

电站锅炉超声波氧化皮测厚方法分析

庞凯杰^{1*}, 高杰², 张华德², 鲍凌¹, 孙剑¹, 束乾坤²

¹国能神皖安庆发电有限责任公司, 安徽 安庆

²苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州

收稿日期: 2022年7月17日; 录用日期: 2022年8月16日; 发布日期: 2022年8月25日

摘要

本文介绍了超声波氧化皮测厚方法在电站锅炉中的应用。同时, 通过使用便携式氧化皮测厚仪对一台超超临界机组锅炉的高温受热面进行现场超声波氧化皮厚度检测, 并将得到的数据与电厂监测的后台数据和实验室取样测量数据进行比较, 证明采用超声波氧化皮测厚得到的测量结果是可靠的。通过这种方法可高效全面的了解锅炉运行情况, 有效减少了锅炉爆管的风险, 提高了设备的安全性和稳定性。

关键词

超超临界机组; 氧化皮测厚; 氧化皮测厚仪; 当量温度

Analysis of Ultrasonic Oxide Skin Thickness Measurement Method for Utility Boiler

Kaijie Pang^{1*}, Jie Gao², Huade Zhang², Ling Bao¹, Jian Sun¹, Qiankun Shu²

¹National Energy Shenwan Anqing Power Generation Co. Ltd., Anqing Anhui

²Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

Received: Jul. 17th, 2022; accepted: Aug. 16th, 2022; published: Aug. 25th, 2022

Abstract

The application of ultrasonic oxide skin thickness measurement method in utility boilers is introduced. At the same time, the high temperature heating surface of an ultra supercritical unit boiler was tested by using a portable oxide skin thickness gauge, and the obtained data are compared with the background data monitored by the power plant and the laboratory sampling measurement data, which proves that the measurement results obtained by ultrasonic oxide skin thickness measurement are reliable. This method can efficiently and comprehensively understand the boiler operation, effectively reduce the risk of boiler tube explosion, and improve the safety and sta-

*第一作者。

bility of the equipment.

Keywords

Ultra Supercritical Unit, Oxide Skin Thickness Measurement, Oxide Skin Thickness Gauge, Equivalent Temperature

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超超临界机组锅炉的高温受热面在运行期间, 由于其管内壁长期与高温水蒸汽接触, 不可避免的会产生氧化皮, 并随着运行时间的增加而不断变厚, 进而导致受热面管传热效率下降, 很容易造成管子超温运行甚至发生爆管的事故。

近年有越来越多的锅炉由于受热面管内壁氧化皮相关的原因发生爆管事故, 氧化皮的生成原因和预控措施日益受到重视。氧化皮的生成会导致管子传热效率变差, 同时氧化皮的增厚和堆积还会导致管子内通流面积减小, 这些都会使管内实际温度超过预期温度。所以通过检测受热面管内壁的氧化皮厚度来计算管子运行时的当量温度, 并依据受热面温度趋势来制定相关的运行建议和检修计划, 预防超温爆管事故的发生。

目前对受热面氧化皮厚度的检测主要通过实验室取样分析测量和现场超声波氧化皮测厚这两种方法。相对于实验室取样分析测量, 现场超声波氧化皮测厚具有简便、快捷且不需要破坏工件等优点, 是当前氧化皮检测方法的主要研究方向。

2. 机组概况

国内某 1000 MW 燃煤汽轮发电机组于 2015 年 5 月 31 日交投产, 并于 2021 年 11 月检修, 累计运行约 45,000 小时。锅炉形式为: 超超临界参数、变压直流炉、单炉膛、一次再热、平衡通风、露天导式布置、固态屏渣、对冲燃烧方式、II 型锅炉。炉膛上部沿烟气走向分别布置有屏式过热器、高温过热器、高温再热器, 尾部有低温再热器、低温过热器、省煤器。

3. 超声波氧化皮测厚技术原理

由于受热面管子内壁氧化皮厚度的增长与管壁温度有明显的对应关系, 所以只要测量得到管子内壁的氧化皮厚度和管子的实际壁厚, 就可以计算出其对应的当量温度[1] [2] [3]。

受热面管内壁氧化皮厚度测量采用超声波氧化皮测量设备。该设备由超声脉冲发生/接收器, 显示设备及高频探头组成。通过选择适当的探头、频率和显示波形, 仪器可同时测量出超声波在管子金属中的传播时间和在氧化皮中的传播时间。超声波在已知材料的传播速度是一定的, 结合对比试块测量出的超声波在氧化皮中的声速, 现场测量出超声波在管子金属中的传播时间和在氧化皮中的传播时间, 可以计算出管内壁的氧化皮厚度和管子实际壁厚[4]。

4. 当量温度计算方法

某段管子不管它曾经在何种温度、何种应力条件下运行了多少时间, 其寿命的损耗程度总可以等效

于某一固定的金属温度及特定的应力条件下服役了相同时间，这个等效的金属温度就称之为金属当量温度。因而，金属当量温度既不是管子的外壁温度，也不是其内壁温度和外壁的平均温度，而是某段服役期内寿命损耗程度的一种等效描述。

锅炉高温受热面管内壁氧化皮的生长厚度与其在该段服役期内的当量金属温度有一定的对应关系。参照美国及加拿大普遍采用的 Laborelec 经验公式，对于 T91 或 12Cr1MoV 等材料来说，满足如下的公式：

$$T = \frac{a}{b + \lg t - 2 \lg(0.4678x)} - 273.1$$

式中： T ——过热器或再热器管的当量金属温度(°C)

x ——管子内壁氧化皮厚度(mm)

t ——管子已运行时间(h)

a 、 b ——材料常数

5. 氧化皮测厚及分析

该超超临界机组于 2021 年 11 月进行了停机检修，在检修期间使用超声波氧化皮测厚仪，对该机组的低温过热器和低温再热器分别进行了氧化皮测厚工作，并进行了取样金相分析。

现场氧化皮检测采用高频超声纵波法检测，检验设备为美国奥林巴斯(OLYMPUS)的 38DL-PLUS 型超声波测厚仪，检测精度为 0.01 mm，实际检测中发现对于氧化皮厚度小于 0.1 mm 的部位仪器一般无法识别，故认为仪器的最小检测厚度为 0.1 mm。

5.1. 低温过热器氧化皮测厚

低温过热器位于尾部烟道后包墙和中隔墙之间，共计 148 片管屏，每屏 6 根管。此次检测的管子规格为 $\Phi 51 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ，材料为 12Cr1MoVG，共计检测 888 根管，实际检测部位如图 1 所示。

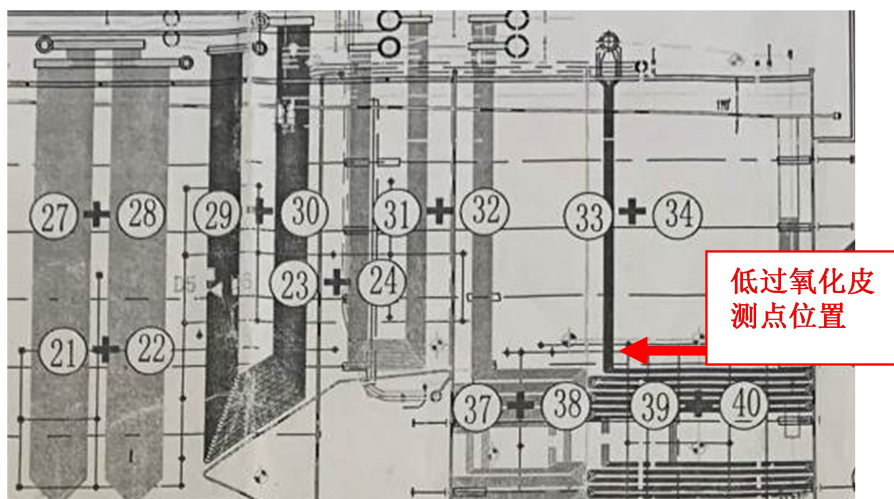


Figure 1. Schematic diagram of detection parts of low temperature superheater

图 1. 低温过热器检测部位示意图

低温过热器的过氧化皮厚度主要集中在 0.17~0.31 mm 的范围内，经过计算后其对应的金属当量温度都没有超过材料的许用温度，详见表 1。

Table 1. Test results of oxide skin thickness of inner wall in low temperature superheater tube

表 1. 低温过热器管内壁氧化皮厚度检测结果

氧化皮厚度	0.17 mm	0.18 mm	0.19 mm	0.20 mm	0.21 mm	0.22 mm	0.23 mm
数量(根)	45	90	116	199	171	83	109
当量温度 $^{\circ}\text{C}$	534	539	543	547	551	555	558
氧化皮厚度	0.24 mm	0.25 mm	0.26 mm	0.27 mm	0.28 mm	0.29 mm	0.31 mm
数量(根)	49	13	1	6	1	3	2
当量温度 $^{\circ}\text{C}$	562	565	569	572	575	578	583

5.2. 低温再热器氧化皮测厚

低温再热器位于尾部烟道前包墙和中隔墙之间，共计 148 片管屏，每屏 6 根管。此次检测低温再热器管子规格为 $\Phi 57 \times 4.5 \text{ mm}$ ，材料为 SA-213T91，共计检测 888 根管，实际检测部位如图 2 所示。

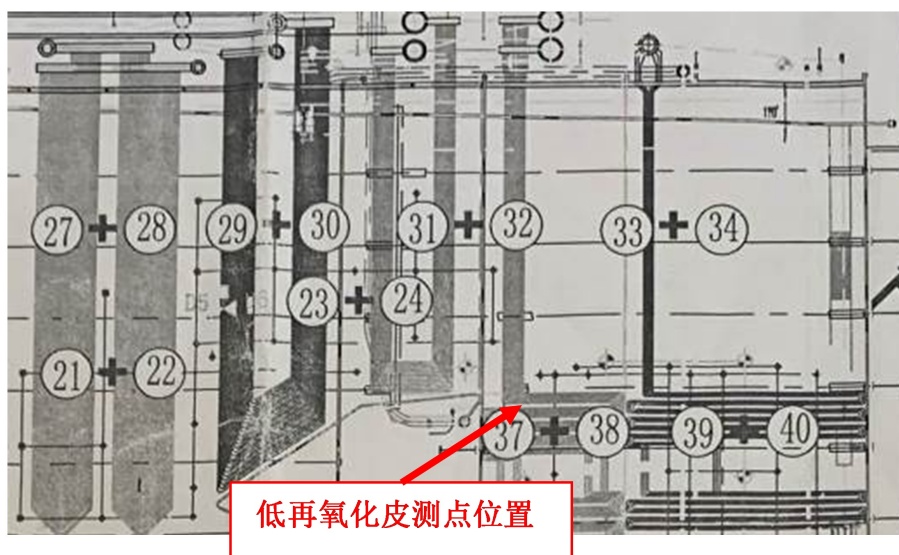


Figure 2. Schematic diagram of detection parts of low temperature reheater

图 2. 低温再热器检测部位示意图

低温再热器的过氧化皮厚度主要集中在 0.15~0.23 mm 的范围内，经过计算后其对应的金属当量温度都没有超过材料的许用温度，详见表 2。

Table 2. Test results of oxide skin thickness of inner wall in low temperature reheater tube

表 2. 低温再热器管内壁氧化皮厚度检测结果

氧化皮厚度	0.15 mm	0.16 mm	0.17 mm	0.18 mm	0.19 mm	0.20 mm	0.21 mm
数量(根)	43	122	146	165	187	139	75
当量温度 $^{\circ}\text{C}$	590	595	601	606	611	613	613
氧化皮厚度	0.22 mm	0.23 mm					
数量(根)	10	1					
当量温度 $^{\circ}\text{C}$	614	615					

5.3. 现场氧化皮测厚数据分析

1) 从图 3 中可以看出通过低温过热器管氧化皮厚度计算得出的当量温度分布整体比较平稳, 除个别点当量温度较高外, 无较大波动。对比电厂锅炉管壁温监测设备测得的低温过热器管屏温度分布情况, 整体也是趋于比较平稳的曲线, 这与氧化皮测厚结果较吻合, 能大致反映低温过热器管在实际运行中温度分布情况。

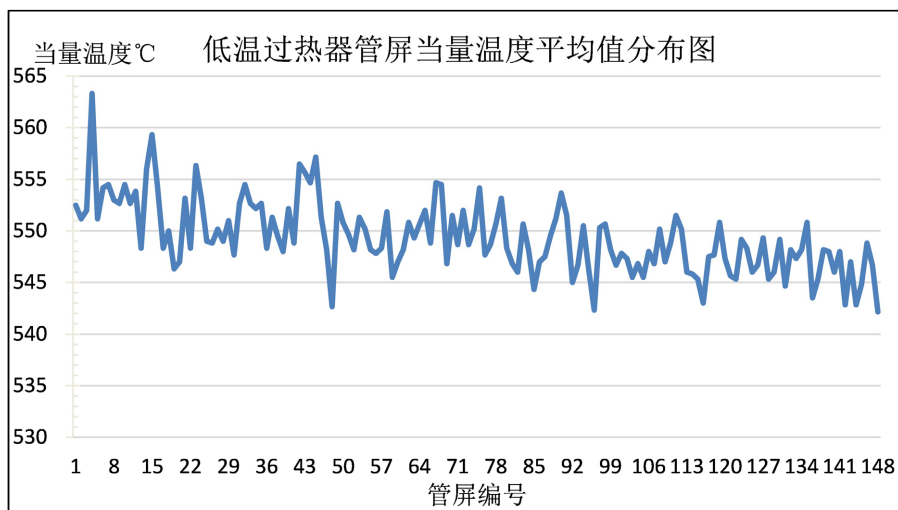


Figure 3. Distribution of equivalent temperature of low temperature superheater tubes

图 3. 低温过热器管当量温度分布情况

2) 从图 4 中可以看出通过低温再热器管氧化皮厚度计算得出的当量温度分布整体比较平稳, 无较大波动。对比电厂锅炉管壁温监测设备测得的低温过热器管屏温度分布情况, 整体也是趋于比较平稳的曲线, 这与氧化皮测厚结果较吻合, 能大致反映低温再热器管在实际运行中温度分布情况。

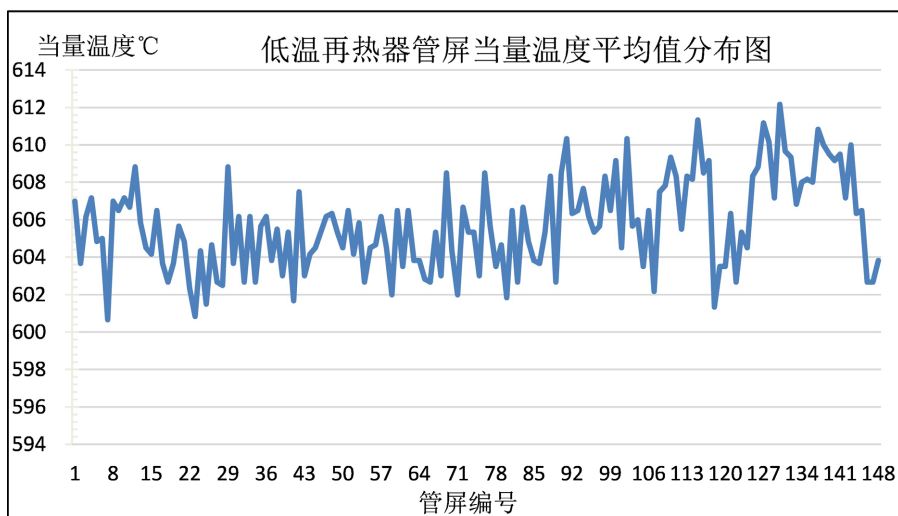


Figure 4. Distribution of equivalent temperature of low temperature reheater tubes

图 4. 低温再热器管当量温度分布情况

3) 通过对比氧化皮测厚数据和现场实际运行的壁温分布情况, 可以发现通过氧化皮测厚仪器测得的

结果跟实际情况比较接近，这其中存在的个别偏差可能是由于现场检测的测点位置不同导致的，因此可以认为采用超声波测厚仪进行的锅炉受热面管氧化皮测厚方法是可靠的。

5.4. 实验室氧化皮测厚分析

对现场低温过热器管和低温再热器管各取一根样管，并先对取样管使用超声波测厚仪进行氧化皮测厚并记录，然后对取样管加工后在实验室使用金相显微镜对内壁氧化皮厚度测量，两种测量方法的结果见下表 3。

Table 3. Test results of oxide skin thickness of inner wall in sampling pipe

表 3. 取样管内壁氧化皮厚度检测结果

名称	材质	规格	测厚仪数值	显微镜数值
低温过热器取样管	12Cr1MoVG	Φ51 × 10	0.27 mm	0.29 mm
低温再热器取样管	SA-213T91	Φ57 × 4.5	0.17 mm	0.16 mm

对使用超声波测厚仪和使用金相显微镜测得的氧化皮厚度数据对比发现，两种方法的测得的数据基本接近，偏差分别在 0.02 mm 和 0.01 mm。通过观察取样管的微观金相组织可以发现，管子内壁氧化皮薄厚分布并不均匀，上表测量结果的偏差有可能是因为测点位置的误差导致的(图 5、图 6)。因此可以进一步证明采用超声波测厚仪进行的锅炉受热面管氧化皮测厚方法是可靠的。

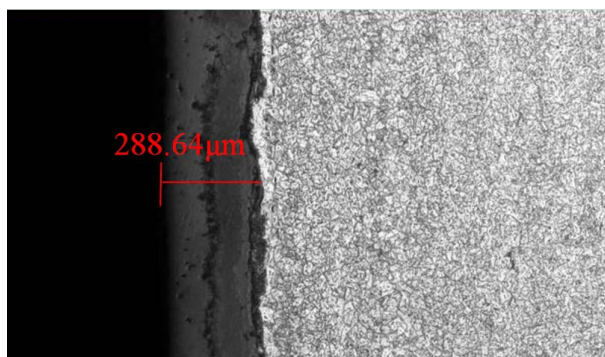


Figure 5. Oxide skin on inner wall of low temperature superheater tube under metallographic microscope

图 5. 金相显微镜下低温过热器管内壁氧化皮

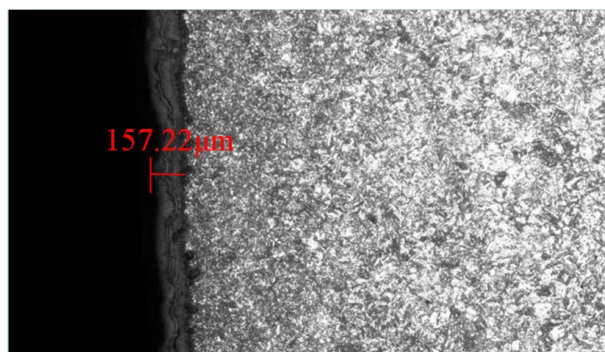


Figure 6. Oxide skin on inner wall of low temperature reheater tube under metallographic microscope

图 6. 金相显微镜下低温再热器管内壁氧化皮

6. 结论

对于超超临界机组锅炉因超温原因引起的爆管，超声波氧化皮测厚是一种既简便高效又准确全面的检测方法，通过这种方法可较全面地了解炉管内氧化皮厚度及锅炉运行期间是否存在超温运行情况，为指导锅炉运行及制定检修方案提供依据，有效减少了锅炉爆管的风险，提高了设备的安全性和稳定性。

锅炉受热面管的氧化皮需要做长期、大量的监测，只有在大量历史数据的支撑下，氧化皮测厚的准确性才会越来越高。同时氧化皮测厚是一种抽样检测，而内壁氧化皮生成和脱落是一个动态过程，在实际检测过程中数值上会与实际结果存在一定的偏差，所以在判断锅炉爆管原因等问题时，仍需要结合其他相关的检测技术，这样才能更准确和真实地反映炉管实际运行工况。

对于锅炉受热面的氧化皮测厚工作只是在金属材料因素上的监测，要消除锅炉超温的情况还是需要改善锅炉的运行工况，保证受热面在设计条件下运行，才能更好地防止锅炉超温及爆管事故的发生。

参考文献

- [1] 张志红, 刘洁, 张孝元, 尉丰婵. 奥氏体不锈钢的高温氧化皮行为[J]. 锻压技术, 2021, 46(7): 214-220.
- [2] 鲍俊涛, 张启礼, 金学峰. 电站锅炉末级过热器内壁氧化皮分析[J]. 电力安全技术, 2021, 23(3): 17-20.
- [3] 刘川槐, 潘卫国, 纪冬梅. 国产 TP347HFG 奥氏体不锈钢氧化皮问题分析及预控措施[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(1): 61-65.
- [4] 董强, 钤献民. 管内壁氧化皮测厚技术在预防锅炉高温过热器爆管中的应用[J]. 热电发电, 2003, 32(5): 65-67.