

火力发电厂锅炉屏式过热器弯管泄漏失效原因分析及预防措施

蒋 涛

(大唐东北电力试验研究院有限公司, 吉林 长春 130012)

摘 要:某 600 MW 发电机组锅炉屏式过热器发生漏泄,造成机组非正常停机。通过现场检查、宏观、微观、测厚及化学成分分析,结合金相组织以及硬度分析,综合判断了管材失效的原因。结果表明,屏式过热器最内圈弯管不合理的结构及长周期的交变载荷作用,使弯管外壁内弧面产生横向疲劳裂纹,并向内壁扩展。高温高压蒸汽在该位置发生初始泄漏,连锁吹损其它管段,最终导致事故的发生;内壁表面加工划痕沟槽等原始缺陷是过热器弯管中性面的裂纹源,在爆裂及蒸汽泄漏过程的影响下向外壁扩展,形成贯穿性裂口。为防止类似事故再次发生,在检修、监督、设计及制造等方面均提出了相应的预防措施。

关键词:屏式过热器;弯管;中性面;内弧面;泄漏

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)03-0224-05

Analysis and Prevention of Platen Superheater Elbow Leakage of Supercritical Boiler in a Coal-fired Power Plant

JIANG Tao

(Datang Northeast Electric Power Test and Research Institute, Changchun 130012, China)

Abstract: Leakage of platen superheater in a 600 MW Power Unit resulted an abnormal shutdown. The causes of superheater leaking were analyzed and studied through on-site inspection, macroscopic, microscopic, thickness measurement, chemical composition analysis, combined with metallographic structure analysis and hardness analysis. The results show that the transverse fatigue cracks occur on the inner arc surface of the outer wall of the tube and extend to the inner wall due to the unreasonable structure of the tube and the long period of alternating load. The initial leakage of high temperature and high pressure steam in this position leads to the chain blowing of other pipe sections, which ultimately leads to the occurrence of the unit shut down abnormally; The original defects, such as scratches and grooves, are the source of cracks in the neutral surface of the superheater elbow, which expand to the outer wall and form penetrating cracks under the influence of the process of burst and steam leakage. In order to prevent similar accidents from happening again, corresponding preventive measures are put forward in maintenance, supervision, design and manufacturing.

Key words: platen superheater; elbow tube; neutral plane; intrados; leakage

依据“碳达峰”、“碳中和”的远景规划,我国大力发展和布局新能源产业,传统火力发电厂锅炉逐渐调整其功能定位,向着高参数、大容量以及灵活参与调峰的方向发展^[1]。在机组参数性能指标提升的同时,锅炉部件及其材料的服役条件也越来越苛刻。过热器管是电厂锅炉的重要组成部分,其服役温度高、承受压力大、使用环境复杂,极易发生蠕变、磨损、应力腐蚀开裂、热疲劳、高温腐蚀等失效,造成锅炉的紧急停运,严重影响电厂的安全经济稳

定运行^[2-8]。12Cr1MoVG 是低合金珠光体型耐热钢,具有较好的强韧性和抗蠕变性能、良好的抗高温氧化和耐腐蚀性能,以及出色的冷、热加工工艺性能和焊接性能,出于综合考虑,多用于亚临界电站锅炉的过热器低温段部分^[9]。本文作者研究了某 600 MW 机组屏式过热器 12Cr1MoVG 弯管泄漏失效特征及原因,为预防同类型问题提供了借鉴。

1 背景

近日,某电厂锅炉屏式过热器发生漏泄,造成机组非正常停机。该锅炉为 SG-2028/17.5-M916 型 600 MW 亚临界参数控制循环汽包 II 型锅炉,全钢架悬吊结构、露天布置、单炉膛、直流四角切向燃烧、一次再热、平衡通风、固态排渣。截止事发,锅炉累计

收稿日期: 2021-11-02

作者简介: 蒋 涛(1992—), 硕士, 工程师。主要从事腐蚀、焊接、材料失效与分析、无损检测方面的工作。

电话: 17390019550, Email: jiangtaoxingsu@126.com

运行时间约 7 万 h。该锅炉屏式过热器是由 36 片小屏分成 6 层分隔,布置于炉膛上方,每小屏包含 10 根回路管。回路管设计规格为 $\phi 57.0 \text{ mm} \times 6.5 \text{ mm}$,材质为 12Cr1MoVG,服役环境温度为 475 $^{\circ}\text{C}$,蒸汽介质压力为 17.47 MPa。

2 试验及结果

2.1 现场检查

停机冷却后,进入锅炉内部进行现场检查,发现漏泄管位于屏式过热器第 3 层中的第 5 小屏。该小屏中有 3 根管出现不同程度的损伤,分布于内 3 圈 U 型弯及相邻上部区域,如图 1 所示。图 1 中的数字标记点为壁厚测量点、硬度测量点以及金相检查点。

在最内圈 U 型弯管上部发现长度约 110 mm 爆口(图 1 中一号位置),边缘锋利,部分翻卷,周围区域有范围性吹损减薄痕迹;在弯管中性面位置,存在弧长约 60 mm 的贯穿裂纹(图 1 中二号位置),裂口微张,两端有延伸扩展趋势;在弯管的内弧面位置,发现一系列横向裂纹,最长裂口约为 30 mm (图 1 中三号位置)。

在次内圈 U 型弯管上部发现漏点 3 处,其中位置靠下的漏点呈现扁条状(图 1 中四号位置),长度约 30 mm,与三号位置损伤方向正对,附近吹损减薄痕迹呈环向凹槽状;位置靠上两处漏点呈现孔状(图 1 中五号位置),与一号位置爆口损伤方向相对。另外,在第 3 内圈 U 型弯管上部发现漏点两处,呈现孔状(图 1 中六号位置),也正对爆口方向。同时,在第 4~6 内圈 U 型弯管上部也存在明显的吹损减薄痕迹。

经扩大范围检查,发现在屏式过热器其它小屏的最内圈弯管内弧面位置,同样存在相似的横向裂纹,但并未裂透,如图 2 所示。

2.2 宏观分析

将第 5 小屏中最内圈 U 型弯管弯头部分割管取样分析,观察管材内外壁情况。发现弯管中性面裂纹齐整,内外壁均未见明显的吹损冲刷痕迹。在贯穿裂纹的对侧,存在明显的加工划痕沟槽,如图 3 所示。此外,弯管内弧面横向裂纹已延伸至内壁,外壁裂纹宽度大于内壁裂纹宽度,外壁裂口有一定的向外冲刷倾角,周边表面较为光亮,如图 4 所示。

2.3 微观分析

对最内圈 U 型弯管弯头中性面开裂位置进一

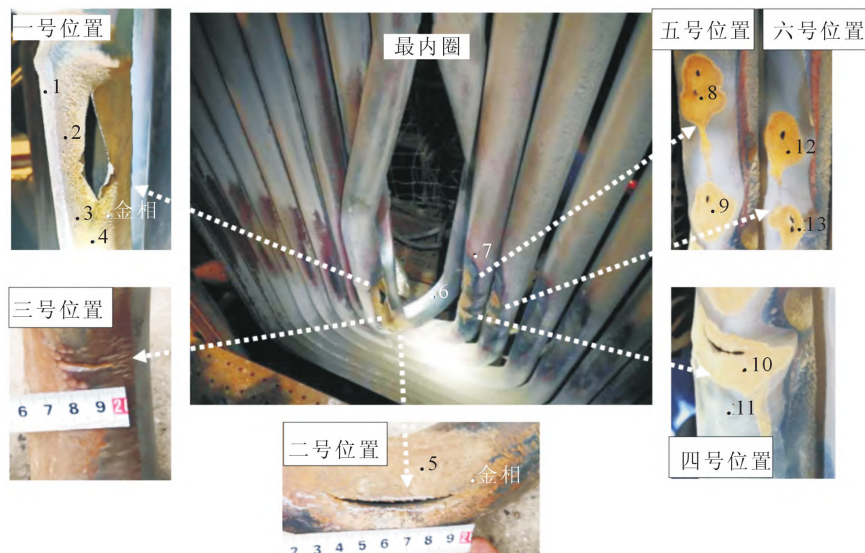


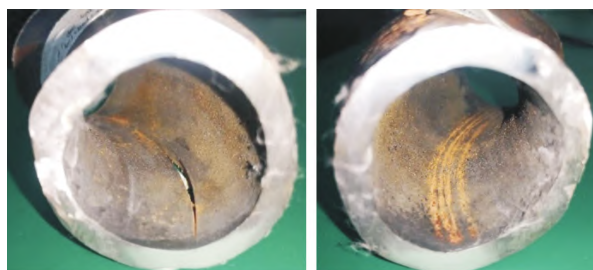
图 1 第 5 小屏整体损伤情况

Fig.1 the overall damage of the 5 th platen



图 2 其它小屏弯管内弧面损伤

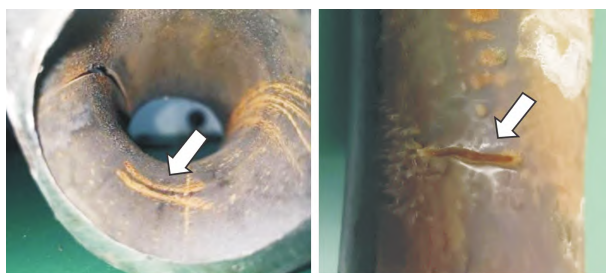
Fig.2 Damages on the intrados of elbow tubes of other small platens



(a) 贯穿裂纹侧 (b) 贯穿裂纹对侧

图3 最内圈 U 型弯管中性面内壁宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphologies of inside wall of neutral plane of the most inner U-shaped elbow



(a) 内壁 (b) 外壁

图4 最内圈 U 型弯管内弧面内外壁宏观形貌

Fig.4 Macroscopic morphologies of wall inside and outside of the most inner U-shaped elbow

步取样进行截面微观分析。如图 5 所示, 管内壁仍存在向外壁扩展的裂纹, 此截面处裂纹长度约为 1 mm。

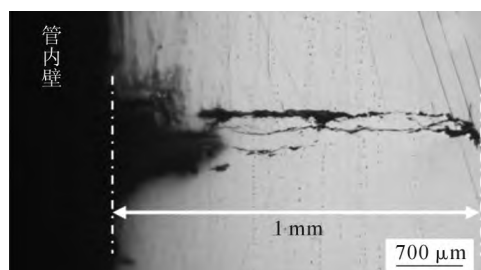


图5 最内圈 U 型弯管中性面某截面微观形貌

Fig.5 Microscopic morphologies of a section along the neutral plane of the most inner U-shaped elbow

2.4 测厚分析

采用 DM5E 测厚仪对第 5 小屏中内三圈 U 型弯管进行厚度测量分析, 测量点为图 1 中数字标记点, 测量结果见表 1。依据 DL/T 5366-2014《发电厂汽水管道应力计算技术规程》, 屏式过热器管材的

表1 壁厚测量结果

Tab.1 The results of wall thickness measurement

测量点	平均值 /mm	测量点	平均值 /mm
1	6.43	8	2.88
2	3.64	9	1.67
3	2.04	10	2.02
4	3.83	11	3.75
5	6.30	12	1.85
6	6.40	13	1.78
7	6.42		

计算壁厚为 3.48 mm, 最小壁厚为 3.98 mm。由表 1 可见图 1 中一号位置、四号位置、五号位置、六号位置周围管材部分测量点壁厚已减薄至小于计算壁厚及最小壁厚, 不满足实际使用需求。

2.5 化学成分分析

采用 SPECTROMAXx 台式光谱仪对屏式过热器 U 型弯管进行化学成分分析, 分析结果如表 2 所示。通过所测数据可知, 内三圈管材的化学成分符合标准 GB/T 5310-2017《高压锅炉用无缝钢管中》对 12Cr1MoVG 化学成分的要求。

2.6 金相组织分析

通过 Axio Observer A1m 台式显微镜对第 5 小屏中最内圈 U 型弯管进行金相分析, 取样位置见图 1 所示金相标记点, 分别为一号爆口附近位置和二号弯管中性面开裂附近位置。可以发现, 两处管材组织为铁素体 + 珠光体, 珠光体区域已显著分散, 但仍保留原有的区域形态, 颗粒状碳化物在晶界上增多、增大, 如图 6 所示。依据 DL/T 773-2016《火电厂用 12Cr1MoV 钢球化评级标准》, 金相组织球化等级均为 3.5 级。

2.7 硬度分析

利用 THB-3000S 型布氏硬度计对第 5 小屏中内两圈 U 型弯管进行硬度检测, 硬质合金球直径 2.5 mm, 检测力为 187.5 kgf, 保持时间 10 s, 检测点为图 1 中数字标记点, 检测结果如表 3 所示。GB/T 5310-2017《高压锅炉用无缝钢管中》对 12Cr1MoVG 规定的母材硬度值为 135~195 HBW。由此可知, 测试管段硬度均符合标准要求。

表2 化学成分分析结果 w(%)

Tab.2 Chemical composition analysis results of the steel

	Cr	Mo	V	C	S	P	Mn	Si	Fe
GB/T 5310-2017	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30	0.08~0.15	≤0.010	≤0.025	0.40~0.70	0.17~0.37	余量
最内圈	1.034	0.336	0.29	0.132	0.010	0.025	0.58	0.29	余量
次内圈	0.996	0.347	0.28	0.145	0.010	0.024	0.59	0.30	余量
第3内圈	1.071	0.342	0.29	0.144	0.010	0.025	0.58	0.26	余量

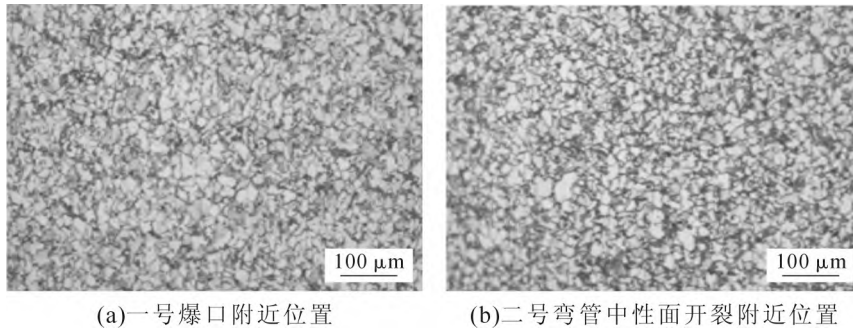


图 6 最内圈 U 型弯管管材金相组织

Fig.6 Microstructures of the most inner U-shaped elbow tubes

表3 硬度测量结果(HBW)

Tab.3 The results of hardness measurement

检测点	第 1 次	第 2 次	第 3 次	硬度平均值
1	176.5	174.9	172.1	174.5
5	183.4	180.6	177.4	180.5
6	177.3	170.5	178.1	175.3
7	178.7	179.0	181.9	179.9

3 讨论与分析

3.1 屏式过热器失效过程讨论分析

由上述结果可知,屏式过热器管材化学成分正常,金相组织无异常,硬度符合标准要求,说明屏式过热器在运行中无明显过热过烧现象。根据现场检查情况,过热器管屏中出现多处损伤,图 1 中一号位置、四号位置、五号位置以及六号位置附近均测得明显减薄。因此,这些位置出现的爆口损伤是发生泄漏后蒸汽吹损所致,并非泄漏初始位置。

二号位置与三号位置的损伤均在过热器最内圈 U 型弯管弯头部分。结合宏观分析结果,二号弯头中性面位置裂纹齐整,内外壁均未见明显的吹损冲刷痕迹,并且其裂口方向与其它位置损伤方向空间垂直。而三号弯头内弧面位置横向裂纹已延伸透至内壁,外壁裂口有一定的向外冲刷倾角,周边表面较为光亮,并且其裂口方向正对四号位置。因此可以判断,三号弯头内弧面位置为初始泄漏位置。

当高温高压蒸汽首先在三号位置向外泄露后,吹损对侧的四号位置,致使四号位置管材出现环向凹槽状减薄;一段时间后,四号位置壁厚减至不满足强度要求,在内压的作用下,该位置发生扁条状爆口泄漏。四号位置产生漏点后,喷出的高压蒸汽大面积冲刷对侧水平位置,致使最内圈 U 型弯管上部出现范围性吹损减薄;一段时间后,一号位置壁厚不满足强度要求,致该位置产生长度约 110 mm 爆口。一号爆口位置喷出大量的高压蒸汽,吹损对侧的五号位置、六号位置以及第 4-6 内圈 U 型弯管上部位置,最终形成 4 处孔状爆口泄漏点和管材减

薄。具体模拟失效过程如示意图 7 所示。

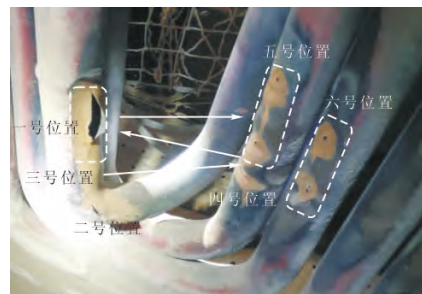


图 7 失效过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of the failure process

3.2 弯管内弧面裂纹产生原因讨论分析

通过上述讨论可知,弯管内弧面裂纹位置为初始泄漏位置。在现场扩大范围检查过程中,发现在屏式过热器其它小屏的最内圈弯管内弧面位置,同样存在相似的环向裂纹(图 2),但尚未引发泄漏事故。因此,弯管内弧面横向裂纹始发于管壁外表面,在运行过程中不断向内扩展,直至完全开裂延伸至内壁,引发管屏泄漏^[10-11]。

根据弯管内弧面系列横向裂纹的形貌特征,说明其产生的原因是经过长时间的交变应力载荷疲劳造成的。锅炉在累计运行时间约 7 万小时的过程中,由于该处管材多为弯曲不连续和弯头弯曲半径 R 与管径 D 之比较小(小 R/D)的结构,微动的汽水载荷变化引起的应力交变,加上环境介质参数变化产生的热交变应力,致使管材应力集中处高周疲劳,产生裂纹并扩展^[12-13]。

3.3 弯管中性面平面裂纹产生原因讨论分析

通过上述分析,弯管中性面位置产生的贯穿裂纹与其他位置的损伤无直接关系,该裂纹齐整,内外壁均未见明显的吹损冲刷痕迹。而且,贯穿裂纹的对侧存在明显的加工划痕沟槽,结合此处微观分析结果,说明弯管中性面裂纹始发于内壁表面原始缺陷并向外壁扩展(图 5),直至形成贯穿性裂口,裂口形成后高温高压蒸汽未大量从中喷出。

弯管中性面处的加工划痕沟槽容易造成应力集

中,成为裂纹源^[14-15],在一号位置产生爆口损伤时,会对同侧管壁产生较大应力波动,加上由蒸汽泄漏造成的热应力联合作用,使得裂纹源快速扩展形成裂口。

4 结论及预防措施

(1)屏式过热器管材化学成分正常,金相组织无异常,硬度符合标准要求。由于不合理的最内圈弯管结构及长周期的交变载荷作用使得弯管外壁内弧面产生横向疲劳裂纹并向内扩展,高温高压蒸汽在此初始泄漏,连锁吹损其它管段。

(2)内壁表面加工划痕沟槽等原始缺陷为屏式过热器弯管中性面的裂纹源,在爆裂及蒸汽泄漏过程的影响下向外壁扩展,形成贯穿性裂口。

(3)应制定检修计划,对类似屏式过热器最内圈U型弯管内弧面、中性线面位置进行缺陷排查;弯管内弧面可采用表面无损检测,中性线面可采用射线或超声导波检测。应制定监督检查计划,对于同类结构管屏进行定期抽样检查,分析发展趋势,预测剩余寿命,及时更换处理。

(4)在设计弯管结构部件时,应优化弯管结构应力分布,尽量避免多弯曲不连续和小R/D结构的管道存在。加强弯管制造质量控制,注意避免管道内壁的制造缺陷,应选用合理的冷、热加工工艺,并配合相应材料的热处理技术,弯管制造完成后应及时进行宏观及无损检验。

参考文献:

[1] 潘尔生,田雪沁,徐彤,等.火电灵活性改造的现状、关键问题与

发展前景[J].电力建设,2020,41(9):58-68.

- [2] Duarte C A, Espejo E, Martinez J C. Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 704-713.
- [3] 刘献良,赖云亭,马芹征.电站锅炉过热器管爆管原因分析[J].热加工工艺,2021,50(6):158-160.
- [4] RAY A K, TIWARI Y N, ROY P K, et al. Creep rupture analysis and remaining life assessment of 2.25Cr-1Mo steel tubes from a thermal power plant [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 454-455: 679-684.
- [5] 宋玉,郭岩,李鹏刚,等.长时运行高温过热器 12Cr1MoV 钢寿命评估[J].金属热处理,2021,46(7):223-229.
- [6] 范章帅.某电厂后屏过热器管泄漏原因分析[J].材料保护,2021,54(2):152-156.
- [7] 石仁强,王舒涛,杨超,等.电厂锅炉过热器失效统计与分析[J].焊接技术,2019,48(9):136-139.
- [8] 胥杨,陈文觉,陈乐,等.某台垃圾焚烧炉过热器失效分析[J].锅炉技术,2019,50(1):55-60.
- [9] 姜求志,王金瑞.火力发电厂金属材料手册[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [10] 刘艳梅,周丽新,戚厚军,等.材料中裂纹的分析方法[J].铸造技术,2015,36(2):263-266.
- [11] 邱启明,江国栋,洪茂林.锅炉管失效分析[J].铸造技术,2015,36(2):378-379.
- [12] 吴优福,侯召堂.超超临界机组水冷壁管弯曲面失效分析[J].东北电力技术,2017,38(3):45-49.
- [13] 卢如意,陈建,要玉宏,等.电站锅炉 15CrMo 钢水冷壁管横向裂纹成因分析[J].西安工业大学学报,2018,38(2):121-126.
- [14] 苗兴,李玉鹏,冯琳杰,等.由制造缺陷引起的几起锅炉受热面管泄漏事故分析与思考[J].热加工工艺,2014,43(3):220-223.
- [15] 马红,史志刚,崔雄华,等.高压锅炉管内表面类裂纹缺陷的分析和评定[J].热力发电,2010,39(11):93-96.