

文章编号:1673-9981(2010)03-0202-05

采用 HVOF 与 HVAF 工艺制备的 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层的结构和性能表征

王 枫, 朱晖朝, 陈志坤, 邓春明

(广州有色金属研究院, 广东 广州 510650)

摘 要:分别采用 HVAF 和 HVOF 工艺制备了 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层,对两种方法所制备的涂层的显微组织、硬度、孔隙率及摩擦磨损性能进行了表征。从涂层的微观结构和磨损机理方面分析了两种涂层的耐磨损性能不同的原因。研究表明,与 HVAF 涂层相比,HVOF 喷涂时由于火焰温度和焰流速度较高,制备的 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层更均匀和致密,孔隙率和表面粗糙度较低,硬度更高。HVAF 涂层中碳化铬的剥落与犁沟均较明显,耐磨性能较差。

关键词: HVAF; HVOF; NiCr-Cr₃C₂; 耐磨性

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

NiCr-Cr₃C₂ 是目前应用最广泛的金属陶瓷复合材料之一。NiCr 具有优良的耐热、抗高温氧化和耐腐蚀性能,Cr₃C₂ 具有较高的硬度和抗高温氧化性能良好。NiCr-Cr₃C₂ 涂层在 900 ℃ 以下具有优良的抗高温氧化、抗高温气流或微粒冲蚀磨损和硬面磨损性能^[1-3],被广泛应用于连铸连轧轧辊和中温退火炉炉内辊的耐磨涂层、航空涡轮发动机的涡轮叶片耐高温冲蚀磨损涂层、火力发电厂的燃煤炉耐高温燃气冲蚀磨损涂层^[3-5]。

热喷涂是制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层的重要手段。目前,工业上制备 NiCr-Cr₃C₂ 涂层采用最多的热喷涂方法是 HVAF(High Velocity Air-Fuel Spraying)和 HVOF(High Velocity Oxy-Fuel Spraying)。本文分别采用 HVAF 和 HVOF 制备 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层,分析研究两种涂层的磨损性能和磨损机理,为工程设计、应用超音速火焰喷涂 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层提供科学依据。

1 试验方法与表征

收稿日期:2010-06-01

作者简介:王枫(1973—),男,江苏江都人,工程师。

1.1 试验方法

试验采用粒度为(-45+15) μm 的 NiCr-25%Cr₃C₂ 热喷涂粉末,粉末形貌如图 1 所示。基体为 45 号钢,尺寸为 100 mm×50 mm×3 mm。

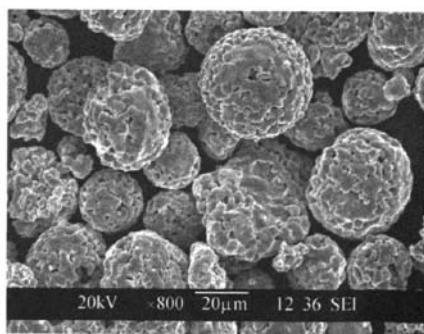


图 1 NiCr-25%Cr₃C₂ 粉末形貌

Fig. 1 Morphologies of NiCr-25%Cr₃C₂ powder

喷涂设备采用美国 UniqueCoat Technology 公司生产的 Intelli-Jet AC-HVAF 系统和德国 GTV 公司生产的 HVOF 系统。HVAF 喷涂选用 SB250

喷枪,HVOF 喷涂选用 K2 喷枪. HVAF 系统采用压缩空气作为助燃剂,丙烯为燃料,火焰温度在 1300 ℃ 左右,焰流速度可以达到 800~900 m/s. HVOF 喷涂系统使用煤油作为燃料,与氧气充分混合后,燃烧室压力可以达到 0.9 MPa 以上,火焰温度最高可达 2600 ℃,焰流温度在 1800 ℃ 左右,焰流速度可以达到 2000 m/s.

HVAF 喷涂时空气压力为 0.6 MPa,丙烯压力为 0.5 MPa,喷距 170 mm. HVOF 喷涂时,煤油流量为 26 L/h,氧气流量为 900 L/min,氮气流量为 9 L/min,喷距 380 mm.

1.2 表 征

采用 Leica DMIRM 金相显微镜和 JSM5910 SEM 扫描电子显微镜对试样横截面显微组织形貌进行观察和分析. 采用 MH-5D 数字显微维氏硬度计测试涂层的显微硬度,载荷为 2.94N,加载时间为 15 s.

涂层的耐磨性能试验在日本 SUGA 轮式磨损试验机上进行,选用 320 号 SiC 砂纸带,压力为 20 N,往复频率为 40 次/min. 砂纸轮转动一周,往复磨损 400 回,一轮磨损完成,更换砂纸. 用 HVAF 和 HVOF 制备两组 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层样品,每个

样品磨损 5 轮,取平均值. 每次摩擦磨损试验后,在丙酮中用超声波清洗试样,用精度为 0.1 mg 的分析天平测量磨损失重 ΔW.

采用 Dsier 公司生产的 Spraywatch 3i 系统分别对 HVAF 和 HVOF 喷涂过程中粒子温度和粒子速度进行实时检测.

2 试验结果与分析

2.1 显微结构分析

HVAF 和 HVOF NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层的剖面形貌如图 2 所示. 由图 2 可见,两种涂层均致密均匀,涂层与基体结合紧密. 采用 LeiCa DMIMR 自带的图像分析系统测得 HVAF 涂层的孔隙率为 1.29%,HVOF 涂层的孔隙率为 1.04%. 高倍观察发现,涂层中黑色的 Cr₃C₂ 硬质相均匀地分布于 NiCr 粘结相中,粘结相和硬质相结合良好. 对比两种涂层可知,HVAF 涂层中的孔隙较多,这些孔隙主要分布于粘结相和硬质相的界面,使粘结相与硬质相的结合力降低,因此,HVAF 涂层中粘结相与硬质相的结合比 HVOF 涂层的差.

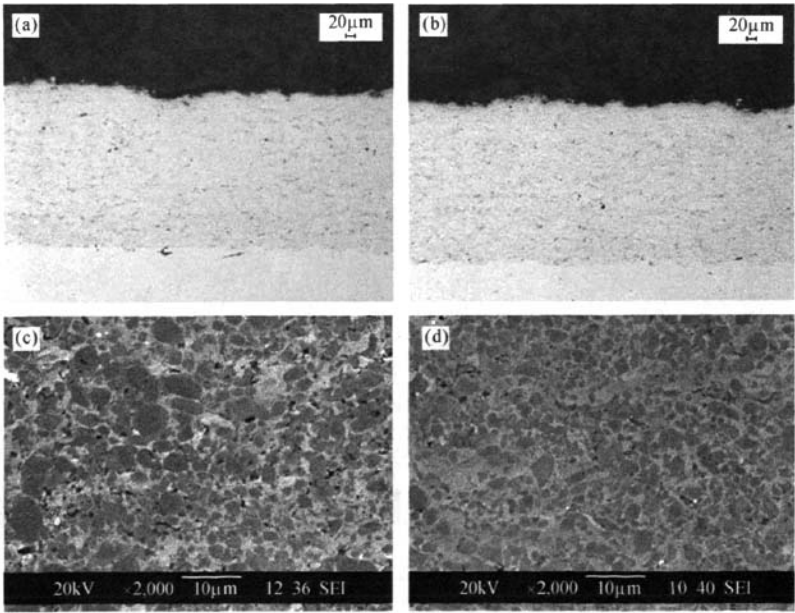


图 2 HVAF 涂层(a)(c)和 HVOF 涂层(b)(d)剖面形貌图
Fig.2 Cross-sectional images for HVAF and HVOF coatings

用 Spraywatch 3i 系统检测 HVOF 和 HVAF 喷涂时粒子速度和粒子温度,结果列于表 1. 由表 1 可见,HVOF 喷涂时粒子的速度明显大于 HVAF 喷涂时粒子的速度. HVOF 的粒子温度也高于 HVAF 的粒子温度. 由于在喷涂过程中,HVAF 的火焰温度和焰流速度均比 HVOF 的低. 所以 HVOF 喷涂时能够使 NiCr 颗粒熔化更充分,较高的焰流速度也可使熔化的 NiCr 颗粒在轰击镶嵌到基体表层时具有更大的动能,从而使粒子的铺展、变形更充分,涂层更加致密均匀. HVOF 的 Cr_3C_2 粒子也具有更高的动能,在轰击到 NiCr 粒子时,粘结结合得更紧密.

表 1 Spraywatch 3i 系统实时检测数据

Table 1 Real time measurement data of Spraywatch 3i system

喷涂方法	粒子速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	粒子温度/ $^{\circ}\text{C}$
HVAF	550	1400
HVOF	700	1800

图 3 和图 4 分别为 HVAF 和 HVOF 涂层的 X 射线衍射图谱. 由图 3 和图 4 可以看出,NiCr-25% Cr_3C_2 涂层中有 Cr_7C_3 相,这是在喷涂过程中由 Cr_3C_2 颗粒受热分解脱碳而生成的. 铬的碳化物均匀地分布在 NiCr 粒子上,提高了涂层的硬度与耐磨性.

HVAF 涂层的表面粗糙度为 $R_a\ 4.16\ \mu\text{m}$, HVOF 涂层的表面粗糙度为 $R_a\ 3.07\ \mu\text{m}$,由此可见,HVOF 涂层的表面更光滑. 图 5 是 HVAF 涂层和 HVOF 涂层表面 SEM 形貌图. 由图 5 可以看出,

HVOF 涂层表面细密光滑,气孔较少,而 HVAF 涂层表面的孔隙较多较大,这也和其较大的表面粗糙度相对应.

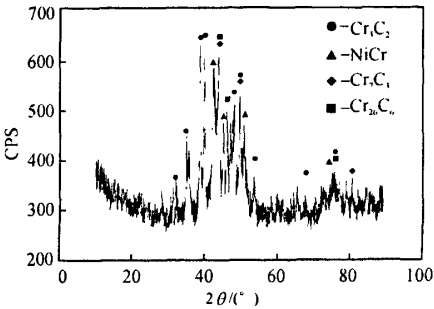


图 3 HVAF NiCr-25% Cr_3C_2 涂层 XRD 谱图
Fig. 3 XRD pattern of the HVAF NiCr-25% Cr_3C_2 layer

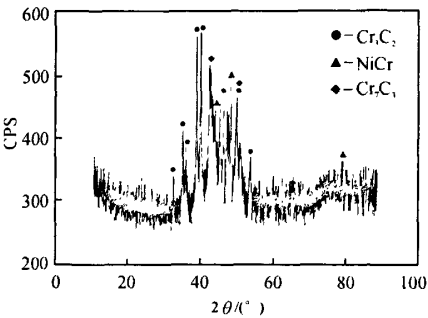


图 4 HVOF NiCr-25% Cr_3C_2 涂层 XRD 谱图
Fig. 4 XRD pattern of the HVOF NiCr-25% Cr_3C_2 layer

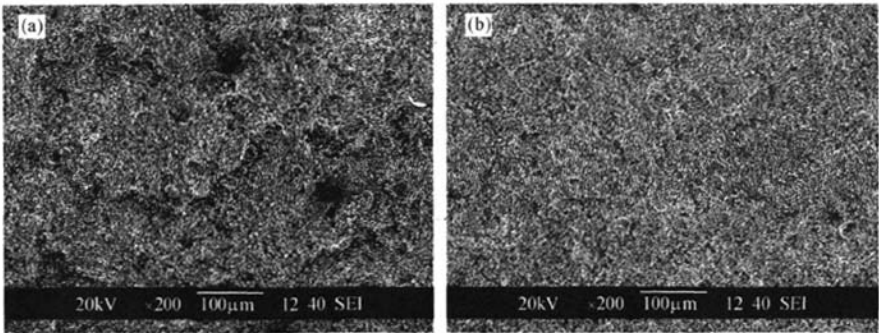


图 5 涂层的表层 SEM 形貌图
(a)HVAF 涂层; (b)HVOF 涂层
Fig. 5 SEM images showing morphologies of the layer surface
(a) HVAF coating; (b) HVOF coating

2.2 显微硬度和耐磨性能分析

用MH-5D型数字显微维氏硬度度仪测得HVOF涂层的显微硬度Hv0.3897,HVOF涂层的显微硬度Hv0.3965.由于HVOF涂层中充分熔融的NiCr与硬质相结合良好,涂层的孔隙率较低,所以它的显微硬度较高.

在相同磨损条件下,两种涂层的磨损量列于表2.由表2可见,HVOF涂层的磨损量小于HVOF涂层的磨损量.HVOF涂层的平均磨损量为HVOF涂层磨损量的70%,表明HVOF涂层具有更高的耐磨损性能,这也和涂层硬度的结论相符.

表2 涂层的摩擦磨损试验磨损量
Table 2 Wear weight loss of the layer

喷涂方法	磨损损失重量/mg					平均
	第1次磨损	第2次磨损	第3次磨损	第4次磨损	第5次磨损	
HVOF	13.5	12.4	9.0	5.4	8.7	9.8
HVOF	19.7	15.4	11.5	11.5	12.1	14.0

图6为HVOF和HVOF涂层摩擦磨损后的磨痕形貌.由图6可见,两种涂层磨损面上均有大量的犁沟,这是由于在摩擦过程中,沙粒不断犁削涂层表面所形成的.在HVOF涂层中可明显地看到涂层中有较多的粘着物 and 凹坑,划痕较多较深(图6(a)).

而HVOF涂层中的粘着物较少,凹坑和空洞较少,划痕较浅(图6(b)).能谱分析结果表明,磨痕处粘着物主要为NiCr,凹坑是Cr₃C₂颗粒从涂层中脱落后所形成的.

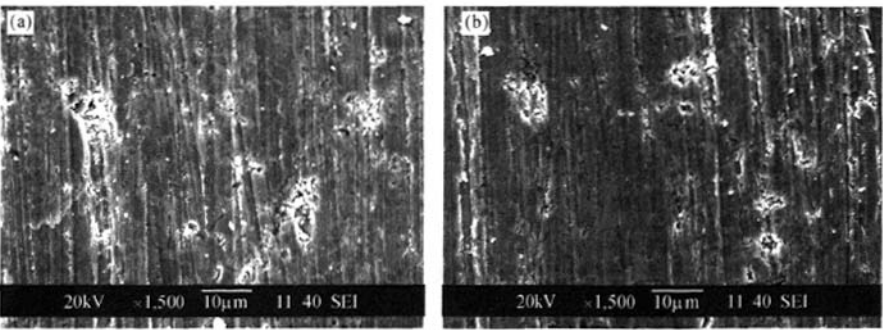


图6 涂层磨损表面SEM形貌图
(a)HVOF涂层;(b)HVOF涂层
Fig.6 SEM images for worn surfaces of the layer
(a) HVOF coating; (b) HVOF coating

涂层的磨损性能与涂层内部颗粒的结合状况密切相关,而在喷涂过程中,喷涂速度、火焰温度又直接对涂层颗粒产生影响^[6-7].HVOF喷涂具有较低的火焰温度和焰流速度.NiCr粒子的熔化程度较差,而较大的Cr₃C₂颗粒,以高速轰击镶嵌在前涂层或NiCr粒子时,与NiCr的结合力较小,在磨损时容易从涂层中脱落,从而在磨损表面形成凹坑.由HVOF涂层的剖面(图2(c))可见,粘结相与硬质相

的界面存在较多的孔隙,这些孔隙削弱了硬质相与粘结相的粘结性能.

3 结 论

- (1)HVOF和HVOF都能获得具有较高致密度、较高硬度的NiCr-25%Cr₃C₂涂层.
- (2)由于充分熔融的NiCr粘结相和Cr₃C₂硬质

相有较高的结合力, HVOF 可以获得显微硬度更高、耐磨性能更好、表面粗糙度更低、更致密的 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层。而 HVOF 涂层中在粘结相与硬质相界面存在较多孔隙。

(3)两种 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层磨损形式均为磨粒磨损。HVOF NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层的耐磨性能明显好于 HVOF NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层,其磨损量约为 HVOF NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层的 70%。

参考文献:

- [1] KAMAL S. JAYAGANTHAN R. PRAKASH S. High temperature oxidation studies of detonation-gun-sprayed Cr₃C₂-NiCr coating on Fe- and Ni-based superalloys in air under cyclic condition at 900℃[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 472, 378-389.
- [2] MATTHEWS S. JAMES B. HYLAND M. The Effect of heat treatment on the oxidation mechanism of blended powder Cr₃C₂-NiCr coatings[C]//Proceedings of the International Thermal Spray Conference. [S. l.]: [s. n.], 2009.
- [3] 戴达煌, 刘敏, 余志明, 等. 薄膜与涂层现代表面技术[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007.
- [4] 高峰, 刘富荣, 任先京. 超音速火焰喷涂 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层的滑动摩擦磨损性能研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2008(21): 98-101.
- [5] 李振铎, 于月光, 刘海飞, 等. 高温耐磨损 Cr₃C₂-25%NiCr 涂层制备及其性能研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2006, S1: 37-40.
- [6] 纪岗昌, 李长久, 王豫跃, 等. 超音速火焰喷涂 NiCr-25%Cr₃C₂ 涂层磨粒磨损性能研究[J]. *材料保护*, 2002, 35(12): 23-25.
- [7] SAHRAOUI T. FENINECHE N-E. MONTAVON G. et al. Structure and wear behaviour of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr and WC-Co coatings[J]. *Materials and Design*, 2003, 24: 309-313.

Microstructural and properties of NiCr-25%Cr₃C₂ coating prepared by HVOF and HVOF process

WANG Feng, ZHU Hui-chao, CHEN Zhi-kun, DENG Chun-ming

(Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650, China)

Abstract: In this paper, NiCr-25%Cr₃C₂ coatings were prepared by high velocity air fuel (HVOF) and high velocity oxy fuel (HVOF) process respectively. The microstructure, hardness, porosity and wear resistance for both NiCr-25%Cr₃C₂ coatings were investigated, and the different wear resistance for the coatings was explored from microstructural observation and wear mechanism. The result showed that the relatively higher temperature and higher particle velocity for HVOF process than HVOF process led to more effective melting of NiCr adhesive phase, better uniform microstructure, lower porosity and surface roughness and finally higher microhardness. HVOF NiCr-25%Cr₃C₂ coating exhibited worse wear resistance due to the delamination of Cr₃C₂ hard phase and deeper wear scar.

Key words: HVOF; HVOF; NiCr-Cr₃C₂; wear resistance