经通过了预可行性研

究审查。

下一步,随着材料技术的发展,超超临界燃煤发电技术将逐步实现35 MPa、700 °C / 720 °C / 720 °C^[6]。

5.2 CO₂ 捕集关键技术

CO₂ 捕集、利用和储存技术(CCS)是IGCC中最重要实现CO₂ 减排的技术,也是IGCC实现洁净发电的关键。对于超超临界燃煤机组,已经开展了一些技术研究,工业试验级的设施已经投入运行。在中国电力投资集团公司重庆合川电厂两台 3×10^5 kW机组自主研发、建造了国内首个万吨级燃煤电厂CO₂ 捕集装置的工业示范项目,碳捕集率达到95%以上,整体技术水平达到国际先进。十万吨级碳捕集技术也已经完成可行性研究。该技术的进一步大型化和经济性的提高将使超超临界机组在效率和CO₂ 减排方面优于IGCC等先进的洁净煤技术,是今后燃煤发电的主要发展方向。

总之,燃煤发电技术是解决我国电力工业可持续发展最重要、作用最大的技术,需要国家高度重视和大力支持,需要全国科研工作者共同不懈努力。

参考文献

- [1] 张晓鲁. 超超临界燃煤发电技术的研究[C]// 中国科学技术学会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. 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,汪建平,胡振岭. 600 MW火电机组空冷技术的研发与工程示范[J]. 中国电力,2011(3):69-73.
- [6] 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.

Developing and promoting advanced coal-fired power generation technologies to support sustainable development of the electric power industry

Zhang Xiaolu

(China Power Investment Corporation, Beijing 100033, China)

[**Abstract**] China is standing in a key period of accelerating transformation of its economic growth model. As the demand of energy is continuously growing, the pressure of environmental protection and climate change increasingly restrain China's sustainable economic and social development. The characteristics of the primary energy mix determine the power supply pattern in China, which is dominant with coal-fired power generation. Coal-fired power generation is a big consumer of coal and water and also a big contributor to pollutants. The strategic adjustment of the electric power industry is to optimize coal-fired power development and transit to intensive and environment-friendly development mode. This paper demonstrates the strategy of clean coal power technology in China, reviews the R & D achievements and industrial commercialization of ultra super critical technology and large-scale air-cooling technology, and expounds the supporting role of these two advanced coal-fired power generation technologies in transforming the electric power industry.

[**Key words**] coal-fired power generation; ultra super critical; air-cooling; intensive; environment-friendly; development

(上接 18 页)

Innovation and application of energy saving and environmental protection technologies for the Sichuan to East China Gas Transmission Project

Cao Yaofeng

(China Petrochemical Corporation, Beijing 100728, China)

[**Abstract**] In light of the sensitive and vulnerable environment, and high-toxic, high-acid gas reserves in the northeast area of Sichuan Province, the Project upheld the guideline of environmental first and implemented a construction model featuring energy conservation, environmental protection, eco-friendly and low carbon emission. It combined the concept of systemic optimization and technological innovation, incorporated strict supervision into clean production, and promoted the innovation and application of energy conservation and environmental protection technologies throughout the entire process, ranging from optimal design, clean production to environmental supervision. Thanks to the above measures, the Project put an end to large-scale accidents caused by environmental pollution or ecological damages; minimized the negative effects on original eco-environment and local cultural and historical assets, and reached the standards of pollutant concentration, aggregation and environmental quality. As a result, the Project fulfilled its social commitments of making Sichuan-East gas transmission project an eco-friendly project, the Puguang gas field a "Green Gas Field", and the pipeline a green energy corridor.

[**Key words**] the Sichuan to East China Gas Transmission Project; engineering construction; energy saving and environmental protection; technological innovation