

## 柔性电极电火花强化钛合金表面性能

刘志东 徐安阳 王振兴 张艳

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

**摘要:**采用旋转的柔性铜电极与钛合金表面在高频脉冲电源的作用下进行电火花表面强化,使空气中的氧等元素在放电形成的高温高压条件下与钛合金表面发生反应。结果表明:该试验条件下可以使钛合金表面硬度相对基体提高237%~399%;强化层厚度达到21~157  $\mu\text{m}$ ;通过能谱分析(Energy dispersive spectrometer, EDS)及X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析表明,在钛合金表面生成了钛的氧化物等强化物质和钛与铜、锌等的合金;强化表面不存在明显的传统放电蚀除凹坑,但有明显机械刮磨涂覆痕迹,同时单脉冲放电能量被分散,使得表面粗糙度值的提高量较小且可控;在氢氟酸和硝酸混合溶液中,强化层具有较高的抗腐蚀能力,经过点面磨损测试表明,强化层表面耐磨性能相对于基体表面有显著提高。经强化,能够获得具有良好耐磨性、抗腐蚀性、表面良好的钛合金。

**关键词:**钛合金;柔性电极;电火花加工;表面强化

**中图分类号:** TG661

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2012)02-0222-06

## Surface Property of Titanium Alloys by Electrospark Surface Strengthening of Flexible Electrode

Liu Zhidong, Xu Anyang, Wang Zhenxing, Zhang Yan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** Electrospark surface strengthening of titanium alloys is done by flexible rotating copper electrode with high-frequency pulse power supply. Then the oxygen and other elements from the air could react with titanium under the condition of high temperature and pressure caused by discharge. Experimental results show that the surface hardness of titanium alloy is improved by 237%—399% with reference to the substrate, and the thickness of the strengthened layer reaches a range of 21~157  $\mu\text{m}$ . Through energy dispersive spectrometer (EDS) and X-ray diffraction (XRD) analysis, it is shown that titanium oxides and other strengthening matter such as titanium and copper/zinc alloys are generated on the titanium surface. In addition, obvious mechanical scraping and coating traces exist on the strengthening surface, but there are no significant traditional discharge erosion concave pits. At the same time, single pulse discharge energy is dispersed, thus the surface roughness value increases a little and is controllable. Besides, the strengthened layer has an improved ability of anti-corrosion in the mixed solution of hydrofluoric acid and nitric acid, and the enhanced layer has a high corrosion resistance. Point and surface wear tests show that the surface abrasion performance of the strengthened layer is improved significantly relative to the substrate surface. Good abrasion resistance, good corrosion resistance, and good quality of titanium alloy surface are obtained after being hardened.

**Key words:** titanium alloys; flexible electrode; electric discharge machining; surface strengthening

**基金项目:**国家自然科学基金(51175256)资助项目;航空科学基金(20100343004,2011ZE52060)资助项目;江苏省自然科学基金(BK201122973)资助项目。

**收稿日期:**2011-01-14;**修订日期:**2011-04-27

**通讯作者:**刘志东,男,教授,博士生导师,1966年生,E-mail:liutim@nuaa.edu.cn。

钛合金具有密度小、比强度高、比刚度大、有很好的抗腐蚀性能、高温力学性能、抗疲劳和蠕变性能,另外,还具有吸氢、超导、无磁、形状记忆、低阻尼等优良特性,是一种新型的、有巨大发展潜力和应用前景的结构材料。近年来在航空航天、舰艇及兵器军品制造等钛合金的传统应用领域应用日益广泛,另外在汽车、造船、化学、电子、海洋开发、排污防腐和能源等民用行业也存在着巨大的应用潜力<sup>[1-2]</sup>。但钛合金存在的硬度低、导热系数低、耐磨性差、易发生热粘连、可燃性差等缺点也限制了钛合金的发展<sup>[3]</sup>。

对此国内外学者做了大量的研究,以提高其耐磨性、耐蚀性、或抗高温氧化性等,如采用湿法电镀、渗碳、气体氮化、堆焊、物理气相沉积法(Physical vapor deposition, PVD)、化学气相沉积法(Che-mical vapor deposition, CVD)、激光表面气体合金化法等。但这些方法也存在一些不足,如电镀需要进行表面预处理;等离子喷涂存在涂层表面较粗糙、生产过程产生噪声、极强紫外线污染;气体氮化、PVD和CVD涂层厚度薄、工艺复杂、需要专用设备和专业的技术人员,生产成本低;激光表面气体合金化法需要昂贵设备、特定的场所和专业的技术人员、生产成本低等问题<sup>[4-9]</sup>。

传统的钛合金电火花表面强化是在空气或者特殊气体中利用火花放电的能量,将钛合金工件表面熔化,并通过与放电场中的强化物质反应,形成具有冶金特性的强化层<sup>[10]</sup>,以提高零件的硬度、耐磨性、耐蚀性及热硬性等性能,是钛合金表面强化的有效手段之一。但传统电火花强化工艺存在强化层的表面粗糙度不易控制,不能作为最后处理工序、生产效率低、强化工艺不稳定的缺点<sup>[11]</sup>,制约了该技术的发展及推广应用。针对上述问题,本文提出了以柔性电极替代刚性电极,通过高速旋转的柔性电极与钛合金表面在高频脉冲电源作用下放电形成高温放电点,使钛合金表面与空气中的氧等强化介质反应,在钛合金表面形成晶粒细化的强化物质,达到对钛合金表面强化的方法。

## 1 原理及特点

柔性电极电火花表面强化原理如图1所示,采用“正极性加工”,电机带动中空的柔性电极高速旋转,在脉冲电源的作用下与钛合金表面形成连续的火花放电,使钛合金工件表面发生熔化甚至气化,熔融的钛合金表面在火花放电产生的高温条件下与空气中的氧等元素发生反应,生成新的强化物质

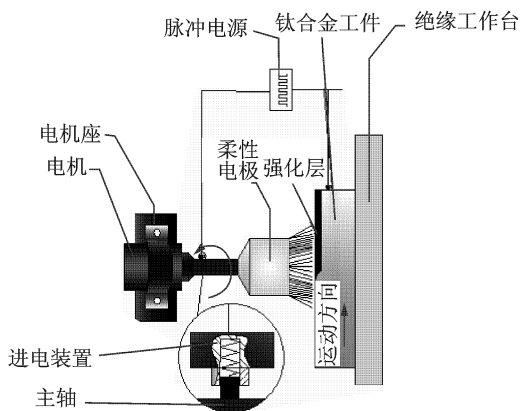


图1 柔性电极电火花表面强化原理图

如氧化钛等,并沉积在工件表面形成氧化钛膜。由于放电产生的骤热骤冷作用,将使得形成的氧化钛膜表面具有细化的晶粒。由于氧化钛膜具有化学稳定性好,抗腐蚀性和抗氧化性能优良,不易于发生化学反应,摩擦因数低,具有干润滑、抗粘着作用,韧性好,热硬性高,能承受某种程度的弹性变形的压力等优点,从而达到对钛合金表面强化的目的。强化过程中可以通过调节进给速度、电极转速、放电能量等得到不同表面硬度、质量及厚度的强化层。

采用柔性电极进行电火花表面强化除具有一般电火花表面强化的优点外还具有以下特点:

(1)强化层的表面质量易控,柔性电极由金属丝组成,放电能量可以通过多电极丝分别释放,分散了单脉冲能量,放电点分布均匀;可通过控制放电能量的大小,控制表面质量,形成均匀的强化层;在强化过程中柔性电极做高速旋转,不会在同一点产生连续放电,杜绝了产生拉弧的条件。

(2)强化层和基体易形成冶金结合,由于是钛合金表面熔融层和强化介质(氧、氮等)进行反应,在基体表面形成强化层,并非简单的材料涂敷与堆积。

(3)可形成多种强化层物质,通过调节强化介质,可达到在同一表面形成多种强化层甚至达到形成梯度强化效果。

(4)效率高,成本低,适应面广,该表面强化方法不但可以处理平面,还可以利用数控方法处理复杂的三维曲面,且不需要投入昂贵的设备。

## 2 试验

### 2.1 试验条件

电极:黄铜丝盘,外径 $\varnothing 25$  mm,中空 $\varnothing 15$  mm,转速2 500 r/min;工件:钛合金TC4,

30 mm×6 mm×6 mm,经表面磨削,清洗、吹干,采用“正极性加工”,电极强化速度为1 min/cm<sup>2</sup>,选用3组参数进行强化,每组试件5个,试验参数及强化结果如表1所示。

试件的表面硬度用某公司生产的HXS-1000AK型显微硬度计测量,载荷为200 g,加载时间为15 s,取5个不同点平均值;表面粗糙度采用时代公司生产的TR240型便携式表面粗糙度仪进行测量。

表1 钛合金试验参数及表面强化结果

试验组别	脉冲宽/ μs	占空比	平均电 流/A	粗糙度 Ra/μm	表面硬 度/HV	硬度提 高比例/%	强化层 厚度/μm
1	32	1:4	3.5	1.95	1 748	399	157
2	16	1:4	3.0	1.22	1 283	266	110
3	8	1:4	2.1	0.99	1 178	237	21
基体				0.80	350		

强化层由强化物质层和重熔层组成,本试验采用在工具读数显微镜下测量灰黑强化物质层和白亮重熔层的厚度,近似认为该厚度为强化层的厚度,测量数据如表1所示。

通过点面磨损试验测试强化层的耐磨损性能,采用球-盘接触摩擦磨损试验机,型号为IN32-MMW-1A,测试件尺寸30 mm×6 mm×6 mm,对磨球材料为∅3 mm的GCr15球,电机频率为600 r/min,摩擦时间为15 min,载荷为230 g,在常温下和GCr15对磨测试。采用往复滑动摩擦方式,接触载荷为5 N,往复距离为40 mm,往复速度为60次/min,磨损时间为21 min,总行程为100 m。

## 2.2 试验分析

### 2.2.1 表面质量分析

钛合金表面强化后在表面形成了呈明显流动状分布的均匀强化层(图2),没有出现与传统电火花放电类似的放电蚀坑。主要原因在于高速旋转的柔性电极具有众多的电极丝,会在钛合金表面同时形成多个放电点,放电点密度较大,并且柔性电极不断对熔融的表面进行刮磨作用(图3)。从图2中还可以看出,有表面强化物质被柔性电极带动移动的现象,这说明在放电产生的同时金属电极会带动生成的强化物质在钛合金表面移动,并对钛合金表面产生一定的机械磨削涂覆作用。由于火花放电的骤热骤冷作用,形成的表层强化物质具有较小的晶粒结构(图4),但同时由于放电的骤热骤冷及生成的强化物质与基体的不同,会在表面形成微小的裂纹(图3),而柔性电极的磨削涂覆作用则能够对这些微裂纹进行填充和覆盖,在一定程度上减少了表面的微裂纹。

柔性电极表面强化的放电过程不同于传统电火花间隙放电,检测到典型的表面强化放电的波形如图5所示。由图可知,在一个脉冲放电过程中,放

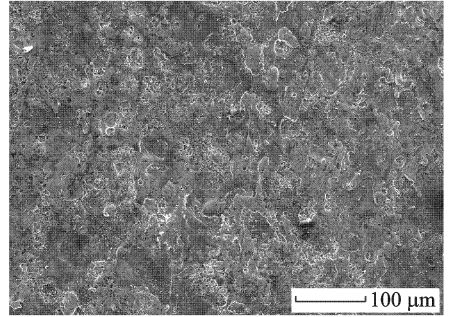


图2 强化表面重熔层表面形貌

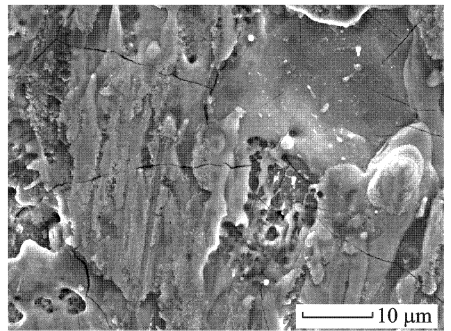


图3 强化表面的机械磨削涂覆作用

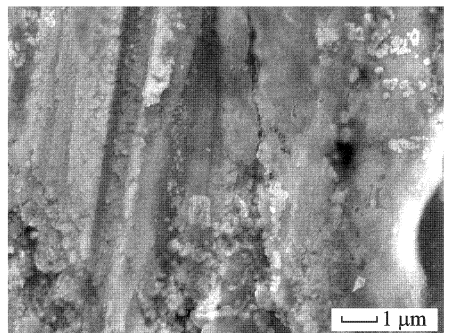


图4 强化表面细小晶粒

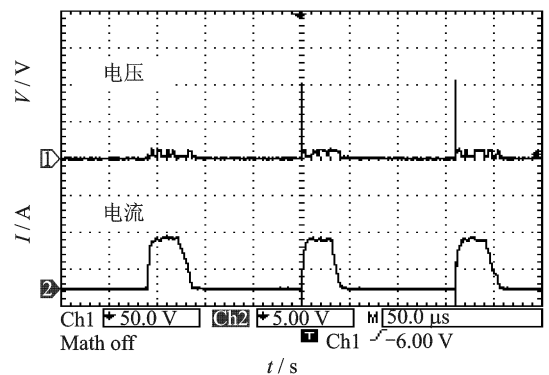


图5 表面强化放电波形图(电压50 V/格,电流10 A/格)

电状态在电弧放电-短路之间跳转,这主要是由于高速旋转的柔性电极在放电过程中,单根电极丝所经历的过程都是先短路后脱开工件表面产生电弧放电,由于电极丝数量多,体现在放电波形上就呈现出在一个脉冲期间放电状态在电弧放电-短路之间多次跳转,单个脉冲放电被分散为几次放电或者多点放电,从而使一个脉冲的放电能量被分散为几次释放,降低了单个放电点能量密度,减少了火花放电对强化表面的破坏作用。

由表1可知,钛合金表面强化后,表面硬度与基体相比,第1组提高了399%,第2组提高了266%,第3组提高了237%,说明随着放电能量密度(平均电流)及脉宽的增加,表面硬度随之增加。这主要是由于:随着放电能量密度的增大,放电点放电能量增强,放电区温度提高,强化介质和熔融的表面金属反应的时间增加而且反应更加充分,生成强化合金更多且表面硬度获得较大提高。

由表1结果显示,表面强化处理后表面粗糙度值略有提高。这主要是因为放电所形成的放电产物在表面产生堆积造成的,但相对初始表面粗糙度值提高量并不显著,特别是在小能量密度和窄脉宽处理的条件下。且由表1可知,表面粗糙度值可随放电能量密度(平均电流)和脉冲宽度的增大而增加。所以,强化过程中如采用窄脉宽和适当的能量密度,对于表面质量的影响并不大。因此,运用这种方法可以在提高工件表面硬度的同时保持良好的表面质量。

### 2.2.2 强化层成分分析

图6是第2组试样的能谱(Energy dispersive spectrometer, EDS)分析结果。从图中可以看到,钛合金表面强化层出现了大量氧、铜、锌等新元素。图7是强化层X射线衍射(X-Ray diffraction, XRD)谱图。谱线表明,强化层主要由TiO<sub>2</sub>、Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>等组成,此外还有少量的其他合金形式。可见,在利用柔性电极对钛合金进行强化过程中生成了大量的TiO<sub>2</sub>和由电极材料与基体材料组成的合金,说明空气中的氧元素和熔融或者熔化的钛元素发生反应,生成新的强化物质(如氧化钛等)并沉积到钛合金表面,电弧放电同时也使电极材料沉积到工件表面,电极中的铜、锌元素有部分熔化、气化,沉积到钛合金表面,与钛元素生成新的合金;此外,随着放电能量密度的增加钛合金表面熔融金属和空气中的氧反应更加充分,生成的氧化钛等强化物质增多,电极损耗也增大,沉积在工件表面的铜、锌等元素比例增加。

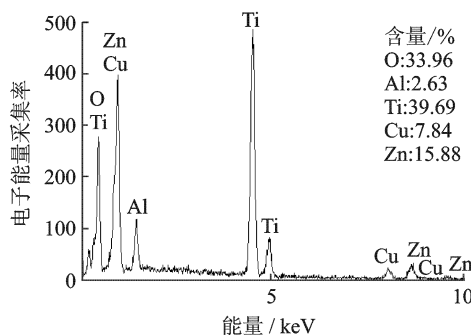


图6 第2组试样能谱分析图

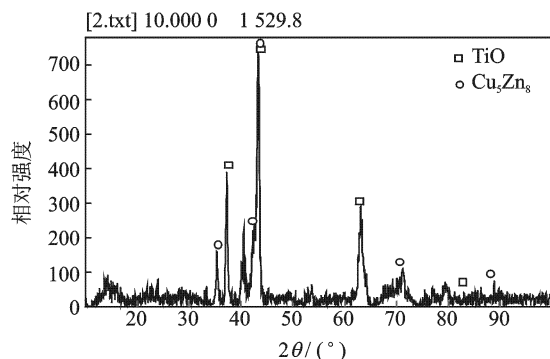


图7 强化表面XRD谱分析图

### 2.2.3 强化层厚度

由表1的数据表明,强化层厚度随着单脉冲放电能量增加而加大,随着放电时间的延续及能量密度的增加使得钛合金表面材料的熔化量增多,有更多的时间及熔化的钛合金与强化介质反应生成强化物质,重新沉积在工件表面,使强化层的厚度增加,但同时也会影响到试件表面的粗糙度。组3试验条件下强化层截面的显微照片如图8所示。由图中可观察到,强化表面由强化层及重熔层组成,由于放电产生的骤热骤冷作用,导致了重熔层体现出与基体相比更加细小的晶粒结构,对钛合金表面同样起到一定的强化作用。

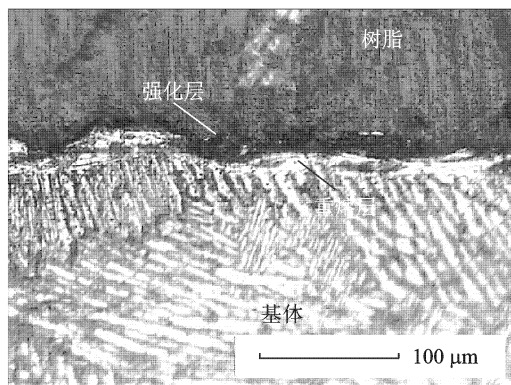


图8 钛合金强化层截面微观照片

### 2.2.4 强化层的耐腐蚀性能

把经表1参数表面强化处理的钛合金试件浸在4%氢氟酸和5%硝酸混合溶液中进行腐蚀实验,测量其腐蚀失质量,获得的腐蚀失重随时间变化关系如图9所示。

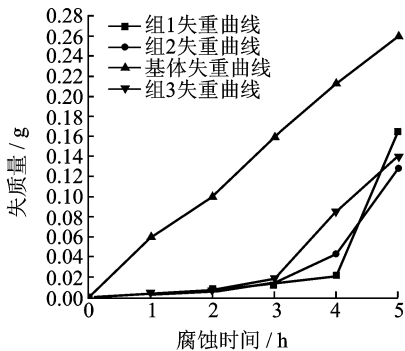


图9 强化表面腐蚀失重随时间变化关系图

从图中可以看出,钛合金表面的腐蚀失重较大,而且稳定,经过强化的钛合金表面抗腐蚀性能在初始阶段获得明显提高,但当腐蚀经过两小时后,强化试样的腐蚀失重速度急剧增大,经观察试件发现表面强化层呈片状脱落。这主要是因为腐蚀开始从强化层表面的孔洞和微裂纹等缺陷处开始逐渐影响整个表面,一旦腐蚀到基体,就会在强化层下面的钛合金基体中进行,使强化层与基体分离,致使强化层呈片状脱落。因此为提高表面抗腐蚀性能,就必须减小孔洞和微裂纹等缺陷,即要提高强化表面的均匀性、致密性及表面质量。因此,在强化过程中要采用合适的电流密度、电极转速、强化速度以及初始表面粗糙度,发挥柔性电极的磨削涂覆作用,消除强化表面的微孔洞和微裂纹,以减少和避免对钛合金基体的腐蚀。

### 2.2.5 强化层的耐磨损性能

由图10“摩擦因数-时间”关系曲线变化可以看出,对于基体,在初始阶段基体的摩擦因数急剧增大,经过很短一段预磨期后,曲线稳定在一个比较

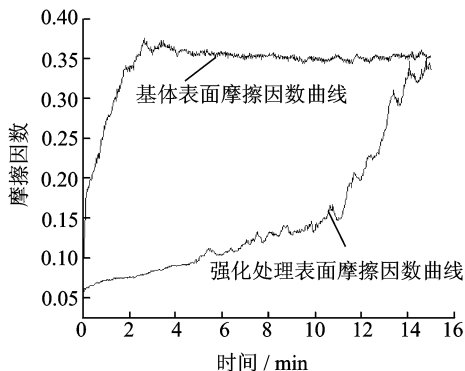


图10 “摩擦因数-时间”关系曲线图

高的位置。这是由于在摩擦初始阶段,试样的表面粗糙度很小,因而摩擦因数较小。随着磨损的进行,表面的粗糙度逐渐加大,摩擦因数随之增大。钛合金本身硬度比较低,容易被磨损,磨损产物在继续摩擦过程中,会成为对磨件之间的磨粒,增大摩擦因数。而且,钛合金本身容易发生热粘连,随着摩擦的进行,接触面积增大,也可能会出现热粘连,造成摩擦因数增大。经过一段时间摩擦之后,磨损和热粘连也进入平衡期,表面摩擦因数进入一个稳定期。对于强化处理表面,在起始阶段摩擦因数比较小,而且在较长的时间内保持较低的摩擦因数。经过较长时间的平稳摩擦磨损后,摩擦因数开始逐渐增大,直到和基体摩擦因数相似。这主要是由于在摩擦初始阶段,钛合金强化表面有强化层覆盖而且强化层硬度较高,在对磨的过程中,不易磨损,对磨区就不会出现磨粒磨损和热粘连,因此能在较长时段里保持较低的摩擦因数。当强化表面的强化层经磨损破损后,摩擦因数开始迅速增大,直到和基体摩擦因数相接近。

如图11所示,经过100 m滑动距离后,钛合金基体表面(样品1)和经过强化的表面(样品2)失质量分别为0.004 2 g和0.001 5 g,后者是前者的1/3左右。说明经过强化的试件,质量损失远远小于未处理试件。

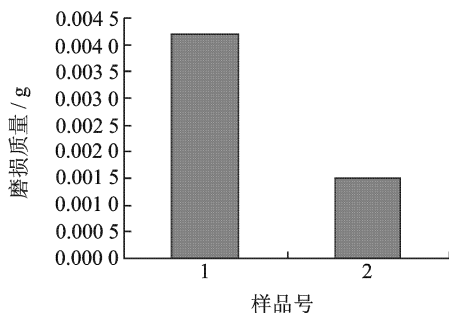


图11 强化表面和基体表面磨损质量对比

## 3 结束语

本文采用柔性电极在空气中与钛合金表面进行电火花放电可以在其表面生成的新的强化物质(如氧化钛等)和新的合金(钛和铜、锌合金),且形成的强化表面硬度随放电能量密度的增大而增加。强化表面未出现典型的电火花放电蚀坑,且由于单脉冲能量被分散,减少了脉冲放电能量密度,同时柔性电极对钛合金表面有一定的磨削涂覆作用,在维持表面粗糙度的同时在一定程度上减少强化表面的微裂纹,使得表面粗糙度值的提高量较小且可控。强化表

层具有较高的抗腐蚀能力及良好的表面耐磨性能。

### 参考文献:

- [1] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [2] 邵娟. 钛合金及其应用研究进展[J]. 稀有金属和硬质合金,2007,35(4):61-65.  
Shao Juan. Application and development of titanium alloys [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2007,35(4):61-65.
- [3] Koczak M J, Premkumar M K. Emerging technologies for the in-situ production of MMCS[J]. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society,1993(1):44-48.
- [4] 胡树兵,李志章,梅志物. 物理气象沉积TiN复合涂层研究进展[J]. 材料科学与工程,2000,18(2):110-115.  
Hu Shubing, Li Zhizhang, Mei Zhiwu. Research development of the TiN PVD composite coatings[J]. Materials Science and Engineering,2000,18(2):110-115.
- [5] 谢致薇,王国庆. 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 Zhiwei, Wang Guoqing. Improvement on properties of TiN film by multi-components methods[J]. Materials Science and Engineering,2000,18(4):135-139.
- [6] Matsuura K, Kudoh M. Surface modification of titanium by a diffusional carbo-nitriding method[J]. Acta Materialia, 2002,50(10):2693-2700.
- [7] 郭晓霞. 几种常用表面强化技术的比较[J]. 现代制造工程,2008(3):84-87.  
Guo Xiaoxia. The comparison of several surface hardening used usually [J]. Modern Manufacturing Engineering,2008(3):84-87.
- [8] 牛静,张立文,张全忠,等. BT20钛合金电火花沉积TiC涂层的微观组织研究[J]. 金属热处理,2006,31(4):59-61.  
Niu Jing, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong, et al. Microstructure of TiC coating deposited by electric-spark process on BT20 titanium alloy [J]. Heat Treatment of Metals,2006,31(4):59-61.
- [9] 刘洪喜,汤宝寅,王浪平,等. 钛合金的等离子体浸没离子注入表面强化处理[J]. 稀有金属材料与工程,2005,34(8):1318-1321.  
Liu Hongxi, Tang Baoyin, Wang Langping, et al. Improvement on surface properties of titanium alloy by plasma immersion ion implantation technique[J]. Rare Metal Materials and Engineering,2005,34(8):1318-1321.
- [10] Galinov I V, Luban R B. Mass trends during electrospark alloying[J]. Surface and Coatings Technology, 1996(79):9-18.
- [11] 张春辉,游涛,闫平,等. 钛合金表面电火花沉积强化研究现状[J]. 稀有金属快报,2007,26(2):1-6.  
Zhang Chunhui, You Tao, Yan Ping, et al. Research status of electron-spark deposition on titanium alloys[J]. Rare Metals Letters,2007,26(2):1-6.