

# 现役燃煤火电机组提升参数改造技术现状及关键问题分析

范庆伟<sup>1</sup>, 管洪军<sup>2</sup>, 陈显辉<sup>3</sup>, 刘俊<sup>4</sup>

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 胜利发电厂, 山东 东营 257100;  
3. 东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000; 4. 内蒙古岱海发电有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 013700)

**摘要:** 伴随我国能源结构调整政策的实施, 燃煤火电机组节能减排技术得到了极大的发展, 近年来国内出现了一批现役燃煤火电机组提升参数改造的典型病例。本文对提升参数改造技术的发展历程、技术特点和典型病例进行了综述。在此基础上, 针对提升参数改造技术在节能潜力、机组增容、受热面调整方式、投资收益比和未来发展等方面进行了分析。提升参数改造若与现役机组延寿改造同步实施, 将会提高该技术的经济性, 同时也会提升改造后机组的生存几率。

**关键词:** 现役燃煤机组; 提升参数; 设备改造; 节能降耗; 设备延寿

中图分类号: TM621 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.mdlgc.2022.06.002

[引用本文格式] 范庆伟, 管洪军, 陈显辉, 等. 现役燃煤火电机组提升参数改造技术现状及关键问题分析[J]. 热能动力工程, 2022, 37(6): 12-18. FAN Qing-wei, GUAN Hong-jun, CHEN Xian-hui, et al. Present situation and key problem analysis in parameters increasing reformation technology for active coal-fired thermal power units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 12-18.

## Present Situation and Key Problem Analysis in Parameters Increasing Reformation Technology for Active Coal-fired Thermal Power Units

FAN Qing-wei<sup>1</sup>, GUAN Hong-jun<sup>2</sup>, CHEN Xian-hui<sup>3</sup>, LIU Jun<sup>4</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co. Ltd., Xi'an, China, Post Code: 710054; 2. SHENGLI Power Plant, Dongying, China, Post Code: 257100; 3. DONGFANG TURBINE Co. Ltd., Deyang, China, Post Code: 618000;  
4. Inner Mongolia Daihai Power Generation Co. Ltd., Hohhot, China, Post Code: 013700)

**Abstract:** Energy saving and emission reduction technology of coal-fired thermal power units has been greatly developed along with the implementation of China's energy structure adjustment policy. In recent years, a number of typical cases of parameters increasing reformation have been conducted for active coal-fired thermal power units. In this paper, the development process, technical characteristics and typical cases of parameters increasing reformation technology are reviewed and analyzed. On this basis, aiming at the parameters increasing reformation technology, the analyses are focused on the energy saving potential, unit power output capacity increase, heating surface adjustment mode, investment income rate and trend of development. If parameters increasing reformation and life-extension reformation can be conducted synchronously, the technical economy and the power units competitiveness can be both improved.

**Key words:** active coal-fired thermal power units, parameters increasing, equipment reformation, energy saving and emission reduction, life-extension

## 引言

在我国电力系统中,燃煤发电始终占据着主导地位。对于燃煤机组,提升蒸汽初始参数(压力、温度)可以显著提高机组的循环热效率,实现更好的经济性。因此,不断提高燃煤机组蒸汽参数是节能降耗的重要技术措施,如700℃等级先进超(超)临界燃煤发电技术的研发<sup>[1]</sup>。

为加快推动能源生产和消费革命,进一步提升煤电高效清洁发展水平,2014年9月,国家发展改革委、环境保护部和国家能源局联合发布《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》<sup>[2]</sup>,行动计划对现役燃煤机组能耗水平提出了明确的量化指标,推动了节能降耗工作的进程。在行动计划的刺激下,“亚临界机组改造为超(超)临界机组”技术(跨代升级改造)开始在业内出现,后续逐渐演变为“亚临界机组提升参数改造”技术。本文首先介绍了该技术的发展过程、典型实施案例分析,进而对该技术的关键问题进行分析论证,以期对该技术的进一步发展提供理论依据。

## 1 跨代升级改造技术的发展

对于老旧现役机组提效改造的技术路线,国外已有类似研究。ALSTOM公司2004年9月发布的美国煤基朗肯循环电厂提效可行性研究报告,以Philip Sporn电厂4号机组为案例进行了方案设计<sup>[3]</sup>。该机组为50年代投产的燃煤机组,额定功率169 MW,蒸汽参数为14 MPa/566℃/538℃。为实现升级改造,在原锅炉基础上新增一台循环移动床锅炉,锅炉出口主蒸汽参数为30 MPa/700℃,主蒸汽进入新增的前置透平做功,并带动小发电机发电,小发电机输出功率为32 MW。前置透平排汽参数为14 MPa/566℃,与原汽轮机进口设计参数匹配,原汽轮机高压缸排汽压力为3.5 MPa,送入新增循环移动床锅炉的再热器段吸热,再热蒸汽温度为538℃,与原汽轮机中压缸进口设计参数匹配。经上述改造后,机组循环热效率可由35.7%提升至38.4%。

2014年9月,国家三部委联合下发的《煤电节

能减排升级与改造行动计划(2014-2020年)》要求:“到2020年,现役燃煤发电机组改造后平均供电煤耗低于310 g/(kW·h),其中现役60万千瓦及以上机组(除空冷机组外)改造后平均供电煤耗低于300 g/(kW·h)”。在行动计划附件中,提到了处于技术研发阶段的“亚临界机组改造为超(超)临界机组”技术,通过将亚临界老旧机组改造为超(超)临界机组,对汽轮机、锅炉和主辅机设备做相应改造,实现机组循环效率的大幅提升。随后,提出北仑电厂2号亚临界600 MW机组跨代升级为超临界二次再热800 MW机组方案,跨代升级改造技术路线开始被业内所熟知<sup>[4]</sup>。方案实施后机组额定出力达到830 MW,蒸汽参数为31 MPa/600℃/566℃/538℃,供电煤耗下降40 g/(kW·h)。改造方案新增一台超超临界背压机,并带单独的小发电机。背压机同轴布置背压抽汽式透平(简称BEST透平),BEST透平抽汽供给除氧器和高压加热器用汽。超超临界背压机排汽进入锅炉再热,随后进入原汽轮机高压缸做功;高压缸排汽进入锅炉二次再热,随后进入原汽轮机中、低压缸做功。详细系统布置方案参见文献<sup>[5]</sup>。跨代升级改造虽可大幅降低机组的供电煤耗水平,但从北仑项目方案可知,其改造范围、工程量、投资规模均非常大。此外,原址重建过程中还要考虑原设备拆除、运输、处理的费用和施工周期。因此,示范项目最终经过方案论证后未能进入工程实施阶段。此后,跨代升级改造技术路线的研究鲜有报道。这也侧面证明了该技术路线的实操难度大,推广性不强。

为完成行动计划的任务,提出现役燃煤火电机组提升参数改造技术,并受到业内的广泛关注。该技术重点针对的是亚临界机组,仅提升蒸汽温度,而主蒸汽压力基本保持不变,这样既可以降低机组煤耗水平,又可以有效减少改造工程量。业内多个电力集团及下属电厂、设备制造单位、科研院所等均对提升参数改造技术方案进行了研究,从技术可行性、改造方案、投资概算和技术经济性等方面进行分析论证。在随后的几年内,国内有4家电厂陆续进行了相应的改造实践,证实了项目的可行性及节能效果。

## 2 提升参数改造典型案例分析

蒸汽参数提升的幅度与方案的难易程度和投资规模成比例。根据国内目前的工程案例,蒸汽温度提升主要分为3种:(1)小幅提温运行技术:充分利用主设备制造余量或小规模改造,小幅提升蒸汽温度运行(通常不超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ );(2)“亚改超”技术:进行一般规模改造,机组蒸汽温度从亚临界等级提升至超临界等级;(3)“亚改超超”技术:进行大规模改造,机组蒸汽温度从亚临界等级提升至超超临界等级。此外,国内还有一批超临界机组设计阶段主蒸汽温度为 $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等级,随着技术的不断完善,进行了蒸汽参数补齐,即主蒸汽温度由 $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升至 $566\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此处需说明的是,“亚改超”和“亚改超超”为业内人士对该技术的普遍叫法,故而加引号,沿袭于行动计划的跨代升级改造技术,也有学者提出“高温亚临界”技术的名词,均对应提升参数改造技术。

### 2.1 小幅提温运行技术

机组小幅提升蒸汽温度运行技术的主要出发点是充分利用各部件在设计、制造等阶段的安全余量,在不进行改造或者较少改造量的情况下提升蒸汽初始温度。该技术需在充分掌握机组各高温部件设计参数、运行参数、当前状态等信息的基础上,详细校核各部件的许用上限温度,并以最薄弱部件的许用上限温度作为提升蒸汽温度的最高限值。国内某 $300\text{ MW}$ 亚临界湿冷机组设计蒸汽温度 $538\text{ }^{\circ}\text{C}/538\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在综合提效改造中论证了提升温度至 $545\text{ }^{\circ}\text{C}/545\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $566\text{ }^{\circ}\text{C}/566\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $545\text{ }^{\circ}\text{C}/538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等多种方案(主蒸汽压力保持不变)。经核算,机组现有主、再热蒸汽管道最高允许温度为 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,考虑运行安全,在不改造主、再热蒸汽管道的情况下,可将汽轮机进口蒸汽温度提高到 $545\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,各高温部件核算结果均可承受 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (锅炉侧)/ $545\text{ }^{\circ}\text{C}$ (汽机侧)的上限温度。最终,项目选取提升温度至 $545\text{ }^{\circ}\text{C}/538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为实施方案,即主蒸汽温度提升 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、再热蒸汽温度不变。该方案针对主蒸汽温度提升,锅炉侧不进行任何改造,完全利用设计余量并充分考虑改造后的运行安全裕量。汽轮机侧机组提效改造在进行通流改造时直接 $545\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为汽轮机进口

设计参数。因此,汽轮机部分提升参数改造的投入非常小。经核算,改造后机组供电煤耗降低约 $0.3\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。本项目虽然获得的收益不大,但其相应的资金投入几乎可忽略,因此,仍具有非常重要的代表意义。

### 2.2 “亚改超”技术

“亚改超”技术是将机组主、再热蒸汽的运行温度由亚临界等级的 $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提升至超临界等级的 $566\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,机组运行压力保持不变。已有改造案例包括大唐托克托电厂 $600\text{ MW}$ 亚临界机组综合升级提效改造、大唐安阳电厂 $300\text{ MW}$ 亚临界机组升参数节能改造和京能岱海电厂二期 $600\text{ MW}$ 亚临界空冷机组节能减排改造<sup>[6-10]</sup>。

大唐托克托电厂“亚改超”项目通过汽轮机通流改造技术已实现较好的提效目的。在此基础上,又同步将主、再热蒸汽参数由 $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提至 $566\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,机组容量不变、运行压力不变,从而实现了亚临界机组能耗水平的进一步提升。相比常规通流改造技术,由于蒸汽温度的提升,汽轮机对应高温部件材质需升档,其他改造内容基本一致。锅炉部分为适应蒸汽温度的提升,屏式过热器、高温过热器、高温再热器和各自出口集箱进行了整体更换及对应的材料升档,其布置结构保持不变(锅炉改造前减温水量较大,即过热器换热面积较大,改造后,减温水量减半,因此,过热器换热面积未增加)。管道部分为适应蒸汽温度的提升,主蒸汽管道弯管及附属疏水系统更换,直管段强度核算合格,可以利旧;再热热段全部管道、部件及附属疏水系统更换;两台低旁阀及附属疏水系统更换。改造后,3号汽轮机热耗率为 $7\ 744\text{ kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,4号汽轮机热耗率为 $7\ 749\text{ kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,两台机组性能数据明显优于常规亚临界 $600\text{ MW}$ 机组通流改造后的平均效果(热耗率低至 $100\text{ kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ )。大唐安阳“亚改超”项目主、再热蒸汽温度提至 $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,运行压力不变、机组容量增加 $20\text{ MW}$ 。相比常规通流改造技术,汽轮机通流改造需对高温部件的材料进行升档。锅炉部分除了高温部件材料升档外,还需增加换热面积,因此改造范围更大。主要包括:低温过热器增加一组管圈、面积增加 $20\%$ ,大屏过热器材料升档、面积增加 $5\%$ ,后屏过热器材料升档,高温过热器材料升档、面积增

加12%,中温再热器出口段材料升档,高温再热器材料升档、面积增加100 m<sup>2</sup>。同时,对高压过热器进口集箱、出口集箱、高压再热器出口集箱进行更换,壁式再热器出口集箱更换。管道部分将再热蒸汽热段管道整体更换,主蒸汽管道利旧。更换的阀门包括汽轮机侧主、再热管道疏水阀、高/低压旁路疏水阀、本体疏水管道及阀门,锅炉侧过热器出口和再热器出口安全阀、水压实验堵阀、对空排气阀,过热器出口的放空气阀、疏水阀、反冲洗阀、压力讯号阀,高/低压旁路调节阀等。此外,为适应机组电功率的增容,对发电机和主变系统也进行了增容改造。由上述改造内容可知,安阳项目的改造范围比大唐托克托电厂项目要大,改造后汽轮机热耗率为7 801 kJ/(kW·h),达到预期水平。

京能岱海“亚改超”项目为600 MW亚临界空冷机组提升温度改造的典型实例,主、再热蒸汽温度由538℃提升至566℃,运行压力不变、机组容量增加至660 MW。通流改造相比常规通流改造技术需对高温部件的材料进行升档。锅炉部分改造范围包括:垂直低温过热器增加1圈,分隔屏过热器材料升档并增加2排管圈(管圈数量增加1圈),后屏过热器材料升档并增加3排,墙式再热器高度增加2 m并增加50根管子,屏式再热器材料升档并增加2根管圈,末级再热器材料升档并增加1根管圈。同时,对分隔屏过热器出口集箱、后屏过热器和末级过热器进出口集箱、再热器进出口集箱和管道均进行更换。考虑机组增容后流量增加,对锅炉原设计安全阀和动力泄放阀及相应的排汽管道进行更换。蒸汽管道强度经校核,主蒸汽管道弯头等管件需更换,直管段可利旧,再热蒸汽管道热段整体更换。岱海项目通流改造及提升参数改造后供电煤耗下降14.74 g/(kW·h)。

### 2.3 “亚改超超”技术

“亚改超超”技术是将机组的主、再热蒸汽温度由538℃提升至接近600℃水平,机组运行压力保持不变,已有的改造实例包括京能岱海一期600 MW湿冷机组(改造后为空冷)提效改造和华润徐州300 MW机组高温亚临界改造<sup>[11]</sup>。

京能岱海一期机组原设计为湿冷机组,为保护岱海湖淡水资源,改造为空冷机组,并同步实施节能

减排改造,“亚改超超”是其中非常重要的改造项目。改造后机组主、再热蒸汽温度由538℃提至596℃,受限于受热面布置的问题,并未达到600℃。汽轮机通流改造采用超超临界机组积木式的模块结构,改造后包括1个筒形高压缸,1个双流中压缸和2个双流空冷低压缸。锅炉部分为适应蒸汽温度提升,改造范围包括:对低温过热器出口段、屏式过热器、后屏式过热器、末级过热器、水平再热器部分管段、高温再热器管道的材质和结构进行改造;低温过热器出口集箱、屏式过热器出口集箱、后屏过热器进出口集箱、末级过热器进出口集箱、再热器进出口集箱以及相应连接管道均需进行强度升级;对安全阀、PCV阀、排汽管道、疏水盘、排放管及固定装置进行改造;在后屏及末级过热器之间增加过热器三级减温系统,在低温再热器出口管组及高温再热器进口管组之间增加二级再热器减温系统,并相应的增加连接的管道和集箱;将再热器结构形式改为大U型。同时,将再热器系统由原来的单进单出形式,改为双进双出形式。蒸汽管道系统为适应改造后的蒸汽参数进行了升级改造。本项目实施后,额定工况汽轮机热耗率降低至7 900 kJ/(kW·h),节能、节水效果显著。

华润徐州项目是目前提升参数改造项目中蒸汽温度提升幅度最大的,主、再热蒸汽温度均提升至600℃,项目于2019年8月10日顺利通过168 h试运行。改造项目的技术细节并未公开报道。

## 3 提升参数改造关键问题探讨

### 3.1 机组节能量分析

提升参数改造包括两部分节能收益:其一为汽轮机通流改造的节能收益,这部分收益通过新一代通流改造技术的实施即可获得;其二为蒸汽温度提升带来的循环效率的提高,这部分收益可认为纯粹是提升参数改造的节能收益,孙科等人<sup>[12]</sup>研究了提升再热汽温对发电煤耗的影响效果。

以300 MW亚临界机组为例,按现有技术实施通流改造后,保证的汽轮机热耗率约为7 850 kJ/(kW·h),额定工况设计发电煤耗为289.4 g/(kW·h)。以此为基准,提升参数改造的节能收益如图1所示,估算过程关键参数如表1所示。

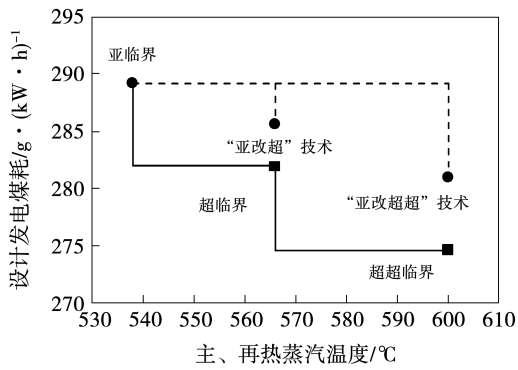


图1 提升参数改造节能量分析

Fig. 1 Energy saving analysis of parameter increasing technology

表1 节能量分析关键参数

Tab. 1 Key parameters for energy saving analysis

参数	基准值	提温工况	
蒸汽温度/°C	538	566	600
高排温度/°C	320.5	342.7	370.4
高压缸效率/%	88.0	88.3	89.0
中压缸效率/%	93.0	93.2	93.5
低压缸效率/%	89.0	89.4	90.0
给水温度/°C	276.2	278.0	278.9
机组背压/kPa	4.9	4.9	4.9
汽轮机热耗率/kJ·(kW·h) <sup>-1</sup>	7 850	7 746	7 622
锅炉效率/%	93.5	93.5	93.5
设计发电煤耗/g·(kW·h) <sup>-1</sup>	289.4	285.6	281.0

主、再热蒸汽温度提升至 566 °C 时,汽轮机热耗率降至 7 746 kJ/(kW·h),额定工况设计发电煤耗为 285.6 g/(kW·h),发电煤耗降低 3.8 g/(kW·h)。与常规超临界机组相比,其额定工况设计发电煤耗约为 282.0 g/(kW·h),仍有一定差距。主、再热蒸汽温度提升至 600 °C 时,汽轮机热耗率降至 7 622 kJ/(kW·h),额定工况设计发电煤耗为 281.0 g/(kW·h),发电煤耗降低 8.4 g/(kW·h)。常规超超临界机组额定工况设计发电煤耗约为 274.6 g/(kW·h)。由此可知,单纯依靠提升蒸汽温度的提升参数改造技术的节能量并不十分显著,“亚改超”技术的节能量约合 3.5 ~ 4.5 g/(kW·h),“亚改超超”技术和节能量约合 7.5 ~ 8.5 g/(kW·h)。

### 3.2 机组增容能力分析

提升参数改造后机组在额定出力下的主蒸汽流

量、燃料量均有所下降,这就使机组具备了小幅增加出力的潜力。对于锅炉系统而言,各主、辅设备对燃料量非常敏感。通常,等煤量可作为增加出力核算的基准,即增加出力后最大负荷消耗的燃料量与改造前相同。此时,锅炉各主、辅设备运行工况与改造前一致,不会限制机组增加出力(如果原设备运行本身存在问题,如屏式过热器挂焦严重、辅机容量不足等则需要单独校核)。若要进一步增加出力,则需要核算的因素包括:锅炉炉膛容积热负荷、截面热负荷,燃烧器与屏底高度、受热面布置空间等结构参数;锅炉制粉系统、环保设备及烟风系统余量等设备参数;对于汽轮机系统而言,提升参数必然意味着通流改造,本体部分按增加出力后的容量重新设计即可,但需要校核各管道、加热器等的流速、容积流量等关键参数;对于电气系统而言,只要增加了出力,就需要校核主辅设备的余量是否足够。

从政策法规的角度而言,机组不增加出力提升参数改造可以带来节能减排的效应、降低电厂煤炭消耗总量,不涉及政策法规问题。等煤量增加出力的幅度在 10% 以内,该方案尚属小幅增加出力,且由于总燃煤量不增加,也较易获批,如岱海二期项目。大幅增加出力方案会使校核和改造的范围大幅扩大,且增加的燃料消耗未必会得到地方政府的允许,因此,实施难度很大。

在经济性方面,机组增加出力改造对节能量的影响基本可以忽略,由于出力增加所带来的基础发电量的增加易受多种因素制约,在目前电力市场状况下较难落地,因此其收益也难以定量估计。

综合考虑上述因素,提升参数改造后的机组容量宜选择维持原状或按燃料总量不增加原则机组容量小幅提升。

### 3.3 锅炉受热面改造分析

提升参数改造将改变锅炉各级受热面的热量分配关系,以 300 MW 亚临界机组通流改造后额定工况数据为基准(如图 2 所示),主、再热蒸汽温度提至 566 °C 时,受主蒸汽流量减少(给水温度变化幅度较小)的影响,蒸发阶段受热面(省煤器和水冷壁)总吸热比例减少 1.73%。而受主蒸汽温度提高的影响,过热阶段受热面(包墙过热器、低温过热器、屏式过热器及高温过热器)的总吸热比例增加

1.99%。主蒸汽温度提高会使低温再热器入口蒸汽温度同步提高,这抵消了一部分再热温度提高的影响,此外,受抽汽量影响,再热蒸汽流量也有所调整。最终,再热阶段受热面(低温再热器、高温再热器等)总吸热比例仅略有降低,降低约0.25%。当主、再热蒸汽温度提至600℃时,受热面吸热比例变化幅度更大,蒸发阶段受热面总吸热比例减少3.60%,过热阶段受热面总吸热比例增加4.08%,再热阶段受热面总吸热比例仅降低0.48%。

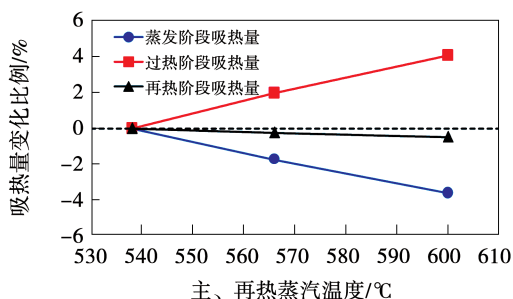


图2 提升参数改造锅炉受热面吸热比例变化分析

Fig.2 Heat absorption ratio analysis of boiler heating surface through parameter increasing technology

图2为提升参数改造受热面吸热比例变化分析。由图2可知,提升参数改造后,额定负荷下的燃料量减少,将使得各级受热面进、出口的烟气温度出现不同程度的降低,而蒸汽温度却有所升高,从而导致受热面对数传热温压降低。原设计的各级受热面的换热面积不足(尤其是过热器和再热器各级受热面),需进行增容改造。对于现役锅炉而言,尾部烟道内能布置的受热面面积受限于钢架结构承载能力、烟道结构尺寸、受热面结构参数(管径、截距等)等因素,其可增容的幅度有限。从目前实施的案例分析,蒸汽温度提升至566℃等级时,对锅炉结构影响较小,通过尾部烟道受热面的合理布置,是完全可以满足要求的。而蒸汽温度提升至600℃等级时,锅炉结构的限制效果就凸显出来了,岱海一期项目即为考虑了上述因素,最终蒸汽温度按596℃设计。

当蒸汽温度提升至600℃等级及以上时,蒸发阶段和过热阶段的吸热比例变化幅度较大,约4%。因此,需重点考虑上述两个过程吸热比例的调节措施。此时,锅炉烟气再循环技术可解决上述问题,但烟气再循环技术受限于运行稳定性和经济性,在国

内的普及程度较低<sup>[13]</sup>。除此之外,也可考虑在炉膛内进一步布置过热受热面(尤其是高温过热器部分),但由于炉膛内的烟气温度较高,对受热面的材质要求非常高,需重点关注。从结构角度分析,炉膛内的过热受热面膨胀与水冷壁的膨胀程度必然不一致,也需考虑受热面防拉裂失效措施。

对于现役机组而言,钢结构原设计的强度必然有限,加上寿命损耗、载荷增加(尤其是近年的环保改造)等因素,对受热面增容的限制颇多,因此,适度的温度提升改造更为稳妥。

### 3.4 投资收益问题探讨

提升参数改造技术的改造范围包括锅炉受热面改造、汽轮机通流改造和蒸汽管道改造等,投资规模较大。其中,汽轮机通流改造的节能量一般为6~10 g/(kW·h),投资收益较好,具有较强的可行性。在此基础上,锅炉受热面改造、管道改造的费用要高于通流改造的投资,节能量却仅有3.5~4.5 g/(kW·h)(如表1)。因此,即使将提升参数改造与汽轮机通流改造合并考虑,其总的投资收益比也非常低,该技术的经济性较差。

### 3.5 未来的发展预测

发达国家电力工业起步早、机组服役时间长,全球范围内煤电机组平均服役30年以上的超过24%。日本近50%的煤电机组服役年限为30~39年,25%的煤电机组服役年限超过40年。美国燃煤发电厂的平均使用年限为42年,有11%的发电厂运行年限超过60年<sup>[14]</sup>。而在我国燃煤机组构成中,300 MW等级亚临界机组的台数最多,其中服役年限在20年以内的占比达到82.8%,大部分机组在设计寿命中期水平,未达到如发达国家大批老旧机组面临提效改造或被迫退役的状态。从国外的经验来看,机组在达到设计寿命后通过适当的延寿改造,其服役年限可以大幅提升。

对于即将达到设计寿命的机组,其锅炉受热面、集箱、阀门及蒸汽管道等设备在壁厚、强度、剩余寿命等方面必然无法满足延寿后长期运行的需求。出于延寿的目的,仅需对更换设备的设计参数小幅度的调整,即可满足提升参数改造的需求。此时,计算提升参数改造项目的投资收益时,可考虑将正常延

寿部分的投资作为基准值,提升参数改造的费用作为附加投资,提升参数改造的收益作为附加投资的收益,按此原则计算附加投资与附加收益的投资收益比,则可大幅提升项目的经济可行性。如果延寿机组的发电量饱满,煤价较高,更加可行。因此,提升参数改造技术的推广应聚焦于现役机组的延寿改造项目。

从未来国家电力结构的发展趋势分析,燃煤火电机组将以保障基础电力的形式存在,仍将占据一定的比例,高效、灵活的机组更容易被保留。提升参数改造技术对于大量现役的亚临界机组而言,可有效降低机组的发、供电煤耗指标,提高其服役年限。

## 4 结 论

现役燃煤火电机组提升参数改造是近年提出的节能改造技术,并已在多台机组节能改造中实施,取得了一定的节能效果。本文对已实施的多台机组的改造案例进行了论述分析,并就改造中的关键问题进行了理论分析,结果表明:

(1) 提升参数改造技术具有一定的节能效果,但并不十分显著,跨越一代技术改造的节能量约合  $3.5 \sim 4.5 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

(2) 提升参数改造的增容潜力受限于改造范围,从技术、政策、经济等方面综合考虑,不增容或小幅增容(等燃料量改造)的可行性更佳。

(3) 提升参数改造将改变锅炉各级受热面的吸热比例,温度提升幅度越大,对应的吸热比例变化幅度也越大,须对受热面布置进行调整。当温度提升幅度较大时,需增设烟气再循环或炉膛内过热受热面的方式进行吸热比例调整。综合考虑,适度提温改造更为稳妥。

(4) 提升参数改造技术更适用于对现役机组进行延寿改造过程中的同步实施,给机组延寿提供附加的节能收益将大幅提升该技术的经济性。未来,亚临界机组提升参数延寿改造也可一定程度提高机组的服役年限。

## 参考文献:

[1] 王倩,王卫良,刘敏,等.超(超)临界燃煤发电技术发展与展望[J].热力发电,2021,50(2):1-9.

WANG Qian, WANG Wei-liang, LIU Min, et al. Development and prospect of ultra-super critical coal-fired power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 1-9.

[2] 国家发展和改革委员会,环境保护部,国家能源局.关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014~2020年)》的通知(发改能源[2014]2093号)[Z].国家发展和改革委员会,2014.

National Development and Reform Commission, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, National Energy Administration. Notification of action plan of upgrading and renovating in energy saving and emission reduction for coal fired power plant(2014~2020)([2014]2093)[Z]. National Development and Reform Commission, 2014.

[3] MARKPALKES, RICHARD E W, GREGORY N L. Economics and feasibility of Rankine cycle improvements for coal fired power plants[R]. Alstom PowerInc(US), 2004.

[4] 国家能源局综合司.《国家能源局综合司关于下达2014年煤电机组节能升级与改造示范项目的通知》(国能综电力[2014]787号)[Z].国家能源局,2014.

Synthesis Division of National Energy Administration. Notification of demonstration project in energy saving and emission reduction for coal fired power plant 2014([2014]787)[Z]. National Energy Administration, 2014.

[5] 谢大幸,石永锋,郝建刚,等.600 MW 等级亚临界机组跨代升级改造技术应用研究[J].发电技术,2015,36(6):23-26.

XIE Da-xing, SHI Yong-feng, HAO Jian-gang, et al. Application of cross-generation upgrade reconstruction technology in the 600 MW subcritical unit[J]. Power Generation Technology, 2015, 36(6): 23-26.

[6] 大唐国际托克托发电有限责任公司.大唐托克托发电公司节能减排改造提效技术路线[J].节能减排,2016,10:76-79.

Tuoketuo Power Generation Company of China Datang Corporation LTD. Technical route of energy saving and emission reduction improvement in Datang Toketuo Power Generation Company[J]. Energy Saving, 2016(10): 76-79.

[7] 范运涛,李飞.300 MW 机组中幅提温亚临界升参数节能改造探讨[J].热工技术,2016,132:40-44.

FAN Yun-tao, LI fei. Discussion on energy-saving renovating of parameters increasing for 300 MW subcritical unit[J]. Cogeneration Power Technology, 2016, 132: 40-44.

[8] 白德龙,张劲松,解冠宇,等.岱海电厂二期机组节能减排改造可行性研究[J].锅炉技术,2017,48(6):60-62.

BAI De-long, ZHANG Jin-song, XIE Guan-yu, et al. Feasibility study on energy saving and emission reduction renovating of Daihai power plant phase II unit[J]. Boiler Technology, 2017, 48(6): 60-62.