

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306074

燃气-蒸汽联合循环机组中压旁路系统 焊缝和开孔热应力分析

霍东方¹, 李松², 张子健¹, 张攀登¹, 程勇明², 何宝义³

(1. 华能河南中原燃气发电有限公司, 河南 驻马店 463000;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 为构建以新能源为主体的新型电力系统, 近年来火电机组频繁参与调峰, 导致管道焊缝开裂失效事故时有发生。针对某电厂燃气-蒸汽联合循环机组中压旁路阀后管道与凝汽器罩壳交汇处两侧焊缝及消音器管道开孔区域频繁开裂的问题, 建立了中压旁路管道整体计算模型, 采用有限元法研究中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道的热传导过程, 对比了正常工况、调峰工况的热应力分布情况, 获得正常工况下管道一次应力、二次应力分布及各节点的位移、荷载。对比结果表明, 在调峰工况下, 因喷嘴雾化效果差造成蒸汽中带水严重, 旁路阀后管道至凝汽器消音器管道温差较大及减温水的反复投停是造成焊缝及开孔区域热疲劳断裂的主要原因。

[关键词] 管道; 焊缝; 有限元; 热传导; 热应力

[引用本文格式] 霍东方, 李松, 张子健, 等. 燃气-蒸汽联合循环机组中压旁路系统焊缝和开孔热应力分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 46-52. HUO Dongfang, LI Song, ZHANG Zijian, et al. Thermal stress analysis of weld and opening area in medium pressure bypass system of gas-steamcombinedcycleunit[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(10): 46-52.

Thermal stress analysis of weld and opening area in medium pressure bypass system of gas-steamcombinedcycleunit

HUO Dongfang¹, LI Song², ZHANG Zijian¹, ZHANG Pandeng¹,
CHENG Yongming², HE Baoyi³

(1. Huaneng Henan Zhongyuan Gas Power Co., Ltd., Zhumadian 463000, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

(3. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In recent years, thermal power units have frequently participated in peak shaving to build a new type of power system with new energy as the theme. Accidents of pipeline weld cracking and failure often occur. The welds on both sides of the intersection between the pipeline behind the intermediate pressure bypass valve and the condenser casing frequently crack. The opening area of the muffler pipeline also frequently crack. The heat transfer process from the pipeline behind the medium pressure bypass valve to the condenser muffler is studied by using the finite element method. The distribution of thermal stress under normal and peak shaving conditions was compared. To investigate the causes of the problem, a comprehensive calculation model for the medium pressure bypass pipeline is first established to obtain the distribution of primary and secondary stresses in the pipeline under normal working conditions, as well as the displacement and bearing values of each node. The finite element method is used to study the heat conduction process from the local medium pressure bypass valve to the condenser silencer pipeline. The thermal stress distribution under normal and peak shaving conditions is studied. The results indicate that under peak shaving conditions, the poor atomization effect of the nozzle results in severe water entrainment in the steam,

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-HF193)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-HF193)

第一作者简介: 霍东方 (1972), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为发电厂运营管理与新能源发电技术, llhhd@sina.com。

The temperature difference between the pipeline behind the bypass valve and the pipeline of the condenser muffler is larger and repeated operation and shutdown of the desuper heating water cause thermal fatigue fracture of the weld seam and the opening area.

Key words: pipe; welding seam; finite element; heat conduction; thermal stress

近年来,为响应“2030 年碳达峰、2060 年碳中和”号召,国家大力发展新能源。由于新能源发电具有先天的波动性和较强的反调峰特性,为了保证电力输出稳定,深度调峰主要由火电机组承担。深度调峰需要机组频繁快速变负荷,甚至快速启停,易产生锅炉炉膛应力变形、压力管道热应力增大、发电机性能劣化、汽轮机腐蚀等情况,造成发电机组主设备故障、水冷壁开裂、管道焊缝开裂。

随着电网负荷峰谷差不断加大,持续时间不断增长,深度调峰频率越来越频繁,负荷率越来越低,锅炉部件和压力管道在复杂多变的条件下发生焊缝开裂的情况明显增多。火电机组部件和设备裂纹的产生与温度、热应力、变工况等因素相关^[1-6]。据统计,由温度变化引起的热应力而导致管道焊缝开裂而造成管道泄露事故的比重逐年增加,因此对管道进行温度场建模和热应力分析十分必要^[7-10]。刘明等^[11]通过热固耦合有限元方法对疏水管道接管座进行热应力分析,结果表明有限元获得的最大应力位置与实际焊缝开裂位置吻合,其开裂原因是管道布置不合理造成管道热膨胀受阻,使得接管座区域产生较高热应力。王平程等^[12]对电厂蒸汽管道三通部件的泄露问题进行了研究,发现温度变化引起的热应力是导致其产生裂纹的主要原因。Chang 等人^[13]采用三维非稳态导热模型和三维热弹塑性模型对管道焊接接头的热应力场进行了有限元分析,结果表明不合理的焊接接头对构件循环热载荷的承载能力具有较大影响。孙颖等^[14]采用有限元的方法,通过建立三维空间模型对输气管道的热应力进行了研究,并详尽分析了影响热应力的外部因素。综上,管道的热应力对构件的强度和裂纹萌生及扩展行为具有重要的影响。

由于调峰原因,某燃气发电有限公司安装的一台西门子 SGT5-4000F (V94.3A2) 型燃气-蒸汽联合循环机组频繁快速启停,中压管道与凝汽器罩壳交汇处两侧焊缝和消音器管道开孔区域频繁开裂,影响机组安全稳定运行,机组被迫停机修复时,排除了材料、焊接问题引起的开裂。为此,建立了中压旁路管道整体计算模型,采用有限元法研究中压

旁路阀后管道至凝汽器消音器管道的热传导过程,对比了正常工况、调峰工况的热应力分布情况,获得正常工况下管道一次应力、二次应力分布情况及各个节点的位移、荷载。

1 管系应力计算分析

1.1 管道应力验算方法

支吊架的配置(荷载、类型、位置)将直接影响管系的应力分布和大小,影响管系一次应力、二次应力水平的高低^[15-16]。因此,需针对现场管道支吊架进行检验、调整,确保管道支吊架状态正常。

根据管道布置、支吊架配置和设计参数进行计算和分析,计算软件为 CAESARII。CAESARII 是由美国 COADE 公司开发的管道应力分析软件,是国内外此领域应用最广泛的软件,它以梁单元模型为基础的有限元程序,能进行静力和动力分析^[17]。

管道应力计算的主要工作,一是验算管道的一次应力和二次应力,二是核算管道对设备产生的推力和力矩应在设备所能安全承受的范围内,本文主要是针对前者。管道应力分为 2 种:1) 一次应力,管道内压、自重和其他持续外载产生的轴向应力之和;2) 二次应力,热胀、冷缩和其它位移受约束而产生的热胀应力之和^[18]。一次应力、二次应力分别为:

$$\sigma_L = \frac{pD_i^2}{D_o^2 - D_i^2} + 0.75 \frac{iM_A}{W} \leq 1.0[\sigma]_t \quad (1)$$

$$\sigma_E = \frac{iM_C}{W} \leq f[1.2[\sigma]_{20} + 0.2[\sigma]_t + ([\sigma]_t + -\sigma_L)] \quad (2)$$

式中: σ_L 为管道在工作状态下,由内压、自重和其他持续外载产生的轴向应力之和, MPa; p 为设计压力, MPa; D_o 为管道外径, mm; D_i 为管道内径, mm; i 为应力增加系数; M_A (为自重和其他持续外载作用在管道横截面上的合成力矩, N·mm; W 为管道抗弯截面系数, mm³; $[\sigma]_t$ 为钢材在设计温度下的许用应力, MPa; σ_E 为热胀应力范围, MPa; M_C 为按全补偿值和钢材在 20 °C 时的弹性模量计算的,热胀引起的合成力矩范围, N·mm; f 为应力范围的减小系数; $[\sigma]_{20}$ 为管道钢材在 20 °C 时的许用应力, MPa。

1.2 管系应力计算模型

中压旁路蒸汽系统是燃气-蒸汽联合循环机组的重要组成部分,该系统主要功能是调节汽轮机再热蒸汽管道压力。当再热蒸汽管道压力超过设计允许值后,中压蒸汽旁路压力调节阀迅速打开,将再热蒸汽管道的部分蒸汽排入凝汽器,保证汽轮机的安全稳定运行。同时,在启停机阶段,通过旁路系统使再热蒸汽管道压力平滑升高至机组正常运行设计值。中压旁路管道中的蒸汽经减温减压器后进入凝汽器,在凝汽器中经消音器将减温减压后的排汽回收至凝汽器中^[19-25]。

计算时,将高温再热蒸汽管道和中压旁路管道连接在一起作为一个整体,计算模型如图 1 所示。

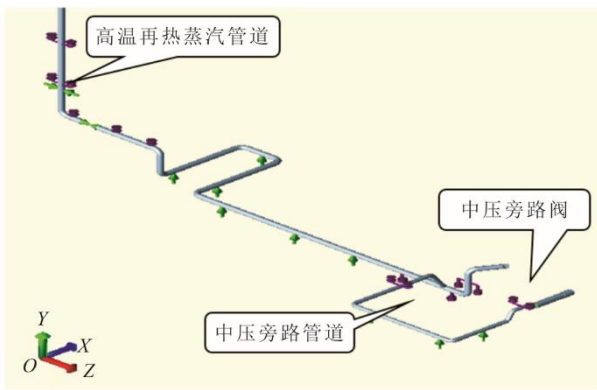


图 1 管道应力计算模型

Fig.1 Stress calculation model diagram of pipeline

1.3 计算结果分析

中压旁路管道最大应力计算结果见表 1。由表 1 可见,在支吊架状态正常的情况下,中压旁路管道最大一次应力、最大二次应力均在允许范围之内,管道应力校核合格,最大一次应力为其允许值的 34.4%,最大二次应力为其允许值的 6.8%。此外计算还得到中压旁路阀前后节点的热位移和荷载,作为下一步分析的边界条件。

表 1 中压旁路管道最大应力计算结果

Tab.1 Calculation results of maximum stress of medium pressure bypass pipeline

应力分类	最大值/MPa	许用应力/MPa	计算值/许用值/%
一次应力	31.34	91.32	34.4
二次应力	17.32	255.13	6.8

2 有限元仿真建模

2.1 有限元模型

通过中压旁路管道整体计算表明管道最大一次应力、最大二次应力均在允许范围之内,管道应

力校核合格,利用管系应力计算得到的中压旁路阀前后节点的热位移和荷载,作为有限元分析的边界条件。中压旁路阀后管道与凝汽器罩壳交汇处两侧焊缝及消音器管道开孔区域频繁开裂,考虑到中压旁路阀前温度稳定,不存在明显温差,管道应力校核合格。利用 ABAQUS 软件进行有限元建模,模型从中压旁路阀后开始,管道示意如图 2 所示。对中压旁路阀后管道、减温减压器、凝汽器消音器管道进行一体化建模,有限元物理模型如图 3 所示。

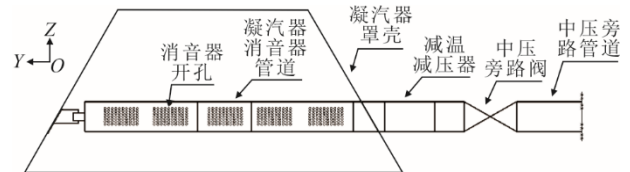


图 2 中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道示意

Fig.2 Sketch map of the medium pressure bypass pipe-condenser silencer pipe

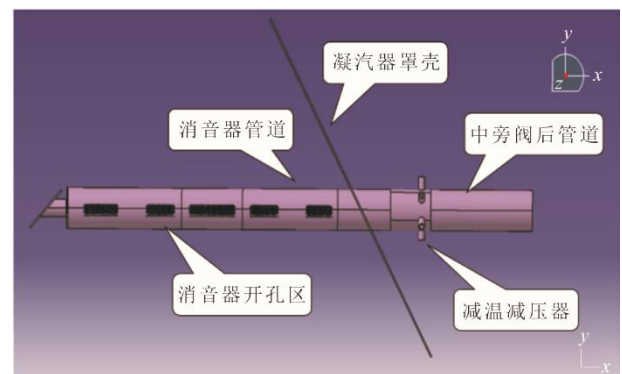


图 3 中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道模型

Fig.3 Geometric model of the medium pressure bypass pipe-condenser silencer pipe

2.2 网格划分

采用 20 节点六面体实体单元对中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道进行网格划分,在网格划分时,控制单元最长边和最短边的长度比在 5 以内,最小角度 20°,最大角度 160°,共 2 105 472 个单元、2 628 399 个节点。为提高计算精度,在管道与凝汽器罩壳连接处两侧焊缝位置、消音器管道开孔区域进行网格细化,网格划分如图 4、图 5 所示。

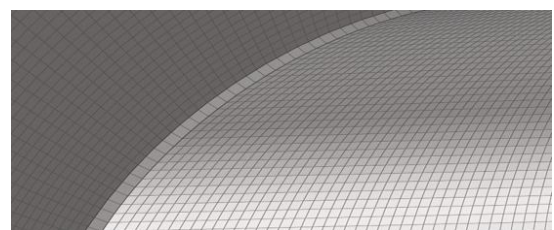


图 4 管道与凝汽器罩壳连接处两侧焊缝位置网格划分

Fig.4 Finite element mesh division of weld positions

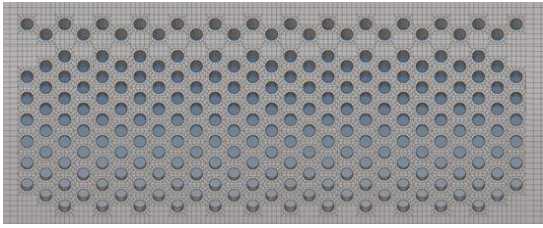


图 5 消音器管道开孔区域网格划分

Fig.5 Finite element mesh generation results of the muffler pipeline opening area

中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道各部分采用的材质不同，中压旁路阀后管道的材质为低合金结构钢 F22，凝汽器消音器管道和减温减压器后管道的材料为 20 号钢，减温减压器的材料为合金结构钢 15CrMo。开裂位置均发生在 20 号钢的管段，20 号钢随温度变化的材料物理参数见表 2。

表 2 20 号钢的物理参数
Tab.2 Physical parameters of no.20 steel

参数	温度/℃			
	100	200	300	400
弹性模量/GPa	187	179	170	161
导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	48.6	46.1	43.3	38.9
线膨胀系数/(×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	12.10	12.78	13.83	13.90
比热容/(J·(g·°C) ⁻¹)	4.69×10 ⁸	4.81×10 ⁸	5.09×10 ⁸	5.36×10 ⁸
泊松比	0.289	0.300	0.319	0.298
屈服强度/MPa	210	186	153	124

2.3 边界条件

中压旁路阀后管道起始位置的边界条件由 1.3 节校核计算获得，消音器管道末端、凝汽器罩壳边缘为固定形式，因此对其施加位移边界条件，完全限制自由度，位移边界条件施加如图 6 所示。

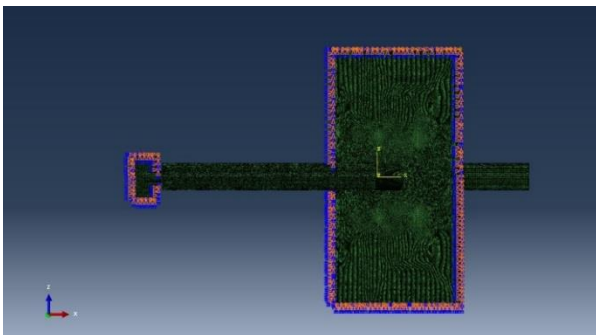


图 6 位移边界条件的施加

Fig.6 Imposition of displacement boundary conditions

3 热传导与热应力分析

3.1 工况分析

中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道在正

常运行工况和调峰工况时，选择中压旁路阀后管道和消音器管道的温度、压力为边界条件进行热传导分析。

调峰时机组需快速启停，采用昼开夜停的单日启停运行方式。在调峰过程中发现喷嘴雾化效果差，造成蒸汽中带水严重，温度不易控制，导致减温器后管道存在温度不均情况。现场利用温度计测量减温器后管道整体一圈温度，选取温度梯度最大的一组工况进行分析，按 0 点方向（管道上壁）、3 点方向（朝向炉侧）、6 点方向（朝向机侧）及 9 点方向（朝向机侧）的管道右壁温度作为边界条件。正常工况和调峰工况下的温度、压力边界条件见表 3。

表 3 正常工况和调峰工况的边界条件
Tab.3 Boundary conditions of normal operating condition and peak shaving condition

参数	正常工况	调峰工况
管道内部压力/MPa	0.8	0.8
减温器前管道温度/℃	559	559
减温器后 0 点温度/℃	100	300
减温器后 3 点温度/℃	100	300
减温器后 6 点温度/℃	100	40
减温器后 9 点温度/℃	100	40

3.2 温度场分布

针对中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道有限元模型，首先进行热传导分析。热传导分析分为与时间相关的瞬态热传导分析与与时间无关的稳态热传导分析。稳态热传导分析与时间无关，管道内温度在一定压力和温度下基本保持不变，且稳态传热节省计算成本，因此本文采用稳态热传导分析模拟管道在不同工况下持续工作的温度场。由于管道外面包覆保温层，可以认为管道工作时处于绝热状态。

中压旁路阀后管道至凝汽器消音器管道在正常工况下计算的温度场如图 7 所示，在调峰工况下计算的温度场如图 8 所示。

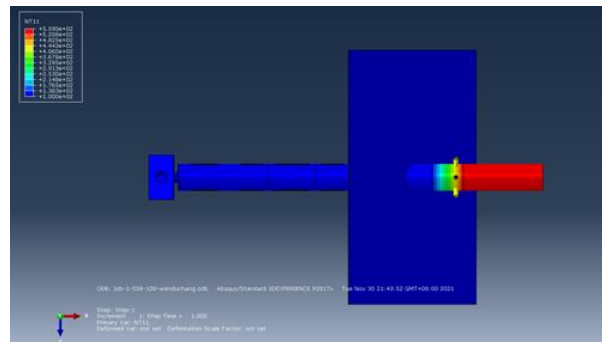


图 7 正常工况时的温度场

Fig.7 Temperature field at normal operating condition

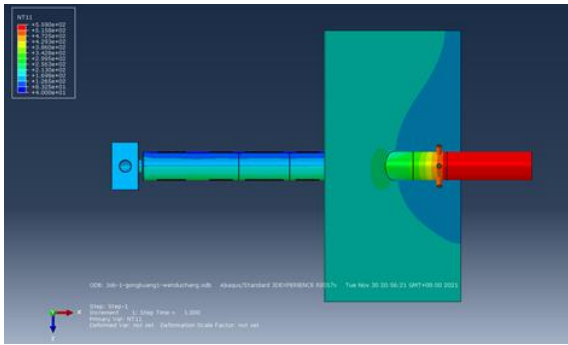


图 8 调峰工况时的温度场
Fig.8 Temperature field at peak shaving condition

由图 7、图 8 可见：正常工况下消音器管道的温度均匀分布，不存在温度梯度；而调峰工况下，由于减温减压器雾化效果差，减温器后管道温度分布不均，导致消音器管道温度亦呈现不均匀分布。

3.3 热应力分析

根据热应力学原理可知，当物体内存在温度梯度时，会导致热应力的产生，由得到的管道内部温度场对其进行热应力进行求解。

对于复杂应力状态，不能用单一的应力来判断材料是否发生或将要发生破坏。基于材料力学第四强度理论（形状改变比能理论），使用 Von Mises 等效应力用应力等值线来表示材料内部的应力分布情况，其综合考虑了第一、第二、第三主应力的影响，可以用来评价材料的危险程度，其表达式为：

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (3)$$

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力。

重点研究分析减温减压器后管道与凝汽器罩壳交汇处两侧焊缝区域以及消音器管道开孔区域的应力分布大小。正常工况下焊缝区域、开孔区域的应力分布云图如图 9、图 10、图 11 所示；调峰工况下焊缝区域、开孔区域的应力分布云图如图 12、图 13、图 14 所示。

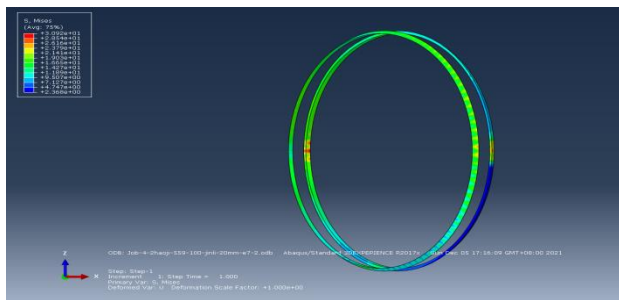


图 9 正常工况时的焊缝应力云图
Fig.9 Stress cloud diagram of weld at normal operating conditions

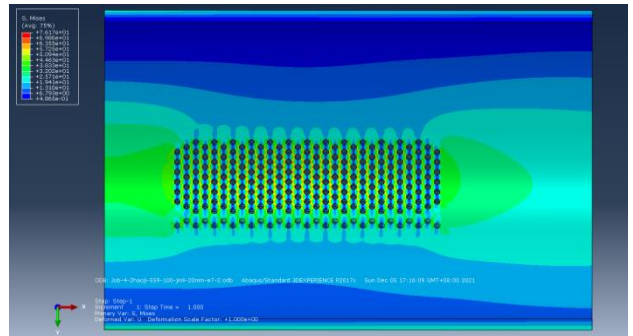


图 10 正常工况时的开孔区域内部应力云图
Fig.10 Stress cloud diagram of the internal opening area at normal operating condition

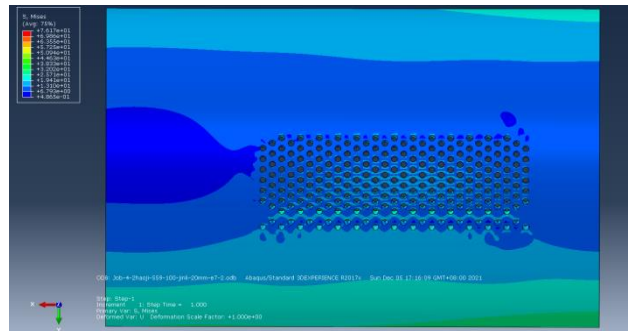


图 11 正常工况时的开孔区域外部应力云图
Fig.11 Stress cloud diagram of the external opening area at normal operating condition

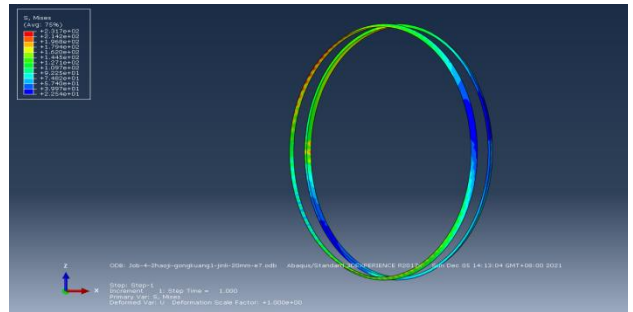


图 12 调峰工况时管道与凝汽器罩壳连接处两侧焊缝位置应力分布
Fig.12 Stress cloud diagram of weld positions on both sides of the connection between the pipeline and the condenser casing at peak shaving condition

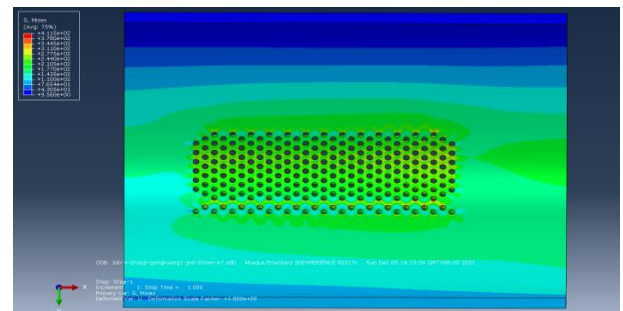


图 13 调峰工况时的开孔区域内部应力云图
Fig.13 Stress cloud diagram of the internal opening area at peak shaving condition

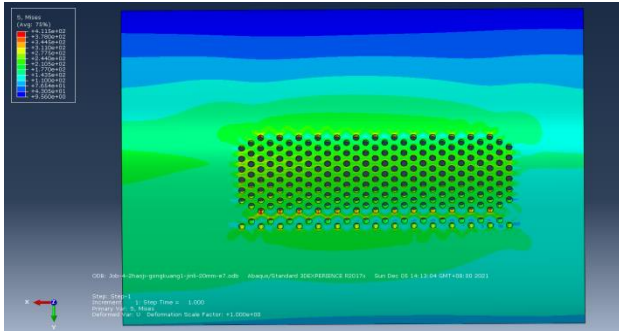


图 14 调峰工况时的开孔区域外部应力云图

Fig.14 Stress cloud diagram of the external opening area at peak shaving condition

由图 9—图 14 可知：凝汽器罩壳与减温减压器后管道焊缝交汇处区域的最大应力出现在 3 点方向，与实际焊缝开裂位置吻合；凝汽器消音器管道开孔区域最大应力集中出现在小孔的边缘，与现场开孔区域频繁开裂位置相符。

减温减压器后管道与凝汽器罩壳交汇处两侧焊缝区域和消音器管道开孔区域在不同工况下的最大应力值见表 4。由表 4 可见：正常工况下，焊缝区域最大应力值为 30.92 MPa，开孔区域最大应力值为 76.17 MPa，20 号钢材料的屈服强度为 210.00 MPa，二者均远小于材料的屈服强度；调峰工况下，焊缝区域最大应力值为 231.70 MPa，开孔区域最大应力值为 411.50 MPa，因较大温差造成热应力升高，最大应力值大于材料的屈服强度；在凝汽器罩壳与减温减压器管道焊缝交汇处，应力集中出现在 3 点方向的区域，凝汽器消音器管道开孔区域应力集中出现在小孔的边缘，应力集中对结构的直接作用会产生疲劳裂纹而引起材料的断裂，与现场开裂情况吻合。

表 4 正常工况和调峰工况下的最大应力值 单位：MPa

Tab.4 Maximum stress values at normal operating condition and peak shaving condition

工况	最大应力值	
	焊缝区域	开孔区域
正常工况	30.92	76.17
调峰工况	231.7	411.5

4 结 论

1) 中压旁路阀后管道与凝汽器罩壳交汇处两侧焊缝及消音器管道开孔区域频繁开裂原因为，调峰工况下，因喷嘴雾化效果差，造成蒸汽中带水严重，管道温差较大及减温水的反复投停造成焊缝及开孔区域热疲劳，最终出现开裂。

2) 对于复杂减温减压系统出现的类似问题，排除材料、焊接因素外，应采用有限元法研究局部管道的热传导过程和热应力分布情况，为解决此类问题提供参考。

[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] 沈利, 徐书德, 关键, 等. 超临界大容量火电机组深度调峰对燃煤锅炉的影响[J]. 发电设备, 2016, 30(1): 21-23.
SHEN Li, XU Shude, GUAN Jian, et al. Effects of deep participation in peak regulation on the coal-fired boiler of a supercritical high-capacity thermal power unit[J]. Power Equipment, 2016, 30(1): 21-23.

[3] 章良利, 李敏, 周晓蒙, 等. 深度调峰下燃煤机组运行方式对能耗的影响[J]. 中国电力, 2017, 50(7): 85-89.
ZHANG Liangli, LI Ming, ZHOU Xiaomeng, et al. Impact of the running modes of coal-fired units on energy consumption in in-depth peak load cycling[J]. Electric Power, 2017, 50(7): 85-89.

[4] 邢振中, 冷杰, 张永兴, 等. 火力发电机组深度调峰研究[J]. 东北电力技术, 2014, 35(4): 18-23.
XING Zhenzhong, LENG Jie, ZHANG Yongxing, et al. Research on depth peak load cycling of thermal power generator units[J]. Northeast Electric Power Technology, 2014, 35(4): 18-23.

[5] 李玲, 刘鑫屏. 新能源大规模并网条件下火电机组深度调峰控制策略优化[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 155-161.
LI Lin, LIU Xinping. Control strategy optimization for thermal power unit adapted to deep peak shaving for large-scale new energy source integration[J]. Electric Power, 2014, 35(4): 18-23.

[6] 张贤山, 孙培伟, 魏新宇. 汽轮机蒸汽旁路排放系统的动态特性分析[J]. 核动力工程, 2021, 42(增刊 2): 25-28.
ZHANG Xianshan, SUN Peiwei, WEI Xinyu. Dynamic characteristic analysis of steam bypass exhaustsystem of steam turbine[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(Suppl.2): 25-28.

[7] 陈海富. 燃气-蒸汽联合循环机组旁路系统及控制特点[J]. 燃气轮机发电, 2015, 17(4): 15-18.
CHEN Haifu. Control characteristics of bypass system in gas-steam combined cycle unit[J]. Gas Turbine Power Generation, 2015, 17(4): 15-18.

[8] 孙钰. M701F 燃气-蒸汽联合循环机组旁路阀压力控制模式研究[C]. 中国电机工程学会燃气轮机发电专业委员会 2008 年年会论文集, 2008: 107-110.
SUN Yu. Study on pressure control mode of bypass valve of m701f gas-steam combined cycle unit[C]. Proceedings of the 2008 Annual Meeting of Gas Turbine Power Generation Committee of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2008: 107-110.

[9] 赵春, 王培红. 燃气-蒸汽联合循环热经济学分析评价指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 44-50.
ZHAO Chun, WANG Peihong. Investigation on the evaluation indices for thermoeconomic analysis of

- combined cycle power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 44-50.
- [10] 康玉洁. 燃气-蒸汽联合循环发电系统的现状和展望[J]. 电气时代, 2013(6): 60-61.
KANG Yujie. Current status and prospects of gas steam combined cycle power generation system[J]. Electric Age, 2013(6): 60-61.
- [11] 刘明, 刘奇, 白佳, 等. 某 660 MW 超超临界机组热段疏水管道接管座的开裂原因[J]. 机械工程材料, 2021, 45(2): 90-95.
LIU Ming, LIU Qi, BAI Jia, et al. Reasons for cracking of nozzle socket of hot section drain pipe of a 660 MW ultra-supercritical unit[J]. Mechanical Engineering Materials, 2021, 45(2): 90-95.
- [12] 王平程. 蒸汽系统焊制三通热疲劳裂纹的规律[J]. 电力技术, 1991(2): 52-54.
WANG Pingcheng. The law of thermal fatigue crack in steam system welding tee[J]. Electric Power Technology, 1991(2): 52-54.
- [13] CHANG K, JIANG G, SHIN Y. The behavior of welded joint in steel pipe members under monotonic and cyclic loading[J]. International Journal of Pressure and Piping, 2006(83): 280-298.
- [14] 孙颖, 吕超. 基于有限元的输气管道热应力及影响因素分析[J]. 西华大学学报, 2018, 37(2): 19-22.
SUN Yin, LYU Chao. Analysis of thermal stress and influencing factors of gas pipeline based on finite element method[J]. Journal of Xihua University, 2018, 37(2): 19-22.
- [15] 郭延军. 火力发电厂在役管道支吊架失效分析[J]. 热力发电, 2008(2): 84-86.
GUO Yanjun. Failure analysis of pipe supports and hangers in service of thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2008(2): 84-86.
- [16] 安慧, 安付立, 韩光辉, 等. 发电机组管道支吊架常见问题分析及处理[J]. 热力发电, 2012, 41(11): 80-82.
AN Hui, AN Fuli, HAN Guangwei, et al. Common problems and case study for pipe supports and hangers in power generating units[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(11): 80-82.
- [17] 刘明, 解鑫, 白佳. 一种在 CAESAR II 软件中建立拉撑杆限位实体单元的方法[J]. 理化检验(物理分册), 2019(11): 759-762.
LIU Ming, XIE Xin, BAI Jia. A method of establishing entity unit of tie rod limit in CAESAR II software[J]. PTCA(PHYS TEST), 2019, 11: 759-762.
- [18] 火力发电厂汽水管道应力计算技术规定: DL/T5366—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 1.
- Technical code for stress calculating of steam/water piping in fossil fuel power plant: DL/T5366—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 1.
- [19] 何青, 罗宁. 燃气蒸汽联合循环热电联产机组热经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 49-56.
HE Qing, LUO Ning. Thermal-economic analysis of combined heat and power generation unit of gas-steam combined cycle[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 49-56.
- [20] 臧向东. 燃气蒸汽联合循环余热锅炉的发展和研究[J]. 浙江电力, 2005(2): 5-9.
ZANG Xiangdong. Development and research of HRSG of gas-steam combined cycle[J]. Zhejiang Electric Power, 2005(2): 5-9.
- [21] 邢振中. 火力发电机组深度调峰技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013: 1.
XING Zhengzhen. Technology research on depth peak load cycling of thermal power generator units[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013: 1.
- [22] 梁木子. 发电站蒸汽管道支管及接管座温度场和热应力分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2007: 1.
LIANG Muzi. Temperature field and thermal stress analysis of the steam pipe and correlative branch pipe of power plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 1.
- [23] 殷尊, 蔡晖, 侯召堂, 等. 国产 1 000 MW 超超临界机组水冷壁管典型横向裂纹分析[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(3): 442-447.
YIN Zhun, CAI Hui, HOU Zhaotang, et al. Study on typical transverse crack of water wall tube of 1 000 MW domestic ultra-supercritical units[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(3): 442-447.
- [24] 李建杰, 石春生, 庾博园, 等. 汽轮机主蒸汽疏水管裂纹原因分析及处理措施[J]. 河北电力技术, 2013(6): 50-51.
LI Jianjie, SHI Chunshen, YU Boyuan, et al. Cause analysis and settlements on turbine main steam pipes cracks[J]. Hebei Electric Power Technology, 2013(6): 50-51.
- [25] 刘明, 朱伟雄, 丁勇能, 等. 启机阶段高温蒸汽管道弯头温度场及热应力分析[J]. 华电技术, 2019, 41(9): 18-21.
LIU Ming, ZHU Weixiong, DING Yongneng, et al. Analysis of temperature field and thermal stress of high-temperature steam pipe elbow in start-up stage[J]. Huadian Technology, 2019, 41(9): 18-21.

(责任编辑 邓玲惠)