

# 焊接工艺方法对 6061-T6 铝合金焊接接头疲劳性能的影响

李敬勇, 马建民

(华东船舶工业学院 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 通过对 6061 铝合金 MIG 焊接头和 TIG 焊接头在对应的加载应力条件下疲劳寿命的测定, 对比分析了两种工艺方法对铝合金焊接接头疲劳性能的影响。结果表明, 在加载应力低于焊接接头静载力学性能的 90% 时, 焊接接头的疲劳寿命均能满足需求背景的需要 (100000 次不破坏)。同样载荷条件下, MIG 焊接头的疲劳性能优于 TIG 焊接头, 尤其是在高应力条件下, MIG 焊接头的优势更为明显。焊接接头显微组织分析表明, MIG 焊接头比 TIG 焊接头具有更为细小的晶粒和焊接热影响区, 有效地提高了接头的滑移形变抗力, 抑制了循环滑移带的形成和开裂, 从而提高接头的疲劳性能。疲劳断口分析显示, 试件的表面缺陷 (疏松、气孔、夹杂等) 及机械损伤是疲劳裂纹主要的策源地。

**关键词:** 铝合金; 焊接接头; MIG 焊; TIG 焊; 疲劳性能

**中图分类号:** G405      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-5053(2004)03-0052-06

铝合金由于具有优越的性能特点, 在各领域的应用正迎来前所未有的机遇。资料表明, 铝合金焊接结构中 90% 的断裂是由承受重复性载荷的焊接接头处疲劳破坏引起的<sup>[1]</sup>。因此铝合金焊接接头的疲劳性能已经受到设计及使用单位的普遍关注。关于铝合金焊接接头疲劳性能的研究, 大多数集中在应力集中及焊接缺陷对疲劳寿命及疲劳强度的影响等方面<sup>[2~4]</sup>。而对焊接工艺方法对于焊接接头疲劳性能的影响则尚未见系统的研究报告。铝合金焊接目前应用最广泛的是熔化极惰性气体保护焊 (MIG) 和钨极惰性气体保护焊 (TIG)<sup>[5]</sup>。关于铝合金 MIG 焊接头和 TIG 焊接头疲劳性能的对比, 对于 5000 系列铝合金国外已经有研究报告, 但其研究结果依然是建立在焊缝成形优劣的基础之上的, 而且没有明确的结论。

随着焊接工艺方法的发展和改进, 两种工艺方法均能获得理想的焊缝外形, 因此, 对比研究两种工艺方法对焊接接头疲劳性能的影响, 并得出明确的结论, 对于合理采用两种工艺方法具有重要的意义。本文结合应用背景的需要, 针对性地测定了 6061 铝合金 TIG 焊接头和 MIG 焊接头的疲劳性能, 并对其断裂特征进行了分析。

## 1 试验材料

本研究采用的试验材料为 Al-Mg-Si 系 6061 铝合金, 材料状态为 T6, 试板厚度 4mm, 试板尺寸为 300mm × 120mm。焊接填充材料为 Al-Mg 系 5356 合金。试验板材及填充材料的化学成分列于表 1。焊接采用的保护气体为 He-Ar 混合

表 1 6061 铝合金及填充材料的化学成分 (wt %)

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum and welding wire 5356 aluminum (wt %)

Materials	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
6061	0.4 ~ 0.8	0.7	0.15 ~ 0.4	0.15	0.8 ~ 1.2	0.25	0.04 ~ 0.35	0.15	Bal
5356welding wire	0.25		0.1	0.05 ~ 0.2	4.5 ~ 5.5	0.1	0.05 ~ 0.2	0.06 ~ 0.2	Bal

气, 混合气比例为 75% He + 25% Ar。

6061 铝合金母材及 TIG 焊接头、MIG 焊接头的静载力学性能见表 2。

收稿日期: 2004-02-18; 修订日期: 2004-04-28  
作者简介: 李敬勇 (1963-), 男, 副教授, 博士研究生。

表2 6061 铝合金母材及 TIG 焊接头、MIG 焊接头的静载力学性能

Table 2 Mechanical properties of 6061 aluminum base material and its welded joints

Test specimens	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ / %
Base material	312	286	15
MIG Welding joint	223	133	7.5
TIG Welding joint	188	128	7.2

## 2 试样的制备

TIG 焊、MIG 焊试板均采用平位并在工装夹具夹持下进行焊接,接头形式全部为 I 型对接接头,单面焊双面成形。焊后对焊缝进行 100% 的 X 射线探伤检验,在此基础上进行疲劳试样的截取。试样加工后,再次对试样逐个进行射线探伤检验,以获取每根试样的真实状况。图 1 为疲劳试样的形状及尺寸。鉴于焊缝形状对疲劳性能的影响已经进行专门的研究,因此,本试验的试样均采用机械方法去除焊缝余高。

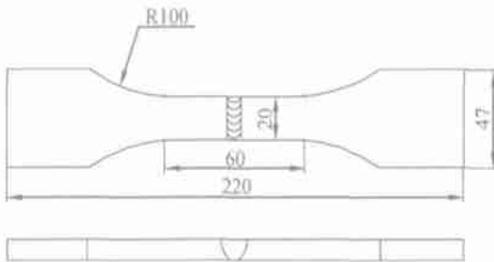


图1 疲劳试样形状尺寸

Fig. 1 The shape and dimensions of fatigue samples

## 3 疲劳试验

### 3.1 试验方案的确定

根据背景结构的受力特点,并考虑与已有研究成果相对应,本试验采用轴向加载方式进行疲劳试验。应力比  $r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.1$ ,加载频率  $f = 20\text{Hz}$ 。试验加载应力以焊接接头的静载拉伸强度为参照依据,分别取两种接头抗拉强度的 60%~90%。通过试验测定不同加载应力下的疲劳寿命。根据背景结构的使用条件,疲劳寿命要求一般不高于 100000 次,因此,试验最高寿命设定为 500000 次。为了对比两种接头的性能,在加载应力选取时,还兼顾在同一载荷下进行试验。

由于铝合金焊接时,极易产生气孔、夹杂及未焊透等缺陷,因此本试验采用扫描电镜对断口形

貌进行观察,对两种接头的疲劳断裂特征和焊接缺陷对焊接接头疲劳性能的影响进行了分析研究。

### 3.2 疲劳试验及其结果

疲劳试验在 810 型 MTS 万能实验机上进行。加载应力首先选择两种接头各自静载抗拉强度的 60% 进行试验。经过 500000 次的循环加载,两种接头均未发生破坏。将加载应力提高至 MIG 焊接头的 70%,80% 进行试验,而且两种接头采用同一加载应力(此时 TIG 焊接头的加载应力已接近其自身静载抗拉强度的 84% 和 95%),结果两者的疲劳寿命依然高于 100000 次。继续将 MIG 焊接头的加载应力提高到其抗拉强度的 90% 和 95%,除个别有缺陷试样的寿命稍低外,大多试样疲劳寿命依然高于 100000 次。将 TIG 焊接头的加载应力提高到其自身抗拉强度的 95% 和 98%,所有试样的寿命均低于 100000 次。疲劳试验结果列于表 3。

## 4 试验结果分析

### 4.1 两种工艺方法焊接接头疲劳性能对比

从表 3 所列试验结果可以看出,在去除焊缝余高后,只要焊缝具有较好的内部质量,且接头区域保持较好的表面状态,MIG 焊接头和 TIG 焊接接头在试验加载条件下均表现了较好的疲劳性能。加载应力低于其各自静载抗拉强度的 60% 时,疲劳寿命均达 500000 次而不断裂,而且 MIG 焊接头在加载应力为静载抗拉强度的 70% 时,还出现 1000000 次不断裂的记录。在加载应力低于静载抗拉强度 90% 的情况下,两种接头的疲劳寿命也均能高于 100000 次。

图 2 是根据表 3 试验结果绘制的两种工艺方法焊接接头的  $\sigma-N$  曲线。

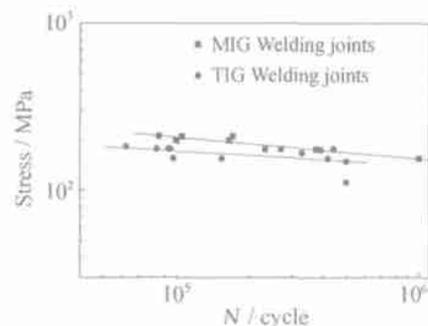


图2 TIG和MIG接头疲劳曲线

Fig. 2 Fatigue curves of TIG and MIG welded joints

表 3 6061 合金对接接头轴向疲劳性能

Table 3 Fatigue properties of 6061 aluminum welding joints

Stress loaded /Mpa	Fatigue life $N$ /cycle	Rupture situations	$\sigma_b$ / %	Welds' quality	Welding process
133.8	500000	Not broken	60	No weld defects	MIG
156.1	251439	Broken at weld	70	$\phi 0.8, \phi 0.6$ slag inclusion	
156.1	1000405	Not broken	70	No weld defects	
178.4	292113	Broken at weld	80	No weld defects	
200.7	164589	Broken at weld	90	No weld defects	
200.7	99668	Broken at weld	90	$\phi 0.5$ porosity	
211.9	120060	Broken at weld	95	$\phi 0.5$ porosity	
112.8	500000	Not broken	60	No weld defects	TIG
150.4	500000	Not broken	80	No weld defects	
156.1	420169	Broken at weld	83	Dispersion porosities	
156.1	153381	Broken at weld	83	No weld defects	
156.1	97011	Broken at weld	83	Dispersion porosities, $\phi 0.2$ slag inclusion	
169.2	328252	Broken at weld	90	Dispersion porosities	
178.6	418281	Broken at weld	95	No weld defects	
178.6	92673	Broken at weld	95	Dispersion porosities	
178.6	83003	Broken at weld	95	$\phi 0.5$ tungsten inclusion	
184.2	61885	Broken at weld	98	Dispersion porosities	

从图 2 中两条  $\sigma-N$  曲线的变化趋势看, TIG 焊接头和 MIG 焊接头的疲劳强度均随着循环次数的增大而降低。而 TIG 焊接接头疲劳曲线的斜率小于 MIG 焊接接头, 说明随着循环次数的增加, TIG 焊接接头的疲劳强度降低的程度要小于 MIG 焊接接头的疲劳强度降低的程度, 两条曲线有相交的趋势, 表明在高应力下, 两种焊接方法对疲劳性能的影响有显著差异, 随着应力的降低, 两种焊接方法对疲劳性能的影响的差异逐渐减小。即在加载应力较低时, MIG 焊接接头疲劳性能并未表现为明显好于 TIG 焊接头, 但由于 TIG 焊接头静载强度较低, 因此在高应力下, MIG 焊接接头疲劳性能要好于 TIG 焊接头。

对两条  $\sigma-N$  曲线进行拟合可得, TIG 焊接头和 MIG 焊接接头的  $\sigma-N$  曲线的方程分别为:

$$\text{MIG 焊接头: } \lg s = 2.199173 - 0.13391 \lg N$$

$$\text{TIG 焊接头: } \lg s = 2.53653 - 0.05987 \lg N$$

疲劳试验所得的结果往往是比较分散的, 与静载拉伸试验的结果相比, 其分散性要大得多。本试验所得数据也同样表现了较大的离散性, 而

且部分 TIG 焊接头的疲劳寿命明显高于 MIG 焊接头。尽管如此, 从总的情况来看, 本研究依然倾向于认为, MIG 焊接头的疲劳性能好于 TIG 焊接头, 尤其是在较高应力条件下, MIG 焊接头的优越性更为突出。至于个别数据的异常表现, 这与疲劳试验的固有特点(离散性强)有关, 而且疲劳试验对试样的表面和内部质量极为敏感。焊缝中存在的气孔、夹杂、未焊透等缺陷和试样表面的机械划痕都会造成焊接接头疲劳性能的显著下降。关于焊接缺陷及试样表面状态对接头疲劳性能的影响, 可以结合断口形貌的观察进行分析。

#### 4.2 显微组织对疲劳性能的影响

由于 MIG 焊电流密度大、线能量集中、电弧穿透能力较强, 同时焊接速度较快, 采用其焊接铝合金, 对于焊缝金属和焊接热影响区的组织极为有利。焊缝及热影响区的晶粒细小, 而且热影响区较窄。而 TIG 焊焊接热输入大、焊接速度慢, 在焊缝及其附近产生了较高的峰值温度和较宽的热影响区, 造成焊接接头的晶粒粗化。

图 3 和图 4 分别为两种工艺方法焊接试样的

焊缝中心及热影响区的显微组织。从图 3、图 4 可以看出 MIG 焊接头的晶粒明显小于 TIG 焊接头。

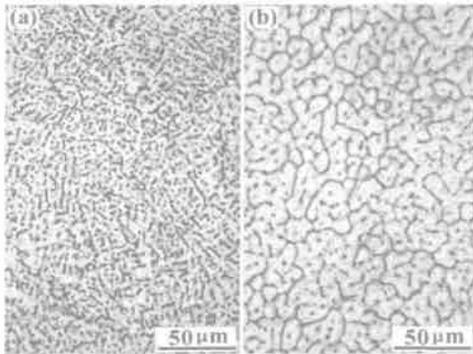


图 3 6061 铝合金焊缝中心显微组织  
(a) MIG 焊缝; (b) TIG 焊缝

Fig. 3 Microstructures of the 6061 aluminum weld materials  
(a) MIG weld; (b) TIG weld

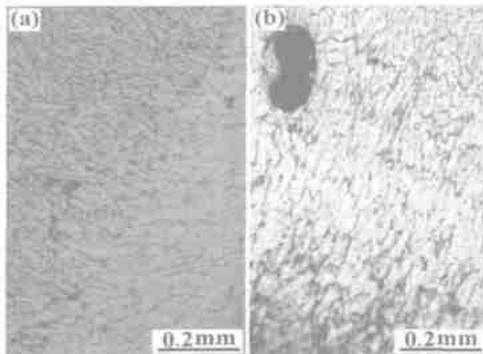


图 4 6061 铝合金熔合区显微组织  
(a) MIG 焊接头; (b) TIG 焊接头

Fig. 4 Microstructures of zones near the weld interfaces of 6061 aluminum welded joints  
(a) MIG joint; (b) TIG joint

由于晶界对位错运动的阻塞作用,晶粒细化可以有效提高材料的滑移形变抗力,抑制循环滑移带的形成和开裂,增加裂纹扩展的晶界。从疲劳裂纹沿晶界开裂的位错塞积机制可知,细化晶粒可以有效提高材料的疲劳强度。因此,MIG 焊接头的形变抗力要大于 TIG 焊接头,其阻止循环滑移带的形成和开裂的程度比 TIG 接头大<sup>[6]</sup>。所以,从组织上来说,MIG 焊接头的疲劳性能要好于 TIG 焊接头。

#### 4.3 疲劳断口分析

为了进一步分析焊接接头疲劳断裂的特征和

试样质量对疲劳性能的影响,本研究采用 JSM-35C 扫描电子显微镜对典型的疲劳断口形貌及局部化学成分进行了观察和分析。

疲劳试样断口分析显示,疲劳破坏大部分始于试样表面,大部分试样表现为单源特征,个别试样则表现为多源特征。试样疲劳裂纹源处可发现显微疏松、表面气孔、未焊透、夹杂物以及表面机械划伤等。上述表面缺陷及损伤的存在,为疲劳裂纹的产生创造了条件。图 5 (a), (b) 分别为 MIG 焊接头和 TIG 焊接头典型的疲劳断口低倍形貌,图中可以清晰看到以裂纹源为起始的裂纹扩展走向。图 6 为几种疲劳裂纹源的形貌。

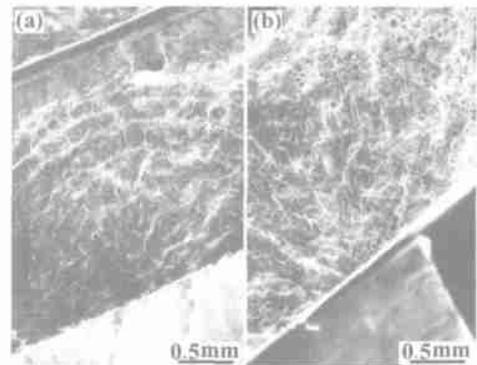


图 5 疲劳断口低倍形貌

(a) MIG 焊接头; (b) TIG 焊接头

Fig. 5 SEM fractographs of 6061 aluminum welded joints (a) MIG joint; (b) TIG joint

图 7 为裂纹扩展区中形成海滩状的疲劳辉纹,它表示裂纹前沿在间歇扩展中的逐次位置。试验各试样均具有同样的特征,疲劳辉纹细而密,且十分均匀。由于裂纹扩展中两表面的羁押和摩擦作用,断口的疲劳区的突起部分,被磨光或呈贝壳状的光泽表面。

裂纹的持续扩展,使剩余截面上的应力不断增加,裂纹扩展速率也相应地增加。当剩余面积不足以支持所加载荷时,试样即发生瞬间断裂。瞬断区的断口形貌均呈韧窝状,是典型的静载撕裂特征,见图 8。应力较低时,疲劳区面积相对较大,而应力高时,疲劳区面积则相应较小。

综上所述可以看出,焊缝金属由于属于铸态组织,并且焊缝余高去除使其静载强度降低,所以在去除焊缝余高造成的应力集中等因素后,焊缝部分是焊接接头的最薄弱环节。而焊缝中气孔、未焊透、夹杂物、组织疏松及表面机械划伤等缺陷的存在,则为疲劳裂纹的产生创造了条件,并成为

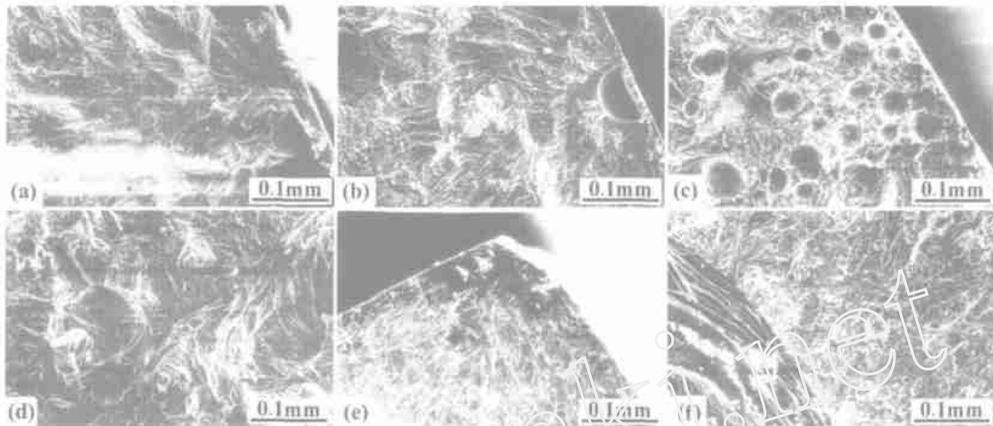


图 6 疲劳裂纹源的形貌

(a) 显微疏松; (b) 单个气孔; (c) 密集气孔; (d) 夹杂; (e) 表面划痕; (f) 未焊透

Fig. 6 Microscopes of fatigue rupture origins

(a) shrinkage cavity; (b) single porosity; (c) dense porosities; (d) inclusion; (e) nick on surface; (f) incomplete joint penetration

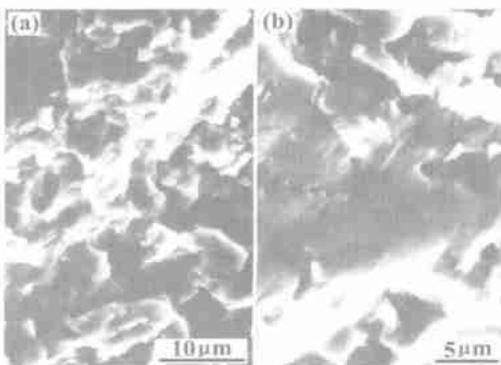


图 7 疲劳裂纹扩展区辉纹特征

Fig. 7 Fatigue strips in the extended partition of a fatigue crack

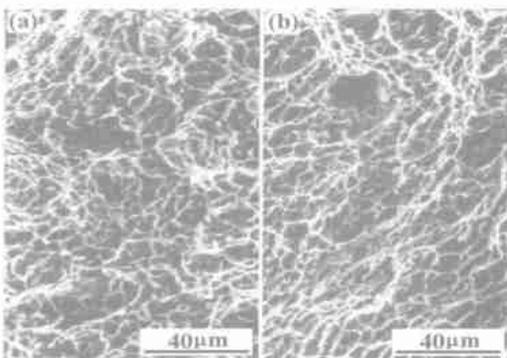


图 8 最终断裂区韧窝形貌特征

Fig. 8 Typical fractographs of the final rupture zones  
(a) MIG joint; (b) TIG joint

疲劳裂纹的源头。因此,为有效提高铝合金焊接接头的疲劳性能,一方面应选择能获得良好焊缝组织的填充材料,以提高焊缝金属的静载强度,另一方面应制定合理的焊接工艺,严格控制焊缝质量,减少试件疲劳裂纹的源头。

## 5 结 论

(1) 试验条件下,6061 铝合金 MIG 焊接头和 TIG 焊接头均表现了较好的疲劳性能。当应力低于其自身静载抗拉强度的 60% 时,两种接头的疲劳寿命均能高于  $5 \times 10^5$  次不破坏;当应力低于其自身静载抗拉强度的 90% 时,其疲劳寿命均能高于  $1 \times 10^5$  次不破坏。

(2) 相同或相近载荷条件下 MIG 焊接头的疲劳性能好于 TIG 焊接头,尤其是在较高载荷条件下,MIG 焊接头的优越性更为明显。

(3) MIG 焊电流密度大、线能量集中、电弧穿透能力较强,同时焊接速度较快,采用其焊接铝合金,焊缝及热影响区的晶粒细小,而且热影响区较窄,提高了材料的滑移形变抗力,抑制循环滑移带的形成和开裂,增加裂纹扩展的晶界。因此,与 TIG 焊相比,采用 MIG 焊方法可以有效提高铝合金焊接接头的疲劳性能。

(4) 焊缝中气孔、夹杂和未焊透等缺陷及表面机械划伤可显著降低焊接接头的疲劳性能,并成为疲劳裂纹地源头。

## 参考文献:

- [1] T. R. 格内尔. 焊接结构疲劳[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [2] 田锡唐. 焊接结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [3] 霍立兴. 焊接结构工程强度[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [4] 傅祥炯. 结构疲劳与断裂[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [5] 周振丰. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [6] 杨化仁, 郭晓光. 焊接结构疲劳强度理论[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.

## Effect of welding processes on fatigue properties of 6061-T6 aluminum welded joints

LI Jing-yong, MA Jian-min

(East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** The effect of welding processes (MIG and TIG) on fatigue properties of 6061-T6 aluminum welded joints are analyzed based on fatigue testing. The results shows that the fatigue life of two kinds of joints can settle for the requests of applied objects when loads are under 90 % of the tensile strength of welded joints. And the fatigue properties of MIG welded joints are better than those of TIG welded joints, especially under higher loading conditions. Fracture morphologies and microstructures of joints are comparatively fine in the MIG welds with high fatigue life opposed to the TIG welds having comparatively low fatigue life. Fracture morphologies also shows that the fatigue fracture occurred from porosities, inclusions, incomplete joint penetrations and other weld defects and nicks, ect.

**Key words:** aluminum alloy; welded joint; MIG welding process; TIG welding process; fatigue property

\* \* \* \* \*

(上接第 35 页)

## Study on the mechanisms of electrochemical surface treatment of carbon fibers in $H_3PO_4$ solution

CAO Hai-lin, HUANG Yu-dong, ZHANG Zhi-qian

(Department of Applied Chemistry, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The carbon fibers were electrochemical treated in  $H_3PO_4$  solution. The treatment mechanisms were investigated using cyclic voltammetry, XPS, SEM and XRD measurements. The results indicated that the electro active substances on the fibers were reacted to produce new active carbon atom under the polarization current in initial stage, then the fibers were oxidized and etched more and more greatly under the couple action of polarization current and the electrolyzation of water. The content of oxygen element on the fiber surface were increased. The concentration of different functional groups which contained oxygen element were changed continuously during the surface treatment period. The carboxyl group and acid anhydride were increased with the treatment time extending. The surface morphology of carbon fibers was rougher and the grooves on the fiber surface were wider and deeper after treatment. Whereas the bulk structure of the fiber was not changed during treatment, the structure of micro crystallite on the fiber surface was changed slightly.

**Key words:** carbon fibers; electrochemical treatment;  $H_3PO_4$ ; mechanism