

TiNi 记忆合金电子束熔覆层的组织性能研究

温涛涛¹, 陈玉华¹, 孙国栋², 刘长华²

(1. 南昌航空大学 焊接工程系, 南昌 330063; 2. 九江学院 机械与材料学院, 江西 九江 332005)

摘要: 目的 利用电子束熔覆技术将 TiNi 记忆合金熔覆在 TC4 的表面, 开展熔覆层耐磨性能研究, 以此来改变材料的表面性能, 达到实际应用的要求。方法 通过 SEM、EDS、维氏显微硬度计和摩擦磨损试验机, 对熔覆层的宏观形貌、显微组织、元素分布、显微硬度以及摩擦磨损性能等进行测试分析。结果 制备出的熔覆层表面成形良好、无气孔、无裂纹, 并且与基体实现了良好的冶金结合。熔覆层由表及里的硬度升高, 其值最高可达 HV625, 较 TC4 母材(HV350)的硬度有明显的提高。通过磨损试验曲线表明, TiNi 合金熔覆层和 TC4 基材稳定后的平均摩擦因数为 0.052 和 0.169, 比磨损率为 0.96×10^{-4} 和 $2.28 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。结论 TiNi 熔覆层的耐磨性能较 TC4 基材的耐磨性能显著增强, 可以达到减磨的效果。

关键词: TiNi 合金; 电子束熔覆; 显微组织; 耐磨性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2018.05.021

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2018)05-0125-07

Microstructure and Properties of Electron Beam Cladding Layer of TiNi Shape Memory Alloy

WEN Tao-tao¹, CHEN Yu-hua¹, SUN Guo-dong², LIU Chang-hua²

(1. Department of Welding Engineering, Nanchang HangKong University, Nanchang 330063, China;

2. Institute of Machinery and Materials, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China)

ABSTRACT: The paper aims to clad NiTi memory alloy onto the surface of TC4 with electron beam cladding technology to study wear resistance of the cladding layer to change the surface properties of the material and meet the requirements on actual application. SEM, EDS, Vickers microhardness tester and friction and wear tester were used to test the macroscopic morphology, microstructure, element distribution, microhardness and friction and wear property of the cladding layer. The surface of the cladding layer was well-formed without pore, no crack, and it achieved a good metallurgical bond with the substrate. The hardness of the cladding layer increased from the surface to the inside, and its value was up to HV625, which was significantly higher than that of the TC4 base metal (HV350). The test curve chart showed that the average friction coefficient of the TiNi alloy solder layer and TC4 substrate after stabilization was 0.052 and 0.169, and the wear rate was $0.96 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ and $2.28 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$. The wear resistance of TiNi alloy cladding layer is significantly higher than that of the TC4 substrate, and the wear reduction effect can be achieved.

KEY WORDS: TiNi memory alloy; electron beam cladding; microstructure; wear resistance

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51565040); 江西省教育厅科技落地计划(科学前沿)(KJLD14055); 江西省青年科学家培养计划(20153BCB23038)

作者简介: 温涛涛(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新材料及异种材料的连接。

通讯作者: 陈玉华(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新材料及异种材料焊接、电弧增材制造等。

TC4 钛合金是使用量最多的钛合金,以其良好的生物相容性、优越的抗腐蚀性、高的比强度等性能广泛应用于航空航天、生物医疗、汽车等行业,并以逐年增加的趋势应用于工业中,成为现代化制造业不可或缺的材料^[1-2]。钛合金在使用过程中存在摩擦因数大、耐磨性差、易粘着、高温抗氧化性能低、润滑性差等缺点,大大降低了其使用性能,从而限制了其应用范围^[3-5],因而如何提高钛合金的耐磨性是许多材料工作者所关注的问题^[6]。TiNi 合金是一种新型材料,以其优良的形状记忆效应、超弹性、耐磨性、阻尼性、良好的综合力学性能等广泛应用于航空航天、医疗器械、仪器仪表、核工业、家电等行业,是使用最广泛的一种形状记忆合金^[7-8]。电子束表面熔覆技术已经成为当前的研究热点,其能量密度高、加工速度快、功率参数可控性好和绿色环保等优点广泛应用于各个领域^[9],电子束熔丝熔覆技术是利用电子束作为热源,在真空的条件下,将金属丝材从一侧送入,在聚焦的电子束流的作用下,在基材上形成熔池。同

时随着基材的移动来实现材料的层层堆积,最终实现在基材上的熔覆技术。与其他的熔覆方法相比,其有许多的优点:① 真空环境,保护效果好,不易有杂质渗入,能获得良好的成形质量;② 消耗低、少污染、高效节能;③ 金属丝材熔化效率高,焊后容易清洁;④ 能够快速熔覆,适用于尺寸大的金属构件的高效率制造。以退火态 TC4 钛合金作为基材, TiNi 合金作为熔丝,进行了电子束熔覆实验。利用光学显微镜、扫描电镜和能谱仪分析了熔覆层的显微组织、成分及其界面结合情况,并且对 TiNi 合金熔覆层的显微硬度和磨损性能进行了测试。

1 条件及方法

试验材料是以退火态 TC4 为基材,规格为 100 mm×20 mm×16 mm,其化学成分见表 1。将 $\Phi 0.8$ mm 的 TiNi 记忆合金丝材利用电子束熔覆在 TC4 表面,其化学成分见表 2。

表 1 TC4 钛合金化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (mass fraction)

Al	V	Fe	O	Si	C	N	H	其他	Ti
6.17	4.08	0.30	0.20	0.15	0.10	0.05	0.015	<0.4	余量

表 2 TiNi 形状记忆合金的化学成分(质量分数)

Tab.2 Chemical composition of TiNi shape memory alloy (mass fraction)

Ti	Ni	Mn	Fe	Si
43.58	56.4	0.01	0.005	0.005

采用的真空电子束焊机的型号是 KS15-PN150KM 型,焊前用砂纸将 TC4 基材待熔覆表面的氧化膜打磨掉。并用丙酮、酒精依次擦拭打磨后的基材表面。擦拭干净后将其装夹在夹具上放入真空室,待真空抽取结束后,进行表面熔覆。电子束工艺参数:熔覆时,电子束流 I_b 为 10 mA,送丝速度 v_f 为 20 m/s,基板移动的速度 v_s 为 240 mm/min。

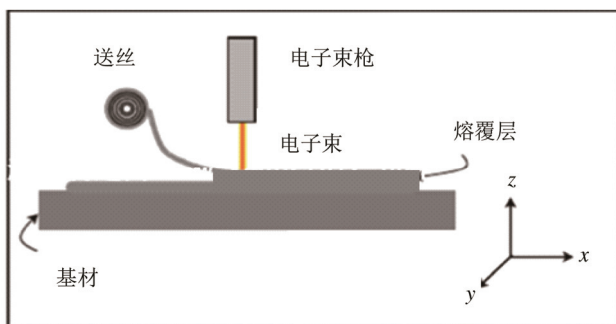


图 1 电子束熔覆原理

Fig.1 Schematic diagram of electron beam cladding

将电子束熔覆实验后得到的试样用线切割沿横截面切开,并进行打磨和抛光。用比例为 HF:HNO₃:H₂O=1:3:7 的腐蚀液对试样进行腐蚀,腐蚀时间为 10 s。将腐蚀后的试样置于 4XB-TV 型倒置金相显微镜,观察不同区域的组织,并采用带有 EDS 能谱仪的 S-3400N 扫描电镜对试样进行组织形貌观察分析,并测试成分;采用 401MVD 型显微硬度计测量熔覆层和基体的显微硬度,加载力为 200 g,加载时间为 10 s,试样的测试点之间的距离为 0.1 mm。

采用 CFT-1 显微磨损试验机对 10 层熔覆层的 TiNi 熔覆层和 TC4 基材分别进行摩擦磨损性能测试,加载载荷 3 N,试验时间为 20 min,转速为 600 r/min,旋转半径为 3 mm,摩擦副为 HV2200 的 Si₃N₄ 陶瓷球。用 sartorius 五位天平分别对试样进行质量称取,得到磨损量 Δm 。比磨损率 $K=V/(FS)$,单位为 mm³/(N·m),其中 $V=2\pi rA$,单位为 mm³, A (mm²)为轮廓面积,采用绘图软件积分计算得出, S 为滑动距离,磨痕轨迹的横截面轮廓采用 JB-6C 型粗糙度轮廓仪进行测量,轮廓面积 A (mm²)通过 Origin 绘图软件积分计算得出, r (mm)为磨痕轨道半径, F (N)表示载荷。试样摩擦因数则由试验机自动获取,摩擦后利用 JB-6C 型粗糙度轮廓仪测量磨痕剖面的轮廓,并采用 4XB-TV 型倒置金相显微镜对试样表面磨损形貌进行观察。

2 结果及分析

2.1 显微组织分析

采用上述试验参数得到表面成形良好、无气孔、宏观裂纹的熔覆层,其宏观形貌见图 2。

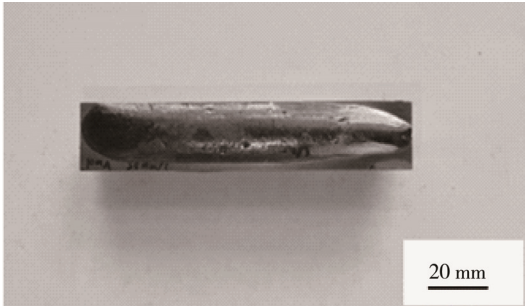
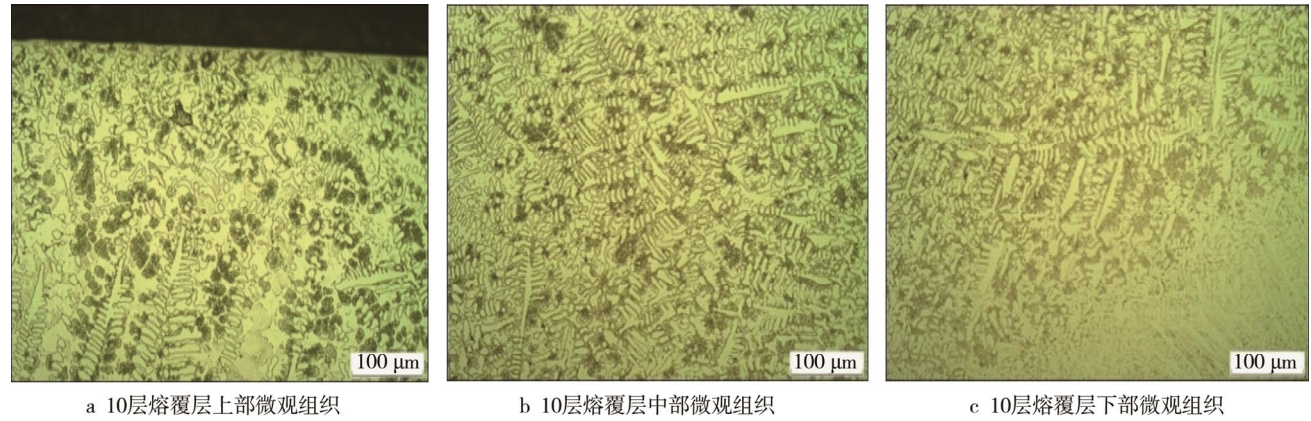


图 2 电子束熔覆的宏观形貌
Fig.2 Macroscopic topography of electron beam cladding

熔覆 10 层的熔覆层微观组织演变过程见图 3,从图 3 中的 a, b, c 可以看出,熔覆层主要以初 α 树枝晶为主,且分布均匀,同时还分布着黑色团簇状共晶体。由图 3a 可以看出,熔覆层表面的组织为块状组织,再往其下的组织是较为粗大的初生 α 树枝晶,在其表面还分布着较多的黑色团簇状共晶体。由图 4 的熔覆层熔合线附近的 EDS 能谱可知,距熔覆层表面越深,其 Ti 元素的含量越多,而 Ni 元素的含量减少。根据 Ti-Ni 合金图(见图 5)可知,在高温下更容易形成 TiNi_3 ,而熔覆层的表层更靠近热源,所以推断该黑色团簇状共晶体是 TiNi_3 和 TiNi 。从图 3b 可知,该区域的组织为粗大的树枝晶和块状的组织,且分布均匀,同样分布着黑色团簇状共晶体,但数量没有图 3a 的多。图 3c 中的组织是树枝晶和块状组织,分布没有图 3b 密集,还有较多的浅灰色相。



a 10层熔覆层上部微观组织 b 10层熔覆层中部微观组织 c 10层熔覆层下部微观组织

图 3 熔覆层微观组织演变
Fig.3 Microstructure evolution of the cladding layer

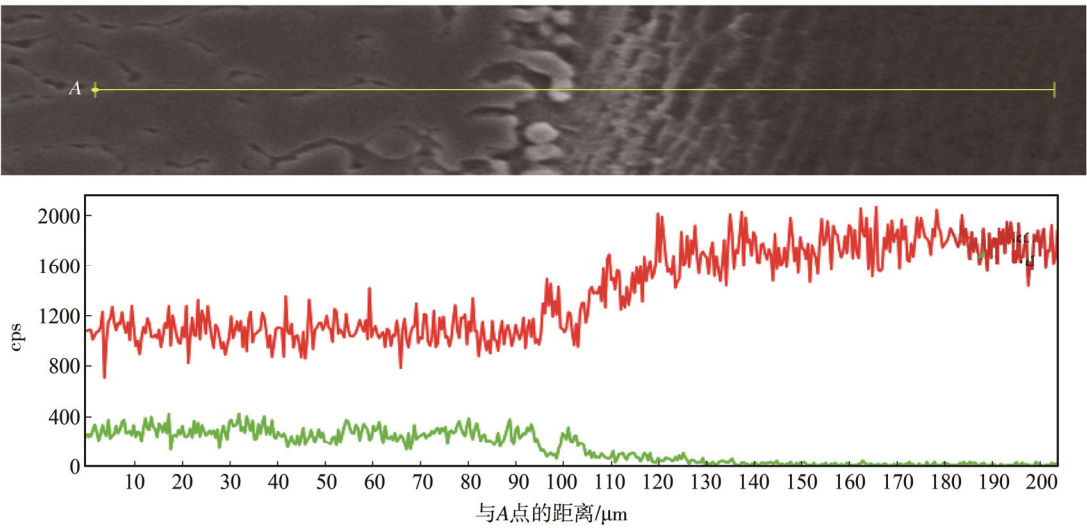


图 4 10 层熔覆熔合线附近的 EDS 能谱
Fig.4 EDS spectrum near the ten-layer cladding fusion line

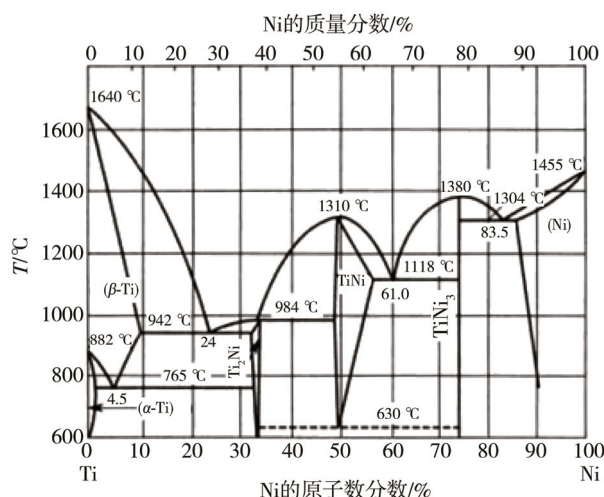


图5 Ti-Ni合金相图

Fig.5 Phase diagram of Ti-Ni alloy

熔覆的熔合线区域的微观组织见图6。可以看出,在熔合线的上部分是由细小的树枝晶和块状组织组成,树枝晶的主轴与熔池的底部大致垂直,呈联生结晶特征。下部分是热影响区,其组织是集束状的魏氏组织。在结合处是一条黑色带状。通过图7熔覆熔合线处的扫描电镜可以看出,熔覆层组织均匀、连续、致密,无裂纹等缺陷。结合处是一条银白色的带状,说明熔覆层与基体形成良好的冶金结合。

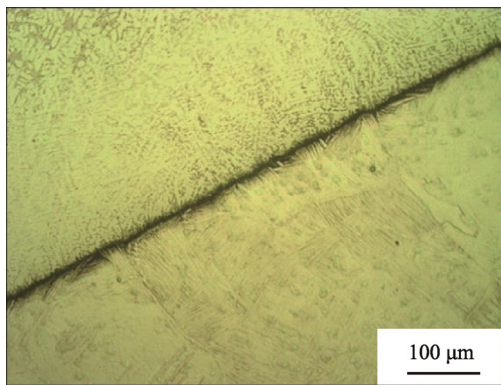


图6 10层熔覆熔合线处的微观组织

Fig.6 Microstructure of ten-layer cladding fusion line

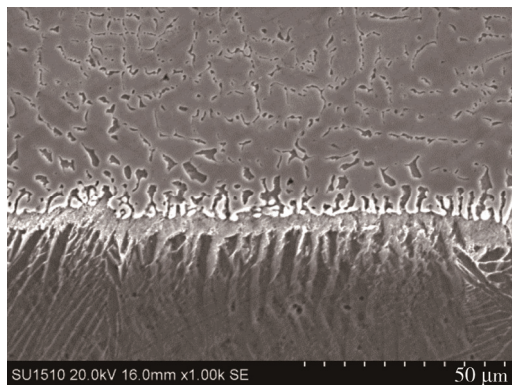


图7 熔覆层熔合线处的SEM

Fig.7 SEM image for fusion line of cladding layer

10层熔覆的扫描电镜图见图8,可以看出熔合线附近的元素分布情况。分别测试了4个点的元素分布情况,即谱图1、谱图2、谱图3、谱图4这4点,这4点各元素的原子数分数见表3。由谱图1可以看出,Ti和Ni的原子数分数分别是65.73%和34.37%,Ti含量大约是Ni含量的2倍,其元素比符合 Ti_2Ni 原子比例。由谱图2、谱图3和谱图4可知,Ni含量逐渐减少,到了熔合线以下(谱图3),没有Ni的含量。这是因为电子束成形速度快,冷却速度也快,熔覆层中Ni来不及扩散,使得熔合线以下没有Ni。

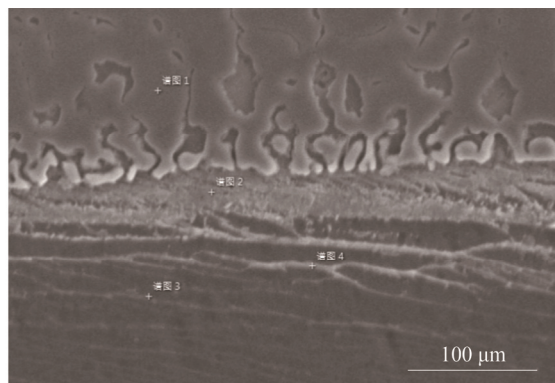


图8 10层熔覆的扫描电镜

Fig.8 Scanning electron micrograph of ten-layer cladding

表3 各点的元素的原子数分数

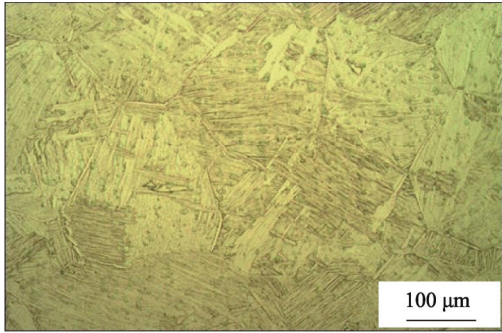
Tab.3 Atomic fraction of elements at each point %

元素	谱图1	谱图2	谱图3	谱图4
Ti	65.73	91.12	100	98.46
Ni	34.27	8.88		1.54

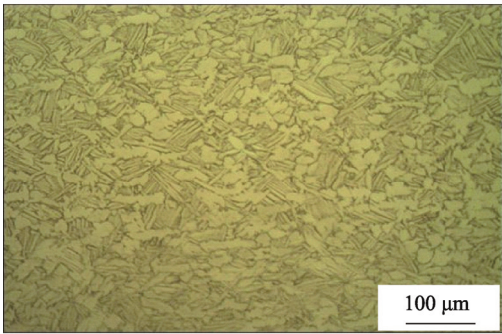
熔覆层的热影响区见图9。图9a是热影响区中部,形成了大量的集束状的魏氏体 α 相和 β 相组织。形成大量的魏氏组织是因为冷却速度过快所造成的。魏氏体对组织有一定的危害,会使塑性和冲击韧性显著降低,也会使脆性转折温度升高,引起强度降低,可以通过正火的方法将其消除。图9b是热影响区下部分,该部分是由双态组织,由等轴初生 α 相和片层状 β 转变组织组成。

2.2 电子束熔覆层的显微硬度

电子束熔覆10层时熔覆层的硬度分布见图10。在 $TiNi$ 熔覆层中,其硬度随着距熔覆层表面深度的增加而增大。熔覆层中上部的硬度大约是HV454,而在熔覆层中下部的硬度则达到HV625。这是因为在电子束熔覆过程中,熔合区金属硬度较母材急剧升高,这与金属间化合物的生成有关^[10-11],Ti-Ni脆性金属间化合物较硬,分布在熔覆层中可使熔覆层硬度增加,硬度会随着脆性化合物的增多而增大。熔覆过程中处于熔合线附近的液态金属相对于熔覆层其他位



a 热影响区中部微观组织



b 热影响区下部微观组织

图 9 熔覆层的热影响区微观组织
Fig.9 Micro-structure of heat affected zone of ten-layer cladding

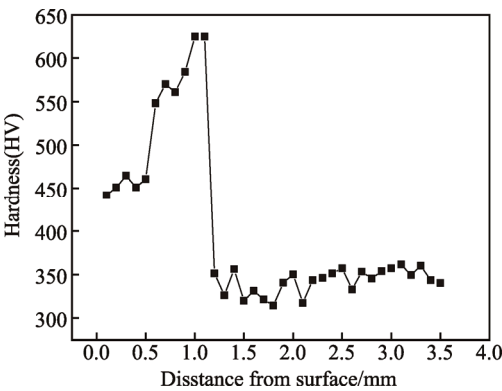


图 10 熔覆层硬度分布
Fig.10 Cladding hardness distribution

置有较低的流速，并在此环境下形核结晶。而熔池中其他位置的金属液流动相对剧烈，并由于电子束流的搅拌作用使其搅动均匀，从而使熔覆层在结晶过程中对 Ti-Ni 脆性金属间化合物的形成起到阻碍作用，脆性相含量的减少使硬度降低，而 TC4 母材的平均硬度约为 HV350，相比较于热影响区的硬度稍高。

2.3 电子束熔覆层的摩擦磨损性能

TiNi 熔覆层与 TC4 基材的摩擦因数曲线见图 11。可以看出，试验刚开始阶段，不管是 TC4 基材还是 TiNi 熔覆层，曲线都有很大的波动，摩擦因数很高。这是因为在载荷 300 g 的作用下，磨球 Si₃N₄ 和合金材料的表面产生了挤压并且发生粘着。在摩擦磨损试验机启动的时候，需要克服较高的变形和粘着阻力。随后，摩擦因数下降。这是因为基材和熔覆层的表面进行一段时间的磨合，消除了合金表面的凹坑等。在 3 min 后，曲线趋于稳定。稳定后，TC4 基材的平均摩擦因数约为 0.169，磨损量为 0.7 mg，比磨损率为 2.28×10^{-4} mm³/(N·m)；TiNi 熔覆层的平均摩擦因数约为 0.052，磨损量为 0.42 mg；平均摩擦因数下降了 69.2%，磨损量下降了 40%；其比磨损率为 0.96×10^{-4} mm³/(N·m)，试样磨损结果见表 4。

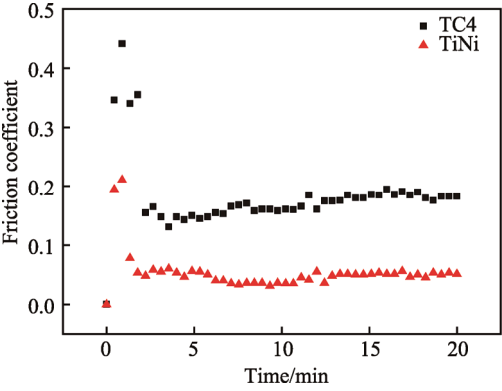


图 11 熔覆层/TC4 基材磨损系数
Fig.11 Cladding layer / TC4 substrate wear coefficient

表 4 试样磨损结果
Tab.4 Wear results of sample

参数	磨痕半径/ (r·mm ⁻¹)	磨痕剖面面积 A(×10 ⁻⁴)/mm ²	磨损体积 V/mm ³	载荷 P/N	滑动距离 S/m	比磨损率K(×10 ⁻⁴)/ (mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)
TC4基材	3	82.08	2πrA	3	2πr×600×20	2.28
TiNi熔覆层	3	34.56	2πrA	3	2πr×600×20	0.96

由此可见，TiNi 熔覆层的耐磨性较 TC4 基材的耐磨性有了明显提高。分析认为，这种结果与电子束熔覆所得的熔覆层的组织和化学成分有关。TiNi 合金本身就具有较高的耐磨性，在经过电子束熔覆技术后，TC4 基材上形成组织均匀、连续、无气孔以及良好冶金结合的 TiNi 熔覆层，并且由于熔覆层中有 Ni

元素的加入，电子束熔覆后会形成高韧性的 TiNi 和 Ti₂Ni 金属化合物，所以电子束熔覆层的耐磨性与 TC4 相比有较明显的提高。熔覆层磨痕形貌见图 12，12a 和 12b 分别是 TC4 基材和 TiNi 熔覆层磨痕形貌。根据大量文献[12—15]可知，TC4 钛合金的磨损主要是磨粒磨损、粘着磨损以及氧化磨损共同作用的

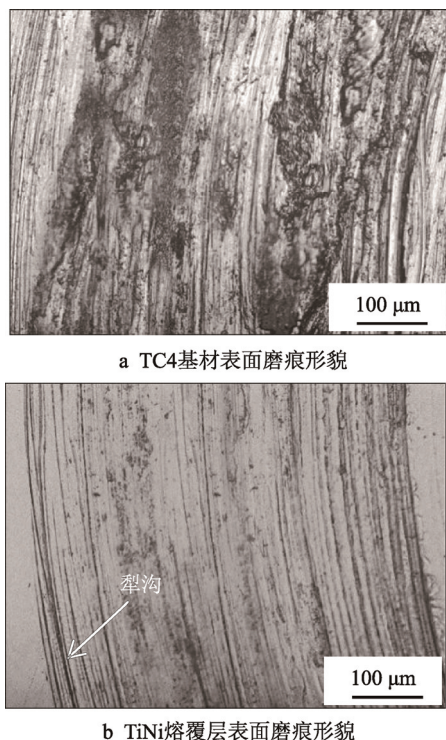


图 12 熔覆层磨痕形貌

Fig.12 Profile for wear traces of cladding layer

结果。从图 12a 可以看出, TC4 基材的磨痕宽而深, 并伴随严重的粘着剥落和犁沟。这是因为磨球与 TC4 基材表面的相互接触而产生很高的剪切应力, 并且使得 TC4 基材产生塑性流动和严重的撕裂特征, 导致材料表面的磨损。从图 12b 可以看出, TiNi 熔覆层的磨痕宽度及深度较 TC4 基材的小, 这是由于电子束熔覆层具有高的硬度和良好的耐磨性。由图 12 可以观察到, 两者的磨损表面都有着由磨粒犁削产生的沟槽, 只不过 TC4 基材的深度较深, 犁沟严重。试验中 TC4 基材和 TiNi 熔覆层的磨损形式都有磨粒磨损, 而 TC4 基材表面的磨痕中犁沟和粘着共存, 犁沟深而明显, 粘着以局部擦伤的形式存在, 伴有粘着磨损。两者在磨损的过程中, 表面均有黑色的磨削产生, TiNi 熔覆层的磨削较 TC4 基材的磨削少。磨削发黑的原因主要是在进行磨损试验过程中, 摩擦产生的热量使磨削发生氧化, 生成脆性大的氧化钛, 加速了磨损的发生, 所以 TiNi 熔覆层比 TC4 基材更加耐磨, 耐磨性有明显的提高。这是因为 TiNi 熔覆层中生成了弥散分布的 Ti_2Ni 相, 而 Ti_2Ni 相有着较高的硬度。同时 TiNi 相也具有良好的韧性和延展性, 在磨损试验中可以发挥其超弹性的特性。

3 结论

1) 在加速电压为 60 kV、电子束流为 10 mA、送丝速度为 20 m/s、基板移动速度为 240 mm/min 的真空电子束熔覆条件下所得的熔覆层成形良好, 并

且与基体实现了良好的冶金结合。熔覆层的组织主要是以树枝晶为主, 并且含有大量的 Ti-Ni 脆性金属间化合物。

2) 在熔覆过程中, 由于生成了 Ti-Ni 脆性金属间化合物, 使熔覆层最高硬度值可达 HV625, 明显高于 TC4 母材(HV350)。熔覆层由表到里硬度逐渐升高, 分析认为, 熔覆过程中处于熔合线附近的液态金属相对于熔覆层其他位置有较低的流速, 并在此环境下形核结晶, 脆性相含量增多。

3) TC4 基材和 TiNi 熔覆层的比磨损率分别是 2.28×10^{-4} 和 $0.96 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, TiNi 熔覆层较 TC4 基材的比磨损率降低了 57.9%; 其稳定后 TC4 基材和 TiNi 熔覆层的平均摩擦因数分别是 0.169 和 0.052, 平均摩擦因数下降了 69.2%; 在室温干摩擦磨损的条件下, TC4 钛合金发生了较严重的粘着磨损, 出现了较深的犁沟以及撕裂, 而 TiNi 熔覆层发生了程度比 TC4 钛合金轻的粘着磨损, 出现了较浅而窄的犁沟。由此可见, TiNi 熔覆层的耐磨性明显较 TC4 基材的耐磨性好, 可以实现减磨的作用。

参考文献:

- [1] YAN M Q, LI K, WANG Y H, et al. Influence of Upsetting and Drawing Times on the Microstructure and Microtexture of TC4 Titanium Alloy[J]. Materials Science Forum, 2016, 849: 317—320.
- [2] LIU H, SUN Y, GENG Y, et al. Experimental Research of Milling Force and Surface Quality for TC4 Titanium Alloy of Micro-milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(3): 705—716.
- [3] 郭凯. 钛合金 TC11 等离子表面渗 Mo 的摩擦磨损性能[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
GUO Kai. Friction and Wear Properties of Titanium Surface TC11 Plasma Mo[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [4] 吴宏亮. 钛合金表面等离子碳氮化工艺及性能研[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
WU Hong-liang. Research on the Technology and Performance of Plasma Carbonitriding on Titanium Alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [5] 菅丽娜, 张凌云, 于荣莉, 等. 钛合金表面激光熔敷 $Cr_{13}Ni_5Si_2$ 基金属硅化物涂层组织与耐磨性[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(6): 936—939.
JIAN Li-na, ZHANG Ling-yun, YU Rong-li, et al. Microstructure and Wear Resistance of Laser Clad $Cr_{13}Ni_5Si_2$ Base Metal Silicide Coating on Surface of Titanium Alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(6): 936—939.
- [6] 孙荣禄, 郭立新, 董尚利, 等. 钛合金表面激光熔覆 NiCrBSi-TiC 复合涂层的研究[J]. 中国激光, 2001,

- 28(3): 275—278.
- SUN Rong-lu, GUO Li-xin, DONG Shang-li, et al. Laser Cladding of NiCrBSi-TiC Composite Coating on Titanium Alloy Surface[J]. China Laser, 2001, 28(3): 275—278.
- [7] DONG J, CAI C S, OKEIL A M. Overview of Potential and Existing Applications of Shape Memory Alloys in Bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(2): 305—315.
- [8] HARTL D, LAGOUDAS D C. Aerospace Applications of Shape Memory Alloys[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part G, 2007, 221(4): 535—552.
- [9] 张国培, 刘海浪, 黄以平, 等. 基于电子束的材料表面熔覆技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(2): 27—30.
- ZHANG Guo-pei, LIU Hai-lang, HUANG Yi-ping, et al. Research Progress on Surface Cladding Technology Based on Electron Beam[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(2): 27—30.
- [10] SONG P, ZHU Y, GUO W, et al. Mechanism of Crack Formation in the Laser Welded Joint Between NiTi Shape Memory Alloy and TC4[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(S2): 6—9.
- [11] CHEN Y, MAO Y, LU W, et al. Investigation of Welding Crack in Micro Laser Welded NiTiNb Shape Memory Alloy and Ti6Al4V Alloy Dissimilar Metals Joints[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91: 197—202.
- [12] 孙明. 激光制备 WC 及原位 TiC 陶瓷增强复相涂层[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007.
- SUN Ming. Laser Preparation of WC and In-situ TiC Ceramic Reinforced Duplex Coatings[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2007.
- [13] 高焕明, 陈超英. 激光熔覆 TiC-Ni 复合涂层的摩擦磨损性能和磨损机制研究[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 546—548.
- GAO Huan-ming, CHEN Chao-ying. Study on Friction and Wear Properties and Wear Mechanism of Laser Cladding TiC-Ni Composite Coatings[J]. Optics and Optical Engineering, 2009, 35(4): 546—548.
- [14] 刘丹. TC4 钛合金表面激光熔覆复合涂层及耐磨性能研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- LIU Dan. Study on Laser Cladding Composite Coating and Wear Resistance of TC4 Titanium Alloy[D]. Hengyang: Nanhua University, 2015.
- [15] 魏增敏, 张永忠, 高士友, 等. 激光快速成形技术的发展及其在功能梯度材料制备上的应用[J]. 材料导报, 2005, 19(5): 77—80.
- WEI Zeng-min, ZHANG Yong-zhong, GAO Shi-you, et al. Development of Laser Rapid Prototyping Technology and Its Application in the Preparation of Functionally Graded Materials[J]. Materials Review, 2005, 19(5): 77—80.