

文章编号: 1000-8055(2026)08-20250331-08

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250331

镍基单晶高温合金表面铝化物涂层 高温氧化机理

李艳明, 王 全, 刘 欢, 胡 鹏, 高志坤

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 镍基单晶高温合金基体上沉积 Al 涂层和 Co-Al 涂层, 针对 1 000 °C 高温环境中 200 h 氧化后的实验样品展开系统性研究工作。实验数据表明: 合金基体与两种涂层材料的氧化动力学过程均呈现典型的抛物线型变化趋势。相较于未沉积涂层实验样品和单一 Al 涂层, Co-Al 涂层的氧化速率明显降低。经过高温氧化实验后, 可以观察到合金基体表面存在大量孔洞结构及裂纹缺陷, 内氧化现象和内氮化反应的发生使得材料抗氧化性能显著下降。与单一 Al 涂层相比, Co-Al 涂层在高温氧化后形成的 Al_2O_3 保护膜展现出更优异的抗高温特性, 该保护膜缺陷密度较低且纯净度较高, 结构更为致密。实验还发现 Co 元素的引入有效延缓了 $\beta\text{-NiAl}$ 相向 $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ 相的转变过程, 难熔金属元素的外扩散行为受到明显抑制, 有力促进连续致密 Al_2O_3 保护膜的形成。

关 键 词: Al 涂层; Co-Al 涂层; 高温氧化; 相转变; Al_2O_3 保护膜

中图分类号: V232.4; TG136.1

文献标志码: A

High-temperature oxidation mechanism of aluminide coatings on the surface of nickel-based single crystal superalloys

Li Yanming, Wang Quan, Liu Huan, Hu Peng, Gao Zhikun

(Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Al coatings and Co-Al coatings are generally deposited on the substrate of nickel-based single crystal superalloys. A systematic study was conducted on the experimental samples after 200 h of oxidation in a high-temperature environment at 1 000 °C. The experimental data showed that the oxidation kinetics of both the alloy substrate and the two coatings materials exhibited a typical parabolic variation trend. Compared with the alloy substrate and Al coating, the oxidation rate of the Co-Al coating was significantly reduced. After the high-temperature oxidation experiment, a large number of hole structures and crack defects can be observed on the surface of the alloy substrate. The occurrence of internal oxidation and internal nitridation reactions significantly reduced the oxidation resistance of the material. Compared with the Al coating, the Al_2O_3 protective film formed by the Co-Al coating after high-temperature oxidation exhibited more excellent high-temperature resistance, with lower defect density, higher purity, and a denser structure. The experiment also found that the introduction of Co effectively delayed the phase transformation process from $\beta\text{-NiAl}$ phase to $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ phase, and the outward diffusion behavior of refractory metal elements was significantly inhibited, providing favorable conditions for the formation of a continuous and dense Al_2O_3 protective film.

收稿日期: 2025-07-15

作者简介: 李艳明(1990—), 男, 工程师, 硕士, 从事航空发动机材料应用研究。E-mail: 260535498@qq.com

引用格式: 李艳明, 王全, 刘欢, 等. 镍基单晶高温合金表面铝化物涂层高温氧化机理[J]. 航空动力学报, 2026, 41(8): 20250331. Li Yanming, Wang Quan, Liu Huan, et al. High-temperature oxidation mechanism of aluminide coatings on the surface of nickel-based single crystal superalloys[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(8): 20250331.

Keywords: Al coating; Co-Al coating; high-temperature oxidation; phase transformation; Al_2O_3 protective film

随着高推质比航空发动机、燃气轮机的技术变革,涡轮叶片材料性能的提升需求日益迫切,高温力学性能、抗高温氧化性能以及耐热腐蚀性能成为关键指标^[1-4]。晶粒取向的特殊性及晶界数量的降低,优异抗高温特性在镍基单晶高温合金中得以体现,该材料也成为制造先进涡轮叶片的首选方案。然而,涡轮叶片在高温环境下长时间工作,由于高温氧化现象导致叶片基体材料损伤问题频繁发生。防护涂层通常被施加于叶片表面以提高整体抗高温氧化能力,而基体材料则负责维持高温力学性能的稳定性,涂层与基体的协同作用对于延长涡轮叶片使用寿命具有显著效果^[5-7]。

涡轮叶片内腔一般采用复杂特殊的气冷结构设计,通常采用包埋法、化学气相沉积法方法制备的铝化物涂层对内腔进行高温防护^[8-9]。与单一的铝涂层相比,加入 Si、Cr 和 Pt 等元素形成二元或三元结构的铝化物涂层具有更好的抗氧化性能。Liu 等^[10-11]研究了钴基高温合金表面涂层的高温性能,结果表明涂层的高温氧化分为初始氧化、稳定氧化和加速氧化这 3 个阶段。Ti 的加入加速了涂层的氧化分解,促使氧化进程由稳定阶段过渡到加速阶段。Yang 等^[12-13]研究了高温合金表面 Al-Si 涂层的高温氧化行为,在涂层中加入 Si 元素可以防止元素的涂层和基体之间的扩散,保证基体中 Al 的含量。Al-Si 涂层表面可形成致密、连续的 Al_2O_3 保护膜,防止了氧向合金基体的渗透,具有良好的抗氧化性。Ma 等^[14]研究得出 Cr-Al 涂层拥有一定的抗高温氧化性能,但是 Al 含量要控制在一定范围内。Pt-Al 涂层具有优异的抗高温氧化性能,Pt 元素可以有效改善 Al 元素的选择性氧化,增强 Al_2O_3 膜与合金基体的黏附性,延缓基体高温转变,延长涂层使用寿命^[15-17]。

过往研究多集中于多晶态材料及定向凝固合金材料体系,同时针对 Si、Cr、Pt 等元素改性的铝基涂层已有较多探讨,然而关于 Co 元素改性铝化物涂层的系统性研究仍显不足。因此,本实验采用化学气相沉积技术在镍基单晶高温合金基材表面制备 Al 涂层与 Co-Al 涂层,开展高温氧化实验研究工作。

1 实验

1.1 实验样品

镍基单晶高温合金作为实验用基材,主要化

学成分(质量分数,%)为 Cr: 6.5~7.5, Co: 7.0~8.0, W: 4.5~5.0, Al: 6.0~6.5, Ta: 6.0~7.0, Mo: 1.0~1.5, Hf: 0.1~0.5, Re: 2.5~3.5, Ni 为余量。将合金材料加工成 30 mm × 10 mm × 1.5 mm 的片状实验样品,通过砂纸打磨处理,超声波清洗表面油污,烘干后待用。

Al 涂层和 Co-Al 涂层均采用化学气相沉积(CVD)设备制备涂层,样品数量分别为 3 个。Co-Al 涂层的制备包括 Co 层的沉积和表面的铝化反应。Al 涂层制备关键参数:CVD 温度选择为 600~750 °C,时间为 5~10 h,前驱体成分为 AlCl_3 , Ar 气为载体, H_2 为还原气体,最大沉积速率可达 2 $\mu\text{m/h}$,孔隙率可达 0.5%。Co-Al 涂层的制备包括钴层的沉积和表面的铝化反应。钴层的沉积关键参数:CVD 温度选择为 500~650 °C,时间为 1~3 h,前驱体成分为 CoCl_3 , Ar 气为载体, H_2 为还原气体,最大沉积速率可达 5 $\mu\text{m/h}$ 。铝层的制备工艺与上述基本相同。最后一步为扩散处理,实验温度为 850~1 050 °C,保温时间为 5~15 h,全程 Ar 气氛保护,促进钴铝元素互扩散^[18-19]。

1.2 实验方法

采用 HB 5258-2000《钢及高温合金的抗氧化性测定实验方法》标准要求开展实验。实验温度为 1 000 °C,实验时间为 200 h。采用电子分析天平表征实验样品氧化前后的质量变化情况,基于增重法绘制氧化动力学曲线。通过配备成分分析组件(EDS)的扫描电子显微镜(SEM)对高温氧化产物的表面形貌特征、截面组织结构以及元素分布情况进行表征。通过 X 射线衍射仪(XRD)对高温氧化产物进行物相分析。

2 结果与讨论

2.1 原始涂层结构

对 Al 涂层、Co-Al 涂层实验样品表面进行物相分析,图 1 展示纵坐标相对强度与横坐标衍射角 2θ 的关系,Al 涂层中为单一的 $\beta\text{-NiAl}$ 相。Co-Al 涂层中为单一的 $\beta\text{-(Ni, Co)Al}$ 相,Co 主要以取代 NiAl 相中的 Ni 的形式固溶存在于 NiAl 相中^[20]。

图 2 为原始涂层结构形貌,图 2(a)和图 2(c)分别展示了 Al 涂层、Co-Al 涂层实验样品表面微观形貌,两者表面均呈现较规则的典型网状结构。

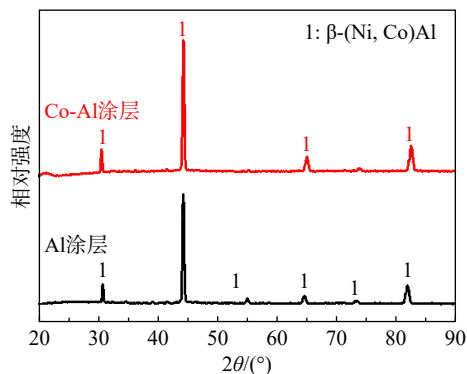


图 1 Al 涂层和 Co-Al 涂层沉积态表面 XRD 图

Fig. 1 Surface XRD patterns of Al coating and Co-Al coating in the deposited state

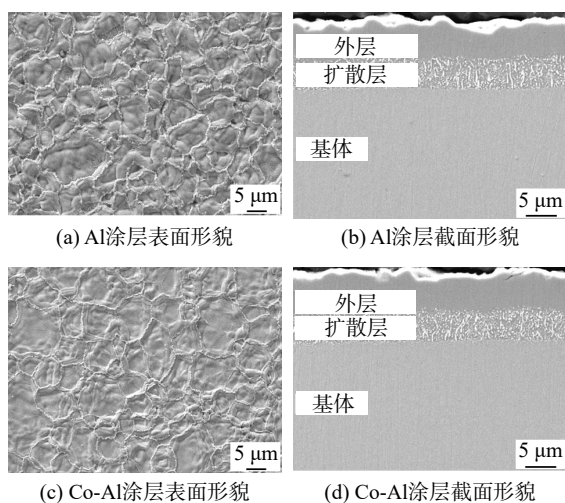


图 2 原始涂层结构形貌

Fig. 2 Original coating structure morphology

其中, Al 涂层主要元素成分(质量分数, %)为 Cr: 1.1, Co: 3.9, Al: 32.0, 其余为 Ni; Co-Al 涂层主要元素成分为 Cr: 1.0, Co: 5.0, Al: 30.0, 其余为 Ni。涂层中含有少量的 Co 和 Cr 元素, 表明在制备涂层过程中存在元素扩散现象, 从合金基体向涂层区域迁移, 这些元素应该是置换固溶于 β 相中。

图 2(b) 和图 2(d) 分别呈现了 Al 涂层、Co-Al 合金的实验样品截面微观形貌, 涂层沉积厚度均匀致密, 过渡界面未见明显的缺陷。涂层为双层结构, 最外层为均质单一相, 与 XRD 结果分析一致(见图 1)。内层为扩散层, 大量的白色析出相呈现弥散分布特征。通过能谱分析表明, 颗粒状相富 W 和 Ta, 应该为 W 和 Ta 元素在涂层形成过程中扩散作用所致的碳化物。

2.2 氧化产物物相分析

图 3 为合金基体氧化后 XRD 图谱, 合金在 1000 °C 氧化 200 h 后, 表面形成 NiO、Cr₂O₃ 和

Al₂O₃ 等混合型氧化物。图 4、图 5 为 Al 涂层和 Co-Al 涂层氧化后的 XRD 图谱, 产物均出现 Al₂O₃ 和 γ' -Ni₃Al 相, γ' -Ni₃Al 相是由表面氧化铝膜下的 β -NiAl 相转变而来^[21]。氧化过程中形成 Al₂O₃ 产物, 导致涂层中 Al 元素含量消耗减少。Ni、Cr、Co 等元素的外扩散, 引起 Al 元素的内扩散, 会进一步降低 Al 含量, 两者共同导致 β -NiAl 相向 γ' -Ni₃Al 相的转变^[22-23]。与 Al 涂层相比, Co-Al 涂层中 β -NiAl 相在高温氧化后的衍射峰强度更高, 表

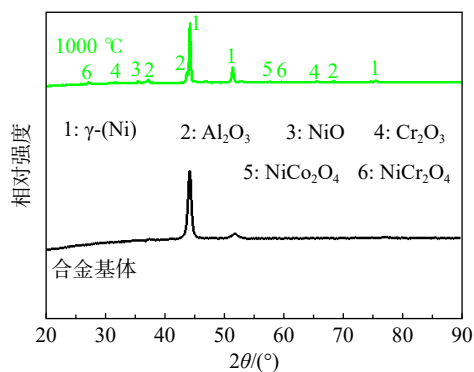


图 3 氧化后基体合金 XRD 图谱

Fig. 3 XRD pattern of the oxidized base alloy

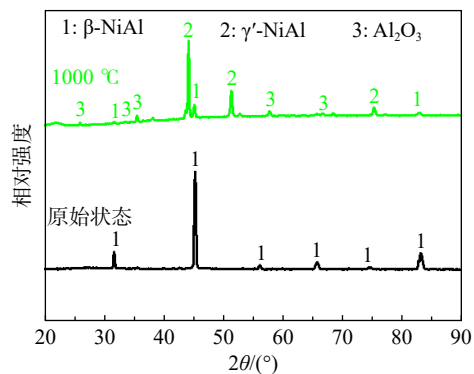


图 4 氧化后 Al 涂层 XRD 图谱

Fig. 4 XRD pattern of the oxidized Al coating

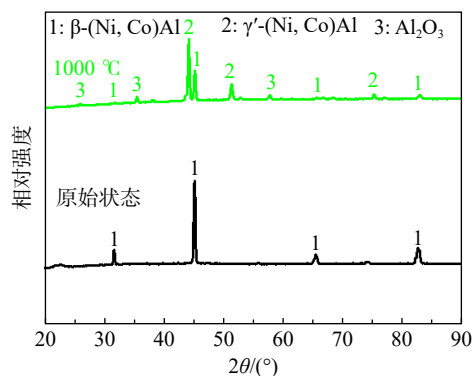


图 5 氧化后 Co-Al 涂层 XRD 图谱

Fig. 5 XRD pattern of the oxidized Co-Al coating

明 β -NiAl 相向 γ' -Ni₃Al 相的转变速率相对较慢。Co 元素固溶在 β -NiAl 相中形成 β -(Ni, Co)Al 相, 降低了 Al 的扩散速率, 抑制 γ' -Ni₃Al 相的形成, 提高了涂层的抗氧化性。

2.3 氧化动力学曲线

基于增重法绘制基体合金、Al 涂层、Co-Al 涂层实验样品的氧化动力学曲线, 结果如图 6 所示, 氧化动力学曲线基本相似且均近似呈现抛物线特征。在 0~50 h 实验时间内, 质量增加较为迅速, 反应速率明显加快, 这是由于氧化的初始阶段, 氧与实验样品表面充分接触, 此阶段界面反应起到主导作用; 在 50~200 h 实验时间内, 随着实验时间的增加, 质量增加变得缓慢, 应该是实验样品表面形成的氧化膜发挥了作用, 外界氧向基体扩散的过程受到阻碍, 此阶段主要是由氧在连续的氧化膜中的扩散速度控制的^[24]。

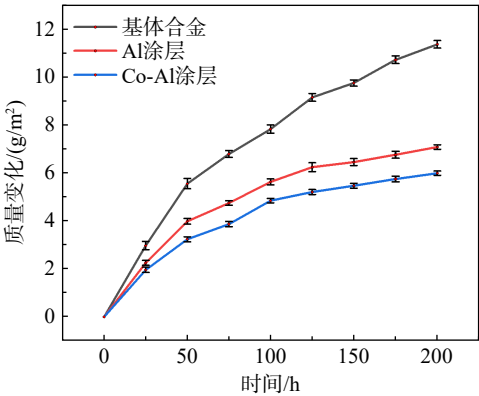


图 6 基体合金、Al 涂层和 Co-Al 涂层氧化动力学曲线
Fig. 6 Oxidation kinetics curves of base alloy, Al coating and Co-Al coating

Co-Al 涂层 200 h 氧化后平均质量增加为 5.99 g/m², Al 涂层 200 h 氧化后平均质量增加 7.08 g/m², 合金基体 200 h 氧化后平均质量增加 11.36 g/m²。从图 6 中可看出氧化产物的质量变化基本符合抛物线方程, ΔM 为质量变化量, K_p 氧化速率常数, T 氧化时间, C 为常数, 其方程表示为:

$$(\Delta M)^2 = K_p T + C \tag{1}$$

选择氧化实验中“氧化膜稳定生长”的时间段(排除初期快速氧化异常阶段)进行方程拟合, 根据本实验数据计算出合金基体、Al 涂层和 Co-Al 涂层合金氧化速率常数(见表 1), 通过数值对比可以看出, 涂层氧化速率小于合金基体, 表明合金表面施加涂层可以延缓氧化反应的进行, Co 元素的加入可以改善 Al 涂层的抗氧化性能。

表 1 基体合金、Al 涂层和 Co-Al 涂层氧化速率
Table 1 Oxidation rates of base alloy, Al coating and Co-Al coating

材料	氧化速率/(g ² /(m ² ·h))	拟合区间/h	拟合优度
合金基体	0.698 38±0.054 28	50~200	0.962
Al 涂层	0.214 91±0.016 76	25~200	0.968
Co-Al 涂层	0.191 99±0.014 69	25~200	0.971

2.4 氧化产物表面分析

基体合金、Al 涂层、Co-Al 涂层实验样品氧化产物表面形貌见图 7, 基体合金表面产物大量脱落, 产生较多裂纹和空洞等缺陷, 生成混合型氧化物(见表 2)。Al 涂层和 Co-Al 涂层表面基本未见大量的涂层剥落现象, Co-Al 涂层表面存在更少的孔洞和裂纹, 呈现更好的抗氧化性。对 Al 涂层表面不同区域进行 EDS 分析, Al 涂层深色区域(Al 的质量分数为 62.6%)保持较完整, Al 涂层明亮区域(Al 的质量分数为 53.4%)存在少量的裂纹和孔洞, Al 含量仍然保持较高的水平, 应为外层的氧化膜发生脱落后新生成 Al₂O₃ 膜所致, 此现象被视为氧化膜的自愈合过程。当保护性氧化膜在高温过程中产生局部破裂, 涂层系统 Al 元素会扩散到损伤处, 自发地在损伤处形成一层新的、

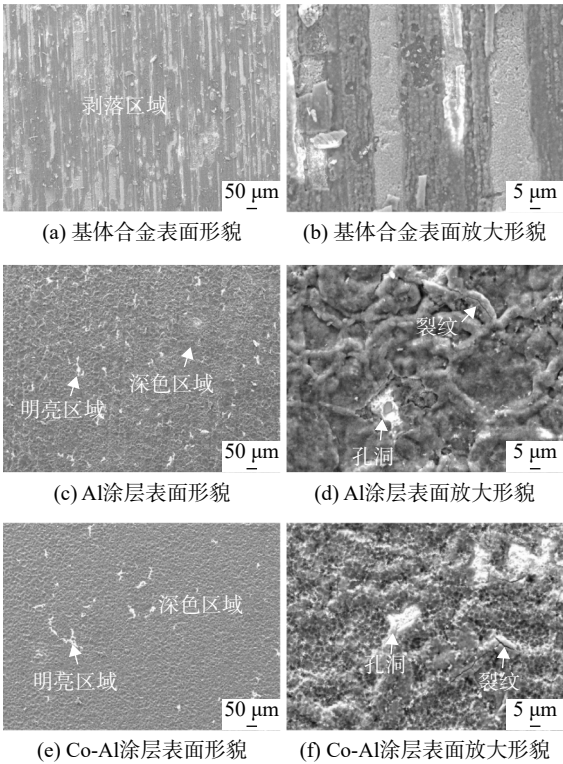


图 7 合金基体、Al 涂层和 Co-Al 涂层表面形貌
Fig. 7 Surface morphologies of the alloy substrate, Al coating, and Co-Al coating

表 2 不同表面区域化学组成
Table 2 Chemical composition of different surface areas

区域	质量分数/%				
	Al	O	Ni	Cr	Co
图 8(a)	21.0	23.4	32.3	15.8	7.5
图 8(c)(深色)	62.6	30.9	5.5	0.1	0.9
图 8(c)(明亮)	53.4	25.3	17.1	1.1	3.1
图 8(e)(深色)	62.9	32.9	3.3	0.4	0.5
图 8(e)(明亮)	54.8	21.8	15.4	2.5	5.5

连续的 Al_2O_3 , 最初形成的不稳定过渡型 Al_2O_3 会逐渐变为最稳定的 Al_2O_3 膜, 从而恢复其防护能力的过程。氧化反应启动后, Co-Al 涂层的最外层与 O 充分接触, 生成完整致密的 Al_2O_3 膜, Co 元素的引入减缓 Al 元素外扩散速率, O 元素基本沿着 Al_2O_3 膜的氧化膜孔洞和微裂纹等缺陷区域生长扩散, 进一步保证了 Co-Al 涂层表面的完整性, 呈现出较少的孔洞和微裂纹等表面损伤^[25]。

2.5 氧化产物截面分析

基体合金、Al 涂层、Co-Al 涂层样品氧化产物截面形貌见图 8, 不同截面区域化学组成结果见表 3, 基体氧化产物层可见呈现多层结构, 内部为连续分布的黑色 Al_2O_3 , 靠近基体侧也生成大量 Al 和 N 的黑色块状氮化物, 可见发生了内氧化和内氮化现象。

Al 涂层、Co-Al 涂层氧化产物层均可见 3 层结构: 外层、中间层和扩散区。外层均为 Al_2O_3 层, Al 涂层形成的 Al_2O_3 层厚度相对不均匀, Co-Al 涂层形成的 Al_2O_3 层更加纯净、均匀、致密。Al 涂层的中间层由少量颜色较深的 $\beta\text{-NiAl}$ 相和大量浅色的 $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ 相组成, 此区域的 Al 元素分别向涂层表面外扩散、向基体内扩散, 导致 Al 元素质量分数的减少, 进而使 $\beta\text{-NiAl}$ 相向 $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ 相的转变速度加快, $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ 相逐渐长大成为氧的扩散通道, 更加促进涂层的氧化。

与 Al 涂层相比, Co-Al 涂层的中间层出现更加少量的 $\gamma'\text{-Ni}_3\text{Al}$ 相, Co 的加入抑制 Al 在 $\beta\text{-Ni}$

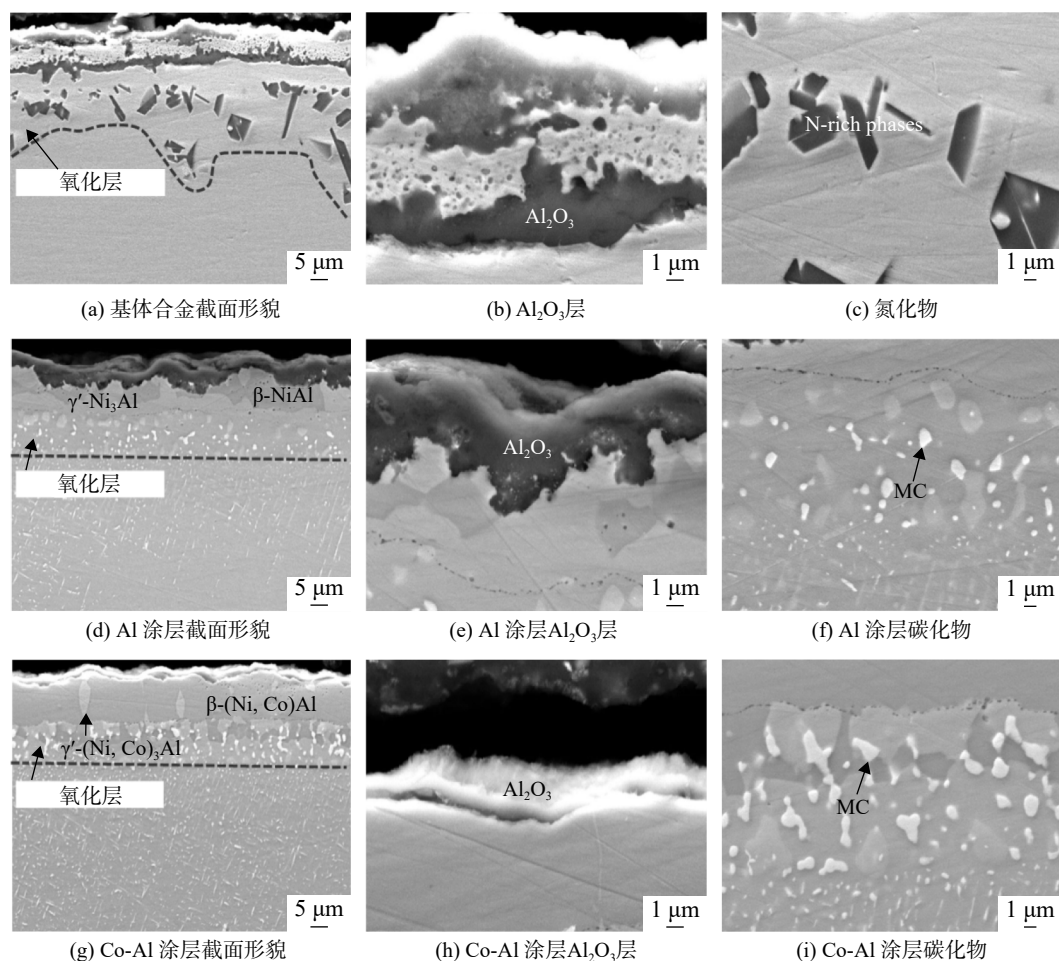


图 8 合金基体、Al 涂层和 Co-Al 涂层截面形貌

Fig. 8 Cross-sectional morphologies of the alloy substrate, Al coating, and Co-Al coating

Al 相中的扩散,减缓了 β -NiAl 的相转变过程。同时,基体元素的外扩散也被抑制,进而改善了 Al 元素的选择性氧化机制,有利于在涂层表面形成更加厚度均匀、纯净致密的 Al_2O_3 膜。伴随着 Al_2O_3 膜生长速率的减缓,氧化膜之间的应力得以释放, Al_2O_3 膜的脱落、裂纹程度也会大幅度降低,与图 8 中两种涂层的表面形貌分析结果表现一致。

Al 涂层和 Co-Al 涂层的扩散区均存在碳化物析出相。随着温度升高,Al 涂层扩散层厚度增加,碳化物总体数量较少且分布不均匀。相反地,Co-Al 涂层扩散层厚度保持基本不变,碳化物总体数量较多、尺寸较大、分布较均匀,碳化物析出相进一步阻止 Co、Al 等基体元素的互扩散,提高 Co-Al 涂层的抗高温氧化性能。

对于本实验所采用的合金基体材料而言,其氧化机理示意图如图 9 所示,高温氧化开始后合金基体内部生成大量的氧化物 Al_2O_3 和氮化物 AlN ,氧化物 Al_2O_3 更加靠近高温空气的外侧,氮化物 AlN 更加靠近基体的内侧。 Al_2O_3 的热力学稳定性优于 AlN ,在相同环境条件下优先生成稳

定性更高的 Al_2O_3 。相比 N 元素而言,O 元素也具有较高的反应活性,当空气向合金基体的扩散渗入,Al 与 O 优先发生反应,随着扩散深度的继续增加,O 逐渐反应被消耗引起分压降低,N 的分压反而升高,N 会向基体内部更深层渗透而生成大量的氮化物 AlN ^[24, 26]。

对于本实验的 Al 涂层和 Co-Al 涂层而言,其氧化机理示意图如图 10 所示,高温氧化开始后,涂层表面易先形成 Al_2O_3 膜,此时的 Al_2O_3 膜下方 β -NiAl 相中仍然含有较高含量的 Al 元素,随着氧化过程的深入,Al 元素向 Al_2O_3 膜外扩散、向合金基体方向内扩散,促进涂层中发生 β -Ni-Al 相向 γ' - Ni_3Al 相的转变,空气中的氧更加容易从 γ' - Ni_3Al 相通道扩散到基体内部,导致基体元素逐渐发生氧化, β -NiAl 层也逐渐变薄;同时,基体合金中的 Ni、Co、Cr 等基体元素透过 Al_2O_3 膜向表面扩散,形成了疏松多孔的 NiO 、 Cr_2O_3 和 Al_2O_3 混合型氧化物,高温会使氧化物之间产生由于体积膨胀而引起的局部应力,当应力增加到一定程度,容易出现裂纹、脱落等现象,加快涂层失

表 3 不同截面区域化学组成
Table 3 Chemical composition of different cross-sectional areas

样品	区域	质量分数/%									
		Al	O	Ni	Cr	Co	Ta	W	Re	Mo	N
基体合金	Al_2O_3	64.3	33.2	1.7	0.5	0.3					
	AlN	56.6		21.9	3.4	3.3					14.7
Al 涂层	β -NiAl	16.4		73.5	3.9	6.1					
	γ' - Ni_3Al	6.0		70.4	2.0	7.5	12.1	1.4		0.6	
	Al_2O_3	56.9	40.3	2.2	0.4	0.2					
	MC	0.9		18.8	10.4	9.7	3.9	26.8	24.9	4.6	
	β -(Ni,Co)Al	17.1		71.6	3.5	7.8					
Co-Al 涂层	γ' -(Ni,Co) $_3$ Al	6.0		71.1	2.0	7.6	11.6	1.4		0.4	
	Al_2O_3	61.0	32.7	5.1	0.6	0.6					
	MC	0.7		12.9	12.8	10.8	2.4	27.8	26.8	5.9	

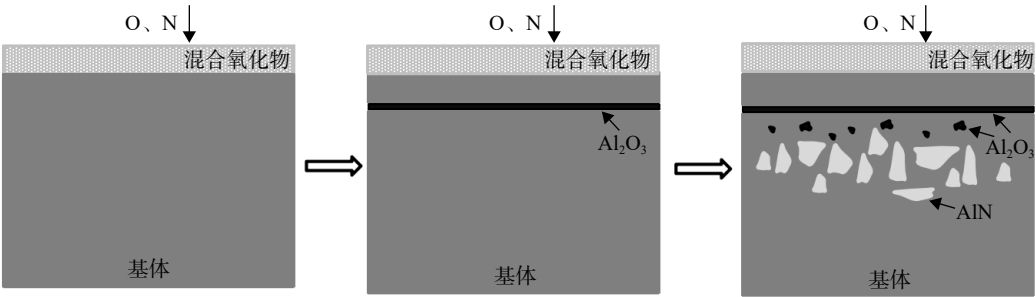


图 9 合金基体氧化机理示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the oxidation mechanism of the alloy matrix

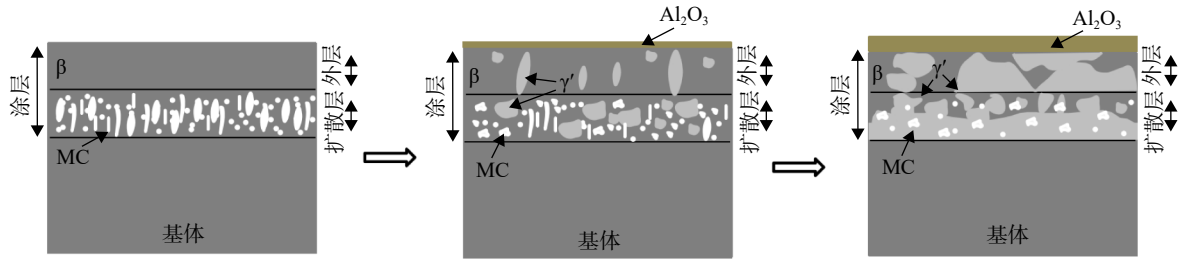


图 10 涂层氧化机理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of coating oxidation mechanism

效^[27]。

Co 元素的引入使得 β -NiAl 向 γ' -Ni₃Al 的转变进程变得缓慢, 涂层能够长时间地处于稳定的 β -NiAl 相。同时, Al 元素的选择性氧化机制得以优化, 更易形成高度完整的 Al₂O₃ 保护膜, 减弱了氧化膜层内的应力水平, 减小了氧化膜破裂风险。难熔金属元素形成的碳化物析出相也阻碍了元素之间的相互扩散行为, 从而提高了 Co-Al 涂层的抗高温氧化性能^[21, 28-29]。

3 结 论

通过研究镍基单晶高温合金基体上 Al 涂层和 Co-Al 涂层在 1 000 ℃、200 h 条件下的氧化行为, 得到如下结论:

1) 镍基单晶高温合金基体、Al 涂层和 Co-Al 涂层的氧化动力学曲线均基本符合抛物线规律, Co-Al 涂层的氧化速率小于合金基体和 Al 涂层。

2) 合金基体氧化过程中形成多层 Al₂O₃ 保护膜, 表明合金具有一定的抗高温氧化能力, 但合金基体内部存在内氧化和内氮化现象, 抗氧化性能有所降低。

3) 与合金基体相比, 涂层可以提供更好的抗高温氧化性能, Co-Al 涂层性能表现更加优异。

4) Co 元素的加入减缓 β -NiAl 相向 γ' -Ni₃Al 相的转变速率, 优化 Al 元素的选择性氧化机制, 阻碍基体中难熔金属元素的外扩散行为, 易生成更加连续、致密、纯净的 Al₂O₃ 保护膜, 提高 Co-Al 涂层的抗高温氧化性能。

参考文献:

- [1] 赖建和. 航空发动机涡轮叶片冷却技术综述[J]. 新型工业化, 2021, 11(8): 39-40.
Lai Jianhe. Summary of cooling technology for aero-engine turbine blades[J]. The Journal of New Industrialization, 2021, 11(8): 39-40. (in Chinese)
- [2] 高志坤, 王威, 李艳明, 等. 基于显微组织演变的涡轮叶片损伤分析[J]. 航空发动机, 2022, 48(1): 121-126.

- Gao Zhikun, Wang Wei, Li Yanming, et al. Damage analysis of turbine blades based on microstructure evolution[J]. *Aeroengine*, 2022, 48(1): 121-126. (in Chinese)
- [3] 张俊峰, 胡锡文, 崔凯, 等. 涡轮叶片典型交叉肋结构的气热分析[J]. 风机技术, 2022, 64(1): 54-59.
Zhang Junfeng, Hu Xiwen, Cui Kai, et al. Aero-thermal analysis of cross ribbed structure of turbine blade[J]. *Compressor, Blower & Fan Technology*, 2022, 64(1): 54-59. (in Chinese)
- [4] 刘迪, 高潘, 蔡杰, 等. GH80A 经强流脉冲电子束改性后的高温氧化行为研究[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 157-165.
Liu Di, Gao Pan, Cai Jie, et al. High temperature oxidation behavior of nickel-based superalloy GH80A treated by high-current pulsed electron beam[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(11): 157-165. (in Chinese)
- [5] 郭磊, 高远, 叶福兴, 等. 航空发动机热障涂层的 CMAS 腐蚀行为与防护方法[J]. 金属学报, 2021, 57(9): 1184-1198.
Guo Lei, Gao Yuan, Ye Fuxing, et al. CMAS corrosion behavior and protection method of thermal barrier coatings for aeroengine[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(9): 1184-1198. (in Chinese)
- [6] 李一民, 王升正, 范苛, 等. 基于电站风机表面保护的热喷涂和聚合物涂层研究[J]. 风机技术, 2020, 62(4): 68-74.
Li Yimin, Wang Shengzheng, Fan Ke, et al. Thermal spraying and polymer coating based on fan surface protection in power plant[J]. *Compressor, Blower & Fan Technology*, 2020, 62(4): 68-74. (in Chinese)
- [7] 陈景阳, 荆甫雷, 杨俊杰. 镍基单晶高温合金热机械疲劳行为与寿命建模[J]. 航空动力学报, 2021, 36(5): 897-906.
Chen Jingyang, Jing Fulei, Yang Junjie. Thermo-mechanical fatigue behavior and life modelling in nickel based single crystal superalloy[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(5): 897-906. (in Chinese)
- [8] 郭殿品, 张尊礼, 张凡云, 等. 耐热扩散涂层在燃气轮机上的应用现状及趋势[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(1): 59-62.
Guo Dianpin, Zhang Zunli, Zhang Fanyun, et al. High temperature corrosion resistant coatings for parts of gas turbines hot section[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2005, 17(1): 59-62. (in Chinese)
- [9] 李克, 张莉, 丁志敏. 复杂型腔空心叶片气相渗铝工程化应用研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(20): 41-44.
Li Ke, Zhang Li, Ding Zhimin. Research on engineering application for vapor aluminizing process of hollow blade[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(20): 41-44. (in Chinese)
- [10] Liu P S, Liang K M, Gu S R. High-temperature oxidation behavior of aluminide coatings on a new cobalt-base superalloy in air[J]. *Corrosion Science*, 2001, 43(7): 1217-1226.
- [11] Liu P S, Liang K M. A new way to evaluate the high-temperature

- oxidation life of aluminide coatings on co-base superalloys in air[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 126(1): 64-68.
- [12] Yang Shiwei, Zhang Fanyun, Li Li, et al. High temperature oxidation morphology of Al-Si coating on the superalloy K438[J]. *High Temperature Material Processes (an International Quarterly of High-Technology Plasma Processes)*, 2005, 9(4): 619-624.
- [13] Yang S, Liu H, Zhu L, et al. High temperature oxidation resistance of Al-Si coating on K4104 superalloy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2006, 26(6): 371-375.
- [14] Ma Jiaojiao, Meng Chuiyi, Wang Hui, et al. Effect of Al content on the high-temperature oxidation resistance and structure of CrAl coatings[J]. *Coatings*, 2021, 11(12): 1434.
- [15] Vialas N, Monceau D. Effect of Pt and Al content on the long-term, high temperature oxidation behavior and interdiffusion of a Pt-modified aluminide coating deposited on Ni-base superalloys[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(7): 3846-3851.
- [16] Ebach-stahl A, Fröhlich M. Oxidation study of Pt-Al based coatings on γ -TiAl at 950 °C[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 287: 20-24.
- [17] Das D K. Microstructure and high temperature oxidation behavior of Pt-modified aluminide bond coats on Ni-base superalloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2013, 58(2): 151-182.
- [18] Ren Weipeng, Xiao Chengbo, Li Qing, et al. Microstructure evolution of cobalt aluminide coating on nickel-based superalloys during exposure at 1050 °C[J]. *Vacuum*, 2014, 106: 39-45.
- [19] 任维鹏, 李青, 黄强, 等. 定向凝固镍基高温合金 DZ466 表面 CoAl 涂层的氧化及组织演变[J]. *金属学报*, 2018, 54(4): 566-574.
- Ren Weipeng, Li Qing, Huang Qiang, et al. Oxidation and microstructure evolution of CoAl coating on directionally solidified Ni-based superalloys DZ466[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(4): 566-574. (in Chinese)
- [20] 李艳明, 李中生, 刘欢, 等. 镍基高温合金表面 Co-Al 涂层抗高温氧化性能研究[J]. *航空发动机*, 2023, 49(1): 169-174.
- Li Yanming, Li Zhongsheng, Liu Huan, et al. Research on high temperature oxidation resistance of co-Al coatings on Ni-based superalloy[J]. *Aeroengine*, 2023, 49(1): 169-174. (in Chinese)
- [21] 戴建伟, 易军, 王占考, 等. 单晶高温合金铂改性铝化物涂层的高温氧化行为[J]. *航空材料学报*, 2015, 35(5): 32-38.
- Dai Jianwei, Yi Jun, Wang Zhankao, et al. High temperature oxidation behavior of Pt modified aluminide coating on single crystal superalloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2015, 35(5): 32-38. (in Chinese)
- [22] Liu He, Li Shuai, Jiang Chengyang, et al. Oxidation performance and interdiffusion behavior of a Pt-modified aluminide coating with pre-deposition of Ni[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2019, 32(12): 1490-1500.
- [23] 杨世伟, 张志明, 潘健全, 等. 镍基高温合金渗 Al-Si 涂层抗高温氧化性能研究[J]. *热加工工艺*, 2007, 36(20): 59-61.
- Yang Shiwei, Zhang Zhiming, Pan Jianquan, et al. Study on high temperature oxidation properties of Al-Si coatings on superalloy[J]. *Hot Working Technology*, 2007, 36(20): 59-61. (in Chinese)
- [24] 卢旭东, 王复利. Ni-Cr-Co-Mo-W-Ta-Al 合金在 900 °C 和 1 000 °C 的高温氧化行为[J]. *材料研究学报*, 2016, 30(8): 589-594.
- Lu Xudong, Wang Fuli. Isothermal oxidation behaviour of Ni-Cr-Co-Mo-W-Ta-Al superalloy at 900 °C and 1 000 °C[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2016, 30(8): 589-594. (in Chinese)
- [25] 王鑫, 许振华, 彭超, 等. 单晶高温合金铂改性铝化物涂层的高温防护性能研究[J]. *真空*, 2020, 57(3): 11-16.
- Wang Xin, Xu Zhenhua, Peng Chao, et al. High temperature protection properties of Pt modified aluminide coating on the single crystal superalloy[J]. *Vacuum*, 2020, 57(3): 11-16. (in Chinese)
- [26] 李艳明, 刘欢, 乔志, 等. 镍基高温合金 DD5、DD10 和 DSM11 热腐蚀行为比较[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(9): 2105-2115.
- Li Yanming, Liu Huan, Qiao Zhi, et al. Comparison on hot corrosion behaviors of Ni-base superalloy DD5, DD10 and DSM11[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(9): 2105-2115. (in Chinese)
- [27] 范其香, 王铁钢, 刘艳梅, 等. 镍基高温合金上 Co 改性铝化物涂层的组织结构与耐蚀性能[J]. *中国表面工程*, 2015, 28(5): 116-122.
- Fan Qixiang, Wang Tiegang, Liu Yanmei, et al. Microstructure and corrosion behavior of co modified aluminide coatings on Ni-based superalloy[J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(5): 116-122. (in Chinese)
- [28] 马春春, 孙建刚, 刘镇洋, 等. Co、Al 共渗涂层的性能研究[J]. *热喷涂技术*, 2016, 8(2): 30-35.
- Ma Chun Chun, Sun Jiangang, Liu Zhenyang, et al. Study of CoAl coating by pack cementation process[J]. *Thermal Spray Technology*, 2016, 8(2): 30-35. (in Chinese)
- [29] 闻明, 姜东慧, 陈志全, 等. 铂铝高温抗氧化涂层的制备及性能研究[J]. *贵金属*, 2010, 31(3): 16-22.
- Wen Ming, Jiang Donghui, Chen Zhiquan, et al. Study on preparation and properties of Pt-Al high temperature oxidation-resistant coatings[J]. *Precious Metals*, 2010, 31(3): 16-22. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)