

WC 颗粒对激光沉积 Ni25 涂层耐磨性增强机制影响研究

王 涛^{1,2} 孟 琨^{1,2} 王长宏^{1,2} 王 浩^{1,3} 唐 杰^{1,2} 张 莹^{1,2}
(1.中国民航大学民用航空激光制造技术研究所; 2.中国民航大学航空工程学院;
3.中国民航大学工程技术训练中心)

摘 要 利用激光定向能量沉积在 Q235 钢表面分别制备了 Ni25 涂层和 Ni25/WC 复合涂层,并对两种涂层的微观组织、元素分布、摩擦磨损性能进行了对比分析与研究。结果表明,两种涂层成形良好,无裂纹缺陷;未完全溶解的 WC 颗粒在 Ni25/WC 复合涂层中分布较为均匀,部分 WC 在激光作用下分解。C 与涂层中其他元素结合生成多种碳化物,在结晶过程中提供了更多形核点,使得 Ni25/WC 复合涂层与 Ni25 涂层相比,晶粒更加细化。部分 WC 颗粒保持完整形态,WC 颗粒改变了涂层的摩擦磨损机理,与 Ni25 涂层相比,显著提高了涂层的耐磨性能。

关键词 激光定向能量沉积;微观组织;摩擦磨损;磨损机理

中图分类号 TG148;TG456.7 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.09.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of WC Particles on the Wear Resistance Reinforcement Mechanism of Ni25 Coating by Laser Deposition

Wang Tao^{1,2}, Meng Kun^{1,2}, Wang Changhong^{1,2}, Wang Hao^{1,3}, Tang Jie^{1,2}, Zhang Ying^{1,2}
(1.Civil Aviation Laser Manufacturing Technology Institute, Civil Aviation University of China;
2.College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China;
3.Engineering Technology Training Center, Civil Aviation University of China)

Abstract: Ni25 and Ni25/WC coatings were prepared on the surface of Q235 steel by laser directed energy deposition. The element distribution, microstructure and friction-wear properties of the coatings were comparatively analyzed. The results indicate that the coatings are well formed without crack defects. The incompletely dissolved WC reinforcement particles are uniformly distributed in the coating, while a part of that are decomposed under the action of laser, and the C atoms combine with other elements to form a variety of carbides in the coating. During the crystallization process, more nucleation points are provided, making the coating grain more refine compared with Ni25 coating. A part of WC particles remain intact, which change the wear mechanism of the Ni25/WC coating and significantly improve the wear resistance compared with the Ni25 coating.

Key Words: Laser Directed Energy Deposition, Microstructure, Friction and Wear, Wear Mechanism

Ni25 合金粉末成形件具有优良的韧性、耐冲击性及切削性等,可用于各种模具的修复和表面强化。研究表明,模具寿命对制造成本、产品品质和生产效率有较大影响^[1]。然而,模具在服役过程中易产生表面磨损、疲劳裂纹和塑性变形等局部损伤^[2],对模具受损部位进行精确修复和强化,能够有效延长模具寿命,显著提高经济效益。

目前,常用修复及表面强化技术有堆焊修复技术、

热喷涂和热喷焊修复、激光定向能量沉积修复和电火花修复等^[3]。激光定向能量沉积具有热输入小、残余应力小、修复速度快以及修复后再加工余量小等特点,在模具修复领域具有广阔的应用前景。LU J Z 等^[4]在 H13 热作模具钢磨损表面制备了 Ni25 修复层。结果表明,修复层与基体结合良好,主要相组成为 γ -Ni 奥氏体和少量 M_7C_3 碳化物。WANG X H 等^[5]在 4Cr14Ni14NW2Mo 耐热钢表面制备了 Ni/WC 基复合涂层。结果表明,

收稿日期:2022-03-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52172360);天津市研究生科研创新资助项目(2021YJSS113);中国民航大学研究生科研创新资助项目(2021YJS034)
第一作者简介:王涛,男,1979 年出生,教授,天津(300300),E-mail:wangtaotdme@163.com
通信作者:张莹,女,1983 年出生,副教授,天津(300300),E-mail:caucezy@163.com
引用格式:王涛,孟琨,王长宏,等. WC 颗粒对激光沉积 Ni25 涂层耐磨性增强机制影响研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(9):1 057-1 060.
WANG T, MENG K, WANG C H, et al. Effects of WC particles on the wear resistance reinforcement mechanism of Ni25 coating by laser deposition[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(9):1 057-1 060.

Ni21+20%WC+0.5%CeO₂ 涂层显微组织细密, 具有较好的高温磨损性能。杨胶溪等^[6]在 GCr15 基体表面分别用微米团聚状和块状 WC 制备了 Ni/WC 基复合涂层。结果表明, 均匀分布的硬质相 WC 可显著提高复合涂层的高温耐磨性。李云峰等^[7]在 ZG42CrMoA 基体表面分别用微米与纳米级 WC 颗粒制备了 Ni45/WC 涂层, 发现在晶界和共晶区弥散分布的纳米 WC 能阻碍位错运动, 提高复合涂层的耐磨性和耐冲击性能。

尽管如此, 研究者对球形铸造 WC 陶瓷颗粒对涂层的耐磨性增强作用及机理研究报道较少。本课题选用球形铸造 WC 和 Ni25 粉末和激光定向能量沉积制备 Ni25 和 Ni25/WC 涂层, 研究球形铸造 WC 对激光定向能量沉积 Ni25 涂层耐磨性能的影响, 揭示 WC 颗粒对 Ni25 涂层耐磨性能的增强机制。

1 试验材料与方法

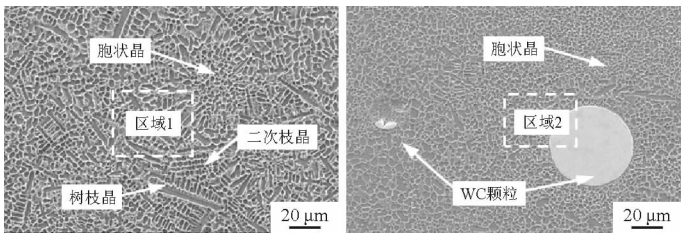
试验基材为 Q235 钢, 沉积材料分别为 Ni25 粉末和 Ni25/WC 混合粉末, Ni25 粉末的化学成分见表 1。将 WC 和 Ni25 粉末在 110℃ 下干燥 1 h, 冷却至室温后制备 WC 含量为 6% (质量分数, 下同) 的 Ni25/WC 混合粉末 (预试验发现 WC 含量为 6% 时, 涂层宏观形貌良好, 无裂纹, 孔洞缺陷较少)。

表 1 Ni25 粉末的化学成分

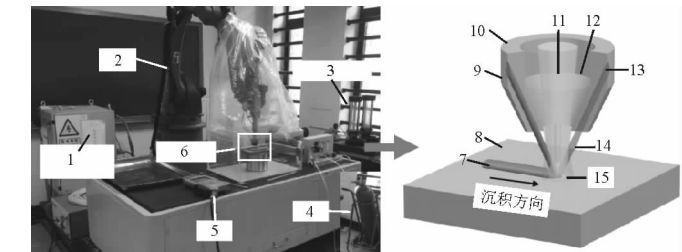
Tab.1 Chemical composition of Ni25 powders %				
w _B				
C	Si	Fe	B	Ni
0.20	3.50	8.00	1.50	余量

采用 RFL-C1000 激光器, 保护气体为高纯氩气。激光波长为 1 080 nm, 光斑直径为 2 mm, 优化后工艺参数: 激光功率为 850 W, 扫描速度为 12 mm/s, 搭接率为 50%。激光定向能量沉积试验示意图见图 1。

涂层经制样后, 使用王水腐蚀 20 s, 利用 Sigma 300 扫描电镜进行微观组织和 EDS 分析; 利用 D/MAX-2500 X 射线衍射仪分析物相组成; 利用 M-2000 摩擦磨损试验机测试试样的摩擦磨损性能, 载荷为 250 N, 时间为 60 min, 磨擦环材料为 GCr15 钢, 转速为 200 r/min, 直径为 40 mm, 硬度(HRC)为 60。



(a) Ni25 (b) Ni25/WC



(a) 实物图 (b) 试验示意图

图 1 激光定向能量沉积试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser directed energy deposition experiment

- 1.RFL-1000 型激光器 2.六自由度机械臂 3.双桶送粉器 4.氩气
5.示教器 6.沉积试样 7.涂层 8.基体 9、13.送粉气 10.同轴喷嘴
11.激光束 12.保护气体 14.粉末流 15.熔池

2 试验结果和分析

2.1 XRD 分析

图 2 为 Ni25 及 Ni25/WC 涂层的 XRD 图谱。可以看出, Ni25 涂层主要由 γ -Ni、FeNi₃、Ni₂B 及少量 Fe₃C 相组成; 而 Ni25/WC 涂层中的 WC 颗粒在激光的高能量输入作用下, 发生部分分解, 产生 W₂C 和 C 原子。C 原子在熔池再结晶过程中, 与 Ni25 中的 Fe 元素原位生成 Fe₃C。

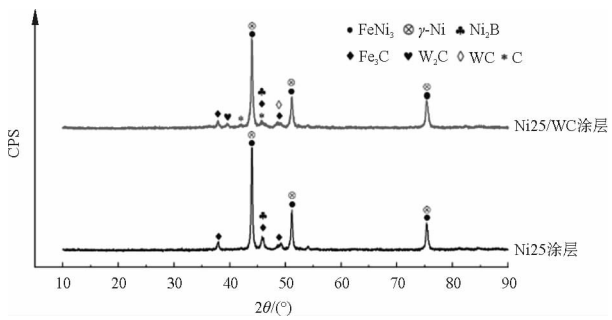
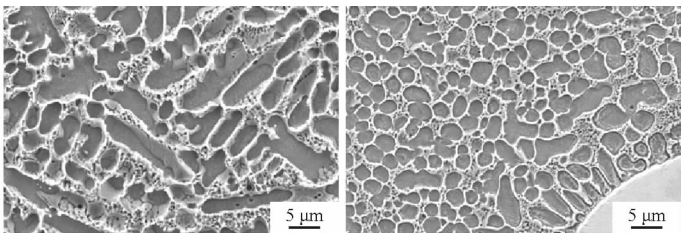


图 2 Ni25 和 Ni25/WC 涂层的 XRD 图谱
Fig.2 XRD patterns of Ni25 and Ni25/WC coatings

2.2 微观组织分析

图 3 为两种涂层截面 SEM 形貌。可以看出, Ni25 涂层分布有大量的胞状晶、树枝晶以及二次枝晶, 而 Ni25/WC 涂层中则是以胞状晶为主。Ni25 涂层的晶



(c) 区域 1 放大 (d) 区域 2 放大

图 3 Ni25 和 Ni25/WC 涂层截面 SEM 图

Fig.3 SEM images of cross sections of Ni25 and Ni25/WC coatings

粒尺寸明显大于 Ni25/WC 涂层, Ni25/WC 涂层中晶粒遇到 WC 后停止生长, 围绕 WC 颗粒形成一圈细小的等轴晶, 从而细化晶粒和微观组织^[8]。

根据成分过冷度理论, 熔池由于对流搅拌作用, 液相相对均匀, 在凝固开始时, 高熔点的碳化物快速形核并长大^[9]。由于 Ni25/WC 涂层碳化物种类更多和含量更高, 在熔池凝固时提供了更多的形核点, 因此 Ni25/WC 涂层组织的晶粒尺寸更小。晶粒细化后, 晶界面积增加, 晶界上的夹杂物相对减少, 界面结合力提高, 使得材料更难以变形, 因而强度提高, 耐磨性增强。

图 4 和图 5 分别为图 3c 和图 3d 区域的 EDS 面扫结果。由图 4 和图 5a、图 5b 可以看出, Ni 和 Fe 在两种涂层均匀分布。从图 5c 看出, Ni25/WC 涂层中, 在 WC

颗粒外检测到 W 元素, 说明一部分 WC 发生了分解。从图 5d 看出, 在 Ni25/WC 涂层中, C 元素在 WC 颗粒以外发生了明显的偏析。

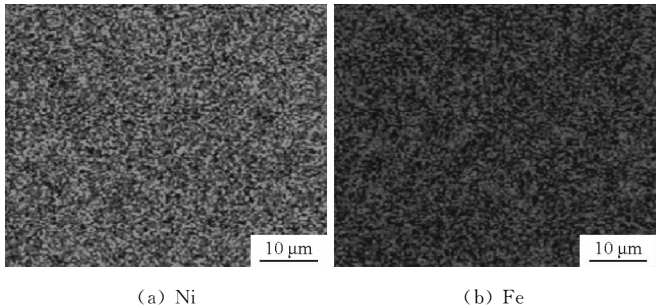


图 4 Ni25 涂层 EDS 元素面扫描结果

Fig.4 EDS element face scanning results of Ni25 coating

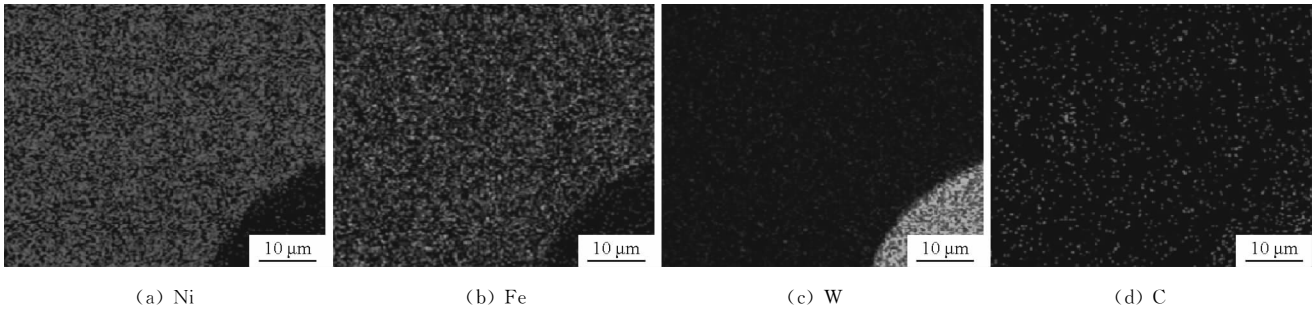


图 5 Ni25/WC 涂层 EDS 元素面扫描结果

Fig.5 EDS element face scanning results of Ni25/WC coating

2.3 摩擦磨损性能

图 6 为两种试样的摩擦因数曲线和磨损结果。由图 6a 可以看出, 曲线分为磨合阶段和稳定磨损阶段。在稳定磨损阶段, Ni25/WC 涂层的摩擦因数小于 Ni25 涂层, 并且随着试验的进行更加明显。这一方面是由于 WC 陶瓷颗粒具有极强的耐磨性, 摩擦环与其相遇时, 不会产生细小磨屑, 从而减小摩擦因数^[10]; 另一方面, 在沉积过程中, WC 颗粒分解, 产生游离态 C, 起到了一定的润滑作用^[11,12], 从而减小了摩擦因数。从图 6b 可以看出, WC 颗粒的加入使得涂层的耐磨性明显提高。这是由于 Ni25/WC 复合涂层中未完全溶解的 WC 颗粒在摩擦时起到的钉扎作用和生成的硬质相 Fe₃C 的

强化作用, 提高了涂层的耐磨性。

图 7 为 Ni25/WC 涂层磨损过程示意图。可以看出, 摩擦环首先与 Ni25 涂层接触, 由于 Ni25 涂层较软, 摩擦环表面的微小凸起对涂层形成微切削^[13], 导致涂层迅速磨损, 见图 7a。随着磨损进行, WC 颗粒在涂层中凸出, 由于 WC 硬度极高, 不易被磨损, 摩擦环与试样间的摩擦转换为 WC 颗粒对摩擦环的摩擦, 见图 7b, 此时磨痕浅而窄。随着摩擦继续进行, 由于 Ni25 基体的损耗, WC 颗粒在摩擦力的作用下, 被从基体中“拔出”而进入摩擦副, 这时的试样磨损表现为三体磨粒磨损, 见图 7c。随着 WC 颗粒被排出摩擦副, 磨损方式又变为粘着磨损, 由此可见, 在有增强相的涂层磨损试验中, 粘着磨损和磨粒磨损交替进行。

两种涂层试样的磨损表面 SEM 形貌见图 8。Ni25

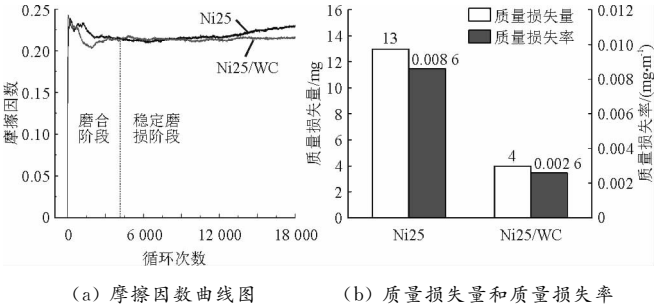


图 6 Ni25 和 Ni25/WC 涂层的摩擦磨损性能

Fig.6 Friction and wear properties of Ni25 and Ni25/WC coatings

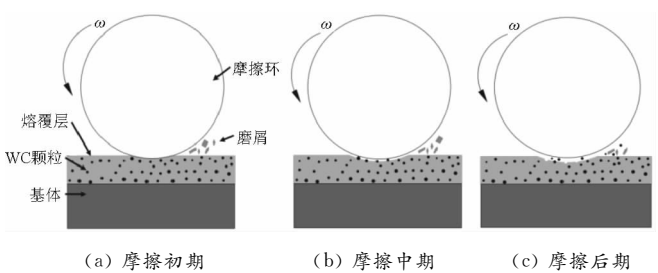


图 7 Ni25/WC 磨损过程示意图

Fig.7 Schematic diagrams of wear process of Ni25/WC

涂层磨损表面主要为平行于磨削方向的犁沟,犁沟较深且连续,磨痕表面光滑,见图 8a。Ni25/WC 涂层磨损表面同样存在犁沟,但深度较浅,同时连续性降低,在 WC 颗粒位置出现截断,除了犁沟,Ni25/WC 涂层磨损表面还出现明显剥落痕迹,集中出现在 WC 颗粒附近,见图 8b。

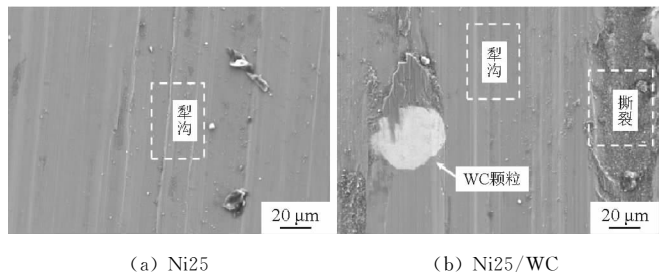


图 8 Ni25 和 Ni25/WC 涂层磨损表面的 SEM 形貌
Fig.8 SEM images of wear surface of Ni25 and Ni25/WC coatings

以耐磨性较强的 GCr15 钢作为对磨件,在外载荷作用下,摩擦环表面的微小凸起在涂层表面进行微切削,形成犁沟。从微观上来看,摩擦环与 Ni25/WC 涂层试样摩擦时并不是面接触,而是涂层中突出的 WC 颗粒与摩擦环接触,极小的接触面积造成接触点的局部应力很大,使接触点产生粘着或焊合,在试样与摩擦环的相对运动中被撕裂,表现为材料的剥落^[14]。通过试验对比发现,Ni25/WC 涂层中的 WC 陶瓷颗粒弥散分布,对涂层产生较强的支撑保护作用,避免较软的 Ni25 涂层被过度磨削。

3 结 论

(1)Ni25/WC 涂层中的 WC 颗粒在激光作用下部分发生分解,产生 W_2C 和 C 原子。C 原子在熔池再结晶过程中与 Ni25 中的 Fe 结合,生成新的强化相 Fe_3C 。

(2)Ni25/WC 涂层中部分 WC 分解生成了更多的碳化物,在结晶过程中提供了更多形核点,使得涂层晶粒细化。晶粒细化后,晶界面积增加,晶界上的夹杂物相对减少,界面结合力提高,使得材料变形更难,更加耐磨。

(3)Ni25/WC 涂层中部分 WC 颗粒并未溶解,形态完整并且分布较均匀,这些 WC 颗粒在涂层中起到了弥散强化作用。在涂层摩擦过程中,未熔的 WC 颗粒在涂层中起到钉扎作用,改变了磨损机理,使得涂层耐磨性显著提高。

参 考 文 献

[1] EMAMVERDIAN A A, SUN Y, CAO C, et al. Current failure mechanisms and treatment methods of hot forging tools (dies)-A review[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105 678.

[2] 江昌勇. 压铸模的寿命特性与失效分析[J]. 模具制造, 2009, 9 (5): 69-73.

[3] 刘斌, 崔志杰. 模具修复技术及发展趋势[J]. 模具工业, 2017, 43 (2): 1-5.

[4] LU J Z, XUE K N, LU H F, et al. Laser shock wave-induced wear property improvement and formation mechanism of laser cladding Ni25 coating on H13 tool steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 296: 117 202.

[5] WANG X H, LIU A M. Microstructure and abrasive-wear behavior under high temperature of laser clad Ni-based WC ceramic coating [J]. Physics Procedia, 2013, 50: 145-149.

[6] 杨胶溪, 张健全, 常万庆, 等. 激光熔覆 WC/Ni 基复合涂层高温滑动干摩擦磨损性能[J]. 材料工程, 2016, 44(6): 110-116.

[7] 李云峰, 石岩. WC 对激光熔覆层组织及耐磨耐冲击性的影响[J]. 中国表面工程, 2021, 34(2): 104-113.

[8] 孙宁, 方艳, 张家奇, 等. WC-12Co 添加量对激光熔覆 Inconel 625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48 (6): 93-102.

[9] 雍耀维. 激光熔覆镍基复合涂层工艺和性能的试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

[10] ZHAO Y, YU T, GUAN C, et al. Microstructure and friction coefficient of ceramic (TiC , TiN and B_4C) reinforced Ni-based coating by laser cladding[J]. Ceramics International, 2019, 45(16): 20 824-20 836.

[11] ZHANG H X, YU H J, CHEN C Z. In-situforming composite coating by laser cladding C/ B_4C [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 30(6): 743-747.

[12] ZHAO Y, YU T, CHEN L, et al. Microstructure and wear resistance behavior of Ti-C- B_4C -reinforced composite coating [J]. Ceramics International, 2020, 46(16): 25 136-25 148.

[13] 金剑波, 赵宇, 赵淑珍, 等. TiN 含量对激光选区熔化成形钛基复合材料微结构与耐磨性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 186-193.

[14] ZHAO S, ZHOU S, XIE M, et al. Phase separation and enhanced wear resistance of $Cu_{88}Fe_{12}$ immiscible coating prepared by laser cladding [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 2 001-2 010.

(编辑:彭瑾)

华人运通一体化后座舱荣获国际大奖

近日,Altair 隆重揭晓第 10 届年度 AltairEnlighten Award 获奖名单。其中,中国车企华人运通的一体化压铸(HPDC)后座舱荣获轻量化使能技术亚军,成为获奖名单中唯一来自中国的汽车品牌。

据介绍,华人运通在其后座舱使用了免热处理材料和高压压铸,从而使后座舱减重高达 20%,实现轻量化,降低能耗的同时还提高了车辆续航里程。此外,HPDC 后座舱将后地板的 40 个部件集成到一个部件中,将制造时间缩短了 1/3,大大提高了车身开发效率。据悉,华人运通旗下的高合汽车是目前中国的新能源智能汽车之一。

(摘自压铸周刊)