

# 钛合金基体激光熔覆 WC/TC18 复合涂层滚动接触疲劳性能研究



刘育斌,冯成慧,朱小军,王志刚,冯军

航空工业第一飞机设计研究院,陕西 西安 710089

**摘要:**为了提高钛合金的滚动接触疲劳性能,以碳化钨(WC)/钛合金(TC18)混合粉末为原料,利用激光熔覆技术在TC18基材表面制备了耐磨涂层,分析了涂层的显微组织和显微硬度,在室温条件下测试了涂层的接触疲劳性能。结果表明,涂层与基体冶金结合良好,WC颗粒呈不规则块状均匀分布于 $\beta$ -Ti基体中,WC显微硬度在2122~2271HV之间。与传统钛合金表面超声速火焰喷涂WC-Co涂层相比,激光熔覆复合涂层的滚动接触疲劳性能改善,但耐磨性能降低。

**关键词:**钛合金;激光熔覆;复合涂层;滚动接触疲劳;耐磨性

中图分类号: TG156.99

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.03.011

钛合金具有比强度高、耐腐蚀和耐高温等优异性能,被广泛应用于飞机襟翼滑轨等航空、航天、国防等高端领域,然而钛合金表面硬度较低、耐磨性较差<sup>[1]</sup>,工程上常采用超声速火焰喷涂碳化钨涂层<sup>[2]</sup>,但是涂层与基体之间是机械结合,结合强度不高<sup>[3]</sup>,涂层的滚动接触疲劳性能改善有限。理论上,在涂层硬度相当的情况下,涂层与基体的结合强度越高,涂层的滚动接触疲劳性能越好<sup>[4]</sup>。激光熔覆是一种新的表面改性技术,利用高能激光束使涂层材料与基体表层一起熔凝,形成冶金结合的添料熔覆层<sup>[5]</sup>。利用激光熔覆技术将硬质增强相复合材料制备耐磨涂层,可以极大地扩展钛合金在恶劣磨损环境的应用<sup>[6]</sup>。Farayibi等<sup>[7-18]</sup>研究了钛合金表面激光熔覆复合涂层的微观组织演变特性、耐磨性、抗冲蚀性能等。但尚未对激光熔覆的WC(碳化钨)/TC18(钛合金)复合涂层的滚动接触疲劳性能开展研究。

本文利用激光熔覆技术,在TC18钛合金零件表面制备了WC/TC18复合涂层,分析了涂层的显微组织及WC颗粒分布,测试了涂层内部增强相和基体的显微硬度,并在室温条件下测试了该复合涂层与超声速火焰喷涂碳化钨(WC-17%Co)涂层的滚动接触疲劳性能和磨损速率,根据磨损形貌及损伤演变分析了涂层的滚动接触疲劳机理。

## 1 材料与试验件

利用激光熔覆成形技术,在钛合金基体表面堆积形成

新型的复合涂层,试验件基材为TC18近 $\beta$ 钛合金(Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe),激光熔覆涂层材料选用WC/TC18混合粉末,TC18粉末粒度为80~200目。

采用连续波固体激光器进行同轴送粉式表面熔覆,激光功率为1.0~1.5kW,光斑直径为5~7mm,扫描速度为800~1000mm/min,送粉率为14~16g/min,涂层厚度为250~350 $\mu$ m。接触疲劳试验件设计参考了YB/T 5345—2006《金属材料滚动接触疲劳试验方法》,试验件尺寸为70mm $\times$ 28mm,如图1所示。



图1 接触疲劳试样结构和尺寸示意图

Fig.1 Section of specimen

## 2 复合涂层组织分析

### 2.1 激光熔覆涂层显微组织

观察激光熔覆WC/TC18涂层纵截面(垂直于结合面)组织形貌发现,涂层与基体呈致密冶金结合,无气孔、裂纹

收稿日期: 2021-12-18; 退修日期: 2022-01-16; 录用日期: 2022-02-19

引用格式: Liu Yubin, Feng Chenghui, Zhu Xiaojun, et al. Rolling contact fatigue property of WC/TC18 composite coating prepared by laser cladding on titanium alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(03): 86-90. 刘育斌,冯成慧,朱小军,等. 钛合金基体激光熔覆WC/TC18复合涂层滚动接触疲劳性能研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(03): 86-90.

等缺陷。WC/TC18涂层厚度为250~350 $\mu\text{m}$ ,涂层内部WC颗粒呈不规则块状,分布均匀,如图2和图3所示。

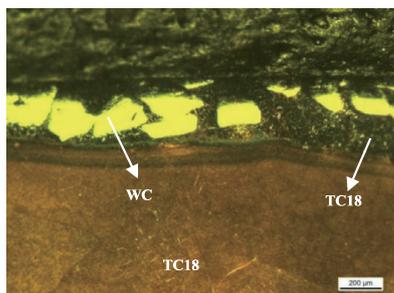


图2 光学显微镜下涂层显微形貌(50倍)

Fig.2 Cross section microstructures of laser cladding coating(50 $\times$ )

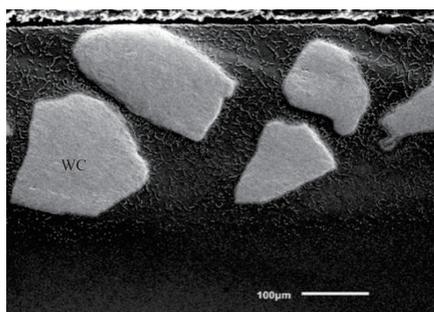


图3 WC/TC18涂层背散射电子像(200倍)

Fig.3 Electron image of backscattering of WC/TC18 coating(200 $\times$ )

由WC/TC18涂层XRD图谱,结合背散射电子像分析可知,激光熔覆WC/TC18涂层的相组成为WC、 $\alpha$ 相和 $\beta$ 相,如图4所示。

## 2.2 激光熔覆涂层表面硬度

激光熔覆WC/TC18涂层纵截面的显微硬度测试结果

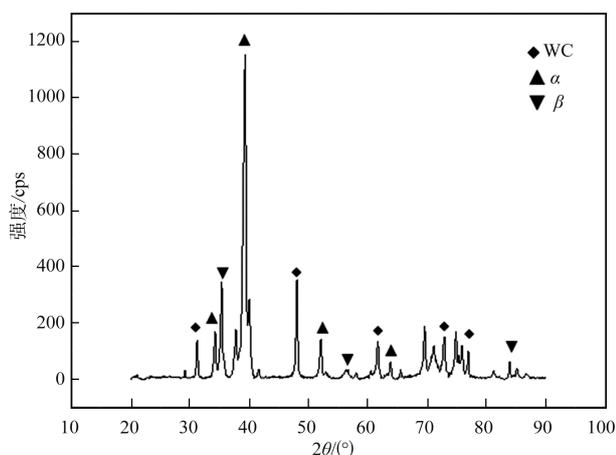


图4 WC/TC18涂层XRD图谱

Fig.4 XRD spectrum of the WC/TC18 coating

见表1,其中WC粒子显微硬度均值为2185.74HV,TC18(涂层)显微硬度均值为460.59HV,TC18(基体)显微硬度均值为403.27HV。

表1 激光熔覆WC/Ti涂层纵截面显微硬度(单位:HV)

Table 1 Microhardness profile along depth direction of the laser clad WC/Ti coating

截面组织	1	2	3	4	5	平均值
WC粒子	2271.33	2212.90	2122.78	2198.91	2122.78	2185.74
TC18(涂层)	444.18	449.37	466.05	479.61	463.76	460.59
TC18(基体)	401.78	400.20	401.70	404.81	407.87	403.27

## 3 试验与分析

### 3.1 接触疲劳性能测试与分析

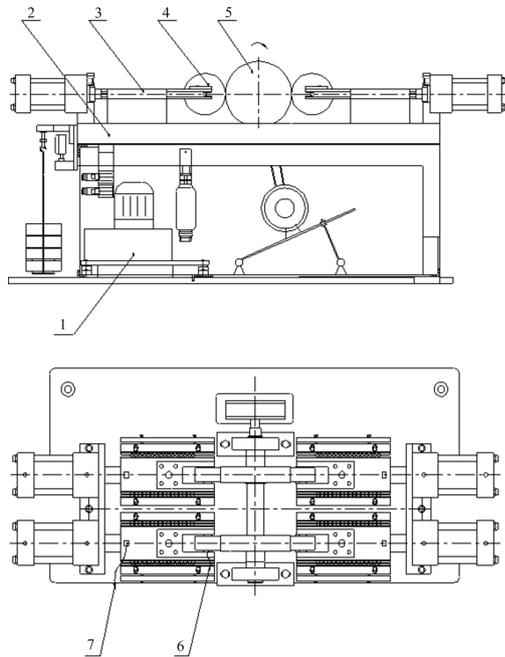
将试验样品在25 $^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的环境下等温放置4h以上,检测试验件的圆柱度、表面粗糙度和外径(精确到0.001mm),测量试验件的质量,并做记录。

将试验件(4号)装入对滚试验机,如图5所示,在试验件外圆表面均匀涂抹MP\_DX NO.2润滑脂。首次加载时,在静止状态下,先加至试验载荷的10%;检查滚轮接触情况,如果滚轮接触良好,开机运行,检查加载情况和滚轮接触情况,然后在3h运转过程中逐步加载到100%。以后每套试验件因停机检查等情况再次启动试验机时,在试验机运转0.5h过程中逐步加载到试验载荷的100%。

对滚试验机为ABLT-6A型轴承强化寿命试验机,每次装夹两个陪试圆盘,装夹4个试验件,试验载荷通过试验件施加在导轮上。驱动电机通过链轮驱动陪试圆盘匀速旋转,通过摩擦驱动试验件以(90 $\pm 2$ )r/min的转速匀速旋转。试验件通过支承轴承被装夹在试验机滑动导轨上,加载油缸通过滑动导轨将不同应力级的试验载荷施加在试验件上,使试验件与陪试圆盘表面的接触应力为规定的接触应力,并保持恒定。

每隔0.5h对试验件表面进行目视检查一次,检查试件表面涂层是否有起泡、剥落等现象。如有起泡、剥落等现象,则停止试验并做记录和拍照,然后用毛刷清洗表面油脂并做进一步检查和记录。每隔0.5h对载荷测量一次,保证载荷的正确性。试验过程中每运转2h(10800r)对试验件外径表面和导轮(陪试件)表面涂抹一次润滑脂。

加载到接触载荷时,试验件在试验载荷下运转10万转停机,卸下试验和导轮放在25 $^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的环境中4h以上,测量外径尺寸,并做记录,完成后再行上机试验。以后每隔10万转停机,重复以上测量。试验截止到100万转。



1—加载油缸; 2—机架; 3—滑动导轨; 4—试验件; 5—陪试圆盘  
6—液压加载供油系统; 7—驱动电机

图5 试验件安装简图

Fig.5 Illustration of specimen installment

试验终止条件:(1)试验件单块涂层剥落面积 $\geq 3\text{mm}^2$ ;(2)对于麻点剥落,在剥落集中区域处,10 $\text{mm}^2$ 面积内出现麻点率达到15%或以上;(3)试验件涂层表面出现起泡、分层、涂层被完全磨去等其他失效;(4)试验件运转了100.17万转。

对比试验的试验件基体材料、试验件尺寸与图1完全相同,表面是超声速火焰喷涂碳化钨(WC-17%Co)涂层,涂层厚度100~150 $\mu\text{m}$ 。

试验结果见表2,可以看出,在接触应力为450MPa时,激光熔覆涂层与超声速火焰喷涂碳化钨(WC-17%Co)涂层在达到100.17万转的试验截止值时,都没有发生失效。在接触应力为630MPa时,超声速火焰喷涂碳化钨(WC-17%Co)涂层有两个试验件未失效,其余4件都失效,失效平均寿命是51.84万转。激光熔覆涂层试验件有两个未失效,4件失效,失效平均寿命为100.17万转。

### 3.2 耐磨性能测试与分析

另外,对两种涂层的磨损速率进行测量,数据详见表3。可以看出,在450MPa和630MPa接触应力下,激光熔覆涂层的磨损速率分别为超声速火焰喷涂 WC-17%Co涂层的2.13倍和8.79倍。同种涂层随着接触应力的增加,磨损速率也在增加。在相同接触应力的前提下,激光熔覆涂层的磨损速率大于超声速火焰喷涂 WC-17%Co涂层,故在仅考

表2 接触疲劳试验性能

Table 2 Contact fatigue test date

	接触疲劳试验寿命(万转)			
	接触应力 450/MPa	平均值	接触应力 630/MPa	平均值
超声速火焰喷涂 WC-17%Co涂层	100.17 <sup>a</sup>	100.11	100.17 <sup>a</sup>	51.84
	100.17 <sup>a</sup>		100.17 <sup>a</sup>	
	100.08 <sup>a</sup>		71.28 <sup>b</sup>	
	100.08 <sup>a</sup>		56.16 <sup>b</sup>	
	100.08 <sup>a</sup>		25.92 <sup>b</sup>	
	100.08 <sup>a</sup>		54 <sup>b</sup>	
激光熔覆 复合涂层	100.17 <sup>a</sup>	100.17	100.17 <sup>b</sup>	100.17
	100.17 <sup>a</sup>		100.17 <sup>b</sup>	
	100.17 <sup>a</sup>		100.17 <sup>b</sup>	
	100.17 <sup>a</sup>		100.17 <sup>a</sup>	
	100.17 <sup>a</sup>		100.17 <sup>b</sup>	
	100.17 <sup>a</sup>		100.17 <sup>a</sup>	

注:a表示数据未失效、截止b表示数据失效数据

表3 涂层磨损速率

Table 3 Rate of coating wear

基体材料	涂层	磨损速率	
		接触应力 (450MPa)	接触应力 (630MPa)
TC18 (退火)	超声速火焰喷涂 WC-17%Co	0.60 $\mu\text{m}/10$ 万转	1.92 $\mu\text{m}/10$ 万转
	激光熔覆复合涂层	1.28 $\mu\text{m}/10$ 万转	16.88 $\mu\text{m}/10$ 万转

虑磨损失效时,激光熔覆涂层的厚度应略大于WC涂层。

### 3.3 失效机理分析

超声速火焰喷涂碳化钨涂层形貌图如图6所示。可以看出,超声速火焰喷涂碳化钨涂层以涂层和基体分层剥落破坏为主。随着循环进行,累积损伤逐渐增加,在涂层与基体之间形成裂纹。在接触应力的反复作用下,裂纹尺寸逐渐增大。当裂纹扩展到足够长度时,润滑油可以进入,在滚动载荷的作用下涂层脱落。

激光熔覆涂层表面形貌图如图7所示。从图7中可以



图6 超声速火焰喷涂碳化钨涂层表面形貌图

Fig.6 Fatigue surface morphologies of HVOF WC coating

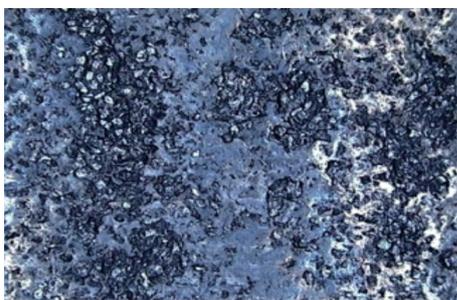


图7 激光熔覆涂层表面形貌图

Fig.7 Fatigue surface morphologies of the laser clad WC/Ti coating

看出,涂层表面发生轻微剥落和涂层被磨损,激光熔覆复合涂层滚动接触疲劳失效机理为循环应力超过材料的疲劳强度,引发裂纹,随着裂纹扩展,涂层发生表面点状剥落失效。

激光熔覆接触疲劳寿命提高的主要原因可能是涂层与基体之间的结合强度得到了提高。这是因为超声速火焰喷涂碳化钨涂层与钛合金基体之间属于“机械结合”,而激光熔覆涂层与钛合金基体属于“冶金级结合”,结合强度显著增强。

## 4 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)激光熔覆制备的碳化钨(WC)/钛合金(TC18)复合涂层与钛合金基体为冶金结合,WC增强颗粒在涂层中分布均匀。

(2)同等在滚动接触应力水平下,以钛合金基体的激光熔覆复合涂层比超声速火焰喷涂碳化钨涂层具有更高的抗滚动接触疲劳性能,但激光熔覆复合涂层耐磨性较差。

(3)激光熔覆复合涂层滚动接触疲劳失效机理为循环应力超过材料的疲劳强度,引发裂纹,随着裂纹扩展,涂层发生表面点状剥落失效。

AST

## 参考文献

- [1] 宋袁曾,刘立君,齐超琪,等.飞机襟翼滑轨用钛合金表面激光熔注 WC/TC4 复合涂层微观组织分析[J].焊接,2018(11):44-50.  
Song Yuanzeng, Liu Lijun, Qi Chaoqi, et al. Microstructure of laser melt injected WC/TC4 MMC on titanium alloy of aircraft flap track[J]. Welding & Joining, 2018(11):44-50. (in Chinese)
- [2] 姬寿长,李争显,李京龙,等.钛表面厚碳化钨涂层研究进展[J].钛工业进展,2018,35(6):20-25.  
Ji Shouchang, Li Zhengxian, Li Jinglong, et al. Research status

of thick WC coating on titanium alloy surface[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(6):20-25. (in Chinese)

- [3] Sudaprasert T, Shipway P H, McCartney D G. Sliding wear behavior of HVOF sprayed WC-Co coatings deposited with both gas-fuelled systems[J]. Wear, 2003, 255(7-12):943-949.
- [4] 王迪,林松盛,刘灵云,等.表面处理技术对钛合金疲劳性能影响的研究进展[J].真空,2019,56(6):36-42.  
Wang Di, Lin Songsheng, Liu Lingyun, et al. Research progress of surface treatment technology on fatigue properties of titanium alloy[J]. Vacuum, 2019, 56(6):36-42. (in Chinese)
- [5] 肖林林,任雁,高秋华,等.浅谈激光熔覆技术研究进展[J].新技术新工艺,2021(7):5-7.  
Xiao Linlin, Ren Yan, Gao Qiuhua, et al. Research on progress of laser cladding technology[J]. New Technology & New Process, 2021(7):5-7. (in Chinese)
- [6] Farayibi P K, Abioye T E, Clare A T. A parametric study on laser cladding of Ti-6Al-4V wire and WC/W2C powder[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87(9-12):1-10.
- [7] Farayibi P K, Murray J W, Huang L, et al. Erosion resistance of laser clad Ti-6Al-4V/WC composite for waterjet tooling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(3):710-721.
- [8] 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(9):2600-2607.  
Liu Jiandi, Zhang Shuquan, Wang Huaming. Microstructure and wear resistance of laser cladding WC particles reinforced composite coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9):2600-2607. (in Chinese)
- [9] 丁永志,刘元海,慕仙莲,等.2A12 铝合金表面石墨烯富镁涂层性能研究[J].航空科学技术,2021,32(9):57-62.  
Ding Yongzhi, Liu Yuanhai, Mu Xianlian, et al. Properties of graphene magnesium-rich coating on 2A12 aluminum alloy[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9):57-62. (in Chinese)
- [10] 苗迪迪,郑达,郑侃,等.旋转超声铣削钛合金残余应力及疲劳试验研究[J].航空科学技术,2020,31(6):73-77.  
Miao Didi, Zheng Da, Zheng Kan, et al. Experimental study on residual stress and fatigue of titanium alloy by rotary ultrasonic milling[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(6):

- 73-77. (in Chinese)
- [11] 杨素淞,白春玉,杨强,等. 金属材料与结构冲击疲劳问题研究综述[J]. 航空科学技术,2021,32(2):1-13.  
Yang Susong, Bai Chunyu, Yang Qiang, et al. Review on impart fatigue of metallic materials and structures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(2): 1-13. (in Chinese)
- [12] 杨理京,王培,叶源盛,等. TA2纯钛表面激光熔覆WC7Co/TC4复合涂层的组织演变特性[J]. 钛工业进展,2018,35(6):31-35.  
Yang Lijing, Wang Pei, Ye Yuansheng, et al. Characteristics of microstructure evolution of WC7Co/TC4 composite coating produced by laser cladding on TA2 pure titanium substrate[J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35(6): 31-35. (in Chinese)
- [13] 何斌峰. TC4钛合金激光熔覆NiCrAl+TiC涂层的性能[J]. 金属热处理,2019,44(9):69-73.  
He Bin Feng. Properties of laser cladding NiCrAl+TiC composite coatings on TC4 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(9): 69-73. (in Chinese)
- [14] 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(1):177-182.  
Li Fuquan, Gao Zhenzeng, Li Liqun, et al. Microstructure and properties of compound layer fabricated by coincident wire-powder laser cladding on Ti6Al4V surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(1): 177-182. (in Chinese)
- [15] 王培,李争显,黄春良,等. TC4钛合金表面激光熔覆Ni包WC复合涂层研究[J]. 钛工业进展,2014,31(3):39-42.  
Wang Pei, Li Zhengxian, Huang Chunliang, et al. Research of Ni/WC composite coatings on TC4 titanium alloy by laser cladding[J]. Titanium Industry Progress, 2014, 31(3): 39-42. (in Chinese)
- [16] 王阿敏,张红霞,戴景杰. 钛合金表面激光熔覆Ti/Al/B<sub>4</sub>C/C涂层组织与性能分析[J]. 材料保护,2020,53(3):41-46.  
Wang Amin, Zhang Hongxia, Dai Jingjie. Microstructure and properties of Ti/Al/B<sub>4</sub>C/C coating prepared by laser cladding on titanium alloy surface[J]. Materials Protection, 2020, 53(3): 41-46. (in Chinese)
- [17] Mateos J, Cuetos J M, Fernandez E, et al. Tribological behavior of plasma-sprayed WC coatings with and without laser remelting[J]. Wear, 2000, 239(2): 274-281.
- [18] Fauchais P, Montavon G, Bertrand G. From powders to thermally sprayed coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1/2): 56-80.

## Rolling Contact Fatigue Property of WC/ TC18 Composite Coating Prepared by Laser Cladding on Titanium Alloy

Liu Yubin, Feng Chenghui, Zhu Xiaojun, Wang Zhigang, Feng Jun

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

**Abstract:** In order to improve the rolling contact fatigue property of titanium alloy, tungsten carbide (WC)/ titanium alloy (TC18) mixed powder was used as raw material to prepare wear-resistant coating on TC18 substrate surface by laser cladding technology. The microstructure and microhardness of the coating were analyzed. The contact fatigue property of the coating was tested at room temperature. The results showed that the laser cladding coating is metallurgically bonded to the substrate. The WC phase uniform distributes over the  $\beta$ -Ti matrix as irregular block structure, and the microhardness of which is in the range of 2122~2271HV. Compared with WC-Co coating sprayed by supersonic flame on the surface of traditional titanium alloy, the rolling contact fatigue property of composite coating strengthened by laser cladding was improved, but the wear resistance was decreased.

**Key Words:** titanium alloy; laser cladding; composite coating; rolling contact fatigue; wear resistance