

超临界压力锅炉现状和发展趋势

Present Status and Developmental Trend of Supercritical Pressure Boilers

李宝岩¹, 马玉峰², 白少义³, 吴东垠⁴

(1. 北京第三热电厂, 北京 100074; 2. 胜利发电厂, 山东 东营 257087;

3. 沈阳军区锅炉检验所, 辽宁 沈阳 110005; 4. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 通过国内外几个超临界压力锅炉的实例, 介绍其现状和发展趋势, 并指出超临界压力锅炉在提高能源转化率、减少 CO₂ 排放等方面具有明显优势。指出发展方向是满足日益严格的环保要求, 合理组织炉内燃烧工况, 完善低 NO_x 燃烧器, 开发炉内脱氮脱硫技术。随着蒸汽参数提高, 还需要采取切实可行的措施防止受热面高温腐蚀, 提高机组的可靠性。

关键词: 超临界压力; 锅炉; 高温腐蚀

Abstract: The present status and developmental trend of supercritical pressure boilers are introduced through several examples at home and abroad, and it is indicated that the supercritical pressure boilers have clear superiorities in the improvement of energy conversion ratio and the reduction of CO₂ emission. Currently, the developmental directions are: to satisfy the increasingly requirements of environment protection, rationally organize furnace combustion conditions, improve low-NO_x burners, develop furnace denitration and desulfurization technology; along with the raising of steam parameters, it is also necessary to take effective measures to prevent the heating surfaces form high temperature corrosion, so as to improve the reliability of generation units.

Key words: supercritical pressure; boiler; high temperature corrosion

中图分类号: TK229.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-9649 (2000) 11-0010-04

0 前言

在今后 20~30 a 内, 世界主要能源仍将以化石燃料为主, 为缓解利用化石燃料造成的环境污染, 要求更加广泛地使用电力。我国早在 1985 年就提出能源工业的发展要以电力为中心, 1995 年又提出能源建设要以电力为中心, 这个方针完全符合世界发展趋势。发达国家几乎把污染最严重的煤炭的全部或大部分用于发电。

在我国, 1998 年全国供电煤耗平均 404 g/(kW·h), 约比世界先进水平高 60~70 g/(kW·h), 且环境污染严重, 能源利用率低和环境污染问题是目前国内火力发电厂存在的 2 个突出问题, 也是制约我国电力工业乃至整个国民经济可持续发展的重要因素。为解决这一问题, 早在 1994 年制定的“电力工业科学技术发展规划”中提出了一系列措施, 其中包括“发展大容量、高效低污染的常规火电机组(超临界压力机组)及积极开发洁净煤发电新技术等”。1999 年国家经贸委根据“国务院办公厅转发国家经

贸委关于关停小火电机组有关意见的通知”, 制定了关停小火电机组的实施意见, 其总体目标是单机容量 50 MW 以下(含 50 MW)的常规小火电机组在 2003 年底前基本关停。1999 年 11 月, 中国工程院与矿业工程学部共同在北京主办的“高效超临界压力发电技术研讨会”认为: 提高能源利用率是实现我国可持续发展战略目标的最有效、最经济的途径。发展高效超临界大型火力发电机组, 缩小与世界先进水平的差距对提高能源利用率及环境保护有重要作用。

整体煤气化联合循环(IGCC)和增压流化床(PFBC)是比较先进的洁净煤发电技术, 也是妥善解决节能与环保的主要手段之一。但该项技术在德国、西班牙、美国、日本等工业发达国家尚属示范运行和工业化试验阶段, 在我国还是新兴技术, 作为未来燃烧发电的首选技术, 需进一步消化吸收和研究开发。在国外, 超临界压力机组技术则是一项比较成熟的技术, 在发达国家已得到广泛应用, 目前正向超超临界技术方向发展。

收稿日期: 2000-03-06; 修订日期: 2000-06-09

作者简介: 李宝岩(1966-), 男, 北京人, 副总工程师, 从事电站锅炉检修与运行。

- 10 -

1 超临界压力锅炉现状

超临界压力锅炉从 50 年代开始就在美国投入运行,世界第 1 台超临界压力机组是美国的试验性机组,负荷为 125 MW,蒸汽参数为 31 MPa/621 ℃/566 ℃/566 ℃。该机组于 1957 年即投入运行;第 2 台 325 MW 机组为超超临界压力机组,蒸汽参数为 34.4 MPa/649 ℃/566 ℃/566 ℃,于 1958 年投入运行。在美国的超临界技术发展初期,由于蒸汽参数选取过高,超越了当时材料性能,后来又不得不把蒸汽参数降了下来,但由于同时采取了其它一些当时不够成熟的技术,如采用微正压燃烧等,从而引发了烟气泄漏热膨胀处理等问题,加上由于当时能源价格相对低廉,开发新能源设备的动力不足,人们的注意力只停留在对现有设备的改造和提高上,对超临界压力机组的认识不足,因此,超临界技术在美国的发展一度较为缓慢。尽管到 1980 年,美国的超临界压力机组已投运 170 余台,但到后来,美国就几乎停止了超临界技术发展,而以亚临界压力汽包炉为主。前苏联则坚持发展超临界技术,依靠自己的技术力量,经多次技术改进,超临界技术相对比较成熟,发展了 500 MW、800 MW 和 1 200 MW 的系列产品,而且新建的 300 MW 以上机组,只采用超临界参数。日本则采用引进其它国家的先进技术,并加以消化吸收的方法,技术发展很快,至 1985 年前后,其超临界压力机组的台数就已占到日本装机容量的 59% 以上,目前在日本新建的 450 MW 以上机组均为超临界压力机组,正向超超临界技术发展,第 1 台负荷为 700 MW,蒸汽参数为 30.9 MPa/621/566/566 ℃ 的机组已于 1989 年投入运行,其经济性和可靠性均达到较高水平。

欧洲以德国发展超临界技术最早,如今丹麦则拥有世界上净效率最高的超临界压力机组,其发电效率达 45.3%。近年来,美国总结了超临界技术的经验教训,认为在超临界技术发展过程中所遇到的问题并非超临界蒸汽参数所致,在吸取其它国家先进经验的同时,经不断改进和完善,美国超临界压力机组的可用率已与亚临界压力机组相当。后来又开始发展超临界压力机组,1992 年底又投运了 1 台 300 MW,蒸汽参数为 24.1 MPa/638 ℃/538 ℃ 的超临界压力燃煤机组,又重新发展超临界技术。人们在提高蒸汽参数的同时,也努力改进汽轮机通流部分设计与燃烧技术,技术日臻成熟。表 1 列出了 80 年代末及 90 年代初建造的一些代表当今科技水平的超

表 1 几个有代表性的超临界压力机组

电力公司 /电厂名称	功率 /MW	蒸汽参数 /MPa/℃/℃	投运年份
KYUSHU/MATSUURA	700	25.5/538/565	1989
EPDC/MATSUURA	1 000	25.5/538/565	1991
CHUBU/HEKINAN	700	25.5/538/565	1991
EPDC/WAKAMATSU	500	36.2/649/593	1991
ELSAM/VESTKRAFT	400	25.2/560/560	1992
CHUBU/KAWAGOE	700	32.8/565/565	1989、1990 各 1
碧南火电厂(日本)	700	25/543/569	1992

临界压力机组。

我国已引进多台超临界压力机组并投入运行,如最早的华能上海石洞口第二发电厂(2×600 MW)和华能南京电厂(2×300 MW),以及最近的伊敏发电厂(2×500 MW)和盘山电厂(2×500 MW)等。但已投运和正在安装的机组均为进口设备,最大单机容量为 800 MW,正设计的机组单机容量为 900 MW,也为进口设备,且俄罗斯机组占据了较大份额。经一段时间的运行实践,积累了丰富的运行经验,随着设备国产化份额不断增加,设备成本也不断降低。

在我国,超临界技术的发展也可走引进、仿制、创新之路,最近,国家发展计划委员会已确定沁北电厂 2×600 MW 机组作为超临界压力机组国产化的依托单位工程,标志着我国超临界压力机组的发展进入一个新阶段。

2 超临界压力锅炉实例

2.1 丹麦 Vestkraft 电厂 3 号炉

该机组代表了目前超临界技术的较高水平。该机组投产于 1992 年 7 月 1 日,机组发电效率在凝汽运行时达 45.3%。该机组有供热装置以便向 Esbjerg 地区供热,全供热运行时效率大于 90%,机组按 100% 燃油和 100% 燃烧设计。

锅炉为苏尔寿直流锅炉,塔式布置,24 支浓淡型直流燃烧器分 6 层布置,切圆燃烧,锅炉配备 3 台 BRD4760 型双进双出钢球筒型磨煤机,磨煤机的设计出力可保证在燃烧设计煤种时只投 2 台磨煤机即可带锅炉满负荷运行,其中 1 台磨煤机备用,仅在燃烧质量较差时才 3 台磨煤机运行,两端煤粉出口各装 1 台固定式粗粉分离器,向锅炉 1 层燃烧器供粉,同时配有 20 支油燃烧器分 5 层布置。锅炉采用改变燃烧器的摆角来控制再热蒸汽温度,锅炉负荷降至 40% 时,再热蒸汽温度仍能维持在 560 ℃ 左右。炉膛水冷壁为 164 根平行管螺旋上升环绕,炉膛断面约 13 m×12 m,高约 35 m,回转式空气预热器为三分仓容克式,满负荷时可将烟气冷却

至 104℃,当燃烧含硫量高于 1.4% 时,需投入蒸汽暖风器以提高排烟温度,避免烟气系统的低温腐蚀。表 2 为锅炉主要技术参数。

表 2 丹麦 Vestkraft 电厂 3 号锅炉主要技术参数

项 目	数 值	项 目	数 值
额定蒸发量/ $t \cdot h^{-1}$	1 080	再热蒸汽压力/MPa	5.4
主蒸汽温度/℃	560	给水温度/℃	275
主蒸汽压力/MPa	25.1	热风温度/℃	310
再热蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	972	排烟温度/℃	104
再热蒸汽温度/℃	560	锅炉效率/%	95.77

2.2 日本碧南火电厂 1 号炉

该机组投产于 1992 年,机组负荷为 700 MW,配套锅炉系日本三菱公司制造,为超临界变压运行燃烧直流炉。为防止隔墙结渣并使结构简单化,锅炉为中间无隔墙的 8 角单炉膛,水冷壁上升管采用内螺纹管,每层 8 个燃烧器,左、右炉膛各布置 4 个燃烧器,分别在炉内形成正反 2 个切圆。锅炉采用 6 台 MPS 磨煤机(其中 1 台备用)、直吹式制粉系统及与之配套的 PM 燃烧器,还有先进的 MACT(炉内脱氮法)等方法,可降低 NO_x 含量和飞灰可燃物。再热蒸汽温度的调节是通过调整安装在尾部烟道出口的烟气挡板开度和烟气再循环来实现的,过热蒸汽温度由煤水比进行粗调、辅之以三级过热器喷水减温器进行细调,以提高煤种适应性和负荷变化率。不投油最低稳燃负荷为 30% MCR(机组最大连续发电量)。另外,还有自动吹灰控制、磨煤机台数控制、煤发热量修正控制等锅炉总体控制装置。满负荷时,锅炉飞灰可燃物最低可达到 1.16%。就机组负荷特性而言,在伴随磨煤机启动、停止而大范围变化负荷的试验中,均取得了较好效果。表 3 为锅炉主要技术参数。

表 3 日本碧南火电厂 1 号锅炉主要技术参数

项 目	数 值
额定蒸发量/ $t \cdot h^{-1}$	2 300
主蒸汽温度/℃	543
主蒸汽压力/MPa	25
再热蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	1 821
再热蒸汽温度/℃	569
再热蒸汽压力/MPa	3.96
给水温度/℃	295.5
锅炉效率/%	89.04

2.3 伊敏发电厂 1、2 号炉

伊敏发电厂 1、2 号 500 MW 火电机组由俄国波多尔斯克锅炉厂制造的 Д-Д-1650-25-545-BT 型超临界压力直流锅炉与列宁格勒金属工厂制造的 K-500-240 型汽轮机配套。汽轮机为一次再热,单轴 4 缸 4 排汽凝汽式,最大功率为 525 MW,进汽压

力为 23.1 MPa/3.51 MPa,进汽温度为 540℃/540℃,1 号机组于 1999 年 5 月投产。

锅炉为垂直上升往复直流锅炉,T 型布置,单炉膛,炉膛横断面为 18.472 m×18.472 m 的方形断面,通过金属结构件吊挂在标高为 97 m 的大板梁上,炉膛水平连接烟道和对流竖井是由整体焊接而成的膜式壁构成,形成一个气密的箱体,锅炉最高标高为 102.5 m。锅炉汽水系统由 2 条平等不相混的、具有独立控制系统的流程构成。一个流程位于左半炉膛、左水平烟道和左对流竖井内;另一流程相对于锅炉中心线布置于右侧。锅炉配备 4 台直径为 10 m 的回转式空气预热器,8 台风扇磨煤机,为直吹式制粉系统,每台磨煤机供 4 个燃烧器工作,燃烧器分 4 层,每层 8 个燃烧器,共 32 个燃烧器,组织切圆燃烧,其中,锅炉前、后、左、右墙各布置 2 个燃烧器,但在炉内形成 1 个切圆,而前述日本碧南火电厂 1 号锅炉每层 8 个燃烧器,左、右炉膛各布置 4 个燃烧器,分别在炉内形成正反 2 个切圆。表 4 为 1、2 号锅炉主要技术参数。

表 4 伊敏发电厂 1、2 号锅炉主要技术参数

项 目	数 值
额定蒸发量/ $t \cdot h^{-1}$	1 650
主蒸汽温度/℃	545
主蒸汽压力/MPa	25
再热蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	1 357.6
再热蒸汽温度/℃	545
再热蒸汽压力/MPa	3.92
给水温度/℃	271
热风温度/℃	320
排烟温度/℃	134
炉膛容积热强度/ $W \cdot m^{-3}$	64 700
炉膛截面热强度/ $W \cdot m^{-2}$	3 900 000
锅炉效率/%	90.08

2.4 上海石洞口第二发电厂 1、2 号炉

该电厂 1 号机组投产于 1991 年 10 月,2 号机组投产于 1992 年 11 月,机组负荷为 600 MW。锅炉系 CE-SULZER 公司制造,为螺旋管圈直流锅炉,锅炉螺旋管圈盘绕圈数为 1.74 圈,螺旋管选用管径为 $\phi 38.0 \text{ mm} \times 5.6 \text{ mm}$ 的低合金耐热钢,最高工作温度为 560℃,当 MCR(锅炉最大连续蒸发量)负荷时,水冷壁管内的质量流速为 2 800 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。再热器系统采用 1 次中间再热,由低温再热器和高温末级再热器组成,2 极之间进行 1 次左右交差。低温再热器进口集箱上装有事故喷水减温器。省煤器为非沸腾式,省煤器蛇形管垂直于前墙、顺列、逆流布置。设计燃用神木石讷台烟煤,并以晋北煤作为校核煤种,

配备 6 台 HP943 型碗式中速磨,冷一次风机正压直吹式制粉系统,锅炉采用四角切圆摆动式直流燃烧器,每角 6 只燃烧器,计 24 只燃烧器,在炉膛中心形成 2 个假想切圆,直径分别为 1.5 m 和 1.7 m,切圆逆时针方向旋转。过热蒸汽温度由煤水比进行粗调,辅之 2 级喷水减温进行细调;其次,多层燃烧器的不同组合运行,也可作为调节过热汽温的一种手段;再热汽温的调节主要靠改变摆动式燃烧器的摆角来实现,作为事故情况下保护再热器事故喷水装置也可用做备用减温器。表 5 为锅炉主要技术参数。

表 5 石洞口第二发电厂 1、2 号炉主要技术参数表

项 目	数 值
额定蒸发量/ $t \cdot h^{-1}$	1 900
主蒸汽温度/ $^{\circ}C$	541
主蒸汽压力/MPa	25.3
再热蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	1 613
再热蒸汽温度/ $^{\circ}C$	559
再热蒸汽压力/MPa	4.47
给水压力/MPa	29.4
给水温度/ $^{\circ}C$	286
排烟温度/ $^{\circ}C$	130
炉膛容积热强度/ $W \cdot m^{-3}$	127 000
炉膛截面热强度/ $W \cdot m^{-2}$	4 800 000
锅炉效率/%	92.53

3 发展趋势

超临界压力锅炉经过 40 多年的运行实践和技术改造,技术日臻成熟,运行的经济性和可靠性不断提高,与亚临界压力锅炉相比,超临界压力锅炉在提高能源转化率、降低供电煤耗、减少 CO_2 排放等方面有明显优势。目前,超临界压力机组的蒸汽参数正向超超临界方向发展,有望将电站效率提高至 45% 以上。在此基础上,为满足日益严格的环保要求,合理组织炉内燃烧工况,完善低 NO_x 燃烧器,开发炉内脱氮脱硫技术显得尤其重要;其次,随着国民经济发展,对机组调峰性能的要求也越来越高,要求机组能变压运行和带中间负荷,这正是超临界压力机组的另一优势,因为超临界压力锅炉受热面的壁厚较薄,升降负荷的速率可大些,以适应带中间负荷和机组调峰要求,如前所述的丹麦 Vestkraft 电厂 3 号炉在负荷高于 50% MCR 时,一般负荷变化率为 7% /min,在负荷低于 50% MCR 时,一般负荷变化率为 4% /min;日本碧南火电厂 1 号炉在 100%~50% ECR 时,一般负荷变化率为 3% /min,紧急情况下负荷变化率能达到 5% /min,在 50%~30% ECR

时,一般负荷变化率为 1.5% /min。

防止受热面管子烟气侧的高温腐蚀和蒸汽侧的氧化皮生成的措施是提高材料的含铬量,为防止烟气侧的高温腐蚀,添加 MgO 和 CaO 也可减轻腐蚀作用;其次,可采取以下措施:(1)采用复合管或有镀层的管子;(2)将腐蚀严重的管子布置在有利于检修的位置,以便定期更换;(3)采用半圆金属管或陶瓷管做保护瓦。

4 结论

提高常规火电机组热效率的主要途径是提高单机容量和蒸汽初参数,国外超临界技术的发展与应用已有 40 余年的历史。实践证明,从亚临界参数向超临界参数过渡的技术难度要小些,而从汽包炉向直流炉过渡要相对困难些。

从热力学的角度讲,超临界乃至超超临界技术的经济性显而易见。目前,国际上运行的超临界压力机组实际运行供电煤耗大体在 310~329 g/($kW \cdot h$)之间。随着该项技术的引进和消化吸收,设备的国产化份额增加,制造成本也将大幅度降低。就可靠性而言,日本制造的超临界压力机组可用率大多在 95% 以上。在我国,早在 1997 年,华能上海石洞口二电厂超临界压力机组等效可用系数就已高于国内早已投入运行的平圩、北仑港和元宝山电厂的 600 MW 亚临界压力机组,其可用率在 90% 以上。因此,未来几年,超临界压力机组乃至超超临界压力机组在国内具有广阔的应用前景。

国际超临界压力机组正朝 24.2 MPa/600 $^{\circ}C$ /600 $^{\circ}C$ 参数发展,我国拟采用 24.1 MPa/560 $^{\circ}C$ /566 $^{\circ}C$ 系列蒸汽参数。随着蒸汽参数提高,高温腐蚀将进一步加剧,需要开发切实可行的技术,同时,需要满足日益严格的环保要求。

参考文献:

- [1] 国家经贸委,电力工业近期技术发展方向和重点[J].中国能源,1999,(10).
- [2] 史习仁.超临界压力锅炉在我国的发展[J].锅炉技术,1999,(8).
- [3] 超临界垂直上升管变压运行 8 角燃烧锅炉的运行状况[J].吴东垠摘译.锅炉技术,1995,(8).
- [4] 郝福民,黄晶辉,汪保春.伊敏发电厂俄制 1 650 t/h 超临界压力锅炉[J].锅炉技术,1997,(7).
- [5] 吴东垠,田文栋,魏小林,等.压力热回收锅炉的结构和技术要点[J].中国电力,1999,(12).

(责任编辑 孙家振)