

# 基于氧化膜生成速度和剥落厚度的600MW超临界锅炉高温过热器安全性分析

谢建文<sup>1</sup>, 孙平<sup>1</sup>, 李涛<sup>2</sup>, 杨红权<sup>2</sup>, 周克毅<sup>3</sup>

(1. 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京市 丰台区 100069; 2. 神华国华太仓发电有限公司, 江苏省 太仓市 215433; 3. 东南大学东南大学能源与环境学院, 江苏省 南京市 210096)

## Analysis on Safety of High Temperature Super-heater in 600 MW Supercritical Boiler Based on Growth Rate and Spalling Depth of Oxidation Film

XIE Jianwen<sup>1</sup>, SUN Ping<sup>1</sup>, LI Tao<sup>2</sup>, YANG Hongquan<sup>2</sup>, ZHOU Keyi<sup>3</sup>

(1. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co., Ltd, Fengtai District, Beijing 100069, China;

2. Shenhua Guohua Taicang Electric Power Co., Ltd, Taicang 215433, Jiangsu Province, China;

3. School of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** The growth and spalling of steam-side oxide scale have direct effects on the operation safety of high-temperature heating surfaces in supercritical or ultra-supercritical boilers. The accidents leading to the rupture of high temperature super-heater tubes induced by the spalling of oxide scale were analyzed on the basis of two 600 MW supercritical boilers, and technical measures adopted in practical operation were also introduced in detail. As for the retrofit design, measures considering the growth and spalling mechanism of steam-side scale for the evaluation of the metal safety were presented with the cases of T91 and TP347HFG tubes, the evaluation result is that high temperature super-heater tubes of two 600 MW supercritical boilers should be safe in a overhaul period after retrofit, and suggestions for the further optimization were also proposed. The research can provide valuable reference for the safety operation and the establishment of the boiler scheduled maintenance procedure.

**KEY WORDS:** boiler; oxide scale; growth; spalling; rupture

**摘要:** 金属蒸汽侧氧化膜的生长和剥落对超临界或超超临界锅炉高温受热面的安全性有直接影响。以2台600MW超临界锅炉为对象, 详细分析因蒸汽侧氧化膜剥落所导致的高温过热器爆管事故, 介绍实际运行中所采取的提高高温受热面安全性的技术措施。在此基础上, 以T91和TP347HFG管材为例, 针对设备改造设计提出基于金属蒸汽侧氧化膜生长和剥落规律评价高温受热面金属安全性的方法, 并应用于这2台锅炉高温过热器的实际改造方案的安全性评价, 评价结果表明改造方案可以实现高温过热器在一个大修期内安全

运行的预定目标, 同时给出进一步优化改造方案的建议。研究结果对于制定锅炉检修计划和安全运行技术措施具有指导意义。

**关键词:** 锅炉; 氧化膜; 生成; 剥落; 爆管

## 0 引言

锅炉金属管束的高温蒸汽氧化腐蚀随管壁温度升高而明显加剧, 管壁温度越高, 氧化膜生成速度越快; 氧化膜的生成又会导致金属基体温度的升高, 使金属更容易发生超温现象<sup>[1]</sup>。氧化膜的剥落主要与温度变化幅度和速率, 以及氧化膜的厚度有关。温度变化幅度越大、变化速度越快、氧化膜越厚, 则氧化膜越易剥落。由于在启动和停止阶段, 锅炉的金属管壁温度变化较大, 故氧化膜更容易发生脱落。脱落的氧化膜一旦沉积在受热面管内, 将使蒸汽流量急剧减少, 导致管材短期过热, 引发爆管事故<sup>[2-3]</sup>。

目前, 关于锅炉高温受热面安全性的设计主要是从金属的高温强度和烟气侧的高温腐蚀方面考虑<sup>[4]</sup>。至今为止, 关于防治锅炉高温受热面蒸汽氧化腐蚀危害的研究主要集中在研制抗蒸汽氧化性能更强的耐高温金属方面<sup>[5-7]</sup>。锅炉高温受热面采用抗蒸汽氧化性能更强的金属材料后, 氧化膜的生长速率下降, 氧化膜剥落的概率减小, 有利于提高锅炉运行的安全性, 但将使锅炉造价大幅升高。在过

去 10 年内,关于蒸汽侧氧化膜剥落的研究比上个世纪明显得到关注<sup>[8-12]</sup>,主要从氧化膜的生长过程、结构和应力方面研究剥落机制,但在确定氧化膜的临界剥落应力及其与实际运行参数的关系方面尚未形成共识,更没有得到与锅炉高温受热面的设计和运行有关的安全性评价方法。

围绕金属高温蒸汽氧化腐蚀对锅炉高温受热面安全性的影响,以太仓发电公司 2 台 600 MW 超临界锅炉高温过热器为对象,详细分析了锅炉实际运行中因氧化膜剥落引发的频繁爆管事故,介绍了实际运行中所采用的相应技术措施。在此基础上,针对高温受热面的改造设计,提出基于氧化膜生成和剥落规律分析高温受热面安全性的方法,并应用于这 2 台锅炉高温过热器的改造分析,提出进一步优化改造设计的建议。

## 1 高温过热器的特点

太仓发电公司 2 台 600 MW 超临界直流锅炉采用了低  $\text{NO}_x$  同轴燃烧系统(Low  $\text{NO}_x$  concentric firing system, LNCFS),主燃烧器上部配置 2 层紧凑燃尽风(close coupled over-fired air, CCOFA)和 5 层分离燃尽风(separating over-fired air, SOFA)。

炉膛上部布置有分隔屏过热器和后屏过热器,水平烟道内沿烟气的流动方向依次布置高温再热器和高温过热器,尾部烟道内布置低温再热器和省煤器。高温过热器总计 82 屏,每屏 12 根管,分为冷段和热段,逆流布置。集箱内不设计节流圈,依靠使用不同耐温等级的材料和不同管径的阻力调节作用满足热偏差对于管子强度的要求。热段用材如图 1 所示,外圈管入口段为 T91、出口段为

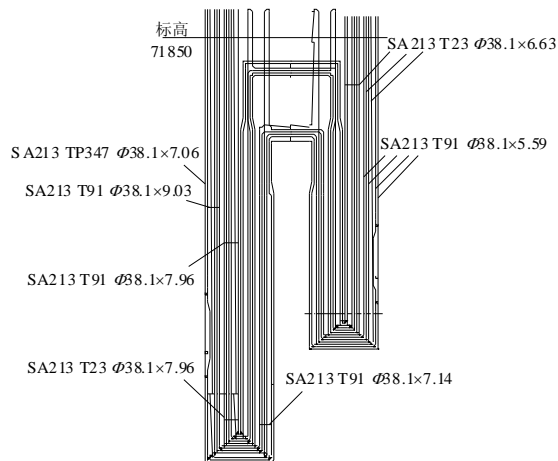


图 1 高温过热器结构和管材

Fig. 1 Frame and tube material of high temperature

TP347H,第 2~6 圈管出、入口段均为 T91,第 7~12 圈管入口段为 T23、出口段为 T91。

由于炉膛出口烟气残余旋转的存在和高温过热器屏间流量分配特性的影响,沿炉膛宽度方向各管屏金属测量温度呈“双驼峰”形式分布,如图 2 所示。

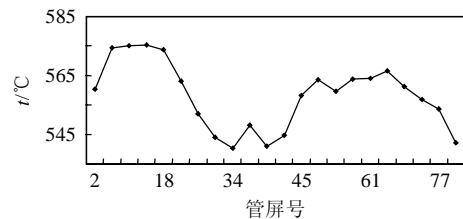


图 2 高温过热器各管屏金属测量温度分布

Fig. 2 Measured metal temperature distribution of high temperature super-heater panels

## 2 氧化膜大量剥落原因分析及治理

2 台锅炉投产以来发生因氧化膜剥落导致的高温过热器爆管事件总计 5 次,爆管位置见表 1。第 1 次爆管原因为停炉后自然通风冷却不足 18 h 即开始强制通风冷却,导致氧化膜大量脱落。为此运行厂家制定了停炉后必须密闭冷却 24 h 的控制措施、检查氧化膜堆积情况及清理堆积超标管段氧化膜的检修措施,同时开展降低高温受热面热偏差的燃烧调整试验,通过将 SOFA 喷嘴反切  $15^\circ$  和适度增加 SOFA 送风比例,将高温过热器管屏金属测量温度的峰值降低了  $5\sim 10^\circ\text{C}$ ,如图 3 所示。

第 2 次爆管原因为启动过程中升负荷速度过快,过早投用减温水导致主汽温度最大变化幅度达  $30^\circ\text{C}/\text{min}$ 。为此对机组启动速度进行了控制,可以做到 150 MW 负荷以下不投过热器二级减温水,但使启动油耗大幅升高。

表 1 高温过热器因氧化膜剥落爆管情况

Tab. 1 Case of tube rupture in high temperature super-heater induced by the spalling of oxide scale

| 序号 | 爆管日期             | 炉号 | 材质  | 屏号 | 根号 |
|----|------------------|----|-----|----|----|
| 1  | 2007.6.21(启动期间)  | #8 | T91 | 69 | 9  |
|    |                  |    | T91 | 59 | 11 |
| 2  | 2009.2.6(启动期间)   | #7 | T23 | 15 | 12 |
| 3  | 2009.10.7(启动期间)  | #7 | T91 | 9  | 12 |
| 4  | 2009.10.14(启动期间) | #7 | T91 | 71 | 4  |
| 5  | 2009.11.19(运行期间) | #8 | T91 | 67 | 6  |
|    |                  |    | T91 | 71 | 6  |

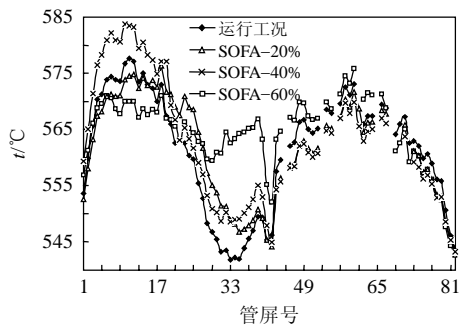


图3 SOFA比例对高温过热器各管屏金属测量温度分布的影响

Fig. 3 Effect of SOFA proportion on measured metal temperature distribution of high temperature super-heater panels

第3次爆管原因为锅炉打压后高温过热器积水烘干不净,启动后管屏振动导致氧化膜疏松和大量剥落。第4次爆管原因为换管方案不彻底,启动后已疏松的氧化膜再次大量剥落。为此要求烘干积水过程中,在保证主蒸汽过热度的同时,必须控制同屏偏差小于 $40^{\circ}\text{C}$ 。

第5次爆管发生在机组启动完成、且已大负荷连续运行42天之后,是锅炉启动、停止阶段无法采取必要控制措施所能避免的。

2009年10月,对2台锅炉高温过热器出口段距底部1.3和5m处的管段采用测厚仪进行了全面的氧化膜测厚工作,包括T23和T91两种材质,结果如表2、3所示。由于当时无损测厚技术应用于不锈钢管材误差较大,因此未对外圈的TP347H管材进行测量。另外,在距底部1.3m处切开部分管段,通过内窥镜检查发现部分T91管材内壁氧化膜出现鼓泡、开裂现象,测厚仪也监测到了内壁氧化膜的分层现象。

通常,铁素体钢的内壁氧化膜厚度达到0.2mm以上则极易剥落。从表2、3的数据可以看出,测量部位的T23、T91材料的平均氧化膜厚度基本已达到或超过此数值,由于工期限制未对更高位置的管材氧化膜厚度进行测量,但可以推测,随着蒸汽温度的不断升高,测量部位以上区域管材的氧化膜厚度值将更大。由此表明,采取降低高温受热面热偏差的运行调整措施和“慢启、缓冷”的启、停炉措施,坚持执行“逢停必检”的检修技术措施,虽然可以提高高温受热面的安全性能,但当氧化膜厚度达到一定数量等级后,即使小幅负荷波动所导致的应力变化也将导致其剥落。

表2 高温过热器T91氧化膜厚度

Tab. 2 T91 oxide scale thickness of high temperature super-heater

| 计算类型 | 数值/mm | 炉号 | 累计运行年数/a | 平均年生长率/(mm/a) | 位置/m |
|------|-------|----|----------|---------------|------|
| 最大值  | 0.310 | #7 | 3.75     | 0.083         | 1.3  |
| 平均值  | 0.190 | #7 | 3.75     | 0.051         | 1.3  |
| 最大值  | 0.320 | #7 | 3.75     | 0.085         | 5    |
| 平均值  | 0.214 | #7 | 3.75     | 0.057         | 5    |
| 最大值  | 0.290 | #8 | 3.92     | 0.074         | 1.3  |
| 平均值  | 0.198 | #8 | 3.92     | 0.051         | 1.3  |
| 最大值  | 0.270 | #8 | 3.92     | 0.069         | 5    |
| 平均值  | 0.210 | #8 | 3.92     | 0.054         | 5    |

表3 高温过热器T23氧化膜厚度

Tab. 3 T23 oxide scale thickness of high temperature super-heater

| 计算类型 | 数值/mm | 炉号 | 累计运行年数/a | 平均年生长率/(mm/a) | 位置/m |
|------|-------|----|----------|---------------|------|
| 最大值  | 0.310 | #7 | 3.75     | 0.083         | 1.3  |
| 平均值  | 0.200 | #7 | 3.75     | 0.053         | 1.3  |
| 最大值  | 0.290 | #8 | 3.92     | 0.074         | 5    |
| 平均值  | 0.209 | #8 | 3.92     | 0.053         | 5    |

此时,现实、可行的措施只能是局部更换氧化膜厚度超标管段。同时,应综合考虑改造成本、检修成本、运行成本及整体使用寿命,确定是否进行受热面管材升级改造。对测量部位氧化膜厚度超过0.27mm的管段进行同材质新管更换后,锅炉在改造方案实施前的11个月里一直安全运行。

### 3 高温过热器改造后安全性分析

#### 3.1 改造方案

虽然采取了运行控制和检修技术措施,但2台600MW超临界锅炉在投产不足4年的时间内仍频繁发生氧化膜大量剥落导致的高温受热面爆管事件。为进一步提高机组运行安全性,按照高温受热面中金属管壁温度低于 $570^{\circ}\text{C}$ 使用T23、高于 $570^{\circ}\text{C}$ 低于 $595^{\circ}\text{C}$ 使用T91、高于 $595^{\circ}\text{C}$ 使用TP347HFG的原则选用管材,同时要求管材壁厚选择应留有 $10^{\circ}\text{C}$ 裕度,由制造厂提出了对高温过热器热段进行管材整体升级改造的方案。

改造后高温过热器的热段入口管材使用T91、出口管材使用TP347HFG,材料分段如图4所示。根据设计计算,改造后仍为每屏第4、6根管温度较高,如表4所示。

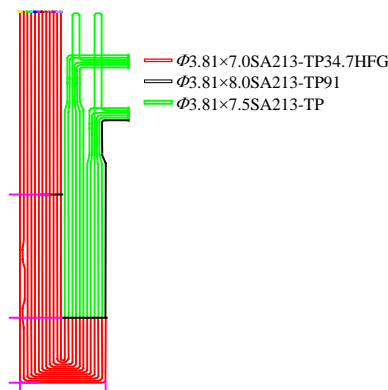


图 4 高温过热器管材的改造设计方案  
Fig. 4 Retrofit design of tube material in high temperature super-heater

表 4 高温过热器改造方案的设计最高金属温度  
Tab. 4 Highest metal temperature of retrofit design in high super-heater

| 管根号 | 管材       | 最高汽温/℃ | 材料最高平均壁温/℃ | 材料强度允许壁温/℃ |
|-----|----------|--------|------------|------------|
| 4   | T91      | 563    | 574        | 601        |
| 6   | T91      | 565    | 576        | 601        |
| 4   | TP347HFG | 594    | 612        | 644        |
| 6   | TP347HFG | 593    | 609        | 644        |

### 3.2 T91 和 TP347HFG 的氧化及剥落特性

T91 金属的蒸汽氧化特性，早在 20 世纪 80 年代就进行了大量的研究，采用水蒸气、空气和其他混合气体测试不同温度下 T91 的氧化特性<sup>[13-16]</sup>。因材料加工制造、试验介质以及试验方法等差异，很难得到 T91 统一的氧化特性关系，目前只形成几种工程常用的关系曲线。图 5 为 T91 蒸汽侧氧化膜厚度与金属温度和时间关系曲线中常见的一种<sup>[17]</sup>，将用于以下计算分析。

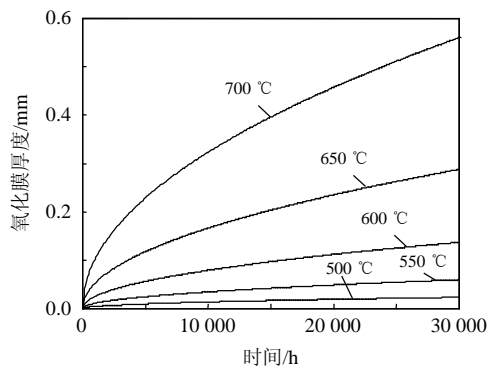


图 5 T91 蒸汽氧化特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of T91 steam oxidation

有关 TP347HFG 金属蒸汽侧的氧化特性也有许多研究<sup>[14,18-20]</sup>，以下计算分析选用了下列氧化膜

生长计算式<sup>[20]</sup>。

$$\delta_{ox} = \sqrt{2A\tau e^{Q/(T_{ox}+273.15)/R}} \quad (1)$$

式中： $\delta_{ox}$  为氧化膜厚度； $A$  为 Arrhenius 常数； $\tau$  为时间； $Q$  为金属激活能； $T_{ox}$  为氧化膜温度； $R$  为通用气体常数。对于不同的金属材料，Arrhenius 常数和激活能均不相同，氧化膜的温度与厚度是密切相关的，需要分时段反复计算。

利用氧化膜厚度生长曲线或式(1)，根据受热面的当前参数可以预测氧化膜厚度的生长变化。对前述改造方案进行计算，初始氧化膜厚度可取为 0；氧化膜的初始温度与金属内壁温度相同，由热偏差计算得到。计算过程中将时间段分为若干小的连续时间段，每个时间段内都要应用式(1)计算氧化膜厚度的变化量，然后再根据厚度重新计算氧化膜的温度，作为下一时段氧化膜厚度的计算温度。

蒸汽侧氧化膜的存在会导致金属超温，有效厚度的降低还会使管材强度下降，但根据 2 台 600MW 超临界锅炉历次爆破管段的金相分析，氧化膜的大量剥落、堆积所导致的短期过热才是主要原因。目前，关于锅炉高温受热面蒸汽侧金属氧化膜的脱落特性研究尚不完善，是锅炉高温金属材料研究中亟待解决的重要问题之一。

为对改造后的高温过热器安全性进行保守估算，采用金相分析手段得到的 2 台 600MW 超临界锅炉频繁发生爆管期间的 T91 材质爆破管段端部氧化膜最大测厚数据 0.32mm 作为其临界剥落厚度。经过多次停炉检查，从堆积物超标的 TP347H 管段中清理出的氧化膜厚度约为 0.075~0.125mm。在同样外部条件下，不同金属材料的氧化膜剥落厚度差异主要来自其线膨胀系数的不同，因此将 TP347H 管材的脱落氧化膜厚度平均值 0.1mm 作为主要与其存在晶粒度差异的 TP347HFG 管材的氧化膜临界剥落厚度。

根据上述临界脱落厚度，应用式(1)就可以分别预测受热面在改造后 T91 和 TP347HFG 管内金属氧化膜厚度达到临界脱落厚度所需要的时间，由此可分析高温过热器改造后的热段金属管束的安全性。

### 3.3 氧化膜剥落时间计算结果及分析

由于高温过热器改造后仍为每屏第 4、6 根管温度最高，因此仅对其在最高使用管壁温度下达到临界剥落厚度的运行时间进行了计算，计算结果如

表5所示。

表5 改进型高温过热器氧化膜剥落预测  
Tab. 5 Forecast of oxide scale spalling  
in high temperature super-heater

| 管屏根号 | 管材       | 氧化膜剥落预测 |         |
|------|----------|---------|---------|
|      |          | 计算厚度/mm | 所需时间/h  |
| 4    | T91      | 0.32    | 66 300  |
| 6    | T91      | 0.32    | 61 800  |
| 4    | TP347HFG | 0.10    | 367 000 |
| 6    | TP347HFG | 0.10    | 369 400 |

由于热偏差的存在,表5中列出的所需时间并不表明所有管屏的第4、6根管的残余寿命已耗尽,而只是表明此时应加强检查,通过全面的氧化膜测厚工作和典型管段的氧化膜形貌分析,以及基于氧化膜厚度的残余寿命计算,根据检修间隔和工期要求,确定局部换管方案。

由表5的计算结果可以看出,根据目前计算方法,高温过热器改进后再辅以相应运行和检修措施的前提下,T91管材可以满足机组一个大修周期内的安全运行要求,而TP347HFG管材则可以满足锅炉全寿命期内的安全运行要求。T91和TP347HFG管材之间的使用寿命存在较大差距,这一问题值得锅炉制造厂在新建锅炉设计时加以优化,同时发电企业在选择超临界机组抑或超超临界机组时,也值得认真考虑。

#### 4 结论

燃烧调整可以降低高温受热面的热偏差,从而减缓氧化膜的生成速度;降低机组启、停速率和避免停炉后的强制冷却可以控制氧化膜的剥落;对受热面进行氧化膜堆积情况和厚度检测,清理氧化膜堆积超标管段,更换氧化膜厚度超标管段,可以明显提高锅炉高温受热面的安全性。因此,“减缓生成、控制剥落、加强检查、及时清理、及时换管”成为锅炉高温蒸汽氧化腐蚀问题治理的重要技术路线。

在锅炉高温受热面的设计中,不仅要考虑高温强度要求,还要根据金属蒸汽侧氧化膜生成和剥落特性合理选用管材。这些都是保障锅炉安全运行和提高机组经济性的关键。

针对2台600MW超临界锅炉进行的事故分析以及提出的相应治理措施和新的安全性评价方法,对超(超)临界锅炉高温受热面的安全运行和优化设计具有指导意义。

#### 致谢

本文在撰写阶段得到了上海锅炉厂有限公司徐雪元总工程师和上海发电设备成套设计研究院丁士发博士、陶丽高级工程师的热情帮助,在此深表感谢。

#### 参考文献

- [1] 周强泰,周克毅,冷伟,等. 锅炉原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 297-299.  
Zhou Qiangtai, Zhou Keyi, Leng Wei, et al. Boiler principle [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009: 297-299(in Chinese).
- [2] Evans H E. Spallation models and their relevance to steam-grown oxides [J]. *Materials at High Temperatures*, 2005, 22(1/2): 155-166.
- [3] Ennis P J, Quadackers W J. Implications of steam oxidation for the service life of high-strength martensitic steel components in high-temperature plant [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2007, 84(1-2): 82-87.
- [4] 徐自立. 高温金属材料的性能、强度设计及工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 106-114.  
Xu Zili. The performance, design and engineering application of high temperature metal materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 106-114(in Chinese).
- [5] Viswanathan R, Purgert R, Rao U. Materials technology for advanced coal power plants[R]. EPRI Report, 2002.
- [6] Viswanathan R, Sarver J, Tanzosh J M. Boiler materials for ultra-supercritical coal power plants-steamside oxidation[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2006, 15(3): 255-274.
- [7] Vaillant J C, Vandenberghe B, Hahn B, et al. TP23,24,911 and 92: new grades for advanced coal-fired power plants-properties and experience[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(1-2): 38-46.
- [8] 贾建民, 陈吉刚, 唐丽英, 等. 12X18H12T 钢管蒸汽侧氧化皮及其剥落物的微观结构与形貌特征[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 43-48.  
Jia Jianmin, Chen Jigang, Tang Liying, et al. Investigation on microstructure and morphology features of steam-side oxidation scale and exfoliated oxide from the internal surface of 12X18H12T tube[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(17): 43-48(in Chinese).
- [9] 边彩霞, 周克毅, 胥建群, 等. 锅炉过热器蒸汽侧氧化膜瞬态应力的有限元分析[J]. 动力工程, 2008, 28(5): 696-700.  
Bian Caixia, Zhou Keyi, Xu Jianqun, et al. Finite element

- analysis on transient stresses of oxide scales at steam side of boiler superheater[J]. *Journal of Power Engineering*, 2008, 28(5): 696-700(in Chinese).
- [10] 雷明凯, 徐忠成, 杨辅军, 等. 高温合金氧化膜破坏的界面断裂力学分析[J]. *金属学报*, 2004, 40(10): 1104-1108.  
Lei Mingkai, Xu Zhongcheng, Yang Fujun, et al. Interface fracture mechanics of failure for oxide scale on superalloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2004, 40(10): 1104-1108(in Chinese).
- [11] Nakagawa K, Matsunaga Y, Yanagisawa T. Corrosion behavior of ferritic steels on the air sides of boiler tubes in a steam/air dual environment[J]. *Materials at High Temperature*, 2001, 18(1): 51-56.
- [12] Sarver M H. Steam oxidation properties of fine-grained steels[C]// *Proceedings 4th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*, Hilton Head Island, USA, 2005: 441-450.
- [13] Wright I G, Sabau A S, Dooley R B. Development of strain in oxides grown in steam tubes[J]. *Materials Science Forum*, 2008, 595(1): 387-395.
- [14] Montgomery M, Karlsson A. Survey of oxidation in steamside conditions[J]. *VGB Kraftwerkstechnik*, 1995, 75(3): 235-240.
- [15] Cory N J, Herrington T M. Kinetics of oxidation of ferrous alloys by superheated steam[J]. *Oxidation of Metals*, 1987, 28(5/6): 237-258.
- [16] Ishitsuka T, Inoue Y. Effect of silicon on the steam oxidation resistance of a 9% Cr heat-resistant steel [J]. *Oxidation of Metals*, 2004, 61(1/2): 125-142.
- [17] Lepingle V, Louis G, Petelot D, et al. High-temperature corrosion behavior of some boiler steels in pure water vapor[J]. *Materials Science Forum*, 2001, 369(1): 239-246.
- [18] Otsuka N, Shida Y, Fujikawa H. Internal-external transition for the oxidation of Fe-Cr-Ni austenitic stainless steel[J]. *Oxidation of Metals*, 1989, 32(1/2): 13-45.
- [19] Sarver M H. Steam oxidation properties of fine-grained steels[C]// *Proceedings 4th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*, Hilton Head Island, USA, 2005: 441-450.
- [20] Sumida T, Ikuno T, Saburi T. High-temperature oxidation behavior of SUS321H and SUS347H boiler tubes in long-term exposure to superheated steam[J]. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 1995, 59(11): 1149-1156.



谢建文

收稿日期：2011-03-21。

作者简介：

谢建文(1968), 男, 工程硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为锅炉燃烧优化和高温受热面蒸汽氧化腐蚀治理技术, 800803@ghpc.com。

(责任编辑 张媛媛)