

表面失效及防护

Ti65 合金磷酸盐涂层抗高温氧化性能研究

李佳忆^{1,2}, 孔令艳¹, 刘建荣¹, 熊天英¹

(1.中国科学院金属研究所, 沈阳 110016;
2.中国科学技术大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110016)

摘要: **目的** 通过表面涂层提高高温钛合金 Ti65 的抗高温氧化性能。**方法** 采用喷涂法在 Ti65 合金基体上制备以磷酸铝为粘结剂、Al 和 Al/SiC 为填料的两种磷酸盐抗高温氧化复合涂层。研究 Ti65 合金和涂层样品在 650 °C 准等温、静态空气条件下的氧化动力学行为。用 XRD 和 SEM/EDS 分别对涂层样品氧化前后的物相组成、组织形貌和微区成分进行表征分析; 用电子探针 (EPMA) 分析涂层样品的元素分布情况。**结果** 650 °C 抗高温氧化实验结果表明, 磷酸盐涂层样品的准等温氧化动力学曲线均符合抛物线规律, 两种涂层样品的抛物线氧化速率常数 k_p 分别为 3.922×10^{-2} 、 1.768×10^{-2} $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$ 和 2.48×10^{-2} 、 3.385×10^{-4} $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$, 均小于 Ti65 合金, 氧化增重显著降低。以 Al/SiC 为填料的磷酸铝涂层的抗氧化性能最好, 氧化 1000 h, 质量增加 $0.20 \text{ mg}/\text{cm}^2$, 约为 Ti65 基体氧化增重 ($1.13 \text{ mg}/\text{cm}^2$) 的 1/6。微观分析结果表明, 两种磷酸盐涂层样品在 650 °C 准等温氧化后, 涂层与基体形成扩散层, 生成 TiAl_3 金属间化合物, 涂层表面均保持完好, 没有裂纹和孔隙, 有效阻止了氧元素向 Ti65 基体的扩散, 保护基体不受氧化。**结论** 磷酸盐涂层能有效阻止 650 °C 温度下氧向 Ti65 合金基体的扩散, 具有优异的抗高温氧化性能。

关键词: Ti65 合金; 抗高温氧化性能; 磷酸盐涂层; 氧化动力学; 微观组织

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)03-0171-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.03.022

High Temperature Oxidation Resistance of Phosphate Coatings on Ti65 Alloy

LI Jia-yi^{1,2}, KONG Ling-yan¹, LIU Jian-rong¹, XIONG Tian-ying¹

(1.Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2.School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the high temperature oxidation resistance of Ti65 with surface coating. Two types of high temperature oxidation resistance phosphate coatings were prepared on Ti65 alloy surface by spray with aluminum phosphate as the binder and Al particles and Al/SiC particles as the fillers. Oxidation behavior of Ti65 alloy and coated sample was investigated in quasi-isothermal static air of 650 °C. XRD and SEM/EDS were used to characterize and analyze phase

收稿日期: 2019-07-01; 修订日期: 2020-02-03

Received: 2019-07-01; Revised: 2020-02-03

基金项目: 国家自然科学基金 (50902131)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (50902131)

作者简介: 李佳忆 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LI Jia-yi (1995—), Female, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 孔令艳 (1975—), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为磷酸盐胶态材料、表面工程。邮箱: lykong@imr.ac.cn

Corresponding author: KONG Ling-yan (1975—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: phosphate based colloidal material, surface engineering and coatings. E-mail: lykong@imr.ac.cn

引文格式: 李佳忆, 孔令艳, 刘建荣, 等. Ti65 合金磷酸盐涂层抗高温氧化性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 171-179.

LI Jia-yi, KONG Ling-yan, LIU Jian-rong, et al. High temperature oxidation resistance of phosphate coatings on Ti65 alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 171-179.

composition, microstructure and chemical composition of micro-area of the coated samples before and after oxidation test. EPMA was used to analyze the distribution of elements. From the results of high temperature oxidation test at 650 °C, the quasi-isothermal oxidation kinetics curves of phosphate coating samples all conformed to parabolic laws and both coated samples had lower parabolic oxidation rate constant k_p of 3.922×10^{-2} , 1.768×10^{-2} mg/(cm²·h^{1/2}) and 2.48×10^{-2} , 3.385×10^{-4} mg/(cm²·h^{1/2}) than that of Ti65 alloy and the oxidation weight gain was significantly decreased. The aluminum phosphate coating with Al/SiC as fillers had the best oxidation resistance and the weight gain was 0.20 mg/cm² after oxidation for 1000 h, which was about 1/6 of that of Ti65 base alloy (1.13 mg/cm²). From the microscopic analysis results, after quasi-isothermal oxidation at 650 °C, an intermetallic (TiAl₃) diffusion layer was formed between the coating and substrate alloy. Both coatings kept perfect without any crack and pore and effectively prevented the diffusion of oxygen into the Ti65 substrate, thus protecting the substrate from oxidation. Phosphate coating can effectively prevent oxygen diffusion to Ti65 alloy substrate at 650 °C, and has excellent high temperature oxidation resistance.

KEY WORDS: Ti65 alloy; high temperature oxidation resistance; phosphate coating; oxidation kinetics; microstructure

Ti65 合金是一种设计使用温度在 600~650 °C 的近 α 型高温钛合金^[1-2], 具有密度低、比强度高和高温力学性能优良等优点, 用于航空发动机中的轮盘、叶片或整体叶盘等, 以减轻航空发动机的质量, 增加燃油效率^[3-7]。然而, Ti65 合金抗高温氧化性能不足, 尤其当使用温度超过 600 °C 时, 表面会形成不具有保护性的 TiO₂ 氧化膜, 氧渗透到基体与钛形成固溶体, 导致合金变脆, 严重影响合金的力学性能, 因此目前 Ti65 合金仍处于工程化研究阶段。采用有效的表面防护技术提高其抗高温氧化性能, 是解决这一问题的的重要途径。

磷酸盐涂层具有耐高温 (1300~1600 °C)、耐腐蚀和耐磨损的优异性能^[8-12], 利用磷酸盐粘结性能, 可以将多种颗粒粘结在一起涂附到基体上, 制备成多功能复合涂层。TIAN 等^[13-14]使用磷酸铝作为粘结剂, Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 混合颗粒作为填料, 在 Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V 钛合金上制备了磷酸盐涂层, 结果表明, 磷酸盐涂层作为阻挡层, 提高了基体的抗氧化性能。KONG 等^[15]以磷酸盐为粘结剂, 通过添加纳米级的 SiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃、SiC 和黏土等陶瓷骨料, 在 TiAl 合金基体上制备耐高温陶瓷涂层, 基体表面形成了以 Al₂O₃ 为主的连续致密氧化膜, 有效地阻挡了氧元素向基体的扩散。王云鹏等^[16]以正硅酸乙酯改性的磷酸二氢铝为粘结剂, 铝粉为填料, 在 45 钢上制备了含铝磷酸盐涂层, 结果表明, 中性盐雾腐蚀 1000 h 后, 涂层表面无腐蚀产物生成, 并且在 600 °C 氧化 100 h 下具有良好的抗高温氧化性能。CHEN 等^[17]以磷酸铝为粘结剂, Al₂O₃ 和 SiC 为填料, 在 A3 钢上制备复合陶瓷涂层, 磨损试验结果表明, 涂覆陶瓷涂层的 A3 钢的耐磨性约为未涂覆 A3 钢的 2 倍。这些研究结果表明, 磷酸盐涂层高温防护效果非常显著。

综上, 本文利用磷酸盐耐高温、抗氧化的性质, 粘结 Al、Al/SiC, 在 Ti65 合金表面制备两种磷酸盐抗高温氧化复合涂层, 以解决钛基合金抗高温氧化不足的问题。通过对氧化动力学曲线、样品物相组成和

组织形貌进行分析, 研究其在 Ti65 合金表面 650 °C 静态空气下的抗高温氧化行为。

1 实验

1.1 实验材料

基体材料选用 Ti65 合金, 其成分如表 1 所示, 使用电火花线切割机将其切割成尺寸为 10 mm×15 mm×2 mm 的试样。将样品表面依次在 150#、400#、800#砂纸上打磨, 去除氧化层后, 喷砂粗化, 然后在乙醇中超声清洗, 干燥备用。采用喷涂法, 以 AlPO₄ 为粘结剂, 分别以 Al 和 Al/SiC 为填料, 按一定比例称量、混合、搅拌, 制成浆料, 喷涂于 Ti65 合金样品六个表面, 构成全涂层封闭样品, 再经 120 °C 固化 2 h, 得到两组磷酸铝涂层样品, 分别标记为 S1 和 S2, 组分如表 2 所示。S1 为单层铝/磷酸铝复合涂层, S2 为内层 Al/磷酸铝、外层 SiC/磷酸铝的双层结构复合涂层。涂层平均厚度约为 20~50 μ m。

表 1 Ti65 合金的成分
Tab.1 Chemical composition of Ti65 alloy

Element	Al	Sn	Zr	Mo	Si	Nb	Ta	W	C	Ti
Content	5.9	4.0	3.5	0.3	0.4	0.3	2.0	1.0	0.05	Bal.

表 2 涂层的组分
Tab.2 Composition of coatings

Coating	S1	S2
Binder	Aluminum phosphate	Aluminum phosphate
Filler	Al	Al/SiC

1.2 测试方法

采用静态空气氧化不连续称重法, 将两组涂层样品放入 Al₂O₃ 坩埚, 在 650 °C 温度的马弗炉中进行准等温氧化实验。实验过程中剥落于坩埚中的氧化物计

入称量,取单位面积氧化增重值绘制氧化动力学曲线,并通过与 Ti65 合金的氧化增重曲线对比,评价其抗高温氧化性能。氧化实验所用天平为上海赞衡仪器有限公司 ZA305AS 型精密天平,感量为 10^{-5} g。

采用日本理学公司的 D/Max-2500PC 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析氧化后涂层的物相组成。利用配备能谱仪的 FEI Inspect F50 型场发射扫描电子显微镜 (SEM/EDS) 观察氧化前后涂层的表面、截面形貌变化,涂层与基体的结合以及涂层的致密性,并对微区进行成分分析。采用日本岛津公司的 EPMA-1610 型电子探针设备,获得涂层样品元素面分布。

2 结果与分析

2.1 氧化动力学曲线

在静态空气中,于 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行 200 h 的准等温氧化实验,氧化增重与时间的函数关系曲线如图 1a 所示。由图可知, S1 涂层样品的总增重为 0.35 mg/cm^2 , 低于 Ti65 合金基材氧化增重 (1.00 mg/cm^2)。图 2a 给出了 S2 涂层样品和 Ti65 合金在 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 空气中氧化 1000 h 的准等温氧化动力学曲线。由图可知,涂层样

品的增重明显比 Ti65 合金基材低。涂层样品增重 0.20 mg/cm^2 , 约为 Ti65 合金基材 (1.13 mg/cm^2) 的 1/6。两种涂层 S1、S2 氧化动力学曲线均分为两部分,氧化增重主要集中在初始氧化阶段,这是由于,氧化初期 10 h 内,涂层中的 Al 迅速氧化生成 Al_2O_3 所致,随后氧化增重缓慢或者几乎不变。

将单位面积氧化增重 Δm 与氧化时间 $t^{1/2}$ 作图,如图 1b 和图 2b 所示,两种涂层样品和 Ti65 合金的准等温氧化动力学曲线均符合抛物线规律。根据公式 (1),经线性拟合可得出磷酸铝涂层样品和 Ti65 合金在 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的抛物线氧化速率常数^[18]。

$$\Delta m_t = a + k_p t^{1/2} \quad (1)$$

式中, Δm_t 是单位面积氧化增重 (mg/cm^2); k_p 是抛物线氧化速率常数 ($\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$); t 是氧化时间 (h); a 是常数。

对 S1 涂层样品和 Ti65 合金基材进行线性拟合,得出 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下抛物线氧化速率常数,如表 3 所示。对 S2 涂层样品和 Ti65 合金基材进行线性拟合,得出 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下抛物线氧化速率,如表 4 所示。

分析可知, S1 涂层样品的 k_p 值均显著低于 Ti65 合金的 k_p 值。S1 涂层样品在整个高温氧化过程中始

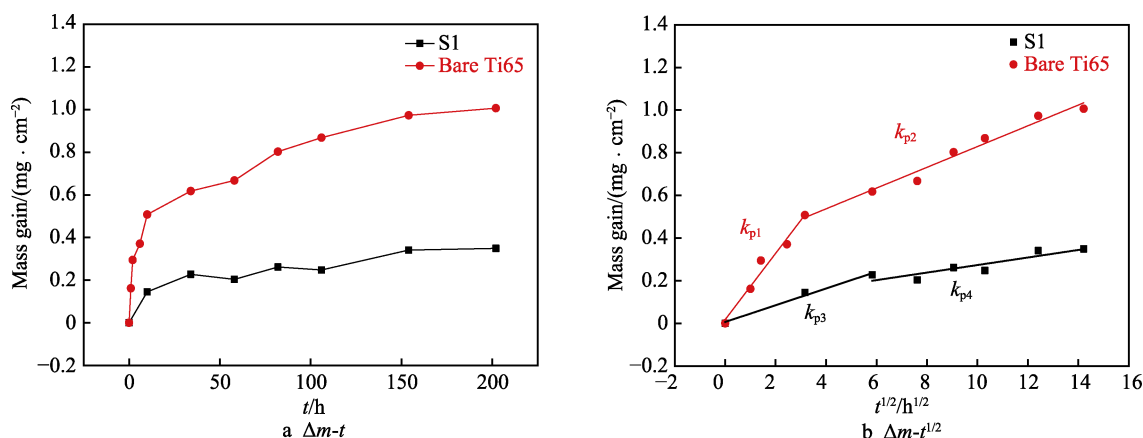


图 1 S1 涂层样品和 Ti65 合金的等温氧化动力学曲线

Fig.1 Isothermal oxidation kinetic curves of S1 coating samples and Ti65 alloy

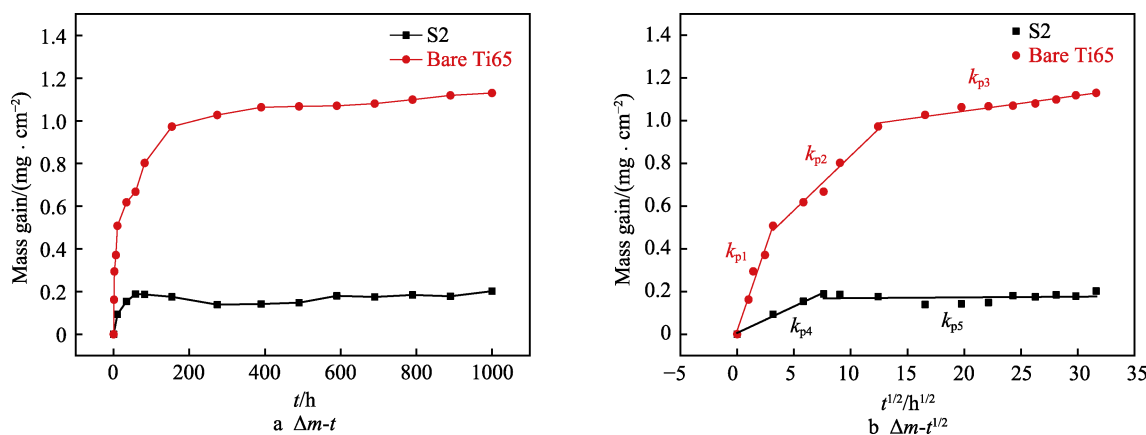


图 2 S2 涂层样品和 Ti65 合金的等温氧化动力学曲线

Fig.2 Isothermal oxidation kinetic curves of S2 coating samples and Ti65 alloy

表3 S1涂层样品和Ti65合金650℃下
抛物线氧化速率常数 k_p

Tab.3 Parabolic oxidation rate constant of S1 coating
samples and Ti65 alloy at 650℃

Samples	Oxidation rate constant	Value/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$)
Ti65	k_{p1}	15.53×10^{-2}
	k_{p2}	4.867×10^{-2}
S1	k_{p3}	3.922×10^{-2}
	k_{p4}	1.768×10^{-2}

表4 S2涂层样品和Ti65合金650℃下
抛物线氧化速率常数 k_p

Tab.4 Parabolic oxidation rate constant of S2 coating
samples and Ti65 alloy at 650℃

Samples	Oxidation rate constant	Value/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1/2}$)
Ti65	k_{p1}	15.53×10^{-2}
	k_{p2}	5.113×10^{-2}
	k_{p3}	7.33×10^{-3}
S2	k_{p4}	2.48×10^{-2}
	k_{p5}	3.385×10^{-4}

终保持着较低的氧化速率,这与磷酸铝涂层具有优异的抗氧化性相对应。准等温氧化实验表明,Ti65合金在650℃时的抗氧化性能相对较差,这是因为Ti和O之间发生反应形成 TiO_2 ,在很大程度上加剧了钛合金的质量增加。而磷酸铝涂层在650℃时显著提高了Ti65合金的抗氧化性能。

2.2 氧化膜相结构分析

图3为S1涂层样品在650℃静态空气下氧化前后的XRD图谱。如图3a所示,原始涂层样品的图谱中只有Al和钛基体对应的衍射峰。氧化20、200h后,除钛基体对应的衍射峰外,涂层中的Al一部分氧化生成 Al_2O_3 ,一部分与钛基体反应生成 TiAl_3 ,涂层中Al的衍射峰强度相应降低,如图3b。

图4为S2涂层样品在650℃下氧化不同时间后的XRD图谱。如图所示,涂层在650℃固化2h后,涂层中的Al生成了 Al_2O_3 和 TiAl_3 。随着氧化时间的增加, TiAl_2 的衍射峰逐渐增强。涂层中的SiC在650℃下并不会发生氧化,检测到的 SiO_2 相为SiC颗粒中夹杂的杂质。

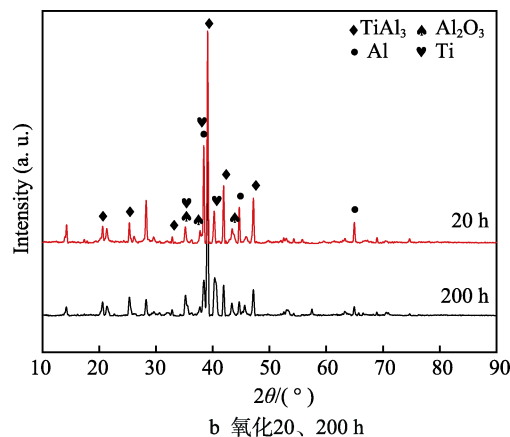
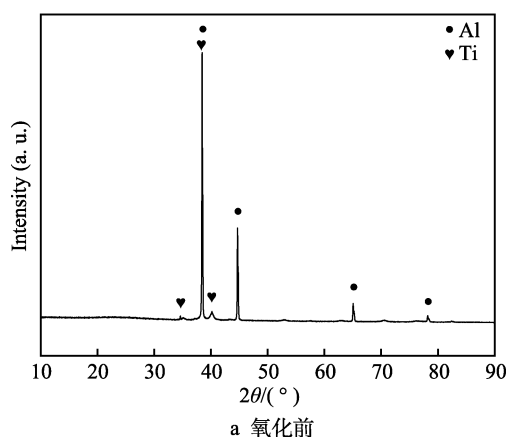


图3 S1涂层在650℃下氧化前后的XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of S1 coating (a) before and (b) after oxidation for 20 and 200 h at 650℃

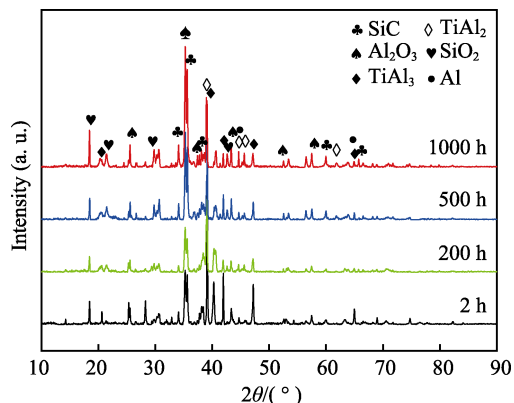


图4 S2涂层在650℃下氧化不同时间后的XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of S2 coatings after
different oxidation time at 650℃

2.3 氧化膜的组织形貌

图5为S1涂层样品的表面形貌和横截面形貌。如图所示,氧化前涂层由粒径大小不一的球形铝粉颗粒粘结堆砌形成涂层(图5a)。其截面形貌显示,涂层厚度约为25~30μm,且与Ti65合金基体结合良好(图5b)。经过20h的氧化,铝粉颗粒有少许破碎,但整体仍保持完整;氧化200h后,球形铝粉颗粒仍保持完好,镶嵌在磷酸盐构成的网状结构之中,涂层表面呈现致密完整的形貌(图5c、e)。氧化膜截面分析显示,氧化后,涂层样品在过渡区形成了涂层/扩散层/基体的三明治结构,扩散层厚度约为8~10μm(图5d、f)。经EDS分析,Ti和Al的原子比约为1:3,成分为 TiAl_3 相,这与XRD的结果一致。这一结果

表明,涂层与基体的结合由机械结合变成冶金结合,涂层与基体的结合性能提高。磷酸铝材料具有优异的耐高温性能,涂层由磷酸铝粘结包覆大小不一的铝粉颗粒形成,粒径小的铝粉颗粒分布在粒径大的铝粉颗粒周围,磷酸铝形成网络状结构,涂层致密,从而阻挡氧气扩散到基体中,对外界氧气形成屏蔽阻挡作用。此外,铝粉经氧化,表面形成氧化铝薄膜,也能够起到屏蔽效果^[19]。

图 6 为 S2 涂层样品在静态空气中于 650 °C 氧化不同时间后的表面形貌和截面形貌图。由图 6a 可知,涂层表面不平整,由尺寸大小不均匀的 SiC 颗粒组

成。经过不同时间的氧化,涂层样品的表面形态变化不大(图 6c、e、g)。氧化 1000 h 后,在涂层表面没有检测到钛的氧化物和其他氧化物新相,这归于 SiC 颗粒在 650 °C 下具有良好的热稳定性,没有被氧化或分解。磷酸铝涂层起到了氧气扩散阻挡层的作用,改善了 Ti65 合金的抗氧化性。

氧化膜截面形貌显示, S2 涂层为双层结构,最外层为 SiC/磷酸铝层,内层为 Al/磷酸铝层,涂层厚度约为 20~50 μm 。氧化后,涂层与基体在界面处形成 TiAl_3 扩散层,扩散层厚度约为 5~8 μm ,增强了涂层与基体之间的结合力(图 6b)。随着氧化时间的增

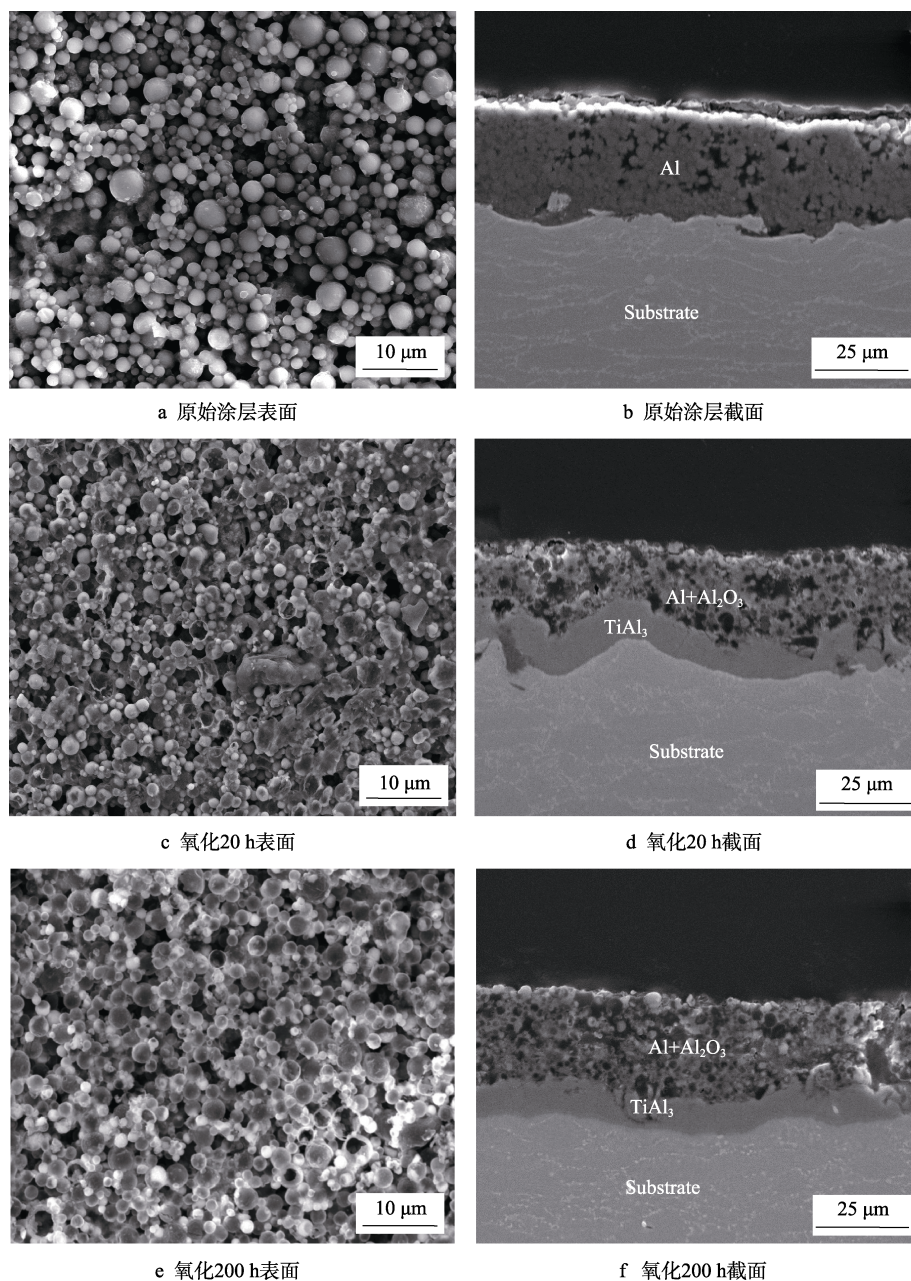


图 5 S1 涂层氧化前后的表面形貌和截面形貌

Fig.5 Surface and cross-sectional morphologies of S1 coatings: a) original coating surface; b) original coating cross section; c) surface after oxidation for 20 h; d) cross section after oxidation for 20 h; e) surface after oxidation for 200 h; f) cross section after oxidation for 200 h

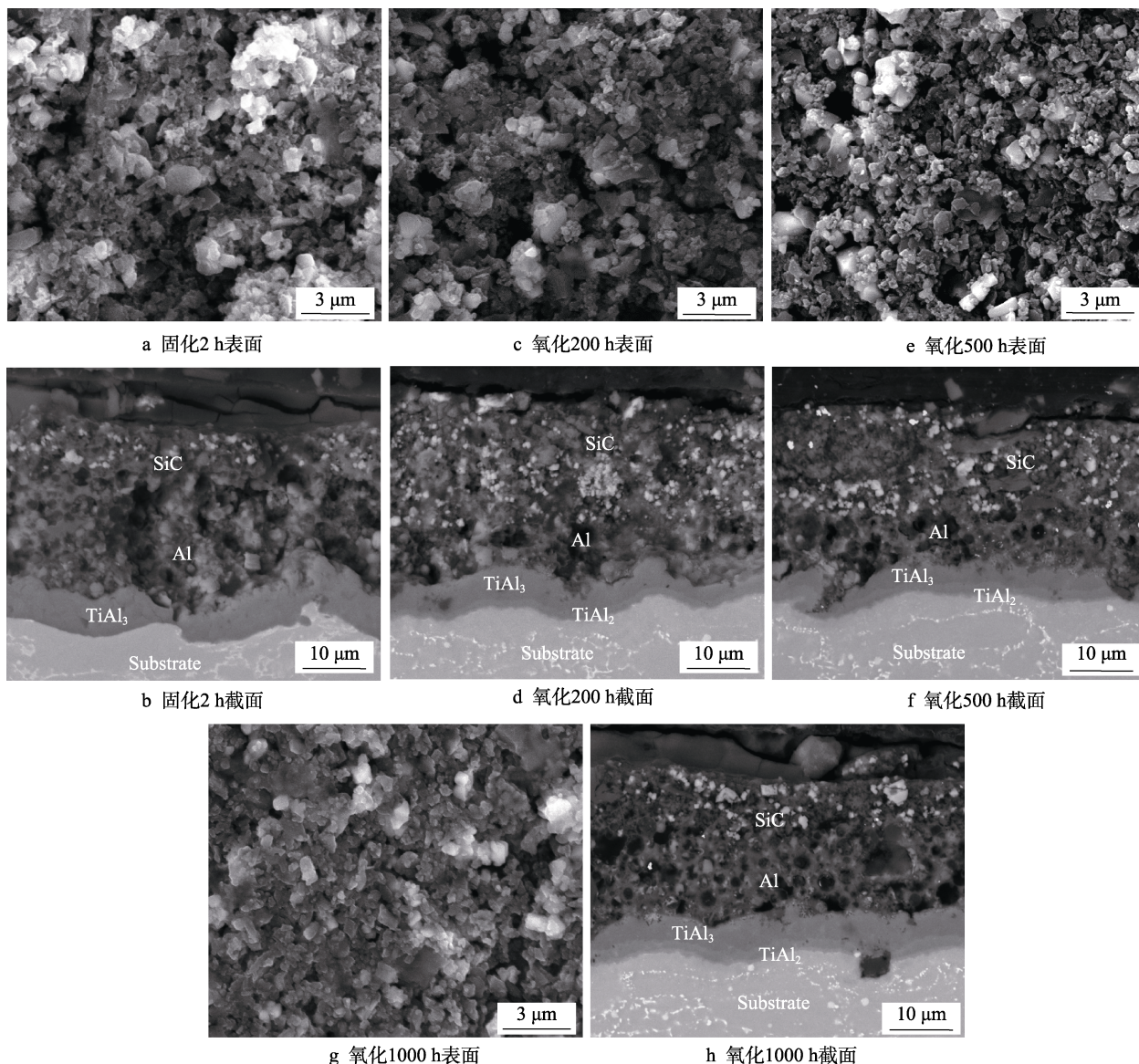


图 6 S2 涂层在 650 °C 下氧化不同时间的表面形貌和截面形貌

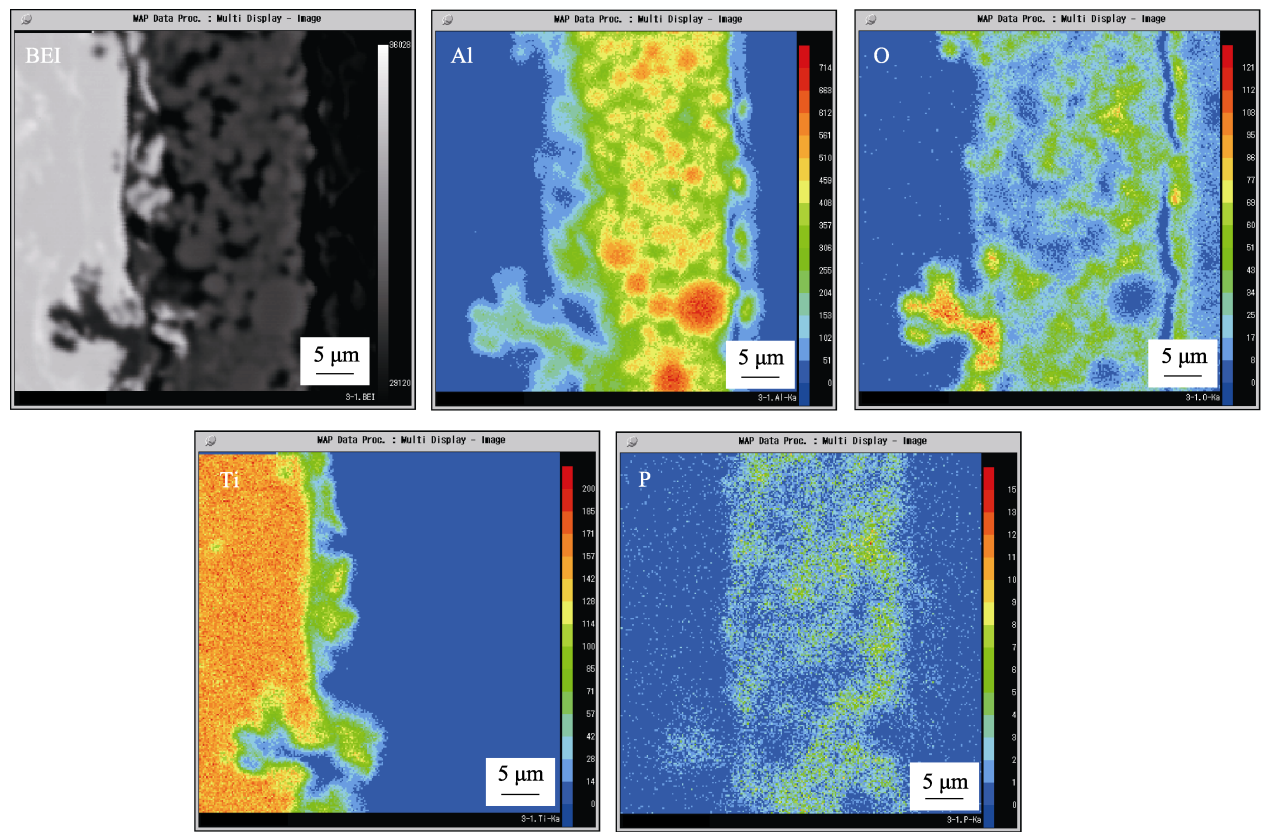
Fig.6 Surface and cross-sectional morphologies of S2 coatings after different oxidation time at 650 °C:

- a) surface after curing for 2 h; b) cross section after curing for 2 h; c) surface after oxidation for 200 h;
d) cross section after oxidation for 200 h; e) surface after oxidation for 500 h; f) cross section after oxidation for 500 h;
g) surface after oxidation for 1000 h; h) cross section after oxidation for 1000 h

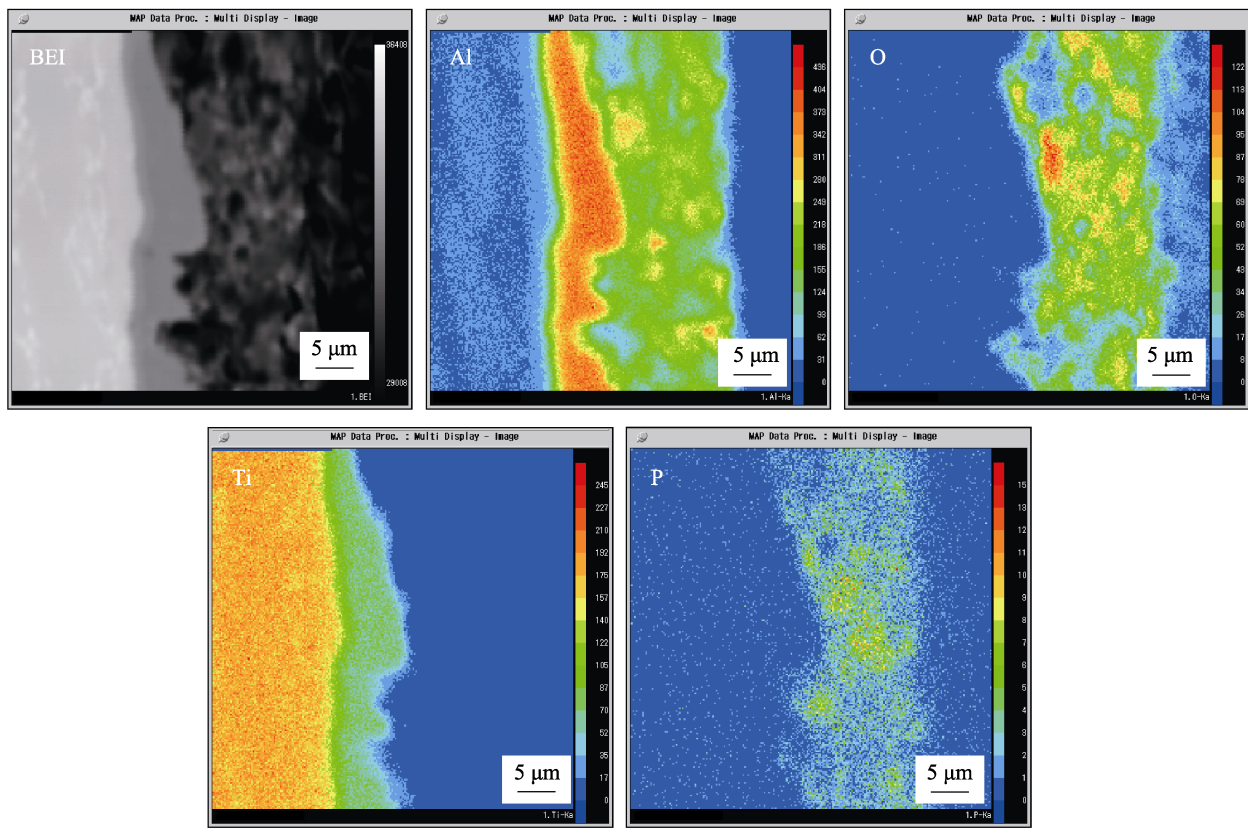
加, 扩散层的成分不仅存在 TiAl_3 相, 还有 TiAl_2 相的存在 (图 6d、f、h), 此结果与 XRD 分析结果相符 (图 4)。最外层的 SiC 层几乎没有变化, 内层的 Al 层横向孔隙增多, 但未观察到能贯穿表面的纵向孔隙, S2 双层结构涂层的氧化增重 (0.2 mg/cm^2) 低于 S1 涂层的氧化增重 (0.35 mg/cm^2), S2 涂层显示出优于 S1 涂层的抗氧化性能, 这可能归功于最外层致密的 SiC 层减少了内层 Al 层的氧化。

为获得涂层样品的元素分布情况, 对两种磷酸铝涂层样品进行了电子探针元素面扫描分析。图 7 为 S1 涂层的 EPMA 元素面分布图, 涂层同时富含 Al、P 和 O 等元素。从图 7b 中看出, 涂层样品在 650 °C 氧化 200 h 后, Al 元素在高温环境中发生了明显的向

内扩散, 在 Al 元素含量最高、Ti 元素含量最低的位置, 即界面区形成了扩散层, P 元素弥散分布在涂层中, O 元素含量增多, 但 O 元素并未扩散进入 TiAl_3 扩散层及基体内, 表明磷酸铝复合涂层有效地阻挡了氧的向内扩散。S2 涂层的 EPMA 元素面分布图如图 8 所示, 涂层同时富含 Al、P、O 和 Si 等元素, Al 元素集中在涂层的内层, 在 650 °C 温度下固化 2 h 后, Al 元素向基体扩散形成扩散层 TiAl_3 , Si 元素在涂层的最外层, 并在涂层中有少量偏聚, 如图 8a 所示。从图 8b 中看出, 涂层样品在 650 °C 氧化 1000 h 后, Si 元素也向内发生扩散, P 元素仍弥散分布在涂层中, O 元素被阻挡在基体之外, 该涂层也同样阻挡了氧向内扩散。



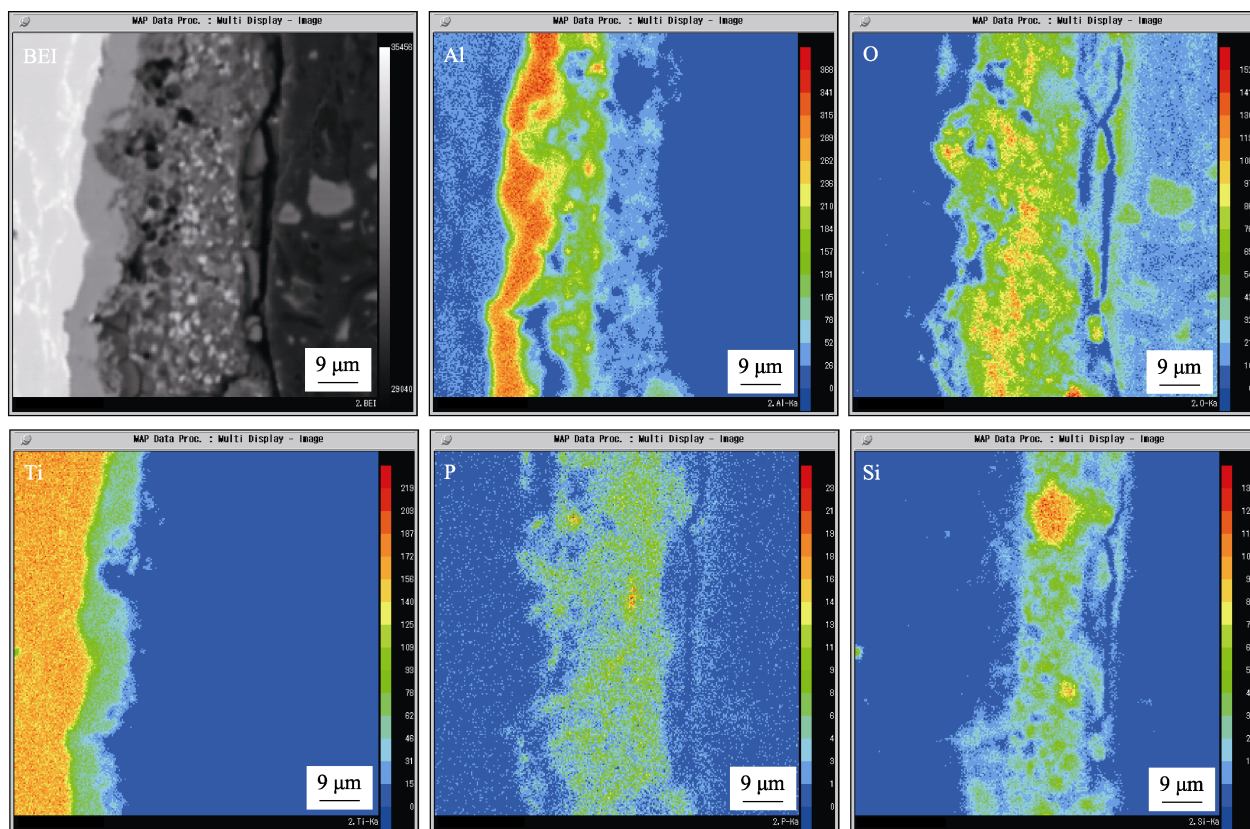
a 原始涂层



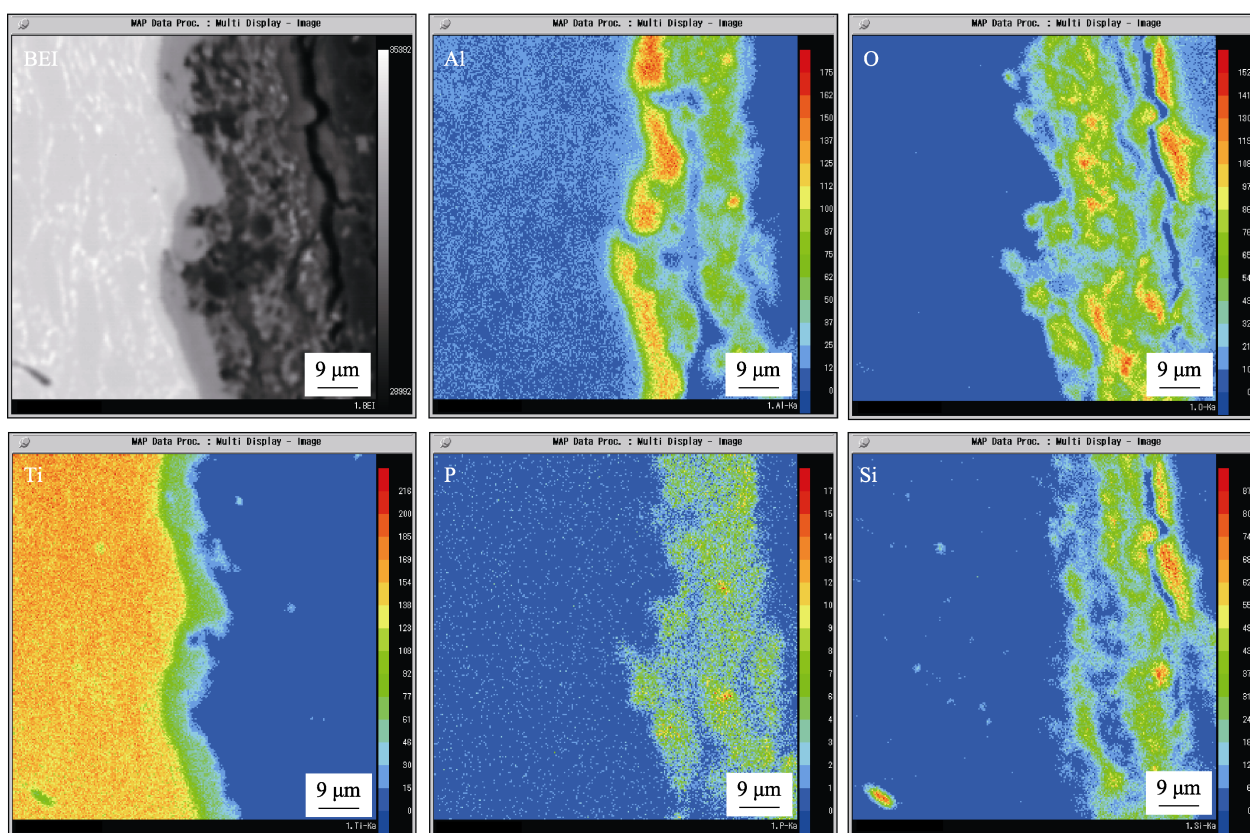
b 氧化200 h后

图 7 S1 涂层 650 °C 氧化前后 EPMA 元素面分布图

Fig.7 EPMA maps for selected elements of S1 coatings before and after oxidation at 650 °C:
a) EPMA maps of original coating; b) EPMA maps after oxidation for 200 h



a 固化2 h



b 氧化1000 h

图8 S2涂层 650 °C氧化后 EPMA元素面分布图

Fig.8 EPMA maps for selected elements of S2 coatings after oxidation at 650 °C:

a) EPMA maps after curing for 2 h; b) EPMA maps after oxidation for 1000 h

3 结论

1) 两种磷酸铝涂层样品在静态空气中 650 °C 下的氧化动力学曲线均符合抛物线规律, 两种涂层样品的氧化速率均小于 Ti65 合金基体的氧化速率, 高温氧化增重显著降低, 且以 Al/SiC 为填料的磷酸铝双层结构涂层的抗氧化性能最好。

2) 准等温氧化后, 涂层与基体形成 TiAl_3 金属间化合物扩散层, 涂层与基体由机械结合变成冶金结合, 涂层表面保持完好, 没有任何破裂或剥落。

3) 磷酸盐复合涂层能显著阻挡氧气向钛合金基体扩散, 有效地提高 Ti65 合金的抗高温氧化性能。

参考文献:

- [1] YUE K, LIU J R, ZHU S X, et al. Origins of different tensile behaviors induced by cooling rate in a near alpha titanium alloy Ti65[J]. *Materialia*, 2018(1): 128-138.
- [2] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(4): 1-26.
WANG Qing-jiang, LIU Jian-rong, YANG Rui. High temperature titanium alloys: Status and perspective[J]. *Journal of aeronautical materials*, 2014, 34(4): 1-26.
- [3] WINSTONE M R, PARTRIDGE A, BROOKS J W. The contribution of advanced high-temperature materials to future aero-engines[J]. *Journal of materials: Design and applications*, 2001, 215(2): 63-73.
- [4] 何春艳, 张利军. 国内外高温钛合金的发展与应用[J]. *世界有色金属*, 2016(1): 21-25.
HE Chun-yan, ZHANG Li-jun. The development and application of high temperature titanium alloy at domestic and abroad[J]. *World nonferrous metals*, 2016(1): 21-25.
- [5] 侯金健, 高强强, 安晓婷. 国内外高温钛合金研究及应用的最新发展[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(10): 11-15.
HOU Jin-jian, GAO Qiang-qiang, AN Xiao-ting. Latest development of domestic and international research of high-temperature titanium alloy and its application[J]. *Hot working technology*, 2014, 43(10): 11-15.
- [6] 贾新云, 刘培英, 陶冶, 等. 钛合金的高温氧化及防护[J]. *航空工程与维修*, 2000(4): 19-21.
JIA Xin-yun, LIU Pei-ying, TAO Ye, et al. High temperature oxidation and protection of titanium alloys[J]. *Aviation engineering*, 2000(4): 19-21.
- [7] 蔡建明, 曹春晓. 新一代 600 °C 高温钛合金材料的合金设计及应用展望[J]. *航空材料学报*, 2014, 34(4): 27-36.
CAI Jian-ming, CAO Chun-xiao. Alloy design and application expectation of a new generation 600 °C high temperature titanium alloy[J]. *Journal of aeronautical materials*, 2014, 34(4): 27-36.
- [8] SAYYEDAN F S, ENAYATI M H. Evaluating oxidation behavior of amorphous aluminum phosphate coating[J]. *Applied surface science*, 2018, 455: 821-830.
- [9] GUTIÉRREZ-MORA F, GORETTA K C, SINGH D, et al. High-temperature deformation of amorphous AlPO_4 -based nano-composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, 26(7): 1179-1183.
- [10] 史述宾, 戴雷, 周楠, 等. 硅溶胶改性磷酸盐无机涂料制备及其防腐性能研究[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 2017, 29(1): 48-52.
SHI Shu-bin, DAI Lei, ZHOU Nan, et al. Preparation and anti-corrosion properties of phosphate inorganic coating modified by silica sol[J]. *Corrosion science and protection technology*, 2017, 29(1): 48-52.
- [11] DAYYARI M R, AMADEH A, SADREDDINI S. Application of magnesium phosphate coating on low carbon steel via electrochemical cathodic method and investigation of its corrosion resistance[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2015, 647: 956-958.
- [12] KONG H, HAN H G. Enhancement of tribological properties of metal phosphate composite coatings with the addition of tin[J]. *Wear*, 2015, 338: 22-26.
- [13] TIAN H, WANG Y M, GUO L X, et al. Oxidation resistance of AlPO_4 bonded ceramic coating formed on titanium alloy for high-temperature applications[J]. *International journal of applied ceramic technology*, 2015, 12(3): 614-624.
- [14] WANG Y M, TIAN H, GUO L X, et al. Amorphous AlPO_4 coating formed on titanium alloy for high temperature oxidation protection: Oxidation kinetics and microstructure[J]. *Surface and coatings technology*, 2014, 252: 134-141.
- [15] KONG L Y, YANG Y, WANG J Q, et al. Preparation of inorganic phosphate ceramic coatings on γ -TiAl based alloys[J]. *ITSC*, 2015: 150-154.
- [16] 王云鹏, 李淑琴, 陈小虎, 等. 含铝磷酸盐防腐涂层的制备与性能[J]. *机械工程材料*, 2016, 40(10): 42-45.
WANG Yun-peng, LI Shu-qin, CHEN Xiao-hu, et al. Preparation and property of anti-corrosion aluminum containing phosphate coating[J]. *Materials for mechanical engineering*, 2016, 40(10): 42-45.
- [17] CHEN D C, HE L P, SHANG S P. Study on aluminum phosphate binder and related Al_2O_3 -SiC ceramic coating[J]. *Materials science and engineering*, 2003, 348(1/2): 29-35.
- [18] PIERAGGI B. Calculations of parabolic reaction rate constants[J]. *Oxidation of metals*, 1987, 27(3/4): 177-185.
- [19] 翁夏, 秦真波, 周潼, 等. 硅溶胶对无机磷酸铝涂料防腐性能的影响[J]. *涂料工业*, 2018, 48(5): 7-13
WENG Dan, QIN Zhen-bo, ZHOU Tong, et al. Effect of silica sol on corrosion resistance of aluminum phosphate composite coatings[J]. *Paint and coatings industry*, 2018, 48(5): 7-13.