

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.05.012

TC21 合金表面 Al-Cr 涂层的制备及其高温抗氧化性

刘 文 梁文萍 缪 强 潘晓扬 任蓓蕾

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,211106)

摘要:利用双辉等离子渗金属技术和多弧离子镀技术在 TC21 钛合金表面制备了 Al-Cr 复合涂层,并于 750, 850,950 °C 下进行了抗高温氧化性能研究。结果表明:Al-Cr 涂层分为纯 Al 层、AlCr 合金层、纯 Cr 层及扩散层,厚度约为 48 μm ,涂层连续致密、无贯穿性裂纹,并且与基体结合紧密。氧化过程中,Al-Cr 涂层表面能形成致密的 Al_2O_3 氧化层,阻止 O 元素向内扩散侵蚀基体,使涂层具有优异的抗高温氧化性能;Cr 的存在既促进了 Al 的选择性氧化,同时又使得涂层的自修复能力得到增强。Al-Cr 复合涂层显著提高了 TC21 合金的高温抗氧化性。

关键词:TC21 钛合金;Al-Cr 复合涂层;双辉技术;多弧离子镀技术;抗高温氧化性

中图分类号:TN958

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)05-0702-06

Preparation and Oxidation Resistance of Al-Cr Composite Coating on TC21 Alloy Surface

Liu Wen, Liang Wenping, Miao Qiang, Pan Xiaoyang, Ren Beilei

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: Al-Cr composite coating of TC21 alloy is prepared by the combined process of multi-arc ion planting and double-glow plasma surface alloying technology. And the high temperature oxidation behavior is studied at 750,850,950 °C. The results show that the Al-Cr coating, consisted of pure Al layer, AlCr alloy layer, pure Cr layer and diffusion layer, is about 48 μm in thick. And it is dense, with no cracks, and combined with substrate firmly. At the process of oxidation, a dense Al_2O_3 layer is formed on the Al-Cr coating surface, which prevents the internal diffusion of O and the external diffusion of Ti, and makes the composite coating possess an excellent protection performance. Cr promotes the formation of dense Al_2O_3 and improves the self-repairing function of Al-Cr coating. The Al-Cr composite coating significantly increases the oxidation resistance of TC21 alloy.

Key words: TC21 alloy; Al-Cr coating; double-glow plasma; multi-arc ion planting; high temperature oxidation resistance

钛及钛合金因其密度低、强度高、耐蚀性好等优点,在航空航天工业领域有着重要的应用。然而,抗热腐蚀性能差、抗高温氧化能力不足严重限制了其应用^[1-3]。TC21 (Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-1.5Cr-2Nb) 合金是中国在 Ti62222S 钛合金基础

上,研制出的具有知识产权的高强韧性损伤容限型钛合金^[4-5]。目前 TC21 合金已被应用在飞机起落架、基体链接件、有温度要求的发动机框架以及机身温度最高的发动机舱隔板材料等^[6]。然而由于 TC21 合金中抗氧化元素的含量低,若长期使用,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51474131)资助项目;南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金(BCXJ14-11)资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2013-07-05;**修订日期:**2014-08-10

通信作者:梁文萍,女,教授,博士生导师,E-mail:wpliange@nuaa.edu.cn。

需要在其表面采取适当的防护涂层。Al-Cr涂层有优异的热稳定性和抗热腐蚀等性能,在超临界发电机组和燃气涡轮叶片中得到广泛应用。

目前,制备Al-Cr涂层的方法主要有:粉末包埋渗、气象渗、料浆法等热渗法,以及热浸镀、热喷涂等方法^[7-11]。然而,热浸镀Al-Cr合金法、高温渗Cr后渗Al法、电镀Cr后渗Al法和包埋渗Al-Cr法都需要700℃以上的处理温度;电沉积法可以在低温下制备Al-Cr涂层,但涂层的结合力较差,且镀液稳定性差,Cr含量控制困难;采用物理气相沉积(Physical vapor deposition,PVD)法同样也存在涂层与基体结合力差等问题。

与上述制备Al-Cr涂层的方法相比,等离子渗金属技术^[12]具有渗层厚、致密性好、涂层与基体结合良好等优点,是一种新型的、有较大工程潜力的表面改性技术。多弧离子镀技术^[13]具有成膜速率高、膜层均匀致密、纯度高、较好的绕镀性等优点,且镀膜时温度可控,利于原子扩散,从而在工件表面形成合金层,提高膜层与工件的结合力。

本文提出采用双辉技术和多弧离子镀技术的联合工艺,在TC21合金表面渗镀Al-Cr复合涂层,对涂层的组织结构进行了表征,并在750,850,950℃下研究了其抗高温氧化性能。与其他的制备方法相比,本方法得到的Al-Cr涂层结合力更好、膜层更均匀致密,且通过调整镀膜温度更容易获得不同组成成分的涂层。

1 实验材料和方法

实验基材采用西北有色金属研究院研制的TC21钛合金,其名义成分为Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-1Cr-2Nb,线切割成14 mm×14 mm×4 mm的方试样,用SiC金相砂纸将其进行逐级打磨,依次是400#,500#,600#,800#和1000#号砂纸,并进行机械抛光至镜面。使用丙酮和酒精对试样净化清洗后吹干备用。Cr靶尺寸为 Φ 100 mm×30 mm,纯度为99.9%。

在自制的10 kW多功能双辉等离子渗金属炉中对TC21合金进行渗Cr处理,以纯Cr板作为源极,TC21钛合金作阴极。双层辉光等离子渗金属技术的原理及方法见文献^[12]。工艺参数为:氩气气压35~40 Pa,极间距15~20 mm,源级电压900~950 V,基体(阴极)电压350~450 V,时间3 h,炉冷至室温。取出试样,并在镀膜实验前使用丙酮和酒精对其净化清洗后吹干备用。

镀Al采用DHD-8B型多弧离子炉,实验采用

直径为100 mm的纯Cr(质量分数为99.9%)靶作为弧源;实验前对试样辉光清洗10 min,进一步其表面残留杂质。多弧离子镀技术的原理及方法见文献^[13]。制备Al层的具体工艺参数如表1所示。

表1 制备Al层的工艺参数

Tab. 1 Process parameters of Al layer				
参数	底真空度/Pa	辉光清洗	工作气压/Pa	工作偏压/V
数值	7.5×10^{-4}	10 min,600 V	2~4	150
参数	靶电流/A	温度/℃	镀膜时间/min	
数值	60	250	60	

氧化实验采用恒温氧化法在高温电阻炉中进行,实验介质为静止空气,实验温度分别为750,850,950℃。为保证试样表面都与空气接触,将已测好尺寸的试样倾斜放在氧化铝坩埚内。每氧化10 h将试样取出,空冷30 min,用精度0.1 mg的FA1044型分析天平连同坩埚进行称重,试样累计氧化100 h。计算单位面积上的氧化增重,使用origin软件绘出合金重量随时间变化的氧化动力学曲线。为保证实验数据的准确性和结果可重复性,每个温度下都用3个试样同步实验。

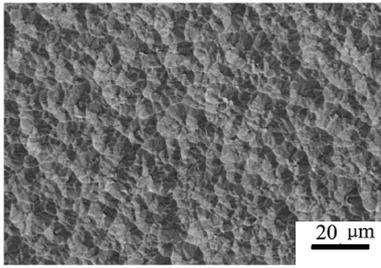
采用带有能谱仪(Energy dispersive spectrometer,EDS)的S4800型场发射扫描电子显微镜(Field emission scanning electron microscope,FESEM)分析和观察氧化前后试样的表、截面形貌和显微组织;用D8 Advance型X射线衍射仪(X-ray diffraction,XRD)来检测氧化层及剥落物的相组成,靶材为Cu K α 。

2 实验结果与讨论

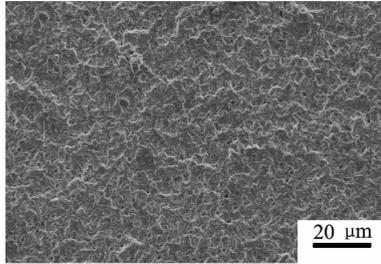
2.1 Al-Cr复合涂层

TC21合金表面双辉渗Cr层和Cr层上的镀Al层从宏观上看都光滑平整,呈银白色,有金属光泽,没有脱落、裂纹等缺陷。

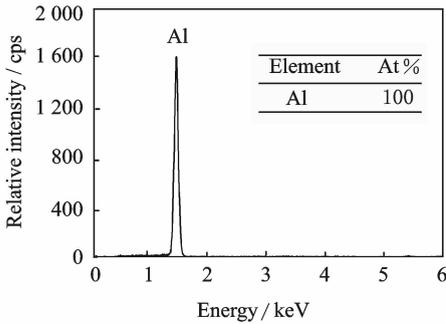
图1是TC21合金表面Cr层、Cr上镀Al层的扫描电镜微观表面形貌。从图1(a)可以看出,渗Cr后表面呈现丘陵状形貌,涂层由大量的锥形晶体构成,Cr层致密均匀、无疏松孔洞。从图1(b)可以看出,Al层表面光滑平整、质地致密,但出现少量凹坑,文献^[14]指出这种凹坑的出现是由于薄膜柱状晶生长缺陷所造成的。Al层的生长方式呈明显的层状生长,在其表面未发现明显的熔滴颗粒存在。对表面Al层进行选区面扫能谱分析,结果如图1(c)所示,可见复合涂层表面为纯Al层。



(a) Cr层



(b) Al层



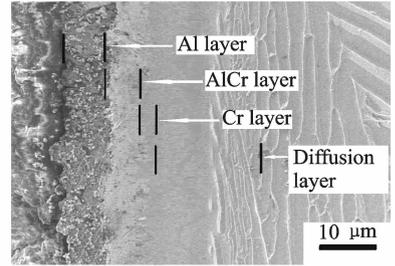
(c) Al层选区面扫能谱分析结果

图1 Cr层和Al层的表面形貌及Al层能谱分析结果

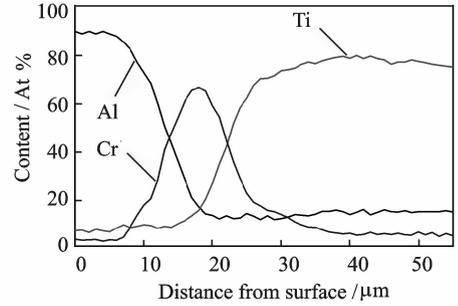
Fig.1 SEM images of surface of Cr and Al and EDS result of Al

图2(a)是Al-Cr复合涂层的截面形貌。可以看出Cr层与基体及Al层之间都存在互扩散层,起到良好的支撑作用,使膜层、基体间结合紧密。涂层中未发现贯穿性裂纹,Cr层与Al层厚度均匀。对Al-Cr复合涂层截面形貌进行EDS线扫,结果如图2(b)所示,复合涂层中Al层厚度约为7 μm,在其下Al-Cr合金层的厚度约10 μm,Cr的沉积层较薄约为3 μm,而Ti-Cr扩散过度区总厚度约为20 μm。可见复合涂层与基体是典型的冶金梯度结合,增强了涂层与基体的结合力,这是双辉技术的优势之一。Al层与Cr层之间由于热扩散形成了合金层,使得内外涂层界面结合良好。

对Al-Cr涂层进行XRD谱线测定,如图3所示。物相分析结果表明,涂层表面主要由Al相构成。



(a) 断层形貌



(b) EDS能谱图

图2 Al-Cr复合涂层的截面形貌及EDS能谱图

Fig.2 SEM and EDS images of cross-section of Al-Cr composite coating

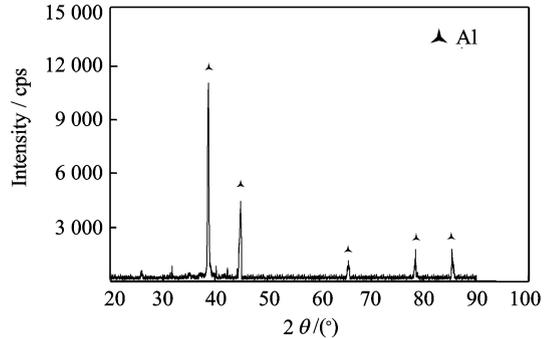


图3 Al-Cr涂层表面XRD能谱图

Fig.3 XRD pattern of Al-Cr coating

2.2 抗高温氧化性能分析

2.2.1 TC21合金的氧化动力学分析

图4是TC21钛合金分别在750,850,950 °C的干燥空气中的恒氧化动力学曲线。由图4可得,750~950 °C,氧化增重逐渐增加。初始有氧化膜生成,增重较快。这个阶段的重量增长依靠的是氧化反应,而不是原子扩散。经过100 h恒温氧化后,在750 °C时,氧化增重为5.62 mg·cm⁻²,抗氧化性能差。850 °C时,氧化增重为13.34 mg·cm⁻²,氧化动力学曲线呈直线定律。950 °C时,经过20 h合金表面氧化层脱落严重,实验终止。因此,在较高温度下TC21合金的表面形成的氧化层不具有保护作用,发生了严重的氧化腐蚀。

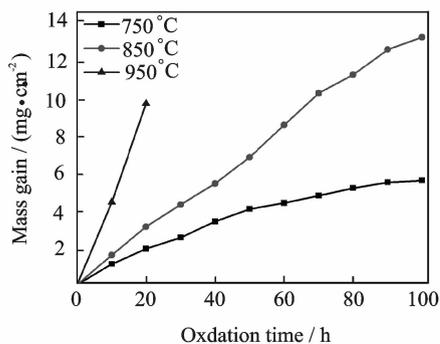


图 4 TC21 合金在 750,850,950 °C 的氧化动力学曲线
Fig. 4 Oxidation kinetic curves of TC21 alloy at 750, 850, 950 °C

2.2.2 Al-Cr 涂层的氧化动力学分析

在 TC21 合金表面制备 Al-Cr 复合涂层后,试样经过 750,850,950 °C/100 h 氧化后的氧化动力学曲线见图 5。Al-Cr 涂层试样在 750,850 °C 高温氧化时,初期 10 h 内,氧化层快速生长,然后进入高温氧化稳定阶段。在 950 °C 时,涂层试样在经历短暂的氧化初期阶段后,迅速进入快速增长阶段,氧化 40 h 后,氧化曲线呈直线趋势。高温氧化 100 h 后,750 °C 时试样增重量为 1.3 mg·cm⁻²,平均氧化速率为 0.071 g·m⁻²·h⁻¹,属于完全抗氧化级^[15];850 °C 时,试样的增重量为 6.7 mg·cm⁻²,平均氧化速率为 0.649 g·m⁻²·h⁻¹,属于抗氧化级别;但在 950 °C 时,试样的氧化增重量为 29.4 mg·cm⁻²,平均氧化速率为 2.862 g·m⁻²·h⁻¹,达到次抗氧化级别。

可见,在 750,850 °C 下,Al-Cr 复合涂层具有优异的抗高温氧化性能,对基材起到了很好的保护作用。但在 950 °C 时,涂层在短时间内具有良好的保护作用。

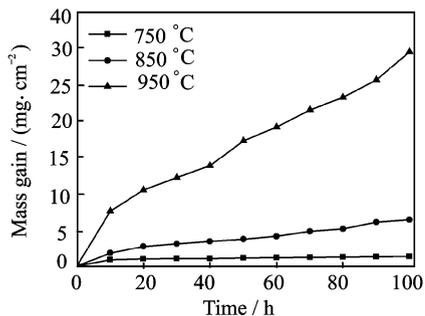


图 5 Al-Cr 复合涂层恒温氧化动力学曲线
Fig. 5 Oxidation kinetic curves of Al-Cr composite coating

2.2.3 XRD 物相分析

图 6 是 Al-Cr 涂层经不同温度高温氧化 100 h 后的 XRD 物相分析图谱。由图 6 可见,在 750 °C

时,XRD 中的强峰为 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃,弱峰相为 TiO₂,表明试样表面的氧化物主要由 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 构成,且含有少量的 TiO₂。在 850 °C 时,强峰主要是 TiO₂ 和 Al₂O₃,以及微量的 Cr₂O₃,弱峰中出现了少量 Al,Cr 的合金相 Al₈Cr₅。在 950 °C 时,强峰相为 TiO₂,弱峰中含有 Al₂O₃,Al₈Cr₅,Cr₂O₃ 等相,Al₈Cr₅ 相的含量明显增多。

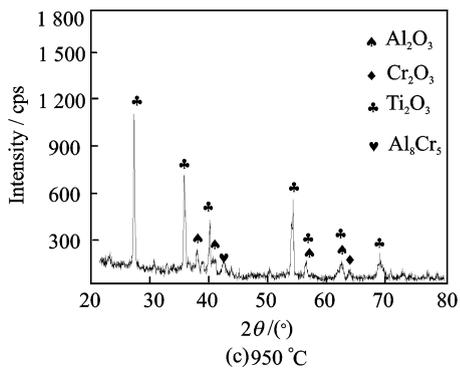
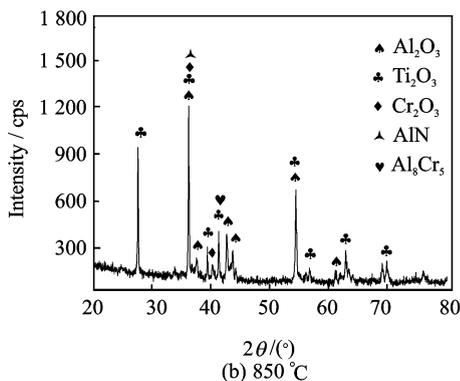
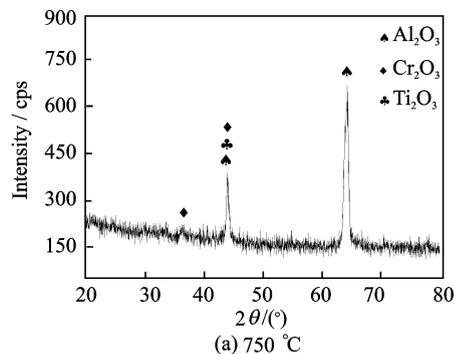


图 6 Al-Cr 涂层氧化后试样表面 XRD 结果
Fig. 6 XRD patterns of Al-Cr coating after oxidation

2.2.4 氧化膜表面形貌

图 7 是 Al-Cr 复合涂层在 750,850,950 °C 下氧化 100 h 后的表面组织形貌。从图 7(a)可以看出,750 °C 时,涂层在氧化过程中形成了致密、连续的外氧化层,氧化层上广泛分布有氧化物小颗粒,根据 XRD 结果可判定该颗粒状氧化物为 Al₂O₃,

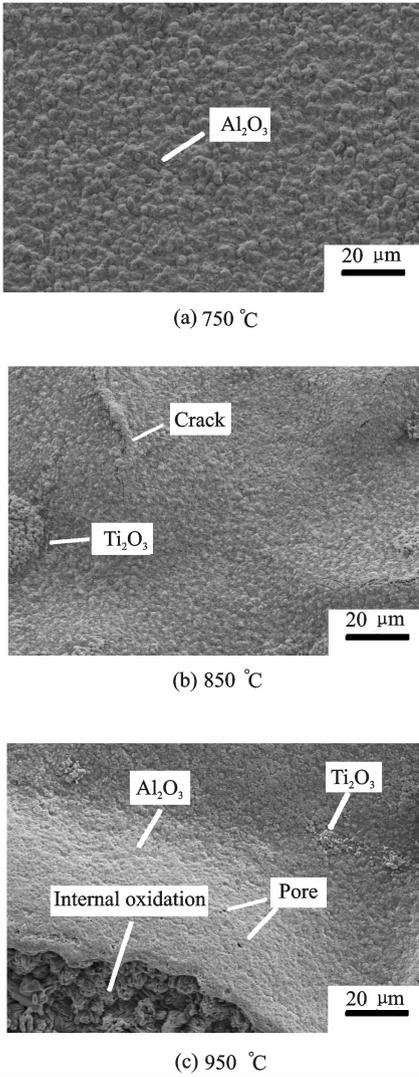


图7 Al-Cr涂层试样在750,850,950 °C下恒温氧化100 h后表面形貌

Fig. 7 Surface morphologies of Al-Cr coating after isothermal oxidation for 100 h at 750,850,950 °C

氧化层未发现裂纹或剥落现象。在850 °C时,表面氧化膜发生动态再结晶,形成了细小颗粒的 Al_2O_3 陶瓷层,并且有团簇状 TiO_2 形成,如图7(b)所示, Al_2O_3 膜表面产生了鼓包现象,鼓包上出现了小裂纹,但并未剥落,涂层仍具有良好的抗氧化性。图7(c)是950 °C/100 h氧化后的表面形貌,可以看出, Al_2O_3 颗粒进一步细化,鼓包增大并发生破裂,漏出内部氧化层,通过EDS分析主要为Ti,O和少量的Al,结合XRD结果测定大颗粒为 TiO_2 。此外,在 Al_2O_3 层鼓包上出现了小孔洞,并有部分 TiO_2 团簇物透过 Al_2O_3 膜向外生长。

2.2.5 氧化膜截面形貌

图8显示的是Al-Cr复合涂层750~950 °C/

100 h氧化后的截面氧化膜组织形貌。从图8(a)可看出,750 °C时, Al-Cr 涂层主要是表面部分被氧化,氧化膜的外层是凹凸的 Al_2O_3 层,厚度为2 μm 左右,在氧化层下方为 AlCr 合金层。

试样在850 °C氧化100 h后, Al-Cr 涂层氧化膜截面略有起伏(图8(b)),氧化膜呈现出交叠层状氧化结构,氧化膜厚度明显增大。表层氧化膜连续致密,且在 Al_2O_3 膜中夹杂有 TiO_2 。中间氧化层I为致密的 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 混合层。中间氧化层II由Ti,Cr的氧化物组成,主要是 TiO_2 和 Cr_2O_3 ,Al含量较低不足以形成连续的 Al_2O_3 膜, Al_2O_3 颗粒嵌入混合膜中。Cr的扩散和Ti的贫化使得大量 Ti(Al,Cr)_2 相析出于混合膜下。

图8(c)是试样经过950 °C/100 h高温氧化后的截面形貌。氧化膜厚度明显增大,涂层内部发生了大范围内氧化,氧化膜形态更复杂。扩散至涂层表面的Ti被氧化而形成疏松的 TiO_2 膜(图7(c)),

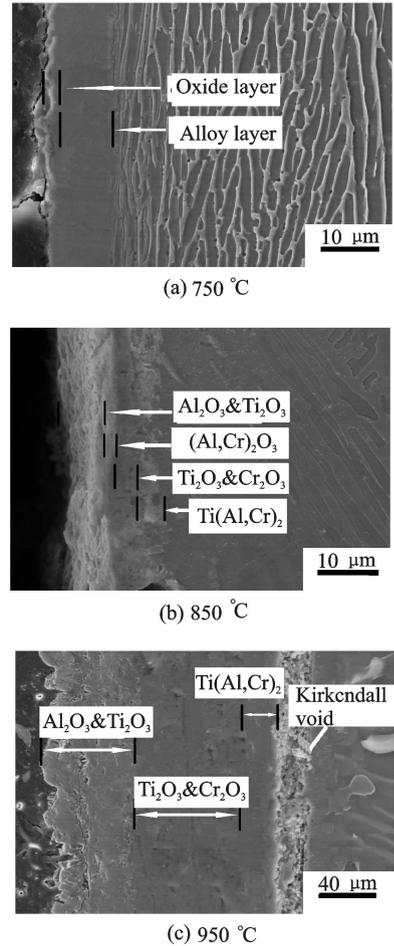


图8 Al-Cr涂层试样在750,850,950 °C下恒温氧化100 h后截面形貌

Fig. 8 Cross-sectional images of Al-Cr coating after isothermal oxidation for 100 h at 750,850,950 °C

但内氧化层仍是连续致密的。O 向内扩散与 Cr, Ti 反应,生成混合氧化物,主要为 Cr_2O_3 , TiO_2 和 Ti_2O_3 等。而在 Ti 的氧化膜中生成了连续的 Al_2O_3 膜。在氧化膜下仍有大量的 $\text{Ti}(\text{Al},\text{Cr})_2$ 析出相。Ti 向外扩散使得在基体中出现了贫 Ti 区,并发生了柯肯达尔效应。

2.2.6 氧化机理分析

覆有 Al-Cr 涂层试样在 750,850,950 °C 的静止空气中高温氧化过程是一个既有氧化膜形成与破裂、剥落,又有元素间相互扩散的过程。

高温静止空气中,Al-Cr 涂层表面的 Al 在较高氧分压下能快速形成一层致密的保护性 Al_2O_3 膜。由于 Al_2O_3 膜的阻挡,O 内扩散受到了阻碍,导致 O 向基体的扩散速率下降。而 Al,Cr 受到热扩散作用,互扩散形成 AlCr 合金相。基体中的 Ti 原子由于其较高的活性,且可被 Cr 原子携带向外扩散,因此部分 Ti 原子穿过 Al_2O_3 层,在表面被氧化成 TiO_2 。

随着温度升高,元素扩散能力增强,涂层表面生成 Al_2O_3 层所产生的热应力显著变大。热应力通过氧化膜的塑性变形得到释放,在 Al-Cr 涂层表面出现了“鼓包”。“鼓包”的产生,造成 Al_2O_3 膜上的裂纹、小孔洞等缺陷增多,O 透过鼓包扩散至内部,与 Ti,Cr 原子形成 TiO_2 , Cr_2O_3 等氧化物。另外,Al 内扩散以及 Cr 外扩散,使得在 850 °C 时形成了稳定的 Al_5Cr_5 合金相。O 的扩散,消耗了 AlCr 合金层中 Al 原子,而在 Al_2O_3 层下形成了一层致密、连续的 Cr_2O_3 保护性膜,阻止 O 继续侵入扩散。大量 Ti 原子向外扩散,形成了 TiCr 相。而基体中的 Al 外扩散,在 TiCr 相中也会导致析出 $\text{Ti}(\text{Al},\text{Cr})_2$ 相。

950 °C 时,氧化膜中热应力进一步增大,氧化层产生裂纹,鼓包破裂。随着表层 Al_2O_3 膜的剥落和修复,Al 层不断被消耗,Ti 扩散至氧化层表面,生成了生长速率极高的 TiO_2 。同时,Cr 外扩散,遇到 O 被氧化成 Cr_2O_3 ,超过 900 °C 时 Cr_2O_3 与 O 进一步反应,生成挥发性的 CrO_3 ,随着时间增长,Cr 不断被氧化成 CrO_3 。EDS 结果表明,在 Cr_2O_3 膜和基体之间,有一层连续的 Al_2O_3 膜,这是由“Cr 效应”所致。该效应认为,在 Ti-Al-Cr 三元体系中,一定量的 Cr 有利于促进低含量的 Al 形成连续的 Al_2O_3 层。该层对阻止 O 原子向基体的侵入扩散起到一定的作用。贫 Ti 区边缘 Ti 含量最低,出现柯肯达尔空隙,为 Ti 向外扩散所致。

3 结 论

(1) 本文采用双辉等离子渗金属技术和多弧离

子镀技术的联合工艺制备的 Al-Cr 复合涂层致密、无明显孔洞。涂层与基体结合良好,无贯穿性裂纹,总厚度约为 48 μm ,分别为 Al 沉积层 (7 μm)、AlCr 合金层 (10 μm)、Cr 沉积层 (3 μm)、扩散层 (20 μm)。

(2) 750 °C 时,Al-Cr 涂层形成了致密的 Al_2O_3 层,阻止 O 元素向内扩散侵蚀基体。850 °C 时出现层状氧化膜结构,表层 Al_2O_3 通过塑性变形释放热应力,并有 $\text{Ti}(\text{Al},\text{Cr})_2$ 相析出。950 °C 时,外氧化层疏松多孔,Ti 显著外扩散并生成 TiO_2 。Cr 的存在提高了涂层的自修复能力,并促进了 Al 的选择性氧化。Al-Cr 复合涂层显著提高了 TC21 合金的高温抗氧化性。

参考文献:

- [1] 魏东博,张平则,姚正军,等. TC4 合金双辉等离子渗 Cr 高温氧化行为 [J]. 材料热处理学报, 2011, 32(10):146-150.
Wei Dongbo, Zhang Pingze, Yao Zhengjun, et al. Effect of double glow plasma surface chromizing on high-temperature oxidation resistance of TC4 titanium alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(10):146-150.
- [2] Wei Dongbo, Zhang Pingze, Yao Zhengjun, et al. Cyclic oxidation behavior of plasma surface chromizing coating on titanium alloy Ti-6Al-4V[J]. Applied Surface Science, 2012 (261):800-806.
- [3] He Z Y, Wang Z X, Zhang F, et al. Oxidation behavior of TiAl alloy treated by plasma surface chromizing process[J]. Surface and Coatings Technology, 2013(228):S287-S291.
- [4] 李世平,刘道新,李瑞鸿,等. 喷丸强化与表面完整性对 TC21 钛合金疲劳性能的影响 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(12):1921-1926.
Li Shiping, Liu Daoxin, Li Ruihong, et al. Influence of shot peening and surface integrity on fatigue properties of TC21 titanium alloy[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(12):1921-1926.
- [5] Shao Hui, Zhao Yongqing, Ge Peng. In situ SEM observations of tensile deformation of the lamellar microstructure in TC21 titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2013(559):515-519.
- [6] 牛蓉蓉. 热处理冷却速率对 TC21 钛合金组织与性能的影响[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
Niu Rongrong. Influence of heat treatment cooling rate on Microstructure and properties of TC21 titanium alloy [D]. Xi'an: Xian University of Architecture

- and Technology, 2010.
- [7] 李文川, 蔡俊, 凌国平. Al-Cr 涂层低温扩散制备及其相组成的研究[J]. 金属学报, 2011, 47(2):231-235.
Li Wenchuan, Cai Jun, Ling Guoping. Al-Cr coatings prepared by diffusion at low temperature and its phase characterization[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(2):231-235.
- [8] 林翠, 杜楠, 李晓刚. 电子束蒸发沉积 Al-Cr 合金涂层研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(5):257-261.
Du Cui, Du Nan, Li Xiaogang. Deposition of aluminum-chromium alloy coating by electron beam evaporation plating [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2003, 23(5):257-261.
- [9] 尹磊. 双辉等离子渗技术制备 Cr-Si、Al-Cr、Al-Cr-Si 氧化物涂层及其性能研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
Yin Lei. Preparation and properties of Cr-Si, Al-Cr, Al-Cr-Si oxide coatings by double glow discharge plasma technique[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011.
- [10] 赵宇光, 周伟, 彭新, 等. 钛合金表面低氧压熔结 Al-Cr 涂层及其高温抗氧化性 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2004, 34(4):521-526.
Zhao Yuguang, Zhou Wei, Peng Xin, et al. Low oxygen pressure self-fused Al-Cr coatings formed on surface of Ti alloy and their oxidation resistance [J]. Journal of Jilin University :Engineering and Technology Edition, 2004, 34(4):521-526.
- [11] 黄敏, 李克智, 李贺军, 等. 等离子喷涂炭/炭复合材料 Cr-Al-Si 涂层显微结构及高温抗氧化性能 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(5):109-112.
Huang Min, Li Kezhi, Li Hejun, et al. Investigation on microstructure and oxidation resistance of Cr-Al-Si coating for carbon/carbon composites by plasma spraying [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(5):109-112.
- [12] Wei Dongbo, Zhang Pingze, Yao Zhengjun, et al. Oxidation of double-glow plasma chromising coating on TC4 titanium alloys [J]. Corrosion Science, 2013, 66:43-50.
- [13] Wang Lei, Zhang Shihong, Chen Zhong, et al. Influence of deposition parameters on hard Cr-Al-N coatings deposited by multi-arc ion plating [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(8):3629-3636.
- [14] 宁珍珍, 余传杰, 李明, 等. 磁控溅射制备多孔柱状晶 ZrO_2 薄膜 [J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(2):143-150.
Ning Zhenzhen, Yu Chuanjie, Li Ming, et al. Preparation and characterization of nanoporous columnar ZrO_2 films by reactive magnetron sputtering [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(2):143-150.
- [15] 国防科学技术工业委员会. HB 5258-2000. 钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法 [S]. 2000.

