

某燃气轮机电厂余热锅炉再热器 1 出口集箱 异常位移原因分析及对策研究

虞 辉,章 恂,濮鸿威

(华能南京燃机发电有限公司,南京 210046)

摘 要:本文叙述了某燃气轮机发电厂 1 号机组余热锅炉再热器 1 出口至再热器 2 进口集箱支吊架的运行时状态和存在的问题,支吊架调整前,再热器 1 出口集箱垂直方向热位移异常,集箱一端向下热位移不足,另一端反向向上翘曲。支吊架在状态检查以及其应力校验、核算的基础上,通过综合性的研究分析提出了该管道支吊架的调整方案并且依据方案对再热器 1 出口集箱载荷设计偏大的 2 组支吊架进行了更换。热态复核检验结果为支吊架承载应力及热位移量正常,管道热位移量正常,管系应力合格,达到了整治目标。

关 键 词:管道;支吊架;应力;调整

中图分类号:TK478 **文献标志码:**B **文章编号:**1009-2889(2019)04-0068-05

1 概述

某电厂 1 号 395 MW 燃气机组,余热锅炉型号为 Q2384\605-286(42.7)-10(0.4)\566.5(296.5),为高中低三压、无补燃、卧式、中间再热、自然循环余热锅炉。锅炉主要设计参数如表 1 所示。

表 1 余热锅炉主要设计参数

名 称	数值
高压部分最大连续蒸发量/(t·h ⁻¹)	286.426
高压部分额定蒸汽出口压力/MPa	10.01
高压部分额定蒸汽出口温度/℃	566.5
再热部分最大连续蒸发量/(t·h ⁻¹)	314.231
再热部分额定蒸汽出口压力/MPa	2.23
再热部分额定蒸汽出口温度/℃	566.2
再热部分冷再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	273.0
再热部分冷再热蒸汽温度/℃	364.7

支吊装置是管道系统的重要组成部分,支吊装置起到控制管道位移量和承受管道荷载的重要作用。管道系统的应力分布与其大小受支吊架安装位置、状态、规格类型的直接影响,其中支吊架质量的优劣、承载合理性等都影响到管道的安全运行和使

用的年限。

如果管道支吊架在其设计、安装过程中存在问题,在经过一段时间的运行之后,管线的形态、位置以及支吊架弹簧、吊杆等部件的性能均会发生一定的变化。若产生支吊架部件的破坏、过度承载、位移受限或欠载等问题,均会使管道局部区域的应力变化、对端点设备推力产生变化。这些情况将会严重地影响设备运行经济性和安全性。特别是当机组容量的增大,管道的直径、壁厚随之增大,发生问题的可能性和严重性也随之增加,对管道安装、运行、维护、监督提出了更高的要求。

该电厂#1 号燃气轮机在 2006 年投产以来未对各大主要管道的支吊架受力状况及运行情况进行系统性的检验、分析、调整,较多支吊架存在缺陷,尤其是再热器 1 出口集箱垂直方向热位移异常,集箱一端向下热位移不足,另一端反向向上翘起弯曲,存在影响管道使用寿命和安全生产运行的重大隐患。根据 DL/T616—2006^[1]规定:主蒸汽管道、高低温再热蒸汽管道、高压给水管道这些重要管道在投运 30 000 小时至 40 000 小时之后每次的大修,都应对管道的支吊架进行全面的检验、校核和调整,从而及

时解决管道支吊架在设计、安装和运行过程中产生的问题,及时消除因为支吊架受力不合理等原因产生的机组安全运行隐患。电厂利用大修机会对 1 号机组再热器 1 出口集箱支吊架进行检验、改造、调整,从而来改善管道与支吊架的运行状况,达到设备安全、经济运行的目的。

2 支吊架状态检验

支吊架状态的检查、校验和调整主要涵盖四个方面的内容;首先是审核查阅资料,根据设计资料,对支吊架逐一进行核对,检查各类支吊架的型号、热位移值的变化和工作参数等数据是否和原始设计符合;其次,检查支吊架,查看弹簧支吊架是否存在过载或欠载的情况,恒力弹簧支吊架内部结构件有无

表 2 再热器 1 出口集箱支吊架检查、校验结果统计表组

管系名称	恒力吊架	弹簧吊架	滑动支架	限位支架	数量合计	问题数量	问题比例/%
再热器 1 出口集箱	2	1	0	2	5	3	60.0

2.1 管道原始数据及设计计算复核

再热器 1 出口集箱主要技术数据参数见表 3。

表 3 再热器 1 出口集箱计算数据参数

管道规格 外径×壁厚/mm	材料	计算压力/ MPa	计算温度/ ℃
Φ609.6×17.48	A335P22	2.027	490
Φ168.3×7.11	A335P22	2.027	490

为了校核再热器 1 出口集箱的最初设计,依据这些管道的基本布置与设计参数,对管系进行了新的静态核算,从而得出了支吊架的吊点位移、荷重分配状态。

2.2 安装情况复核

根据再热器 1 出口集箱原始设计技术资料,对每一支吊架的型号、冷态荷重、热态荷重及安装位置进行核对。最后的校核结果表明,最初施工安装与设计相符合。

2.3 支吊架状态检验

再热器 1 出口集箱一共布置了 5 组支吊架,其中 2 组恒力吊架、1 组弹簧吊架、2 组限位支架。

检验结果表明:再热器 1 出口集箱一共有 3 组支吊架存在不同程度的问题,占有支吊架数的 60%。问题如下:

- 1) #1 单弹簧吊架过压缩,吊架过载。
- 2) #3 单恒力吊架,热态时恒力吊架位移指针指示于 50% 的位置,冷态时恒力吊架位移指针卡死于上极限位置。吊点处管道向下热位移明显不足。

卡死现象,记录冷态与热态的时候支吊架指针位置和热位移量的变化情况,依据这些内容判断、确认支吊架的运行状况;再次,计算管系的应力,校核支吊架的配备对管系应力所产生的影响,从而提供给支吊架调整的理论支持;最后,全面分析设计资料和支吊架检查检验、应力计算结果,提出针对性地改进方案并进行整改。检查结果统计表见表 2。

再热器 1 出口集箱管道支吊架的主要问题如下:

- 1) 再热器 1 出口集箱垂直方向热位移异常,集箱一端向下热位移不足,另一端反向上翘曲。
- 2) 恒力支吊架的位移指示器在极限位置受阻、卡死。
- 3) 弹簧支吊架承载存在欠载、过载现象。

3) #5 单恒力吊架,冷态及热态时恒力吊架位移指针都卡死于上极限的位置,热态时吊杆松弛,吊架失载,吊点附近的膨胀指示器显示热态时集箱反向上热位移。

3 计算与分析

3.1 管道应力验算方法

管道的静力计算是在确定温度、自重等外载力作用下,分析管道的应力分布、形态变化和支撑结构的约束反力等,然后以此为基准确定整个管系的薄弱点和关键部位,计算并评估管系的使用安全性、可靠性。

采用 CAESAR II 2011 软件对四大汽水管道的再热器 1 出口集箱进行应力校核计算,该软件符合 ASME B 31.1 等相关规范和标准的要求,在管道静力计算中得到了非常广泛应用。

为了便于分析和计算,依据力学中力的独立性原理,将管道应力分成两类,分别是由管道自身重量、内部压力和其他持续外部载荷产生的轴向应力之和(此为一次应力)与由热胀冷缩及其他位移受到约束限制而产生的热膨胀应力范围(此为二次应力)。

管道因为在工作、运行状态下,由于自身重量、内部压力和其他持续外部载荷产生的一次应力,不得超过钢材在设计温度下的基本许用应力。

$$\sigma_L = p D_i^2 / (D_o^2 - D_i^2) + 0.75 i M_A / W \leq 1.0 [\sigma]^t \tag{1}$$

式中： p —设计压力，MPa； D_o —管道外径，mm； D_i —管道内径，mm； M_A —自身重量和其他持续外载荷作用在管道横截面上所合成的力矩，N·mm； W —管道截面抗弯矩，mm³； $[\sigma]^t$ —钢材在设计温度下的许用应力，MPa； i —应力增强系数； σ_L —由于内部压力、自身重量和其他持续外载荷所产生的轴向应力之和，MPa。

管道由热胀冷缩和其它位移受约束力而产生的热应力范围必须满足以下计算式：

$$\sigma_E = i M_C / W \leq f [1.25 [\sigma]^{20} + 0.25 [\sigma]^t + ([\sigma]^t - \sigma_L)] \tag{2}$$

其中： $[\sigma]^{20}$ —管道钢材在 20℃时的许用应力，MPa； M_C —按照全补偿值与钢材在 20℃时弹性模量计算的，热胀所引起的合成力矩范围，N·mm； σ_E —热胀应力范围，MPa； σ_L —由于内部压力、自身重量和其他持续外载荷所产生的轴向应力之和，MPa； f —应力范围的减小系数。

预期电厂在运行年限之内，管道在全温度周期性中的交变次数 N 和系数 f 有关。

当 $N \leq 2\,500$ 时， $f = 1$ ；当 $N > 2\,500$ 时， $f = 4.78N - 0.2$ 。

3.2 管系应力计算对象及计算参数

本文计算对象为再热器 1 出口集箱。计算过程中对管道的冷紧力、三通以及阀门等刚性管件均作了相应处理或简化。在管系应力的计算中，需要有以下四类的基本参数：

- 1) 管材性能，包括弹性模量、材料许用应力及线性膨胀系数等；
- 2) 运行工况，包括运行中温度、压力及其波动范围值等；
- 3) 各种管道的几何尺寸，弯头、三通等管件的形状及尺寸与类型等；
- 4) 管道的保温状况。

管道计算所需的主要计算参数列于表 4，各参数为： t —计算温度，℃； P —计算压力，MPa； α —热膨胀系数，10⁻⁶/℃； E^{20} —钢材在 20℃时弹性模量，GPa； E^t —钢材在计算温度下弹性模量，GPa； $[\sigma]^{20}$ —钢材在 20℃时基本许用应力，MPa； $[\sigma]^t$ —钢材在计算温度下的许用应力，MPa； R —弯管弯曲半径，mm。

表 4 管道主要管材计算参数

外径×壁厚/mm	材料	P /MPa	t /℃	$\alpha^t/(10^{-6}/℃)$	E^{20} /GPa	E^t /GPa	R /mm	$[\sigma]^t$ /MPa	$[\sigma]^{20}$ /MPa
Φ609.6×17.48	A335P22	2.027	490	14.144	211.08	176.00	914	86.15	103.40
Φ168.3×7.11	A335P22	2.027	490	14.144	211.08	176.00	229	86.15	103.40

3.3 计算结果分析

再热器 1 出口集箱应力计算时支吊架的计算编号和施工图编号均保持一致。再热器 1 出口集箱的最大应力计算结果见表 5，其中同时给出了一次应力和二次应力的许用值，最大应力点的位置见图 1。

由表 5 可以知，再热器 1 的出口集箱支吊架经过调整后，管系中的各支吊架均处于正常的状态，且各次应力也均满足了管道的安全运行要求。其中第 2 类管材的 (Φ168.3×7.11 mm) 最大一次应力最高，为许用值的 47.88% (最大应力在 S3 点处)，第 1 类管材的 (Φ609.6×17.48 mm) 最大二次应力最高，为许用值的 22.98% (最大应力在 S2 点处)。

由表 6 可知，校核计算结果表明，#1 单弹簧吊架、#3 单恒力吊架及#5 单恒力吊架工作载荷均比原设计值小。由表 7 可知，支吊架在整改前，#3 单恒力吊架处管道向下的热位移量不足，#5 单恒力吊架向上反向热位移大；支吊架整改后，#3 单恒力吊架及#5 单恒力吊架均向下热位移，管道热位移状况得到了有效改善。分析认为，导致管道热位移异常的原因之一是原设计的支吊架载荷量过大，另一方面是恒力支吊架恒定度较大，当管道向下热位移时，#3 单恒力吊架载荷增加过多，致使#5 单恒力吊架处管

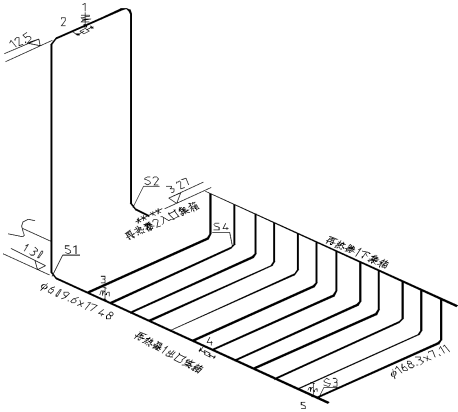


图 1 再热器 1 出口集箱支吊架与管系布置图

道反向向上翘起、弯曲。

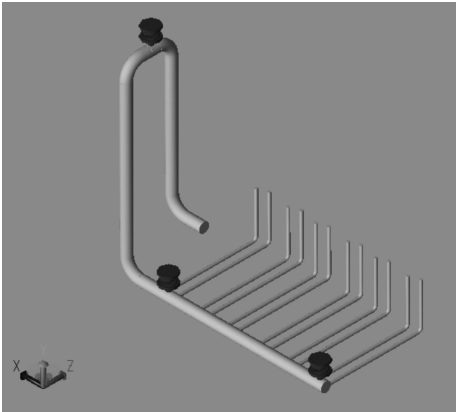


图 2 再热器 1 出口集箱应力计算校核模型图

4 对策研究

依据支吊架的检查、校核结果与管系的计算结果报告,整体分析和评估后提出支吊架调整、改造的方案。根据管道和支吊架所出现的问题,区分性质。依次采取下列主要的调整、改造办法:

- 1) 对设计中不合理的支吊架进行重新计算以及更换处理;
- 2) 对承载状态不正确(过载、欠载、失载)的弹簧和刚性吊架进行调整处理。

以上措施的实施,将使支吊架处于正常的设计工作状态,管道应力的合理分布将确保管线的热态、冷态荷载的分布和热膨胀满足设计计算的要求,最终实现管系的长期、安全、稳定的经济运行目的。

表 5 再热器 1 出口集箱主要管种最大应力计算校核结果

序号	管种	应力分类	最大应力计算值/MPa	应力许用值/MPa	计算值/许用值/%	最大应力点位置
1	Φ609.6×17.48 mm	σ_1	30.76	86.16	35.70	S_1
		σ_2	49.12	213.77	22.98	S_2
2	Φ168.3×7.11 mm	σ_1	41.25	86.16	47.88	S_3
		σ_2	19.88	218.20	9.11	S_4

表 6 再热器 1 出口集箱恒力支吊架工作载荷量对比表

吊架编号	原设计		校核计算	
	工作载荷/N	垂直热位移/mm	工作载荷/N	垂直热位移/mm
#1 单弹簧吊架	121 358	-60	113 937	-77
#3 单恒力吊架	45 000	-190	43 432	-148
#5 单恒力吊架	45 000	-190	31 025	-157

表 7 再热器 1 出口集箱恒力支吊架整改前后的热位移量对比表

吊架编号	原设计	校核计算	整改前	整改后
	垂直热位移	垂直热位移	实际垂直热位移	实际垂直热位移
#3 单恒力吊架	-190	-148	-100	-120
#5 单恒力吊架	-190	-157	+5(反向)	-150

注:实际热位移均分别从安装于#3、#5 吊架管部的膨胀指示器上读数所得。

1 号机组再热器 1 出口集箱调整细节见调整方案表 8。

- 1) 坐标系约定如下:从始建端指向扩建端方向为正方向 X,从汽轮机指向锅炉方向为正方向 Z,垂直向上为正方向 Y。
- 2) 表 8 中吊点参数为原设计值。

- 3) 支吊架状态栏中恒力弹簧吊架的位移指针刻度位置规定为:恒力吊架弹簧由极致松弛位置到极致拉紧位置相对应的刻度为 0% 到 100%。恒力弹簧支吊架的上极限对应弹簧极致松弛位,下极限对应弹簧极致拉紧位。

表 8 再热器 1 出口集箱支吊架调整方案

支吊架编号及型式	工作载荷/kg	垂直方向热位移/mm	支吊架状态检验结果	冷态调整措施
#1 单弹簧吊架	12 135.6	-60	弹簧过压缩,吊架过载。弹簧型号为 TD90C22。	放松吊杆,调节弹簧承载,使其状态正常。
#2 限位支架	/	/	未发现异常。	无需调整。
#3 单恒力吊架	4 500	-190	热态时候恒吊位置指示器处于 50% 的位置。冷态时恒吊位置指示器处于卡死在上极限位置。管道向下热位移不足。定位销安装位置错误,但恒力支吊架转动机构并未与其卡碰。	应力计算结果表明,原设计支吊架载荷过大,管道向下热位移量不足。根据应力计算结果重新选型载荷偏小的恒力支吊架,将其更换。
#4X 向限位支架	/	-190	未发现异常。	无需调整。
#5 单恒力吊架	4 500	-190	冷态与热态时恒吊位移指针均卡死于上极限位置,热态时吊杆松弛,吊架失载,吊点附近的膨胀指示器显示集箱反向向上热位移 +5mm。定位销安装位置错误,但恒力支吊架转动机构并未与其卡碰。	应力计算结果表明,原设计的支吊架载荷偏大,管道向下热位移受阻。根据应力计算结果重新选型载荷偏小的恒力支吊架,将其更换。

5 热态复查

改造完成后机组重新启动正常运行,对再热器 1 出口集箱支吊架进行了全面热态复查、检验。结果表明,经过改造以后支吊架的运行状态得到了明显改善,支吊架的承载均正常,管道热位移量正常,能够满足机组安全、稳定运行要求,达到了项目预期目的。

6 结论

- 1) 支吊架在整改前,再热器 1 出口集箱支吊架工作状态异常,严重影响设备的长期安全、稳定运行,突出的问题是恒力吊架位移指针卡死在极限位置、弹簧支吊架过载。
- 2) 支吊架在整改前,再热器 1 出口集箱一端向下热位移量不足,另一端反向向上翘起弯曲;支吊架

整改后,管道的垂直热位移状态得到了明显的改善,能满足管道正常运行的要求;应力校核计算结果表明,支吊架的原设计载荷偏大是再热器 1 出口集箱热位移发生异常的主要原因。

参考文献:

[1] 杨晓伟,李国明,谢澄,等. 600MW 机组主再热蒸汽及旁路系统管道支吊架调整与优化[J]. 浙江电力,2016,35(4):54-58.

[2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 火力发电厂汽水管道路与支吊架维护调整导则: DL/T616—2006[S]. 北京,中国电力出版社,2006:3-6.

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 火力发电厂汽水管道路应力计算技术规程: DL/T5366—2006[S]. 北京,中国电力出版社,2006:17-19.

[4] 中华人民共和国电力工业部. 火力发电厂汽水管道路设计技术规定:DL/T5054—1996[S]. 北京,中国电力出版社,1996:36-43.

(下转第 38 页)

9E Class Gas Turbine Part – load Performance Enhance Technology-Intake Heating Study and Engineering Application

Hao Hongliang¹, Sun Guobin², Liu Jun², Zhu Hongfei¹,
Yan Zhiyuan¹, Zhang Tao¹, Yang Gensheng¹

(1. GuoDian Science and Technology Research Institute Co. , Ltd. , Nanjing 210033, China;
2. Tianjin Huadian Fuyuan Thermal Power Co. , Ltd. ,Tianjin 301700,China)

Abstract: Based on the introduction of the operating characteristics of gas turbine and the current situation of gas turbine power generation industry in China, simulation and operation data analysis of part-load operation of gas turbine is studied. Based on the operating data of gas turbine power plant, the problems of efficiency attenuation and energy waste in part-load operation of gas turbine generally exists. In view of the operation status, this paper studies the influence of gas turbine inlet air temperature adjustment on the performance of combined cycle units under partial load by analyzing the actual operation data of PG9171E type gas turbine units and simulating the power plant model. At the same time, according to the research results, a technical route of gas turbine part-load performance enhance technology,which is called inlet air heating, using low-grade waste heat of gas combined cycle system as heat source is proposed. And the application of this technology in different types of gas turbine in China is studied. The results show that the design of inlet air heating system is concise and the inlet air heating technology is applicable to most of the gas turbine in China and can significantly improve the operating efficiency of gas turbine under part-load conditions.

Key words:gas turbine; performance optimize; inlet air heating

.....
(上接第 72 页)

Cause Analysis and Countermeasure Research on Abnormal Displacement of Reheater 1 Outlet Header of Waste Heat Boiler in a Gas-fired Power Plant

Yu Hui,Zhang Xun,Pu Hongwei
(Huaneng Nanjing Gas Turbine Power Generation Co. , Ltd. , Nanjing 210046, China)

Abstract: This paper describes the operation status and existing problems of the header support suspension of the waste heat boiler of unit 1 of a gas turbine power plant from the outlet of reheater 1 to the inlet of reheater 2. Before the adjustment of the support suspension, the vertical thermal displacement of the header at the outlet of reheater 1 is abnormal, the downward thermal displacement at one end of the header is insufficient, and the reverse upward warping at the other end. On the basis of condition checking, stress checking and calculation, the adjustment scheme of the pipeline support and hanger is put forward through comprehensive research and analysis. According to the scheme, two groups of support and hanger with larger design load on the outlet header of reheater 1 are replaced. The results of thermal inspection show that the load-bearing stress and thermal displacement of the support and hanger are normal, the thermal displacement of the pipeline is normal, and the stress of the pipeline system is qualified, which achieves the renovation goal.

Key words:pipe; support and hanger; stress; adjustment