

Zr/Re 共改性 PtAl 涂层在恒温氧化中组织演变研究

李运通, 肖俊峰, 高松, 唐文书, 李永君, 南晴,
黎一帆, 徐小卜, 马伟, 吴小虎

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用电镀 Pt 真空扩散退火, 复合电镀 Ni-Zr/Re 层+电弧离子镀 Al 层真空扩散退火的方法制备了 Zr/Re 共改性 PtAl 涂层, 并对其在 1100 °C 进行 200 h 的恒温氧化实验。使用 SEM、XRD、EPMA 对退火态涂层、氧化态涂层的物相组成以及显微形貌进行表征, 探究氧化过程中改性元素的分布以及涂层组织的演变规律。结果表明, 涂层中弥散分布的富 Re 析出相在氧化过程中聚集长大并形成挥发性氧化物 Re_2O_7 。固溶在涂层中的 Zr 与扩散到涂层中的基体合金元素 Ta 发生了共析出, 并且部分 Zr 进入 Al_2O_3 膜中形成富 Zr 氧化物, 降低 Al_2O_3 膜的生长速率。此外, 随着涂层和基体之间元素互扩散, 涂层中的 β 相发生马氏体相变, 互扩散区中的析出相由片状结构转变为颗粒状, 同时在涂层的二次反应区中发现富 Cr 析出相和富 Re、Cr 和 W 析出相存在共生关系。

关键词: PtAl 涂层; 电弧离子镀; Re; Zr; TCP 相

中图法分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)08-1951-07

1 引言

航空发动机和地面燃气轮机正向着高推重比、高效率以及高流量比的方向发展, 这对航空发动机和燃气轮机的定向叶片、导向叶片等热端部件的高温力学性能提出了更加严苛的要求。热端部件材料镍基高温合金为了追求更优异的高温力学性能, 难熔元素含量逐渐增加而合金中具有抗腐蚀作用元素 Al、Cr 的含量逐渐降低^[1]。因此, 高温合金的抗高温氧化性能、抗热腐蚀性能越来越依赖高温防护涂层。

Pt 改性铝化物 (PtAl) 涂层凭借其优异抗高温氧化性能, 既可作为抗高温氧化涂层单独使用, 也能够充当热障涂层的金属粘结层。近年来, 为了进一步提高 PtAl 涂层的性能, 研究者在 PtAl 涂层的基础上添加了 Ru、Hf、Y、Re、Zr 等单一改性元素^[2-6]。此外, 少数研究者还对 Y/Hf 共改性 PtAl 涂层^[7]、Re/Y 共改性 PtAl 涂层^[8] 以及 Re/Hf 共改性 NiAl 涂层^[9] 进行了探究, 但是关于 Zr/Re 共改性 PtAl 涂层的研究少之又少。最近, 本研究采用电镀 Pt 扩散退火, 电镀 Ni-Zr/Re 层, 电弧离子镀 Al 真空扩散退火的方法制备了一种 Zr/Re 共改性 PtAl 涂层。虽然采用电镀的方法引入活性元素不仅可以更好地控制活性元素的含量而且还能够保证其在涂层中的均匀分布, 但是新型 Zr/Re 共改性 PtAl 涂层在高温氧化过程中活性元素

的扩散情况以及组织演变规律仍不清楚。搞清楚活性元素在氧化过程中的分布以及涂层组织的演变对研究涂层中活性元素提高其抗氧化性能的机制具有重要作用。

在本研究中, 新型 Zr/Re 共改性 PtAl 涂层在 1100 °C 进行了 200 h 的恒温氧化实验, 探究了涂层中活性元素 Re 和 Zr 在氧化过程中的分布规律, 分析了涂层互扩散区 (IDZ) 和二次反应区 (SRZ) 中拓扑密堆积 (TCP) 相的组织形貌及其成分的变化。为实现 Zr/Re 共改性 PtAl 涂层在航空发动机以及燃气轮机上的应用提供数据支撑。

2 实验

选用第 2 代镍基单晶高温合金 DD5 (63.45Ni-7Cr-7.5Co-1.5Mo-5W-6.2Ta-6.2Al-3Re-0.15Hf, wt%) 作为基体材料。使用线切割将合金切割成尺寸为 $\Phi 16$ mm \times 1.5 mm 的小圆片试样, 同时在距试样边缘 1.5 mm 处切割 2 个直径为 1.5 mm 的对孔, 方便在制备涂层时悬挂试样。试样经 800#SiC 砂纸打磨后进行 200 目刚玉颗粒湿吹沙处理, 并随后对其依次进行 15 min 的去离子水、丙酮和乙醇超声处理, 去除试样表面残留的喷砂颗粒以及油污。

如图 1 所示, Zr/Re 共改性 PtAl 涂层的制备过程需要以下几个步骤。首先, 选用“Q”盐镀 Pt 的方法在试样表面沉积一层 3 ± 0.1 μ m 厚的 Pt 层, 并对其进行 1080 °C 保温 2 h 的真空扩散退火处理, 以达到稀释涂层表面 Pt 含

收稿日期: 2025-08-05

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2024GX-YBXM-214); 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ18-H11)

作者简介: 李运通, 男, 1996 年生, 博士, 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054, E-mail: liyuntong@tpri.com.cn

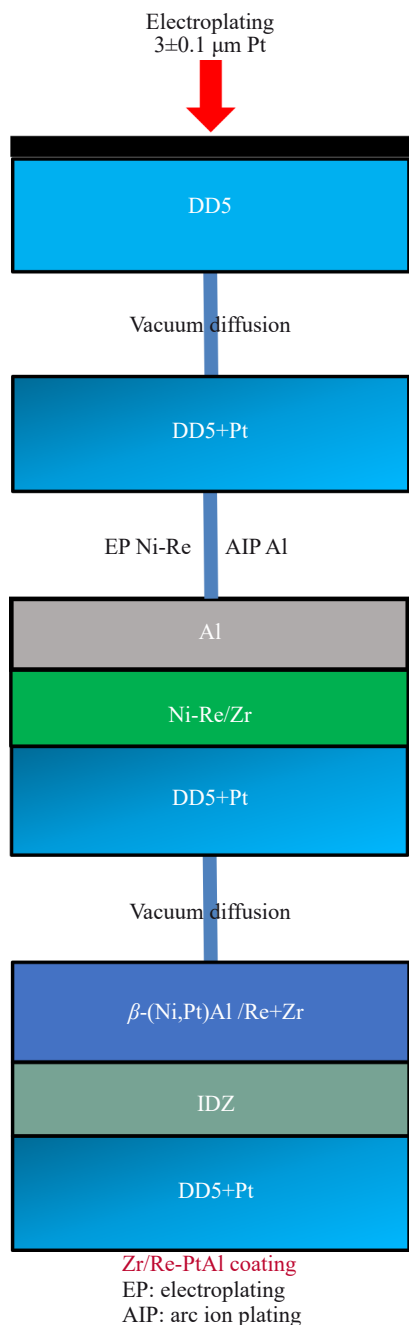


图1 Zr/Re-PtAl涂层的制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparation process of Zr/Re-PtAl coating

量的目的。其次,选用硫酸镍和柠檬酸为原料配置镀Ni溶液,通过浓氨水将溶液pH值调至8~9并在溶液中添加0.125 g/L的铼盐(KReO₄)以及25 g/L的Zr粉。利用磁力搅拌使Zr粉在溶液中处于悬浮状态,转速为10~15 r/min,并采用水浴锅将电镀溶液加热到50 °C,将电流密度调节至4 A/dm²在Pt退火试样表面沉积一层厚度大约为15 μm的Ni-Zr/Re层。最后,采用型号为DH-12的电弧离子镀设备在电镀层上方沉积约25 μm厚的Al层,后续进行真空扩散退火处理,退火过程是以10 °C/min的升温速率将真空环境中的试样升温至1050 °C保温2 h后随炉冷却至

室温。电弧离子镀沉积纯Al层具体实验参数可参照文献[10]。此外,采用相同的方法制备了单一Re改性PtAl涂层,后续将Re改性PtAl涂层和Zr/Re共改性PtAl涂层分别命名为Re-PtAl涂层和Zr/Re-PtAl涂层。

选用箱式马弗炉在高温大气环境中对试样进行恒温氧化实验。将4个平行试样放置在干净且恒重的陶瓷坩埚,并将带有试样的坩埚放置于1100 °C恒温的马弗炉内部进行200 h的恒温氧化实验。采用精度为0.01 mg的电子天平对试样进行称重,获取试样的剥落量。此外,在恒温氧化实验期间,取出1个具有代表普遍性的样品,用于观察涂层在高温氧化过程中组织变化的中间状态。

选用X射线衍射仪(XRD)观察涂层和氧化膜中的相组成。使用配备电子能谱(EDS)的Quanta, 200 F的场发射扫描电镜(SEM)观察退火态以及氧化态涂层截面及表面的组织和形貌。利用型号为JXA-800的电子显微探针(EPMA)分析涂层IDZ中TCP相的元素组成。同时,采用化学镀镍的方式对涂层外层的氧化膜进行保护,防止磨、抛光热镶试样截面时导致氧化膜发生脱落。

3 结果与讨论

3.1 退火态涂层

图2为退火态Zr/Re-PtAl涂层的截面形貌以及XRD图谱。如图2b所示,退火态Zr/Re-PtAl涂层是由单一β-(Ni,Pt)Al相构成。虽然退火态Zr/Re-PtAl涂层中存在富Re析出相以及富W析出相(如图2a所示),但是由于析出相含量较少,XRD无法检测到这些物相。同时该实验结果表明,在涂层形成过程中添加的改性元素对涂层的主体相结构不存在影响。通过图2a可知,Zr/Re-PtAl涂层是由较厚的外层以及较薄的IDZ构成,并且涂层的外层区域弥散分布着许多白色析出相。结合表1中涂层不同区域成分的差异以及析出相的不同,将涂层外层区域分为2层分别命名为Zone 1和Zone 2。其中Zone 1是以β相为基体,含有富Re析出相。Zone 2中除了β相和富Re析出相外,部分区域还存在从基体扩散到涂层中的富W析出相。涂层的IDZ则是由β相和基体元素Cr、W、Ta和Re析出形成的TCP相组成。

先前研究表明^[11],电弧离子镀Al涂层的形成过程主要是以Al向内扩散为主。在退火过程中,随着Al层中的Al原子逐渐向Ni-Zr/Re层发生扩散,Ni-Zr/Re层逐渐由γ相向γ'相发生转变,最终形成β相。根据上述实验方法可知,Re存在于铼盐(KReO₄)通过电镀的形式被添加到镀Ni层,Ni-Zr/Re层中的Re是以原子的形式存在于γ-Ni相。由于Re在γ/γ'相中的固溶度远远大于在β相中的固溶度^[12],随着Al层中的Al向镀Ni层中发生扩散,固溶Ni层中的Re析出长大形成白色的析出相。Zr则是以颗粒的形式存在于Ni-Zr/Re层,虽然Zr在β相中具有较小

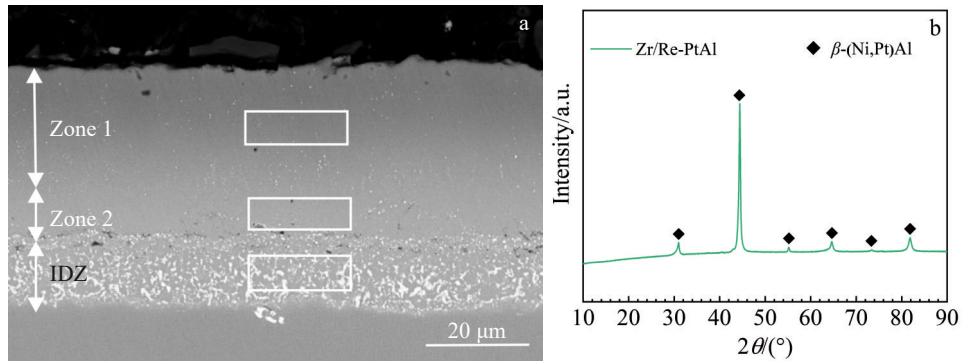


图2 退火态Zr/Re-PtAl涂层的截面形貌及XRD图谱

Fig.2 Cross-section morphology (a) and XRD pattern (b) of annealed Zr/Re-PtAl coating

表1 图2a中退火态Zr/Re-PtAl涂层不同区域成分

Table 1 Composition of different regions of annealed Zr/Re-PtAl coating marked in Fig.2a (wt%)

Region	Composition
Zone 1	67.77Ni-25.09Al-4.25Pt-1.10Re-1.28Co-0.51Cr
Zone 2	49.10Ni-17.91Al-24.84Pt-0.81Re-0.77W-3.49Co-3.09Cr
IDZ	35.30Ni-11.01Al-20.71Pt-5.78Re-6.76W-11.28Ta-4.26Co-4.89Cr

的固溶度但是其添加量较少^[13],在涂层形成过程中完全固溶在涂层的β相。因此,退火态Zr/Re-PtAl涂层中没有出现富Zr析出相。

3.2 1100 °C恒温氧化后涂层

图3给出了Re-PtAl涂层和Zr/Re-PtAl涂层在1100 °C恒温氧化200 h后表面氧化膜的单位面积剥落量曲线。从图3中可以看出,在前50 h氧化过程中2种涂层表面氧化膜的剥落量较小并且差别不大。但是随着恒温氧化时间的增加,Re-PtAl涂层表面氧化膜剥落速率远大

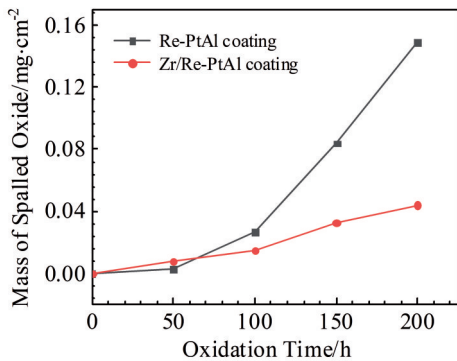


图3 Re-PtAl涂层和Zr/Re-PtAl涂层在1100 °C恒温氧化200 h后氧化膜剥落量曲线

Fig.3 Spalling curves of Re-PtAl coating and Zr/Re-PtAl coating after isothermal oxidation at 1100 °C for 200 h

于Zr/Re-PtAl涂层表面氧化膜的剥落速率。在经过200 h恒温氧化后,Re-PtAl涂层和Zr/Re-PtAl涂层表面氧化膜的剥落量分别为0.149和0.044 mg/cm²,结果表明Zr/Re-PtAl涂层表面氧化膜具有更优异的粘附性能。

图4为Zr/Re-PtAl涂层在1100 °C恒温氧化50和200 h后的XRD图谱。如图4a所示,随着氧化时间的增加,涂层中的Al和空气中的O发生反应生成Al₂O₃相,从而导致涂层中的β-(Ni,Pt)Al相发生扩散相变形成γ'-Ni₃Al相。此外,涂层中还存在着马氏体相(L1₀相),这是因为当涂层中部分β相的Al含量低于37at%时^[14-15],这部分β相从1100 °C空冷时将以切变的形式发生马氏体相变,生成L1₀相。β相和L1₀相成分相似,仅仅是晶体结构不同,分别为体心立方(bcc)结构和面心正方(fct)结

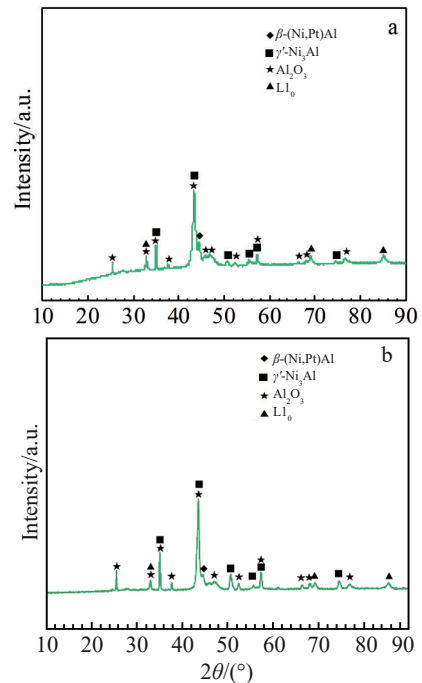


图4 Zr/Re-PtAl涂层在1100 °C恒温氧化不同时间后的XRD图谱
Fig.4 XRD patterns of Zr/Re-PtAl coating after isothermal oxidation at 1100 °C for 50 h (a) and 200 h (b)

构^[6]。因此在 SEM 背散射模式下,2 种物相的原子序数衬度不存在差别。图 4b 为 Zr/Re-PtAl 涂层在 1100 °C 恒温氧化 200 h 后的 XRD 图谱。相较于恒温氧化 50 h 的 XRD 图谱, β -(Ni,Pt)Al 相衍射峰的强度明显降低,表明随着氧化时间延长,涂层中更多的 β -(Ni,Pt)Al 相向 γ' -Ni₃Al 相以及 L1₀ 马氏体相发生相变。

图 5 为 Zr/Re-PtAl 涂层在 1100 °C 恒温氧化 50 h 后的截面和表面形貌。如图 5a 所示,随着涂层中 β 相向 γ' 相发生转变,涂层表面形成一层 Al₂O₃ 薄膜并且涂层中的 Al 向基体合金发生扩散形成二次反应区(SRZ)。此外,在恒温氧化 50 h 后,涂层中的富 Re 析出相数量变少且尺寸变大。一方面是因为高温环境给予富 Re 相足够的能量发生扩散,偏聚并长大;另一方面,Re 可形成具有挥发性的氧化物 Re₂O₇^[17],造成部分富 Re 析出相因挥发而消失。综上所述,涂层中富 Re 相数量减少。根据 EDS 结果可知,Point 1 的成分为 2.17Zr-56.79Al-41.04O (wt%),氧化膜中的白色相为富 Zr 氧化物,表明涂层中的 Zr 在氧化过程中形成了富 Zr 氧化物。大量相关研究表明^[18-20],Zr 沿氧化铝晶界扩散与空气中的 O 发生反应形成的富 Zr 氧化物偏析在氧化膜的晶界处。Zr 具有较大的原子半径,沿晶界扩散速率缓慢,阻碍了 Al 原子沿晶界的扩散速率,因此降低了涂层表面氧化铝薄膜的生长速率,从

而提高了涂层氧化膜的抗剥落性能。此外,通过观察涂层表面氧化膜(图 5b),部分区域氧化膜已经发生了剥落。

通过观察恒温氧化 200 h 后的涂层截面和表面形貌(图 6),近氧化膜的涂层中出现许多不同于富 Re 相的细小白色析出相。根据 EDS 结果可知,Point 2 的成分为 3.26Ta-2.79Zr-52.89Ni-20.23Pt-13.78Al-3.96Co-3.00Cr(wt%),即这些白色析出相为富 Zr/Ta 相。先前研究表明^[12],由于 Ta 和 Hf 具有较强的化学亲和力,导致 β 相涂层出现富 Hf/Ta 相。Zr 和 Hf 同主族具有相似的化学性质,表明 Ta 和 Zr 可能也具有较强的化学亲和力,因此,当基体合金中的 Ta 扩散到涂层时,和固溶在涂层中的 Zr 发生共析出,该结果和 Jiang 等人^[21]研究所获得的结果一致。

3.3 Zr/Re-PtAl 涂层的 IDZ 和 SRZ 在氧化过程中的演变

根据图 2 可知,退火态的 Zr/Re-PtAl 涂层主要是由涂层外层和互扩散区 2 部分组成。在经过高温氧化以后,基体和涂层之间的互扩散导致基体中产生 TCP 相恶化基体合金的力学性能^[22],从而形成二次反应区。恒温氧化 200 h 后,Zr/Re-PtAl 涂层主要是由涂层外层、互扩散区以及二次反应区组成。通过观察涂层退火态及氧化态的截面形貌,涂层中不同区域的 TCP 相不仅形状各异而且成分也不相同。因此将分析该涂层中 IDZ 和 SRZ 在氧

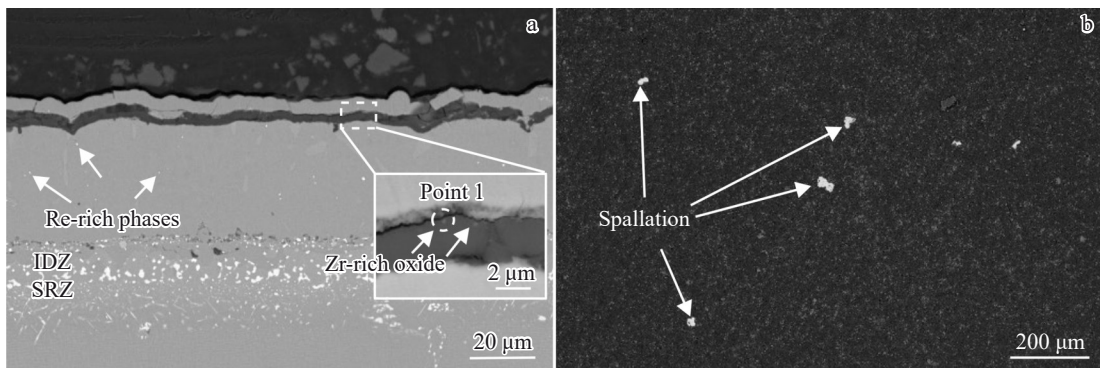


图 5 Zr/Re-PtAl 涂层在 1100 °C 恒温氧化 50 h 后的截面和表面形貌

Fig.5 Cross-sectional (a) and surface (b) morphologies of Zr/Re-PtAl coating after isothermal oxidation at 1100 °C for 50 h

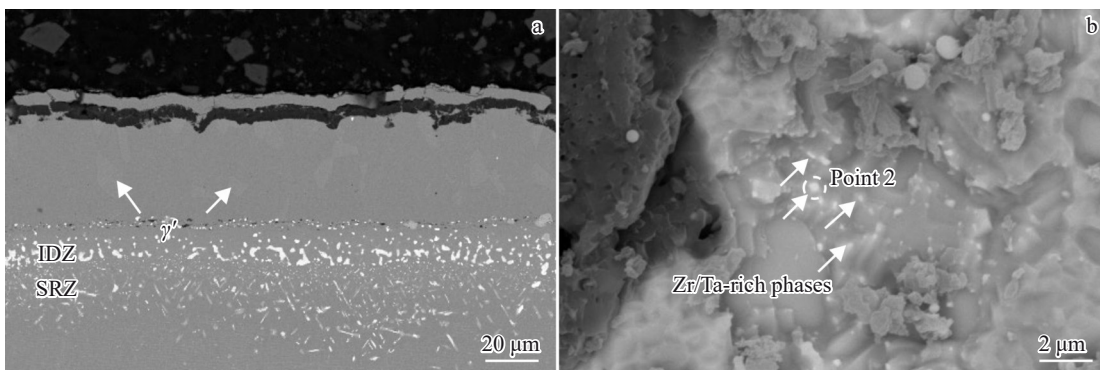


图 6 Zr/Re-PtAl 涂层在 1100 °C 恒温氧化 200 h 后的截面和表面形貌

Fig.6 Cross-sectional (a) and surface (b) morphologies of Zr/Re-PtAl coating after isothermal oxidation at 1100 °C for 200 h

化过程中的演变。

图7为Zr/Re-PtAl涂层IDZ和SRZ在1100℃恒温氧化过程中演变示意图。在涂层形成过程中,基体合金中的Ni以及电弧离子镀Al层中的Al会发生互扩散,造成基体结构由 γ/γ' 相结构转变成 β 相结构,固溶在基体 γ 相中的难熔元素W、Re、Ta和Cr发生原位析出形成大量片状以及少数点状的TCP相。根据图8退火态Zr/Re-PtAl涂层EPMA图谱结果可知,此时涂层IDZ中TCP相主要是富W、Ta析出相以及富Re、Cr析出相。

随着氧化时间的增加,涂层和基体之间互扩散导致IDZ中的 β 相向 γ' 相发生转变。由于形成TCP相的难熔元素在 β 相中的固溶度小于在 γ 相中的固溶度^[23],部分难熔元素发生回熔以及向外扩散到涂层中导致IDZ中的TCP相由片状形貌转变为圆化的颗粒状,并且涂层退火态存在的小型颗粒状TCP相消失。与此同时,在氧化过程中基体和涂层之间互扩散也导致基体的组织结构发生转变,即从 γ/γ' 相转变为 γ 相,从而导致许多 γ 相固溶元素析出形成TCP相从而形成SRZ。

图9为Zr/Re-PtAl涂层IDZ和SRZ恒温氧化200h后的截面形貌图。通过观察图9b,在SEM背散射模式下TCP相颜色的不同代表成分不同,根据相的颜色发现氧

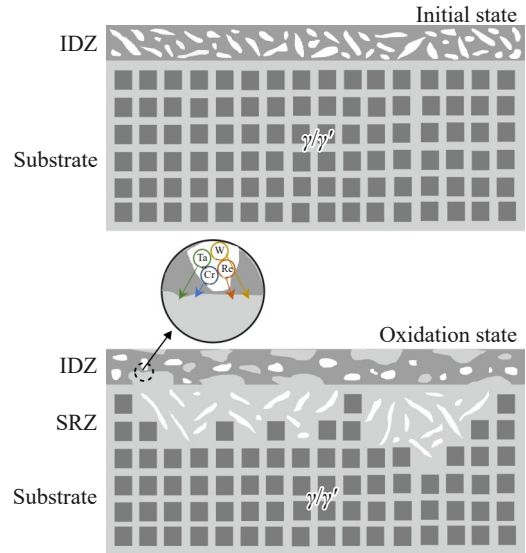


图7 Zr/Re-PtAl涂层IDZ和SRZ在1100℃恒温氧化过程中演变示意图

Fig.7 Evolution schematic diagram of IDZ and SRZ in the Zr/Re-PtAl coating during isothermal oxidation process at 1100 °C

化态涂层IDZ中存在2种类型的TCP相。根据表2中涂层不同区域中TCP相的成分可知,IDZ中颜色最浅的相为富Cr、Re相,颜色最明亮的相为富Re、W和Cr相。

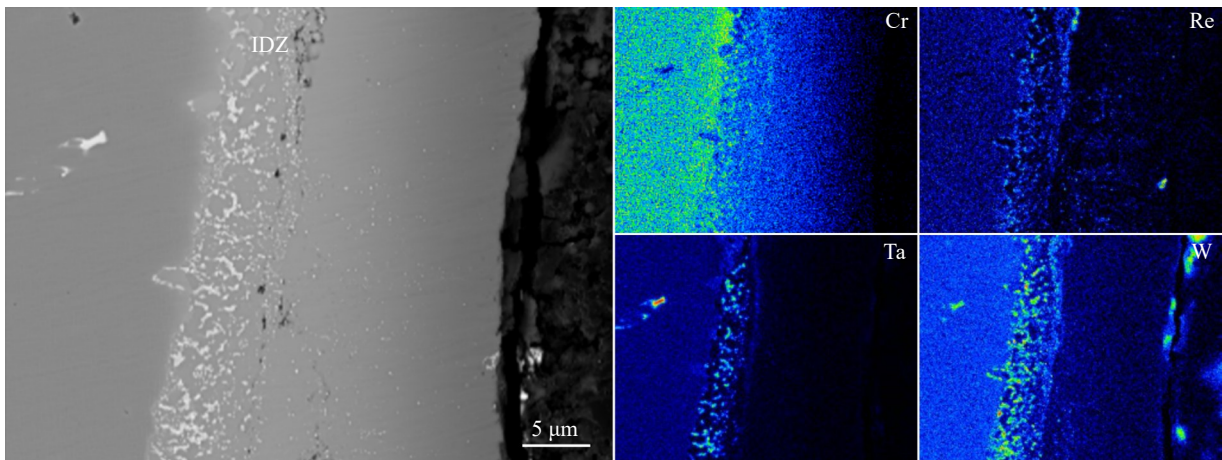


图8 退火态Zr/Re-PtAl涂层的EPMA照片

Fig.8 EPMA images of Zr/Re-PtAl coating after annealing

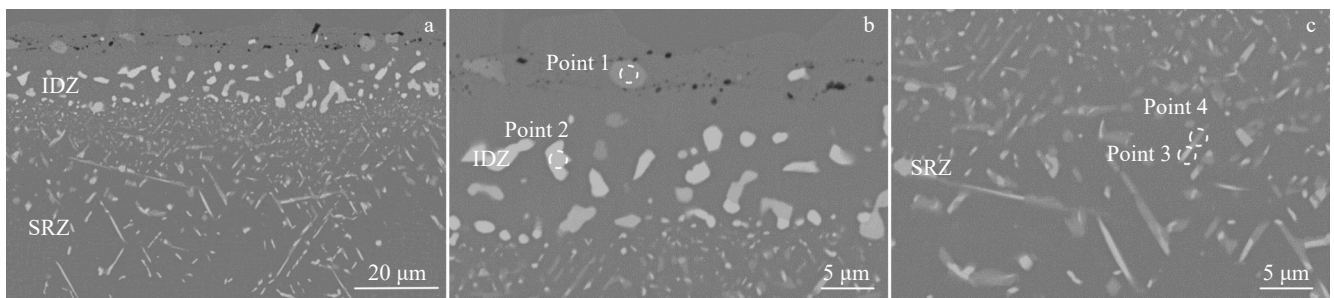


图9 Zr/Re-PtAl涂层恒温氧化200h的截面形貌及IDZ和SRZ区域形貌

Fig.9 Cross-sectional morphology of Zr/Re-PtAl coating after isothermal oxidation for 200 h (a); morphologies of IDZ region (b) and SRZ region (c)

表2 图9中 Zr/Re-PtAl涂层不同区域TCP相的成分
Table 2 Composition of TCP phase in different regions of Zr/Re-PtAl coating in Fig.9 (at%)

Region	Location	Composition
IDZ	Point 1	74.36Cr-14.45Re-3.25W-9.51Ni-0.42Al
	Point 2	36.79Re-25.71Cr-15.04W-22.11Ni-0.35Al
SRZ	Point 3	15.48Re-14.38Cr-9.38W-50.36Ni-10.41Al
	Point 4	39.90Cr-9.47Re-4.67W-36.84Ni-9.12Al

图9c为氧化态Zr/Re-PtAl涂层SRZ中TCP相的形貌。从图9c中可以看出,SRZ中TCP相的形貌为针片状形貌,且这些TCP相沿着IDZ/SRZ交界面近45°的方向生长,该生长方向和单晶高温合金(001)取向有关^[24]。此外,涂层的SRZ中也存在2种类型的TCP相,并且2种TCP相互依附在一起。根据EDS的结果,颜色较亮的相为富Re、Cr和W的TCP相,而颜色较暗的相为富Cr的TCP相。该2种物相的共生关系和在已有的高温合金研究TCP相中报道结果一致^[25-26]。

4 结论

1)采用电镀Pt真空扩散退火、电镀Ni-Zr/Re层、电弧离子镀Al退火的方法制备了Zr/Re共改性PtAl涂层。涂层外层可分2部分,上层由 β 相和富Re析出相组成,下层为 β 相、富Re析出相以及富W析出相,互扩散区则是由 β 相和TCP相构成。

2)在经过200 h恒温氧化后,相较于Re-PtAl涂层,Zr/Re-PtAl涂层具有更小的剥落量。Zr沿氧化膜晶界扩散形成富Zr氧化物,阻碍Al原子扩散,降低氧化膜的生长速率,提高氧化膜的抗剥落性能。

3)在氧化过程中,富Re析出相发生扩散聚集长大,形成具有挥发性 Re_2O_7 氧化物造成涂层中富Re析出相数量减少。另外,由于Zr与Ta具有较高的化学亲和力,基体中扩散到涂层的Ta与固溶在涂层中的Zr发生共析出。

4)经过恒温氧化后,涂层IDZ中的TCP相由片状结构转变成颗粒状结构,根据成分可分为富Cr、Re相;富Re、W和Cr相。此外,在氧化过程中基体产生SRZ,其内部TCP相沿着IDZ/SRZ交界面近45°的方向生长,呈针片状形貌。根据成分主要分为2类,即富Re、Cr和W相以及富Cr相,并且这2种TCP相存在共生关系。

参考文献 References

- [1] Sato A, Harada H, Yeh A C *et al.* *Superalloys 2008*[C]. Champion: TMS, 2008, 131
- [2] Peng X, Li W, Fu L B *et al.* *Corrosion Science*[J], 2023, 218: 111151
- [3] Jiang C Y, Yang Y F, Zhang Z Y *et al.* *Corrosion Science*[J], 2018, 133: 406
- [4] Yu C T, Jiang Y M, Li S *et al.* *Corrosion Science*[J], 2023, 221: 111375
- [5] Zhang H B, Liu Y, Su H *et al.* *Corrosion Science*[J], 2023, 225: 111608
- [6] Liu R D, Jiang S M, Guo C Q *et al.* *Corrosion Science*[J], 2017, 120: 121
- [7] Li S, Xu M M, Zhang C Y *et al.* *Corrosion Science*[J], 2021, 178: 109093
- [8] Li Wei(李伟). *Preparation and Oxidation Behavior of Re-Modified Aluminide Coatings*(Re改性铝化物涂层的制备和氧化行为研究)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021
- [9] Fan L J, Li W, Zhang W L *et al.* *Corrosion Science*[J], 2024, 240: 112447
- [10] Li W, Zhang W L, Li T *et al.* *Corrosion Science*[J], 2022, 207: 110486
- [11] Liu Ruidong(刘瑞东). *Development and Evaluation of Pt Modified β -NiAl Coatings*(Pt改性 β -NiAl涂层的制备与性能研究)[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017
- [12] Han B H, Ma Y, Peng H *et al.* *Corrosion Science*[J], 2016, 102: 22
- [13] Kitabjian P H, Nix W D. *Acta Materialia*[J], 1998, 46(2): 701
- [14] Zhang Y, Haynes J A, Pint B A *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2003, 163-164: 19
- [15] Chen M W, Glynn M L, Ott R *et al.* *Acta Materialia*[J], 2003, 51: 4279
- [16] Li Y T, Li T, Li W *et al.* *Corrosion Science*[J], 2023, 222: 111415
- [17] Olikier V E, Gridasova T Y, Sirovatka V L *et al.* *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*[J], 2009, 48: 466
- [18] Pint B A. *Oxidation of Metals*[J], 1996, 45: 1
- [19] Ebach-Stahl A, Schulz U, Swadźba R *et al.* *Corrosion Science*[J], 2021, 181: 109205
- [20] Li D Q, Guo H B, Wang D *et al.* *Corrosion Science*[J], 2013, 66: 125
- [21] Jiang C Y, Qian L Y, Feng M *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35(7): 1334
- [22] Zhang G, Tao X P, Jafri S M A *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2024, 53(10): 2766
- [23] Zhang Z, Bao B, Peng H *et al.* *Materials & Design*[J], 2015, 88: 667
- [24] Wang R L, Gong X Y, Peng H *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2015, 326: 124
- [25] Jiang H, Dong J X, Zhang M C. *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2019, 8(2): 2461
- [26] Wang Z X, Li Y M, Zhao H C *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 782: 1

Microstructure Evolution of Zr/Re Co-modified PtAl Coatings During Isothermal Oxidation

Li Yuntong, Xiao Junfeng, Gao Song, Tang Wenshu, Li Yongjun, Nan Qing, Li Yifan, Xu Xiaobu, Ma Wei, Wu Xiaohu
(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Zr/Re co-modified PtAl coating was fabricated by electroplating Pt vacuum diffusion annealing and composite electroplating Ni-Zr/Re layer+arc ion plating Al layer vacuum diffusion annealing. The isothermal oxidation experiment was carried out at 1100 °C for 200 h. The phase composition and microstructure of the as-annealed coating and the oxidized coating were characterized by SEM, XRD and EPMA, and the distribution law of the modified elements and the evolution law of the coating microstructure during oxidation were investigated. The results show that the Re-rich precipitates dispersed in the coating aggregate and grow during oxidation and form volatile oxide Re_2O_7 . The Zr solid-solved in the coating co-precipitates with the Ta element diffused into the coating from the substrate alloy, and some Zr enters the Al_2O_3 scale to form Zr-rich oxides, reducing the growth rate of the Al_2O_3 scale. In addition, with the mutual diffusion of elements between the coating and the substrate, the β phase in the coating undergoes martensitic transformation. The precipitates in the mutual diffusion zone change from plate-like to particle-like, and the coexistence relationship of Cr-rich precipitates and Re, Cr and W-rich precipitates is found in the secondary reaction zone of the coating.

Key words: PtAl coating; arc ion plating; Re; Zr; TCP phase

Corresponding author: Xiao Junfeng, Master, Professor, Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, P. R. China, Tel: 0086-29-82102558, E-mail: xiaojunfeng@tpri.com.cn