

# 不同时效态 3J21 合金疲劳行为

## Fatigue Behavior of 3J21 Alloy at Different Aged States

金晓鸥<sup>1</sup>, 何世禹<sup>2</sup>, 薛文博<sup>1</sup>

(1 黑龙江大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150086;

2 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

JIN Xiao-ou<sup>1</sup>, HE Shi-yu<sup>2</sup>, XUE Wen-bo<sup>1</sup>

(1 School of Architecture and Engineering, Heilongjiang

University, Harbin 150086, China; 2 School of Materials Science

and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**摘要:** 在 MTS 万能实验机上对室温大气环境下欠时效态、峰时效态和过时效态 3J21 合金的疲劳行为进行研究, 并采用扫描电镜(SEM)对宏观断口及微观断口进行分析。结果表明: 不同时效态疲劳裂纹均呈穿晶扩展, 欠时效态 3J21 合金疲劳裂纹萌生寿命最长, 扩展途径比较曲折, 扩展速率最小, 表现出最大的疲劳裂纹扩展抗力, 疲劳寿命最长。而过时效态 3J21 合金的疲劳裂纹萌生寿命最短, 沿晶扩展的比例增加, 扩展途径相对平直, 扩展速率最大, 裂纹扩展抗力最小, 疲劳寿命最低; 峰时效态合金介于两者之间。不同时效态的疲劳断口均由疲劳源、疲劳裂纹扩展区和瞬断区组成。在低速扩展区, 欠时效态断口呈现小平面, 峰时效态和过时效态断口呈现冰糖状花样, 在中速扩展区均未看到长的疲劳条纹, 仅发现个别细小的疲劳条纹。

**关键词:** 3J21 合金; 时效; 疲劳行为; 裂纹扩展特性

中图分类号: TG113      文献标识码: A      文章编号: 1001-4381(2007)06-0026-05

**Abstract:** The fatigue behavior of under-aged, peak-aged and over-aged 3J21 alloy were testly by using MTS testing machine. The macrographs and micrographs of fatigue fracture were analyzed by Scanning Electron Microscopy (SEM). The results show that the fatigue crack growth for different aged alloys is all transgranular. The fatigue crack initiation life of under-aged 3J21 alloy is the longest, the fatigue crack growth track is zigzag, the fatigue crack growth rate is the slowest; the fatigue crack growth resistance is maximal; the fatigue life is the longest. However; the fatigue crack initiation life for over-aged alloy is the shortest. The proportion of growing along intercrystalline for over-aged alloy gradually increases; Its crack track is straighter; The fatigue crack growth rate is the fastest, its fatigue crack growth resistance is the lowest. The fatigue life is the shortest. The fatigue behavior of peak-aged alloy is between that of the two aged state alloys. The fatigue fracture consists of fatigue source, fatigue crack growth area and instantaneously fractured area of different states. In low growing area, the fatigued fracture of under-aged shows small plane. The fatigue fracture of peak-aged and over-aged shows sugar candy pattern. In middle growth area, the long fatigue striations were not inspected except small individual fatigue striations.

**Key words:** 3J21 alloy; aged; fatigue behavior; crack growth characteristic

3J21 合金被认为是综合性能最好的钴基高弹性合金之一。已有研究结果表明<sup>[1-4]</sup> 对该合金进行形变热处理后, 可获得高的弹性性能、高的强度、硬度、耐磨性、耐疲劳性和无磁性等性能, 同时许多介质中具有很高的耐腐蚀能力, 具有一定的热稳定性和较低的缺口敏感性。因此 3J21 合金在国防和民用工业领域都有广泛的应用。由于使用的需要, 构件及结构常常带

有键槽、油孔、几何突变部位等。缺口的存在产生应力集中; 在交变载荷作用下, 疲劳裂纹往往始于这些危险部位并扩展导致整个构件疲劳断裂<sup>[5]</sup>。因此, 深入研究 3J21 合金的疲劳行为, 可为设计选材提供详实的理论依据, 具有十分重要的意义。本工作主要以室温大气条件下欠时效态、峰时效态和过时效态 3J21 合金为典型材料, 研究不同时效状态对合金疲劳行为的影响。

1 实验材料及方法

实验用材料为 3J21 合金,其化学成分见表 1。

表 1 3J21 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of 3J21 alloy

Element	C	Si	Mn	Co	Ni	Cr	Mo
Mass fraction/ %	0.08	0.55	1.9	40	15	20	7.0

3J21 合金经固溶处理(在真空炉中 1180℃±5℃保温 1.5h 水淬)后,在 450℃的恒温箱中进行人工时效<sup>[6]</sup>,时效过程中每间隔一定时间取样进行维氏硬度测试,硬度实验在 HVS-5 型维氏硬度试验机上进行,载荷为 1kg,加载时间为 10s,物镜放大倍数为 40 倍。所得时效硬化曲线如图 1 所示。选定的欠时效态、峰时效态和过时效态的时效时间分别为 4h、8h 和 14h。

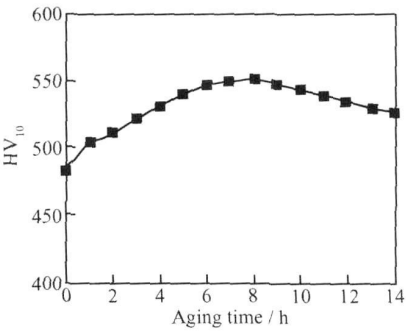


图 1 3J21 合金 450℃时效硬化曲线

Fig. 1 Age-hardening curve of 3J21 alloy at 450℃

疲劳实验在 MTS 伺服试验机上进行,疲劳试样如图 2 所示。应力比  $R$  为 0.1,应力集中系数  $K_t$  没有进行计算,考虑到  $K_t$  的影响,在加工孔时尽量使每个试样一致,使  $K_t$  保持基本相同。

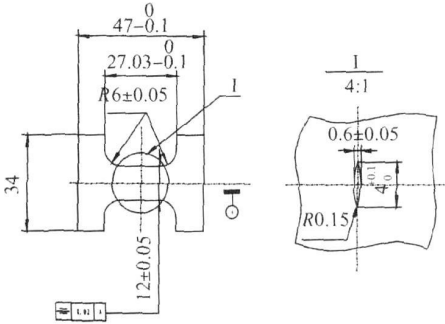


图 2 疲劳试样形状和尺寸

Fig. 2 Shape and dimension of fatigue test sample

测定 S-N 曲线选择载荷的原则:最大载荷对应的应力小于材料的屈服强度,然后依次减小 50MPa,直到循环寿命达到疲劳极限 10<sup>7</sup> 次。疲劳裂纹扩展速率

实验按 ASTM<sup>[7]</sup> 和中国国家标准<sup>[8]</sup> 中的要求进行。用 SEM 扫描电镜观察疲劳断口形貌,以深入研究不同时效态 3J21 合金的疲劳行为。

2 实验结果

2.1 S-N 疲劳曲线

欠时效态、峰时效态、过时效态 3J21 合金的疲劳实验结果见图 3。

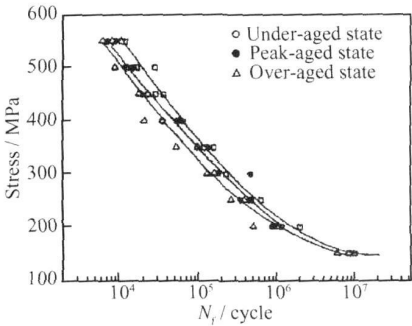


图 3 不同时效态 3J21 合金的 S-N 疲劳曲线

Fig. 3 Fatigue curve S-N of 3J21 alloy at different aged states

由图 3 可见,在较高循环应力水平下,欠时效态合金表现出较好的疲劳抗力,过时效态合金的疲劳抗力最差,峰时效态合金介于两者之间。随着循环应力的逐渐减小,三种时效态合金的疲劳抗力越趋接近。

2.2 疲劳裂纹萌生与扩展

2.2.1 疲劳裂纹萌生寿命

图 4 为同一载荷、不同时效状态下 3J21 合金疲劳裂纹萌生照片。

本研究以三种不同时效状态下 3J21 合金疲劳裂纹扩展到 0.1mm 时所对应的疲劳循环次数作为疲劳裂纹的萌生寿命,见表 2。可见,欠时效态 3J21 合金疲劳裂纹萌生寿命最长,过时效态的最短,峰时效态的疲劳裂纹萌生寿命介于两者之间。

2.2.2 疲劳裂纹扩展速率

不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹扩展曲线和  $da/dN-\Delta K$  关系曲线如图 5、6 所示( $R=0.1$ )。可以看到,总体上,不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹扩展速率差别并不很大。随着循环次数的逐渐增加,欠时效态合金裂纹长度增长稍慢,扩展速率最低,门槛值最高。过时效态合金裂纹长度增长稍快,扩展速率最高,门槛值最低。峰时效态合金介于两者之间。

2.2.3 疲劳裂纹扩展途径

不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹宏观扩展途径如图 7 所示。裂纹都是在预制的缺口处产生,并沿着近

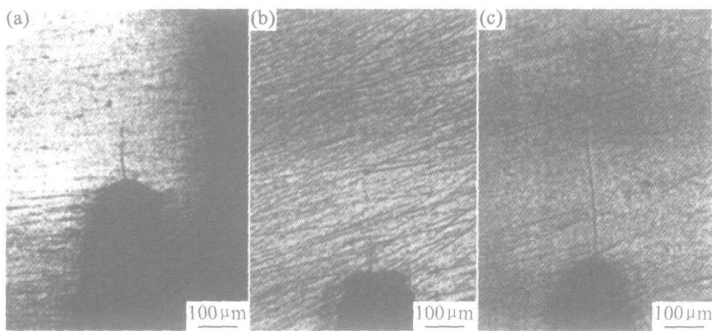


图 4 不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹萌生照片( $\sigma=350\text{MPa}$ ) (a) 欠时效态; (b) 峰时效态; (c) 过时效态

Fig. 4 Fatigue crack initiation of 3J21 alloy at different aged states  
(a) under-aged state; (b) peak-aged state; (c) over-aged state

表 2 不同时效状态下 3J21 合金疲劳裂纹萌生寿命

Table 2 Fatigue crack initiation life of 3J21 alloy at different aged states			
Aged state	Fatigue crack initiation life		Average
Under-aged state	$3.48 \times 10^6$	$3.62 \times 10^6$	$3.55 \times 10^6$
Peak-aged state	$3.37 \times 10^6$	$2.86 \times 10^6$	$2.96 \times 10^6$
Over-aged state	$3.55 \times 10^6$	$3.11 \times 10^6$	$2.45 \times 10^6$

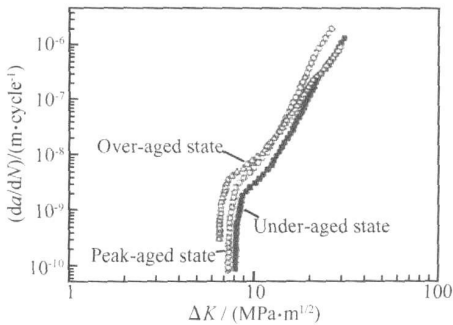


图 6 不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹  $da/dN-\Delta K$  关系曲线

Fig. 6 Fatigue crack growth rate  $da/dN-\Delta K$  curve of 3J21 alloy at different aged states

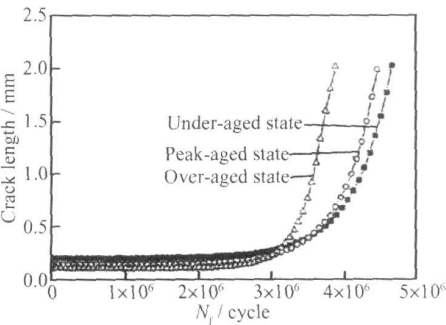


图 5 不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹扩展曲线

Fig. 5 Fatigue crack growth curve of 3J21 alloy at different aged states

似于中心线的方向扩展。

对不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹微观扩展途径进行观察如图 8 所示。可以看到, 欠时效态 3J21 合金疲劳裂纹主要是穿晶扩展, 扩展途径较为曲折, 峰时效态合金疲劳裂纹出现沿晶扩展迹象, 扩展途径较为平直, 过时效态合金疲劳裂纹为穿晶和沿晶扩展, 但沿晶扩展的比例增大, 扩展途径更为平直。

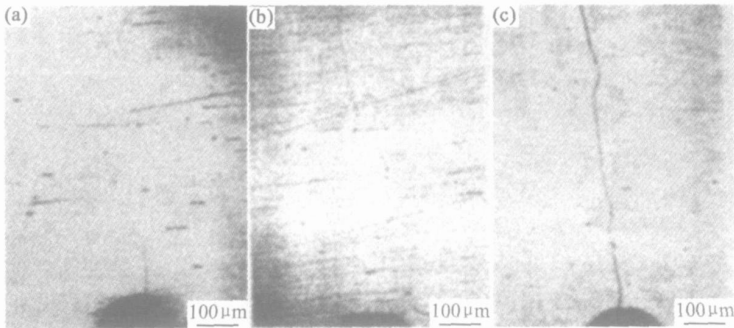


图 7 不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹宏观扩展途径( $\sigma=350\text{MPa}$ ) (a) 欠时效态; (b) 峰时效态; (c) 过时效态

Fig. 7 Macroscopic fatigue crack growth of 3J21 alloy at different aged states( $\sigma=350\text{MPa}$ )  
(a) under-aged state; (b) peak-aged state; (c) over-aged state

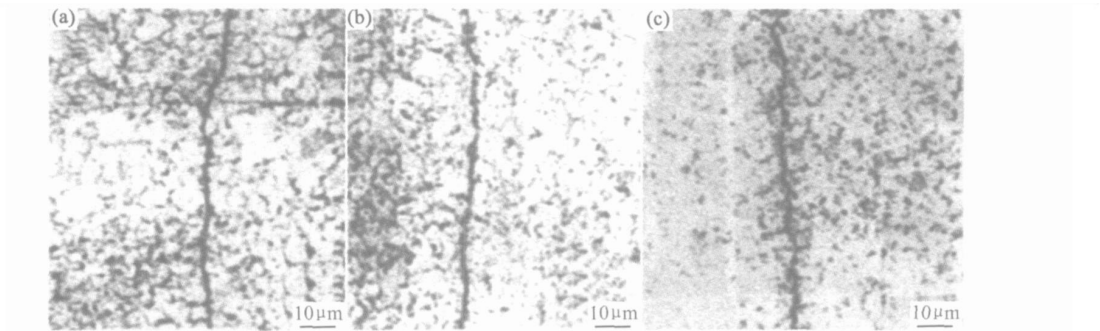


图 8 不同时效态 3J21 合金疲劳裂纹微观扩展途径( $\sigma= 350\text{MPa}$ ) (a) 欠时效态; (b) 峰时效态; (c) 过时效态  
Fig. 8 Micrographs fatigue crack growth of 3J21 alloy at different aged states( $\sigma= 350\text{MPa}$ )  
(a) under-aged state; (b) peak-aged state; (c) over-aged state

2.3 宏观疲劳断口分析

图 9 为不同时效态 3J21 合金在  $350\text{MPa}$  应力下

的疲劳断口宏观形貌。由图 9 可见, 断口均由疲劳源、疲劳裂纹扩展区和瞬断区组成。在同一应力下, 欠时

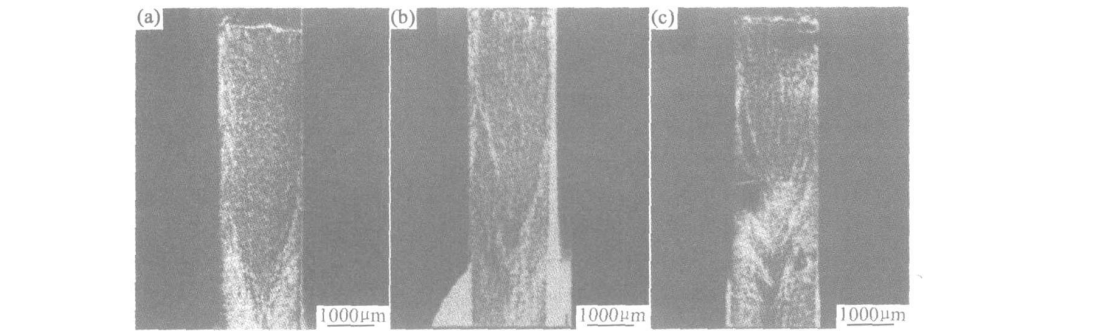


图 9 不同时效态 3J21 合金疲劳断口宏观形貌( $\sigma= 350\text{MPa}$ ) (a) 欠时效态; (b) 峰时效态; (c) 过时效态  
Fig. 9 Macroscopic morphologies of fatigue fractures 3J21 alloy at different aged states( $\sigma= 350\text{MPa}$ )  
(a) under-aged state; (b) peak-aged state; (c) over-aged state

效态 3J21 合金的疲劳区最大, 过时效态的疲劳区最小, 凸凹不平的瞬断区所占比列较大; 而峰时效态的疲劳区范围介于两者之间。

2.4 微观疲劳断口分析

观察不同时效态 3J21 合金微观疲劳断口如图 10 所示。

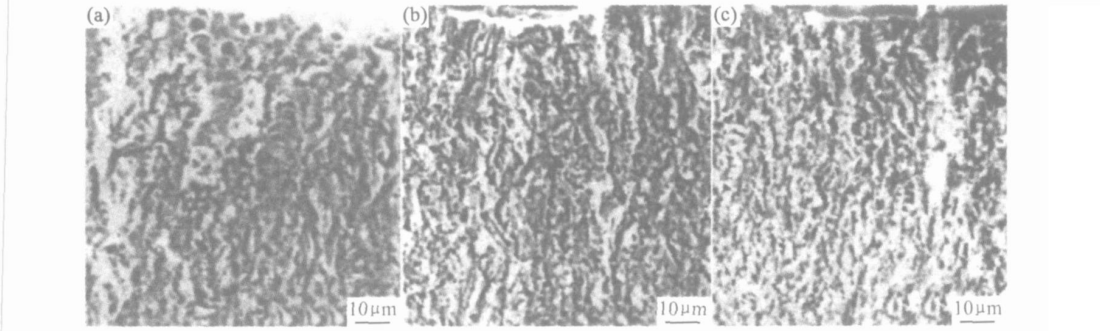


图 10 不同时效态 3J21 合金低速扩展区 SEM 照片( $\sigma= 350\text{MPa}$ ) (a) 欠时效态; (b) 峰时效态; (c) 过时效态  
Fig. 10 SEM micrographs showing low growth area of 3J21 alloy at different aged states( $\sigma= 350\text{MPa}$ )  
(a) under-aged state; (b) peak-aged state; (c) over-aged state

疲劳裂纹区域对应着三个不同的断裂机制。在低速扩展区, 疲劳断口类似解理断裂, 对应非连续机制, 可观察到较多的小平面。欠时效态合金的小平面较平

坦, 而峰时效态和过时效态合金断口呈现冰糖状花样。这些特征与不同时效状态下的裂纹萌生速率不同相对应。在欠时效状态下, 裂纹萌生最慢, 裂纹扩展需要在

若干次循环下才能进行, 在累计反复循环中, 导致裂纹尖端位错往复滑移和环境污染, 最终形成较多小平面。

图 11 为疲劳裂纹中速扩展区, 呈现条纹机制。但未看到长的疲劳条纹。仅看到个别细且短的疲劳条纹。这是因为 3J21 合金是高强材料, 断裂韧性  $K_{IC}$  值低, 在较低的应力场强度因子差值  $\Delta K$  下, 便满足了裂

纹尖端最大应力场强度因子  $K_{max}$  与断裂韧性  $K_{IC}$  之比大于或等于  $1/2$  的条件, 直接进入 II 区<sup>[9, 10]</sup>, 即相当于使 II 区移向低  $\Delta K$  值方向, 所以大多数断口不能呈现单一的条纹特征, 个别试样可看到细小的短疲劳条纹。

图 12 为疲劳裂纹瞬断区( III) SEM 照片。断口开始出现静断特征, 可看到二次裂纹、准解理和韧窝。

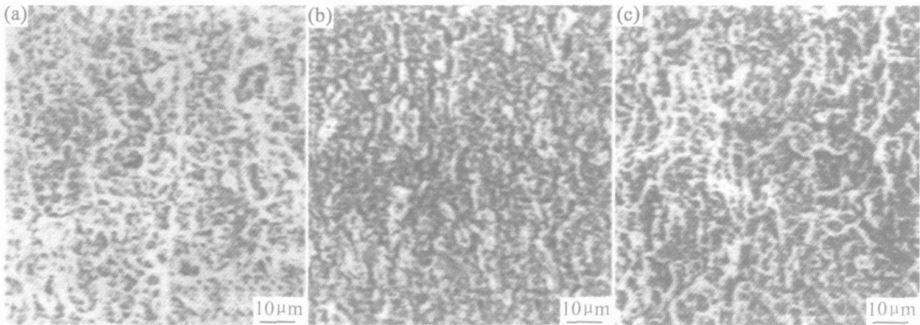


图 11 不同时效态 3J21 合金中速扩展区 SEM 照片 ( $\sigma = 350\text{MPa}$ ) (a) 欠时效态; (b) 峰时效态; (c) 过时效态

Fig. 11 SEM micrographs showing middle growth area of 3J21 alloy at different aged states ( $\sigma = 350\text{MPa}$ )

(a) under-aged state; (b) peak-aged state; (c) over-aged state

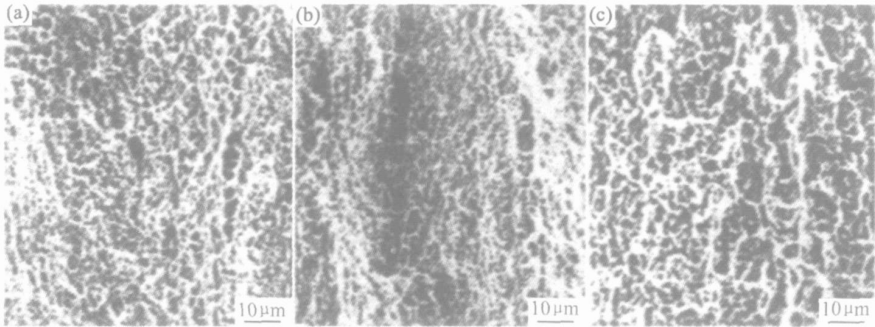


图 12 不同时效态 3J21 合金瞬断区 SEM 照片 ( $\sigma = 350\text{MPa}$ ) (a) 欠时效态; (b) 峰时效态; (c) 过时效态

Fig. 12 SEM micrographs showing fast fractured area of 3J21 alloy at different aged states ( $\sigma = 350\text{MPa}$ )

(a) under-aged state; (b) peak-aged state; (c) over-aged state

3 结论

- (1) 欠时效态 3J21 合金疲劳裂纹萌生寿命最长, 过时效态的疲劳裂纹萌生寿命最短, 峰时效态的疲劳裂纹萌生寿命介于两者之间。
- (2) 欠时效态 3J21 合金疲劳裂纹扩展速率最小, 表现出最大的疲劳裂纹扩展抗力。过时效态的疲劳裂纹扩展速率最大, 裂纹扩展抗力最低, 峰时效态的疲劳裂纹扩展速率介于两者之间。
- (3) 欠时效态 3J21 合金疲劳裂纹呈穿晶扩展, 扩展途径比较曲折; 峰时效态中出现沿晶扩展迹象, 扩展途径相对平直; 过时效态中沿晶扩展的比例增加, 扩展途径更为平直。

(4) 不同时效态 3J21 合金的疲劳断口均呈现三个区: 低速扩展区、中速扩展区和瞬断区。载荷较高时, 欠时效态 3J21 合金的低速扩展区最大, 疲劳寿命最高, 过时效态合金的低速扩展区最小, 疲劳寿命最低; 峰时效态合金介于两者之间。

参考文献

[ 1 ] 束德林. 金属力学性能[ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[ 2 ] 潘肃, 李成功. 金属功能材料在航天航空工业方面的应用[ J ]. 金属功能材料, 1995, ( 1 ): 1- 4.

[ 3 ] 诺伊曼. 材料和材料的未来[ M ]. 北京: 科学普及出版社, 1986.

[ 4 ] 何开元. 精密合金材料学[ M ]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.

[ 5 ] 郭树铮, 王茂廷, 周永源. 缺口疲劳裂纹扩展规律及疲劳寿命预测[ J ]. 辽宁工学院学报, 1998, ( 3 ): 64- 66.

[ 6 ] 庞芳仙. 弹性合金的热处理[ J ]. 金属热处理, 1996, ( 6 ): 42- 44.

( 下转第 64 页 )

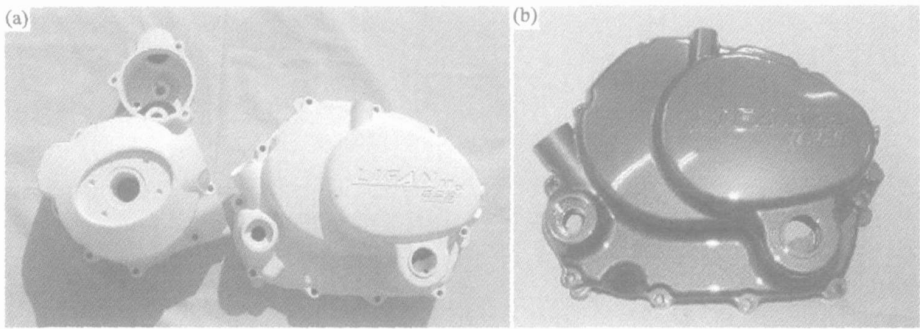


图 7 微弧氧化以及氧化并涂漆后的摩托车零件照片 (a)微弧氧化后的零件; (b)微弧氧化并涂漆后的零件

Fig.7 Pictures of micro-arc anodized and anodized, then painted motor parts  
(a) micro-arc anodized parts; (b) anodized and then painted part

5 结论

用自行开发的微弧氧化工艺,氧化了汽车轮毂和其它一些工件,氧化后的样品为白色,外观漂亮,氧化膜致密,具有良好的耐蚀性。

参考文献

[1] 陈振华,严红革,陈吉华,等. 镁合金[M]. 北京:化学工业出版社,2004.  
[2] FROES F H, ELIEZER D, AGHION E. The science, technology, and applications of magnesium [J]. JOM, 1998: 5(9): 30-34.  
[3] 胡庆福. 镁化合物生产与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.  
[4] FU NATANI K. Emerging technology in surface modification of light metals [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 133-134: 264-272.  
[5] 邱庆荣,孙宝德,周尧和. 铝合金铸件在汽车上的应用[J]. 铸造, 1998, (1): 46-49.  
[6] 曾荣昌,柯伟,徐永波,等. Mg 合金的最新发展及应用前景[J]. 金属学报, 2001, 37(7): 673-685.  
[7] LUO A, RENAUD J, NAKATSUGAWA I, et al. Magnesium

casting for automotive applications [J]. JOM, 1995, 47(7): 28-31.  
[8] BROWN R E. 53rd annual world magnesium conference [J]. Light Metal Age, 1996, 8: 50-60.  
[9] 刘正,张奎,曾小勤,等. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.  
[10] 蒋百灵,吴国建,张淑芬,等. 镁合金氧化陶瓷层生长过程及微观结构研究[J]. 材料热处理学报,2002, 23(1): 5-7.  
[11] 张荣发,单大勇,韩恩厚. 一种耐蚀性镁合金微弧氧化电解液及其微弧氧化方法[P]. 中国专利: 200410100410. X, 2004-12-20.  
[12] 张荣发. 镁合金阳极氧化与电偶腐蚀的研究[D]. 沈阳:中国科学院金属研究所,2005. 52-79.  
[13] B117-95, Standard Practice for Operating Salt Spray (fog) Apparatus[S]. Pennsylvania: ASTM, 1996.  
[14] B537-70, Standard Practice for Rating of Electroplated Panels Subjected to Atmospheric Exposure[S]. Pennsylvania: ASTM, 1997.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574086)  
收稿日期: 2006-01-16; 修订日期: 2006-04-06  
作者简介: 张荣发(1965-),男,博士,现从事镁合金腐蚀与防护的研究,联系地址: 中国科学院金属研究所,单大勇转(110016)。

(上接第 30 页)

[7] ASTM E647-93, Standard Test Method for Constant Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rates above  $10^{-8}$  m/cycle[S].  
[8] GB6398-86,金属材料疲劳裂纹扩展速率实验方法[S].  
[9] 黎秀秀,吴静贞. 16Ni10Co14Cr2Mo 钢疲劳裂纹扩展特性[J]. 物理测试, 1995, (2): 32-37.  
[10] 焦成革,侯淑娥,李玉春. 7075T73510 合金断裂韧性和疲劳裂纹

扩展[J]. 材料研究学报, 1994, (8): 35-39.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(G1999065005)  
收稿日期: 2006-10-20; 修订日期: 2006-12-24  
作者简介: 金晓鸥(1962-),女,硕士,副教授,主要从事材料可靠性模拟研究,联系地址: 哈尔滨市学府路 209 号黑龙江大学建筑工程学院(150086)。