

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5293

# TiAl 合金表面处理及涂层防护技术研究进展

张宜键,周晓俊,徐文朝,陈思凡,王永胜  
(太原理工大学材料科学与工程学院,山西太原 030024)

**摘要:** TiAl 合金因其低密度、高比强度及高温性能优异等特点,是航空发动机镍基高温合金最具优势的替代材料之一,但其 700~800 °C 以上抗氧化性能不足,严重制约着部件的可靠性与寿命。本文从涂层材料体系、制备方法、失效形式等方面综述了 TiAl 合金表面防护研究现状,并基于航空发动机部件性能持续提升对材料综合性能的应用需求,提出 TiAl 合金防护涂层从“屏障保护”演进为“功能集成”的研究趋势。

**关键词:** TiAl 合金;表面改性;涂层;抗氧化性能

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)03-0234-15

## Research Progress on Surface Treatment and Coating Protection Technology for TiAl Alloys

ZHANG Yijian, ZHOU Xiaojun, XU Wenchao, CHEN Sifan, WANG Yongsheng

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** TiAl alloys represent among the most advantageous alternative materials to nickel-based high-temperature alloys for aeroengine applications because of their low density, high specific strength, and superior high-temperature performance. However, their oxidation resistance above 700~800 °C is inadequate, severely restricting component reliability and service life. This paper reviews and discusses recent advances in surface protection technologies for TiAl alloys, organized by coating material systems, preparation methods, and failure mechanisms. In response to the growing demands for comprehensive material performance in aerospace engine components, a research trend in which protective coatings for TiAl alloys are evolving from barrier protection toward functional integration solutions has been identified.

**Key words:** TiAl alloys; surface modification; coatings; antioxidant properties

TiAl 合金金属间化合物因其低密度、高比强度、卓越的抗蠕变性及高温强度,完美契合新型航空发动机高温、轻质的苛刻要求<sup>[1-3]</sup>,已成为航空发动机低压涡轮叶片、涡轮盘等核心部件的关键材料<sup>[4-5]</sup>,成功应用于波音 787 客机用铸造 4822TiAl 合金低压涡轮叶片、空客 A320 客机用变形 TiAl 合金低压涡轮叶片、汽车用增压涡轮和排气阀等。

研究发现,随着 Al 含量的提高,TiAl 合金表面形成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 增多,氧气扩散区域减小,抗氧化性能更好(图 1)<sup>[6]</sup>。因此提高 Al 含量,促进形成致密 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜是保护 TiAl 合金的重要途径之一。尽管 Ti 与 Al 元素形成的 Ti<sub>3</sub>Al、TiAl、TiAl<sub>3</sub> 等相中铝元素的含量

较高,但 Ti<sub>3</sub>Al、TiAl 中的 Al 元素不能择优氧化,Ti 元素向外扩散速度较快,表面难以形成连续、致密的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护层,导致 TiAl 合金 700~800 °C 以上抗氧化能力迅速下降,合金的力学性能不能充分发挥,限制了其实际工程应用。

针对该问题,为了避免影响合金基体力学性能,常采用表面涂层法,即通过改变材料表面结构、成分、相组成等,使其表面获得功能性能(如抗氧化、耐腐蚀等),又不损失基体的力学性能优点<sup>[6]</sup>。因此,通过表面改性及涂层提高  $\gamma$ -TiAl 合金抗氧化性能已成为国内外研究的热点。

高温防护涂层需同时满足功能性与结构性双重

收稿日期: 2025-12-31

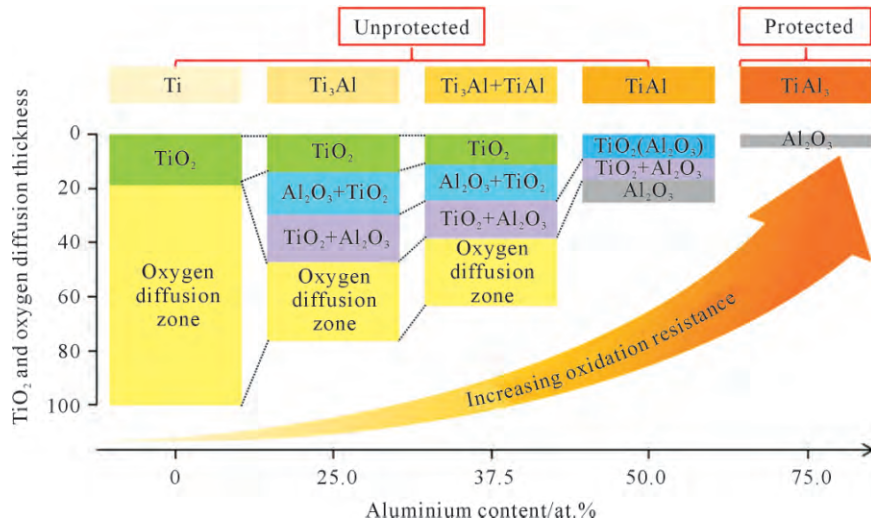
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52531004); 山西省归国留学人员科研基金(2024-057)

作者简介: 张宜键,2003 年生,硕士生。研究方向为高温防护涂层。Email: zhangyijian0224@link.tyut.edu.cn

通信作者: 王永胜,1982 年生,博士,副教授。研究方向为先进涂层设计及制备。Email: wangyongsheng@tyut.edu.cn

引用格式: 张宜键,周晓俊,徐文朝,陈思凡,王永胜. TiAl 合金表面处理及涂层防护技术研究进展[J]. 铸造技术, 2026, 47(3): 234-248.

ZHANG Y J, ZHOU X J, XU W C, CHEN S F, WANG Y S. Research progress on surface treatment and coating protection technology for TiAl alloys[J]. Foundry Technology, 2026, 47(3): 234-248.

图1 钛合金表面氧化膜和氧扩散区示意图<sup>[5]</sup>Fig.1 Schematic diagram of the oxide film and oxygen diffusion zone on the titanium alloy surface<sup>[5]</sup>

需求。功能性防护要抵抗高温氧化( $>800\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、热腐蚀(含 S/Cl 环境)等多重侵蚀;结构性保障要求涂层/基体界面结合力需大于  $\sim 50\text{ MPa}$ , 避免因热膨胀失配引发剥落,同时涂层不得显著降低基体疲劳强度( $\Delta\sigma < 10\%$ )。

航空发动机叶片防护技术早期以铝及铝化物涂层为主,通过渗铝工艺等在表面构建富铝层,以提高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜的稳定性和自修复能力;为适应更高性能要求,MCrAlY 涂层(M 为 Ni、Co 或 NiCo 合金)逐渐成为主流,其兼具优良抗氧化性与适度韧性,并能较好匹配基体的热膨胀特性。近年来,多层复合涂层、纳米结构涂层等新型体系不断涌现,基于此,本文评述了 TiAl 合金表面处理及涂层防护技术研究进展。

## 1 TiAl 合金的表面防护涂层体系

### 1.1 铝及改性铝化物涂层

铝及铝化物涂层是 TiAl 合金最早被研究的防护涂层之一,涂层与合金基体的化学成分、晶体结构等相容性较好,热膨胀系数匹配度高,且技术简单、工艺成熟、应用广泛<sup>[7]</sup>。为了提高 TiAl 合金抗氧化能力,早期研究结果大多在表面制备 Al 涂层。 $\gamma$ -TiAl 合金表面采用包埋渗铝法制备厚度为  $50\text{ }\mu\text{m}$  的  $\text{Al}_3\text{Ti}$  涂层<sup>[8]</sup>, $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  循环氧化 500 h,氧化增重  $0.8\text{ mg/cm}^2$ 。Ti-50Al 表面溅射厚度为  $5\text{ }\mu\text{m}$  铝膜, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  循环氧化 80 h 后氧化速率常数相比于基体降低 5 个数量级<sup>[9]</sup>。高温氧化中普通铝化物涂层与基体的 Al 和 Ti 元素发生互扩散进而形成脆性  $\text{Al}_3\text{Ti}$  相,消耗涂层中的 Al,导致保护性  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜无法持续再生,削弱了涂层长期抗氧化能力<sup>[7,10]</sup>。

目前,已有学者通过添加 Si、Cr 和 Pt 等元素对

铝化物涂层进行改性,提高其高温长时下的抗氧化性能。Goral 等<sup>[11]</sup>采用料浆法在 TNB 表面制备 Si 改性铝化物涂层, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、500 h 增重为  $0.3\text{ mg/cm}^2$ ,且氧化层无剥落。 $\gamma$ -TiAl 表面粉末包埋共沉积 Al-Si 层, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、3 900 h 氧化增重仅为  $0.67\text{ mg/cm}^2$ ,展现了极强的抗高温氧化能力<sup>[10]</sup>。在  $\gamma$ -TiAl 合金上磁控溅射 Al-Si 涂层,含 3%Si(原子分数)的涂层在  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  循环氧化 5 000 h 后,氧化增重  $\leq 0.82\text{ mg/cm}^2$ ,能够满足高温长时服役要求<sup>[12]</sup>。Zhao 等<sup>[13]</sup>通过氟化处理 TiAl 合金表面 Al-Si 涂层,发现 F 元素能够促进单相  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜的形成, $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$  循环氧化 1 000 h 后涂层增重极小且未剥落。在 TiAl 合金表面包埋渗 Cr 改性铝化物涂层,加入 Cr 不仅能够改善涂层脆性,形成的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  层还能够进一步阻止氧气渗入<sup>[14]</sup>。Ebach-Stahl 等<sup>[15]</sup>采用磁控溅射在  $\gamma$ -TiAl 合金表面制备 Pt-Al 涂层,在  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1 000 h 循环氧化后氧化增重为  $\sim 0.5\text{ mg/cm}^2$ 。

### 1.2 硅化物涂层

硅化物涂层具有良好的热稳定性和高温抗氧化性。在氧化过程中,硅化物涂层上会形成具有一定流动性和自修复能力的致密保护性  $\text{SiO}_2$  膜<sup>[16]</sup>。Fröhlich 等<sup>[17]</sup>通过磁控溅射技术制备纯 Si 涂层,在  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  循环氧化 1 000 次后, $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  层表现出优异的高温抗氧化性能。Liang 等<sup>[18]</sup>在  $\gamma$ -TiAl 合金上包埋渗 Si 生成稳定的  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$  层和致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  复合涂层,在  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  循环氧化 1 000 次后氧化增重  $< 0.3\text{ mg/cm}^2$ ,未出现裂纹或剥落现象。然而,纯硅的热膨胀系数与 TiAl 合金差异很大,在长期热循环过程中会产生较大的热应力,当应力超过涂层与基体的结合强度时,涂层就会从基体剥离。

为改善涂层与基体结合能力,Al、Co、K 和 Y 等

表面改性元素被逐步应用于硅化物涂层的开发和设计。Li 等<sup>[19]</sup>在 TiAl 合金上制备 Si-Al-Y 共渗层, 1 000 °C 氧化 80 h 后该涂层仍保持抗氧化能力。Tian 等<sup>[20]</sup>采用包埋渗在 Ti45Al-6Nb-0.1Y 合金上制备了 Si-Co 扩散涂层, 在 1 000 °C 氧化 100 h 后, 其氧化抛物线速率与纯硅化物涂层相比降低约 1 个数量级。Yan 等<sup>[21]</sup>研究的 K 掺杂 SiO<sub>2</sub> 涂层显著提高了基体在 900 °C 下的抗氧化性能, 将纯 SiO<sub>2</sub> 涂层的氧化增重降低 89.1%, 同时有效降低了涂层应力和裂纹产生倾向。Huang 等<sup>[22]</sup>采用冷喷涂技术沉积 Al-40Si 涂层, 950 °C 等温氧化 1 000 h 后质量增重为 ~3.0 mg/cm<sup>2</sup>, 形成连续稳定的 Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> 扩散阻挡层, 有效抑制元素互扩散。Zhang 等<sup>[23]</sup>采用包埋渗法在 TiAl 合金表面制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti-Si 复合涂层, 900 °C 循环氧化 100 h 后质量增重仅为 ~0.7 mg/cm<sup>2</sup>, Al 的选择性氧化与 Ti-Si 相的固有稳定性共同促进高温暴露下的长期保护。

### 1.3 多元合金涂层

多元合金涂层体系是一个以功能为导向, 通过多种元素协同作用构成的复杂材料体系, 其主要设计目的是克服单一涂层的局限性, 实现宽温域、长寿命的高温防护。多元合金涂层包括 MCrAlY 和 Ti-Al-X 等涂层体系。这类涂层的制备工艺主要为热喷涂或物理气相沉积技术, 在高温部件表面形成有效的防护屏障。

MCrAlY 涂层作为经典的高温防护体系, 其最高工作温度可达 1 000 °C。MCrAlY 涂层中的 M 代表 Ni、Co 等涂层的主要组成元素。Ni 元素促进韧性相的形成, 加入 Co 元素可以提高涂层抗热腐蚀性<sup>[24-25]</sup>。Tang 等<sup>[26]</sup>研究了 Co-30Cr-6Al-0.5Y 和 Ni-30Cr-6Al-0.5Y 涂层对 1 000 °C 下 TiAl 合金抗氧化性能的影响, 结果表明两种涂层均能有效降低 TiAl 合金的氧化速率。然而, 由于 MCrAlY 涂层与 TiAl 合金基体之间存在显著的成分差异、明显的原子互扩散倾向及热膨胀系数不匹配等问题, 涂层与基体间的结合能力并不理想。Kim 等<sup>[27]</sup>采用大气等离子喷涂技术在 TiAl-4Nb-3Mn 合金上制备纳米 NiCrAlY 涂层, 1 000 °C 循环氧化 800 次后, 约 1/2 的原始 NiCrAlY 涂层被扩散反应区所取代, 涂层逐渐失效。

为解决高温长时氧化过程中原子互扩散问题, 国内外学者开始关注 MCrAlY 涂层和扩散阻挡层形成的复合涂层。Li 等<sup>[28]</sup>在 NiCrAlY 涂层与 TiAl 合金之间制备 Cr<sub>2</sub>AlC 扩散阻挡层, 900 °C 循环氧化 1 000 次后发现扩散阻挡层能够有效阻止 Ti 向外扩

散, 提高了涂层长期抗氧化性能。Zheng 等<sup>[29]</sup>利用射频磁控溅射技术在  $\gamma$ -TiAl 合金表面制备 NiCo-CrAlY/ZrO<sub>2</sub> 复合涂层, 发现 ZrO<sub>2</sub> 层不仅能阻挡 Ti 原子的扩散, 还能够提高抗氧化层与基体之间的附着力。Zeng 等<sup>[30]</sup>使用双辉等离子渗金属技术在  $\gamma$ -TiAl 合金表面溅射 Cr/CoNiCrAlTaY 复合涂层, 900 °C 下氧化 200 h 后, 涂层试样的质量增重为 1.0 mg/cm<sup>2</sup>。CoNiCrAlTaY 作为过渡层阻挡 Ti 向外扩散, 使其未进入 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层。

另一类提高 TiAl 合金高温抗氧化性能的是 Ti-Al-X 涂层体系, 在高温下可有效抑制 TiO<sub>2</sub> 的析出, 形成连续 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜。Ti-Al-Cr 涂层因其优异的高温抗氧化性备受研究者关注<sup>[31-32]</sup>。Zhou 等<sup>[33]</sup>研究了 Ti-50Al-10Cr 涂层的高温抗氧化性, 1 000 °C 下循环氧化 100 次后质量增重 < 2 mg/cm<sup>2</sup>, 涂层抗氧化性能优异。Braun 等<sup>[34]</sup>在  $\gamma$ -TiAl 合金上制备 Ti-Al-Cr 涂层, 在 900 °C 循环氧化 1 000 次下表现出优异的抗氧化性。

基于 Ti-Al-Cr 涂层已有的抗氧化性能研究基础, 逐渐加入 Zr、Y、Hf、Si 和 W 等元素预期制备更优异的高温防护涂层。Braun 等<sup>[35]</sup>采用磁控溅射技术在  $\gamma$ -TiAl 合金上制备了 Ti-49Al-34Cr-4Zr 涂层, 1 000 °C 循环氧化 1 000 h 后仍存在连续 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜, Zr 元素的加入延缓其在高温下的分解, 提升涂层的长期防护能力。Han 等<sup>[36]</sup>采用真空等离子喷涂技术在 TiAl 合金表面制备 Ti-Al-Cr-Y 涂层, 在 1 000 °C 氧化 250 h 后涂层无剥落, 抗氧化性能优异。Laska 等<sup>[37]</sup>在  $\gamma$ -TiAl 和 TNM 合金上溅射含少量 Y 或 Zr 的 Ti-Al-Cr 涂层, 在 950 °C 循环氧化 1 000 次后涂层未失效。进一步在 Ti-Al-Cr-Y-Si 涂层添加多种元素<sup>[38]</sup>, 850 °C 氧化 288 h 后质量增重仅为无涂层基体的 1/5。Kaczmarek 等<sup>[39]</sup>通过磁控溅射制备 Ti-Al-W 涂层, 显著提高了  $\gamma$ -TiAl 基体在 900 °C 下的抗氧化性, 其氧化速率比未涂层基体降低了 4 个数量级。

### 1.4 陶瓷涂层

陶瓷涂层凭借突出的高温稳定性、优异的抗腐蚀能力及良好的化学惰性, 成为钛及钛铝合金高温防护的重要选择。目前, 陶瓷涂层体系呈现多元化发展趋势, 不同种类陶瓷涂层适应不同场景, 以下为典型陶瓷基防护涂层的研究现状。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基陶瓷涂层是 TiAl 合金高温防护中应用广泛的经典体系之一。采用磁控溅射技术在  $\gamma$ -TiAl 合金表面沉积 3  $\mu$ m 厚的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层<sup>[40]</sup>, 在 950 °C、250 h 氧化增重 3.1 mg/cm<sup>2</sup>。但长时高温氧化后, 该类涂层易出现开裂、氧化皮剥落等问题。Gao 等<sup>[41]</sup>采用

电泳沉积法在  $\gamma$ -TiAl 合金上制备纳米结构  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$  复合涂层,显著提升了合金的抗氧化性。Xie 等<sup>[42]</sup>通过阴极等离子电解沉积法在 TiAl 合金上制备  $\text{ZrO}_2$ /YSZ(yttria-stabilized zirconia) 掺杂的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层, $\text{Zr}^{4+}$  和  $\text{Y}^{3+}$  的协同作用提高了  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的热稳定性,在  $950\text{ }^\circ\text{C}$ 、100 h 氧化增重  $0.48\text{ mg/cm}^2$ 。He 等<sup>[43-44]</sup>采用相同沉积技术制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Au、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Pt、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -Pt 等金属掺杂涂层,在保证抗氧化能力的同时,大幅提升了涂层高温下的断裂韧性与抗剥落性能。

氮化物陶瓷涂层兼具抗氧化、耐腐蚀、耐磨损及低表面能等优良特性。Zhang 等<sup>[45]</sup>采用电弧离子镀技术在 Ti-48Al-2Cr-2Nb 合金上制备了 TiAlSiN 涂层, $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层和  $\text{Ti}_3\text{Si}_3$  扩散阻挡层,有效阻碍 Ti、N 等元素的互扩散。Braun 等<sup>[46]</sup>通过高能脉冲磁控溅射方法在  $\gamma$ -TiAl 基合金上制备 CrAlYN/CrN 纳米涂层,在  $850\text{ }^\circ\text{C}$  氧化 2500h 后增重仅  $0.2\text{ mg/cm}^2$ ,表现出优异的长期抗氧化能力。Jia 等<sup>[47]</sup>通过在  $\gamma$ -TiAl 基合金表面制备 AlN 涂层,在高温下转化为致密的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  保护层,并形成  $\text{Ti}_3\text{Al}/\text{Ti}_2\text{AlN}/\text{Ti}_3\text{Al}$  过渡层,显著增强了涂层与基体间的结合力。

$\text{SiO}_2$  基陶瓷涂层在高温下能优先、持续地生成一层致密稳定的  $\text{SiO}_2$  或硅酸铝玻璃相,有效阻隔氧原子向基体内部的扩散<sup>[48]</sup>。Yan 等<sup>[49]</sup>采用电沉积法在  $\gamma$ -TiAl 合金上制备 Ni 改性  $\text{SiO}_2$  涂层,  $900\text{ }^\circ\text{C}$  循环氧化 100 h 后增重仅  $0.16\text{ mg/cm}^2$ ,Ni 通过增强涂层的韧性、致密性与自愈合能力显著提升抗氧化性能。该团队还通过引入 Al 纳米颗粒<sup>[50]</sup>,使涂层在  $900\text{ }^\circ\text{C}$  氧化 100 h 后的氧化速率降低 32.4%。为进一步优化性能,利用碳原子取代  $\text{SiO}_2$  中的部分氧原子形成 SiOC 涂层,改善了涂层的机械、蠕变、热冲击性能<sup>[51-52]</sup>。Wu 等<sup>[53]</sup>采用浸涂法在 Ti-45Al-8.5Nb 合金表面制备 SiOC 涂层,  $850\text{ }^\circ\text{C}$ 、100 h 氧化增重  $0.85\text{ mg/cm}^2$ 。后续又制备了 SiOC-25Ni 涂层,Ni 在高温下与氧气、SiOC 反应生成 NiO 和  $\text{Ni}_2\text{Si}$ ,抑制了涂层表面裂纹,促进氧气扩散并诱发热生长氧化物层的形成<sup>[54]</sup>。

搪瓷涂层因成分可调性强、热膨胀匹配度高、制备成本低及抗高温氧化等特点被广泛研究<sup>[55-56]</sup>。Datta 等<sup>[57]</sup>采用玻璃釉涂覆技术在 TiAl 合金上制备了 MgO- $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  涂层,在  $800\text{ }^\circ\text{C}$ 、100 h 氧化增重仅  $0.10\text{ mg/cm}^2$ ,远低于基体合金的  $1.3\text{ mg/cm}^2$ 。Tang 等<sup>[58]</sup>测试了  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$ -ZnO- $\text{B}_2\text{O}_3$ -CaO- $\text{Na}_2\text{O}$  搪瓷涂层的高温性能。结果表明,搪瓷涂层拥有良好的抗氧化性和耐腐蚀性。Chen 等<sup>[59]</sup>制备了添加纳米 Ni 颗粒的金属-搪瓷复合涂层,涂层中的 Ni 颗粒在

高温下氧化并膨胀,结合搪瓷的高温黏弹性实现裂纹的自修复,显著提升涂层抗热冲击能力。

与上述涂层相比,YSZ 涂层在  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  以上的高温环境中仍能保持良好的抗氧化性,是目前应用最广泛的热障涂层材料之一<sup>[60-61]</sup>,该涂层以  $\text{ZrO}_2$  为基体,添加适量  $\text{Y}_2\text{O}_3$  形成的陶瓷涂层材料,具有优异的耐高温和良好的机械性能<sup>[62]</sup>。通过大气等离子喷涂在  $\gamma$ -TiAl 合金制备了纳米结构 8YSZ 涂层<sup>[63]</sup>,经过  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 、200 h 循环氧化,涂层增重  $1.45\text{ mg/cm}^2$ 。Sahmani 等<sup>[64]</sup>使用大气等离子喷涂技术制备 YSZ/CoNi-CrAlY 热障涂层,  $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 、300 h 循环氧化后几乎没有增重,而无涂层 TiAl 合金增重为  $98.1\text{ mg/cm}^2$ 。由此可见,YSZ 和粘结层组成的热障涂层具有极好的高温抗氧化性抗热冲击性,是目前应用最为广泛的涂层之一。

### 1.5 新型防护涂层

$\gamma$ -TiAl 合金表面新型涂层正从传统的扩散涂层、多元合金包覆涂层和陶瓷涂层向基于新理念、新材料的涂层体系发展。新一代涂层体系的核心设计思路不再局限于对传统体系的调控改良,而是从材料成分、微观结构及本征特性 3 个维度进行创新,其中稀土元素改性涂层作为传统涂层向新一代体系过渡的关键方向,凭借独特的作用机制<sup>[65]</sup>实现了涂层性能的突破性提升,是当前产业化应用与前沿研究的重要衔接点。目前,稀土改性涂层、纳米结构涂层、高熵合金涂层和 MAX 相涂层等新一代涂层体系正成为研究前沿。

稀土元素(如 Y、La、Ce、Nd 等)因其独特的电子构型和表面活性,在 TiAl 合金涂层中具有广泛应用,不仅能作为单一的涂层组元,还可作为掺杂元素改性的传统扩散涂层、陶瓷涂层或多元合金涂层。如稀土元素可通过磁控溅射、等离子喷涂、溶胶-凝胶等工艺<sup>[38,66-67]</sup>引入涂层,既能制备稀土氧化物( $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{La}_2\text{O}_3$ )单一涂层<sup>[41,68]</sup>,也可制备稀土掺杂 Al-Si、NiCrAlY 等多元涂层,亦或是与陶瓷相( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、YSZ)复合形成稀土改性陶瓷涂层<sup>[42,69]</sup>。稀土元素核心优势在于优化氧化膜结构、阻滞元素扩散及提升涂层强韧性。此外,其还能改善涂层与基体的界面结合强度,避免服役过程中出现涂层脱落失效,兼顾高温防护性能与结构稳定性,适配 TiAl 合金航空发动机叶片等高温服役场景,是衔接传统涂层与新型前沿涂层的关键桥梁。

纳米结构涂层通过引入纳米尺度的晶粒或复合层调控其微观结构,结合纳米材料的独特界面效应,从根本上改善涂层的物理和化学性能。Zou 等<sup>[70]</sup>通

过一步法液相等离子体辅助粒子沉积烧结(LPDS)技术在 TiAl 合金表面制备 HfSi<sub>2</sub>-HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 纳米复合陶瓷涂层。凭借 HfSi<sub>2</sub> 耗氧相高温生成的 HfO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 形成致密氧化屏障,有效阻碍氧扩散与裂纹扩展,提升了 TiAl 合金抗氧化与抗烧蚀性能。

高熵合金涂层打破传统合金的成分设计理念,由等摩尔或近似等摩尔的 5 种及以上主元构成,形成具有简单固溶体结构的涂层。Sun 等<sup>[71-72]</sup>采用双辉等离子渗金属技术在 TiAl 合金表面制备 NiCoCrAl 和 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层,涂层表面连续致密且无缺陷,与基体形成冶金结合。其中,NiCoCrAl 涂层在 900 °C 氧化 100 h,质量增重(1.42 mg/cm<sup>2</sup>)为无涂层基体的 1/10。

MAX 相涂层是一类三元层状陶瓷材料,化学式为 M<sub>n+1</sub>AX<sub>n</sub>(M 为过渡金属元素、A 为主族元素、X 为 C 或 N 元素),兼具金属与陶瓷的独特特性。以 Ti<sub>2</sub>AlC 和 Cr<sub>2</sub>AlC 为代表的能形成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 保护膜

MAX 相,凭借其独特的自愈合能力、良好的韧性及抗氧化性能,在 TiAl 合金高温防护涂层领域展现出巨大潜力。Swadzba 等<sup>[73]</sup>通过直流磁控溅射在 TiAl (4822) 合金表面成功制备 Ti<sub>2</sub>AlC 涂层,800 °C 高温氧化 1 h 后 Ti<sub>2</sub>AlC MAX 相和表面热生长 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层同步形成。在 850 °C 循环氧化 100 h 后,热生长 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层仅略微增加 ~1 μm,表现出优异的抗氧化性能。Laska 等<sup>[74]</sup>通过磁控溅射在 TiAl (4822)合金表面沉积厚度超过 7 μm 的 Cr<sub>2</sub>AlC 和 Ti<sub>2</sub>AlC MAX 相涂层。Cr<sub>2</sub>AlC MAX 涂层在 800 °C 下氧化 100 h 后发生降解。然而,在 Ti<sub>2</sub>AlC 涂层上方形成保护性热生长 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层,涂层在 850 °C 氧化 300 h 后仍具有抗氧化能力。

为了说明不同高温防护涂层对 TiAl 合金抗氧化性能的提升差异,图 2 统计了近年来 TiAl 合金表面高温抗氧化涂层在不同氧化温度和氧化时间下的质量增重。表 1 则归纳了长时高温抗氧化防护涂层

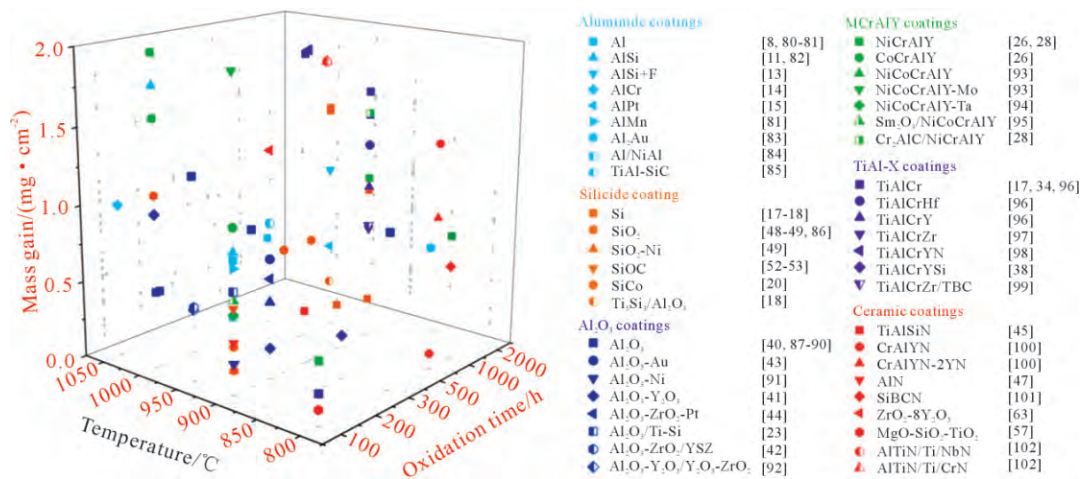


图 2 TiAl 合金抗氧化涂层在不同温度和时间氧化增重统计

Fig.2 Statistical chart of the oxidation weight gain of the TiAl alloy oxidation-resistant coatings at different temperatures and holding times

表1 TiAl合金高温长时抗氧化涂层氧化增重数据

Tab.1 Data sheet of oxidation weight gain for high-temperature long-term oxidation coatings on TiAl alloys

Coating	Substrate	Exposure	Mass gain	Lit.
AlSi	Ti-31Al-8.6W	800 °C, 3 900 h	0.67 mg/cm <sup>2</sup>	[10]
AlSi+F	Ti-45Al-2Nb-2Mn	950 °C, 1 000 h	1.08 mg/cm <sup>2</sup>	[13]
AlPt	Ti-45Al-8Nb-0.8C	950 °C, 1000 h	0.50 mg/cm <sup>2</sup>	[15]
Pt	Ti-45Al-8.5Nb-0.2W-0.2B-0.02Y	850 °C, 3 000 h	1.26 mg/cm <sup>2</sup>	[79]
SiBCN	Ti-48Al-2Cr-2Nb	800 °C, 1 000 h	0.59 mg/cm <sup>2</sup>	[101]
TiAlCr	Ti-50Al	900 °C, 1 000 h	0.68 mg/cm <sup>2</sup>	[34]
TiAlCrY	Ti-45Al-8Nb-0.2C	850 °C, 2 000 h	1.01 mg/cm <sup>2</sup>	[103]
TiAlCrY+7YSZ	Ti-45Al-8Nb-0.2C	850 °C, 2 000 h	1.01 mg/cm <sup>2</sup>	[103]
TiAlCrZr	Ti-48Al-2Cr-2Nb	900 °C, 1 000 h	0.35 mg/cm <sup>2</sup>	[37]
TiAlCrHf	Ti-45Al-8Nb-0.2C	900 °C, 1 000 h	1.23 mg/cm <sup>2</sup>	[34]
NiCrAlY	Ti-45Al-2Nb-2Mn	900 °C, 1 000 h	1.08 mg/cm <sup>2</sup>	[28]
CrAlN	Ti-45Al-8Nb-0.2C	850 °C, 2 000 h	1.25 mg/cm <sup>2</sup>	[100]
CrAlN-2YN	Ti-45Al-8Nb-0.2C	850 °C, 2 000 h	0.80 mg/cm <sup>2</sup>	[100]

氧化增重数据。由图表可知,目前可长期耐高温的TiAl合金涂层多为添加Cr、Si、Pt等元素的复合涂层。其中,Cr和Si元素应用较为广泛,但Cr所形成的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 氧化膜脆性较高,长期高温环境下易发生开裂与剥落,且Cr元素易在晶界处偏聚,削弱涂层与基体的结合力<sup>[75-76]</sup>。Si形成的硅化物同样脆性较大,在热循环过程中易萌生微裂纹,过量添加还会加剧界面应力,导致涂层的抗热震性能下降<sup>[77-78]</sup>。Pt元素在相关体系中的研究较为有限,本课题组研究的Pt涂层<sup>[79]</sup>在850℃下、3 000 h增重1.26 mg/cm<sup>2</sup>,Fröhlich等<sup>[15]</sup>制备的Pt-Al涂层在950℃下、1 000 h增重0.50 mg/cm<sup>2</sup>,表现出极强的高温抗氧化性能。Pt在高温以纳米颗粒分散于氧化层,不与Ti、Al形成脆性化合物,既促进Al扩散形成致密 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 阻挡氧渗透,又凭借延展性抑制裂纹扩展、缓解热应力,兼顾抗氧化性的同时提升韧性与抗蠕变能力,解决了传统涂层的核心短板,因此,未来在TiAl合金涂层设计过程中,添加Pt元素是一个重要的设计思路。

## 2 涂层制备技术

涂层制备技术是影响涂层性能的关键因素之一。近年来,相较于涂层体系的快速发展,其制备工艺的进步相对缓慢。为提高TiAl合金的高温抗氧化性能,各国研究者采用了多种表面涂层制备方法,主要包括气相沉积技术、热喷涂技术、表面渗镀技术、激光及高能束表面改性技术、溶胶-凝胶法以及离子注入技术等。

### 2.1 物理气相沉积技术

物理气相沉积技术是制备TiAl合金高温防护涂层的主要方法,凭借制备温度低、镀层纯度高、结合力强等优势被广泛应用,通过蒸发、溅射、离子化等物理过程将靶材沉积于TiAl合金表面,可精准调

控涂层成分、微观结构及厚度,能有效解决TiAl合金在高温环境下易氧化、表面耐磨性差、抗腐蚀性能不足的缺点。且工艺清洁无污染,契合航空航天高端领域对部件表面洁净度、性能稳定性的严苛要求,尤其适用精密TiAl合金部件(如航空发动机叶片、航天飞行器结构件)的表面防护涂层制备。

Bauer等<sup>[104]</sup>通过磁控溅射在TNB-V2合金表面制备Al-18Si涂层,850℃氧化300 h后形成保护性 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 层,显著提升合金抗氧化性。Yang等<sup>[105]</sup>通过磁控溅射在 $\gamma\text{-TiAl}$ 合金表面制备Ni+CrAlYHfSiN涂层,发现氮化物可有效抑制涂层裂纹生长。Ostrovskaya等<sup>[106]</sup>用高功率脉冲磁控溅射在Ti-47Al-2Cr-8Nb合金沉积TiAl/TiAlN双层涂层,形成钝化氧化铝层,在1 000℃表现出优异防护效果。

### 2.2 热喷涂技术

热喷涂技术是通过高温热源将金属、陶瓷等涂层材料(粉末或丝材状)加热至熔融或半熔融状态,再以高速气流(或者等离子流)将其喷射至合金表面,形成高温防护涂层的表面工程技术。其中,粉末状涂层材料凭借粒径均匀、成分易调控的优势,广泛应用于TiAl合金等金属间化合物涂层的制备。图3为热喷涂示意图<sup>[107]</sup>,该技术适用材料范围广,可兼容金属、陶瓷、金属陶瓷复合材料等多种类型涂层材料,涂层厚度可控性强,可在几十微米至数毫米范围内灵活调节,具备可大面积施工、施工效率高的特点,能有效降低规模化生产的成本。

Zhao等<sup>[108]</sup>采用热喷涂技术在TiAl合金表面制备SiAl基高温涂层,致密的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合氧化膜,有效阻挡氧扩散。Pan等<sup>[109]</sup>通过离子喷涂工艺制备TiAlCrY/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>复合涂层,在1 000℃热循环中表现出优异抗热震性。Han等<sup>[65]</sup>采用等离子喷涂制备TiAlCrY/YSZ双层热障涂层,在1 100℃氧化

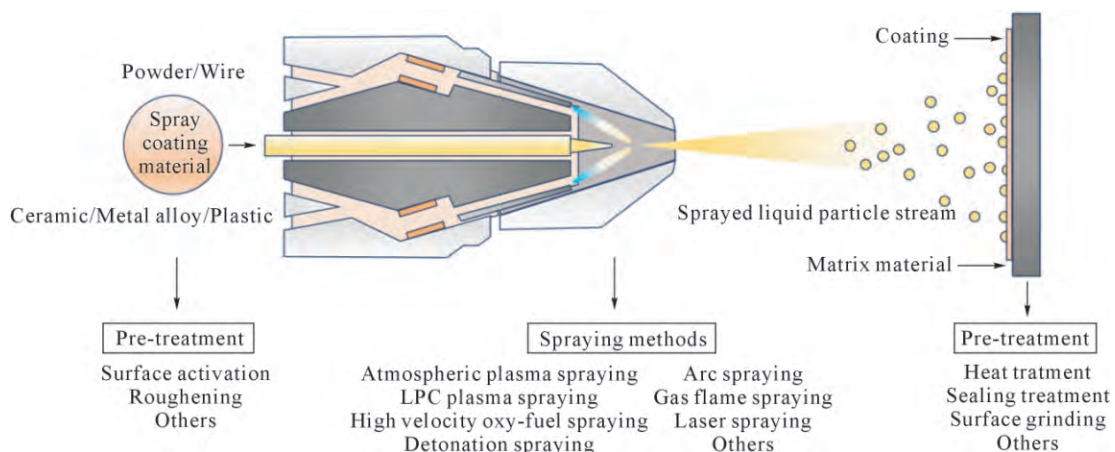


图3 热喷涂示意图<sup>[107]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of thermal spraying<sup>[107]</sup>

300 h 仍保持完好。该团队还采用低压等离子喷涂法制备 TiAl 基高温涂层<sup>[36]</sup>, 涂层致密度达 90% 以上, 但设备成本较高。Chen 等<sup>[93]</sup>通过热喷涂技术在 TiAl 合金表面制备了 Mo+NiCoCrAlY 涂层, 提升了涂层高温硬度与抗蠕变性能。Hua 等<sup>[110]</sup>采用超音速火焰喷涂制备 CoNiCrAlY-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合涂层, 提升了合金的高温耐磨性与抗氧化性。

### 2.3 扩散渗技术

扩散渗技术是在高温下通过化学或物理方法将活性渗剂元素(如 Al、Si、Cr、卤素元素等)扩散至合金表面从而在金属基体表面形成具有冶金结合的涂层或改性层。该技术主要包括热浸渗铝和粉末包埋渗等方法, 成本低廉、工艺简单, 涂层与基体结合紧密, 是一种被广泛应用的表面改性技术。

Kim 等<sup>[111]</sup>在 700~900 °C 用 Al、NH<sub>4</sub>Cl 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末混合物在 TiAl 合金上进行填充渗铝, 经高温氧化试验后表面形成了多层结构, 有效阻挡了氧的内扩散。Li 等<sup>[112]</sup>采用卤化物活化包埋渗碳技术在 TiAl 合金上制备了 Si-Y 共沉积涂层, 1 000 °C 下氧化 50 h 后, 氧化膜与涂层结合紧密。Jia 等<sup>[113]</sup>分别采用包埋渗法在 TiAl 上制备了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti-Si 复合涂层, 在 900 °C 下表现出良好的高温抗氧化性。

扩散渗技术有效解决了 TiAl 合金高温抗氧化能力不足和涂层易剥落的关键难题, 尤其适用于复杂内腔的零部件。但是, 扩散处理是不可逆的热处理过程, 高温长时间处理可能导致基体组织粗化或轻微脆化, 影响基体本身的力学性能。

### 2.4 激光熔覆技术

激光熔覆技术以高能激光束为热源, 使涂层粉末与基体表层快速熔化, 经快速凝固形成致密涂层, 能显著提升 TiAl 基体的高温耐磨、抗氧化及耐腐蚀性能。Liu 等<sup>[114]</sup>通过激光熔覆 NiCr-Si 复合粉末在  $\gamma$ -TiAl 合金上制备 Ti<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>/ $\gamma$ /TiSi 涂层, 能有效改善耐磨性和高温抗氧化性。Barekat 等<sup>[115]</sup>采用激光熔覆技术在  $\gamma$ -TiAl 基体上制备了 Co-Cr-Mo 涂层, 涂层短期形成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层, 长期则形成 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 内层和 CoCrO<sub>4</sub> 外层的双层结构, 在 900 °C 下表现出良好高温抗氧化性能。Chen 等<sup>[95]</sup>采用激光熔覆制备不同 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的 NiCoCrAlY 涂层, 发现适量 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 能细化晶粒、抑制裂纹、促进形成致密  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜, 提升涂层在 900 °C 的抗氧化性能。

激光熔覆技术的核心优势在于热影响区小、涂层成分和厚度可控。但由于熔池区域附近的温差较大, 导致层基结合力差, 涂层易出现裂纹与剥落, 限制了其进一步应用。

### 2.5 双层辉光等离子体表面合金化技术

双层辉光等离子体表面合金化技术可以将金属元素渗透进基体表层<sup>[116]</sup>, 实现涂层与基体之间的冶金结合, 显著提高涂层/基体的结合强度<sup>[117]</sup>。因此, 已被广泛应用于 TiAl 合金等表面改性研究。

Zeng 等<sup>[30]</sup>采用双辉等离子体表面合金化技术在  $\gamma$ -TiAl 合金表面沉积 Cr/CoNiCrAlTaY 涂层。在 900 °C 氧化 100 h 后涂层氧化增重为 0.78 mg/cm<sup>2</sup>, 低于基体的 1.14 mg/cm<sup>2</sup>。Wei 等<sup>[118]</sup>使用双辉等离子体表面合金化技术在 TiAl 合金表面渗金属 Nb, 750 °C、100 h 后氧化增重为基体的 1/2。Xu 等<sup>[119]</sup>在 TiAl 合金表面使用双辉等离子体表面合金化技术沉积了 MoSiAlY 涂层, 900 °C 氧化 100 h 后的氧化增重仅为基体的 1/5, 显著提升了 TiAl 合金高温抗氧化能力。

采用双辉等离子体渗金属技术对 TiAl 合金进行表面改性, 已被证实是提升其抗高温氧化性能的有效途径。其普遍作用机理是促进在高温氧化初期形成一层更具保护性的混合氧化膜, 从而在一定程度上阻隔了氧的内扩散和钛离子的外扩散, 减缓了氧化速率。

综上所述, 在 TiAl 合金表面制备高温抗氧化涂层的技术类型丰富, 不同方法均各有特点。表 2 总结了不同制备工艺的优缺点、典型代表涂层及适用范围, 可以根据工件和涂层材料选择适宜的制备工艺。

## 3 TiAl 合金防护涂层的失效形式

涂层失效的本质是其在服役环境下丧失保护基体的功能, 通常由于高温氧化、环境腐蚀(海洋、沙漠)、航空燃油产物腐蚀、蠕变及震动疲劳、高温摩擦等导致涂层材料自身组织结构退化、涂层/基体界面失稳、外部环境侵蚀等。

### 3.1 抗氧化涂层的自身因素

很多涂层的抗氧化能力依赖于 Al、Cr、Si 等元素形成保护性氧化膜, 氧化膜的热力学稳定性和动力学生长速度等决定了涂层的高温抗氧化性能。热力学上, 要求高温条件下氧化膜的生成焓足够小、稳定性高。例如 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 1 000 °C 时, 热力学稳定性好, 且抗熔盐腐蚀性能比 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 好, 但 1 000 °C 以上会转变为易挥发的高价氧化物 CrO<sub>3</sub><sup>[120]</sup>。SiO<sub>2</sub> 在高温、低氧分压环境中也易转化为易挥发的 SiO<sup>[121]</sup>。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在低氧分压、水蒸气等环境存在亚稳态( $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\theta$  相)向稳态的  $\alpha$  相转变<sup>[122]</sup>, 伴随约 8%~14% 的体积变化, 氧化膜易产生裂纹。动力学上, 希望高温条件下氧化膜的蒸汽压足够小、生长速率慢。在长期氧化过程中, 如果这些元素不断消耗以生长和修复氧化膜, 当涂

表2 不同制备工艺的优缺点、典型代表涂层和适用范围  
 Tab.2 Advantages and disadvantages, typical representative coatings and application scopes of different preparation processes

Coating technology	Advantages	Disadvantages	Typical coatings	Applicable components
Physical vapor deposition (PVD)	Dense coating, strong adhesion to substrate, no substrate damage	Challenging for deposition on large/complex components; high equipment cost	TiN, AlCrN	Precision cutting tools, engine blades, gears
Thermal spraying	High deposition efficiency, excellent adaptability to complex/large-sized components	High porosity (requiring sealing treatment); relatively low bonding strength	NiCrAlY, YSZ	Combustor liners, guide vanes
Diffusion infiltration	Excellent bonding (no spalling), mature process, low manufacturing cost	Thin infiltration layer; poor uniformity on components with complex cavities	Al-X, Si-Y	Turbine blades, fasteners
Laser cladding	Dense metallurgical bonding with substrate, precise selective cladding	Susceptible to thermal stress-induced microcracks; low processing efficiency	CoCrMo, NiCrAlY	Wear-repaired turbine blades, load-bearing components
Double glow plasma surface alloying	Controllable composition gradient, moderate process temperature	Complex equipment configuration; low industrialization maturity	Multi-element alloy coatings	Chemical industry valves, small-sized components

层表层的铝含量降低至临界值以下时,将无法生成稳定的  $Al_2O_3$  膜,转而生成保护性更差的非保护性氧化物。同时,涂层在长期服役中可能发生相变,如 MCrAlY 涂层中  $\beta$ -(Ni, Co)Al 相分解导致涂层体积收缩,产生应力并促进氧化膜开裂<sup>[123]</sup>。

此外,合金元素(Cr、Y、Ni、Hf)过量添加易诱发多种涂层失效机制,表3总结了常见元素形成的化合物及过量危害。Cr 过量易形成脆性  $Cr_2O_3$ , 长期高温易脱落。Y 在 TiAlYN 涂层中含量  $\geq 0.05$  时,会促进 TiO 生成,形成表面孔洞,降低抗氧化性<sup>[3,46]</sup>。在 Ni-Al 涂层中  $\delta$ -Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> 向  $\beta$ -NiAl 相变易产生孔隙<sup>[7,79]</sup>。Hf 虽可细化晶粒、提升高温蠕变性能,但过量会促进 TiO<sub>2</sub>、HfO<sub>2</sub> 等疏松氧化物生长,引发晶间脆化,导致氧化膜开裂剥落<sup>[9,34]</sup>。

### 3.2 涂层/基体界面失效

界面失效是涂层最根本的失效模式之一。一方面,由于涂层/基材之间的化学成分差异,各层间的元素扩散过程是难以避免的自发过程,引起界面处物相变化。扩散严重时出现元素的“贫化”层、“富集”层,对涂层的防护作用产生负面影响。例如 MCrAlY 涂层在 1 000 °C 氧化初期, Ni 内扩散形成 Ni<sub>2</sub>TiAl/NiAlTi/NiAlTi+TiAl 扩散层,表面同步生成 NiO、 $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Ni(Al, Cr)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 尖晶石等氧化物。随着氧化进行, Ti 向外扩散导致其表面形成 TiO<sub>2</sub>, 破坏 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜的连续性。同时, Al 向外迁移造成涂层及扩散区内部 Al 元素贫化<sup>[28,130]</sup>, 削弱了涂层的抗氧化能力。涂层在长期循环热应力与 Kirkendall 空洞共同作用下,发生开裂、剥落导致最终失效<sup>[22,131-132]</sup>。另一方面,

表3 涂层元素形成化合物以及元素过量影响  
 Tab.3 Compound formation and effects of elemental excess in the coating

Element	Main compounds	Hazards of excess	Lit.
Ti	TiAl, Ti <sub>3</sub> Al, TiN	Ti/Al imbalance, inhibits the formation of $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , and increases coating brittleness and internal stress	[83, 124]
Al	TiAl, TiAl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Forms brittle TiAl <sub>3</sub> phase, reduces coating adhesion, and intensifies interfacial interdiffusion	[77-78]
Cr	TiCrAl, CrN, Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Forms $\sigma$ phase, reduces toughness, and hinders the formation of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> film	[76, 125]
Y	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> segregation, accelerates internal oxidation, and increases coating brittleness	[126-127]
N	TiN, AlN, Ti <sub>2</sub> AlN	Increases coating brittleness and internal stress, prone to microcracks and spallation	[47, 106]
Ni	NiAl, Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	Accelerates coating-substrate interdiffusion, causing coating spallation	[84, 128]
Hf	HfO <sub>2</sub>	Increases coating brittleness, hinders the formation of Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> film, and prone to cracks	[34, 129]

陶瓷涂层与金属基体的热膨胀系数差异显著<sup>[133]</sup>。在热循环过程中,巨大的热应力会导致涂层内部产生裂纹(尤其是垂直裂纹),最终造成涂层的剥落。

### 3.3 环境腐蚀与侵蚀

TiAl 合金部件的服役环境中存在多种腐蚀性

环境。①热腐蚀<sup>[134]</sup>,在含 S、Na 等杂质的燃气环境中(如海洋环境或燃料),涂层表面会沉积低熔点的硫酸盐(如  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜反应生成  $\text{Al}_2\text{S}_3$  等产物,破坏保护性氧化膜,加速涂层失效。例如,喷涂 Al-Y 涂层的 TiAl 合金在 850 °C 下的 25%NaCl+75%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  熔盐中腐蚀 30 h 后,表面出现裂纹并伴有白色颗粒状产物  $\text{TiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{S}_3$ <sup>[135]</sup>。S 通过裂纹扩散至涂层内部,与 Al、Ti 反应生成非保护性的  $\text{Al}_2\text{S}_3$  和 TiS,这些硫化物在高温下会破坏涂层的完整性并加速内腐蚀<sup>[136-137]</sup>。②CaO-MgO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  硅酸盐玻璃体腐蚀<sup>[138]</sup>,在航空发动机中,吸入的沙尘、火山灰等在高温下熔融形成硅酸盐玻璃体,会渗入涂层(尤其是多孔的热障涂层),导致涂层烧结、相变,诱发较大的热应力,导致涂层早期开裂和剥落。③机械磨损与冲蚀<sup>[139]</sup>,涂层表面的磨损、微动磨损或颗粒冲蚀会直接减薄或破坏涂层及氧化膜,失去防护能力。

### 3.4 热-机械疲劳失效

实际服役中涂层承受着循环热应力与机械应力的共同作用。由周期性温度变化引起的热循环,与机械振动、离心力、气流冲击等机械载荷相互叠加,会诱发涂层内部及其与基体界面处产生交变应力集中<sup>[140-141]</sup>。在这种循环应力驱动下,微裂纹往往优先在涂层自身的微观缺陷处萌生,图 4 展示了涂层在经过拉应力和压应力共同作用下产生的裂纹,例如孔隙、夹杂、微裂纹等制造或服役过程中形成的薄弱点。或是起源于涂层与基体之间的界面区域,该处常因材料物理属性(如热膨胀系数)失配而形成应力突变区<sup>[142]</sup>。这些初始微裂纹在持续的热-机械交变载荷作用下,会沿涂层厚度方向或沿界面逐步扩展、连通,形成宏观裂纹网络<sup>[143]</sup>。随着裂纹扩展,涂层的粘结强度和完整性逐步丧失,最终发生局部或大面积的剥离、脱落,丧失其应有的防护功能<sup>[144]</sup>。在航空发动机叶片、涡轮盘等高速旋转且承受高温燃气冲刷的动态部件中,此类由热-机械疲劳驱动的涂层开裂与剥落,正是制约涂层寿命,影响部件可靠性的关键失效模式之一。

综上所述,TiAl 合金涂层的失效并非单一机制作用的结果,而是在热-力-化学多场耦合环境下相互促进的综合体现,图 4 列举了 TBC 涂层体系在多场耦合作用下造成的失效形态,因此未来涂层的设计与优化,必须针对这些具体的失效模式,通过成分设计、结构调控和工艺创新来系统性提升其抗互扩散、抗热震、抗环境腐蚀及抗疲劳的综合能力。即涂层设计理念从单一的“屏障保护”演进为“功能集成”,以满足航空发动机苛刻服役环境对材料性能的

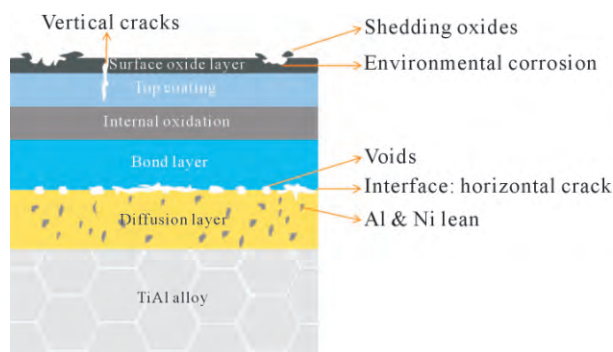


图 4 TBC 涂层体系在多场耦合作用下的最终失效示意图  
Fig.4 Schematic diagram of the final failure of the TBC coating system under multifield coupling action

实际需求。

## 4 总结与展望

表面防护涂层作为解决高温氧化问题的关键技术,近年来取得了显著进展,形成了铝及改性铝化物涂层、硅化物涂层、多元合金涂层、陶瓷涂层及新型功能涂层五大体系。涂层成分优化配合物理气相沉积、热喷涂、扩散渗、激光熔覆及双辉等离子体表面合金化等技术,实现 TiAl 合金高温防护涂层性能提升与高效制备。尽管上述涂层体系与制备技术有效提升了 TiAl 合金的高温防护性能,但在航空发动机等实际苛刻服役环境中,涂层需承受热-力-化学多场耦合作用,其失效机制仍较为复杂。主要体现在以下交互作用机制:涂层自身因 Al 元素消耗及相变,导致氧化膜失效;涂层与基体间因元素互扩散形成脆性相,并在热失配应力下引发界面开裂;外部腐蚀环境与机械磨损进一步破坏涂层完整性;在实际服役的热-机械循环载荷下,微裂纹萌生并扩展,导致涂层剥落。因此,涂层设计需从单一的“屏障保护”转向“功能集成”,通过成分、结构与工艺的系统优化,抗高温氧化的同时,兼顾涂层结合性能、抗腐蚀、力学等多重功能,以满足航空发动机苛刻服役环境对材料性能的复合需求。未来将围绕材料创新、工艺优化和工程服役模拟 3 个方向展开进一步研究。

(1)新型材料设计是关键突破口,表面防护涂层设计多依赖“试错法”,难以兼顾抗氧化性、界面相容性与抗热震性的综合需求。近年来,相图模拟与机器学习的协同应用,为 TiAl 合金高温防护涂层的精准设计提供了有效工具。相图模拟通过热力学数据库计算合金的相组成-温度-成分关系,可精准预测涂层中的相变化,为成分优化提供理论支撑。高温防护涂层的性能受多元素协同效应影响,传统实验方法难以处理各元素复杂关系。机器学习通过大数据分析,可挖掘元素间的隐藏规律,快速筛选出最优成分

组合,缩短开发周期。

(2)制备工艺优化是提升涂层致密度、结合力和抗热震性等性能的关键环节。传统制备工艺(如激光熔覆、热喷涂等)需高温热源,易导致TiAl合金晶粒粗化导致力学性能下降。绿色低温工艺(如冷喷涂、电解沉积和化学镀等)通过低温高速喷涂或溶液化学沉积实现涂层制备,能够避免基体的热损伤。复合涂层工艺能够协同发挥各工艺的优势,实现涂层性能的综合提升,解决单一工艺短板。

(3)TiAl合金涂层失效机制的表征面临温度-应力-氧化/腐蚀等多场耦合的复杂性和高温原位表征的挑战。未来,需通过机器学习优化模型收集大量实验数据(如氧化增重、裂纹扩展速率等),训练机器学习模型并校准模拟参数,提高模型准确性。发展更先进的高温原位表征技术,实现原子尺度的元素扩散实时分析。通过多物理场模拟量化多场耦合效应,先进原位表征揭示原子尺度的失效过程,两者结合推动涂层技术的创新发展。

#### 参考文献:

- [1] 刘艳明,贾新祿,张依德,汪欣. 钛及钛铝合金的高温氧化行为与防护[J]. 中国材料进展, 2023, 42(9): 699-721, 731.  
LIU Y M, JIA X L, ZHANG Y S, WANG X. High-temperature oxidation behavior and protection of titanium and titanium aluminum alloys[J]. Materials China, 2023, 42(9): 699-721, 731.
- [2] 卫贝贝,马彪,陈晓飞,张翔,唐斌. Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B合金多道次热轧后冷却速率对其组织演化及性能的影响[J]. 铸造技术, 2025, 46(4): 307-315.  
WEI B B, MA B, CHEN X F, ZHANG X, TANG B. Effects of cooling rate after multi-pass hot rolling on microstructure evolution and properties of Ti-43Al-4Nb-1Mo-0.2B alloy[J]. Foundry Technology, 2025, 46(4): 307-315.
- [3] 郭佳明,梁精龙,李慧,徐正震. 钛铝合金及其金属间化合物制备工艺研究进展[J]. 矿产综合利用, 2022(3): 1-5.  
GUO J M, LIANG J L, LI H, XU Z Z. Research progress on preparation technology of titanium aluminum alloy and its intermetallic compounds[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 2022(3): 1-5.
- [4] 毕威卿,李广志,苏驰,蒲思洪,李龙. 航空航天用钛及钛铝合金熔模铸造技术研究进展[J]. 铸造技术, 2025, 46(10): 1014-1018.  
BI W Q, LI G Z, SU C, PU S H, LI L. Research progress on investment casting technology for titanium and titanium alloys in aerospace applications[J]. Foundry Technology, 2025, 46(10): 1014-1018.
- [5] 张永刚,韩雅芳,陈国良. 金属间化合物结构材料[M]. 北京:国防工业出版社, 2001: 439.
- [6] 华佳俊,孙志平,卓恩达,艾诚. TiAl合金的高温抗氧化涂层研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(4): 1062-1079.  
HUA J J, SUN Z P, ZHOU E K, AI C. Research progress on high-temperature oxidation coatings of TiAl alloys[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(4): 1062-1079.
- [7] ZHANG Z G, TENG X, XIANG H F, SHENG Y G, ZHANG X J. Preparation of TiAl<sub>3</sub> coating on  $\gamma$ -TiAl through hot-dip aluminizing and subsequent interdiffusion treatment[J]. High Temperature Materials and Processes, 2009, 28(1-2): 115-119.
- [8] ALAM M Z, DURGARAO K Y, KUMAWAT M, BANUMATHY S. Microstructure, oxidation and mechanical properties of a diffusion aluminide (Al<sub>3</sub>Ti) coated lamellar  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380: 125071.
- [9] CHU M S, WU S K. The improvement of high temperature oxidation of Ti-50Al by sputtering Al film and subsequent interdiffusion treatment[J]. Acta Materialia, 2003, 51(11): 3109-3120.
- [10] XIANG Z D, ROSE S R, DATTA P K. Codeposition of Al and Si to form oxidation-resistant coatings on  $\gamma$ -TiAl by the pack cementation process[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 80(2): 482-489.
- [11] GORAL M, SWADZBA L, MOSKAL G, HETMANCZYK M, TETSUI T. Si-modified aluminide coatings deposited on Ti46Al7Nb alloy by slurry method[J]. Intermetallics, 2009, 17(11): 965-967.
- [12] BAUER P P, KLAMANN L, SWADZBA R, LASKA N. Effect of Si content on deposition and high-temperature oxidation of Al-Si coatings obtained by magnetron sputtering PVD method[J]. Coatings, 2022, 12(6): 859.
- [13] ZHAO F, CUI X, XIONG T, WANG J Q. Promoting direct formation of a single  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> scale on a silicon-aluminizing coating on TiAl alloys by a novel fluorination method[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 6211-6225.
- [14] ZHOU C, XU H, GONG S, YANG Y, KIM K Y. A study on aluminide and Cr-modified aluminide coatings on TiAl alloys by pack cementation method[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 132(2-3): 117-123.
- [15] EBACH-STAHL A, FRÖHLICH M. Oxidation study of Pt-Al based coatings on  $\gamma$ -TiAl at 950 °C[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 287: 20-24.
- [16] MITRA R. Mechanical behaviour and oxidation resistance of structural silicides[J]. International Materials Reviews, 2006, 51(1): 13-64.
- [17] FRÖHLICH M, EBACH-STAHL A, BRAUN R, LEYENS C. Oxidation protective coatings for  $\gamma$ -TiAl-recent trends[J]. Materials Science & Engineering Technology, 2007, 38(9): 667-673.
- [18] LIANG W, MA X X, ZHAO X G, ZHANG F, SHI J Y, ZHANG J. Oxidation kinetics of the pack siliconized TiAl-based alloy and microstructure evolution of the coating[J]. Intermetallics, 2007, 15(1): 1-8.
- [19] LI Y, XIE F, LI X. Si-Al-Y co-deposition coatings prepared on Ti-Al alloy for enhanced high temperature oxidation resistance[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2018, 33(4): 959-966.
- [20] TIAN J, ZHANG C, LYU W, LI X, TIAN W. Structure and high-temperature oxidation performance of Si-Co diffusion coatings prepared on a TiAl-Nb alloy[J]. Coatings, 2023, 13(8): 1427.
- [21] YAN H J, YE X Y, MENG X Z, LI H, HU H S, LIU H J, SUN Q Q, WU L K, CAO F H. Tailoring microstructure in K-doped SiO<sub>2</sub> coatings for enhanced densification and oxidation resistance[J].

- Journal of Materials Science & Technology, 2026, 254: 29-44.
- [22] HUANG J, ZHAO F, CUI X, WANG J Q, XIONG T Y. Long-term oxidation behavior of silicon-aluminizing coating with an in-situ formed  $Ti_3Si_3$  diffusion barrier on  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. Applied Surface Science, 2022, 582: 152444.
- [23] ZHANG Z F, SONG X L, MU Y K, DUAN Z X, YANG Y, XIE L, LIU Y, HAN Y, XU R. Fabrication of  $Al_2O_3/Ti$ -Si ceramic composite diffusion coatings via Si/SiO<sub>2</sub> pack cementation for oxidation protection of TiAl alloys[J]. Ceramics International, 2025, 51 (30): 65551-65564.
- [24] SALAM S, HOU P Y, ZHANG Y D, WANG H F, ZHANG C, YANG Z G. Compositional effects on the high-temperature oxidation lifetime of MCrAlY type coating alloys[J]. Corrosion Science, 2015, 95: 143-151.
- [25] PENNISI F J, GUPTA D K. Improved plasma-sprayed Ni-Co-Cr-Al-Y and Co-Cr-Al-Y coatings for aircraft gas turbine applications [J]. Thin Solid Films, 1981, 84(1): 49-58.
- [26] TANG Z, WANG F, WU W. Effect of MCrAlY overlay coatings on oxidation resistance of TiAl intermetallics[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 99(3): 248-252.
- [27] KIM D J, SEO D Y, HUANG X, YANG Q, KIM Y W. Cyclic oxidation behavior of a beta gamma powder metallurgy TiAl-4Nb-3Mn alloy coated with a NiCrAlY coating [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(13): 3048-3054.
- [28] LI Y, MA K, XU J J, LI Y M, ZHANG Y, ZUO J, LI M S. Microstructure evolution and cyclic oxidation performance of  $Cr_2AlC$  as active diffusion barrier for NiCrAlY coating on TiAl alloy[J]. Corrosion Science, 2024, 226: 111696.
- [29] DING Z, MIAO Q, LIANG W P, YANG Z G, LIN H. Isothermal oxidation behavior of NiCoCrAlY/ZrO<sub>2</sub> composite coating on  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. Materials Research Express, 2018, 5(6): 066524.
- [30] ZHEN Z, BING Z, WANG Y R I, ZHOU B, ZHENG K, GUI W Y, WANG Y L, YU S W, LIN J P. Synthesis and interfacial characterization of Cr/CoNiCrAlTaY bilayer coating on  $\gamma$ -TiAl alloy for oxidation protection[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35(6): 1837-1854.
- [31] LEE J K, OH M H, WEE D M. Long-term oxidation properties of Al-Ti-Cr two-phase alloys as coating materials for TiAl alloys[J]. Intermetallics, 2002, 10(4): 347-352.
- [32] FOX-RABINOVICH G S, WILKINSON D S, VELDHUIS S C, DOSBAEVA G K, WEATHERLY G C. Oxidation resistant Ti-Al-Cr alloy for protective coating applications[J]. Intermetallics, 2006, 14(2): 189-197.
- [33] ZHOU C, YANG Y, GONG S, XU H B. Effect of Ti-Al-Cr coatings on the high temperature oxidation behavior of TiAl alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 307(1-2): 182-187.
- [34] BRAUN R, FROEHLICH M, LEYENS C. Oxidation behaviour of TiAl-based intermetallic coatings on  $\gamma$ -TiAl alloys[J]. International Journal of Materials Research, 2010, 101(5): 637-647.
- [35] BRAUN R, KELM K, EHIASARIAN A P, HOVESEPIAN P E. Oxidation protection of  $\gamma$ -TiAl alloys by intermetallic Ti-Al-Cr-Zr coatings [J]. MRS Online Proceedings Library, 2013, 1516 (1): 89-94.
- [36] HAN D, PAN Y, NIU Y, CHEN Y, QI Z X, PAN X, ZHENG X B, CHEN G. Isothermal oxidation resistance and microstructure evolution of VPS-TiAlCrY coating on TiAl single crystals at 1 100-1 200 °C[J]. Corrosion Science, 2022, 208: 110664.
- [37] LASKA N, BRAUN R, KNITTEL S. Oxidation behavior of protective Ti-Al-Cr based coatings applied on the  $\gamma$ -TiAl alloys Ti-48-2-2 and TNM-B1[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 347-356.
- [38] SWADZBA R, BAUER P P. Microstructure formation and high temperature oxidation behavior of Ti-Al-Cr-Y-Si coatings on TiAl [J]. Applied Surface Science, 2021, 562: 150191.
- [39] WENDLER B, SINIARSKI D, RYLSKI A, BIELINSKI D, DOBROWOLSKI O, LIPINSKI P. Oxidation resistance of refractory  $\gamma$ -TiAlW coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201: 6167-6170.
- [40] MALECKA J. Effect of an  $Al_2O_3$  coating on the oxidation process of a  $\gamma$ -TiAl phase based alloy[J]. Corrosion Science, 2012, 63: 287-292.
- [41] GAO J, HE Y, GAO W. Oxidation behavior of  $\gamma$ -TiAl based alloy with  $Al_2O_3$ - $Y_2O_3$  composite coatings prepared by electrophoretic deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(19): 4453-4458.
- [42] WANG S, XIE F, WU X, MA Y, DU H X, WU G. Cathodic plasma electrolytic deposition of ZrO<sub>2</sub>/YSZ doped  $Al_2O_3$  ceramic coating on TiAl alloy [J]. Ceramics International, 2019, 45(15): 18899-18907.
- [43] MA X, HE Y, WANG D. Preparation and high-temperature properties of Au nano-particles doped  $\alpha$ - $Al_2O_3$  composite coating on TiAl-based alloy[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(23): 10273-10281.
- [44] WANG P, HE Y, ZHANG J.  $Al_2O_3$ -ZrO<sub>2</sub>-Pt composite coatings prepared by cathode plasma electrolytic deposition on the TiAl alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 37-43.
- [45] ZHANG K, XIN L, LU Y L, CHENG Y X, WANG X L, ZHU S L, WANG F H. Improving oxidation resistance of  $\gamma$ -TiAl based alloy by depositing TiAlSiN coating: Effects of silicon [J]. Corrosion Science, 2021, 179: 109151.
- [46] BRAUN R, LANGE A, HOVSEPIAN P E, EHIASARIAN A P, TIETEMA R, LEYENS C. Oxidation behaviour of TiAlYN/CrN and CrAlYN/CrN nanoscale multilayer coatings with  $Al_2O_3$  topcoat deposited on  $\gamma$ -TiAl alloys [J]. Materials at High Temperatures, 2011, 28(4): 324-335.
- [47] YANG L L, GAO F Y, ZHOU Z H, JIA Y X, DU Y, WANG J L, QIAO Y X, ZHU S L, WANG F H. Oxidation behavior of the AlN coatings on the TiAl alloy at 900 °C [J]. Corrosion Science, 2023, 211: 110891.
- [48] WU L K, WU W Y, SONG J L, HOU G Y, CAO H Z, TANG Y P, ZHENG G Q. Enhanced high temperature oxidation resistance for  $\gamma$ -TiAl alloy with electrodeposited SiO<sub>2</sub> film[J]. Corrosion Science, 2018, 140: 388-401.
- [49] YAN H J, MENG X Z, ZHUANG Z T, ZHANG Q H, SUN Q Q, WU L K, CAO F H. Effect of Ni in SiO<sub>2</sub> coating on the oxidation resistance of TiAl alloy at 900 °C [J]. Applied Surface Science, 2023, 638: 158054.
- [50] YAN H J, MENG X Z, CHONG J B, LI H, YIN R Z, ZHANG H F,

- WU L K. Cristobalite-suppressed Al-SiO<sub>2</sub> ceramic coatings: DFT guided nanoparticle design for durable oxidation resistance [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2025, 14(6): 9221090.
- [51] BIK M, GIL A, STYGAR M, DĄBROWA J, JELE P, DŁUGOŃ E, LEŚNIAK M, SITARZ M. Studies on the oxidation resistance of SiOC glasses coated TiAl alloy[J]. *Intermetallics*, 2019, 105: 29-38.
- [52] YIN R Z, YAN H J, LI Y Y, CHE Z X, WU L K, CAO F H. Enhancing the oxidation resistance of Ti45Al8.5Nb alloy with multi-layer SiOC ceramic coating[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(13): 17278-17295.
- [53] LI Y Y, YAN H J, WU L K, CAO F H. Improving the high temperature oxidation resistance of TiAl alloy by SiOC coating [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 2882-2892.
- [54] LI Y Y, YAN H J, YIN R Z, SUN Q Q, WU L K, CAO F H. The oxidation resistance of Ni nanoparticle incorporated SiOC coating for TiAl alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 679: 161148.
- [55] XIONG Y, ZHU S, WANG F. Synergistic corrosion behavior of coated Ti60 alloys with NaCl deposit in moist air at elevated temperature[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50(1): 15-22.
- [56] XIONG Y M, ZHU S L, WANG F H, LEE C H. Effect of vitreous enamel coating on the oxidation behavior of Ti6Al4V and TiAl alloys at high temperatures[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2008, 5(1): 93-98.
- [57] SARKAR S, DATTA S, DAS S, BASU D. Oxidation protection of gamma-titanium aluminide using glass-ceramic coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203(13): 1797-1805.
- [58] TANG Z, WANG F, WU W. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and enamel coatings on 900 °C oxidation and hot corrosion behaviors of gamma-TiAl [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 276(1-2): 70-75.
- [59] LIAO Y M, ZHANG B, CHEN M H, FENG M, WANG J L, ZHU S L, WANG F H. Self-healing metal-enamel composite coating and its protection for TiAl alloy against oxidation under thermal shock in NaCl solution[J]. *Corrosion Science*, 2020, 167: 108526.
- [60] CLARKE D R, OECHSNER M, PADTURE N P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines[J]. *MRS Bulletin*, 2012, 37(10): 891-898.
- [61] PAN Y, LIANG B, NIU Y, TIAN J, HAN D J, ZHONG X, XIE L L, ZHENG X B. Thermal shock behaviors of plasma sprayed YSZ/TiAlCrY system on TiAl alloys[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(5): 6199-6207.
- [62] FRÖHLICH M, BRAUN R, LEYENS C. Oxidation resistant coatings in combination with thermal barrier coatings on  $\gamma$ -TiAl alloys for high temperature applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(7): 3911-3917.
- [63] ZENG S, ZHAO A, JIANG H. Oxidation of conventional and nanostructured 8 wt.% yttria-stabilized zirconia coating surface coatings on  $\gamma$ -TiAl [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 332: 362-367.
- [64] NOURI S, SAHMANI S, ASAYESH M, AGHDAM M M. Microstructural characterization of YSZ-CoNiCrAlY two-layered thermal barrier coating formed on  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloy via APS process[J]. *Intermetallics*, 2020, 118: 106704.
- [65] HAO X, ZHAI J, KONG L B, XU Z. A comprehensive review on the progress of lead zirconate-based antiferroelectric materials[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 63: 1-57.
- [66] WANG S, XIE F, WU X, CHEN L. CeO<sub>2</sub> doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite ceramic coatings fabricated on  $\gamma$ -TiAl alloys via cathodic plasma electrolytic deposition[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788: 632-638.
- [67] SONG J, LONG Y, HE Y, LI Y, HUANG D, GU Y, WANG X, WANG J, CHEN M. Study on preparation of nano-CeO<sub>2</sub> modified aluminized coating by low temperature pack aluminizing on  $\gamma$ -TiAl intermetallic compound[J]. *Coatings*, 2025, 15(8): 914.
- [68] HAN D, LI J, SUN T, YE Y, PAN X, NIU Y, ZHENG X. Thermal shock resistance of TiAlCrY/rare-earth aluminate ceramics thermal barrier coatings on TiAl single crystals[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2025, 513: 132437.
- [69] LAN H, YANG Z G, XIA Z X, ZHANG Y D, ZHANG C. Effect of dysprosium addition on the cyclic oxidation behaviour of CoNi-CrAlY alloy[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(4): 1476-1483.
- [70] ZOU Y, WANG J, ZHANG L, FU Y, YE Z, WANG Y, WEI D, ZHOU Y. Microstructure and ablation behavior of TiAl alloy with in-situ HfSi<sub>2</sub>-HfO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> nanocomposite ceramic coating by LPDS technique[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 476: 130268.
- [71] SUN Y Y, MIAO Q, LIANG W P, ZANG K, WU Y T, YU H Y, YIN M J, CAO X G, SONG Y D. High temperature oxidation resistance of NiCoCrAl high entropy alloy coating on the TiAl alloy[J]. *Metals and Materials International*, 2024, 30(1): 89-102.
- [72] SUN Y, MIAO Q, LIANG W, GUPTA M, JIA F, XU J Y, YU H Y, ZANG K. High temperature oxidation-resistant AlCoCrFeNi high entropy alloy coating on TiAl alloy: Role of pre-diffusion on oxidation resistance[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 689: 162501.
- [73] LASKA N, SWADŹBA R, NELLESEN P, HELLE O, ANTON R. Oxidation behavior of Ti<sub>2</sub>AlC MAX phase-based coating on a  $\gamma$ -TiAl alloy TiAl48-2-2 produced by DC magnetron sputtering[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2024, 480: 130601.
- [74] LASKA N, BAUER P, HELLE O, KREPS F. Sputtering and characterization of MAX-phase forming Cr-Al-C and Ti-Al-C coatings and their application on  $\gamma$ -based titanium aluminides[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2022, 24(2): 2100722.
- [75] SIENKIEWICZ J, KURODA S, MURAKAMI H, ARAKI M, KURZYDŁOWSKI K. Microstructure and oxidation performance of TiAl-(Cr, Nb, Ta) coatings fabricated by warm spray and high-velocity Oxy-fuel spraying[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, 28(3): 563-579.
- [76] BADINI C, DEAMBROSIO S M, PADOVANO E, FABRIZIO M, OSTROVSKAYA O, MIORIN E, D'AMICO G, MONTAGNER F, BIAMINO S, ZIN V. Thermal shock and oxidation behavior of HiPIMS TiAlN coatings grown on Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic alloy[J]. *Materials*, 2016, 9(12): 961.
- [77] SASAKI T, YAGI T. Two-step diffusion treatment of aluminum-coated TiAl-based alloy[J]. *Surface Engineering*, 2016, 32(11): 809-815.
- [78] VARLESE F A, TULUI M, SABBADINI S, PELLISSERO F, SEBASTIANI M, BEMPORAD E. Optimized coating procedure for

- the protection of TiAl intermetallic alloy against high temperature oxidation[J]. *Intermetallics*, 2013, 37: 76-82.
- [79] MU Y X, LIANG Y F, SHENG J Q, ZHANG C Y, GUO Z, YANG G, SUN T L, WANG Y S, LIU J P. A novel approach to coating for improving the comprehensive high-temperature service performance of TiAl alloys[J]. *Acta Materialia*, 2025, 283: 120500.
- [80] ZHOU C, XU H, GONG S, KIM K Y. A study of aluminide coatings on TiAl alloys by the pack cementation method[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 341(1-2): 169-173.
- [81] ZHANG Z G, WANG Y J, XIAO L J, ZHANG Q L, SU Y, LIN J S. High-temperature oxidation of hot-dip aluminizing coatings on a Ti<sub>3</sub>Al-Nb alloy and the effects of element additions[J]. *Corrosion Science*, 2012, 64: 137-144.
- [82] XIONG H P, MAO W, XIE Y H, MA W L, CHEN Y F, LI X H, LI J P, CHENG Y Y. Liquid-phase siliconizing by Al-Si alloys at the surface of a TiAl-based alloy and improvement in oxidation resistance[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(9): 2605-2620.
- [83] MOSER M, MAYRHOFER P H, CLEMENS H. On the influence of coating and oxidation on the mechanical properties of a  $\gamma$ -TiAl based alloy[J]. *Intermetallics*, 2008, 16(10): 1206-1211.
- [84] LIN X, LIU H, DUAN J, ZHENG B, ZUO X, LIU B, YUAN X, HUANG H. High temperature oxidation behavior of Al/NiAl composite coating on TiAl alloy [J]. *Materials Characterization*, 2025: 115653.
- [85] GONG S, XU H, YU Q, ZHOU C. Oxidation behavior of TiAl/TiAl-SiC gradient coatings on gamma titanium aluminides[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 130(1): 128-132.
- [86] TENG S, LIANG W, LI Z, MA X. Improvement of high-temperature oxidation resistance of TiAl-based alloy by sol-gel method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 464(1-2): 452-456.
- [87] WANG S, XIE F, WU X, LV T, MA Y. Microstructure and high temperature oxidation behavior of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> CPED coating on TiAl alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 828: 154271.
- [88] ZHANG X J, LI Q, ZHAO S Y, WANG L, ZHANG J. Improvement in the oxidation resistance of a  $\gamma$ -TiAl-based alloy by sol-gel derived Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 255(5): 1860-1864.
- [89] ZHU M, LI M, LI Y, ZHOU Y. Influence of sol-gel derived Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> film on the oxidation behavior of a Ti<sub>3</sub>Al based alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 415 (1): 177-183.
- [90] MAŁECKA J. Oxidation behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on Ti-25Al-12.5 Nb alloy [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(7): 2951-2958.
- [91] YANG X, JIANG Z, HAO G, LIANG Y, DING X, LIN J. Ni-doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings prepared by cathode plasma electrolysis deposition on Ti-45Al-8.5 Nb alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 455: 144-152.
- [92] YAO Y B, YAO Z J, ZHOU Y J. High-temperature oxidation resistance of sol-gel-derived ZrO<sub>2</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) coating on titanium alloy[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2016, 80 (3): 612-618.
- [93] GONG X, CHEN R R, YANG Y H, WANG Y, DING H S, GUO J J, SU Y Q, FU H Z. Effect of Mo on microstructure and oxidation of NiCoCrAlY coatings on high Nb containing TiAl alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 431: 81-92.
- [94] CHEN R, GONG X, WANG Y, QIN G, ZHANG N N, SU Y Q, DING H S, GUO J J, FU H Z. Microstructure and oxidation behaviour of plasma-sprayed NiCoCrAlY coatings with and without Ta on Ti<sub>44</sub>Al<sub>6</sub>Nb<sub>1</sub>Cr alloys [J]. *Corrosion Science*, 2018, 136: 244-254.
- [95] GONG X, CHEN R R, WANG Y, SU Q, GUO J J, FU H Z. Microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlY coating with different Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concentration on TiAl alloy[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8: 710431.
- [96] XIONG Y, ZHU S, WANG F. The oxidation behavior of TiAlNb intermetallics with coatings at 800 °C [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 197(2-3): 322-326.
- [97] LASKA N, WATERMEYER P, KOLIOTASSIS L, BRAUN R. Oxidation behaviour of an intermetallic Ti-Al-Cr-Zr bond coat on a  $\gamma$ -TiAl based TNB alloy with 7YSZ thermal barrier coating[J]. *Materials at High Temperatures*, 2018, 35(1-3): 187-194.
- [98] LEYENS C, BRAUN R, FRÖHLICH M, HOVSEPIAN P E. Recent progress in the coating protection of gamma titanium-aluminides [J]. *JOM*, 2006, 58(1): 17-21.
- [99] LASKA N, BRAUN R. Lifetime of thermal barrier coatings deposited on  $\gamma$ -TiAl based alloys using intermetallic Ti-Al-Cr bond coats with additions of yttrium and zirconium[J]. *Oxidation of Metals*, 2014, 81(1): 83-93.
- [100] BRAUN R, ROVERE F, MAYRHOFER P H, LEYENS C. Environmental protection of  $\gamma$ -TiAl based alloy Ti-45Al-8Nb by CrAlYN thin films and thermal barrier coatings[J]. *Intermetallics*, 2010, 18(4): 479-486.
- [101] SIMOVA V, KNITTEL S, CAVARROC M, MARTINU L, KLEMBERG-SAPIEHA J. Amorphous Si-B-C-N coatings for high-temperature oxidation protection of the  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 442: 128544.
- [102] DU H L, DATTA P K, GRIFFIN D, ALJARANY A, BURNELL-GRAY J S. Oxidation and sulfidation behavior of Al-TiN-coated Ti-46.7 Al-1.9 W-0.5 Si intermetallic with CrN and NbN diffusion barriers at 850 °C[J]. *Oxidation of Metals*, 2003, 60 (1): 29-46.
- [103] LASKA N, BRAUN R. Oxidation and fatigue behaviour of gamma titanium aluminides coated with yttrium or zirconium containing intermetallic Ti-Al-Cr layers and thermal barrier coating[J]. *Materials at High Temperatures*, 2015, 32(1-2): 221-229.
- [104] BAUER P P, LASKA N, SWADŹBA R. Increasing the oxidation resistance of  $\gamma$ -TiAl by applying a magnetron sputtered aluminum and silicon based coating[J]. *Intermetallics*, 2021, 133: 107177.
- [105] YANG Y, XIAO Q, REN P, LI W, ZHU S L, WANG F H. Improved oxidation resistance of  $\gamma$ -TiAl intermetallics by sputtered Ni+CrAlYHfSiN composite coating [J]. *Corrosion Science*, 2021, 187: 109510.
- [106] OSTROVSKAYA O, BADINI C, DEAMBROSIO S M, MIORIN E, BIAMINO S, PADOVANO E. Protection from oxidation of second and third generation TiAl intermetallic alloys by magnetron sputtering deposition of a TiAl/TiAlN coating[J]. *Materials & Design*, 2021, 208: 109905.
- [107] 金海波. 现代表面处理新工艺. 新技术与新标准[M]. 北京: 当代

- 中国音像出版社,2012:595.
- [108] ZHAO F, HUANG J, CUI X Y, WANG J Q, XIONG T Y. Oxidation behavior of silicon-aluminizing coating on  $\gamma$ -TiAl alloy at different temperatures [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(9): 4447-4460.
- [109] PAN Y Y, HAN D J, HUANG S S, NIU Y, LIANG B, ZHENG X B. Thermal insulation performance and thermal shock resistance of plasma-sprayed TiAlCrY/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coating on  $\gamma$ -TiAl alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 468: 129715.
- [110] HUA C, HUANG T H, MAN Y T, ZHOU R F, HE X, ZHAI R X, YANG Q S, XIONG X P, LIANG Y W, SONG P. Fracture behavior and failure mechanism of CoNiCrAlY-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite coating and in-situ Ti<sub>2</sub>CN diffusion barrier on TiAl alloy [J]. *Materials Today Communications*, 2025, 48: 113502.
- [111] KIM S, PAIK D, KIM H, PARK K. Effect of aluminising on high temperature oxidation resistance of TiAl compounds [J]. *Materials Science and Technology*, 1998, 14(8): 822-826.
- [112] LI Y Q, XIE F Q, WU X Q. Microstructure and high temperature oxidation resistance of Si-Y co-deposition coatings prepared on TiAl alloy by pack cementation process [J]. *Transactions Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(3): 803-810.
- [113] JIA Z H, SONG X L, SU Z T, DUAN Z X, SUI Q, YANG Y, HAN Y, RAN X, LIU Y. Enhancing the high-temperature oxidation resistance of TiAl alloy via a novel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti<sub>3</sub>Si<sub>3</sub> composite coating prepared through a modified pack cementation technique [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 692: 162717.
- [114] LIU X B, WANG H M. Microstructure, wear and high-temperature oxidation resistance of laser clad Ti<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>/ $\gamma$ -TiSi composite coatings on  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(14-15): 4462-4470.
- [115] BAREKAT M, SHOJA RAZAVI R, GHASEMI A. High temperature oxidation behavior of laser clad Co-Cr-Mo coating on  $\gamma$ -TiAl substrate [J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(4): 042005.
- [116] ZHENG K, WANG Y R, WANG R Y, CHENG F, MA Y, HEI H J, GAO J, ZHOU B, WANG Y S, LIANG Y F, YUY S W, TANG B, LIN J P, WU Y C. Microstructure, oxidation behavior and adhesion of a CoNiCrAlTaY coating deposited on a high Nb-TiAl alloy by plasma surface metallizing technique [J]. *Vacuum*, 2020, 179: 109494.
- [117] WEI X F, ZHANG P Z, WEI D B, ZHAO H Y, LISKIEWICZ T. Niobium coated Ti-Al alloy: Improvement of tribological behaviour, oxidation resistance and flame retardancy [J]. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2016, 10(6): 559-569.
- [118] WEI D B, ZHANG P Z, YAN Y Q, CHEN X H, LI F K, WANG S Y, YAO Z J. High-temperature oxidation of double-glow plasma tantalum alloying on  $\gamma$ -TiAl [J]. *Oxidation of Metals*, 2019, 92(3): 337-351.
- [119] XU Y, SHI P, QIU J, WU A J, GUI S Y, LI Z, TAO X W. Oxidation behaviors and self-healing performance of MoSiAlY coating on  $\gamma$ -TiAl substrate by a surface alloying method [J]. *Vacuum*, 2019, 165: 148-156.
- [120] TSAO T K, YEH A C, KUO C M, MURAKAMI H. High temperature oxidation and corrosion properties of high entropy superalloys [J]. *Entropy*, 2016, 18(2): 62.
- [121] JACOBSON N S. Corrosion of silicon based ceramics in combustion environments [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, 76(1): 3-28.
- [122] WANG X, CAI C, ZHOU G. Effect of water vapor on alumina scale growth based on first-principles calculations [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(18): 9736-9746.
- [123] CHEN H, JACKSON G A, SUN W. An overview of using small punch testing for mechanical characterization of MCrAlY bond coats [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(6): 1222-1238.
- [124] ANINAT R, VALLE N, CHEMIN J, DUDAY D, MICHOTTE C, PENOY M, BOURGEOIS L, CHOQUET P. Addition of Ta and Y in a hard Ti-Al-N PVD coating: Individual and conjugated effect on the oxidation and wear properties [J]. *Corrosion Science*, 2019, 156: 171-180.
- [125] JIANG Z, ZHAO C, YU J, ZHANG H, LI Z. Effect of Cr on microstructure and oxidation behavior of TiAl-based alloy with high Nb [J]. *China Foundry*, 2018, 15(1): 17-22.
- [126] QUAN Y L, QIN F X, LIN S Y. Microstructure and hot corrosion resistance of Si-Al-Y coated TiAl alloy [J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(9): 2530-2537.
- [127] LI Y, XIE F, WU X, LI X. Effects of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the microstructures and wear resistance of Si-Al-Y co-deposition coatings prepared on Ti-Al alloy by pack cementation technique [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 287: 30-36.
- [128] ZHANG H, PENG X, WANG F. Fabrication of an oxidation-resistant  $\beta$ -NiAl coating on  $\gamma$ -TiAl. *Surface and Coatings Technology*, 2012, 206(8-9): 2454-2458.
- [129] TANIGUCHI S, JUSO H, SHIBATA T. Effect of Hf additions on the isothermal-oxidation behavior of TiAl at high temperatures [J]. *Oxidation of Metals*, 1998, 49(3): 325-348.
- [130] PILLAI R, WESSEL E, NOWAK W J, NAUMENKO D, QUADAKKERS W J. Predicting effect of base alloy composition on oxidation-and interdiffusion-induced degradation of an MCrAlY coating [J]. *JOM*, 2018, 70(8): 1520-1526.
- [131] DAROONPARVAR M, HUSSAIN S M, YAJID M A M. The role of formation of continuous thermally grown oxide layer on the nanostructured NiCrAlY bond coat during thermal exposure in air [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 261: 287-297.
- [132] SHI D Q, SONG J N, QI H Y, LI S L, YANG X G. Effect of interface diffusion on low-cycle fatigue behaviors of MCrAlY coated single crystal superalloys [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 137: 105660.
- [133] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications [J]. *Science*, 2002, 296(5566): 280-284.
- [134] GARIP Y, OZDEMIR O. Corrosion behavior of the resistance sintered TiAl based intermetallics induced by two different molten salt mixture [J]. *Corrosion Science*, 2020, 174: 108819.
- [135] QUAN Y L, RUI Q H, DONG G L, LIU G J, LIU J S. Microstructure and hot corrosion properties of an Al-Y coating on TiAl alloy [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31(2): 330-345.
- [136] WEI Z, LI X, LV W, MING B, LI Y, LIU X, LAI S, LIU F. Struc-

- ture and hot corrosion behavior of an Al-Co-Y Co-deposited coating on TiAl alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(11): 4796-4806.
- [137] LI X, LYU W, XIE X, WEI Z, ZHANG X, JIA L, ZHOU D. Microstructure and hot corrosion property of a Si-Co-Y diffusion coating deposited on TiAl-Nb alloy[J]. *High Temperature Corrosion of Materials*, 2024, 101(1): 169-185.
- [138] 徐博文, 赵文月, 马岳, 官声凯.  $\gamma$ -TiAl 合金在高温熔盐环境下的腐蚀机理[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(11): 2130-2135.
- XU B W, ZHAO W Y, MA Y, GONG S K. Corrosion mechanism of  $\gamma$ -TiAl alloy in high-temperature molten salt environment[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(11): 2130-2135.
- [139] LIM H P, LIEW W Y H, MELVIN G J H, JIANG Z T. A short review on the phase structures, oxidation kinetics, and mechanical properties of complex Ti-Al alloys[J]. *Materials*, 2021, 14(7): 1677.
- [140] SHEN Q, YANG L, ZHOU Y C, WEI Y G, ZHU W. Effects of growth stress in finite-deformation thermally grown oxide on failure mechanism of thermal barrier coatings[J]. *Mechanics of Materials*, 2017, 114: 228-242.
- [141] BARJESTE H M M, MADAR K Z, ABBASI S M, SHIRVANI K. Influence of prior cyclic oxidation on high temperature low cycle fatigue life of bare and Pt-Al coated superalloy Rene<sup>®</sup> 80[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(1): 43-59.
- [142] QI H Y, YANG J S, YANG X G, LI S L, MA L Q. Fatigue behavior of uncoated and MCrAlY-coated DS nickel-based superalloys pre-exposed in hot corrosion condition[J]. *Rare Metals*, 2018, 37(11): 936-941.
- [143] LI X L, LI W, LASHARI M I, SAKAI S T, WANG P, CAI L, DING X M, HAMID U. Fatigue failure behavior and strength prediction of nickel-based superalloy for turbine blade at elevated temperature[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 136: 106191.
- [144] LI S L, YANG X G, QI H G, XU G Q, SHI D Q. Influence of MCrAlY coating on low-cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-based superalloy in hot corrosive environment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 678: 57-64.

(责任编辑:李亚敏)