

文章编号: 1001-3806(2022)04-0551-05

TC4 表面激光熔覆 Fe60-TiO₂ 涂层性能研究

龚美美¹, 谢林圻¹, 吴 腾¹, 师文庆^{1*}, 黄 江¹, 谢玉萍¹, 何宽芳²

(1. 广东海洋大学 电子与信息工程学院, 湛江 524088; 2. 佛山科学技术学院 机电工程与自动化学院, 佛山 528225)

摘要: 为了提高 TC4 合金表面的硬度和减磨性、优化工艺参数, 采用多组工艺参数(不同功率、不同 TiO₂ 粉末含量)在 TC4 板表面制备不同比例的 Fe60-TiO₂ 复合涂层, 分析了熔覆层宏观形貌、表面维氏硬度和减磨性。结果表明, 当激光功率为 500W、TiO₂ 质量分数为 0.10 时, 熔覆层表面较平整; 通过 X 射线衍射分析熔覆层生成较多 Ti 化合物, 这些 Ti 化合物对提高熔覆层硬度和减磨性非常有利; 熔覆层硬度比基体提高了约 2.5 倍; 摩擦系数较基体相比有所降低, 熔覆层的平均摩擦系数约为 0.46。此研究结果对 TC4 钛合金表面熔覆 Fe 基复合涂层的硬度和减磨性工艺参数有一定指导作用。

关键词: 激光技术; 减磨性; 硬度; TC4 钛合金

中图分类号: TG156.99 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.04.018

Study on the properties of laser cladding Fe60-TiO₂ coating on TC4 surface

GONG Meimei¹, XIE Linyi¹, WU Teng¹, SHI Wenqing¹, HUANG Jiang¹, XIE Yuping¹, HE Kuanfang²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528225, China)

Abstract: In order to improve the surface hardness and wear reduction of TC4 alloy, Fe60-TiO₂ composite coatings with different proportions were prepared on the surface of TC4 plate by using several groups of process parameters (different power and different TiO₂ powder content). The macroscopic morphology, surface Vickers hardness, and wear reduction property of the cladding layer were analyzed. The results show that when the laser power is 500W and the mass fraction of TiO₂ is 0.10, the surface of the cladding layer is smooth. According to the X-ray diffraction analysis, many Ti compounds are formed in the cladding layer, which is very beneficial to improve the hardness and wear reduction of the cladding layer. The hardness of the cladding layer is about 2.5 times higher than that of the substrate. The average friction coefficient of the cladding layer is about 0.46. The results have a certain guiding effect on the hardness and wear reduction process parameters of Fe based composite coating on TC4 titanium alloy surface.

Key words: laser technique; antifricition sex; hardness; TC4 titanium alloy

引 言

激光熔覆技术作为近年来表面改性的研究热点, 具有基体变形小、效率高、易于基体形成冶金结合等优点^[1-2]。TC4 合金具有耐热性强、耐腐蚀性好、比强度高优点, 被广泛应用于航空航天、国防、汽车以及海

洋等工业领域(发动机零件、凸轮轴、紧固件、阀门等), 但是其减磨性能和硬度较差^[3-5]。因此, 利用激光技术改善 TC4 合金减磨性, 提高表面硬度对拓宽其应用范围有重要意义, 这也成为了该材料研究领域的热点之一^[6-7]。Fe60 粉末具有硬度高、抗氧化、成本低以及良好的减磨性等诸多优点^[8-10], 又由于激光熔覆过程是一个冶金结合的过程, 熔覆层表面难免存在气孔、裂纹等缺陷。因此加入 TiO₂ 陶瓷粉末可以有效减少裂纹、气孔等缺陷^[11-12]。

YI 等人^[13]在 TC4 表面熔覆 WC, Ni, Si 的涂层, 涂层物相主要由 α -Ti, Ti₅Si₃, WC 和 TiNi 组成, 涂层硬度可达 950HV, 平均摩擦因数为 0.2。ZHANG 等人^[14]在 TC4 表面熔覆 Ni60A 粉末, 耐磨性和力学性能均有

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073089); 广东省普通高校重点领域专项项目(2020ZDZX2061); 湛江市创新创业团队引导“领航计划”资助项目(2020LHJH003)

作者简介: 龚美美(1995-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光加工及应用。

* 通讯联系人。E-mail: swqafj@163.com

收稿日期: 2021-04-23; 收到修改稿日期: 2021-05-11

提高,硬度提高了近1倍。LIU等人^[15]TC4钛合金表面熔覆TiC、TiB₂与Ni的混合粉,熔覆层显微硬度最高可达863HV,为基体的2.5倍,熔覆层减磨性能较TC4钛合金明显提高。XIA等人^[16]在TC4基体制备添加不同质量分数的TiC的Ni60复合熔覆层,硬度和减磨性均有提高。

近年来,随着我国农业现代化的发展,深松铲的使用正在逐步增多。传统的深松铲材料多是蠕墨铸铁,但因其耐腐蚀性能差,不适用于沿海地区。而TC4具有耐腐蚀性好、比强度高、综合性能优良,在生产深松铲方面有很大的应用前景^[17-19];但钛合金也存在耐磨性差、硬度低、抗阻尼性差等缺点,对深松铲的使用

寿命有很大限制^[20]。故作者在TC4表面制备不同比例的Fe60-TiO₂复合涂层,探究不同TiO₂粉末含量和不同激光功率对涂层形貌和性能变化的影响。在经济和性能方面均有提升,对农业中的农具发展具有一定的参考价值。

1 实验

1.1 实验材料

使用TC4板材,尺寸为90mm×50mm×2mm,熔覆Fe60粉末和陶瓷粉末TiO₂规格分别为150目~270目、200nm~500nm。TC4板材、Fe60和TiO₂粉末质量成分含量如表1、表2和表3所示。

Table 1 Composition of titanium alloy(mass fraction)

type	Fe	C	N	H	O	Al	V	Ti
TC4	≤0.0030	≤0.0010	≤0.0005	≤0.00015	≤0.0020	0.055~0.068	0.035~0.045	balance

Table 2 Chemical composition of Fe60 powder(mass fraction)

type	C	Si	B	Cr	Ni	Fe
Fe60	0.008~0.012	0.010~0.020	0.038~0.042	0.16~0.18	0.090~0.12	balance

Table 3 Chemical composition of TiO₂ powder(mass fraction)

type	Fe	Al	Ca	Mg	Cu	Mn	Co	Ni	Si	Ni	K	Ti
TiO ₂	0.000005	0.00001	0.00005	0.00003	0.00001	0.00003	0.00001	0.000002	0.000003	0.000002	0.00001	balance

1.2 实验条件与方案

实验设备(如图1所示)采用XL-F2000W光纤激光熔覆系统,送粉方式为预置法,铺粉厚度约1mm。熔覆前选用800目、1200目两种不同粒度的砂纸依次打磨基体表面,然后用无水乙醇清洗并烘干,去除表面的杂质。



Fig. 1 XL-F2000W fiber laser

为了研究不同工艺参数对多道试样减磨性和硬度的影响,针对不同功率、TiO₂粉末含量等工艺参数进行实验;通过前期做了TC4合金单道熔覆试验的相关探究,发现激光功率400W、扫描速率10mm/s、粉末含量5%、离焦量+5mm时,熔覆层表面较好且基体和熔覆层成形良好。因此在进行多道熔覆时,激光功率采用300W~500W,扫描速率10mm/s,离焦量+5mm,多道搭接率45%。采用多组实验进一步探究最优工艺

参数,实验方案如表4所示。图2所示为激光加工示意图。

Table 4 Multiple groups of experimental tables

number	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
power/W	300	300	300	400	400	400	500	500	500
mass fraction of TiO ₂	0	0.05	0.1	0	0.05	0.1	0	0.05	0.1

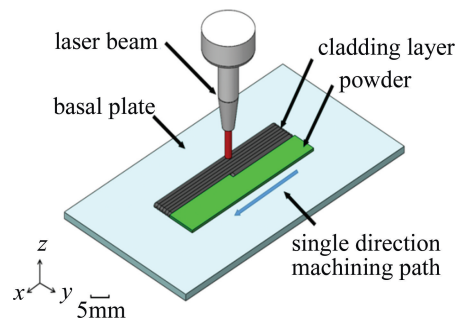


Fig. 2 Diagram of laser processing

2 结果与分析

2.1 熔覆层形貌分析

分析涂层截面,熔覆层在金相显微镜下放大25倍的外观形貌如图3所示,熔覆层宏观形貌如图4所示。

从图3a、图3b、图3c和图4a、图4b、图4c可以看

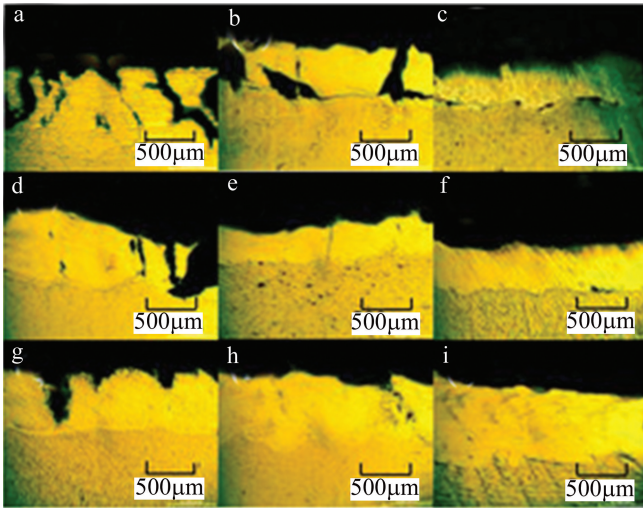


Fig. 3 Microscopic appearance (25 \times , Fig. 3a~Fig. 3i are in order 1 $\#$ ~9 $\#$ in Table 3)

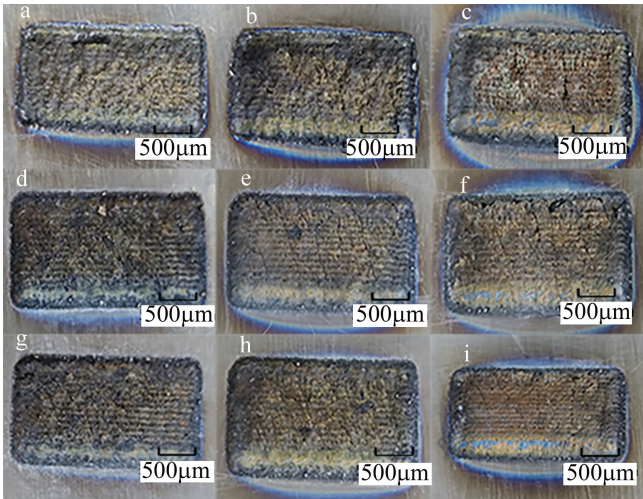


Fig. 4 Macro topography

出,熔覆层和基体之间有明显的裂纹,成形效果差。这是因为功率较小,单位面积内基材吸收的热量不足以使粉末完全熔覆所致;图 3d、图 3e、图 3f 对比图 3a、图 3b、图 3c 熔覆效果较好,随着功率的增加,熔池内的热量增加,熔池内有更多的粉末融合,使得熔覆层与基体结合良好,随着 TiO₂ 粉末的增加熔覆层的裂纹明显减少;图 3g、图 3h、图 3i 熔覆层效果最好。这是因为随着激光功率不断增大,熔池内的粉末完全融合,表面的裂纹明显减少熔覆层与基体结合良好。

对于同功率不同 TiO₂ 粉末含量的情况下,以图 3d、图 3e、图 3f 为例,发现图 3d 的熔覆效果最差,图 3f 的熔覆效果最好;这是因为 Fe60 与基体 TC4 的热膨胀系数差异较大引起裂纹。所以在激光熔覆时,在保证所要达到性能的同时,应尽量选择热膨胀系数相同或相近的粉末和基材。

2.2 维氏硬度分析

使用数显显微硬度机(MHVD-1000AT),选取试样中的 3 $\#$ 、6 $\#$ 、9 $\#$ 进行硬度检测,利用硬度测试仪沿多涂层截面进行测试,每个试样分别测试 7 个点,加载力 1.96N、保荷时间 10s,结果如图 5 所示。3 $\#$ 试样的平均维氏硬度是 645.21HV,6 $\#$ 试样的平均维氏硬度为 446.63HV,9 $\#$ 试样的平均维氏硬度为 834.07HV。由此可见功率对熔覆层的硬度有很大影响。3 $\#$ 、6 $\#$ 和 9 $\#$ 试样的平均维氏硬度依次升高,这说明在一定范围内适量增加功率可以提高熔覆层的硬度;这是因为随着功率的增加,粉末与基体形成良好的冶金结合,熔覆层硬度提高。TC4 合金的维氏硬度 356.43HV,9 $\#$ 试样熔覆层的表面硬度比基体提高接近 2.5 倍,很大程度上提高了材料的硬度。

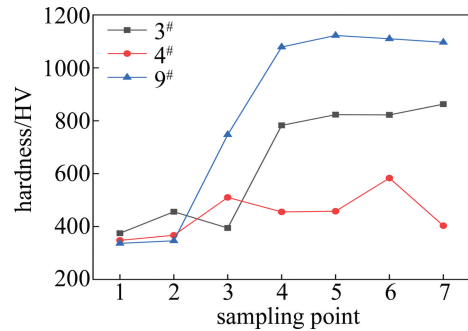


Fig. 5 Vickers hardness profile

2.3 减磨性分析

从图 6 中基材与含有不同 TiO₂ 粉末涂层的摩擦系数可以看出,TC4 基材的摩擦系数稳定在 0.65 \pm 0.03;当未添加 TiO₂ 粉末(4 $\#$)时,此时涂层的摩擦系数在 0.5 左右浮动;随着涂层中 TiO₂ 的质量分数进一步增加,摩擦系数系数明显降低,当添加质量分数为 0.05 的 TiO₂ 粉末(2 $\#$)和 0.10 的 TiO₂ 粉末(3 $\#$)时,熔覆涂层的摩擦系数显著下降,分别为 0.47 \pm 0.05 和 0.3 \pm 0.03,这是因为激光熔覆过程中,熔覆层中的与 Fe 基粉末充分融合,在摩擦过程中能够 TiO₂ 粉末有

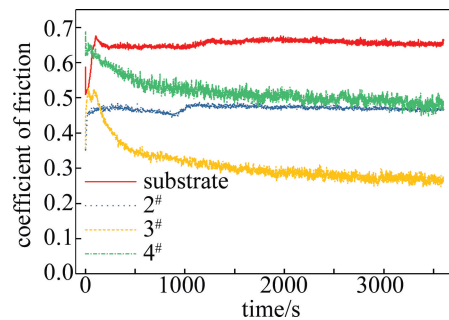


Fig. 6 Variation law of friction coefficient of laser cladding sample surface with time

效的阻止磨粒的显微切削,降低了复合涂层的摩擦系数,提高熔覆层的减摩擦性。

3 熔覆层的微观组织分析

图7中给出了不同功率和不同含量的TiO₂粉末熔覆后涂层的X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)图谱。从涂层1[#]、7[#]中Ti化合物的衍射峰对比可以看出,随着功率的增加,未添加TiO₂的7[#]涂层生成了更多的Ti化合物,这是由于过小的激光功率导致1[#]涂层生成的Ti化合物较少,而7[#]涂层生成了更多的Ti化合物;从涂层7[#]、8[#]中Ti化合物的衍射峰可以看出,在同功率的情况下,TiO₂粉末含量增加致使8[#]涂层生成了更多的Ti化合物;涂层3[#]、6[#]和9[#]在加入质量分数为0.10的TiO₂后,只有6[#]生成了Ti化合物。对比分析可知,不同功率和不同摩尔比粉末对熔覆后涂层Ti化合物的含量都有影响。在TiO₂粉末含量一定的时,随着激光功率的增加,有助于熔覆层Ti化合物的形成,但过大的激光功率会抑制Ti化合物的形成;在同功率情况下,例如功率400W时,添加质量分数为0.05的TiO₂所产生的Ti化合物较添加0和0.10更多。

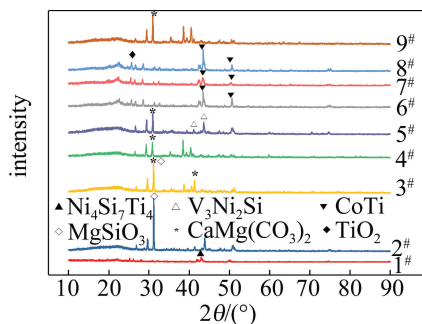


Fig. 7 XRD patterns of each coating after laser cladding

4 结论

通过多组实验,在TC4板表面熔覆多道Fe60-TiO₂复合涂层,对不同功率和不同TiO₂粉末的熔覆层进行了宏观形貌、表面维氏硬度和减磨性的分析。

(1)在进行激光熔覆实验时,激光功率过低,熔覆层和基体之间有明显的裂纹,成形效果差;在一定范围内,随着功率增加熔池内的热量增加,熔池内有更多的粉末融合,使得熔覆层与基体结合良好。在同功率下随着TiO₂粉末的增加熔覆层的裂纹明显减少。

(2)一定范围内适当增加激光功率可以提高熔覆层的硬度,在激光功率为500W时熔覆层的硬度增大到基体的2.5倍左右。

(3)在一定范围内,随着TiO₂粉末质量分数的增

加,涂层的摩擦系数降低,减磨性提高。

(4)不同激光功率和不同TiO₂粉末质量分数对熔覆后涂层Ti化合物的质量分数都有影响。在TiO₂粉末质量分数一定的情况下,激光功率的增加有助于熔覆层Ti化合物的形成,但过大的激光功率会抑制Ti化合物的形成;在激光功率相同的情况下,添加质量分数为0.05的TiO₂所产生的Ti化合物较添加质量分数为0和0.10更多。

参考文献

- [1] QIN Y, YAN H, GAO Q Sh, *et al.* Microstructure and wear resistance of in-situ synthesized Ti₃SiC₂/Ni-based coating by laser cladding on titanium alloy[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019,9(4): 34-40(in Chinese).
- [2] HE B F. Properties of laser cladding NiCrAl+TiC composite coatings on TC4 titanium alloy[J]. *Heat Treatment Of Metals*, 2019,44(9): 69-73(in Chinese).
- [3] ZHAO X X, XIAO H Q, YOU Ch Ch, *et al.* Process and microstructure properties of laser cladding TiAl alloy coating on TC4 surface [J]. *Laser Technology*, 2021,45(6):697-702(in Chinese).
- [4] ZHANG L T, LIU D X, ZHANG W Q, *et al.* Research progress of laser cladding coating on titanium alloy surface[J]. *Surface Technology*, 2020,49(8):97-104(in Chinese).
- [5] LIU K, YAN H, ZHANG P, *et al.* Wear behaviors of TiN/WS₂ + hBN/NiCrBSi self-lubricating composite coatings on TC4 alloy by laser cladding[J]. *Coatings*, 2020, 10(8): 747.
- [6] GAO Y, LIU R, WU T, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser clad TiAlSi +xB₄C coatings on Ti-6Al-4V alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021,46(2):196-200(in Chinese).
- [7] OLOFSSON U, LYU Y, ÅSTRÖM A H, *et al.* Laser cladding treatment for refurbishing disc Brake rotors; Environmental and tribological analysis[J]. *Tribology Letters*, 2021,69(2):1-11.
- [8] WU G G, WANG X G, ZENG X, *et al.* Microstructure and properties of laser clad AlCoCrFeNiTi 0.5 high-entropy alloy coating on TC4 surface[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019,44(12):1-5(in Chinese).
- [9] ZHANG Z Q, YANG F, ZHANG T G, *et al.* Research progress of laser cladding titanium carbide reinforced titanium-based composite coating[J]. *Surface Technology*, 2020,49(10):138-151(in Chinese).
- [10] LIU Zh P, WU W X, LI Sh, *et al.* Research on microstructure and properties of laser cladding Fe-base alloy coating[J]. *Mechanical Engineer*, 2021(4):18-19(in Chinese).
- [11] DING Z Y, MA Z B, LI W Q, *et al.* Study on microstructure and properties of laser cladding Fe-based alloy powder cladding layer [J]. *Hot Working Technology*, 2019,48(18):100-102(in Chinese).
- [12] TAN J H, SUN R L, NIU W, *et al.* Research status of TC4 alloy laser cladding materials [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(15): 15132-15137(in Chinese).
- [13] YI J, PENG R Sh. Microstructure and wear resistance of laser alloying coating on TC4 titanium alloy surface [J]. *Heat Treatment Of Metals*, 2020,45(2):225-230(in Chinese).
- [14] ZHANG D Q, LIU X D, ZHANG W B. Experimental study on laser

- cladding of TC4 alloy[J/OL]. [2021-03-22]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20152462>(in Chinese).
- [15] LIU D, CHEN Z Y, CHEN K P, *et al.* Microstructure and wear resistance of laser clad composite coating on TC4 titanium alloy surface [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015,40(3):58-62(in Chinese).
- [16] XIA S H, WU M P, MA Y Q, *et al.* Effect of TiC content on microstructure and properties of laser clad layer on TC4 alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020,45(6):212-215(in Chinese).
- [17] ZHAN J M, LIANG Zh G, HUANG J Y, *et al.* Study on the single laser cladding process on TC4 titanium alloy surface[J]. *Applied Laser*, 2020,40(6):955-961(in Chinese).
- [18] YOU Ch Ch, XIAO H Q, REN L R, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding Ti-Al-N composite coating on TC4 surface [J]. *Laser Technology*, 2021,45(5):585-589(in Chinese).
- [19] XIE L Y, WU T, GONG M M, *et al.* Numerical simulation and experimental study on temperature field of single channel laser cladding [J]. *Laser Technology*, 2022,46(2):226-232(in Chinese).
- [20] YU T B, HAN J B, QIAO R Zh, *et al.* The influence of process parameters on coating performance of Ni based and Fe based cladding layer[J]. *Laser & Infrared*, 2019,49(7):801-807(in Chinese).