

海洋大气环境对钛合金 TA15 断裂韧度的影响

舒畅¹, 张帷¹, 苏艳¹, 刘彬², 皮韬略³

(1. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039;

2. 中国人民解放军驻 296 厂军事代表室, 重庆 400054; 3. 上海电力学院, 上海 200090)

[摘要] 对 TA15 钛合金开展海洋平台户外大气暴露试验和海水飞溅试验,研究了海洋大气环境对钛合金断裂韧度的影响。结果表明:TA15 钛合金的断裂韧度随海洋环境试验时间的延长,呈下降趋势;海水飞溅试验对材料断裂韧度的影响较大,经 4 年试验后,TA15 的断裂韧度下降了 10.4%,断口形貌显示材料的脆性增加。同时通过 XPS 分析,探讨了合金表面氧化层扩散产生的近表面效应。

[关键词] TA15 钛合金; 断裂韧度; 海洋平台户外大气暴露; 海水飞溅

[中图分类号] TG111.91

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2012)06-0054-04

Effect of Marine Atmosphere Environment on Fracture Toughness for TA15 Titanium Alloy

SHU Chang¹, ZHANG Wei¹, SU Yan¹, LIU Bin², PI Tao-lve³

(1. No. 59 Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;

2. PLA Military Representatives of 296 Factory, Chongqing 400054, China;

3. Shanghai University of Electric Power, ShangHai 200090, China)

[Abstract] The effect of marine environment on fracture toughness for TA15 titanium alloy was studied by marine platform outdoor exposure test and marine splashing test. The results show that the fracture toughness for TA15 titanium alloy decreases with increasing marine atmosphere environment test time. The effect of marine splashing test for fracture toughness is bigger than marine platform outdoor exposure test. The fracture toughness of TA15 decreases 10.4% after 4 year's marine splashing test, the embrittlement increases by fracture morphology analysis. The near surface effects were discussed by XPS, most likely to be the diffusion of oxygen into the alloy.

[Key words] TA15 titanium alloy; fracture toughness; marine platform outdoor exposure; marine splashing

平面应变断裂韧度是表征材料抵抗裂纹失稳扩展能力的常数,是对材料进行损伤容限设计时用到的重要力学性能指标。随着我国航空装备的快速发展,新一代航空装备对环境适应性提出了更高的要求,设计方急需掌握材料断裂力学性能在典型自然环境条件下的变化规律,以便在设计产品时充分考虑环境的影响,以减少各类失效事件的发生。

钛合金 TA15 具有中等室温强度和高温强度,及良好的耐蚀性、热稳定性和焊接性能,在航天航空领域得到了广泛的应用。目前,对钛合金 TA15 平面应变断裂韧度的研究主要集中在微观组织对断裂韧度的影响方面^[1-2]。S. L. Draper 等人^[3]研究了不同氧成分对 Gamma MET PX 力学性能的影响,但极少有人研究实

际的应用环境对钛合金断裂韧度是否有影响。文中对钛合金 TA15 开展了自然环境试验,对不同取样周期的试样进行平面应变断裂韧度测试,研究海洋大气环境对钛合金断裂韧度的影响,以掌握钛合金 TA15 的力学性能在使用环境下的变化规律,希望为产品结构设计与选材提供参考。

1 试验

1.1 试样

试验材料选择厚 55 mm 的 TA15 厚板,其名义成分为 Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr,化学成分见表 1,原始显微组织表现为片状组织,常规力学性能见表 2。

[收稿日期] 2012-06-20; **[修回日期]** 2012-07-18

[基金项目] 国防基础科研项目计划资助项目(A1020110014)

[作者简介] 舒畅(1982—),女,重庆人,硕士,工程师,主要从事装备环境适应性研究。

表 1 TA15 化学成分

Tab. 1 Chemical composition of TA15

合金元素的质量分数/%						
Ti	Al	Mo	V	Zr		
余量	5.5 ~ 7.1	0.5 ~ 2.0	0.8 ~ 2.5	1.5 ~ 2.5		
杂质的质量分数/%						
C	Fe	Si	O	N	H	其它
≤0.08	≤0.25	≤0.15	≤0.15	≤0.05	≤0.015	≤0.30

表 2 TA15 的常规力学性能

Tal. 2 The mechanical properties of TA15

抗拉强度/ MPa	断后伸长率/ %	屈服强度/ MPa	弹性模量/ MPa
972	16.7	922	1.25×10 ⁵

参照 GB/T 4161—1984《金属材料平面应变断裂
韧度 K_{IC} 试验方法》,将厚板加工成标准紧凑拉伸试样
(也称紧凑 C(T) 试样),裂纹平面的法线方向为 T 向
(宽度方向),预期的裂纹扩展方向为 L 向(长度方
向),厚度 B 为 25 mm,宽度 W 为 50 mm。

1.2 自然环境试验

在海南万宁开展自然环境试验,试验方式为海洋
平台户外大气暴露和海水飞溅。海洋平台户外大气暴

$$\left\{ \begin{aligned} K_q &= [P_q / (BW^{\frac{1}{2}})] f(a/W) \\ f(a/W) &= (2+a/W) (0.886+4.64a/W-13.32a^2/W^2+14.72a^3/W^3-5.6a^4/W^4) \times \frac{1}{(1-a/W)^{3/2}} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

当试验结果满足以下有效性判据时, K_q 值为有效
 K_{IC} 值。

$$P_{max}/P_q \leq 1.1 \quad (2)$$

$$B \geq 2.5 (K_q/\sigma_Y)^2 \quad (3)$$

$$a \geq 2.5 (K_q/\sigma_Y)^2 \quad (4)$$

$$W-a \geq 2.5 (K_q/\sigma_Y)^2 \quad (5)$$

采用 quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM) 观察断
口形貌。

2 结果与分析

2.1 TA15 在海洋大气环境下的常规力学性能

在海洋大气环境下,TA15 的抗拉强度及断后伸长
率随试验时间的变化曲线如图 1 所示。

从图 1 可以看出,海洋大气环境对 TA15 的力学
性能有一定影响,特别是对材料塑性的影响较大。经
过 4 年的海洋大气环境试验,TA15 的抗拉强度略微上
升,而断后伸长率则表现为明显的下降趋势,说明材料
的塑性降低。两种试验方式相比,海水飞溅对材料力

露参照 GB/T 14165—2008《金属和合金 大气腐蚀试
验 现场试验的一般要求》的相关规定执行,海洋平台
暴露场入海 25 m,试样架与水平面呈 45°角,将试样放
置于试样架上,预期的裂纹扩展方向向下。海水飞溅
试验是将试样垂直悬挂于海水飞溅区的试样架上,预
期的裂纹扩展方向向下。试验时间为 2007 年 8 月至
2011 至 8 月,取样周期为 2 年和 4 年。

1.3 断裂试验

断裂试验所用设备为 MTS 809 电液伺服试验机,
其负荷量程为±25 kN 及±250 kN,采用 TestStarII 控
制系统,COD 引伸计型号为 MTS632. 02F-20(标距为 5
mm,用于测量常温下 C(T) 试样加载线一侧端面的裂
纹张开位移)。

断裂试验参考 GB/T 4161—2007《金属材料平面
应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法》进行。预制疲劳裂纹时
采用载荷控制,初始加载载荷为 18 kN,最后阶段加载
载荷为 16 kN,频率为 30 Hz。然后经过二次疲劳拉断
试样,在 C(T) 试样的拉伸过程中采集 P -COD 曲线实
验数据,利用工具显微镜测量沿厚度方向 $B/4$, $B/2$,
 $3B/4$ 处的裂纹长度,计算其平均值作为裂纹长度 a 。
从 P -COD 曲线中确定载荷 P_q 值,并由式(1)计算 K_q
值。

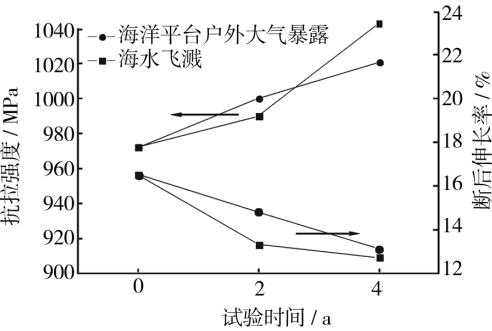


图 1 TA15 力学性能随试验时间的变化
Fig. 1 The changing curve of mechanical properties
of TA15 with the test time

学性能的影响相对较大,试验 4 年后,TA15 的抗拉强
度上升了 7.3%,断后伸长率下降了 23.0%。

2.2 TA15 在海洋大气环境下的断裂韧度

对原始样、海洋平台户外大气暴露 2 年和 4 年试
样、海水飞溅 2 年和 4 年试样进行断裂试验,由公式
(1) 计算得到相应的试验结果,根据公式(2)~(4) 检
验试验结果的有效性,统计结果见表 3。

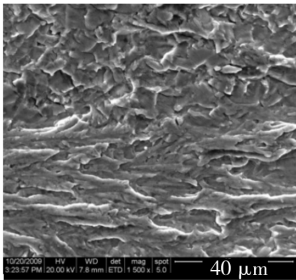
表 3 TA15 断裂试验结果
Tab.3 The test result of fracture toughness of TA15

试样	$K_q/(MPa \cdot m^{1/2})$		K_{IC} $/(MPa \cdot m^{1/2})$	$2.5(K_q/\sigma_y)^2$ mm	备注
	范围	平均值			
原始样	64.5 ~ 72.1	67.2	67.2	11.9 ~ 14.9	全部试样有效
海洋平台暴露 2 年	64.0 ~ 76.5	69.1	69.1	10.7 ~ 15.3	全部试样有效
海水飞溅 2 年	57.7 ~ 63.5	62.4	62.4	8.8 ~ 10.7	全部试样有效
海洋平台暴露 4 年	58.0 ~ 73.8	63.4	61.7	8.7 ~ 14.2	2 件试样无效 ($P_{max}/P_q > 1.1$)
海水飞溅 4 年	55.8 ~ 64.7	60.7	60.2	8.0 ~ 10.7	1 件试样无效 ($P_{max}/P_q > 1.1$)

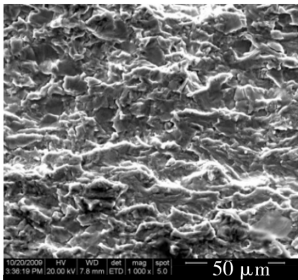
从表 3 可以看出,经 4 年海洋大气环境试验后,部分试样开展断裂试验时,其载荷比 $P_{max}/P_q > 1.1$,试验数据无效, K_{IC} 均值为剔除无效数据后计算的值。数据表明,海洋大气环境对钛合金的断裂韧度有一定影响。TA15 断裂韧度随试验时间的延长呈下降趋势,但下降幅度较小。两种试验方式相比,海水飞溅对材料断裂韧度的影响更大,试验 4 年后,TA15 断裂韧度平均值为 $60.2 MPa \cdot m^{1/2}$,相比原始值下降了 10.4%,最小值为 $55.8 MPa \cdot m^{1/2}$,相比原始最小值下降了 13.5%。

2.3 断口形貌分析

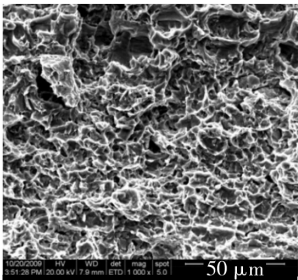
图 2 为原始 TA15 试样断口的微观形貌,试样的断口由预制疲劳裂纹起始区、裂纹扩展区和瞬断区三部分组成。预制疲劳裂纹区的断口为解理断口,如图 2a 所示;疲劳裂纹扩展区变形严重,撕裂棱较为明显,且出现少量大而浅的韧窝,其断口为韧性较高的准解理断口,如图 2b 所示。从裂纹扩展区到裂纹终止,准解理逐渐减少,韧窝逐渐增多,到瞬断区(图 2c)全为小而深的韧窝,断口为韧窝状塑性断口。这表明钛合金 TA15 材料的断裂为韧性断裂。



a 预制疲劳裂纹起始区



b 疲劳裂纹扩展区

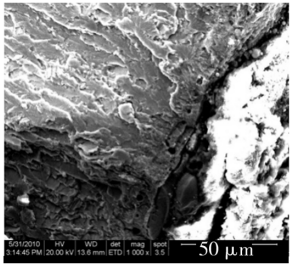


c 瞬断区

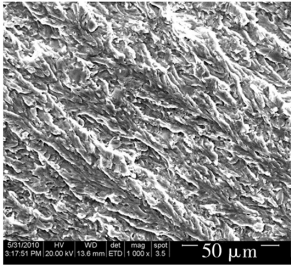
图 2 原始 TA15 试样断口形貌

Fig.2 The fracture morphology of original TA15 sample

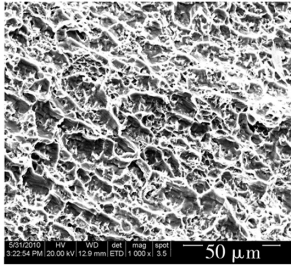
图 3 为海水飞溅 2 年 TA15 试样(其 $K_{IC} = 57.7 MPa \cdot m^{1/2}$)的断口微观形貌,与图 2 相比可以发现,该试样的断口形貌和原始样基本一致,但也存在差异:该试样在裂纹源处有腐蚀现象,断口特征表现为撕裂的细小韧窝;疲劳裂纹扩展区的撕裂棱更为突出。腐蚀产物的存在破坏了合金的连续性,降低了局部塑性变形能力,削弱了材料抵抗裂纹扩展的阻力,对合金的 K_{IC} 值有不利影响。



a 预制疲劳裂纹起始区



b 疲劳裂纹扩展区

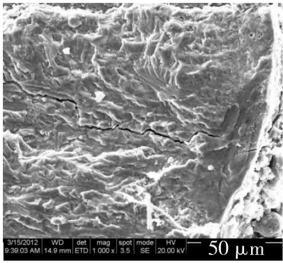


c 瞬断区

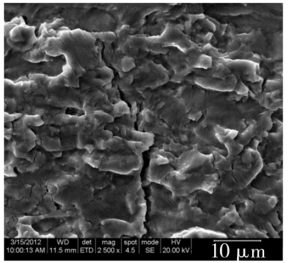
图 3 海水飞溅 2 年 TA15 试样断口形貌

Fig.3 The fracture morphology of TA15 sample exposed on marine splashing zone for 2 years

图 4、图 5 分别为海水飞溅 4 年试样(其 $K_{IC} = 55.8$



a 预制疲劳裂纹起始区



b 疲劳裂纹扩展区

图 4 海水飞溅 4 年 TA15 试样断口形貌

Fig.4 The fracture morphology of TA15 sample exposed on marine splashing zone for 4 years

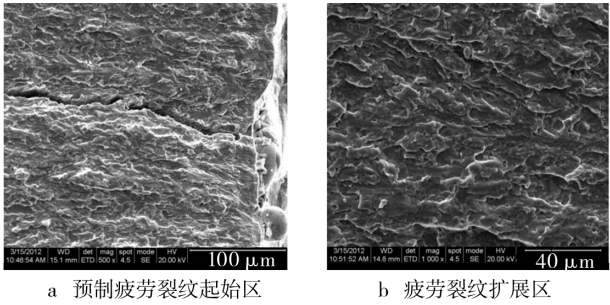


图 5 海洋平台户外大气暴露 4 年 TA15 试样断口形貌
Fig. 5 The fracture morphology of TA15 sample exposed on marine platform outdoor for 4 years

MPa · m^{1/2}) 和海洋平台户外大气暴露 4 年试样的断口微观形貌。从图 4 和图 5 可以看出,预制疲劳裂纹起始区和疲劳裂纹扩展区的断口形貌仍表现为解理断口和准解理断口,在预制疲劳裂纹起始区均发现非裂纹扩展方向的裂纹,且海水飞溅 4 年试样的疲劳裂纹扩展区已出现二次裂纹,说明材料的脆性明显增加。

2.4 XPS 分析

合金成分、基体相结构、显微组织等是影响材料平面断裂韧度 K_{IC} 值的主要因素。有报道指出^[3],当合金暴露在特定的环境中,氧由表及里扩散会引起一种近表面效应,从而导致材料表面变脆,断裂韧度下降。为了研究这种近表面效应,文中采用 X 射线光电子能谱仪刻蚀样品,检测合金表面是否存在氧化及氧的扩散情况,图 6 为原始样与海水飞溅 4 年试样的检测结果。X 射线光电子能谱仪刻蚀钛合金的速度为 3 ~ 5 nm/min,根据图 6 计算,4 年海水飞溅试验后,钛合金表面的氧化层在 350 nm 以上,相比原始样增厚了 2 倍多,说明 TA15 表面发生了氧化,表面间隙元素氧的含量增加,产生了近表面效应,表面变脆。这与钛合金强度略增,塑性下降,断裂韧性下降的试验结果是一致的。

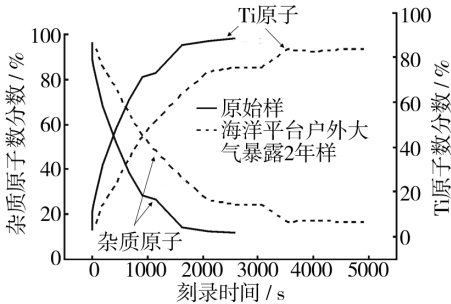


图 6 X 射线光电子能谱仪刻蚀检测结果
Fig. 6 The result of TA15 etching by XPS

3 结论

1) 海洋大气环境对 TA15 钛合金的力学性能有一定影响。随着试验时间的延长,其抗拉强度略增,塑性

下降,断裂韧度下降。与海洋平台户外大气暴露相比,海水飞溅对 TA15 钛合金断裂韧度的影响更大,海水飞溅 4 年后,TA15 的断裂韧度为 60.2 MPa · m^{1/2},相比原始值下降了 10.4%。

2) 断口形貌显示,TA15 钛合金的断裂为韧性断裂,海水飞溅试验 2 年后,裂纹源出现腐蚀现象;试验 4 年后,疲劳裂纹起始区出现非裂纹扩展方向的裂纹,疲劳裂纹扩展区出现二次裂纹,材料的脆性增加。

3) XPS 分析表明,TA15 钛合金表面氧化层扩散,产生了近表面效应,引起材料变脆、塑性降低。

[参 考 文 献]

[1] 张庆玲,李兴元. TA15 钛合金两类组织对疲劳性能和断裂韧度的影响[J]. 材料工程,2007(7):3—5.
[2] 王耀宁,马红周,郭志军,等. BT-20 钛合金厚板组织形貌对应性能特征分析[J]. 热加工工艺,2007,36(18):27—28,31.
[3] DRAPER S L, LERCH B A, LOCCI I E, et al. Effect of Exposure on the Mechanical Properties of Gamma MET PX[J]. Intermetallics, 2005, 13: 1014—1019.