

船用钛合金微弧氧化膜的性能及其研究进展^{*}

白清友, 刘海萍^{*}, 毕四富, 马志强, 曹立新, 屠振密

(哈尔滨工业大学(威海)海洋科学与技术学院, 山东 威海 264209)

摘 要: 钛合金密度小、比强度高、可加工性好及耐海水腐蚀性强, 是一种优秀的船舶材料。然而钛合金较低的耐磨性能、耐高温氧化性能及其对异种金属的电偶腐蚀等制约了其在船舶中实际应用。通过微弧氧化在钛合金表面原位生长氧化物陶瓷层, 可显著改善钛合金的以上性能。文中综述了国内外船用钛合金微弧氧化研究进展及微弧氧化对钛合金的耐磨性、耐蚀性、结合强度及抗高温氧化性能的研究现状, 展望了微弧氧化技术改善船用钛合金表面性能的发展趋势。

关键词: 钛合金; 微弧氧化; 耐蚀性; 耐磨性; 耐高温氧化性

中图分类号: TG178

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)01-0001-05

Performance and Research Progress of Oxide Ceramic Coatings by Micro-arc Oxidation on Shipbuilding Titanium Alloy

BAI Qing-you, LIU Hai-ping, BI Si-fu, MA Zhi-qiang, CAO Li-xin, TU Zhen-mi

(School of Marine Science and Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, Shandong)

Abstract: Titanium is a new shipbuilding structural material, which has excellent comprehensive properties, such as the low density, high specific strength, good workability, and excellent resistance to seawater corrosion. However, the titanium using shipbuilding material is handicapped by several critical disadvantages, including the lower wear resistance, the ability of resistance to high temperature oxidation, and the galvanic corrosion when titanium alloy contacts with other metals. The ceramic coating on the surface of titanium alloy obtained through micro-arc oxidation can improve these disadvantages of titanium alloy. This paper reviews, the recent research progress and the property improvements on the wear resistance, corrosion resistance, bonding strength, and high-temperature oxidation resistance on shipbuilding titanium alloy surface by micro-arc oxidation are reviewed. The trends of research of micro-arc oxidation technology for shipbuliding titanium alloy surface are also anticipated.

Key words: titanium alloy; micro-arc oxidation; corrosion resistance; wear resistance; high-temperature oxidation resistance

0 引 言

钛及钛合金由于具有密度小、抗拉伸强度高、比强度高、耐腐蚀、无磁性、可加工性好等特点, 成为制造舰船的理想材料。钛及钛合金在舰船中的使用延长了设备的使用寿命, 减轻了重量, 提高了舰船整体的技术性能。世界上已有俄

罗斯、美国和中国进行专门的船用钛合金研究, 并建立了自己的船用钛合金体系。我国船用钛合金的研究与应用始于 20 世纪 60 年代, 目前已形成具有我国特色、较完整的船用钛合金系列, 如 TA2、TA5、ZTA5、TC4、TC11、Ti31、Ti75、TiB19、Ti91、Ti70、STi80、TAS、Ti631 和 ZTi60

收稿日期: 2012-08-20; **修回日期:** 2013-01-14; **基金项目:** * 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT. NSRIF. 2009155)

作者简介: 白清友(1988—), 男(汉), 黑龙江鹤岗人, 硕士生; **研究方向:** 电化学

网络出版日期: 2013-01-21 10:50; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130121.1050.002.html>

引文格式: 白清友, 刘海萍, 毕四富, 等. 船用钛合金微弧氧化膜的性能及其研究进展 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 1-5.

等^[1-2]。关于船用钛合金的研究及应用水平有了较大提高,能满足水面舰艇、水下潜艇和深潜器的不同强度级别的要求并适用于其不同部位。

然而钛合金的硬度较低,耐磨性及抗微动磨损性能、耐高温性能较差;而且钛合金在使用中易造成与其接触的铝、钢、铜及铜基合金工件在海水中产生电偶腐蚀等制约了钛合金在舰船中的实际应用。为了改善钛合金的上述性能,国内外的研究者开发了多种钛合金表面处理和改性技术,主要有离子注入、气相沉积、激光表面改性、阳极氧化、微弧氧化及金属涂层等^[3-5]。其中微弧氧化(Micro-arc Oxidation, MAO),是一种在有色金属(Al、Ti、Mg等)及其合金表面原位生长氧化物陶瓷层的新技术^[6-7]。该技术通过将不同阴阳极电压、电流密度、占空比、脉冲频率以及电解液成分、温度、pH、微弧氧化时间等参数相组合来获得具有特殊性能的氧化陶瓷膜。所得膜层厚,具有孔隙率低、耐腐蚀性好、结合强度高、硬度高、耐磨性好、耐高温氧化等特点,使得该技术在钛合金表面处理上具有广泛前景^[8-10]。文中分析与讨论微弧氧化处理对钛合金耐磨性、耐蚀性、结合强度及耐高温氧化性能等改善效果,展望了微弧氧化技术改善船用钛合金表面性能的发展趋势。

1 微弧氧化膜的耐磨性

钛合金在舰船上主要应用于螺旋桨、管系、声纳、喷水推进装置等部位,而该部位的材料通常需要较高的硬度,以维持船体结构在海洋复杂环境下不受影响。此外,钛合金构件与海水以及海水中的泥沙接触,在一定程度上还存在磨损问题,因此硬度与耐磨性是制约钛合金在舰船上应用的重要因素^[11]。而国内外的研究表明通过改变微弧氧化电源参数可以获得高硬度表面膜层与良好的耐磨层,有望成为解决这一问题的有效途径^[12]。如唐元广^[13]改变阴极电压脉冲占空比(d_c)发现微弧氧化膜硬度随 d_c 的改变变化较大,当 $d_c=70\%$ 氧化陶瓷膜硬度达到最大 6.1 GPa。Guang-xin Tang^[14]应用改变脉冲频率方法在纯钛表面得到显微硬度达 645 HV 的高硬度多孔的氧化层。蒙晓娟^[15]通过改变电流密度成功的在 TC4 合金上制备出 100 μm 的氧化陶瓷膜层,研究发现,相同条件下该氧化陶瓷膜层的磨损量仅为

0.005 g,远远小于未经处理钛合金的 0.23 g。

此外,相比微弧氧化电源参数,国内外的研究也表明通过改变电解液成分同样可以提高钛合金材料的硬度与耐磨性。如 WU Xiang-qing^[16]发现向电解液中加入适量的添加剂(柠檬酸钠、石墨、钨酸钠)可以使 Ti-Al 合金氧化陶瓷膜含有硬质相 Al_2O_3 、 WO_3 、 Ti_2O_3 ,从而将耐磨速率降低至 3.27×10^{-7} g/Nm。也有研究人员报导^[17]在硅酸盐电解液中添加 KOH,得到的微弧氧化陶瓷膜层磨损痕迹轻,磨损量较少,在磨损后期摩擦因数远远小于基体。SHI Xing-ling^[18]通过改变电解液中 $\text{CaC}_3\text{H}_5(\text{OH})_2\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的浓度发现,当 $\text{CaC}_3\text{H}_5(\text{OH})_2\text{PO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 浓度在 0.04 ~ 0.06 mol/L 时,氧化陶瓷膜层的硬度最高,相应的耐磨性也最好。

与此同时,也有不少研究者通过对氧化陶瓷层进行后处理来改善氧化膜层的硬度与耐磨性。Fanya Jin 等^[19]将钛合金表面微弧氧化后在 600 $^\circ\text{C}$ 、800 $^\circ\text{C}$ 高温退火,对退火前后的耐磨性进行研究。发现高温退火 600 $^\circ\text{C}$ 处理后的硬度为 871 HV 远高于基体的硬度;Chen Fei^[20]研究表明,微弧氧化膜层经过抛光处理后摩擦因数由 0.5 下降到 0.2,因此高温退火与抛光处理都可以有效的提高氧化陶瓷膜的硬度或耐磨性。

在微弧氧化改善膜层硬度与耐磨性的研究中,无论电参数、电解液组成的改变,还是对微弧氧化陶瓷膜进行后处理,都是通过改变氧化膜的相结构与表面形貌来实现的。氧化膜陶瓷中硬质相含量越高,表面粗糙度越低,氧化陶瓷膜硬度与耐磨性就越好。因此,通过改变微弧氧化工艺来提高氧化陶瓷膜中硬质相含量与降低表面粗糙度将是今后船用钛合金微弧氧化研究中的热点。

2 微弧氧化膜耐腐蚀性

即使钛合金有比其它常用金属高得多的耐腐蚀性,但长期使用也会被腐蚀;而且更重要的是,在使用中钛合金易造成与其接触的其它船舶零件如铝、钢、铜及铜基合金工件在海水中产生电偶腐蚀。通过微弧氧化方法处理钛合金形成的陶瓷膜层具有腐蚀电位高,腐蚀电流小等特点,已经成为钛合金耐蚀性的研究热点。由于 3.5% NaCl 溶液与海水成分近似,并考虑到舰船

使用的特殊环境,因此许多研究者通过 3.5% NaCl 溶液研究微弧氧化陶瓷膜层与基体的耐蚀性。如有研究者^[21-22]发现通过对钛合金进行微弧氧化处理可有效降低与之偶合金属的电偶腐蚀。高广睿^[23]发现氧化陶瓷膜层在 3.5% NaCl 溶液中自腐蚀电位由基体的 -0.29 V 提高到 0.45 V,腐蚀电流由基体 10^{-9} A/cm² 下降至 10^{-10} A/cm²,耐蚀性提高 1 个数量级。也有学者^[24]指出在 3.5% NaCl 溶液中微弧氧化陶瓷膜层没有腐蚀击穿现象,当阴极电压 45V 时所制备的氧化膜层腐蚀电流密度为 5.0×10^{-5} A/m² 比基体 0.125 A/m² 的腐蚀电流要小 4 个数量级。Y. Vangolu^[25]等发现当电解液中 Na₃PO₄ 与 KOH 物质质量比为 1:0.6,电压 450/-80 V、频率 200 Hz、循环时间 200 μ s 时,微弧氧化的氧化膜层腐蚀电流最小;当 Na₃PO₄ 与 KOH 物质的量比为 1:2.37、电压 450 V、频率 200 Hz、循环时间 300 μ s 时,得到的氧化膜层腐蚀电压最大。Hanhua Wu^[26]等应用 3.5% NaCl 溶液研究了微弧氧化阴极电压对氧化膜层点腐蚀的影响。发现当阳/阴极电压固定 320/-45 V 时制备出的氧化陶瓷层腐蚀电流比基体腐蚀电流小 4 个数量级。由以上研究可以看出微弧氧化在钛合金表面形成的陶瓷膜可以显著提高钛合金材料在 3.5% NaCl 溶液中的耐蚀性。

当舰船长期在海洋环境里使用,海水中大量的浮游生物会吸附在舰船表面生长,从而腐蚀舰船表面。因而仅以 3.5% NaCl 溶液来代替海水对船用钛合金耐蚀性研究并不能完全说明问题。由于生理盐水与海洋浮游生物表面液体成分接近,因此,也有研究者在生理盐水中研究微弧氧化膜层与基体的耐腐蚀能力。如 J. L. Xu^[27]通过 Hank's 生理盐水研究发现,微弧氧化膜 -0.289 V 高于基体 -0.346 V 的腐蚀电位,而氧化陶瓷膜的腐蚀电流也比基体的腐蚀电流低两个数量级。X. Nie^[28]通过自制生理盐水研究 TiO₂ 膜与 TiO₂/Cr(N)复合膜的耐蚀性,结果表明,腐蚀电位最低的膜层为仅含有 TiO₂ 膜层(-193 mV)的钛合金,但仍然高于不含有氧化膜层的钛合金基体。腐蚀电位最高的为含有 TiO₂/Cr(N)复合膜层的钛合金(最高为 373 mV)。由此可知,所有样品均有很好的抗点腐蚀性能,并且复合膜层与单独的微弧氧化膜层相比,有更好的抗腐

蚀性能。

综上所述,可知通过微弧氧化技术,可有效提高钛合金在 3.5% NaCl 溶液或在生理盐水中的耐蚀性能。相信随着微弧氧化提高船用钛合金耐蚀性研究的不断深入,该技术在不久的将来会越来越多应用在钛合金船体结构材料中。

3 微弧氧化膜层结合强度

由于钛合金表面氧化膜的存在,使得在钛合金表面进行直接电镀、化学镀时,很难获得结合力良好的膜层。而钛合金微弧氧化制备的膜层为表面原位生长,厚度均匀,与金属基体结合强度高,增加了该技术在船用钛合金领域应用前景。近几年,也有不少通过微弧氧化技术提高钛合金膜层与基体结合力的研究报道。杨眉^[29]通过划痕试验,发现微弧氧化陶瓷膜层与基体平均结合力为 48.50 N,膜与基体结合良好。刘忠德^[30]同样通过划痕测试,得出即使在较大的电流密度下,氧化膜与基体的结合力也能达到 22 N。由此可以看出微弧氧化膜层与基体的结合力好,能够满足一般船用钛合金的要求。

但以上研究者均是通过划擦实验进行研究,划擦实验虽有操作简便、实用等优点,同样也有其缺点,如划擦法在定量确定结合强度时要求膜层表面必须十分光滑,但通过微弧氧化制备的氧化陶瓷粗糙多孔,即使打磨掉最外层的疏松多孔层,致密层上的少量空洞还是会影响氧化陶瓷膜层与结合力的确定。抗拉伸实验测试结合强度由于具有定量性、客观性好的特点,近几年应用在微弧氧化陶瓷膜层与基体结合强度的研究中。如李兆丰^[31]通过抗拉伸试验发现,微弧氧化 30 min 氧化陶瓷膜与基体结合强度高达到 30.6 MPa;Jian-Xue Li^[32]发现经过微弧氧化后氧化膜抗拉伸结合强度为 40.46 MPa 左右,比喷砂处理后的 33.28 MPa 结合强度高出 39.6%。Hui Tang^[33]等在微弧氧化电解液中加入 FeSO₄,通过抗张强度测试发现:随着 FeSO₄在电解液中浓度的增大,结合强度减弱,但氧化层的结合强度仍然高于 30 MPa。同时也发现电解液中 Co(CH₃COO)₂浓度的增大,微弧氧化膜层的结合强度下降,但结合强度仍然高于 10 MPa^[34]。Y. M. Wang^[35]等应用微弧氧化技术在 NaAlO₂ 电解液中制备出抗拉伸结合强度高达 110 MPa 的微弧氧化陶瓷膜。由以上研究可以

看出通过微弧氧化技术在钛合金表面形成的氧化陶瓷膜层与钛合金基体具有很高的结合强度。

4 微弧氧化膜抗高温抗氧化能力

钛合金在高温条件下形成的氧化膜比较疏松,不能够对氧的扩散侵入形成有效阻碍,并且疏松的氧化层将对合金的硬度和抗拉伸性能造成损害,因而必须对钛合金进行表面处理以达到抗高温氧化的目的。钛合金微弧氧化得到的氧化膜层具有外层疏松多孔,内层致密,与基体结合牢固等特点,在一定程度上改善了钛合金的抗高温氧化能力,增加了钛合金在舰船高温燃气机等的应用前景。

通过微弧氧化技术提高钛合金抗高温氧化性研究最早以 TiAl 合金与工业纯钛为主。如 Yuan-Hong Wang^[36] 等应用微弧氧化技术在 Ti₂AlNb 合金表面形成氧化膜层,并对比了微弧氧化处理前后的钛合金基体的耐高温氧化性能。结果发现,在 800 ℃ 下高温氧化 100 h 后,含有微弧氧化膜层增加的重量小于基体增加的重量。Kuan-Chen Kung^[37] 等研究了工业纯钛微弧氧化后热处理对膜层性能的影响,发现热处理后微弧氧化膜层的表面形貌没有改变;随着热处理温度的升高,结合强度增加、力学性能提高。

由于 TC4 合金的优异性能,也有研究者分析了 TC4 合金的抗高温性能。如解念锁^[38] 研究了微弧氧化对 TC4 钛合金高温抗氧化性能的影响。结果表明,在 750 ℃ 循环氧化 100 h 后,经 300 V 电压微弧氧化 60 min 的 TC4 钛合金的氧化增重为 7.8 mg/cm²,而未经微弧氧化处理的 TC4 钛合金氧化增重为 30.51 mg/cm²;周慧^[39] 等发现在 700 ℃ 循环氧化 100 h 后,经微弧氧化处理的 TC4 合金的氧化增重为 2.08 mg/cm²,低于未经微弧氧化处理 TC4 合金的增重(20 mg/cm²),因而微弧氧化能有效地提高 TC4 合金的抗高温氧化性能。

由此可知,在钛合金表面进行适当的微弧氧化处理可以有效改善其耐高温氧化性能。然而目前对钛合金微弧氧化抗高温氧化性的研究较少;但随着钛合金材料在高温领域的应用(发动机部件、汽轮机叶片、高温管道等)越来越广泛,相信在不久的将来,通过微弧氧化提高钛合金抗高温氧化性的研究将会越来越多。

5 结 语

微弧氧化技术由于具有处理效率高、操作简单、膜层易于控制、环保等特点,已经广泛应用在船用钛合金表面处理研究中。但对于舰船特殊的使用环境,该技术还未在舰船领域进入大规模实际应用阶段。因此,深入了解该技术,扩大该技术在舰船领域的应用还有许多工作要做。在文献综述基础上并结合本课题组的研究经验,笔者认为今后可以主要从以下几个方面重点研究:①优化微弧氧化工艺参数,开发出具有优异膜层的 MAO 工艺;②完善膜层性能研究方法,使研究方法更能客观真实的反应海洋复杂环境对膜层性能的影响;③将 MAO 工艺与其他处理相结合,进一步提高膜层性能,扩大使用范围。

参考文献

- [1] 陈军,赵永庆,常辉. 中国船用钛合金的研究和发展 [J]. 材料导报, 2005, 19(6): 67-70.
- [2] 孙建科,孟祥军,陈春和,等. 我国船用钛合金研究、应用及发展 [J]. 金属学报, 2002, 38(增): 33-36.
- [3] 张毅斌. 船用钛合金表面改性技术研究进展 [J]. 材料开发与应用, 2009, 24(5): 70-74.
- [4] 屠振密,李宁,朱永明. 钛及钛合金的表面处理技术和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 7-9.
- [5] 屠振密,朱永明,李宁,等. 钛及钛合金表面金属电沉积预处理问题 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 24-29.
- [6] 王庆良,徐伶俐,葛世荣. 钛合金微弧氧化陶瓷层的结构研究 [J]. 中国表面工程, 2007, 20(5): 11-15.
- [7] 金凡亚,童洪辉,沈丽如,等. 钛合金微弧氧化陶瓷膜微观特性的分析 [J]. 材料保护, 2005, 38(8): 42-44.
- [8] 幸泽宽,唐恩军,段睿. TC4 钛合金微弧阳极氧化膜层结构与性能的研究 [J]. 材料保护, 2005, 38(12): 54-57.
- [9] 吴向清,谢发勤. 钛合金表面微弧氧化技术的研究 [J]. 材料导报, 2005, 19(6): 85-87.
- [10] 李利群,裘建军,姚英学. 钛合金微弧氧化技术的研究 [J]. 焊接, 2008(5): 15-18.
- [11] Man H C, Zhang S, Cheng F T, et al. Microstructure and formation mechanism of in situ synthesized TiC/Ti surface MMC on Ti-6Al-4V by laser cladding [J]. Scripta Materialia, 2001, 44(12): 2801-7.
- [12] Jiang P, He X L, Li X, et al. Wear resistance of a laser surface alloyed Ti6Al4V alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 130: 24-28.
- [13] 唐元广,吴汉华,常宏,等. 阴极电压占空比对钛合金微弧氧化膜特性的影响 [J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4840-5.
- [14] Tang G X, Zhang R J, Yan Y N, et al. Preparation of porous anatase titania film [J]. Materials Letters, 2004, 58: 1857-60.

- [15] 蒙晓涓,李卫京,崔世海,等. Ti6Al4V 合金微弧氧化陶瓷膜的组织结构研究 [J]. 航空材料学报, 2009, 2(29): 39-42.
- [16] Wu X Q, Xie F Q, Hu Z C, et al. Effects of additives on corrosion and wear resistance of micro-arc oxidation coatings on TiAl alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 20(2010): 1032-6.
- [17] 王永东,刘万辉,鲍爱莲. TC4 钛合金表面微弧氧化陶瓷涂层的摩擦学行为 [J]. 煤矿机械, 2010, 31(11): 65-67.
- [18] Shi X L, Wang Q L, Wang F S, et al. Effects of electrolytic concentration on properties of micro-arc film on Ti6Al4V alloy [J]. Mining Science and Technology, 2009(19): 220-224.
- [19] Jin F Y, Chua Paul K, Wang Ke, et al. Thermal stability of titania films prepared on titanium by micro-arc oxidation [J]. Materials Science and Engineering, 2008(476): 78-82.
- [20] Chen Fei, Zhou Hai, Chen Chen, et al. Study on the tribological performance of ceramic coatings on titanium alloy surfaces obtained through micro-arc oxidation [J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64: 264-267.
- [21] 赵晴,朱文辉,王帅星,等. 微弧氧化 TC4 钛合金与金属电偶的腐蚀行为 [J]. 材料保护, 2011, 44(74): 7-10.
- [22] Peng Z, Nie X. Galvanic corrosion property of contacts between carbon fiber cloth materials and typical metal alloys in an aggressive environment [J]. Surface Coating Technology, [http://dx. doi. org/10. 1016/j. surfcoat. 2012. 08. 098](http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.098)
- [23] 高广睿,李争显,杜继红. TC4 合金表面微弧氧化膜层耐蚀及摩擦性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(4): 602-605.
- [24] 吴汉华,王秀琴,龙北红,等. 阴/阳极电压对钛合金微弧氧化膜特性影响的研究 [J]. 功能材料, 2004, 35(s): 3286-9.
- [25] Vangolu Y, Arslan E, Totik Y, et al. Optimization of the coating parameters for micro-arc oxidation of Cp-Ti [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205: 1764-73.
- [26] Wu H H, Lu X Y, Long B H, et al. The effects of cathodic and anodic voltages on the characteristics of porous nanocrystalline titania coatings fabricated by microarc oxidation [J]. Materials Letters, 2005, 59: 370-375.
- [27] Xu J L, Liu F, Wang F P, et al. Formation of Al_2O_3 coatings on NiTi alloy by micro-arc oxidation method [J]. Current Applied Physics, 2009(9): 663-666.
- [28] Nie X, Leylanda A, Matthews. Low temperature deposition of CrN/rTiO coatings using a 2 duplex process of unbalanced magnetron sputtering and micro-arc oxidation [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133-134: 331-337.
- [29] 扬眉,刘清才,薛屹,等. TC11 微弧氧化膜制备及其结构性能研究 [J]. 功能材料, 2011, 42(1): 34-36.
- [30] 刘忠德,向正群,张中元,等. 电流密度对钛合金微弧氧化膜的影响 [J]. 轻金属, 2008, 1(1): 48-51.
- [31] 李兆丰,张建欣,蒋鹏,等. 钛合金微弧氧化膜的性能探讨 [J]. 材料保护, 2010, 43(9): 66-68.
- [32] Li J X, Zhang Y M, Han Y, et al. Effects of micro-arc oxidation on bond strength of titanium to porcelain [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 204: 1252-8.
- [33] Hui T, Xin T Z, Qiu S, et al. Influence of $FeSO_4$ concentration on thermal emissivity of coatings formed on titanium alloy by micro-arc oxidation [J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 10839-44.
- [34] Hui T, Qiu S, Xin T Z, et al. Influence of $Co(CH_3COO)_2$ concentration on thermal emissivity of coatings formed on titanium alloy by micro-arc oxidation [J]. Current Applied Physics, 2012(12): 284-290.
- [35] Wang Y M, Jiang B L, Lei T Q, et al. Microarc oxidation and spraying graphite duplex coating formed on titanium alloy for antifriction purpose [J]. Applied Surface Science, 2005, 246: 214-221.
- [36] Wang Y H, Liu Z G, Ouyang J H, et al. Preparation and high temperature oxidation resistance of microarc oxidation ceramic coatings formed on Ti2AlNb alloy [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(2): 8946-52.
- [37] Kung K C, Yuan K, Lee T M, et al. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical behavior of porous Sr-Ca-P coatings on titanium [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 515: 68-73.
- [38] 解念锁,武立志. 微弧氧化对 TC4 钛合金高温抗氧化性能的影响 [J]. 铸造技术, 2012, 33(4): 416-418.
- [39] 周慧,刘正堂,李争显,等. 钛合金表面微弧氧化膜及抗氧化性能的研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 11(34): 1835-8.

作者地址: 山东省威海市文化西路 2 号

264209

哈尔滨工业大学(威海) 海洋科学与技术学院

Tel: (0631) 5687 232

E-mail: hpluihit@126.com