

# 电弧离子镀 HY11 涂层的 1200 °C 高温氧化行为研究

蔡妍, 李建平, 牟仁德, 何利民

(中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** **目的** 研究真空电弧镀方法制备的超高温金属涂层 HY11 在 1200 °C 下的高温氧化行为。**方法** 用真空电弧镀技术 (AIP) 在单晶镍基高温合金 DD6 上制备超高温金属涂层 HY11, 采用 HB 5258 循环氧化方法进行 1200 °C 循环氧化试验, 通过试验过程中试样质量变化评价涂层氧化寿命。通过扫描电镜 (SEM) 分析氧化后的试样显微形貌, 用 X-射线衍射仪分析涂层材料的相结构, 通过氧化速率对涂层材料抗氧化性能进行表征。**结果** 采用单靶真空电弧镀技术制备的 HY11 涂层, 经过 1050 °C 真空条件下扩散 2 h, 涂层厚度为 50~60 μm, 扩散区厚度为 10~15 μm, 涂层微观组织均匀致密, 涂层合金界面清晰平整。DD6 合金的 1200 °C 循环氧化寿命仅仅为 4 h, HY11 涂层在 1200 °C 的循环氧化寿命近 300 h。沉积态涂层 HY11 相结构主要以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ni<sub>3</sub>Al 为主。氧化后涂层材料表面形成的氧化膜以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主。**结论** HY11 涂层在 1200 °C 的循环氧化寿命为 298 h, 极大地提高了 DD6 合金在 1200 °C 的循环氧化寿命。

**关键词:** HY11 涂层; DD6 合金; 电弧离子镀; 循环氧化;

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2019.01.007

**中图分类号:** TG174.4      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2019)01-0035-06

## Oxidation Behaviour of HY11 Coating Deposited by AIP at 1200 °C

CAI Yan, LI Jian-ping, MU Ren-de, HE Li-min

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT: Objective** To observe the high temperature oxidation behaviors of superhigh temperature metal coating Y11 made through vacuum arc ion plating at 1200 °C. **Methods** HY11 coating was deposited by AIP on single crystal nickel-base superalloy DD6. The cyclic oxidation test was carried out at 1200 °C through HB5258 cyclic oxidation. The oxidation life of the coating was assessed through mass change during test. The microstructure of the sample after oxidation was analyzed with SEM. The phase structure of the coating was analyzed with X-RAY diffractometer. The oxidation resistance of the coating was characterized by scanning electron microscopy and X-ray diffraction. **Results** For HY11 coating made of single target ARC ion plating after two hours of diffusion in vacuum at 1050 °C, the thickness of coating was 50~60 μm, the thickness of diffusion zone was 10~15 μm. Microstructure of the coating was uniform and dense. The alloy interface of the coating was clear and flat. The cyclic oxidation life of DD6 alloy at 1200 °C was only 4 h and that of HY11 coating was nearly 300 h. The as-deposited coating was mainly composed of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ni<sub>3</sub>Al. The coatings material was composed of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> after oxidation in air at 1200 °C. **Conclusion** The cyclic oxidation life of HY11 coatings is 298 h at 1200 °C. The cyclic oxidation life of DD6 alloy at 1200 °C is improved significantly.

**KEY WORDS:** HY11 coating; DD6 alloy; ARC ion plating; cyclic oxidation

随着航空燃气轮机向高推重比、高进口温度的方向发展,燃烧室的燃气温度和压力不断提高,为适应这一恶劣的工作环境,热障涂层得到了发展,其作用为降低热端部件的工作温度,防止部件的高温氧化和腐蚀。热障涂层是由隔热的陶瓷面层和抗高温氧化的金属粘结层组成的涂层系统<sup>[1]</sup>。金属粘结层在高温氧化腐蚀环境中表面会迅速形成一层具有生长速率低、粘附性好、连续致密的 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜,从而起到保护高温合金基体的作用<sup>[2]</sup>。MCrAlX系列包覆型涂层(M=Ni、Co或它们的组合,X=Y、Si或者Y+Si),是目前应用最为广泛的金属粘结层之一,广泛应用于航空发动机涡轮叶片表面防护涂层<sup>[3-6]</sup>。MCrAlX涂层的特点是成分和厚度可按要求控制,满足不同使用工况条件的要求。另外,MCrAlX涂层具有良好的抗高温氧化、抗热腐蚀性能,且涂层韧性好、强度高、对基体合金的机械性能影响较小,并且与合金基体具有良好的结合强度,可以作为高温防护涂层单独使用,又可以用作热障涂层的金属粘结层<sup>[7-9]</sup>。然而,MCrAlX系列包覆型涂层常规使用温度低于1423 K,当使用温度超过1150℃时,涂层加速氧化,导致氧化膜过厚,产生裂纹和开裂,引起涂层失效,合金氧化失效。抗1200℃氧化腐蚀的金属防护涂层是目前国际研究热点。新一代先进高温耐蚀防护涂层需在1200℃以上温度抗高温氧化腐蚀,且与高温合金保持低扩散特性。国内外主要采用NiAl涂层作为单晶合金的抗氧化涂层,在NiAl中加入Ru、Pt、Pd、Rh、Hf、Zr、Y等活性元素,大幅度提高氧化膜的结合力,提高NiAl的抗氧化性能,以满足1200℃高温需求<sup>[8-12]</sup>。但NiAl涂层与单晶合金匹配性差,涂层结合力不足。文中采用电弧离子镀工艺制备的MCrAlX涂层具有厚度、元素和相组成可精密控制的优点及准确的重复性<sup>[7-9]</sup>,在此基础上制备添加Ru元素的HY11涂层,涂层与合金具有良好的化学兼容性,能够满足单晶合金1200℃抗氧化、耐腐蚀需求。

采用精密铸造成形浇铸成HY11靶材<sup>[2]</sup>,采用真空电弧镀技术在单晶合金上制备HY11涂层。用循环氧化实验方法测试了涂层在1200℃下的高温氧化行为,研究涂层的显微结构,了解Ru对HY11涂层的氧化膜增长和氧化膜与涂层结合力的影响作用。

## 1 试验

### 1.1 材料

采用DD6单晶镍基高温合金作为基体材料,将DD6合金线切割成两端为圆弧的试片,两端圆弧为

R5,在试样一端加工直径为2 mm的小孔,用于涂层制备时悬挂于卡具上。试片尺寸为30 mm×10 mm×1.5 mm。合金试样线切割后抛光,保证粗糙度Ra为0.63~1.25 μm。

### 1.2 涂层制备

涂层制备前,按照GB 11373—1989《热喷涂金属件表面预处理通则》对试样进行表面处理及活化。采用磨流处理的方法对试样表面进行活化,将粒度为0.154 mm的刚玉砂加入液体吹砂机中,工作压力0.2~0.5 MPa,处理时间为10 min。将活化后的试片放在0.3%~0.5%水基清洗剂溶液中超声波清洗20~30 min,在流动水中漂洗不少于3 min,再依次在去离子水、一道无水乙醇、二道无水乙醇中漂洗,每道漂洗不得少于3 min。

采用真空电弧镀设备在合金试样上涂覆50~60 μm的HY11(NiCoCrAlYHfRu)涂层,涂层制备时电弧电流为550~750 A,真空度为 $6 \times 10^{-3}$ ~ $7 \times 10^{-3}$  Pa。靶材采用NiCoCrAlYHf和HY11配合安装。每个沉积行程首先沉积NiCoCrAlYHf涂层,再沉积HY11涂层,最后沉积HY5涂层,每层涂层厚度为0.2~0.3 μm。对沉积涂层的试样进行扩散处理,真空度为 $1 \times 10^{-2}$ ~ $1 \times 10^{-3}$  Pa,温度为(1050±10)℃,时间为2 h。

### 1.3 循环氧化实验

采用循环氧化设备,按HB 5258《钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法》中抗氧化试验条件和试验方法进行1200℃循环氧化试验。试验条件为按规定的时间保温60 min,室温冷却5 min为一个周期,按规定的试验周期数(如1、4、7、10、20、50、100 h等)称量试样,试验过程中氧化皮任其自然脱落。当试样平均质量变化 $\leq 0$ 时,视其寿命终止,停止试验。按照式(1)计算试验过程中试样质量变化:

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

式中: $\Delta m$ 为单位面积质量变化,g/m<sup>2</sup>;  $m_i$ 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,m<sup>2</sup>。

### 1.4 涂层组织观察

采用数码照相机拍摄试样的表面状态进行外观对比分析<sup>[9]</sup>。采用电子分析天平(精度为0.1 mg)BS110S称量计算氧化过程中试样的质量变化,从而计算氧化速率<sup>[9]</sup>。采用扫描电子显微镜(SEM, FEI-Quanta 600)分别观察合金、涂层的表面及横截面显微形貌,同时借助能谱仪(EDS, Oxford IN-CAX-sight 6427)检测相关区域的涂层成分<sup>[11]</sup>。

## 2 结果和讨论

### 2.1 涂层沉积态显微结构

图 1 为 DD6 合金沉积 HY11 涂层的沉积态截面显微组织。原始的 NiCoCrAlYHf 涂层及 HY11 涂层已经无法看见, 在涂层的制备过程中, 真空室的高温已经使得 NiCoCrAlYHf 涂层与合金基体以及 HY11 涂层发生元素互扩散。在每个行程中沉积的 NiCoCrAlYHf 涂层和 HY11 涂层之间没有明显的界限, 这是因为这两种涂层本身的元素含量很接近, 线膨胀系数在同一个数量级上, 两者发生了互溶。涂层制备后, 经过 1050 °C 的真空扩散, 进一步促进了 NiCoCrAlYHf 涂层及 HY11 涂层混成一体, 彻底形成 HY11 涂层。如图 2 所示, 采用真空电弧镀膜技术沉积的 HY11 涂层与基体合金结合良好, 界面处无孔洞等明显缺陷, 涂层与基体之间有一层扩散区<sup>[1,6]</sup>。HY11 涂层厚度为 50~60  $\mu\text{m}$ , 扩散区厚度为 10~15  $\mu\text{m}$ 。涂层与基体之间结合良好, 厚度均匀。

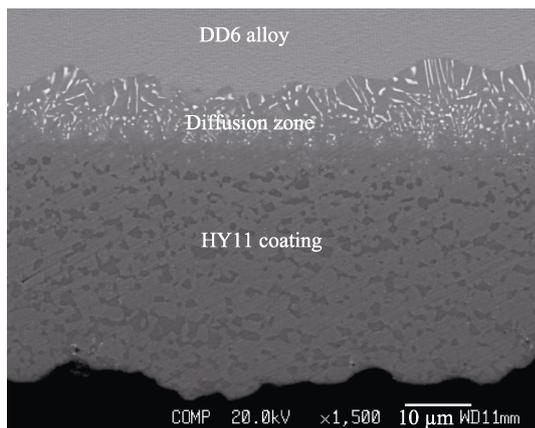


图 1 DD6+HY11 涂层沉积态的 SEM 截面

图 2 为 DD6 合金上沉积 HY11 涂层的沉积态的截面元素分布曲线, 线扫描从基体开始, 在涂层表面结束。由图 2 可见, 基体合金中的 Al 元素分布比较均匀, 其质量分数基本上在 5%~7%; Cr 元素的分布从合金基体到涂层表面呈现逐渐升高的趋势, 基体中 Cr 的质量分数为 2%~3%, 涂层中的 Cr 在 16%~23%; Ru 元素的分布从合金基体到涂层表面呈现逐渐降低的状态, 合金的 Ru 在 3%~4%, 涂层中的 Ru 在 1%~2%。对比靶材和涂层的 Ru 含量, 靶材添加的 Ru 为 0.47%, 涂层中的 Ru 基本上大于 1%, 表明真空电弧镀膜蒸发 Ru, Ru 易于沉积。初期设计涂层成分时, 估计涂层中 Ru 的质量分数在 0.5% 左右即能够起到合适的活性元素的作用。根据实际情况, 靶材添加的 Ru 元素的含量可以适当降低, 也降低了靶材成本。Ru 提高了涂层的组织稳定性, 抑制因 Re 加入形成的 TCP 相。同时可见, Hf 元素的分布从合金基体到涂

层表面呈现逐渐上升的状态。合金基体中 Hf 的质量分数在 0.1% 左右, 沉积态的涂层中 Hf 在 0.2%~0.7% 左右, 靶材中 Hf 为 0.61%, 真空电弧镀膜沉积 Hf 的含量基本上与靶材设计值等同。

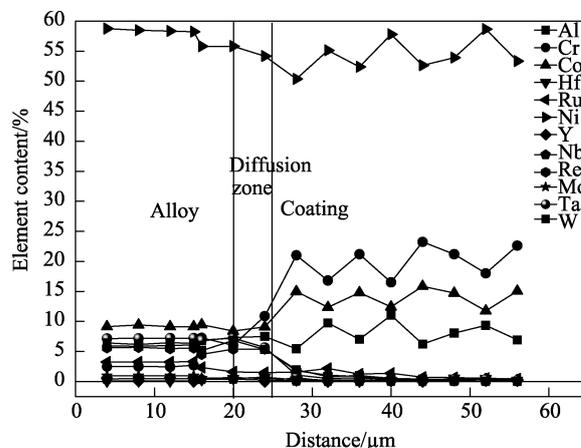


图 2 DD6 合金+HY11 涂层截面元素分布

### 2.2 氧化动力学曲线

循环氧化试验温度 1200 °C, 无涂层单晶高温合金 DD6 循环氧化实验进行 4 h, 涂覆 HY11 涂层循环氧化实验进行 298 h。为了减小试验误差, 取无涂层合金试样和有涂层试样各 5 个, 同时悬挂于井式循环氧化炉内试验, 进行对比研究。根据 HB 5258 的循环氧化试验得到的循环氧化动力学曲线如图 3 所示。从图 3a 中可见, DD6+HY11 涂层在 1200 °C 下的氧化寿命为 298 h。在 0~10 h 内, 涂层质量开始增加, 氧化 1、4、7、10 h, 其质量增量分别为 3.33、5.55、6.25、7.64  $\text{g}/\text{m}^2$ ; 在 20、40、60、80 h, 涂层氧化质量增量逐渐上升, 分别为 8.89、9.72、10.42、10.69  $\text{g}/\text{m}^2$ ; 氧化 80 h, 涂层质量增量到最大值 10.69  $\text{g}/\text{m}^2$ ; 在 80~100 h, 涂层氧化质量增量一直保持不变。总的来说, 在 0~100 h, 涂层质量增量呈现上升趋势。涂层氧化 125 h 后, 涂层质量开始减小。直至氧化 298 h, 涂层表面氧化膜增长速度小于剥落速度, 涂层质量小于涂层原始质量, 即可表明, HY11 涂层在 1200 °C 氧化寿命为 298 h。从整个氧化动力学曲线来看, 涂层试样氧化质量呈现典型的抛物线趋势, 符合高温防护涂层质量变化规律, 表明涂层具有良好的抗高温氧化性能。从图 3b 可见, 无涂层单晶高温合金循环 1 次, 质量略微增加, 循环 4 次后比原始质量还低。这是由于无涂层合金考虑综合性能, 添加较多强化元素, 合金中的 Al 和 Cr 等抗氧化元素含量不足以形成致密氧化膜, 在 1200 °C 超高温条件下形成的氧化膜很快开裂、剥落, 合金裸露, 氧化膜的剥落速度大于氧化膜形成速度, 新生成氧化膜带来的质量增量小于氧化膜剥落的质量损失, 因此 DD6 合金本身不具备 1200 °C 抗氧化能力, 需要涂覆涂层保证其抗氧化性。

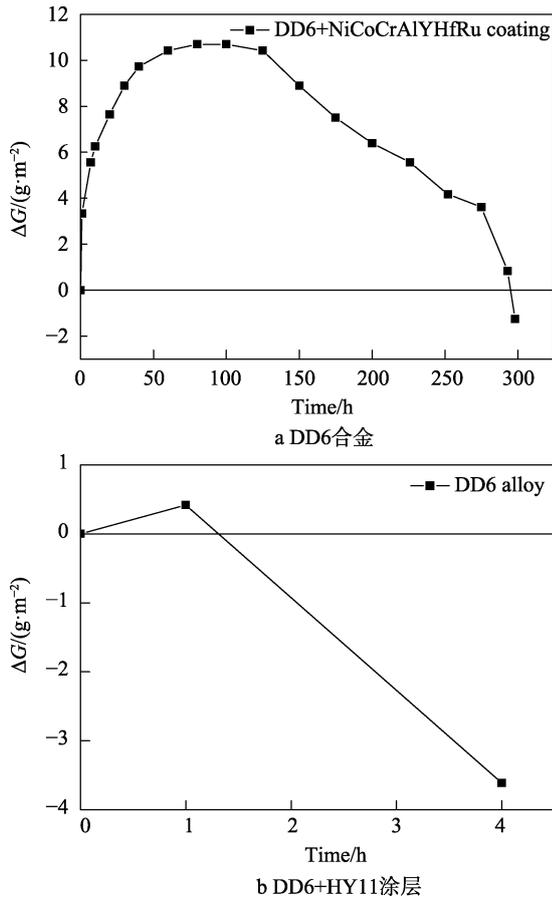


图3 1200 °C循环氧化动力学曲线

### 2.3 相结构和 SEM 表面形貌

对沉积态的 DD6+HY11 涂层进行表面相结构分析,结果如图 4 所示。可以看出, DD6+HY11 沉积态涂层主要由 NiAl 和 Ni<sub>3</sub>Al 等相组成<sup>[3,11]</sup>, 基体中的 Ni 向外扩散与涂层表面 Al 元素结合形成 NiAl 和 Ni<sub>3</sub>Al。

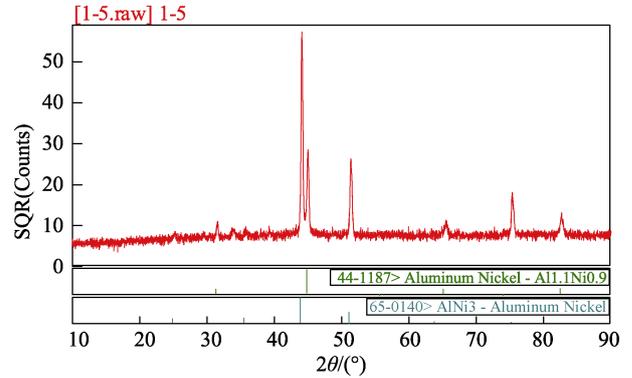


图4 DD6+HY11 涂层 X-射线衍射图

沉积态的 DD6+HY11 涂层表面形貌如图 5 所示。由图 5a 可见, 涂层表面形貌致密平整, 能够在超高温氧化、腐蚀条件下为单晶合金基体提供有效的保护, 延长基体合金材料的使用寿命。分析其能谱为(以质量分数计): Al 8.31%、Cr 13.38%、Co 9.73%、Ni 47.55%、Y 6.09%、Ru 0.51%、Hf 14.43%。涂层

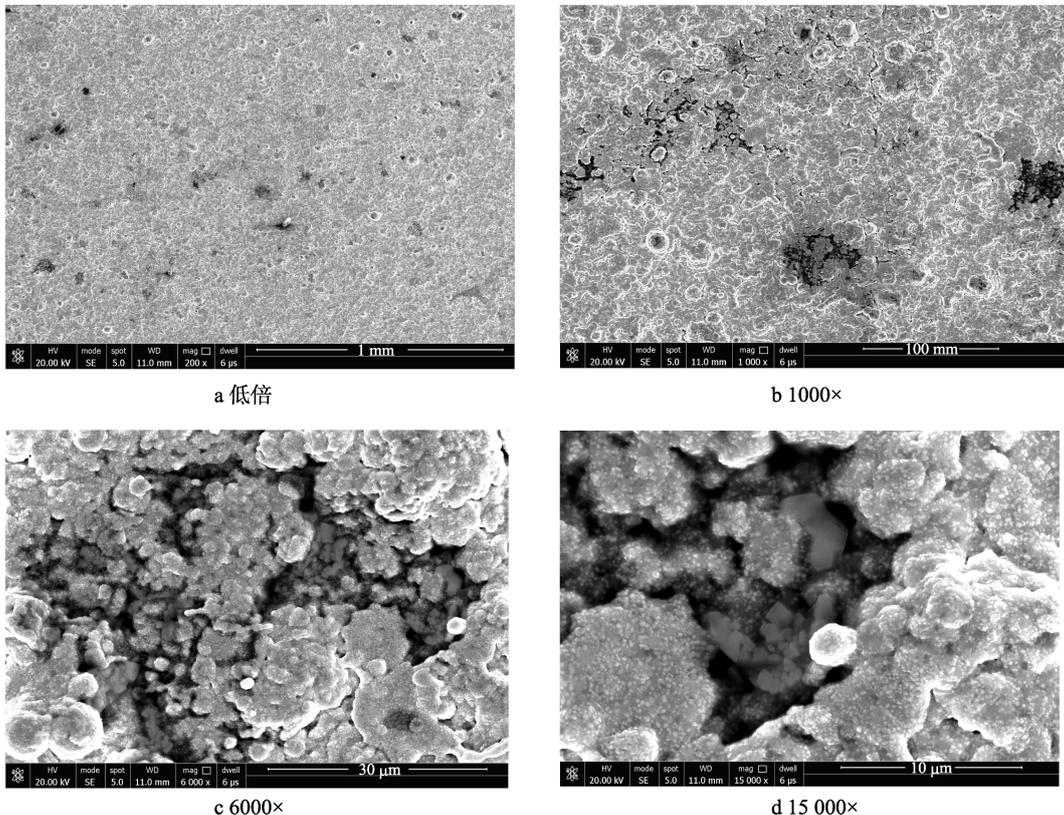


图5 DD6+HY11 涂层表面形貌

表面已经出现大量的 Hf、Y 元素，说明 Hf 和 Y 易于从涂层内部扩散到表面。Hf 和 Y 是活性元素，少量添加可以明显改善涂层表面氧化膜的附着力，并且降低氧化膜的生长速度。DD6+HY11 涂层表面形貌放大至 1000 倍，如图 5b 所示，涂层表面基本上是突起的菜花状的涂层。分析其能谱为：Al 8.24%、Cr 18.98%、Co 11.71%、Ni 54.39%、Y 1.68%、Ru 0.23%、Hf 4.77%。DD6+HY11 涂层表面形貌放大至 6000 倍和 15 000 倍，如图 5c、d 所示。涂层表面基本上是突起的菜花状的涂层，发现在涂层黑色区域内有晶粒，分析其能谱为：Al 6.35%、Cr 12.40%、Co 8.04%、Ni 41.67%、Y 1.42%、Ru 27.34%、Hf 5.48%。从能谱来看，白色的晶粒富集 Ru，这可能就是添加 Ru 能提高 NiCoCrAlYHf 涂层的高温防护性能原因所在。

## 2.4 表面形貌

HY11 涂层经 1200 °C 下氧化 300 h 后的表面形貌如图 6 所示。氧化 300 h 后，涂层表面出现严重的氧化皮剥落现象，黑色的氧化皮剥落后涂层表面露出白色的内部涂层。从图 6 可见，白色区域已经连成很大一片，大量的涂层内部裸露出来。从宏观上看，涂层试样表面分为三种状态。针对图中不同部位的显微形貌进行了 EDS 能谱分析，其中 A 区的主要元素成分为：O 35.03%、Al 29.06%、Cr 9.26%、Co 3.99%、Ni 22.67%；B 区的主要元素成分为：O 8.45%，Al 16.10%，Cr 6.10%，Co 10.48%，Ni 56.96%，Si 1.92%。从图 6 中可见，A 区表面覆盖着一层较为平整均匀的氧化皮，对比 B 区内，氧的含量不高，铝的含量尚在保护性元素浓度范围之上（8%~12%），Ni 的含量处于高位，同时出现了一定含量的 Si，该区域已经有向外扩散的基体合金元素 Si。Si 是从合金基体扩散到涂层表面的，说明该区域已经不是单一的氧化膜  $Al_2O_3$ ，而是掺杂了尖晶石化合物的氧化膜。

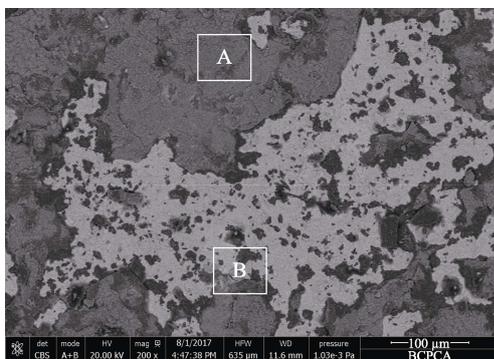


图 6 HY11 涂层经 1200 °C 下氧化 300 h 后表面形貌

## 2.5 截面形貌

HY11 涂层经 1200 °C 下氧化 300 h 后的截面形貌如图 7 所示。可以看出，经过 1200 °C 氧化 300 h，涂

层与基体之间形成了很明显的扩散区。涂层表面形成了一层黑色的氧化膜，经过 EDS 分析，其成分主要为  $Al_2O_3$ （见表 1）。对比分析涂层、扩散区、基体的元素含量，这三个区域的有效抗氧化元素 Al 的质量分数分别为 4.69%、4.46%、5.43%。说明涂层中的 Al 已经扩散到涂层表面形成氧化膜，同时扩散到基体合金。层中有效抗腐蚀元素 Cr 的质量分数降至 7.01%，除了向基体扩散外，在 1200 °C 超高温条件下，形成的  $Cr_2O_3$  已经挥发，所以在涂层表面的氧化膜中并没有检测到 Cr。对比分析涂层、扩散区、基体中的 Ru，这三个区域的 Ru 的质量分数分别为 2.83%、3.09%、3.89%，说明 Ru 从基体扩散到涂层中。Ru 作为活性元素，明显改善了涂层表面氧化膜的附着力，并且降低了氧化膜的生长速度。

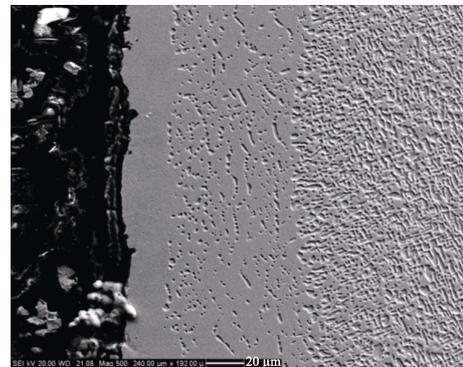


图 7 HY11 涂层经 1200 °C 下氧化 300 h 后截面形貌

表 1 涂层氧化 300 h 后各区域能谱

Element	Substrate	Diffusion layer	Coating	Oxidation layer
O	—	—	—	53.91
Al	5.43	4.46	4.69	43.12
Si	—	—	0.22	—
Cr	4.65	6.63	7.01	—
Co	9.95	9.57	9.29	—
Ni	61.93	57.18	59.29	—
Y	—	—	0.22	1.51
Ru	3.89	3.09	2.83	—
Ta	5.16	5.40	5.40	—
W	8.99	7.24	6.65	—
Re	—	6.43	4.40	—
Hf	—	—	—	1.47
Total	100			

## 3 结论

1) 采用单靶真空电弧镀技术制备 HY11 涂层经过 1050 °C 真空条件下扩散 2 h，涂层厚度为 50~60 μm，扩散区厚度为 10~15 μm，微观组织均匀

致密, 界面清晰平整。

2) 沉积态 HY11 涂层主要由 NiAl 和 Ni<sub>3</sub>Al 等相组成。

3) DD6 合金经过 1200 °C 循环氧化后不到 10 h 发生了显著剥落, HY11 涂层经过 1200 °C 循环 298 h 后, 氧化膜没有发生明显剥落, 这是因为 Ru、Hf 和 Y 是活性元素, 少量添加可以明显改善涂层表面氧化膜的附着力, 并且降低氧化膜的生长速度。

#### 参考文献:

- [1] SUZUKI A S, KAWAGISHI K, YOKOKAWA T, et al. Effect of Cr on Micro Structural Evolution of Aluminized Fourth Generation Ni<sub>2</sub>base Single Crystal Super Alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(11-12): 2769-2773.
- [2] 蔡妍, 李建平, 何利民, 等. NiCoCrAlYHf 涂层材料的 1200°C 高温氧化行为[J]. 真空, 2017, 54(6): 12-16
- [3] 李建平, 陆峰, 蔡妍, 等. 真空电弧镀沉积高温防护涂层技术[J]. 真空, 2008, 45(1): 34-36.
- [4] 张鹏飞, 李建平, 蔡妍, 陆峰. K3 合金复合涂层高温防护性能研究[J]. 材料工程, 2007(10): 68-71.
- [5] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 新型高温/超高温热障涂层及制备技术研究进展[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2722-2731.
- [6] 蔡妍, 陆峰, 陶春虎, 等. 电弧离子镀 Al 扩散障结构及抗高温氧化性能研究[J]. 航空材料学报, 2010, 30(1): 57-61.
- [7] 郑蕾, 郭洪波, 郭磊, 等. 新一代超高温热障涂层研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(6): 14-24.
- [8] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. 中国材料进展, 2009(9-10): 18-26.
- [9] 李建平, 李伟光, 吴凤筠. 机械工程材料研究进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [10] XU C Z, JIANG S M, BAO Z B, et al. Isothermal Oxidation Behavior of a Gradient NiCrAlYSi Coating Deposited by Arc Ion Plating on Ni<sub>2</sub> Based Single Crystal Superalloy[J]. Corrosion Science, 2009, 51(6): 1467-1474.
- [11] BAI Bo, GUO Hong-bo, PENG Hui, et al. Cyclic Oxidation and Interdiffusion Behavior of a NiAlDy/RuNiAl Coating on a Ni-Based Single Crystal Superalloy[J]. Corrosion Science, 2011, 53: 2721-2727.
- [12] LI Dong-qing, GUO Hong-bo, WANG Di, et al. Cyclic Oxidation of β-NiAl with Various Reactive Element Dopants at 1200 °C [J]. Corrosion Science, 2013, 66: 125-135.
- [13] 钟锦岩, 牟仁德, 何利民. NiCoCrAlYHf 涂层与一种 Ni 基单晶高温合金循环氧化行为研究[J]. 材料工程, 2013(8): 28-35.
- [14] 蔡妍, 李建平, 陆峰, 等. 电弧离子镀 TiC 扩散障结构及抗高温氧化性能研究[J]. 真空, 2010, 47(5): 5-8.
- [15] 张鹏飞, 李建平, 蔡妍, 等. 电弧离子镀 AlYSi 涂层抗高温氧化性能研究[J]. 材料工程, 2011(1): 76-80.
- [16] BELZUNCE F J, HIGUERA V, POVEDA S. High Temperature Oxidation of HFPD Thermal Sprayed MCrAlY Coatings[J]. Materials Science and Engineering, 2001, 97: 162-167.
- [17] TRYON B, MURPHY K S, YANG J Y. Hybrid Intermetallic Ru/Pt-modified Bond Coatings for Thermal Barrier Systems [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202: 349-361.
- [18] 张鹏飞, 李建平, 蔡妍, 等. AlYSi 涂层组织结构及抗燃气热腐蚀性能[J]. 真空, 2010, 47(3): 27-30.
- [19] RUSSELL N V, WIGLEY F, WILLAMSON J. Microstructural Changes to Metal Bond Coatings on Gas Turbine Alloys with Time at High Temperatures[J]. Journal of Material Science, 2000, 35: 2131-2138.
- [20] LEYENSA C, PINTB U B A, WRIGHTB I G. Effect of Composition on the Oxidation and Hot Corrosion Resistance of NiAl Doped with Precious Metals[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133-134: 15-12.
- [21] 蔡妍. 高温防护涂层扩散阻挡层技术研究[D]. 北京: 北京航空材料研究院, 2010.
- [22] 赵青, 彭徽, 郭洪波. Ru/NiAlHf 涂层在单晶高温合金界面的互扩散及循环氧化行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 338-1344.