

DOI: 10.7652/xjtuxb201907004

超临界二氧化碳条件下 3 种典型耐热钢 腐蚀特性实验研究

梁志远, 桂雍, 赵钦新

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对超临界电站锅炉蒸汽侧氧化皮剥落严重, 主要研究了新型超临界二氧化碳动力系统高温部件材料腐蚀问题。选取典型耐热钢 T91、TP347HFG 和 Sanicro 25 为实验材料, 在超临界二氧化碳腐蚀实验系统上进行 650 ℃、15 MPa 工况条件下 500 h 的腐蚀实验。腐蚀实验结束后, 通过分析天平测得耐热钢腐蚀前后的质量变化; 利用拉曼光谱仪、X 射线衍射仪和辉光放电光谱仪对耐热钢表面腐蚀产物进行物相和成分表征以获得耐热钢的腐蚀行为。腐蚀质量增量结果表明, 3 种耐热钢的腐蚀动力学符合抛物线腐蚀规律, 且 T91 腐蚀质量增量高于其他两种奥氏体耐热钢。微观表征结果显示, 耐热钢 T91 表面腐蚀产物从二氧化碳/氧化物界面到基体依次为 Fe_3O_4 、 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$ 和弥散于基体的碳化物, 而奥氏体耐热钢腐蚀产物从气固界面到基体主要为 Cr 的氧化物、Mn 和 Si 的氧化物和碳化物。耐热钢腐蚀产物表面观察到了碳的沉积现象。基于耐热钢表面的腐蚀产物, 提出了利用腐蚀退化深度表征耐热钢的抗腐蚀性能。3 种耐热钢的腐蚀退化深度从大到小依次为 Sanicro 25、TP347HFG 和 T91。

关键词: 超临界二氧化碳; 耐热钢; 腐蚀行为

中图分类号: TG178 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0023-07

High-Temperature Corrosion Behavior of Three Heat-Resistant Steels under Supercritical Carbon Dioxide Condition

LIANG Zhiyuan, GUI Yong, ZHAO Qinxin

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Considering the severe oxide skin exfoliation in supercritical boilers, this paper conducted the research on the corrosion behavior of heat-resistant steel in supercritical carbon oxygen system. The high-temperature corrosion behaviors of heat-resistant steels T91, TP347HFG and Sanicro 25 at 650 ℃ and 15 MPa for 500 h in supercritical carbon dioxide environment were studied. To acquire the corrosion behavior data of investigated heat-resistant steel, the Raman analysis, X-ray diffraction and glow-discharge optical emission spectrometry were employed to characterize the corrosion products. The mass change of the heat-resistant steels was obtained by the analytical balance result. Weight gain results showed that the corrosion kinetics of the investigated heat-resistant steels obey a parabolic corrosion law. The corrosion products formed on T91 are mainly composed of Fe_3O_4 , $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$ and carbides mixed in the substrate from the gas/oxide interface to the substrate. Corrosion products formed on

austenite heat-resistant steel were mainly Cr_2O_3 , Mn and Si oxides and carbides in the substrate. Moreover, some carbon was detected on the surface of corrosion products. Based on the above corrosion products, the corrosion degradation depth was used to evaluate the corrosion resistance of steels in high-temperature supercritical carbon dioxide. The corrosion degradation depths of the three steels were in the following order: Sanicro 25 > TP347HFG > T91.

Keywords: supercritical carbon dioxide; heat-resistant steel; corrosion behavior

超临界二氧化碳循环发电系统具有能量转化效率高、关键部件和系统所占空间小、节水巨大和经济性显著等优点。相对于传统蒸汽工质的朗肯循环,超临界二氧化碳循环发电技术优势显著,被认为是新能源领域最具应用前景的能量转换系统之一,该技术在新型燃气轮机、第四代核电、火力发电以及太阳能发电等领域应用前景广阔。在同等级的运行参数下,超临界二氧化碳发电系统的循环效率比蒸汽循环系统高约5%。20世纪70年代研究人员认识到在闭合布雷顿循环中以超临界二氧化碳为工质,利用少量的压缩功,可以使系统达到更高的转换效率^[1-3]。限于当时透平机械和紧凑式换热器的制造加工技术,超临界二氧化碳循环发电技术未得到发展及应用。近几年美国、日本和中国等国家相继在核电、太阳能发电和火电等领域开展超临界二氧化碳循环发电系统与关键技术的研究^[4-10]。清华大学、上海发电设备成套设计研究院、工程热物理研究所、西安热工研究院等科研机构开展了超临界二氧化碳循环发电系统设计、优化和关键部位材料选型研究^[7-10]。文献[11-19]指出,超临界二氧化碳环境下耐热钢及合金的抗腐蚀性性能决定于材料的成分,耐热钢及合金中高Cr和高Ni含量提高材料的抗腐蚀性能,9Cr马氏体耐热钢的腐蚀速率远高于18Cr奥氏体耐热钢及合金。微量元素会影响材料的抗腐蚀性能,元素Mn、Si在耐热钢表面优先形成连续且致密的氧化膜,从而提高了耐热钢的抗腐蚀性能^[20-23]。

目前,超临界二氧化碳循环发电系统的研究重点逐渐转移到长周期系统的安全高效运行,为确保系统的高效安全运行,系统关键高温部件材料的腐蚀及腐蚀寿命预测问题成为关键因素之一。2011年以来,超超临界火电机组因蒸汽工质侧腐蚀问题频繁爆管停机,单次事故造成数以千万元的经济损失。与超临界水蒸气相比,超临界二氧化碳工质具有特殊性,腐蚀过程中碳的渗入及反应增加了研究的复杂性。

兼顾强度与抗腐蚀性的耐热钢体系已成熟应用于超超临界燃煤发电和核电领域的材料体系,成为

超临界二氧化碳循环发电系统关键部件材料,具有明显的优势。铁素体耐热钢T91、奥氏体耐热钢TP347HFG和Sanicro 25已广泛应用于超超临界电站锅炉,为不同Cr含量耐热钢的典型代表,因此,研究超临界二氧化碳环境典型耐热钢的腐蚀行为及机理具有重要的科学和应用意义,可为超临界二氧化碳系统应用现有材料提供技术支持。

1 实验系统和材料

超临界流体腐蚀实验系统由流体输入系统、流体预热器、主实验装置、冷凝器和排空部分组成,超临界流体实验系统可通入去离子水、二氧化碳及其的混合物,如图1所示。腐蚀系统压力通过OSK背压阀控制,实验过程中预热器温度为700℃,实验段温度为650℃,压力为 (15 ± 0.2) MPa,实验时间为50、125、250和500 h,实验用二氧化碳纯度(质量分数)为99.999%。实验材料选择铁素体耐热钢T91、奥氏体耐热钢TP347HFG和Sanicro 25,材料由上海锅炉厂有限公司提供,材料化学成分如表1所示。

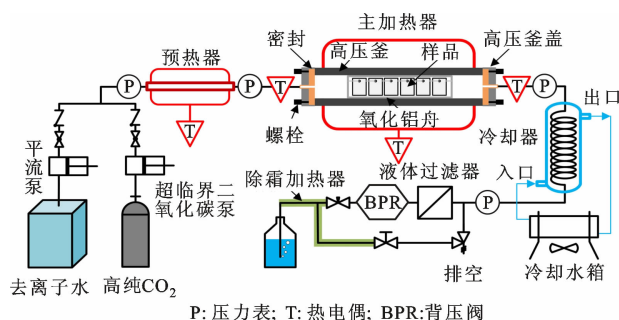


图1 超临界流体腐蚀实验系统图

尺寸为12 mm×12 mm×2 mm的样品悬挂于氧化铝舟,保证样品与超临界流体充分接触。实验前,样品经过240#、400#、800#和1 000#砂纸打磨后,置于酒精溶液中超声清洗5 min,低温晾干后测量表面积和质量,之后放置于腐蚀系统主实验段进行实验。实验前通入二氧化碳气体排空高压釜内残留的空气以保证实验的精度,实验结束后,称量样品

的质量用来获得材料的反应动力学曲线,分别对样品进行 LabRAM 型拉曼光谱和 X’pert PRO 型 X 射线衍射分析,获得腐蚀产物及其表面的物相成分。

表 1 实验材料化学成分

材料	质量分数/%									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	其他元素		
T91	0.11	0.46	0.34	0.003	0.013	8.67	0.07	Nb:0.07	V:0.19	Mo:0.94
TP347HFG	0.08	0.75	0.48	0.002	0.020	18.80	10.70	Cu:0.05 Nb:0.73		
Sanicro 25	0.07	0.49	0.17	0.001	0.014	21.65	25.07	W:3.85	Cu:3.0	Co:1.5 Nb:0.5

2 实验结果

650℃、15 MPa 条件下 500 h 后耐热钢 T91、TP347HFG 和 Sanicro 25 的腐蚀质量增量及腐蚀动力学曲线如图 2 所示。铁素体耐热钢 T91 的腐蚀质量增量远高于奥氏体耐热钢 TP347HFG 和 Sanicro 25,而奥氏体耐热钢 TP347HFG 和 Sanicro 25 的腐蚀质量增量趋势基本一致,实验结果与超临界水和过热蒸汽环境中耐热钢腐蚀质量增量结果一致^[23-24],说明超临界二氧化碳腐蚀过程中 Cr 元素的重要性。图 2b 中 3 种耐热钢的腐蚀动力学曲线均符合抛物线型的腐蚀动力学规律,其中 T91 的腐

蚀动力学常数高于其他两种耐热钢,说明超临界二氧化碳腐蚀过程受离子扩散所控制。

对超临界二氧化碳腐蚀后样品的腐蚀产物进行表面拉曼光谱分析,结果如图 3 所示。图 3a 中发现 T91 腐蚀产物表面主要为 Fe₃O₄,与已有高温二氧化碳环境中 T91 腐蚀产物表面为 Fe₂O₃ 不同,文献[14]可知,超临界二氧化碳环境中的氧分压与高温二氧化碳中不同,这种差异是腐蚀产物不同的原因。图 3b、图 3c 显示了奥氏体耐热钢 TP347HFG 和 Sanicro 25 腐蚀产物表面主要是 Cr₂O₃,这是因为奥氏体耐热钢中 Cr 含量较高,且 Cr 元素与 O 的亲合力高于 Fe、Ni,从而在耐热钢表面形成 Cr₂O₃。

利用拉曼光谱分析腐蚀产物表面后,对 3 种耐

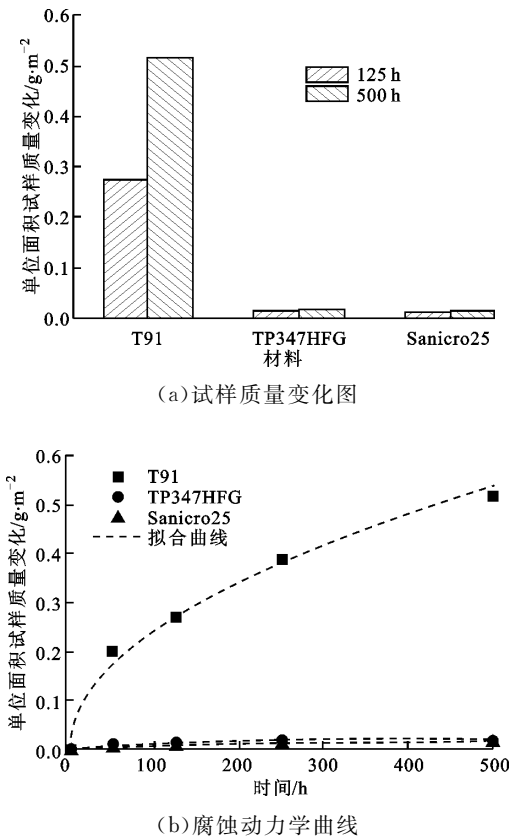


图 2 3 种耐热钢的腐蚀质量增量及腐蚀动力学曲线

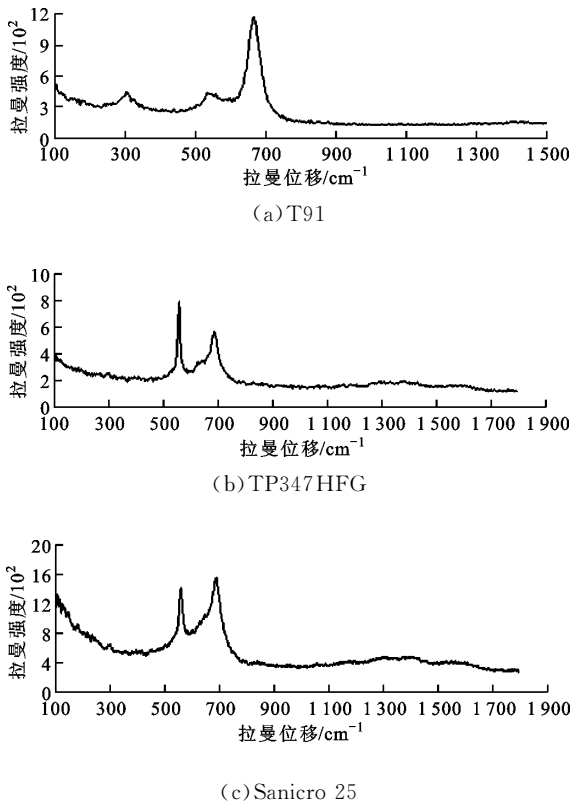
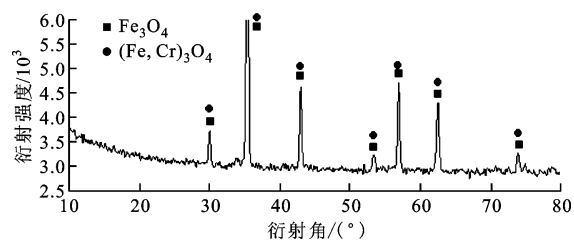
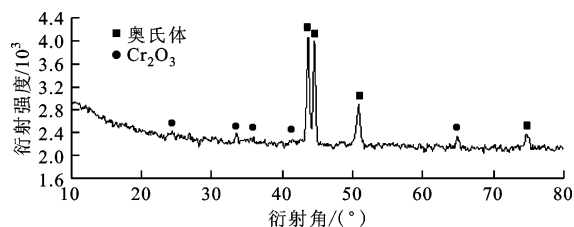


图 3 250 h 后 3 种耐热钢腐蚀产物拉曼分析结果

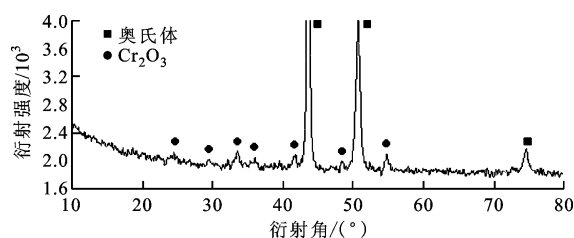
热钢腐蚀产物进行了X射线衍射分析,结果如图4所示。由图4可知,T91的腐蚀产物主要为 Fe_3O_4 、 $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$,奥氏体耐热钢TP347HFG、Sanicro 25腐蚀产物为奥氏体相和 Cr_2O_3 。由于奥氏体耐热钢表面的腐蚀产物较薄,所以X射线衍射结果中出现了奥氏体相;由于奥氏体耐热钢中Cr含量均高于18%,在腐蚀过程中可提供充足的Cr以保证 Cr_2O_3 保护膜连续并持续生长;铁素体耐热钢中的Cr含量较低,无法形成完整的 Cr_2O_3 氧化膜,导致Fe离子在腐蚀过程中不断向氧化物与气体界面扩散并反应,形成 Fe_3O_4 和 $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ 。除T91腐蚀产物表面出现 Fe_2O_3 之外,衍射结果与耐热钢在蒸汽环境中的实验结果一致。



(a) T91



(b) TP347HFG

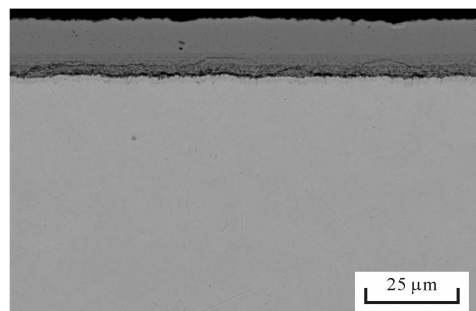


(c) Sanicro 25

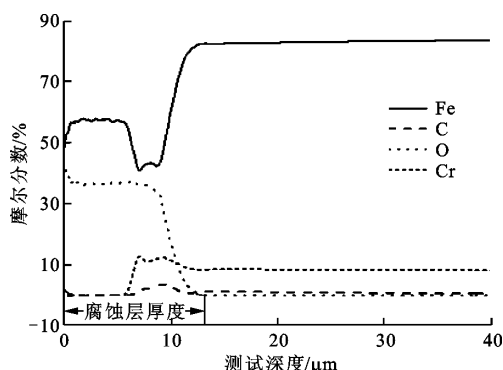
图4 实验125 h后3种耐热钢腐蚀产物的X射线衍射分析结果

对耐热钢腐蚀产物进行了辉光放电光谱分析以获得腐蚀产物沿深度方向元素分布规律,测试结果如图5所示。图5b显示耐热钢T91腐蚀产物主要由Fe、O和Cr组成,腐蚀层厚度约为 $12.5\ \mu\text{m}$,腐蚀产物从气固界面到耐热钢基体主要为Fe的氧化物、Fe-Cr氧化物和部分碳化物。结合X射线衍射结果,判定T91耐热钢表面腐蚀产物从二氧化碳/

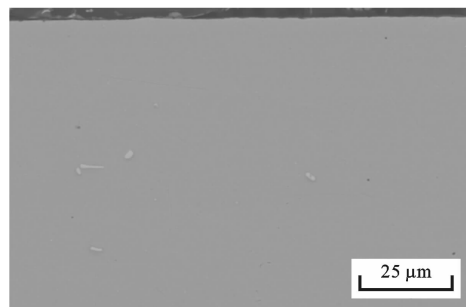
氧化物界面到基体依次为 Fe_3O_4 、 $(\text{Fe,Cr})_3\text{O}_4$ 和弥散于基体的碳化物。图5d显示奥氏体耐热钢TP347HFG腐蚀产物主要为Cr、O、Mn、Si等元素,腐蚀层厚度约为 $0.4\ \mu\text{m}$,腐蚀产物从气固界面到耐



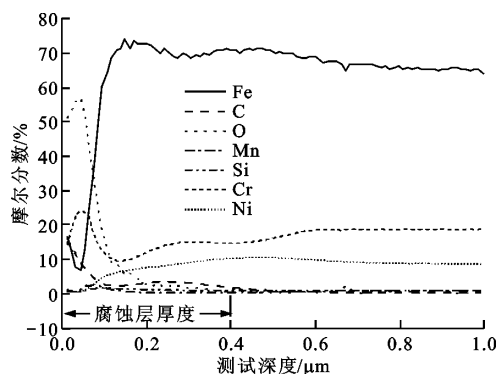
(a) T91 试样断面形貌



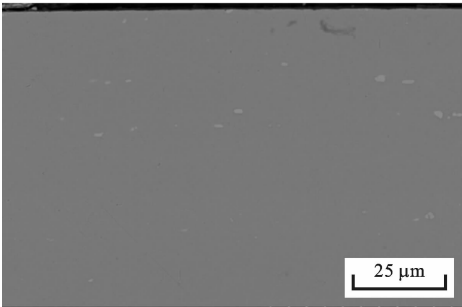
(b) T91 试样辉光放电元素分析结果



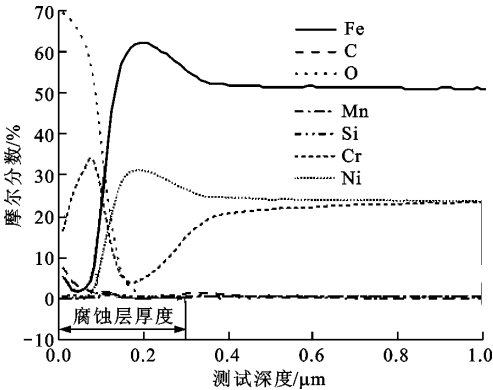
(c) TP347HFG 试样断面形貌



(d) TP347HFG 试样辉光放电元素分析结果



(e)Sanicro 25 试样断面形貌



(f)Sanicro 25 试样辉光放电元素分析结果

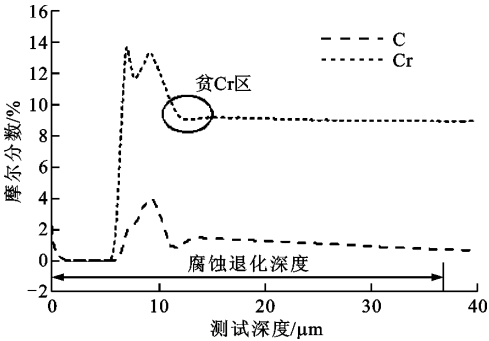
图 5 650℃、15 MPa 下 250 h 后 3 种耐热钢腐蚀产物断面形貌及辉光放电元素分析结果

热钢基体主要为 Cr 的氧化物、Mn 和 Si 的氧化物和碳化物,由于腐蚀产物非常薄,X 射线衍射无法检测到除 Cr_2O_3 之外的其他氧化物,推断奥氏体耐热钢 TP347HFG 腐蚀产物从二氧化碳/氧化物界面到基体依次为 Cr_2O_3 、Mn-Si 氧化物和部分碳化物。图 5f 显示奥氏体耐热钢 Sanicro 25 腐蚀产物主要为 Cr、O、Mn 和 Si 等元素,腐蚀层厚度约为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$,耐热钢腐蚀产物为 Cr_2O_3 、Mn-Si 氧化物和部分碳化物,与 TP347HFG 相类似。

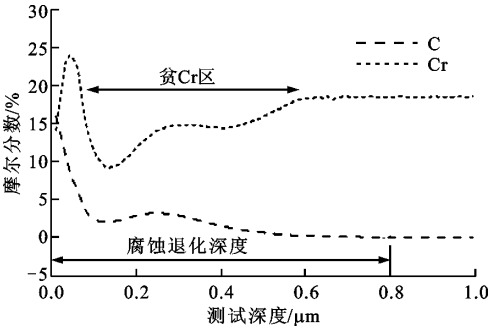
图 6 显示了超临界二氧化碳环境下耐热钢表面腐蚀产物沿深度方向 Cr、C 元素分析结果。由图 6 可知:耐热钢腐蚀产物中均含有贫 Cr 区域和富 C 区域;奥氏体耐热钢 TP347HFG 和 Sanicro 25 中贫 Cr 区域更明显,主要原因是腐蚀过程中 Cr 离子不断向外扩散形成富 Cr 氧化膜。

3 分析与讨论

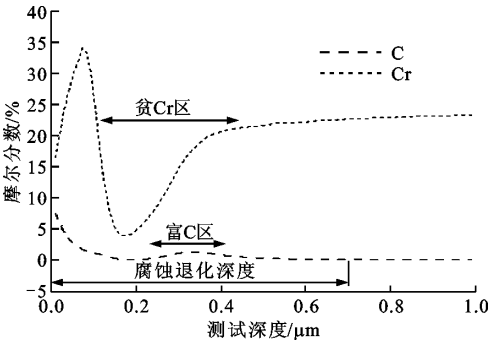
超临界二氧化碳环境下奥氏体耐热钢腐蚀质量变化明显低于铁素体耐热钢,结合 3 种耐热钢表面腐蚀产物的表征,铁素体耐热钢腐蚀产物主要是 Fe 的氧化物,而奥氏体耐热钢腐蚀产物为富 Cr 的氧化物。根据金属元素 Fe、Cr 与 O 的亲合力,Cr 与 O



(a)T91



(b)TP347HFG



(c)Sanicro 25

图 6 250 h 后 3 种耐热钢腐蚀产物沿深度方向 Cr、C 元素分析结果

的亲合力高于 Fe 与 O 的亲合力,说明腐蚀反应初期耐热钢表面形成 Cr 的氧化物。铁素体耐热钢 T91 之所有形成铁的氧化物,是因为耐热钢中的 Cr 不足以形成完整的富 Cr 保护膜,导致 Fe 离子快速向气体与氧化物界面扩散,而奥氏体耐热钢中 Cr 含量足以支撑腐蚀过程中完整保护膜的形,这是奥氏体耐热钢表面质量变化较小的原因。

由于超临界二氧化碳与超临界水工质中元素种类和腐蚀特性不同,所以重点分析超临界二氧化碳腐蚀产物中的 Cr、C 元素分布。腐蚀过程中金属离子不断从基体向外扩散,Cr 元素出现 2 个峰值,第 1 个峰值为 Cr 原子置换了 Fe_3O_4 中的 Fe 原子形成

(Fe,Cr)₃O₄,第2个峰值一部分为(Fe,Cr)₃O₄,另一部分为CO₂穿过氧化层后分解的碳与基体中的Cr反应形成的Cr、Fe碳化物,之后Cr元素含量出现了小范围的降低,腐蚀产物表面的C含量较高,这是CO₂在表面分解形成的C沉积。

耐热钢TP347HFG表面主要是Cr的氧化物,而Cr₂O₃氧化层底部出现了一段深约0.5 μm的贫Cr区域,C含量在Cr₂O₃氧化层底部出现了峰值,说明CO₂穿过Cr₂O₃氧化层并与基体发生反应而形成碳化物;耐热钢Sanicro 25表面主要是Cr的氧化物,而Cr₂O₃氧化层底部出现了一段深约0.3 μm的贫Cr区域,C含量在Cr₂O₃氧化层底部出现了峰值,说明CO₂穿过Cr₂O₃氧化层并与基体发生反应而形成碳化物。耐热钢TP347HFG和Sanicro 25腐蚀产物表面的C含量较高,与T91腐蚀产物表面碳含量类似。

原有评估方法主要通过腐蚀后样品质量增量及腐蚀层厚度来判断耐热材料的抗腐蚀性能^[14-15,23,25],但是超临界二氧化碳腐蚀过程中耐热钢出现了渗碳区域和贫Cr区域,因此原有评估方法不再适用于超临界二氧化碳环境中耐热材料抗腐蚀性能的评估。因此,本文提出了腐蚀退化区的概念,退化区包括了腐蚀氧化层、渗碳区域和贫Cr区域,所提评估方法可有效判断耐热材料腐蚀后受影响的区域,尤其是渗碳区域,腐蚀退化深度可评估耐热材料的抗腐蚀性能,通过该方法评估了3种耐热钢的抗腐蚀性能,性能由大至小依次为Sanicro 25、TP347HFG、T91。

4 结 论

(1)超临界二氧化碳环境下耐热钢腐蚀动力学规律符合抛物线型腐蚀规律,且T91腐蚀质量增量远大于TP347HFG、Sanicro 25。

(2)T91耐热钢表面腐蚀产物从二氧化碳/氧化物界面到基体依次为Fe₃O₄、(Fe,Cr)₃O₄和弥散于基体的碳化物,而奥氏体耐热钢腐蚀产物从气固界面到基体主要为Cr的氧化物、Mn和Si的氧化物和碳化物。奥氏体耐热钢表面的富Cr保护膜提高了抗腐蚀性能。

(3)根据实验结果提出了根据腐蚀退化深度评估超临界二氧化碳环境下耐热钢抗腐蚀性能,主要包括氧化层、渗碳区和贫Cr区域,从而获得了3种耐热钢的抗腐蚀性能,由大到小依次为Sanicro 25、TP347HFG和T91。

参考文献:

- [1] ANGELINO G. Carbon dioxide condensation cycles for power production [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1968, 90(3): 287-295.
- [2] YANTOVSKII E I, WALL G, LINDQUIST L, et al. Exergonomics of the OCDOPUS project [J]. Energy Conversion and Management, 1993, 34 (9/10/11): 1213-1218.
- [3] MATHIEU P, NIHART R. Zero-emission MATHANT cycle [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1999, 121(1): 116-121.
- [4] CHACARTEGUI R, ESCALONA J, SÁNCHEZ D, et al. Alternative cycles based on carbon dioxide for central receiver solar power plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5): 872-879.
- [5] CHA J E, LEE T H, EOH J H, et al. Development of a supercritical CO₂ Brayton energy conversion system coupled with a sodium cooled fast reactor [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2009, 41(8): 1025-1044.
- [6] BRESE R G, KEISER J R, PINT B A. Effect of thermal cycling on compatibility in CO₂ for concentrated solar power applications [J]. Oxidation of Metals, 2017, 87(5/6): 631-642.
- [7] 段承杰, 杨小勇, 王捷. S-CO₂ 布雷顿循环的参数优化 [J]. 原子能科学技术, 2011, 45(12): 1489-1494. DUAN Chengjie, YANG Xiaoyong, WANG Jie. Parameters optimization of supercritical carbon dioxide Brayton cycle [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(12): 1489-1494.
- [8] 梁墩煌, 张尧立, 郭奇勋, 等. 核反应堆系统中以超临界二氧化碳为工质的热力循环过程的建模与分析 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, 54(4): 608-613. LIANG Dunhuang, ZHANG Yaoli, GUO Qixun, et al. Modeling and analysis of nuclear reactor system using supercritical-CO₂ Brayton cycle [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2015, 54(5): 608-613.
- [9] 颜见秋, 李富, 周旭华, 等. 气冷快堆燃料组件均匀化初步研究 [J]. 原子能科学与技术, 2009, 43(7): 626-629. YAN Jianqiu, LI Fu, ZHOU Xuhua, et al. Homogenization of fuel assembly of gas-cooled fast reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(7): 626-629.
- [10] 张一帆, 王生鹏, 刘文娟, 等. 超临界二氧化碳再压缩再热火力发电系统关键参数的研究 [J]. 动力工程

- 学报, 2016, 36(10): 827-833.
- ZHANG Yifan, WANG Shengpeng, LIU Wenjuan, et al. Study on key parameters of a supercritical fossil-fired power system with CO₂ recompression and reheat cycles [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(10): 827-833.
- [11] LEE H J, KIM H Y, JANG C H. Corrosion behaviors of structural materials in high temperature S-CO₂ environments [J]. Corrosion Science and Technology, 2014, 13(2): 41-47.
- [12] FIROUZDOR V, SRIDHARAN K, CAO G, et al. Corrosion of a stainless steel and nickel-based alloys in supercritical carbon dioxide environment [J]. Corrosion Science, 2013, 69: 281-291.
- [13] FURUKAWA T, ROUILLARD F. Oxidation and carburizing of FBR structural materials in carbon dioxide [J]. Progress in Nuclear Energy, 2015, 82: 136-141.
- [14] BRESE R G, KEISER J R, PINT B A. Effect of thermal cycling on compatibility in CO₂ for concentrated solar power applications [J]. Oxidation of Metals, 2017, 87(5/6): 631-642.
- [15] PINT B A, BRESE R G, KEISER J R. Effect of pressure on supercritical CO₂ compatibility of structural alloys at 750 °C [J]. Materials and Corrosion, 2017, 68(2): 151-158.
- [16] SARRADE S, FÉRON D, ROUILLARD F, et al. Overview on corrosion in supercritical fluids [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2017, 120: 335-344.
- [17] FIROUZDOR V, CAO G P, SRIDHARAN K, et al. Corrosion resistance of PM2000 ODS steel in high temperature supercritical carbon dioxide [J]. Materials and Corrosion, 2015, 66(2): 137-142.
- [18] HOLCOMB G R, CARNEY C, DOĞAN Ö N. Oxidation of alloys for energy applications in supercritical CO₂ and H₂O [J]. Corrosion Science, 2016, 109: 22-35.
- [19] FIROUZDOR V, SRIDHARAN K, CAO G, et al. Corrosion of a stainless steel and nickel-based alloys in high temperature supercritical carbon dioxide environment [J]. Corrosion Science, 2013, 69: 281-291.
- [20] HE L, ROMAN P, LENG B, et al. Corrosion behavior of an alumina forming austenitic steel exposed to supercritical carbon dioxide [J]. Corrosion Science, 2014, 82(2): 67-76.
- [21] NGUYEN T D, ZHANG J, YOUNG D J. Effects of silicon and water vapour on corrosion of Fe-20Cr and Fe-20Cr-20Ni alloys in CO₂ at 650 °C [J]. Oxidation of Metals, 2017, 87(3/4): 541-573.
- [22] NGUYEN T D, ZHANG J, YOUNG D J. Effect of Mn on oxide formation by Fe-Cr and Fe-Cr-Ni alloys in dry and wet CO₂ gases at 650 °C [J]. Corrosion Science, 2016, 112: 110-127.
- [23] 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.
- [24] ASTEMAN H, SVENNSSON J E, JOHANSSON L G, et al. Indication of chromium oxide hydroxide evaporation during oxidation of 304L at 873 K in the presence of 10% water vapor [J]. Oxidation of Metals, 1999, 52: 95-111.
- [25] NEWCOMB S B, STOBBS W M. The initiation of breakaway oxidation of Fe-9Cr-1Mo in a high pressure CO₂ atmosphere [J]. Oxidation of Metals, 1986, 26(5/6): 431-466.
- [本刊相关文献链接]**
- 张赞坚, 刘朝晖, 潘辉, 等. 低流阻火箭煤油的超临界压力流动与换热特性. 2019, 53(1): 129-134. [doi:10.7652/xjtuxb201901017]
- 刘佳伦, 李会雄, 冯渊, 等. 跨临界变压运行中水冷壁动态特性的实验研究. 2018, 52(11): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201811001]
- 冯雪佳, 王顺森. 在煤富氧燃烧下的超临界 CO₂ 再压缩循环的热力学分析. 2018, 52(11): 100-105. [doi:10.7652/xjtuxb201811015]
- 单亚飞, 李天卉, 杨竹强, 等. 超临界环己烷水平管内水动力学多值性研究. 2018, 52(9): 64-70. [doi:10.7652/xjtuxb201809008]
- 马志豪, 贾义, 陈占耀, 等. 燃料在亚/超临界环境下的喷射现象学研究. 2018, 52(9): 127-133. [doi:10.7652/xjtuxb201809017]
- 吕海财, 赵金乐, 潘辉, 等. 超临界 CO₂ 水平管内浮升力和热加速效应评判准则. 2018, 52(9): 140-147. [doi:10.7652/xjtuxb201809019]
- 曲默丰, 梁梓宇, 赵云杰, 等. 低质量流速光管内超超临界水传热特性的实验与数值模拟. 2018, 52(7): 52-59. [doi:10.7652/xjtuxb201807008]
- 王朝阳, 常仁杰, 朱庆玉, 等. 两种水煤比控制策略下调峰机组的能耗特性. 2018, 52(7): 115-122. [doi:10.7652/xjtuxb201807017]
- 姬亚军, 刘云鹏, 杨鸿辉, 等. 纳米片型 MFI 分子筛超临界催化裂解正十二烷和煤油对比研究. 2017, 51(11): 51-56. [doi:10.7652/xjtuxb201711008]

(编辑 赵炜)