

TC4 钛合金表面激光熔覆 Ni60+Cu/Mo 涂层的显微组织和性能

汪学静^{1,2} 周志明^{1,3} 张月霞² 谢峰² 张毓军² 吴亚渝² 韩世伟² 周忠娇⁴ 刘应瑞⁴

(1.重庆理工大学材料科学与工程学院; 2.重庆铁马工业集团有限公司; 3.重庆合创纳米科技有限公司;
4.重庆生物智能制造研究院)

摘要 在 TC4 钛合金表面激光熔覆 Ni60A、Ni60CuMo 复合粉末,研究 Cu 和 Mo 元素对熔覆层显微组织、硬度及耐磨性的影响。结果表明,在相同激光熔覆工艺参数下,Ni60CuMo 熔覆层中除含有 Ni60A 熔覆层所含有的 Ti₂Ni、TiNi、TiB₂ 和 TiC 相外,还含有 Cu_{0.81}Ni_{0.19}、Ti₂Cu、MoSi₂ 等硬质相。在硬质相的作用下,Ni60CuMo 熔覆层的显微硬度平均值(HV_{0.1})为 826,是 Ni60A 熔覆层硬度的 1.2 倍。在相同条件下,Ni60CuMo 熔覆层的磨损率为 3.30×10⁻⁶ mm³/(N·m),约为 Ni60A 熔覆层磨损率的 16.42%,是 TC4 钛合金基体磨损率的 4.23%。添加 Cu 和 Mo 能显著提升 TC4 钛合金表面激光熔覆层的耐磨性。

关键词 TC4 钛合金;激光熔覆;Ni60A 粉末;Ni60CuMo 粉末;耐磨性能

中图分类号 TG174.44;O532+.25

文献标志码 A

DOI10.15980/j.tzzz.2023.10.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Performance of Laser Cladding Ni60+ Cu/Mo Coating on TC4 Titanium Alloy Surface

Wang Xuejing^{1,2}, Zhou Zhiming^{1,3}, Zhang Yuexia², Xie Feng², Zhang Yujun², Wu Yayu²,
Han Shiwei², Zhou Zhongjiao⁴, Liu Yingrui⁴

(1.School of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology;
2.Chongqing Iron Horse Industry Group Co., Ltd.; 3.Chongqing Hechuang Nano Technology Co., Ltd.;
4.Chongqing Institute of Biointelligent Manufacturing)

Abstract: Ni60A and Ni60CuMo composite powders were laser cladded on the surface of TC4 titanium alloy and the effects of Cu and Mo elements on the microstructure, hardness, and wear resistance of cladding layer were investigated. The results indicate that under the same laser cladding process parameters, Ni60CuMo cladding layer contains not only the Ti₂Ni, TiNi, TiB₂, and TiC possessed by the Ni60A cladding layer, but also hard phases such as Cu_{0.81}Ni_{0.19}, Ti₂Cu, MoSi₂. Under the action of hard phase, the average microhardness (HV_{0.1}) of Ni60CuMo cladding layer is 826, which is 1.2 times of Ni60A cladding layer. Under the same conditions, the wear rate of Ni60CuMo cladding layer is 3.30 × 10⁻⁶ mm³/(N·m), which is approximately 16.42% of Ni60A cladding layer and 4.23% of TC4 titanium alloy matrix. Cu and Mo addition significantly enhances the wear resistance of laser cladding layer on the surface of TC4 titanium alloy.

Key Words: TC4 Titanium Alloy, Laser Cladding, Ni60A Powder, Ni60CuMo Powder, Wear Resistance

钛合金因其具有密度低、比强度高、耐腐蚀性强等特点,在国防工业中的应用越来越广泛^[1]。钛合金优异的综合性能可降低武器装备的重量,提高装备的耐腐蚀性、耐冲击性能,方便粗重装备运输,提高作战机动性,

满足部队的时效性要求。在舰船、装甲车、导弹等武器装备领域得到普遍应用^[2]。但是钛合金表面硬度低、耐磨性能差、抗高温氧化性能差^[3],需进行表面改性。钛合金表面改性的方法主要有化学热处理^[4]、离子注

收稿日期:2022-10-30;修改稿收到日期:2022-12-15
基金项目:重庆市英才计划资助项目(2020RC22);重庆市技术创新与应用发展专项重点资助项目(2022TIAD-DEX0040 及 2022JMRH);绍兴英才计划资助项目
第一作者简介:汪学静,女,1997 年出生,硕士研究生,重庆(400054),E-mail:1404622249@qq.com
通信作者:周志明,男,1976 年出生,教授,重庆(400054),E-mail:zhouzhiming@cqut.edu.cn
引用格式:汪学静,周志明,张月霞,等. TC4 钛合金表面激光熔覆 Ni60+Cu/Mo 涂层的显微组织和性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10): 1 380-1 384.
WANG X J, ZHOU Z M, ZHANG Y X, et al. Microstructure and performance of laser cladding Ni60+ Cu/Mo coating on TC4 titanium alloy surface[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 380-1 384.

入^[5]、微弧氧化^[6]、电镀^[7]、热喷涂^[5]、激光表面合金化和激光熔覆^[8]等,其中激光熔覆具有快冷快热^[9]、环保^[10]、热影响区小、熔覆层可与基体形成良好冶金结合的特点^[11],已被广泛应用于钛合金表面改性。激光熔覆粉末是影响激光熔覆品质的重要因素^[12],常用的激光熔覆粉末有金属粉末、陶瓷粉末、金属-陶瓷复合粉末等。其中,镍基自熔性合金粉末因其较高的硬度和耐磨性,较好的湿润性,热膨胀系数与钛合金基体相近,易形成冶金结合等特点^[13-14],成为应用最广泛的激光熔覆粉末之一。但是在更恶劣的服役环境下,Ni60A 合金涂层的耐磨性仍无法满足使用要求^[15-17]。臧春城等^[18]在 20Cr 基体表面激光熔覆 Ni60+35% 的 WC-Ni 混合粉末,熔覆层中含有 WC、Cr₇C₃ 硬质相和 Fe-Ni 化合物,对提高涂层硬度、耐磨性,增加涂层韧性作用显著。赵盛举等^[19]对添加了 50% 的 Cr₃C₂ 的 Ni60A 合金进行激光熔覆数值模拟仿真,发现熔覆粉末中含有微量稀土 Y₂O₃,结合适当的工艺参数能有效改善熔覆层形貌和显微组织。申泽慧等^[20]在 TC4 合金表面激光熔覆 Ni60 自熔性合金粉末,并添加不同比例的 WS₂ 粉末,发现随着 WS₂ 含量增加,熔覆层形貌由凸起型过渡为凹陷型,组织均匀性变差,其硬度低于未添加 WS₂ 的 Ni60 涂层。LU X L 等^[21]在 Ni60 粉末中添加 h-BN,通过激光熔覆技术在 TC4 合金表面制备高温自润滑耐磨涂层,发现由于涂层中存在 TiC 和 TiB₂ 硬质相,Ni60/h-BN 涂层的硬度和耐磨性均高于 Ni60 涂层。目前,有关在 Ni60 粉末中同时添加 Cu 和 Mo 元素的研究报道较少。Ni60 合金粉末本身具有自熔性,添加的 Cu 与 Ni 的热膨胀系数相近,易形成无限固溶体,能够使激光熔覆粉末充分熔化^[22-23]。Mo 作为中强碳化物元素,在试验过程中可反应生成 MoC、Mo₂C 等硬质相,能够改善熔覆材料的组织和耐磨性能^[24-25]。因此,本研究通过在 TC4 钛合金表面激光熔覆 Ni60A、Ni60CuMo 复合粉末,对比研究 Cu 和 Mo 元素对熔覆层显微组织、硬度及耐磨性的影响,以期对 TC4 钛合金的表面改性提供参考。

1 试验材料与方法

试验基体材料为 TC4 合金,其具有(α+β)双相结构,是目前综合性能最好、应用最广的钛合金之一。将钛板表面用不同粗糙度的砂纸打磨,去除表面氧化皮。激光熔覆粉末选择 Ni60A 和 Ni60CuMo 粉末,粒度为 100~270 目,其化学成分见表 1。

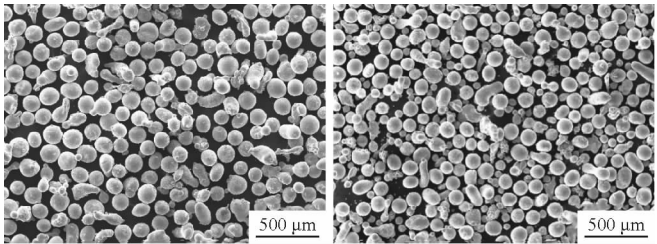
图 1 为 Ni60A 粉末和 Ni60CuMo 粉末的微观形貌。可以看出,两种粉末均呈球形或近球形,这有利于

粉末在激光熔覆过程中保持良好的流动性。

激光熔覆试验采用 3 000 W 半导体光纤激光器,搭配 LC300 型激光头。工艺参数如下:激光功率为 2 400 W,送粉速率为 16 g/min,扫描速率为 40 mm/min,搭接量为 1.2 mm,光斑直径为 4 mm,保护气体为氩气,气体流量为 14 L/min。

表 1 Ni60A 粉末和 Ni60CuMo 粉末的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Ni60A and Ni60CuMo

powders									%
合金	w_B								
	Cr	Fe	C	B	Si	Cu	Mo	O	Ni
Ni60A	15.0~17.0	≤5	0.7~1.1	3.0~4.0	3.5~5.0	—	—	<0.05	余量
Ni60CuMo	16.88	3.85	0.9	3.05	4.22	3.25	3.05	<0.05	余量



(a) Ni60A 粉末 (b) Ni60CuMo 粉末
图 1 熔覆粉末的微观形貌
Fig.1 Micro-morphologies of cladding powder

采用 PANalytical Eepyrean Series 2 X 射线衍射仪(XRD)分析涂层的物相组成,电压为 40 kV,电流为 40 mA,掠入角度为 2°,扫描角度范围为 30°~90°。利用 JSM-6460LV 扫描电镜(SEM)观察熔覆涂层微观形貌及摩擦磨损试验后的磨损形貌。利用 HVS-1000Z 型自动转塔数显维氏硬度计测试涂层的显微硬度,载荷为 0.1 N,加载时间为 15 s,从涂层表面至基体每隔 0.1 mm 测量 1 个硬度值;利用 UMT-TriboLab 多功能摩擦磨损试验机对熔覆层表面进行磨损试验,摩擦副采用直径为 6 mm 的 SiC 陶瓷,环境温度为 25 ℃,载荷为 3 N,频率为 4 Hz,试验时间为 30 min。在 ContourGT-K 型 Bruker 白光干涉仪下观察磨痕形貌,并对熔覆层摩擦磨损性能进行综合评定。

2 试验结果与讨论

2.1 物相分析

TC4 合金表面激光熔覆 Ni60A 熔覆层和 Ni60CuMo 熔覆层的 X 射线衍射图谱见图 2。可以看出,Ni60A 熔覆层中最强衍射峰为 α-Ti,此外,还含有 Ti₂Ni、TiNi、TiC、TiB₂ 等相。Ni60CuMo 熔覆层中除含有 α-Ti、Ti₂Ni、TiC、TiB₂ 化合物外,还有 Cu_{0.81}Ni_{0.19}、Ti₂Cu、MoSi₂ 等硬质相。

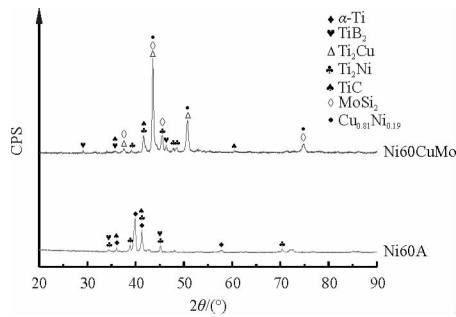


图 2 不同熔覆层的 XRD 分析结果
Fig.2 XRD patterns of different cladding layers

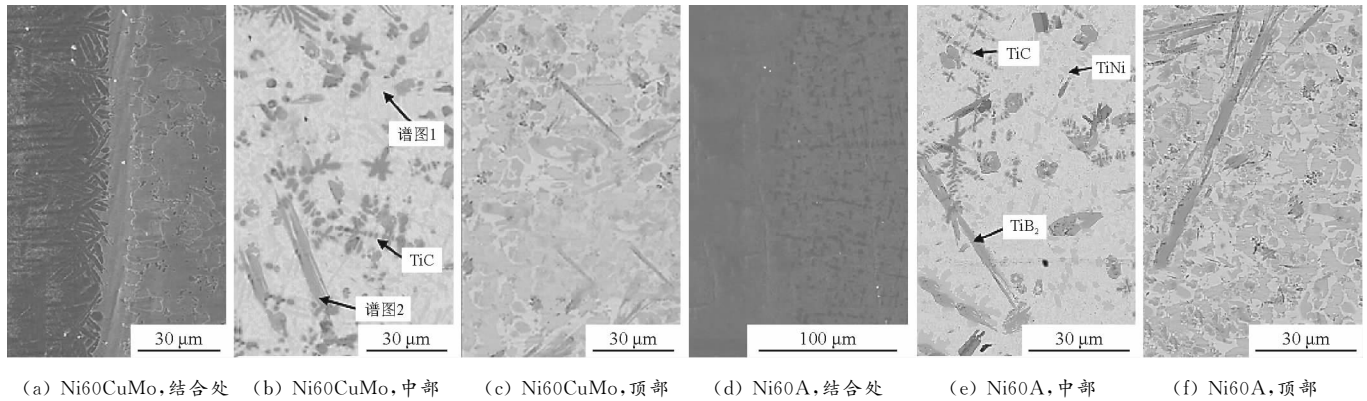


图 3 两种熔覆层不同区域的截面组织形貌

Fig.3 Cross-section structure of cladding layers in different regions

表 2 熔覆层不同位置的元素分析

Tab.2 Chemical composition of cladding layer at different positions

谱图	x B								%
	C	Ti	Cr	Ni	Al	Fe	Cu	V	
1	31.40	23.89	1.53	34.52	6.19	0.64	1.81	—	—
2	22.74	57.19	7.06	0.80	—	—	—	7.46	4.76

晶,且生长方向沿热流相反的方向。由图 3b 和图 3e 可知,Ni60CuMo 和 Ni60A 熔覆层中部组织中灰色相为 TiNi 相,呈黑色直线排列的主要为 TiC 相,长条状组织主要为 TiB₂ 相。结合表 2 可知,Cu 与 Ni 的热膨胀系数相近,能够形成无限固溶体,主要分布在 TiNi 相中,Mo 元素主要分布在 TiB₂ 相中。对比熔覆层顶部组织和中部组织发现,在激光熔覆过程中,上浮到表面的 Ti 含量降低,少量 Ti 优先与 Ni、B、C 反应生成 TiNi、TiB、TiC 等相,见图 3c 和图 3f。

2.3 显微硬度

图 4 为 TC4 合金表面激光熔覆 Ni60CuMo 和 Ni60A 熔覆层的硬度。可以看出,熔覆层的硬度变化趋势基本相同,可分为:熔覆区(CL)、热影响区(HAZ)和基体(Substrate)。Ni60CuMo 熔覆层的硬度(HV_{0.1})明显高于 Ni60A 熔覆层的硬度,且两种熔覆层的硬度均高于钛合金基体。

熔覆层的显微硬度曲线呈阶梯状分布。在相同工艺参数下,Ni60CuMo 熔覆层的厚度更厚,约为 1.8 mm,

2.2 显微组织

图 3 为两种熔覆层不同区域的截面组织形貌,表 2 为熔覆层不同位置的元素分析。可以看出,两种熔覆层表面平整,截面上无明显的裂纹与孔洞。因熔覆层不同区域加热及冷却条件不同,导致各区域的组织也有明显的变化^[26]。熔覆层与基体之间形成良好的冶金结合,见图 3a 和图 3d。图 3a 中,Ni60CuMo 熔覆层与 TC4 基体的结合区为一条宽约 10 μm 的带状组织,图 3d 中 Ni60A 熔覆层与 TC4 基体的结合区组织为细小的树枝

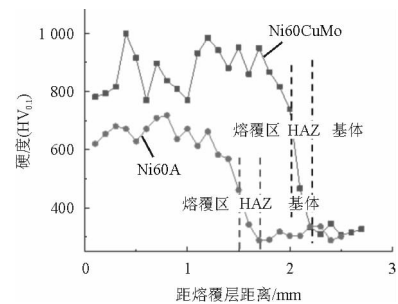


图 4 熔覆层的显微硬度曲线

Fig.4 Microhardness curves of cladding layer

而 Ni60A 熔覆层的厚度约为 1.2 mm。Ni60CuMo 熔覆层的硬度曲线波动较大,这是因为与 Ni60A 涂层相比,添加 Cu 和 Mo 元素之后,Ni60CuMo 涂层中包含 Cu_{0.81}Ni_{0.19}、Ti₂Cu、MoSi₂ 等硬质相,硬度更高且分布不均。熔覆层的最高硬度出现在熔覆层的中部而非最表面^[24],主要是由于激光熔覆过程中,熔覆层的表面受外界影响更多,激光的热量直接接触会导致熔覆粉末烧损、挥发或氧化,降低表面的硬度;同时在基体熔化过程中,上浮到表面的 Ti 较少,生成的 TiC 和 TiB 硬质相更少,硬度降低。结合图 3b 和图 3e 可知,在熔覆层的中部,镍基熔覆粉末中的 Ni、C、B、Si、Cu、Mo 等元素易与基体反应形成固溶体,起到固溶强化^[27]的效果,同时熔覆粉末与基体反应生成的金属间化合物,使熔覆层中部的硬度较高。熔覆层中部组织中还弥散分布着碳化

物、硼化物、钼硅化物等硬质相,在一定程度上起到弥散强化的作用^[28]。

2.4 耐磨性

图 5 为不同摩擦时间后熔覆层和基体的摩擦因数变化曲线。可以看到,Ni60A 熔覆层的平均摩擦因数约为 0.33,Ni60CuMo 熔覆层的平均摩擦因数约为 0.38,都小于 TC4 基体的平均摩擦因数。Ni60A 熔覆层的平均摩擦因数最小,且曲线变化趋势最平稳,在短时间内迅速上升达到平稳,而 Ni60CuMo 熔覆层的平均摩擦因数曲线前期大于 TC4 基体的摩擦因数,然后逐渐下降并趋于平稳,最终低于 TC4 基体的摩擦因数。这是因为在试验前期,Ni60CuMo 涂层中硬质相硬度较高,表面凸起的硬质相不易被磨平,导致试样表面粗糙度较大,所以摩擦因数大。随着时间延长,Ni60CuMo 涂熔覆层表面的硬质相在力的作用下被磨掉,摩擦因数逐渐降低并趋于稳定。

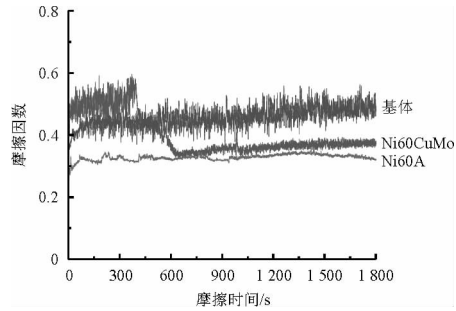


图 5 不同摩擦时间后熔覆层和基体的摩擦因数
Fig.5 Friction coefficient of cladding layer and matrix after different friction time

熔覆层表面的磨痕形貌见图 6。从图 6a~图 6c 可知,TC4 基体的磨痕最宽,宽约为 1.31 mm,深约为 26.61 μm ;Ni60A 涂层有明显的磨损痕迹,宽约为 0.72 mm,深约为 8.18 μm ;而 Ni60CuMo 涂层的磨痕最浅,宽约为 0.27 mm,深约为 0.91 μm 。根据磨损率的计算公式计算出熔覆层与基体的磨损率,见图 7。可

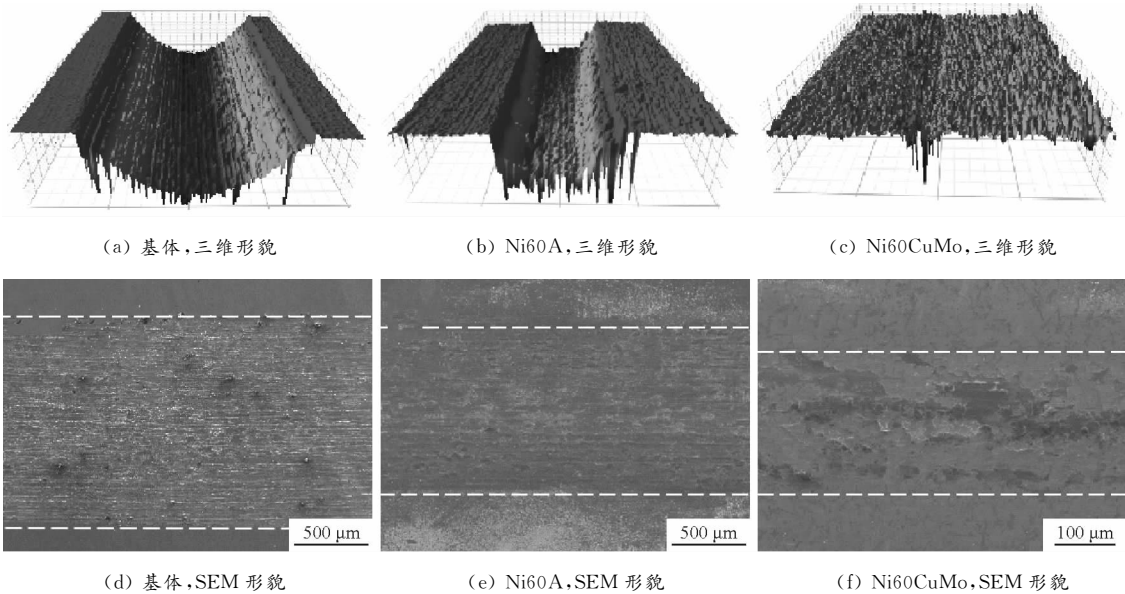


图 6 熔覆层和基体的磨损形貌图

Fig.6 Worn morphologies of cladding layers and matrix

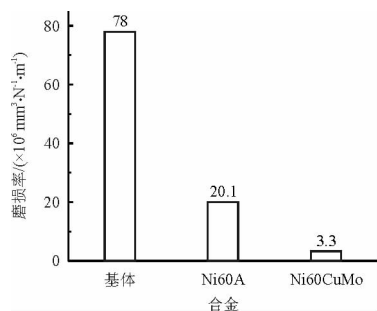


图 7 熔覆层和基体的磨损率

Fig.7 Wear rate of cladding layer and matrix

见 TC4 基体的磨损率为 $7.80 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,Ni60A 熔覆层的磨损率为 $2.01 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,

约为基体磨损率的 25.77%,Ni60CuMo 熔覆层的磨损率为 $3.30 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,仅为基体磨损率的 4.23%。与 TC4 基体相比,两种熔覆层中含有金属间化合物和硬质相,金属间化合物原子结合力很强,硬度高,能有效抵抗磨损,而且生成硬质相的弥散强化,润滑性较好,能够有效提高熔覆层的耐磨性。

对比发现,Ni60A 和 Ni60CuMo 熔覆层的磨损率与摩擦因数变化趋势相反,这是因为在 Ni60CuMo 熔覆层中添加 Cu 和 Mo 元素后,形成了 $\text{Cu}_{0.81}\text{Ni}_{0.19}$ 、 Ti_2Cu 、 MoSi_2 等硬质相,硬度明显提升。虽然 Ni60A 熔覆层的摩擦因数较 Ni60CuMo 低,但是 Ni60A 熔覆层硬度低,被磨损的面积大,磨损率高。因此 Ni60CuMo

熔覆层的耐磨性更好。

由图 6d~图 6f 可知,在钛合金基体的磨痕中形成明显犁沟并伴随白色的剥离边缘,同时还存在少量不均匀分布的磨屑和塑性变形,磨损机理主要为磨粒磨损和塑性变形。Ni60A 涂层的磨痕中产生犁沟现象但并无磨屑分布,与硬度较低的钛合金基体材料相比其犁沟深度更浅,塑性变形小,磨损机理为较小的塑性变形和粘着磨损。添加 Cu 和 Mo 元素之后,在涂层中形成固溶强化、硬质强化,使涂层表面硬度显著提升,且弥散强化效果能有效提高熔覆层表面的润滑性。Ni60CuMo 熔覆层的磨痕中无犁沟存在,有鱼鳞状的切屑附着于表面。这是因为 Ni60CuMo 熔覆层表面存在不同的硬质相,硬度较高,在磨损过程中少量的凸起物与摩擦副表面接触,在力的作用下形成鱼鳞状切屑。在磨损过程中,摩擦副表面的材料发生明显转移,推断此涂层的磨损机理为粘着磨损。

3 结 论

(1)采用相同的激光熔覆工艺参数,添加 Cu、Mo 元素后,Ni60CuMo 熔覆层具有更高的显微硬度($822\text{ HV}_{0.1}$),明显高于 Ni60A 涂层($676\text{ HV}_{0.1}$)和 TC4 钛合金基体($300\text{ HV}_{0.1}$)的。

(2)Ni60CuMo 熔覆层的耐磨性更好,熔覆层的磨损率为 $3.3 \times 10^{-6}\text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,是 Ni60A 熔覆层磨损率 [$2.01 \times 10^{-5}\text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$] 的 16.42%,是基体磨损率的 4.23%。

(3)钛合金基体的磨损机理为磨粒磨损和塑性变形,Ni60A 熔覆层的磨损机理为粘着磨损,Ni60CuMo 熔覆层的磨损机理为较小的塑性变形和粘着磨损。综上,Cu、Mo 元素的添加对提高熔覆层显微硬度和耐磨性有很好的作用。

参 考 文 献

- [1] 郝芳,辛社伟,毛友川,等.钛合金在装甲领域的应用综述[J].材料导报,2020,34(1):293-327.
- [2] 刘全明,张朝晖,刘世锋,等.钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J].钢铁研究学报,2015,27(3):1-4.
- [3] 唐洋洋,袁守谦,杨潘,等.激光熔覆对钛合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(11):1204-1207.
- [4] 李崇桂,王斌,潘斌,等.钛合金表面改性技术研究进展[J].热加工工艺,2015,44(16):22-25.
- [5] 董凯辉,宋影伟,韩恩厚.钛合金耐磨微弧氧化制备技术的研究进展[J].表面技术,2021,50(7):57-65.
- [6] 冯秋元,郭佳林,李蒙,等.钛合金电镀铬研究现状及应用[J].材料保护,2018,51(10):109-113.
- [7] 付颖,张艳,包星宇,等.钛合金表面耐磨涂层研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2018,38(2):117-123.
- [8] 赵晖,王宝婷,杜春燕,等.TC4 钛合金表面改性技术研究进展[J].

- 沈阳理工大学学报,2017,36(2):74-77.
- [9] 谢发勤,何鹏,吴向清,等.钛合金表面激光熔覆技术的研究及展望[J].稀有金属材料与工程,2022,51(4):1514-1524.
- [10] MAJUMDAR J D, GALUN R, MORDIKE B L, et al. Effect of laser surface melting on corrosion and wear resistance of a commercial magnesium alloy[J]. Mater. Sci. Eng., 2003, 361(12): 119-129.
- [11] ZHU L D, XUE P S, LAN Q, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [12] 赵晖,孙旭,杜春燕,等.TC4 合金表面激光熔覆材料研究进展[J].沈阳理工大学学报,2022,41(1):31-37.
- [13] 谭金花,孙荣禄,牛伟,等.TC4 合金激光熔覆材料的研究现状[J].材料导报,2020,34(8):15132-15137.
- [14] 刘家奇,宋明磊,陈传忠,等.钛合金表面激光熔覆技术研究进展[J].金属热处理,2019,44(5):87-96.
- [15] LI W Y, YANG X F, XIAO J P, et al. Effect of WC mass fraction on the microstructure and friction properties of WC/Ni60 laser cladding layer of brake discs[J]. Ceramics International, 2021, 47: 28754-28763.
- [16] 张磊,陈小明,刘伟,等.激光熔覆 Ni 基合金裂纹的形成机理及敏感性[J].激光与光电子学进展,2019,56(11):111401.
- [17] 张佳虹,孙荣禄.激光熔覆 Ni 基复合涂层气孔及裂纹敏感性的研究[J].热加工工艺,2015,44(4):141-144.
- [18] 臧春城,王延忠,张以都,等.激光熔覆 Ni60+35WC-Ni 涂层的显微组织和摩擦磨损特性[J].稀有金属,2015,39(5):385-391.
- [19] 赵盛举,祁文军,黄艳华,等.TC4 表面激光熔覆 Ni60 基涂层温度场热循环特性数值模拟研究[J].表面技术,2020,49(2):301-308.
- [20] 申泽慧,孙荣禄.钛合金表面激光熔覆镍基涂层质量分析[J].热加工工艺,2015,44(4):161-164.
- [21] LU X L, LIU X B, YU P C, et al. Synthesis and characterization of Ni60-hBN high temperature self-lubricating anti-wear composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 87-94.
- [22] LI Y J, DONG S Y, LIU X T, et al. Interface phase evolution during laser cladding of Ni-Cu alloy on nodular cast iron by powder pre-placed method[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106684.
- [23] 董江,刘芳,陈岁元,等.铜板上激光熔覆制备 Co-Ni-Cu 梯度涂层[J].东北大学学报(自然科学版),2008,29(11):1581-1584.
- [24] 张野,王文权,徐红勇.Mo 对等离子喷焊 Ni60A 涂层组织与性能的影响[J].材料热处理学报,2016,37(7):185-190.
- [25] 侯清宇,何宜柱,高甲生.等离子熔覆 Mo/Ni 基合金涂层的组织结构及耐磨性能[J].中国有色金属学报,2006,16(9):1595-1602.
- [26] 上官芸娟,吴巧荣,宋瑞宏,等.激光功率对 Ni60A 合金熔覆层组织、显微硬度及耐磨性的影响[J].工业技术创新,2021,8(5):24-29.
- [27] 刘亚楠,孙荣禄,牛伟,等.扫描速度对 Ti811 合金激光熔覆涂层组织与性能的影响[J].表面技术,2018,47(12):134-141.
- [28] 杨丹,宁玉恒,赵宇光,等.工艺参数对 304 不锈钢表面激光熔覆 Ni 基合金涂层的组织、耐磨性及耐腐蚀性的影响[J].材料导报,2017,31(12):133-140.

(编辑:刘晨辉)