

文章编号:1674-2974(2009)04-0057-04

## 镍基碳化钨喷焊涂层组织与磨损性能研究\*

王 群<sup>1†</sup>, 陈振华<sup>1</sup>, 丁彰雄<sup>2</sup>, 吴落义<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

**摘 要:**采用带有能谱仪的扫描电镜、X射线衍射和透射电镜技术分析了氧乙炔火焰喷焊 WC 增强镍基自熔性合金复合涂层的组织结构, 并采用湿砂橡胶轮式磨粒磨损实验机对该涂层、镀铬层以及 Q235 钢进行了抗磨粒磨损性能测试. 结果表明, 复合喷焊层的结构为在  $\gamma$ -Ni 固溶体基体上较均匀的分布着颗粒较粗的 WC 粒子和弥散分布着大量细小的碳(硼)化物硬质相, 这些细小的硬质相主要是  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Ni}_3\text{B}$  等. 在相同的实验条件下, 镀铬层和 Q235 钢的磨损失重分别为喷焊层的 1.86 倍和 29.8 倍.

**关键词:**显微组织; 磨粒磨损; 涂层; 镍基自熔性合金

**中图分类号:** TG174.442

**文献标识码:** A

## Microstructure and Wear Performance of WC Reinforced Ni-based Spraying-Welding Coating

WANG Qun<sup>1†</sup>, CHEN Zheng-hua<sup>1</sup>, DING Zhang-xiong<sup>2</sup>, WU Luo-yi<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Energy and Engineering, Wuhan Univ of Technology, Wuhan, Hubei 430063, China)

**Abstract:** Microstructure of Tungsten Carbide(WC) reinforced Ni-based self-fluxing alloy composite coating prepared with oxy-acetylene flame spray-welding was investigated with scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-Ray Spectrometry (EDS), X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy(TEM). The wear performance of the spray-welding coating, hard chromium layer and Q235 steel were tested with a MLS-225 wet sand rubber wheel abrasive wearing tester. The results indicated that the microstructure of spray-welding coating was composed of  $\gamma$ -Ni solid solution, in which large amounts of coarse WC and fine carbide grains such as  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  and  $\text{Ni}_3\text{B}$  dispersed. The weight loss of abrasive wear of hard chromium layer and Q235 steel were 1.86 and 29.8 times the spray-welding coating respectively.

**Key words:** microstructure; abrasive wear; coating; Ni-based self-fluxing alloy

表面失效是零部件中的重要失效形式, 在表面失效中, 磨损占 60%~80% 的比例, 其中磨料磨损造成的损失在磨损失效中占 50%<sup>[1]</sup>. 目前表面工程技术在提高零件表面性能方面得到了越来越广泛的应用. 在矿山、水利和电力等领域中, 恶劣的工况条件要求工件表面必须具备较高的耐磨粒磨损性能. 实践表明, 表面涂层技术不但能够对失效工件进行

修复, 节省材料和能源, 而且还能大幅度地提高工件表面的使用性能, 是一种简便、有效的技术手段<sup>[2-3]</sup>. 近年来镍基自熔性合金涂层以及采用硬质颗粒增强镍基合金的复合涂层在提高材料表面耐磨性能方面受到日益广泛的关注, 鲍君峰<sup>[4]</sup>等人研究了 WC 的含量对 Ni60+WC 喷焊涂层组织及耐磨损性能的影响. 于美杰<sup>[5]</sup>等将氧乙炔火焰喷焊 Ni 基

\* 收稿日期: 2008-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479016)

作者简介: 王 群(1972-), 男, 安徽郎溪人, 湖南大学副教授, 博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: wangqun72@163.com

WC 涂层与等离子喷涂 NiCr/Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 涂层耐磨粒磨损性能进行了比较;陈传忠<sup>[6-7]</sup>,李士同<sup>[8]</sup>等人对 Ni60 及 Ni60/WC 涂层的相结构和显微组织进行了详细的分析.目前对镍基涂层的研究热点多集中在激光熔覆制备技术上<sup>[9-11]</sup>.然而,激光熔覆技术成本很高,而且如果控制不当易造成 WC 等低熔点颗粒的熔解,降低涂层的耐磨性能.与之相比,氧乙炔火焰喷焊技术成本低,工艺成熟、便于操作,更具有推广应用的潜力<sup>[5]</sup>.然而,目前对于火焰喷焊镍基涂层的耐磨机理,特别是涂层组织与其耐磨性之间关系研究的较少.本文将采用氧乙炔火焰喷焊技术制备 WC 增强镍基复合涂层,采用 SEM、XRD 和 TEM 等技术研究其组织结构,并利用湿砂橡胶轮式磨损实验机进行磨粒磨损实验,并且与镀铬层和没有进行任何防护的 Q235 钢进行对比,从而进一步分析复合喷焊层的组织结构对其磨粒磨损性能的影响,为其推广应用提供一定的理论指导.

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

实验基材厚度为 5 mm 的 Q235 钢板,涂层材料为商售镍基自熔性合金粉末 DG. Ni6025WC 粉末,粉末粒度为 -300 目.复合粉末中 Ni60 的质量分数为 75%,碳化钨的质量分数为 25%,其中 Ni60 的成分为:  $\omega_C: 0.7\% \sim 1.0\%$ ,  $\omega_{Cr}: 15\% \sim 18\%$ ,  $\omega_B: 3.0\% \sim 4.5\%$ ,  $\omega_{Si}: 3.5\% \sim 5.5\%$ ,  $\omega_{Fe} \leq 5\%$ ,  $\omega_{Ni}$ : 余量.

### 1.2 涂层制备

基材经净化和喷砂处理之后,使用 QH-2/h 型氧乙炔火焰喷焊枪采用“一步法”制备涂层.喷焊工艺参数为:氧气压力为 0.4~0.5 MPa,乙炔压力 0.03~0.06 MPa,基体预热温度 200~300 °C,即基体表面刚出现淡黄色时,立刻喷一层厚度约为 0.2 mm 的粉末,喷粉距离为 150~200 mm.喷粉后立刻将喷嘴与基体的距离调整为 10~20 mm,集中火力进行粉末重熔.喷粉与重熔的过程交替进行,直到喷焊层达到预先设定的 1 mm 左右的厚度.

### 1.3 显微硬度测试

用线切割加工出尺寸为 10 mm × 14 mm × 5 mm 的带有涂层的试样,经过镶嵌、初磨和抛光,然后用 Wilson Wolpert 401MVA 型显微硬度计测试喷焊层截面的显微硬度,实验载荷为 100 g,压力保持时间为 10 s.由于 WC 增强的镍基合金喷焊层中存

在多种显微组织结构,不同的区域显微硬度也不同,所以,分别在 WC 块上、枝晶状组织上以及在靠近结合界面附近的喷焊层测试其显微硬度.

### 1.4 磨粒磨损性能测试

磨损实验在 MLS-225 型湿砂橡胶轮式磨粒磨损实验机上进行,在实验过程中橡胶轮能有效地将与水混合的磨粒带到轮缘和试块中间,并保持试块上的压力基本不变,非常适合在同一实验条件下评价不同材料的耐磨性能.本实验所用的试块为 Ni6025WC 复合喷焊层、表面镀铬的 Q235 钢和未作防护的 Q235 钢基体.磨粒磨损的具体实验参数为:磨料为 40~80 目的石英砂;磨损试样所受正压力为 78.4 N;橡胶轮转速 240 r/min;砂浆由 1 000 g 水和 1 500 g 砂混合而成.组成第一轮实验预磨 500 r,其磨损失重不计入累计失重.正式磨损的总转数为 10 000 r,用精度为 0.1 mg 的 F0001 型分析天平称量试样质量,磨损前后的质量差值即为磨损的累计失重.

### 1.5 组织形貌及相结构表征

采用带有 OXFORD 能谱仪的 JEOL JSM-6700 型扫描电镜对喷焊层截面的显微组织、元素分布以及 3 种磨损试样表面的磨损形貌进行了分析;采用 H-800 型透射电镜对喷焊层的微观组织进行分析.采用 SIEMENS D5000 型 X 射线衍射仪对喷焊层进行相结构测试,阳极靶为 Cu 靶,扫描角度从 30°到 90°,管压 35 kV,管流 30 mA,积分时间 0.2 s,采样间隔 0.02 s.

## 2 结果与讨论

### 2.1 显微组织分析

图 1 为 Ni6025WC 复合喷焊层显微组织的 SEM 图像.

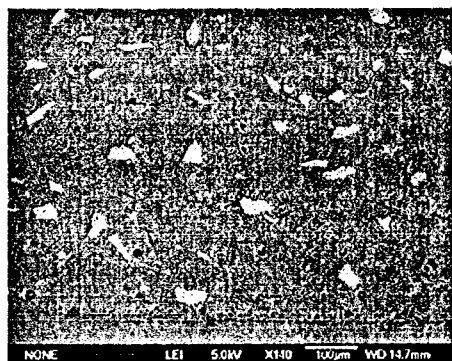


图 1 Ni6025WC 喷焊层横截面的显微形貌

Fig. 1 Microstructure of the Ni6025WC coating

从图 1 可以看出,喷焊层组织较致密涂层中的

WC 分布比较均匀,有较少量的气孔,喷焊层中的 WC 粒子分布较均匀具有较尖锐的棱角,说明镍基自熔性合金熔化时 WC 颗粒没有熔化.将图 1 中指定矩形区域放大,并采用扫描电镜自带的能谱仪对喷焊层横截面进行元素分布线扫描,所得的界面形貌及相应的元素线分布如图 2 所示.

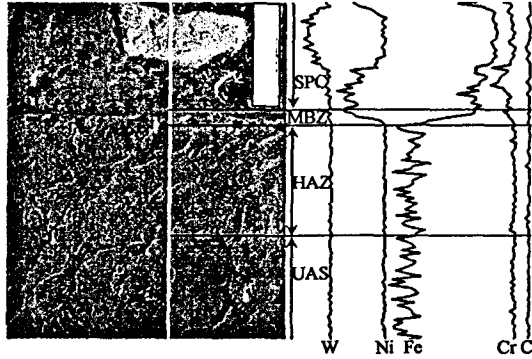


图 2 Ni6025WC 喷焊层的元素线分布  
Fig.2 Element line distribution of the Ni6025WC coating

从图 2 可以看出,喷焊层与基材的界面处发生了一定的互扩散现象,即基材中的 Fe 元素向喷焊层扩散,而喷焊层中的 Ni、Cr 和 W 等元素向基材扩散.试样的横截面组织主要由 4 部分组成,即喷焊层 (SPC)、冶金结合区 (MBZ)、存在大量的珠光体组织的热影响区 (HAZ) 和以及未受影响的主要以铁素体为主典型的低碳钢组织低碳钢基体 (UAS).喷焊重熔使涂层与基材之间形成了冶金结合,互扩散的结果不仅使界面处形成了冶金结合,而且还出现了组织为珠光体的热影响区,降低了界面两侧材料在性能上的差异,大大提高了喷焊层与基材的结合强度.另外,从元素的线分布特征还可以看出,喷焊层中大块带棱角的多边形颗粒确实是未熔的 WC 颗粒.

采用 X 射线衍射仪和透射电镜对复合喷焊层进行相结构和微观形貌的分析,结果如图 3 和图 4 所示.结合文献 [6-9] 可知:镍基自熔性合金与 Ni/WC 的混合粉末经火焰喷焊后,形成了以  $\gamma$ -Ni 固溶体为基体,以 WC 颗粒为增强相的复合喷焊层,而且涂层中还弥散分布着大量细小的硬质点,如  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Ni}_3\text{B}$  等.

### 2.2 显微硬度

镀铬层和 Q235 钢的平均显微硬度分别为  $\text{HV}_{0.1}890$  和  $\text{HV}_{0.1}132$ . WC 增强的镍基合金喷焊层不同区域的显微硬度的值也不同,白亮的 WC、枝晶状组织和结合界面附近的涂层平均显微硬度值分别为  $\text{HV}_{0.1}1735.2$ ,  $\text{HV}_{0.1}942.3$  和  $\text{HV}_{0.1}809.7$ . 可见

喷焊层中的平均显微硬度值最高,镀铬层次之, Q235 钢最低.

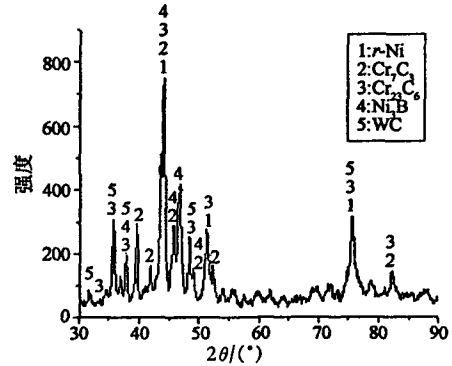


图 3 Ni6025WC 喷焊层的 X 射线衍射图谱  
Fig.3 X-ray diffraction pattern of Ni6025WC coating



图 4 Ni6025WC 喷焊层的 TEM 图像  
Fig.4 TEM image of Ni6025WC coating

### 2.3 磨粒磨损性能分析

图 5 为 Ni6025WC 喷焊层,镀铬层和 Q235 基体经过 10 000 r 后的累计磨损失重.

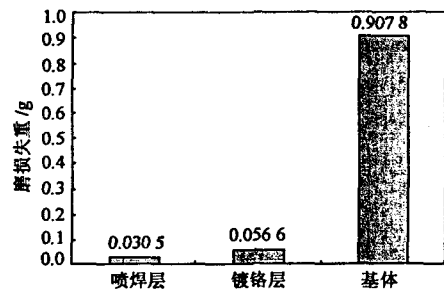


图 5 喷焊层和镀铬层以及 Q235 基体的累计磨损失重  
Fig.5 The cumulative wear mass loss of the spray-welding coating in comparison with the hard chrome plating and Q235 steel

由图 5 可见, Ni6025WC 喷焊层的抗磨粒磨损性能最好,镀铬层和 Q235 钢的磨损失重分别为喷焊层的 1.86 倍和 29.8 倍.

图 6(a),图 6(b)和图 6(c)分别为镍基喷焊层、镀铬层以及 Q235 磨粒磨损后的表面形貌.

从图 6 的表面磨损形貌可以更直观的看出三者磨损性能的显著差异.图 6(a)中 Ni6025WC 涂层的

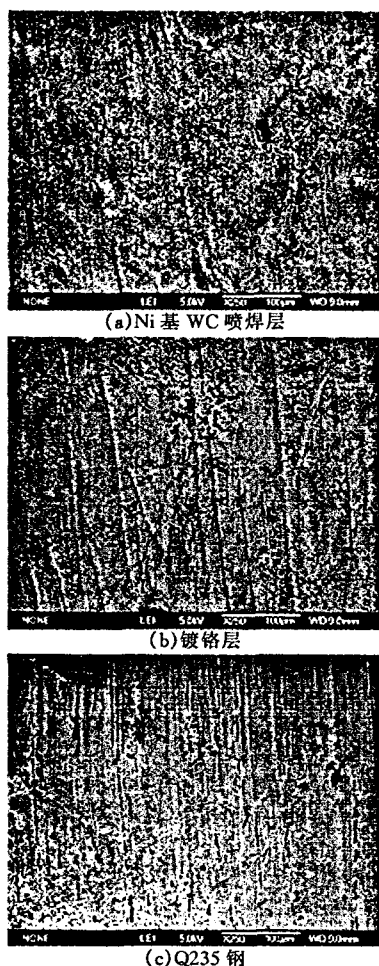


图6 试样磨损后的表面形貌  
Fig.6 The worn surface of samples

磨损划痕浅而窄,并且划痕不连续,图6(b)中镀铬层的磨损划痕较深、宽,且较为连续、平直,图6(c)中20钢的磨损划痕最深,最密且最为平直,呈现出典型的塑性材料的磨损特征。Ni6025WC复合喷焊层中存在着较多WC颗粒和其他碳化物硬质增强颗粒,这些硬质颗粒能有效地阻碍磨粒对喷焊表面的犁削作用,从而提高喷焊层的耐磨性能。而Q235钢的基体的硬度较低,在磨粒磨损的过程中,砂粒在其表面产生严重的犁削作用,从而造成了严重的磨损。对于镀铬层,其磨损形貌介于喷焊层和Q235钢之间,这是因为其硬度高于Q235钢基体,但低于Ni6025WC复合喷焊层的缘故。另外,镀铬层中缺乏相应的硬质粒子来抵御砂粒的犁削作用,从而导致其出现了更类似塑性材料Q235的磨损特征。

结合以上对涂层的组织分析可以看出,涂层磨粒磨损性能与其显微组织密切相关。Ni6025WC喷焊层中,Cr溶解于Ni中,形成了稳定的Ni-Cr固溶体,起到了固溶强化作用,同时合金中的Cr、B和C

在凝固后形成大量弥散分布的硬质点,又对基体起到了弥散强化作用,这样喷焊层基体的强度和硬度得到大大增强,能够有效地阻止磨粒对涂层的犁削作用。即使有一部分磨粒犁削到喷焊层基体,由于WC和其他碳化物硬质颗粒阻碍作用,从而大大地提高了喷焊层的抗磨粒磨损性能。

### 3 结论

WC颗粒增强Ni60复合喷焊层中, $\gamma$ -Ni固溶体的固溶强化作用和大量细小碳化物硬质相的弥散强化作用大大增强了涂层基体的硬度,喷焊层基体上均匀分布的粗颗粒WC有效地阻碍了砂粒的犁削作用,从而使得WC增强的镍基喷焊层具有很好的耐磨粒磨损性能。

### 参考文献

- [1] 黄智文. 谈谈磨粒磨损[J]. 表面技术, 2000, 29(4): 34-36. HUANG Z W. Talk about abrasive wear[J]. Surface Technology, 2000, 29(4): 34-36. (In Chinese)
- [2] 李金桂. 再论现代表面工程[J]. 中国表面工程, 1998, 3: 1-7. LI J G. Rediscussion on modern surface engineering[J]. China Surface Engineering, 1998, 3: 1-7. (In Chinese)
- [3] 顾迅. 现代表面技术的应用[J]. 金属热处理, 1999, 4: 1-6. GU X. Application of modern surface technology[J]. Heat Treatment of Metals, 1999, 4: 1-6. (In Chinese)
- [4] 鲍君峰, 于月光, 刘海, 等. 火焰喷焊Ni基WC复合涂层的性能研究[J]. 矿冶, 2006, 15(4): 47-52. BAO J F, YU Y G, LIU H, et al. Study on properties of flame spray welded Ni-based WC composite coating[J]. Mining Metallurgy, 2006, 15(4): 47-52. (In Chinese)
- [5] 于美杰, 王成国, 孙宏飞, 等. WC增强镍基复合喷焊层的组织与磨粒磨损性能研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(3): 116-127. YU M J, WANG C G, SUN H F, et al. Microstructure and wear performance of WC reinforced Ni-based composite coating[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(3): 116-127. (In Chinese)
- [6] 陈传忠. WC/Ni60A等离子喷涂层的相结构分析[J]. 材料研究学报, 2000, 14(2): 147-152. CHEN C Z. Structure of phases in WC/Ni60A composite coating sprayed by plasma[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2002, 14(2): 147-152. (In Chinese)
- [7] 陈传忠, 边洁, 王佃刚, 等. 熔覆工艺对Ni60A激光熔覆层微观组织的影响[J]. 应用激光, 2001, 21(6): 381-384. CHEN C Z, BIAN J, WANG D G, et al. Effect of cladding technology on microstructure of laser clad Ni60A coating[J]. Applied Laser, 2001, 21(6): 381-384. (In Chinese)
- [8] 李士同, 王成国, 伦宁, 等. Ni60(WC)涂层的显微组织电子探针分析[J]. 电子显微学报, 2002, 21(5): 713-714. LI S T, WANG C G, LU N, et al. The electron probe analysis of microstructure of Ni-based WC coating[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2002, 21(5): 713-714. (In Chinese)
- [9] AMADO J M, TOBAR M J, ALVAREZ J C, et al. Laser cladding of tungsten carbides (Spherotene1) hardfacing alloys for the mining and mineral industry[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5553-5556.
- [10] PRZYBYLOWICZ J, KUSINSKI J. Structure of laser clad tungsten carbide composite coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109: 154-160.
- [11] WU P, ZHOU C Z, TANG X N. Microstructural characterization and wear behaviour of laser clad nickel-based and tungsten carbide composite coatings[J]. Surface and Coating Technology, 2003, 166: 84-88.