

超超临界机组参数和热力系统的优化分析

沈邱农 程钧培

(上海发电设备成套设计研究所)

Shanghai Power Generation Equipment Design Institute

摘要: 本文概要叙述了国外超超临界技术的现状和发展趋势,研究各种因素对超超临界机组参数和热力系统选择的影响,对我国发展超超临界技术的可选方案和经济性作出了初步分析。

关键词: 超超临界 参数 热力系统 经济性

1 超超临界技术的发展

二十世纪五十年代超超临界技术开发初期,由于蒸汽参数选取过高,超越了当时的材料技术水平,很大程度上影响了超超临界机组的可靠性。其后的 20 余年,蒸汽参数被降至 24.1MPa、538/566℃的超临界水平。但是,由于全球性的节约能源和环境保护的原因,在此期间超超临界技术发展的研究一直在进行,首先重点解决的是高温高强度材料开发。八十年代欧洲以英国为中心进行了 COST501 项目,研制 600℃级的珠光体钢。1998 年开始,欧洲 16 个国家参加了 COST522 项目,启动了 650℃级超超临界机组珠光体材料的开发,计划到 2003 年结束。日本从 1981—2000 年在通产省的支持下实施了珠光体钢和奥氏体钢材料研究计划,第一阶段将汽轮机的进汽参数提高到 31.1MPa、593℃/593℃/593℃和 34.3MPa、649℃/593℃/593℃,发电端效率为 44.2%—44.9%。第二阶段将汽轮机进汽参数提高到 30MPa、630℃/630℃,发电机端效率达到 44.16%。

欧盟从 1998 年还启动了计划长达 17 年的 700℃级超超临界参数的开发项目“AD700 计划”(THERMIE PROGRKAM)。目标是开发先进蒸汽参数的超超临界火电机组,将供电效率提高到 55%(深海水冷却)或 52%(内陆电厂),并且使厂房结构更加紧凑,降低燃煤电厂的投资。“AD700 计划”的核心技术是通过镍基超级合金材料的开发和应用,使汽轮机的主蒸汽温度由目前的 600℃提高到 700℃。为了在将来的超超临界机组中减少使用价格昂贵的镍基超级合金,同时还确立相同温度等级奥氏体钢和铁素体钢的发展计划。“AD700 计划”的战略意义是使欧盟成员国燃煤火电机组的技术水平始终处于世界领先水平,因为欧盟各成员国拥有大量亚临界机组到 2010 年运行寿命接近 40 年,采用 700℃等级的超超临界机组替换老机组,可明显提高热效率。另外欧盟各成员国已批准了《联合国气候变化框架公约》京都议定书,大规模采用高效率的超超临界机组可以使 CO₂ 的减排满足“京都议定书”的要求。上述研究计划虽然还没有如期实现,但正在向目标前进,在超超临界机组参数选择、机组设计制造以及运行方面已经取得了阶段成果。

新材料的开发始终是超超临界技术发展的关键。国外超超临界技术的发展轨迹十分清楚,上世纪 50 年代已具有生产蒸汽参数达 600℃~650℃机组的材料,但材料技术不成熟,且价格昂贵,影响了超超临界机组的可靠性,因而不得不降低温度参数。直到 80 年代研究出适用于 600~650℃蒸汽参数的 9% -12% Cr 钢,成本远低于最初用的奥氏体钢和高温合金,且其物理性能与工艺性能都比奥氏体钢优越,给再度生产蒸汽参数为 600~650℃的机组创造了条件,90 年代起又开始制造超超临界参数机组。目前国外已形成 600℃等级的 9% -12% Cr 钢的材料标准系列,新型高温铁素体-马氏体 9%-12%Cr 材料已用于 31MPa、600℃/610℃参数的超超临

的 1218mm 长叶片, 对北方低背压地区可用 1280mm 或更长的钛合金叶片。这种机型研制的主要困难是技术难度较大, 不仅要解决超超临界机组高温高压段部件的设计制造问题, 同时还要解决低压段 1200mm 以上长叶片开发和超纯净转子的制造。

三缸四排汽 600MW 机组由一个高中压合缸和二个双流低压缸组成。机组背压为 4.4kPa~5.39kPa 时, 末级叶片可选用 1050mm 长叶片, 机组的热效率与二缸二排汽 600MW 机组基本相同。其特点是低压缸可通用现有亚临界和超临界机组 600MW 机组的低压缸, 有较强的技术继承性, 可使用现有成熟的末级长叶片, 解决超纯净转子研制即可。

1000MW 容量等级超超临界机组可由一个高压双流缸、一个中压双流缸和两个双流低压缸组成单轴四缸四排汽机组, 在参数为 25.0MPa、600℃/600℃的情况下, 机组热效率可达到 43.1%。机组总体尺寸与亚临界四缸 600MW 机组基本相近。国内有关制造厂通过技术引进或联合设计制造的合作方式, 在机组通流部分、总体特性(轴系、差胀、推力等)、辅助系统和 DEH 控制系统设计技术方面已经得到许可转让技术, 能够保证机组具有较高的设计制造质量, 可大大缩短研制周期。低压缸选用 1218mm 末级钢制叶片, 排汽面积为 11.3 m², 两个低压缸正好适用于 20℃ 冷却水温的 1000MW 机组, 是技术、经济和可靠性综合俱佳的选择。

3.2 经济性分析 ← **3.2 Economic Analysis**

超超临界机组由于采用更高的蒸汽参数, 能够明显提高电厂的热效率, 降低污染排放。但又由于压力提高将增加钢材用量, 温度提高将需要采用价格较高的高温热强度好的材料, 采用二次再热增加了由锅炉、汽轮机和管道等组成的汽水系统复杂性, 机组造价将比常规亚临界机组提高。影响机组造价的因素较多, 但无疑与采用的温度、压力参数的高低有直接关系。表2为国外技术资料的一个分析举例, 虽然不代表普遍情况只能作为参考, 但从表3中可以分析, 随着机组参数的提高和增加再热次数, 电厂机岛的比投资增加, 超临界机组比亚临界机组提高~5%, 超超临界机组又比常规超临界机组提高~5%。但是整个电厂的比投资超临界和超超临界机组都只比亚临界提高1%, 说明在同样功率密度提高, 功率密度增加, 电厂其它系统的投资可以减少, **the capital expenditure of the sub-critical coal-fired power plant is 5% less than the super-critical units**

表3为我国电力生产各类火电机组经济性的比较, 是在各类典型火电厂工程经济性测算的基础上列出的。从表中可以看出, 600MW超超临界机组与相同功率的超临界机组相比, 虽然电厂比投资高出~1%左右, 但由于热效率的提高, 供电标准煤耗低出~3.8%, 含税电价低出~0.7%。与大型燃气轮机联合循环机组和IGCC联合循环机组相比, 除环保性能方面存在差距以外, 其上网电价具有明显的竞争优势。

表 2 超临界机组与亚临界机组电厂比投资比较

部套 \ 比投资 (\$/kw)	亚临界 16.6MPa/538/538℃ 比投资 (%)	超临界 24.0MPa/538/566℃ 比投资 (%)	超超临界 31.1MPa/593/593/593℃ 比投资 (%)
锅炉(含钢结构)	142.94(100%)	153.09 (107.1)	163.52 (114.4)
锅炉岛管道	27.81(100%)	31.03 (111.6)	31.81 (114.4)
给水系统	28.06(100%)	28.62 (102.0)	29.18 (104.0)
汽轮机—发电机	79.20(100%)	82.37 (104.0)	83.95 (106.0)
汽轮机岛管道	16.25(100%)	15.44 (95.0)	15.43 (95.0)

小计	294.26(100%)	310.38 (105.5)	323.91 (110.1)
电厂其它投资	509.17(100%)	500.69 (98.3)	487.17 (95.7)
总计	803.43(100%)	811.07 (101.0)	811.08 (101.0)

表 3 各类火电机组经济性比较

项目名称	容量 (MW)	比投资 (元/千瓦)	年均供电煤耗 (Kg/kwh)	环保性能			厂用电率 %	含税电价 元/kkWh
				PM	SO2	NOx		
亚临界 300MWCFB	2×300	5413	341	200	154	250	7.0	335.2
超临界 600MW+FGD	2×600	5493	324	100	154	500	6.0	337.5
超临界 600MW+FGD +SNCR	2×600	5542	325	100	154	300	6.2	339.7
超超临界 600MW+FGD	2×600	5548	312	100	154	500	6.0	334.9
超超临界 600MW+FGD +SNCR	2×600	5605	313	100	154	300	6.2	337.5
GTCC 350MW	2×350	3879	235 (折算)	10	10	50	3.0	430.5
IGCC 485MW	1×485	7325	330	10	10	50	15.0	402.6

4 结论

超超临界火电机组经过几十年的发展，已经是成熟先进的发电技术，在经济发达国家中已大量投入商业运行，并且正进一步向更高参数方向发展。由于其显著的节能和减少环境污染的效果，将成为 21 世纪很具有竞争力的燃煤火电机组。为迅速扭转我国火电机组煤耗长期居高不下的局面，优化火电结构，缩小与国外先进水平的差距，发展国产大容量超超临界火电机组十分必要。我国有条件立足于较高的起点，把近期目标定在当前国际水平，充分利用当今世界最新的科技成果，尽快跨入发展超超临界机组的发展阶段。

超超临界机组参数的选择受到许多因素的影响，但材料是最关键的因素。目前国外 600℃ 等级的 9% -12% Cr 钢的材料技术已经相当成熟。主蒸汽和再热蒸汽温度为 600℃ 等级的超超临界机组也已经大批量生产和投运，价格越来越具有竞争力。在引进技术或自主开发我国超超临界机组时，应充分重视技术的成熟性、可靠性，目前宜先完成 600℃ 温度参数等级的超超临界机组的研制，形成批量生产能力，并进一步完善。对更高温度参数的超超临界技术应开展储备性研究。

与亚临界机组相比，在同样的机组出力情况下，由于超超临界机组的热效率提高，功率密度增加，电厂其它系统的投资可以减少，因而电厂总的比投资增加幅度不大。但在节能、环保和运行经济性方面具有竞争优势。

参考资料

- 1、吕维业等 《火电结构优化和技术升级研究》 研究报告 2002.5
- 2、沈邱农等 《超超临界汽轮机的技术特点》 《动力工程》 2001.4
- 3、沈邱农、柳惠龄等 《超超临界火电机组技术选型研究》 研究报告 2003.9
- 4、沈邱农等 《超超临界火电机组技术开发的分析与研究》 研究报告 2004.2