

超临界机组的合金管蒸汽侧氧化膜生长与剥落研究进展

徐洪¹, 祁晶²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 南京师范大学 能源与机械工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要:超临界机组高温合金管氧化膜剥落问题是困扰机组安全与经济运行的难题,严重制约了机组蒸汽参数和效率的提高。特别是,在超临界机组采用给水加氧处理方式(OT)后,奥氏体不锈钢管内壁氧化膜大面积剥落事故屡见不鲜,尤以TP347H合金管为甚。本文总结了近年来国内外针对超临界机组合金管氧化膜研究的进展及相关成果,首先介绍了超临界蒸汽环境中合金管氧化机理和原子迁移机制,综述了铁素体和奥氏体合金表面氧化膜的形貌特征,分析了蒸汽溶氧对氧化膜生长速率、形貌和缺陷的影响。氧化膜完整性是决定合金抗腐蚀性能的重要因素,但在机组运行过程中氧化膜应力破坏了氧化膜完整性。进一步总结了国内外氧化膜应力和剥落研究的数值分析及实验研究情况,为我国超临界机组氧化膜剥落故障诊断研究提供参考。

关键词:超临界机组;氧化膜生长;氧化膜剥落;锅炉;给水加氧

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.02.001

[引用本文格式]徐洪,祁晶.超临界机组的合金管蒸汽侧氧化膜生长与剥落研究进展[J].热能动力工程,2022,37(2):1-7.
XU Hong, QI Jing. Review on the oxide growth and exfoliation on alloy tube from supercritical power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(2): 1-7.

Review on the Oxide Growth and Exfoliation on Alloy Tube from Supercritical Power Plant

XU Hong¹, QI Jing²

(Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing, China, Post Code: 211102; 2. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210046)

Abstract: The problem generated by oxide scale formed on superheater alloy tubes in supercritical power plant confuses the safety and economic operation, which seriously restricts the improvement of the steam parameters and efficiency of power plant. The supercritical units adopt the feed water oxygenation treatment(OT), which could cause large area exfoliation accident on the oxide scale formed on the inner surface of austenite stainless steel tubes, especially in TP347H alloy tube. This paper reviews the process and related achievements for oxide scale formed on alloy tubes in supercritical power plant at home and abroad in recent years. Firstly, the oxidation mechanism and atomic migration mechanism of alloy tube in supercritical steam environment are introduced. The morphology characteristics of oxide scale on the surfaces of ferrite and austenite alloys are reviewed. The effects of steam dissolved oxygen on the growth rate, morphology and defects of the oxide scale are analyzed. The integrity of oxide scale has an important effect on the corrosion resistance of alloy. The integrity of oxide scale is damaged by the oxide stress during the operation of the unit. This paper further summarizes the numerical analysis and experimental studies on

the stress and exfoliation of oxide scale, and provides reference for the research on the spalling exfoliation fault diagnosis of oxide scale in supercritical units.

Key words: supercritical unit, oxide growth, oxide exfoliation, boiler, feed water oxygenation

引 言

超(超)临界机组是我国发展洁净煤发电技术的优先选择,其内部工质参数达到临界参数以上,能大幅度提高循环热效率,降低单位发电能耗和污染物排放^[1-2]。超临界蒸汽与机组合金管发生氧化反应,形成结构致密的保护性氧化膜,可抑制合金管进一步氧化^[3]。然而,在降负荷和停炉过程中会产生较大的氧化膜热应力,最终导致氧化膜剥落^[4]。剥落的氧化膜不仅会堵塞合金管,还会侵蚀汽轮机叶片,进而对发电机组安全运行构成威胁^[5-6]。近些年,在超临界机组采用给水加氧处理方式(OT)后,高温合金管内壁氧化膜大面积剥落事故频发^[6],尤以 TP347H 合金管为甚。

超临界机组合金管氧化膜问题本身便有学科交叉的复杂性,国外科学研究机构,如美国通用电气公司、美国巴威公司、国立橡树岭实验所等开展了大量的研究工作^[7]。近些年,西安交通大学^[8]、上海交通大学^[9]、南京师范大学^[10]在合金管氧化膜生长机理、氧化膜形貌特征、缺陷形成机理等方面,开展了广泛研究。

本文总结了近年来超临界机组蒸汽侧氧化膜的研究进展及相应成果,首先介绍了超临界蒸汽环境中合金氧化反应机理,概述不同合金材料的氧化膜形貌特征,进一步介绍了蒸汽溶氧对氧化膜内原子迁移、氧化膜形貌和氧化膜缺陷的影响,最后综述了合金管氧化膜应力和剥落特性研究进展,为我国超临界机组氧化膜生长与剥落故障研究提供参考。

1 超临界蒸汽环境中合金管氧化反应机理

合金管暴露在超临界蒸汽环境,快速形成保护性氧化膜,将合金与蒸汽隔离,此后氧化膜进一步生长依赖于氧化膜内原子迁移^[8,11]。氧化膜内原子迁移是高温氧化机理的一个重要组成部分。1933 年, Wagner 等人^[12]提出带电荷物质以化学梯度和电位梯度为驱动力经氧化膜缺陷扩散传质,推导出高温

氧化膜生长遵循抛物线规律。Mott 等人^[13]认为氧化膜中原子迁移的驱动力是氧化膜两侧的电位差。

合金管氧化膜内原子迁移机制与氧化膜缺陷类型相关。纯铁氧化膜主要由 FeO、Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃ 层构成,结合 Engell 的氧化机理^[14],铁的氧化机制如图 1 所示,最内层 FeO 是金属不足的 p 型半导体,由于阳离子空位浓度高,FeO 层生长依赖于阳离子传递^[14];Fe₃O₄ 中 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 位置都存在缺陷,因此铁离子可以通过这两种位置扩散;最外层 Fe₂O₃ 中 Fe³⁺ 和 O²⁻ 都存在缺陷,因此这两种离子都可以迁移^[15]。

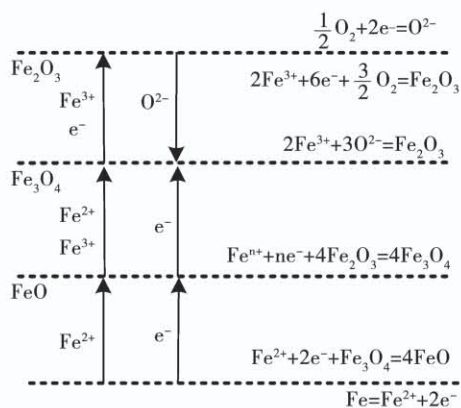


图 1 纯铁的氧化机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oxidation mechanism of pure iron

基于量子力学的密度泛函理论,为微尺度研究 FeCr 合金氧化膜生长机理提供了好的解决方案。Qi 等人^[16]基于量子力学,研究合金表面 Cr 原子对铁基合金蒸汽氧化机理的影响,发现:H₂O 分子先分解成 OH⁻ 和 H⁺ 原子,结合在金属原子的桥位和空心位上;然后,OH⁻ 分解成 O²⁻ 和 H⁺ 原子,移动到两个相邻的空心位置生成氧化物。

2 超临界蒸汽环境中合金管的氧化膜形貌

超临界蒸汽的氧分压远高于形成金属氧化物所需的氧分压,因此超临界蒸汽环境中电站合金管表面会形成多层结构的氧化膜^[17]。已有学者从电站

割取带有氧化膜的合金管,或者在实验室模拟电站环境氧化合金材料,并利用扫描电子显微镜观察合金氧化膜的形貌特征,结合 X 射线衍射仪分析表面氧化膜的元素组成^[18]。电站合金管材主要分为铁素体和奥氏体两种类型,这两类合金蒸汽侧氧化膜的形貌特征存在较大不同。

Wright 等人^[18]从 500 MW 电站割取运行 200 kh 的铁素体 T22 管,发现表面形成厚度大致相等的双层结构氧化膜即外层磁铁矿(Fe_3O_4)和内层铁铬尖晶石(FeCr_2O_4),如图 2(a)所示。其中,外层是柱状颗粒结构,并在晶界处包含大量空隙;内层是包含不规则细小孔隙的等轴晶粒结构,该层的铬含量与合金中铬含量相当。此外,还会在磁铁矿的外表面形成不连续的赤铁矿(Fe_2O_3)。在 593 ℃ 蒸汽环境氧化 63.6 kh 的 T91 合金氧化膜如图 2(b)所示^[18],相比于 T22 合金,在 T91 合金晶界和氧化膜-合金交界面区域,会形成离散的富铬氧化物。并随着氧化时间增加,这些富铬氧化物沉淀发展成半完全层。

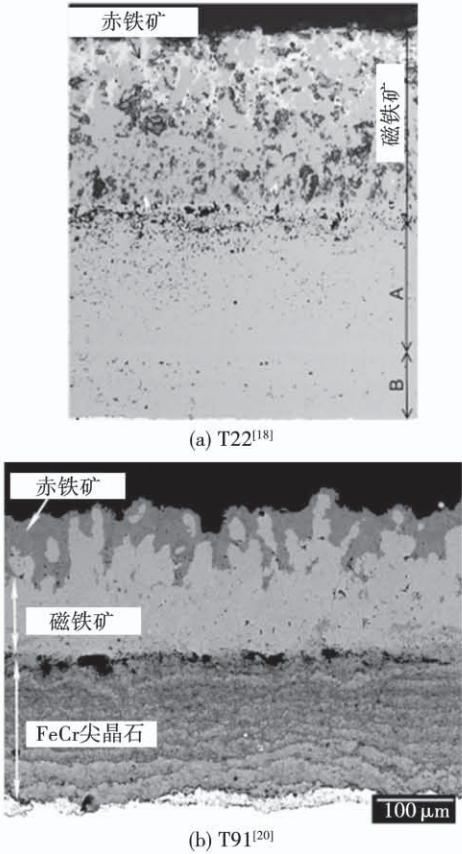


图 2 铁素体氧化膜形貌

Fig.2 The oxide morphology on ferrite alloy

300 系列奥氏体(如 TP304H、21H、TP347HFG 和 TP347H)与铁素体有类似的氧化物,但内层 FeCr 尖晶石有较高的 Cr 含量,对氧化膜形貌产生影响^[3]。由于 Fe 原子向外迁移的速率低,氧化膜生长缓慢,内外层氧化膜交界面更容易形成空隙,外层磁铁矿表面也更易于被氧化成赤铁矿。图 3(a)为在 540 ℃ 蒸汽环境运行 9 kh 的 TP347H 氧化膜横截面形貌^[19]。TP347H 氧化膜分布均匀,且内外层氧化膜厚度大概一致。内层氧化膜晶界处铬元素浓度高,外层柱状结构的氧化膜存在大量孔隙。图 3(b)为在 570 ℃ 蒸汽环境运行 3 kh 的 TP347HFG 氧化膜横截面形貌^[19]。TP347HFG 与 TP347H 相似,也包含双层结构。但 TP347HFG 的氧化物-合金界面含有更多的铬,且分布不均匀。

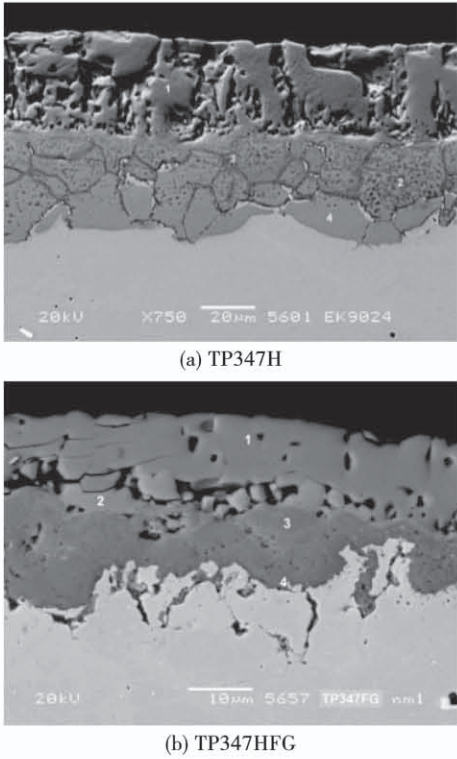


图 3 奥氏体氧化膜形貌

Fig.3 The oxide morphology on austenite alloy

3 超临界蒸汽溶氧对合金管氧化膜的影响

随着超临界机组采用给水加氧处理,学者们注意到了蒸汽溶氧在合金管氧化膜局部形貌特征及剥落机理中的重要作用,并开始以蒸汽溶氧为切入点,在换热器氧化膜缺陷形成机制、裂纹形成及扩展机

理等方面开展了大量研究^[21]。Tan 等人^[22]认为在铁原子迁移系数最低的位置形成磁铁矿缺陷,当这些缺陷浓度足够时,缺陷就会坍塌成孔隙。Maruyama 等人^[23]研究磁铁矿中的铁离子扩散机理,分析氧化膜中铁原子的扩散系数与蒸汽溶氧量的关系:

$$D_{\text{Fe}} = a(p_{\text{O}_2})^{-2/3} + b(p_{\text{O}_2})^{2/3}(1 + 2K_V(p_{\text{O}_2})^{2/3}) \quad (1)$$

式中: p_{O_2} —蒸汽中溶氧压力; a 、 b —与温度相关的系数; K_V —与磁铁矿中缺陷类型相关的无量纲数。随着氧气压力的增加,铁原子扩散系数先增加后降低。

Tan 等人^[22]在 500 °C、25 MPa 超临界蒸汽环境氧化铁基 HCM12A 合金,采用称重法、SEM/EDS、XRD 和 EBSD 研究 25×10^{-9} 和 2×10^{-6} 溶氧量对合金氧化的影响,发现:低溶氧环境会在合金表面形成内层 FeCr 尖晶石和外层磁铁矿(图 4(a));在高溶氧环境,会在最外层形成少量的赤铁矿(图 4(b))。低溶氧环境和高溶氧环境都会在氧化膜表面和内部形成孔隙,其中溶氧量对氧化膜孔隙的形成有重要影响。

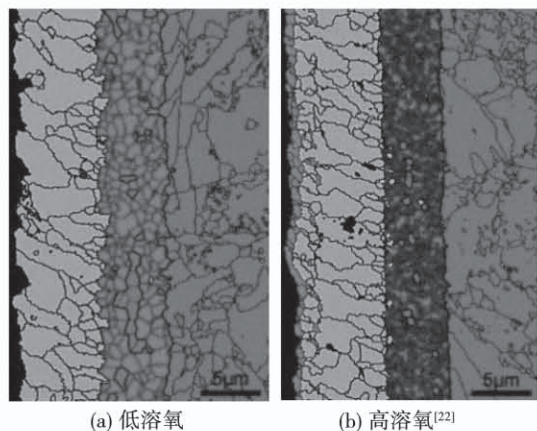
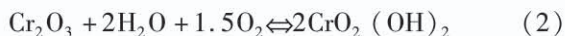


图 4 氧化膜横截面的 EBSD 扫描图

Fig. 4 EBSD scan of cross section of oxide scale

徐洪^[10]发现超临界蒸汽溶氧后,蒸汽中铬含量增加,且蒸汽中的铬含量随溶氧量的增加而逐步升高,认为合金管内层氧化膜与溶氧蒸汽反应生成气态羟基氧化铬:



如图 5 所示,锅炉给水加氧处理后,内外层氧化膜交界面由于铬蒸发逸形成空穴,导致内外层氧

化膜交界面结合强度逐步降低。

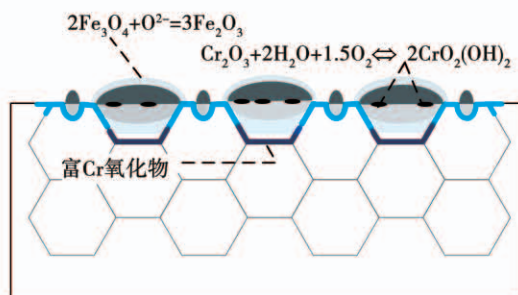


图 5 蒸汽溶氧对合金氧化膜缺陷及成分的影响

Fig. 5 Influence of steam dissolved oxygen on defects and composition of alloy oxide scale

4 合金管氧化膜应力研究

氧化膜完整性是决定合金抗氧化性能的重要因素。然而,合金管蒸汽侧氧化膜在运行过程中受到应力作用,破坏氧化膜的完整性^[24-25]。氧化膜应力主要分为热应力和生长应力两种类型,热应力是由合金管壁和氧化膜热膨胀差异产生的应力,生长应力是由氧化膜自身生长产生的应力。

Bedworth 最早采用氧化物和所消耗金属的体积比(Pilling-Bedworth ratio, PBR)计算生长应力, PBR 大于 1 时,在生长过程中产生压应力,反之产生拉应力^[26]。李美栓等人^[27]改进常规弯曲实验法,氧化膜生长在试样两侧,测量 1 000 °C 空气中 Fe-22Cr-5Al-0.3Y 合金表面氧化膜的生长应力,发现生长应力会随氧化膜厚度增加而降低。目前,关于氧化膜生长应力的形成机制有待进一步深入研究。

围绕电站合金管氧化膜热应力, Sabau 等人^[28]提出轴对称平面应变模型,假设合金/内层氧化膜、内/外层氧化膜交界面结合完好,氧化膜热应力模型表示为:

$$\sigma_{\text{therm}} = \frac{-E_{\text{ox}} \int_{T_f}^{T_i} \Delta\alpha(T) dT}{(1 - \nu_{\text{ox}}) + \frac{d_{\text{ox}}}{d_{\text{sub}}} \frac{E_{\text{ox}}}{E_{\text{sub}}} (1 - \nu_{\text{sub}})} \quad (3)$$

式中: E 、 ν 和 d —弹性模量、泊松比和厚度;下标 ox 和 sub—氧化膜和合金; T_i 、 T_f —降温的初始温度和终止温度; $\Delta\alpha$ —氧化膜和合金热膨胀系数的差异。

Barnes 等人^[29]采用平板模型计算合金表面 Cr_2O_3 氧化膜的热应力,分析热循环过程中氧化膜蠕

变对热应力的影响。边彩霞等人^[4]采用 ANSYS 软件建立锅炉过热器蒸汽侧氧化膜瞬态有限元模型,在蒸汽侧温度和烟气侧温度瞬变条件下,计算 T22 合金蒸汽侧氧化膜和管壁温度和应力场动态响应特性。

5 合金管氧化膜剥落研究

当合金管氧化膜应力过大时产生氧化膜裂纹,导致合金管抗氧化性能失效,严重情况下会引发氧化膜剥落。1978 年美国电力研究院 (EPRI) 基于 Evans 理论建立氧化膜剥落解析模型,计算不同剥落类型的临界应变,并推出著名的 Armitt 氧化膜剥落图^[30],如图 6 所示,建立氧化膜剥落临界应变与氧化膜厚度的关系。然而,氧化膜剥落机理复杂,受到多种因素影响,实际机组也发现氧化膜发生了剥落现象,而比较厚的氧化膜却依然完整。在此基础上,EPRI 使用组合参数 ω 代替 Armitt 图氧化膜厚度,推出新一代氧化膜失效图 AOSFD,如图 7 所示。该组合参数 ω 包含氧化膜厚度、缺陷尺寸、断裂韧性和氧化膜/基体交界面粗糙度^[9]。

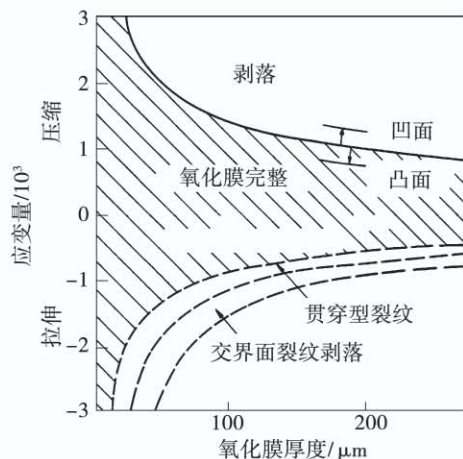


图6 Armitt 氧化膜失效图^[30]

Fig. 6 Failure diagram of Armitt oxide scale^[30]

Sabau 等人^[31]计算停机过程中 T22、T91 和 TP347H 合金表面氧化膜热应力分布,并与文献^[9]中氧化膜临界失效应变对比,预测氧化膜失效的临界厚度,发现模型得到的临界厚度往往高出实际电站氧化膜剥落厚度一倍以上。这表明,若假设氧化

膜结构完好,模型的计算结果往往难以准确评估氧化膜剥落,特别在机组采用给水加氧处理方式 (OT) 后,发生剥落的电站氧化膜更薄。

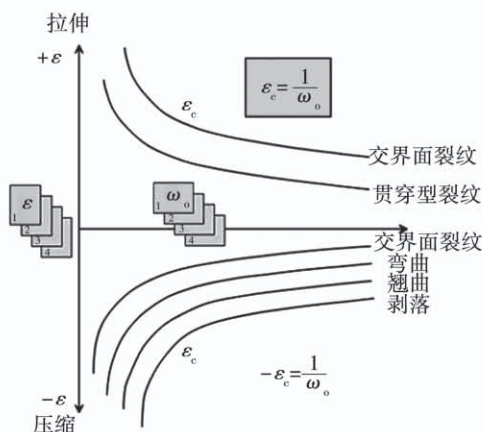


图7 新一代氧化膜失效图 AOSFD^[9]

Fig. 7 Failure diagram of new oxide scale AOSFD^[9]

一些学者认为氧化膜在溶氧蒸汽环境生成气态 $\text{CrO}_2(\text{OH})_2$,由此产生的氧化膜内外层交界面缺陷是加剧氧化膜剥落的主要因素^[17]。另一些学者发现蒸汽溶氧后合金氧化膜表面 Fe_2O_3 体积分数由 22.5% 增至 26%,认为 Fe_2O_3 增大了氧化膜与合金热膨胀量的差异,加剧氧化膜剥落^[32]。针对蒸汽溶氧加剧氧化膜剥落的两种观点,徐洪^[10]采用 ANSYS 软件,通过理论分析发现 Fe_2O_3 对氧化膜应力没有促进作用,反而会降低氧化膜应力;由铬蒸发引起的氧化膜内外层交界面缺陷,是导致氧化膜剥落的重要因素。

6 结论

(1) 合金暴露在超临界蒸汽环境中快速形成保护性氧化膜,将合金与蒸汽隔离。合金进一步氧化依赖于氧化膜内原子迁移,该氧化膜内原子迁移机制与氧化膜的缺陷相关。

(2) 超临界蒸汽环境中合金表面形成双层结构氧化膜,其中氧化膜内铁原子向外迁移,与蒸汽中的氧原子结合,形成磁铁矿 (Fe_3O_4);蒸汽在氧化膜表面分解生成氧原子,这些氧原子向内迁移,并在氧化膜内外层交界面与合金中向外扩散的铁原子反应,形成轴晶粒结构的铁-铬尖晶石 (FeCr_2O_4)。

(3) 采用给水加氧处理方式后,氧化膜中夹杂的氧化铬与溶氧蒸汽反应生成气态羟基氧化物,内外层氧化膜交界面由于铬蒸发散逸形成空穴,导致内外层氧化膜交界面结合强度逐步降低。

(4) 合金管氧化膜受到应力作用,破坏氧化膜的完整性。氧化膜应力主要分为热应力和生长应力两种类型,一般采用实验和数值模拟的方法研究氧化膜应力,材料高温蠕变对氧化膜应力有重要影响。

参考文献:

- [1] QI Jing, ZHOU Ke-yi, HUANG Jun-lin, et al. Numerical simulation of the heat transfer of superheater tubes in power plants considering oxide scale [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 122: 929–938.
- [2] 黄军林, 周克毅, 边彩霞, 等. 锅炉过热器蒸汽侧氧化膜的应力状态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(14): 49–55.
HUANG Jun-lin, ZHOU Ke-yi, BIAN Cai-xia, et al. Analysis on stress state of the steam-side oxide scale in superheater tubes[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(14): 49–55.
- [3] LI Yan-hui, WANG Shu-zhong, SUN Pan-pan, et al. Early oxidation mechanism of austenitic stainless steel TP347H in supercritical water[J]. *Corrosion Science*, 2017, 128: 241–252.
- [4] 边彩霞, 周克毅, 朱正林, 等. 停机过程中锅炉高温受热面蒸汽侧氧化膜的应力分析[J]. *化工学报*, 2013, 64(4): 1444–1452.
BIAN Cai-xia, ZHOU Ke-yi, ZHU Zheng-lin, et al. Numerical analysis of stresses of steam-side oxide scales in boiler high-temperature heating surface in shutdown process[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2013, 64(4): 1444–1452.
- [5] 蒋东方, 白 杨, 朱忠亮, 等. 超临界机组汽水系统腐蚀产物迁徙过程研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(4): 343–348.
JIANG Dong-fang, BAI Yang, ZHU Zhong-liang, et al. Moving process of corrosion products in steam-water system of supercritical power units[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2016, 36(4): 343–348.
- [6] 曹杰玉, 贾建民, 刘 锋, 等. 给水加氧处理对氧化皮脱落的影响研究[J]. *热力发电*, 2017, 46(12): 56–60.
CAO Jie-yu, JIA Jian-min, LIU Feng, et al. Effect of oxygenated treatment on oxide scale exfoliation[J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 12(46): 56–60.
- [7] WRIGHT I G, SCHÜTZE M, DOOLEY R B, et al. Program on technology innovation oxide growth and exfoliation on alloys exposed to steam[R]. EPRI Report TR-1013666, California, 2007.
- [8] LIANG Zhi-yuan, ZHAO Qin-xin. Steam oxidation of austenitic heat-resistant steels TP347H and TP347HFG at 650–800 °C [J]. *Materials*, 2019, 12(4): 577.
- [9] 王 定. 大容量超临界锅炉金属氧化皮问题综合分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
WANG Ding. Comprehensive analysis of the oxide-skin exfoliation in large capacity supercritical pressure once-through boiler[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [10] 徐 洪, 祁 晶, 陈有福, 等. 基于有限元的溶氧蒸汽环境 TP347H 管氧化膜剥落特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(18): 5979–5987.
XU Hong, QI Jing, CHEN You-fu, et al. Investigating the role of oxygenated treatment on oxide exfoliation in TP34H alloy tube based on finite element method[J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 2020, 40(18): 5979–5987.
- [11] 徐 洪, 梁志远, 丁建良, 等. 国产 Super304H 耐热钢实炉高温腐蚀性能研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(24): 63–66.
XU Hong, LIANG Zhi-yuan, DING Jian-liang, et al. Study on high temperature corrosion resistance of domestic super 304h heat resistant steel in real furnace[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(24): 63–66.
- [12] WAGNER C. Models for lattice defects in oxide layers on passivated iron and nickel[J]. *Chemischer Informationsdienst*, 1973, 77(12): 1090–1097.
- [13] MOTT N F. The Basis of the electron theory of metals, with special reference to the transition metals [J]. *Proceedings of the Physical Society Section A*, 1949, 62(7): 416–422.
- [14] ENGELL H. The concentration gradient of iron-ion-vacancies in wustite scaling films and the mechanism of oxidation of iron[J]. *Acta Metallurgica*, 1958, 6(6): 439–445.
- [15] SCHWENK W, RAHMEL A. Theoretical considerations on phase boundary reactions and mass transfer during the oxidation of iron [J]. *Oxidation of Metals*, 1986, 25(5): 293–303.
- [16] QI J, XU H, LIANG Z, et al. The role of Cr atom in the early steam oxidation of Fe-based alloys: an atomistic simulation[J]. *Materials and Corrosion*, 2020, 72(3): 465–473.
- [17] 朱志平, 柳 森, 郑敏聪. 外加溶氧对锅炉过热器管内氧化皮生长及剥落的影响[J]. *全面腐蚀控制*, 2016, 30(5): 12–18.
ZHU Zhi-ping, LIU Sen, ZHENG Min-cong. Effect of adding dissolved oxygen upon formation and exfoliation of oxide scale of superheater tube [J]. *Total Corrosion Control*, 2016, 30(5): 12–18.
- [18] WRIGHT I G, BARRY D R. Morphologies of oxide growth and

- exfoliation in superheater and reheater tubing of steam boiler[J]. *Materials at High Temperatures*, 2011, 28(1): 40–57.
- [19] MONTGOMERY M, LARSEN O H, JENSEN S A, et al. Field investigation of steamside oxidation of TP347H[J]. *Materials Science Forum*, 2004, 461: 1007–1014.
- [20] WRIGHT I G, DOOLEY R B. Steam-side scale morphologies associated with scale exfoliation from ferritic steel T22[J]. *Materials at High Temperatures*, 2013, 30(3): 168–182.
- [21] QIU W B, ZHANG S S, LI C M, et al. Protective properties analysis of oxide skin by WOT in supercritical unit[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 616–618: 1725–1731.
- [22] TAN L, YANG Y, ALLEN T R. Porosity prediction in supercritical water exposed ferritic/martensitic steel HCM12A[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(12): 4234–4242.
- [23] MARUYAMA T, FUKAGAI N, UEDA M, et al. Chemical potential distribution and void formation in magnetite scale formed in oxidation of iron at 823 K[J]. *Materials Science Forum*, 2004, 461–464: 807–814.
- [24] QI J, ZHOU K Y, HUANG J L, et al. Numerical simulation of the failure behavior of steam-side oxide scale considering oxide creep and physical defects[J]. *Materials and Corrosion*, 2018, 69(2): 215–226.
- [25] QI J, ZHOU K, HUANG J, et al. Failure evolution of steam-side oxide scales grown on T91 superheater tubes by acoustic emission technique[J]. *Materials and Corrosion*, 2017, 68(8): 892–901.
- [26] MOORE W J. Oxidation of metals at high temperatures[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1953, 100(7): 302–313.
- [27] 李美栓, 辛 丽, 钱余海, 等. 氧化膜应力研究进展[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1999, 11(5): 300–305.
- LI Mei-shuan, XIN Li, QIAN Yu-hai, et al. A review on studies of internal stress in oxide scales[J]. *Corrosion science and protection technology*, 1999, 11(5): 300–305.
- [28] SABAU A S, WRIGHT I G. Influence of oxide growth and metal creep on strain development in the steam-side oxide in boiler tubes[J]. *Oxidation of Metals*, 2010, 73(5): 467–492.
- [29] BARNES J J, GOEDJEN J G, SHORES D A. A Model for stress generation and relief in oxide-metal systems during a temperature change[J]. *Oxidation of Metals*, 1989, 32(5): 449–469.
- [30] ARMITT J, HOLMES R, MANNING M I, et al. The spalling of steam-grown oxide from superheater and reheater tube steels[R]. EPRI Report FP-686, California, 1978.
- [31] SABAU A S, SHINGLEDECKER J P, WRIGHT I G. Steam-side oxide scale exfoliation behavior in superheaters and reheaters: differences in the behavior of alloys T22, T91 and TP347 based on computer simulation results[C]//Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 2011.
- [32] 张广文, 孙本达, 张金升, 等. 给水加氧处理对过热器高温氧化皮生成影响的试验研究[J]. *热力发电*, 2012, 41(1): 31–33.
- ZHANG Guang-wen, SUN Ben-da, ZHANG Jin-sheng, et al. Influence of adding oxygen into feed-water treatment upon high-temperature oxide skin formed in the superheater[J]. *Thermal Power Generation*, 2012, 41(1): 31–33.

(姜雪梅 编辑)