

# TC21 合金 315℃高周疲劳光滑和缺口试样断口分析

Fractography Analysis of Smooth and Notched High  
Cycle Fatigue Specimens in TC21  
Alloy at 315℃

虞忠良<sup>1,2</sup>, 赵永庆<sup>1</sup>, 周 廉<sup>1</sup>, 孙 军<sup>2</sup>

(1 西北有色金属研究院, 西安 710016; 2 西安交通大学, 西安 710049)

YU Zhong-liang<sup>1,2</sup>, ZHAO Yong-qing<sup>1</sup>,

ZHOU Lian<sup>1</sup>, SUN Jun<sup>2</sup> (1 Northwest Institute for Nonferrous

Metal Research, Xi'an 710016, China; 2 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**摘要:** 开展了 TC21 研究合金光滑和缺口试样的 315℃高周疲劳实验, 并对疲劳断口进行详细观察, 研究了缺口对 TC21 合金疲劳寿命的影响。结果表明, 光滑和缺口试样的疲劳强度比值随循环寿命降低而降低; 光滑试样的失稳疲劳裂纹长度随循环应力升高而降低; 瞬断区所承受的断裂应力随循环应力升高而降低; 这说明裂纹失稳决定试样的断裂, 缺口试样断口有多个裂纹源, 以缺口试样名义应力乘以应力集中因子与光滑试样的应力相等作为比较时, 缺口试样主裂纹长度大于光滑试样的裂纹长度, 缺口试样的裂纹扩展寿命更长。

**关键词:** TC21 合金; 缺口; 疲劳断口; 裂纹长度

中图分类号: TG146.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)07-0055-04

**Abstract:** The HCF fatigue tests of smooth and notched specimens in TC21 alloy were performed at 315℃, and the fractography was observed by SEM, the effect of notch on fatigue life was investigated. The results indicate that, the fatigue strengths ratio of the smooth and notched specimens decreases with the decrease of fatigue life. The main crack length of smooth specimens increases with the decrease of the maximum cyclic stress, but the ultimate fracture stress of the final fracture zone increases with the decrease of the maximum cyclic stress, which means that the ultimate fracture of fatigue specimens is controlled by the destabilization of fatigue cracks. For the notched specimens, there are multiple crack initiation sites on the fractography. When the nominal section stress multiplied by stress concentration factor equals the nominal stress of the smooth specimens, the main crack length of notched specimens is longer than that of the smooth specimens, meaning that the weight percent of fatigue cracks propagation life in overall life of notched specimens is larger than that of smooth specimens.

**Key words:** TC21 titanium alloy; notch; fatigue fractography; crack length

疲劳总寿命由裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命两部分组成, 低应力幅裂纹萌生寿命占主要, 随着应力幅的升高裂纹扩展寿命在总寿命中的权重逐渐增大<sup>[1]</sup>。通常疲劳断口主要由裂纹扩展区和瞬断区构成, 瞬断区大小与疲劳寿命没有关系, 与疲劳寿命有关的是裂纹扩展区。裂纹萌生后, 在一定的应力强度因子作用下缓慢扩展至临界长度后, 试样即失稳断裂, 外加循环应力不同, 试样失稳的临界裂纹长度不同, 裂纹扩展寿命不同, 对应裂纹扩展区的面积也不同, 断口上裂纹扩展区的大小一定程度反映疲劳的寿命。

疲劳 S-N 曲线中的寿命为试样的总寿命, 工程上处理光滑和缺口试样所采用的疲劳强度因子  $K_f$ , 缺口敏感系数  $q$  以及 Neuber 法等仅适用材料的裂纹萌生阶段<sup>[2-7]</sup>, 当裂纹扩展一定长度, 光滑和缺口试样的应力大小不同, 应力强度因子不同, 从而影响两种试样条件的裂纹扩展。裂纹扩展区的大小反映疲劳裂纹扩展寿命, 然而对这方面的关注较少, 本工作对新型钛合金 TC21 合金<sup>[8]</sup> 315℃光滑和缺口试样高周疲劳的断口裂纹扩展区进行测量, 研究不同应力幅光滑和缺口试样裂纹扩展区面积的不同, 从而研究缺口对疲劳 S-N

曲线影响的机理。

## 1 材料与实验

疲劳实验所使用的材料为高强高韧高损伤容限 TC21 合金, 是一种两相钛合金, 属于  $Ti-6Al-4V-Zr-Mo-Cr-Nb-Si$  系多元钛合金。在疲劳实验前, 材料经如下热处理:  $910^{\circ}\text{C}$  1h/AC +  $550^{\circ}\text{C}$  6h/AC, 所得到的组织为双态组织。

疲劳试样为光滑 ( $K_t = 1$ ) 和 V 型缺口 ( $K_t = 3$ ) 两种试样, 光滑试样标距处的截面尺寸以及缺口试样的净截面尺寸都为  $\phi 5\text{mm}$ , 其他尺寸根据 GB15248 及实验机夹头尺寸确定。疲劳实验在 2HFP421 高频疲劳实验机上进行, 所选用实验温度为  $315^{\circ}\text{C}$ , 频率  $100\text{Hz}$ , 循环应力比为 0.1。在 JSM 6460SEM 电镜下对疲劳试样的断口进行了观察。

光滑试样的疲劳断口示意如图 1a 所示, 光滑试样的断口只有一个裂纹源, 裂纹扩展区的形状近似为扇形, 确定试样断裂时疲劳裂纹扩展的长度为扇形的半径。结合 SEM 电镜, 观察疲劳裂纹快速扩展区特征, 确定主裂纹长度为裂纹源至裂纹扩展进入裂纹失稳区的长度, 即图中  $ab$  线所示。缺口试样的断口示意图见图 1b, 由于缺口的应力集中, 缺口试样表面有多个裂纹源。测量缺口试样的主裂纹长度为主裂纹源到瞬断区的距离, 即图中  $ef$  线所示。

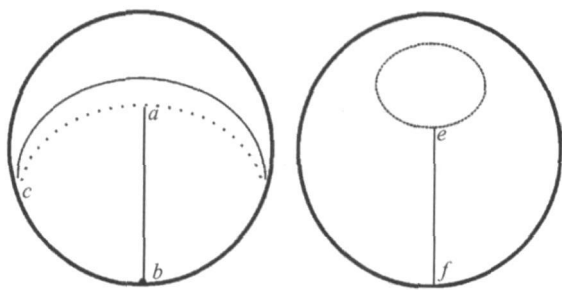


图 1 疲劳断口示意图 (a) 光滑试样; (b) 缺口试样

Fig. 1 The schematic sketch of fractography

(a) smooth specimen; (b) notched specimen

## 2 实验结果及分析

### 2.1 疲劳 S-N 曲线

$315^{\circ}\text{C}$  时, TC21 合金的高周疲劳 S-N 曲线见图 2, 由图 2 可以看到, 光滑和缺口试样的疲劳 S-N 曲线并不平行。对光滑和缺口试样数据进行处理, 得到曲线的近似表达式如下:

$$\text{光滑试样: } \sigma = 1081.22(2N_f)^{-0.02415} \quad (1)$$

$$\text{缺口试样: } \sigma = 1166.91(2N_f)^{-0.10644} \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为最大循环应力,  $N_f$  为疲劳寿命。

参照确定材料缺口疲劳强度因子的方法, 用公式

(1) 除以公式 (2) 得:

$$K = 0.927(2N_f)^{0.08229} \quad (3)$$

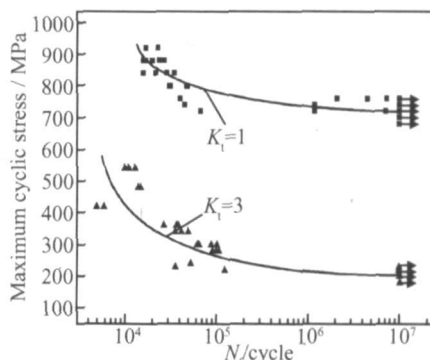


图 2 TC21 合金  $315^{\circ}\text{C}$  高周疲劳 S-N 曲线

Fig. 2 The HCF S-N curves of TC21 alloy at  $315^{\circ}\text{C}$

由公式 (3) 可以看到, 不同疲劳寿命下, 疲劳强度的比值并不相同, 疲劳寿命越短, 疲劳强度的比值越小, 疲劳寿命越长, 疲劳强度的比值越大。疲劳试样的总寿命包括裂纹萌生寿命和扩展寿命, 而只有在裂纹的萌生以前, 缺口根部的轴向应力大小与光滑试样的应力接近, 疲劳寿命可能比较接近, 而在裂纹扩展阶段, 缺口试样截面的应力重新分布, 裂纹扩展的驱动力降低, 临界失稳的裂纹长度增加, 这导致光滑试样和缺口试样裂纹扩展寿命的不同。当疲劳寿命较低, 即对应高循环应力条件下, 裂纹扩展寿命所占比例增大, 所以随着疲劳寿命降低, 疲劳强度的比值降低。当循环应力升高, 缺口根部产生塑性变形, 应力重新分布, 应力集中影响降低, 曲线有相交趋势。

### 2.2 光滑试样的疲劳断口

图 3a 是最大循环应力为  $760\text{MPa}$  光滑试样的疲劳断口的宏观形貌, 可以看到, 光滑试样的疲劳断口裂纹源只有一个, 在试样的表面, 与机械加工刀痕有关。机械加工过程中, 试样表面经受了大的塑性变形, 表面强度升高, 同时塑性有所降低, 在疲劳过程中容易在表面刀痕处应力集中, 使疲劳裂纹萌生。

由图 3a 还可以看到, 断口上裂纹扩展区为扇形, 对于以恒应力连续疲劳的试样, 只看到裂纹扩展区与瞬断区相交的弧线, 看不到其它的疲劳弧线或沟槽。测量的裂纹源到弧线中部  $a$  点及弧线在表面处的  $c$  点距离相等 (见示意图 1a), 表明裂纹在距离裂纹源相等的弧线上以近似相等速率向前扩展。由于裂纹扩展时顶端为弧线, 弧线上各位置的裂纹张开不相等, 其中弧线的顶部张开受到两边的限制, 裂纹张开较小, 应力强

度因子降低, 裂纹扩展速率降低, 相反裂纹两端处张开较大, 应力强度因子较大, 裂纹扩展速率增大。然而, 弧线两端由于应力强度因子较大而扩展较快时, 但同时降低对内部裂纹的闭合作用, 使表面裂纹扩展与中部裂纹扩展速率相差不致太大。表面质量影响裂纹扩展速率, 但表面附近的机械加工影响层厚度不大, 对裂纹扩展速率影响不大。距离相等还与材料延性有关, 材料延性高使裂纹上下表面有足够挠度用于弧中部裂纹张开, 降低弧线上表面对内部的约束, 使弧线上裂纹扩展驱动力近似相等。

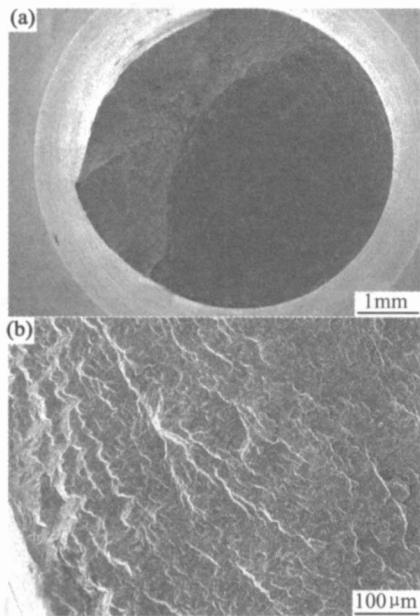


图3 光滑试样的疲劳断口 (a) 宏观断口; (b) 扩展区靠近表面

Fig. 3 The fractography of smooth specimens

(a) macroscopic fracture; (b) the crack propagation region near the surface

应力状态决定瞬断区形貌<sup>[9]</sup>, 当断口受力状态为平面应力状态时, 断口倾向于剪切断裂, 当断口上受力为平面应变状态时, 断口倾向于平面方式扩展。然而, 影响应力状态也与材料的延性有关, 对于具有较高的延性的 TC21 合金, 更容易满足平面应力状态, 所有应力状态下断口都有较大剪切区。所有应力下断口共同特征是, 当裂纹扩展至临界长度时, 裂纹以平面方式向前扩展, 同时剪切断裂也同时发生。断口上失稳的位置并不相同, 应该在弧线的两端。实际上, 在裂纹的两端, 由于所受的平面应力状态, 疲劳裂纹扩展区已不平坦, 有台阶存在, 但台阶上仍有疲劳辉纹并指向裂纹源, 见图 3b。

图 4 是测量的光滑试样不同应力水平下疲劳断口上的裂纹长度, 即裂纹扩展区扇形半径。由图可以看到, 随着光滑试样最大循环应力的升高, 裂纹扩展区的

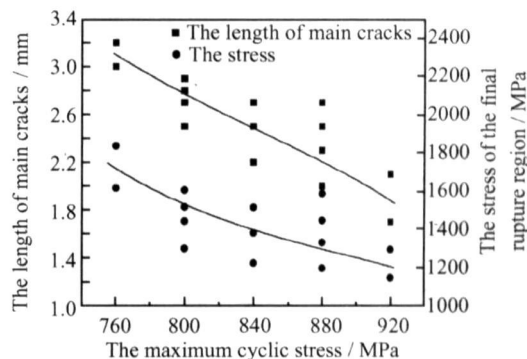


图4 光滑试样断口主裂纹长度及瞬断区应力

Fig. 4 The crack length and the stress of the final fracture region of smooth specimens

扇形半径减小, 即主裂纹长度降低。在相同的循环应力水平下, 不同疲劳试样的裂纹长度也不相等, 有一定的分散性, 其中总寿命长的疲劳试样, 主裂纹也较长, 因为总寿命包括裂纹萌生寿命和裂纹扩展寿命, 主裂纹长度的不同也说明疲劳裂纹扩展寿命也有较大波动。由图还可以看到, 裂纹失稳时断口上瞬断区所承受的最大应力随着样品最大循环应力升高而降低, 但瞬断区的应力都低于拉伸试样颈缩区的断裂应力(约 2200 MPa), 这说明, 对于含有裂纹的疲劳试样, 决定试样最终断裂是裂纹是否失稳。

### 2.3 缺口疲劳断口

最大循环应力为 300 MPa 缺口试样疲劳宏观断口示于图 5a 中, 如示意图 1b 所示的那样, 缺口疲劳断口含有多个疲劳裂纹源, 分布在断口周围, 这是由缺口根部的应力状态决定的。缺口疲劳试样的共同特点是, 瞬断区在断口的一侧, 为椭圆形, 而与其相对的一侧是主裂纹源。由于裂纹多源, 瞬断区与裂纹扩展区的交线为反向的弧线, 这与缺口试样表面缺陷敏感性有关<sup>[10]</sup>。图 5b 为与主裂纹源相对的一侧, 次裂纹源的裂纹扩展区与瞬断区相交的照片, 说明试样断裂时源于次裂纹源的裂纹还没有失稳, 试样的断裂是主裂纹的失稳断裂所致。

对于含有裂纹的试样, 裂纹的失稳是试样断裂的首要条件, 而主裂纹源到瞬断区距离最长, 裂纹应力强度因子最大, 因此测量了主裂纹源到瞬断区距离, 结果示于图 6。与光滑试样的裂纹长度相比, 当缺口的名义截面应力乘以应力集中因子等于光滑试样的应力时, 缺口试样的裂纹长度大于光滑试样的裂纹长度, 而且这种差别随着循环应力升高而加大。主裂纹长度反映裂纹扩展寿命, 缺口试样裂纹长度大于光滑试样裂纹长度, 说明缺口试样的裂纹扩展寿命权重大于光滑试样。

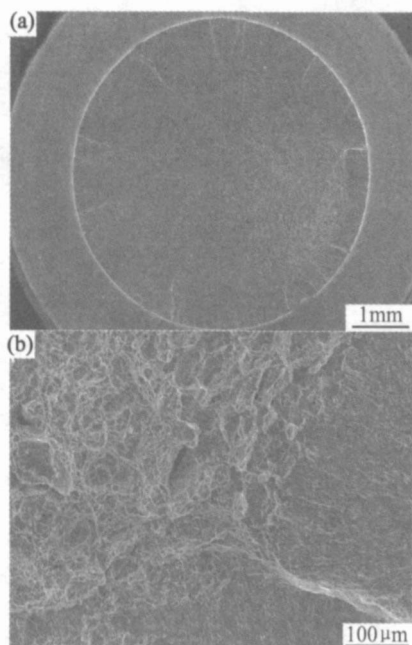


图5 缺口试样的疲劳断口 (a)宏观断口;  
(b)与主裂纹源相对的次裂纹扩展区与瞬断区相交区域

Fig. 5 The fractography of notched specimens  
(a) macroscopic fractography; (b) the intersecting region of secondary crack propagation region opposing to the main crack source and the final fracture region

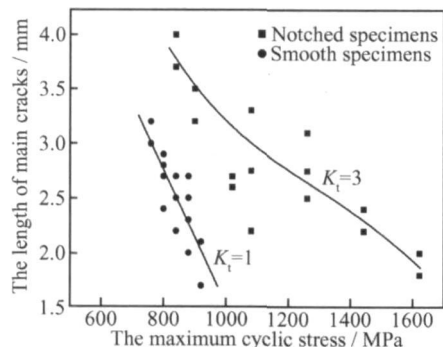


图6 光滑和缺口试样主裂纹长度比较

Fig. 6 The comparison of crack length of smooth and notched fatigue specimens

### 3 结论

(1) TC21 钛合金 315℃高周疲劳的光滑和缺口试样的疲劳强度的比值随疲劳寿命降低而降低。

(2) 对于光滑试样断口, 不同应力幅主裂纹长度不同, 循环应力幅越高, 主裂纹长度越短。光滑试样断口瞬断区面积随应力幅降低而降低, 低应力幅瞬断区承受应力高于高应力幅时所承受的应力, 决定疲劳试样断裂为裂纹失稳。

(3) 缺口疲劳试样的裂纹源为多个。当缺口试样截面名义应力乘以应力集中因子与光滑试样的截面应

力相等, 缺口试样的主裂纹长度大于光滑试样的主裂纹长度, 应力幅越高, 主裂纹长度差别越大。

#### 参考文献

- [1] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 王中光译. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] HAMMOUDA M M, SMITH R A, MILLER K J. Elastic-plastic fracture mechanics for initiation and propagation of notch fatigue cracks [J]. *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, 1979, 2: 139– 154. .
- [3] HARITOS G K, NICHOLAS T, LANNING D B. Notch size effects in HCF behavior of Ti-6Al-4V [J]. *Int J Fatig*, 1999, 21: 643– 652.
- [4] LANNING D B, HARITOS G K, NICHOLAS T. Influence of stress state on high cycle fatigue of notched Ti-6Al-4V specimens [J]. *Int J Fatig*, 1999, 21(S): 87– 95.
- [5] MARTINEZ C M, EYLON D, NICHOLAS T, et al. Effects of ballistic impact damage on fatigue crack initiation in Ti-6Al-4V simulated engine blades [J]. *Mater Sci Eng*, 2002, A325: 465– 477.
- [6] LANNING D B, NICHOLAS T, HARITOS G K. On the use of critical distance theories for the prediction of the high cycle fatigue limit stress in notched Ti-6Al-4V [J]. *Int J Fatig*, 2005, 27: 45– 57.
- [7] BACHE M R, TASLEEM M. Fatigue life prediction techniques for notch geometries in titanium alloys [J]. *Int J Fatig*, 1999, 21 (S): 187– 197.
- [8] 赵永庆, 曲恒磊, 冯亮. 高强高韧损伤容限型钛合金 TC21 研制 [J]. *钛工业进展*, 2004, 21(2): 22– 24.
- [9] 布鲁柯斯 C R, 考霍莱 A. 工程材料的时效分析 [M]. 谢斐娟译. 北京: 中国机械工业出版社, 2003.
- [10] 钟群鹏, 张峥, 武淮生, 等. 金属疲劳扩展区和瞬断区的数学物理模型 [J]. *航空学报*, 2000, 21(S): 11– 14.

收稿日期: 2006-07-20; 修订日期: 2006-12-23

作者简介: 虞忠良 (1971– ), 男, 博士后, 从事钛合金的疲劳与断裂研究. 联系地址: 陕西西安西北有色金属研究院钛合金研究所 (710016)。

(上接第 54 页)

physical changes during cure [J]. *J Polym Sci, Part A: Polym Chem*, 1989, 27: 711– 754.

- [8] KEREUZ J A, ENDREY A L. Studies of thermal cyclizations of polyamic acids and tertiary amine salts [J]. *J Polym Sci, Part A*, 1966, 4: 2607– 2616.
- [9] SNYDER R W. FTIR studies of polyimides: thermal curing [J]. *Macromolecules*, 1989, 22: 4166– 4172.
- [10] 黄培, 耿洪斌, 程茹, 等. 长链聚酰胺酸的热环化动力学 [J]. *高分子学报*, 2004, 2: 256– 262.

收稿日期: 2006-08-14; 修订日期: 2006-12-20

作者简介: 程茹 (1979– ), 女, 博士, 主要从事功能材料的合成及应用研究. 联系地址: 南京工业大学 化学化工学院黄培新 (210009). E-mail: phuang@njut.edu.cn