

TA 15 钛合金的高周疲劳性能和断裂特征

High Cycle Fatigue Properties and Fracture Features of TA15 Titanium Alloy

曹京霞, 黄旭, 李臻熙 (北京航空材料研究院, 北京 100095)
CAO Jing-xia, HUANG Xu, LI Zhen-xi
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了双态组织的 TA 15 钛合金的高周疲劳性能和疲劳断裂特征, 结果表明, β 转变组织中次生 α 相的数量和形态对疲劳性能有显著影响, 次生相 α 相的球化显著降低了合金抗裂纹扩展的能力, 而大量的片状次生 α 相则通过造成疲劳裂纹的分枝有效地降低了疲劳裂纹的扩展速度, 提高了疲劳极限。
关键词: 钛合金; 组织; 疲劳; 断裂
中图分类号: TG 146.23; TG 113.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2004) 03-0028-03

Abstract: The high cycle fatigue properties and fracture features of TA15 titanium alloy were investigated. The results show that there is great influence of the morphology and amount of the secondary α phase in the transformed β microstructure on the fatigue properties. The spherical secondary α phases in the transformed β microstructure decrease the crack propagation resistance, while the great deal of plate-like secondary α phases, which lead to crack deflection, effectively decrease the crack propagating rate and improve the fatigue strength.
Key words: titanium alloy; microstructure; fatigue; fracture

TA 15 钛合金是高 Al 当量的近 α 型钛合金^[1], 具有中等的室温和高温强度, 良好的热稳定性和焊接性能, 是一种飞机和发动机结构用重要的钛合金材料, 可在 450 ~ 500 温度范围长期使用。材料的疲劳性能往往是直接影响其使用寿命的重要因素, 在钛合金的微观组织、疲劳性能和断裂行为的研究方面有很多报道, 但大多文献是关注于单相区变形得到的片层组织与两相区变形得到的双态组织的疲劳变形特征的对比^[2-5], 而本工作研究了 TA 15 钛合金两相区变形组织的高周疲劳性能和疲劳断裂特征。

1 试验材料和方法

试验材料为两个 TA 15 钛合金环锻件, 锻件在 $\alpha + \beta$ 两相区轧制, 在 800 ~ 820 退火并空冷。锻件的成分为 6.72Al, 1.77Mo, 2.32V, 2.19Zr (质量分数 / %)。锻件的室温拉伸和断裂韧性性能见表 1 (锻件的厚度决定了试样的厚度不能满足平面应变的条件, 故只能得到断裂韧性 K_{Ic} 值), 锻件 1 的拉伸断裂强度和屈服强度略高于锻件 2。沿锻件弦向切取试样毛坯, 加工成光滑高周疲劳试样。疲劳试验在室温、大气中进行, 试验波形为正弦波, 频率为 125Hz, 应力比为 0.1。用 JSM-5600LV 扫描电镜对锻件的微观组织和疲劳断口进行了观察分析。

表 1 锻件的室温拉伸和断裂韧性性能
Table 1 Tensile and K_{Ic} properties at room temperature of the forgings

Forging	Tensile at room temperature				Toughness
	σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ_5 / %	ψ / %	K_{Ic} / MPa · m ^{1/2}
1	957.8	917.3	17.4	53.1	96.79
2	947.3	898.3	18.6	48.3	90.16

2 试验结果与分析

2.1 微观组织

两个锻件的横向微观组织见图 1。为 $\alpha + \beta$ 两相区变形的典型组织, 由等轴初生 α 相和 β 转变组织组成。两个锻件的退火温度远低于锻造温度, 对等轴初生 α 相的含量没有影响, 锻造温度决定了两个锻件组织中的等轴初生 α 相的体积分数。锻件 1 的微观组织中等轴初生 α 相的含量较低, 约为 15%, 锻件 2 的微观组织中等轴初生 α 相含量较高, 达到 65%。由此说明锻件 1 的变形温度高于锻件 2, 从 β 转变组织形态看, 锻件 1 的 β 转变组织为较宽的次生片状 α 相和片间的残留 β 相组成; 锻件 2 的 β 转变组织中次生 α 相含量少, 次生 α 相的片厚与锻件 1 的次生 α 相片层厚度相当, 但片的长度较短, 因此锻件 2 的 β 转变组织可描述为由近于球化的次生 α 相和残留晶间 β 相组成, 也表明锻件 2 在变形或热处理后的冷却速度较慢。

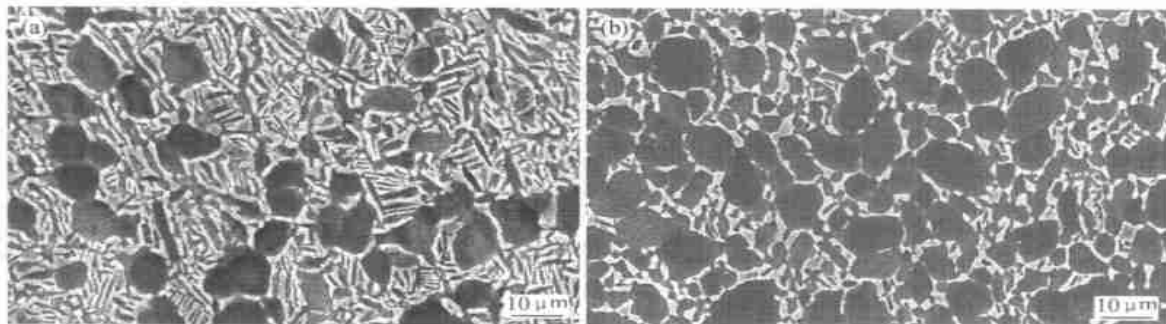


图1 两个锻件的微观组织 (a) 锻件1; (b) 锻件2

Fig. 1 Microstructures of the two forgings

(a) forging 1; (b) forging 2

2.2 高周疲劳性能

试验测试了两个锻件室温下光滑试样的高周疲劳性能, 结果表明相同试验条件下锻件1的疲劳极限达690MPa, 比锻件2高60MPa, 锻件1较高的疲劳极限与其较高的屈服强度相对应。两个锻件的室温高周疲劳S-N曲线见图2。

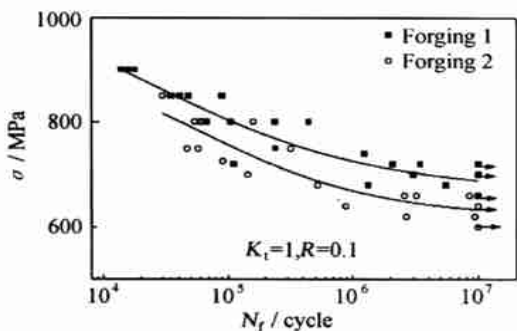


图2 锻件的疲劳性能

Fig. 2 Fatigue properties of the two forgings

研究认为^[6], 对于钛合金中等轴相和片层相混合的微观组织形态, 等轴 α 相体积分数的增加, 增强了抗裂纹萌生的能力, 有利于钛合金塑性和冲击性能的提高; 而片状组织体积分数的增加, 提高了抵抗裂纹扩展的能力, 从而提高钛合金的断裂韧性。因为裂纹在片状组织中的扩展方向的改变比在球状组织中更频繁, 裂纹分叉形成了次生裂纹, 这些过程的结果使裂纹的总长度增加, 需要更多地消耗断裂所需的能量, 因此等轴相和片状相混合组织中增加片状相的体积分数会引起断裂韧性的增加。

在本研究中, 锻件1的微观相组成中片状 β 转变组织体积分数相对于锻件2高, 抵抗裂纹萌生的能力相对较低, 但具有良好的抗裂纹扩展能力, 因此锻件1表现出相对高的强度和断裂韧性。

材料的疲劳极限反映的是材料抗裂纹萌生和扩展的综合能力, 本研究中锻件2具有较高的等轴 α 相

含量, 对应了高的抗裂纹萌生能力, 但其 β 转变组织所占的体积分数少, 且次生 α 相几乎球化, 抵抗裂纹扩展的能力大大降低, 因此其疲劳性能远低于初生 α 相含量低的锻件1。由此看出 β 转变组织的形貌对钛合金的抗裂纹扩展能力有极大的影响。

2.3 高周疲劳断裂特征

试验观察分析了两个TA15合金锻件的疲劳断口, 通过断口表面的放射状河流起点可以判断疲劳源。疲劳源区没有明显的组织特征差别, 图3为锻件1在不同加载应力下的疲劳源区形貌。低应力下裂纹起源于试样的内部(图3a), 随加载应力的增加, 裂纹起源于试样表面的加工痕(图3b), 应力进一步增加, 接近屈服强度时, 试样近表面产生多个裂纹源(图3c), 锻件2的疲劳裂纹均起源于试样表面或近表面, 没有发现裂纹起源于内部的试样, 从一个侧面也表明了锻件2的抗裂纹萌生能力强于锻件1。锻件源区的微观形貌呈现为滑移台阶和较少的解理特征(图3d)。

裂纹的扩展区有明显的疲劳条纹, 低应力时疲劳条纹细密, 晶界对疲劳裂纹的扩展起重要作用, 在晶界附近裂纹前沿受阻, 当裂纹从一个晶粒过渡到邻近晶粒时条纹走向改变。高应力下裂纹扩展较快, 疲劳条纹宽, 条纹的晶体学特征不明显(图4a, b)。

微观组织对疲劳断裂特征的影响主要反应于疲劳裂纹扩展区。片状次生 α 相体积分数较高的锻件1的疲劳断口起伏明显, 并可观察到更多的二次裂纹, 说明裂纹在扩展过程中产生分枝, 降低了裂纹扩展速度, 对提高疲劳寿命有利, 而锻件2的疲劳断口较平, 扩展区较少有二次裂纹。图5对比了两个锻件疲劳断口扩展区的形貌。

3 结论

(1) 两相区锻造的TA15钛合金为由初生等轴 α

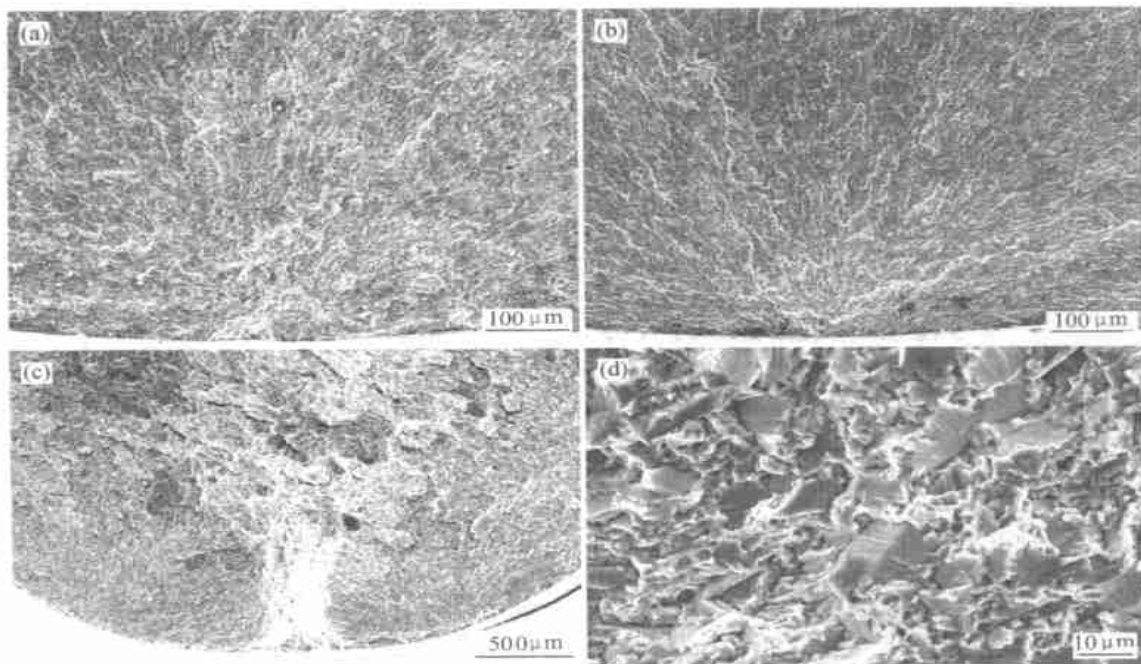


图3 疲劳裂纹的起源

Fig. 3 Initiation of fatigue cracks

(a) $\sigma = 680\text{MPa}$, $N > 10^6$; (b) $\sigma = 800\text{MPa}$, $N > 10^5$; (c) $\sigma = 900\text{MPa}$, $N > 10^4$; (d) $\sigma = 800\text{MPa}$, $N > 10^5$

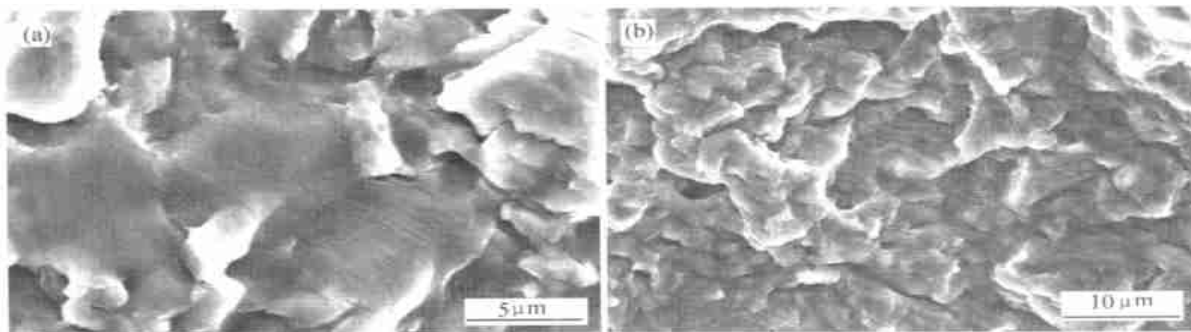


图4 疲劳裂纹的扩展

Fig. 4 Propagation of the fatigue cracks

(a) $\sigma = 680\text{MPa}$, $N > 10^6$; (b) $\sigma = 900\text{MPa}$, $N > 10^4$

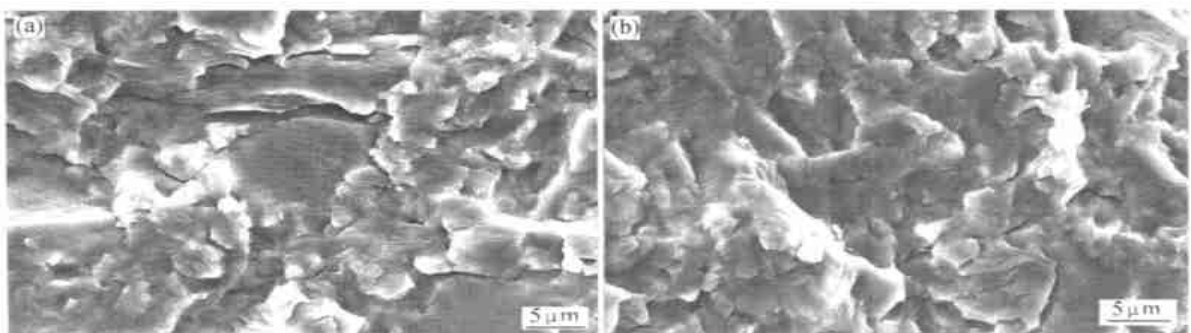


图5 两个锻件疲劳断口扩展区的对比

Fig. 5 Comparison of the fatigue propagation regions of the two forgings

(a) forging 1 $\sigma = 800\text{MPa}$, $N > 10^5$; (b) forging 2 $\sigma = 660\text{MPa}$, $N > 10^6$

(下转第 34 页)

渍裂解周期下 3D-BC_f/SiC 复合材料的弯曲强度和断裂韧性有所提高,但不是非常明显,约 10% 左右,原因是超声对纤维有一定程度的损伤。而采用超声探头法虽然能引入 27% (体积分数) 的 SiC 微粉,3D-BC_f/SiC 复合材料的密度也达到 1.9 g/cm³ 以上,但其弯曲强度只有 77.6 MPa,断裂韧性只有 6.4 MPa·m^{1/2},主要原因是超声探头对碳纤维强度损伤严重,同时编织物体积发生膨胀,纤维编织松散,纤维的体积分数变小,在一定程度上降低了复合材料中纤维的承载能力,导致材料性能大幅下降。

表 4 3D-BC_f/SiC 复合材料的力学性能
Table 4 Mechanical properties of
3D-B C_f/SiC composites

Sample	Volume fraction of SiC _p / %	Density / g·cm ⁻³	Flexural strength / MPa	Fracture toughness / MPa·m ^{1/2}
K	—	1.58	245.5	12.1
C01	16.4	1.69	266.9	13.8
C11	10.4	1.73	264.6	15.1
D01	22.5	1.94	161.3	10.1
E01	27.0	1.98	77.6	6.4

3 结论

- (1) 采用超声浸渍法在碳纤维编织物中引入 SiC 微粉时,粒度为 0.4μm 的 SiC 微粉引入效果优于粒度为 1.0μm 的 SiC 微粉。
- (2) 超声浸渍法引入 SiC 微粉时,浆料 SiC/EtOH 配比为 1:1 的浸渍效果较好,三次浸渍引入 SiC 微粉的体积分数可达 16.4%。
- (3) 采用超声浸渍法预先引入 SiC 微粉可以缩短先驱体浸渍裂解制备 3D-BC_f/SiC 复合材料的致密化周期,在相同的浸渍裂解周期下 3D-BC_f/SiC 复合材料的力学性能有所提高。
- (4) 利用真空超声或超声探头复合工艺引入 SiC 微粉的体积分数(超过 20%)明显高于单一工艺的结果,但对纤维的损伤较大,特别是采用超声探头,编织物体积出现严重膨胀,纤维松散,损伤严重,材料性能大幅下降。

参考文献

[1] Seyferth D. Preceramic polymers: past, present, and future [R]. AD-A 258 327, 1992.

[2] Funayama O, Oaki T, Kato T, et al. Synthesis of thermosetting copolymer of polycarbosilane and perhydropolysilazane [J]. J Mater Sci, 1996, 31 (23): 6369—6375.

[3] Seyferth D, Nathan B, David P, et al. Preceramic polymer as

“reagents” in the preparation of ceramics [J]. J Am Ceram Soc, 1991, 74 (10): 2687—89.

[4] Greil P, Seibold M. Modeling of dimensional changes during polymer-ceramic conversion for bulk component fabrication [J]. J Mater Sci, 1992, 27: 1053—60.

[5] 郑文伟,等.热模压辅助先驱体浸渍裂解制备 C_f/SiC 复合材料研究[J].复合材料学报,2003,20(5):44—48.

[6] 马青松,等.热压辅助先驱体裂解制备三维编织碳纤维增强 Si-O-C 复合材料的研究[J].材料工程,2002,(5):37—39.

[7] 郑文伟,等.三维整体编织物增强陶瓷基复合材料的制备工艺及性能表征[J].复合材料学报,1997,14(1):48—53.

收稿日期: 2003-09-02; 修订日期: 2003-12-24
作者简介: 郑文伟 (1970-), 男, 硕士, 讲师, 现主要从事陶瓷基复合材料专业, 联系地址: 湖南省长沙市国防科技大学 (410073)。

* * * * *

(上接第 30 页)

- 相和 β 转变组织组成的双态组织,β 转变组织的体积分数减少,且次生 α 相的球化会显著降低合金抗裂纹扩展的能力,从而降低了疲劳极限。
- (2) β 转变组织中大量的片状次生 α 相会对疲劳裂纹的扩展形成阻碍,使疲劳裂纹分枝,降低了疲劳裂纹的扩展速度,提高疲劳极限。
- (3) 疲劳断口分析表明,低应力下疲劳裂纹起源于试样内部,高应力下疲劳裂纹起源于试样表面,疲劳源区为滑移台阶和解理特征。疲劳断口的扩展区有典型的疲劳条纹。

参考文献

[1] 李兴无,刘瑞民,沙爱学,储俊鹏,等.显微组织对 TA 15 合金疲劳性能的影响[J].金属学报,2002,38(增刊):280—281.

[2] J A Hines, G L tjering. Propagation of microcracks at stress amplitudes below the conventional fatigue limit in Ti-6Al-4V [J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 1999, 22 (8): 657—666.

[3] A L Dowson, C J Beevers and L Grabowski. The Microstructural Features Associated with the Growth of Short Fatigue Cracks in a Near -Alpha Ti Alloy [A]. F H Froes and I Caplan. Titanium 92 Science and Technology [C]. TMS, 1993, 1741—1748.

[4] G L tjering. Influence of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of (α+β) Titanium Alloys [J]. Mat Sci Eng, 1998, A243: 32—45.

[5] W J Evans. Optimising Mechanical Properties in Alpha + Beta Titanium Alloys [J]. Mat Sci Eng, 1998, A243: 89—96.

[6] M Ya Brun, G V Shakhnova. Titanium Alloy Structure and Parameters Defining Its Diversity [J]. Titanium Scientific Technical Journal, 1993, 1 (3): 24—29.

收稿日期: 2003-05-13; 修订日期: 2003-12-15
作者简介: 曹京霞 (1968-), 女, 高级工程师, 从事钛铝金属间化合物和钛合金材料的研究, 联系地址: 北京 81 信箱 15 分箱 (100095)。