

氧乙炔火焰喷焊镍基复合涂层的 显微组织和腐蚀性能研究

陈艺文^{1,2}, 柏洪武³, 巩秀芳^{1,2}, 王伟^{1,2}

(1.长寿高温材料国家重点实验室, 四川 德阳 618000; 2.东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000; 3.重庆工业职业技术学院, 重庆 401120)

摘要: **目的** 研究 Ni60 和 Ni60WC 喷焊涂层的显微组织、防腐和耐磨性能及其腐蚀机理, 为恶劣工况下服役的零件选择合适的喷焊涂层提供参考。**方法** 采用氧乙炔火焰喷焊工艺在 16Mn 钢基体上制备 Ni60 和 Ni60WC 涂层, 用 X 射线衍射仪、金相显微镜和扫描电子显微镜分析了喷焊涂层的相结构和显微组织, 并采用电化学工作站、盐雾腐蚀试验机、磨粒磨损试验机测试了两种喷焊涂层的防腐和耐磨性能。**结果** 喷焊层与基体间都存在冶金结合层和热影响区, Ni60 涂层的显微组织为 NiCr 固溶体基体上弥散分布着大量细小粒状和杆状碳化物和硼化物。Ni60WC 喷焊涂层组织中, 除了具有与 Ni60 涂层类似的基体相和细颗粒硬质相外, 还较均匀地分布着不同尺寸的 WC 颗粒。Ni60 和 Ni60WC 涂层的磨损率分别为 16Mn 钢的 8.3% 和 2.3%, 自腐蚀电流密度分别为 16Mn 钢的 1.0% 和 7.6%。另外, 基体相和硬质相之间的电偶腐蚀是两种镍基喷焊涂层的主要腐蚀机理。**结论** 这两种镍基喷焊涂层均能显著提高 16Mn 钢的抗磨和防腐性能, 其中, Ni60 喷焊涂层耐腐蚀性更好, Ni60WC 喷焊涂层耐磨损性能更好。

关键词: 喷焊; 镍基合金涂层; Ni60; WC; 磨粒磨损; 腐蚀

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)05-0295-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.05.033

Study on Microstructure and Corrosion Performance of Nickel Base Composite Coatings Prepared by Oxy-Acetylene Flame Spray Welding

CHEN Yi-wen^{1,2}, BAI Hong-wu³, GONG Xiu-fang^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Long-life High Temperature Materials, Deyang 618000, China; 2.Dongfang Electric Corporation Dongfang Turbine Co., Ltd, Deyang 618000, China; 3.Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China)

ABSTRACT: This work investigated the microstructure, corrosion and wear resistance and corrosion mechanism of Ni60 and Ni60WC spray welding coating, which can provide a reference for the selection of spray welding coating for the mechanical parts in service under severe working environment. Ni60 and Ni60WC coatings were prepared on 16Mn steel substrate by an

收稿日期: 2020-05-08; 修订日期: 2020-07-18

Received: 2020-05-08; **Revised:** 2020-07-18

作者简介: 陈艺文 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: CHEN Yi-wen (1986—), Male, Master, Engineer, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 王伟 (1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为材料表面改性技术。邮箱: wangwei_dtc@163.com

Corresponding author: WANG Wei (1981—), Male, Senior engineer, Research focus: surface modification of materials. E-mail: wangwei_dtc@163.com

引文格式: 陈艺文, 柏洪武, 巩秀芳, 等. 氧乙炔火焰喷焊镍基复合涂层的显微组织和腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 295-302.

CHEN Yi-wen, BAI Hong-wu, GONG Xiu-fang, et al. Study on microstructure and corrosion performance of nickel base composite coatings prepared by oxy-acetylene flame spray welding[J]. Surface technology, 2021, 50(5): 295-302.

oxy-acetylene flame spray welding process. The phase composition and microstructure of the coatings were tested and analyzed by an X-ray diffractometer, metallographic microscope and scanning electron microscope. The corrosion and wear resistance of the two coatings were studied by an electrochemical workstation, salt spray(fog) apparatus and abrasive wear tester. The results show that there are metallurgical bonding layer and heat affected zone between spray welding layer and 16Mn steel substrate. The microstructure of the Ni60 coating is a large number of smaller-sized granular and rod-shaped carbides and borides dispersed on the NiCr solid solution substrate. In addition to the fine hard phase similar to the Ni60 coating, the Ni60WC spray-welded coating has a uniform distribution of WC particles of different sizes. The wear rates of Ni60 and Ni60WC coating are 8.3% and 2.3% of 16Mn steel respectively, and the self-corrosion current densities are 1.0% and 7.6% of 16Mn steel respectively. In addition, the galvanic corrosion between the matrix phase and the hard phase is the main corrosion mechanism of the two nickel based spray welding coatings. Both Ni60 and Ni60WC spray welding coatings can significantly improve the wear and corrosion resistance of the 16Mn steel. Among them, Ni60 and Ni60WC coatings are respectively suitable for surface protection of mechanical parts in service environment where corrosion and wear are the main factors.

KEY WORDS: spray welding; nickel-based alloy coating; Ni60; WC; abrasive wear; corrosion

氧乙炔火焰喷焊工艺制备镍基涂层具有操作简单、成本低廉、涂层与基体结合强度高和可喷焊的材料成分可调等优点,常用于提高机械零件表面的抗磨与防腐性能^[1-5]。为了进一步提高喷焊层的硬度和耐磨性能,常常向镍基合金中添加 WC 颗粒。从理论上来说,镍基粉末中添加的 WC 越多,相应涂层的硬度也越高^[6],但是随着 WC 添加比例的增加,镍基 WC 粉末的喷焊工艺性能将会降低^[4]。生产实践表明,当镍基合金中添加的 WC 质量比例超过 35%时,相应粉末的喷焊工艺会显著下降^[7-9]。当前,在氧乙炔喷焊镍基涂层领域,大多数的研究集中在镍基复合涂层耐磨损性能和磨损机理方面^[4,10-14],而对于其腐蚀性能,特别是显微组织和腐蚀行为的关系方面,报道还较少^[15-16]。因此,本文采用氧乙炔火焰喷焊工艺在 16Mn 钢基体上分别制备 Ni60 和添加了 35%WC (以质量分数计)的 Ni60WC 涂层,比较了这两种喷焊涂层的显微组织、硬度、磨损性能和腐蚀性能,着重研究了两种涂层的抗腐蚀性能与显微组织间的关系,以期在腐蚀和磨损工况下服役的机械零件合理地选用喷焊涂层材料提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验基材为 100 mm×60 mm×6 mm 的 16Mn 钢板,涂层材料为市售镍基自熔性合金粉末 Ni60 和 Ni60WC,其中, Ni60 和 Ni60WC 粒度都不大于 325 目, Ni60WC 粉末中 WC 为 35%。

1.2 涂层制备

对 16Mn 板表面进行喷砂,采用 SJ210 型粗糙度仪(日本三丰)对基体表面进行粗糙度测试,直至 $Ra=5\text{ }\mu\text{m}$ 左右。然后,用丙酮清洗喷砂面,以除去油

污。在经过粗化和清洁的基体表面进行喷焊,工艺步骤如下:(1)开启乙炔和氧气阀,在小流量的情况下,点燃乙炔和氧气的混合气流;(2)逐步增大氧气和乙炔流量,并调整火焰为中性焰,对基体进行预热,距离为 150~200 mm,待基体表面呈现淡黄色时,向预热后的整个样板表面喷一层厚度为~0.2 mm 的粉末;(3)将喷嘴与基体的距离调整为 10~20 mm,分别设置氧气压力为 0.45 MPa,乙炔压力为 0.05 MPa,并用高温焰心尖端对喷涂的涂层进行高强度加热,待表面的涂层熔化呈现亮红色镜面反光时,再间歇式按下送粉开关进行喷粉与重熔,直到喷焊层的厚度达到预先设定的 0.7 mm 左右;(4)重熔完成后,让样块在空气中自然冷却,然后打磨掉涂层表面的熔渣,完成喷焊样品制备。

1.3 相结构测试

采用 SIEMENS D 5000 型 X 射线衍射仪,对切成小块的样品涂层面进行相结构测试,阳极靶为 Cu 靶,扫描角度为 30°~80°。

1.4 金相样品制备和硬度测试

用电火花线切割工艺对喷焊样板进行切割,并将样块截面作为磨抛面,用胶木粉热镶嵌,再依次用 320、600、1200 号砂纸以及平均粒度为 2.5 μm 的金刚石喷雾剂进行粗磨、精磨和抛光。用上海泰明光学仪器有限公司生产的 HX-1000TM 型显微硬度计测试喷焊层截面显微硬度,载荷为 300 g,保压时间为 10 s,并用该显微硬度计自带的拍照系统拍摄喷焊层截面显微组织形貌。观察喷焊层的显微组织时,用王水作为腐蚀剂;观察喷焊层基体组织时,用 5%的硝酸酒精溶液作为腐蚀剂。

1.5 磨粒磨损实验

用电火花线切割工艺切割出尺寸为 59 mm×27 mm×

6.5 mm 的样块,并用平面磨床磨削样块尺寸为 59 mm×27 mm 的两个大平面。将磨削好的样块清洗干净,进行磨粒磨损测试,所用设备为 MLS-225 型湿砂橡胶轮磨粒磨损试验机。磨损介质为石英砂和水的混合物,其中,石英砂的粒度为 40~70 目,其质量为 1500 g,水的质量为 1000 g。实验载荷为 100 N,总磨程为 1677 m。磨损率计算公式如下:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{\rho L}$$

式中: w 为磨损率,单位 mm^3/m ; m_1 为磨损前样品的质量,单位 g ; m_2 为磨损后样品的质量,单位 g ; ρ 为样品的理论密度,单位 g/cm^3 ; L 为总磨程,单位 m 。

1.6 电化学腐蚀实验

电化学腐蚀实验采用上海辰华仪器公司生产 CHI660B 型电化学工作站,辅助电极为薄铂片,参比电极为饱和甘汞电极,工作电极的工作面为经过磨削和抛光的喷焊涂层表面。涂层样块的其余表面用环氧树脂封闭,并用铜导线与涂层样品的基体侧进行可靠连接。腐蚀介质是 3.5%NaCl 溶液。电化学腐蚀后,采用美国产 Zygo 白光干涉仪测量涂层的表面粗糙度。

1.7 铜加速乙酸盐雾腐蚀实验

按照 ASTM B368—2009 标准对样品进行盐雾腐蚀测试^[17],盐雾腐蚀溶液成分为 50 g/L NaCl 和 0.26 g/L $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,通过向该腐蚀溶液添加乙酸将其 pH 值调整为 3.0~3.1。将试样放入盐雾箱中的试样架上,样块的受检面与垂直方向大约成 20° 角,实验箱内温度设置为 50°C 。每 24 h 取出试样,用室温自来水清洗受检表面,吹干后,观察表面腐蚀情况。盐雾腐蚀总时间为 168 h。

2 结果与讨论

2.1 Ni60 和 Ni60WC 喷焊粉末

Ni60 和 Ni60WC 喷焊粉末低倍和高倍表面形貌如图 1 所示。由图 1a、b 所示, Ni60 和 Ni60WC 粉末呈球形、近球形或椭球形,其中, Ni60WC 中的 WC 颗粒呈多角形。由单个 Ni60 粉末颗粒的高倍形貌(图 1c)可以看出,粉末表面呈现出尺寸细小的枝晶形态。无论是气雾化还是水雾化制备的粉末,其凝固的速度都应该很快,晶粒应该是细小的等轴晶,甚至是非晶。而本文两种粉末中的 Ni60 粒子表面产生了枝晶,可能与其复杂的化学成分造成的特殊凝固结晶方式有关。

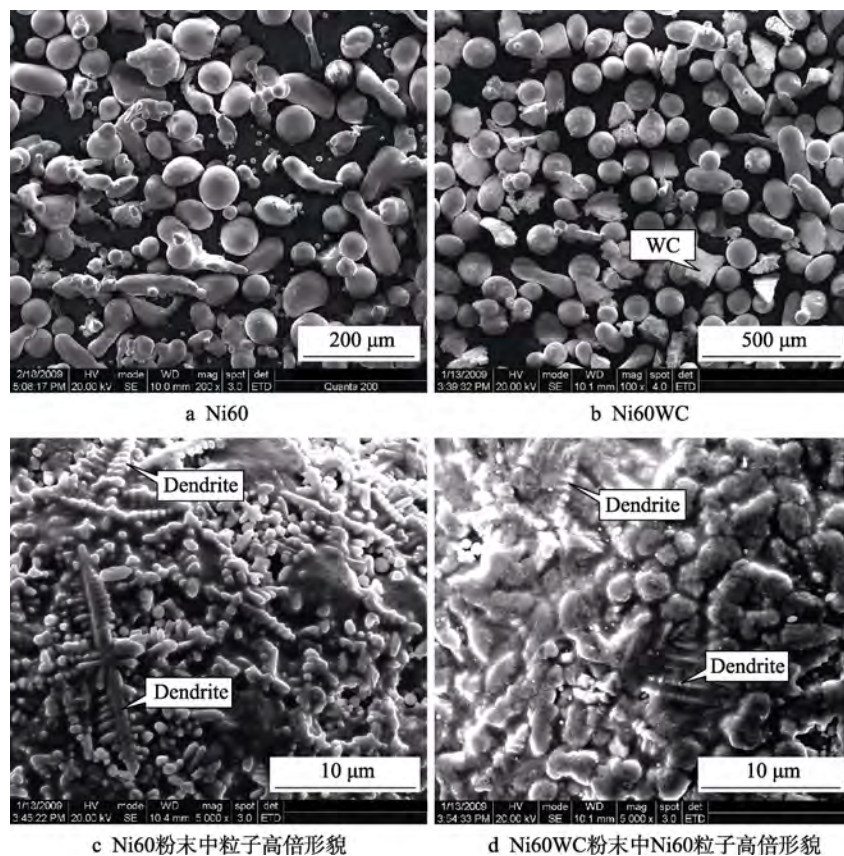


图 1 Ni60 和 Ni60WC 粉末的表面形貌

Fig.1 Surface morphologies of the Ni60 and Ni60WC powders: c) high magnification morphology of the Ni60 particle, d) high magnification morphology of the Ni60 particle of the Ni60-WC

2.2 Ni60 和 Ni60WC 喷焊涂层相结构

Ni60 和 Ni60WC 喷焊涂层的相结构如图 2 所示。

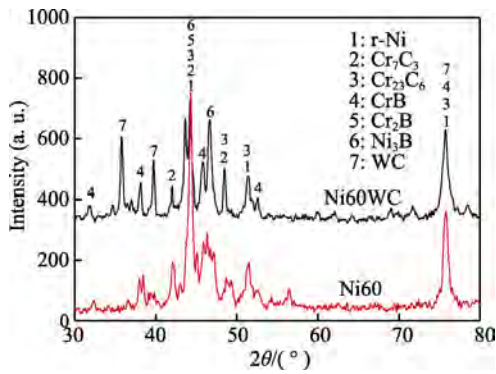


图 2 Ni60 和 Ni60WC 喷焊涂层的相结构
Fig.2 XRD results of the Ni60 and Ni60WC coatings

可以看出, Ni60 涂层的相主要由 Ni、碳化铬 (Cr_7C_3 和 Cr_{23}C_6)、硼化物 (CrB 、 Cr_2B 和 Ni_3B) 组成。Ni60WC 涂层的相结构除了比 Ni60 多了 WC 相外, 其余相组成基本相同。说明氧乙炔火焰喷焊制备的镍基涂层与激光熔覆^[18-20]、等离子喷焊^[21]、真空重熔^[22]、等离子喷涂^[23]制备的同类涂层具有类似的相结构。

2.3 Ni60 和 Ni60WC 喷焊涂层的显微组织

Ni60 和 Ni60WC 喷焊涂层的显微形貌和选定部位的能谱分析如图 3 所示。从图 3a、c 可以看出, 两种喷焊层与基体界面上均存在一定厚度的冶金结合层 (Metallurgical bonding layer), 这种冶金结合层的存在说明喷焊涂层与基体形成了良好的冶金结合^[4-5,13,20]。另外, 喷焊层组织中都存在一定数量的气孔, 采用“灰度法”统计 Ni60 和 Ni60WC 涂层的气孔,

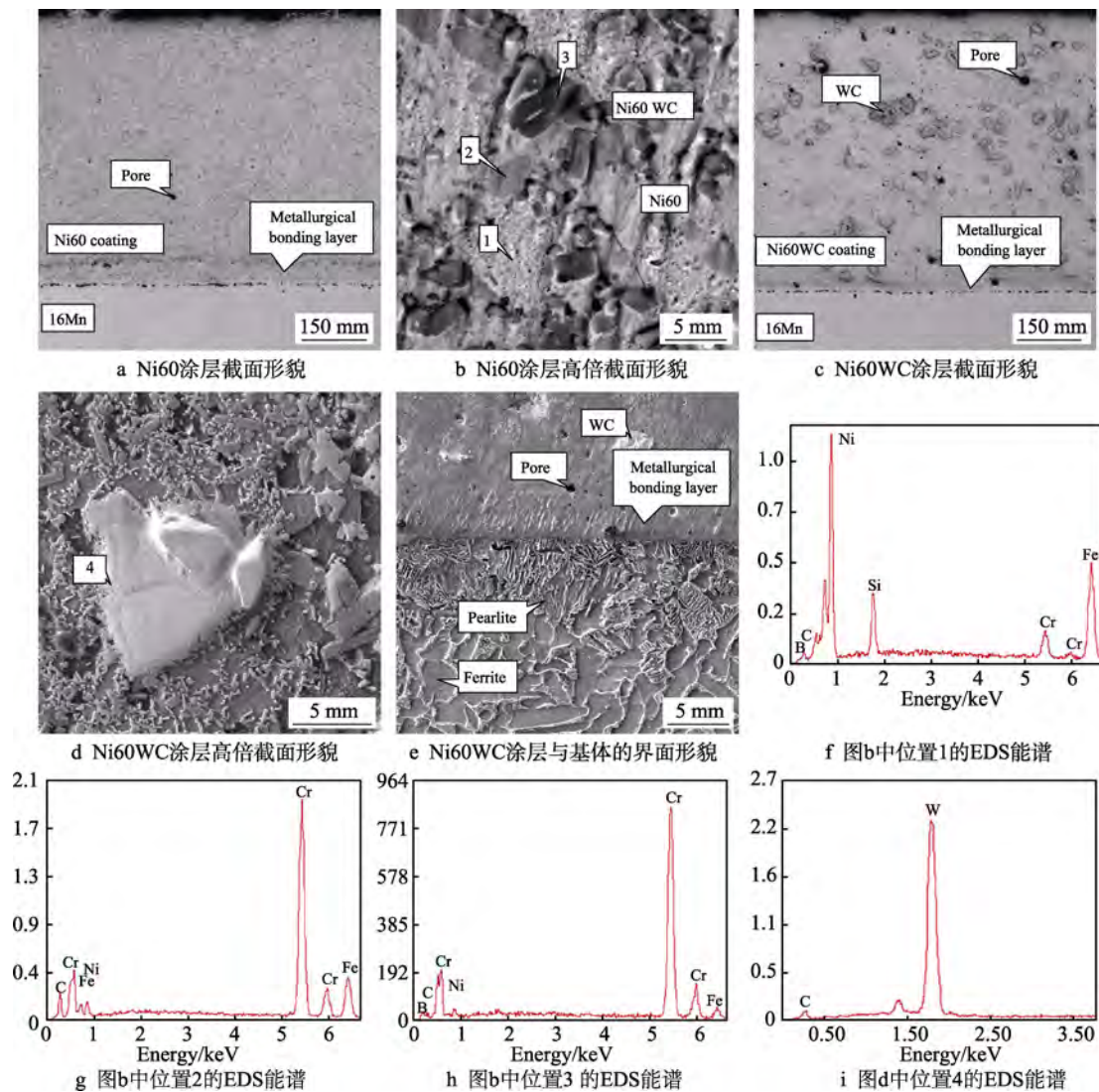


图 3 Ni60 和 Ni60WC 涂层显微组织形貌和能谱分析

Fig.3 Microstructure morphologies and EDS analysis: a) cross-section morphology of Ni60 coating; b) high-magnification cross-section morphology of Ni60 coating; c) cross-section morphology of Ni60WC coating; d) high magnification cross-section morphology of the Ni60WC coating; e) the interface between Ni60WC coating and substrate; f) the EDS result of the region labeled as 1 in Fig.b; g) the EDS result of the region labeled as 2 in Fig.b; h) the EDS result of the region labeled as 3 in Fig.b; i) the EDS result of the region labeled as 4 in Fig.d

隙率，分别为 0.34%和 0.97%。由图 3b 可以看出，Ni60 涂层的显微组织为基体相上弥散分布着大量细颗粒相。由图 3f、g、h 的 EDS 分析结果可知，基体相主要是 NiCr 固溶体，颜色呈黑灰色的是以硼化铬为主的硼化物，颜色稍浅的呈灰色的颗粒是碳化铬为主的碳化物。硼化物和碳化物都是硬度较高的陶瓷相，弥散分布在 NiCr 构成的固溶体上，使 Ni60 涂层表现出高的硬度^[24-26]。由图 3d 所示的 Ni60WC 涂层在腐蚀后的高倍显微组织可以看出，Ni60WC 涂层除了存在与 Ni60 涂层类似的基体以及碳化铬和硼化铬析出相外，还存在尺寸较大的块状颗粒，由能谱分析（图 3i）可知，该块状颗粒是 WC 相。由 Ni60WC 涂层与基体界面的显微组织（图 3e）可以看出，越靠近冶金结合层，基体组织中的片状珠光体越多，主要原因是喷焊粉末 Ni60 中的碳向基体中扩散。Ni60 粉末中的碳约为 0.7%，明显高于 16Mn 钢中的含碳量（ $\leq 0.2\%$ ）。通常，镍基喷焊粉末的熔融温度为 1060℃，在喷焊过程中，熔融粉末中含量高的碳会向低碳钢 16Mn 基体进行下坡扩散，同时，喷焊界面处的 16Mn 基体组织在高温下也会发生奥氏体转变。喷焊结束后，样品在空冷中缓冷，奥氏体化后的组织发生组织转变，生成珠光体和铁素体。靠近冶金结合层处的基体中的奥氏体由于碳含量高，相应获得的珠光体组织数量会增多，而在远离界面的组织中，珠光体数量逐渐减少，铁素体的数量逐渐增加，直至过渡到 16Mn 钢中以铁素体为主、珠光体为辅的组织^[13]。其中，由冶金结合层至正常 16Mn 钢组织区间的部分，可称为热影响区^[4-5]。文献[20]也报道了这种类似的喷焊层组织结构，并指出在涂层与基体的界面处，除了碳元素发生了扩散外，铁和镍等元素也发生了扩散。

2.4 基体和喷焊层的硬度和磨损率

基体 16Mn 和两种喷焊涂层的硬度和磨损率如图 4 所示。由图 4 可以看出，两种喷焊层的磨损率显著

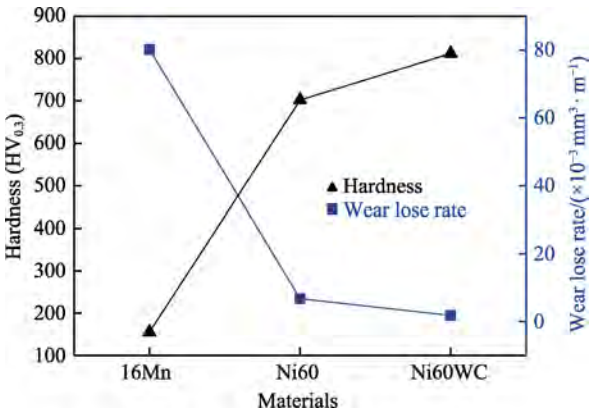


图 4 基体 16Mn 和两种喷焊镍基涂层的硬度和磨损率
Fig.4 Hardness and wear loss rate of the 16Mn steel and two spray welding Ni-based coatings

低于 16Mn 基体，且材料的磨损率与硬度基本呈反比。通常，在橡胶轮磨粒磨损过程中，硬质磨粒通过橡胶轮的压力和摩擦力分别对材料产生压入和刮擦作用，材料的硬度越高，其抵抗磨粒压入和刮擦的能力越强，相应的材料磨损率就越小。文献[4,14]报道，Ni60 涂层中存在大量弥散分布的碳化铬和硼化铬等硬质相，能显著提高涂层的硬度，进而提高其耐磨性。相对于 Ni60 涂层，由于高硬度 WC 的引入，使 Ni60WC 涂层硬度和耐磨性能有了进一步的提高。

2.5 基体和喷焊涂层的腐蚀性能

2.5.1 基体和喷焊涂层的电化学腐蚀性能

基体 16Mn 钢和两种喷焊镍基涂层的电化学腐蚀极化曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出，两种喷焊涂层的腐蚀电位显著高于基体 16Mn 钢，其相应的曲线位置也比 16Mn 钢更靠左。采用电化学工作站自带的软件对图 5 所示曲线进行自动拟合，得到各样品的腐蚀电位和自腐蚀电流密度，见表 1。

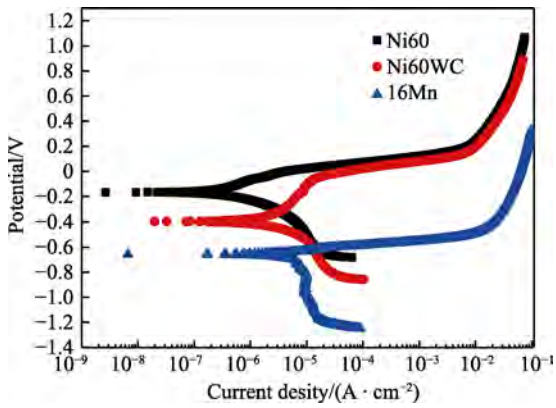


图 5 基体 16Mn 和两种喷焊镍基涂层电化学极化曲线
Fig.5 Polarization curves of the 16Mn steel and two spray welding Ni-based coatings

表 1 基体 16Mn 和两种喷焊镍基涂层的腐蚀电位和自腐蚀电流密度

Tab.1 Corrosion potential and corrosion current density of the 16Mn steel and two spray welding Ni-based coatings

Materials	Corrosion potential/V	Corrosion current density/($\times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
16Mn	-0.66	37.65
Ni60	-0.17	0.39
Ni60WC	-0.40	2.86

由表 1 可以看出，两种镍基喷焊涂层的开路电位分别比 16Mn 高 0.49 V 和 0.26 V，自腐蚀电流分别是 16Mn 的 1.0%和 7.6%。被测试材料的腐蚀电位越高，表明其发生腐蚀的倾向越小，自腐蚀电流密度越低，表明其腐蚀速度越慢^[25]，可见氧乙炔火焰喷焊的两种镍基涂层抗腐蚀性能都显著优于 16Mn 钢。

Ni60WC 喷焊层电化学腐蚀后的表面形貌及能谱分析结果如图 6 所示。从图 6a、b 可以看出，两种

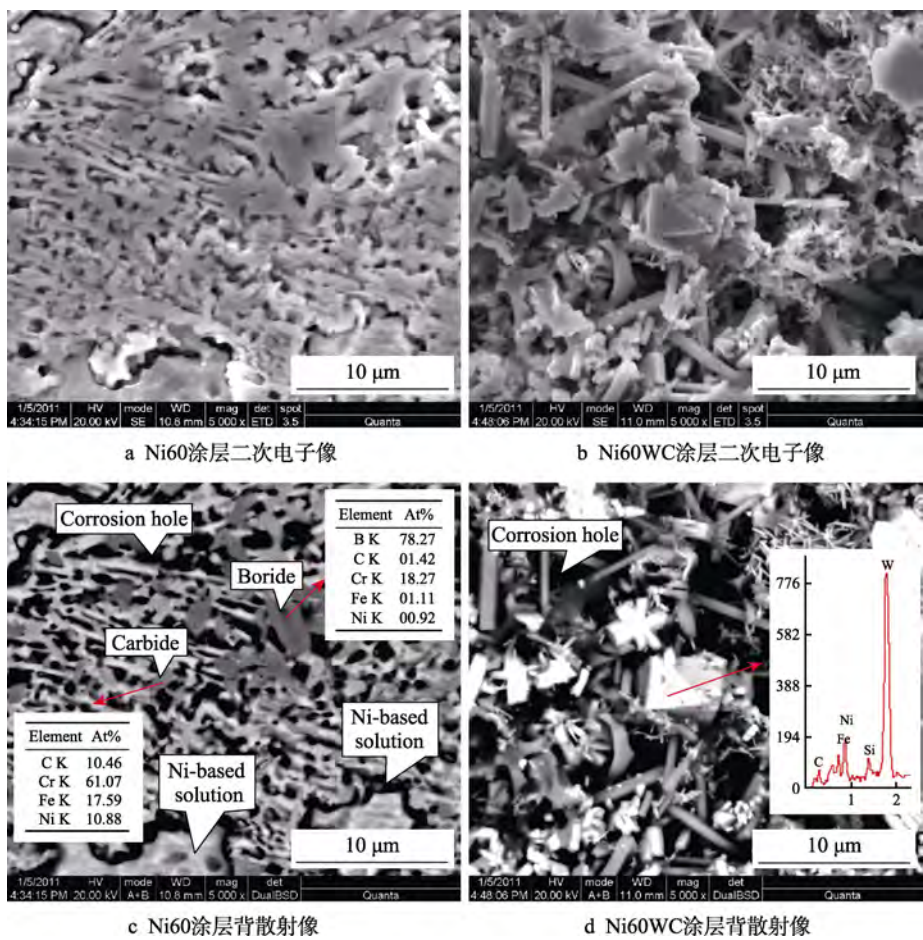


图 6 两种镍基喷焊层腐蚀后的表面形貌及能谱分析结果

Fig.6 Surface morphologies and EDS results of the two spray welding Ni-based coatings after electrochemical corrosion

镍基喷焊涂层腐蚀后，表面出现大量的孔洞和缝隙，这些腐蚀孔洞和沟槽一般分布在颗粒状和杆状粒子之间或块状相四周。Ni60 和 Ni60WC 涂层表面电化学腐蚀后，粗糙度平均值分别为 $Ra=0.8\ \mu\text{m}$ 和 $Ra=1.3\ \mu\text{m}$ ，表明后者腐蚀要更剧烈一些。结合图 2 的 Ni60 显微组织和图 6c 中的选区能谱分析结果可以推测，图 6c 中灰黑色的相应该是硼化铬，浅灰色的应该是碳化铬相，大块的相是 NiCr 基体固溶体^[4,14]。碳化物和硼化物都属于陶瓷相，相对于金属或合金相，陶瓷相具有更高的腐蚀电位。在电化学腐蚀过程中，高电位的陶瓷相与低电位的镍基合金相之间会形成微电池而发生电偶腐蚀，使这些陶瓷相周围的镍基合金相在电化学腐蚀过程中发生优先腐蚀。当碳化铬和硼化铬析出相分布较密集时，即析出相颗粒间的 NiCr 粘结相名义自由路径较小时，其周围的 NiCr 粘结相几乎被完全腐蚀，导致这些块颗粒和杆状相之间出现孔洞和沟槽。当碳化铬和硼化铬等陶瓷析出相分布较稀疏时，即其周围的 NiCr 粘结相的名义粘结自由路径比较大时，由于电偶腐蚀的原因，使得与硬质相相临部分的 NiCr 粘结相被优先腐蚀，导致在大块的 NiCr 固溶体四周形成了环绕形的沟槽。由 NiWC 涂层腐蚀后的表面形貌背散射图（图 6d）可以看出，

除了与 Ni60 腐蚀后具有类似的棒状和颗粒状的形貌外，Ni60WC 涂层中还存在大量白亮色颗粒物，由能谱分析结果（图 6d 插入的能谱图）可知，这些白色的物质是 WC 相。由于额外添加的这些 WC 颗粒使 Ni60WC 涂层中硬质相的含量和种类比 Ni60 涂层更多，导致 Ni60WC 涂层中 NiCr 粘结相的名义自由路径更小。可以推测，在电化学腐蚀过程中，有以下几方面的原因导致 Ni60WC 涂层的耐腐蚀性能比 Ni60 涂层差：（1）Ni60WC 涂层中大量的 WC 和原位析出的其他碳化物和硼化物相作为阴极，与四周作为阳极的 Ni 基体相构成了更多的微电池；（2）喷焊凝固过程中，未熔的 WC 颗粒由于收缩不一致，导致在涂层内部产生大量的微区应力场^[16]；（3）由于喷焊工艺难度增大，导致 Ni60WC 涂层的孔隙率较高。

2.5.2 基体和喷焊涂层的抗盐雾腐蚀性能

铜加速醋酸盐雾腐蚀试验 24 h 后的 16Mn 钢以及试验 168 h 后的 Ni60 和 Ni60WC 涂层样块表面形貌如图 7 所示。试验中，16Mn 钢表面很快生成一层锈蚀层，腐蚀 24 h 后，锈蚀层较厚，如图 7a。两种镍基喷焊层表面基本保持光亮，Ni60WC 涂层表面仅仅生成了两点颜色较浅的锈迹。相对中性盐雾试验，铜加速醋酸盐雾腐蚀的腐蚀强度要大得多。一般认为，

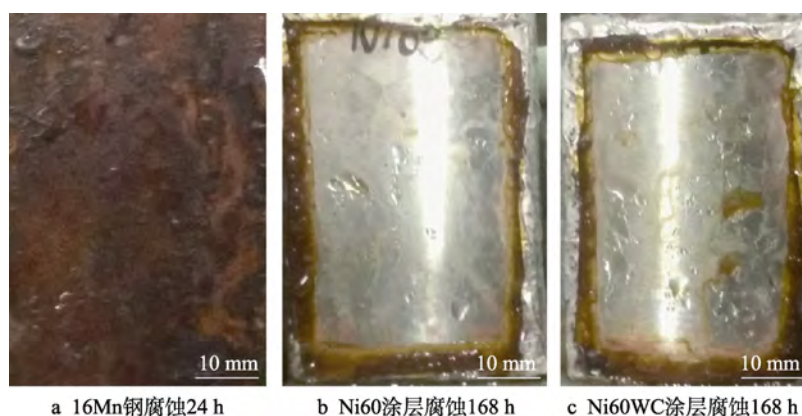


图 7 铜加速醋酸盐雾腐蚀后的样品表面照片

Fig.7 Surface morphologies of the 16Mn steel and two spray welding Ni-based coatings after copper-accelerated acetic acid-salt spray (fog) testing: a) 16Mn steel after 24 h of corrosion; b) Ni60 coating after 168 h of corrosion; c) Ni60WC coating after 168 h of corrosion

由于铜离子和乙酸的加入,使铜加速乙酸盐雾腐蚀的强度是中性盐雾腐蚀强度的 8 倍^[17]。按照这种折算比例可推测出,两种镍基喷焊层耐中性盐雾腐蚀实验的时间可超过 1000 h,表现出极好的抗腐蚀性能。其中, Ni60 涂层的抗腐蚀性能要优于 Ni60WC 涂层。可见盐雾腐蚀结果与电化学腐蚀的结果一致。

3 结论

1) 采用氧乙炔火焰喷焊工艺,在 16Mn 钢表面成功地制备了两种与基体结合良好且组织结构较为致密的镍基涂层。Ni60 涂层的显微组织为 NiCr 固溶体上弥散分布着碳化铬以及硼化铬为主的原位析出硬质相。Ni60WC 涂层中除了与 Ni60 涂层具有同样的基体相和原位析出硬质相外,还存在 WC 相,并且相应 NiCr 粘结相的名义自由路径要小一些。

2) 两种镍基喷焊涂层都能显著提高 16Mn 钢的防腐和耐磨性能。相对于 Ni60 涂层, Ni60WC 涂层的硬度和耐磨性更高。

3) 两种镍基喷焊涂层的电化学腐蚀机理主要是,硬质相和基体相间存在电位差而形成的电偶腐蚀。电化学腐蚀和铜加速乙酸盐雾腐蚀结果都表明,两种镍基喷焊涂层的抗腐蚀性能显著优于 16Mn 钢,并且 Ni60WC 涂层的抗腐蚀性要比 Ni60 涂层差。

参考文献:

- [1] USANA-AMPAIPONG T, DUMKUM C, TUCHINDA K, et al. Surface and subsurface characteristics of NiCrBSi coating with different WC amount prepared by flame spray method[J]. Journal of thermal spray technology, 2019, 28: 580-590.
- [2] HOUDKOVA S, SMAZALOVA E, VOSTRAK M, et al. Properties of NiCrBSi coating, as sprayed and remelted by different technologies[J]. Surface & coatings technology, 2014, 253: 14-26.
- [3] AFSOUS M, SHAFYEI A, SOLTANI M, et al. Characterization and evaluation of tribological properties of NiCrBSi-Gr composite coatings deposited on stainless steel 420 by HVOF[J]. Journal of thermal spray technology, 2020, 29: 773-788.
- [4] 吴有伍, 谭兴龙, 吴琴, 等. 铸造碳化钨添加量对镍基复合喷熔涂层性能的影响[J]. 铸造, 2013, 62(9): 874-877.
- [5] WU You-wu, TAN Xing-long, WU Qin, et al. Effect of the casting WC powder content on the performance of WC reinforced Ni-based spray fused coating [J]. Foundry, 2013, 62(9): 874-877.
- [6] 王群, 陈振华, 丁彰雄, 等. 镍基 WC 喷熔涂层组织与磨损性能研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(4): 57-60.
- [7] WANG Qun, CHEN Zhen-hua, DING Zhang-xiong, et al. Study on Microstructure and wear properties of WC spray melted coating [J]. Journal of Hunan University: Natural science edition, 2009, 36(4): 57-60.
- [8] CHEN Z X, LI H, REN L M, et al. Effect of tungsten carbide addition on the wear resistance of flame-sprayed self-lubricating Ni-graphite coatings[J]. Journal of materials engineering and performance, 2020, 29: 1156-1164.
- [9] 贾瑞灵, 李建国, 张秀云. 碳化钨对自熔合金 Ni60B 喷熔层耐磨性的影响[J]. 内蒙古工业大学学报, 2005, 24(4): 285-289.
- [10] JIA Rui-lin, LI Jian-guo, ZHANG Xiu-yun. A study on the influence of WC on wear resistance of Ni-base self-fluxing alloy[J]. Journal of Inner Magnolia University of Technology, 2005, 24(4): 285-289.
- [11] KIM H J, HWANG S Y, LEE C H. Assessment of wear performance of flame sprayed and fused Ni-based coatings[J]. Surface and coatings technology, 2003, 172(2-3): 262-269.
- [12] RACHIDI R, EL KHEL B, DELAUNOIS F, et al. Wear performance of thermally sprayed NiCrBSi and NiCrBSi-

- WC coatings under two different wear modes[J]. Journal of materials and environmental sciences, 2017, 8(12): 4550-4559.
- [10] 沈德久, 千玉林, 方春林. 碳化钨增强镍基喷熔层耐磨性的研究[J]. 粉末冶金技术, 1997, 15(4): 286-288.
SHEN De-jiu, QIAN Yu-lin, FANG Chun-lin. Study on wear resistance of WC enhanced Ni based spray melt layer[J]. Powder metallurgy technology, 1997, 15(4): 286-288.
- [11] 陈志刚, 汤小丽, 苏静, 等. 超细碳化钨体积分数对喷熔层耐磨性的影响[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 44-46.
CHEN Zhi-gang, TANG Xiao-li, SU Jing, et al. Influences of volume content of WC on wear resistance of sprayed coating[J]. Journal of Jiangsu University: Natural science edition, 2006, 27(1): 44-46.
- [12] 王长生, 杨蕴林. WC添加量对Ni60自熔合金喷熔层磨粒磨损性能影响[J]. 热加工工艺, 1997(1): 28-30.
WANG Chang-sheng, YANG Yun-lin. Effect of the WC addition on the abrasive wear properties of fused Ni60 self-fluxing alloy coating[J]. Hot working technology, 1997(1): 28-30.
- [13] WANG Qun, CHEN Zhen-hua, DING Zang-xiong, et al. Abrasive wear behavior of WC reinforced Ni-based composite coating deposited by oxy-acetylene flame spraying weld process[J]. Surface review and letters, 2009, 16 (3): 475-485.
- [14] 梁方政, 周伍喜, 易长宾, 等. 火焰喷焊 Ni 基涂层微观结构及耐摩擦磨损性能的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2018, 46(3): 54-58.
LIANG Fang-zheng, ZHOU Wu-xi, YI Chang-bin, et al. Study on microstructure and wear resistance of flame spray welding Ni-based coatings[J]. Rare metals and cemented carbides, 2018, 46(3): 54-58.
- [15] SHABANA, SARCAR M, SUMAN K, et al. Tribological and corrosion behavior of HVOF sprayed WC-Co, NiCrBSi and Cr_3C_2 -NiCr coatings and analysis using design of experiments[J]. Materials today: Proceedings, 2015, 2(4-5): 2654-2665.
- [16] 李慕勤, 马巨, 尹柯, 等. Ni-WC-RE 组合粉喷焊层的磨损及腐蚀行为[J]. 焊接学报, 1996, 17(1): 7-12.
LI Mu-qing, MA Ju, YIN Ke, et al. Abradability and corrosion resistance of spray-welding layers of Ni-WC-RE combination powder[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1996, 17(1): 7-12.
- [17] ASTM B368—2009, Standard test method for copper-accelerated acetic acid-salt spray (fog) testing (CASS Test)[S].
- [18] LIU J, BOLOT R, COSTIL S, et al. Transient thermal and mechanical analysis of NiCrBSi coatings manufactured by hybrid plasma spray process with in-situ laser remelting[J]. Surface and coatings technology, 2016, 292(8): 132-143.
- [19] ZHOU S, LEI J, DAI X, et al. A comparative study of the structure and wear resistance of NiCrBSi/50 wt.% WC composite coatings by laser cladding and laser induction hybrid cladding[J]. International journal of refractory metals and hard materials, 2016, 60: 17-27.
- [20] SERRES N, HLAWEKA F, COSTIL S, et al. Microstructures of metallic NiCrBSi coatings manufactured via hybrid plasma spray and in situ laser remelting process[J]. Journal of thermal spray technology, 2011, 20(1-2): 336-343.
- [21] MASLAREVIC A, BAKIC G M, DJUKIC M B, et al. Microstructure and wear behavior of MMC coatings deposited by plasma transferred arc welding and thermal flame spraying processes[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2020, 73:259-271.
- [22] WEN Z, BAI Y, YANG J, et al. Effect of vacuum remelting on microstructure and wear resistance of NiCrMoY coatings deposited by supersonic atmospheric plasma spraying[J]. Surface and coatings technology, 2015, 281 (1): 62-67.
- [23] DONG X Y, LUO X T, ZHANG S L, et al. A Novel Strategy for depositing dense self-fluxing alloy coatings with sufficiently bonded splats by one-step atmospheric plasma spraying [J]. Journal of thermal spray technology, 2020, 29: 173-184.
- [24] 王建萍, 唐菊, 王灿, 等. 氧乙炔火焰喷焊制备自熔性合金涂层及其性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 117-122.
WANG Jian-ping, TANG Ju, WANG Can, et al. Properties of self-fluxing alloy coating prepared by oxy-acetylene flame spray welding[J]. Surface technology, 2018, 47(2): 117-122.
- [25] 王群. 热喷涂(焊)金属 WC 涂层组织、性能及抗磨粒磨损行为研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
WANG Qun. Microstructure, performance and abrasive wear behaviour of metal tungsten carbide coatings deposited by HVOF and oxygen-acetylene flame spray and fuse[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [26] 柯德庆, 潘应君, 童向阳. 纯铜表面等离子喷焊 Ni60 涂层组织及性能的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 91-93.
KE De-qing, PAN Ying-jun, TONG Xiang-yang. Study on the microstructure and properties of Ni60 coating by plasma spray welding on copper[J]. Surface technology, 2013, 42(4): 91-93.