

· 产品研发 ·



稀土对 9Cr-3Co-2W 马氏体耐热钢在 625 °C 水蒸汽环境中的氧化行为影响

耿 伟¹, 朱志宝², 马金辉², 宋新莉¹, 葛 锐¹

(1 武汉科技大学耐火材料国家重点实验室, 武汉 430081; 2 大冶特殊钢有限公司, 黄石 435001)

摘 要: 抗蒸汽氧化腐蚀是评价锅炉钢的重要指标。本研究对 9Cr-3Co-2W 马氏体耐热钢 (1%: 0.08C, 0.40Si, 0.40Mn, 9.00Cr, 0.20Ni, 0.50Mo, 1.50W, 0.05Nb, 0.20V, 0.07, 0.030Al, 0.0012B, S≤0.010, P≤0.020) 进行了不加稀土和加稀土 $w[\text{Ce}]$ 为 0.03% 两组试验, 在 625 °C 水蒸汽环境中的氧化动力学曲线, 并借助 SEM、XRD 等分析氧化膜的形貌与结构。结果表明, 两组实验钢在 625 °C 水蒸汽环境中氧化铁皮外层主要均是富 Fe 的氧化物 Fe_3O_4 或 Fe_2O_3 , 内层是富 Cr、Fe 氧化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ 与 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$, 但是没有添加稀土的实验钢外层氧化物致密性差, 甚至出现裂纹。而添加稀土实验钢外层氧化物致密, 富铬氧化层厚度较大。氧化动力学曲线表面, 氧化初期 (0~200 h), 随着氧化时间的延长, 实验钢的氧化速率较大, 氧化时间超过 200 h 后, 氧化速率逐渐降低, 在 2 000 h 后氧化速率接近水平, 氧化速率继续下降并逐渐趋于稳定。马氏体耐热钢添加少量稀土 Ce 有助于形成致密的氧化膜, 提高钢的抗氧化性能。

关键词: 马氏体耐热钢; 稀土; 氧化动力学; 氧化膜; 氧化速率; 氧化物

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2025-00066 **中图分类号:** TG142

Effect of Rare Earth on Oxidation Behavior of 9Cr-3Co-2W Martensitic Heat-resistant Steel in 625 °C Water Vapor Environment

Geng Wei¹, Zhu Zhibao², Ma Jinhui², Song Xinli¹, Ge Rui¹

(1 State Key Laboratory of Refractory Materials, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2 Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China)

Abstract: Steam oxidation corrosion resistance is an important index to evaluate boiler steel. In this study 9Cr-3Co-2W martensitic heat-resistant steel (1% 0.08C, 0.40Si, 0.40Mn, 9.00Cr, 0.20Ni, 0.50Mo, 1.50W, 0.05Nb, 0.20V, 0.07N, 0.030Al, 0.0012B, S≤0.010, P≤0.020), the oxidation kinetics curves of the two groups without rare earth and with rare earth $w[\text{Ce}]$ 0.03% in 625 °C water vapor environment were carried out, and the morphology and structure of the oxide film were analyzed by SEM and XRD. The results show that the outer layer of iron oxide scale in both sets of experimental steel are mainly rich in Fe oxide Fe_3O_4 or Fe_2O_3 , and the inner layer is rich in Cr and Fe oxides $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ and $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$ in the 625 °C water vapor environment. However, the outer layer of iron oxide scale in the experimental steel without rare earth addition has poor density, and even cracks appear. The experimental steel with rare earth added has dense outer oxide layer and large chromium-rich oxide layer thickness. On the surface of the oxidation kinetics curve, at the initial stage of oxidation (0 h-200 h), with the extension of oxidation time, the oxidation rate of the test steel is large. After the oxidation time exceeds 200 h, the oxidation rate gradually decreases, and after 2 000 h, the oxidation rate approaches the level, and the oxidation rate continues to decline and gradually becomes stable. The addition of a small amount of rare earth Ce can help to form a dense oxide film and improve the oxidation resistance of the steel.

Key Words: Martensite Heat Resistant Steel; Rare Earth Elements; Oxidation Kinetics; Oxide Film; Oxidation Rate; Oxide

中国“双碳”目标力争于 2030 年实现碳达峰, 2060 年实现碳中和。而减少 CO_2 的排放, 需要开发超超临界机组用钢。(9~12)Cr 马氏体耐热钢具有优异的蠕变强度、持久寿命、良好的导热性和较小的

热膨胀系数而广泛用于制造超超临界锅炉集管、主蒸汽管、再热器管和过热加热器管等^[1-2]。P92 钢作为第三代马氏体钢, 在 P91 钢的基础上降低 Mo 含量, 添加 $w[\text{W}]$ 约 1.8% 和微量 B, 获得了优异的高温

基金项目: 2023 湖北省重大攻关项目 (DJ)(2023BAA019)

作者简介: 耿 伟 (2000—), 男, 硕士生; **E-mail:** gengwei@wust.edu.cn;

收稿日期: 2025-03-12

通信作者: 宋新莉 (1973—), 女, 博士, 教授; **E-mail:** xlsong@wust.edu.cn

力学性能,广泛应用于 600~625 °C 参数的超超临界锅炉。但长期服役于高温水蒸汽环境中,导致钢的内表面形成氧化膜,随氧化膜厚度增加不仅降低发电效率,严重的导致失效开裂现象,给企业造成较大的经济损失^[3]。因此,研究马氏体耐热钢在高温水蒸汽环境中长时间氧化行为与氧化膜生长动力学是十分必要的。影响耐热钢在高温水蒸汽环境中的氧化行为的因素包括钢的合金成分、温度、气体流速与时间等^[4-6]。马云海等^[7]研究了 G115 钢与 P92 钢在 650 °C 水蒸汽环境中氧化行为,发现氧化膜外层为粗大柱状 Fe_3O_4 , 内层氧化层为 Fe-Cr 尖晶石和少量 Fe_3O_4 , 外层氧化膜中有孔洞。为降低高温合金氧化行为,科研人员研究了合金元素种类对高温氧化性能影响。王刘利等^[8]研究发现添加 Al 元素,氧化膜中形成 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 、 $\text{Fe}(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$ 等,降低氧化速率,但是较高的 Al 含量增加钢的冶炼难度。曾莉等^[9]研究发现奥氏体不锈钢中加入 0.4% 的 B 可以促使耐热钢板表面形成致密的氧化薄膜,形成的硼酸盐 (Fe_3BO_6) 能够抑制氧化行为的深入发展。大量研究认为,钢中添加少量的稀土元素可以净化钢水,改变夹杂物形态与铸态组织和性能等作用,在耐热钢中稀土元素能影响铬离子与氧离子的扩散,有利于降低氧化速率^[10]。本研究以两组 9Cr-3Co-2W 钢为研究对象,研究没有添加稀土的钢与添加稀土 Ce 合金化的钢在 625 °C 水蒸汽环境中氧化行为与氧化动力学,分析稀土添加对氧化膜形成规律与结构影响机理。

1 实验材料与方法

1 号马氏体耐热钢的化学成分为(质量分数)/% : 0.08C, 0.40Si, 0.40Mn, 9.00Cr, 0.20Ni, 0.50Mo, 1.50W, 0.05Nb, 0.20V, 0.07N, 0.030Al, 0.001 2B, $S \leq 0.010$, $P \leq 0.020$ 和 Fe 余量。2 号实验钢化学成分是在 1 号实验钢成分基础上添加少量稀土 Ce。实验钢为中试车间真空感应炉(SGM.VE150/18Q)冶炼,实验钢铸坯经过锻造与轧制后,在 1 070 °C 正火 1 h,空冷,然后在 770 °C 回火 1 h,空冷,热处理炉为箱式电阻炉(型号 SX2-10-13)。

借助线切割机将实验钢切割出 8 个 4 mm × 4 mm × 20 mm 的矩形试样,用于研究氧化行为。用 180#~1000# 的砂纸依次打磨氧化试样的每一个面并在一个 4 mm × 20 mm 面的四个棱角上倒角,然后用清水清洗干净放在乙醇超声清洗仪中清洗,随后立即放入 60 °C 的烘箱中保温 2 h,最后用 METTLER

XS205 天平称重,重复 6 次取平均值后记录。

首先将吹入孟式洗瓶与恒温水浴锅连接好并设置 60 °C 恒温水浴模式,然后将制备好的氧化样打了倒角的一面朝上,倾斜置于刚玉坩埚壁上,尽量保证每个面都能与空气接触,将坩埚置于高温管式气氛炉(型号 SXK2-5-11)中心位置,开启气泵设置 20% 的蒸气压向加热管中输送 625 °C 的水蒸汽。试样氧化一段时间后,使用坩埚夹取出盛放坩埚的试样,放置密闭空间内空冷。利用清洁烘干的试管夹把冷却的试样放在置于精密天平(可精确到 10^{-4} g)称重区上的滤纸上(滤纸已经去皮处理),对天平进行归零处理。随后连续对试样进行 10 次称重,去除异常值再取平均值并做好记录。定期取出氧化试样并称量记录,用冷镶机将氧化试样镶嵌好,随后将倒角面通过 180#~2000# 砂纸打磨并机械抛光至可观察呈镜面形态,无划痕。用侵蚀液(5 g FeCl_3 +2 mL HCl +100 mL H_2O)腐蚀。制样完成后利用喷金仪对试样进行喷金处理,再将试样置于扫描电镜(Apreo S HiVac)SE 模态下观察试样的氧化层形貌并测定氧化膜厚度,并利用 EDS 能谱仪对氧化膜的层状结构和不同区域的化学成分进行分析,以确定氧化膜的类型。同时,利用岛津 XRD-7000 型 x 射线衍射仪对氧化膜进行 x 射线衍射(XRD)分析,进一步确定氧化膜的结构和类型。

2 结果与讨论

2.1 氧化膜形貌与物相组成

图 1、图 2 所示为两组实验钢在 625 °C 水蒸汽环境中不同氧化时间表面形貌。1 号实验钢表层氧化物为片状,致密性较差,并出现裂纹,而添加稀土 Ce 的 2 号稀土 Ce 微合金实验钢的表面氧化膜中晶粒尺寸更细小,致密性增大,没有明显的开裂现象。图 3、图 4 所示为实验钢在 625 °C 水蒸汽环境中氧化 832 h 截面形貌。1 号实验钢截面氧化膜厚度约 40 μm 左右,外层主要是富 Fe 的氧化物,内层是富 Cr、Fe 氧化物。添加稀土的 2 号实验钢截面氧化膜厚度约为 104 μm ,氧化膜致密,外层也是富 Fe 氧化物,内层是富 Cr、Fe 的氧化物,由于 1 号实验钢表面氧化膜致密性差,出现脱落现象,因此,截面氧化物厚度比 2 号实验钢小。添加稀土氧化膜与基体界面致密性增大,有利于阻碍水蒸汽中氧元素的进一步往基体中扩散。如图 5 所示为氧化层 XRD 物相鉴定,由图 5 可知,实验钢氧化膜主要含有氧化层主要是由 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 或 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ 组成,外层主要是铁的氧

化物 Fe_3O_4 或 Fe_2O_3 , 内层主要是 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ 或 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$ 。

实验钢在水蒸汽环境中氧化还原反应如公式

(1~4)所示, Fe与O反应形成 Fe_2O_3 , 铁与水蒸汽反应形成 Fe_3O_4 加还原性气体 H_2 , Fe_2O_3 与 H_2 反应形成 Fe_3O_4 , 在高温条件下, 基体中Cr向氧化层扩散, 由于

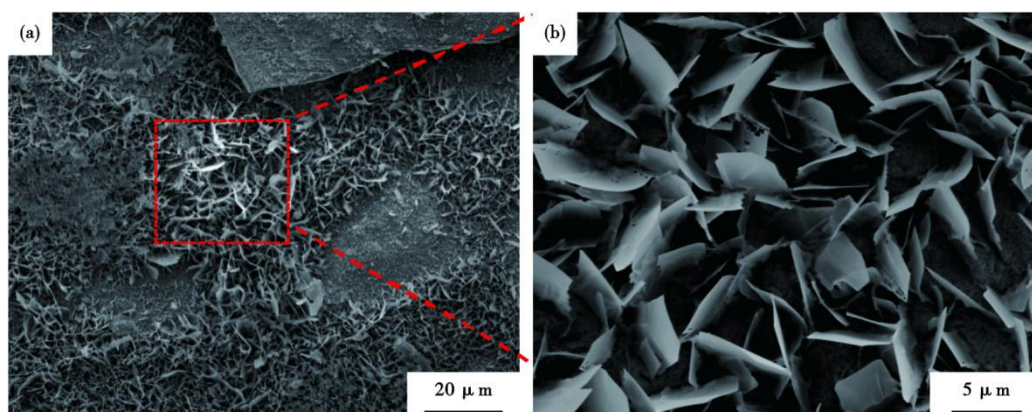


图1 1号不加稀土实验钢在625℃水蒸汽中氧化832 h后表面形貌:(a)整体形貌,(b)局部放大

Fig. 1 The surface morphology of No. 1 experimental steel without rare earth was oxidized in water vapor environment at 625 °C for 832 h: (a) overall morphology, (b) local magnification

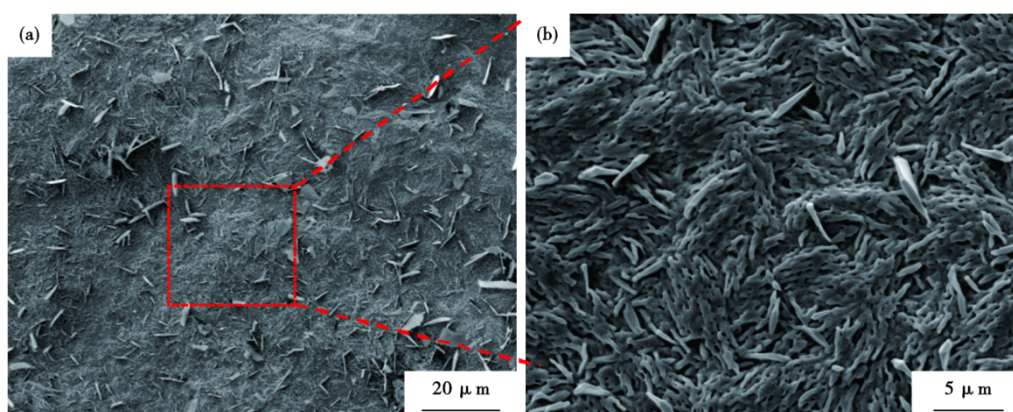


图2 2号添加Ce实验钢在625℃水蒸汽环境中氧化832 h表面形貌:(a)整体形貌,(b)局部放大

Fig. 2 The surface morphology of No. 2 Ce added experimental steel was oxidized for 832 h in 625 °C water vapor environment: (a) overall morphology, (b) local magnification

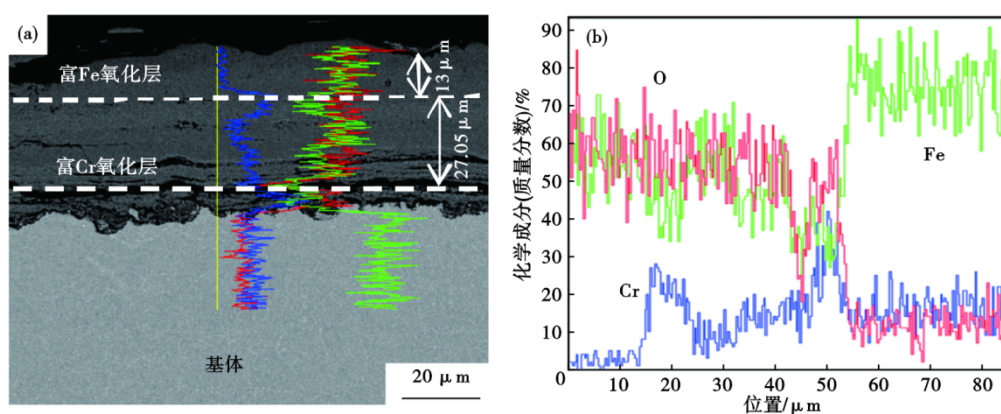


图3 1号不加稀土实验钢在625℃水蒸汽中氧化832 h氧化层厚度与成分分析:(a)氧化层截面形貌,(b)氧化层线扫结果

Fig. 3 Analysis of the thickness and composition of the oxide layer of No. 1 experimental steel without rare earth in 625 °C steam after oxidation for 832 hours: (a) cross-sectional morphology of the oxide layer, (b) linear scan results of the oxide layer

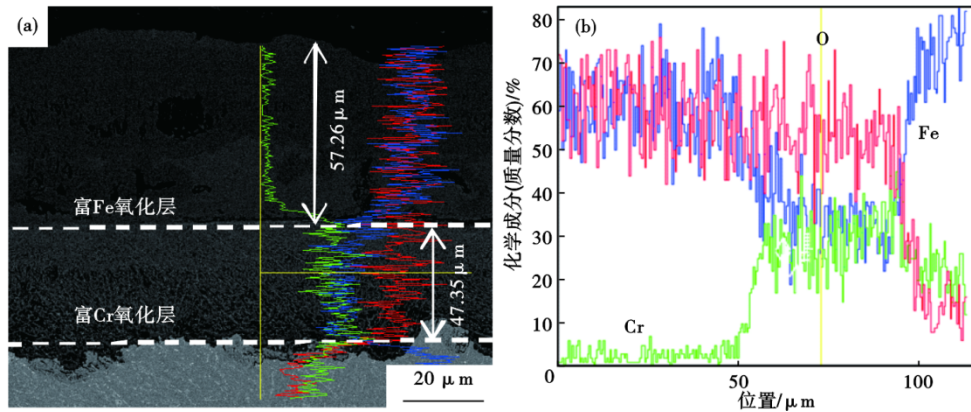


图 4 2号添加Ce实验钢在625 °C水蒸汽中氧化832 h氧化层厚度与成分分析:(a)氧化层截面形貌,(b)氧化层线扫结果
 Fig. 4 Analysis of the thickness and composition of the oxide layer of No. 2 Ce-added experimental steel after oxidation in 625 °C steam for 832 hours: (a) cross-sectional morphology of the oxide layer, (b) linear scan results of the oxide layer

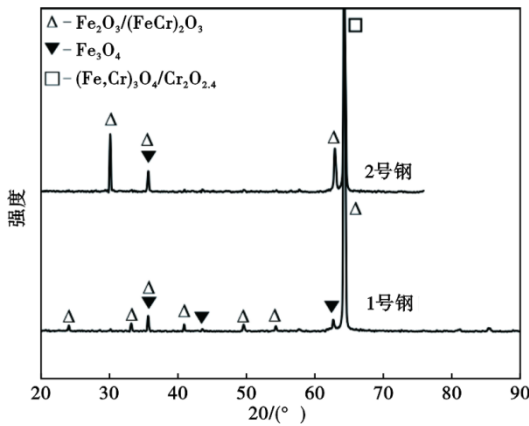
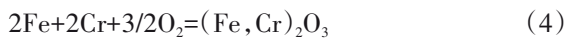
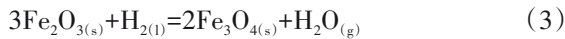
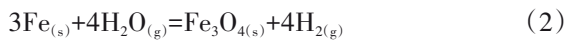


图 5 氧化层的XRD相分析
 Fig. 5 XRD phase analysis of oxide layer

Cr的氧亲和力大于Fe,Cr与Fe、O等发生化学反应形成(Fe,Cr)₂O₃。



没有添加稀土的1号实验钢形成Fe₃O₄与Fe₂O₃,当金属向外扩散,形成空位,空位沉积在氧化层与基体之间聚集成空腔,致密度差,因此,氧化层易于剥落。图(1)~(4)可知,马氏体耐热钢中添加少量稀土,在高温水蒸汽环境中形成的致密的氧化膜,对基体具有保护作用,会降低氧离子与铬离子进一步向基体内扩散,有利于降低氧化速率。高温条件下,钢的表面氧化膜是形成机制主要是阳离子向外扩散机制,氧化膜界面是阳离子扩散通道,而Ce离子半径较大,在氧化物界面偏聚,占据氧化膜中空位缺陷,抑制了金属阳离子沿晶格或空位向外

扩散的通道。合金内层先形成致密的富Cr的氧化膜,阻碍Cr离子与氧离子扩散,降低氧化速度。有学者研究认为,添加了稀土的合金中形成的稀土氧化物可以作为Cr₂O₃形核核心,在较低的铬离子浓度下即可形成连续的Cr₂O₃层。耐热钢中稀土发生内氧化,形成的楔形钉扎物在氧化层与金属基体中间起到良好的连结作用,增强了基体与氧化物之间的粘附性,从而提高氧化层的抗剥落性能^[11-14]。

2.2 氧化动力学曲线

图6两组耐热钢在625 °C水蒸汽环境中氧化质量随时间变化规律,由曲线可见,氧化增重明显分为三个阶段,从0~500 h,氧化速率最快,在500~2 000 h,氧化增重斜率降低,说明氧化速率降低,2 000 h以后,氧化增重斜率几乎水平,水平氧化速率进一步降低。氧化质量增重Δm与氧化时间t的关系如式(6)。

$$\Delta m = k_p t^n \quad (5)$$

$$k_p = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT_k}\right) \quad (6)$$

式中,Q为激活能,J/mol;k_p为与温度相关的氧化速率常数;k₀为材料自身的氧化速率常数;R为热力学常数,8.314 J/(mol·K);T_k为蒸汽温度,K;n为时间指数。

实验数据带入公式(5)、(6),氧化初期即0~100 h,质量增重与时间的关系曲线如式(7)。

$$\Delta m = 0.00376t^{1/2} - 0.00343 \quad (7)$$

100~1 600 h氧化质量增重与时间关系如式(8)。

$$\Delta m = 0.001226t^{1/2} + 0.02695 \quad (8)$$

氧化时间增加到1 600 h以后,质量增重与时间

关系如式(9)。

$$\Delta m = 0.000\ 083t^{1/2} + 0.077\ 09 \quad (9)$$

由图 7 对 Ce 添加的实验钢的氧化动力学曲线,可知,氧化初期(0~80 h)质量增重与时间关系曲线如式(10)。

$$\Delta m = 0.001\ 38t^{1/2} - 0.001\ 24 \quad (10)$$

80~625 h 氧化质量增重与时间关系如式(11)。

$$\Delta m = 0.003\ 6t^{1/2} + 0.008\ 46 \quad (11)$$

氧化时间增加到 625 h 以后,质量增重与时间关系如式(12)。

$$\Delta m = 0.000\ 471t^{1/2} + 0.069\ 49 \quad (12)$$

由图 7 中 2 号钢的氧化动力学曲线可知,添加稀土 Ce 的 9Cr-3Co-2W 实验钢在 0~100 h 氧化初期,氧化速率常数 K_P 明显最大,随时间延长由于外层氧

化膜中有大量裂纹,最外层氧化膜脱落,但是到 1 600 h 以后氧化速率常数 K_P 才进一步降低。图 8 为 Ce 微合金化的 9Cr-3Co-2W 钢的氧化动力学曲线,氧化初期 0~80 h,氧化速率常数 K_P 最小,为 0.001 38,随时间延长到 80~625 h,氧化速率常数 K_P 增大到 0.003 6,625 h 以后,氧化速率常数 K_P 显著降低。即添加稀土 Ce 的 9Cr-3Co-2W 钢在 625 °C 水蒸汽环境中氧化 625 h 以后,表层氧化膜厚度增加速度降低。原因是添加 Ce 钢的表层氧化膜晶粒尺寸细小,致密度高,降低了氧原子进一步向氧化膜中扩散。在初始氧化阶段,此时试样最外层由于氧向合金表面扩散,此时,试样与水蒸汽界面处的氧势足够高,基体中的 Fe 可以直接氧化,发生反应形成 Fe_2O_3 。由于实验钢是在 625 °C 水蒸汽环境中,向外层扩散的铁与水蒸汽反应向外释放出 H_2 ,导致初始

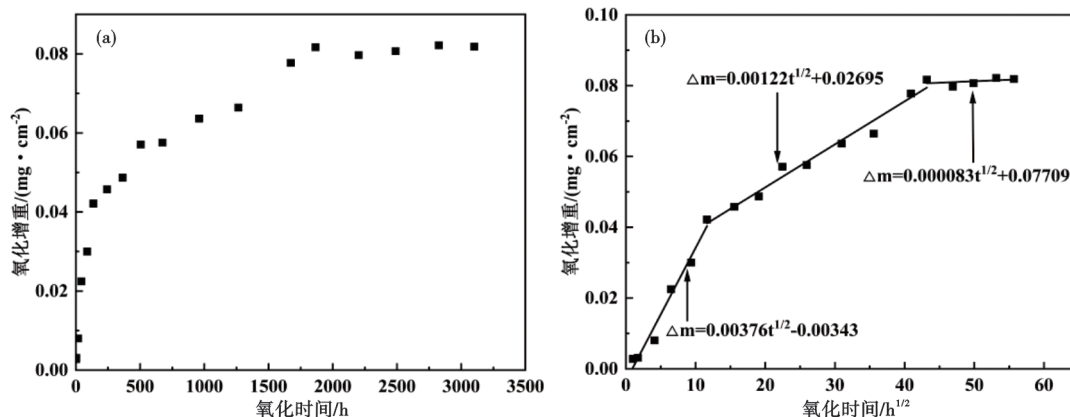


图 6 1 号不加稀土耐热试验钢氧化动力学曲线:(a) 氧化时间与单位面积氧化增重关系,(b)氧化时间的 0.5 次幂与单位氧化增重关系

Fig. 6 Oxidation kinetics curve of No. 1 heat-resistant test steel without rare earth : (a)relationship between oxidation time and oxidation gain per unit area, (b)relationship between 0.5 power of oxidation time and unit oxidation gain

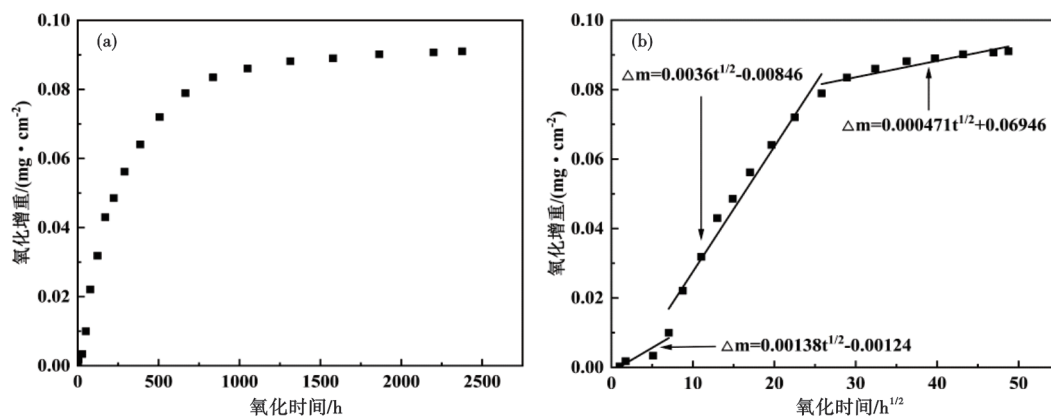


图 7 2 号添加稀土耐热钢氧化动力学曲线:(a) 氧化时间与单位面积氧化增重关系,(b)氧化时间的 0.5 次幂与单位氧化增重关系

Fig. 7 Oxidation kinetics curve of heat-resistant steel with rare earth addition No. 2 : (a)relationship between oxidation time and oxidation gain per unit area, (b)relationship between 0.5 power of oxidation time and unit oxidation gain

形成的氧化铁层受到应力作用,从而导致外层氧化铁皮中产生一定程度的微裂纹,裂纹足够大,就会导致剥落(图 1 所示)。因此,实验钢在水蒸汽中初始阶段,氧化速率较快。当实验钢氧化一定时间(832 h)后,接触面处氧势开始下降,9Cr 马氏体钢中 Cr 含量足以在高温蒸汽环境中快速形成 Cr 氧化物,当下降到可以发生 Cr 的氧化临界条件时,优先在内层形成致密的富 Cr 氧化层,降低了氧化速率。由图 3 和图 4 可知,添加稀土 Ce 的实验钢表面富 Cr 氧化层的厚度明显高于没有添加稀土实验钢。主要是由于稀土促进了基体中 Cr 的扩散,使得氧化皮中 Cr 含量增加,从而形成致密的富 Cr 氧化层,有利于阻碍氧向基体扩散^[15-18]。实验钢在氧化较长的时间(2 000 h)后,基体中的 Cr 向氧化层扩散,近表层 Cr 含量消耗,不足以形成连续致密的 Cr_2O_3 , Fe^{3+} 也开始继续向外扩展。同时,在这个过程中表层的 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 也会发生反应,最终在内层形成相对稳定的 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$, 减少了 Fe 的外扩散流量,减

弱了电子传输性能,且内层致密,从而抑制了氧化速率。

3 结论

研究了没有添加稀土与添加稀土 $w[\text{Ce}]$ 为 0.03% 的 9Cr-3Co-2W 马氏体耐热钢在 625 °C 水蒸汽环境中的氧化动力学与氧化膜的结构和形貌,并分析了氧化机理。

1) 马氏体耐热钢在 625 °C 水蒸汽环境中,外层主要是富铁氧化物,内层主要是富 Cr 氧化物。没有添加稀土的耐热钢外层氧化铁皮致密性差,最外层出现剥落现象。添加稀土的钢表面氧化铁皮致密性高,内层富 Cr 氧化层比没有添加稀土耐热钢氧化层厚度大。

2) 两组马氏体耐热钢在 625 °C 水蒸汽环境中,氧化初期(0~200 h),实验钢的氧化速率线性增大,随初始氧化膜形成,随氧化时间进一步延长(200~832 h),氧化速率降低。2 000 h 后氧化速率逐渐趋于稳定,最终达到稳态氧化的变化规律。

参考文献

- [1] 李金祺, 陈艺文, 裴玉冰, 等. 汽轮机高温叶片用马氏体耐热钢服役氧化行为研究[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 395-398.
- [2] 张伟, 白银, 包汉生, 等. 超超临界电站锅炉用耐热钢的水蒸汽氧化行为[J]. 特殊钢, 2019, 40(6): 23-27.
- [3] 杨浩, 司宇, 曹鹏军, 等. 火电机组耐热钢失效机理的研究现状[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 14-24.
- [4] 李茂东, 倪进飞, 王彩福, 等. T92 钢在高温水蒸气中的氧化行为[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 10-14.
- [5] Ampornrat P, Was G S. Oxidation of ferritic-martensitic alloys T91, HCM12A and HT-9 in supercritical water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 371(1-3): 1-17.
- [6] Ennis P J, Quadakkers W J. Mechanisms of steam oxidation in high strength martensitic steels[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, 84(1-2): 75-81.
- [7] 马云海, 王延峰, 赵双群, 等. G115 钢的高温持久性能和抗蒸汽氧化性能[J]. 机械工程材料, 2022, 46(2): 48-56.
- [8] 王刘利, 赵靖宇, 吕焯哲, 等. 铝对马氏体抗磨耐热钢高温抗氧化性能的影响[J]. 铸造, 2012, 61(12): 1439-1442.
- [9] 曾莉, 王斌, 徐梅, 等. 硼对奥氏体不锈钢高温氧化性能的作用机理[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 61.
- [10] Xue W, Conghao D, Kai Z, et al. Steam oxidation behavior of T92 steel tube for high temperature reheater after long-term service in ultra-supercritical boilers[J]. Corrosion Science, 2023, 221.
- [11] Trindade V B, Borin R, Hanja B Z, et al. High-Temperature Oxidation of Pure Fe and the Ferritic Steel 2. 25Cr1 Mo[J]. Materials Research. Ibero. American Journal of Materials, 2005, 8(4): 365-369.
- [12] Tan L Z, Yang Y, Allen T R. Porosity prediction in supercritical water exposed ferritic/martensitic steel HCM12A[J]. Corrosion Science, 2006, 48(12): 4234-4242.
- [13] Zhang N Q, Zhu Z L, Lv F B, et al. Influence of exposure pressure on oxidation behavior of the ferritic-martensitic steel in steam and supercritical water[J]. Oxidation of Metals, 2016, 86(1): 113-124.
- [14] 於琛钧, 张天翼, 张乃强, 等. 组织老化对 P92 钢在超临界水中氧化行为影响研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(6): 1349-1357.
- [15] Zhong X Y, Wu X Q, Han E H. Effects of exposure temperature and time on corrosion behavior of a ferritic-martensitic steel P92 in aerated supercritical water[J]. Corrosion Science, 2015, 90: 511-521.
- [16] Dong L, Liu M J, Zhang X F, et al. Low temperature in situ formation of oxygen barriers by heat treatment of aluminum infiltrated environmental barrier coatings[J]. Ceramics International, 2021, 47(24): 34463-34472.
- [17] Martinelli L, Balbaud-Célérier F, Terlain A, et al. Oxidation mechanism of a Fe-9Cr-1Mo steel by liquid Pb-Bi eutectic alloy (Part I)[J]. Corrosion Science, 2008, 50(9): 2523-2536.
- [18] Shen Z, Chen K, Yu H B, et al. New insights into the oxidation mechanisms of a Ferritic-Martensitic steel in high-temperature steam[J]. Acta Materialia, 2020, 194: 522-539.