

文章编号:1673-9981(2010)03-0207-04

# 超音速火焰喷涂哈氏合金 C-276 涂层的显微结构与性能

黄科<sup>1,2</sup>, 邓运来<sup>1</sup>, 刘敏<sup>2</sup>, 邓春明<sup>2</sup>, 宋进兵<sup>2</sup>

(1. 中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 广州有色金属研究院, 广东 广州 510650)

**摘要:**采用超音速火焰喷涂工艺制备了 C-276 哈氏合金涂层, 同时对涂层的显微结构、显微硬度及耐磨性进行了研究。结果表明: 涂层为层状结构且致密, 与基体结合牢固; 涂层与 C-276 合金粉末均以面心立方的  $\gamma$  相 Ni-Cr-Co-Mo 合金为主晶相, 保持了喷涂粉末材料的性能, 但喷涂过程中产生的氧化物与气孔影响了涂层的硬度及耐磨性。

**关键词:** C-276 合金涂层; 超音速火焰喷涂; 显微结构; 性能  
**中图分类号:** TG113.2 **文献标识码:** A

哈氏合金 (HASTELLOY alloys) 由美国汉斯国际公司研制开发的, 是世界公认的顶级抗腐蚀合金, 其广泛使用于需要稳定性、安全性及减少维护成本的各种设备的关键性部件中, 如金属酸洗设备、烟气脱硫净气器及核燃料再处理、垃圾焚烧等设备。其中 C-276 哈氏合金具有高强度、高硬度、良好延展特性的镍-铬-钼固溶体合金, 又由于铬、钼、钨或铌的含量较高, 以及合金化程度较高, 因此具有很强的耐点蚀性能及点蚀临界温度高等特性<sup>[1]</sup>, 适合在氧化性与还原性之间波动的混合溶液环境中使用, 尤其适用于混入了  $\text{Fe}^{3+}$  及  $\text{Cu}^{2+}$  等强氧化性离子的盐酸、硫酸溶液的环境中。然而, C-276 哈氏合金块材较贵, 加工难度较大, 因此限制了其应用。

热喷涂技术是将涂层材料送入热源中熔化, 并利用高速气流将其喷射到基体材料表面而形成覆盖层的一种工艺<sup>[2]</sup>, 其中超音速火焰喷涂工艺制备的涂层与基体结合强度高、涂层致密、涂层的残余应力小及孔隙率小于 1%, 而且可喷涂厚涂层, 近年来已广泛地应用于材料表面防护与强化等领域中。本文采用超音速火焰喷涂工艺快速制备 C-276 哈氏合金涂层, 且对涂层的显微结构及性能进行了研究。

## 1 试验方法与表征

### 1.1 试样

以 316L 作为基体, 其尺寸为 100 mm×60 mm×3 mm。先将基体超声除油, 然后用 25 号刚玉砂于 0.4 MPa 压力下进行喷砂处理, 获得粗糙度  $R_a$  为 3~5  $\mu\text{m}$  的粗化表面, 以备喷涂。

### 1.2 方法

喷涂所用的粉末为日本 Fujimi 公司生产的 C-276 哈氏合金粉末, 采用真空雾化工艺制备所得, 呈球状, 粒径为 20~53  $\mu\text{m}$ , 其化学成分列于表 1, 图 1 为该粉末的显微形貌。用德国 GTV 公司生产的氧气助燃超音速火焰喷涂 (HVOF) 设备, 在 316L 基体上制备 C-276 哈氏合金涂层, 涂层厚度为 500~600  $\mu\text{m}$ , 喷涂工艺的参数列于表 2。

表 1 C-276 合金粉末的化学组成

Table 1 Chemical composition for Hastelloy C-276 powder

| 元素        | Fe  | Cr | Mo | W   | Co   | Ni |
|-----------|-----|----|----|-----|------|----|
| 含量 $w/\%$ | 5.0 | 16 | 16 | 4.0 | <2.5 | 余量 |

收稿日期: 2010-05-07

作者简介: 黄科 (1977-), 男, 广东博罗人, 工程师, 学士。

表 2 超音速火焰喷涂工艺参数  
Table 2 Parameters for HVOF process

| 氧气流量<br>/(L·min <sup>-1</sup> ) | 送粉氮气流量<br>/(L·min <sup>-1</sup> ) | 送粉率<br>/(g·min <sup>-1</sup> ) | 喷涂距离<br>/mm | 喷涂间距<br>/mm | 喷涂走枪速度<br>v/(m·min <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|------------------------------------|
| 900                             | 9                                 | 80                             | 380         | 8           | 10                                 |

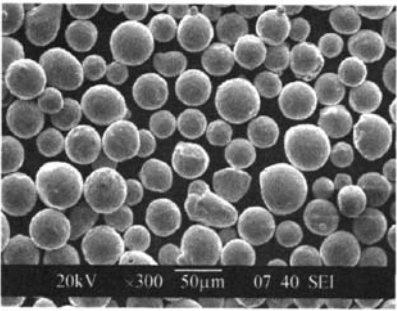


图 1 C-276 合金粉末形貌  
Fig. 1 Morphology for Hastelloy C-276 powder

1.3 表 征

采用线切割法将所制备的涂层试样加工成所需要的尺寸,以进行涂层性能检测.用 JL-SM5910 型带能谱仪扫描电镜,对涂层的显微结构进行分析;用 LeiCa DMIMR 金相显微镜及自带的图像分析系统,测量涂层的孔隙率;用 D/Max-RC 型 X 射线衍射仪对粉末及涂层的相组成进行分析;用 VDMH-5 型显微硬度计测试涂层的显微硬度,其中载荷为 2.94 N,加载停留时间为 15 s;用日本产 Suga 仪测试涂层的耐磨性,其中涂层试样的对磨件为 100 号 SiC 砂纸,载荷为 294 N,每组测试共

反复磨 400 个来回<sup>[3]</sup>.

2 结果及讨论

2.1 涂层的显微结构

图 2 为超音速火焰喷涂 C-276 哈氏合金涂层纵、横剖面形貌.从图 2(a)可见,涂层为层状结构且较为致密,经金相图像分析仪测定涂层的孔隙率约为 0.8%.从图 2(b)可见:涂层中有明显的未熔颗粒(图中箭头所示),这是由于所喷涂粉末粒径较大,焰流温度及粉末的动能不足以使大粒径的 C-276 粉末充分熔融<sup>[4]</sup>,但未熔粉末与四周涂层结合较好,没有明显地影响涂层的致密度;涂层层间发现有明显的氧化带,氧化带产生的主要原因是熔融的 C-276 粉末颗粒流动性及润湿性较差,在喷涂过程中与空气发生化学反应,反应所生成的表面氧化物(主要成分为 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)以及微小气泡随熔融粉末流动,在凝固时铺展而成<sup>[5]</sup>.虽然氧化带可提高涂层的抗氧化性能,但是同时也降低了涂层内粒子之间的结合强度<sup>[6-7]</sup>.

图 3 为 C-276 合金涂层与基体的剖面形貌.从图 3 可见,涂层与基体有着良好的结合,表明涂层的结合强度较高.

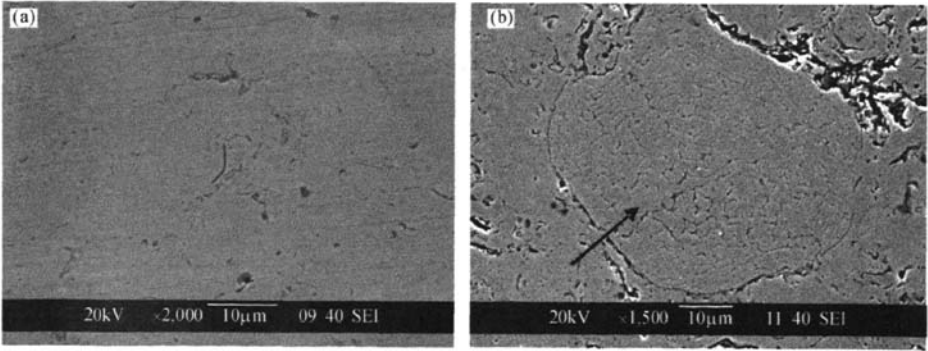


图 2 C-276 合金涂层剖面形貌  
(a)纵剖面;(b)经腐蚀后的横剖面  
Fig. 2 Cross-sectional images for Hastelloy C-276 coating  
(a) longitudinal section; (b) the corrosion of the cross section

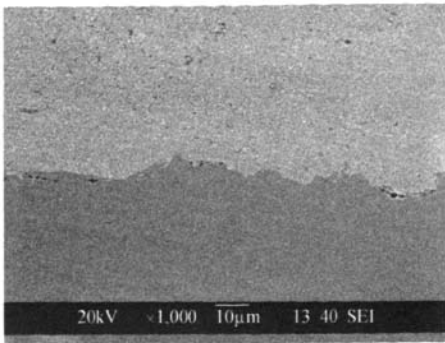


图 3 C-276 合金涂层与基体的剖面形貌

Fig. 3 Cross-sectional images for Hastelloy C-276 coating and substrate

2.2 涂层的相分析

图 4 为 C-276 合金粉末涂层的 X 射线衍射图谱. 从图 4 可见, 所制备的 C-276 合金涂层及粉末均为面心立方的  $\gamma$  相 Ni-Cr-Co-Mo 合金. 这表明, 超音速火焰温度没有明显地改变粉末的相组成. 由于单相面心立方晶格结构的镍基合金具有很好的抗腐蚀性能, 其中固溶的 Cr, W 及 Mo 等元素能增加原子间结合力产生的点阵畸变, 降低堆垛层错能, 使再结晶温度提高, 因此高温时也能保持良好的热稳定性<sup>[8-9]</sup>.

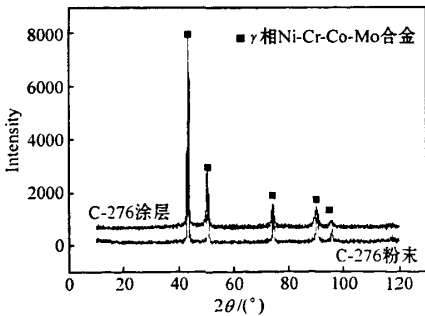


图 4 C-276 粉末和涂层的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns for Hastelloy C-276 powder and coating

2.3 涂层的显微硬度与耐磨性

涂层的硬度是表征涂层耐磨性的指标之一. 经显微硬度计的测试, C-276 合金涂层的平均显微硬度为 630Hv, 而 316L 基体的硬度为 250Hv. 由此可知, 涂层的硬度明显比基体高. 将 C-276 涂层试样

和 316L 基体试样在日制 Suga 砂纸摩擦磨损试验机上测试, 经过三组测试, 每组试样分别被砂纸打磨 400 次、800 次及 1200 次, 图 5 为 C-276 合金涂层和 316L 基体的磨损结果. 从图 5 可见, 随着磨损次数的增加, 涂层磨损量基本稳定, 由于涂层未经过处理, 强度不高. 因此, 可认为未经处理后的 C-276 涂层的耐磨性比 316L 基体差些.

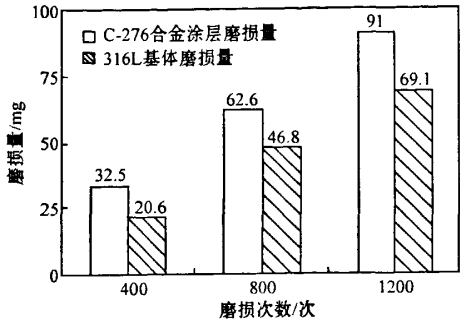


图 5 C-276 合金涂层与 316L 基体的磨损结果

Fig. 5 Weight loss for Hastelloy C-276 coating and 316L

3 结 论

可采用超音速火焰喷涂工艺快速制备 C-276 哈氏合金涂层, 所制备的涂层非常致密, 并与基体结合牢固, 涂层层间存在氧化带; C-276 合金粉末经喷涂后没有发生明显的相变, 粉末与涂层均以  $\gamma$  相 Ni-Cr-Co-Mo 合金为主晶相; 所制备涂层的显微硬度比 316L 基体高, 未经处理后的 C-276 涂层的耐磨性比 316L 基体差些.

参考文献:

[1] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.  
[2] 戴达煌, 周克崧, 袁镇海. 现代材料表面技术科学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.  
[3] 王卫泽, 李长久. 热喷涂涂层的结构及其表征[J]. 材料保护, 2006(11): 39.  
[4] KAWAKITA J. Oscillational corrosion potential of Hastelloy C coatings fabricated by GS-HVOF spraying[J]. Corrosion Science, 2005, 47: 2053-2062.  
[5] AHMAD M, AKHTER J I. Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastel-

- loy C-276[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 390:88-93.
- [6] ZHANG Qiang. Corrosion behavior of Hastelloy C-276 in supercritical water[J]. Corrosion Science, 2009, 51: 2092-2097
- [7] AHMAD M. Surface modification of Hastelloy C-276 by SiC addition and electron beam melting[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 336:120-124.
- [8] 施爱娟. 镍基耐蚀合金 C-276 平衡析出相的热力学计算[J]. 特殊钢, 2009(5):30.
- [9] 马文有. Mo 含量对一种镍基单晶高温合金显微组织和持久性能的影响[J]. 金属学报, 2006(11):42.

## Microstructure and properties of HVOF sprayed Hastelloy C-276 coating

HUANG Ke<sup>1,2</sup>, DENG Yun-lai<sup>1</sup>, LIU Min<sup>2</sup>, DENG Chun-ming<sup>2</sup>, SONG Jin-bing<sup>2</sup>

(1. Materials Science and Engineering Institution, Center South University, Changsha 410083, China;

2. Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals, Guangzhou 510651, China)

**Abstract:** A Hastelloy C-276 coating was prepared by HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) process, and the microstructure, microhardness and wear resistance of the coating were demonstrated. The results revealed that the coating was layered and dense, firmly bonded to the substrate, the main crystalline phases of the coating and Hastelloy C-276 powder were both face-centered cubic  $\gamma$  phase structured Ni-Cr-Co-Mo alloy. The phase of coating remained to be consistent with that of spray powder. Nevertheless, the oxide and porosity generated during the spray process affected the hardness and wear resistance of the coating.

**Key words:** C-276 coating; HVOF; microstructure; property