

电火花表面强化 TC4 钛合金的组织与性能

李敏¹ 王宏伟² 蔡兰蓉¹ 刘鹏鑫¹

(1 天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津 300222)

(2 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

文 摘 以石墨为电极, 分别在煤油和雾介质中对 TC4 钛合金(表面分别未涂覆及涂覆碳层)进行电火花表面强化。对强化层微观组织、相组成及显微硬度进行了研究。结果表明, 所有强化层组织均呈菊花瓣状。合金表面涂覆碳层后强化层表面球状碳化物数量都较未涂覆时明显增加, 且在煤油介质中得到的强化层中碳化物在花瓣边缘处聚集, 雾介质条件下碳化物分布更为弥散、均匀。对强化层进行物相分析表明, 强化相由电极 C 和基体 Ti 原位反应生成, 强化层由基体 α -Ti 和 TiC 相组成。强化层表面显微硬度较原始 TC4 钛合金相比大幅提高, 雾介质中得到的强化层显微硬度值与煤油介质中基本相同, 可达 800 MPa 左右, 但分布更为均匀, 力学性能更稳定。

关键词 电火花表面强化, 强化层, 微观组织, 相组成, 显微硬度

Microstructure and Properties of TC4 Alloy With Electrical Discharge Surface Strengthening

Li Min¹ Wang Hongwei² Cai Lanrong¹ Liu Pengxin¹

(1 School of Mechatronics Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222)

(2 School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The electric spark deposition method was used to strengthen TC4 alloy surfaces (with or without carbide layer coating, respectively) under kerosene-based oil or misted deionized water medium conditions. The microstructure, phase compositions and microhardness of strengthened layer were investigated. The results indicated that microstructure of strengthened layer showed chrysanthemum petal-like. Under kerosene-based oil medium condition, compared with uncoated surfaces the quantity of carbide after coating on alloy surface was increased, which were overlapping on edges of petals as while. Under misted deionized water medium condition, the distribution of carbides on strengthened layer was more disperse and uniform. Analysis for phase composition of strengthened layer showed that it was composed of α -Ti and TiC. In addition, compared with primary TC4 alloy, the microhardness of strengthened layer was improved significantly. The microhardness was measured to be about 800 MPa under both medium condition while it showed more stable performance in misted deionized water medium condition.

Key words Electrical discharge strengthen, Strengthen layer, Microstructure, Phase composition, Microhardness

0 引言

钛合金具有质量轻、比强度高、耐腐蚀等优点, 在冶金、机械、化工和航空航天领域获得了广泛的应

用^[1-3]。但钛合金硬度低、耐磨损性能差限制了其应用范围^[4-6]。近年来, 科研工作者针对钛合金各种表面强化技术开展了广泛的应用研究。如传统的化学

收稿日期: 2012-11-21

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(50775143), 校级科研基金资助项目(KYQD10012)

作者简介: 李敏, 1981 年出生, 讲师, 主要从事钛合金电火花表面强化研究。E-mail: limin04s@163.com

热处理表面渗碳或氮、激光熔覆、微弧氧化、离子注入等,但存在着如加热温度高、热处理时间长、渗层薄、合金表面不平整、成分及组织控制比较困难、增强层与基体结合较差、硬质层表层组织疏松、易脱落及设备昂贵等缺陷^[7]。

电火花表面强化工艺是直接利用电极与工件之间的瞬态放电,放电能量使电极材料向基体扩散、迁移,以实现基体局部表面熔化和合金化在工件表面形成强化层,其显微硬度、耐磨性和耐腐蚀性等显著提高^[8-10]。以往的电火花表面强化主要集中在单一工作介质(液或气)方面^[11-14]。液中电火花表面强化工艺以煤油为工作介质,利用工具电极在电火花放电过程中所产生的熔融液滴或气化气体与工件以及工作液分解物在工件表面发生合金化反应形成强化层。由于工作液的气化及膨胀的去除效果,会对熔化并转移到工件表面的电极强化材料有很强的冲刷作用,十分不利于沉积层的形成。以空气为工作介质可以扩大电火花表面强化的应用范围,但存在加工精度均一性差、强化层较薄等缺点。以雾(气液混合)作为工作介质的可行性首先由 Tanimura 等进行阐述^[15],并应用在了电火花加工领域,取得了较好的成效。本课题组研究团队长期从事雾状介质放电机理的研究,并在雾中电火花加工领域取得了一定的研究成果。基于以上研究基础,为解决上述单一介质电火花表面强化存在的问题,本文以航空航天工程领域中应用较广泛的 TC4 钛合金为研究对象,以石墨为电极,在新型的雾状介质中对其进行电火花表面强化,对强化层的微观组织、物相组成和显微硬度进行了研究。并与在传统的单一煤油介质中电火花表面强化后强化层组织、物相组成和显微硬度进行了比较。

1 实验

1.1 实验材料

采用从德国莱宝(Leybold/ALD Vacuum Technologies GmbH)公司引进的 EV DN500 型真空水冷铜电磁感应熔炼/离心浇铸设备熔炼浇注的 TC4 (Ti6Al4V) 钛合金(合金化学成分如表 1 所示)。合金微观组织形貌为典型的层片状双相组织结构(图 1)。

表 1 TC4 铸件化学成分的测试结果

Table 1 Chemical composition of the TC4 casting						wt %
Al	V	Fe	Cu	Si	Ti	
5.63	4.08	0.12	0.034	-	其余	

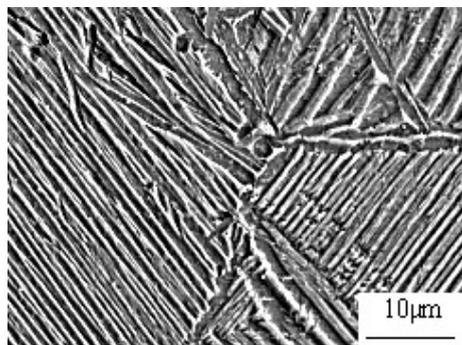


图 1 TC4 钛合金微观组织形貌

Fig. 1 Microstructure of TC4 alloy

1.2 仪器设备

电火花表面强化实验采用北京安德建奇电火花成形机床,工具电极为石墨,采用的工作放电介质是传统的电火花专用煤油和新型的雾状去离子水,雾状发生器由本课题组自行研制,如图 2 所示。

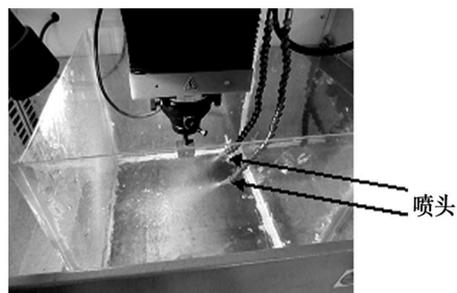


图 2 电火花加工喷雾装置

Fig. 2 Spray device of electric-spark process

1.3 实验参数及试样制备

电火花实验参数:脉冲间隔 $t_{off} = 50 \mu s$,脉冲宽度 $t_{on} = 50 \mu s$,峰值电流 $I_c = 11.4 A$,电源极间放电电压为 120 V,加工深度 $h = 0.1 mm$ 。强化时,工件接电源正极,工具电极接电源负极。

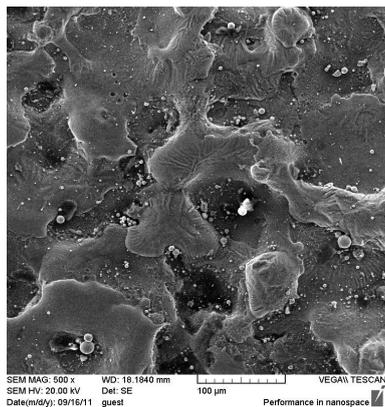
本实验共分为四组,为在煤油工作介质中 TC4 合金表面分别涂覆碳层(涂覆厚度为 0.1 mm)和无碳层条件下电火花表面强化、雾工作介质中 TC4 合金表面分别涂覆碳层(涂覆厚度为 0.1 mm)和无碳层条件下表面强化。

试样规格为 10 mm×10 mm×5 mm,经 180# ~ 600# 金相砂纸磨光,然后抛光后进行电火花表面强化实验。在 OLYMPUS 光学显微镜及 Tescan VEGA TS5136XM 扫描电子显微镜下观察原始合金及强化层表面显微组织,在显微硬度计下进行显微硬度测试,在 X 射线衍射仪上对强化层进行物相分析。

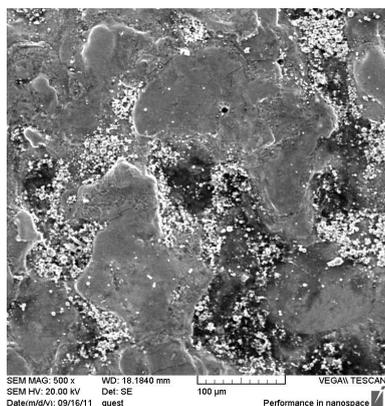
2 结果与分析

2.1 对合金表面强化层微观组织的影响

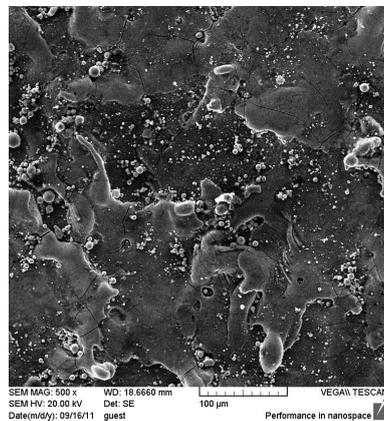
图3为原始TC4钛合金分别在煤油和雾介质中,表面在未涂覆及涂覆碳层条件下进行电火花表面强化后强化层的微观组织形貌。根据电火花强化过程可知,放电产生的高温使熔融的电极材料和部分基体材料在合金表面合金化发生反应,生成增强相。可以看出,煤油介质中合金表面未涂覆碳时,强化层组织呈菊花瓣状,且花瓣边缘位置呈亮白色,微量球状碳化物较为弥散的分布在合金表面[图3(a)]。此时表层组织结构和成分取决于电极材料和原始合金基体材料,由电极和原始合金材料的元素(C和Ti)、基体相及少量的碳化物组成,能谱分析已证明以上元素的存在。合金表面涂覆碳层进行电火花表面强化后,强化层表面球状碳化物数量明显增加,且在花瓣边缘的重叠处聚集[图3(b)]。这是由于合金表面涂覆碳层后,在电火花加工合金化过程中,参加反应的元素除了基体合金提供的Ti、电极提供的C之外,C含量明显增加,使得反应后的碳化物含量明显增加,X射线衍射分析表明为TiC相。由图3(c)、(d)可看出,较煤油介质条件相比,菊花瓣状的组织重叠在一起,致密性提高,这是由于雾介质的冷却速率大于煤油介质。另外,碳化物较为弥散和均匀的分布在基体上,表明雾介质条件下原子的扩散速率大于煤油介质,进而获得的组织出现偏聚的几率减小。



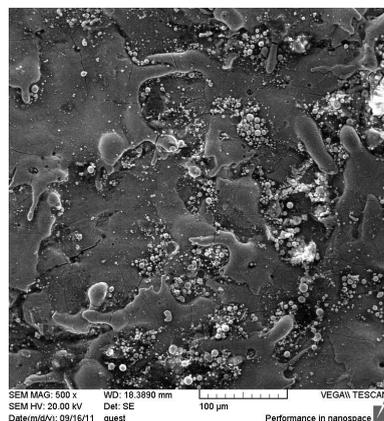
(a) 煤油介质,合金表面未涂碳



(b) 煤油介质,合金表面涂碳



(c) 雾介质,合金表面未涂碳



(d) 雾介质,合金表面涂碳

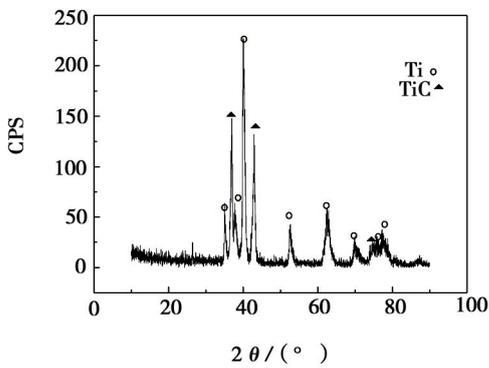
图3 不同工艺条件下表面强化后TC4钛合金微观组织形貌

Fig. 3 Microstructure of TC4 alloys after surface strengthening under different conditions

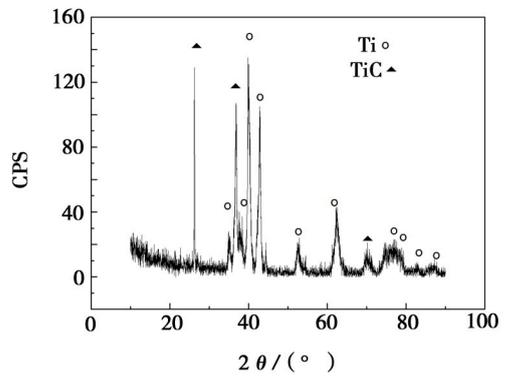
2.2 对强化层物相组成的影响

图4为TC4钛合金电火花表面强化后的X射线衍射图谱。可以看出,强化层均由两种相组成,分别为基体 α -Ti和TiC相。表明强化后表面层出现了碳和钛的化合物 $Ti+C=TiC$ 。且与雾介质相比,煤油介质中获得的强化层中TiC相含量较多,基体 α -Ti相含量减少。这主要是由于煤油工作介质较流动的雾介质能提供一个更加稳定的熔化及结晶环境,基体相与工具电极石墨(及合金表面涂覆碳层)在煤油工作介质中损耗较小。另外,与未涂覆碳层相比,合金表面涂覆碳层后强化层中TiC相含量明显增加,基体 α -Ti相含量明显减少。这是因为合金表面涂覆碳层后,在电火花表面强化过程中除了电极能够提供的C元素之外,明显增加了合金化过程中的C含量,使得生成强化层的TiC含量明显增加。

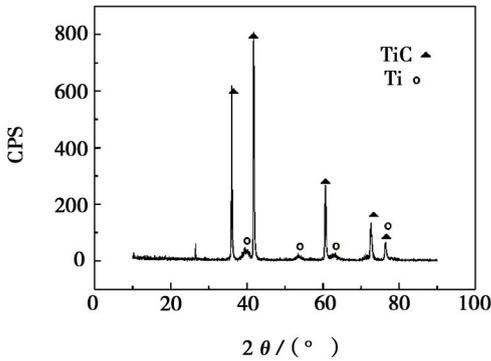
由图4还可以看出,与煤油介质相比在雾状介质条件下,虽然仍有几个明显的尖锐峰,但尖锐的程度不高,衍射峰的宽度明显增加,出现类似非晶衍射所特有的“馒头峰”。



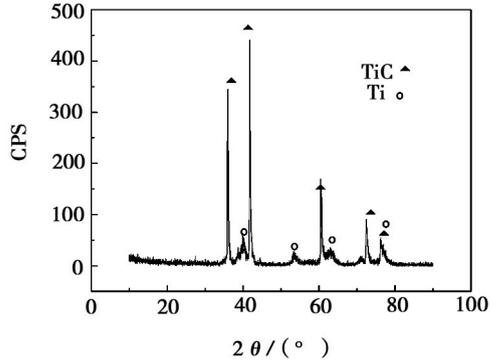
(a) 煤油介质, 合金表面未涂碳



(b) 煤油介质, 合金表面涂碳



(c) 雾介质, 合金表面未涂碳



(d) 雾介质, 合金表面涂碳

图4 TC4 钛合金表面强化后的 X 射线衍射图谱

Fig.4 X-ray diffraction patterns of strengthened of TC4 alloy

根据文献[16]分析可知,可能是晶体衍射峰叠加在非晶衍射峰的“馒头峰”上形成叠加峰的结果。由电火花加工过程,强化中产生高温和瞬时极冷,使电极材料、熔化的基体材料(和涂覆材料)以很快的冷却速率冷却。煤油的蓄热系数明显大于雾(气和液),而热导率与雾相比又较小,因此,使得煤油介质中合金化过程的环境温度高于雾状介质,导致冷却速率较雾状介质中小。除此之外,雾状介质的产生是在

雾状发生器中以喷雾的形式形成,为流动状态。强化过程中,流动的雾状介质带走了一定的热量,对凝固过程起到一定的冷却作用,也是形成其合金化过程中环境温度低于煤油介质的原因之一。

2.3 对合金表面力学性能的影响

不同强化工艺条件下,在强化层表面随机选取四个位置进行显微硬度测试(表2)。

表2 不同工艺条件下 TC4 钛合金表面显微硬度(HV)

Tab.2 Microhardness of surface of TC4 alloys under different condition

试样	第1组数据	第2组数据	第3组数据	第4组数据
原始 TC4 钛合金	290	353	302	303
煤油介质未涂碳	569	711	841	912
煤油介质涂碳	709	823	1199	1064
雾介质未涂碳	730	821	830	785
雾介质涂碳	812	1029	863	831

表2可以看出,强化层表面的显微硬度相较原始

TC4 钛合金的 300 HV 左右均有大幅度提高。在煤油

或雾工作介质条件下,TC4 钛合金表面涂覆碳层后再进行电火花强化,获得的强化层显微硬度均优于同种工作介质中合金表面未涂覆碳层时强化层。除此之外,雾工作介质条件下获得强化层表面不同位置处显微硬度值较煤油中差别较小,强化层的整体性能更加稳定。另外,煤油工作介质中合金表面涂碳电火花强化后,较其他合金相比在第3和第4组数据处呈现出较大的硬度值,这是由于在花瓣与花瓣交接的边缘位置聚集了较多的碳化物[图3(b)],且聚集面积较大,增大了这一区域内强化层的硬度,并增加了高显微硬度值出现的频率。

3 结论

以石墨为电极,TC4 钛合金为基体材料,分别在雾、煤油介质中,合金表面涂覆及未涂覆碳层条件下进行电火花表面强化,得到如下结论。

(1)煤油介质中,TC4 钛合金表面未涂覆碳时,强化层组织呈菊花瓣状,且花瓣边缘位置呈亮白色,微量球状碳化物较为弥散的分布在合金表面。合金表面涂覆碳层后,强化层表面球状碳化物数量明显增加,且在花瓣边缘的重叠处聚集。

(2)雾介质较煤油介质相比,强化层表面碳化物更为弥散、均匀。

(3)对强化层进行物相分析表明,由基体 α -Ti 和 TiC 相组成。合金表面涂覆碳层后强化层中 TiC 相含量明显增加,基体 α -Ti 相含量明显减少。

(4)电火花强化后 TC4 钛合金表面显微硬度明显高于原始合金,雾介质中得到的强化层显微硬度值与煤油介质中基本相同,可达 800 MPa 左右。

参考文献

- [1] Yang Guangjun, Zhao Yongqing, Yu Zhentao, et al. New advances in titanium alloy research [J]. Processing and Applications Materials Review, 2001, 15(10): 19-21
- [2] 陶春虎,刘庆琮,曹春晓,等. 航空用钛合金的失效及其预防[M]. 北京:国防工业出版社,2002:1-4
- [3] 陈玉勇,肖树龙,李宝辉,等. 铸造钛合金及钛铝系金属间化合物的研究进展及发展趋势[C]//中国铸造活动周论文集,2004:68-74

[4] Longxian D, Keijiro N, Masahiko K, et al. Coating of TiB₂ dispersed Ti50Ni50 superelastic alloy layer onto Ti - 6Al - 4V alloy by spark and resistance sintering[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(11): 1738-1748

[5] Costa M, Venditti M, Voorwald H, et al. Effect of WC - 10% Co - 4% Cr coating on the Ti - 6Al - 4V alloy fatigue strength[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 507(1-2):29-36

[6] Watanabe I, Watanabe E, Yoshida K, et al. Effect of surface contamination on adhesive bonding of cast pure titanium and Ti-6Al-4V alloy[J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 1999, 81(3): 270-276

[7] 张春辉,马红岩,王茂才. 钛合金表面强化新进展[J]. 钛合金工业进展,2003,20(4/5):49-52

[8] 汤精明,乔生儒. 两种钢铁材料电火花表面强化层组织结构研究[J]. 材料热处理,2006,35(20):19-21

[9] 郑良桂,陈子庚. 电火花加工表面变质层机械性能的研究[J]. 电加工与模具,1984(2):24-29

[10] 董春杰. 超声振动辅助电火花放电表面强化技术及机理研究[D]. 山东大学博士论文,2011

[11] Kansal H K, Singh S, Kumar P. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,169 (3):427-436

[12] 张明,李福杰. 电火花成型机床空气中放电沉积试验研究[J]. 工具技术,2009,43(6):40-42

[13] Lee L C, Lim L C, Narayanan V, et al. Quantification of surface damage of tool steels after EDM [J]. International Journal of Machinery Tools & Manufacture, 1988, 28(4):359-372

[14] 王振龙,金柏冬,曹国辉. 空气中电火花沉积微螺旋结构的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(5):717-721

[15] Tanimura T, Isuzugawa K, Fujita I, et al. Development of EDM in the Mist[J]. Proc. ISEM, 1989, 9: 313-316

[16] 李建忱,马丽杰,于燕. Al-Mn 非晶合金镀层[J]. 中国有色金属学报,1997,7(1):172-175

(编辑 任涛)