

进口锅炉三级过热器整体国产化改造探讨

李文华, 陈培淋, 程国辉, 柯安鹏, 张富荣

引用本文:

李文华, 陈培淋, 程国辉, 柯安鹏, 张富荣. 进口锅炉三级过热器整体国产化改造探讨[J]. 南方能源建设, 2022, 9(增刊1): 63-68.

LI Wenhua, CHEN Peilin, CHENG Guohui, KE Anpeng, ZHANG Furong. Discussion on the Modification by China-Manufacturer of Imported Boiler Tertiary Superheater[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(增刊1): 63-68.

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)

关于推进核电焊接领域国产化、智能化的探索

Exploration on Promoting the Localization and Intelligent Development of Welding in Nuclear Industry

南方能源建设. 2020, 7(4): 93-97 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.014>

核电站反应堆堆芯温度测量K型热电偶的国产化研制

Localization of Type K Thermocouples of In-core Temperature Measurement for Nuclear Power Plant Reactor

南方能源建设. 2017, 4(2): 132-136 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.024>

700MW机组旁路控制系统冗余控制研究与应用

Research and Application of By-pass Control System for 700 MW Unit

南方能源建设. 2019, 6(4): 54-58 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.008>

三代非能动核电项目SA-508国产大锻件性能不符合项探讨

Research on NCRs of Domestic-Made SA-508 Heavy Forgings for the Third Generation Passive Nuclear Power Plant

南方能源建设. 2017, 4(3): 119-126 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.022>

蛇形管高压加热器用于1000MW二次再热机组的可行性分析

Feasibility Analysis on the Application of High Pressure Serpentine Heater in 1 000 MW Coal-fired Power Plant with Double Re-heating Cycles

南方能源建设. 2017, 4(1): 44-48 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.007>

进口锅炉三级过热器整体国产化改造探讨

李文华[✉], 陈培淋, 程国辉, 柯安鹏, 张富荣
(广东省能源集团有限公司珠海发电厂, 广东 珠海 519060)

摘要: [目的] 珠海电厂由日本三菱重工设计制造的700 MW进口锅炉三级过热器长期服役后近年爆管频发, 爆管类型均为典型长期过热导致的失效, 金相组织球化严重, 力学性能普遍下降, 表明炉管处于长期较高温度运行状态, 需查明长期过热原因并提出解决方案。[方法] 为查明三级过热器频繁爆管原因, 对三级过热器受热面管屏不同材质管段氧化皮厚度情况进行了测试分析并计算其蠕变剩余寿命, 对三级过热器各管屏之间的流量偏差情况进行了计算和沿炉膛宽度方向上的吸热偏差情况进行了统计分析。[结果] 发现T91材质有59%的管段剩余寿命不足 5×10^4 h, 39%的管段剩余寿命不足 1×10^4 h; T23材质有25%的管段剩余寿命不足 5×10^4 h, 9%的管段剩余寿命不足 1×10^4 h, 三级过热器管材普遍机械性能劣化严重。三级过热器各管屏之间的流量偏差达到10.6%, 沿宽度方向上的吸热偏差达到 60°C , 已无法通过更换新管段解决问题, 需进行整体设计改造。[结论] 根据上述研究结果实施了国产化改造方案, 改造重点在降低热偏差, 通过增大进出口集箱直径, 减小了集箱中的工质流速和沿集箱轴向的静压不均匀性, 进而减小集箱效应产生的流量偏差, 使集箱流量偏差减小到2.24%; 流量偏差的减小降低了沿炉膛宽度方向上管屏的壁温偏差, 偏差减小到 40°C 。此外充分考虑三级过热器所处辐射和对流换热环境, 对受热面材质进行了提升强度等级改造, 材质由5种减少到4种, 规格由23种减少到12种, 减少了采购和维护成本。

关键词: 进口锅炉; 蠕变寿命; 流量偏差; 热量偏差; 国产化

中图分类号: TM611; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)S1-0063-06

开放科学(资源服务)二维码:



Discussion on the Modification by China-Manufacturer of Imported Boiler Tertiary Superheater

LI Wenhua[✉], CHEN Peilin, CHENG Guohui, KE Anpeng, ZHANG Furong
(Zhuhai Power Station of Guangdong Energy Group Co., Ltd., Zhuhai 519060, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] The imported boiler tertiary superheater of Zhuhai power station which was designed and manufactured by Mitsubishi Heavy Industries has occurred tube failures frequently in recent years, the types were typical long-term overheating failures, the metallographic spheroidization were occurred and mechanical properties were declined, indicating that the furnace tube was in a long-term high temperature operation state. [Method] To find out the reasons of long-term overheating and to propose solutions, the thickness of oxide of tertiary superheater tubes was tested, the flow deviation and heat absorption deviation of tertiary superheater were studied. [Result] The residual creep life of 59% T91 tubes were less than fifty thousand hours, 39% T91 tubes were less than ten thousand hours, the residual creep life of 25% T23 tubes were less than fifty thousand hours, 9% T23 tubes were less than ten thousands hours. The flow deviation of the superheater header was 10.6%, the heat deviation of the tubes temperature in the width direction was 60°C . The problem couldn't be solved by replacing the new pipe section, the overall design Modification was required. [Conclusion] According to the above researches, the modification design by China-manufacturer was proposed. After the modification the flow deviation of the superheater header was reduced to 2.24% and the heat deviation of the tubes temperature in the width direction was reduced to 40°C . In addition, considering the working environment of the tertiary superheater, properties of the tube materials had been upgraded, the types of the material were reduced from 5 to 4, and the specification were reduced from 23 to 12.

收稿日期: 2022-02-15 修回日期: 2022-03-08

基金项目: 广东省能源集团有限公司科技项目“700 MW进口锅炉三级过热器国产化研究与应用”(ZHP-PJ-190018)

12, the procurement and maintenance costs were reduced.

Key words: imported boiler; creep life; flow deviation; thermal deviation; modification by China-manufacturer

2095-8676 © 2022 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/>).

珠海电厂1号锅炉是由日本三菱重工业有限公司设计并制造的亚临界、强制循环、一次中间再热的室燃煤粉炉，其燃烧方式为四角切圆，已运行超过二十年。1号锅炉三级过热器材质有T12、T22、T23、T91及TP347HFG五种，近几年1号锅炉三级过热器爆管较为频繁，三级过热器爆管主要集中在管屏水平段、出口段，爆管类型为长时过热，即超温幅度较高的蠕变爆管。锅炉耐热钢长期在高温运行时不可避免地出现高温氧化问题，目前国内外对火电厂受热面管的高温氧化行为有较多研究，对氧化皮形成机制、动力学均有清晰理论^[1-3]，对其寿命评估也有成熟方法^[4-5]。

四角切圆燃烧锅炉虽然具有流动混合性能好、燃烧稳定以及煤种适应性好等优点，但烟气在炉膛内螺旋上升导致在出口处存在残余旋转，残余旋转会使得炉膛宽度方向上出现吸热不均匀，处在炉膛出口处的三级过热器会出现宽度方向上的热偏差，随着机组负荷的增加，热量偏差程度将会加剧^[6]。对于四角切圆燃烧锅炉，高温烟气进入水平烟道后，右侧区域烟气流速大于左侧区域烟气流速，右侧烟温将会高于左侧^[7]，所以为防止高温受热面发生超温爆管等问题，在其设计阶段应对结构设计、材质选型等在沿炉膛宽度方向左、右侧温差情况予以考虑^[8]。

此外受热面结焦或积灰、火焰在炉内充满程度或火焰中心偏斜等现象都可能造成吸热不均。引起热偏差的主要因素除了吸热不均，还有流量不均，造成流量不均的一个重要因素是“集箱效应”：集箱内工质的流动情况对流量分配有很大的影响，会导致集箱内部混合分配能力不足、传热不稳定、应力分布不均匀，更严重的会导致受热面爆管频发^[9-12]。Kreid等研究了集箱三通涡流区对流量分配的影响^[13-14]，曲新鹤等对集箱内的压力变化进行研究，提出了优化流量分配的方法^[15]。

本文针对进口锅炉超过二十年服役过程中出现的问题进行分析，讨论了吸热不均和流量不均对三级过热器热偏差的影响，并提出合理化国产改造方

案，对同厂其他受热面和其他国内类似进口锅炉的国产化改造具有重大借鉴意义。

1 改造前情况

1.1 材质性能劣化情况

珠海电厂1号锅炉三级过热器是半辐射式过热器，已运行超过 13×10^4 h，整体热负荷偏高，烟温高，爆管易出现的位置主要集中在管屏水平段和靠近顶棚（靠近出口集箱）位置处。在水平段接触烟气温度最高，热流密度大，管壁容易出现超温；出口位置处工质温度最高，同样容易产生壁温过高的问题。近几年还参与深度调峰，三级过热器管屏运行过程中易出现短时超温运行，最高可达 $620\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2018年4月，对1号炉三级过热器受热面材质为T22、T23和T91的管子进行了内壁氧化层厚度现场检测，三级过热器有大量管段氧化皮厚度超过0.5 mm，详见表1。

表1 三级过热器T22、T23、T91材质氧化层厚度分布统计(根数)

Tab. 1 Distribution statistics of oxide thickness of T22、T23、T91 tubes

测点 材质	氧化层厚度分布统计(根数/占比)			
	0.1~0.4 mm	0.4~0.5 mm	0.5~0.6 mm	≥0.6 mm
T91	330/53.7%	157/25.6%	99/16.1%	29/4.6%
T23	299/60.7%	124/25.2%	61/12.4%	8/1.7%
T22	516/78.6%	115/17.5%	20/3.0%	5/0.9%

应用拉森-米勒公式及力发电厂蒸汽管道寿命评估技术导则对上述三种材质进行蠕变剩余寿命评估^[5]，评估结果表明：三级过热器出口段管子有大量管段蠕变剩余寿命不足 5×10^4 h，其中部分管段已不足 1×10^4 h，见表2。

上述结果表明三级过热器管屏中的部分管段T22、T23、T91材质经长期运行性能劣化较严重，蠕变剩余寿命远小于其他管段，原始设计选材不合理，对于采用四角切圆燃烧方式的锅炉，残余旋转引起的沿炉膛宽度方向热负荷分布不均匀性，易引

表2 三级过热器 T22、T23、T91 材质不同寿命区间比例分布

Tab. 2 Distribution statistics of residual creep life of T22、T23、T91 tubes

测点材质	剩余蠕变寿命统计(占比)/%			
	$\leq 1 \times 10^4$ h	$(1 \sim 3) \times 10^4$ h	$(3 \sim 5) \times 10^4$ h	$\geq 5 \times 10^4$ h
T91	39	10	10	41
T23	9	8	8	75
T22	0	0.3	0.4	99.3

发超温爆管,需对三级过热器受热面进行整体改造,对受热面材质选型和材质种类优化配置。

1.2 流量偏差

由于分配集箱和汇集集箱中工质的静压沿集箱轴向不断变化,当并联管与两个集箱连接后,各管进、出口的压差也随之变化,各管的流动动力不相同,从而影响各并联管的流量分配。造成流量偏差的一个重要因素是集箱效应,主要体现在集箱的引入方式和集箱尺寸上。本文主要对集箱效应引起的流量偏差进行计算,评估集箱对流量偏差的改善效果。

本文采用上海锅炉厂内部联箱设计的计算方法,首先分别引入参数:稳定性因子 S 、射流因子 F ,最后引入流量偏差 U 。

$$S = 1.85 \left[\frac{v_o}{v_i} + 1 \right] / \left[\frac{v_o}{v_i} + 3 \right] \quad (1)$$

$$F = 0.748 \left(\frac{D_o}{D_i} \right)^{0.3} C^{-0.15} \quad (2)$$

式中:

D_o ——出口集箱内径 (inch);

D_i ——出口集箱管接头内径 (inch);

v_i ——进口集箱蒸汽比容 (ft^3/lb);

v_o ——出口集箱蒸汽比容 (ft^3/lb);

C ——集箱周向管子根数,值为8。

流量偏差由下式计算得到:

$$U = 18S \frac{VH_i}{\Delta P} \left[2.3F \frac{VH_o}{VH_i} - 1 \right] \quad (3)$$

式中:

ΔP ——过热器阻力 (psi);

VH_i ——进口集箱蒸汽动压 (psi);

VH_o ——出口集箱蒸汽动压 (psi)。

三菱锅炉三级过热器集箱流量偏差计算结果如

表3所示,流量偏差达到10.09%,并联管之间流量偏差较大。

表3 集箱改造前、后流量偏差对比

Tab. 3 Flow deviation of the header before and after the modification

项目	符号	改造前	改造后	单位
进口蒸汽比容	v_i	0.236 37	0.235 80	ft^3/lb
出口蒸汽比容	v_o	0.290 53	0.290 53	ft^3/lb
出口集箱内径	D_o	11.102	14.882	inch
出口集箱管接头内径	D_i	1.126	0.984	inch
管子周向排数	C	8	8	—
射流因子	F	1.088	1.237	—
进口集箱蒸汽动压	VH_i	9.87	4.34	psi
出口集箱蒸汽动压	VH_o	8.54	2.65	psi
三级过热器阻力	ΔP	20	25	psi
流量偏差	U	10.09	2.24	%

1.3 热量偏差

沿炉膛宽度热负荷分布不均匀性是产生热偏差的主要原因之一,锅炉烟气的温度场和速度场以及燃烧产物浓度场分布不均匀是形成热力不均匀的主要原因。受火焰中心位置的影响,沿宽度的热力不均匀可达30%~40%。一般来说,位于炉膛出口的受热面沿宽度的热力不均匀可达20%~30%,烟温偏差可达200~300℃,过热器个别管圈的汽温偏差可达50~100℃。如果火焰形状和充满度不好,火焰中心偏斜,局部地区发生煤粉再燃烧,部分燃烧器停运或各个燃烧器负荷不一致,以及部分受热面上结渣等也会导致严重的热量不均匀。若炉膛出口烟气存在残余旋转,同样会引起沿宽度方向两侧热负荷差别很大。

珠海电厂锅炉设计燃烧煤种为易结焦煤种,为适应此煤种珠海电厂锅炉炉膛截面积比其他相同容量机组的大;但实际燃烧煤种灰分少,不易结焦,导致水冷壁吸热增加、高温受热面吸热则减少,三级过热器出口温度达不到设计值,锅炉经济性下降,为提高过热器出口温度,需将燃烧器摆角上调,进一步加大了炉膛出口烟气旋转力度,沿宽度方向两侧热负荷差别变大。

珠海电厂锅炉燃烧煤种与设计煤种不一致导致三级过热器管屏两侧壁温高中间管屏壁温低,最大温差达到90℃;为降低沿宽度方向的热量偏差,厂家通过在中间管屏加装节流孔(孔径12.4~15.2 mm)

限制流量,使两侧流量增加,两侧管屏壁温与中间管屏壁温温差有所降低(下降约 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$),但最大温差仍达到 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$,见图1。

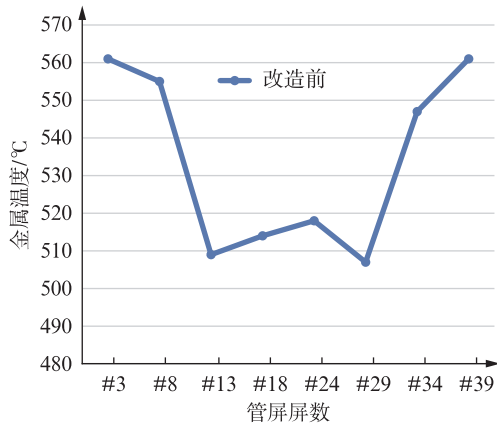


图1 三级过热器管屏平均金属温度分布曲线图

Fig. 1 The average metal temperature distribution curve of the tertiary superheater tubes

2 改造方案

珠海电厂1号锅炉三级过热器的流量偏差较大(10.6%),流量偏差大就会使不同屏之间的壁温差异变大,在满足出口蒸汽温度的要求时,某些管屏出现超温,导致爆管频繁。鉴于以上结果,改造的主要措施:降低流量偏差和适当提高受热面的材料等级。受热面管组的总阻力值受限于蒸汽流量及总并联管数,且并联管数量直接影响受热面面积,影响过热蒸汽温度,涉及整体热力性能及参数要求,如果减少并联管数量来提高管内工质流速,相当于减少了三级过热器的受热面面积,势必需通过增加其它受热面来解决汽温问题,改造范围更大。因此,基于锅炉整体热力性能参数保持不变的原则,优化进、出口集箱的尺寸和适当提高受热面的材料等级,不对管屏数量、管屏高度、管子根数进行更改,是本次改造的基本原则。在充分考虑三级受热面所处工作环境的基础上,为提高其内表面的抗氧化特性和许用应力,拟对三级受热面部分管段进行材料升级。本改造方案中,三级受热面的材料由5种(T12、T22、T23、T91、TP347HFG)减少到4种(12Cr1MoVG、T91、TP347HFG和SUPER304H),且提升优化材料的整体抗高温力学性能,并根据《锅炉强度计算标准应用手册》(增订版本)对上述4种材料进行强度校核以确定三级过

热器不同部位的材料种类、管子外径和管壁厚度。如图2所示。

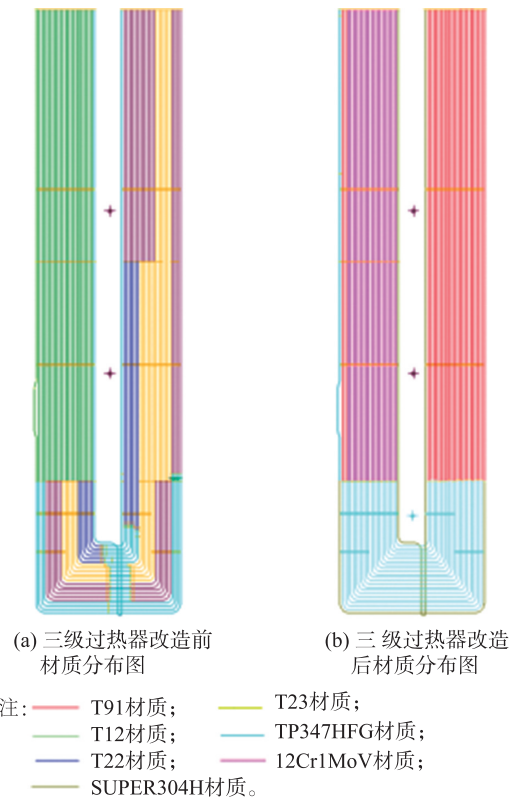


图2 三级过热器改造前后管屏材质图

Fig. 2 Tube materials of the tertiary superheater before and after the modification

珠海电厂1号锅炉三级过热器采用大三通结构的引入引出方式,如图3所示。采用该引入引出方式,过热蒸汽在集箱中的流速相对较低,集箱内流体静压变化以及由此引起的各片屏的流量偏差减小。在此基础上,为了进一步减小集箱效应导致的流量偏差,对进、出口集箱的尺寸进行优化,具体

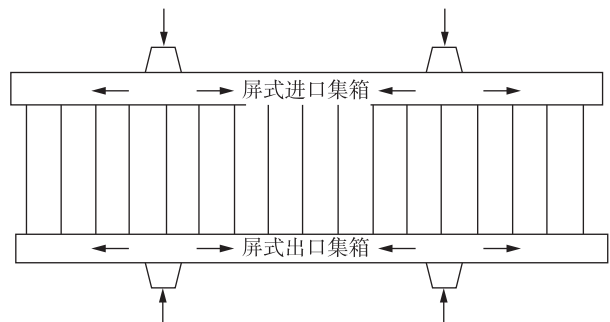


图3 三级过热器引入引出方式示意图

Fig. 3 Geometry model of the tertiary superheater

措施为: 增大进、出口集箱直径。采用该方法, 集箱中的工质流速进一步降低, 沿集箱轴向的静压不均匀性减小, 从而使得进入各片屏的流量接近一致, 实现减小流量偏差的目的, 优化后集箱尺寸和优化前集箱尺寸如表4所示。

表4 集箱优化前后尺寸

Tab. 4 Header sizes before and after the modification

项目	外径×壁厚	内径	
优化前进口集箱	规格 $\phi 368.3 \times 55$	258.3 mm	10.169 inch
优化前出口集箱	规格 $\phi 381 \times 49.5$	282 mm	11.102 inch
优化后进口集箱	规格 $\phi 457 \times 70$	317 mm	12.480 inch
优化后出口集箱	规格 $\phi 508 \times 65$	378 mm	14.882 inch

3 改造后情况

3.1 流量偏差

三级过热器改造后集箱流量偏差计算结果如表4所示, 通过增大进、出口集箱尺寸, 流量偏差由10.60%减小到2.24%, 这对于减小受热面的热偏差具有非常重要的意义。尺寸较大的分配联箱和汇流联箱截面增强了流动的均匀性, 减小了集箱中的工质流速, 减小了沿集箱轴向的静压不均匀性, 进而减小集箱效应产生的流量偏差, 从而使得进入各片屏的流量接近一致, 管屏局部超温情况得到改善。

3.2 热量偏差

因集箱效应导致的流量偏差大幅度减小, 进入各屏的流量接近一致, 改造后三级过热器沿炉膛宽度方向上管屏两侧和中间壁温偏差值降低, 最大偏差约40℃, 局部超温现象大大减少, 如图4所示。

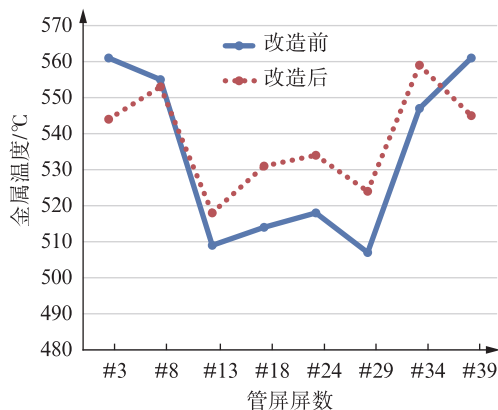


图4 三级过热器管屏平均金属温度分布曲线图

Fig. 4 The average metal temperature distribution curve of the tertiary superheater tubes before and after the modification

4 结论

珠海发电厂1号锅炉三级过热器爆管频发, 流量偏差大, 部分管材寿命不足, 经国产化改造后各项指标得到大幅度改善。

1) 增大了进、出口集箱尺寸, 减小了集箱中的工质流速及沿集箱轴向的静压不均匀性, 进而减小集箱效应产生的流量偏差, 流量偏差由原来的10.60%减小到2.24%。

2) 重新选用优质受热面材质, 本改造方案使用的主要材料种类由5种减少到4种, 规格由23种减少到12种, 减少了采购和维护成本。

3) 三级过热器受热面爆管频发, 主要是与受热面工质流量偏差大、受热面材料等级偏低和服役年限长等因素导致。

4) 珠海电厂1号锅炉三级过热器国产化改造后, 沿炉膛宽度方向上仍有一定的热量偏差, 要特别注意炉内燃烧状况, 改善炉膛出口烟气偏差, 减轻残余旋转。建议后续对锅炉进行燃烧调整试验, 改善炉内空气动力场, 减轻偏烧现象, 改善炉膛出口两侧烟温偏差。

参考文献:

- [1] 王志武. 四种耐热钢高温高压水蒸汽氧化研究 [D]. 湖北: 武汉大学, 2006.
WANG Z W. Study on the oxidation behavior of four heat-resistant steels in high temperature and high pressure water [D]. Hubei: Wuhan University, 2006.
- [2] 美国腐蚀工程师协会. 腐蚀与防护技术基础 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
American Society of Corrosion Engineers. Fundamentals of corrosion and protection technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987.
- [3] RAKOWSKI J M. The oxidation of metal alloy foils in the presence of water vapor [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power: Transactions of the ASME, 2004, 126(4): 867-873. DOI: 10.1115/1.1787508.
- [4] 中华人民共和国国家能源局. 火电机组寿命评估技术导则: DL/T 654—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. The technical guide for the life assessment of units in fossil-fuel power plant: DL/T 654—2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 火力发电厂蒸汽管道寿命评估技术导则: DL/T 940—2005 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
National Development and Reform Commission. The technical

- guide for the life assessment of steam pipe in fossil-fuel power plant: DL/T 940—2005 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [6] 朱珍锦, 张长鲁, 李亮, 等. 残余旋转对烟道气流速度偏差特性的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(3): 282-287. DOI: 10.3321/j. issn: 1006-8740. 2001. 03. 018.
ZHU Z J, ZHANG C L, LI L, et al. Experimental studies of air-flow velocity deviation characteristics at flue gas duct effected by residual rotation at outlet [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(3): 282-287. DOI: 10.3321/j. issn: 1006-8740. 2001. 03. 018.
- [7] 吴伟, 王恩禄, 诸育枫, 等. 煤粉切圆燃烧Π型布置锅炉屏式过热器热力不均匀分析与优化布置 [J]. 锅炉技术, 2020, 51(1):1-5. DOI:10.3969/j. issn. 1672-4763. 2020. 01. 001.
WU W, WANG E L, CHU Y F, et al. Thermal deviation analysis and layout optimization of screen type super-heater of tangential combustion pulverized coal boiler with type Π arrangement [J]. Boiler Technology, 2020, 51(1): 1-5. DOI:10.3969/j. issn. 1672-4763. 2020. 01. 001.
- [8] 李晗, 范卫东, 刘亚成. 大型电站锅炉再热器热偏差热力计算分析 [J]. 锅炉技术, 2017, 48(2): 10-15+65. DOI:10.3969/j. issn. 1672-4763. 2017. 02. 003.
LI H, FAN W D, LIU Y C. Thermal calculation analysis of thermal deviation of reheater in large capacity utility boiler [J]. Boiler Technology, 2017, 48(2): 10-15+65. DOI:10.3969/j. issn. 1672-4763. 2017. 02. 003.
- [9] 赵浩儒, 杨帆, 刘超, 等. 立式轴流泵装置流道内部流动特性及消涡试验 [J]. 流体机械, 2016, 44(3): 1-5. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-0329. 2016. 03. 001.
ZHAO H R, YANG F, LIU C. Analysis on the vortex flows and vortex suppression schemes of cube-type inlet passage for pumping system [J]. Fluid Machinery, 2016, 44(3): 1-5. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-0329. 2016. 03. 001.
- [10] 王亚男, 夏邁, 鹿世化. 微通道平板换热器内流体分配不均的研究进展 [J]. 流体机械, 2015(9): 83-87. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-0329. 2015. 09. 017.
WANG Y N, XIA M, LU S H. Research progress of maldistribution in microchannel plate heat exchanger [J]. Fluid Machinery, 2015(9): 83-87. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-0329. 2015. 09. 017.
- [11] 俞谷颖, 张富祥, 陈端雨. 超(超)临界压力锅炉垂直管屏水冷壁水动力与热偏差调整建议 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(9): 658-662.
YU G Y, ZHANG F X, CHEN D Y, et al. Suggestion on adjustment of hydrodynamic and thermal deviation of ultra-supercritical pressure boiler waterwall with vertical tube panel [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(9): 654-662.
- [12] 杨红权, 李富春, 张妮乐, 等. 超临界锅炉屏区受热面高度方向吸热不均匀性的数值研究 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(12): 895-898.
YANG H Q, LI F C, ZHANG N L, et al. Numerical simulation on the heat deviation of heating surface height direction of screen area in supercritical pressure boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(12): 895-898.
- [13] KREID D K, CHUNG C J, CROWE C T. Measurements of the flow of water in a "T" junction by the LDV technique [J]. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42(2): 498-499. DOI: 10.1016/0022-1694(73)90065-6.
- [14] 刘进, 刘平元, 陈朝松. 电站锅炉三通集箱系统流量分配的数值模拟 [J]. 动力工程, 2009, 29(6): 528-533. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6761. 2009. 06. 005.
LIU J, LIU P Y, CHEN C S. Numerical simulation on flow distribution in tee-junction header system of utility boilers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2009, 29(6): 528-533. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6761. 2009. 06. 005.
- [15] 曲新鹤, 孙中宁, 丁铭. 联箱匹配对U型布置并联管组换热器流量分配影响研究 [J]. 原子能科学技术, 2015(4): 623-628. DOI: 10.7538/yzk. 2015. 49. 04. 0623.
QU X H, SUN Z N, DING M. Study on effect of header match on flow distribution in u-type arrangement parallel manifold of heat exchanger [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015(4): 623-628. DOI: 10.7538/yzk. 2015. 49. 04. 0623.

作者简介:



李文华

李文华 (通信作者)

1987-, 男, 广东珠海人, 工程师, 华中科技大学硕士, 主要从事电站金属技术管理工作 (e-mail) liwenhua543@163.com。

(责任编辑 李辉)