

集束电极电火花合成沉积 TiN 涂层组织及耐磨性能

徐安阳, 王晓明, 朱胜, 常青, 袁鑫鹏, 周克兵

(陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要:为满足提高铜合金表面耐磨性能的需求,提出了一种利用集束钛电极在QAl9-4铝青铜旋转工件表面电火花合成沉积TiN涂层的新方法,并进行了试验研究。结果表明:在铜合金表面制备出了均匀连续的TiN涂层;涂层表面由细化了的晶粒结构构成,组织致密;电极丝对涂层表面有较强的磨削涂覆作用,显著降低了涂层表面粗糙度值;涂层主要由TiN硬质相构成,厚度为85 μm左右,显微硬度可达890 HV_{0.05},约为基体(185 HV_{0.05})的4.8倍;涂层与基体间具有合金化冶金结合的过渡层;涂层表面摩擦因数为0.125~0.2,远小于基体(0.23~0.35)且波动性较小,磨损率约为主基体的49.6%,具有更好的减摩耐磨特性。

关键词:电火花沉积;集束电极;合成沉积;TiN涂层;耐磨性;磨损率

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)03-0115-08

Microstructure and Wear Resistance of TiN Coating Synthesized by Electric Spark Deposition with Cluster Electrode

XU Anyang, WANG Xiaoming, ZHU Sheng, CHANG Qing, YUAN Xinpeng, ZHOU Kebing

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China)

Abstract: A new method of electric spark discharge (ESD) was proposed to improve the wear resistance of copper alloys. TiN strengthened coating was formed on the surface of QAl9-4 aluminium bronze rotating workpiece through the reaction of titanium cluster electrode with nitrogen under the action of ESD heating. The results show that a uniform and continuous TiN coating was formed on the surface of copper alloy. The surface of the TiN coating is composed of refined grain structure and compact structure. The electrode wire has a strong grinding pin coating effect on the surface of the coating, which significantly reduces the roughness of the coating surface. The sum of the titanium and nitrogen atomson on the surface of the coating layer and the end of the electrode wire is more than 90%. The coating is composed mainly of TiN hard phase with a thickness of about 85 μm. The micro-hardness of the coating can reach 890 HV_{0.05}, which is about 4.8 times of the substrate (185 HV_{0.05}). There is an alloying metallurgical bonding layer between the coating and the substrate. The friction coefficient of the coating is 0.125–0.2, which is much smaller than that of the substrate (0.23–0.35), and the fluctuation is small. The wear rate of the TiN coating is about 49.6% of the substrate. The TiN coating has better antifriction and wear resistance than the substrate.

Keywords: electric spark deposition (ESD); cluster electrode; synthesis deposition; TiN coating; wear resistance; wear rate

收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-04-21

通信作者: 王晓明(1978—), 男(汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 轻合金表面防护、增材再制造复合能场成形; E-mail: uwangxm@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1105800); 中国博士后科学基金(2017M623445)

Fund: Supported by National Key R&D Program of China (2018YFB1105800) and China Postdoctoral Science Foundation (2017M623445)

引用格式: 徐安阳,王晓明,朱胜,等.集束电极电火花合成沉积 TiN 涂层组织及耐磨性能[J].中国表面工程,2019,32(3): 115-122.

XU A Y, WANG X M, ZHU S, et al. Microstructure and wear resistance of TiN coating synthesized by electric spark deposition with cluster electrode[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(3): 115-122.

0 引言

氮化钛(TiN)具有硬度高、熔点高、化学稳定性好，耐腐蚀性好、耐磨损性强并具有优良的导电性和导热性等特点^[1]。被广泛的应用在刀具、模具、装饰材料和集成电路等产业中^[2]。TiN涂层制备方法主要有：物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)、激光表面合金化、等离子喷涂法、反应电火花沉积等方法^[3-8]。这些方法普遍存在工艺复杂、成本高、厚度薄等问题，且均需要使用昂贵的专用设备，特定的场所，专业的技术人员^[9-11]，同时加工面积和厚度难以控制，使表面强化层制备成本大大增加，限制了其在工业上的广泛应用^[12-13]。传统的以钛材料电极在其它材料表面或者以其它材料电极在钛合金工件表面电火花沉积^[14-15](包括氩弧熔覆^[16])合成TiN涂层，能够获得硬度高^[17-19]、耐磨性能和耐腐蚀性能较好的TiN强化涂层^[20-21]，但是生成的涂层均匀性较差，表面粗糙度不易控制，生产效率低、工艺不稳定。

针对上述工艺方法的缺陷和问题，文中提出利用集束钛丝作为电极，变单一电极单通道放电为集束电极多通道放电，增大放电面积和放电时间，与作为反应和保护气体的氮气反应，在铜合金表面合成沉积TiN强化涂层。对涂层和电极的微观组织、涂层物相、硬度和耐磨性能等进行分析。

1 试验

1.1 试验原理

集束电极电火花合成沉积TiN涂层是在常规电火花沉积基础上提出的新工艺，其原理如图1所示。电极静止，工件做高速旋转，通过电极内

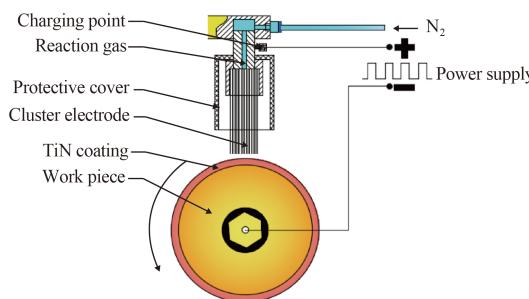


图1 集束电极合成沉积TiN涂层原理

Fig.1 Principle of synthetic TiN coating by cluster electrode

孔向合成沉积区域通入高纯氮气，在放电产生的高温高压作用下，熔化、熔融的电极材料与氮气发生化学反应，生成TiN硬质相，化学式为：



生成的TiN强化物质沉积在工件表面，生成合金化涂层^[13]，改善工件表面的力学、耐磨等性能。

1.2 试验设备与材料

沉积电源采用上海生造机电设备有限公司的SZ-8100型电火花沉积/堆焊电源，沉积参数为：电压40V，功率800W，频率300Hz，电极材料为纯钛TA2，丝径为Φ0.4mm，集束电极外径为Φ10mm，工件材料为QA19-4铝青铜，尺寸为Φ35mm×10mm圆盘件，经打磨、抛光、清洗，工件转速为1600r/min，采用99.9%的工业氮气作为保护和反应气体，气体流量为10L/min，沉积时间为10min。

1.3 表征与分析

采用时代公司的TIME3200便携式表面粗糙度仪测量表面粗糙度，采用HXS-1000AK型显微硬度计(上海昊微公司)测量硬度，Quanta 200系列扫描电子显微镜(SEM)观察表面微观形貌和测量表面元素及含量，采用D8A型X射线衍射仪(XRD，测量表面成分，采用CETR UMT-3型往复式摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验，研究TiN涂层的耐磨性能。

2 结果与讨论

2.1 涂层表面宏观形貌分析

集束电极电火花合成沉积制备的TiN涂层宏观形貌如图2所示。涂层表面均匀、完整、光滑，呈现TiN特有的金黄色，有电极磨削工件表面生成的条状纹理。这说明在合成TiN涂层过程中，电极端面与加工表面发生了接触摩擦，对TiN涂层表面有一定的修整作用。



图2 集束电极合成沉积TiN涂层宏观表面

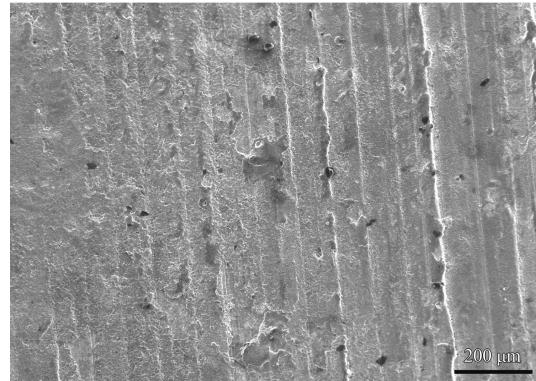
Fig.2 Macro surface of cluster electrode deposited TiN coating

测量相同参数条件下, 集束电极原位合成 TiN 涂层表面和直径 $\Phi 3\text{ mm}$ 单一电极电火花沉积表面的粗糙度值, 分别为 $R_a 5.91\text{ }\mu\text{m}$ 和 $R_a 12.43\text{ }\mu\text{m}$ 。TiN 涂层表面粗糙度值不到单一电极电火花沉积的一半, 表明集束电极对涂层表面的磨削涂覆作用显著降低了涂层表面的粗糙度值, 提高了 TiN 涂层的表面质量。

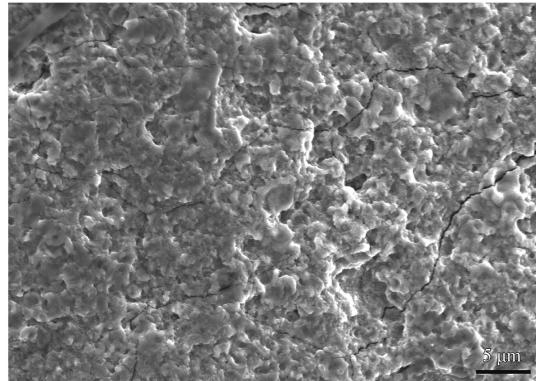
2.2 TiN 涂层表面微观形貌及 EDS 分析

2.2.1 TiN 涂层表面微观形貌分析

集束电极电火花合成沉积 TiN 涂层微观形貌



(a) Microscopic morphology



(b) Partial enlargement

图 3 TiN 涂层表面微观形貌

Fig.3 Surface microstructure of TiN coating

2.2.2 TiN 涂层表面 EDS 分析

采用扫描电子显微镜 (SEM) 自带的 X 射线能谱仪 (EDS) 对图 4 所示 TiN 涂层中两个有代表性区域进行元素面扫描分析, 结果如表 1 所示, 其中氮元素原子比将近 40%, Ti 原子占比约 50%, 表明集束钛电极与 N_2 在放电区域发生剧烈反应, 生成大量钛的氮化物硬质相。

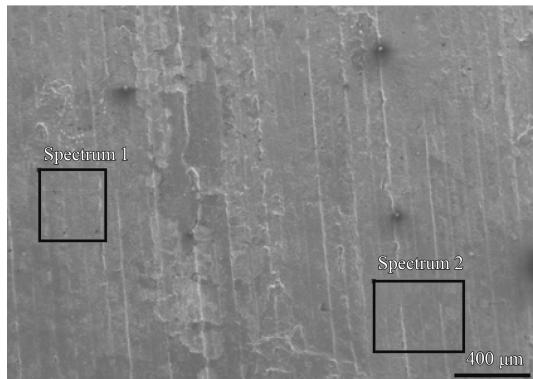


图 4 TiN 涂层表面 EDS 分析区域

Fig.4 EDS analysis region of TiN coating surface

如图 3 所示。

由图 3(a) 可知, TiN 涂层微观表面完整均匀, 未出现典型的放电蚀坑, 有明显的钛电极丝熔化过渡到工件表面的痕迹, 金属丝带动熔化熔融物摩擦涂覆在涂层表面形成条状纹理。由图 3(b) 可知, 涂层表面由细化了的晶粒结构构成, 组织致密, 细化硬化了表面组织有一定的微裂纹。表明: 电火花放电的骤冷骤热交替作用, 细化了涂层表面晶粒结构, 也产生了内应力, 生成微裂纹。

表 1 TiN 涂层表面 EDS 分析

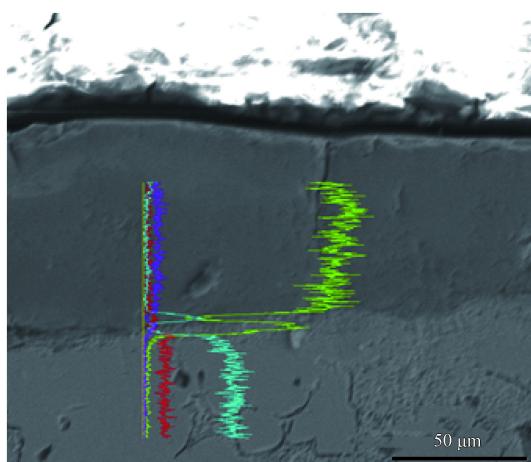
Table 1 EDS analysis of TiN coating surface (a/%)

Element	Area 1	Area 2
N	39.80	38.28
Al	2.95	3.23
Ti	51.16	51.35
Fe	0.48	0.73
Cu	5.61	6.41
Totals	100.00	100.00

2.3 TiN 涂层截面微观形貌及 EDS 分析

集束电极电火花合成沉积 TiN 涂层截面结构如图 5(a) 所示, 经测量 TiN 涂层厚度为 $85\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 涂层较为均匀连续, 有少量微裂纹, 与基体结合紧密, 界面处有过渡层。

对涂层-基体界面进行 EDS 线扫描分析, 结果如图 5(b) 所示。工件基体主要由铜和铝等元素组成, 涂层主要由钛和氮等元素组成, 结合 XRD 分析可知, 涂层主要由 TiN 硬质相组成。涂层与基



(a) Microstructure

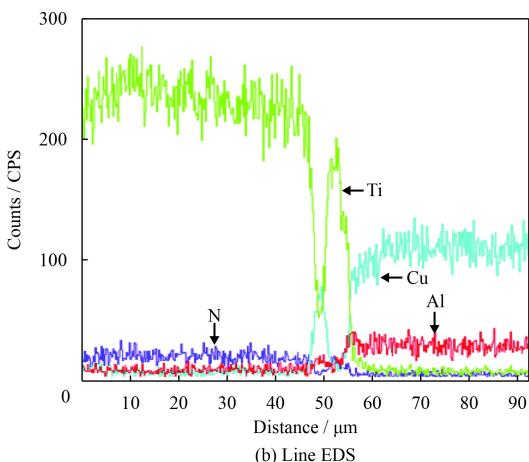


图 5 涂层截面结构和线扫描能谱

Fig.5 Crosssection structure and line EDS of coating

体界面处过渡层厚度约为 15 μm 左右, Cu、Al 等基体元素震荡降低, Ti、N 等涂层元素上升。这表明, 在电火花沉积中, 熔化熔融的合成物质和两极材料相互熔渗过渡, 在界面处生成合金化的冶金结合的过渡层。

2.4 电极端面微观形貌及 EDS 分析

单个电极丝端面形貌及 EDS 分析区域如图 6 所示, 所选区域的元素原子比如表 2 所示。由图 6 可知, 电极端部被重凝的熔化物质覆盖, 有熔化物质从端面边缘断裂脱离留下的痕迹, 电极端部直径大于电极丝原始直径。主要是由于, 电极丝直径较小, 易受热熔化熔融, 生成钛的氮化物, 一部分过渡沉积到工件表面, 一部分吸附于电极端面, 在电磁力、表面张力及摩擦力的作用下, 形成锥形粗大的端部结构, 使端面直径增大。

由表 2 可知, 电极端面主要由钛及其氮化物组成, 少量的铝和铜元素为放电沉积过程中, 工

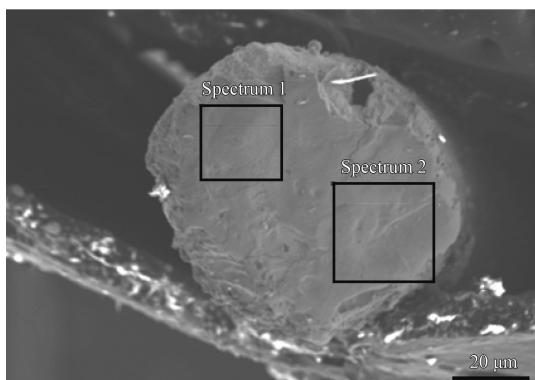


图 6 电极端面形貌及 EDS 分析区域

Fig.6 Morphology and EDS analysis area of electrode end face

表 2 电极端面 EDS 分析

Table 2 EDS analysis of electrode end faces (a/%)

Element	Area 1	Area 2
N	29.43	34.76
Al	1.34	0.41
Ti	67.18	64.36
Cu	2.05	0.47
Totals	100.00	100.00

件表面材料反渡到电极端面所致。在电极相对运动的前端区域 2 的氮元素含量大于其后部的区域 1 的含量。这表明, 电极前端优先与工件产生电火花放电, 温度较高, 且随工件旋转带入极间的氮气流量大, 与熔融熔化钛材料的反应更加充分, 生成较多的钛的氮化物。

2.5 TiN 涂层表面 XRD 物相分析

图 7 为 TiN 涂层的 X 射线衍射图谱, TiN 涂层较基体物相发生了明显变化, 衍射峰主要包含 TiN 和 Cu 等相, 结合表 1 所示钛和氮元素占总原

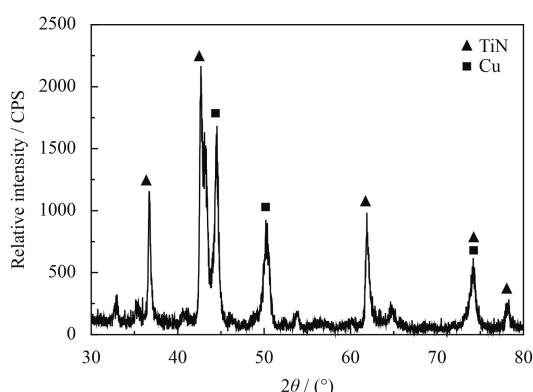


图 7 TiN 涂层的 X 射线衍射图谱

Fig.7 XRD patterns of TiN coating

子数的 90% 可知, 涂层主要由钛的氮化物硬质相构成。表明, 在电火花放电产生的高温高压作用下, 电极中的钛元素与氮气分子、放电电离的产生的氮原子、氮离子等发生化合反应, 生成 TiN 硬质相。由表 1 可知, 铜元素在沉积表面的含量较少, 对涂层的影响较小。

2.6 TiN 涂层显微硬度测试与分析

将 TiN 涂层样截面试打磨、抛光、清洗, 由表及里测试涂层表面到基体的显微硬度分布, 加载 50 g, 保荷 15 s, 获得如图 8 所示 TiN 涂层显微硬度分布曲线, 可以分为涂层区、过渡区和基体区, 涂层区显微硬度最高可达 $890 \text{ HV}_{0.02}$, 约为基体硬度 ($185 \text{ HV}_{0.02}$) 的 4.8 倍。这是由于涂层组织中含有丰富的 TiN 硬质相, 提高了涂层的整体硬度; 在涂层和基体界面附近的过渡区, 硬度逐渐降低, 一方面是由于基体材料对涂层中硬质相的稀释作用, 另一方面是电火花放电对基体材料

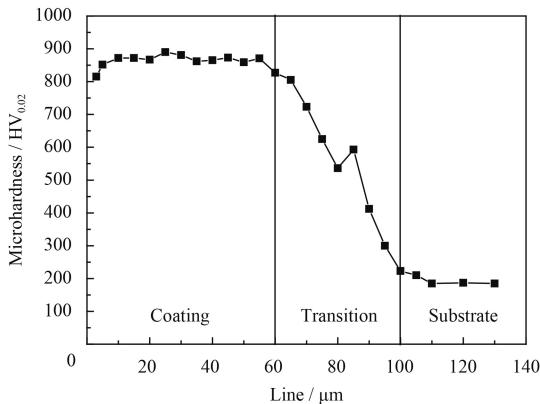


图 8 TiN 涂层显微硬度分布

Fig.8 Microhardness distribution of TiN coating

的循环热影响, 提高了界面处基体材料的显微硬度, 随着与涂层表面的距离增大, 硬质相含量和热硬化作用降低, 硬度也随之下降, 直到与基体相同。

2.7 TiN 涂层耐磨损性能研究

采用 CETR UMT-3 型摩擦磨损试验机测量干摩擦条件下 QAL9-4 铝青铜合金基体与 TiN 涂层的耐磨损性, 往复频率为 5 Hz, 振幅为 5 mm, 载荷为 10 N, 加载时间为 15 min, 试样在磨损前后均经酒精超声清洗 30 min, 然后采用精度为 0.1 mg 的 HC 电子天平称量其质量, 计算试样的磨损率, 测得两种表面摩擦因数对比如图 9 所示, 表面磨损的 SEM 形貌如图 10 所示。

由图 9 可知, 在稳定摩擦阶段, 基体的摩擦因数为 0.23~0.35, 而 TiN 涂层的摩擦因数仅为 0.125~0.2。TiN 涂层摩擦因数的波动幅度显著小于基体。基体的摩擦因数初始快速增长, 之后进

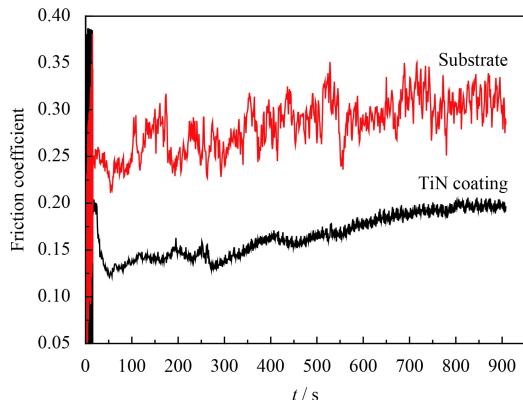
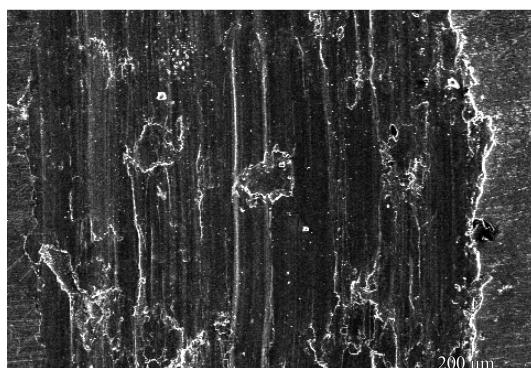


图 9 基体和 TiN 涂层试样摩擦因数随时间的变化

Fig.9 Variation of the friction coefficient with the time of the substrate and TiN coating



(a) Substrate



(b) TiN coating

图 10 基体和 TiN 涂层表面磨痕 SEM 形貌

Fig.10 SEM morphologies of wear marks on the surface of the substrate and TiN coating

入波动阶段，呈现震荡上升趋势；TiN涂层的摩擦因数，在摩擦初始阶段快速升高，可达0.2以上，之后经过短暂摩擦，呈现下降趋势，达到0.13后进入小范围波动阶段，随着时间的增长，摩擦因数逐渐增大，结束时接近0.2。这说明，集束电极丝在TiN涂层表面合成沉积形成的条状微观结构(如图3(a)所示)，在初始阶段增大了涂层的摩擦因数，当粗糙的表面结构被摩擦副磨削平整之后，摩擦因数有所降低。也表明，涂层中TiN硬质相分布存在差异，在摩擦副相对运动中，所受阻力不均匀，形成摩擦因数的波动，且随着摩擦加载时间的增长，摩擦副接触区域增大，摩擦产生的磨粒增多，摩擦副运动阻力增大，摩擦因数呈现逐渐上升趋势。TiN涂层的摩擦因数及其波动幅度远小于基体，表明合成沉积制备的TiN涂层较QAl9-4铝青铜基体具有更好的耐磨特性。

由图10(a)可知，基体试样磨损表面出现了明显平行于磨削方向的犁沟，宽度、深度较大，呈现典型的磨粒磨损，一些颗粒和块状物附着在磨痕表面，在磨擦过程中，由于摩擦发热，摩擦副之间产生明显粘着现象。因此基体表面的磨损主要是磨粒磨损，磨擦温度较高时出现少量粘着磨损。

从图10(b)可以看出，相同载荷下，TiN涂层表面磨痕宽度、深度均小于基体，磨痕表面较为光滑，犁沟磨痕较细且浅，周边有细小颗粒状磨粒，有部分物质剥落生成的剥落坑。这表明，在摩擦过程中，持续的循环载荷诱使涂层中的微裂纹等缺陷进一步扩展、连通，最终导致部分表层材料剥落，形成剥落坑^[22]，剥落物质在摩擦副不断挤压、剪切作用下，形成大量自由颗粒堆积在摩擦区域周边，增大了TiN涂层的磨损量。TiN涂层的主要磨损机制是疲劳磨损，还伴有一定程度的剥层磨损。与基体相比，TiN涂层具有更好的耐磨性能。

以单位载荷和单位磨损距离下的磨损体积作为磨损率，由公式(2)计算基体和TiN涂层的磨损率：

$$W_r = \frac{V}{FD} \quad (2)$$

式中， W_r 为磨损率； $V=\Delta m/\rho$ 为磨损体积， mm^3 ； Δm 为试样磨损质量，g； ρ 为材料密度，

g/cm^3 ； F 为施加载荷，N； D 为滑动行程，m，可由公式(3)求得：

$$D = f \times 2A \times 60t \times 1000^{-1} \quad (3)$$

式中， f 为振动频率，Hz； A 摩擦振幅，mm； t 为摩擦磨损时间，min。

经计算，基体磨损率为 $4.33 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ，而TiN涂层磨损率为 $2.15 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。TiN涂层的磨损率约为基体的49.6%，具有更好的减摩耐磨性能。

3 结 论

(1) 利用集束钛电极采用电火花合成沉积的方法在铜合金表面制备出了均匀连续的TiN涂层，电极丝对涂层表面有较强的磨削涂覆作用，显著降低了涂层表面粗糙度值。

(2) TiN涂层表面和电极丝端面钛和氮元素的原子占比之和大于90%，TiN涂层厚度在85 μm左右，主要由TiN硬质相组成，涂层与基体间具有冶金结合的过渡层。

(3) 涂层的显微硬度可达890 HV_{0.05}，约为基体(185 HV_{0.05})的4.8倍，TiN涂层的磨损机制以疲劳磨损为主，同时伴有一定程度的剥层磨损，摩擦因数为0.125~0.2远小于基体(0.23~0.35)且波动较小，磨损率约为基体的49.6%，具有良好的减摩耐磨特性。

参考文献

- [1] 谭国强, 苗鸿雁. 氮化钛粉体制备及反应机理的研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005, 27(5A): 414-417.
TAN G Q, MIAO H Y. Study on preparation and reaction mechanism of titanium nitride powder[J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition), 2005, 27(5A): 414-417 (in Chinese).
- [2] 谢致薇, 王国庆, 蒙继龙, 等. TiN薄膜的多元合金化强化[J]. 材料科学与工程, 2000, 18(4): 135-139.
XIE Z W, WANG G Q, MENG J L, et al. Improvement on properties of TiN film by multicomponents methods[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 18(4): 135-139 (in Chinese).
- [3] 杨凯. 反应磁控溅射法制备TiN薄膜的研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 8-9.
YANG K. The research on tin films deposited by magnetron sputtering[D]. Nang Jing: Southeast University, 2006: 8-9 (in Chinese).

- [4] 苗建旺, 王超, 周春根. 化学气相沉积 TiN 薄膜及其耐磨性能[J]. *航空学报*, 2008, 29(6): 1687-1691.
- MIAO J W, WANG C, ZHOU C G. Preparation and wear-resistant properties of TiN films by CVD[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2008, 29(6): 1687-1691 (in Chinese).
- [5] 马跃进, 李午申, 郝建军, 等. TC4 表面反应电火花强化层物相及磨损行为分析[J]. *焊接学报*, 2008, 29(10): 21-24.
- MA Y J, LI W S, HAO J J, et al. Study on XRD patterns and wear behavior of TC4 coated by reactive electric-spark deposition[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(10): 21-24 (in Chinese).
- [6] MATSUURA K, KUDOH M. Surface modification of titanium by a diffusional carbo-nitriding method[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(10): 2693-2700.
- [7] KATSUSHI F, HIROMICHI S, MASAYUKI S. Influence of electrical conditions on performance of electrical discharge machining with powder suspended in working oil for titanium carbide deposition process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 40(11): 1093-1101.
- [8] 徐安阳, 刘志东, 王振兴, 等. 钛合金表面柔性电极电火花强化层的组织与性能[J]. *机械工程材料*, 2011, 35(04): 46-48.
- XU A Y, LIU Z D, WANG Z X, et al. Microstructure and properties of electro-spark strengthening layer on titanium alloy surface by flexible electrode[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2011, 35(04): 46-48 (in Chinese).
- [9] 郝建军, 黄继华, 赵建国, 等. 电火花沉积反应合成 TiN 增强金属基复合涂层[J]. *焊接学报*, 2007, 28(10): 33-36.
- HAO J J, HUANG J H, ZHAO J G, et al. Reactive synthesis TiN reinforced matrix composite coating by electric-spark deposition[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(10): 33-36 (in Chinese).
- [10] LIU Z D, XU A Y, QIU M B, et al. Basic study of combustion-material removal process by Multi-Function electrode[J]. Elsevier, 2013(6): 64-70.
- [11] 郝建军, 彭海滨, 黄继华, 等. 钛合金表面反应电火花沉积 TiN/Ti 复合涂层[J]. *焊接学报*, 2009, 30(011): 69-72.
- HAO J J, PENG H B, HUANG J H, et al. TiN/Ti composite coating deposited on titanium alloy substrate by reactive electric-spark[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2009, 30(011): 69-72 (in Chinese).
- [12] 徐安阳, 刘志东. 柔性钛电极电火花表面强化模具钢 Cr12 试验研究[J]. *电加工与模具*, 2011(6): 24-27.
- XU A Y, LIU Z D. Study of electric discharge surface hardening mold steel Cr12 by flexible titanium electrode[J]. *Electromachining & Mould*, 2011(6): 24-27 (in Chinese).
- [13] 刘志东, 徐安阳, 王振兴, 等. 柔性电极电火花强化钛合金表面性能[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(2): 222-227.
- LIU Z D, XU A Y, WANG Z X, et al. Surface property of titanium alloys by electro-spark surface strengthening of flexible electrode[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(2): 222-227 (in Chinese).
- [14] 张平, 张二亮, 马琳, 等. 原位反应电火花沉积 TiN 陶瓷增强相的工艺性能[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2011, 25(4): 74-79.
- ZHANG P, ZHANG E L, MA L. Processing properties of tin ceramic coating prepared by in-situ synthesis electric spark deposition[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2011, 25(4): 74-79 (in Chinese).
- [15] 王振廷, 郑维, 周晓辉. 原位合成 TiN 增强 Ni 基复合涂层的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2011, 32(3): 93-96.
- WANG Z T, ZHENG W, ZHOU X H. Microstructure and performance of in-situ synthesis TiN particle reinforced Ni-matrix composite coating[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(3): 93-96 (in Chinese).
- [16] 王振廷, 丁元柱, 梁刚. 钛合金表面氩弧熔覆原位合成 TiB₂-TiN 涂层组织及耐磨性能[J]. *焊接学报*, 2011, 32(12): 105-108.
- WANG Z T, DING Y Z, LIANG G. Microstructure and wear resistance of in-situ synthesis TiB₂-TiN particulates of composite coating reinforced titanium alloy surface by argon arc cladding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(12): 105-108 (in Chinese).
- [17] 宋贵宏, 娄苗, 熊光连, 等. 铜合金表面 Ti/TiN 多层膜的制备、结构及其性能[J]. *沈阳工业大学学报*, 2012, 34(4): 391-396.
- SONG G H, LOU M, XIONG G L, et al. Preparation, structure and performance of Ti/TiN multilayer film on surface of copper alloy[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2012, 34(4): 391-396 (in Chinese).
- [18] 徐安阳, 刘志东. 柔性钛电极电火花合成 TiN 涂层[J]. *焊接学报*, 2014, 35(2): 23-27.
- XU A Y, LIU Z D. Study of the TiN coating synthesized by EDM of flexible titanium electrode[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(2): 23-27 (in Chinese).
- [19] 徐安阳, 刘志东, 李文沛, 等. 功能电极钛合金表面 TiN 涂层的原位合成[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2014(1): 11-16.
- XU A Y, LIU Z D, LI W P, et al. In-situ synthesis of TiN coating on titanium alloy surface by EDM with functional electrode[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2014(1): 11-16 (in Chinese).
- [20] 王振廷, 胡磊, 高红明, 等. 氩弧熔覆原位合成 TiN 复合涂

- 层的组织与耐磨性[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2014, 24(5): 451-454.
- WANG Z T, HU L, GAO H M, et al. Research on structure and wear resistance of TiN composite coating by argon arc cladding in situ synthesis[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2014, 24(5): 451-454 (in Chinese).
- [21] HONG X, TAN Y F, WANG X L, et al. Effects of nitrogen flux on microstructure and tribological properties of in-situ TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electro-
- park deposition[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(10): 3329-3338.
- [22] 田宗军, 王东生, 沈理达, 等. TiAl合金表面激光重熔陶瓷涂层组织及耐磨性能[J]. *南京航空航天大学学报*, 2009, 41(3): 348-353.
- TIAN Z J, WANG D S, SHEN L D, et al. Microstructure and wear resistance of laser remelted ceramic coatings on TiAl alloy surface[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(3): 348-353 (in Chinese).

• 本刊讯 •

第二十届全国疲劳与断裂学术会议将在重庆召开

为解决材料与结构的安全评价和寿命预测问题, 推动我国疲劳断裂领域的理论研究和技术应用, 服务国家经济建设和社会发展, 加强该领域专家学者交流、研讨与合作, “第二十届全国疲劳与断裂学术会议”将于 2020 年 5 月 8—11 日在重庆保利花园皇冠假日酒店召开, 会议由中国航空学会失效分会、材料工程分会和中国航发北京航空材料研究院承办。

全国疲劳与断裂学术会议始于 1977 年召开的“中国金属学会断裂学科讨论会”和 1982 年召开的“全国疲劳学术大会”, 在各自举行八届以后, 1998 年合并举办“第九届全国疲劳与断裂学术会议”。此后每两年举办一届, 由中国航空学会、中国金属学会、中国力学学会、中国腐蚀与防护学会、中国机械工程学会、中国材料研究学会六学会轮流主办。

论文摘要请通过会议网站 (<http://ncff2020.com/>) 的投稿系统提交, 摘要字数限制在 1000 字以内, 摘要提交日期为 2019 年 9 月 1 日—12 月 30 日。通过论文摘要审核的作者将收到组委会发出的录用通知, 全文接收的截止日期为 2020 年 2 月 15 日。会议将提供摘要集, 供与会者交流。欢迎全国从事相关领域研究和应用的专家学者、科研人员、工程技术人员、高校师生踊跃投稿, 欢迎全国从事相关领域的高等院校、科研院所和企事业单位踊跃参会。

(本刊编辑部 供稿)