

超音速火焰喷涂 WC-CrNi 涂层的滑动磨损特性研究

朱振¹, 张宏², 张箭², 马瑞永², 沈承金¹

(1. 中国矿业大学 材料科学与工程学院, 徐州 221008;

2. 徐州工程集团挖掘机械有限公司, 徐州 221004)

[摘要] 采用超音速火焰喷涂技术制备 WC-CrNi 涂层,研究了自配副磨损和三体磨损条件下,涂层的滑动磨损性能,并分析了涂层磨损前后的形貌及成分变化。结果表明:WC-CrNi 涂层组织致密、结构均匀;两种磨损条件下,涂层的摩擦系数相差较大,三体磨损时,涂层损伤严重,由于配副接触面间第三体存在增加了摩擦阻力,使得摩擦系数稳定性变差;涂层在两种磨损条件下的磨损机制有所不同,自配副时的磨损机制为 WC 层状剥离,三体磨损下则以微切削并伴随塑性变形为主。

[关键词] 超音速火焰喷涂; 碳化钨; 滑动磨损; 磨损机制

[中图分类号] TG174.453

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2012)03-0012-04

Study on Sliding Wear Characteristic of HVOF Sprayed WC-CrNi Composite Coatings

ZHU Zhen¹, ZHANG Hong², ZHANG Jian², MA Rui-yong², SHEN Cheng-jin¹

(1. School of Material Science and Engineering, China University of Mining & Technology,

Xuzhou 221008, China; 2. XCMG Excavator Machinery Limited Company, Xuzhou 221004, China)

[Abstract] WC-CrNi coating was deposited by HVOF technique. The sliding wear resistance of coating was investigated under self-matching friction couple and three body wear conditions, the morphology and composition change before and after wear were analyzed. The results showed that WC-CrNi coating had more homogeneous, dense microstructure owing to HVOF technique. WC-CrNi coating exhibited great differences in friction coefficients under two wear conditions. Friction coefficient of coating was not stable, owing to the formation of three body wear increasing frictional resistance, and it experienced a severer worn. The wear mechanism of the coating under both wear conditions was different. The wear mechanism was WC layered peel under self-matching friction couple, the main abrasion model after three body wear were micro-cutting and plastic deformation.

[Key words] high velocity oxy-fuel spraying; WC-CrNi; sliding wear; wear mechanism

工程机械需具备高的可靠性,因而人们对材料的耐磨性能提出了更高的要求。具有“硬质点+软基体”典型结构的 WC 金属陶瓷涂层,被广泛应用于航空航天、化工、冶金、机械等行业^[1-2]。WC 在 540 ℃时仍然硬度高且耐磨性好,以 Co, Ni 等作为粘结相的 WC 涂层,WC 与 Ni 相互润湿,结合强度较好,涂层硬度高,特别适用于提高工程机械零部件的耐磨粒磨损和耐冲刷磨损等性能^[2-5],在耐磨要求较苛刻的场合可获得满意的效果^[6]。

近年来,表面堆焊、表面感应熔覆、激光熔覆及等离子喷焊等表面改性方法在国内外引起了广泛关

注^[5,7-11]。相比而言,采用超音速火焰喷涂(HVOF),不仅制得的涂层组织致密,少氧化,综合性能好,而且喷涂 WC-Co, NiCr-Cr₂C₃ 等材料时,合金元素氧化和热分解少^[12-13]。

文中采用 HVOF 工艺制备 WC-CrNi 涂层,研究其在自配副和三体磨粒磨损条件下的磨损性能,并探讨摩擦学行为和磨损机制。

1 实验材料与方法

基材选用 35 钢,试样分环状 $\phi 40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 和

[收稿日期] 2011-12-23; **[收稿日期]** 2012-02-29

[作者简介] 朱振(1987—),男,安徽阜阳人,硕士生,主攻材料表面工程。

[通信作者] 沈承金(1964—),男,安徽合肥人,博士,教授,主要研究方向为材料表面工程。

块状 20 mm×10 mm×10 mm 两种。利用 XY-3200 型超音速火焰喷涂系统制备 WC-CrNi 涂层。喷涂粉末为北京矿冶研究总院提供的复合包覆型粉末,粒度—25~45 μm。喷涂时,以航空煤油作为液体燃料,氧气为助燃气,氮气为保护气体,喷涂距离 350 mm。喷涂采用优化的工艺参数,见表 1。

表 1 超音速火焰喷涂工艺参数

Tab.1 HVOF process parameters

煤油压力 /MPa	氧气压力 /MPa	载气压力 /MPa	煤油流量 /(L·h ⁻¹)
1.4	0.8	1.7	21
氧气流量 /(m ³ ·h ⁻¹)	载气流量 /(m ³ ·h ⁻¹)	送粉气压力 /MPa	送粉量 /(kg·h ⁻¹)
40	1.4	0.45	1.1

WC 涂层滑动磨损实验在 M-2000 磨损试验机上进行,如图 1 所示,通过施加法向载荷使环试样与块试样形成环-块接触方式。实验载荷 300 N,转速为 200 r/min,磨损时间 3 h,磨损半径为 20 mm。对磨的环、块试样为同质 WC 涂层,分别考察涂层干摩擦及石英砂参与的三体磨损性能,涂层用 800# 砂纸抛光至表面粗糙度 Ra=3.2 μm。其中,三体磨损时,选用粒度为 36 目的石英砂,硬度 1000HV0.3,通过外接沙漏引入摩擦副间。摩擦系数 μ 计算公式如下:

$$\mu=\frac{M}{r \cdot F}$$

式中:M 为摩擦力矩,kg/cm;F 为法向载荷,kg;r 为下环试样半径,cm。

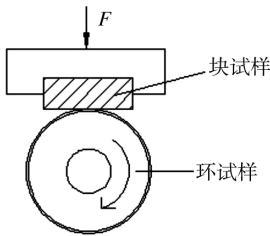


图 1 摩擦磨损模型

Fig.1 Schematic diagram of friction model

采用 Philips-XL30 型环境扫描电镜(ESEM)观察涂层结构及表面磨损形貌,用荧光能谱分析仪(EDAX)分析磨损表面的成分变化,用 Rigaku D/max-rA 转靶多晶体 X 射线衍射仪分析涂层物相组成。用磁选法收集磨损实验过程中的磨屑,经过退磁后,均匀撒在导电胶带上,以观察磨屑形貌。

2 结果与讨论

2.1 WC-CrNi 涂层组织和结构

图 2 给出了 WC-CrNi 涂层表面与截面的 SEM 照

片,可见陶瓷相和粘结相在复合涂层中分布均匀,没有明显的裂纹和喷涂缺陷。从截面形貌观察,涂层还具有热喷涂涂层的空洞、缝隙和部分未熔化及半熔化颗粒等典型结构^[5],这是熔化或半熔化态颗粒撞击基体并相互堆积形成的。超音速喷涂过程中,高的粒子速率使粉末冲击表面,形成低空隙率、高致密度的涂层,涂层与涂层之间形成交错堆叠结构。

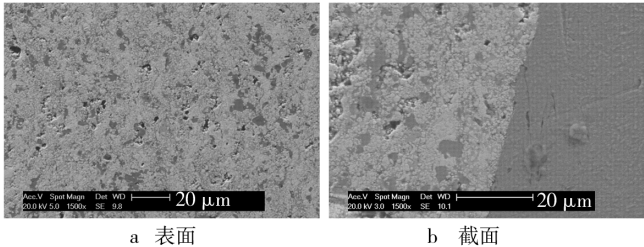


图 2 WC-CrNi 涂层的 SEM 照片

Fig.2 SEM micrographs of WC-CrNi coating

图 3 示出了 WC-CrNi 粉末及其相应涂层的 XRD 图谱。可以看出,喂料粉末由金属粘结相 Ni 和陶瓷相 WC,Cr₂C₃ 组成,而经超音速火焰喷涂形成涂层后,涂层中还含有少量 W₂C。这是由于超音速火焰喷涂的高温过程中,WC 陶瓷相发生分解所致。有学者研究还发现^[3-4],超音速火焰喷涂中,除由于高温分解产生 W₂C 相外,还形成了少量粘结相和 WC 的复合相。

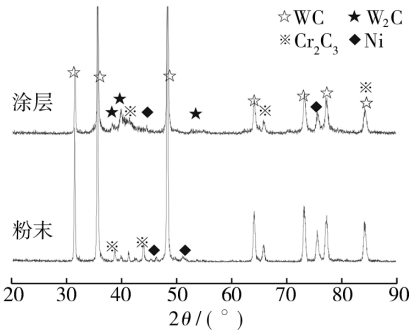


图 3 WC-CrNi 喂料粉末及涂层的 XRD 谱

Fig.3 XRD patterns of WC-CrNi powder and as-sprayed coating

2.2 WC-CrNi 涂层摩擦学性能

摩擦磨损是两个接触表面相互作用,而引起滑动阻力和能耗的过程。摩擦磨损过程中,各种因素的相互关系极其复杂,伴随着表面层机械、组织结构和物理化学性能的变化^[13]。图 4 给出了超音速火焰喷涂 WC-CrNi 涂层在自配副和石英砂三体摩擦磨损条件下,摩擦系数随滑动时间的变化曲线。可以观察到:自配副时,涂层稳定摩擦系数是 0.54,三体磨损下的摩擦系数在 0.36 左右,与自配副相比有很大变化。相比而言,三体磨损下,石英砂在摩擦副之间形成第三体,增加了摩擦阻力,使得摩擦系数稳定性变差。另外,滑

动磨损过程中,石英砂作为第三体存在,与摩擦副形成不连续接触,也影响了接触面的平整度。

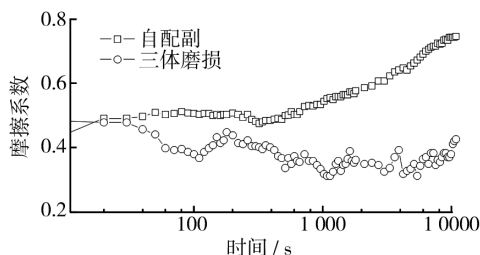


图4 WC-CrNi涂层自配副及三体磨损的摩擦系数
Fig. 4 Friction coefficient of the WC-CrNi coating of self-matching friction couple and three body wear

2.3 WC-CrNi 涂层磨损机制探讨

2.3.1 涂层磨损形貌分析

图5a为自配副条件下,WC-CrNi涂层磨损表面的SEM照片,可见配副界面存在因较多颗粒脱落形成的疲劳剥离坑,挤压变形不明显。如图5a的高倍图所示,涂层中存在硬质相崩塌、破碎的痕迹,磨损形貌存在明显不同的两个部分:中心A处呈不连续、较松散的颗粒分布;B区域与原始涂层之间发现长裂纹,即硬质相与粘结相的锚固作用下降,在垂直于磨损方向上产生裂纹。磨屑形貌如图5b所示,磨屑主要以较光滑薄片状存在,证实涂层损伤以剥离为主。

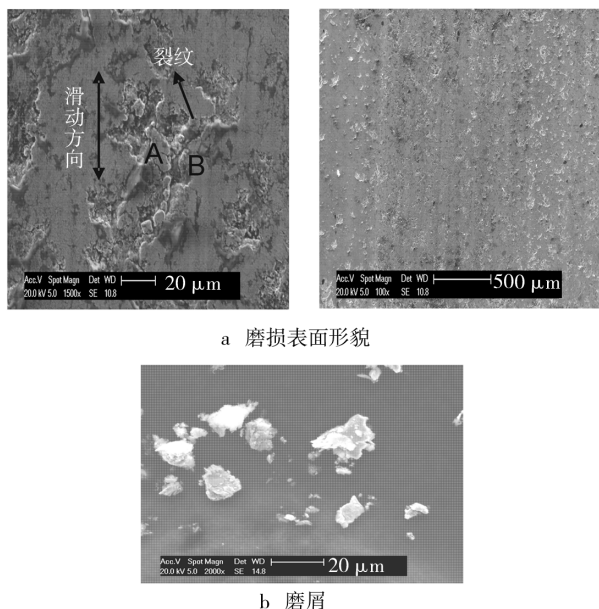


图5 WC-CrNi涂层自配副时的磨损形貌
Fig. 5 Worn morphology of the WC-CrNi coating of self-matching friction couple

温诗铸等^[13]总结了磨粒磨损机理,认为三体磨损时,磨料会在载荷作用下压入摩擦表面而产生压痕,挤压形成层片状剥离。图6所示为在三体磨损条件下,WC-CrNi涂层的磨损表面形貌。图6中可以观察到深浅不等、宽窄不一的犁沟痕,划痕周围分布着挤压痕

及塑性变形沟槽(A区域)。对比自配副磨损表面,三体磨损时,涂层损伤更严重,以第三体石英砂导致的犁切变形为主。这主要是因为涂层中硬度低于石英砂的粘结相先磨损,产生轻微塑性切削,而塑性沟槽则是由于接触面间捕捉到第三体磨粒,接触应力急剧增大,以致涂层表面发生强烈塑性变形。

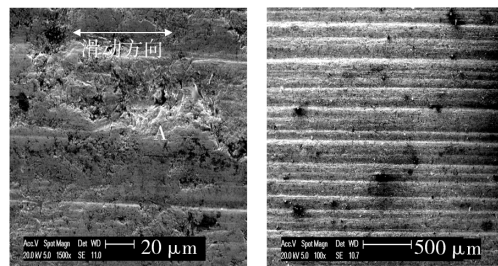


图6 WC-CrNi涂层三体磨损下的磨损形貌
Fig. 6 Worn morphology of the WC-CrNi coating after three body wear

2.3.2 涂层表面与磨痕成分分析

对涂层表面及磨损后的磨痕进行EDAX分析,结果如图7所示。通过对比碳化物与粘结相(包括Ni)中元素的含量,发现自配副条件下元素的相对含量比值(2.592)与磨损前的涂层(4.522)相比,有明显下降,说明碳化物去除幅度大于粘结相。

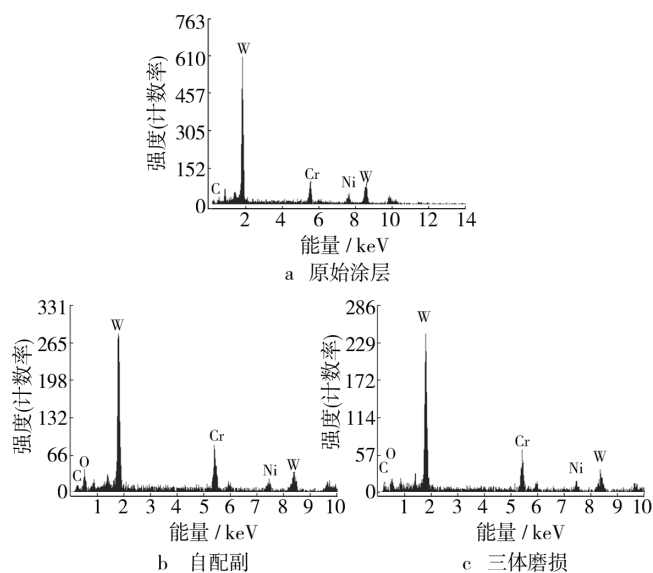


图7 WC-CrNi涂层表面与磨痕的EDAX图谱
Fig. 7 EDAX analysis spectra of WC-CrNi coating surface and its wear scar

摩擦表面相互接触,常以粗糙峰形式配副,法向载荷作用下,粗糙峰彼此嵌入而形成很高的接触应力和塑性变形。涂层自配副时的微凸峰较多,以硬质相接触作用为主,粘结相减少不明显,与图5中磨损形貌所表现的以WC剥离为主的理论相吻合,同时,由于WC剥离,使得W含量大幅减少。而三体磨损后,元素相对含量比值(4.04)与自配副磨损时相比,粘结相减少

明显,有效证实了涂层磨损以粘结相的移除为主。

2.3.3 涂层磨损机制探讨

结合磨损形貌和 EDAX 成分分析,对 WC-CrNi 涂层在两种磨损条件下的磨损机制进行初步探讨。自配副条件下,WC-CrNi 涂层的磨损机理以 WC 剥离为主,其磨损模型见图 8b。首先,在法向载荷和表面切向力形成的交变剪切应力作用下,WC-CrNi 涂层发生塑性变形,粘结相与 WC 由于塑性差异,变形不同步,在两者相界面萌生疲劳裂纹(见图 5);之后经过剪切应力的反复作用,涂层表层塑性变形严重,直至变硬、变脆,疲劳裂纹萌生并逐渐扩展,导致粘结基体相的模量和机械强度不足,造成涂层硬质相 WC 的剥离。

三体磨损条件下,WC-CrNi 涂层的磨损机理以磨粒磨损为主,粘结相在硬磨粒作用下产生较大的塑性变形,见图 8c。涂层表面以塑性变形的磨损方式磨损,多次塑性变形(微观压入)作用产生明显的挤压痕。第三体磨粒硬度高于粘结相,形成切削磨痕,不断捕捉到新的磨粒,反复作用之下,犁沟两侧呈皱状隆起,产生较大塑性变形。

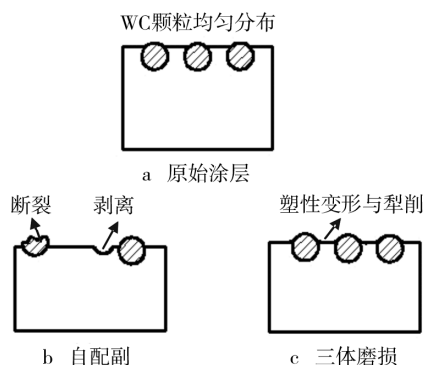


图 8 WC-CrNi 涂层磨损机制模型

Fig. 8 Wear model of the WC-CrNi coating

3 结论

1) 由陶瓷相 WC, Cr_2C_3 和粘结相 Ni 组成的 WC-CrNi 喂料粉末,经超音速火焰喷涂后,形成以 WC 为主,兼含 W_2C 相和金属粘结相的金属陶瓷涂层。

2) 在自配副和三体摩擦磨损条件下,WC-CrNi 涂层摩擦系数相差较大。三体磨损条件下,涂层损伤严重,由于配副接触面间第三体的存在增加了摩擦阻力,使得摩擦系数稳定性变差。

3) 通过磨损表面形貌和成分分析,发现在两种磨损条件下,WC-CrNi 涂层的磨损机制不同:自配副时,以 WC 剥离为主要磨损机制,剥离坑周围分布细微疲劳裂纹;三体磨损条件下,磨损机制为微切削伴随塑性变形。

[参 考 文 献]

- [1] 贺定勇,傅斌友,蒋建敏,等. 含 WC 陶瓷相电弧喷涂层耐磨粒磨损性能的研究[J]. 摩擦学学报,2007,37(2):116-119.
- [2] 简中华,马壮,曹素红,等. 超音速火焰喷涂 WC-Co 与 NiCr-Cr₂C₃ 涂层磨损性能研究[J]. 材料工程,2007(7):21-24.
- [3] AW P K, TAN B H. Study of Microstructure, Phase and Micro Hardness Distribution of HVOF Sprayed Multimodal Structured and Conventional WC-17Co Coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1/2/3):305-311.
- [4] SIDHU H S, SIDHU B S, PRAKASH S. Mechanical and Microstructure Properties of HVOF Sprayed WC-Co and Cr₃C₂-NiCr Coatings on the Boiler Tube Steels Using LPG as the Fuel Gas[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(1):77-82.
- [5] MACHIOA C N, AKDOGANA G, WITCOMBB M J, et al. Performance of WC-VC-Co Thermal Spray Coatings in Abrasion and Slurry Erosion Tests[J]. Wear, 2005, 258: 434-442.
- [6] 陈志刚,朱小蓉,汤小丽,等. 火焰喷涂重熔 Ni 基 WC 复合涂层的耐磨性能试验研究[J]. 物理学报,2007,56(12):7321-7328.
- [7] 屈金山,张晖,周仲荣. 滑移区内不同堆焊层熔敷金属的微动摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报,2007,27(6):519-523.
- [8] 吕一中,刘俊英,曲敬信. 层流等离子体射流铝合金表面熔覆 SiC_p/Al-Si 涂层的磨损过程[J]. 金属热处理,2005,30(3):31-33.
- [9] CHEN Zhen-da, LIM Leong Chew, QIAN Mingh. Laser Cladding of WC-Ni Composite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 62:321-323.
- [10] 吴萍,周昌炽,唐西南. 激光熔覆镍基合金和 Ni/WC 涂层的磨损特性[J]. 金属学报,2002,38(12):1257-1260.
- [11] 蔡幼庆. 等离子弧喷焊铜基合金的组织 and 耐磨性[J]. 焊接学报,2003,24(2):94-96.
- [12] 李南翔. 超音速火焰喷涂 WC-Co 涂层性能研究[D]. 大连:大连海事大学,2010:7-9.
- [13] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.