

# 电泳共沉积 NiCoCrAlY 粘结层制备及抗高温氧化研究

戚哮啸, 王伟, 王莉莉

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

**摘要:**目的 分析研究 Ni 基合金与粘结层之间的扩散和界面反应规律, 以及其对热障涂层的抗高温氧化性能和工作寿命的影响。方法 采用电泳共沉积、真空致密化处理, 在 K17 镍基高温合金表面制备 NiCoCrAlY 粘结涂层, 并进行 1000 °C×100 h 抗高温氧化实验, 采用 XRD、SEM、EDS 分析 NiCoCrAlY 粘结涂层在高温氧化过程中合金元素的扩散规律。结果 高温氧化动力学曲线表明, 氧化 100 h 制备的 NiCoCrAlY 粘结涂层的氧化速率为 17.2134 mg/cm<sup>2</sup>, 远低于 K17 镍基高温合金的。Ni 由涂层向基体内扩散, Cr 和 Co 向外扩散, Al 向界面处扩散。电泳沉积制备的 NiCoCrAlY 粘结层经真空致密化处理后, 涂层均匀、致密, 粘结层主要由 Ni<sub>3</sub>Al、Al<sub>3</sub>Y<sub>5</sub>O<sub>12</sub>、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 以及  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等组成。结论 NiCoCrAlY 粘结涂层的抗高温氧化性高于 K17 镍基高温合金, 在高温氧化过程中,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 氧化膜提高了 NiCoCrAlY 粘结涂层的高温抗氧化性。Ti 主要来自基体的缺陷中, 随着高温氧化作用, 获得了由基体向外扩散所需要的能量, 并且同时与氧反应生成 TiO, TiO 容易在粘结层表面形成泡状物质, Ti 的扩散对粘结层的致密度与均匀度造成一定的影响。

**关键词:** 电泳沉积; K17 镍基耐热合金; NiCoCrAlY 粘结层; 高温氧化; 元素扩散;  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0149-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.025

## Preparation of Electrophoresis Co-deposition NiCoCrAlY Adhesive Layer and Its Resistance to High Temperature Oxidation

QI Xiao-xiao, WANG Wei, WANG Li-li

(Department of Materials, Shanghai University of Engineering Sciences, Shanghai 201620, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To analyze and study the law of diffusion and interface reaction between Ni-base alloy and the adhesive layer, and its impact on high temperature oxidation resistance and working life of the thermal barrier coating. **Methods** NiCoCrAlY bonding coating was prepared on the surface of K17 Nickel-based heat-resistant alloy by electrophoretic co-deposition and vacuum densifying treatment. The high temperature oxidation resistance experiment was carried out at 1000 °C for 100 h, and the diffusion law of alloying elements in the NiCoCrAlY bonding coating during oxidation at high temperature was analyzed by XRD, SEM and EDS. **Results** The high temperature oxidation kinetic curves showed that the oxidation rate of NiCoCrAlY bonded coating prepared

收稿日期: 2015-11-10; 修订日期: 2016-01-12

Received: 2015-11-10; Revised: 2016-01-12

基金项目: 上海市大学生创新项目 (cs1405015)

Fund: Supported by Undergraduate Innovation Project in Shanghai (cs1405015)

通讯作者: 王伟 (1973—), 男, 教授, 主要从事利用电泳沉积制备热障涂层的研究和核压力容器钢中亚稳相析出早期组织和结构演化。

Corresponding author: WANG Wei (1973—), Male, Professor, Research focus: preparation of thermal barrier coating with electrophoretic deposition, early organization and structure evolution of metastable phase in nuclear pressure vessel steel.

by 100 h oxidation was  $17.2134 \text{ mg/cm}^2$ , which was much lower than that of K17 Nickel-based heat-resistant alloy. SEM and EDS analysis of the diffusion of NiCoCrAlY bonding coating in the process of high temperature oxidation of alloy elements showed that Ni was diffused from the coating to the substrate, Co and Cr spread out, while Al diffused at the interface. The adhesive layer was uniform and dense after vacuum densifying process, and the adhesive layer was mainly composed of  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Al}_3\text{Y}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  and  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . **Conclusion** The high temperature oxidation resistance of NiCoCrAlY bonding coating was higher than that of K17 Nickel-based heat-resistant alloy. In the process of high temperature oxidation, the oxidation resistance of NiCoCrAlY bonding layer was increased by  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  oxidation film. Ti mainly came from defects of the substrate, with the high temperature oxidation, the outward diffusion of energy needed by the matrix was gained and TiO was simultaneously generated by reacting with oxygen, leading to easy generation of foam-like substance on the surface of the adhesive layer. The diffusion of Ti had certain impact on the density and uniformity of the adhesive layer.

**KEY WORDS:** electrophoretic deposition; Nickel-based heat-resistant alloy K17; NiCoCrAlY bonding coating; high temperature oxidation; element diffusion;  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

目前,船用或电站用燃气轮机或大型民用飞机发动机的叶片材料多采用 K17 镍基高温合金<sup>[1-3]</sup>,虽然该合金具有较好的高温力学性能,但其高温耐蚀性能仍不够理想,且价格昂贵。所以世界各国在竞相开发性能更优越的新材料的同时,也在研制和应用各种抗高温氧化的热障涂层以提高叶片的综合性能。

热障涂层由于能够有效保护耐热部件,提高部件的抗高温氧化性能,因此在航空航天领域和发动机技术中都占有十分重要的地位。热障涂层由 MCrAlY 为粘结底层和陶瓷顶层组成,它兼有良好的抗热腐蚀性能和隔热性能,主要用来降低基体的工作温度,免受高温氧化、腐蚀、磨损,从而保护基体并提高关键零部件的工作温度<sup>[4-5]</sup>。但是基体与粘结涂层界面的化学反应和扩散,是热障涂层在高温、高压等特殊条件下使用时失效的主要原因。本文主要分析研究 Ni 基合金与粘结层之间的扩散和界面反应规律,以及其对热障涂层的抗高温氧化性能和工作寿命的影响。

目前应用等离子喷涂<sup>[6-9]</sup>和电子束物理气相沉积<sup>[10-12]</sup>制备热障涂层已趋于成熟,并且在实际生产中使用,但等离子喷涂工艺易使涂层含有大量气孔、熔渣、夹杂和微裂纹等缺陷,电子束物理气相沉积成本太高。新发展的制备工艺如化学气相沉积<sup>[13]</sup>和电泳沉积<sup>[14-15]</sup>可以制备形状复杂的工件涂层,具有巨大的应用潜力。国内外研究学者已经开始利用电泳沉积技术制备热障涂层,本文便是利用电泳沉积技术制备 NiCoCrAlY 粘结涂层。采用 SEM、EDS、XRD 等分析手段研究粘结层组织、结构及成分的演化过程,粘结层/基体合金界面扩散方式,高温对粘结层/合金基体氧化性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 样品的制备

首先对样品进行粗磨与细磨,至试样表面无明显划痕,然后将试样放入丙酮溶液中超声清洗 15 min,清除表面污垢,最后放入质量分数为 20% 的硫酸溶液中进行表面活化 10 min,时间过长容易导致试样表层腐蚀氧化。用酒精清洗烘干备用。

以乙醇作为溶剂,按 50 g/L 的比例配制溶质, NiCoCrAlY 粘结层中各元素的配比(以质量分数计)为:Cr 20.0%, Co 24.0%, Y 0.76%, Ni 46.14%, Al 9.1%。Ni、Cr、Al 的粒度要求为 500 目, Y、Co 的粒度要求为 200 目。

将称量好的溶质倒入事先配制好的溶剂中,用玻璃棒充分搅拌。将搅拌好的溶液放入超声震荡仪中,每次超声搅拌 15 min,搅拌次数应大于四次,直至溶液达到很好的悬浮效果。在进行电泳沉积实验前放入微量的  $\text{AlCl}_3$ ,用稀硫酸滴定溶液,控制电泳液为弱酸性。

将预先处理好的基体夹在电泳槽的阴极,将石墨片夹在电泳槽的阳极,保持阴极与阳极的距离在 2 ~ 3 cm 左右。将电压调节至 150 V,沉积时间为 3 min。沉积好的试样在空气中干燥 24 h 后,用 ZT(Y)系列真空热压炉在  $10^{-3} \text{ Pa}$  下真空烧结 2 h。

### 1.2 高温氧化实验

氧化温度为 1000 °C,实验过程中,分别氧化 5、10、15、20、25、30、50、70、100 h 后将放有试样的坩锅取出进行称量。通过对样品进行恒温氧化实验,获取

不同氧化时间的镀层样品,采用 JSM-6700F 扫描电镜、EDS 以及 D/max-rB X 射线衍射仪等分析手段,研究粘结层在氧化过程中的组织、结构及成分的演化过程,及高温对粘结层/合金基体氧化性能的影响。

## 2 结果与讨论

图 1a 为 NiCoCrAlY 粘结层经 1200 °C 真空烧结处理后的组织形貌图,图 1b 为 NiCoCrAlY 粘结层与 K17 基体截面形貌图。从图 1a 中可以较清晰地看出金属颗粒排列较为紧密,金属颗粒相互融和成不规则的形状,颗粒之间无明显分界,这说明金属颗粒已经被烧结。同时发现在颗粒之间分布些许小气孔,且分布较均匀。

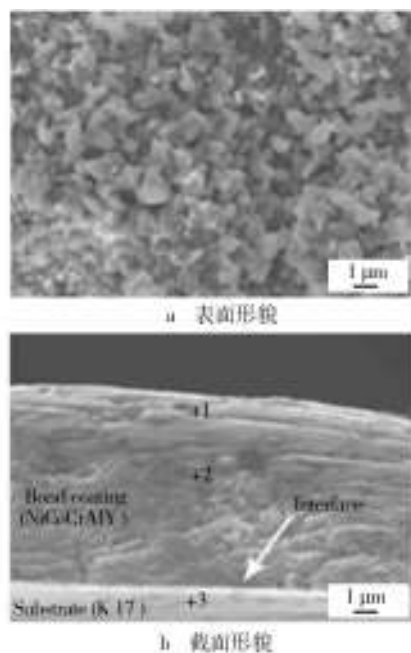


图 1 1200 °C 真空烧结后 NiCoCrAlY 粘结层形貌图

Fig. 1 Topography of NiCoCrAlY adhesive layer after vacuum sintering at 1200 °C: a) Surface topography, b) Sectional topography

由图 1b 可见, NiCoCrAlY 粘结层与 K17 基体有明显的界面,涂层厚度约为 6 μm,涂层较均匀、致密。同时可以看出, NiCoCrAlY 粘结层靠近 K17 基体处,即先沉积的部分颗粒大、空隙多,而靠近 NiCoCrAlY 粘结层外表面,即后沉积的部分更加致密、空隙很少,颗粒粒径较小。由 DLVO 理论可知,当沉积开始后,由于外加电压给予颗粒的驱动力可以使颗粒越过势垒,因此金属颗粒可以沉积在基体上,而当沉积继续进行,随着沉积颗粒的逐渐增多,由于 Ni、Co、Cr、Al、

Y 等金属微粒的介电常数较悬浮液高得多,导致实际悬浮液中的颗粒上所加电压降低。此时实际电压不具备驱动大颗粒越过势垒的能力,实际电压仅能克服小颗粒的势垒高度,故仅小颗粒可以沉积。所以小颗粒易于沉积在小颗粒旁边,形成较为致密的涂层。

图 2 和图 3 分别为经真空致密化处理后 NiCoCrAlY 粘结层 EDS 能谱图和表面的 XRD 衍射图谱。经分析可知, NiCoCrAlY 粘结层主要有 Ni、Al、Cr、Co 等合金元素,同时还含有其他元素,如 W、Mo、Ti、O 和 C 等。由于粘结层中 Y 的含量较少,EDS 未检测到 Y 的存在。由 XRD 衍射分析可知, NiCoCrAlY 粘结层主要由 Ni、CoC<sub>x</sub>、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 以及 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等相组成。

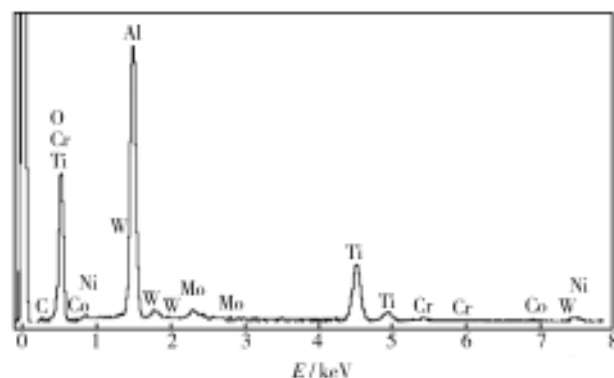


图 2 1200 °C 真空烧结后 NiCoCrAlY 粘结层 EDS 图谱

Fig. 2 EDS patterns of NiCoCrAlY adhesive layer after vacuum sintering at 1200 °C

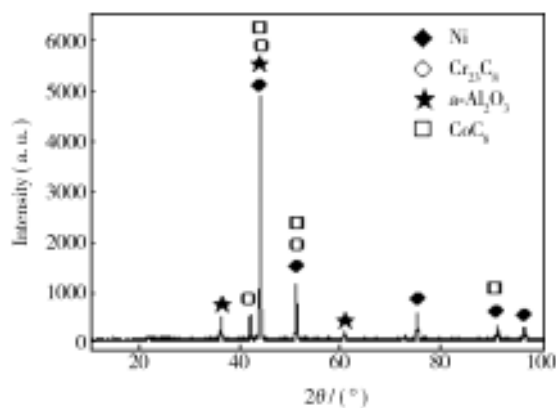


图 3 1200 °C 真空烧结后 NiCoCrAlY 粘结层 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of the NiCoCrAlY adhesive layer after vacuum sintering at 1200 °C

粘结层真空致密化处理,促进了沉积原子与基体之间的相互扩散。经过对粘结层截面从表层到基体进行成分分析(如图 1b 所示 1、2、3 三点),见图 4。从图 4 可以看出,经致密化处理后的粘结层,从表层到基体, Ni 和 Co 的含量逐渐上升, Cr 在粘结层表面含

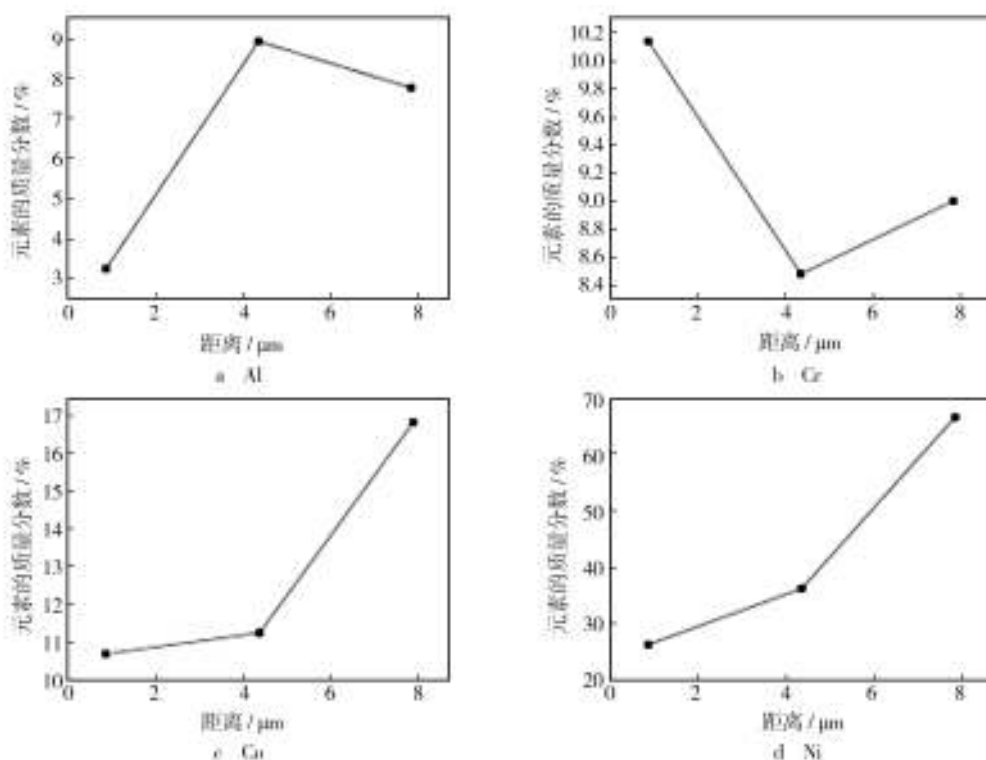


图4 从NiCoCrAlY粘结层到基体元素Al、Cr、Co、Ni含量变化图

Fig. 4 Distance from the adhesive layer to the base element Al, Cr, Co, Ni and variation of their contents

量较高,Al在粘结层与基体间的含量较高,表层的含量较低。这表明致密化处理过程中Ni和Co主要向内扩散。Cr同样由粘结层向表面扩散,并分别与C形成 $\text{CoC}_x$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 化合物(同图3XRD衍射结果一致),存在粘结层中。

图5为NiCoCrAlY粘结层经1000℃高温氧化速率曲线图。从图5可以看出,在试验所测定的时间范围内,试样的氧化增重随时间的增加而增大,并且有粘结层涂层的试样氧化速率明显低于K17合金试样,表现出了优良的高温抗氧化性,这是由于在粘结层表面生成了致密的氧化膜,可以有效地阻止涂层内部进一步氧化。

如图6a和b分别为NiCoCrAlY粘结层经1000℃高温氧化5h和100h后表面形貌图。从图6可以看出,NiCoCrAlY粘结层氧化5h后,涂层表面出现形状不规则、深度较浅的沟壑,氧化物颗粒细小,颗粒直径为2~3 μm;氧化100h后,氧化颗粒仍然比较小,部分颗粒长大,但沟壑较深,表面变得更加平整光滑。通过对1000℃氧化后的粘结层进行EDS能谱扫描,测得5h后试样表层Cr、Co、Al、Y等元素含量偏高(图7a),100h后的粘结层试样表层主要元素有Ni、Cr、Co、Al(图7b)。

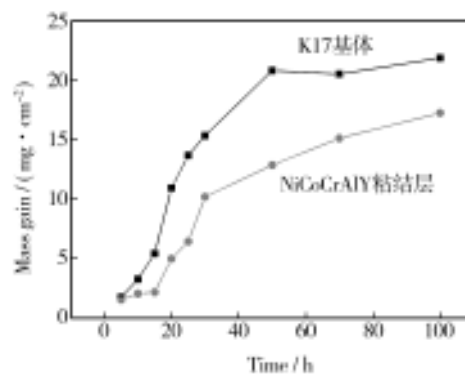


图5 1000℃高温氧化速率曲线

Fig. 5 High temperature oxidation rate curves at 1000 °C

通过对试样表面进行X射线衍射检测,测得5h静态氧化后的试样表面主要由 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 、 $\text{NiO}$ 、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\beta\text{-Y}_2\text{O}_3$ 组成,如图8a所示。而100h静态氧化后的试样主要组成相为 $\text{NiO}$ 、 $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 以及少量的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Ni}_2\text{Y}_3$ ,如图8b所示。

通过分析可知,部分Ni和Al在高温条件下生成了 $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,部分铝和氧则反应生成了致密的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜,起到很好的抗高温氧化作用。而Cr由于向外扩散,在表层的含量偏高,但由于氧化前(见图2),Al的含量(质量分数为25.18%)偏高,Cr的含量(质量分数



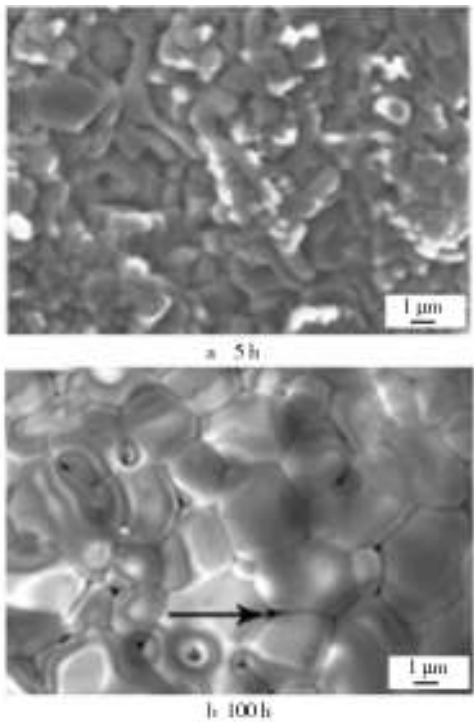


图 6 粘结层在 1000 °C 高温氧化表面形貌图  
Fig. 6 High temperature oxidation surface topography of adhesive layer at 1000 °C

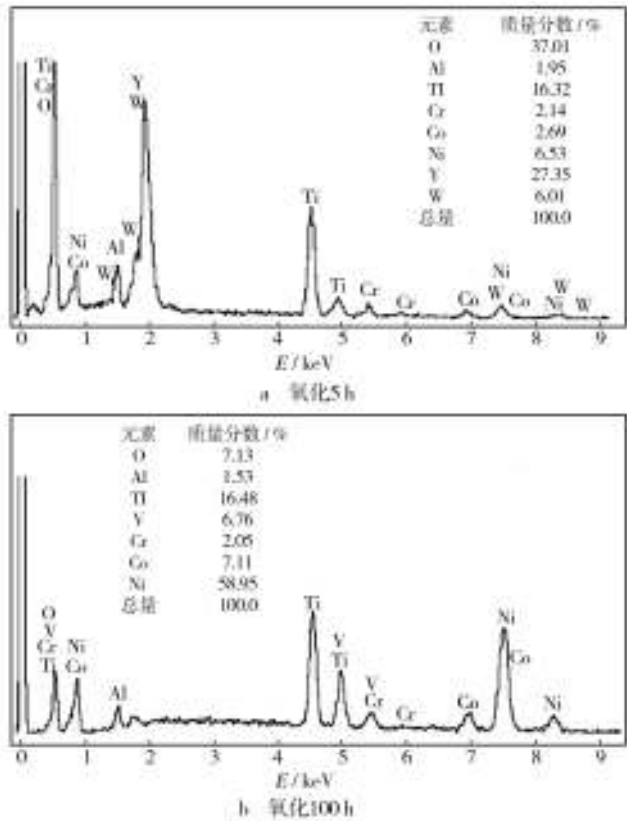


图 7 粘结层高温氧化后的 EDS 图谱  
Fig. 7 High temperature oxidation of adhesive layer (a) 5 h, (b) 100 h EDS atlas

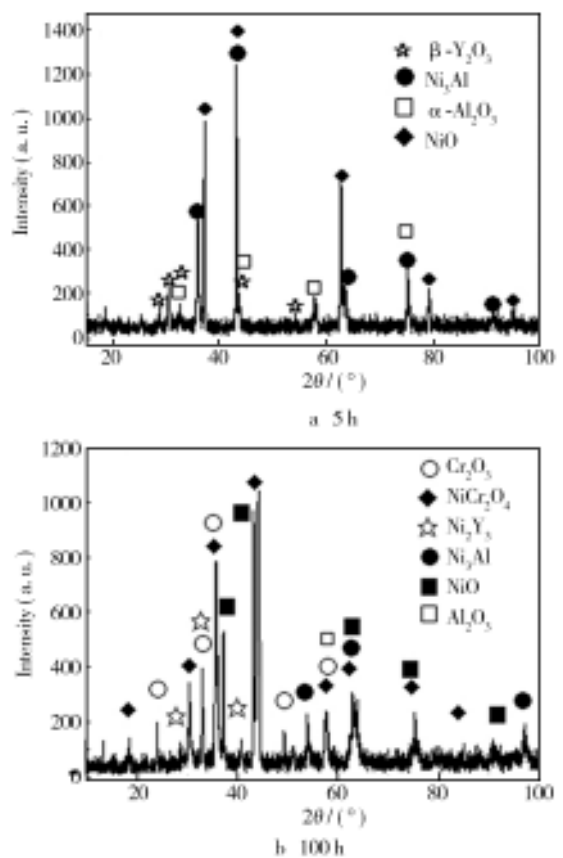


图 8 NiCoCrAlY 粘结层在 1000 °C 下氧化 XRD 相图  
Fig. 8 XRD Phase Diagrams of oxidation of NiCoCrAlY adhesive layer at 1000 °C

为 1.25%) 偏低, 因此氧化初期将优先形成  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 阻碍了氧与粘结层中 Cr 的反应, 从而降低了  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量。从图 7a 可以看出, NiCoCrAlY 粘结层氧化 5 h 后, Al 的含量大幅降低(质量分数为 1.95%), 而 Cr 的含量(质量分数为 2.14%) 增多, 因此在后期的高温氧化中, Cr 与 O 优先反应, 从而提高了  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的含量。由于长时间的高温氧化, 尖晶石型  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$  逐渐增多, 降低了粘结层的抗高温氧化性。分析认为 Al 含量的降低主要是由于其向内扩散所引起的, 而 Cr 向外扩散提高了涂层表面的 Cr 含量。

通过比较图 7a 和图 7b 发现, 在涂层表面含有 Ti 和 Y 元素, 分析认为, Ti 主要来自基体的缺陷中, 随着高温氧化作用, 获得了由基体向外扩散所需要的能量, 并且同时与氧反应生成  $\text{TiO}$ ,  $\text{TiO}$  容易在粘结层表面形成泡状物质, 如图 6b 箭头所示, Ti 的扩散对粘结层的致密度与均匀度造成一定的影响。粘结层中的 Y 一部分在高温下与氧反应生成  $\beta\text{-Y}_2\text{O}_3$ , 一部分在长时间的高温氧化后与 Ni 反应生成了  $\text{NiY}$ 。  $\text{Y}_2\text{O}_3$  在高温氧化反应中可以钉扎氧化物颗粒, 并且在参与氧

化膜的形成过程中细化  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒,减小了粘结层的空隙率,提高了致密度,并在一定程度上提升了粘结层的抗高温氧化性。

NiCoCrAlY 粘结层经高温氧化 5 h 和 100 h 后横截面形貌见图 9a 和 9b。比较发现,经 5 h 高温氧化的 NiCoCrAlY 粘结层截面组织较为致密,界面清晰,厚度约为  $6 \sim 8 \mu\text{m}$ ,经 100 h 高温氧化后,相邻金属粒子之间存在明显的空隙,粘结层致密度显著下降,厚度随之增加,约为  $10 \sim 12 \mu\text{m}$ ,在基体与 NiCoCrAlY 粘结层之间的部分区域出现了较大孔隙,降低了粘结层与基体之间的结合力。

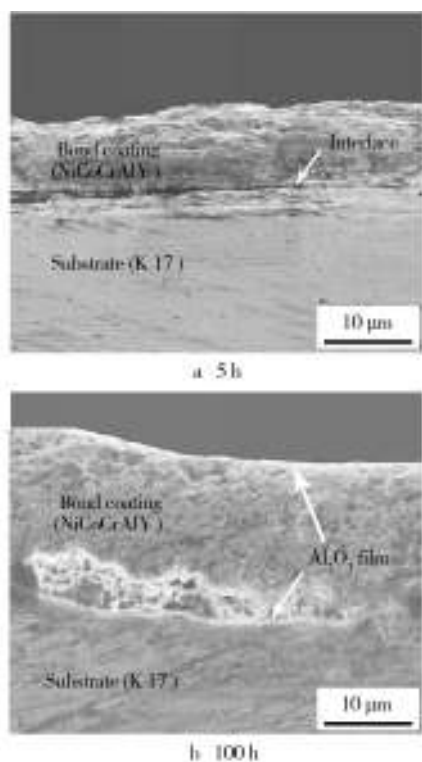


图9 NiCoCrAlY 粘结层高温氧化后横断面形貌

Fig. 9 Cross-sectional morphology of the NiCoCrAlY adhesive layer after high temperature oxidation

粘结层经 5 h 高温氧化后的 NiCoCrAlY 粘结层到 K17 基体截面不同深度合金元素分布情况如图 10a 所示。分析可得,随着涂层从表层到基体深度的递增,Ni 的含量逐渐增加,说明 Ni 在高温氧化过程中发生内扩散。Al 含量在粘结层表面和粘结层/基体的界面处含量较多,说明 Al 在高温氧化过程中向界面扩散,界面处的 Al 多以  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  的形式存在。Cr 在粘结层表层与界面处的含量较高,说明 Cr 在高温氧化过程中也倾向于在界面处偏聚。

经 100 h 高温氧化后的 NiCoCrAlY 粘结层/K17 基体截面合金元素分布如图 10b 所示。分析测得在

不同深度的粘结层中都含有 Al,主要以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  氧化膜的形式存在。而表层主要元素为 Ni 和 O,由于缺少了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  氧化膜的保护,在粘结层表面形成 NiO,降低了粘结层的高温抗氧化性。对比不同深度的元素成分的质量分数可得,在深度为  $12.83 \mu\text{m}$  处 Ni 含量较高(见图 10b)。分析认为,一方面由于 Ni 的内扩散作用,Ni 更倾向于向基体扩散,导致粘结层内层贫 Ni;另一方面,Cr 在粘结层中的不同深度发生了替位掺杂,置换了粘结层中含量较低的 Ni,加速了 Ni 的向内扩散。截面处 Ni 含量偏低,由于主要形成了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,并且由于不同深度 Al 含量低于 Cr 含量,在高温氧化过程中,会优先生成  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , $\text{Cr}_2\text{O}_3$  较  $\text{Al}_2\text{O}_3$  所组成的氧化膜疏松,为氧的进一步向内扩散提供了渠道。

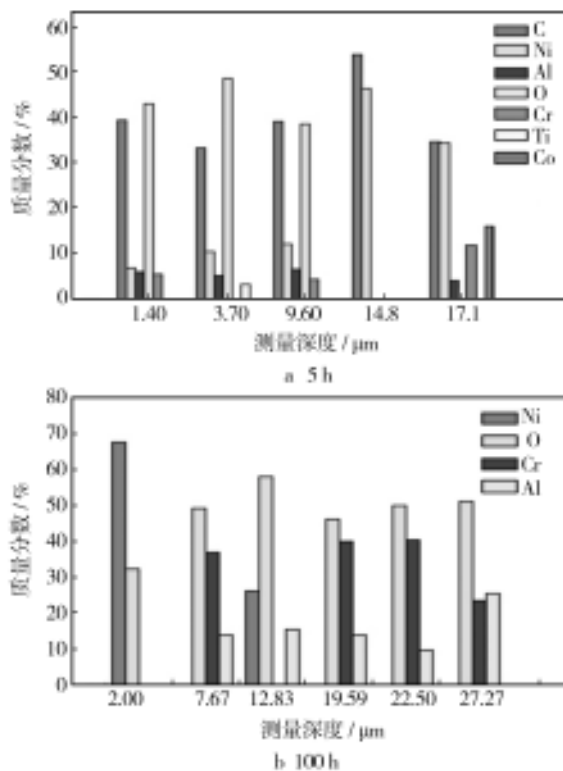


图10 高温氧化后从 NiCoCrAlY 粘结层到 K17 基体截面合金元素分布

Fig. 10 Distribution of the alloying elements from NiCoCrAlY adhesive layer to K17 after high temperature oxidation

### 3 结论

1) 电泳沉积制备的 NiCoCrAlY 粘结层经真空致密化处理后,涂层均匀、致密,粘结层主要由  $\text{Ni}_3\text{Al}$ 、 $\text{Al}_3\text{Y}_5\text{O}_{12}$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  以及  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  等组成。

2) 高温氧化过程中,Ti 从基体扩散到涂层的表

面形成泡状球形氧化物,是导致涂层抗氧化性降低的原因之一。

3) NiCoCrAlY 粘结涂层氧化 100 h 时的氧化速率为  $17.2134 \text{ mg/cm}^2$ , K17 镍基高温合金的氧化速率为  $21.8346 \text{ mg/cm}^2$ , NiCoCrAlY 粘结涂层显著提高了 K17 的高温抗氧化性。

## 参考文献

- [1] 孙伟,花银群,陈瑞芳,等. 激光熔覆  $\text{MoSi}_2$ -NiCrSiB 复合涂层的组织和性能[J]. 热加工工艺,2014,43(22):149—151.  
SUN Wei, HUA Yin-qun, CHEN Rui-fang, et al. The Microstructure and Properties of Laser Cladding  $\text{MoSi}_2$ -NiCrSiB Complex Coating[J]. Thermal Processing, 2014, 43(22): 149—151.
- [2] 王会阳,安云岐,李承宇,等. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报,2011,25(18):482—486.  
WANG Hui-yang, AN Yun-qi, LI Cheng-yu, et al. Research Progress of Nickel-based Superalloy Materials[J]. Materials Review, 2011, 25(18): 482—486.
- [3] WANG X, CHEN M H, ZHU S L, et al. Oxidation Behavior of Glass-based Composite Thermal Barrier Coating on K417G Superalloy with a NiCoCrAlY Bond Coat at  $1000^\circ\text{C}$  [J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 270(25): 314—323.
- [4] NITIN P, PADTURE, GEL M, et al. Thermal Barrier Coatings for Gas-turbine Engine Application-s [J]. Science, 2002, 4(12): 280—284.
- [5] MANFRED P, CHRISTOPH L, UWE S, et al. EB-PVD Thermal Barrier Coatings for Aero-engines and Gas Turbines[J]. Advanced Engineering Materials, 2001, 3(4): 193—204.
- [6] 张红松,杨树森,温倩.  $\text{A}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  型稀土锆酸盐热障涂层研究进展[J]. 表面技术,2014,43(4):135—140.  
ZHANG Hong-song, YANG Shu-sen, WEN Qian.  $\text{A}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  Type Rare Earth Zirconate Research Progress[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 135—140.
- [7] 李嘉,谢铮,何箫,等.  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  热障涂层材料的热物理性能[J]. 表面技术,2015,44(9):18—22.  
LI Jia, XIE Zheng, HE Jing, et al.  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3$ - $\text{Y}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  Thermal Barrier Coating Material Thermal Physical Properties[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 18—22.
- [8] 王东生,田宗军,杨斌,等. 等离子喷涂纳米热障涂层热震性能[J]. 热加工工艺,2012,41(4):126—129.  
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, YANG Bin, et al. Plasma Sprayed Nanostructured Thermal Barrier Coatings[J]. The Hot Working Processes, 2012, 41(4): 126—129.
- [9] PAWLOWSKI L. Suspension and Solution Thermal Spray Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(19): 2807—2829.
- [10] 牟仁德,何利民,陆峰,等. 热障涂层制备技术研究进展[J]. 机械工程材料,2007(5):1—4.  
MU Ren-de, HE Li-min, LU Feng, et al. Preparation of Thermal Barrier Coating Technology Research Progress[J]. Journal of Mechanical Engineering Materials, 2007(5): 1—4.
- [11] 郭洪波,彭立全,宫声凯,等. 电子束物理气相沉积热障涂层技术研究进展[J]. 热喷涂技术,2009(2):7—14.  
GUO Hong-bo, PENG Li-quan, GONG Sheng-kai, et al. The Electron Beam Physical Vapor Deposition Thermal Barrier Coating Technology Research Progress[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2009(2): 7—14.
- [12] GAO L H, GUO H B, WEI L L. Microstructure and Mechanical Properties of Yttrium Stabilized Zirconia Coatings Prepared by Plasmas Spray Physical Vapor Deposition[J]. Ceramics International, 2015, 41(7): 8305—8311.
- [13] GOTO T. High-speed Deposition of Zirconia Films by Laser-induced Plasma CVD[J]. Solid State Ionics, 2004, 172(1—4): 225—229.
- [14] 宋子豪,孙耀宁,王艳飞. 纳米陶瓷涂层的特性及研究现状[J]. 热加工工艺,2014,43(14):12—15.  
SONG Zi-hao, SUN Yao-ning, WANG Yan-fei. Characteristics and Research Status of Nano Ceramic Coating[J]. Hot Working Technology Hot Work Technology, 2014, 43(14): 12—15.
- [15] LI C L, WANG W, TAN S L, et al. Bond Strength and Oxidation Resistance of YSZ/(Ni, Al) Composite Coatings[J]. Surface Engineering, 2014, 30(9): 619—623.

(上接第136页)

- WANG Yong-yin, SI Yun-sen, CHEN Zhen, et al. Effect of SDS on Electrochemical Behavior of Electrodeposited Nickel [J]. Metal Products, 2010, 36(6): 22—24.
- [15] 储荣邦. 光亮镀镍中如何正确使用十二烷基硫酸钠[J].

电镀与环保,2004,24(5):13—16.

CHU Rong-bang. The Correct Use of Sodium Dodecyl Sulfate in Bright Nickel Plating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2004, 24(5): 13—16.