

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18026

火力发电厂锅炉受热面管泄漏原因分析

徐勃¹, 赵海¹, 高强²

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江省 杭州市 310030;

2. 黑龙江华电齐齐哈尔热电有限公司, 黑龙江省 齐齐哈尔市 161000)

Analysis on the Leakage of Boiler Heating Surface Tube of Thermal Power Plant

XU Bo¹, ZHAO Hai¹, GAO Qiang²

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., LTD., Hangzhou 310030, Zhejiang Province, China;

2. Heilongjiang Huadian Qiqihar Thermal Power Co., Ltd., Qiqihar 161000, Heilongjiang Province, China)

摘要: 一直以来, 高温过热器爆管事故都是影响电厂安全运行的主要因素之一, 且造成的损失最大。该文结合现场工作的实际对某电厂 1 号锅炉末级过热器泄漏原因进行了讨论。通过宏观检验、化学成分分析、力学性能试验及显微组织观察等多种试验手段, 对该受热面管进行了较为全面的分析, 以期对改善锅炉受热面管失效提供帮助。分析得出该末级过热器的泄漏为长时过热所致, 泄漏处的显微组织为铁素体加碳化物, 珠光体球化达 5 级, 并存在大量蠕变裂纹。

关键词: 锅炉; 受热面管; 失效分析; 球化

ABSTRACT: The high-temperature superheater bursting accident is one of the main factors that affect the safe operation of power plants, and causes the greatest loss. Based on the actual work in the field, the reasons for the leakage of final superheater of boiler No. 1 in a power plant are discussed. Through a variety of test means such as macroscopic test, chemical composition analysis, mechanical properties test and microstructure observation, the tubes are comprehensively analyzed to improve the failure of the heating surface tube of the boiler. The analysis shows that the leakage of the last stage superheater is caused by long overheating. The microstructure near the leakage position is ferrite plus carbides, pearlite spheroidized up to 5 levels, and there are a lot of creep cracks.

KEY WORDS: boiler; heating surface tube; failure analysis; spheroidization

0 引言

锅炉受热面作为火力发电厂锅炉中一个基本部位经常处于复杂、恶劣的环境之中^[1]。锅炉受

热面管包括省煤器管、水冷壁管、过热器管和再热器管。多年来, 受热面管的损坏泄漏一直是影响火力发电厂安全运行的一大因素。受热面管的泄漏是造成电厂非正常停机(非停)的最普通、最常见的形式, 一般占机组非停事故的 50%以上, 最高可达 80%^[2]。受热面管的失效严重影响了机组的安全性和经济性, 因而备受电厂重视。造成受热面管泄漏失效的主要原因有磨损、过热、应力、疲劳、腐蚀、焊接缺陷、材料原始缺陷等^[3-5]。

1 事故经过

某电厂 300MW 锅炉于 2007 年 9 月投产, 是采用美国燃烧工程公司引进技术设计和制造的。锅炉为亚临界参数、一次中间再热、自然循环汽包炉, 采用平衡通风、四角切圆燃烧方式, 设计燃料为烟煤。末级过热器位于水冷壁排管后方的水平烟道内, 一共有 90 片, 材质、规格分别为 12Cr1MoV $\Phi 51 \times 9$ mm 和 SA-213 T23 $\Phi 51 \times 8$ mm, 以 152.4 mm 的横向节距沿整个炉宽方向布置。此次泄漏位置为末级过热器高温段。

事故当天 19:00 时, 1 号炉炉管泄漏监测测点“26”、“27”、“16”点发出报警, 报警点位于尾部烟道后墙 40~53 m 标高处, 机组运行参数未见异常。打开本体人孔门检查, 确认锅炉发生泄漏, 22:56 时停止 1 号机组运行。入炉检查发现 1 号炉末级过热器泄漏, 需将外部管割除才能处理漏点, 共割管 18 根。对漏泄管以及临近管取样并

进行失效分析。

2 试验与分析

2.1 宏观分析

进行试验的 3 段末级过热器管，材质为 12Cr1MoV，规格为 $\Phi 51\times 9\text{mm}$ 。其中有一段过热器管为泄漏管段，编号 25-6，其余 2 段过热器管为与泄漏管段相邻的未泄漏管段(分别编号 24-6 和 26-6)，各管段位置编号及位置关系见表 1。

表 1 管段位置关系一览表
Tab. 1 Position relationship list

编号	位置
24-6	由锅炉甲侧向乙侧数第 24 排第 6 根
25-6	由锅炉甲侧向乙侧数第 25 排第 6 根
26-6	由锅炉甲侧向乙侧数第 26 排第 6 根

宏观检查中未发现编号 24-6 和 26-6 的试样有明显胀粗，但管段迎烟气侧均有不同程度的氧化；编号 25-6 的试样存在明显异常，图 1(a)为该管段迎烟气面的宏观形貌，可观察到管段中上部有爆口，管径有明显的胀粗，测量后发现爆口处胀粗量为 5.9%，其他位置胀粗量为 3.5%。图 1(b)是图 1(a)中爆口处的局部形貌，可以看到爆口边缘是不平整钝边，爆口处管壁厚度减薄不明显，爆口及附近管外壁氧化皮较厚，且有部分已经脱落，如图 1(c)所示，这说明氧化皮很脆，爆口呈较明显的长时过热特征。

表 2 末级过热器化学成分分析结果

Tab. 2 Analysis of the chemical composition of final superheater

试样号	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
24-6 号	—	—	0.449	0.948	0.294	0.189	—	—
25-6 号	0.106	—	0.432	0.940	0.274	0.171	0.014	0.032
26-6 号	—	—	0.538	0.903	0.299	0.281	—	—
GB5310—2008	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.90~1.20	0.25~0.35	0.15~0.30	≤ 0.010	≤ 0.025

根据 GB 5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》对 12Cr1MoV 化学成分的要求，3 根管材的化学成分基本满足标准要求。其中编号 25-6 的样品中 S、P 元素略高于标准成分要求。

2.3 力学性能试验

分别从 3 个样品上沿管长度方向切取拉伸试样，拉伸试样尺寸如图 2 所示，每个管上切取 2

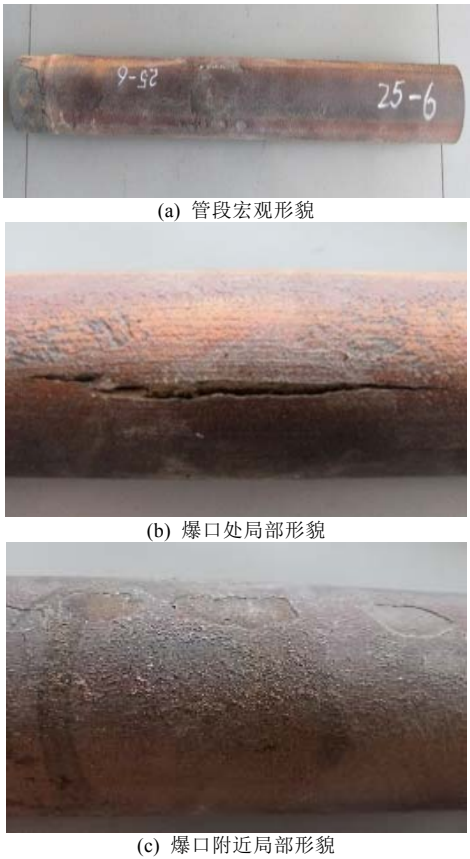


图 1 25-6 号样品沿长度方向及局部宏观照片
Fig. 1 Macro photograph of sample No. 25-6

2.2 化学成分分析

从编号 25-6 的样品上钻取金属屑，分别采用 CS230 对 C、S，采用 Optima 8300DV 对 Cr、Mo、V、Mn，采用 7230G 分光光度计对 P 进行化学成分测定分析；采用合金分析仪对编号 24-6、26-6 的样品进行化学成分测定分析，其结果见表 2。

根平行试样。采用 AG-Xplus 100 kN 万能材料试验机进行拉伸试验，试验结果见表 3，各样品编号后的数字 1 代表迎烟气侧，数字 2 代表背烟气侧。将各样品的强度及延伸率与 GB 5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》中规定 12Cr1MoV 的力学性能进行比较：编号 24-6 和 26-6 的样品的屈服强度、抗拉强度以及延伸率均完全符合标准，

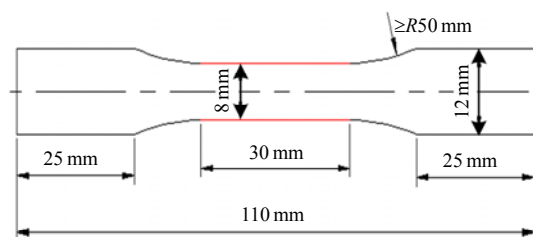


图2 力学性能试样尺寸示意图

Fig. 2 Sample size diagram

表3 试样力学性能试验结果

Tab. 3 Test results of mechanical properties

编号	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	延伸率 $A/\%$
24-6-1	323.522	498.183	36.03
24-6-2	341.482	508.470	36.17
25-6-1	240.873	416.270	41.47
25-6-2	285.539	436.344	44.43
26-6-1	354.962	535.840	34.77
26-6-2	365.490	538.388	34.77
GB5310—2008	$\geq 255\text{MPa}$	470~640MPa	≥ 19

但25-6号样品的屈服强度、抗拉强度均明显低于标准下限,尤其是迎烟气侧更为严重。

2.4 金相观察

采用OLYMPUS GX71金相显微镜进行氧化皮厚度测试。图3为25-6号样品氧化皮厚度测试面宏观照片,分别在管周围所示8个位置观察氧化皮厚度。图4(a)、(b)依次为25-6号样品泄漏位置附近g、h两处(对照图3)测厚位置的显微形貌,其中灰色区域为氧化皮区域,亮白色区域为母材区域。对测量结果对比发现,管内壁的氧化程度比外壁严重,且爆口处附近(位置g)的氧化皮厚度最大,达到0.7255 mm。

在3段管横截面上分别取样,并依次在200倍

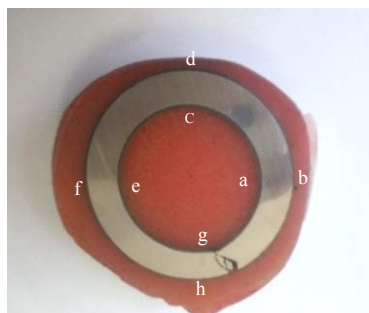
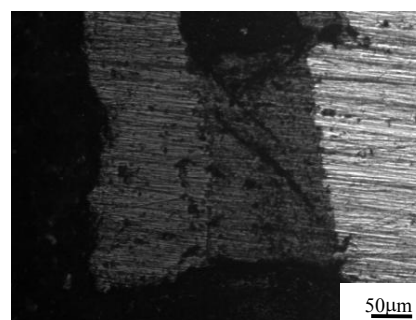
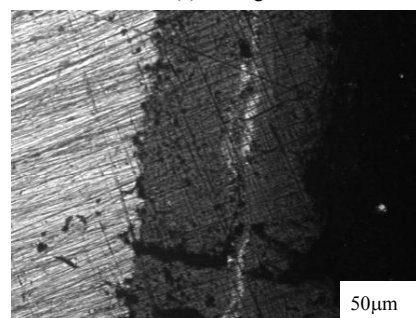


图3 25-6号样品氧化皮厚度观察位置示意图

Fig. 3 Observation position of oxide skin of sample No. 25-6



(a) 位置 g



(b) 位置 h

图4 25-6试样的不同氧化皮测试位置处显微组织

Fig. 4 Microstructure of sample No. 25-6 at different positions of the oxide skin

和1000倍下进行金相显微组织观察,观察位置分别为管内壁、管壁厚中部和管外壁。观察后发现编号24-6和26-6的试样显微组织均为铁素体+珠光体,珠光体球化3.5级和3级。

对25-6号试样泄漏处附近进行观察,如图5所示。图5中(a)、(b)、(c)是200倍下的显微组织形貌,图5中(d)、(e)、(f)是1000倍下的显微组织形貌,可见泄漏处附近的金相组织为铁素体+碳化物,组织中珠光体已经完全球化,球化5级。在晶界处存在大量蠕变孔洞以及由蠕变孔洞连通形成的蠕变微裂纹,裂纹均沿晶分布。

3 讨论

宏观检验中发现编号24-6和26-6的样品管径未见明显胀粗,管外径有比较厚的氧化皮。而25-6号样品管径有比较明显的胀粗,爆口处胀粗量最大达5.9%,其他位置胀粗量3.5%,在迎烟气侧存在沿管径方向的爆口,爆口边缘是不平整的钝边,爆口处壁厚无减薄,爆口及其附近的管子外壁存在较厚的氧化皮。从宏观形貌来看,25-6号样品具有明显的长时过热的特征。

化学成分分析结果表明样品24-6号、25-6

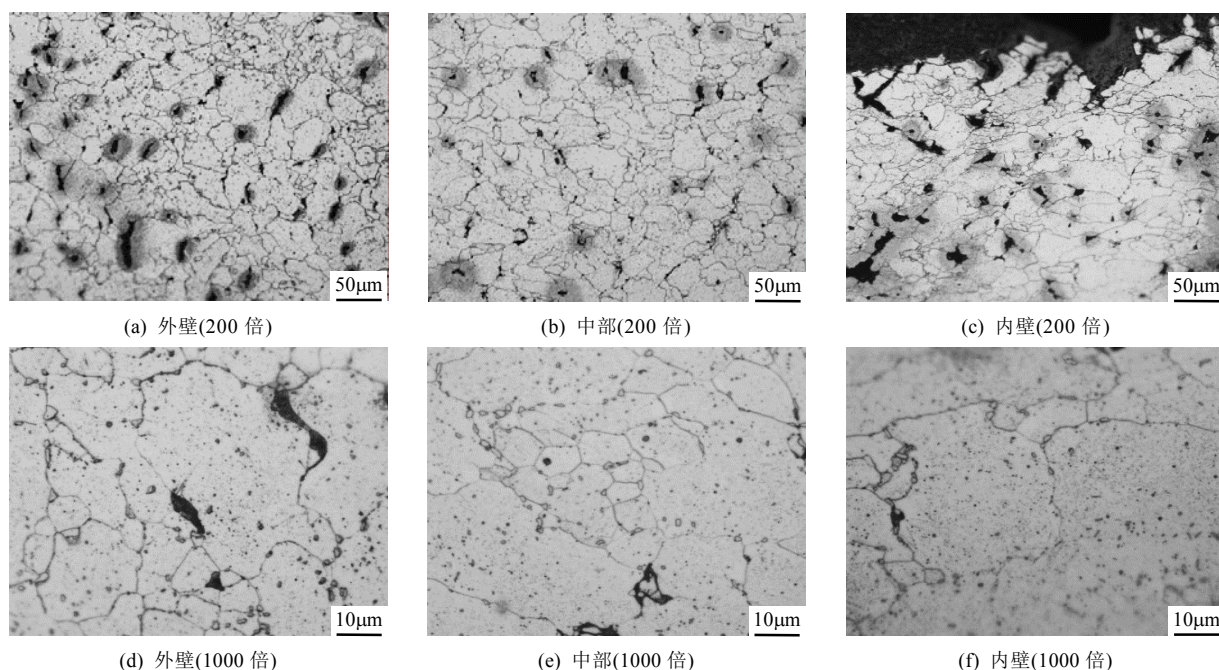


图5 泄漏位置附近金相组织形貌

Fig. 5 Metallographic structure near the leakage position

号和 26-6 号的化学成分基本满足标准 GB 5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》对 12Cr1MoV 的要求。其中 25-6 号样品中的元素 S、P 含量略高于标准要求，但不是此次过热器泄漏的主要原因。

力学性能试验结果表明，编号 24-6 和 26-6 的样品的屈服强度、抗拉强度以及延伸率均完全符合标准 GB 5310—2008《高压锅炉用无缝钢管》中对 12Cr1MoV 材料的要求，但 25-6 号样品的屈服强度、抗拉强度均明显低于标准下限，尤其是迎烟气侧较严重。这说明此次过热器的泄漏与强度不足有直接关系。

对 24-6、25-6 和 26-6 号样品进行金相组织试验，并重点对爆口区附近的金相组织进行观察，结果表明，样品 24-6 和 26-6 的金相组织均为铁素体+珠光体，但珠光体已部分球化，球化分别为 3.5 级和 3 级；而 25-6 号样品的金相组织为铁素体+碳化物，珠光体已完全球化，球化 5 级，并存在大量的沿晶分布的蠕变孔洞和由此产生的裂纹，金相组织明显异常。

综合以上试验结果分析，该厂末级过热器的泄漏是长时过热所致。长时过热是指管子长时超温而发生蠕变破裂的现象^[6-7]。造成超温的原因有很多，如燃烧不稳、局部积灰、结焦、内壁氧化

皮脱落堵塞、启停及事故处理不当等^[8-11]。受热面管在高温下运行时所受的应力主要是管中介质内压力对其产生的切向应力，在这种应力作用下，管子会以相当于 10^{-7} mm/h 的蠕变速度进行正常的径向蠕变^[12-13]。但当管子由于超温而长期过热时，即便所受的应力不变，也会加速蠕变而发生胀粗现象^[14-15]。随着胀粗量的不断增大，蠕变孔洞连通形成蠕变裂纹并沿晶分布，裂纹继续聚集、扩大形成宏观轴向裂纹，最终发生漏泄。此外，高温引起珠光体的球化和碳化物的聚集，会使得钢的抗蠕变能力和持久强度下降，高温性能下降，也会进一步加速蠕变失效的过程。

4 结论

此次末级过热器的泄漏是长时过热所致，是一个由于管子长期超温而发生蠕变破裂最终导致失效的过程。建议查明末级过热器超温原因，并采取有效措施避免类似事故再次发生。

参考文献

- [1] 王绍正. 试论锅炉受热面管失效分析与思考[J]. 中国科技博览, 2015(7): 82-82.
- [2] 蔡文河, 严苏星. 电站重要金属部件的失效及其监

- 督[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 岳忠, 张月山. 电站锅炉管件失效泄漏原因分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(9): 150-153.
- [4] 宏辉, 李超, 沈美华, 等. 锅炉过热器管爆管失效分析[J]. 热加工工艺, 2015(10): 236-238.
- [5] 梁志福, 孙丙新, 张涛, 等. 660 MW 超临界锅炉末级过热器爆管原因分析[J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31(3): 24-28.
- [6] 郭正民. 锅炉受热面管失效分析[C]//中国电机工程学会电力行业第十二届无损检测学术会议论文集, 威海, 2012.
- [7] 史宝良, 李鹏飞, 任爱, 等. 12Cr1MoV 后屏过热器爆管失效分析[C]//全国失效分析学术会议论文集, 北京, 2015.
- [8] 成志红. 超临界 600MW 机组锅炉末级过热器爆管原因分析及预防措施[J]. 热力发电, 2011, 40(7): 81-83.
- [9] 陈祥龙. 末级过热器爆管失效分析[J]. 中国高新技术企业, 2016, 354(3): 59-61.
- [10] 李秀广, 郑准备, 陈璟, 等. 330MW 机组末级过热器异物堵塞及泄漏失效分析[J]. 电力与能源, 2017, 38(5): 619-623.
- [11] 晏嘉陵. 600MW 超临界电站锅炉末级过热器管爆裂失效分析[J]. 理化检验-物理分册, 2017, 53(6): 445-448.
- [12] 屠淑恒, 郭演星, 李勇, 等. 电站高温过热器管用 12Cr1MoV 材料失效分析研究[C]//远东无损检测新技术论坛论文集, 西安, 2017.
- [13] 马崇. 锅炉受热面管失效分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [14] 李泽, 俞旷. 某电厂锅炉末级过热器爆管原因分析[J]. 发电与空调, 2017, 38(6): 50-52.
- [15] 蔡昌全, 王成. 12Cr1MoVG 锅炉高温过热器管爆管事故分析[J]. 化学工程与装备, 2016(9): 285-287.
-
- 收稿日期:** 2018-08-02.
- 作者简介:**
-
- 徐勃(1988), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电站金属理化检验及失效分析相关工作, bo-xu@chder.com.
- 徐勃
- (责任编辑 杨阳)