

基于材质安全的超临界锅炉深度调峰适应性评定研究

龙会国, 景雪潮, 谢阿萌

(国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410208)

摘要: 本文针对超临界锅炉在深度调峰过程中的材质安全问题, 采用滑压运行方式, 在180 MW至600 MW工况范围内, 对某600 MW超临界锅炉不同负荷工况下深度调峰的受热面管壁温脉动特性进行了实验研究。根据实验数据分析了负荷工况与壁温脉动的影响关系。结果表明: 随着调峰负荷从600 MW降低至180 MW, 整体受热面管内工质流量及压力逐渐降低, 受热面管壁温脉动周期及脉动振幅率逐渐增大。当负荷降至临界负荷197.13 MW (即30%最大连续出力) 时, 受热面管壁温脉动周期及脉动振幅率显著增加, 出现受热面管脉动性超温。前包墙过热器作为首先出现脉动性超温的部件, 被确定为影响深度调峰材质安全的关键部件。本研究为超临界锅炉深度调峰适应性评定提供了实验依据。

关键词: 深度调峰; 低负荷运行; 流动不稳定性; 壁温脉动; 脉动振幅率

中图分类号: TM621.2

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.12.010

[引用本文格式] 龙会国, 景雪潮, 谢阿萌. 基于材质安全的超临界锅炉深度调峰适应性评定研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(12): 88-94. LONG Huiguo, JING Xuechao, XIE Ameng. Research on adaptability evaluation of deep peak shaving of supercritical boilers based on material safety[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 88-94.

Research on Adaptability Evaluation of Deep Peak Shaving of Supercritical Boilers based on Material Safety

LONG Huiguo, JING Xuechao, XIE Ameng

(State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha, China, Post Code: 410208)

Abstract: This paper addressed the material safety issue of supercritical boilers during deep peak shaving processes. Using a sliding pressure operation mode, an experimental study was conducted on the wall temperature oscillation characteristics of the heating surface tube walls of a 600 MW supercritical boiler within the operating range of 180 MW to 600 MW. The relationship between load condition and wall temperature oscillation was analyzed based on experimental data. The experimental results show that as the peak regulation load decreases from 600 MW to 180 MW, the working fluid flow rate and pressure inside the overall heating surface tubes gradually decrease, leading to a gradual increase in the oscillation period and oscillatory amplitude ratio of the heating surface tube wall temperature. When the load drops to the critical load of 197.13 MW (i. e., 30% of the maximum continuous rating), there is a significant increase in the oscillation period and oscillatory amplitude ratio of the wall temperature, resulting in pulsating over-temperature conditions in the heating surface tubes. The front enclosed wall superheater, as the first component to experience pulsating over-temperature, is identified as the key component affecting material safety during deep peak shaving. This study provides experimental evidence for the assessment of the adaptability of supercritical boilers under deep peak shaving.

收稿日期: 2024-02-04; 修订日期: 2024-04-17

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(重大专项)(5216A5220025)

Fund-supported Project: State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Research Program (Major Special Project)(5216A5220025)

作者简介: 龙会国(1978-), 男, 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院正高级工程师。

Key words: deep peak shaving, low-load operation, flow instability, oscillation of wall temperature, oscillatory amplitude ratio

引言

材质安全是燃煤机组锅炉深度调峰安全运行的基本要求,也是锅炉兼备“深度调峰+顶峰保供”双重功效的基础。研究锅炉深度调峰负荷工况与受热面壁温脉动特性变化规律,确定影响材质安全因素,提出基于材质安全的锅炉深度调峰适应性评定分区方法,对保证锅炉运行安全、提升深度调峰及保供电能力具有重要的意义。

国内学者对燃煤机组锅炉深度调峰适应性进行了比等限制较深入的研究。张广才等人^[1]通过水冷壁水力核算和壁温偏差计算确定锅炉运行下限值;并针对直流锅炉,通过水力计算确定干态安全运行最低给水流量。王凯等人^[2]从影响锅炉深度调峰的主要因素,如燃烧稳定性、水循环安全性和锅炉辅机等限制确定下限值。杨冬等人^[3]研究得出,低于一定质量流速的工质流动不稳定,易发生脉动,从而引起受热管壁温脉动,导致金属疲劳,并提出了工质流动不稳定的流动脉动无量纲形式判定方法。党岳等人^[4]研究了超临界锅炉 30% 工况下干态运行优化技术。王锡辉等人^[5]提出一种汽温控制方法,提升了超临界汽温稳态控制品质。周科等人^[6]通过模型计算与实炉测量验证,获得了超临界 660 MW 锅炉 30% 最大连续出力深度调峰负荷时水力特性及其安全性。聂鑫等人^[7]通过循环流化床锅炉水循环计算模型计算获得深度调峰下限值为 27% 最大连续出力。欧阳诗洁等人^[8]数值分析了热负荷线密度对超临界锅炉水冷壁工质不稳定产生的影响,可以通过水冷壁压降、进口流量等参数进行调整。刘佳伦等人^[9]研究了低压力、低质量流速等参数条件下水冷壁多通道间密度波不稳定,随着系统稳定性降低,系统压力、质量流速降低;深度调峰降负荷过程中,热密度分布偏差增大,更易造成系统不稳定增大,极易诱发管内密度波脉动。Chen 等人^[10-12]研究了质量流速脉动周期与频率对脉动传热及壁温的影响规律。梁梓宇等人^[13]研究了并联双通道内超临界水流量脉动对壁温的影响规律,得出壁温随工质流量脉动而波动,两者脉动振幅呈正

比关系,脉动周期基本相同,相位相反。

本文通过对某在役 600 MW 超临界机组锅炉分别在 180 ~ 600 MW 范围内不同负荷工况下进行试验,建立锅炉不同负荷工况下深度调峰时受热面管壁温脉动特性曲线,研究壁温脉动周期、脉动振幅以及脉动振幅率随负荷变化的规律,提出基于锅炉部件材质安全性的深度调峰适应性评定方法,保证锅炉深度调峰工况下受热面材质运行安全。

1 试验对象及方法

1.1 试验对象

某电厂 2 号锅炉为东方锅炉(集团)股份有限公司生产的 DG1900/25.4-II 8 型、600 MW、一次中间再热、单炉膛、平衡通风、固态排渣、露天布置、全钢架结构、W 型火焰燃烧、垂直内螺纹管水冷壁、Π 型变压直流锅炉。锅炉主要参数如表 1 所示。

表 1 锅炉主要参数
Tab. 1 Main parameters of the boiler

参 数	锅炉最大连续 蒸发量 (BMCR)	锅炉额定 蒸发量 (BRL)
机组负荷/MW	666	600
过热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 900	1 811.3
过热器出口蒸汽压力/MPa	25.4	25.29
过热器出口蒸汽温度/℃	571	571
再热蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 613.5	1 534.5
再热器出口蒸汽压力/MPa	4.42	4.20
再热器出口蒸汽温度/℃	569	569

1.2 试验方法

锅炉在高参数下运行时,由于流速、温度、压力及负荷的波动干扰,工质存在流动不稳定现象,工质流速脉动的存在导致壁温脉动从而影响受热面管材质性能,壁温脉动随工质质量流速脉动变化而变化,两者脉动振幅呈正比,脉动周期相同,相位相反^[10-13]。因此,通过在役锅炉受热面管壁温脉动监测受热面管内工质质量流速脉动状态。

壁温脉动振幅率 A_T 的定义为:
$$A_T = \frac{\Delta T_w}{\bar{T}_w} \times 100\% \tag{1}$$
式中: A_T —壁温脉动振幅率; ΔT_w —计算脉动周期

内壁温最大值和最小值之差, $\Delta T_w = T_{\max} - T_{\min}$; $\bar{T}_w$ —计算脉动周期内壁温的平均值。

采用滑压运行方式,试验负荷工况范围为 180 ~ 600 MW。采用质量流量计测量主蒸汽流量,采用压差变送器测量压力和压差;采用 K 分度的热电偶测量壁温,测量误差为 $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用准稳态的方法处理实验数据,取计算周期内的均值作为准稳态值,取样频率为 1 min,受热面出口壁温测点均在炉顶大包内,管外壁温度与管内工质温度基本一致。选取高热负荷区域受热面出口壁温数据进行脉动传热分析。研究表明,工质质量流速脉动、壁温脉动数据是连续性的,具有类正弦波特特性^[10-13],非连续性测量数据是异常的,数据分析时应剔除异常值。

2 结果与讨论

2.1 低负荷工况下受热面壁温脉动特性

负荷工况对锅炉各受热面影响趋势一致,但由于受炉膛截面烟气温度差异及各受热面流量分配影响,各受热面壁温受影响程度存在差异。研究中实验数据均采用烟气温度影响大的壁温测点数据。图 1 为 180 ~ 250 MW 负荷工况下水冷壁出口壁温变化。由图 1 可知,水冷壁管出口壁温存在一定脉动性,壁温脉动幅度较小,在稳定平均负荷 185 MW 时,水冷壁最大壁温脉动振幅率为 1.68%。

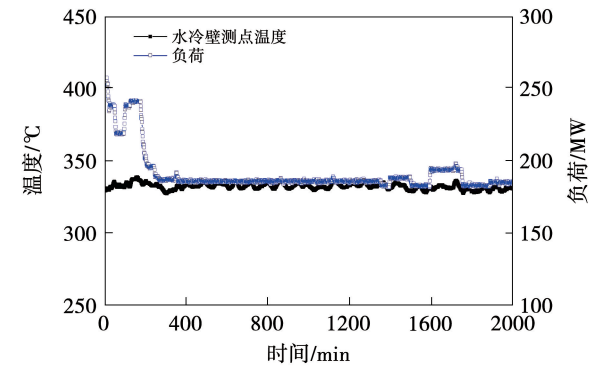


图 1 180 ~ 250 MW 负荷工况下水冷壁壁温脉动特性
Fig. 1 Temperature oscillatory characteristic of water wall under 180 – 250 MW load conditions

图 2 为 180 ~ 250 MW 负荷工况下包墙壁温变化。由图 2 可知,包墙壁温均存在明显脉动性,但由于受烟气温度、受热面管内工质脉动的影响程度不同,其壁温脉动差异较大。从图2(a)可知,随着深度调峰负荷降低至临界负荷时,前包墙壁温脉动周

期及脉动振幅显著增加,即当负荷降至临界负荷 197.13 MW 时,前包墙过热器管内工质脉动振幅及脉动周期显著增加,197.13 MW 负荷为前包墙过热器最低调峰负荷临界值。在稳定平均负荷 185 MW 时,其中:前包墙过热器壁温最大脉动振幅率为 36.59%;后包墙过热器壁温最大壁温脉动振幅率为 7.8%;侧包墙过热器壁温最大脉动振幅率为 7.8%。在 197.13 MW 以下低负荷工况下,变负荷率超过 3 MW/min 时,使后包墙壁温产生较为明显的波动,即后包墙相对应的管内工质产生较为明显的波动。

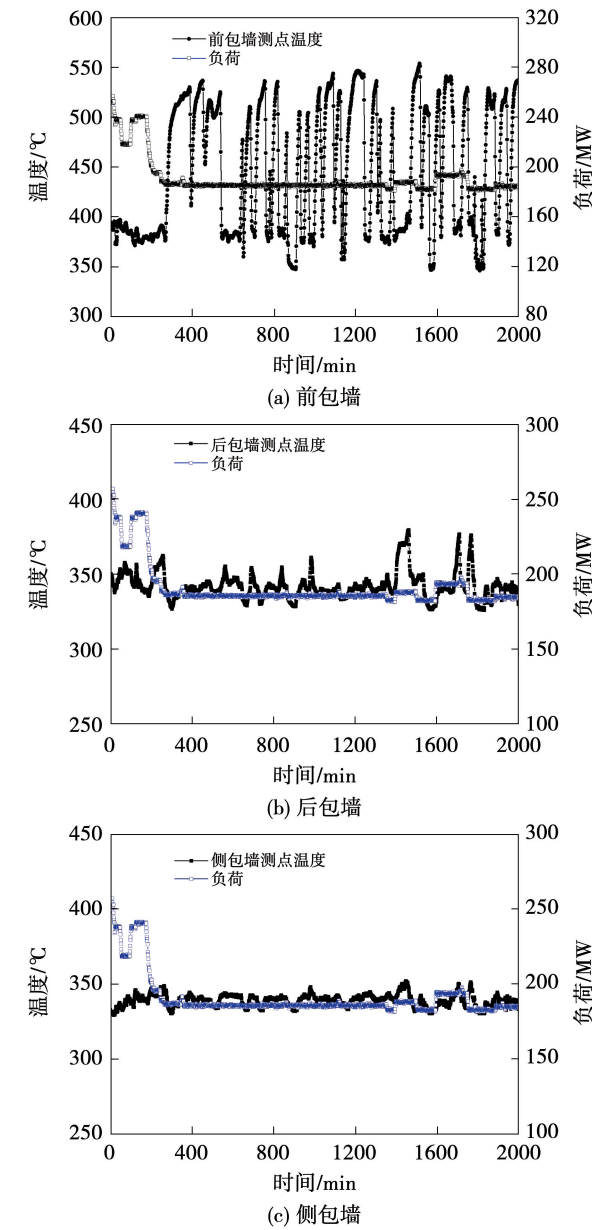


图 2 180 ~ 250 MW 负荷工况下包墙壁温脉动特性
Fig. 2 Wall temperature oscillatory characteristics of enclosed wall superheaters under 180 – 250 MW load conditions

图 3 为 180 ~ 250 MW 负荷工况下低温过热器、屏式过热器及高温过热器壁温变化。

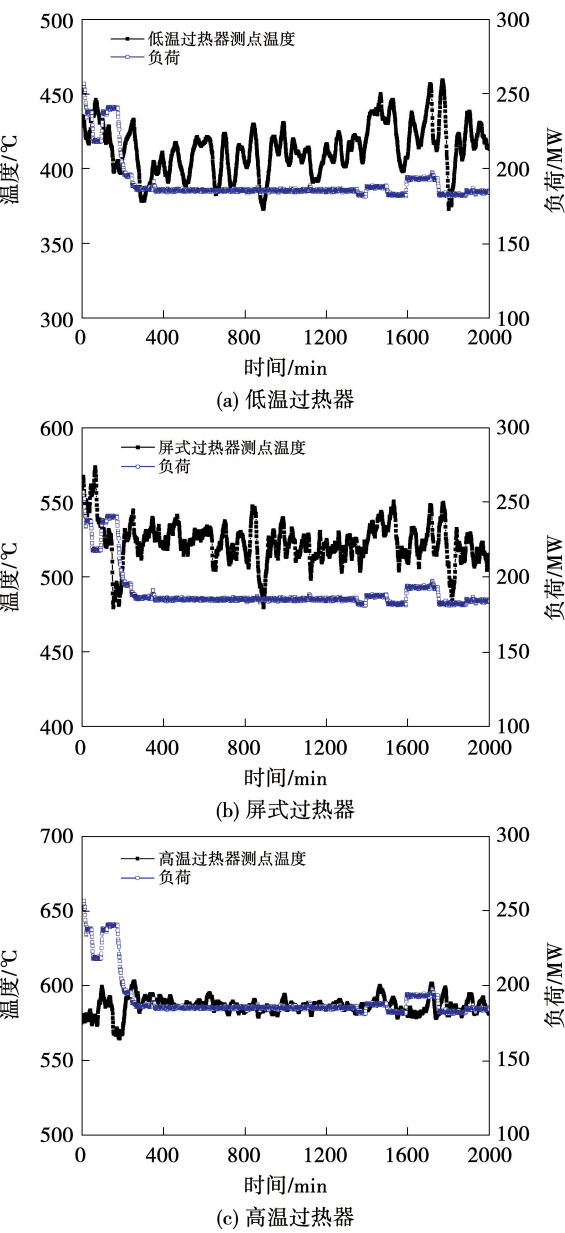


图 3 180 ~ 250 MW 负荷工况下过热器壁温脉动特性
Fig.3 Wall temperature oscillatory characteristics of superheaters under 180 - 250 MW load conditions

由图 3 可知,在低负荷工况下,低温过热器、屏式过热器及高温过热器壁温均存在明显脉动性,但同样受烟气温度、受热面管内工质脉动的影响程度不同,其壁温脉动差异较大,在稳定平均负荷 185 MW 时,低温过热器壁温最大脉动振幅率为 13.96%;屏式过热器壁温最大脉动振幅率为 6.9%;高温过热器壁温最大脉动振幅率为 2.74%。

图 4 为 180 ~ 250 MW 负荷工况下低温再热器

及高温再热器壁温变化。由图 4 可知,在低负荷工况下,低温再热器及高温再热器壁温均存在明显脉动性;在稳定平均负荷 185 MW 时,低温再热器壁温最大脉动振幅率为 4.07%;高温再热器最大壁温脉动振幅率为 3.35%。

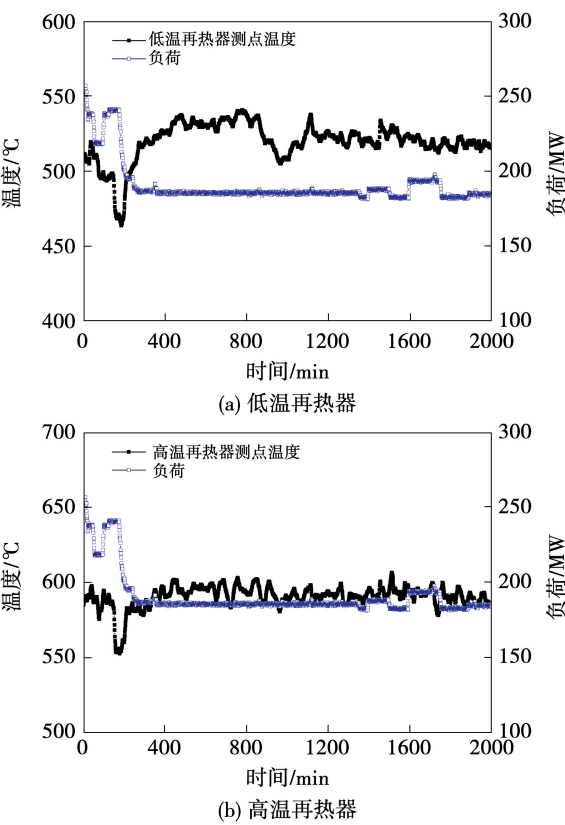


图 4 180 ~ 250 MW 负荷工况下再热器壁温脉动特性
Fig.4 Wall temperature oscillatory characteristics of reheaters under 180 - 250 MW load conditions

综上所述,在 180 ~ 250 MW 负荷工况下,前包墙过热器壁温振幅率最大,且最先达到临界负荷值。因此,影响锅炉材质安全的关键部件为前包墙过热器,其次为低温过热器,其临界负荷为 197.13 MW 即 30% 最大连续出力。

锅炉主要受热面材质、最高壁温值及允许运行温度如表 2 所示,其中,低温过热器运行最高壁温幅值为 505 °C,超过设计温度 496 °C,但未超过设计材质允许温度 580 °C;前包墙过热器运行最高振幅温度为 567.9 °C,已经超过设计材质允许温度 550 °C,存在严重超温安全运行隐患,需要更换为更高等级的材质如 12cr1MoV、T91,才能保证低负荷工况下运行材质安全。

表 2 锅炉主要受热面运行最高壁温

Tab.2 The maximum operating wall temperature of main heating surface of boiler

项 目	水冷壁	前/后/侧包墙	低温过热器	屏式过热器	高温过热器	低温再热器	高温再热器
设计材质	12Cr1MoV	15CrMoG	12Cr1MoV	TP347HFG	TP347HFG	12Cr1MoV	TP347HFG
最高壁温/℃	400.6	567.9/412.2/405.7	505	572.8	589.8	554	625.3
设计温度/℃	530	475	496	653	623	562	645
允许温度/℃ ^[14]	≤580	≤550	≤580	≤700	≤700	≤580	≤700

2.2 锅炉受热面壁温脉动特性规律

以影响锅炉材质安全最为严重的前包墙过热器为例,研究低负荷工况对锅炉受热面传热特性的影响规律。图 5 为 300,200 和 180 MW 低负荷工况下前包墙过热器壁温脉动特性。

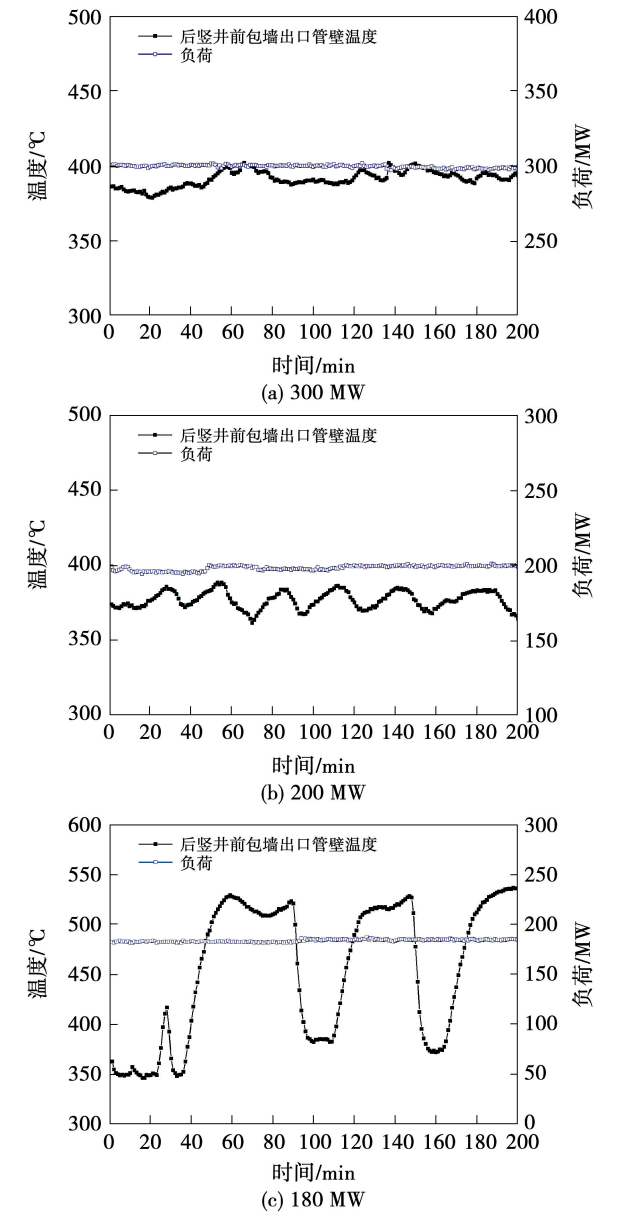


图 5 不同负荷工况下前包墙过热器壁温脉动特性
Fig.5 Wall temperature oscillatory characteristics
of front enclosed wall superheater under
different operating conditions

由图 5 可知,在 300 MW 负荷工况下,壁温脉动不明显,且壁温脉动振幅较小,壁温脉动周期最大为 25 min,脉动周期平均值为 16.8 min,最大壁温脉动振幅率为 5.89%;在 200 MW 负荷工况下,壁温脉动周期最大为 44 min,脉动周期平均值为 31.7 min,最大壁温脉动振幅率为 7.17%;在 180 MW 负荷工况下,壁温脉动周期最大为 75 min,脉动周期平均值为 51.9 min,最大壁温脉动振幅率为 42.53%。可见,随着深度调峰负荷降低,管壁温脉动周期增大,壁温的脉动振幅率也相应增大。管壁温的脉动特性反映了管内工质质量流速的脉动特性,管壁温度脉动周期性与管内工质质量流速脉动周期性相同,两者脉动相位相反,即质量流速越大壁温越小,质量流速越小则壁温越大。当在临界负荷 197.13 MW 及以下工况运行时,即 30% 最大连续出力时,其脉动周期及脉动振幅率显著增加,这也是由于受热面内工质质量流速脉动周期及脉动振幅率显著增加使传热强化^[15-16],在临界负荷以下工况运行时,前包墙过热器壁温脉动的幅度可达 196.9℃,周期平均值为 51.9 min,管壁温度呈现周期性变化,并呈周期性超温。

2.3 深度调峰适应性评定

图 6 为在稳定负荷工况下,前包墙过热器平均温度、主蒸汽平均流量及压力随负荷变化情况。由图 6 可知,随着调峰负荷降低,主蒸汽流量、压力整体呈降低趋势;负荷大于或等于 450 MW 时,随着调峰负荷降低,前包墙过热器平均壁温降低;在负荷为 400~450 MW 时,随调峰负荷降低,前包墙过热器平均壁温存在明显的先升后降趋势,壁温脉动振幅受负荷及烟气侧热负荷综合影响,即工质质量流速脉动及炉膛热负荷的综合影响,当机组负荷工况降低时,工质质量流速脉动周期及质量流速脉动振幅增加,在相同炉膛热负荷下,壁温脉动振幅增加;但炉膛热负荷降低,相同工质质量流速状态下,壁温振幅降低;当机组负荷工况降低、炉膛热负荷起主导作

用时,壁温振幅降低;当工质质量流速脉动周期、脉动振幅起主导作用时,则壁温脉动振幅增加。在 197.13 ~ 400 MW 负荷范围内,前包墙过热器平均壁温存在先升后降趋势;负荷小于 197.13 MW 时,随着调峰负荷降低,前包墙过热器平均壁温明显增大。说明小于临界负荷时,随着负荷的降低,受热面管内工质质量流速脉动周期及质量流速脉动振幅显著增大,工质质量流速脉动影响占其主导作用,促使管壁温度脉动周期及壁温脉动振幅显著增大,从而引起管壁平均温度显著增大。该运行负荷段受热面管周期性在高温幅值段运行,如果不加以系统控制,则管壁高幅值温度影响材质组织及性能,最终因管壁过热导致材质性能劣化而产生泄漏故障。

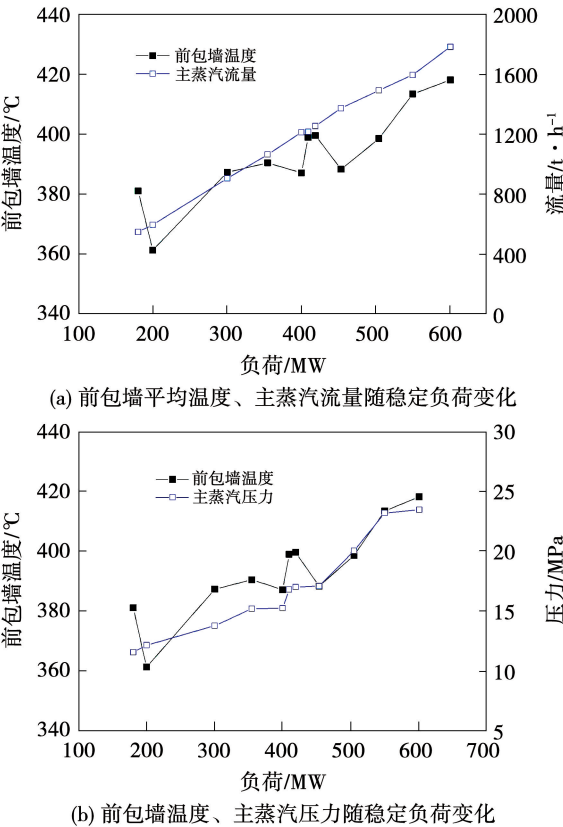


图 6 前包墙壁温、主蒸汽流量及压力随负荷的变化
Fig.6 Variations of front enclosed wall superheater temperature, main steam flow rate and pressure with load

在现有的运行条件下,450 ~ 666 MW 负荷区间为稳定调峰区;400 ~ 450 MW 负荷区间为运行扰动区;197.13 ~ 400 MW 负荷区间为可深度调峰区;深

度调峰下限临界值为 197.13 MW (30% 最大连续出力);临界负荷以下,非深度调峰区。

3 结 论

- (1) 随着调峰负荷从 600 MW 降低至 180 MW,工质流量及压力降低,工质质量流速脉动周期及脉动振幅增大,导致受热面管壁温脉动周期及脉动振幅率增大,当调峰负荷降至临界负荷 197.13 MW 及以下时,受热面管壁温脉动周期及脉动振幅率显著增加,壁温振幅周期性超过设计值,受热面材质周期性运行超温。
- (2) 在本实验条件下,前包墙过热器的壁温脉动周期显著变长,脉动振幅和脉动振幅率急剧增加,首先出现壁温脉动振幅值周期性超过设计报警温度的部件,即为影响锅炉深度调峰的关键部件。
- (3) 根据实验结果,197.13 ~ 666 MW 负荷区间为可深度调峰区。临界负荷 197.13 MW 以下为非深度调峰区。这一结论为超临界锅炉的深度调峰适应性评定提供了重要参考。

参考文献:

[1] 张广才,周 科,鲁 芬,等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电,2017,46(9):17-23.
ZHANG Guangcai,ZHOU Ke,LU Fen,et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants [J]. Thermal Power Generation,2017,46(9):17-23.

[2] 王 凯,黄葆华,司派友. 火电机组调峰裕度的影响因素研究[J]. 节能技术,2012,30(1):52-54.
WANG Kai,HUANG Baohua,SI Paiyou. Research on influencing factors of peak-regulation margin in power-plant units[J]. Energy Conservation Technology,2012,30(1):52-54.

[3] 杨 冬,聂 超,周 科,等. 超临界机组深度调峰工质流动不稳定试验与理论计算[J]. 洁净煤技术,2023,29(6):40-48.
YANG Dong,NIE Chao,ZHOU Ke,et al. Experiment and theoretical calculation of flow instability in deep peak-shaving of supercritical units[J]. Clean Coal Technology,2023,29(6):40-48.

[4] 党 岳,樊小朝,王志强,等. 超临界机组灵活性调峰及低负荷运行优化技术研究[J]. 锅炉技术,2022,53(6):61-64.
DANG Yue,FAN Xiaochao,WANG Zhiqiang,et al. Research on flexible peak shaving and low-load operation optimization technology of supercritical units [J]. Boiler Technology,2022,53(6):61-64.

[5] 王锡辉,朱晓星,陈厚涛,等. 火电机组宽负荷调峰汽温控制技

术应用[J]. 湖南电力,2022,42(5):95-100.

WANG Xihui,ZHU Xiaoxing,CHEN Houtao,et al. Application of steam temperature control technology of wide load peak shaving for thermal power unit[J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(5): 95-100.

[6] 周 科,何敏强,牛田田,等. 超临界 660 MW 褐煤锅炉深度调峰负荷水力特性研究[J]. 热力发电,2022,51(9):88-95.

ZHOU Ke,HE Minqiang,NIU tiantain,et al. Research on hydrodynamic characteristics at deep peak load regulation of 660 MW supercritical lignite boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(9):88-95.

[7] 聂 鑫,谢海燕,杨 冬,等. 循环流化床机组锅炉深度调峰负荷水循环安全性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2766-2776.

NIE Xin,XIE Haiyan,YANG Dong,et al. Safety analysis for boiler thermal-hydraulic circulation with severe peak load regulation of a CFB unit[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(7):2766-2776.

[8] 欧阳诗洁,李 娟,董 乐,等. 超超临界锅炉低负荷运行时的流动不稳定性计算分析[J]. 西安交通大学学报,2019,53(7):84-91.

OUYANG Shijie,LI Juan,DONG Le,et al. Calculation and analysis on the flow instability of an ultra supercritical boiler under low load[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(7): 84-91.

[9] 刘佳伦,张永海,陈勇强. 低参数条件下并联多通道间汽-水两相流密度波不稳定性分析[J]. 动力工程学报,2024,44(1):15-24.

LIU Jialun,ZHANG Yonghai,CHEN Yongqiang. Analysis of steam-water density wave instability among parallel multiple channels under low parameter conditions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(1):15-24.

[10] CHEN C A,CHANG W R,LIN T F. Time periodic flow boiling heat transfer of R-134a and associated bubble characteristics in a narrow annular duct due to flow rate oscillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2010,53:3593-3606.

[11] WANG S L,CHEN C A,LIN T F. Oscillatory subcooled flow boiling heat transfer of R-134a and associated bubble characteristics in a narrow annular duct due to flow rate oscillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2013,63:255-267.

[12] CHEN C A,LIN T F,YAN W M,et al. Time periodic evaporation heat transfer of R-134a in a narrow annular duct due to mass flow rate oscillation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2018,118:154-164.

[13] 梁梓宇,万 李,李 娟,等. 并联双通道内超临界水的脉动传热特性[J]. 化工学报,2019,70(7):2488-2495.

LIANG Ziyu,WAN Li,LI Juan,et al. Oscillatory heat transfer characteristics of supercritical water in parallel channels[J]. CIESC Journal,2019,70(7):2488-2495.

[14] DL/T715-2015,火力发电厂金属材料选用导则[S].

DL/T715-2015 selection guide for the metallic material of fossil power plant[S].

[15] 李思文,李 华,杨臧健,等. 光管内湍流脉动传热影响因素的实验研究[J]. 浙江工业大学学报,2013,41(4):395-399.

LI Siwen,LI Hua,YANG Zangjian,et al. Experimental study on influencing factors of pulsating heat transfer in turbulent flow in a pipe[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2013, 41(4):395-399.

[16] 杨卫卫,何雅玲,陶文铨,等. 凹槽通道中脉动流动强化传质的数值研究[J]. 西安交通大学学报,2004,38(11):1119-1122.

YANG Weiwei,HE Yaling,TAO Wenquan,et al. Numerical study on enhancing mass transfer in grooved channel by pulsating flow[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(11): 1119-1122.

(姜雪梅 编辑)