

# 采用再热温度 630 °C 的 1 000 MW 新一代 超超临界二次再热机组可行性研究

王东雷, 张鹏, 霍沛强

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的]为了推动采用再热温度 630 °C 的 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组发展, 需对某沿海电厂 2 × 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组的可行性进行研究。[方法]文章分析了主机参数、主机技术条件、主机设备可行性、辅机设备可行性、主要系统配置、机组经济性和热经济性指标。[结果]研究表明: 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组是可行的, 已具备示范应用条件。与 1 000 MW 常规超超临界二次再热机组相比, 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组热效率更高, 污染物排放更少, 经济效益较高。该 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组热效率达到 48.72%, 发电标煤耗达到 252.48 g/kWh, 供电标煤耗达到 260.16 g/kWh, 为国内最优水平。[结论]我国具有自主知识产权的先进马氏体耐热钢 G115 和带小发电机的抽背式给水泵汽轮机可以应用于新一代超超临界二次再热机组。

**关键词:** 新一代超超临界二次再热机组; 主机参数; G115; 热力系统

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)03-0033-09

## Feasibility Study on 1 000 MW New Generation Ultra-supercritical Unit with Double Re-heating Cycles at 630 °C

WANG Donglei, ZHANG Peng, HUO Peiqiang

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] The feasibility study of a 2 × 1 000 MW new generation ultra-supercritical unit with double re-heating cycles in a power plant in coastal areas is completed to promote the development of 1 000 MW new generation ultra-supercritical unit with double re-heating cycles at 630 °C. [Method] The aspects of the main equipment parameters, specifications for main equipment, feasibility for main equipment, feasibility for auxiliary equipment, main system configuration, unit economy and thermal economy were analyzed. [Result] The results show that 1 000 MW new generation ultra-supercritical unit with double re-heating cycles is feasible, which can be applied in our country. Compared with 1 000 MW ultra-supercritical unit with double re-heating cycles, 1 000 MW new generation ultra-supercritical unit with double re-heating cycles has a higher thermal efficiency, a lesser pollutant emissions, and a better economic profit. The 1 000 MW new generation ultra-supercritical unit with double re-heating cycles has a 48.72% thermal efficiency, a 252.48 g/kWh gross coal consumption rate and a 260.16 g/kWh net coal consumption rate, and is best in China. [Conclusion] Advanced martensitic heat-resistant steel G115 with independent intellectual property rights in China and extraction back pressure feed water pump steam turbine with a small generator can be used in 1 000 MW new generation ultra-supercritical unit with double re-heating cycles.

**Key words:** new generation ultra-supercritical unit with double re-heating cycles; main equipment parameter; G115; thermal system

收稿日期: 2017-10-31 修回日期: 2017-11-24

基金项目: 中国能建广东院科技项目“更高参数、二次再热超超临界机组双机回热带小发电机发电技术”(EV04031W)

近年来,我国经济发展进入新常态,各行业均面临结构调整和转型升级。随着社会用电量增速回落,作为我国电力生产主要形式的火力发电机组年

利用小时数逐年下降,火力发电机组大批量建设的时期已经结束。另一方面,绿色发展已经在全社会形成共识,电力行业面临减少  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}_2$  排放的巨大压力。在这种形势下,电力主管部门和发电企业均要求新建燃煤发电机组能大幅提升热效率和减少排放。发展更高参数和更高效率的发电机组,是电力行业转型升级的重要方向,对我国节能减排和可持续发展具有重大意义<sup>[1-3]</sup>。700 °C 超超临界燃煤发电技术是世界各国重点研发的火力发电技术,采用该技术的机组需要大量采用镍基合金等高温合金材料<sup>[4-5]</sup>,其技术研发的核心是研制成本合理、易于加工并能够在电站条件下实现长周期安全稳定服役的新型镍基合金材料<sup>[6]</sup>。目前,该技术还处于研发阶段,尚不具备工程实施条件。在700 °C 发电技术应用之前,研究建造中间参数火力发电机组成为近期火力发电行业的发展方向。本文依托某工程项目,对采用再热温度630 °C的新一代超超临界二次再热机组的可行性进行分析。

依托工程位于广东省汕尾市陆丰湖东镇海岬山西约2 km的范围,濒临南海。电厂规划建设8台1 000 MW超超临界燃煤机组,目前正在建设一期2×1 000 MW机组,本期工程在一期施工规划预留场地上进行扩建。工程设计煤种为68%澳洲煤+32%印尼煤的混煤,校核煤种I为神华煤,校核煤种II为印尼煤。

## 1 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组主机参数选择

### 1.1 我国1 000 MW超超临界二次再热机组发展现状

“十二五”期间,我国超超临界火力发电技术经过前期高速发展后进入了新阶段,二次再热发电技术进入了工程实施阶段。国内第一个采用二次再热发电技术的百万机组为国电泰州二期工程,该工程为1 000 MW二次再热燃煤发电示范工程,采用主机参数为31 MPa/600 °C/610 °C/610 °C,示范工程建设的两台机组分别于2015年9月和2016年1月正式投入商业运行,两台机组供电煤耗分别达到266.57 g/kWh和265.75 g/kWh<sup>[7]</sup>。随后开始建设的1 000 MW二次再热机组的参数均为31 MPa/600 °C/620 °C/620 °C,该参数机组已有投产业绩且有一批项目正在建设中。采用该参数的1 000 MW超

超临界二次再热机组在电厂设计、主机设计制造和运行等方面已经相对成熟。

### 1.2 我国耐高温材料研究新进展

近年来,钢铁研究总院和宝武钢铁集团共同研发的可用于650 °C的马氏体耐热钢G115研究取得了新进展<sup>[8]</sup>,目前已完成开发阶段的各项研制工作,有待进行产品技术评审<sup>[9]</sup>。在620~650 °C温度区间,该钢具有优异的组织稳定性和持久强度,其许用应力是P92钢的1.5倍,同时其抗蒸汽氧化腐蚀性能也优于P92钢<sup>[10]</sup>。

### 1.3 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组主机参数选择

2016年5月24日,电力规划设计总院受国家能源局委托在北京组织召开了650 °C超超临界燃煤发电技术可行性研讨会,会议得出结论为:鉴于目前国内外材料研发情况,尚不具备建设650 °C超超临界机组工程的条件,可开展相关的研究工作;对于630 °C超超临界机组,造价较620 °C超超临界机组增加不大,初步具备建设示范工程的技术条件<sup>[9]</sup>。在应用我国自主研发的先进马氏体耐热钢G115的基础上,按应用G115和现有成熟耐高温材料制造锅炉、汽轮机和高温管道的上限进行设计,1 000 MW超超临界二次再热机组可以进一步提高初参数,主蒸汽压力可达35 MPa,主蒸汽温度可达615 °C,再热蒸汽温度可达630 °C<sup>[10]</sup>。因此,在当前技术条件下,1 000 MW超超临界二次再热机组可以采用参数35 MPa/615 °C/630 °C/630 °C。

## 2 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组主机技术条件

### 2.1 锅炉技术规范

型式:超超临界参数、变压直流炉、固态排渣、单炉膛、二次中间再热、平衡通风、前后墙对冲燃烧或切圆燃烧、露天布置、全钢构架、全悬吊 $\pi$ 形结构或塔式布置。锅炉最大连续蒸发量工况(BMCR, boiler maximum continue rate)下的主要技术参数如表1所示。

### 2.2 汽轮机技术规范

型式:超超临界参数、二次中间再热、单轴、五缸四排汽、十二级回热、双背压、凝汽式、湿冷。汽轮机阀门全开(VWO, valve whole open)工况下的主要技术参数如表2所示。

表1 锅炉 BMCR 工况主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of boiler at BMCR

项 目	数 值
最大连续蒸发量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 940
过热器出口压力/MPa	36.65
过热器出口温度/℃	620.0
一次再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 870
一次再热蒸汽进口压力/MPa	14.00
一次再热蒸汽进口温度/℃	458.0
一次再热蒸汽出口压力/MPa	13.51
一次再热蒸汽出口温度/℃	633.0
二次再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 884
二次再热蒸汽进口压力/MPa	3.630
二次再热蒸汽进口温度/℃	420.0
二次再热蒸汽出口压力/MPa	3.440
二次再热蒸汽出口温度/℃	633.0
给水温度/℃	337.1
锅炉 NO <sub>x</sub> 排放浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	≤ 200
最低稳燃负荷	30% BMCR
锅炉保证效率/%	95

表2 汽轮机 VWO 工况主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of steam turbine at VWO

项 目	数 值
额定功率/MW	1 000
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 940
主汽门前蒸汽压力/MPa	35.00
主汽门前蒸汽温度/℃	615.0
一次再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 870
超高压缸排汽压力/MPa	14.19
超高压缸排汽温度/℃	459.8
高压缸主汽门前蒸汽压力/MPa	13.19
二次再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 884
高压缸排汽压力/MPa	3.710
高压缸排汽温度/℃	422.2
中压缸主汽门前蒸汽压力/MPa	3.320
中压缸主汽门前蒸汽温度/℃	630.0
设计平均背压/kPa	4.800
回热级数	5级高加+2级除氧+5级低加
保证热耗/(kJ·kWh <sup>-1</sup> )	6 950

## 2.3 发电机技术规范

型式:水-氢-氢冷却、自并励静止励磁。发电机主要技术参数如表3所示。

表3 发电机主要技术参数

Tab. 3 Main technical parameters of generator

项 目	数 值
额定功率/MW	1 000
最大功率/MW	1 072
额定电压/kV	27.00
功率因数(滞后)	0.900
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000
短路比	0.530
相数/相	3
频率/Hz	50.00
保证效率/%	99.00

## 3 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组主机设备可行性分析

### 3.1 锅炉设备可行性分析

#### 3.1.1 省煤器材料选择

受 SCR 催化剂可承受温度的限制,省煤器出口烟气温度不应超过 420℃,最佳温度应控制在 390℃,因此最高给水温度不宜超过 350℃。另一方面,给水温度提高可以降低汽轮发电机组热耗,但空预器入口烟气温度越高,锅炉排烟损失越大,锅炉效率会降低,因此给水温度应结合汽轮发电机组热耗和锅炉效率统筹确定。经济性最好的给水温度还需要考虑主、辅机设备、管道和阀门等的初投资、折旧费以及运行费用的影响<sup>[11]</sup>。此外,给水温度的选取还需要保证锅炉尾部受热面的水循环安全。本工程经过综合考虑最终采用给水温度为 337.1℃。正在设计中的某 1 000 MW 二次再热机组给水温度取 330.1℃,新一代超超临界二次再热机组的给水温度和烟温与常规二次再热机组锅炉相近,水冷壁材料可以继续采用 SA-210C,或者可以采用价格相差不大的 15 MoG。

#### 3.1.2 水冷壁材料选择

与常规二次再热机组相比,新一代超超临界二次再热机组给水温度高约 7℃,给水压力高约 4.3 MPa,主蒸汽流量增加约 6%,一次再热蒸汽流量减少约 24%,二次再热蒸汽流量减少约 10%,锅炉内部焓增分配和受热面布置需要重新调整,水冷壁温度会高于目前常规超超临界二次再热机组。水冷壁可以根据温度分段使用不同材料,下部温度较低部分仍可采用 15CrMoG 和 12Cr1MoVG,上部

温度较高部分宜采用 T23 或 T24, 需要的话也可以采用 T91 或 T92。

### 3.1.3 中低温过热器材料选择

新一代超超临界二次再热机组锅炉末级过热器出口压力高达 36.65 MPa, 末级过热器出口温度高达 620 °C, 中低温过热器设计参数会相应提高, 可以根据温度分段采用成熟的 T91 和 Super304H, 局部可以继续使用 12Cr1MoVG。

### 3.1.4 末级过热器和辐射区屏过材料选择

新一代超超临界二次再热机组锅炉过热器出口参数为 36.65 MPa、620 °C, 末级过热器与辐射区屏过常用材料 Super304H 在这个温度下许用应力下降较明显(温度由 625 °C 升高为 650 °C 时, 许用应力由 91.3 MPa 急剧降低为 78 MPa)<sup>[12]</sup>, 抗蒸汽氧化性能已经不足(Cr 含量为 17% ~ 19%)<sup>[13]</sup>。材料 HR3C (TP310HCbN) 抗氧化性能满足要求(Cr 含量为 24% ~ 26%), 但 600 °C 以上时许用应力低于 Super304H, 强度不足<sup>[14-15]</sup>。推荐末级过热器与辐射区屏过采用新开发的奥氏体钢, 候选材料有 NF709 (TP310MoCbN)、SAVE25 和 Sanicro25 (S31035)。NF709 和 Sanicro25 已经收录进 ASME (The American Society of Mechanical Engineers) 体系, Code Case 号分别为 2581 和 2752、2753<sup>[12]</sup>, 设计选用有依据。Sanicro25 在三种材料中强度最高, Cr 含量也略高于 NF709, 可以考虑作为首选材料<sup>[12]</sup>。因此, 末级过热器与辐射区屏过低温部分可以用 Super304H 或 HR3C, 高温部分可以用 Sanicro25 或 NF709。

### 3.1.5 低温再热器材料选择

与常规超超临界二次再热机组相比, 新一代超超临界二次再热机组汽轮机超高压缸排汽压力提高约 24%, 排汽温度提高约 34 °C; 高压缸排汽压力基本保持不变, 排汽温度降低约 24 °C。低温再热器布置在锅炉尾部竖井或塔式炉上部, 烟气侧温度变化不大。因此, 低温再热器可以沿用成熟材料 T91。

### 3.1.6 高温再热器材料选择

新一代超超临界二次再热机组锅炉高温再热器出口温度高达 633 °C, 一次再热高温再热器设计压力需提高约 24%, 二次再热高温再热器设计压力基本不变。高温再热器蒸汽侧温度提高幅度较大, 对材料抗蒸汽氧化性能要求提高, 其设计压力比过热器设计压力低很多, 对材料的强度要求较小。由于

用于高温再热器的材料要求具有良好的抗蒸汽氧化性能, 推荐采用 20Cr 以上材料, 候选材料有 NF709 (TP310MoCbN)、SAVE25、Sanicro25 (S31035) 和 HR3C (TP310HCbN)。HR3C (TP310HCbN) 在超超临界参数机组上已经广泛应用, 其强度虽然略低, 但高温再热器设计压力不高, 经济性比较时可以作为备选材料。

### 3.1.7 集箱和大口径管道材料选择

新一代超超临界二次再热机组锅炉过热器出口蒸汽温度高达 620 °C, 再热器出口蒸汽温度高达 633 °C。目前, 可用于超超临界机组集箱和大口径管道的成熟材料只有 4 种马氏体合金钢, 分别为 P91、P92 (NF616)、P122 (HCM12A) 和 P911 (E911), 相应的管接头则需要选用 T91、T92、T122 和 T911。P91/T91 和 P911/T911 材料的高温强度不足, P122/T122 材料的持久强度下降较快, 都不适用于超过 600 °C 的场合。P92/T92 管材在 600 °C 等级超超临界锅炉中有非常多的使用业绩, 是否继续适用于新一代超超临界二次再热机组是最关键的材料问题。

ASME 规范规定 P92/T92 管材最高使用温度为 649 °C<sup>[12]</sup>, 而国内《锅炉安全技术监察规程》(TSG G0001—2012) 规定其最高使用温度仅为 630 °C<sup>[16]</sup>。P92 应用于新一代超超临界二次再热机组主蒸汽管道时, 管道壁厚超过 150 mm, 已经接近目前管件厂和锅炉厂制管和焊接的经验上限; 另一方面, 其管道外径  $D_o$  和管道内径  $D_i$  的比值大于 1.7, 已超出有规范使用的管道最小壁厚计算公式的使用条件<sup>[17]</sup>。

P92/T92 材料若应用于再热蒸汽系统, 其运行温度 633 °C 已超出国内规范的限制, 即使采用 ASME 规范, 其温度安全裕量仅有 16 °C。因此, P92/T92 材料已经不再适合应用于新一代超超临界二次再热机组锅炉过热器集箱、再热器集箱、主蒸汽管道和高温再热蒸汽管道。

新开发的可以应用于 630 °C 机组的高温材料有两大类: 9Cr 马氏体材料和 11Cr 马氏体材料。9Cr 马氏体材料有 G115 (9Cr-3W-3CoCuVNbBN, 国产, 钢研院和宝武钢铁集团)、MARBN (9Cr-3W-3CoVNbBN, 日本, 日本国立材料研究所) 和 SAVE12AD (9Cr-3W-3CoNdVNbBN, 日本, 新日铁住金); 11Cr 马氏体材料有 NF12、SAVF12 (日本, 新日铁住金) 和 G112 (国产)。11Cr 钢由于持

久强度过低,不适合应用于630~650℃,9Cr钢是推荐使用的材料,其中国产材料G115已完成开发阶段的各项研制工作,有待进行产品技术评审,并已向中国钢铁工业协会团体标准委员会申请了团体标准,宝武钢铁集团已具备商业化生产能力,上海锅炉厂有限公司已开展了相关焊接性能试验研究<sup>[18]</sup>,完全可以应用于新一代超超临界二次再热机组锅炉过热器集箱、再热器集箱、主蒸汽管道和高温再热蒸汽管道的制作。

### 3.2 汽轮机设备可行性分析

新一代超超临界二次再热机组汽轮机基本上可以沿用现有常规超超临界二次再热机组汽轮机的材料体系。汽轮机超高压缸内外缸夹层之间可设置冷却蒸汽,用于冷却汽缸和转子高温进汽端,超高压转子可以使用成熟的FB2,超高压内缸和主汽阀阀体可以使用成熟的CB2,并适当增加缸壁或阀体厚度<sup>[19]</sup>,超高压外缸可以沿用常规二次再热机组材料。汽轮机高压缸、中压缸和一、二次再热联合汽阀进汽温度提高至630℃,高、中压缸采用双流程设计,外缸和内缸之间充满排汽,低温排汽可以冷却外缸,外缸可以继续沿用常规二次再热机组材料,高、中压内缸和一、二次再热联合汽阀阀体可以使用成熟的CB2,并适当增加缸壁或阀体厚度<sup>[19]</sup>,高、中压转子可以采用在FB2基础上改进的含3%Co的新型转子钢,日本的钢厂已经可以生产可满足630℃机组使用要求的新FB2高温转子锻件,高、中压转子的另一个方案可以采用分段焊接转子,即高温部分采用镍基合金或新型转子钢,低温部分采用12Cr钢。汽轮机高温叶片可选用成熟的、长期组织稳定性优良的GH4080A,现有机组已经有使用经验。通过选择合理的分缸参数,低压缸设计参数变化不大,可以沿用原有材料。综上,新一代超超临界二次再热机组汽轮机及相关高温阀门基本沿用常规二次再热机组材料,局部材料调整工作已经完成,可以满足工程示范需求。

### 3.3 发电机设备可行性分析

新一代超超临界二次再热机组发电机的生产制造和机组参数提高无关,可以沿用原有成熟产品。

### 3.4 主机厂设计制造能力分析

近年来,我国超超临界火力发电技术得到了长足发展。自2006年首台百万千瓦等级超超临界机组投产以来,截至2018年6月26日,国内投产的

1000 MW超超临界机组已达108台。国内三大主机制造厂已经完全掌握了超超临界机组的设计制造技术,并积累了丰富的工程经验。新一代超超临界二次再热机组锅炉和汽轮机高温高压部件材料确定后,主机制造厂只需要根据新参数和流量对相关设备进行重新设计。目前,三大主机制造厂已经完全具备了该项设计制造能力。

## 4 1000 MW 新一代超超临界二次再热机组主要辅机设备可行性分析

### 4.1 高温高压管道设计

新一代超超临界二次再热机组蒸汽参数采用35 MPa/615℃/630℃/630℃,主蒸汽管道的设计温度为625℃,高温再热蒸汽管道设计温度为638℃。由于受材料使用温度和现有规范关于管道最小壁厚计算公式的使用条件限制,P92材料已经不再适合应用于新一代超超临界二次再热机组主蒸汽管道和高温再热蒸汽管道。

为了适应机组参数进一步提高的需求,国内外研究人员开发了一些新材料。在新开发的可以应用于630℃机组的高温材料中,国产9Cr钢G115是重点推荐材料。

G115是我国企业具有自主知识产权的650℃先进马氏体耐热钢,在620~650℃温度区间,该钢具有优异的组织稳定性和持久强度,其许用应力是P92钢的1.5倍,同时其抗蒸汽氧化腐蚀性能也优于P92钢。2012年起,相关企业开展了厚壁大口径G115钢管的研发,目前已具备了生产最大外径1.2 m,最大壁厚0.1 m的全谱系钢管的能力<sup>[10]</sup>。2008—2017年间,钢铁研究总院和宝武钢集团已试制11轮次G115钢管,目前已掌握了G115钢的冶炼工艺、加工工艺和热处理工艺。上海锅炉厂有限公司已完成了两次焊接工艺试验,得出的结论为G115的可焊性与P92相当,焊接接头的常规性能评定均合格<sup>[10]</sup>。G115材料已经在2015年11月完成了材料的预评审,目前正在推进由国家锅炉及压力容器标准化委员会主持的材料评审。相关单位已经向中国钢铁工业协会团体标准委员会提交了“600℃以上超超临界电站锅炉用新型马氏体耐热钢无缝钢管(G115)”团体标准,预计于2017年底完成报批和发布。

与常规超超临界二次再热机组相比,新一代超

超临界二次再热机组主蒸汽流量、一次再热蒸汽流量和二次再热蒸汽流量均变化较多,主蒸汽管道、一次高温再热蒸汽管道和二次高温再热蒸汽管道采用新材料 G115。经计算,半容量主蒸汽管道、一次高温再热蒸汽管道和二次高温再热蒸汽管道规格分别为 ID318×94、ID451×63 和 ID851×32,管道单重分别为常规超超临界二次再热机组的 0.85 倍、0.59 倍和 0.62 倍。G115 钢材价格相比 P92 略高,但其许用应力远高于 P92,管道壁厚可以大幅减小,低温再热蒸汽管道和高压给水管道沿用原有材料,经初步比较,新一代超超临界二次再热机组六大管道造价与常规超超临界二次再热机组基本相当。

#### 4.2 给水泵选型

新一代超超临界二次再热机组 1×100% 容量汽动给水泵流量约为 3 230 t/h,主泵扬程约为 4 760 mH<sub>2</sub>O。与常规超超临界二次再热机组 1×100% 容量汽动给水泵相比,流量增大约 6%,扬程提高约 4%,经咨询给水泵生产厂家,流量和扬程增大有两个解决方案:一是泵型不变,提高给水泵转速;二是在现有泵型基础上增加一级叶片。给水泵扬程提高后,现有给水泵的泵轴、叶片和泵壳的强度需要重新复核,以满足更高压力的需要,经厂家初步评估,在现有给水泵基础上,本体设计不用做大的改动即可满足新一代超超临界二次再热机组 1×100% 容量汽动给水泵的要求。

#### 4.3 高压加热器选型

新一代超超临界二次再热机组单列高压加热器的设计流量约为 3 088 t/h,管侧设计压力为 50 MPa,与常规超超临界二次再热机组单列高加相比,流量提高约 6%,管侧设计压力提高约 10%。新一代超超临界二次再热机组单列高压加热器壳侧设计参数和管侧设计温度与常规超超临界二次再热机组基本相当。单列高压加热器如果继续采用 U 形管式高压加热器,管侧主要承压部件半球形封头和管板厚度将大幅增加,设计和加工会遇到以下难题:(1)半球形封头原材料超规格和厚度超规范;(2)管板厚度超规范;(3)应力集中及变工况运行适应性变差。因此,新一代超超临界二次再热机组单列高加已经不适合再采用 U 形管式高压加热器,如采用 U 形管式高压加热器,可考虑采用双列形式。

为适应高压加热器设计流量和管侧设计压力增

大的需要,国内高加厂家已经推出了蛇形管式高压加热器,相关科技工作者对蛇形管式高压加热器用于 1 000 MW 二次再热机组的可行性进行了分析<sup>[20]</sup>。由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司设计的某工程已经在国内率先采用该型高压加热器,可以为后续工程积累相关设计、制造和运行经验。蛇形管式高压加热器通过集箱和蛇形管束分隔高压给水和加热蒸汽,同等条件下,蛇形管式高压加热器的集箱厚度仅为 U 形管式高压加热器管板厚度的约 10%<sup>[20]</sup>,其加工制造已经不受目前材料加工能力限制,高加变工况运行非常灵活,完全可以应用于新一代超超临界二次再热机组单列高压加热器。

#### 4.4 抽背式给水泵汽轮机设计制造

新一代超超临界二次再热机组采用抽汽背压式给水泵汽轮机,其汽源为超高压缸排汽,采用五抽一排方案,即抽背式给水泵汽轮机设置 5 级抽汽分别供给 4 台高压加热器和高压除氧器,其排汽供给低压除氧器。由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司设计的某工程已经采用了上海汽轮机厂生产制造的三抽一排抽背式给水泵汽轮机,可以为后续工程积累相关设计、制造和运行经验。目前,国内三大主机制造厂已经初步完成了抽背式给水泵汽轮机的设计,其中上海汽轮机厂已经有了相关工程业绩。

#### 4.5 抽背式给水泵汽轮机剩余能量用于发电的可行性分析

新一代超超临界二次再热机组抽背式给水泵汽轮机在驱动给水泵的同时,还拖动一台小发电机,其功率约为 13.8 MW。变转速的抽背式给水泵汽轮机驱动发电机发出电网要求的 50 Hz 的电,可以采用以下两种方案:一是变速汽轮机通过调速装置转化为定速输出,驱动工频发电机发电,其所发电量可以直接并网,国内南京高精传动设备制造集团有限公司已经开发出了相关调速装置<sup>[21]</sup>;另一种是变速汽轮机驱动变频发电机发电,其发出电量经过变频装置处理为 50 Hz 交流电后接入电网。

### 5 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组主要系统配置和经济性

#### 5.1 燃烧制粉系统主要辅机配置

1)本工程煤质易燃、易爆,拟采用中速磨煤机

正压冷一次风机直吹式制粉系统, 每台锅炉配置6台中速磨煤机, 5台运行, 1台备用。

2) 每台锅炉配置6台电子称重皮带式给煤机, 5台运行, 1台备用。

3) 每台锅炉配置6个圆筒仓形煤仓, 材料为碳钢, 内衬不锈钢。

4) 每台锅炉配置2台全容量离心式密封风机, 1台运行, 1台备用。用于对正压制粉系统的设备密封, 防止煤粉外泄。

5) 每台锅炉配置2台半容量一次风机, 采用动叶可调轴流式, 2台运行, 不设备用。

6) 每台锅炉配置2台半容量送风机, 采用动叶可调轴流式, 2台运行, 不设备用。

7) 每台锅炉配置2台半容量引风机, 采用动叶可调轴流式, 2台运行, 不设备用。

## 5.2 热力系统主要辅机配置

1) 每台机组配置1台双壳体、单流程、双背压、表面式凝汽器。

2) 每台机组配置5台全容量蛇形管集箱式高压加热器, 采用立式布置。

3) 每台机组配置5台全容量U形管管板式低压加热器和1台U形管管板式疏水冷却器, 采用卧式布置。

4) 每台机组配置2台内置式除氧器。

5) 每台机组配置1台全容量汽动给水泵, 其前置泵与主泵同轴布置。每台机组设置1台35% BM-CR容量电动调速给水泵, 启动和低负荷时投入使用。机组采用单缸、单流、抽背式全容量给水泵汽

轮机, 其在驱动给水泵的同时还拖动1台小发电机发电。

6) 每台机组配置2台全容量立式筒型凝结水泵, 1台运行, 1台备用, 用于将凝汽器中的凝结水输送至低压除氧器。每台机组配置2台全容量中继水泵, 1台运行, 1台备用, 用于将低压除氧器中的凝结水输送至高压除氧器。

7) 机组采用高、中、低压三级串联旁路系统。每台机组配置4套25% BM-CR容量高压旁路装置, 中、低压旁路装置容量根据凝汽器不增加面积情况下的接收能力来核算确定, 高压旁路装置替代过热器出口安全阀。

## 5.3 1000 MW 新一代超超临界二次再热机组经济性

与1000 MW常规超超临界二次再热机组相比, 1000 MW新一代超超临界二次再热机组整体投资略高, 但具有热效率高和污染物排放少等优势, 静态回收年限为7.7年, 动态回收年限为9.9年, 回收年限较短, 经济效益较高, 且可以促进我国电力工业转型升级。详细经济性对比数据如表4所示。

## 5.4 1000 MW 新一代超超临界二次再热机组热经济性指标

本工程采用新一代超超临界参数, 抽背式给水泵汽轮机在拖动给水泵之外, 还驱动1台小发电机用于发电, 热力系统得到了合理配置和优化, 其热经济性指标达到了国内最优水平, 详细数据如表5所示。

表4 1000 MW 常规超超临界二次再热机组与新一代超超临界二次再热机组经济性比较

Tab. 4 Economic comparison between 1000 MW ultra-supercritical units with double re-heating cycles and 1000 MW new generation ultra-supercritical units with double re-heating cycles

项 目	2×1000 MW 常规超超临界二次再热机组	2×1000 MW 新一代超超二次再热临界机组	备 注
投资/亿元	基准	5.3	—
发电标煤耗/(g·kWh <sup>-1</sup> )	基准	-4.65	—
年消耗标煤/t	基准	-128.23	—
年燃煤费用/万元	基准	-1000.19	按780元/t(不含税)计算
主机年发电量/TWh	11.0	11.0	年利用小时按5500h
年售电量/TWh	基准	0.1518	考虑小发电机电量
年售电收益/万元	基准	5877.70	按0.3872元/kWh(不含税)计算
年收益/万元	基准	6877.89	—
静态回收年限/年	基准	7.70	—
动态回收年限/年	基准	9.90	—

表5 机组主要经济指标

Tab. 5 Main economic indexes of unit

项 目	2 × 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组
发电功率/MW	2 × 1 000
年利用小时数/h	5 500
年发电量/TWh	11.00
年供电量/TWh	10.68
汽轮发电机组保证热耗 THA 工况/(MJ · kWh <sup>-1</sup> )	6.95
锅炉保证效率/%	95
管道效率/%	99
全厂热效率/%	48.72
发电标煤耗/(g · kWh <sup>-1</sup> )	252.48
厂用电率/%	2.95
供电标煤耗/(g · kWh <sup>-1</sup> )	260.16

## 6 结论

1) 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组参数宜选取为 35 MPa/615 °C/630 °C/630 °C，我国已经具备该机组的设计制造能力。

2) 钢铁研究总院和宝武钢铁集团共同研发的具有自主知识产权的 650 °C 先进马氏体耐热钢 G115，可以应用于新一代超超临界二次再热机组锅炉过热器集箱、再热器集箱、主蒸汽管道和高温再热蒸汽管道的制作，并以此带动我国材料工业的发展。

3) 带小发电机的抽背式给水泵汽轮机可以应用于新一代超超临界二次再热机组，为 700 °C 超超临界燃煤发电技术的研发和应用奠定基础。

4) 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组与常规超超临界二次再热机组相比整体投资略高，但具有热效率高和污染物排放少等优势，静态回收年限为 7.7 年，动态回收年限为 9.9 年，回收年限较短，经济效益较高。

5) 通过对热力系统进行合理配置和优化，2 × 1 000 MW 新一代超超临界二次再热机组全厂热效率达到 48.72%，发电标煤耗达到 252.48 g/kWh，供电标煤耗达到 260.16 g/kWh，为国内最优水平，可以促进我国电力工业转型升级，对我国节能减排和可持续发展具有重大意义。

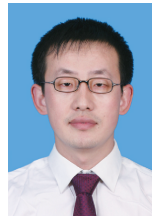
## 参考文献：

- [1] 潘军. 1 000 MW 超超临界机组技术发展的探讨 [J]. 电力勘测设计, 2014(3): 32-35.  
PAN J. Discussions on technique development of 1 000 MW ultra-supercritical units [J]. Electric Power Survey & Design, 2014(3): 32-35.
- [2] 黄迪南. 以技术创新引领一代高效洁净燃煤发电装备的开发 [J]. 华东电力, 2014, 42(1): 6-11.  
HUANG D N. Development of new efficient clean coal-fired power generation equipment led by technology innovation [J]. East China Electric Power, 2014, 42(1): 6-11.
- [3] 张晓鲁. 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 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 91-95.  
ZHANG X L. Some consideration about the future development strategy of advanced ultra supercritical coal-fired power generation technology [J]. Engineering Science, 2013, 15(4): 91-95.
- [4] 迟成宇, 于鸿垚, 谢锡善. 世界 700 °C 等级先进超超临界电站关键高温材料 [J]. 世界钢铁, 2013, 13(2): 42-59 +63.  
CHI C Y, YU H Y, XIE X S. Critical high temperature materials for 700 °C A-USC power plants [J]. World Iron & Steel, 2013, 13(2): 42-59 +63.
- [5] 王起江, 洪杰, 徐松乾, 等. 超超临界电站锅炉用关键材料 [J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(增刊 1): 26-33.  
WANG Q J, HONG J, XU S Q, et al. Key materials used in ultra-supercritical power station boilers [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(Supp. 1): 26-33.
- [6] 刘入维, 肖平, 钟犁, 等. 700 °C 超超临界燃煤发电技术研究现状 [J]. 热力发电, 2017, 46(9): 1-7 +23.  
LIU R W, XIAO P, ZHONG L, et al. Research progress of advanced 700 °C ultra-supercritical coal-fired power generation technology [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(9): 1-7 +23.
- [7] 阳光, 陈仁杰, 朱佳琪. 1 000 MW 超超临界二次再热燃煤发电示范工程总体设计方案 [J]. 中国电力, 2017, 50(6): 12-16.  
YANG G, CHEN R J, ZHU J Q. General design of 1 000 MW ultra-supercritical double-reheat demonstration power plant [J]. Electric Power, 2017, 50(6): 12-16.
- [8] 刘正东, 程世长, 包汉生, 等. 蒸汽温度超超临界火电机组用钢及制备方法: CN103045962A [P]. 2013-04-17.
- [9] 电力规划设计总院. 关于报送 650 °C 超超临界燃煤发电技术可行性研讨会会议纪要的函: 电规发电[2016]224 号[EB]. (2016-05-27)[2018-05-10].
- [10] 刘正东, 包汉生, 徐松乾, 等. 用于超 600 °C 蒸汽参数超超临界火电机组的新型马氏体 G115 耐热刚及其钢管研制 [C]// 2015 年全国高品质特殊钢生产技术交流研讨会, 苏州: 中国金属学会, 2015: 26-32.



- [11] 凌芳, 霍沛强, 邓成刚, 等. 1 000 MW 等级湿冷机组回热级数优化研究 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 45-49.  
LING F, HUO P Q, DENG C G, et al. Optimization of re-generative stage numbers for 1 000 MW wet cooling units [J]. Southern Energy Construction, 2014, 1(1): 45-49.
- [12] The American Society of Mechanical Engineers. Code cases 2015 ASME boiler and pressure vessel code; ASME BPVC. CC. BPV-2015[S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [13] 陈昱萌. 超超临界锅炉运行诊断及 NO<sub>x</sub> 减排调整试验 [J]. 广东电力, 2017, 30(5): 21-24+62.  
CHEN Y M. Operation diagnosis on ultra-supercritical boiler and adjustment experiment on NO<sub>x</sub> emission reduction [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5): 21-24+62.
- [14] 于鸿彦, 董建新, 谢锡善. 新型奥氏体耐热钢 HR3C 的研究进展 [J]. 世界钢铁, 2010, 10(2): 42-49+61.  
YU H Y, DONG J X, XIE X S. Research development of new austenitic heat-resistant steel HR3C [J]. World Iron & Steel, 2010, 10(2): 42-49+61.
- [15] 张建强, 郭嘉琳, 李太江, 等. 12Cr18Ni12Ti/12Cr1MoV 异种耐热钢焊接接头蠕变数值模拟 [J]. 广东电力, 2016, 29(7): 1-4+28.  
ZHANG J Q, GUO J L, LI T J, et al. Numerical simulation on interfacial creep of dissimilar welded joint between 12Cr18Ni12Ti and 12Cr1MoV heat-resistant steel [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(7): 1-4+28.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 锅炉安全技术监察规程: TSG G0001—2012 [S]. 北京: 新华出版社, 2012.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电厂动力管道设计规范: GB 50764—2012 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [18] 上海电气集团股份有限公司. 630 ℃ 锅炉总体方案介绍 [R]. 上海: 上海电气集团股份有限公司, 2016.
- [19] 上海电气集团股份有限公司. 630 ℃ 汽轮机总体方案介绍 [R]. 上海: 上海电气集团股份有限公司, 2016.
- [20] 邓成刚, 郑军, 邹罗明, 等. 蛇形管高压加热器用于 1 000 MW 二次再热机组的可行性分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 44-48.  
DENG C G, ZHENG J, ZOU L M, et al. Feasibility analysis on the application of high pressure serpentine heater in 1 000 MW coal-fired power plant with double re-heating cycles [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1): 44-48.
- [21] 南京高精传动设备制造集团有限公司. 南高齿康驱 (CONT-ROTON)-高速行星齿轮调速系统亮相欧洲 POWER-GEN 展 [EB/OL]. (2017-07-24) [2018-05-10]. <http://news.bjx.com.cn/html/20170724/838974.shtml>.

## 作者简介:



WANG D L

王东雷(通信作者)

1982-, 男, 山西武乡人, 高级工程师, 硕士, 主要从事大型火力发电厂热机设计等工作 (e-mail) wangdonglei@gedi.com.cn。

张鹏

1978-, 男, 湖南益阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事大型火力发电厂热机设计工作 (e-mail) zhangpeng@gedi.com.cn。

霍沛强

1975-, 男, 广东广州人, 高级工程师, 学士, 主要从事火电厂设计工作 (e-mail) 15818889050@139.com。

(责任编辑: 高春萌)

## 能源知识 · 超超临界机组

在工程热力学中, 水在临界状态点的参数是: 压力 22.115 MPa, 温度 374.15 ℃。在临界点以及超临界状态时, 将看不见蒸发现象, 水在保持单相的情况下从液态直接变成汽态。当水蒸汽参数大于这个临界点的参数值, 则称其为超临界参数。从物理意义上讲, 水的物性只有超临界和亚临界之分。发电厂蒸汽动力装置中汽轮机比较典型的超临界参数为 24.2 MPa/566 ℃/566 ℃。有一种观点认为, 温度 566 ℃ 事实上一直是超临界参数的准则, 任何超临界新汽温度或再热汽温度超过这一数值时也被划为超超临界参数范畴, 或者称为提高参数的超临界机组。在国外的技术资料上, Ultra Super Critical (USC) 通常用来代表这类参数的机组, 中文译成超超临界, 也可理解为优化的或高效的超临界机组。

(《南方能源建设》编辑部)