● 材料失效分析 Material Failure Analysis ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.05.020

某工业锅炉过热器管变形原因分析及改进措施

王 皎,黎 明,和 宇,王 萌
(西安特种设备检验检测院,陕西 西安 710065)

摘 要:针对某工业锅炉过热器管的变形,通过对其材质、结构以及运行中的流体进行分析。结果表明,过热器管变形的主要原因是锅炉火焰过长,锅炉燃烧器启动时过热器处于干烧状态。另外,锅炉液态水进入过热器管,水在管子下部,汽在上部,致使管子周向温度不均。根据变形原因提出了过热器管变形的预防措施,即调整火焰长度、提高锅炉汽水分离效果、将逆流布置的过热器改为顺流布置,同时过热器管采用合金钢材质。

关键词:过热器管;变形分析;材质;蒸汽流向

中图分类号:TK229 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)05-0495-03

Deformation Analysis and Improvement Measures of Superheater Tubes in an Industrial Boiler

WANG Jiao, LI Ming, HE Yu, WANG Meng
(Xi'an Special Equipment Inspection and Testing Institute, Xi 'an 710065, China)

Abstract: According to the deformation of superheater tube of an industrial boiler, the materials, structure and fluid in operation are analyzed. The results show that the main reason for the deformation of the superheater tube is that the flame of the boiler is too long and the superheater is in dry burning state when the boiler burner is started. In addition, the boiler water into the superheater pipe, water in the lower part of the pipe, steam in the upper part, resulting in the pipe circumference temperature is uneven. According to the reason of deformation, the preventive measures of superheater tube deformation are put forward, that is, adjusting the flame length, improving the steam separation effect of boiler, changing the superheater arranged upstream to the downstream, and the superheater tube is made of alloy steel.

Key words: superheater tubes; deformation analysis; material; steam flow field

锅炉过热器,即采用蛇形排管方式吸收锅炉高温烟气的热量,将锅炉锅筒出来、流经过热器的饱和蒸汽继续加热到所需的过热蒸汽温度,以满足生产工艺需要的受热部件。过热器一般是由多根ϕ38~45 mm的无缝钢管弯制而成的蛇形管,两端分别与过热器进口集箱和出口集箱焊接相连,过热器进口集箱通过管道与锅炉锅筒相连,过热器出口集箱通过管道与锅炉分汽缸或主汽阀相连。过热器内流动的是高温过热蒸汽,过热器是靠管内蒸汽的流动及时将管外的高温烟气给予的热量带走,如果过热器管内无工质或者蒸汽侧传热恶化,都会使过热器管金属壁温度升高、金属机械性能下降,造成过热器管变形,甚至爆管[1]。再加之过热器一般布置在高温烟区,过热器管壁温度较高。因此,过热器管是工作条件最差的受热面。过热器分为垂直式和水平式过热器。工业用小型锅炉中,当生产需要使用过热蒸汽时,才设置过热器[2]。工业锅炉在实际运行过程中,会有多方面原因造成过热器管变形甚至爆管,严重缩短过热器寿命,极大影响锅炉的安全性和经济性。因此如何使过热器管能长期安全工作是过热器设计和运行中的一个重要问题。

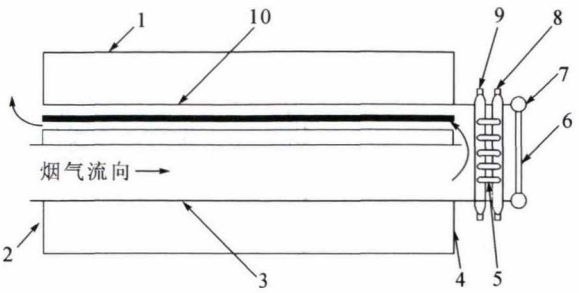
1 使用背景

某锅炉厂1987年生产的一台带过热器的两回程卧式内燃燃油蒸汽锅壳锅炉,型号为WNS4-1.27-Y,额定蒸汽压力为1.27 MPa,额定蒸发量为4 t/h。该锅炉主要用于某高校汽轮机专业试验教学,其实际使用压力为0.8 MPa,实际蒸发量为2 t/h,过热器出口蒸汽温度约270 ℃。该锅炉结构如图1所示。

该锅炉过热器管采用20#钢管,规格为ϕ32 mm×3 mm。过热器为水平布置,如图2所示。该过热器内工质既吸收炉内直接辐射热,又吸收烟气的对流放热。

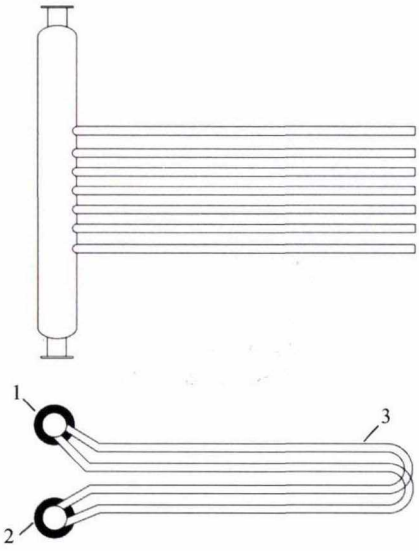
2018年10月在对该锅炉进行内部检验时发现锅炉后部过热器管严重变形,变形量最大处约

收稿日期:2020-02-20
基金项目:陕西省质量技术监督局系统科研项目资助(2018KY03)
作者简介:王 皎(1987-),女,陕西西安人,硕士,工程师.主要从事承压类特种设备检验检测方面的工作.
电话:18991846261,E-mail:w_jiao0901@163.com



1- 筒形壳体;2- 前管板;3- 炉胆;4- 后管板;5- 过热器管;6- 后管墙;7- 后管墙集箱;8- 过热器进口集箱;9- 过热器出口集箱 10- 烟管

图 1 WNS4-1.27-Y 两回程锅炉示意图
Fig.1 Schematic diagram of WNS4-1.27-Y two return trip boiler



1- 进口集箱;2- 出口集箱;3- 换热器管

图 2 锅炉过热器
Fig.2 Boiler superheater

70 mm,超过两倍管子直径,如图 3 所示。其中,过热器管直径为 32 mm。查阅该锅炉以往内部检验报告及相关资料,所知该锅炉在运行期间也未发生超温超负荷现象,锅炉的水汽质量也符合相关国家标准要求。该锅炉过热器管并非第一次变形,以往均采取更换过热器管的方式修复锅炉过热器。为防止本次更换后的过热器管再次出现变形,对过热器变形的原因进行分析,从根本上防止其再次发生变形。

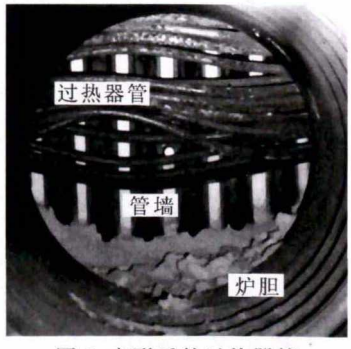


图 3 变形后的过热器管
Fig.3 Deformed superheater tube

2 过热器变形原因

2.1 锅炉烟气流程及汽水流程

为更好地分析过热器管变形原因，首先应了解该锅炉的烟气流程和汽水流程。该锅炉燃料经燃烧器高速喷入炉胆内，与空气混合后进行燃烧形成高温烟气,高温烟气经炉胆进入后烟室,折转 180°,通过螺纹烟管管束返回前烟箱,再经烟囱排向大气,属于两回程锅炉。过热器管处于后烟室,即第一回程末端,该处为烟气高温区。

锅炉汽水流程:给水经给水泵加压进入锅壳,与烟管管束进行对流换热,形成饱和蒸汽,饱和蒸汽经过热器进口集箱再分配至过热器管，与过热器管外的高温烟气换热,形成过热蒸汽,过热蒸汽再经过热器出口集箱至分汽缸,供给生产。

2.2 过热器变形原因分析

首先，该锅炉为两回程锅炉，采用燃料油为燃料,经使用单位锅炉安全管理人员及操作人员反映,该燃烧器中心火焰长度较长，大火运行时火焰会直接冲刷过热器管，致使过热器管壁温度高于其设计温度,这是过热器管子变形的重要原因。

其次,锅炉在启动时,燃烧器已开始工作,此时高温烟气开始冲刷过热器，但锅炉内还未产生饱和蒸汽,工质也未到达锅炉尾部的过热器,过热器处于无蒸汽冷却的干烧状态。短时间内过热器管便会被流经过的高温烟气加热至与高温烟气相近的温度,导致出现过热器管金属超温,乃至变形。

再次，锅炉锅壳内产生的饱和蒸汽进入过热器时,如果汽水分离效果不理想,会附带着液态水一起进入过热器管子,液体水较蒸汽质量大,水在下部、汽在上部,会出现汽、水分层。由于汽、水的对流换热系数不同，水的相变的换热系数约为高压水蒸汽的数十倍[3],从而使液态水所处的下部管壁的降温效果优于蒸汽所处的上部管壁，使过热器管子上部壁温高于下部,管壁存在周向温度不均。同时在汽水分界面处形成温差应力,且由于分界面的波动,管壁会出现交变的温差应力。久而久之,会导致过热器管超温变形。

最后,该过热器管水平布置,管内蒸汽流向与烟气流向呈逆流[2],如图 4 所示。对于逆流布置的过热器,蒸汽温度高的那一段处于烟气高温区,即过热器前侧。此处的过热器管外壁吸收较高温度烟气的热量,同时管内壁的蒸汽温度也较高,导致过热器前侧金属壁温较后侧高,从而加剧过热器前侧管子变形。

如果锅炉水侧存在水垢,水垢的导热系数较小,

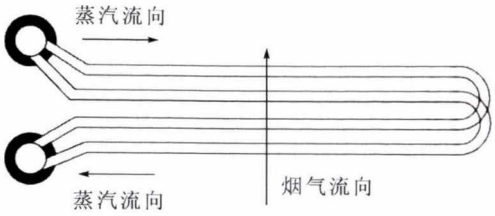


图 4 逆流式过热器
Fig.4 Counterflow superheater

仅为钢铁导热能力的 1/40 至 1/30，结垢会直接影响锅炉的传热效果和金属壁温，锅炉结垢处的金属壁温过高会导致材料过热变形。

查阅该锅炉水汽质量检验报告，锅炉的水汽质量也符合相关国家标准要求，本台锅炉经过内部检验，未发现锅炉水侧有明显的结垢，过热器管子内部也不存在结垢现象，基本可以排除水垢原因造成的过热器管子变形。

3 解决措施

首先，为保证过热器管子金属得到足够冷却，管内工质必须保证一定的流速，流速越高，管子的冷却效果越好，但流速越高工质的压降也越大，因此选择合理的工质流速极其重要[2]。尤其是在锅炉启停时，应保证过热器内充满工质，防止过热器处于干烧状态。同时应调整火焰长度及火焰中心位置，并将过热器管布置在远离热负荷最高的火焰中心处，以防火焰及高温烟气直接冲刷过热器管。

其次，改进锅筒内汽水分离器结构及型式以提高汽水分离效果，同时在锅炉运行时，司炉工应随时关注锅炉水位，并及时调节锅炉水位，避免高水位运行，以减少蒸汽进入过热器时的带水量，进而避免过热器管内出现汽、水分层现象，从而改善过热器管壁周向温度不均现象，同时也减少过热器管汽水分层处管壁的温差应力。

再次，应将逆流布置的过热器改为顺流布置，如图 5 所示。与逆流布置的过热器相比，顺流布置时，蒸汽温度高的那一段处于烟气低温区，即过热器后侧。此处的过热器管外壁的烟气温度较过热器前侧的烟气温度较低，致使整个过热器的温度分布较逆流布置的过热器均匀，减少各平行管子之间的热偏差[2]，安全性也较好。当然还有混流布置的过热器，但考虑到经济性，对于该锅炉过热器没有必要采取混流布置，本文将不作讨论。

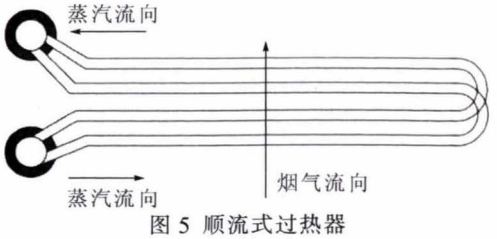


图 5 顺流式过热器
Fig.5 Downstream superheater

最后，《锅炉定期检验规则》中 2.6.3.2 条规定：水管管子直段弯曲变形量超过其长度的 2%却超过管子公称直径，应当进行修理(复位、挖补、更换)[4]。该锅炉后部过热器管严重变形，变形量最大处约 70 mm，超过两倍管子直径(过热管直径 ϕ 为 32mm)，因此应该通过更换过热器管来修复锅炉过热器。

以往更换的过热器管材质为 20#，查阅《锅炉安全技术监察规程》，即表 1[5]可知：该锅炉过热器材料选择是符合现行国家安全技术规范中的工作压力的适用范围。

表 1 锅炉用钢管材料
Tab.1 Steel tube materials for boiler

钢的种类	牌号	标准编号	适用范围		
			用途	工作压力 /MPa	壁温 /℃
	10,20	GB/T 8163	受热面管子	≤1.6	≤350
			集箱、管道		≤350

如果以上三种措施仍无法改善过热器管超温变形情况，锅炉运行中该过热器管壁温度超过了 20# 钢的许用温度，那么 20# 钢就无法满足该过热器的使用要求，必须采用更耐高温的合金钢管作为过热器管。

4 结束语

工业锅炉过热器的工作条件较为恶劣，因其变形导致锅炉停炉检修、甚至爆管等安全事故的几率很大，过热器变形造成的经济损失及安全问题是无法预估的。因此本文针对某两回程工业锅炉过热器管变形，本着以预防为主的态度，科学分析过热器管变形原因。锅炉火焰过长、锅炉启动时过热器处于干烧状态、以及锅炉液态水进入过热器管时水在下汽在上的流场分布致使管子周向温度不均，是导致过热气管变形的主要原因。依据上述变形原因，提出预防过热器管变形的主要措施，即调整火焰长度、提高锅炉汽水分离效果、将逆流布置的过热器改为顺流布置，如果以上措施还无法改善过热器管超温变形情况，则需要将过热器管材质更换为合金钢管。

参考文献：

[1] 华金宏，李延静. 低参数运行对工业锅炉过热器的影响及预防[J]. 青岛远洋船员学院学报, 2002, 23(3): 73-76.
[2] 车得福，庄正宁，李军，等. 锅炉[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
[3] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社. 1998.
[4] TSG G7002-2015, 锅炉定期检验规则[S].
[5] TSG G0001-2012, 锅炉安全技术监察规程[S].