

Si 改性等离子熔覆 IN 718 涂层的高温氧化行为

赵文超^a, 周杰^a, 彭文屹^a, 危翔^a, 邓晓华^b, 章爱生^a,
于思琪^a, 孙祖祥^a, 余飞翔^a, 高安澜^a

(南昌大学 a.材料科学与工程学院 b.空间科学与技术研究院, 南昌 330031)

摘要: 目的 提高 IN 718 涂层的抗氧化性。方法 向 IN 718 镍基粉末中添加 2%Si 粉, 使用等离子熔覆技术在 H13 钢表面制备涂层。利用线切割将涂层从基体上剥离, 使用高温炉在静态空气中进行 900、1000、1100 °C 的循环氧化实验, 测试了 Si 改性 IN 718 涂层的抗高温氧化性能, 通过 XRD、SEM、EDS 分析了涂层及其氧化层的组织、成分的变化。结果 添加 Si 改变了涂层的微观组织, 增加了等轴晶的含量, 提升了涂层的显微硬度。两种涂层在 900 °C 的氧化动力学曲线基本一致, 氧化层均为 Cr₂O₃。IN 718 在 1000~1100 °C 中氧化层为 Cr₂O₃, 根据热力学计算结果, Si 元素活性在 900 °C 以后大幅提高, 因此 IN 718+Si 涂层在 1000 °C 以及 1100 °C 生成了双层氧化层, 外层为 Cr₂O₃, 内层为 SiO₂。结论 添加 Si 元素提高了 IN 718 涂层在 1000 °C 以上的抗高温氧化性能。

关键词: 等离子熔覆; IN 718 涂层; Si 改性; 高温氧化; 氧化动力学

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)03-0103-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.03.010

High Temperature Oxidation Behavior of Si Modified Plasma Cladding IN 718 Coating

ZHAO Wen-chao^a, ZHOU Jie^a, PENG Wen-yi^a, WEI Xiang^a, DENG Xiao-hua^b,
ZHANG Ai-sheng^a, YU Si-qi^a, SUN Zu-xiang^a, YU Fei-xiang^a, GAO An-lan^a

(a. School of Materials Science and Engineering, b. Institute of Space Science and Technology,
Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT: In order to improve the oxidation resistance of IN 718 coating, 2wt.%Si powder was added into IN 718 Ni-based powder to prepare coating on H13 steel surface by plasma cladding technique. The coating was separated from the substrate by wire cutting. The cyclical oxidation experiments at 900 °C, 1000 °C and 1100 °C respectively were carried out in a high temperature furnace in static air. The high temperature oxidation resistance of the Si-modified IN 718 coating was tested. The

收稿日期: 2021-06-04; 修订日期: 2021-06-21

Received: 2021-06-04; Revised: 2021-06-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51461030); 国家大学生创新项目 (202010403053); 江西省研究生创新项目 (YC2020-S071); 南昌大学大学生创新项目 (2020CX004)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51461030); National University Student Innovation Project (202010403053); Postgraduate Innovation Project in Jiangxi Province (YC2020-S071); College Student Innovation Project of Nanchang University (2020CX004)

作者简介: 赵文超 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属涂层。

Biography: ZHAO Wen-chao (1996—), Male, Postgraduate, Research focus: metal coating.

通讯作者: 彭文屹 (1968—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料表面改性和高熵合金。

Corresponding author: PENG Wen-yi (1968—), Female, Doctor, Professor, Research focus: surface modification of metallic materials and high entropy alloys.

引文格式: 赵文超, 周杰, 彭文屹, 等. Si 改性等离子熔覆 IN 718 涂层的高温氧化行为[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 103-109.

ZHAO Wen-chao, ZHOU Jie, PENG Wen-yi, et al. High Temperature Oxidation Behavior of Si Modified Plasma Cladding IN 718 Coating[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 103-109.

changes of microstructure and composition of the coating and its oxide layer were analyzed by XRD, SEM and EDS. The addition of Si changed the microstructure of the coating, increased the content of equiaxed crystal, and improved the microhardness of the coating. The oxidation kinetic curves of the two coatings at 900 °C were basically the same, and the oxide layers were all Cr_2O_3 . IN 718 oxide layer was Cr_2O_3 at 1000~1100 °C. According to the Thermo-calculation result, the Si activity was greatly increased above 900 °C, which results in that a double layer of oxide layer was generated on the IN 718+Si coating at 1000 °C and 1100 °C, the outer layer was Cr_2O_3 , and the inner layer was SiO_2 . The high temperature oxidation resistance of IN 718 coating over 1000 °C was improved owing to Si addition.

KEY WORDS: plasma cladding; IN 718 coating; Si modification; high temperature oxidation; oxidation kinetics

Inconel 718 镍基高温合金简称为 IN 718(国内牌号 GH4169), 其在 650 °C 以下具有优良的抗氧化、抗蠕变、抗疲劳、耐腐蚀性能, 因此被广泛应用于航空航天、船舶、石油化工等领域^[1]. IN 718 在服役的高温合金总量中约占 35%^[2]. IN 718 的最高适用温度一般认为是在 649 °C, 在高于此温度的环境中长时间使用会导致 γ' 相迅速时效或者转变为 δ 相而失去强度及抗蠕变能力^[3-4]. 在目前的研究中发现, IN 718 在 850~1100 °C 高温下的氧化层主要为 Cr_2O_3 或者尖晶石 $\text{Ni}(\text{Cr}, \text{Fe})_2\text{O}_4$ ^[2,5], 由于 Cr_2O_3 在 1000 °C 及以上会生成 CrO_3 , 导致挥发性氧化^[6], 而且 Cr_2O_3 氧化层所处温度越高, 塑性越差^[7]. IN 718 合金的上限温度已被证实为 1523 K (1250 °C)^[8], 所以高温环境对 IN 718 的使用是尤为不利的. 因此, 研究人员开始研究 IN 718 的改进方法, 众多的研究方向指向了 Al/Ti 比及 Al、Ti 含量^[9-11]. Si 在高温下能够形成稳定的 SiO_2 氧化层, 提升抗高温氧化性能, 如添加 Si 可以提高 $\text{CoCr}_2\text{FeNb}_{0.5}\text{Ni}$ 高熵合金涂层以及 NiCrBSi 涂层的抗氧化性能^[12-13], 原因是形成的非晶型 $(\text{Cr}, \text{Si})\text{O}_x$ 阻碍 O 的扩散以及 Si 加速了氧化物的形成. 除此之外, Si 的作用及其机理研究很少被报道. Si 含量的增加会促进偏析^[14]以及更多 Laves 相的生成^[15]. Si 元素含量越高材料的断裂韧性越低, 所以在提高材料的抗高温氧化性能的同时应注意控制 Si 元素含量, 否则将对材料的韧性产生严重影响.

等离子体熔覆作为一种先进的表面改性和修复技术, 可用于制备大面积涂层^[16], 其具有熔覆效率高、工艺简单等优点, 可以快速推广. Jmatpro 软件是一款优秀的热力学计算及性能模拟软件, 在材料研究中得到广泛使用. 本文采用了等离子熔覆 Si 元素改性 IN 718 涂层, 研究了 IN 718 和 Si 改性 IN 718 涂层的高温氧化行为, 并结合 Jmatpro 热力学计算解释了添加 Si 元素对 IN 718 涂层抗氧化的影响机理, 为提升 IN 718 涂层的高温性能提供了一些基础数据.

1 实验

1.1 样品制备

用铣床及 240#砂纸去除 H13 钢基体表面铁锈与

氧化层, 用酒精清洗基体表面后烘干备用. 涂层粉末采用纯度 $\geq 99.5\%$ 、粒度为 100~200 目的商用 IN 718 合金粉末. Si 粉纯度 $\geq 99.99\%$, 粒度为 40~200 目. 在前期探索性实验中, 添加了 4% (质量分数, 全文同) Si 粉的 IN 718 涂层的表面焊道不连续, 表面宏观缺陷较多, 因此选择向 IN 718 粉末中加入 2% Si 粉末, 混合均匀后将混合粉末置于 120 °C 干燥箱中干燥 120 min. 采用等离子熔覆设备在 H13 钢表面制备 IN 718 及 Si 改性 IN 718 涂层. 本实验采用的熔覆参数为: 电流 100 A, 离子气流量 1.5 L/min, 送粉转速 9 r/s, 等离子弧移动速度 3 mm/s, 焊道搭接率 50%, 氩气保护气 4 L/min, 离子弧距基体表面 10 mm. 将 IN 718 涂层及 Si 改性 IN 718 涂层用线切割于基体上剥落, 尺寸分别为 10 mm×10 mm×3 mm 和 5 mm×5 mm×5 mm, 然后进行高温氧化实验与组织分析实验.

1.2 高温氧化实验

用砂纸将尺寸为 10 mm×10 mm×3 mm 的样品打磨至 2000#, 使用超声波清洗仪将样品在无水乙醇中清洗 3 min 后吹干. 用游标卡尺测量各个样品的尺寸, 置于氧化铝坩埚内, 后用精度为 0.1 mg 的电子天平称量记录. 氧化实验中使用的坩埚在实验前已按照 HB 5258—2000《钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法》进行处理. 将样品分别置于 900、1000、1100 °C 的高温炉中进行氧化实验, 每 10 h 取出冷却到室温, 称量后放回, 氧化实验共计 100 h.

1.3 涂层及氧化层微观组织分析

用 X 射线衍射分析仪 (XRD, D8 Advance) 分析涂层的相组成与氧化产物, 角度 2θ 为 20°~100°, 步长为 0.01°. 用附带能谱分析仪 (EDS) 的扫描电镜 (SEM, Fei Quanta 200F、Gemini SEM300) 分析涂层截面与氧化层截面的元素组成.

2 结果与分析

2.1 涂层相组成及组织

IN 718 涂层与 Si 改性 IN 718 涂层的相组成如图 1a 所示. 涂层主要由 γ 相和 γ' 相组成, 在添加 Si 后,

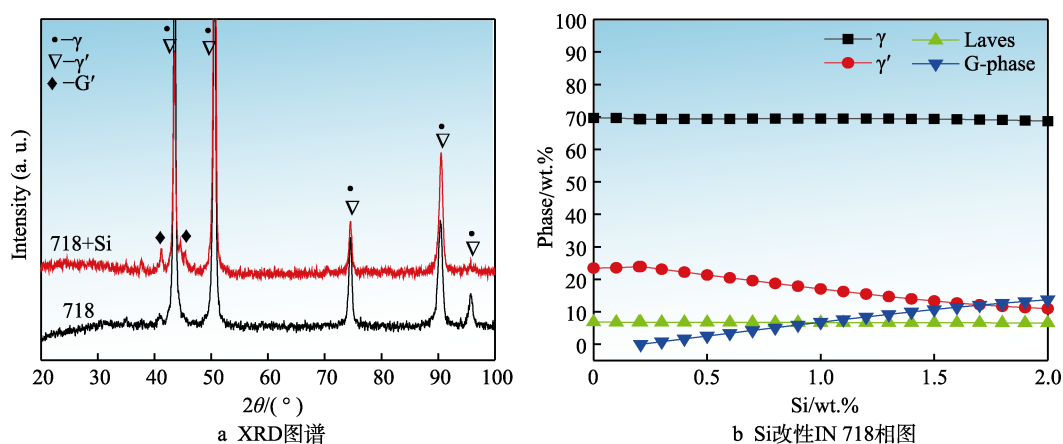


图 1 氧化前涂层的 XRD 图谱与相图

Fig.1 XRD patterns and phase diagram of the coating before oxidation: a) XRD patterns; b) Si modification IN 718 phase diagram

G 相 ($\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$) 的衍射峰强度更加明显, 说明 G 相的含量可能增加了, 这与 Jmatpro 软件计算得出的相图一致。

图 2 为 IN 718 与 IN 718+Si 涂层在背散射模式 (BSD) 下的 SEM 形貌, 可以看到添加 Si 对涂层的组织有明显的影响。在等离子熔覆过程中, 金属粉末和基体材料被等离子弧加热熔化形成熔池。当等离子弧离开后, 由于基体材料的传热, 熔池底部与基体交界处迅速形核结晶, 形成一条锯齿状或波浪状的凝固界面。由于受温度梯度的影响^[17-18], IN 718 涂层和 IN 718+Si 涂层底部和中部主要是柱状晶和胞状晶, IN 718 涂层顶部为柱状晶和等轴晶, 而 IN 718+Si 涂层顶部主要为等轴晶和胞状晶。Si 原子在 γ 相中的固溶

度较低, 但是在等离子熔覆非平衡凝固过程中, 在涂层中下部, 由于凝固速度较快, Si 原子在 γ 相中的固溶度会提高, 不会富集在固液界面前沿。随着液-固界面向上推移和熔池中、底部胞晶或柱晶的形核长大, 使得熔体整体温度降低, 温度梯度减小, 因此在涂层顶部的凝固速度也会降低, Si 原子不容易被 γ 相所捕获, 从而在固液界面前端富集, 成分过冷增大, 导致晶体择优生长取向被抑制, 容易生成等轴晶。

通过 EDS 分析可以知道 (图 3 和表 1), 两种涂层基体相为 γ 相, 晶间为白色相与灰色相组成的共晶组织。白色相均含有大量 Ni、Nb、Si 元素, 根据其成分推测为 G 相 ($\text{Nb}_6\text{Ni}_{16}\text{Si}_7$)。灰色相成分与 γ 相近乎一致。涂层中的黑色颗粒物质为富 Nb、Ti 相。

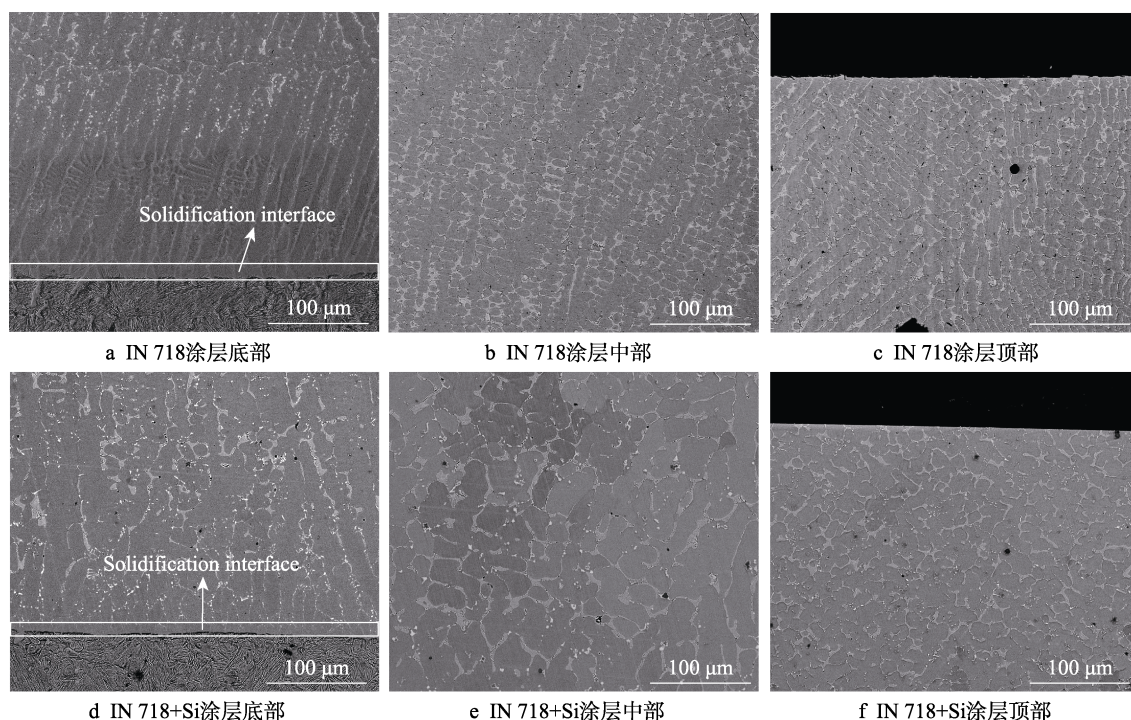


图 2 涂层截面组织的 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of coating section structure: a) the bottom of IN 718 coating; b) the middle of IN 718 coating; c) the upper of IN 718 coating; d) the bottom of IN 718+Si coating; e) the middle of IN 718+Si coating; f) the upper of IN 718+Si coating

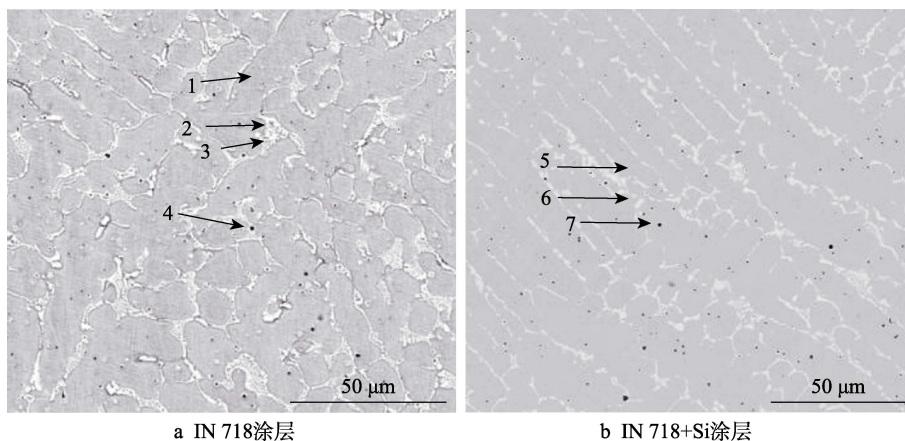


图 3 涂层截面组织背散射图像

Fig.3 SEM images of coating cross section structure: a) IN 718 coating; b) IN 718+Si coating

表 1 图 3 各点处元素成分

Tab.1 Element composition at each point of fig.3

| Element | Ni | Fe | Cr | Al | Nb | Mo | Ti | Si |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| | | | | | | | | at. % |
| 1 | 36.41 | 40.42 | 17.33 | 0.91 | 0.53 | 1.14 | 0 | 3.26 |
| 2 | 38.02 | 35.33 | 17.18 | 1.12 | 1.15 | 1.35 | 0.61 | 4.96 |
| 3 | 34.14 | 21.50 | 11.49 | 0 | 12.63 | 4.34 | 2.19 | 13.71 |
| 4 | 15.56 | 19.24 | 10.63 | 13.76 | 9.02 | 0.82 | 29.63 | 1.33 |
| 5 | 40.5 | 39.4 | 17.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.0 |
| 6 | 34.1 | 23.6 | 10.5 | 15.8 | 0 | 0 | 0 | 16.0 |
| 7 | 7.7 | 9.0 | 4.6 | 0 | 43.9 | 0 | 34.9 | 0 |

如图 4 所示, Si 改性 IN 718 涂层的显微硬度相比于 IN 718 涂层的平均显微硬度由 262.38HV 提升到 276.4HV。由 Tabor 方程可知, 维氏显微硬度约为屈服强度的 1/3, 即 $3H_V \approx \sigma_y$ 的关系, 所以 Si 改性 IN 718 涂层的屈服强度提高了约 42 MPa。使用 JADE6.5 结合 XRD 衍射数据和 Williamson-Hall 方法可以估算出涂层的微观应变, IN 718 的微观应变 ε 约为 0.0116%, Si 改性 IN 718 涂层的微观应变 ε 约为 0.0162%, 而微观应变、位错密度和位错强化值 $\Delta\sigma_b$ 存在以下关系^[19]:

$$\rho = 2\sqrt{\frac{3\varepsilon}{Db}}, \Delta\sigma_b = B M b G \rho^{1/2}.$$

可以发现, 添加 Si 提高

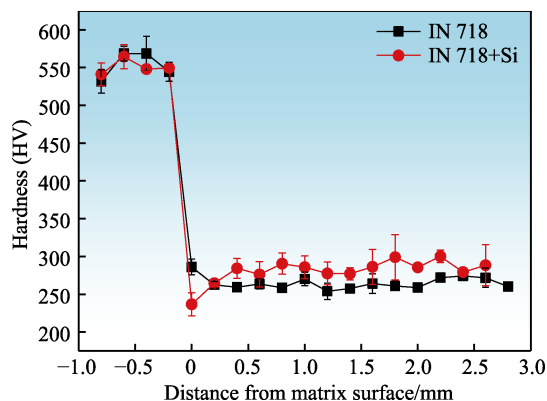


图 4 涂层横截面显微硬度

Fig.4 Microhardness of coating cross section

了涂层的位错密度, 提升了位错强化效果, 这可能是 Si 改性 IN 718 涂层显微硬度提高的原因。

2.2 涂层抗氧化性能分析

从图 5 的氧化动力学曲线可知, 两种涂层在 900 °C 下的氧化动力学曲线近乎一致, 表明氧化过程是类似的。在 1000 °C 和 1100 °C 的前期快速氧化阶段中, IN 718 涂层的氧化增重速率比 IN 718+Si 涂层大, 1100 °C 时该表现更明显。在快速氧化阶段结束后, 氧化过程为稳态氧化, 在这一阶段保持着较小的氧化增重速率。稳态氧化阶段后期, 氧化增重速率增大的原因是在循环氧化过程中, 试样受到多次冷热交替, 由于涂层材料与氧化层的键合不同, 导致涂层与氧化层的热膨胀系数不同, 因此旧氧化层脱落, 生成了新的氧化层。从氧化动力学曲线来看, IN 718+Si 涂层相对于 IN 718 涂层有着更好的抗高温氧化性能。

与 $\text{CoCr}_2\text{FeNb}_{0.5}\text{NiSi}_{0.2}$ 涂层^[12]、Si 添加 NiCrBSi 涂层^[13]、高 Cr 镍基涂层^[20]以及 $\text{CoCrFeMnNb}_x\text{Ni}$ ^[21]相比较, 本文研究的 Si 改性 IN 718 涂层的抗氧化性能更好, 但在 1100 °C 时的抗氧化性能较 MCrAlY (M=Ni, Co) 系涂层^[22]差, 见表 2。从表 2 可以看出, 800 °C 时, $\text{CoCr}_2\text{FeNb}_{0.5}\text{NiSi}_{0.2}$ 涂层、30%Si + NiCrBSi 涂层与 $\text{CoCrFeMnNb}_{0.25}\text{Ni}$ 合金的氧化增重均高于本文研究的 IN 718 + Si 涂层; 900 °C 时, $\text{CoCrFeMnNb}_{0.25}\text{Ni}$

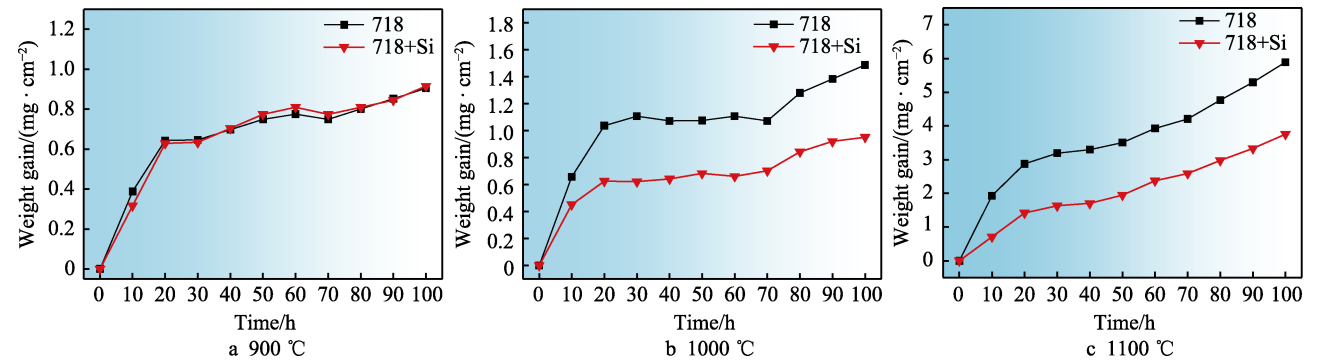


图 5 不同温度下涂层的氧化动力学曲线
Fig.5 Oxidation kinetics curve of coating at various temperatures

表 2 文献氧化数据对比
Tab.2 Comparison of literature oxidation data

| Alloy | Temperature/ °C | Weight gain/ (mg·cm ⁻²) | Reference |
|---|--------------------|--|-----------|
| Ni-based coating with high Cr content | 750 | 6.15 | [20] |
| 30wt.%Si + NiCrBSi | 800 | 3.32 | [13] |
| CoCr ₂ FeNb _{0.5} NiSi _{0.2} | 800 | 1.40 | [12] |
| CoCrFeMnNb _{0.25} Ni | 800 | 1.15 | [21] |
| | 900 | 2.80 | |
| NiCrAlY | 1100 | 0.72 | [22] |
| 2wt.%Si + IN 718 | 750 | 0.38 | This work |
| | 800 | 0.46 | |
| | 900 | 0.92 | |
| | 1000 | 0.95 | |
| | 1100 | 3.76 | |

合金的氧化增重为 2.8 mg/cm², IN 718 + Si 涂层的氧化增重为 0.92 mg/cm²; 1100 °C 时, IN 718 + Si 涂层的氧化增重为 3.76 mg/cm², 高于 NiCrAlY 涂层。

涂层在各个温度氧化后表面的 XRD 图谱如图 6 所示。物相中出现 γ 相的原因是 X 射线的穿透深度超过了氧化层厚度。通过物相分析可以发现, IN 718 涂层在 3 个氧化温度下的氧化物均为 Cr₂O₃, IN 718+Si 涂层在 900 °C 下的氧化物为 Cr₂O₃, IN 718+Si 涂层在

1000 °C 及以上时生成了两种氧化物,即 Cr₂O₃ 和 SiO₂。

如图 7 所示,结合 XRD 结果进行分析可以看出,在 1100 °C 的循环氧化后,IN 718 涂层氧化层主要为 Cr₂O₃,而 IN 718+Si 涂层生成双层氧化物,外层是 Cr₂O₃,内层是 SiO₂。Cr₂O₃ 和 SiO₂ 复合氧化物层能有效地提升涂层的高温抗氧化性能,并且 SiO₂ 可以增加氧化层的黏性,IN 718+Si 涂层的氧化层不易脱落^[23]。此外,氧化物内层 SiO₂ 的形成阻碍 Cr 离子的传输通道^[24],在高温氧化过程后期,进一步阻止抗氧化性能更差的 Cr₂O₃ 氧化层生成。

图 8 是使用 Jmatpro 软件计算得到的 Cr、Si 元素在各个温度的活性数据。可以看出,在 900 °C 以下 Si 元素活性极低,这可能是两种涂层在 900 °C 的氧化动力学曲线和氧化产物近乎一致的原因。同温度下 Cr 元素的活性远高于 Si 元素,Cr 原子的扩散速度比 Si 原子迅速,因此涂层表面氧化时优先生成连续的 Cr₂O₃ 氧化层。但是 SiO₂ 的标准吉布斯自由能更低^[25],并且 Si 元素的活性在 900 °C 后大幅提升,有助于 Si 原子扩散至涂层表面后在氧化层-金属界面生成稳定 SiO₂ 氧化层,所以在 1000 °C 和 1100 °C 的氧化过程中,IN 718+Si 涂层生成了双层氧化层。此外,添加 Si 之后,Cr 的活性有所提升,Si 的氧化物可以作为 Cr₂O₃ 的形核质点,这会加速生成致密的 Cr₂O₃ 层,提升抗氧化性能^[26]。

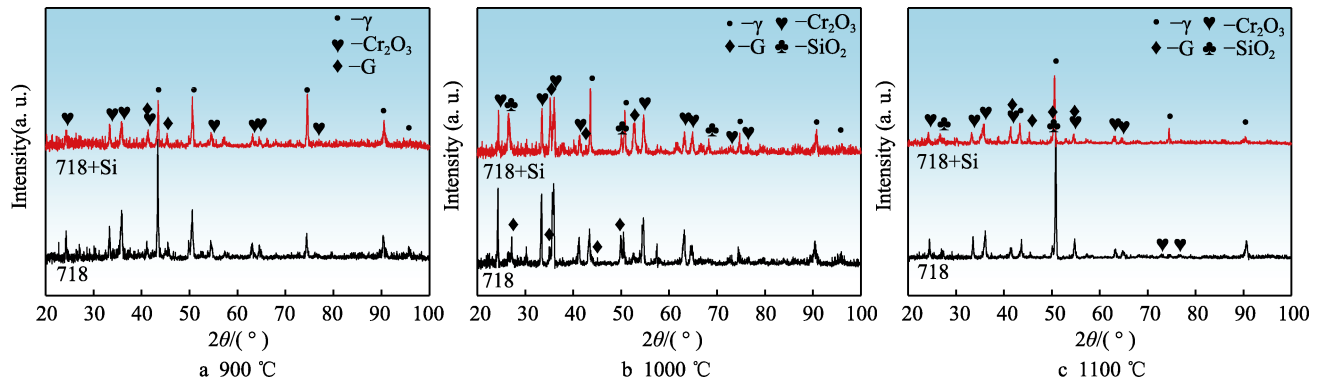


图 6 涂层氧化后表面的 XRD 图谱
Fig.6 XRD of the oxidized surface of the coating

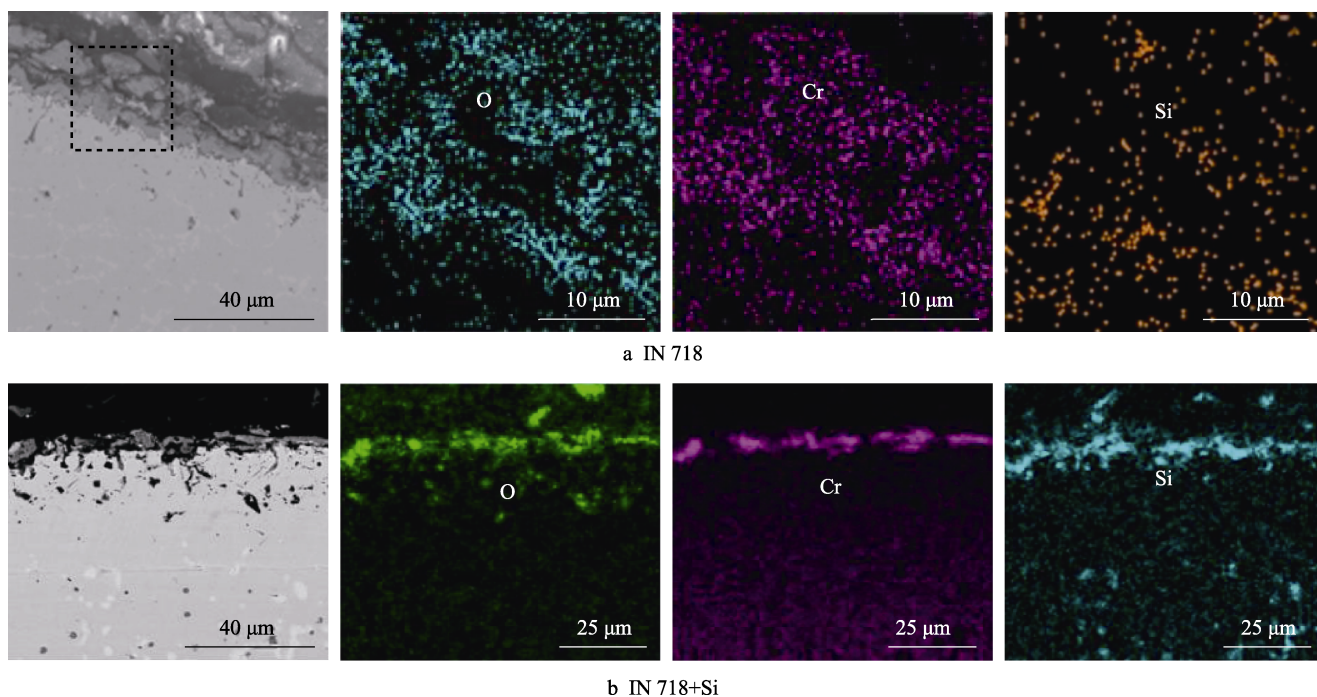


图7 1100 °C循环氧化100 h后涂层氧化层横截面的SEM和EDS成分分布图
Fig.7 SEM and EDS composition distribution of cross section of coating oxide layer after 100 hours of cyclic oxidation at 1100 °C

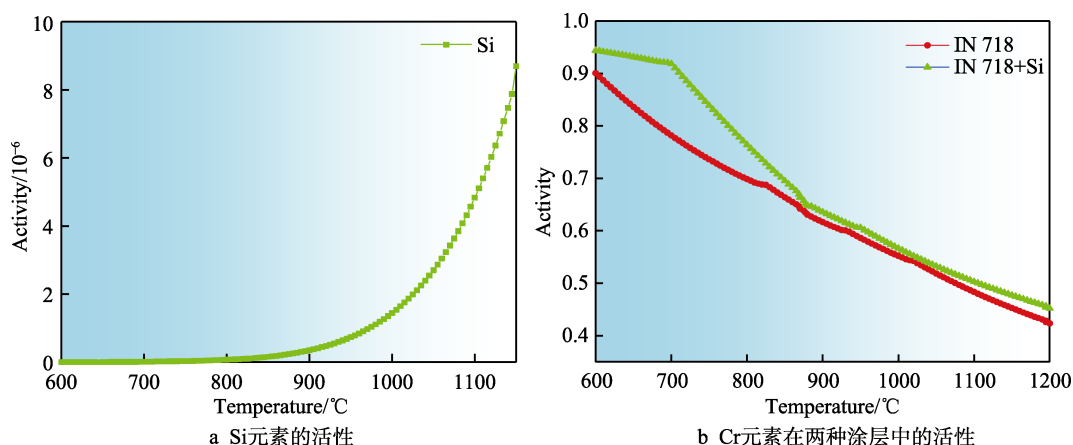


图8 不同温度下Cr元素与Si元素的活性
Fig.8 The activity of Cr and Si at various temperatures: a) activity of Si; b) activity of Cr in two coatings

3 结论

1) IN 718 涂层在添加 Si 后, 组织由细长柱状晶转变为短而粗的柱状晶, 等轴晶数量增多。涂层晶间为白色相与灰色相形成的共晶组织, 白色相根据成分推测为 G 相, Si 元素的添加, 提升了涂层的显微硬度。

2) 从氧化动力学曲线来看, 在 1000 °C 及以上时, Si 元素的引入对涂层的抗高温氧化性能有益, 在 1000 °C 和 1100 °C 的氧化中, IN 718+Si 涂层生成了双层氧化层, 氧化层外层为 Cr_2O_3 , 内层为 SiO_2 。

3) 结合热力学计算结果, Si 元素在 900 °C 以上才具有较高的活性, 这可能是两种涂层在 900 °C 氧

化动力学及氧化产物近乎一致, IN 718 + Si 涂层在 1000 °C 和 1100 °C 生成了双层氧化层的原因。

参考文献:

- [1] HOSSEINI E, POPOVICH V A. A Review of Mechanical Properties of Additively Manufactured Inconel 718[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30: 100877.
- [2] NNAJI R N, BODUDE M A, OSOBA L O, et al. Study on High-Temperature Oxidation Kinetics of Haynes 282 and Inconel 718 Nickel-Based Superalloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(3-4): 1149-1160.

- [3] KENNEDY R. Allvacr 718 Plus, Superalloy for the Next Forty Years[M]. Florida: The Minerals, Metals & Materials Society, 2005: 1-14.
- [4] THOMAS A, EL-WAHABI M, CABRERA J M, et al. High Temperature Deformation of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1-3): 469-472.
- [5] JIA Qing-bo, GU Dong-dong. Selective Laser Melting Additive Manufactured Inconel 718 Superalloy Parts: High-Temperature Oxidation Property and Its Mechanisms[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 62: 161-171.
- [6] BERTHOD P. Kinetics of High Temperature Oxidation and Chromia Volatilization for a Binary Ni-Cr Alloy[J]. Oxidation of Metals, 2005, 64(3-4): 235-252.
- [7] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- LI Tie-fan. High Temperature Oxidation and Thermal Corrosion of Metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [8] GREENE G A, FINFROCK C C. Oxidation of Inconel 718 in Air at Temperatures from 973 K to 1620 K[J]. Office of Scientific and Technical Information, 2000, 56: 442.
- [9] QIAO Zhan, LI Chong, ZHANG Hong-jun, et al. Evaluation on Elevated-Temperature Stability of Modified 718-Type Alloys with Varied Phase Configurations[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(8): 1123-1132.
- [10] FU S H, DONG J X, ZHANG M C, et al. Alloy Design and Development of Inconel 718 Type Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 499(1-2): 215-220.
- [11] COLLIER J P, WONG S H, TIEN J K, et al. The Effect of Varying Al, Ti, and Nb Content on the Phase Stability of INCONEL 718[J]. Metallurgical Transactions A, 1988, 19(7): 1657-1666.
- [12] MA Min-yu, HAN Ai-hua, ZHANG Zun-jun, et al. The Role of Si on Microstructure and High-Temperature Oxidation of $\text{CoCr}_2\text{FeNb}_{0.5}\text{Ni}$ High-Entropy Alloy Coating[J]. Corrosion Science, 2021, 185: 109417.
- [13] ZHANG Y L, LI J, ZHANG Y Y, et al. Evolution in Microstructure and High-Temperature Oxidation Behaviors of the Laser-Cladding Coatings with the Si Addition Contents[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 827: 154131.
- [14] WANG A C, LI Y Y, FAN C G, et al. Effect of P and Si(Mn) on the Solidification Segregation in an Iron-Based Superalloy[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(12): 1695-1700.
- [15] 孙文儒, 郭守仁, 卢德忠, 等. Si对In718合金凝固过程及元素偏析的影响[J]. 航空材料学报, 1996, 16(2): 7-11.
- SUN Wen-ru, GUO Shou-ren, LU De-zhong, et al. Effect of Si on Solidification and Segregation in Inconel 718 Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1996, 16(2): 7-11.
- [16] ZHOU Yong-xin, ZHANG Jie, XING Zhi-guo, et al. Microstructure and Properties of NiCrBSi Coating by Plasma Cladding on Gray Cast Iron[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 361: 270-279.
- [17] 魏民, 万强, 李晓峰, 等. 熔覆电流对FeCoCrNiMn高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(6): 138-143.
- WEI Min, WAN Qiang, LI Xiao-feng, et al. Effect of Cladding Current on Microstructure and Properties of FeCoCrNiMn High Entropy Alloy Coatings[J]. Surface Technology, 2019, 48(6): 138-143.
- [18] 何亚楠, 宋强, 孙康, 等. 等离子熔覆NiCr-Cr₃C₂复合涂层摩擦磨损性能的研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 126-133.
- HE Ya-nan, SONG Qiang, SUN Kang, et al. Wear Resistance of Plasma Cladding Deposited Ni-Based Cr₃C₂ Composite Coating[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 126-133.
- [19] 何骏阳. 合金化对FeCoNiCr系高熵合金组织及力学性能的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- HE Jun-yang. Alloying Effects on Microstructures and Mechanical Properties of FeCoNiCr-Based High Entropy Alloys[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [20] 赵雅莹, 王少刚, 叶庆丰, 等. 高Cr含量镍基合金涂层的电弧喷涂制备及其抗氧化性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(1): 21-26.
- ZHAO Ya-xuan, WANG Shao-gang, YE Qing-feng, et al. Preparation and Oxidation Resistance of Ni-Based Alloy Coating with High Cr Content by Electric Arc Spraying[J]. Surface Technology, 2018, 47(1): 21-26.
- [21] HUANG Dong, LU Jia-shen, ZHUANG Yan-xin, et al. The Role of Nb on the High Temperature Oxidation Behavior of CoCrFeMnNb_xNi High-Entropy Alloys[J]. Corrosion Science, 2019, 158: 108088.
- [22] TOBAR M J, AMADO J M, YÁÑEZ A, et al. Laser Cladding of MCrAlY Coatings on Stainless Steel[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 276-283.
- [23] 陈国良. 高温合金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988.
- CHEN Guo-liang. Superalloys[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988.
- [24] TUNTHAWIROON P, LI Yun-ping, TANG Ning, et al. Effects of Alloyed Si on the Oxidation Behaviour of Co-29Cr-6Mo Alloy for Solid-Oxide Fuel Cell Interconnects[J]. Corrosion Science, 2015, 95: 88-99.
- [25] 徐勋虎. Co-re-Cr-Si-Al合金高温氧化行为研究[D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2020.
- XU Xun-hu. Study on High Temperature Oxidation Behavior of Co-Re-Cr-Si-Al Alloys[D]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Normal University, 2020.
- [26] ESLEBEN K, GORR B, CHRIST H J, et al. The Effect of Ni and Si Additions on the Oxidation Behaviour of Co-17Re-18Cr Alloys[J]. Corrosion Science, 2019, 159: 108135.