

高速电弧喷涂 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层的摩擦学特性研究

王照锋

(河南职业技术学院, 郑州 450046)

摘要: 目的 研究高速电弧喷涂 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层的组织结构和摩擦学特性。方法 采用高速电弧喷涂技术在 45[#] 钢基体上制备 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层, 并对其进行滑动摩擦磨损研究, 利用 SEM, EDS 对涂层的形貌、组织成分进行分析, 测定涂层的显微硬度、孔隙率等。结果 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层组织致密, 孔隙率较低, 呈现典型的层状结构。涂层的摩擦系数随着磨损时间的增加而先增大, 再趋于平稳。结论 由于涂层中加入了金刚石硬质相, 涂层具有较高的显微硬度和优异的耐摩擦磨损性能。

关键词: 高速电弧喷涂; 复合涂层; 摩擦学特性

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)04-0078-04

Tribological Properties of FeCrNi/Ni Coated Diamond Composite Coating Prepared by High-velocity Arc Spraying

WANG Zhao-feng

(Henan Vocational Technical College, Zhengzhou 450046, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the structure and tribological properties of the FeCrNi/ Ni coated diamond composite coating by high-velocity arc sprayed. **Methods** FeCrNi/Ni coated diamond composite coating was prepared on 45[#] steel substrates by high-velocity arc sprayed. MMW-1A wear-test machine was used to analyze the tribological properties of the composite coating. Morphology, composition and cross-section microstructure of the coatings were analyzed by the means of scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectrometry (EDS). The microhardness and porosity of coatings were also tested. **Results** This research indicated that the FeCrNi/Ni coated diamond composite coatings had typical layer structure characteristics and lower porosity. With the increase of sliding time, the friction coefficient of the coatings first increased and then tended to be stable. **Conclusion** The coating had high microhardness and excellent wear resistance because of the addition of ultrahard diamond.

KEY WORDS: high-velocity arc spraying; composite coating; tribological characteristics

高速电弧喷涂技术 (HVAS) 是一种新型的热喷涂技术^[1], 它通过电源加热, 利用高速气流将熔融的金属吹成细小颗粒喷涂到基体表面上, 从而得到性能

优于基体的涂层^[2-3], 以提高基体的耐磨耐蚀性能, 从而减少因磨损而导致零件失效所造成的损失^[4-5]。目前, 国内外学者^[6-9]进行了大量研究, 田浩亮等^[10]

收稿日期: 2014-04-21; 修订日期: 2014-05-04

Received: 2014-04-21; Revised: 2014-05-04

作者简介: 王照锋 (1979—), 男, 河南信阳人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为机械工程表面技术。

Biography: WANG Zhao-feng (1979—), Male, from Xinyang, Henan, Master, Lecturer, Research focus: surface engineering.

研究了电弧喷涂 FeCrAl/Ni95Al 复合涂层的性能,刘荣祥等^[11]研究了电弧喷涂 Ti6Al4V 涂层的性能,徐维普等^[12]研究了高速电弧喷涂 FeAlCr/Ni 包 Cr₃C₂ 复合涂层的性能,但对含有金刚石硬质相的涂层研究较少。金刚石是世界上最硬的物质,它的绝对硬度是刚玉的 4 倍、石英的 8 倍^[13],在复合涂层中加入金刚石硬质相可以提高涂层的硬度及耐磨性能。

笔者利用超声波辅助化学镀工艺^[14]在金刚石表面包覆了一层金属镍,将其作为硬质相添加到粉芯丝材中,利用高速电弧喷涂技术制备 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层,分析了涂层的显微组织和相成分,并对涂层耐磨损性能进行了初步探讨。

1 实验

1.1 复合涂层的制备及摩擦磨损试验

将 10 mm×0.4 mm 的 SPCC 冷轧钢带弯曲成 U 型断面,将配好的粉末加入到 U 型槽中后,利用成形辊进行封闭并压紧丝材。通过拔丝模进行逐级拉拔减径,制成 $\phi=2.5$ mm 的粉芯丝材。药芯粉末中各成分组成为: Ni 包覆金刚石粉体 40% ~ 55% (质量分数,下同),金属镍 15% ~ 25%,金属铬 20% ~ 30%,稀土元素少量。

采用 ZPG-400A 型电源和 QD III-250 型高速电弧喷涂枪进行喷涂。工艺参数为:喷涂电压 34 V,喷涂距离 250 mm,喷涂电流 200 A,空气压力 0.6 MPa^[15]。采用 $\phi 31.5$ mm×7 mm 的 45# 钢作为基体试样,表面进行喷砂粗化处理。喷涂后对涂层表面进行研磨加工,最终试样尺寸为 $\phi 32$ mm×7 mm,涂层表面粗糙度 $Ra=0.46$ μ m,涂层厚度约为 0.5 mm。

在大气室温环境下,进行复合涂层的摩擦磨损试验。上试样采用 $\phi 6$ mm 的 GCr15 钢球,平均硬度为 980HV,主轴转速分别为 120,240,480 r/min,回转直径为 23.87 mm,载荷为 100 N,加载时间为 60 min,滑动磨损距离为 540 m。实验前后,所有试样均要在丙酮中超声清洗 15 min。实验后用精度为 0.1 mg 的天平称取涂层的磨损质量损失,取 3 次实验的平均值。

1.2 涂层组织形貌及性能测试

利用对偶试样拉伸法测量涂层的结合强度。试样前处理后,测量涂层的孔隙率和硬度,用 SEM 分析涂层的组织结构及各元素的分布情况。

2 结果与分析

2.1 复合涂层的组织与性能

图 1 是高速电弧喷涂 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层的组织形貌 SEM 照片。复合涂层组织致密,呈现出典型的层状结构,涂层中随机分布着微凸起颗粒,见图 1 中 A 点。对 A 点进行能谱分析,可得该点的 EDS 图谱,如图 2 所示。分析可知,A 点主要元素为 C,即该点为金刚石颗粒,对该点周围进行面分析可知,周围元素主要为 C, Ni, Fe, Cr。可见在电弧喷涂过程中,金刚石颗粒并没有熔化,熔化的是金刚石表面包覆的金属 Ni,在高速气流的作用下,熔化的金属 Ni 和被作为“核心”保护起来的金刚石一起撞击到基体上,与基体机械结合,形成致密的涂层。

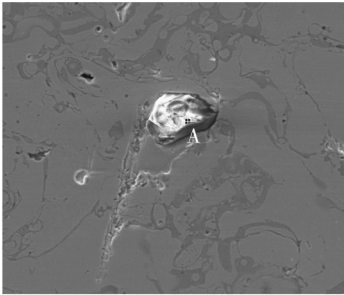


图 1 涂层 SEM 照片
Fig. 1 SEM image of the coating

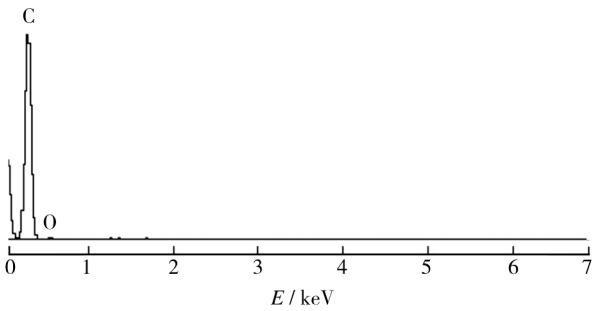


图 2 涂层 A 点的 EDS 谱
Fig. 2 EDS spectrum of the coating

表 1 为 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层的结合强度、孔隙率及显微硬度值,可以看出,涂层的结合强度较高,孔隙率较低,显微硬度较高。这是由于在粉芯丝材中加入 Cr 后可以有效地提高涂层的室温塑性^[16],同时由于涂层中随机分布着金刚石颗粒,提高了复合涂层的显微硬度。

表 1 复合涂层的性能
Tab.1 Properties of the composite coating

涂层	结合强度/MPa	孔隙率/%	显微硬度(HV)
FeCrNi/Ni 包 覆金刚石	32.5	2.46	875

2.2 涂层的摩擦磨损性能

图 3 为高速电弧喷涂 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层在主轴转速为 120 r/min 时的摩擦系数与磨损时间的关系曲线。复合涂层的磨损过程分为 3 个阶段：在 0~5 min,涂层的摩擦系数随磨损时间延长而迅速增大;在 5~8 min,涂层的摩擦系数随磨损时间延长而减小;在 8 min 以后,涂层的摩擦系数基本保持在 0.62。综合分析,该复合涂层中随机分布着金刚石硬质颗粒,硬度高于 GCr15 钢球,在摩擦磨损过程中,GCr15 钢球硬微凸体的犁削作用被有效抵抗,摩擦阻力随之增大,因而复合涂层的摩擦系数较高。

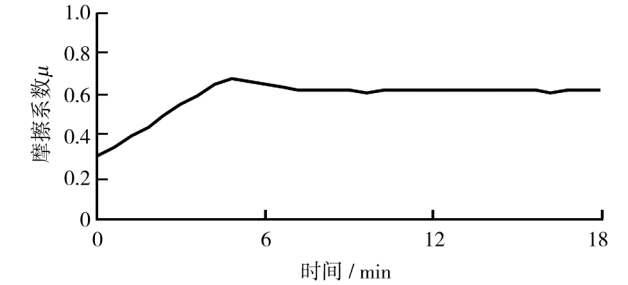


图 3 涂层的摩擦系数与磨损时间的关系
Fig.3 Relationship between friction coefficient of coating and wear time

图 4 为涂层的摩擦系数随转速的变化关系曲线。当主轴转速由 120 r/min 增加到 240 r/min 时,涂层的摩擦系数有微弱增加;当主轴转速由 240 r/min 增加到 480 r/min 时,涂层的摩擦系数显著增加。这是由于随着主轴转速的增加,滑动摩擦速度也随之增加,相应地增加了摩擦表面的温度,当转速为 120~240 r/min 时,摩擦表面温度变化较小,对涂层的摩擦系数影响不大;当主轴转速为 480 r/min 时,摩擦表面的温度升高明显,从而有利于摩擦表面间的材料发生粘着,涂层的摩擦系数显著增大。

当载荷为 100 N,主轴转速为 120 r/min 时,涂层的磨损累积质量损失随磨损时间的变化关系曲线如图 5 所示。复合涂层的磨损累积质量损失上升趋势随着磨损时间的增加而变缓。这是由于磨损初期的

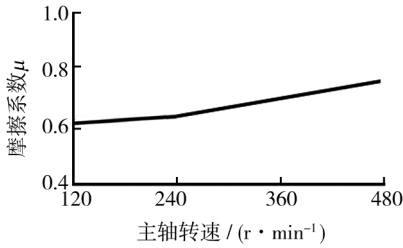


图 4 涂层的摩擦系数与主轴转速的关系
Fig.4 Relationship between friction coefficient of coating and spindle speed

涂层表面上存在一些微凸体,随着磨损时间的增加,这些微凸体被磨平,硬度较高的金刚石硬质相显露出来,有效地抵抗了 GCr15 钢球的犁削作用,而金刚石硬质相与基体结合牢固,很难从涂层中剥离出来,从而使涂层具有优异的耐磨性能。

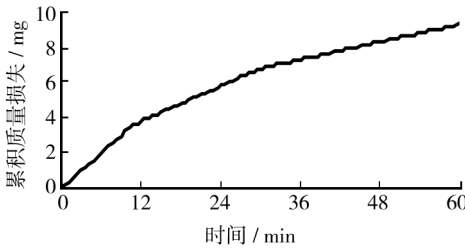


图 5 涂层的累积质量损失与磨损时间的关系
Fig.5 Relationship between mass loss of coating and wear time

3 结论

- 1) 高速电弧喷涂粉芯丝材 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层结合强度高,组织致密,显微硬度高。其摩擦系数随磨损时间的增加先增大后减小,最后趋于稳定值。
- 2) 高速电弧喷涂 FeCrNi/Ni 包覆金刚石复合涂层中的金刚石硬质相能有效地抵抗 GCr15 钢球的摩擦,使得涂层具有优异的耐磨损性能。

参考文献

[1] 董晓焕,张振云,李琼伟,等. 工艺参数对高速电弧喷涂 Al/1Cr13 复合涂层组织结构的影响[J]. 中国表面工程, 2012,25(1):65—70.
DONG Xiao-huan, ZHANG Zhen-yun, LI Qiong-wei, et al. Effects of Spray Parameters on Microstructure of High Velocity Arc Sprayed Al/1Cr13 Composite Coatings[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(1): 65—70.

- [2] 王刚,焦孟旺,李贺,等. 热喷涂技术在发动机减摩性能方面的应用和研究[J]. 表面技术,2014,43(1):103—105.
- WANG Gang, JIAO Meng-wang, LI He, et al. Application and Research of New Thermal Spraying Technology in Engine Friction-reduction Performance[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 103—105.
- [3] LIU Gui-min, ROZNIATOWSKI K J. Quantitative Characteristics of FeCrAl Films Deposited by Arc and High-velocity Arc Spraying [J]. Materials Characterization, 2001, 46(2/3): 99—104.
- [4] KAVIAN C, GOSSETT O, VERNON B, et al. Optimization of the Electric Wire Arc-spraying Process for Improved Wear Resistance of Sugar Mill Roller Shells [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(1): 185—188.
- [5] 黄林兵,余圣甫,邓宇,等. 电弧喷涂 4Cr13 涂层预处理工艺及组织与性能研究[J]. 表面技术,2010,39(6): 26—28.
- HUANG Lin-bin, YU Sheng-fu, DENG Yu, et al. Study on Pretreatment Process and Microstructure and Properties of 4Cr13 Arc Spraying Coatings [J]. Surface Technology, 2010, 39(6): 26—28.
- [6] 彭怡刚,吴玉锋. AZ31 表面电弧喷涂 Al-FeAl 复合涂层的研究[J]. 热加工工艺,2103,42(18): 112—115.
- PENG Yi-gang, WU Yu-feng. Research on Al-FeAl Composite Coating on AZ31 Surface Prepared by Arc Spray [J]. Hot Working Technology, 2010, 39(6): 26—28.
- [7] 欧献,邓畅光,王日初,等. 超音速等离子喷涂工艺参数对 Cr_2O_3 涂层硬度的影响[J]. 表面技术,2014,43(1): 81—83.
- OU Xian, DENG Chang-guang, WANG Ri-chu, et al. Influences of the Supersonic Plasma Spraying Process on the Hardness Properties of Cr_2O_3 Coating [J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 81—83.
- [8] 徐润生,徐滨士,徐维普. 增强相对高速电弧喷涂铁铝复合涂层摩擦学特性的影响[J]. 机械工程材料,2006,30(1): 16—19.
- XU Run-sheng, XU Bin-shi, XU Wei-pu. Effects of Additive Compounds on Tribological Properties of High Velocity Arc Sprayed Iron Aluminum Coatings [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(1): 16—19.
- [9] 齐凤莲,赵民,孙志礼. 等离子热喷涂金刚石涂层的摩擦磨损性能研究[J]. 润滑与密封,2008,33(2): 40—42.
- QI Feng-lian, ZHAO Min, SUN Zhi-li. The Study on Friction and Wear Performance of the Plasma Thermal Spraying Diamond Coating [J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(2): 40—42.
- [10] 田浩亮,魏世丞,陈永雄,等. 高速电弧喷涂 FeCrAl/Ni95Al 复合涂层的性能[J]. 金属热处理,2013,38(4): 92—96.
- TIAN Hao-liang, WEI Shi-cheng, CHEN Yong-xiong, et al. Properties of FeCrAl/Ni95Al Coating by High Velocity Arc Spraying [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(4): 92—96.
- [11] 刘荣祥,周立文,杨玉杰,等. 电弧喷涂 Ti6Al4V 涂层的组织与耐蚀性能研究[J]. 表面技术,2011,40(1): 14—16.
- LIU Rong-xiang, ZHOU Li-wen, YANG Yu-jie, et al. Study on Microstructure and Corrosion Resistance of the Ti6Al4V Coating by Velocity Arc Spray [J]. Surface Technology, 2011, 40(1): 14—16.
- [12] 徐维普,徐滨士,张伟,等. 高速电弧喷涂 FeAlCr/Ni 包覆 Cr_3C_2 复合涂层摩擦学特性[J]. 中国有色金属学报,2004,14(10): 1671—1675.
- XU Wei-pu, XU Bin-shi, ZHANG Wei, et al. Tribological Properties of High Velocity Arc Sprayed FeAlCr/Ni Wrapped Cr_3C_2 Coatings [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10): 1671—1675.
- [13] 关长斌,孙丽君. 化学镀铜对金刚石性能的影响[J]. 表面技术,1995,24(5): 12—14.
- GUAN Chang-bin, SUN Li-jun. The Effect of Electroless Plated Cu on Properties of Diamond [J]. Surface Technology, 1995, 24(5): 12—14.
- [14] 高叔轩,刘贵昌,张茹芝,等. 超声波化学镀的研究进展[J]. 表面技术,2004,33(2): 1—3.
- GAO Shu-xuan, LIU Gui-chang, ZHANG Ru-zhi, et al. Development of Electroless Plating in Ultrasonic Field [J]. Surface Technology, 2004, 33(2): 1—3.
- [15] 王照锋,卢红梅. 高速电弧喷涂 FeCrNi/CBN 复合涂层的组织与性能[J]. 材料保护,2007,40(5): 37—39.
- WANG Zhao-feng, LU Hong-mei. Microstructure and Properties of High Velocity arc Spraying FeCrNi/CBN Coatings [J]. Materials Protection, 2007, 40(5): 37—39.
- [16] 王照锋,彭伟. 高速电弧喷涂 FeCrNi/WC 粉芯丝材的研制与性能研究[J]. 表面技术,2006,35(5): 16—17.
- WANG Zhao-feng, PENG Wei. Development and Properties Research of High Speed Arc Spraying FeCrNi/WC Cored Wire [J]. Surface Technology, 2006, 35(5): 16—17.