

# 铝合金 TIG 焊接接头喷射式微弧氧化腐蚀 疲劳性能研究

帅刚, 邱骥, 王红美, 蔡嘉辉

(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

**摘要:** **目的** 研究铝合金 TIG 焊接接头经喷射式微弧氧化后对腐蚀条件下疲劳寿命的影响, 为延长焊接接头的使用寿命提供一种有效的方法。 **方法** 采用 TIG 焊对 5083 铝合金进行焊接, 观察焊接接头的组织结构, 测试焊接接头的显微硬度距焊缝中心的分布情况; 通过喷射式微弧氧化方法处理焊接接头, 考察陶瓷层的生长曲线和截面纳米硬度; 在最大载荷量为 7, 8, 9 kN 的条件下, 分别对微弧氧化处理与未处理的焊接试样预腐蚀 168 h 后进行等幅拉伸疲劳实验, 对比两种试样拉断时的循环次数。 **结果** 铝合金焊接接头呈现不均匀性, 微弧氧化后接头陶瓷层均匀性较好; 陶瓷层厚度增长呈现先快后慢的趋势, 表面粗糙度与厚度相关, 呈近似线性增长; 7, 8, 9 kN 的载荷下, 未处理的焊接接头相比于喷射式微弧氧化的接头, 疲劳寿命分别降低 50.7%, 58.3%, 64.9%。 **结论** 采用喷射式微弧氧化处理可改善铝合金 TIG 焊接接头的表面状态, 阻隔外界腐蚀介质对焊接基体的侵蚀, 提高其在预腐蚀和交变应力条件下的疲劳寿命, 延长结构零件的使用寿命。

**关键词:** 铝合金; TIG; 微弧氧化; 喷射式; 均匀性; 腐蚀疲劳

**中图分类号:** TG174.451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)12-0110-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.12.018

## Corrosion Fatigue Properties of Aluminum Alloy TIG Welded Joint Treated by Spraying Micro-arc Oxidation

SHUAI Gang, QIU Ji, WANG Hong-mei, CAI Jia-hui

(Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the effect of spraying micro-arc oxidation on the corrosion fatigue life of aluminum alloy TIG welded joints, in order to provide an effective method for prolonging the life of welded joints. **Methods** The 5083 aluminum alloy was welded using TIG welding, the microstructure of the welded joint was observed, and the micro-hardness distribution of welded joints with the distance from the weld center was tested. The growth curve and cross-section nano-hardness of the ceramic coating were investigated after spraying MAO treatment. Under the three loading conditions with the max-stress of 7 kN, 8 kN, 9 kN, the tensile fatigue test was conducted for welded samples treated by micro arc-oxidation and the untreated samples after 168 h of pre-corrosion,

收稿日期: 2015-09-20; 修订日期: 2015-10-01

Received: 2015-09-20; Revised: 2015-10-01

基金项目: 装备预先研究项目(51327040101)

Fund: Supported by the Equipment Pre-research Program(51327040101)

作者简介: 帅刚(1990—), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要从事表面工程及装备维修技术研究。

Biography: SHUAI Gang(1990—), Male, from Jiangxi, Master graduate student, Research focus: surface engineering and equipment maintenance technology.

and the fatigue life of the two samples was compared. **Results** The surface state of welded joints of aluminum alloy was not uniform, whereas the ceramic coating of joint showed good uniformity after micro-arc oxidation. The increment in thickness of the ceramic layer was first fast and then slow, and the surface roughness showed a nearly linear positive correlation with the thickness. Under the three loading conditions (7,8,9 kN), the fatigue life of the untreated welded joints decreased by 50.7% ,58.3% ,64.9% respectively, compared with those after spraying micro-arc oxidation treatment. **Conclusion** The surface condition of TIG welded joints could be improved by spraying micro-arc oxidation, which blocked the erosion of weld substrate by corrosive medium, and improved the fatigue life of aluminum alloy and equipment parts under corrosion and alternating stress.

**KEY WORDS:** aluminum alloy; TIG; micro-arc oxidation; spraying; uniformity; corrosion fatigue

微弧氧化是将铝、镁、钛等阀金属及其合金置于强电场电解液中,表面受端电压作用发生微弧放电,所产生的高温高压使微区的金属原子与溶液中的氧结合生成一层氧化铝为主的陶瓷层<sup>[1-4]</sup>,因其具备工艺简单、膜层综合性能好等优点,微弧氧化技术正受到越来越多科学工作者的青睐。近年来关于微弧氧化的论文和著作层出不穷,为该技术的应用和发展奠定了一定的理论基础<sup>[5-6]</sup>。5083 铝合金属铝-镁系合金,具有高强度、焊接性和耐腐蚀性好等特点,广泛应用于机械制造、交通运输和国防工业等领域<sup>[7]</sup>。海军某装备大量采用 5083 铝合金,但由于局部连接处采用了焊接处理,焊接缺陷与杂质的引入,加速了铝合金整体,特别是焊接区域在海水服役条件下的腐蚀与破坏,为装备使用和训练带来极大损失。

基于上述背景,针对传统浸入式微弧氧化技术难

以处理大面积复杂工件的问题<sup>[8]</sup>,本文使用自行研制的喷射式微弧氧化设备对 5083 铝合金焊接区进行处理,并对生成的陶瓷膜腐蚀后的疲劳性能进行分析,重点考察铝合金焊接区在腐蚀介质和交变应力的共同作用下,喷射式微弧氧化方法对试样疲劳寿命的提升作用。

1 实验

实验基材采用某型装备所使用的 5083 铝合金,试样规格为 60 mm×25 mm×2 mm,距短边打两个直径  $\phi 2.5$  mm 圆孔。铝合金焊接使用的焊丝材料为 ER5356,实验开始前将焊接余高铣平,并用砂纸磨平,经丙酮超声波清洗风干后,等待微弧氧化。铝合金和焊丝化学成分见表 1。

表 1 铝合金及焊丝化学成分  
Tab.1 Chemical components of 5083 and ER5356

	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Cu	Zn	Ti	Al
5083	4.0 ~ 4.9	0.4 ~ 1.0	0.1	0.4	0.4	0.1	0.25	0.15	Bal.
ER5356	4.7 ~ 5.5	0.5 ~ 1.0	0.1	0.25	0.4	0.1	0.25	0.05 ~ 0.2	Bal.

焊接采用手工钨极氩弧焊(TIG)。焊前进行机械清理和化学清理,减少焊接过程中产生的缺陷。钨极直径为 4 mm,焊丝直径为 3 mm,保护气体为氩气,流量为 7 ~ 15 L/min,焊接电流为 135 A。为减小焊接变形和提高焊缝背面成型,使用焊接垫板和压板,焊接完成后待完全冷却再卸载垫板。5083 铝合金强度为 270 ~ 350 MPa,焊接后焊接接头的强度达到基材的 90% 以上。

试样依次进行湿磨、抛光,再用丙酮清洗、风干。金相观察之前对观察区使用 Keller 试剂(盐酸、硝酸、氢氟酸、蒸馏水混合而成)侵蚀 1 min,而后用流动的清水清洗,风干。

微弧氧化实验采用自行研制的喷射式设备,主要由 10 kW 单极脉冲电源、移动式组合阴极喷头、电解液循环和回收系统组成,图 1 为设备示意图。微弧氧化开始前,试样经砂纸打磨并在丙酮内超声波清洗、风干,使用多聚磷酸钠、钼酸钠与去离子水配制成 12 g/L  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ +2 g/L  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  的电解液<sup>[7]</sup>,恒压模式下调节电压、频率和占空比分别为 575 V、300 Hz 和 10%,喷孔大小为  $\phi 2.5$  mm,流速为 27 L/min,开启循环水泵,调节电参数,待流速稳定后开始处理。

采用美国安捷伦公司生产的 Nano Indenter G200 高温纳米压痕仪检测陶瓷层截面的硬度,在样品截面选取 6 ~ 8 个点进行测试,试验设定载荷 20 mN,以平

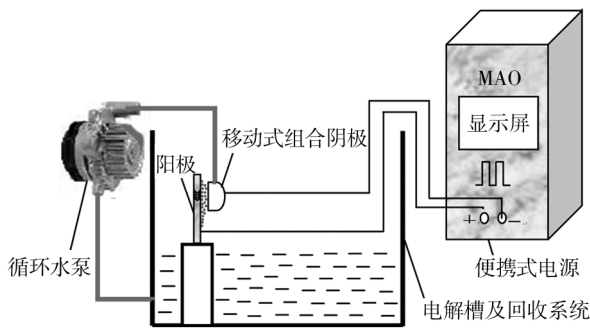


图1 喷射式微弧氧化装置示意

Fig.1 Schematic of the spraying micro-arc oxidation equipment

均值作为膜层最后的显微硬度值。

依照 GJB 1997—1994《金属材料轴向腐蚀疲劳性能试验方法》之规定,对 5083 铝合金焊接及微弧氧化层试样进行预腐蚀疲劳试验。疲劳实验设备采用 PWS-300 型电液伺服材料疲劳试验机,预腐蚀介质为铜加速盐雾腐蚀液,试样腐蚀 168 h 后取出,去除表面腐蚀产物,再进行等幅拉伸疲劳实验,记录断裂时的循环次数。实验最大载荷分别为 7,8,9 kN,最小载荷均为 1 kN,对应的应力比则分别为 0.143,0.125,0.111,实验频率设定为 10 Hz,实验温度为室温。

## 2 结果与讨论

### 2.1 焊接接头组织结构

焊接接头组织分区如图 2 所示,焊接的中心区域为焊缝区,焊接热循环作用区为热影响区,介于焊缝区与热影响区之间的过渡区为熔合区,其余两侧为铝合金基体区。焊接之后常常因缺少有效的保护措施,焊接区易先受到侵蚀破坏<sup>[9-10]</sup>,而微弧氧化将能解决这一问题。

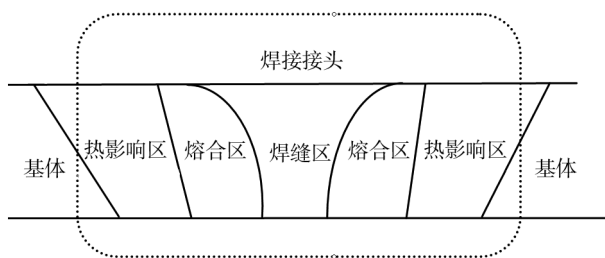


图2 TIG 焊接接头组织区域示意图

Fig.2 Schematic drawing of TIG joint zones

使用 HVS-1000 显微硬度计在距离焊缝中心 13 mm 内测试表面的显微硬度,试验参数选择: $F=50g$ ,

载荷保持时间  $t=10\text{ s}$ 。焊缝区中心位置硬度值为 71HV,原因可能是焊接时的高温致使 Mg 元素烧损,减弱了  $\beta\text{-Al}_3\text{Mg}_2$  的固溶强化作用,导致硬度降低。在距离焊缝中心约 6 mm 处的热影响区硬度值也很低为 69HV,原因可能是热循环作用导致接头软化。整个焊接接头表面硬度呈现出均匀性<sup>[11]</sup>。

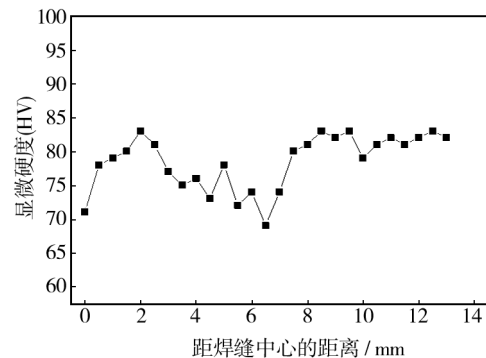


图3 TIG 焊接接头显微硬度分布

Fig.3 Micro-hardness distribution of TIG welded joints

### 2.2 陶瓷层生长曲线

图 4 为陶瓷层的厚度生长曲线,从图中可发现,微弧氧化初期至 40 min 时,陶瓷层生长速率较快,40 min 内增厚至  $48.3\text{ }\mu\text{m}$ ;40 min 之后,生长逐渐变得缓慢,10 min 内仅增厚  $3.1\text{ }\mu\text{m}$ 。随时间延长,膜层变厚,加之溶液电导率增大,电路回路阻抗增大,膜层表面击穿变得更困难,甚至不足以击穿;另一方面,氧化后期由于温度的升高,膜层溶解速度升高,当溶解速度与生长速度达到平衡,膜层厚度将达到稳定。

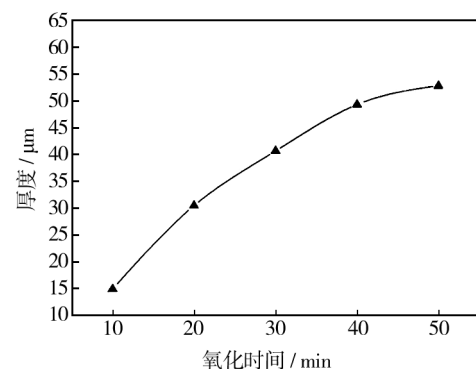


图4 陶瓷层厚度与氧化时间的关系

Fig.4 Coating thickness as a function of the MAO time

图 5 为不同时间制备陶瓷层的粗糙度生长曲线及其拟合曲线,不难发现粗糙度随时间呈近线性增长,陶瓷层厚度越大,表面粗糙度也越大,光滑度降低。

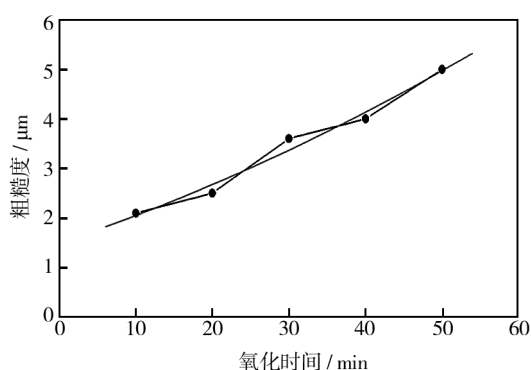


图5 陶瓷层粗糙度与氧化时间的关系

Fig.5 Coating roughness as a function of MAO time

### 2.3 陶瓷层纳米压痕硬度

图6为铝合金焊接基体与陶瓷层的纳米硬度,陶瓷层的内部存在许多疏松孔,导致测试点硬度值分散性较明显。通过对比发现,5083铝合金焊接区硬度值为1.769 GPa,陶瓷层的硬度值为15.408 GPa,相比焊接接头增大7.7倍,微弧氧化可大大提高铝合金焊接接头的表面硬度<sup>[7]</sup>。

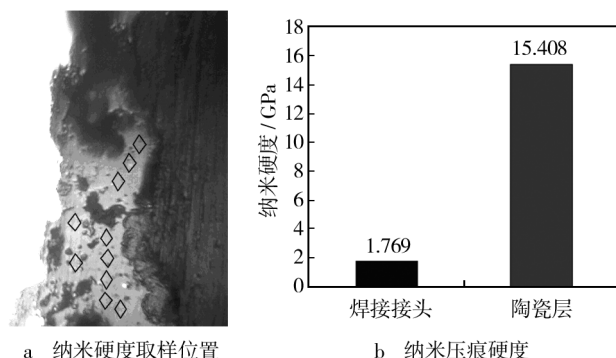


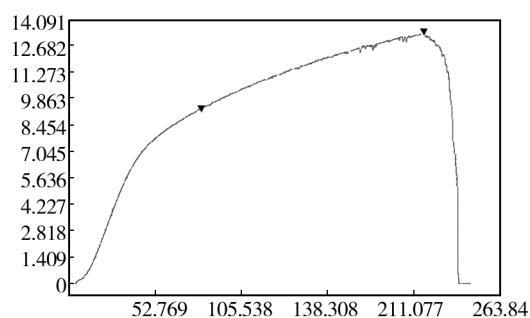
图6 陶瓷层纳米压痕硬度

Fig.6 Nano-hardness of MAO coating

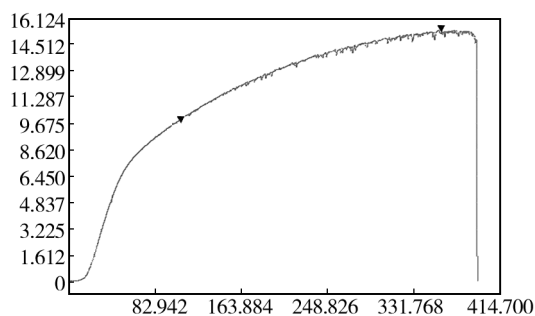
### 2.4 腐蚀疲劳寿命

某型装备局部连接处大量使用焊接,因焊接缺陷及残余应力的存在,加上严酷的海洋服役环境,结构零部件一方面受腐蚀环境的侵蚀,一方面又承受着不同大小和频率交变载荷,导致焊接结构易腐蚀、断裂等缺陷<sup>[12-13]</sup>。本文对微弧氧化的焊接试样和未处理的焊接试样进行了预腐蚀疲劳实验。实验中首先对两种试样各进行了静拉伸实验,实验曲线如下图7所示。未处理试样:面积为46.18 mm<sup>2</sup>,最大力为13.32 kN,最大强度为288 MPa;微弧氧化试样:实验面积为53.1 mm<sup>2</sup>,最大力为15.35 kN,最大强度为289.2

MPa。根据实验强度计算后,标准试样的疲劳试验力定为7,8,9 kN。



a 未处理试样



b 微弧氧化试样

图7 静拉伸实验曲线

Fig.7 Curves of the static tensile experiment

将统计出的疲劳寿命结果绘制成图8,从图中能直观地看出,焊接试样经微弧氧化处理和预腐蚀后,疲劳寿命均比未处理焊接试样和预腐蚀有明显提高。当最大载荷增大时,相应的试样疲劳寿命依次减小。当最大载荷为7 kN时,未处理焊接试样疲劳循环次数较微弧氧化焊接试样降低50.7%;最大载荷为8 kN时,未处理焊接试样疲劳循环次数较微弧氧化焊接试样降低58.3%;最大载荷为9 kN时,未处理焊接试样疲劳循环次数较微弧氧化焊接试样降低64.9%。当铝合金焊接区受到微弧氧化膜的保护后,耐腐蚀性显著提高,铝合金表面受腐蚀介质的侵蚀减弱,抑制了应力集中和裂纹源产生的几率,从而提升疲劳寿命。

疲劳断口分3个区域,分别是疲劳裂纹源区、疲劳裂纹扩展区和瞬时破断区,疲劳裂纹源区是疲劳裂纹最初形成的地方,它一般起源于试样表面应力集中或存在表面缺陷的位置;扩展区是疲劳断口最重要的特征区域,是判断疲劳寿命长短的重要依据;瞬断区是疲劳裂纹到达临界尺寸后发生的快速破断<sup>[14-15]</sup>。在疲劳载荷的作用下,因位错运动而造成的滑移带是疲劳裂纹产生的最根本原因。



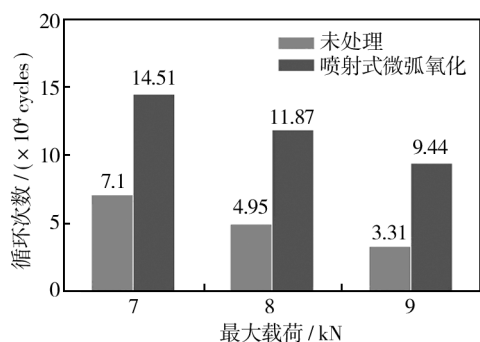


图 8 不同载荷下腐蚀疲劳寿命

Fig. 8 Corrosion Fatigue life under different loading

通过观察疲劳断口的形貌,可分析微弧氧化对提高腐蚀疲劳寿命的作用机理。以最大载荷 8 kN 为例,选取具有代表性的断口比较两者的异同。图 9 是未处理的焊接试样疲劳断口与微弧氧化试样断口的宏观形貌,图中数字 1、2、3 分别代表疲劳裂纹源区、疲劳裂纹扩展区和瞬时破断区。两图中都表现出明显的疲劳断口特征。图 9a 断口发现两处明显的裂纹源区,而图 9b 只有一个裂纹源区;图 9b 裂纹扩展区的面积较大,而图 9a 扩展区面积较小,两图都呈白亮色光泽;图 9b 扩展区平滑细腻,而图 9a 扩展区表面相对粗糙。这些特征都从宏观层面解释了焊接试样经微弧氧化处理后疲劳寿命增加的原因。

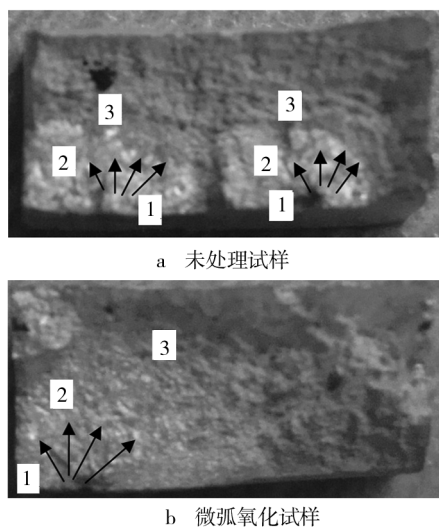


图 9 疲劳断口宏观形貌

Fig. 9 Macroscopic morphology of fatigue fracture

铝合金焊接试样在腐蚀介质的作用下,表面产生许多的点蚀坑,加上拉压载荷的联合作用,点蚀坑处极易产生应力集中,加速导致疲劳裂纹源的萌生,随着时间的延长,裂纹源作缓慢的亚临界扩展,一定时

间后,裂纹到达临界尺寸,便产生脆性断裂。而当经过微弧氧化处理后的铝合金焊接试样在膜层的保护下,减小了腐蚀介质对基体的侵蚀和破坏,膜层内部缺陷较未处理的试样少,所以萌生裂纹的时间相应延长,从而延长了疲劳寿命。另外,腐蚀作用会使微弧氧化膜老化失效,膜层的脆性增加,当加载拉压作用时,膜层更易发生损坏,因此观察到断口周围的膜层部分脱落。

图 10 显示了两种试样疲劳断口的微观形貌,发现由裂纹源区向瞬断区扩展,扩展区呈放射花样状贝纹线,同时也发现微弧氧化断口更加平滑细腻。比较裂纹源区长度,得出未处理焊接试样断口裂纹源长约 2.2 mm,而微弧氧化试样断口裂纹源长约 1.5 mm。裂纹源越长,可加速裂纹的扩展,降低疲劳的寿命,这与上文分析结果正好吻合。

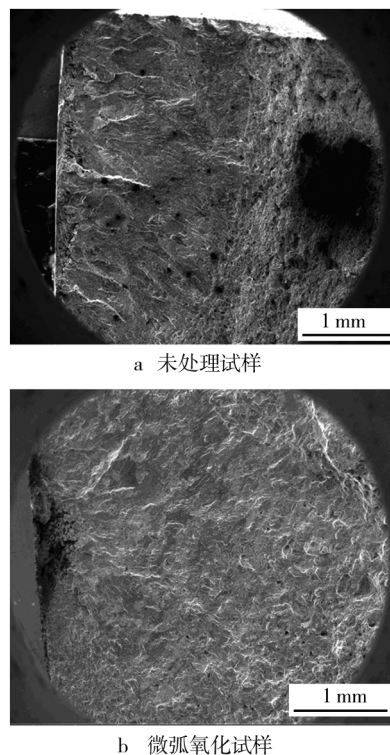


图 10 疲劳断口微观形貌

Fig. 10 Microcosmic morphology of fatigue fracture

### 3 结论

1) 5083 铝合金 TIG 焊接接头共分焊缝区、熔合区、热影响区和基体四部分,每个部分的组织结构和显微硬度值均不相同,表现出不均匀特性。

2) 焊接接头表面陶瓷层厚度生长曲线呈现先快后慢的特点,40 min 后生长缓慢,陶瓷层表面粗糙度

随氧化时间呈近似线性增长。在陶瓷层截面测试纳米硬度,测量结果相比焊接接头硬度有明显提高。

3) 经 168 h 预腐蚀后,在 3 种不同大小的交变载荷下,未处理的焊接接头相比喷射式微弧氧化处理的试样,疲劳寿命降低 50% 以上,微弧氧化可阻止腐蚀介质对基体的破坏,大大提高焊接接头的腐蚀寿命。

## 参考文献

- [1] 王虹斌,方志刚,蒋百灵.微弧氧化技术及其在海洋环境中的应用[M].北京:国防工业出版社,2010.  
WANG Hong-bin, FANG Zhi-gang, JIANG Bai-ling. Micro-arc Oxidation Technology and the Application to the Marine Environment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [2] 石小超,陈朝章,徐晋勇,等.铝合金微弧氧化技术研究概况[J].兵器材料科学与工程,2012,35(6):92—95.  
SHI Xiao-chao, CHEN Chao-zhang, XU Jin-yong, et al. Research Situation of Micro-arc Oxidation of Aluminum Alloys[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(6):92—95.
- [3] 蒋百灵,白力静,蒋永锋,等.铝合金微弧氧化技术[J].西安理工大学学报,2000,16(2):138—142.  
JIANG Bai-ling, BAI Li-jing, JIANG Yong-feng. The Technique of Micro-arc Oxidation on Aluminum Alloy[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(2):138—142.
- [4] 索相波,邱骥,朱海燕.铝合金表面微弧氧化纳米 SiO<sub>2</sub> 复合涂层的元素及物相分析[J].材料科学与工艺,2011,32(1):68—71.  
SUO Xiang-bo, QIU Ji, ZHU Hai-yan. Analysis of Elements and Phases of Nano-SiO<sub>2</sub> Composite Layer Formed on Aluminum Alloy by Micro-arc Oxidation[J]. Materials Science and Technology, 2011, 32(1):68—71.
- [5] 李克杰,李全安.合金微弧氧化技术研究及应用进展[J].稀有金属材料与工程,2007,36(3):199—203.  
LI Ke-jie, LI Quan-an. Research and Application Progress of Micro-arc Oxidation on the Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(3):199—203.
- [6] 慕伟意,李争显,杜继红,等.铝合金微弧氧化陶瓷涂层研究进展[J].表面技术,2013,42(4):94—99.  
MU Wei-yi, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Research Progress of Ceramic Coatings Formed on Aluminum Alloys by Micro-arc Oxidation[J]. Surface Technology, 2013, 42(4):94—99.
- [7] 索相波.铝合金表面纳米复合微弧氧化层制备、表征及性能研究[D].北京:装甲兵工程学院,2010.  
SUO Xiang-bo. Fabrication Characterization and Properties of Nanocomposite Coating on Aluminum Alloy Prepared by Micro-arc Oxidation[D]. Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2010.
- [8] 刘兵. LY12 合金喷射式微弧氧化膜层制备及腐蚀性能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
LIU Bing. Preparation and Corrosion Properties of Coating Formed on LY12 Alloy by Spraying Micro-arc Oxidation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] KUMAR V. Effect of Pulsed Current TIG Welding Parameters on Pitting Corrosion Behaviour of AA6061 Aluminium Alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007, 23(2):223—229.
- [10] 赖春晓.焊缝腐蚀的原因和解决方法[J].全面腐蚀控制,2004,18(6):10—12.  
LAI Chun-xiao. The Causes and Solutions of the Weld Corrosion[J]. Total Corrosion Control, 2004, 18(6):10—12.
- [11] 汪洪峰,左敦稳,王宏宇,等.5554 铝合金 TIG 焊缝组织与性能[J].南京航空航天大学学报,2010,42(6):753—757.  
WANG Hong-feng, ZUO Dun-wen, WANG Hong-yu, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 5554 Aluminum Alloy TIG Welded Seam[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(6):753—757.
- [12] 刘玲霞,成建国,吕绯.7A52 铝合金焊接结构件疲劳性能研究[J].兵器材料科学与工程,2005,28(5):37—40.  
LIU Ling-xia, CHENG Jian-guo, LYU Fei. Research on Fatigue Behavior of Welded 7A52 Al Components[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(5):37—40.
- [13] 梁戈,张亚娟,林敏.微弧氧化处理 LD10 铝合金的疲劳特性[J].材料热处理学报,2010,31(2):123—127.  
LIANG Yi, ZHANG Ya-juan, LIN Min. Fatigue Properties of LD10 Aluminium Alloy with Micro-arc Oxidation Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(2):123—127.
- [14] 文磊,王亚明,周玉,等. LY12 铝合金微弧氧化涂层组织结构对基体疲劳性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2008,38(2):747—750.  
WEN Lei, WANG Ya-ming, ZHOU Yu, et al. Influence of Coating Microstructure on Fatigue Performance of Microarc Oxidation Coated LY12 Alloy Specimen[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 38(2):747—750.
- [15] ZHANG Min, CHEN Chang-jun, CHANG Qing-ming. Study on the Interface Bonding and Bonding Fatigue Properties of Aluminum Alloy Foam Sandwich[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2009, 38(2):119—122.