

TC4-DT 表面 WC 涂层微动磨损性能

杨伟华

(中航工业北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 在 TC4-DT 钛合金表面采用超音速火焰喷涂的方法制备 WC10Co4Cr 涂层, 并评估涂层孔隙率、显微硬度、结合强度和抗微动磨损性能。结果表明: 涂层孔隙率可以控制在 1% 以下, 其显微硬度高达 1 000 HV_{0.3}, 结合强度大于 70 MPa, 其点接触微动耐磨损性能是基体的 30 倍。

关键词: TC4-DT; 超音速火焰喷涂; WC10Co4Cr 涂层; 微动磨损

中图分类号: TG174.4

文献标志码: A

Fretting wear performance of WC coatings on TC4-DT

YANG Wei-hua

(Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory,
Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

Abstract: WC10Co4Cr coatings were prepared by high-velocity-oxygen-fuel spray process on TC4-DT alloy. The coating porosity, microhardness, bonding strength and anti fretting-wear performance of the coatings were evaluated. The results indicate that the porosity is less than 1%, the microhardness is more than 1100 HV_{0.3}, the bonding strength is more than 70 MPa. And the anti fretting-wear performance of the coatings is about 30 times more than that of the substrate.

Key words: TC4-DT; high velocity oxygen fuel; WC10Co4Cr coatings; fretting wear

中强度高损伤容限钛合金 TC4-DT(Ti6Al4V ELI) 具有高比强度、耐腐蚀、抗高温等性能, 在美国 F-22“猛禽”第四代战机上得到了充分验证和广泛应用^[1-2]。但是由于钛合金的电子层、晶体结构和热传导率等特性致使其抗微动磨损性能很差, 易发生粘着磨损、磨粒磨损和氧化腐蚀等^[3-4], 必须对其采用表面工程的方法进行防护, 常用的表面防护方法有热喷涂、电镀、激光表面处理、有机涂层等^[5-8], 其中热喷涂由于经济性、环保性和便于操作等特点成为重要的防护手段。

超音速火焰喷涂技术是 BROWNING 博士于 1982 年发明的技术, 该工艺是将可燃气体/雾化煤油与氧气/压缩空气在燃烧室内燃烧, 通过拉瓦尔管(压缩-扩张)加速, 形成温度 2600 °C 以上、速度高达 2000 m/s 以上的高温高速焰流; 将粉末粒子送入焰流中加热、加速到 500~800 m/s 以上, 材料粒子处于熔化/半熔化状态, 撞击基体形成涂层的热喷涂技术。自从 20 世纪

80 年代末首款商用系统诞生以来, 超音速火焰喷涂技术在航空航天、石油化工、电力、造纸、钢铁及汽车等诸多领域获得了广泛的应用^[9-10]。

本文作者主要针对 TC4-DT 钛合金的耐微动磨损需求, 在其表面采用超音速火焰喷涂的方法制备 WC10Co4Cr 涂层, 并评估其孔隙率、显微硬度、结合强度, 通过与基体性能的对比, 评估了 WC10Co4Cr 涂层抗微动磨损性能。

1 实验

1.1 试样制备

将 TC4-DT 钛合金钢基体加工成 20 mm×10 mm×5 mm 和 d 25 mm×10 mm, 分别用于涂层组织检查和结合强度测量; 涂层粉末采用 WC10Co4Cr 粉

末(成都大光公司生产, 10~50 μm), 粉末形貌如图 1 所示, XRD 谱(见图 2)表明粉末主要由 WC 和 Co 组成。

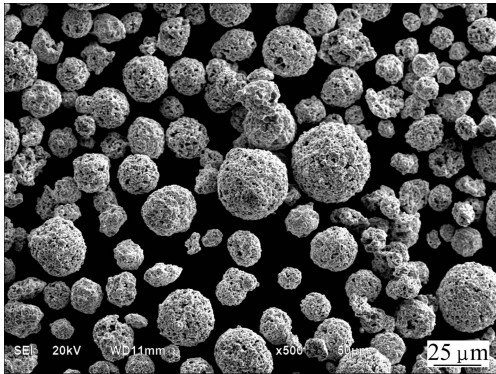


图 1 WC10Co4Cr 粉末的 SEM 像
Fig.1 SEM image of WC10Co4Cr powder

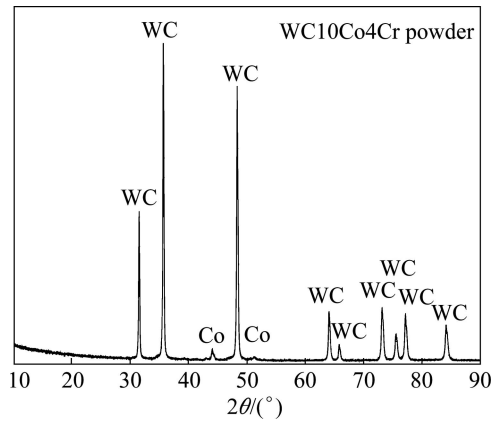


图 2 WC10Co4Cr 粉末的 XRD 谱
Fig.2 XRD patterns of WC10Co4Cr powder

1.2 涂层制备方法

在 TC4-DT 基体表面采用超音速火焰喷涂(EvoCoat 系统, WokaJet410 喷枪, 苏尔寿-美科生产)技术制备 0.20 mm 的 WC10Co4Cr 涂层, 基体表面用 24 棕刚玉吹砂处理后进行涂层喷涂, 喷涂工艺参数如表 1 所列。

1.3 涂层性能表征

1.3.1 孔隙率和显微硬度

涂层组织性能将决定涂层性能的好坏, 为此采用光学电金相显微镜和扫描电镜(JSM-6510)对涂层截面形貌进行了观察, 通过定量金相的方法测量了涂层的孔隙率, 并测量其显微硬度。

1.3.2 涂层结合强度

涂层与基体的结合效果可以用涂层结合强度表征, 可以间接体现其在外加载荷作用下的防护效果,

依据航空工业标准 HB5476—91 采用对偶拉伸的方法对涂层的结合强度进行测量, 测量方法示意图如图 3 所示。

表 1 涂层制备工艺参数

Parameter rate	Value
Flow rate of kerosene/(L·h ⁻¹)	22
Powder rate/(g·min ⁻¹)	60
Stand-off/mm	300
Barrel/mm	101
Flow rate of carrier gas (dual)/(L·h ⁻¹)	7.8
Flow rate of oxygen/(L·h ⁻¹)	876
Thickness/mm	0.20

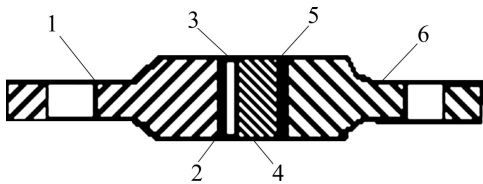


图 3 结合强度测量方法示意图
Fig.3 Scheme of test method of bonding strength: 1, 6—Tensile head; 2, 5—Adhesive; 3—Coatings; 4—Substrate

1.3.3 微动磨损性能

涂层与基体的微动磨损性能采用球-盘点接触进行, 具体试验条件如表 2 所列。

表 2 微动磨损测量参数

Description	Test parameter
Fretting wear (pin-disk)	Room temperature; Load, 200N;
	Frequency, 20 Hz; Swing, 100 μm;
	Duration, 30 min; Pin material,
	Si ₃ N ₄ ball (d10.0 mm); Rich oil

2 结果与讨论

2.1 涂层孔隙率和显微硬度

涂层金相组织如图 4(a)所示, 可以看出, 涂层呈现典型的层状结构, 由于超音速火焰喷涂工艺将喷涂粒子加速至 700 mm/s 左右, 涂层粒子变形充分, 组织均匀, 与基体敏米结合在一起。通过定量金相的方法获得涂层孔隙率小于 1%, 经测量涂层显微硬度 1083.1 HV_{0.3}, 满足 ASTM—2447 标准的要求。

涂层的低倍 SEM 像如图 4(b)所示。可以看出涂层

内部孔隙细小、均匀，约 1 μm，基本呈圆形分布。这种结构有利于在受到外力作用时吸收能量，避免载荷冲击过大引起涂层剥落和掉块。

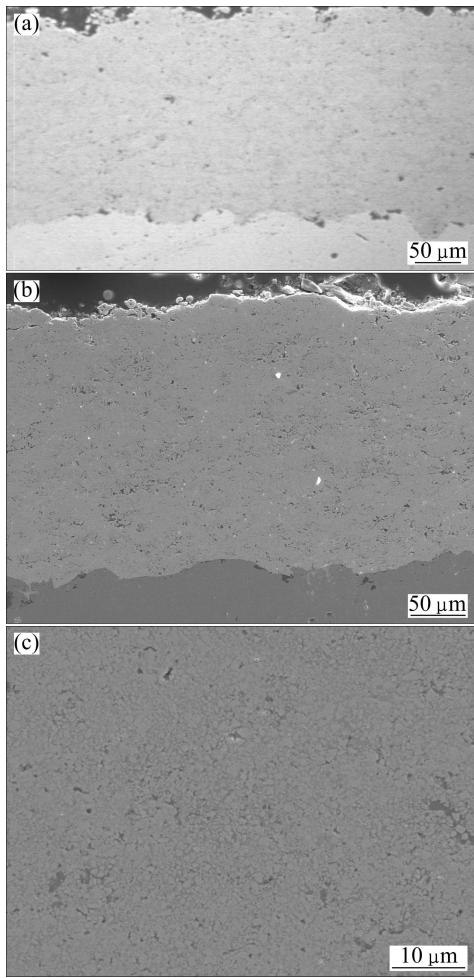


图 4 涂层剖面组织形貌

Fig.4 Metallographs of cross-sections of coatings: (a) OM image; (b), (c) SEM images

涂层的高倍 SEM 像如图 4(c)所示。可以看出，涂层中 2~3 μm 粒径均匀分布的 WC 颗粒被 CoCr 合金粘结相包围，紧密地连接在一起，避免了由于 WC 塑性不足造成涂层松散、脱落，同时 WC 颗粒由具有非常高的硬度，所以，制备的涂层将提供给材料表面良好的耐磨性能。

2.2 涂层结合强度

由图 4 可以看出，涂层与基体间具有非常好的结合效果，变形粒子通过典型的“抛锚作用”钩嵌联合在一起，形成典型机械结合结构。

涂层结合强度测量结果如图 5 所示，样品测量值均大于 70 MPa，平均值 72.8 MPa，达到了 AMS—2447 的技术要求，能够作为重要承力结构耐磨涂层使用。

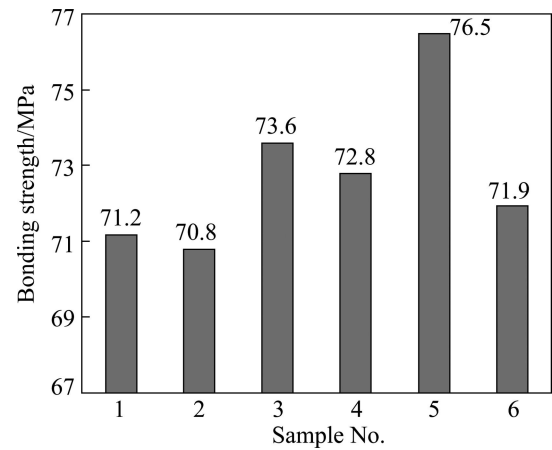


图 5 WC10Co4Cr 的涂层结合强度

Fig.5 Bonding strength of WC10Co4Cr coatings

2.3 涂层微动磨损性能

微动磨损性能主要通过微动磨损量和微动摩擦因数来表征。

微动磨损量(F_{WR})采用如下公式进行计算：

$$F_{WR} = \frac{V}{LD}$$
 (1)

式中： V 为磨损引起的体积损耗； L 为载荷； D 为载荷作用距离。测量结果如表 3 所列。

表 3 微动磨损测量结果

Table 3 Fretting-wear test results

Sample	Frictional coefficient	Volume loss/mm ³	Fretting wear rate/(mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)
TC4-DT	0.185±0.025	1.77×10 ⁻²	1.229×10 ⁻⁵
WC10Co4Cr coating	0.169±0.043	5.677×10 ⁻⁴	3.942×10 ⁻⁷

测量结果表明，涂层样品的磨损量仅为基体的 1/31，磨痕的三维形貌更形象地反映了涂层与钛合金基体的抗微动磨损能力；磨痕的扫描电镜形貌显示钛合金在微动载荷作用下呈现出典型微动磨损失效过程、由粘着、撕裂至脱落，磨痕形貌如图 5 所示。

随着时间的延长，钛合金基体进入 4×10³ 个循环、涂层进入 1.6×10⁴ 个循环，摩擦副间的跑合结束，摩擦因数进入平稳期；由于钛合金材料为均匀金属基体，一直保持平稳，而达到 2.6×10⁴ 个循环后，随着粘结相的磨损殆尽，涂层中出现 WC 颗粒的剥落，表现为摩擦因数的定期波动，周期约为 4×10³ 个循环，基本呈现出微动疲劳的失效特征，如图 6 所示。

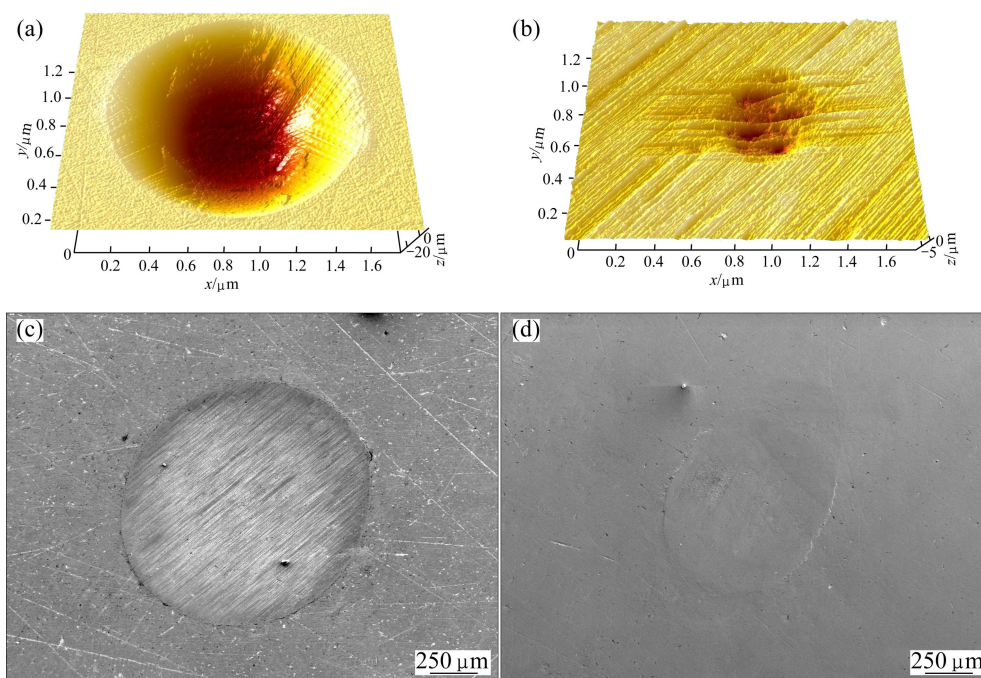


图 5 微动磨损测试后磨痕形貌

Fig.5 Appearances for coatings after fretting wear test: (a) 3D image of TC4-DT; (b) 3D image of WC10Co4Cr coatings; (c) SEM image of TC4-DT; (d) SEM image of WC10Co4Cr coatings

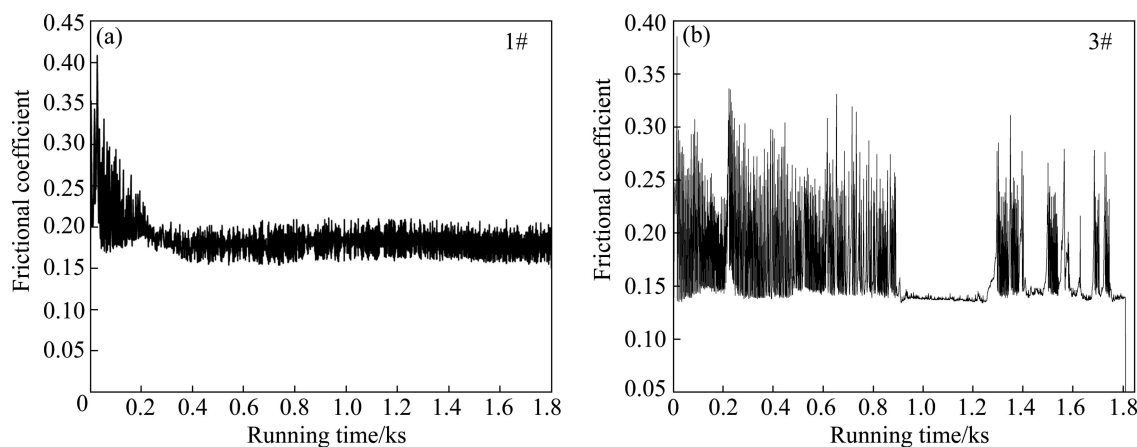


图 6 涂层摩擦因数随时间的变化曲线

Fig.6 Changing curves of frictional coefficient with time for coatings: (a) TC4-DT; (b) WC10Co4Cr coatings

3 结论

1) 超音速火焰喷涂可以在 TC4-DT 表面制备 WC10Co4Cr 涂层, 涂层具备典型的热喷涂涂层特征。

2) WC10Co4Cr 涂层孔隙率小于 1%, 显微硬度大于 1 000 HV_{0.3}, 结合强度大于 70 MPa, 能够作为各种承力结构的抗微动损伤防护涂层使用。

3) WC10Co4Cr 涂层可以实现 TC4-DT 钛合金的抗微动磨损防护, 磨损量仅为基体磨损量的 1/31, 同时改变了基体粘着、撕裂、脱落的失效模式, 呈现出一定微动疲劳失效特征。

REFERENCES

- [1] 冯宝香, 毛小南, 杨冠军, 等. 喷丸强化对 TC4-DT 钛合金组织性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2009, 38(4): 5-8.

- FENG Bao-Xiang, MAO Xiao-Nan, YANG Guan-Jun, et al. Effect of shot peening strengthening on microstructure and properties of TC4-DT titanium alloy[J]. *Material & Heat Treatment*, 2009, 38(4): 5–8.
- [2] 朱知寿, 马少俊, 王新南, 等. TC4-DT 损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展特性的研究[J]. *钛工业进展*, 2005, 22(6): 10–13.
- ZHU Zhi-shou, MA Shao-jun, WANG Xin-nan, et al. Study on fatigue crack propagation rate of TC4-DT damage tolerance titanium alloy[J]. *Titanium Industry Progress*, 2005, 22(6): 10–13.
- [3] HEMSON R. New titanium-titanium alloy solves autoclave problem[J]. *Advanced Materials and Processes*, 1995, 6: 27–28.
- [4] STRAFFELINIG G, MOLINARI A. Dry sliding wear of Ti6Al4V alloy as influenced by the counter face and sliding conditions[J]. *Wear*, 1999, 236: 328–338.
- [5] 杨杰, 安宇龙, 侯国梁, 等. 热喷涂铝青铜涂层的制备与微动磨损行为[J]. *中国表面工程*, 2012, 25(5): 105–109.
- YANG Jie, AN Yu-long, HOU Guo-liang, et al. Fretting behaviors of aluminum bronze coatings prepared by APS and HVOF spray technology[J]. *China Surface Engineering*, 2012, 25(5): 105–109.
- [6] 林修洲, 郑健峰, 林志君, 等. TC4 钛合金微弧氧化涂层的制备与微动磨损性能研究[J]. *航空材料学报*, 2009, 29(2): 43–47.
- LIN Xiu-zhou, ZHENG Jian-feng, LIN Zhi-jun, et al. Preparation and fretting wear performance of microarc oxidation coating on TC4 titanium alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2009, 29(2): 43–47.
- [7] 高广睿. 表面改性对钛合金高温微动疲劳行为影响的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- GAO Guang-rui. Study on the effect of surface modification on high temperature fretting fatigue behavior of titanium alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [8] 孙晓宾, 骆心怡, 郑婷, 等. 钛合金抗微动损伤的研究进展[J]. *金属热处理*, 2010, 35(3): 83–87.
- SUN Xiao-bin, LUO Xin-yi, ZHENG Ting, et al. Research progress in fretting-resistance technology of titanium alloys[J]. *Heat Treat of Metals*, 2010, 35(3): 83–87.
- [9] 吴子健, 吴朝军, 王全胜, 等. 热喷涂技术与应用[M]. 第一版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 25–26.
- WU Zi-jian, WU Chao-jun, WANG Quan-sheng, et al. *Thermal spray technology and application*[M]. 1st ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 25–26.
- [10] RUSCH W. Comparison of operating characteristics for gas and liquid fuel HVOF torches [C]//*Thermal Spray 2007, Global Coating Solutions: Proceedings of the 2007 International Thermal Spray Conference*, 2007: 572–576.

(编辑 龙怀中)