

稀土改性铸造 Fe-24Cr-32Ni 型耐热钢 高温氧化行为的研究

罗杰斌¹, 黄勇^{2, 3}, 王帅^{2, 4}, 严灵¹, 王向明³, 韩培贤⁵, 郑志斌^{2, 5}

(1. 湖南新田岭钨业有限公司, 湖南郴州 423000; 2. 广东省科学院新材料研究所, 国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心, 广东省金属强韧化技术与应用重点实验室, 广东广州 510650; 3. 广州有色金属研究院新丰耐磨合金材料有限公司, 韶关市强韧耐磨钢铁工程技术研究中心, 广东韶关 511199; 4. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 5. 江西联峰熔模铸造有限公司, 江西宜春 336300)

摘要: 通过增重法研究了稀土元素Y和Ce对Fe-24Cr-32Ni耐热钢高温氧化速率的影响。同时采用扫描电子显微镜(SEM), 能谱仪(EDS)和X射线衍射仪(XRD)对耐热钢高温氧化层的结构和组成进行了分析。实验结果表明, 在1 000 °C温度下氧化100 h后, 未添加稀土元素的试样单位面积氧化增重37.1 g/m², 添加0.18%Ce的试样增重量为34.5 g/m², 而添加0.20%Y的试样单位面积增重最小, 仅为14.9 g/m², 说明稀土元素的加入有效提高耐热钢在1 000 °C下的抗氧化性。通过对氧化膜的内部组成及结构分析可知, 稀土元素可以促进氧化膜表面形成一层完整致密的尖晶石氧化物, 促进氧化膜与基体界面处Si的内氧化物形成, 增大氧化膜与基体的接触面积, 提高氧化膜与基体的结合强度。

关键词: 抗高温氧化性; 稀土元素; 钉扎效应

作者简介:

罗杰斌(1984-), 男, 学士, 工程师, 主要从事矿物开采与加工等方面的工作。电话: 15073533435, E-mail: 417400717@qq.com

通讯作者:

黄勇, 男, 高级工程师, E-mail: hylink@163.com; 王帅, 男, 博士, 电话: 18242312911, E-mail: 18242312911@163.com

中图分类号: TG174.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)01-0022-06

基金项目:

广东省重点研发计划项目(2020B010184001, 2020B0101340004); 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项(2021GDASYL-20210102002); 广州市青年科技人才托举工程项目(QT20220101075) 江西省“双千计划”(S2020CXTD0356)。

收稿日期:

2022-05-19 收到初稿,

2022-06-13 收到修订稿。

奥氏体耐热钢因其良好的韧性和抗氧化性以及较高的蠕变强度而被广泛应用于汽轮机、高温蒸汽管道及乙烯裂解炉管等高温服役构件^[1-3]。随着生产需求的提高, 耐热钢的高温服役环境愈加复杂, 因此改善材料的抗高温氧化性越来越受到人们的关注^[4]。

合金的高温氧化行为非常复杂, 通常都以氧化动力学和氧化膜的组成变化来表征合金的高温抗氧化能力^[5]。连续致密的氧化膜可有效地阻止氧原子和其他腐蚀性气体扩散到合金中, 提高合金的使用寿命^[6-7]。耐热材料的抗氧化性能多依赖于其表面是否会形成一层完整致密的氧化膜。对于传统钢铁来说, 在氧化过程中表面形成疏松多孔的富Fe氧化物极易脱落。相对而言, Cr和Ni的氧化物更为致密, 不会从材料表面脱落^[8-9]。为获取完整致密的氧化膜一方面有研究采用等离子渗金属技术, 如通过在奥氏体钢表面渗钎, 之后在表面含钎的过渡层渗碳处理, 以期获得一种新型的高温合金材料^[10]。另一方面直接在奥氏体钢中添加合金元素, 促使合金表面生成致密、稳定的抗高温氧化层。通常情况下, Al₂O₃、Cr₂O₃和SiO₂三种氧化膜不仅致密、其生长速度缓慢, 而且它们又具有良好的高温热力学稳定性, 因此许多种类的合金在设计时都考虑使它们能形成上述三种氧化膜中的一种^[5, 11]。有研究表明, 钢中适当Cr含量的存在可有效阻止钢中Fe的氧化从而获得良好的抗高温氧化性能^[12]。

稀土作为微量元素加入合金中可以有效地提高合金的氧化抗力。有观点认为^[13]合金中稀土的加入不仅能缩短暂态氧化阶段, 降低稳态氧化阶段的氧化速率, 同时也可以减少表面氧化层的剥落, 有效增强了合金的高温抗氧化性能。陈伟鹏等人^[14]发现, 稀土的添加提高了低合金钢的反应激活能, 降低了氧化速率常数, 从而提高低合金钢的抗高温氧化性能, 并且稀土含量越高, 抗高温氧化性能越强; 此外, 稀土的加入细化了氧化膜的晶粒, 增强了氧化膜与基体的粘附性, 使氧化膜不易脱落。

同时, 稀土作为我国丰富的矿产资源, 占世界储量高达80%, 但国内对稀土提高耐热钢高温氧化性的研究却相对较少。为提高耐热钢的高温抗氧化能力, 本文在Fe-24Cr-32Ni型耐热钢中添加稀土元素(Ce、Y)进行高温氧化实验, 并选取有代表性的相关数据进行分析, 检验稀土元素是否促进材料表面生成致密的富Cr或富Mn的氧化膜, 并对氧化膜的结构组成进行分析, 同时探讨氧化物的形成机理。

1 试验方法

1.1 试样制备

实验材料经熔炼后浇铸成基尔试块, 按照HB/5258—2000《钢及高温合金的抗氧化性能测定试验方法》标准, 线切割成 $\Phi 15\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的柱状试样, 打磨抛光后用游标卡尺测量试样尺寸, 计算表面积。测量后用酒精进行超声清洗去除试样表面油污和杂质, 清洗干净的样品放入100℃的烘干箱内烘干后, 放在干燥箱内备用。陶瓷坩埚的准备按照GB/T13303—1991标准进行, 称量氧化前的坩埚和试样的总质量并做记录。实验材料的化学成分如表1, 其中S1号试样为Fe-24Cr-32Ni型耐热钢, 而S2、S3号试样分别为添加稀土Ce和Y元素的耐热钢, 其中所有试样S、P等元素的含量均控制在0.03%以下。

表1 合金试样化学成分
Table 1 Chemical compositions of the steel $w_B/\%$

编号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ce	Y	Fe
S1	0.51	1.45	1.68	24.12	32.04	0.10	—	—	余量
S2	0.50	1.52	1.59	24.06	32.06	0.08	0.18	—	余量
S3	0.54	1.46	1.64	24.23	32.11	0.09	—	0.20	余量

1.2 氧化实验

使用KSS-1400箱式电阻炉进行高温氧化实验, 氧化实验装置示意图如图1所示。实验温度设置为1000℃, 持续氧化时间为100 h。当炉内温度达到指定温度后将装有试样的坩埚放入炉内, 待温度重新升到1000℃后开始计时, 每隔20 h取出坩埚, 盖上坩埚盖后空冷至室温。用精度为0.1 mg的电子天平称量氧化后试样和坩埚的总重量, 分别计算每组试样氧化前后的重量变化。每组数据进行3组重复试验, 取其平均值。根据计算不

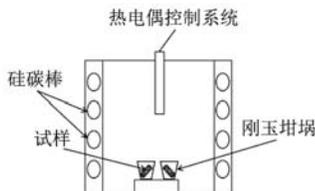


图1 氧化实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oxidation experiment apparatus

同氧化时间样品的单位面积增重, 绘制动力学曲线。同时, 运用D8 ADVANCE型X射线衍射分析试样表面氧化层的相结构, 采用Gemini SEM 300型扫描电镜(含能谱EDAX附件和背散射电子BSEI探头)观察氧化层形貌并分析氧化层中的元素分布。

2 试验结果与分析

2.1 氧化动力学

不同成分的试样在1000℃下连续氧化100 h后的氧化曲线如图2所示。可以看出, 单位面积的氧化增重均随氧化时间的延长而增加, 并且氧化增重曲线整体上有呈抛物线的趋势。在整个氧化过程中, 实验钢单位面积的氧化增重量由大到小的顺序是: S1>S2>S3。对于S1耐热钢, 前60 h氧化增重速率较快, 随着氧化时间的增加, 增重速率趋于平缓。添加稀土Ce的S2钢在1000℃氧化20 h的单位面积增重量与添加稀土Y的S3钢相近, 但随着氧化时间的延长, 在相同的氧化条件下S3钢的单位面积增重越来越小于S2钢。

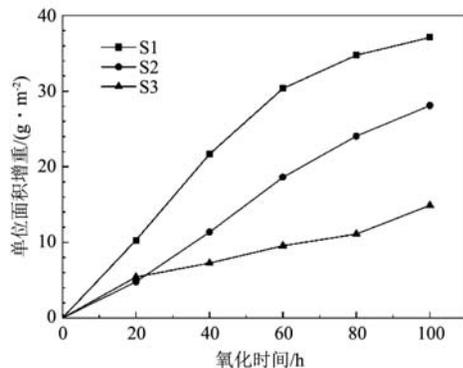


图2 试样在1000℃下氧化增重曲线

Fig. 2 Curves of samples oxidation at 1000℃

氧化速率是指单位面积、单位时间的氧化增重量, 它可以用来表征材料的氧化快慢^[15]。氧化速率越大, 说明抗氧化性能越差, 反之抗氧化性能越好。由于氧化速率多是动态的渐变过程, 因此可通过计算平均氧化速率来表征材料的氧化快慢, 即平均氧化速率 V , $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$:

$$V = \Delta m / St \quad (1)$$

式中: Δm 为氧化增重质量, g; S 为表面积/ m^2 ; t 为氧化时间, h。

由式(1)可分别计算出S1、S2和S3钢在1000℃下氧化100 h后的平均氧化速率, 如图3所示。从图中可以看出, 三种钢氧化100 h后的平均氧化速率均小于1, 都处于抗氧化级别^[12]。通过对比发现, 持续氧化100 h后添加Ce的S2钢氧化速率为0.345, 略小于S1钢。而添加Y的S3钢在同一条件下的氧化速率却为0.149, 仅是S1钢的2/5。这说明添加Ce和Y提高了Fe-24Cr-32Ni型耐

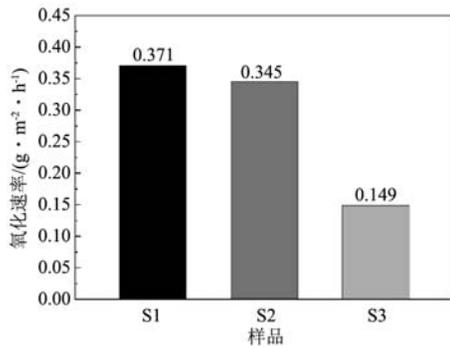


图3 试样在1 000 °C下保温100 h的氧化速率

Fig. 3 Oxidation rate of samples incubated at 1 000 °C for 100 h
 热钢的抗高温氧化能力, 但稀土Y的效果更显著。

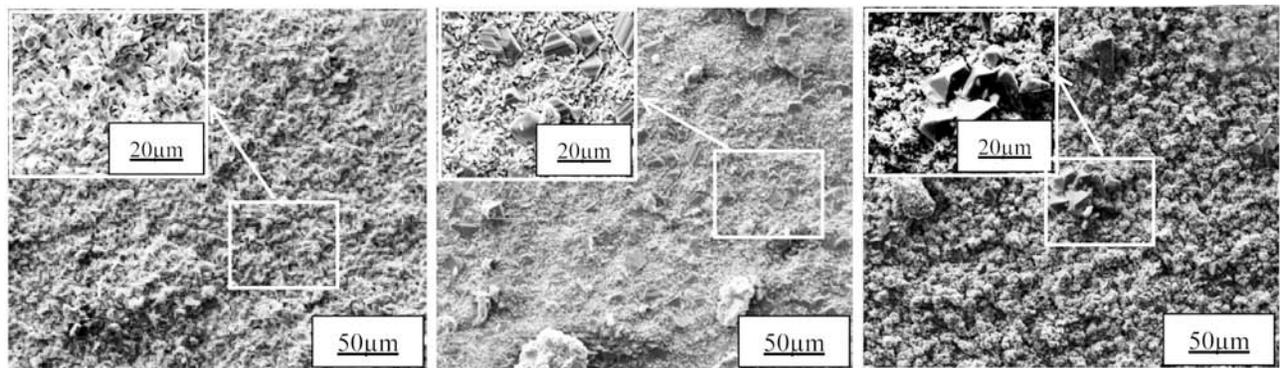
2.2 氧化物形貌及其相组成

通过SEM对在1 000 °C下持续氧化100 h后的样品表面形貌进行观察, 如图4所示。发现S1钢表面尖晶石状氧化物棱角不再明显, 开始有融化黏连的趋势, 同时在氧化表面分布着大量的微孔(图4a)。而添加稀土Ce和Y的S2和S3钢的表面氧化形貌与S1钢有明显的不同, 氧化膜比较平整致密, 同时存在大量的尖晶石状氧化物(图4b、c)。

图5为S1、S2和S3钢在1 000 °C下持续氧化100 h后

表面的X射线衍射图谱。从图中可以看出, 不同成分样品的氧化相存在很大差别。S1钢的氧化物由NiCr₂O₄、(Fe, Cr)₃O₄、Cr₂O₃和SiO₂等相构成; 而添加Ce的S2钢的氧化物中除了检测到NiCr₂O₄、(Fe, Cr)₃O₄和Cr₂O₃等相之外, 还检测到了(Fe, Cr)₂O₃; 另外, 与S1钢相比, 添加Y的S3钢的氧化物中虽未检测到(Fe, Cr)₃O₄相, 但却多出了(Fe, Cr)₂O₃和Mn₂O₄相。稀土Ce和Y的加入改变了Fe-24Cr-32Ni型耐热钢氧化物的结构组成, 从而提高了其高温抗氧化性能。

为了进一步揭示氧化膜的结构, 对氧化膜的截面进行观察, 如图6所示。可以发现S1钢氧化膜不完整且薄厚不均, 氧化膜没有内外层之分, 其中大部分为灰色氧化物, 局部发现一些少量的黑色内氧化物(图6a)。结合XRD鉴定(图5a), S1钢的氧化物主要由灰色的NiCr₂O₄、Cr₂O₃、(Fe, Cr)₃O₄以及少量的黑色SiO₂等相构成。相比较而言, 添加稀土Ce和Y的S2和S3钢的氧化膜更加的完整连续, 氧化皮脱落较少, 如图6b和6c所示。同时从局部放大图中可发现与S2钢相比, S3钢靠近基体侧有更多的黑色内氧化物的存在, 这些黑色内氧化物的出现会起到更好的“钉扎”效果, 会进一步抑制氧化物的脱落, 这可能是S3钢抗氧化性优于S2钢的原因之一。



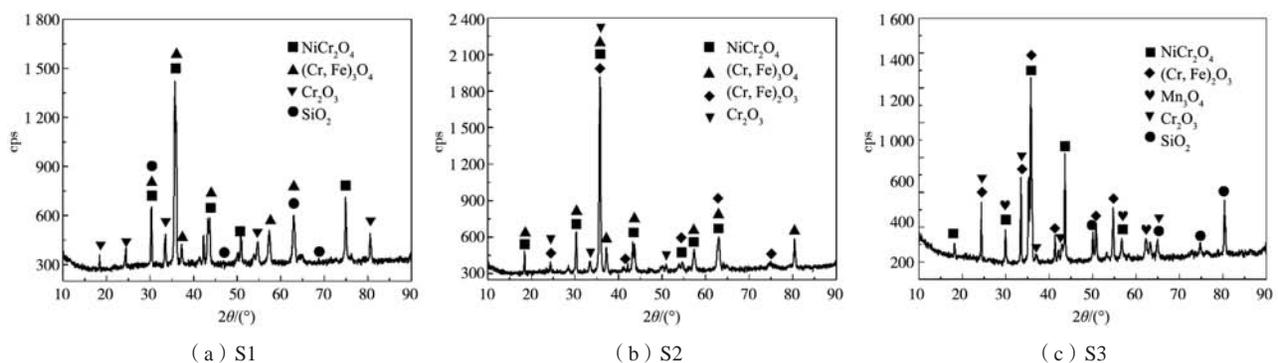
(a) S1

(b) S2

(c) S3

图4 1 000 °C氧化100 h后试样表面SEM形貌

Fig. 4 Surface morphologies of different samples oxidized at 1 000 °C for 100 h



(a) S1

(b) S2

(c) S3

图5 不同氧化试样表面XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of different specimens

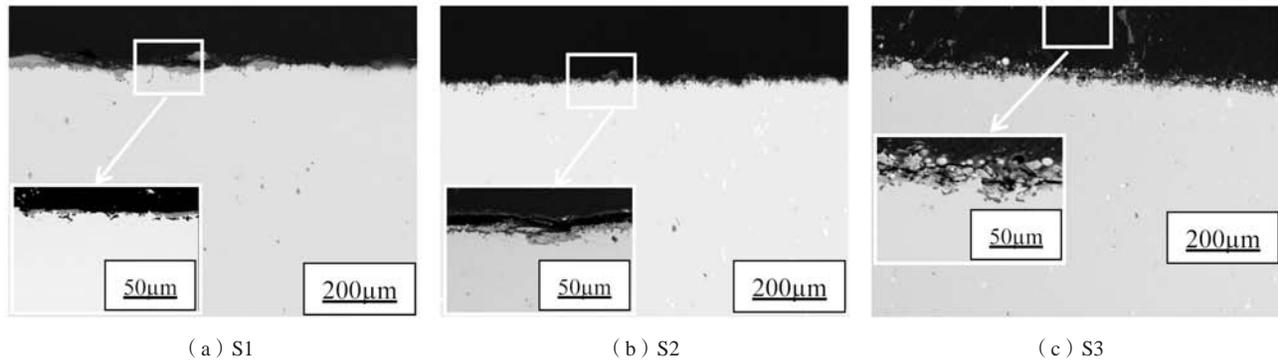


图6 氧化膜截面形貌

Fig. 6 Cross-section analysis of oxide scale

此外，为了更好的探讨Y对Fe-24Cr-32Ni耐热钢氧化层结构组成的影响，图7展示了高倍下S3钢氧化膜截面形貌及对应的EDS能谱分析。从图中可以发现氧化膜中存在一层富Cr和富Mn，同时Si也会在氧化层和基体的交界处发生局部的富集。对比XRD图谱分析（图5c），发现S3钢外层为 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ 和 NiCr_2O_4 尖晶石状氧化物，紧挨尖晶石氧化物还存在一层相对比较完整致密的富Cr氧化物（ Cr_2O_3 ）和富Mn氧化物（ Mn_3O_4 ），同时在基体侧观察到大量黑色相为富Si氧化物（ SiO_2 ）。

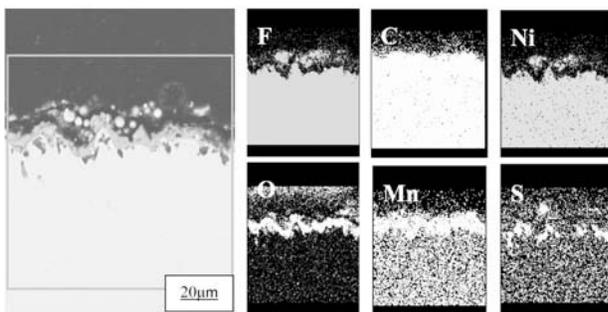


图7 S3钢氧化膜纵截面形貌及对应的EDS能谱

Fig. 7 Cross-sectional morphology of the oxide film for S3 steel and corresponding EDS energy spectrum

2.3 高温氧化机理

合金在高温下表面层中的Cr会迅速与O作用形成一层致密的 Cr_2O_3 ，可以有效阻止氧气与金属基体进一步直接接触从而降低合金的氧化速率。本实验研究的Fe-24Cr-32Ni型耐热钢，氧化膜主要在基体与气体接触的界面处向内生长，但是由于高温下 O^{2-} 离子在 Cr_2O_3 中扩散速率低于金属阳离子（Fe、Ni、Cr、Si、Mn等）近3个数量级，因此金属在高温下氧化膜的生长机制主要以阳离子向外扩散为主导^[16]。添加稀土Y或Ce之所以能显著提高合金的高温抗氧化性，是因为在氧化初期Y与Ce会促使实验钢中Cr、Mn比Fe、Ni等元素优先氧化，这会导致在氧化初始阶段S2和S3钢氧化膜中

Cr、Mn等元素的含量会比S1钢高，所以形成更加致密的氧化膜。此外，稀土元素也会降低氧化物（主要是 Cr_2O_3 ）的生长速率，从而进一步抑制材料的氧化行为。

氧化膜的晶界是阳离子的扩散通道，阳离子沿氧化膜晶界扩散远远高于晶内扩散^[17]。稀土元素在合金中往往会富集在距氧化界面几十纳米处，造成氧化膜表层空位缺陷密度降低，从而阻碍了合金中阳离子沿晶界向外扩散，从而改变了高温下合金氧化膜的生长机制。使氧化膜的生长以阳离子向外扩散为主改变为 O^{2-} 离子向内扩散为主导，降低了氧化物的生长速率^[18]。随着氧化时间的增加，基体与氧化膜界面处不仅有 Cr_2O_3 生成，同时还会生成一些黑色的内氧化产物 SiO_2 （如图6c，图7）。这是因为添加稀土Y后会在基体与氧化膜界面附近产生贫碳区，会使Cr元素扩散到氧化膜与基体界面的速度降低，从而造成界面贫铬并减小了Cr元素的热力学活性，而当贫铬达到一定值时会在这一区域产生内氧化物，即黑色的 SiO_2 ^[19-20]。由于这种黑色的 SiO_2 内氧化物会钉扎入基体中，增大了氧化膜与基体的接触面积，从而有效提高氧化膜与基体的结合强度，使氧化膜不易开裂脱落，起到了更好的抗高温氧化效果。

通过对比XRD图谱，在S3钢氧化物中发现了大量的 Mn_3O_4 ，如图5c所示。由于不同合金元素在氧化膜中的扩散速度差异很大，有研究发现Mn元素在 Cr_2O_3 晶内扩散比其他阳离子在 Cr_2O_3 晶内扩散速度高近2个数量级，这与晶界扩散速度相当，这说明稀土元素在晶界内的偏聚并不能有效阻止Mn元素的向外扩散，因此会在氧化膜外层形成一层富Mn带，从而更好的阻止 O^{2-} 离子的向内扩散，保护并减缓了基体合金的进一步氧化。对于尖晶石氧化物，在低温下对合金基体保护性较弱，并与基体的结合强度低，因此很容易氧化脱落，从而恶化合金的抗氧化性^[20]。但因为Fe-24Cr-32Ni型耐热钢多在高温下服役工作，这种环境下合金表面形成的 Cr_2O_3 不稳定而且容易分解，不能很好更有效地

保护基体，而尖晶石氧化物则有更好的高温稳定性。当合金的外侧形成一层连续均匀的尖晶石氧化物时，可以有效抑制 Cr_2O_3 在高温下的分解，从而提高合金的抗高温氧化性^[20-21]。

对于3种成分实验钢，只有添加稀土Y的S3钢氧化膜外层的尖晶石结构更连续完整，薄厚均匀，抗高温氧化效果更明显。这是因为Y与Ce对实验钢的抗氧化作用机理不同，从而造成不同的抗高温氧化效果。对于添加稀土Ce元素的合金，其氧化膜的空位缺陷浓度很低，主要控制阳离子沿晶格（空位）向外扩散；而添加稀土Y的合金由氧化初期主要控制阳离子沿晶格向外扩散转变为主要控制阳离子沿晶界扩散^[15]。作用机理的不同会导致氧化层的结构组成存在差异，S3钢表面 $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$ 和 NiCr_2O_4 尖晶石状氧化物的存在，可以很好地抑制 Cr_2O_3 层的分解。此外，致密的 Mn_3O_4 层的出现也会进一步阻止阴阳离子的扩散，从而降低氧化速率。同时，氧化物与基体之间 SiO_2 的“钉扎”作用，抑制氧化物的脱落，也有效防止了基体的进一步氧化。从图2、图3（b、c）和图4（b、c）中均能看出稀土Y的抗高温氧化比稀土Ce的效果更好，这一结果与

一些已有的文献资料相一致。

3 结论

（1）对于Fe-24Cr-32Ni型耐热钢以及分别添加稀土Ce和Y的实验钢，在1 000 °C下氧化100 h后单位面积氧化增重分别为 37.1 g/m^2 、 34.54 g/m^2 和 14.9 g/m^2 。添加稀土Ce和Y均起到了抗氧化的效果，但稀土Y的抗氧化效果更显著。

（2）未添加稀土元素的S1钢氧化膜不连续，表层尖晶石状氧化物脱落严重，而添加稀土Ce和Y的S2和S3钢氧化膜连续且脱落较少。其中，添加稀土Y的S3钢的氧化膜由明显的外层尖晶石结构和内层氧化铬组成。

（3）稀土Y的加入更好的促进了氧化膜与基体界面处内氧化物（ SiO_2 ）的生成，它能起到钉扎作用，从而提高氧化膜与基体的结合强度，减少氧化皮的脱落，改善合金的抗高温氧化能力。而其他成分的实验钢的氧化物中几乎没有 SiO_2 的存在，这减弱了氧化物与基体界面的紧密结合，无法有效的抑制氧化膜脱落。

参考文献:

- [1] 李旭泽, 李花兵, 杨守星, 等. C-HRA-5含Nb奥氏体耐热钢中氮的溶解行为研究 [J]. 钢铁研究学报, 2021, 33 (8): 709-717.
- [2] WEI L, ZHENG J, CHEN L, et al. High temperature oxidation behavior of ferritic stainless steel containing W and Ce [J]. Corrosion Science, 2018, 142: 79-92.
- [3] 张婧, 王存宇, 王辉, 等. 奥氏体型Fe30Mn9Al0.9C低密度钢的热变形行为研究 [J/OL]. 钢铁研究学报, <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20220094>.
- [4] 高海青, 乐有树, 李运初. 采用超音速火焰喷涂制备抗高温氧化、磨损涂层的研究及应用 [J]. 材料研究与应用, 2018, 3 (12): 205-209.
- [5] 华脂亭, 韩丽平, 吕晓霞, 等. Fe-Cr-Al合金氧化膜的形貌表征及性能 [J]. 铸造, 2021, 70 (9): 1068-1071.
- [6] ZHENG.Z, WANG S, LONG J. Effect of rare earth elements on high temperature oxidation behaviour of austenitic steel [J]. Corrosion Science, 2020, 164: 108359.
- [7] 德先龙, 邓鹏, 尹斌, 等. Co/Pt改性铝化物涂层热腐蚀行为探究及比较 [J]. 材料研究与应用, 2022, 16 (02): 243-252.
- [8] 李青, 宋鹏, 黎振华, 等. 热喷涂制备Cr涂层提高铝合金包壳耐事故性的研究 [J]. 材料研究与应用, 2022, 16 (01): 40-47.
- [9] 朱敏, 金鑫焱, 陈光. FeMnAlC TWIP钢加热过程中的氧化行为GD-OES研究 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34 (8): 807-814.
- [10] 陆小会, 高原, 韦文竹, 等. 不锈钢表面等离子渗钎及渗碳后的抗高温氧化行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45 (8): 2026-2030.
- [11] 安立聪, 曹静, 杨戈涛. 27Cr-1.7Mn-9Ni-1.5Mo-0.3Nb铸造双相不锈钢高温氧化行为研究 [J]. 铸造, 2016, 65 (11): 1102-1105.
- [12] WANG S, ZHENG K, ZHENG Z, et al. Oxidation behaviour and microstructure evolution of Zr-containing steel under continuous high-temperature exposure [J]. Materials Chemistry & Physics, 2022, 275125324.
- [13] 黄嘉鹏. 含稀土元素Ni-10Cr-5Al合金高温氧化行为研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.
- [14] 陈伟鹏, 李光卫, 张欢, 等. 稀土对低合金钢抗高温氧化性能的影响 [J]. 稀土, 2016 (6): 52-57.
- [15] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [16] 严靖博, 高义民, 梁龙, 等. 稀土元素微合金化提高HP40合金高温抗氧化能力研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40 (12): 2096-2100.
- [17] ACS Sabioni, JNV Souza, V Ji, et al. Study of ion diffusion in oxidation films grown on a model Fe-15%Cr alloy [J]. Solid State Ionics, 2015, 276: 1-8.

- [18] YAN J B, GAO Y M, LIANG L, et al. Effect of yttrium on the cyclic oxidation behaviour of HP40 heat-resistant steel at 1373 K [J]. Corrosion Science, 2011, 53 (1) : 329–337.
- [19] YAN J, GAO Y, SHEN Y, et al. Effect of yttrium on the oxide scale adherence of pre-oxidized silicon-containing heat-resistant alloy [J]. Corrosion Science, 2011, 53 (11) : 3588–3595.
- [20] WANG H, WANG Y, YU H, et al. Effects of composite scale on high temperature oxidation resistance of Fe-Cr-Ni heat resistant alloy [J]. China Foundry, 2009, 6 (2) : 109–114.
- [21] 江旭东, 周治文, 许征兵. FeAlMoCrC和FeAlNiMoCrC涂层在700 °C氧化行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (9) : 3225–3234.

Study on High Temperature Oxidation Behavior of Cast Fe-24Cr-32Ni Steel Modified by Rare Earth

LUO Jie-bin¹, HUANG Yong^{2, 3}, WANG Shuai^{2, 4}, YAN Ling¹, WANG Xiang-ming³, HAN Pei-xian⁵, ZHENG Zhi-bin^{2, 5}

(1. Hunan Xintianling Tungsten Industry Co., Ltd., Chenzhou 423000, Hunan, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences Guangdong Provincial Iron matrix Composite Engineering Research Center, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 3. Guangzhou Nonferrous Metal Research Institute Xinfeng Wear-Resistant Alloy Material Co., Ltd., Shaoguan Strong and Wear-resistant Steel Engineering Technology Research Center, Shaoguan 511199, Guangdong, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; 5. Jiangxi Lianfeng Investment Casting Co., Ltd., Yichun 336300, Jiangxi, China)

Abstract:

The effect of rare earth elements Y and Ce on the high-temperature oxidation rate of Fe-24Cr-32Ni heat-resistant steel was studied by analysis of gain weight. At the same time, scanning electron microscope (SEM), energy spectrometer (EDS) and X-ray diffractometer (XRD) were used to analyze the structure and composition of the high temperature oxide layer of heat-resistant steel. The results show that the biggest mass gain of the sample without addition RE after 100 h oxidation at 1 000 °C was up to 37.1 g/m². The sample with 0.18% Ce added is the second, about 34.5 g/m². The sample with 0.20% Y addition is the smallest, only 14.9 g/m². This indicates that the addition of RE can effectively improve the oxidation resistance of heat-resistant steel at 1 000 °C. By analyzing the structure of the oxide scale, it could be inferred that RE could promote the formation of a complete and dense layer of spinel oxide on the surface of the oxide film. Further, an internal oxide with Si was formed at the interface between the oxide film and the substrate. The pinning effect increased the contact area between the oxide film and the substrate, increasing the contact area and the bonding strength.

Key words: high temperature oxidation resistance; rare earth elements; pinning effect