文章编号:1004-0609(2010)S1-s0518-05

Ti-24Nb-4Zr-8Sn 合金疲劳缺口敏感性

张思倩,李述军,郝玉琳,杨 锐

(中国科学院 金属研究所 沈阳材料科学国家(联合)实验室,沈阳 110016)

摘 要:研究不同缺口半径和应力比对 Ti-24Nb-4Zr-8Sn 合金室温高周疲劳性能的影响。结果表明:缺口的存在 明显降低合金的疲劳强度,缺口半径和应力比的变化对合金的组织及缺口敏感性影响不大,仅疲劳强度稍有变化。 与其他类型常用钛合金相比较,Ti-24Nb-4Zr-8Sn 合金具有低的室温疲劳缺口敏感性,这主要归因于其良好的室温 塑性以及超弹性变形特点。

关键词: 钛合金; 缺口; 疲劳缺口敏感性 中图分类号: TG 146 文献标志码: A

Fatigue notch sensitivity of Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy

ZHANG Si-qian, LI Shu-jun, HAO Yu-lin, YANG Rui

(Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The effect of notch size and *R* ratios on high cycle fatigue properties at room temperature of Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy was investigated. The results show that, due to the superior high ductility and super-elastic deformation, Ti-24Nb-4Zr-8Sn alloy exhibits low fatigue notch sensitivity. The specimen with notch has a much lower fatigue resistance than the normal ones. The notch size and *R* ratios have little effect on microstructure and fatigue notch sensitivity, only have some change on the fatigue strength.

Key words: titanium alloy; notch; fatigue notch sensitivity

作为一种新型医用亚稳β钛合金,Ti-24Nb-4Zr-8Sn(Ti2448)合金具有比其它医用合金低得多的弹性 模量,可以明显减少"应力屏蔽"效应;不含有毒元素, 具有良好的生物相容性和抗腐蚀性;具有较高强度和 超弹性的特征^[1-3],在较高的应力作用下可以安全使 用。Ti2448 合金的非线性变形行为和高度局域化的塑 性变形行为使其具有优良的高、低周疲劳性能^[4]。然 而,合金在实际应用的过程中承受复杂的应力状态, 不可避免地会含有应力集中,疲劳裂纹主要在这里萌 发。应力集中对合金的疲劳性能影响很大,大部分材 料高周疲劳对缺口敏感而低周疲劳不敏感,因此常常 用高周疲劳来研究材料对缺口的敏感程度^[5-7]。 本文作者对热轧态 Ti2448 合金进行了疲劳缺口 敏感性研究,观察了合金的显微组织以及疲劳断口形 貌,讨论了该合金疲劳断裂机制,以期对 Ti2448 合金 的缺口疲劳行为有一个比较深入的了解。

1 实验

1.1 实验材料

研究采用的 Ti2448 合金制备方法如下:以纯 Ti、 纯 Nb、纯 Zr 和 Ti-Sn 中间合金为原料,采用真空自 耗熔炼炉 3 次熔炼获得直径 280 mm 的 Ti2448 合金铸

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50631030;50901080);辽宁省自然科学基金资助项目(20092075)

通信作者:郝玉琳;电话:024-83978841;E-mail:ylhao@imr.ac.cn

锭,在 850 锻造成直径为 55 mm 的棒材,表面打磨 后在 800 进行热轧变形,轧制出直径为 12 mm 的棒 材。Ti2448 合金的化学成分如表 1 所示。

表1 Ti2448 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti2448 alloy (mass fraction,%)

Nb	Zr	Sn	0	Ti
24.7	3.75	8.09	0.11	Bal.

1.2 实验内容

疲劳实验在 Instron 疲劳实验机上进行,应力循环 采用计算机控制,波形为正弦波,应力比为 0.3、0.1 和-1。本实验所用缺口疲劳样品标距部分为 *d* 7.5 mm×30 mm,实验前对标距部分进行了机械抛光处 理,以减小表面机械加工缺陷的影响。

金相分析试样取自热轧棒的中间部分,采用 Axiovert 200 MAT 型金相显微镜进行组织观察。金相 试样的腐蚀剂为煮沸 40% HCI 溶液。利用 SSX-550 型扫描电镜对典型实验条件下破坏样品的断口进行观 察,试样在观察前置于酒精中进行超声波清洗,以去 除表面附着的脏物。显微组织分析采用 JEOL 200 CX- 透射电子显微镜,工作电压为 200 kV。制备透 射电镜样品时,对于高、低周疲劳样品,用电火花线 切割在距离断口 1 mm 处与加载垂直的方向切取厚度 为 0.5 mm 的薄片,用 1200[#]砂纸研磨至 40 μm 左右, 冲成 *d* 3 mm 的圆片,用 Tenupol-5 双喷减薄仪减薄样 品,电解液的成分为 6%高氯酸+35%正丁醇+59%甲醇 (体积分数,%),冷却剂为液氮,减薄条件为:温度 -15~-20 ,工作电压 15~20 V。

2 结果与讨论

2.1 热轧态 Ti2448 合金的显微组织和性能

图 1(a)和(b)所示为热轧态 Ti2448 合金的横截面和 纵剖面的显微组织。由图可知,合金的晶粒尺寸约在 微米级,而且存在织构。TEM 分析表明:在热轧过程 中,Ti2448 合金形成了亚微米级晶粒,晶粒尺寸为 500~600 nm(见图 1(c)),且部分晶粒中存在大量的亚 晶界,尺寸在 100 nm 左右。这种晶粒细化的现象是由 于高温热轧所产生的。对于 Ti2448 合金,通过常规的 塑性变形方法可以使合金的晶粒尺寸有效地减小^[8]。

热轧态 Ti2448 合金的循环拉伸曲线如图 2 所示。 合金至 1%应变的加载卸载曲线完全重合,即达到 1% 应变可以完全回复; 2%和 3%加载卸载后曲线大部分



图 1 热轧态 Ti2448 合金的显微组织

Fig.1 Microstructures of Ti2448 alloy after being hot-rolled: (a) Optical image of transversal section; (b) Optical image of longitudinal section; (c, d) TEM bright field image (inset is $[111]_{\beta}$ zone axis selected-area diffraction pattern)



图 2 Ti2448 合金的弹性变形

Fig.2 Elastic deformation behavior of Ti2448 alloy

回复;合金在4%应变变形后卸载具有最大的应变回 复量,可以达到3%,这表明合金的拉伸曲线呈现出 具有大的应变回复量的非线性变形特点。

2.2 缺口对高周疲劳寿命的影响

图 3 所示为 Ti2448 合金在不同应变比条件下的高 周轴向缺口疲劳 *S—N* 曲线。为了比较,将光滑试样 的 *S—N* 曲线也列于图中。与其他合金一样,Ti2448 合金的疲劳寿命随着应力水平的升高而减小,且缺口 的存在降低了合金的疲劳强度。

与光滑试样的疲劳强度规律类似,随着应力比的 增加,合金的缺口疲劳强度有所增加。由曲线可以看 出,在相同的应力比条件下,缺口的形状对合金的疲 劳强度几乎没有影响。

通常用疲劳缺口敏感度 q 来评定材料的疲劳缺口 敏感性,即

$$q = \frac{K_{\rm f} - 1}{K_{\rm t} - 1} \tag{1}$$

式中:
$$K_{\rm f} = \frac{\sigma_{c,\rm smooth}}{\sigma_{c,\rm notch}}$$

其中: $\sigma_{c,\text{smooth}}$ 和 $\sigma_{c,\text{notch}}$ 分别为光滑和缺口疲劳强度, K_t 与试样缺口的几何形状和合金性能有关。疲劳缺口 敏感度 q 主要取决于材料的性能,表征材料对缺口的 敏感程度,它能反映疲劳过程中,材料发生应力重新 分布,降低应力集中的能力。疲劳缺口敏感性 q 值一 般在 $0 \sim 1$ 之间,当 q 趋于 0 时,说明合金对缺口不敏 感;而当 q 趋于 1 时, K_f 趋于 K_t ,说明合金对缺口极 其敏感,缺口的存在将严重损害合金的疲劳性能。

Ti2448 合金的疲劳敏感性如表 2 所列。由表 2 可



图 3 Ti2448 合金光滑和缺口高周疲劳 *S*—*N* 曲线 **Fig.3** *S*—*N* curves of smooth and notched specimens HCF tested: (a) *R*=-1; (b) *R*=0.1; (c) *R*=0.3

以看出,与其他合金一样,Ti2448 合金的疲劳缺口敏 感性在 0~1 之间^[9]。LANNING 分析计算了 Ti-6Al-4V 合金的疲劳缺口敏感性^[10],并用逐步加载的方式得出 了 合金的 Haigh 图。比较可知,与常规钛合金 Ti-6Al-4V 相比,Ti2448 合金的缺口敏感性较低,这 与合金良好的室温塑性以及具有的超弹性变形特点有 关。 除此之外,在不同的应变比条件下,合金的缺口 敏感系数随着 K_t的增加而略有降低。这说明,缺口形 状对 q 值有一定的影响。当缺口曲率半径较小时,缺 口越尖锐,q 值越低。这是因为 K_t和 K_f都随缺口尖锐 度增加而提高,但 K_t增加比 K_f快。当缺口曲率半径 较大时,缺口尖锐度对q 的影响明显减小。

表 2 Ti2448 合金疲劳缺口敏感性

Table 2Fatigue notch sensitivity of Ti2448 alloy

R	<i>q</i>			
	$K_t=3, r=0.34$	<i>K</i> _t =3.5, <i>r</i> =0.28	<i>K</i> _t =4, <i>r</i> =0.14	
-1	0.366	0.267	0.267	
0.1	0.33	0.314	0.291	
0.3	0.3	0.28	0.259	

2.3 缺口对高周疲劳断裂的影响

与光滑试样的疲劳断口不同,缺口试样缺口处的 应力集中是裂纹萌生的唯一来源。图4所示为缺口疲 劳试样在 *R*=0.1, σ_a=250 MPa 条件下的宏观断口照片 及断口形貌。

与光滑试样类似,缺口试样也表现为多裂纹源断 裂,且裂纹源位于试样表面(见图 4(b))。受应力集中 的影响,试样在裂纹扩展第二阶段中出现了微裂纹 (见图 4(c)),且存在与扩展方向垂直的二次裂纹(见图 4(d))。在裂纹扩展第二阶段后期断口表面上不同区域 存在不同方向的疲劳台阶(见图 4(e)),这也进一步表明 缺口试样存在多个裂纹源。在裂纹扩展最后阶段,出 现了大量的韧窝,表明合金为韧性断裂(见图 4(f))。



图 4 Ti2448 合金缺口试样高周疲劳断口形貌

Fig.4 SEM images of fracture surface of notched specimen fatigue tested at R=0.1, $\sigma_a=250$ MPa: (a) Overview of fracture surface; (b) Crack initiation at surface of specimen; (c) Microcrack; (d) Secondary crack; (e) Fatigue striation; (f) Final fracture region

3 结论

1) Ti2448 合金具有低的室温疲劳缺口敏感性,表 明缺口对合金的疲劳强度影响较小,这主要归因于合 金良好的室温塑性。

 2) 缺口半径和应力比的变化对合金缺口敏感性 影响不大, 仅疲劳强度有所变化。

3) 缺口疲劳试样裂纹萌生于表面,为多裂纹源韧性断裂,且在裂纹扩展区出现了微裂纹、二次裂纹以及疲劳台阶。

REFERENCES

- HAO Y L, LI S J, SUN B B, SUI M L, YANG R. Ductile titanium alloy with low poission's ratio[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98: 216405.
- [2] LI S J, CUI T C, HAO Y L, YANG R. Fatigue properties of a metastable β-type titanium alloy with reversible phase transformation[J]. Acta Biomater, 2008, 4(2): 305–317.
- [3] LI S J, ZHANG Y W, SUN B B, HAO Y L, YANG R. Thermal stability and mechanical properties of nanostructured

Ti-24Nb-4Zr-7.9Sn alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2008, 480(1/2): 101–108.

- [4] ZHANG S Q, LI S J, JIA M T, HAO Y L, YANG R. Fatigue properties of a multifunctional titanium alloy exhibiting nonlinear elastic deformation behavior[J]. Scripta Mater, 2009, 60: 733-736.
- [5] EVANS W J. Stress relaxation and notch fatigue in Ti-6Al-4V[J]. Scripta Metall, 1987, 21: 1223–1227.
- [6] TOKAJI K. Notch fatigue behavior in a Sb-modified permanent-mold cast A356-T6 aluminium alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2005, 396: 333–340.
- [7] TRAIL S J, BOWEN P. Effects of stress concentrations on the fatigue life of a gamma-based titanium aluminide[J]. Mater Sci Eng A, 1995, 192/193: 427–434.
- [8] HAO Y L, LI S J, SUN S Y, ZHENG C Y, HU Q M, YANG R. Super-elastic titanium alloy with unstable plastic deformation[J]. Appl Phys Lett, 2005, 87: 091906.
- [9] CUI C Y, DEMURA M, HASEGAWA K, OHASHI T, KISHIDA K, HIRANO T. Notch sensitivity of heavily cold-rolled Ni₃Al foils[J]. Scripta Mater, 2005, 53: 1339–1343.
- [10] 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]. International Journal of Fatigue, 2005, 27: 45–57.

(编辑 袁赛前)