文章编号: 1004-0609(2013)S1-s0462-05

# 热等静压对 TC4 钛合金薄壁铸件疲劳裂纹扩展特性的影响

冯 新1,彭 霜1,马英杰1,雷家峰1,吴鑫华2,崔玉友1,杨 锐1

(1. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016;

2. Department of Materials Engineering, Monash University, Melbourne 3800, Australia)

**摘 要:**对热等静压处理前后的 TC4 薄壁铸件进行疲劳裂纹扩展速率测试。利用光学显微镜和扫描电镜观察材料的显微组织、疲劳断口形貌和疲劳裂纹扩展路径。结果表明:经热等静压后,疲劳裂纹扩展速率增大,主要是因 为α板条和集束尺寸的增加减少了集束界面对裂纹的阻碍作用。

关键词: TC4; 热等静压; 裂纹扩展速率; 晶体取向

中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

# Influences of hot isostatic pressing on fatigue crack propagation of TC4 titanium alloy thin wall casting

FENG Xin<sup>1</sup>, PENG shuang<sup>1</sup>, MA Ying-jie<sup>1</sup>, LEI Jia-feng<sup>1</sup>, WU Xin-hua<sup>2</sup>, CUI Yu-you<sup>1</sup>, YANG Rui<sup>1</sup>

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Department of Materials Engineering Monash University, Melbourne 3800, Australia)

Abstract: Fatigue crack growth rates testings were carried out on as-cast TC4 thin wall structure component before and after hot isostatic pressing (HIP). The microstructure, fatigue fracture fractography and crack paths were observed by means of optical microscopy and scanning electron microscopy. The results show that fatigue crack growth rate increases after HIPping, which is mainly because the resistance of colony interfaces to crack growth is reduced as a result of the increase of the size of  $\alpha$  platelets and colonies.

Key words: TC4; hot isostatic processing; fatigue crack growth rate; crystal orientation

钛合金具有高比强度、高比刚度及高韧性等优点, 因此大量应用到飞机机体、结构体和发动机零件等领 域。TC4 合金是目前应用最广泛的钛合金之一。由于 钛合金材料成本高,且通过机械加工、锻造和焊接等 方法加工比较困难,在一定程度上限制其进一步推广 应用。采用精密铸造技术则可以提高钛合金材料的利 用率,降低成本<sup>[1]</sup>。目前,大型、薄壁、整体精密钛 合金铸件制造已成为航空用钛合金熔模精密铸造技术 的发展趋势。但是,钛合金活性高,铸造工艺复杂, 影响因素多,因而铸件内部容易产生疏松、气孔等缺 陷,这些缺陷会影响铸件性能,成为失效的隐患。生 产中常采用热等静压技术消除这些缺陷,确保铸件质 量<sup>[2]</sup>。

目前对钛合金铸件的研究主要集中于铸造工艺和 缺陷控制,而对钛合金薄壁铸件的疲劳性能研究较少。 本研究选取薄壁机匣 TC4 钛合金铸件为研究对象,对 比 TC4 钛合金在铸态和热等静压态的显微组织特征, 研究两种状态下合金的疲劳裂纹扩展行为。

### 1 实验

#### 1.1 实验材料

实验材料取自熔模铸造 TC4 薄壁铸件, 其尺寸为

收稿日期: 2013-07-28; 修订日期: 2013-10-10

基金项目: 欧盟宇航局资助项目, 欧盟委员会--中国共同资助项目(FP7-AAT-2010-RTD-CHINA)

通信作者: 雷家峰, 研究员, 博士; 电话: 024-23971958; E-mail: jflei@imr.ac.cn

*d* 60 cm×77 cm,如图 1 所示。分别对热等静压前后的 铸件进行疲劳裂纹扩展实验。在图 1 所示薄壁上的 *A* 区切取部分试样后进行热等静压处理,加热温度为 920 ℃,氩气压力为 150 MPa,保温保压时间为 2 h。



图1 TC4 钛合金薄壁机匣铸件简图

**Fig. 1** Schematic diagram of thin-wall engine casing of TC4 casting

#### 表1 铸造 TC4 合金热等静压前后的力学性能

 Table 1
 Mechanical properties of TC4 castings before and after HIPping

Casting	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{ m b}/{ m MPa}$	A/%
ZTC4	744	853	8
HZTC4	745	872	9

#### 1.2 实验方法

依据 GB/T 6398-2000 金属材料疲劳裂纹扩展速 率试验方法,在 MTS 疲劳试验机上进行试验,疲劳 裂纹扩展实验采用 W=30 mm、B=3 mm 的紧凑拉伸试 样(如图 2 所示),载荷频率 f=5 Hz,应力比 R=0.1。而



图 2 CT 试样尺寸 Fig. 2 Dimensions of CT specimen (Unit: mm)

后利用 AXiovert 200-MAT 光学显微镜观察裂纹扩展 路径,利用 Nova NanoSEM430 扫描电镜和 Oxford channel five 软件对裂纹边部进行背散射电子衍射测 试分析,并利用岛津 SSX-55 扫描电镜观察断口微观 形貌。

## 2 结果与分析

#### 2.1 热等静压对疲劳裂纹扩展速率的影响

图 3 所示为 ZTC4 和 HZTC4 的显微组织,可以看 出两种铸件均为魏氏组织,都由片状 α+片间 β+晶界 α 组成。由于铸造为薄壁机匣,铸态组织冷却速度快,α 片层和集束均较小。经热等静压后,即在高温长时间 保温后,片状α相和集束宽化并长大,合金组织趋于 均匀稳定。



图 3 铸造 TC4 钛合金热等静压前后的微观组织

Fig. 3 Optical microstructures of TC4 alloy: (a) As-cast; (b) Post-HIPped

表1所列为TC4热等静压前后的力学性能,可以 看出,经热等静压后,TC4的屈服强度、抗拉强度和 塑性均略有提高。这是由于热等静压后组织宽化,铸 造残余应力得到不同程度的消除。

对两种组织进行疲劳裂纹扩展速率测试,发现两 种组织获得的疲劳裂纹扩展曲线趋势大体一致(见 图 4)。TC4 的裂纹扩展速率略高于 ZTC4, 主要是因 为随着 α 片层和集束尺寸的增大,疲劳裂纹扩展的有 效滑移距离增大,路径曲折程度降低,减少了扩展所 需的能量。当裂纹长度较短时,两者差别略大,说明 短裂纹受周围组织影响较大。另外,从疲劳裂纹扩展 速率曲线可以看出,数据点较为分散,这是由魏氏组 织裂纹扩展路径较为曲折所造成的。



图 4 TC4 疲劳裂纹扩展速率曲线

Fig. 4 Fatigue crack growth rate curves of TC4 alloy

#### 2.2 裂纹扩展路径分析

通过观察疲劳裂纹扩展路径(见图 5)可以发现,疲 劳裂纹多是沿  $\alpha/\beta$  界面开裂或与片层呈一定角度扩 展。这是由于疲劳裂纹扩展对合金组织结构特别敏感, 裂纹根据周围的组织特征选择在晶界或集束界面等消 耗能量最低的区域扩展<sup>[3]</sup>,或选择最易于扩展的位错 滑移方向扩展。裂纹沿  $\alpha/\beta$  界面扩展,主要是因为两 相界面处的结合力低于  $\alpha$  片层内部,导致界面成为裂 纹扩展薄弱区域<sup>[4]</sup>。裂纹与片层方向呈一定角度的方 向扩展,与应力和片层方向的夹角和裂纹尖端组织晶 体滑移系有关。图 6 所示为疲劳裂纹扩展路径一侧的 EBSD 分析结果,将部分  $\alpha$  集束的 3D 晶体取向图及 相应集束编号标注。从图中可以看出,图 6(a)中的 *A* 集束和图 6(b)中的 *D*、*G*集束主要沿平行柱面滑移开 裂,而图 6(b)中 *E*集束主要沿基面滑移方向开裂。

BANTOUNAS 等<sup>[5]</sup>指出,疲劳加载过程中,单个 集束中滑移系的开动主要取决于两个因素: Schmid 因 子和开动滑移系所需要的临界剪切应力。对于密排六 方结构, <a>基面滑移系、<a>柱面滑移系和<c+a>锥 面滑移系所需的临界剪切应力比为 1:1:2.64。所以, 基面和柱面滑移系易于开动。在同一集束中,裂纹既 可以沿基面也可以沿柱面滑移系方向扩展,如图 6(a) 中的 *B* 集束和图 6(b)中的 *G* 集束。在图 6(a)的 *B* 集束 中,裂纹沿平行柱面扩展一段距离后,转向沿平行基 面扩展。可见滑移系对裂纹扩展方向有很大的影响。 而图 6(b)中 F 集束裂纹不平行平滑移系方向,可能是 α/β 界面强度低,或者是两侧的 G 集束先于 F 集束沿 滑移系开裂,导致裂纹没有选择沿滑移系方向扩展。 当应力方向不利于滑移系开动时,或两个晶粒内裂纹 面间角过大时<sup>[6]</sup>,裂纹也会倾向于沿 α/β 界面或晶界 扩展。

由于同一β晶粒内不同集束的晶体学取向和滑移 系不同,所以疲劳裂纹从一个集束扩展至下一个相邻 集束时,滑移系的改变会导致裂纹扩展方向的改变, 路径变得曲折。与HZTC4相比,ZTC4的α集束尺寸 小,相同体积内集束数目多,裂纹扩展方向改变的次 数增加,路径更为曲折,且疲劳断面粗糙度大,裂纹 闭合效应明显,从而裂纹扩展速率降低。

#### 2.3 断口分析

通过观察疲劳裂纹扩展断面可以看出,当裂纹从 一个集束扩展至下一个集束时,裂纹会发生偏折,如 图 7(a)所示。即使裂纹沿同一集束中 α/β 界面扩展时, 裂纹方向也有可能改变,如图 7(b)所示。由于疲劳加 载产生的位错易于在集束界面处塞积,产生应力集中 引起开裂,这在一定程度上缓解裂纹尖端的应力集中,



图 5 TC4 疲劳裂纹微观路径

**Fig. 5** Crack path morphologies of as-cast (a) and post-HIPped (b) TC4 castings



#### 图 6 TC4 疲劳裂纹扩展路径的 EBSD 分析结果

Fig. 6 EBSD analysis of crack paths in as-cast (a) and post-HIPped (b) TC4 castings



图 7 TC4 合金疲劳断口的 SEM 像 Fig. 7 SEM images of fatigue fracture surfaces of as-cast (a) and post-HIPped (b) TC4 alloy

降低裂纹扩展速率。同时,疲劳裂纹扩展将会在界面 处暂停,且需要多次循环即损伤积累来开启在下一个 集束的裂纹扩展<sup>[7]</sup>,疲劳寿命增加。由于 ZTC4 集束 界面多,因此,裂纹扩展至界面处停顿的次数和在界 面处产生二次裂纹的数目增加,导致裂纹扩展速率降 低。

### 3 结论

 由于裂纹主要沿平行滑移系方向扩展,不同 集束内滑移系不同,导致裂纹在各集束内的扩展方 向发生改变。同时,集束界面对裂纹扩展具有阻碍作
 用。当裂纹扩展至集束界面时,位错会在集束界面处
 塞积引发应力集中,产生二次裂纹,这将有效减缓裂
 纹尖端的应力集中,降低裂纹扩展速率。

 TC4 合金经热等静压后, α 片层和集束尺寸 长大,在相同体积内集束数目减少,裂纹偏析程度降 低,界面的阻碍作用减少,裂纹扩展速率提高。

#### REFERENCES

[1] 肖树龙,陈玉勇,朱洪艳,田 竟,吴宝昌.大型复杂薄壁钛
 合金铸件熔模精密铸造研究现状及发展[J].稀有金属材料与
 工程,2006,35(5):678-681.
 XIAO Shu-long, CHEN Yu-yong, ZHU Hong-yan, TIAN Jing,

WU Bao-chang. Recent advances on precision casting of large thin wall complex castings of titanium alloys[J]. Rare Metal Materials And Engineering, 2006, 35(5): 678–681.

- [2] 张 满,南 海,黄 东,曹国平. 钛合金铸件的热等静压和 氢处理工艺研究[J]. 中国钛造装备与技术, 2002, 5:1-3. ZHANG Man, NAN Hai, HUANG Dong, CAO Guo-ping. Study of heat isostatic pressing and thermohydrogen treatment of titanium alloy castings[J]. China Foundry Machinery and Technology, 2002(5): 1-3.
- [3] SANSOZ F, GHONEM H. Effects of loading frequency on fatigue crack growth mechanisms in  $\alpha/\beta$  Ti microstructure with large colony size[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 356(1/2): 81-92
- [4] 徐 峰. Zr 含量对 Ti-1100 合金 650 °C 拉伸变形和断裂机制的 影响[D]. 沈阳: 中国科学院, 金属研究所, 2008.
   XU Feng. The effect of Zr addition on 650 °C deformation and fracture mechanisms in Ti-1100 alloy[D]. Shenyang: Institute of

Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 2008.

- [5] BANTOUNAS I, DYE D, LINDLEY T C. The effect of grain orientation on fracture morphology during high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V[J]. Acta Materialia, 2009, 57(12): 3584–3595.
- [6] 雷家峰, 刘羽寅, 杨 锐, 李 东. 一种亚稳 β 钛合金中疲劳 短裂纹穿晶扩展晶体学特征的 EBSD 研究[J]. 金属学报, 2002, 38(增刊): 272–276.
  LEI Jia-feng, LIU Yu-yin, YANG Rui, LI Dong. EBSD study on the crystallographic characteristics of fatigue crack propagation
  - through a grain boundary in a metastable Beta titanium alloy[J]. ACTA Metallurgica Sinica, 2002, 38(s): 272–276.
- [7] EYLON D, BANIA P J. Fatigue cracking characteristics of beta-annealed large colony Ti-11 alloy[J]. Metallurgical Transactions A, 1978, 9: 1273–1279.

(编辑 方京华)