

超音速火焰喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层的制备及抗氧化性能研究

曹玉霞^{1,2}, 孙景卫³, 周海静¹, 黄雁¹, 郝斌^{1,2}

(1.唐山学院 新材料与化学工程学院, 河北 唐山 063000;
2.唐山市微纳米材料制备及应用重点实验室, 河北 唐山 063000;
3.唐山市恒中威建设工程材料检验有限公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 目的 提高金属/陶瓷体系高温固体润滑耐磨涂层的抗氧化性能。方法 采用离心喷雾造粒、高压氢还原镀镍和固相合金化技术, 制备包覆型 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合粉体, 并采用超音速火焰喷涂技术在镍基高温合金上沉积复合涂层材料, 通过 SEM 和 XRD 研究粉体和涂层的显微结构和物相组成, 通过马弗炉研究涂层在高温下的氧化性能。结果 Al₂O₃-B₄C 颗粒表面均匀包覆着一层厚度为 2~3 μm 的 NiCoCrAlY 合金。超音速火焰喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合涂层结构致密, 孔隙率仅为 0.45%±0.05%, 涂层与基体结合良好。涂层和粉体的主晶相均为 Ni 的固溶体、α-Al₂O₃ 相和 B₄C 相, 涂层衍射峰强度比粉体有所降低。在 850 °C 氧化 96 h 后, 涂层表面生成了一层连续的灰色物质, 其厚度为 1~3 μm, 经 EDX 分析, 其主要元素组成为 O、Ni、Al 和 Cr, 说明主要成分为 Ni、Al 和 Cr 的金属氧化物。涂层在 850 °C 的氧化动力学曲线分为 2 个阶段, 氧化初期, 涂层快速氧化, 生成以 NiO、Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 为主的混合氧化物膜; 氧化后期, 涂层进入稳定氧化阶段, 此时涂层的氧化过程主要由 O 在氧化膜中的扩散速度决定。结论 涂层在 850 °C 的抗氧化性能良好, 可在 850 °C 的氧化环境下使用。

关键词: 超音速火焰喷涂; NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C 涂层; 显微结构; 氧化; 镍基高温合金; 包覆

中图分类号: TG174.453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)05-0413-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.041

Preparation and Oxidation Properties of HVOF Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C Coatings

CAO Yu-xia^{1,2}, SUN Jing-wei³, ZHOU Hai-jing¹, HUANG Yan¹, HAO Bin^{1,2}

(1. School of New materials and Chemical Engineering, Tangshan College, Hebei Tangshan 063000, China;
2. Key Laboratory of Micro-nano-material Preparation and Application of Tangshan, Hebei Tangshan 063000, China;
3. Tangshan Hengzhongwei Construction Engineering Material Inspection Co., Ltd., Hebei Tangshan 063000, China)

ABSTRACT: Brush seal system was used on high-pressure compressors and turbine blades in advanced turbo-engines.

收稿日期: 2022-04-29; 修订日期: 2022-09-16

Received: 2022-04-29; Revised: 2022-09-16

基金项目: 河北省科技计划项目 (17211028); 河北省高等学校教育科学研究项目 (Z2017054); 唐山市科技计划项目 (21130225c)

Fund: Science and Technology Plans of Hebei Province (17211028); Science and Technology Research Project of Hebei Higher Education (Z2017054); Science and Technology Plans of Tangshan (21130225c)

作者简介: 曹玉霞 (1980—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为涂层材料。

Biography: CAO Yu-xia (1980-), Female, Doctor, Professor, Research focus: coating materials.

引文格式: 曹玉霞, 孙景卫, 周海静, 等. 超音速火焰喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层的制备及抗氧化性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 413-419.

CAO Yu-xia, SUN Jing-wei, ZHOU Hai-jing, et al. Preparation and Oxidation Properties of HVOF Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C Coatings[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 413-419.

The solid lubricating and wear-resistant coatings prepared on turbo-engines by thermal spraying technology would not only reduce the wear rates of the rotor shafts and brushes, but also satisfy the harsh service environment need for the brush seal parts. This is an advanced NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -10%B₄C high temperature solid lubrication wear resistant coating used in brush seal parts of turbo-engines. The work aims to improve its oxidation resistance property.

The Al_2O_3 and B₄C powders were weighted by an electronic balance in according to certain chemical composition and then mixed with some water and bonding. The mixture was made into spherical particles of 45-125 μm by spraying granulation. Then, a dense nickel layer was coated on the surface of Al_2O_3 -B₄C mixed particles by high pressure hydrogen reduction nickel plating. At last, the nickel layer on the surface of Al_2O_3 -B₄C mixed particles was alloyed by Co, Cr, Al, Y through solid state alloying under H_2 atmosphere at 950 $^\circ\text{C}$ for 8 h. The chemical compositions of the NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -10%B₄C composite powder were Ni : Co : Cr : Al : Y : Al_2O_3 : B₄C=37 : 1.25 : 8.75 : 2.75 : 0.25 : 40 : 10.

Nickel base superalloy of 40 mm \times 30 mm \times 3 mm was used to the coating matrix. The surface of the nickel base superalloy was cleaned with acetone before spraying. The composite coating was deposited on the Nickel base superalloy with Jp-5000 supersonic flame spraying equipment by high velocity oxyfuel spraying (HVOF). The spraying parameters were as follows: the flow of aviation kerosene was 21 L/h; the flow of oxygen was 50 m^3/h ; the spraying distance was 350 mm; the rate of powder feeding was 30-40 g/min. The microstructure and phase composition of powder and coating were investigated by SEM and XRD. The oxidation property of coating was characterized by muffle furnace.

Al_2O_3 -B₄C composite particles was coated by NiCoCrAlY alloy of 2~3 μm . The HVOF sprayed NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -10%B₄C coatings exhibited compact structure and the porosity was only 0.45% \pm 0.05%. It exhibited excellent adhesion between the coating and the matrix. The main phases of the coating and powder were all Ni solid solution, α - Al_2O_3 phase and B₄C phase. Compared with the X-ray diffraction of powder, the peak intensity of X-ray diffraction of the coating decreased to some extent. A continuous gray film of 1-3 μm formed on the coating surface after oxidation at 850 $^\circ\text{C}$ for 96 h. According to the EDX analysis on the gray film, the main elements of the film were Ni, Al and Cr, which showed that the gray film consisted of oxides of Ni, Al and Cr. Oxidation kinetics curve of the coating at 850 $^\circ\text{C}$ was divided into two stages. The coating was oxidized rapidly in the initial stage of oxidation and the oxide film with main composition of NiO, Al_2O_3 and Cr_2O_3 was formed on the coating surface. Then, the stable oxidation stage was appeared in the final stage of oxidation. In this stage, the rate of the oxidation process of the coating was determined by diffusion velocity of O in the oxidation film. The coating exhibits excellent oxidation resistance property and it can be used in oxidation environment at 850 $^\circ\text{C}$.

KEY WORDS: HVOF; NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -B₄C coatings; microstructure; oxidation; nickel base superalloy; coated

目前, 先进航空发动机的高压压气机和低压涡轮部位均采用刷式封严结构, 为了降低机轴和刷丝之间的摩擦系数和磨损率, 需要在机轴表面喷涂一层高温固体润滑耐磨涂层材料。NiCoCrAlY 合金具有优异的力学性能、抗高温氧化性能和耐高温热腐蚀性能, 已作为多种高温固体润滑耐磨涂层中的基体材料应用到航空航天、核能、电力等领域的高温相对运转部件上^[1-4]。在高温热腐蚀环境下, NiCoCrAlY 合金中的 Cr 和 Al 元素在涂层的氧化过程中, 在涂层表面生成了一层致密的氧化物保护膜, 从而减缓了 O 元素在涂层中的扩散, 对涂层起到保护作用。

目前, 以 NiCoCrAlY 作为基体材料的高温固体润滑耐磨涂层的研究相对较多^[5-7], 但是以 B₄C 为润滑相的镍基高温固体润滑耐磨涂层研究相对较少。研究发现, B₄C 在氧化和湿热的环境下会生成 H_3BO_3 , 而 H_3BO_3 具有很好的润滑性能^[8-9], 因此, B₄C 很有希望作为性能良好的高温固体润滑剂应用于高温固体润滑耐磨涂层材料中。Araghi 等^[10]对 Ni-P-B₄C 涂

层的硬度和摩擦磨损性能进行了研究, 发现该涂层具有良好的耐磨性能和较高的硬度。Mina 等^[11]采用真空等离子喷涂技术制备了 Ti-6Al-4V/B₄C 复合涂层, 并对涂层的显微硬度和抗折强度进行了研究, 结果表明, 与 Ti-6Al-4V 涂层相比, Ti-6Al-4V/B₄C 复合涂层具有更高的显微硬度, 但是涂层的抗折强度会有所下降。Sarıkaya 等^[12]系统研究了不同含量的 B₄C 对 AlSi-B₄C 复合涂层力学性能和摩擦磨损性能的影响, 研究发现, B₄C 的加入可以明显改善涂层的力学性能和摩擦磨损性能。Meng 等^[13]采用激光熔覆法制备了 B₄C+ NiCrBSi 复合涂层材料, 研究发现, 该涂层的显微硬度是 Ti-6Al-4V 基体材料的 3 倍。Rafiei 等^[14]采用超音速火焰喷涂技术制备了 B₄C-Ni 和 B₄C-TiB₂-TiC-Ni 涂层材料, 并研究了涂层的氧化性能, 研究发现, 经 700、900 $^\circ\text{C}$ 氧化 35 h 后, B₄C-Ni 涂层表面出现了开裂, 而 B₄C-TiB₂-TiC-Ni 涂层未开裂。笔者课题组^[15-17]采用等离子喷涂技术制备了 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -B₄C 复合涂层材料, 研究了该涂层的力学性能、

抗氧化性能和摩擦磨损性能, 研究发现, 该涂层由于空隙率较高, 涂层的力学性能和抗氧化性能并不理想。为了进一步降低涂层材料的孔隙率, 提高涂层的力学性能和抗氧化性能, 本文采用超音速火焰喷涂技术制备了 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合涂层材料, 并研究了该涂层的氧化性能, 探讨了涂层的高温氧化机理, 以期为该涂层的高温应用提供理论基础。

1 试验

1.1 材料制备

用于超音速火焰喷涂的 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合粉体为试验室自制粉体。其具体制备工艺过程: 按一定化学计量比称量 α-Al₂O₃ 和 B₄C 粉体, 并和一定量的去离子水、粘结剂混合均匀, 采用离心喷雾造粒的方法制备成粒径为 45~125 μm 的球状颗粒。然后, 采用高压氢还原的方法在 Al₂O₃-B₄C 混合颗粒表面包覆致密的镍层, 制得 Ni/Al₂O₃-B₄C 复合粉体。最后, 采用固相合金化技术, 在 H₂ 气氛下, 于 950 °C 保温 8 h, 对 Ni/Al₂O₃-B₄C 复合粉体表面的镍层进行渗 Co、Cr、Al、Y, 制得超音速火焰喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合粉体。粉体的具体化学组成见表 1。

表 1 超音速火焰喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C 粉体的化学组成

Tab.1 Chemical compositions of HVOF sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C powder

wt. %						
Ni	Co	Cr	Al	Y	Al ₂ O ₃	B ₄ C
37	1.25	8.75	2.75	0.25	40	10

选用尺寸为 40 mm×30 mm×3 mm 的镍基高温合金为涂层的基体材料。喷涂之前, 需用丙酮对镍基高温合金的表面进行超声波清洗, 烘干后对基体表面进行喷砂预处理, 以获得活性较高的表面。选用 JP-5000

型超音速火焰喷涂设备, 在镍基高温合金表面沉积致密的涂层材料。具体喷涂工艺参数: 航空煤油流量为 21 L/h, 氧气流量为 50 m³/h, 喷涂距离为 350 mm, 送粉速率为 30~40 g/min。

1.2 材料表征

选用带有 EDX 的 FEI Quanta 200 FEG 电子扫描显微镜对涂层和粉体的显微结构和元素组成进行表征。选用 Philips X' PERT X 射线衍射仪对涂层和粉体的物相组成进行表征。选用 SX-5-12 型马弗炉进行涂层的氧化试验, 测试温度为 850 °C, 保温时长分别为 1、4、24、48、75、96 h。试验过程中, 把抛光后的涂层材料放到煅烧后的刚玉坩埚中, 用分析天平称量坩埚和涂层材料的总质量, 记为 m_1 。在 850 °C 保温到所需时间后, 取出坩埚和涂层材料, 并自然降到室温, 再次称量坩埚和涂层材料的总质量, 记为 m_2 , 则涂层的氧化质量增量为 $(m_2 - m_1)/S$, 其中, S 为抛光后涂层的表面积。试验过程中, 需取 3 组样品同时试验, 最后结果取 3 组的平均值。

2 结果与分析

2.1 粉体和的显微结构分析

NiCoCrAlY/Al₂O₃-10 %B₄C 复合粉体的表面和截面 SEM 形貌如图 1 所示。由图 1a 可见, 复合粉体颗粒呈球形或类球形, 粒度分布较均匀, 粒径分布范围为 20~45 μm, 这保证了超音速火焰喷涂过程中送粉的连续性。由图 1b 可见, NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 为包覆型粉体, Al₂O₃ 和 B₄C 球形颗粒表面均匀包覆着一层厚度为 2~3 μm 的 NiCoCrAlY 合金, 这可以减少超音速喷涂过程中由于粉体密度不同而造成的偏析现象, 同时还可以防止 B₄C 在热喷涂过程中发生氧化脱碳。

NiCoCrAlY/Al₂O₃-10 %B₄C 复合涂层的截面 SEM 形貌如图 2 所示。从图 2a 可以看出, 涂层结构非常

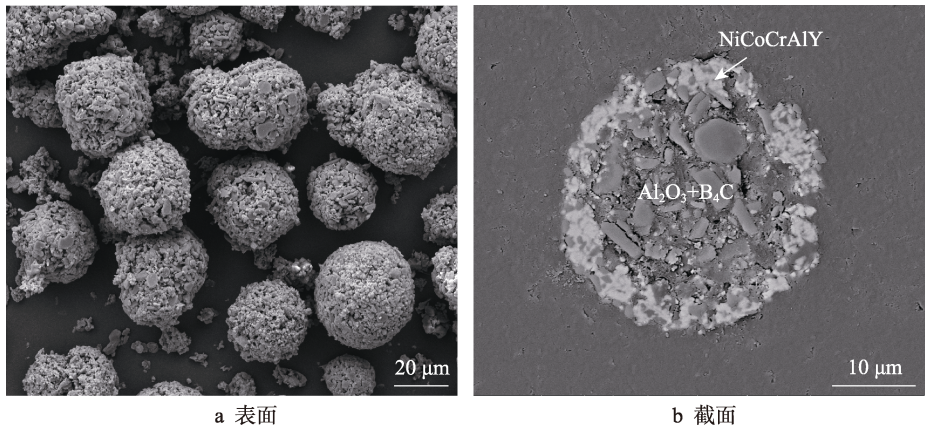


图 1 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10 %B₄C 复合粉体的 SEM 形貌
Fig.1 SEM morphologies of NiCoCrAlY/Al₂O₃-10 %B₄C composite powder: a) surface; b) cross-section

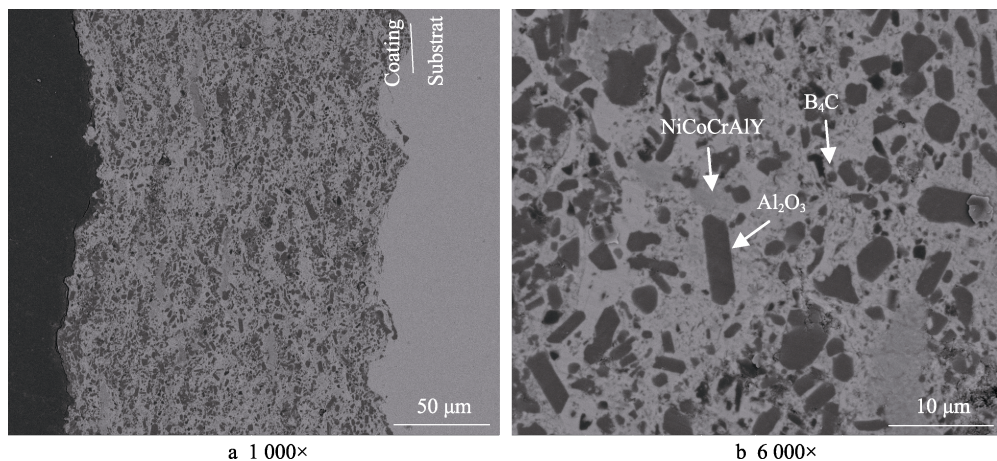


图2 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C复合涂层的截面SEM形貌
Fig.2 Cross-sectional SEM morphologies of NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C composite coating

致密,通过灰度法测得该涂层的孔隙率为 $0.45\% \pm 0.05\%$,涂层中 Al₂O₃ 和 B₄C 相以点状均匀分布在 NiCoCrAlY 基体中,涂层和基体间结合良好。从图 2b 可以看出,涂层中黑色区域为 B₄C 相,深灰色区域为 Al₂O₃ 相,浅灰色区域为 NiCoCrAlY 相。

2.2 粉体和涂层的物相结构分析

NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合粉体和涂层的物相组成分析如图 3 所示。NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合粉体和涂层的主晶相均为 Ni 的固溶体 (Co、Cr、Al、Y 固溶到 Ni 中)、 α -Al₂O₃ 相和 B₄C 相,未发现其他杂质相的存在。与粉体材料相比,涂层的衍射峰强度有所降低,这主要是因为超音速火焰喷涂过程中,粉体部分熔融,由于冷却速度较快,部分熔融的粉体来不及重新结晶,造成粉体结晶性能较差。超音速火焰喷涂以后,涂层中 NiCrAl 相的主衍射峰有少量的左移现象,这可能是因为涂层在冷却过程中产生少量内应力,使得 NiCrAl 合金的晶格参数发生了少量的变化,产生了晶格畸变。

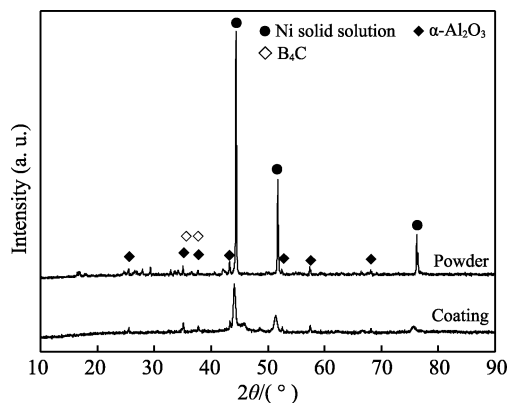


图3 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合粉体和涂层的物相组成分析
Fig.3 Phase composition of NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C composite powder and coating

2.3 涂层的氧化性能分析

NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层在 850 °C 的恒温氧化动力学曲线及其拟合曲线如图 4 所示。NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层的氧化动力学曲线分为 2 个阶段。在氧化初期, NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层的氧化质量增速很快,氧化 4 h 的质量增量为 1.28 mg/cm²。这主要是因为初始阶段,涂层表面没有氧化膜存在,涂层中的所有金属都会发生氧化,生成以 NiO、Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 为主的氧化膜,使得涂层因氧化而质量增加。同时,涂层表面的 B₄C 也会发生氧化,生成 B₂O₃ 和 CO₂ 气体,从而造成涂层氧化质量损失。因此, NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层的氧化动力学曲线是涂层中金属的氧化质量增加和 B₄C 的氧化质量损失双重作用的结果。随着氧化的进行,涂层进入稳定氧化阶段,此时涂层的氧化时间为 4~96 h,在该阶段涂层氧化质量增速较缓慢,氧化 96 h 以后,涂层氧化质量增量为 2.3 mg/cm²。在该阶段,涂层氧化初期阶段生成的 NiO 中的 Ni 元素被涂层内部扩散过来的金属 Cr 置换出来,生成 Cr₂O₃ 和 Ni。此时,涂层表面生成的 Cr₂O₃ 和 Al₂O₃ 以及涂层中加入的 Al₂O₃ 均对涂层起到了保护作用,使得此阶段氧化动力学曲线增加较慢,基本符合抛物线氧化规律。

2.4 涂层的氧化形貌分析

NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 复合涂层经 850 °C 恒温氧化 96 h 后的 SEM 形貌如图 5a、b 所示。涂层在 850 °C 恒温氧化 96 h 后,涂层内部结构基本未发生变化, Al₂O₃ 和 B₄C 颗粒仍以点状均匀分布在 NiCoCrAlY 合金之间。涂层表面生成了一层连续的灰色物质,其厚度约为 1~3 μm。对涂层表面的氧化膜进行 EDX 分析 (如图 5c、d 所示),可以看出,氧化膜的主要元素组成为 O、Ni、Al 和 Cr,说明该氧化膜的主要成分为 Ni、Al 和 Cr 的金属氧化物。涂层表

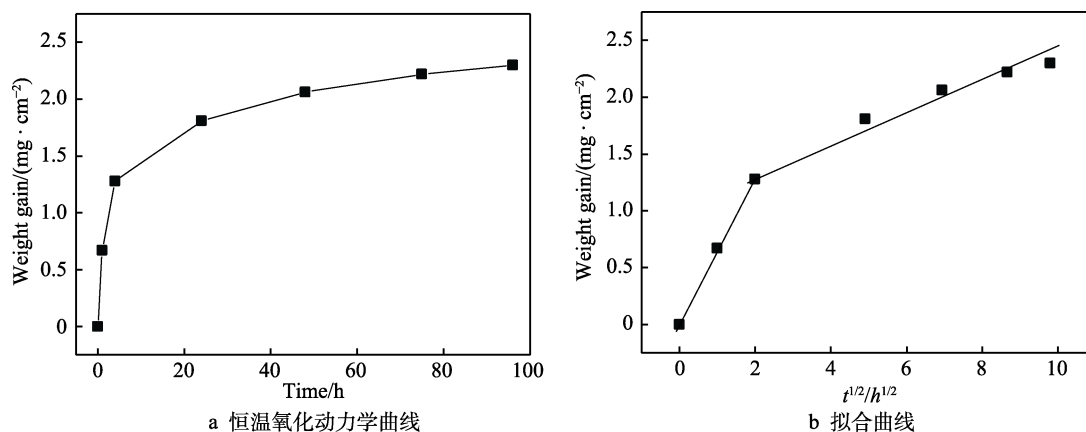


图 4 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10 %B₄C 涂层在 850 °C 恒温氧化动力学曲线及其拟合曲线
Fig.4 Oxidation kinetics curve and fitting curve of NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C coating at 850 °C:
a) oxidation kinetics curve at constant temperature; b) fitting curve

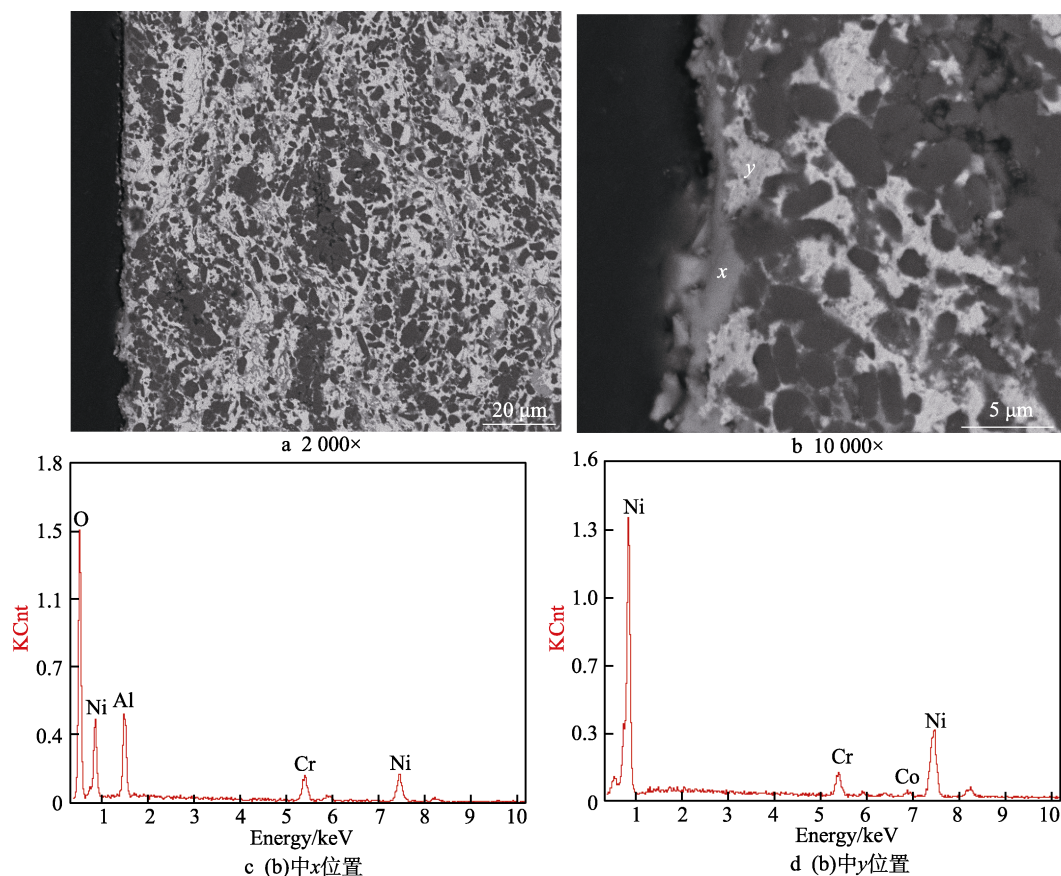


图 5 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层经 850 °C 恒温氧化 96 h 后的 SEM 形貌及 EDX 分析
Fig.5 SEM morphologies and EDX of NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C composite coating under oxidation
at 850 °C for 96 h: (a) 2 000×; (b) 10 000×; (c) x position in Fig.b; (d) y position in Fig.b

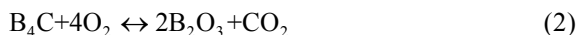
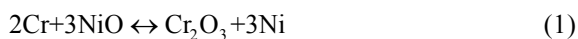
面连续氧化膜的生成,使得涂层表面氧化速度减慢,这与图 4 所得的结论一致。对涂层内部 y 位置的金属进行 EDX 分析,可以看出,涂层内部未发现 O 元素,说明涂层内部未发生氧化现象。

2.5 涂层的氧化机理分析

在 NiCoCrAlY/Al₂O₃-10%B₄C 涂层中,主要的物

相组成有 NiCoCrAlY 相、Al₂O₃ 相和 B₄C 相。对于 NiCoCrAlY 合金的氧化性能,前人已做了大量的研究工作^[18-23],认为在 NiCoCrAlY 合金中,主要是 Cr 元素和 Al 元素起到提高合金抗氧化性能的作用。NiCoCrAlY 合金的氧化过程:在初始氧化阶段,NiCoCrAlY 合金表面的所有金属都发生氧化,生成以 NiO、Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 为主的混合氧化物膜。随着氧化

的进行, 涂层内部的金属 Cr 逐渐向涂层表面进行扩散, 扩散到涂层表面的 Cr 会置换出 NiO 中的 Ni, 生成 Cr_2O_3 , 其具体反应过程如式(1)所示。当合金表面生成连续氧化膜时, 合金的氧化速度非常缓慢, 此时合金的氧化过程主要由 O 在氧化膜中的扩散速度决定。涂层中 Al_2O_3 的加入有利于涂层表面氧化膜的形成, 对涂层的抗氧化性能起到积极的作用^[24]。涂层中 B_4C 相也会在高温下发生氧化反应, 生成 B_2O_3 和 CO_2 ^[8], 其具体反应方程式如式(2)所示。生成的 B_2O_3 在高温下会融化, 熔融的 B_2O_3 液体在剪应力的作用下, 在涂层表面形成了一层润滑膜, 从而可提高涂层的摩擦磨损性能。涂层中 B_4C 的加入可使涂层在氧化过程中质量降低。因此, 对于 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -10% B_4C 涂层来说, 涂层的恒温氧化动力学曲线是 NiCoCrAlY、 Al_2O_3 和 B_4C 三相氧化过程相互叠加的结果。



3 结论

采用离心喷雾造粒、高压氢还原镀镍和固相合金化技术制备了包覆型 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -10% B_4C 复合粉体, 并采用超音速火焰喷涂技术在镍基高温合金表面沉积了 NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -10% B_4C 涂层材料, 研究了涂层的氧化性能, 探讨了涂层的氧化机理。所得主要结论如下:

1) NiCoCrAlY/ Al_2O_3 -10% B_4C 粉体为包覆型粉体, 包覆层厚度约为 2~3 μm 。

2) 涂层结构致密, 涂层与基体间结合良好, 涂层的主晶相为 Ni 的固溶体、 Al_2O_3 相和 B_4C 相。

3) 涂层经 850 $^\circ\text{C}$ 恒温氧化 96 h 后, 涂层表面生成了 1~3 μm 厚的氧化膜, 该氧化膜的主要成分为 Ni、Al 和 Cr 的氧化物。

4) 涂层的氧化动力学曲线分为 2 个阶段, 氧化初期, 涂层快速氧化, 生成以 NiO、 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 为主的混合氧化物膜; 氧化后期, 涂层进入稳定氧化阶段, 此时涂层的氧化过程主要由 O 在氧化膜中的扩散速度决定。

致谢

本工作是在中国科学院过程工程研究所多相复杂系统重点实验室完成的, 非常感谢过程所的老师们在试验过程中给予的热心帮助和悉心指导!

参考文献:

[1] MERCIER D, GAUNTT B D, BROCHU M. Thermal Stability and Oxidation Behavior of Nanostructured

NiCoCrAlY Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(17/18): 4162-4168.

[2] LI Zhi-ming, QIAN Shi-qiang, WANG Wei. Characterization and Oxidation Behavior of NiCoCrAlY Coating Fabricated by Electrophoretic Deposition and Vacuum Heat Treatment[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(10): 4616-4620.

[3] 杨英, 刘永康, 王芳, 等. NiCoCrAlY/NiCoCrAlYN 涂层的腐蚀磨损行为[J]. 表面技术, 2022, 51(2): 284-294. YANG Ying, LIU Yong-kang, WANG Fang, et al. Corrosive Wear Behavior of NiCoCrAlY/NiCoCrAlYN Coatings[J]. Surface Technology, 2022, 51(2): 284-294.

[4] LIU Xia, AN Yu-long, ZHAO Xiao-qin, et al. Hot Corrosion Behavior of NiCoCrAlYT_a Coating Deposited on Inconel Alloy Substrate by High Velocity Oxy-Fuel Spraying Upon Exposure to Molten V_2O_5 -Containing Salts[J]. Corrosion Science, 2016, 112: 696-709.

[5] ZHANG Tian-tian, LAN Hao, HUANG Chuan-bing, et al. Formation Mechanism of the Lubrication Film on the Plasma Sprayed NiCoCrAlY- Cr_2O_3 -AgMo Coating at High Temperatures[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 319: 47-54.

[6] RANA N, MAHAPATRA M M, JAYAGANTHAN R, et al. High-Temperature Oxidation and Hot Corrosion Studies on NiCrAlY Coatings Deposited by Flame-Spray Technique[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, 24(5): 769-777.

[7] DU Ling-zhong, ZHANG Wen-ting, ZHANG Wei-gang, et al. Tribological and Oxidation Behaviors of the Plasma Sprayed NiCoCrAlY- Cr_2O_3 -AgVO₃ Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 298: 7-14.

[8] GOGOTSI Y G, KOVAL'CHENKO A M, KOSSKO I A. Tribochemical Interactions of Boron Carbides Against Steel[J]. Wear, 1992, 154(1): 133-140.

[9] CHEN C M, ZHANG L T, ZHOU W C, et al. High Temperature Oxidation of LaB₆-ZrB₂ Eutectic *in Situ* Composite[J]. Acta Materialia, 1999, 47(6): 1945-1952.

[10] ARAGHI A, PAYDAR M H. Electroless Deposition of Ni-P- B_4C Composite Coating on AZ91D Magnesium Alloy and Investigation on Its Wear and Corrosion Resistance[J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 3095-3099.

[11] MORADI M, MOAZENI M, SALIMIJAZI H R. Microstructural Characterization and Failure Mechanism of Vacuum Plasma Sprayed Ti-6Al-4V/ B_4C Composite[J]. Vacuum, 2014, 107: 34-40.

[12] SARIKAYA O, ANIK S, CELIK E, et al. Wear Behaviour of Plasma-Sprayed AlSi/ B_4C Composite Coatings[J]. Materials & Design, 2007, 28(7): 2177-2183.

[13] MENG Q W, GENG L, ZHANG B Y. Laser Cladding of Ni-Base Composite Coatings Onto Ti-6Al-4V Substrates with Pre-Placed B_4C +NiCrBSi Powders[J]. Surface and

- Coatings Technology, 2006, 200(16/17): 4923-4928.
- [14] RAFIEI M, SALEHI M, SHAMANIAN M, et al. Preparation and Oxidation Behavior of B₄C-Ni and B₄C-TiB₂-TiC-Ni Composite Coatings Produced by an HVOF Process[J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 13599-13609.
- [15] CAO Yu-xia, HUANG Chuan-bing, LIU Wei, et al. Effects of Boron Carbide Content on the Microstructure and Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C Composite Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2014, 23(4): 716-724.
- [16] 曹玉霞. B₄C 含量对等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C 复合涂层力学性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 20-24.
- CAO Yu-xia. Effect of B₄C Content on the Mechanical Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 20-24.
- [17] 曹玉霞. 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃-30%B₄C 复合涂层的摩擦性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(4): 205-209.
- CAO Yu-xia. Tribological Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃-B₄C Composite Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(4): 205-209.
- [18] 王宏宇. 纳米颗粒增强 NiCoCrAlY 激光熔覆涂层制备及其特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- WANG Hong-yu. Research on Preparation and Characteristics of NiCoCrAlY Laser Cladded Coatings Reinforced by Nano-Particles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [19] 徐一, 缪强, 梁文萍, 等. γ -TiAl 表面 NiCrAlY/Al 复合涂层的高温氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(6): 1407-1411.
- XU Yi, MIAO Qiang, LIANG Wen-ping, et al. Oxidation Behavior of γ -TiAl Alloy with NiCrAlY/Al Duplex Coating at 950 °C[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(6): 1407-1411.
- [20] 刘冠熙, 黄光宏, 罗学昆, 等. 表面喷丸处理对 NiCrAlYSi 涂层恒温氧化行为的影响[J]. 金属学报, 2021, 57(5): 684-692.
- LIU Guan-xi, HUANG Guang-hong, LUO Xue-kun, et al. The Influence of Surface Shot Peening on the Isothermal Oxidation Behavior of NiCrAlYSi Coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(5): 684-692.
- [21] 张林伟, 王鲁, 王全胜, 等. 真空预氧化对冷喷涂 NiCoCrAlY 涂层氧化行为的影响[J]. 材料工程, 2014, 42(1): 1-5.
- ZHANG Lin-wei, WANG Lu, WANG Quan-sheng, et al. Effect of Vacuum Pre-Oxidation on Oxidation Behavior of NiCoCrAlY Coating Prepared by Cold Spray[J]. Journal of Materials Engineering, 2014, 42(1): 1-5.
- [22] 杨效田, 付小月, 冯力, 等. 真空扩散原位合成 NiCoCrAlY 涂层及其抗氧化性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(5): 1750-1756.
- YANG Xiao-tian, FU Xiao-yue, FENG Li, et al. NiCoCrAlY Coating of In-Situ Synthesis by Vacuum Diffusion and Its Oxidation Resistance[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(5): 1750-1756.
- [23] 吕艳红, 张启富, 吴子健. 高能高速等离子喷涂 NiCoCrAlY 涂层抗燃气热腐蚀性能[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 126-133.
- LYU Yan-hong, ZHANG Qi-fu, WU Zi-jian. High-Temperature Gas Corrosion Resistance of NiCoCrAlY Coating Prepared by High-Energy and High-Speed Plasma-Spraying[J]. Surface Technology, 2016, 45(9): 126-133.
- [24] 曹玉霞, 杜令忠, 张伟刚, 等. 等离子喷涂 NiCoCrAlY/Al₂O₃ 高温固体润滑耐磨涂层的抗氧化性能研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 48-53.
- CAO Yu-xia, DU Ling-zhong, ZHANG Wei-gang, et al. Study on Oxidation Resistance of Atmospheric Plasma-Sprayed NiCoCrAlY/Al₂O₃ Wear-Resistant Coatings at Elevated Temperature[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 48-53.

责任编辑: 刘世忠