

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.11.04

TC4表面脉冲等离子填丝-送粉熔覆WC/Ti组织及强韧性研究

杜航, 徐睦忠*, 姜忠礼, 巴比奇·亚历山大, 代锋先, 刘自刚,
塔尔多夫·亚历山大·格尔马诺维奇, 邢丽

浙江巴顿焊接技术研究院, 浙江 杭州 313100

摘要: 为提升全钛部件表面耐磨及耐冲击性能, 以WC颗粒和TC4焊丝作为熔覆材料, 采用脉冲等离子填丝-送粉熔覆技术在TC4钛合金表面制备WC/Ti复合层。通过试验获得其中最优化WC/Ti的比例, 并研究其对熔覆层硬度及强韧性的影响, 分析了WC/Ti熔覆层金相组织形貌、显微硬度、冲击韧性、熔覆层与基材结合强度。试验结果表明, 通过优化工艺参数, 获得表面呈现亮黑色、内部无冶金缺陷的WC/Ti熔覆层, 熔覆层主要由WC、TiC、W₂C等相组成, 在WC颗粒周围产生了以TiC相为主的强化组织。当送丝速率为1.4 m/min, 送粉速率为18 g/min时, 熔覆层表面硬度达到51.9 HRC, 是TC4基材的1.5倍以上。冲击韧性测试结果表明, 熔覆层在室温下具有一定的抗冲击性能, 侧向冲击吸收功平均值为10.6 J。熔覆层与基材的结合强度达到616.03 MPa, 远超工程指标450 MPa。脉冲等离子熔覆技术可以有效制备WC/Ti复合层, 提升TC4钛合金表面的耐磨性和冲击韧性。

关键词: 脉冲等离子熔覆; WC/Ti熔覆层; 显微组织; 冲击韧性; 结合强度

中图分类号: TG456.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)11-0025-08

Microstructure and Strength-Toughness of Pulsed Plasma Filament-powder Feeding Cladding WC/Ti Layer on TC4

DU Hang, XU Muzhong*, JIANG Zhongli, Oleksandr Babych, DAI Fengxian, LIU Zigang,
Oleksandr Tardov, XING Li

Zhejiang E.O. Paton Welding Technology Research Institute, Hangzhou 313100, China

Abstract: To enhance the wear and impact resistance of titanium components, WC particles and TC4 welding wire were used as cladding materials. Pulse plasma wire-powder cladding technology was employed to prepare a WC/Ti composite layer on the surface of TC4 titanium alloy. The optimal ratio of WC/Ti was determined through experiments, and its effects on the hardness and toughness of the cladding layer were studied. The microstructure, microhardness, impact toughness, and bonding strength between the cladding layer and substrate were analyzed. The results showed that by optimizing process parameters, a WC/Ti cladding layer with a bright black surface and no metallurgical defects inside was obtained. The cladding layer mainly consists of phases such as WC, TiC, W₂C, etc., with a strengthened structure primarily composed of TiC phase around the WC particles. When the wire feed rate is 1.4 m/min and the powder feed rate is 18 g/min, the surface hardness of the cladding layer reaches 51.9 HRC, which is more than 1.5 times that of the TC4 substrate. The impact toughness test results indicate that the cladding layer has certain impact resistance at room temperature, with an average lateral impact absorption work of 10.6 J. The bonding strength between the cladding layer and the substrate reaches 616.03 MPa, far exceeding the engineering index of 450 MPa. Pulse plasma cladding technology can effectively prepare WC/Ti composite layers,

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0201400); 浙江省“尖兵”“领雁”项目(2023C01244)

作者简介: 杜航(1999—), 男, 学士, 主要从事金属材料焊接及增材制造方面研究。

通讯作者: 徐睦忠(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事金属材料焊接、堆焊及增材制造研究。E-mail: xumuzhong@126.com。



重点专题——堆焊及表面工程

enhancing the wear and impact resistance of TC4 titanium alloy surfaces.

Keywords: pulse plasma cladding; WC/Ti cladding layer; microstructure; impact toughness; bonding strength

引用格式:杜航,徐睦忠,姜忠礼,等. TC4 表面脉冲等离子填丝-送粉熔覆 WC/Ti 组织及强韧性研究[J]. 电焊机, 2024, 54(11): 25-32.

Citation: DU Hang, XU Muzhong, JIANG Zhongli, et al. Microstructure and Strength-Toughness of Pulsed Plasma Filament-powder Feeding Cladding WC/Ti Layer on TC4[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(11): 25-32.

0 引言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等优点,广泛应用于航天航空、国防和化工等领域^[1-4]。军用车辆采用钛合金材料替代钢材料,可以使装备减重 1/3,同时其良好的抗弹性能和防腐性能也受到军工行业的青睐。然而,钛及钛合金的表面硬度相对偏低、耐磨性差,红硬性及耐高温腐蚀性不足,限制了其在高磨损工作环境的单独应用。由于钛合金零部件的磨损失效通常来源于表面或表面层,因而在不影响材料自身性能的条件下,通过使用表面改性技术来提高钛合金的磨损性能对防止早期失效具有重要意义^[5]。近年来,等离子喷涂、物理/化学气相沉积以及激光熔覆等表面改性的方法已被普遍用来提高钛合金表面的耐磨性能^[6-8]。

碳化物陶瓷颗粒增强金属基复合材料(Metal Matrix Composites, MMCs)具有高硬度、低热膨胀系数、高耐磨性和耐腐蚀性等优点,在金属加工和模具生产等工业领域得到了广泛应用^[9],从技术和经济两方面来看,机械零件表面碳化物增强涂层的制造被认为是最有效的方法之一^[10]。在众多耐磨复合熔覆层增强合成材料中,以其高熔点、高硬度(2 200~2 800 HV)、稳定的化学性能和良好的断裂韧性,成为 Ti 基、Ni 基和 Fe 基复合材料中理想的增强相。特别是 WC 具有与钛合金相近的热膨胀系数,而且还具有一定的可塑性和对熔融金属良好的润湿性等^[11],其作为 MMCs 增强相之一,被认为是钛合金耐磨涂层的理想增强相^[12]。

崔琳等人^[13]的研究发现,在镍基合金堆焊层中添加 45% 的 WC 颗粒会导致 WC 沉底,但通过提高预热温度和时间可以改善这一现象,提升耐磨性。江龙威等人^[14]的研究表明,在 Ni/WC 熔覆层中加入 2% 的 CeO₂ 可以消除孔隙,提高硬度和耐磨耐腐蚀性能。

为了提升钛合金表面的硬度和耐磨性,采用熔覆技术在其表面制备耐磨复合涂层是一种有效的方法。等离子熔覆是一种新型的材料表面强化手段,以其高功率、快速加热、高电热转换效率和传热效率等特点,在材料表面改性中显示出巨大潜力^[15]。等离子熔覆能够实现基体与合金粉末的高效熔化,并快速凝固形成低稀释率且冶金结合良好的熔覆层。此外,等离子熔覆还具有加工效率高、易于控制、成本低、熔覆层组织细小、熔覆层与基体呈良好冶金结合等优点,在碳钢、铝合金等表面改性上得到广泛应用^[16-18]。

本研究采用脉冲等离子熔覆技术在 TC4 钛合金表面进行 WC 颗粒和 TC4 焊丝的熔覆研究。通过利用等离子熔覆的技术特点,探究轻量化 TC4 钛合金作用于车载部件表面强化的工艺及性能特点,获得硬度范围在 45~55 HRC、侧面冲击强度≥8 J、基材与熔覆层结合强度≥450 MPa 的表面强化工艺。

1 试验材料与方法

采用图 1 所示的乌克兰进口的 PLAZER 多功能复合等离子焊接/熔覆设备。等离子熔覆枪采用同轴送粉、旁路送丝结构,如图 2 所示。在熔覆过程中,等离子弧的能量同时作用在基材、粉末和焊丝上。粉末在进入熔池前呈小颗粒熔滴形态,该过程的能量分配方式更加趋于合理,不仅可以提升熔覆效率,还能提高熔覆质量。

等离子熔覆所用基材为 TC4 钛合金,试验所用粉末材料为纯度 99.9% 的 WC,粒度为 75~150 μm。如图 3 所示,粉末使用前在 150 °C 下烘干 3 h,焊丝为 φ1.2 mm 的 TC4 钛合金焊丝,表 1、表 2 分别为 TC4 钛合金及 WC 颗粒的化学成分。熔覆试验前,对基体材料进行平整化处理并清除表面污物,随后使用酒精擦拭基材并对其进行装配固定。



图1 等离子熔覆设备示意
Fig. 1 Schematic of plasma cladding equipment

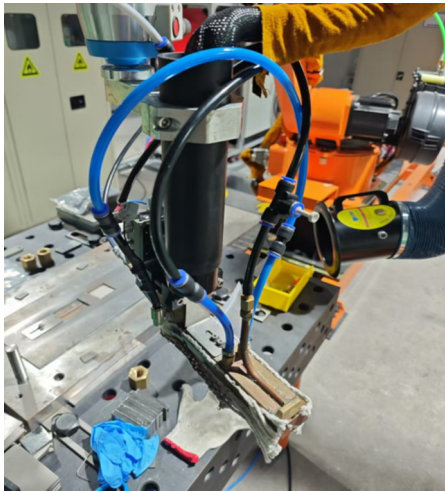


图2 等离子焊枪示意
Fig. 2 Schematic of plasma welding torch

在预装好的 TC4 试验件表面熔覆 WC 粉末和 TC4 焊丝,熔覆层的厚度约为 6 mm,宽度(根部)约为 20 mm。在制备过程中,保护气及送粉气体均采用纯度为 99.999% 的氩气。多层多道熔覆的工艺参数见表 3。

表3 等离子熔覆工艺参数

Table 3 Plasma cladding process parameters

试样编号	脉冲电流 I/A	送丝速率/(m·min ⁻¹)	送粉速率/(g·min ⁻¹)	扫描速率/(mm·s ⁻¹)	离子气流量/(L·min ⁻¹)	保护气流量/(L·min ⁻¹)
WC-01	60/170 60/200	0.7	39	13	1.5	25
WC-02		1.0	31.5			
WC-03		1.3	22.5			
WC-04		1.3	18.8			
WC-05		1.4	18			

注:两侧停留时间为 0.15 s。

使用 DK7740 型线切割设备将熔覆试样粗加工为标准冲击试样;随后采用铣床将冲击试样表面加工平整,完成所有加工工序后,试样尺寸为 55 mm×

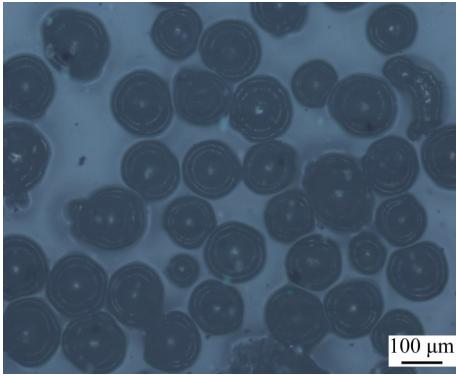


图3 WC 粉末粒径
Fig. 3 WC powder particle size

表1 TC4 钛合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy (wt. %)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.88	4.01	0.13	0.05	0.007	0.015	0.18	Bal.

表2 WC 粉末化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of WC powder (wt. %)

C	V	Si	Fe	Cr	Ti	O	Mo+ Co+Ni	W
4.1	0.001	0.002 1	0.12	0.007 1	0.001 3	0.01	0.0098	Bal.

熔覆层制备完成后,使用 Carl Zeiss Axio Imager M2m(OM)显微镜观察不同工艺参数下熔覆层的内部形貌;使用蔡司 Sigma 500 扫描电镜及能量色散 X 射线光谱(EDS)对熔覆层的微观组织及成分进行测试分析;使用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪对熔覆试样进行物相标定。

将熔覆层表面打磨光滑,使用 HRS-150S 型数显洛氏硬度计进行硬度测量,压头为天然金刚石洛氏压头,沿宽度方向间隔 4 mm 进行洛氏硬度检验,具体测量位置如图 4 所示。

10 mm×10 mm(基材 5 mm+熔覆层 5 mm),如图 5 所示。使用钢研纳克的 NI 300 摆锤式冲击试验机进行冲击性能试验。

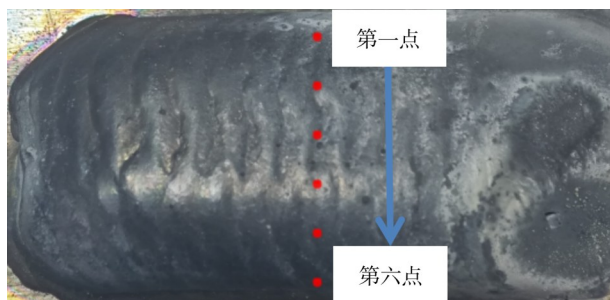


图4 纵向测试示意

Fig. 4 Schematic of longitudinal testing

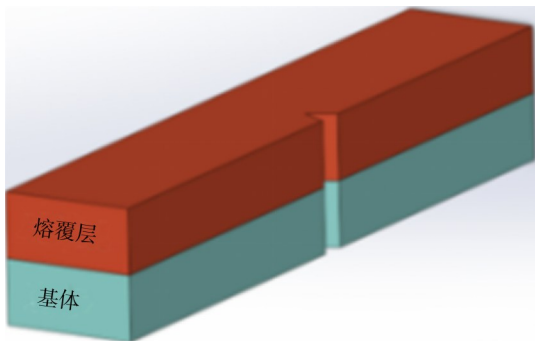


图5 熔覆试样侧面冲击示意

Fig. 5 Schematic of side impact on cladding specimen

为了测试 TC4 钛合金表面 WC/Ti 熔覆层的结合强度,采用相同的熔覆工艺将两块 TC4 熔覆焊接在一起,并制备了试样进行拉伸试验。熔覆焊接的方式如图 6 所示,图 6a 为拉伸试验的取样方式,图 6b 为用于拉伸试验的熔覆试样。使用 INSTRON

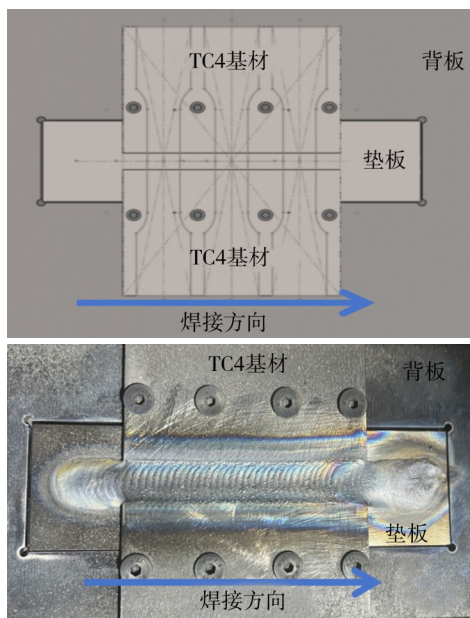


图6 等离子熔覆试样示意

Fig. 6 Schematic of plasma cladding specimen

5982 电子万能拉伸试验机对试样进行了抗拉强度测试,加载速率为 0.5 mm/min。

2 试验结果及讨论

2.1 微观组织

在试验参数初步稳定后,对 WC-05 熔覆试样进行高倍组织观察及元素分布分析。基材与熔覆层界面、熔覆层内部显微组织照片分别见图 7a、图 7b。

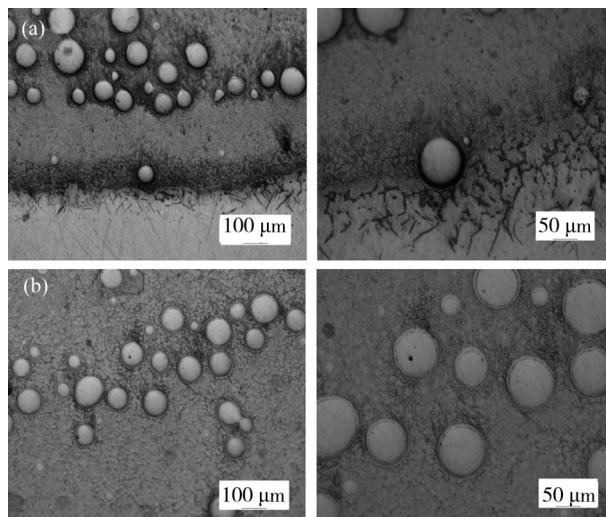


图7 WC-05熔覆试样金相照片

Fig. 7 Metallographic photograph of WC-05 cladding specimen

对图 7 进行分析,在送丝速率 1.4 m/min,送粉速率 18.8 g/min 时,熔覆试样内部成形良好,熔覆层内部存在大量 WC 颗粒,这些 WC 颗粒内部主要是 W 原子和 C 原子,WC 颗粒能与周围基体材料发生反应生成 TiC,罗军明^[19]等采用微波烧结法制备不同 TiC 含量的 TC4 复合材料,结果表明 TiC 含量的增加会提高复合材料的显微硬度和耐磨性,因为增强颗粒能够承受一定的载荷,从而减少磨损量,提高整体的耐磨性能。

图 8 为熔覆层 WC 颗粒微观结构及 EDS 结果,图 9 为熔覆层 XRD 试验结果。由图 8a 可以看出,WC 颗粒边缘出现明显分层,根据表 4 中谱图 91 的 EDS 结果,该区域的元素分布为 24.5%Ti、67%W、8.5%C,结合图 9 的熔覆层 XRD 测试结果,熔覆层主要由 WC、W₂C、TiC 等相构成。这表明,在界面反应过程中,WC 颗粒与熔池中的 Ti 元素发生了反应,形成了 TiC 和 W₂C 等组织。

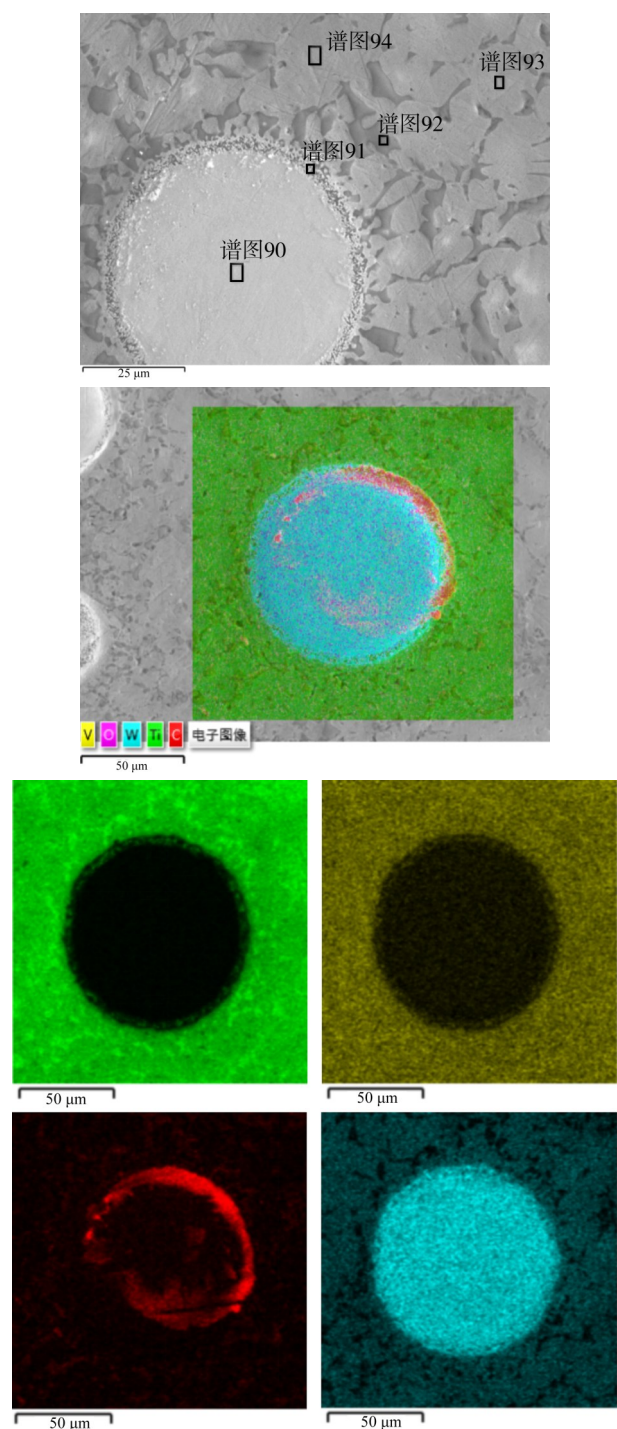


图8 熔覆层WC颗粒微观结构

Fig. 8 Overall microstructure of WC particles in cladding layer

2.2 硬度分析

针对表3参数获得的熔覆试样进行了洛氏硬度测量,熔覆试样编号WC-01~05的平均硬度分别为72.5 HRC、67.4 HRC、56.8 HRC、56.7 HRC、51.9 HRC,单个试样点位所对应测试结果如图10所示。

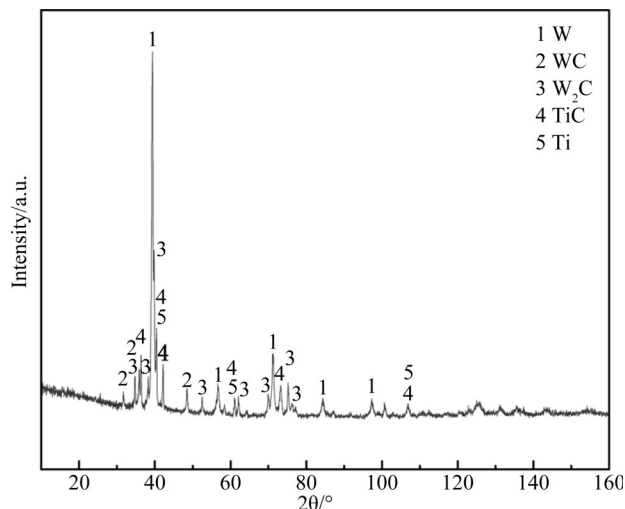


图9 熔覆层XRD测试结果

Fig. 9 XRD test results of cladding layer

表4 熔覆层中WC各点的EDS成分分析结果(原子百分数, %)

Table 4 EDS analysis results of WC points in cladding layer (at. %)

测试点	C _K	Ti _K	W _K
90	5.8	2.2	92
91	8.5	24.5	67
92	9.3	81.3	9.4
93	3.1	55.3	36.8
94	2.7	58.1	33.6

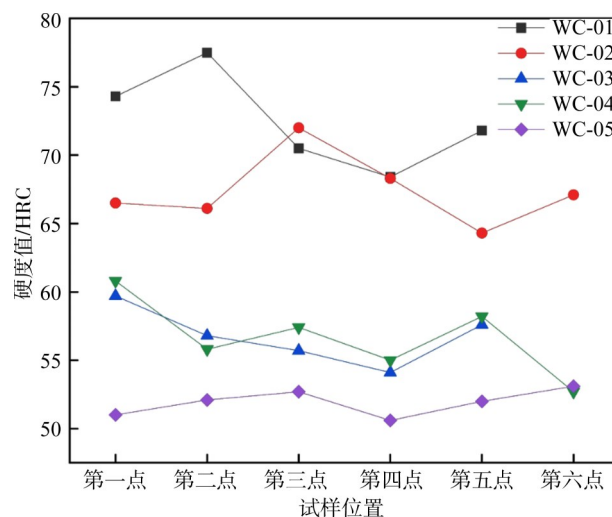


图10 熔覆试样洛氏硬度纵向测试结果

Fig. 10 Longitudinal test results of Rockwell hardness of cladding samples

对比WC-01~WC-05五个熔覆试样,发现采用相同的脉冲电流、扫描速率13 mm/s、两侧停留时间0.15 s、离子气流量1.5 L/min、保护气流量25 L/min的条件下,通过调整送丝速率和送粉速率,可以获

得不同的表面成形和硬度值。当送丝速率较低、送粉速率较高时,WC/Ti熔覆层的表面成形较差,熔覆层边缘出现多处尖锐棱角,且熔覆层中含有较多的WC颗粒,导致硬度值偏高。通过增加送丝速率和降低送粉速率,可以提高TC4在熔覆层中的占比,从而优化熔覆层成形并调控硬度。测试结果表明,在WC-05熔覆试样中,WC颗粒在熔覆层质量占比为59.6%,TC4焊丝在熔覆层质量占比为40.4%,即送丝速率1.4 m/min、送粉速率18 g/min时,可以获得表面呈现亮黑色、内部无冶金缺陷的WC/Ti熔覆层,熔覆层表面硬度平均值为51.9 HRC,是TC4基材的1.5倍。

2.3 冲击韧性

为了测试TC4-WC/Ti熔覆层的冲击性能,采用表3中WC-05试样所用的熔覆参数来制备冲击试样,并进行了冲击性能试验。试样编号分别为WC-06~08,冲击试样断口界面如图11所示,试验结果如表5所示。在室温下对熔覆层进行了一组冲击性能试验,试验结果显示冲击吸收功均超过8 J,这表明熔覆层在室温下具备一定的抗冲击性能。

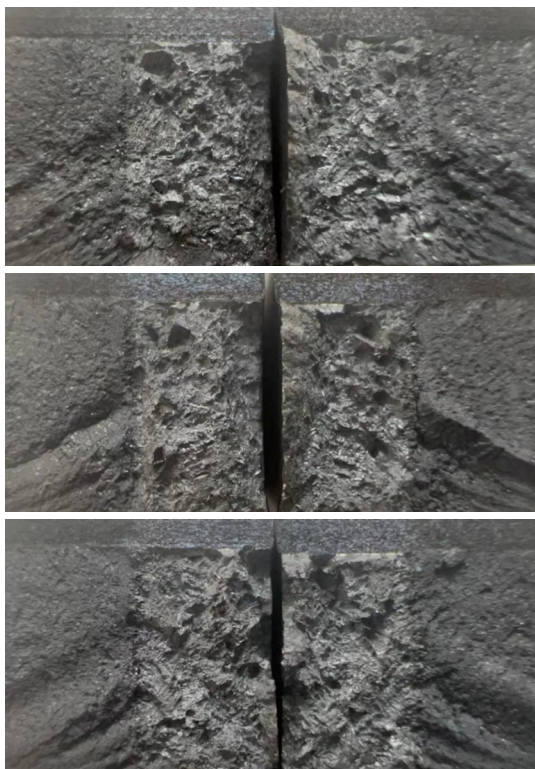


图11 熔覆试样冲击断口界面

Fig. 11 The cladding specimen impinges on the fracture interface

表5 基材-熔覆层冲击试验结果

Table 5 Substrate-cladding impact test results

焊件编号	焊件尺寸/mm	试验温度/°C	缺口形式	吸收能量KV ₂ /J	是否合格
WC-06	55×10×10	20	V 2 mm	10.3	合格
WC-07				12.1	
WC-08				9.4	

2.4 结合强度

采用表3中WC-05的参数,在TC4钛合金表面制备了WC/Ti熔覆层,根据图6a截取试样进行抗拉强度测试,共制备2组共6个拉伸试样。分析试件的抗拉强度、断裂位置及相关特征。其中,两组试样抗拉强度的测试结果如表6所示。拉伸应力与位移的关系曲线如图12所示。

表6 熔覆试样结合强度测试值

Table 6 Cladding specimen bond strength test value

试样编号	抗拉强度/MPa	平均值/MPa	目标值/MPa
WC-LS-01	586.40	601.05	≥450
WC-LS-02	605.38		
WC-LS-03	611.38		
WC-LS-04	666.80	631.01	≥450
WC-LS-05	584.47		
WC-LS-06	641.77		

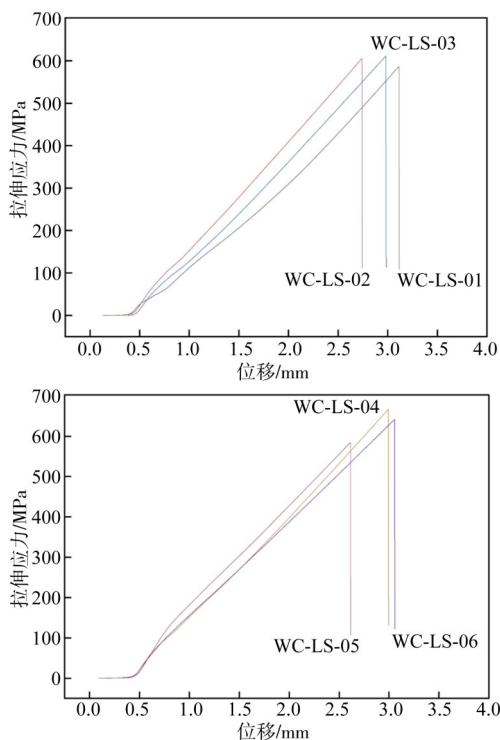


图12 拉伸应力与位移测试关系曲线

Fig. 12 Relationship between tensile stress and displacement

通过拉伸试验发现,断裂位置位于 WC/Ti 熔覆层熔覆金属处。抗拉强度的平均值达 616.03 MPa,这表明所制备的 WC/Ti 熔覆层与 TC4 基材的结合强度不低于 616.03 MPa。

3 结论

采用脉冲等离子熔覆技术在 TC4 钛合金表面制备 WC/Ti 复合层,并探究其对材料性能的影响,为提升钛合金部件耐磨性提供了一种有效方法。

(1)在 TC4 钛合金表面制备的 WC/Ti 熔覆层主要由 WC、TiC、W₂C 等相组成,WC 颗粒周围形成了以 TiC 相为主的强化组织。

(2)采用等离子熔覆技术在 TC4 表面制备 WC/Ti 熔覆层,当送丝速率 1.4 m/min,送粉速率 18 g/min 时,熔覆层表面硬度趋近于 45~55 HRC,熔覆层内部的 WC 颗粒排布集中于心部和底部,表面的 WC 颗粒数量较心部显著降低,制备出的 WC/Ti 熔覆层不仅内部成形良好,外表面也呈现出亮银色。

(3)对熔覆试样进行的冲击性能测试显示,将冲击缺口开在熔覆层和基材的连接界面上,其冲击性能测试结果分别为 10.3 J、12.1 J、9.4 J,均超过试验要求的冲击性能要求(不小于 8 J)。

(4)采用等离子填丝送粉技术制备 WC/Ti 熔覆层,结合强度达 616.03 MPa,远超工程指标 450 MPa,表明两者之间形成了良好的冶金结合,确保了熔覆层的长期稳定性。

参考文献:

- [1] 戈晓岚,仲奕颖,许晓静,等. TC4 钛合金表面激光合金化 Ti-Al-Nb 涂层的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(08):2266-2270.
GE X L, Zhong Y Y, Xu X J, et al. Study on Laser alloying Ti-Al-Nb coating on the Surface of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017,46(08):2266-2270.
- [2] ZHANG K M, ZOU J X, LI J, et al. Surface modification of TC4 Ti alloy by laser cladding with TiC+Ti powders[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010,20(11):2192-2197.
- [3] 许海鹰,张伟,范恺,等. 电子束高频扫描对 TC4 钛合金组织性能影响的研究(英文)[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(06):1457-1462.
- XX H Y, ZHANG W, FAN K, et al. Effect of electron beam high frequency Scanning on microstructure and Properties of TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017,46(06):1457-1462.
- [4] 程晨. TC4 钛合金表面等离子熔覆 Ni 基复合涂层组织研究[D]. 贵州:贵州大学,2018.
CHENG C. Study on microstructure of Ni base composite coating on TC4 titanium alloy Surface by plasma cladding[D]. Guizhou:Guizhou University, 2018.
- [5] 刘建弟,张述泉,王华明. 激光熔覆 WC 颗粒增强复合涂层的组织及耐磨性[J]. 中国有色金属学报,2012,22(09):2600-2607.
LIU J D, ZHANG S Q, WANG H M. Microstructure and wear resistance of laser cladding WC particle reinforced composite coating [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012,22(09):2600-2607.
- [6] 张敬国,刘金炎,蒋显亮. 碳化钨/钴热喷涂粉末和涂层的研究进展[J]. 功能材料,2005(03):332-334+339.
ZHANG J G, LIU J Y, JIANG X L. Research progress of tungsten carbide/cobalt thermal spraying powder and coating[J]. Functional Materials, 2005(03):332-334+339.
- [7] 张新杰. 等离子熔覆耐磨减摩 Ni 基复合涂层研究[D]. 山东:山东科技大学,2018.
ZHANG X J. Research on wear resistant anti-friction Ni base composite coating by plasma cladding [D]. Shandong: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [8] 张全利. 碳化物材料超精密磨削加工表面生成及损伤机理研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2017.
ZHANG Q L. Study on surface formation and damage mechanism of carbide materials in ultra-precision grinding[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [9] Upadhyaya G S. Cemented tungsten carbides: production, properties and testing[M]. William Andrew, 1998.
- [10] Yuan Y L, Li Z G. Microstructure and Dry Sliding Wear Behavior of Fe-Based (Cr, Fe)₇C₃ Composite Coating Fabricated by PTA Welding Process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013,22(11):3439-3449.
- [11] Lou D, Hellman J, Luhulima D, et al. Interactions between tungsten carbide (WC) particulates and metal matrix in WC-reinforced composites[J]. Materials Science & Engineering A, 2003,340(1):155-162.



- [12] 李福泉,高振增,李俐群,等. TC4表面丝粉同步激光熔覆制备复合材料层的微观组织和性能[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(01):177-182.
- LI F Q, GAO Z Z, LI L Q, et al. Microstructure and properties of composite layer prepared by TC4 Surface silk powder synchronous laser cladding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(01): 177-182.
- [13] 崔琳. 硬质 WC 颗粒增强镍基合金堆焊层的微观组织结构演化与摩擦性能研究[D]. 辽宁:辽宁科技大学, 2023.
- CUI L. Study on microstructure evolution and friction properties of Hard WC particle reinforced Nickel-based alloy surfacing layer[D]. Liaoning: Liaoning university of science and technology, 2023.
- [14] 江龙威,师文庆,林一鸣,等. 添加 CeO_2 对激光熔覆 Ni/WC 基熔覆层的性能提升研究[J/OL]. 激光与光电子学进展, 1-15[2024-09-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20240919.0840.006.html>.
- JIANG L W, SHI W Q, LIN Y M, et al. Study on performance improvement of Ni/WC-based laser cladding by adding CeO_2 [J/OL]. Advances in Laser and Optoelectronics, 1-15[2024-09-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20240919.0840.006.html>.
- [15] 王光,王洪福,赵文,等. Ni60- Cr_3C_2 -WC/TiC 等离子堆焊层耐磨性能的研究[J]. 粉末冶金工业, 2019, 29(06):23-27.
- WANG G, WANG H F, ZHAO W, et al. Study on wear resistance of Ni60- Cr_3C_2 -WC/TiC plasma surfacing layer[J]. Powder Metallurgy Industry, 2019, 29(06): 23-27.
- [16] 张松,张春华,刘常升,等. 铝合金表面激光熔覆 NiCrBSi 的空泡腐蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2002(02):99-102.
- ZHANG S, ZHANG C H, LIU C S, et al. Cavitation corrosion properties of laser cladding NiCrBSi on Aluminum Alloy Surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002(02):99-102.
- [17] 余鹏程,刘秀波,陆小龙,等. Ti6Al4V 合金激光熔覆复合涂层的摩擦学 and 高温抗氧化性能研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10):89-96.
- YU P C, LIU X B, LU X L, et al. Tribology and high temperature oxidation Resistance of laser cladding composite coating of Ti6Al4V alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10):89-96.
- [18] Liu X, Lei W, Li J, et al. Laser cladding of high-entropy alloy on H13 steel[J]. Rare Metals, 2014, 33(06):727-730.
- [19] 罗军明,吴小红,徐吉林. TiC 含量对微波烧结 TiC/TC4 复合材料组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(11):3416-3421.
- LUO J M, WU X H, XU J L. Effect of TiC content on microstructure and properties of microwave-sintered TiC/TC4 composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(11):3416-3421.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

