

# TC4 钛合金表面 WC 基耐磨涂层制备

杨伟华, 周海滨, 王 纯

(北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术国防科技重点实验室, 北京 100024)

**摘 要:** 采用等离子喷涂的方法在 TC4 钛合金表面制备适用于太阳翼铰链结构的 WC 基耐磨涂层, 对影响涂层性能的关键工艺参数进行分析。结果表明: 所制备的涂层孔隙率小于 5%, 显微硬度(HV<sub>0.3</sub>)为 880.2, WC 颗粒含量大于 45%(质量分数), 与 TC4 基体的结合强度为 61.0 MPa, 涂层表面粗糙度  $R_z$  为 30.6  $\mu\text{m}$ ; 主气流量、喷涂功率和喷涂距离对涂层性能影响较显著。

**关键词:** TC4 钛合金; 太阳翼; 铰链; WC 涂层; 等离子喷涂

中图分类号: V461

文献标志码: A

## Preparation of WC coatings for TC4

YANG Wei-hua, ZHOU Hai-bin, WANG Chun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Power Beam Process,  
Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** WC coatings were deposited on TC4 by plasma spray technology for solar wing hinge. The plasma spray process was studied. The results show that porosity of the coating is less than 5%, micro-hardness (HV<sub>0.3</sub>) is 880.2, the content of WC particles in the coatings is more than 45% (mass fraction), and the bonding strength of the coatings on TC4 is 61.0 MPa, the roughness ( $R_z$ ) of the coating is 30.6  $\mu\text{m}$ . The main gas flow, plasma energy and spray distance are the key parameters.

**Key words:** TC4 titanium; solar wing; hinge structure; WC coatings; plasma spray

随着空间技术的发展,越来越多的航天器带有可展开的太阳翼,考虑到运载工具空间的限制和在发射过程中要承受较大的过载,在发射阶段太阳翼一般呈收拢状态,直到飞行器与运载工具分离并进入自由飞行轨道后方可解锁展开<sup>[1-2]</sup>,为航天器提供能源。航天器太阳翼是空间飞行器电源分系统的重要组成部分,其可靠性直接关系到整个航天器的成败。太阳翼的展开总是围绕着各种类型的铰链机构进行<sup>[3]</sup>。由于太阳翼铰链间存在不可避免的间隙,在展开过程中,由于结构的巨大变化,往往诱发太阳翼的内碰撞,这些碰撞力往往较大,能够引起剧烈振动,甚至能够影响到航天器本体的姿态运动及太阳翼展开精度和稳定性,从而影响航天器系统的动力学性能。因此,适用于太阳翼铰链结构(如轴承套等)的耐磨涂层不仅需要具有

一定的耐磨性,而且须与基体结合良好(抗振动),表面具有一定的粗糙度(传动、控制姿态)。根据零件结构(铰链)和材料(TC4 钛合金)特点,选择等离子喷涂工艺在零件表面喷涂 WC-12Co 耐磨涂层。这是因为等离子喷涂把金属或陶瓷粉末送入高温的等离子体火焰,以使喷涂材料加热到熔融或半熔融状态,在高速等离子体焰流的加速下,高速撞击工件表面,经变形、凝固而形成涂层<sup>[4-5]</sup>,等离子喷涂具有工艺重现性好、操控便捷、涂层材料无污染、基体热影响小等特点<sup>[6-8]</sup>。

经过与客户协商确定适用于太阳翼铰链结构的等离子喷涂 WC 耐磨涂层必须满足如下技术指标:

- 1) 孔隙率不大于 5%;
- 2) 显微硬度(HV<sub>0.3</sub>)小于 800, WC 含量大于 45%;

- 3) 与基体结合强度不小于 55 MPa;  
4) 涂层表面粗糙度不小于 20  $\mu\text{m}$ 。

针对太阳翼铰链结构的耐磨需求, 本文作者研究等离子喷涂方法制备 WC 基耐磨涂层制备工艺及涂层特性以满足产品需求。

## 1 实验

### 1.1 试样制备

在 TC4(Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V)基体上, 采用等离子(美国 7MB 等离子喷涂系统)喷涂 WC-12Co(粒度为 10~45  $\mu\text{m}$ , 如图 1 所示)作为耐磨涂层, 厚度为 0.15~0.25 mm, 图 2 所示为 WC 耐磨涂层示意图。

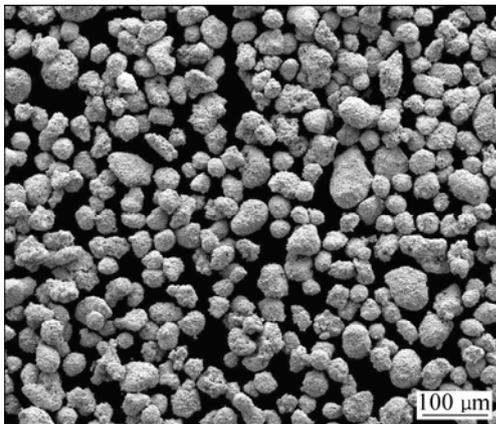


图 1 WC-12Co 粉末典型形貌

Fig.1 Microstructure of WC-12Co powder

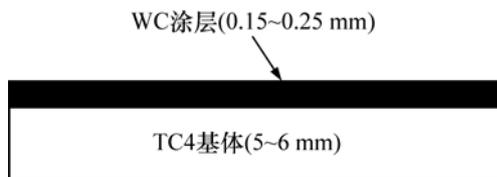


图 2 WC 涂层示意图

Fig.2 Sketch of WC coating

### 1.2 金相观察

根据 GB/T 13298 和 GB/T 4340.1—1999, 对涂层垂直基体的剖面进行金相观察, 测定涂层的孔隙率、显微硬度和 WC 颗粒的含量。

### 1.3 结合强度

根据 HB5476-91, 采用对偶拉伸法测定涂层与基体的结合强度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 主气流量对涂层性能的影响

等离子喷涂的主工作气体通常为氩气, 其流量大小对涂层性能具有显著的影响, 如图 3 所示。

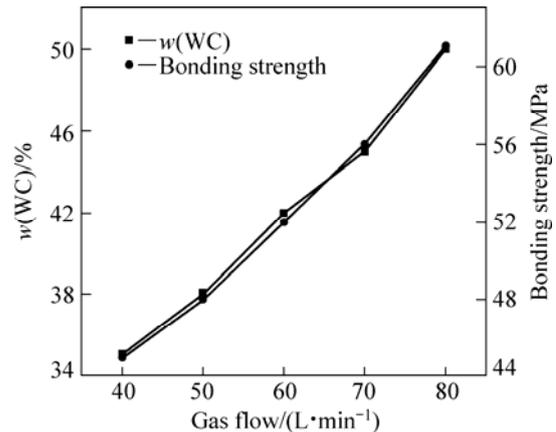


图 3 主气流量对涂层性能的影响

Fig.3 Effect of main gas flow on performance of coating

在喷涂功率 25 kW, 喷涂距离 70 mm 时, 氩气流量大于 70 L/min, WC 颗粒含量大于 45%, 涂层与基体结合强度大于 55 MPa。这是因为主气流量增加强化了 Ar 对 WC 颗粒的保护, 同时提高了喷涂材料粒子的速度, 缩短了其在等离子焰流中的时间, 减轻了 WC 颗粒的烧损, 因此, 涂层中 WC 颗粒含量有所增加; 另外粒子飞行速度的增加, 使粒子变形更加充分, 强化了“抛锚效应”, 提高了涂层的结合强度。

### 2.2 喷涂功率对涂层性能的影响

等离子焰流的功率也会对涂层性能产生较明显的影响, 选择合适的喷涂功率能够获得合适的涂层性能, 喷涂功率对涂层性能的影响如图 4 所示。

在主气流量为 80 L/min, 喷涂距离为 70 mm 的条件下, 当喷涂功率 25 kW 时, 涂层中 WC 颗粒的含量大于 45%, 同时结合强度能够达到 61 MPa; 当喷涂功率为 20 kW 时, 尽管涂层 WC 颗粒含量更高, 但是喷涂材料粒子熔化不充分, 涂层结构较松散, 因此结合强度不高; 当喷涂功率为 30 kW 时, 喷涂材料粒子熔化充分, 涂层致密, 与基体结合强度较高, 但由于功率过高, WC 颗粒烧损严重, 涂层中 WC 颗粒含量降至 38%。

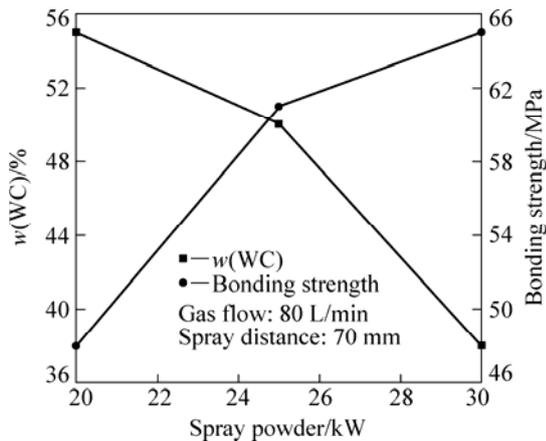


图 4 喷涂功率对涂层性能的影响  
Fig.4 Effect of spray powder on performance of coating

### 2.3 喷涂距离对涂层性能的影响

喷涂距离也是等离子喷涂工艺的关键参数之一, 如果喷涂距离过近, 喷涂粒子加速不充分, 涂层性能难以控制, 同时会对工件造成热损伤; 喷涂距离过远, 喷束发散, 涂层松散, 亦不能满足使用要求。喷涂距离对涂层性能的影响如图 5 所示。

在喷涂功率为 25 kW, 主气流量为 80 L/min 的条件下, 喷涂距离为 70 mm 时, 涂层孔隙率为 4.3%; 喷涂距离大于 70 mm 时, 涂层孔隙率迅速增加; 喷涂距离大于 80 mm 后, 涂层孔隙率增速放缓。这说明喷涂距离在 70~80 mm 时, 随喷涂距离增加, 喷涂粒子变形能力迅速变差, 导致孔隙率迅速增大; 喷涂距离超过 80 mm 后, 随喷涂距离增加, 喷涂粒子变形能力衰减变慢, 所以孔隙率增速亦放缓。从图 5 还可发现, 涂层结合强度随着距离的增加呈现出下降的趋势, 这是由于随着距离的增加喷涂材料粒子速度和表面温度

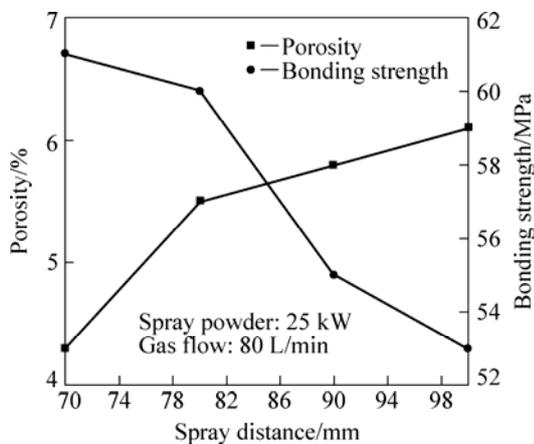


图 5 喷涂距离对涂层性能的影响  
Fig.5 Effect of spray distance on performance of coating

均有所下降, 导致“抛锚效应”变弱。

### 2.4 喷涂参数的选择

综上所述, 适用于太阳翼铰链结构的耐磨涂层等离子喷涂工艺参数如表 1 所示。

表 1 适用于太阳翼铰链结构的耐磨涂层制备工艺

Talbe 1 Preparation parameters of coating used for hinge structure of solar wing

Parameter	Value
Main gas flow/( L·min <sup>-1</sup> )	80±5
Spray power/kW	25±2
Spray distance/mm	70±5
Power feed rate/(g·min <sup>-1</sup> )	60±10
Carrier gas/(L·min <sup>-1</sup> )	15±2

Note: Prepared by 7MB plasma spray made in USA.

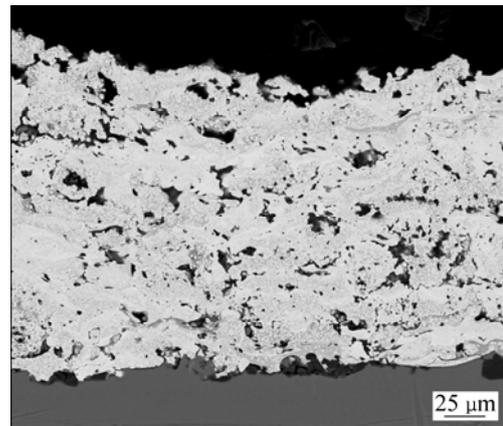


图 6 典型 WC 涂层截面组织

Fig.6 Microstructure of WC coating

### 2.5 耐磨涂层的特性

#### 2.5.1 孔隙率

由于等离子喷涂工艺的特点, 在涂层内部, 变形颗粒之间不可避免地存在一部分孔隙或空洞, 其孔隙率一般在 4%~20%之间。合理控制孔隙率有利于通过微裂纹增韧来提高涂层的韧性。在采用文中所选参数制备的 WC 基耐磨涂层垂直截面上任选 10 个类似图 6 的区域进行金相观察, 分别测量涂层孔隙率, 结果如图 7 所示。

涂层孔隙率基本保持在 4.0%~4.5%之间, 10 个取样点的平均值为 4.3%, 小于 5%的技术指标要求。

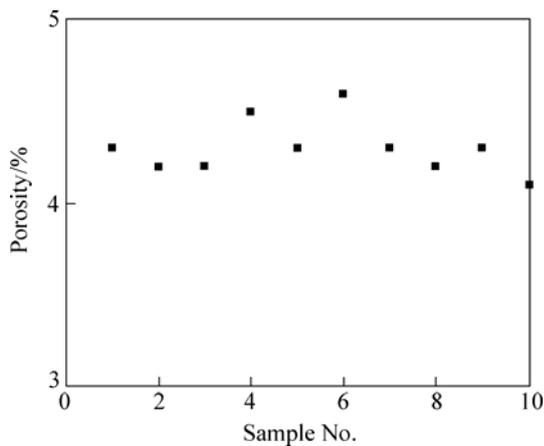


图7 涂层孔隙率测量结果

Fig.7 Porosity of coating

### 2.5.2 WC 颗粒含量

镶嵌在 Co 基体间的 WC 颗粒是涂层中起耐磨作用的关键材料,但是其抗氧化性较差,在等离子焰流中加热时烧损非常严重,形成  $W_2C$ 。尽管其硬度更高,但是会使涂层变脆,在冲击力作用下易发生剥落。因此,控制耐磨涂层中 WC 颗粒的含量非常关键。

通常 WC 颗粒含量大于 45% 时,涂层的显微硬度能够达到 800 以上,涂层具有非常好的耐磨性和抗冲击性。所选样本点的 WC 颗粒含量和显微硬度的实测值如图 8 和图 9 所示。

可见:涂层 WC 颗粒含量保持在 45%~55% 之间,10 个取样点的平均值为 50%,大于 45%;显微硬度基本保持在 800~900 之间,10 个取样点的平均值为 880.2,能够满足技术指标要求。

### 2.5.3 结合强度

等离子喷涂工艺过程中,喷涂材料粒子在等离子

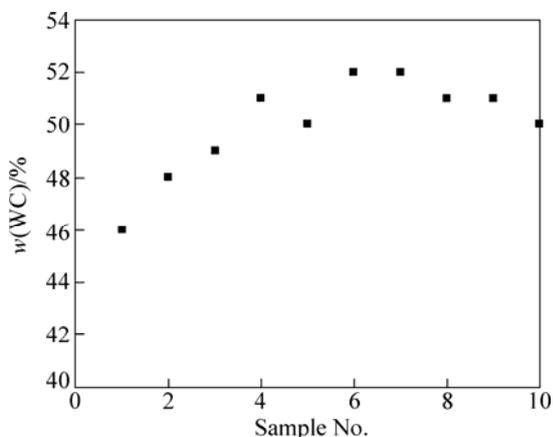


图8 涂层 WC 颗粒含量测量结果

Fig.8 WC content of coating

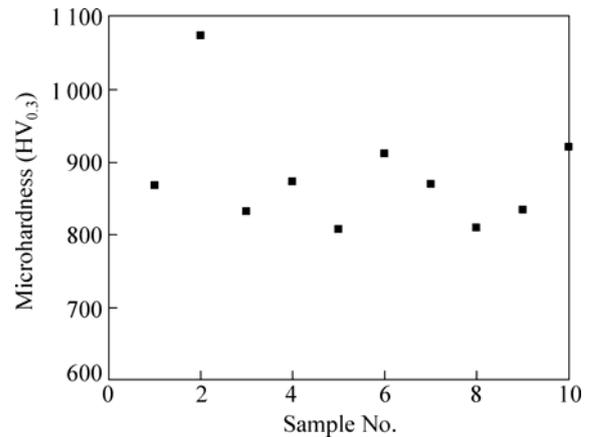


图9 涂层显微硬度测量结果

Fig.9 Microhardness of coating

焰流中加热、加速,撞击基体变形,主要依靠“抛锚”作用与基体结合在一起,属于典型的机械结合;涂层形成过程存在熔化、凝固的过程,不可避免存在一定的热应力,使涂层存在剥落趋势。控制工艺提高涂层与基体结合强度是提高涂层性能的重要手段。WC 基涂层与 TC4 基体的结合强度为 61 MPa(任选 6 个标准试样作为样本点),能够满足太阳翼铰链结构的工况使用,具体测量值如图 10 所示。

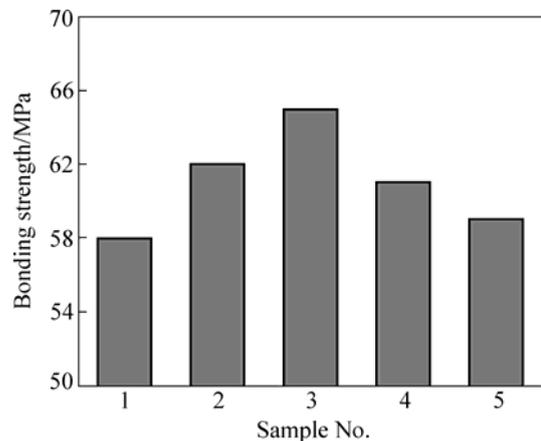


图10 涂层结合强度测量结果

Fig.10 Bonding strength of coating

### 2.5.4 粗糙度

由于铰链结构在太阳翼中起传动和控制姿态作用,因此,耐磨涂层必须具有一定的粗糙度,涂层实测值如图 11 所示(任选 10 个区域作为测量样本点)。

可见:涂层表面粗糙度基本保持在 25~35  $\mu\text{m}$  之间,10 个取样点的平均值为 30.6  $\mu\text{m}$ ,能够满足太阳翼铰链结构的使用要求。

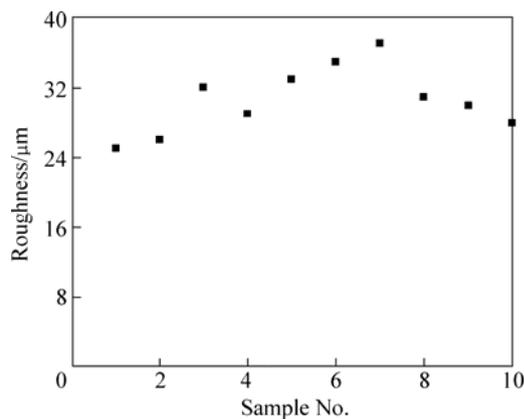


图 11 涂层的粗糙度

Fig.11 Roughness of coating

### 3 结论

1) 采用等离子喷涂方法能够喷涂在 TC4 表面喷涂适用于太阳翼铰链结构的 WC-12Co 耐磨涂层。

2) 等离子喷涂工艺中, 主气流量、喷涂功率和喷涂距离与涂层的孔隙率、WC 颗粒含量和结合强度等性能密切相关。

3) TC4 钛合金表面, 等离子喷涂 WC 基涂层性能如下: 孔隙率为 4.3%, 显微硬度( $HV_{0.3}$ )为 880.2, 与 TC4 基体结合强度为 61 MPa, 涂层表面粗糙度约为 30.6  $\mu\text{m}$ 。

### REFERENCES

- [1] 白争锋, 赵阳, 田浩. 含间隙太阳翼展开过程碰撞动力学研究[J]. 强度与环境, 2008, 35(4): 17-23.  
BAI Zheng-feng, ZHAO Yang, TIAN Hao. Study on impact dynamics for deployment of solar panel with clearance[J].

Structure & Environment Engineering, 2008, 35(4): 17-23.

- [2] 翟少雄, 王长胜, 张伟文, 温庆平, 胡安宗, 郝宏. 适用于热真空环境的太阳翼铰链组件测试系统[J]. 真空与低温, 2004, 10(4): 202-204.  
ZHAI Shao-xiong, WANG Chang-sheng, ZHANG Wei-wen, WEN Qing-ping, HU An-zong, HAO Hong. Development of the solar wing hinge modle test system applied in thermal vacuum environment[J]. Vacuum and Cryogenics, 2004, 10(4): 202-204.
- [3] 李委托. 太阳翼联动装置预置张力设计及分析[J]. 中国空间科学技术, 2006, 26(2): 52-57.  
LI Wei-tuo. The design and analyses of close cable loop of solar array[J]. Chinese Space Science and Technology, 2006, 26(2): 52-57.
- [4] B B 库吉诺夫. 等离子涂层[M]. 闻立时, 明旭光, 陈晓风, 译. 北京: 科学出版社, 1981.  
KYUNHOB B B. Plasma coatings[M]. WEN Li-shi, MING Xu-guang, CHEN Xiao-feng, transl. Beijing: Science Press, 1981.
- [5] 莲井淳. 喷镀技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.  
LIAN Jing-chun. Thermal spray technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1978.
- [6] 吴子健, 吴朝军, 曾克里, 王全胜. 热喷涂技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
WU Zi-jian, WU Zhao-jun, ZENG Ke-li, WANG Quan-sheng. Thermal spray technology and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [7] SOLOENENKO O P, FEDORCHENKO A L. Plasma jets in the development of new materials technology[C]//Proceedings of the International workshop. Utrecht: VSP, 1990.
- [8] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
XU Bin-xhi, ZHU Shao-hua. Theories and technologies on surface engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.

(编辑 赵俊)