

高能高速等离子喷涂 NiCoCrAlY 涂层抗燃气热腐蚀性能

吕艳红, 张启富, 吴子健

(中国钢研科技集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 目的 研究 NiCoCrAlY 涂层抗高温燃气热腐蚀性能。方法 采用高能高速等离子喷涂工艺在 Ni₃Al 基高温合金 IC6 基体表面制备 NiCoCrAlY 涂层, 测试了涂层与基体间的结合强度以及涂层和 IC6 基体在 900 °C 高温环境下的抗燃气热腐蚀动力学曲线。并借助扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪分析燃气热腐蚀试验前后涂层的显微组织和物相结构组成。结果 高能高速等离子喷涂工艺制备的 NiCoCrAlY 涂层致密性高, 孔隙率 $\leq 3\%$; 涂层与基体结合状态好, 平均结合强度达到 62 MPa; 涂层中氧化物和夹杂含量少。经 100 h 燃气热腐蚀后, 基体和涂层的腐蚀速率分别为 8.09 g/(m²·h) 和 0.50 g/(m²·h)。结论 NiCoCrAlY 涂层显著提高了 IC6 合金的抗燃气热腐蚀性能。涂层表面生成了以 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 为主要成分的完整致密的氧化膜, Al₂O₃ 抗氧化性能好, Cr₂O₃ 抗腐蚀性能好, 在两者共同作用下, 腐蚀气氛向涂层内部的侵蚀被有效地阻挡或延缓; 同时涂层内孔隙、氧化物夹杂等缺陷含量少, 腐蚀气氛的扩散通道被阻隔或延长, 降低了腐蚀速率, 使得涂层对基体合金起到了很好的保护作用。

关键词: 高能高速等离子喷涂; NiCoCrAlY 涂层; IC6 高温合金; 结合强度; 抗燃气热腐蚀; 热腐蚀速率

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)09-0126-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.020

High-temperature Gas Corrosion Resistance of NiCoCrAlY Coating Prepared by High-energy and High-speed Plasma-spraying

LYU Yan-hong, ZHANG Qi-fu, WU Zi-jian

(China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the high temperature gas corrosion resistance of NiCoCrAlY coating. **Methods** The NiCoCrAlY coating was prepared by high-energy and high-speed plasma-spraying technology on Ni₃Al based alloy IC6. The adhesion strength and gas hot-corrosion kinetic curve of IC6 and coating at 900 °C were tested. The microstructure and phase composition of the coating before and after corrosion test were also analyzed by means of SEM and XRD. **Results** The NiCoCrAlY coating which was prepared by high-energy and high-speed plasma-spraying had high density with the porosity no more than 3%. The combination between coating and substrate was in good condition, of which the average adhesion strength reached 62 MPa, and the content of oxide and inclusion in the coating was little. The corrosion rate of the IC6 alloy and the coating was re-

收稿日期: 2016-03-27; 修订日期: 2016-05-17

Received: 2016-03-27; Revised: 2016-05-17

作者简介: 吕艳红 (1976—), 女, 博士生, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LYU Yan-hong (1976—), Female, Doctor graduate, Research focus: surface engineering.

spectively 8.09 g/(m²·h) and 0.50 g/(m²·h) after 100 h' gas hot corrosion. **Conclusion** The gas hot-corrosion resistance of IC6 alloy has been increased significantly by applying NiCoCrAlY coating. The surface of coating has produced complete and compact oxide film, with Al₂O₃ and Cr₂O₃ as the main component. Al₂O₃ has good oxidation resistance and Cr₂O₃ has good corrosion resistance. Under the influence of both, the erosion of the corrosion atmosphere towards internal coating has been blocked and delayed. At the same time, because of the little defects such as pores and oxidation in the coating, the diffusing passageway of the corrosion atmosphere has been separated and the corrosion rate has been decreased, which has resulted in a good protection for IC6 alloy.

KEY WORDS: high-energy and high-speed plasma-spraying; NiCoCrAlY coating; IC6 high temperature alloy; adhesion strength; high temperature gas corrosion resistance; hot corrosion rate

IC6 高温合金是一种新型的金属间化合物 Ni₃Al 基铸造合金, 合金成分简单, 具有比重轻、强度高、塑性好、高温持久性能优越、工艺性能好、成本低和综合性能好等优点^[1-3], 可用于工作温度处于 950 ~ 1100 ℃ 的燃气涡轮发动机导向叶片^[4]。但 IC6 合金的抗氧化和热腐蚀性能较差^[5-6], 因此该合金用作导向叶片时必须涂覆涂层进行防护。MCrAlY (M 为 Co、Ni 或 Co+Ni) 涂层是应用较广的一类高温防护涂层, 常用于热障涂层 (TBCs) 的粘结底层。该涂层具有优异的抗高温氧化和抗热腐蚀性能, 即可显著提高热障涂层的结合强度, 又可改善基体材料的抗高温氧化、腐蚀性能^[7-9], 从而提高涂层的使用寿命。本文采用高能高速等离子喷涂工艺在 IC6 基体表面制备了 NiCoCrAlY 涂层, 测试了涂层的显微组织和结合强度, 对比研究了相同试验条件下 IC6 高温合金和 NiCoCrAlY 涂层的抗燃气热腐蚀性能。

1 试验

1.1 涂层制备

以自行研制的 NiCoCrAlY 粉末作为喷涂材料, 粉末粒径为 45 ~ 90 μm, 松装密度和流动性分别为 4.4 g/cm³ 和 15.6 s/50 g。粉末的微观形貌和化学成分分别见图 1 和表 1。

基体材料为 Ni₃Al 基高温合金 IC6, 其主要化学成分列于表 2。用丙酮清洁基体材料的待喷涂表面, 去掉油渍和其他污物, 之后采用 20#棕刚玉砂进行喷砂粗化处理, 使其表面粗糙度 *R_z* 达到 25 ~ 60。采用自行研制的 PS-100 型高能高速等离子喷涂设备制备 NiCoCrAlY 涂层, 喷涂工艺参数见表

3, 其中 Ar 和 H₂ 为工作气体, N₂ 为送粉气体。

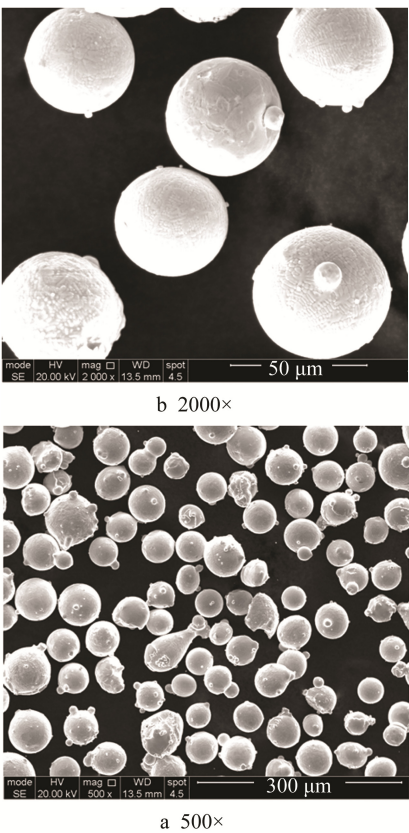


图 1 NiCoCrAlY 粉末形貌
Fig.1 Morphology of NiCoCrAlY powder

表 1 NiCoCrAlY 粉末主要化学成分
Tab.1 Chemical composition of NiCoCrAlY powder

元素	Co	Cr	Al	Y	O	Ni
质量分数/%	26 ~ 28	19 ~ 21	8 ~ 9	0.6 ~ 1	<0.02	余量

表 2 IC6 高温合金的主要化学成分^[10]
Tab.2 Chemical composition of IC6 alloy

元素	Al	Mo	Fe	B	其他杂质	Ni
质量分数/%	7.4 ~ 8	13.5 ~ 14.3	≤1.0	0.02 ~ 0.06	≤2	余量

表 3 NiCoCrAlY 涂层制备工艺参数
Tab.3 Process parameters of coating preparation

电弧 电压 /V	电弧 电流 /A	喷涂 距离 /mm	Ar 流量 /(L·min ⁻¹)	H ₂ 流量 /(L·min ⁻¹)	N ₂ 流量 /(L·min ⁻¹)	送粉量 /(g·min ⁻¹)
120	570	125	55	5	15	50

1.2 涂层性能测试及组织观察

1.2.1 涂层与基体间结合强度测试

涂层结合强度测试按照 HB 5476《热喷涂涂层结合强度试验方法》中规定的方法进行。试验中在直径为 25 mm 的试样圆端面喷涂 NiCoCrAlY 涂层, 涂层厚度为(0.3±0.05) mm。将同等规格的对偶试样圆端面喷砂粗化, 之后采用 FM-1000 型薄膜胶将对偶试样和涂层试样粘结在一起, 并放入夹具中使用限力扳手加压。将加压后的试样放入 DHG-9076A 型电热恒温鼓风干燥箱随炉升温至 270 ℃, 保温 3 h 使薄膜胶固化。

将粘结固化好的试样安装在 WA-10 型万能拉伸试验机上, 在垂直于涂层的方向上加载, 拉伸速度设定为 2 mm/min, 随着拉力逐渐增加, 最终试样被拉断(涂层剥落), 记录拉断时的极限载荷, 并计算结合强度。取 5 个试样的平均值作为最终的结合强度。

1.2.2 抗高温燃气热腐蚀性能测试

按照 HB 7740—2004《燃气热腐蚀试验方法》中的规定测试在指定温度、燃油流量、油气比及海盐含量的条件下所形成的燃气中, NiCoCrAlY 涂层试样和 IC6 光杆试样抗高温燃气腐蚀性能。在燃气热腐蚀试验装置中, 压缩空气经自动调节流量系统分成两路, 一路进主气路雾化燃油及人造海水, 然后进入燃烧区, 另一路空气直接进入燃烧区作为补充的第二次空气。燃油在加热炉的燃烧区充分燃烧后, 腐蚀性气氛进入试验区, 在恒定的温度下对试样进行试验。为保持腐蚀气氛均匀, 试样在专用夹具上旋转, 并定期出炉冷却, 进行冷热循环, 以模拟燃气涡轮中热端部件的热应力的影响。试验委托北京航空材料研究院进行测试。

试样形状为圆柱形, 规格为 $\phi 5$ mm×60 mm, 试验前将试样打磨加工至表面粗糙度 $R_a=0.8$, 带涂层试样涂层厚度为 0.1~0.12 mm, 每组平行试样 4 件。采用 RP-2 型燃油, 流量为 0.2 L/h; 人造海水

质量浓度 20×10^{-6} g/L, 流量为 0.2 L/h; 空气流量 5.8 m³/h, 油气比为 1:45。腐蚀温度设定为 900 ℃, 共进行 100 次冷热交替循环。每次循环周期内, 试样在 900 ℃燃气中保温 55 min, 出炉压缩空气冷却 5 min。每 25 个周期取出试样进行外观检查和称量。试验结束后, 采用在熔融碱中电解的方法(试样作为阴极)对试样腐蚀产物进行清除(简称碱洗), 清除掉腐蚀产物的试样在干燥皿中静置 2 h 后称量, 计算腐蚀速率。为便于分析, 每组试样留下 1 件未碱洗的样品。

试验过程中(清除腐蚀产物前), 试样单位面积质量变化 Δm 按式(1)计算。试验结束后, 腐蚀速率 v 按式(2)计算。取 4 个试样的平均值作为试验的最终结果。

$$\Delta m = (m_i - m_0) / S \quad (1)$$

式中: Δm 为单位面积质量变化 (g/m²); m_i 为各称量点试样质量 (g); m_0 为试样原始质量 (g); S 为试样原始表面积 (m²)。

$$v = (m_0 - m_1) / (S \cdot t) \quad (2)$$

式中: v 为燃气腐蚀速率 (g/(m²·h)); m_0 为试样原始质量 (g); m_1 为清除腐蚀产物后的试样质量 (g); S 为试样原始表面积 (m²); t 为试验时间 (h)。

1.2.3 显微组织和成分分析

采用 Quanta 650 型扫描电子显微镜对涂层腐蚀前后的显微组织进行观察, 借助 PANalytical X'Pert PRO 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析喷涂态涂层及热腐蚀后涂层主要相结构, 衍射测试条件为: 工作电压 35 kV、工作电流 40 mA, 扫描角度 20°~120°, 阵列探测器扫描, 步长 0.017°, 扫描步进时间 20 s; 分析时喷涂态涂层采用 Cu 靶, 腐蚀后涂层采用 Co 靶。

2 结果及分析

2.1 涂层显微组织及成分

NiCoCrAlY 涂层显微组织及 X 射线衍射分析结果分别见图 2 及图 3 所示。

可以看出, 高能高速等离子喷涂工艺制备的 NiCoCrAlY 涂层比较致密、均匀, 不存在大孔径孔隙和明显的裂纹、分层, 只弥散分布着很小的微孔。

采用金相图片对比法，即将图 2a 的金相照片与标准照片比较，可得出涂层孔隙率 $\leq 3\%$ 。涂层与基体之间结合紧密，界面处不存在污染和分离现象。涂层截面上颗粒之间搭接明显，存在少量形状不规则的半熔化或未熔化颗粒和少量氧化物，不存在其他杂质。由衍射分析结果可知，喷涂态涂层主要由 γ 相（Ni 及其固溶体）组成，未出现氧化物相，说明涂层中的氧化物含量较低。

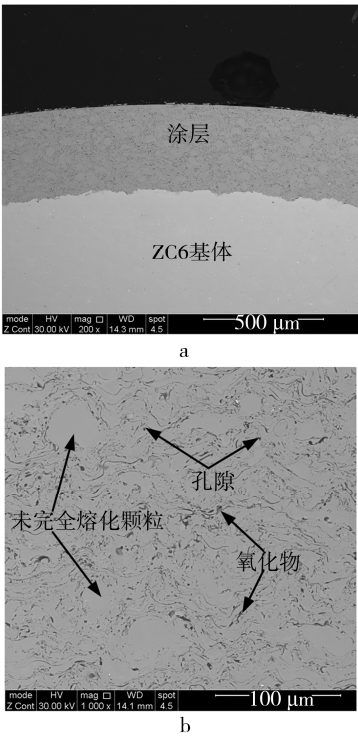


图 2 NiCoCrAlY 涂层显微组织
Fig.2 Microstructure of NiCoCrAlY coating

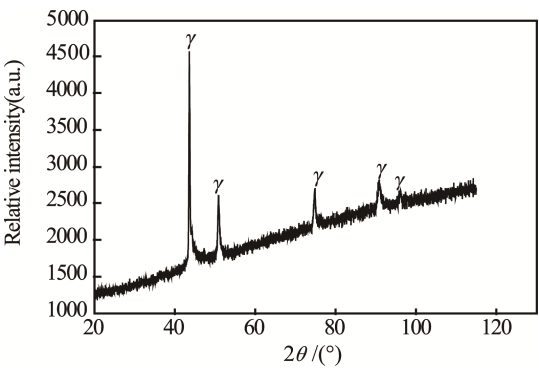


图 3 NiCoCrAlY 涂层 X 射线衍射图
Fig.3 XRD analysis of NiCoCrAlY coating

涂层是由熔滴经过撞击基体—扁平变形—冷却凝固堆积而成的层状结构，热喷涂的工艺特点决定了涂层中的孔隙及层状结构不可避免，

喷涂过程中只能通过调整工艺参数来细化涂层组织并尽可能降低孔隙率，减少缺陷。涂层的氧化主要取决于粉末粒子飞行中的氧化和涂层形成过程中的氧化^[11]，NiCoCrAlY 属于易氧化材料，在粉末加热熔化并喷射到基体的过程中，因与大气充分接触，不可避免地会引起材料氧化，导致涂层出现内氧化现象。为控制涂层内的含氧量，细化涂层组织，本文采用了高能高速等离子喷涂工艺，喷涂过程中等离子射流能量密度高，粉末熔化充分，颗粒飞行速度高，熔融粒子在射流中停留时间短，涂层沉积速度快，减少了粒子飞行中与氧的结合和涂层沉积过程中的氧化。同时，在喷涂工作气体中加入少量的 H_2 作为辅气，使得喷涂焰流为弱还原焰，降低粉末与大气的接触面积，这些措施都能有效降低喷涂态涂层的氧化趋势。由于喷涂过程中粒子的运动速度较高，粒子在撞击至基体时动能转变为热能产生塑性流动而铺展开^[12]，因此涂层与基体结合紧密。粒子在凝固过程中后续液相能及时补充因凝固而产生的收缩，涂层截面上基本能够形成完全充填重叠^[13]，因此涂层内孔隙含量低，分层不明显。

2.2 涂层与基体间结合强度

涂层结合强度测试结果见表 4，图 4 为试验前后试样的宏观表面状态。可知涂层的平均结合强度达 62 MPa，且断裂方式为涂层全部或部分从基体上断裂，均属于有效断裂。涂层与基体的结合强度主要取决于喷涂前基体表面的粗糙度、基体与喷射粒子之间的接触温度、粒子的熔融状态以及在喷射过程中施加于粒子的冲击力^[14]。基体表面粗糙度和喷涂过程中基体的温度控制在一定范围内即可满足喷涂工艺需求，因此喷涂粒子的熔融状态及冲击速度是影响涂层结合强度的关键因素。高能高速等离子喷涂射流能量高，速度快，粒子熔化充分，飞行速度快，到达基体时能以足够的速度冲击界面，从而形成致密且结合强度高的涂层。

表 4 NiCoCrAlY 涂层与基体结合强度						
Tab.4 Adhesion strength between NiCoCrAlY coating and substrate						MPa
试样编号	1	2	3	4	5	平均值
结合强度	62.5	60.6	63.1	59.8	63.2	62

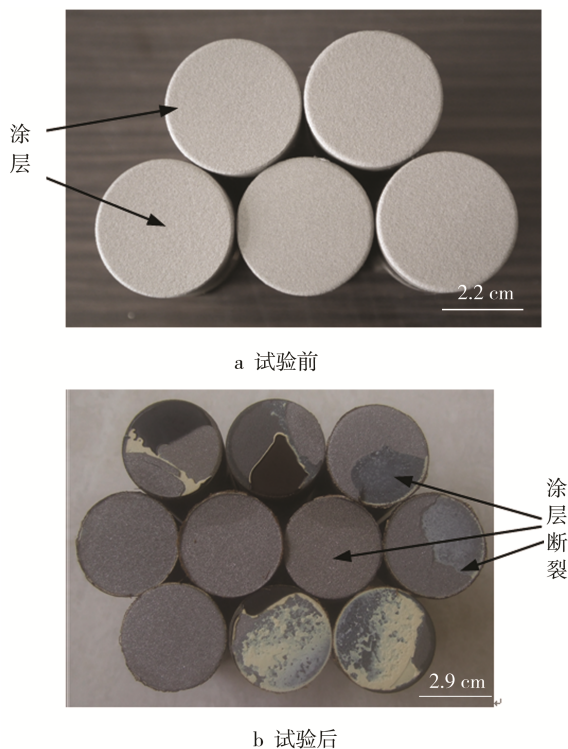


图4 NiCoCrAlY 涂层结合强度试样

Fig.4 Sample of NiCoCrAlY coating before and after test: a) before test, b) after test

2.3 抗燃气热腐蚀性能

IC6 合金和涂层的抗高温燃气腐蚀试验结果和腐蚀动力学曲线分别见表 5 和图 5。图 6 为试验前后试样的表面状态, 其中图 6a 为试验前的表面状态, 图 6b—f 分别表示腐蚀 25、50、75、100 h 以及碱洗后的表面状态, 图 6f 中 12 和 16 所对应的试样未进行碱洗。图 7 为腐蚀后涂层的截面显微组织和 X 射线衍射分析图谱。

表 5 IC6 合金和 NiCoCrAlY 涂层抗燃气热腐蚀测试结果
Tab.5 Results for high temperature gas corrosion resistance of NiCoCrAlY coating and IC6 alloy

实验时间/h	平均腐蚀增量/(g·m ⁻²)	
	IC6 合金	IC6 基体+NiCoCrAlY 涂层
0	0	0
25	-54.26	1.89
50	-128.93	-3.06
75	-464.90	-19.21
100	-600.46	-31.17

由试验结果可知, NiCoCrAlY 涂层的抗燃气热腐蚀性能显著优于 IC6 合金。在腐蚀试验过程中, IC6 合金在试验的不同阶段均呈现腐蚀质量损失状

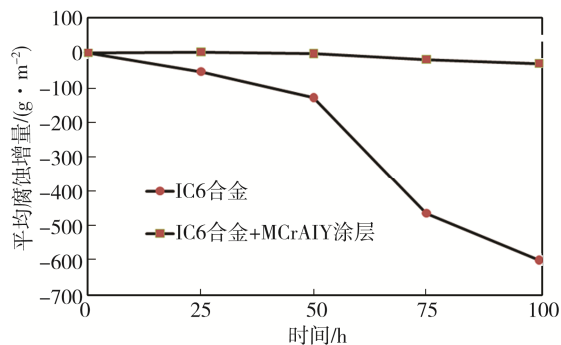


图5 IC6 合金和 NiCoCrAlY 涂层的燃气热腐蚀动力学曲线
Fig.5 Curve of high temperature gas corrosion of NiCoCrAlY coating and IC6 alloy

态, 其中前 25 h 质量损失较小, 但随着腐蚀时间的延长, 合金表现出剧烈的腐蚀质量损失现象, 表面发生了破坏性腐蚀, 生成的腐蚀产物呈碎片状脱落, 腐蚀动力学曲线下降明显。NiCoCrAlY 涂层经 25 h 腐蚀后, 涂层表面由金属光泽色转变为暗灰色, 100 h 后, 涂层表面仍保持暗灰色, 且未发现涂层脱落现象。涂层在 100 h 的试验周期内腐蚀增量较小, 腐蚀动力学曲线比较平稳, 腐蚀增量变化不明显, 50 h 后出现质量损失主要原因在于试样端面无涂层保护, 涂层的腐蚀增重小于端面 IC6 合金的腐蚀质量损失, 导致涂层试样表现为质量损失现象。碱洗清除表面腐蚀产物后, IC6 合金碱洗后的平均质量损失和平均腐蚀速度分别为 -808.64 g/m^2 和 $-49.86 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$, NiCoCrAlY 涂层碱洗后的平均质量损失和平均腐蚀速度分别为 -8.09 g/m^2 和 $0.50 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$, 前者的质量损失和腐蚀速率是后者的 15 倍以上, 可见 NiCoCrAlY 涂层具有较好的抗高温燃气腐蚀性能, 对 IC6 基体起到了很好的保护作用。

燃气热腐蚀过程中, 由于燃油中含有的 S 元素在高温环境下被氧化, 与燃气中的 NaCl 发生反应生成 Na_2SO_4 , 该反应将会在试样表面沉积一层 Na_2SO_4 熔盐膜^[15]。如果表面生成的氧化膜能够有效阻止 Na_2SO_4 渗透, 则试样处于低速腐蚀阶段, 氧化膜具有一定的保护性; 如果氧化膜被熔盐溶解并逐步脱落, 则失去保护作用, Na_2SO_4 继续向基体方向渗透而腐蚀基体, 使腐蚀动力学速度加快^[16], 因此高温燃气中 S、Cl 等元素的存在起到了加速腐蚀的作用。对于 IC6 合金而言, 在腐蚀初始阶段, 合金中的 Ni、Al 等元素与氧发生化学反应, 形成 NiO、 NiAl_2O_4 、 Al_2O_3 等氧化物。NiO 和 NiAl_2O_4

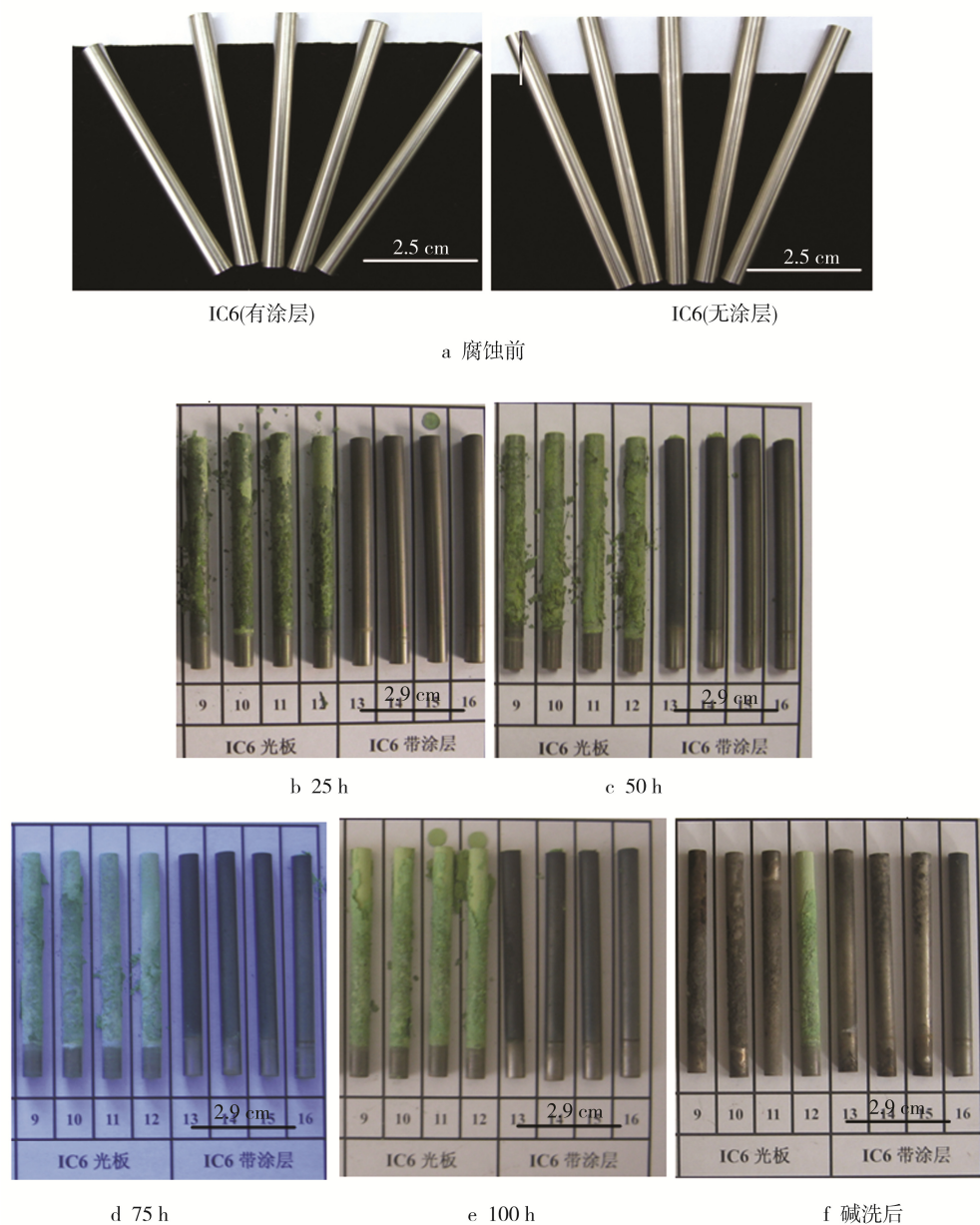


图 6 腐蚀试验前后试样表面状态
Fig.6 Surface of samples before and after test

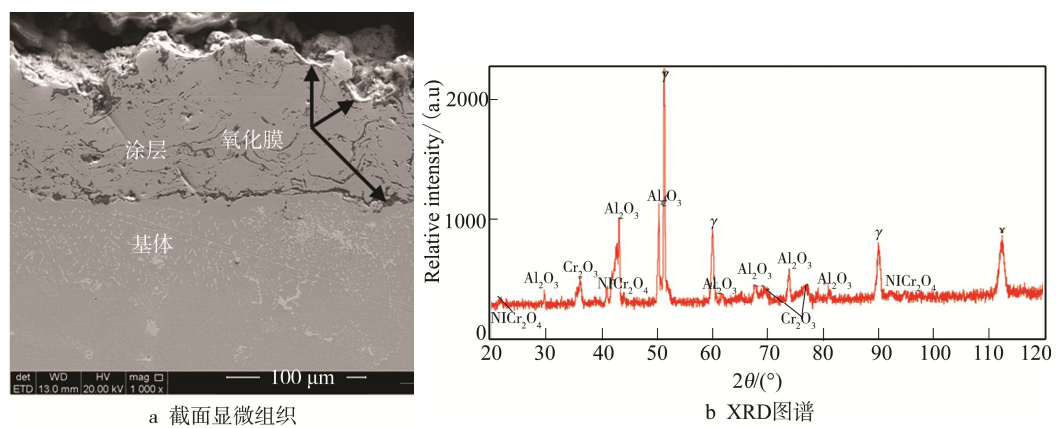


图 7 腐蚀试验后涂层的截面显微组织和 XRD 图谱
Fig.7 Morphology and XRD analysis of the NiCoCrAlY coating after test

与基体的粘附性差,易于剥落,破坏了与基体结合牢固的 Al_2O_3 膜的连续致密性,氧及 Na_2SO_4 从剥落处继续向内渗透腐蚀合金。随着时间的延长,氧与合金中的 Mo 也发生反应,生成挥发性较强的 MoO_3 以及粘附性较差的 NiMoO_4 ^[5],由于 NiO 、 NiAl_2O_4 、 NiMoO_4 等氧化物的剥落和 MoO_3 的逸出,致使 IC6 合金在 100 h 的腐蚀试验过程中表现出剧烈的腐蚀质量损失现象。 NiCoCrAlY 涂层的耐腐蚀性能依赖于涂层中的 Al、Cr 等元素在其表面形成的 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 保护膜。由图 7 可知,涂层表面基本形成了致密连续的氧化膜,该氧化膜以 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 为主,含有少量的 NiCr_2O_4 尖晶石相,氧化膜与基体的粘附性非常好,未发现破裂剥落。 Al_2O_3 膜主要起到抗氧化作用,而 Cr_2O_3 膜则主要为抗热腐蚀作用。研究认为,Cr 是非常重要的抗腐蚀元素,当涂层中的 Cr 含量大于 15% 时,随 Cr 含量的增加涂层抗热腐蚀性能提高^[17]。与 Al_2O_3 膜相比, Cr_2O_3 在熔融的 Na_2SO_4 中稳定性更好,能有效地阻挡 Na_2SO_4 与涂层内部元素的接触^[18],使整个试验过程均处于低速腐蚀阶段,未出现氧化膜在熔盐中的溶解现象。随着腐蚀时间的延长,少量的腐蚀气氛穿透氧化膜渗透到涂层内的缺陷(孔隙、氧化物夹杂)和涂层与基体界面处,在该处形成了少量腐蚀产物,但由于涂层中此类缺陷较少,腐蚀气氛的扩散通道被有效阻隔和延长,因此直至试验结束,涂层未发生严重腐蚀。

3 结论

1) 采用高能高速等离子喷涂工艺制备的 NiCoCrAlY 涂层组织致密,孔隙率 $\leq 3\%$,涂层与基体结合紧密,平均结合强度达到 62 MPa,孔隙、裂纹及氧化物夹杂含量少。

2) NiCoCrAlY 涂层具有较好的抗燃气热腐蚀性能。在 900 °C 燃气中经过 100 h 的循环腐蚀后,IC6 合金的腐蚀质量损失和平均腐蚀速率分别为 808.64 g/m² 和 8.09 g/(m²·h),涂层的腐蚀质量损失和平均腐蚀速率分别为 49.8639 g/m² 和 0.50 g/(m²·h),前者腐蚀速率是后者的 15 倍以上。

3) 在腐蚀试验过程中, NiCoCrAlY 涂层表面生成了致密连续的以 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 为主要成分的氧化膜,有效阻止了腐蚀气氛与涂层内合金元素的

反应。同时,由于涂层内缺陷少,腐蚀气氛的扩散通道被有效阻隔和延长,从而更好地保护基体材料免受腐蚀气氛的破坏。

参考文献

- [1] 苏喜孔,李树索,韩雅芳. Ni_3Al 基合金 IC6 的防护涂层研究[J].航空材料学报,2004,24(3): 5—9.
SU Xi-kong, LI Shu-suo, HAN Ya-fang, et al. Study on Overlay Coating of Ni_3Al Based Alloy IC6 [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2004, 24(3): 5-9.
- [2] 李树索,周春根,宫声凯,等.喷丸处理对 IC6 合金制导向叶片 NiCoCrAlY 涂层使用性能的影响[J].北京航空航天大学学报,2004,3(10): 989—992.
LI Shu-suo, ZHOU Chun-gen, GONG Shen-kai, et al. Effect of Ball Blasting on the Service Properties of NiCoCrAlY Coating of the Alloy IC6 Vane[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 3(10): 989—992.
- [3] JIANG Li-wu, LI Shu-suo, WU Mei-ling, et al. Effect of Dendrite Arm Spacing and the γ -phase Size on Stress Rupture Properties of Ni_3Al -base Single Crystal superalloy IC6SX[J]. Technological Sciences, 2010, 53(6): 1460—1465.
- [4] 王玉叶,李树索,于静静,等. Ni_3Al 基合金 IC6 与变形合金 GH3030 间真空钎焊接头的组织与力学性能[J].中国有色金属学报,2011,21(8): 1887-1892.
WANG Yu-ye, LI Shu-suo, YU Jing-jing, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Vacuum Brazing Joint Between Ni_3Al -based Alloy IC6 Wrought Superalloys GH3030[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(8): 1887—1892.
- [5] 李树索,韩雅芳,肖程波,等. Ni_3Al 基合金 IC6 及 MCoCrAlY 包覆涂层的抗腐蚀性能[J].中国有色金属学报,2003,13(6): 1451—1455.
LI Shu-suo, HAN Ya-fang, XIAO Cheng-bo, et al. Corrosion Resistances of Ni_3Al Based Alloy IC6 and MCoCrAlY Overlay Coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(6): 1451—1455.
- [6] 刘旭,宋尽霞,李树索,等. $\text{NiCoCrAlY}(\text{Si})$ 梯度涂层对 Ni_3Al 基单晶合金 IC6SX 抗氧化性能的影响[J].材料工程,2008(5): 52-56.
LIU Xu, SONG Jin-xia, LI Shu-suo, et al. Effect of $\text{NiCoCrAlY}(\text{Si})$ Gradient Coatings on Oxidation Resistances of Ni_3Al Based Single Crystal Alloy IC6SX[J]. Material Engineering, 2008(5): 52—56.
- [7] 樊自拴,柯婷婷. MCoCrAlY 涂层及热障涂层的研究进展[J].材料保护,2013,46(7): 49—52.
FAN Zi-shuan, KE Ting-ting. Research Progress of MCoCrAlY Coatings and Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of Materials Protection, 2013, 46(7): 49—52.
- [8] 唐健江,白宇,张平,等.热障涂层体系中 MCoCrAlY 合金粘结层结构设计及高温氧化行为研究[J].热喷涂技术,

- 2015, 7(2): 22—33.
- TANG Jian-jiang, BAI Yu, ZHANG Ping, et al. Structural Design and High Temperature Oxidation Behavior of MCrAlY Bond Coating in the Thermal Barrier Coating System[J]. Thermal Spray Technology, 2015, 7(2): 22—33.
- [9] LIANG J J, WEI H, ZHU Y L, et al. Influence of Re on the Properties of a NiCoCrAlY Coating Alloy[J]. J Mater Sci Technol, 2011, 27(5): 408—414.
- [10] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册, 第2卷 变形高温合金 铸造高温合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 829.
- The Editorial Board of China Aeronautical Materials Hand Book. China Aeronautical Materials Hand Book, The Second Volume Wrought Superalloys and Cast Superalloys[M]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 829.
- [11] 陈雄伟, 毕刚, 唐慧. HVOF 喷涂制备 MCrAlY 涂层不同处理后的组织性能分析[J]. 热加工工艺, 2011, 40(2): 134—136.
- CHEN Xiong-wei, BI Gang, TANG Hui. Analysis on Microstructure and Properties of MCrAlY Coating by HVOF Sprayed after Different Treatment[J]. Hot Working Technology, 2011, 40, (2): 134-136.
- [12] 邓春明, 邓畅光, 况敏, 等. 低压等离子和超音速火焰喷涂 NiCoCrAlYTa 层的结构和性能[J]. 材料保护, 2011, 44(1): 52—54.
- DENG Chun-ming, DNEG Chang-guang, KUANG Min, et al. Microstructure and Properties of NiCoCrAlYTa Coatings Prepared by Low Pressure Plasma and Supersonic Flame Spraying[J]. Journal of Materials Protection, 2011, 44(1): 52—54.
- [13] 黎樵桑, 朱又春. 金属表面热喷涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 26—31.
- LI Qiao-shen, ZHU You-chun. Thermal Spraying on Metal Surface[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 26—31.
- [14] 吴子健, 吴朝军, 曾克里, 等. 热喷涂技术与应用[M]. 机械工业出版社, 2005: 67.
- WU Zi-jian, WU Chao-jun, ZENG Ke-li, et al. Thermal Spray Technology and Application[J]. China Machine Press 2005: 67.
- [15] 赵德孜. 海洋环境下燃气轮机涡轮叶片的热腐蚀与防护[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 100—103.
- ZHAO De-zi. Hot Corrosion and Protection of Gas Turbine Blade in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 100—103.
- [16] 田宗军, 高雪松, 黄因慧, 等. TiAl 合金表面等离子喷涂 MCrAlY 涂层热腐蚀行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(8): 1439—1442.
- TIAN Zong-jun, GAO Xue-song, HUANG Yin-hui, et al. Study on Hot Corrosion Behavior of Plasma-Sprayed MCrAlY Coating on TiAl Alloy Surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(8): 1439—1442.
- [17] 刘建明, 陈美英, 任先京, 等. 合金元素在 MCrAlY 涂层中的作用[J]. 热喷涂技术, 2010, 2(4): 30—34.
- LIU Jian-ming, CHEN Mei-ying, REN Xian-jing, et al. The Effects of Alloy Elements on the MCrAlY Coatings[J]. Thermal Spray Technology, 2010, 2(4): 30—34.
- [18] 陈林聪, 张弛, 杨志刚. 铼对 CoNiCrAlY 涂层合金抗热腐蚀性能的影响[J]. 2010, 39(2): 243—248.
- CHEN Lin-cong, ZHANG Chi, YANG Zhi-gang. Influence of Rhenium on Hot Corrosion Resistance of CoCrAlY Coatings Alloys[J] 2010, 39(2): 243—248.