

高速钢材料表面激光熔覆 Ni 基 WC 条纹的减摩机理

王燕琳¹, 何源², 洪鑫², 陈斌², 于爱兵²

¹宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

²宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

摘要 利用激光熔覆技术,在 W6Mo5Cr4V2 高速钢(HSS)表面制备了 Ni 基 WC 条纹,分别对 HSS 试件和 Ni 基 WC 熔覆条纹试件进行了摩擦磨损实验,测试了试件的摩擦因数,研究了 Ni 基 WC 条纹 HSS 试件的减摩机理。结果表明,Ni 基 WC 熔覆条纹试件的摩擦因数小于 HSS 试件的,并且随着熔覆条纹间距的减小而减小。Ni 基 WC 熔覆条纹试件中析出的石墨和自身含有的 Ni 金属具有良好的减摩作用;Ni 基 WC 熔覆条纹的减摩机理是软基体与硬相的相互结合。

关键词 激光技术;激光熔覆;高速钢;织构;摩擦

中图分类号 TN249;TG178 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.021403

Friction Reducing Mechanism of High Speed Steel Surface with Ni-Based WC Stripes by Laser Cladding

Wang Yanlin¹, He Yuan², Hong Xing², Chen Bin², Yu Aibing²

¹Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

²Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract Ni-based WC stripes on the W6Mo5Cr4V2 high speed steel (HSS) specimen surfaces are fabricated by the laser cladding technique. The friction and wear tests of HSS specimens and specimens with Ni-based WC cladding stripes are carried out, respectively. The friction coefficients of specimens are measured and the friction reducing mechanism of HSS specimens with Ni-based WC stripes is investigated. The results show that the friction coefficients of specimens with Ni-based WC cladding stripes are lower than those of HSS specimens, and they decrease with the decrease of cladding stripe space. Graphite precipitation and Ni metal self-contained within the specimens with Ni-based WC cladding stripes have a better friction reducing effect, and the friction-reducing mechanism of Ni-based WC cladding stripes is the combination of hard phase with soft substrates.

Key words laser technique; laser cladding; high speed steel; texture; friction

OCIS codes 140.3390; 350.3390

1 引言

激光重熔是改善和提高材料表面性能的主要方法之一^[1]。利用激光重熔在材料表面制备出的网纹、条纹等织构表面具有良好的摩擦学特性^[2-3]。在织构的激光重熔过程中向工件表面添加熔覆材料,可以进一步改善材料表面的摩擦学性能^[4-6]。WC 是一种难熔的金属碳化物,是改善材料耐磨性能的重要成分之一,且 Ni 与 WC 之间具有良好的润湿性^[7],因此,Ni

基 WC 材料主要用于制备有耐磨需求的激光熔覆表面,如激光熔覆 Ni 基 WC 涂层等^[8-10]。

高速钢(HSS)材料主要用于模具、轧辊、锤头、磨球等零件以及麻花钻、成形车刀、齿轮刀具等切削刀具,HSS 材料的磨损会导致零件失效,降低刀具的切削性能。磨损通常发生在材料表面,但通过合理的表面技术可以改善 HSS 材料的摩擦学性能,延长零件和刀具的使用寿命。Senthilkumar 等^[11]通过磨削和电火花方法,在 HSS 表面制备出了具有低

收稿日期:2017-04-21;收到修改稿日期:2017-07-24

基金项目:国家自然科学基金(51175270)

作者简介:王燕琳(1972—),女,博士,副教授,主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: wangyanlin@nbu.edu.cn

磨损量和低摩擦因数的凹坑和条纹织构。

目前,有关 HSS 表面激光熔覆 Ni 基 WC 条纹的摩擦磨损特性的研究工作尚未系统开展。多数研究表明,织构表面或者 Ni 基 WC 涂层有减小磨损量的效果,但有关激光重熔或激光熔覆织构的减摩机理的研究鲜有报道。本文以 W6Cr5Mo4V2 HSS 为研究对象,运用激光熔覆技术在 HSS 表面制备了 Ni 基 WC 熔覆条纹,研究了 HSS 试件表面激光熔覆 Ni 基 WC 条纹的减摩机理。

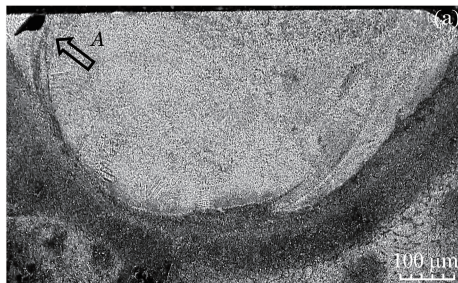
2 材料与方法

2.1 实验材料

选择 W6Mo5Cr4V2 板材作为实验材料。熔覆粉末由 Ni 基自熔性合金粉末 T-Ni25A 和 WC 粉末混合而成,采用雾化制粉法制备,质量分数为 99.9%;T-Ni25A 粉末和 WC 粉末的质量分数分别为 65% 和 35%。Ni 基 WC 粉末颗粒的尺寸为 10~45 μm 。对比实验选用的纯 Ni 粉末颗粒的尺寸为 5~10 μm 。

2.2 试件制备

试件制备的主要流程为:首先,将 HSS 板材通过线切割方式加工成 35 mm×25 mm×4 mm 的矩形试件,并在平面磨床上将试件两面磨平。采用粘结法将厚度为 1 mm 的 Ni 基 WC 粉末预置在 HSS 试件表面,粘接剂是体积分数为 65% 的乙醇溶液。采用深圳大族激光公司生产的 YAG-W200B 型激光焊接机在 HSS 试件表面制备出三种条纹间距的 Ni 基 WC 熔覆条纹,条纹宽度为 1 mm,条纹间距分别为 2,2.5,3 mm。激光熔覆工艺参数为:电流 50 A,脉冲宽度 9 ms,脉冲频率 20 Hz,扫描速度 60 mm·min⁻¹,矩形波,平均功率 45.25 W。激光熔覆后,将 Ni 基 WC 熔覆条纹打磨平整后得到的熔覆条纹试件如图 1 所示。为了进行摩擦因数的对比,采用同样的方法在 HSS 试件表面制备出纯 Ni 熔覆涂层。



2.3 磨损实验与性能测试

采用兰州中科凯华生产的 SFT-2M 型摩擦磨损试验机进行磨损实验,熔覆条纹试件作为摩擦副的下磨损试样,选用直径为 5 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球作为摩擦副的上磨损试样。实验条件为:载荷 80 N,下摩擦副的转速 500 r·min⁻¹,磨损时间 60 min,试件表面的磨痕直径 10 mm。通过摩擦磨损试验机记录摩擦因数并计算平均摩擦因数。采用日本日立公司生产的 S-4800 型扫描电镜(SEM)和日本浩视公司生产的 VHX-1000 型三维数码显微镜观察试件的磨损形貌并进行元素能谱分析(EDS)。

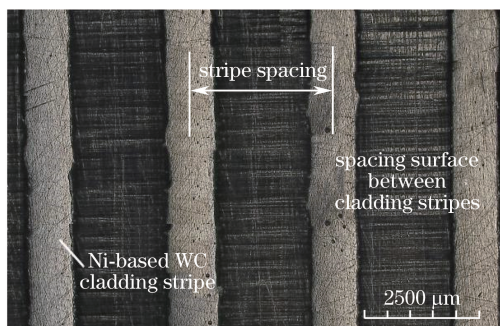


图 1 Ni 基 WC 熔覆条纹试件

Fig. 1 Specimen with Ni-based WC cladding stripes

3 结果与讨论

3.1 熔覆条纹组织

Ni 基 WC 熔覆条纹试件的金相组织如图 2 所示。由图 2(a)可知,Ni 基 WC 熔覆条纹与 HSS 基体的结合较好,熔覆组织与 HSS 基体之间为热影响区。从图 2(b)可以看出,Ni 基 WC 粉末在激光作用下形成了均匀、细小的晶粒,但仍有部分未熔化的黑色 WC 颗粒。熔覆条纹中的 WC 颗粒起到了弥散强化的作用,可以提高熔覆条纹的硬度和耐磨性能。然而,由于受到激光熔覆的影响,部分熔覆条纹组织内部仍然可以观察到微小的裂纹和气孔,如图 2(a)中箭头 A 处所示。

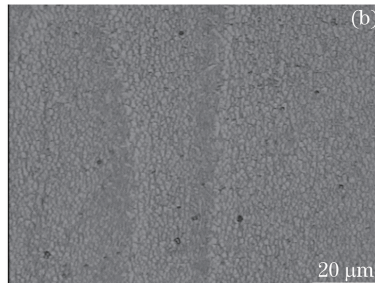


图 2 Ni 基 WC 熔覆条纹组织。(a)剖面图;(b)组织结构

Fig. 2 Microstructures of Ni-based WC cladding stripes. (a) Cross-sectional view; (b) organization structure

3.2 摩擦因数

HSS 试件和 Ni 基 WC 熔覆条纹试件的摩擦因数曲线如图 3 所示,其中 Ni 基 WC 熔覆条纹的间隔

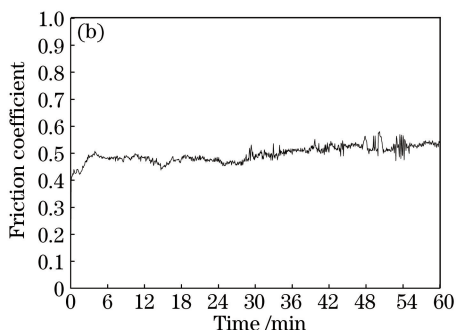
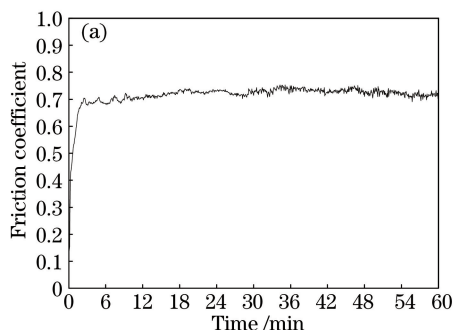


图 3 摩擦因数曲线。(a) HSS 试件;(b) Ni 基 WC 熔覆条纹试件

Fig. 3 Friction coefficient curves. (a) HSS specimen; (b) specimen with Ni-based WC cladding stripes

根据不同表面的摩擦因数曲线,得到了不同表面的试件与对摩擦球的摩擦因数对比,结果如图 4 所示。表面无熔覆的 HSS 试件的摩擦因数最大,Ni 基 WC 熔覆条纹试件的摩擦因数均小于 HSS 试件的,而且 Ni 基 WC 熔覆条纹试件的摩擦因数随着条纹间距的减小而逐渐减小。

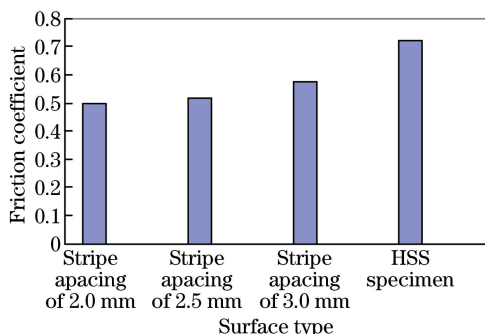


图 4 试件与对摩擦球的摩擦因数

Fig. 4 Coefficients of friction between specimens and friction balls

3.3 减摩机理

3.3.1 石墨析出减摩

在 Ni 基 WC 粉末的激光熔覆过程中,部分 WC 颗粒会发生分解反应^[12]:

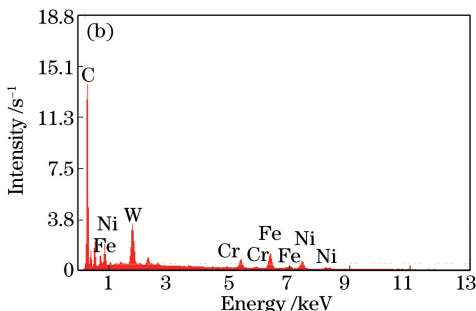
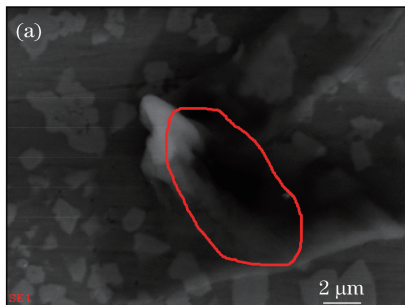


图 5 Ni 基 WC 熔覆条纹表面。(a) SEM 图;(b) EDS 结果

Fig. 5 Ni-based WC cladding stripe surface. (a) SEM image; (b) EDS result

为 2.0 mm。两种试件的摩擦因数随时间的变化均较平稳,但 Ni 基 WC 熔覆条纹试件的摩擦因数明显小于 HSS 试件的。



(1)式表明,在 Ni 基 WC 粉末激光熔覆过程中,WC 的分解会产生 C;另外,Ni 基自熔性合金粉末也含有少量的 C。因此,在 Ni 基 WC 的激光熔覆过程中,粉末熔化材料内的 C 主要来源于 WC 分解生成的 C 和 Ni 基自熔性合金粉末含有的 C。文献[13]表明,C 会被熔化的 Ni 吸留,大部分被吸留的 C 在冷却固化后会以石墨形式析出。因此,在激光熔覆过程中,Ni 基 WC 粉末中熔化的 Ni 基体将会吸留部分 C,并在冷却后析出石墨。石墨的摩擦因数为 0.2^[14],是一种良好的固体润滑剂。HSS 与对摩擦球间的摩擦因数为 0.72,显然,Ni 基 WC 熔覆条纹中析出的石墨具有减小熔覆条纹试件摩擦因数的作用。

熔覆条纹表面 WC 颗粒附近的黑色物质区域的 EDS 结果如图 5 所示,可以看出,C 原子、Fe 原子、Ni 原子、W 原子的原子数分数分别为 87.43%, 4.59%, 3.90%, 2.22%,表明该区域的 C 含量较高。熔覆条纹表面其他区域测试的 C 原子的原子数分数仅为 21.01%。因此,在 Ni 基 WC 熔覆条纹中会存在石墨析出现象。

3.3.2 Ni 金属减摩

为了考察熔覆 Ni 对摩擦因数的影响,测试了激光熔覆纯 Ni 金属涂层与对摩球之间的摩擦因数,结果为 0.407,表明熔覆 Ni 基 WC 条纹中的 Ni 具有一定的减摩作用。由图 4 可以看出,Ni 基 WC 熔覆条纹试件的摩擦因数随着条纹间距的增大而变大。随着熔覆条纹间距的减小,参与磨损的熔覆条纹数量就会增加,意味着磨损表面上的 Ni 金属含量增多。上述分析表明,随着熔覆 Ni 基 WC 条纹试件表面上参与磨损的 Ni 金属含量增多,试件的摩擦因数逐渐减小。激光熔覆 Ni 基 WC 条纹中含有的 Ni 金属可以起到良好的减摩作用。

3.3.3 软基体中硬相承载的减摩机理

软基体中硬相承载的减摩和耐磨机理^[14]表明,如果软基体上分布有硬相,突出于磨损表面的硬相主要起着支撑载荷的作用,而软基体起着支撑硬相的作用,硬相与对摩件接触并发生相对滑动,从而导致摩擦因数变小。Ni 基 WC 熔覆条纹表面的磨损形貌如图 6 所示,可以观察到突出的 WC 颗粒。在 Ni 基 WC 熔覆条纹中,Ni 基体视作为软基体,WC 则为硬相。在磨损过程中,Ni 基 WC 熔覆条纹中的硬质 WC 颗粒起到支撑磨损载荷的作用。刘其斌等^[15]研究表明,WC 颗粒的硬质强化作用具有减摩作用。因此,HSS 试件表面的 Ni 基 WC 熔覆条纹的减摩机理是软基体与硬相的相互结合。

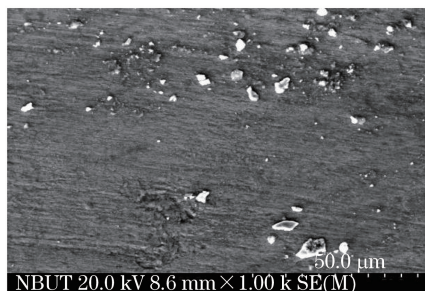


图 6 Ni 基 WC 熔覆条纹表面的磨损形貌
Fig. 6 Worn morphology of Ni-based WC cladding stripe surface

3.3.4 条纹间隔的减摩机理

在磨损过程中,圆环状磨痕的圆周尺寸固定不变。当熔覆条纹的间隔变小时,磨痕圆环中 Ni 基 WC 熔覆材料的面积比例相对增大。同时,在磨损过程中,一部分 Ni 基 WC 熔覆条纹的材料会被对摩球带入熔覆条纹间隔表面,导致磨痕圆环中 Ni 基 WC 熔覆材料的面积比例增大,从而出现更多的 Ni 基 WC 熔覆表面与对摩球接触。因此,摩擦因数会

随着熔覆条纹间隔的变小而减小,这也解释了摩擦因数随 Ni 基 WC 熔覆条纹间隔变化的原因。

综上所述,HSS 试件表面 Ni 基 WC 熔覆条纹中含有的 Ni 金属、析出的石墨以及硬质 WC 颗粒均具有良好的减摩作用,减小了 Ni 基 WC 熔覆条纹试件表面的摩擦因数。

4 结 论

在高速钢表面激光熔覆了 Ni 基 WC 熔覆条纹,减小了高速钢试件的摩擦因数,且摩擦因数随着条纹间距的减小而减小。激光熔覆 Ni 基 WC 熔覆条纹试件呈现出较好的减摩特性。Ni 基 WC 熔覆条纹的减摩机理是软基体与硬相的相互结合。

参 考 文 献

- [1] Zan S P, Jiao J K, Zhang W W. Study on laser cladding process of 316L stainless steel powder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 061406.
管少平, 焦俊科, 张文武. 316L 不锈钢粉末激光熔覆工艺研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 061406.
- [2] Su Y S, Li L, He N, *et al.* Experimental research on laser machining of surface micro-textures of carbide cutting tool[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0603002.
苏永生, 李亮, 何宁, 等. 激光加工硬质合金刀具表面微结构的试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603002.
- [3] Zhao Y, Ren L Q, Tong X, *et al.* Frictional wear and thermal fatigue behaviours of biomimetic coupling materials for brake drums[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(S): 20-27.
- [4] Li F Q, Feng X Y, Chen Y B. Influence of WC content on microstructure of WC/Ni60A laser cladding layer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403009.
李福泉, 冯鑫友, 陈彦宾. WC 含量对 WC/Ni60A 激光熔覆层微观组织的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0403009.
- [5] Duan X X, Gao S Y, Gu Y F, *et al.* Study on reinforcement mechanism and frictional wear properties of 316L-SiC mixed layer deposited by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0103004.
段晓溪, 高士友, 顾勇飞, 等. 激光熔覆 316L+SiC 的强化机制和摩擦磨损性能研究[J]. 中国激光,

- 2016, 43(1): 0103004.
- [6] Jing Z J, Zhou H, Zhang P, *et al.* Effect of thermal fatigue on the wear resistance of graphite cast iron with bionic units processed by laser cladding WC[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 271: 329-336.
- [7] Garrido A H, Gonzalez R, Cadenas M, *et al.* Tribological behavior of laser-textured NiCrBSi coatings[J]. *Wear*, 2011, 271(5/6): 925-933.
- [8] Zhu S M, Su M F, Liao P F. Microstructure and wear resistance of laser cladding nickel-tungsten carbide coating on Q345 steel surface[J]. *Materials Protection*, 2014, 47(8): 68-70.
朱顺敏, 苏美凤, 廖鹏飞. Q345 钢激光熔覆镍基 WC 合金的组织与耐磨性能[J]. *材料保护*, 2014, 47(8): 68-70.
- [9] Dong G, Yu W, Chen Z J, *et al.* Laser clad of Ni/WC composite coating with high WC content and combination remanufacturing of tooth-like components[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(2): 176-181.
董刚, 郁伟, 陈智君, 等. 高 WC 含量 Ni 基合金激光熔覆及齿形零件的组合制造研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(2): 176-181.
- [10] Guo C, Zhou J S, Chen J M, *et al.* High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings[J]. *Wear*, 2011, 270(7/8): 492-498.
- [11] Senthilkumar V, Prasath M G H, Chilamwar V L. Role of surface textures on tribological behaviour of HSS[J]. *Surface Engineering*, 2014, 30(4): 277-282.
- [12] Paul C P, Alemohammad H, Toyserkani E, *et al.* Cladding of WC-12Co on low carbon steel using a pulsed Nd:YAG laser[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 464(1/2): 170-176.
- [13] 谢高阳, 俞练民, 刘本耀, 等. 无机化学丛书第九卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 270-271.
- [14] Wen S Z, Huang P. Principles of tribology (4th edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
温诗铸, 黄平. 摩擦学原理(第 4 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [15] Liu Q B, Zhu W D, Zou L J, *et al.* Microstructure and character of friction and wear of WC_p/Ni based alloy gradient composite coating by wide-band laser cladding[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(6): 52-56.
刘其斌, 朱维东, 邹龙江, 等. 宽带激光熔覆 WC_p/Ni 基合金梯度复合涂层组织与摩擦磨损特性[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(6): 52-56.