

超超临界机组水汽质量控制研究

李少杰, 谈群兴

引用本文:

李少杰, 谈群兴. 超超临界机组水汽质量控制研究[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 109-113.

LI Shaojie, TAN Qunxing. Research on Steam-Water Quality Control for Ultra-Supercritical Power Plant[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 109-113.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

阳西电厂2×1240MW机组热机设计方案研究

Research on Mechanical Design Features of 2 × 1240 MW Unit for Yangxi Power Plant

南方能源建设. 2017, 4(4): 37-41 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.008>

火力发电厂机组APS监控关键技术研究

Key Technique for APS of Thermal Power Plant Control System

南方能源建设. 2015, 2(z1): 19-25 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.S1.005>

国产DCS系统在超超临界机组可靠性应用研究

Reliability Application and Research of Domestic DCS System in Ultra-supercritical Unit

南方能源建设. 2016, 3(3): 85-90 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.03.018>

采用再热温度630℃的1000 MW新一代超超临界二次再热机组可行性研究

Feasibility Study on 1000 MW New Generation Ultra-supercritical Unit with Double Re-heating Cycles at 630 °C

南方能源建设. 2018, 5(3): 33-41 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.005>

超超临界350MW机组的可行性研究和参数选型分析

Feasibility Reascher on Ultra-supercritical 350 MW Unit and Analysis of Main Equipment Parameter

南方能源建设. 2019, 6(4): 47-53 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.007>

超超临界机组水汽质量控制研究

李少杰[✉], 谈群兴

(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] 超超临界机组是国内发电主力机组, 对水汽质量要求严格, 文章提出水汽质量控制措施以防止热力系统产生结垢和腐蚀, 保证机组安全经济运行。[方法] 为控制超超临界机组水汽质量, 应该选择恰当的除盐水生产工艺、可靠的凝结水精处理系统、采取给水加氧处理(OT)、设置合理的在线监测表计、选择合适的凝汽器管材及做好停炉保护。[结果] 以上措施可以有效防止热力系统产生结垢和腐蚀, 保证机组安全经济运行。[结论] 超超临界参数机组水汽质量可参考《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016), 并推荐按期望值进行控制。

关键词: 热力系统; 超超临界; 水汽质量; 火力发电厂

中图分类号: TM611; TM621.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)03-0109-05

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Steam-Water Quality Control for Ultra-Supercritical Power Plant

LI Shaojie[✉], TAN Qunxing

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

Abstract: [Introduction] The ultra-supercritical unit is the main power generation unit in China, which has strict requirements on water steam quality. In this paper, water steam quality control measures have been proposed to prevent scaling and corrosion of the thermal system and ensure safe and economic operation of the unit. [Method] To control the steam-water quality of ultra-supercritical units, proper demineralized water production process, reliable condensate polishing system, feedwater oxygenation treatment (OT), reasonable on-line monitoring meter, appropriate condenser pipe and shutdown protection were selected. [Result] The above measures can effectively prevent scaling and corrosion of the thermal system and ensure the safe and economic operation of the unit. [Conclusion] The steam-water quality control of ultra-supercritical parameters units can refer to the *Water Vapor Quality of Thermal Power Units and Steam Power Equipment* (GB/T 12145—2016), and it is recommended to control the Parameters according to the expected value.

Key words: thermal system; ultra-supercritical; steam-water quality; coal-fired power plant

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

我国能源结构的特点使得火力发电在我国当今乃至将来相当长的时期内都将成最重要的电力供应方式。超超临界参数机组在国内外已有多年的应用, 由于超超临界机组效率比亚临界机组提高4%~5%, 具有较强的节能和环保优势, 因此, 超超临界技术应用对我国节约能源有着重要的意义。

火力发电厂的工质是水蒸汽^[1], 其临界压力为22.12 MPa, 蒸汽压力稍低于临界压力的范围称亚

临界区, 大于临界压力的范围称超临界区。超超临界与超临界的划分界限目前尚无国际统一标准, 一般认为蒸汽压力大于25 MPa, 蒸汽温度高于580℃称为超超临界。

超超临界机组由于水工质状态超过临界点后, 水汽一相, 杂质在水工质中的溶解和沉积特性发生显著变化, 因此超超临界机组面临解决的关键技术问题之一就是更高温度、更高压力参数下的水汽品

收稿日期: 2020-09-15 修回日期: 2021-05-11

基金项目: 中国能建广东院科技项目“大容量高效超超临界发电关键技术研究及应用”(EV01041W)

质控制,以防止热力系统产生结垢和腐蚀,保证机组安全经济运行。

在临界点以上,各类杂质在蒸汽中的溶解能力显著增强,因此超临界参数机组水质控制要求高。但更高温度、更高压力下的超超临界机组工质特性只是在超临界参数基础上延续变化,不存在由亚临界参数到超临界参数那样的显著变化,因此对超超临界机组水汽质量控制认识应建立在对超临界参数机组水质控制认识基础上,许多对超临界参数机组水质控制的方法同样适合于超超临界参数机组。超超临界参数机组与超临界参数机组主要应用差别在给水和主蒸汽、再热管道材料选择要求上,特别是对材料的耐高温腐蚀性能提出更高要求^[2]。

1 超超临界机组水工况特点

1.1 热力系统水循环特性

超超临界机组采用直流炉,直流炉中给水依次流经省煤器、水冷壁、过热器等受热面,变为过热蒸汽送出锅炉。直流炉无汽包,不能进行排污以排除水中杂质,也不能进行炉水加药进行防垢、防腐处理。给水中若含有杂质,将在炉管内沉积或被带入汽轮机,在汽轮机内发生沉积和腐蚀。因而对给水、蒸汽品质有更高要求,如对给水、蒸汽的电导率和钠、硅、总铁等杂质的含量要求比亚临界汽包炉更严格。

1.2 水化学特性

超超临界工质由给水泵至过热器出口,保持单相(非水汽二相)结构,在低温时,其工质性质接近于水,在高温时,接近于蒸汽,在锅炉高低温过渡区,工质的比容和焓在温度不发生显著变化时发生剧烈变化。低温工质具有侵蚀性,能携带出大量悬浮态及溶解态物质,高温工质侵蚀性显著降低,所含悬浮固体颗粒也较少。

超超临界机组水汽系统中各种杂质溶解特性:钠化合物、硅化合物、氯离子和铁氧化物在蒸汽中的溶解度随压力的升高均呈不断升高趋势,所以对于超超临界机组应严格控制给水中各类杂质的含量。

1.3 积盐、结垢特性

由于超超临界直流炉工质的快速蒸发,由给水带入的部分铁氧化物可能沉积在水冷壁管上而影响

锅炉的传热,从而威胁机组的安全运行。

由于超超临界参数机组蒸汽密度大,蒸汽溶解杂质能力强,即杂质在蒸汽中的溶解度显著增大,盐类、硅等几乎全部被蒸汽带到汽轮机,汽机叶片结垢危险性大大增加。超超临界汽轮机通流部分结盐是影响汽轮机效率主要因素之一,与蒸汽含盐量和沉积部位有关^[3]。强酸阴离子、钠和硅化合物中的绝大部分以及部分铁氧化物会溶解于过热蒸汽中带入汽轮机,在汽轮机中做功后过热蒸汽压力和温度均会下降,导致原溶解于过热蒸汽中的杂质的溶解度下降,进而沉积在汽轮机高、低压缸的通流部分而影响汽轮机的效率。

1.4 超超临界参数蒸汽的高温氧化特性

高温水汽氧化是金属腐蚀的一种特殊形式。在高温条件下,因为氢质子的影响,水蒸汽对不锈钢材料表现为一种强氧化剂^[2]。

超超临界锅炉工质水动力特性变化会引起受热面传热特性的改变,高温受热面易发生蒸汽侧氧化腐蚀^[4]。

控制高温氧化和氧化皮剥落,应该选择适合超超临界参数的金属管材,并严格控制过热器和再热器的金属壁温不超过金属高温氧化的突变点。

为及时发现过热器和再热器高温氧化的变化情况,可以通过监测蒸汽中的氢含量的方法监测高温氧化的变化和发展。

2 超超临界机组水质控制要求

2.1 超超临界机组水汽质量控制参考标准

根据超超临界机组的特点,应尽可能地提高水汽品质,减少水汽中盐类杂质含量。为有效防止超超临界机组水汽系统的腐蚀结垢,水汽质量推荐按《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016)的期望值要求控制。

2.2 国外标准分析

日本、欧美等发达国家超超临界技术应用发展已有相当长的一段时间,但这些国家的标准并未明确区分超临界与超超临界参数,水汽质量标准均统一执行超临界参数标准。

我国及部分国家的水汽质量标准统计见表1。从表1可看出各国的给水的汽质量参数控制指标虽有所不同但并不比我国要求严,但应充分认识到

国外标准只是确保机组能安全运行的最低标准。为确保机组的高效、安全运行,我国水汽质量标准制定时,基于国内大量新建超超临界项目的运行经验,并参考主要国际标准将部分水汽质量控制指标

适当提高。因此,按《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016)进行超超临界机组水汽质量控制,且推荐按其期望值控制是安全可靠的。

表1 超临界机组的给水水质标准^[5-6]Tab. 1 Feedwater quality standards for supercritical units^[5-6]

项目	中国		美国EPRI		德国VGB		日本		俄罗斯	
	AVT	OT	AVT	OT	AVT	OT	AVT	OT	AVT	OT
pH(25℃)(无铜系统)	9.2~9.6	8.5~9.3	9.0~9.6	8.0~9.0	9.0~10	8.0~9.0	9.0~9.7	6.5~9.3	—	—
氢电导率(25℃)/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	<0.1	<0.15	<0.2	<0.15	<0.2	<0.2	<0.25	<0.2	<0.3	<0.3
溶氧/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 10	10~150	<5	30~150	<100	30~150	<7	20~200	<10	100~400
全铁/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 5	≤ 5	<10	<5	<20	<20	<10	<10	<10	<10
全铜/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 2	≤ 2	<2	—	<3	<3	<2	<2	<5	<2
联氨/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 30	—	—	—	—	—	>10	—	20~60	—
SiO ₂ /($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 10	≤ 10	—	—	<20	<20	<20	<20	<15	<15
Na ⁺ /($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 2	≤ 2	—	—	<20	<20	—	—	<5	<5
Cl ⁻ /($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	≤ 1	≤ 1	—	—	—	—	—	—	—	—

3 超超临界机组水汽质量控制措施

3.1 选择恰当的除盐水生产工艺

除盐水作为锅炉补给水源其带入的杂质是水汽系统杂质最主要来源,除盐水质量将直接影响到超超临界机组的水汽质量。因此,应重视选择除盐水生产工艺,保证除盐水出水质量达到超超临界机组的要求。

除盐水的水质建议控制值要求如下:电导率(25℃) $\leq 0.10 \mu\text{S}/\text{cm}$,二氧化硅 $\leq 10 \mu\text{g}/\text{L}$,TOC_T(总有机碳) $< 200 \mu\text{g}/\text{L}$ 。

3.2 配置可靠的凝结水精处理系统

凝结水精处理主要有去除悬浮物(包括除铁)和除盐2个功能^[7],去除悬浮物可采用精密过滤工艺,可在机组启停和正常运行过程中去除铁、铜等氧化腐蚀产物,以缩短机组启动时间,保护后续除盐设备的树脂免受污染。除盐则常采用混合离子交换器,用于连续去除凝结水中因补给水带入或凝汽器泄漏进入的二氧化硅、盐类等杂质。应保证凝结水精处理系统连续运行,进行凝结水全容量处理。

凝结水精处理系统出水水质要求如下:Na⁺ $\leq 0.1 \mu\text{g}/\text{L}$ 、Cl⁻ $\leq 0.1 \mu\text{g}/\text{L}$ 、SO₄²⁻ $\leq 0.18 \mu\text{g}/\text{L}$ 、电导率 $\leq 0.08 \mu\text{S}/\text{cm}$ ^[8]。

3.3 选用合适的给水处理方式

锅炉的给水调节是通过化学加药等手段,改善

热力系统水汽的腐蚀特性,保护过流金属材料免遭腐蚀。主要方式有:一是加入碱性物质(如氨)中和给水中的酸性物质(如二氧化碳),防止给水系统中的酸性腐蚀;二是用热力和化学的方法除去给水中的氧气,防止氧腐蚀。三是用加氧的方法,改变金属表面的物理化学性质,使其处于耐蚀的钝化状态^[1]。对于超超临界机组,给水推荐采用加氧处理(OT)^[9]。在给水氢电导率(25℃) $\geq 0.15 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、无法实行加氧处理时,可采用只加氨的氧化性全挥发处理即AVT(O)。与AVT(O)工况相比,给水OT工况下,给水pH控制较低,相应的给水加氨量大幅减少,凝结水精处理混床的运行周期大大延长,可有效缓解AVT工况下凝结水精处理混床氢型运行周期过短的问题^[10]。

3.4 配置合理的水汽在线监测仪表

对于超超临界机组,在线化学仪表测量不准确会严重影响化学监督与控制的准确判断,不能及时发现水汽品质超标问题,长期积累将导致腐蚀、结垢、积盐和爆管等事故,对机组安全、经济运行带来巨大风险及危害^[11]。配置合理的水质在线监测仪表可以及时发现水汽品质的变化,并根据仪表的信号采取相应的措施,如调整化学加药量等,改善热力系统水汽品质。根据《发电厂化学设计规范》(DL 5068—2014),超超临界机组水汽取样点及在

线仪表建议按表2配置。

表2 直流炉机组水汽取样点及在线仪表配置^[12]

Tab. 2 Water and steam sampling points and on-line instruments configuration of once-through boiler unit^[12]

取样点名称	配置在线仪表
凝结水泵出口	CC O ₂ Na
除氧器入口	SC O ₂
除氧器出口	O ₂
省煤器入口	CC SC pH O ₂ SiO ₂
主蒸汽	CC Na SiO ₂
再热蒸汽	CC
启动分离器汽侧出口	CC
高压加热器	CC
暖风器	CC
热网加热器	CC
发电机内冷却水	SC pH
闭式循环冷却水	SC pH
间接空冷机组循环冷却水	SC pH

注：CC—带有H离子交换柱的电导率表；O₂—溶氧表；pH—pH表；Na—钠度计；SC—电导率表；SiO₂—硅表（可选多通道仪表）。

3.5 选择合适的凝汽器管材

因凝汽器泄漏使机组被迫降负荷或停机的事故时有发生，为提高机组运行的安全性和经济性，选择耐蚀性能优良的凝汽器管材是超超临界机组水汽质量控制的关键措施之一。对于冷却水为地表水的发电机组，由于使用不锈钢管材的凝汽器在性能上比使用铜管的凝汽器具有明显的优势——强度高，抗冲击、抗腐蚀能力强，胀管泄漏率低等特点，建议火力发电厂优先选用不锈钢管作为凝汽器冷却水管^[13]。对于冷却水为海水的发电机组，应采用全钛凝汽器。

根据《发电厂凝汽器及辅机冷却器管选材导则》(DL/T 712—2010)，对不同的循环水水质建议按表3选择凝汽器管材。

表3 常用不锈钢凝汽器管材适用水质标准^[14]

Tab. 3 Water quality standards for commonly used stainless steel condenser tubes^[14]

Cl ⁻ /(μg·L ⁻¹)	材料
<200	S30408/S30403
<1 000	S31608/S31603
<5 000	S31708/S31703
海水	钛

3.6 做好停炉保护

机组运行一定时间后，需定期进行检修维护。热力设备停运检修或备用期间，不可避免地会接触到大气中的氧气、二氧化碳、水等对热力设备造成腐蚀的介质。热力设备停运检修期间做好防护措施，可以有效避免水汽系统的金属材料遭受腐蚀，进而避免影响传热效率和系统安全。因此，在每次停炉后对锅炉水汽系统进行保护是很有必要的^[15]。不同的电厂可根据实际情况选择十八胺、氨水钝化烘干、真空干燥等停炉保护措施。

4 结 论

选择恰当的除盐水生产工艺、配置可靠的凝结水精处理系统、采取给水加氧处理(OT)、设置合理的在线监测表计、选择合适的凝汽器管材、做好停炉保护、按《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》(GB/T 12145—2016)的期望值进行水汽质量控制等措施可以有效防止热力系统产生结垢和腐蚀，保证机组安全经济运行。

水汽质量的控制是推动超超临界机组发展的重要保证，已有机组的运行经验还需不断进行总结，以更好地促进超超临界机组技术的进一步发展。

参考文献：

- [1] 李培元. 火力发电厂水处理及水质控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
LI P Y. Water treatment and water quality control in thermal power plants [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 樊泉桂. 亚临界与超临界参数锅炉 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
FAN Q G. Subcritical and supercritical parameter boilers [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [3] 靖东平. 基于化学监督的超(超)临界机组关键控制节能指标分析及建议 [J]. 能源科技, 2020, 18(2): 92-95.
JING D P. Analysis and suggestions on key control energy-saving indexes of ultra (super-)critical units based on chemical supervision [J]. Energy Science and Technology, 2020, 18 (2): 92-95.
- [4] 王学礼. 1 000 MW 超超临界锅炉过热器爆管原因分析及防范措施 [J]. 华电技术, 2019, 41(7): 70-72+76.
WANG X L. Reasons analysis and preventive measures of superheater tube explosion of 1000 MW ultra-supercritical boiler [J]. Huadian Technology, 2019, 41 (7): 70-72+76.
- [5] 中国国家标准化管理委员会. 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量: GB/T 12145—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社,

2016.
China National Standardization Administration Committee. Quality criterion of water and steam for power plant and steam-generating equipment: GB/T 12145—2016 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2016.
- [6] VGB Power Tech e. V. Feed water, boiler water and steam quality for power plant/industrial plant: VGB-S-010-T-00 [S]. Essen: VGB Power Tech Service GmbH, 2012.
- [7] 张富礼,谢静祥. 凝结水精处理系统的合理选择[J]. 中国电力,2001(11):17-19.
ZHANG F L, XIE J X. Reasonable choice of condensate polishing system [J]. China Electric Power, 2001 (11): 17-19.
- [8] 韩隶传,李志刚. 凝结水精处理混床机理和应用研究[J]. 中国电力,2007,40(12):90-93.
HAN L C, LI Z G. Research on the mechanism and application of condensate polishing mixed bed [J]. China Electric Power, 2007, 40 (12): 90-93.
- [9] 肖建群,李元. 超临界机组给水加氧处理技术探讨[J]. 南方能源建设,2019,6(增刊1):10-15.
XIAO J Q, LI Y. Discussion on oxygenated treatment technology for supercritical unit feed water [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6 (Supp. 1): 10-15.
- [10] 游喆,陆培平,黄兴德,等. 凝结水精处理运行控制方式探讨[J]. 净水技术,2009,28(6):21-25.
YOU Z, LU P P, HUANG X D, et al. Discussion on the control mode of condensate polishing operation [J]. Water Purification Technology, 2009, 28 (6): 21-25.
- [11] 苏尧. 超超临界机组在线化学仪表测量现状分析及讨论[J]. 热力发电,2020,49(12):158-163.
SU Y. Analysis and discussion on the status quo of on-line chemical instrument measurement for ultra-supercritical units [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49 (12): 158-163.
- [12] 国家能源局. 发电厂化学设计规范:DL 5068—2014 [S]. 北京:中国计划出版社,2014.
National Energy Administration. Code for design of chemistry of power plant: DL 5068—2014 [S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2014.
- [13] 雷耀武,苏延安. 凝汽器冷却水管材选用的探讨[J]. 西北电力技术,2005(4):53-54.
LEI Y W, SU Y A. Discussion on material selection of condenser cooling water pipe [J]. Northwest China Electric Power Technology, 2005 (4): 53-54.
- [14] 国家能源局. 发电厂凝汽器及辅机冷却器管选材导则:DL/T 712—2010 [S]. 北京:中国电力出版社,2011.
National Energy Administration. Guideline for the selection of condenser and auxiliary cooler tube materials in power plant: DL/T 712—2010 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [15] 高默劼,孙磊. 停炉保护在新建1000 MW超超临界机组中的应用[J]. 电力建设,2010,31(3):96-98.
GAO M J, SUN L. Application of shutdown protection in new 1000 MW USC units [J]. Electric Power Construction, 2010, 31 (3): 96-98.

作者简介:



李少杰

李少杰(通信作者)

1982-, 男, 河北承德人, 高级工程师, 武汉大学应用化学专业, 工学硕士, 主要从事化学水处理方面的设计研究工作 (e-mail) lishaojie@gedi.com.cn。

谈群兴

1980-, 男, 广东开平人, 工程师, 广东工业大学环境工程专业, 学士, 主要从事电厂化学水处理研究及设计工作 (e-mail) tanqunxing@gedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 “大容量高效超超临界发电关键技术研究及应用”(EV01041W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 随着国内电力行业对节能减排要求的提高,对系统进行总体优化的要求也随之逐步提高。本项目围绕系统集成优化,以提高电厂总体效益以及节能降耗为目标,瞄准技术发展方向,对系统拟定、设备选型、提高运行效率等方面进行重点研究。

主要创新点 (1)以系统整体优化为目标,通过深入的理论研究,解决部分性能计算分析依赖厂家的现状;(2)设计方案独立自主优化,促进设备研发;(3)研究水汽质量控制措施,保障热力系统运行稳定;(4)优化辅机配置方案,节能降耗。

(责任编辑 李辉)