

镍基高温合金 Inconel 600 高温氧化行为

赵鑫圻, 肖旋, 刘梓童

(沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110159)

摘要: 研究镍基高温合金Inconel 600在900~1 000 °C条件下的高温氧化行为。借助扫描电子显微镜、能谱、X射线衍射仪、背散射电子衍射等检测仪器, 对样品表面氧化膜的相组成、形貌和结构特点, 以及氧化膜横截面的元素分布特征进行表征和分析, 并绘制该合金的氧化动力学曲线。结果表明: Inconel 600镍基高温合金在900~1 000 °C范围内的氧化动力学符合二次抛物线规律, Inconel 600镍基高温合金在900 °C及以下温度区间范围内属于完全抗氧化级, 在900~1 000 °C温度区间内属于抗氧化级。Inconel 600镍基高温合金的氧化膜由内氧化层和外氧化层两部分组成: 内氧化层主要由 Al_2O_3 组成, 受O原子在晶界的扩散和Al原子的晶内扩散影响, Al_2O_3 主要分布在外氧化层附近基体的晶界上; 外氧化层主要由连续的 Cr_2O_3 氧化膜, 以及掺杂在其中的 $NiCr_2O_4$ 、 MnO_2 、 TiO_2 、 MnO 和 TiO 构成。

关键词: Inconel 600合金; 高温氧化; 氧化动力学曲线; 氧化产物

随着科学技术的高速发展, 金属材料的服役环境日趋严苛复杂, 部分工业设备部件要求选用综合性能更优异的高温合金。力学性能和抗氧化性能是评判一种高温合金综合性能的重要技术指标, 尤其是合金的抗氧化性能和抗热腐蚀性能是评估高温合金的使用寿命和性能的重要依据。高温合金的合金化趋势逐渐增加, 化学成分复杂, 不同的成分配比在不同的温度条件下的氧化过程会呈现不同的氧化机理和演变规律, 形成不同的氧化产物。常用研究方法是通过研究合金的氧化动力学和氧化膜的组成及变化规律来验证高温合金抗氧化性能^[1-9]。如李云等研究铸造镍基高温合金K35的高温氧化行为发现: 在850~1 000 °C温度区间内K35的高温氧化行为是由Cr离子在 Cr_2O_3 氧化层中的扩散行为主导的, 并且K35合金在900 °C以下属于完全抗氧化级, 在900~1 000 °C属抗氧化级^[10]。GH4282合金在800~1 200 °C的氧化膜由三部分组成: 外层是 Cr_2O_3 和 TiO_2 的混合层, 并含有少量(Ni, Co) Cr_2O_4 复合尖晶石相; 中间层是 TiO_2 和 Al_2O_3 的混合层; 内层是 Al_2O_3 氧化层^[11]。蒋贺等人对先进超超临界电站用Inconel 740H在1 050~1 170 °C的氧化行为和机制研究结果表明, 其氧化由金属元素外扩散和氧元素内扩散控制^[12]。Inconel 600合金具有良好抗蠕变性能、卓越的耐热性和耐腐蚀性能以及优良的综合力学性能。作为石化领域中加氢催化剂载体高温焙烧炉的候选材料, 其工作环境较为苛刻, 需要长时间在高温及复杂工况条件下服役, 所选材料不仅要具有良好的综合力学性能和耐热腐蚀性能, 还要具有极高的抗高温氧化性能, 因此对Inconel 600镍基高温合金的抗氧化性能进行研究和评估十分必要。

本文主要针对镍基高温合金Inconel 600, 在900~1 000 °C范围内进行等温氧化试验, 并研究该合金的高温氧化行为与氧化动力学规律之间的关系、高温氧化产物的成分、结构和形貌特征, 进而为该合金的应用提供试验依据和理论基础。

1 试验材料及方法

Inconel 600高温合金主要化学成分为(质量分数, %): C 0.069, Cr 16.40, Al 0.14, Ti 0.16, Mn 0.37, Fe 9.80, Ni余量。将合金材料使用电火花线切割机将棒材切割成尺寸为10 mm × 10 mm × 3 mm的试样, 再经过600~2 000目砂纸研磨, 将试样

作者简介:

赵鑫圻(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为高温合金的长期时效。电话: 15942057564, E-mail: xqzhao_7@163.com

通讯作者:

肖旋, 女, 教授, 硕士生导师。E-mail: xiaoxuan1029@163.com

中图分类号: TG141

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)07-0827-06

收稿日期:

2021-10-14 收到初稿,
2021-12-27 收到修订稿。

浸泡在装有丙酮的烧杯中，放置在超声设备中超声清洗，最后经酒精清洗后放入烘箱烘干。

Inconel 600合金的恒温氧化试验参考HB 5258—1983标准进行。将处理好的试样置于已预先烧至恒重的 Al_2O_3 坩埚中，保持试样与坩埚内壁保持点（线）接触，预先给坩埚加盖避免在高温氧化过程中发生氧化皮迸溅，影响试验结果的准确性。恒温氧化试验使用箱式热处理炉，试验温度为900、950和1 000 °C（控温精度为 ± 5 °C）。选用静态增重法测定合金的氧化增重并绘制动力学曲线，氧化至选定的时间（2.5、12、25、50、100 h）后，取出坩埚，冷却至室温后，在DT-100光电分析天平上称重（误差0.01 mg）。每个试验点均采用3个平行样品。

氧化试验后，借助TESCAN MIRA3型场发射扫描电子显微镜（SEM）和其附带能谱仪（EDS）、PANalyticalX型X射线衍射仪和Nordlys Max2型EBSD探测器，综合分析Inconel 600合金氧化膜的成分、相分布及形貌特征。

2 试验结果与分析

2.1 氧化动力学分析

图1为根据试验结果绘制的Inconel 600合金在900、950和1 000 °C条件下的恒温氧化动力学曲线图，在三

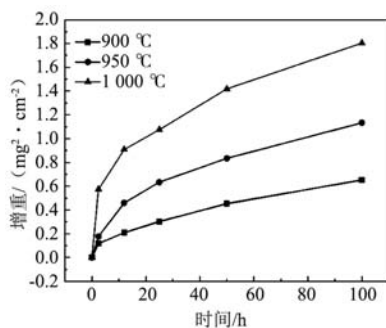
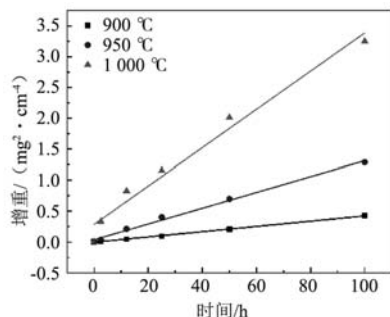


图1 Inconel 600合金在900、950和1 000 °C条件下的氧化动力学曲线

Fig. 1 Oxidation kinetics curves of Inconel 600 alloy at 900, 950 and 1 000 °C



(a) $(\Delta W)^2-t$

种不同的氧化温度下，样品的氧化增重速度随着氧化时间的延长逐渐减慢，氧化温度越高，氧化增重速度越快。曲线整体皆呈现随着氧化时间的延长斜率由大变小的规律；相同氧化时间下，氧化温度升高，氧化速度加快。氧化100 h后，计算出Inconel 600合金在900 °C、950 °C和1 000 °C下的平均氧化速率分别为0.065、0.113和0.181 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。依据HB 5258—2000标准判断，Inconel 600合金在900 °C以下属于完全抗氧化级，在950~1 000 °C范围内属于抗氧化级别。

根据氧化速度时间常数 n ，研究Inconel 600合金在900~1 000 °C范围内的氧化动力学规律，氧化增重（ ΔW ）与时间（ t ）满足式（1）^[13]。

$$\Delta W = kt^n + C \quad (1)$$

式中： ΔW 为样品单位面积的质量变化； k 为氧化速度常数； t 为氧化时间； C 为常数。

式（1）两边取对数，得式（2）。计算出线性关系式的斜率，即为氧化速率常数。

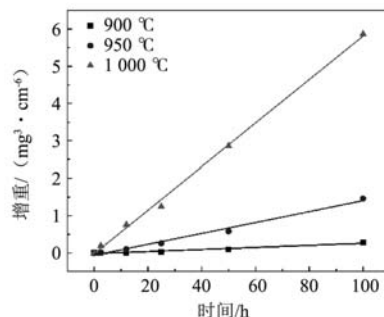
$$\ln(\Delta W) = C_1 + n \ln t \quad (2)$$

图2为Inconel 600合金氧化增重的平方（ ΔW ）²和氧化增重的立方（ ΔW ）³与时间 t 的试验数据拟合出的线性关系图，得出拟合直线的拟合优度（ R^2 ）见表1。表1拟合优度值，表明二次抛物线拟合优度比三次抛物线规律拟合优度值更接近1，拟合效果更好。Hou和Chou^[14-15]所确认的一种高温合金的氧化增重和氧化层厚

表1 Inconel 600合金在900~1 000 °C的线性直线斜率和抛物线规律拟合优化度

Table 1 Linear slope (K_p) and parabolic law fitting optimization (R^2) of Inconel 600 alloy at 900-1 000 °C

氧化增重	温度/°C	$K_p/(\text{mg} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1})$	R^2
$(\Delta W)^2$	900	4.26×10^{-3}	0.999
	950	1.27×10^{-2}	0.997
	1 000	3.10×10^{-2}	0.988
$(\Delta W)^3$	900	2.7×10^{-4}	0.981
	950	1.4×10^{-2}	0.988
	1 000	5.8×10^{-2}	0.997



(b) $(\Delta W)^3-t$

图2 Inconel 600合金的 $(\Delta W)^2-t$ 和 $(\Delta W)^3-t$ 关系曲线

Fig. 2 Relationships between $(\Delta W)^2$ and $(\Delta W)^3$ and t in Inconel 600 alloy at different temperatures

度的增加均符合抛物线规律, 可以认为Inconel 600合金的氧化动力学符合抛物线规律。

Inconel 600合金在900~1 000 °C范围内高温氧化行为的动力学过程遵循抛物线规律, 将抛物线氧化数据按照线性最小平方运算法则拟合如下^[13]:

$$(\Delta W)^2 = K_p t \quad (3)$$

式中: 斜率 K_p 为抛物线速度常数。

参考三个温度下的 K_p 及拟合优度(R^2)如表1所示。根据Arrhenius方程, K_p 与温度 T 成指数关系即公式(4):

$$K_p = K_0 \exp(-Q/RT) \quad (4)$$

两边取对数得线性方程(5):

$$\ln K_p = \ln K_0 - \frac{Q}{RT} \quad (5)$$

式中: K_0 为常数; Q 为氧化激活能。

利用 $\ln K_p - 1/T$ 的曲线关系图3, 计算出斜率($-Q/R$)为-29 667.8, 计算出Inconel 600合金在900~1 000 °C温度区间内的氧化激活能为247 kJ/mol, 近似于Cr离子在 Cr_2O_3 氧化层中扩散激活能259 kJ/mol, 可以认为Inconel 600合金在高温氧化行为中, 氧化过程受到 Cr^{3+} 在 Cr_2O_3 氧化层中的扩散行为的影响^[10]。

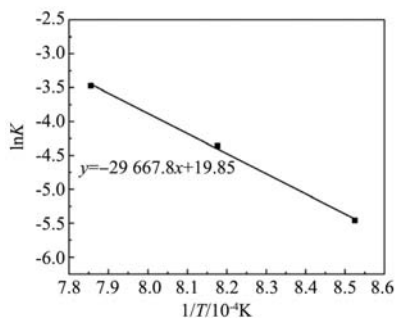


图3 Inconel 600合金恒温氧化 $\ln K_p - 1/T$ 关系曲线
Fig. 3 Curve of $\ln K_p - 1/T$ in Inconel 600 alloy

2.2 氧化膜的成分分析

Inconel 600合金在900和1 000 °C温度条件下样品表面氧化产物XRD物相分析结果如图4所示。在900 °C条件下, 样品的氧化膜相对较薄, 氧化增重较小, 对应的氧化产物的XRD射线比较弱。在氧化温度为1 000 °C时, 各氧化产物所对应的衍射峰明显增强。Inconel 600

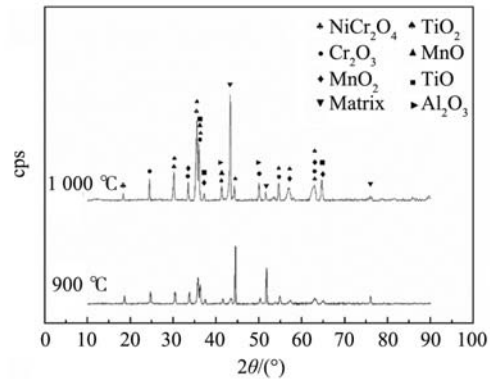


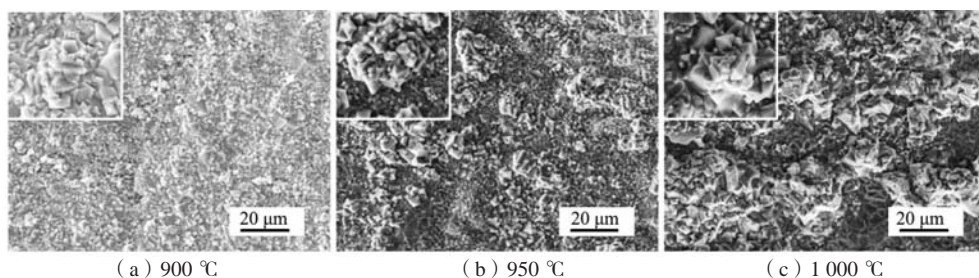
图4 Inconel 600合金在不同温度下氧化100 h的产物XRD分析
Fig. 4 XRD phase analysis of oxidation products of Inconel 600 alloy at 900-1 000 °C for 100 h

合金样品在900~1 000 °C温度范围内恒温氧化100 h后, 氧化产物为 Cr_2O_3 、 TiO_2 、 MnO_2 和 $NiCr_2O_4$, 以及少量的 TiO 、 Al_2O_3 、 MnO 。随着氧化温度的升高, 氧化产物的含量不断增加。

在合金氧化过程中, 表面氧化膜的形成主要受热力学因素和动力学因素两方面控制^[16]。在Cr元素含量超过15%的镍基高温合金中, 氧化初期, 基体中的Ni、Mn和Cr元素与O原子发生氧化生成NiO、MnO和 Cr_2O_3 ^[9]。Inconel 600合金中Cr元素的含量高于15%, 加快Cr元素的氧化速率, 促进氧化产物 Cr_2O_3 在样品表面累积成膜, 在动力学上表现为: 图1氧化动力学曲线中, 氧化初期阶段, 单位时间内样品氧化增重速率高。随着氧化反应的进行, 基体中一部分Ni元素扩散到外氧化层内部和表面, 与O原子反应生产NiO。夹杂在 Cr_2O_3 氧化膜中, 高温条件下NiO与 Cr_2O_3 发生固相反应, 在样品表面生成 $NiCr_2O_4$ 尖晶石相^[12]。一般条件下, 由 Cr_2O_3 组成的氧化膜具有良好的致密性, 可以有效隔绝基体与外部气体环境的接触, 阻止O原子渗透氧化层向基体内部的扩散, 直接造成在 Cr_2O_3 层内的氧分压偏低, 形成贫氧区, 生成Ti和Mn的低价氧化物。因此样品表面的氧化膜主要成分除 Cr_2O_3 、 $NiCr_2O_4$ 尖晶石外, 也包含Ti和Mn的低价氧化物^[15]。

2.3 氧化膜形貌分析

样品氧化膜表面形貌如图5所示。在900 °C氧化100 h



(a) 900 °C (b) 950 °C (c) 1 000 °C

图5 Inconel 600合金的表面氧化膜形貌

Fig. 5 Oxide film morphologies of Inconel 600 alloy at different temperatures

后, 样品表面出现尺寸均匀的氧化物颗粒, 同时出现许多“瘤”状氧化物; 950 °C时, 氧化层上的瘤状物明显长大, 平均尺寸在20 μm左右, 氧化层表面变得粗糙不平。氧化温度为1 000 °C时, 样品表面的氧化层更加粗糙, “瘤”状氧化物明显长大。

根据能谱结果(图6), 瘤状物的主要成分为

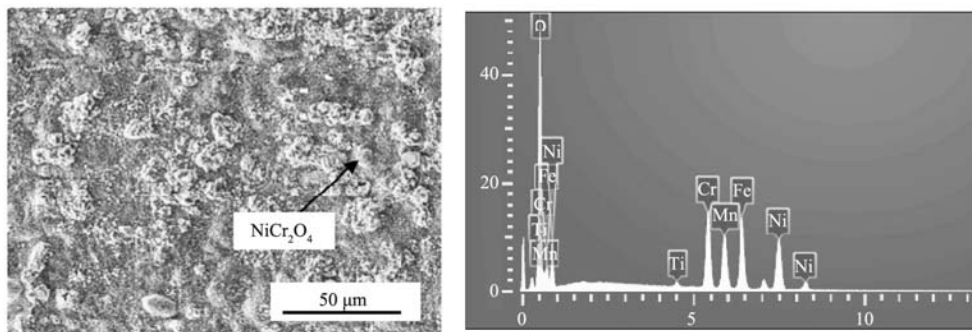


图6 Inconel 600合金在950 °C下氧化膜表面形貌和能谱分析

Fig. 6 Surface morphology and energy spectrum analysis of oxide film of Inconel 600 alloy at 950 °C

2.4 氧化膜截面分析

利用扫描电镜(SEM)和能谱(EDS)对截面微观形貌进行观察, 图7为在900、950和1 000 °C氧化膜截面微观形貌。三个温度条件下样品的氧化膜均由外氧化层和内氧化层组成。表面的外氧化层厚度均匀, 平滑附着在样品表面, 内氧化层呈条状由外氧化层向基体内部延伸。表2为氧化膜厚度统计, 在高温氧化过程中, 随着氧化温度的升高, 合金氧化膜厚度逐渐增加。

利用能谱(EDS)对样品的氧化膜横截面进行分析, 如图8所示。样品在1 000 °C高温氧化100 h后, 外氧化层中Cr、Mn和Ti元素富集, 在靠近外氧化层的基体位置附近出现相应的贫Cr、Mn、Ti元素区。结合XRD相分析的结果表明, 氧化膜外层的相组成主要为Cr₂O₃、TiO₂、MnO₂、NiCr₂O₄和少量的TiO、MnO。

图9为Inconel 600合金1 000 °C氧化100 h后横截面背散射电子衍射技术(EBSD)分析及元素分布, 图9a为衍衬图, 图9b中Ni富集区为基体γ相, Cr的富集区为Cr₂O₃相, Al的富集区为Al₂O₃相, 结合EBSD中能谱Al、O的面分布情况, 并参照衍衬图中晶界位置, Al与O主要分布在基体的晶界位置, 结合EBSD相图与XRD

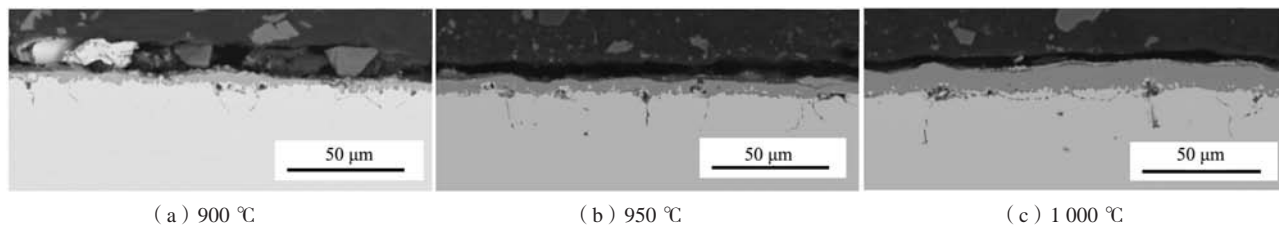
NiCr₂O₄尖晶石类化合物。氧化温度升高, NiCr₂O₄逐渐增多且逐渐长大。随着氧化温度的升高, MnO₂、TiO₂晶核会逐渐长大, 导致氧化物颗粒的密度逐渐减小。MnO₂、TiO₂主要分布在氧化膜表面和内部, 使上层氧化膜变得疏松, 会进一步加剧合金的氧化。

表2 Inconel 600合金氧化100 h后内、外氧化层厚度
Table 2 Internal and external oxide layer thickness of Inconel 600 alloy after 100 h oxidation at the different temperatures

温度/°C	外氧化层/μm	内氧化层/μm
900	4.4	11.1
950	6.2	15.6
1 000	10.4	20.2

相分析, 可以判断内氧化层为Al₂O₃相, 并且主要分布在靠近外氧化层基体的晶界位置。

Inconel 600合金在高温氧化过程中的氧化层可分为内氧化层和外氧化层。图10为Inconel 600合金氧化过程的示意图。氧化初期, 在多元合金高温氧化过程中的选择性氧化规律中。一般情况下, 相较于Cr元素, Al元素的自由能更低, 活性更高。Al离子会优先与O原子反应。但Inconel 600合金的成分配比中Cr元素含量为16.40%, Al元素含量为0.14%, 会发生多元合金的选择性氧化行为。一般认为, 在基体中Cr含量高于15%, Al含量较低时, O原子会选择性优先同Cr离子反应^[11]。相比于Al元素, Mn和Ti元素的自由能相对较高, 活性略低, 但同样与O原子具有良好的亲和力。在氧化过程中, Mn和Ti离子由基体内向外扩散的过程中同O原子



(a) 900 °C

(b) 950 °C

(c) 1 000 °C

图7 Inconel 600合金氧化100 h后的氧化膜截面

Fig. 7 Oxide film cross sections of the Inconel 600 alloy after 100 h oxidation at the different temperatures

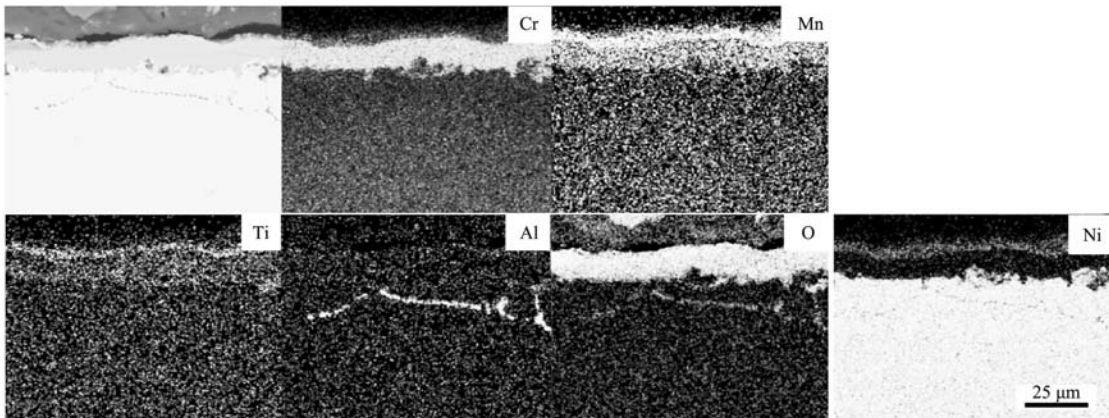
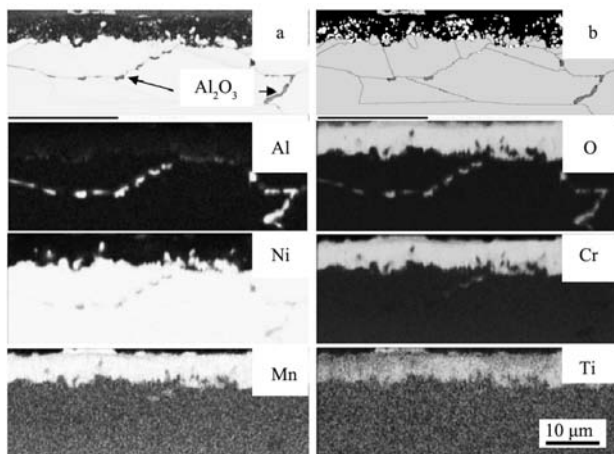


图8 Inconel 600合金1 000 °C/100 h氧化后截面元素分布

Fig. 8 Element distributions in oxide film cross section of Inconel 600 alloy after oxidation at 1 000 °C/100 h



(a) 衍衬图

(b) 相图

图9 Inconel 600合金1 000 °C/100 h氧化后截面EBSD分析及元素分布

Fig. 9 EBSD analysis and element distributions of Inconel 600 alloy after oxidation at 1 000 °C/100 h

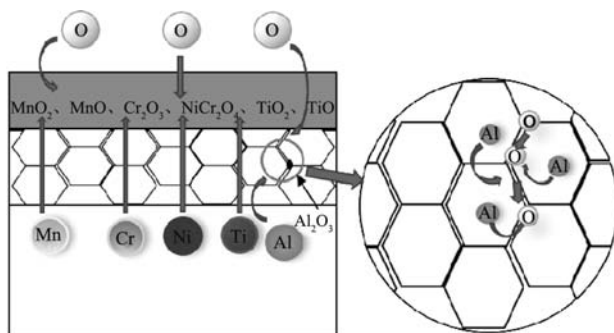


图10 Inconel 600合金氧化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of oxidation in Inconel 600 alloy

结合, 分别在 Cr_2O_3 氧化层的外表面和内部生成 TiO_2 、 MnO_2 。K35镍基铸造高温合金在高温氧化过程中具有相似的行为^[10]。在高温环境下, 空气中的 O 分子开始吸附于样品表面, 在高温作用下加速分解为 O 原子, O 原子向基体内扩散, 并与合金基体中的 Cr 、 Ni 、 Ti 、 Mn 元素发生氧化反应, 分别生成以 Cr_2O_3 、 MnO_2 、 TiO_2

为主的外氧化层, 消耗基体中的合金元素, 造成外氧化膜与基体之间 Cr 、 Ni 、 Ti 、 Mn 元素浓度梯度差, 提供元素扩散的驱动力, 引起这些元素由基体内部向表层的扩散。受到元素扩散的影响, 在靠近氧化层的基体附近逐渐形成对应元素贫瘠区, 该阶段氧化过程由界面反应和元素扩散行为组成, 但由界面反应主导; 随着氧化时间的延长, Cr_2O_3 氧化层逐渐趋于均匀化, 致密性增加, 但在 Cr_2O_3 氧化层内部掺杂的质地疏松的 MnO_2 、 TiO_2 使相对致密的 Cr_2O_3 氧化膜变得疏松, 掺杂 MnO_2 、 TiO_2 的 Cr_2O_3 氧化层, 可以对 O 原子的内扩散行为起到一定程度的阻碍作用, 造成外氧化层内部氧分压过低, 形成 Mn 和 Ti 元素的低价氧化物; 但仍有部分 O 原子扩散透过外氧化层进入基体内部, 在 O 原子扩散进入基体晶界时, 优先选择所需扩散自由能低的晶界作为扩散通道, 并率先与自由能更低的 Al 反应生成 Al_2O_3 , 消耗晶界附近的 Al , 造成晶界和晶内的 Al 元素浓度梯度, 引起 Al 的晶内迁移, 进一步促进内氧化的进行。此时的氧化过程主要以基体元素和 O 元素的扩散行为为主导, 形成了沿晶界分布 Al_2O_3 的内氧化层。

3 结论

(1) Inconel 600镍基高温合金在900、950和1 000 °C的氧化动力学符合二次抛物线规律。在900 °C以下属完全抗氧化级, 950~1 000 °C属于抗氧化级。

(2) Inconel 600合金高温氧化产生的氧化膜可分为内氧化层和外氧化层, 内氧化层主要由 Al_2O_3 组成。

(3) 基体晶界为 O 原子提供了快速扩散通道, 外界 O 原子的不断补充和 Al 元素的晶内扩散为晶界形成 Al_2O_3 内氧化层提供了基础。

(4) 氧化初期, 氧化过程由界面反应和元素扩散两部分组成, 是以界面反应为主导。随着氧化的进行, 氧化过程则逐渐以基体元素和 O 元素的扩散行为为主导。

参考文献:

- [1] 王伟娟, 喻聪, 潘斌, 等. 镍基高温合金的氧化行为研究进展 [J]. 现代冶金, 2021, 49 (1): 1-8.
- [2] 陈超, 范宏誉, 邢守义, 等. 含镍和铝的氧化钇稳定氧化锆复合涂层的显微组织和抗氧化性能 [J]. 上海金属, 2020, 42 (5): 5-8, 14.
- [3] 高双, 侯介山, 杨飞, 等. 两种铸造镍基合金的高温氧化行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48 (3): 960-966.
- [4] 潘苗苗, 高振桓, 巩秀芳, 等. 镍基铸造高温合金Mar-M247的高温氧化行为 [J]. 铸造, 2020, 69 (8): 797-802.
- [5] 孙德山, 肖旋, 王常帅, 等. K282合金的高温氧化行为研究 [J]. 沈阳理工大学学报, 2019 (2): 75-81.
- [6] ZHENG L, ZHANG M C, CHELLALI R, et al. Investigations on the growing, cracking and spalling of oxides scales of powder metallurgy Rene95 nickel-based superalloy [J]. Applied Surface Science, 2011, 257 (23): 9762-9767.
- [7] HUSSAIN N, SHAHID K A, KHAN I H, et al. Oxidation of high-temperature alloys (superalloys) at elevated temperatures in air.I [J]. Oxidation of Metals, 1994, 41 (3-4): 251-269.
- [8] 洪笑宇, 刘青欢, 徐裕来, 等. 新型镍基高温合金1 100 °C氧化行为的研究 [J]. 上海金属, 2018 (5): 55-61.
- [9] HAWK J A, CHENG T L, SEARS J S, et al. Gamma prime stability in haynes 282: theoretical and experimental considerations [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (11): 4171-4181.
- [10] 李云, 尚海波, 郭建亭, 等. 铸造镍基高温合金K35的高温氧化行为 [J]. 金属学报, 2003 (7): 749-754.
- [11] 石照夏, 颜晓峰, 段春华. 新型镍基高温合金GH4282的高温氧化行为 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (12): 2729-2737.
- [12] JIANG H, DONG J X, ZHANG M C, et al. Oxidation behavior and mechanism of Inconel 740H alloy for advanced ultra-supercritical power plants between 1 050 and 1 170 °C [J]. Oxidation of Metals, 2015, 84 (1-2): 61-72.
- [13] 董凯鑫. 高性能粉末高温合金的蠕变、氧化及热腐蚀行为研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 45-62.
- [14] HOU X M, CHOU K C. Quantitative interpretation of the parabolic and nonparabolic oxidation behavior of nitride ceramic [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2008, 29 (3): 517-523.
- [15] 赵双群, 董建新, 张麦仓, 等. 新型镍基高温合金在950 °C和1 000 °C的氧化行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005 (2): 208-211.
- [16] GAO S, HE B, ZHOU L Z, et al. Effects of Ta on the high temperature oxidation behavior of IN617 alloy in air [J]. Corrosion Science, 2020 (4), 170.

High Temperature Oxidation Behavior of Nickel-Based Superalloy Inconel 600

ZHAO Xin-qi, XIAO Xuan, LIU Zi-tong

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China)

Abstract:

The high temperature oxidation behavior at 900-1 000 °C of nickel-based superalloy Inconel 600 was investigated. The phase composition, morphology and structure characteristics of the film on the surface of the sample, as well as the element distribution of the film were analyzed by means of scanning electron microscopy (SEM), energy spectrum (EDS), X-ray diffraction (XRD) and backscattered electron diffraction (EBSD). Then the oxidation kinetics curves of the alloy were plotted. The experimental results showed that the oxidation kinetics of the Inconel 600 alloy in the temperature range of 900-1 000 °C basically conformed to the quadratic parabola law. The Inconel 600 alloy belonged to the complete oxidation resistance grade lower than 900 °C, and belonged to the oxidation resistance grade in the temperature range of 950 to 1 000 °C. The oxidation film of the Inconel 600 alloy consisted of inner and outer oxide layer. The inner oxide layer was mainly composed of Al₂O₃. Under the influence of the diffusion behavior of O atom in grain boundary and diffusion behavior of Al atom in grain boundary, the Al₂O₃ was mainly distributed on the grain boundary of matrix near the outer oxide layer. The outer oxide layer was mainly composed of continuous Cr₂O₃ oxide film. And NiCr₂O₄, MnO₂, TiO₂, MnO as well as TiO doped in it.

Key words:

Inconel 600 alloy; high temperature oxidation; oxidation kinetics curve; oxidation product