

显微组织对 TC18 钛合金应力控制低周疲劳性能的影响

Effects of Microstructure on Low Cycle Fatigue Property of TC18 Titanium Alloy Under Stress-controlled Condition

冯抗屯¹, 沙爱学², 王庆如²

(1 中航飞机起落架有限责任公司 工程技术中心工艺所, 陕西 汉中 723200; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

FENG Kang-tun¹, SHA Ai-xue², WANG Qing-ru²

(1 Processing Department of Engineering & Technical Center of China Aviation Industry Aircraft Landing-gear Advanced Manufacturing Co., Ltd., Hanzhong 723200, Shaanxi, China; 2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了片状和网篮两种典型组织对 TC18 钛合金不同应力振幅下低周疲劳寿命的影响。结果表明: TC18 钛合金低周疲劳寿命对显微组织的变化不敏感。在相同的应力振幅下, 双态组织和片状组织的疲劳寿命基本相当。TC18 钛合金的低周疲劳寿命 N 取决于加载的应力振幅, σ_{\max} 与 N 之间呈对数关系, 相关系数达 0.99 以上。

关键词: 钛合金; 显微组织; 低周疲劳; 应力控制

中图分类号: TG113.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)05-0053-04

Abstract: The effect of lamellar and bimodal microstructures on low cycle fatigue life under different stress swing of TC18 titanium alloy was studied. The results show that fatigue life is not sensitive to the change of microstructure of TC18 titanium alloy. Fatigue lives of bimodal and lamellar microstructures are very similar under the same stress swing. The low cycle fatigue life N of TC18 titanium alloy is determined by stress swing. The relationship between σ_{\max} and N is logarithmic and the correlative coefficient is larger than 0.99.

Key words: titanium alloy; microstructure; low cycle fatigue; stress-controlled condition

TC18 钛合金是一种高强度、高合金化的 $\alpha\beta$ 两相合金, 名义成分为 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe, 该合金的突出优点是在空气介质中的最大淬透截面厚度可达 250mm^[1,2], 特别适合制造飞机起落架的大型承力结构件, 而开展起落架用材料的低周疲劳性能研究具有重要意义。已有研究表明, TC18 钛合金的塑性、冲击韧性和断裂韧度与显微组织类型有很大关系^[3,4], 但该合金显微组织对低周疲劳性能影响的报道很少。通常, 对低周疲劳性能的研究都是在应变控制条件下进行的, 但考虑到工程实际应用中起落架零部件的失效都是在载荷控制条件下发生的, 因此本工作选择应力控制低周疲劳开展试验^[5,6]。

1 实验材料与方法

实验用 TC18 钛合金的主要化学成分见表 1。通

过采用不同的热变形工艺获得了两种不同显微组织类型的 TC18 钛合金模锻件, 用于研究低周疲劳性能与显微组织的关系, 两种显微组织形貌如图 1 所示。图 1a 是典型的双态组织, 在 β 基体上分布着大量球状初生 α 相, 图 1b 是片状组织。两种组织的 TC18 合金主要力学性能见表 2, 二者强度差别不大, 前者的塑性明显好于后者。

表 1 TC18 钛合金的主要化学成分(质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of TC18 titanium alloy
(mass fraction/%)

Al	Mo	V	Cr	Fe
5.86	4.72	5.00	1.04	1.00

疲劳试样的形状和尺寸见图 2, 缺口系数 $K_t = 2.4$ 。应力控制低周疲劳在 MTS810-500KN 型试验机上进行, 载荷类型为恒幅, 试验频率 $f = 0.167\text{Hz}$, 应力比 $R = 0.1$ 。

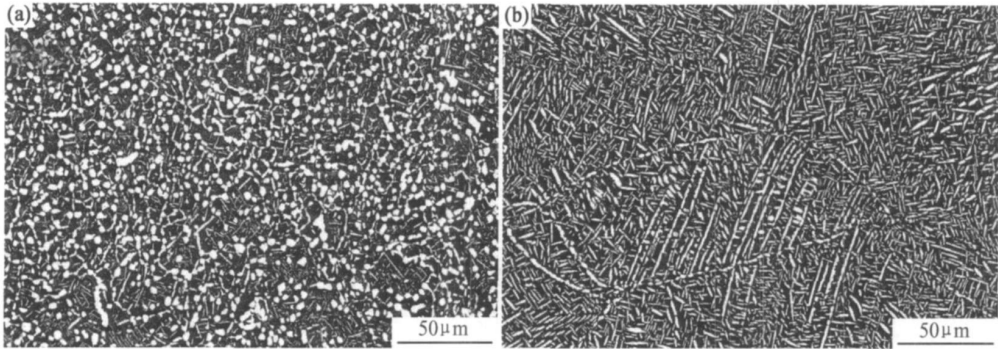
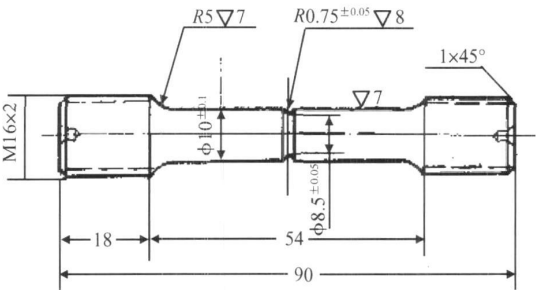


图 1 两种不同类型的 TC18 钛合金显微组织 (a) 双态组织; (b) 片状组织

Fig 1 Two typical microstructures of TC18 titanium alloy (a) bi modal structure; (b) lamellar structure

表 2 TC18 钛合金两种显微组织的室温拉伸性能				
Table 2 Tensile property of TC18 titanium alloy of two typical microstructures at RT				
Type	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	Ψ /%
Bi modal	1191	1152	16.2	56.3
Lamellar	1209	1145	12.2	23.5



2 结果与讨论

2.1 显微组织对应力控制低周疲劳性能的影响

表 3 给出了 TC18 钛合金两种典型组织在不同应

图 2 应力控制低周疲劳试样的尺寸

Fig 2 Specimen dimensions of low cycle fatigue under stress controlled condition

表 3 两种典型组织的 TC18 钛合金在不同应力振幅下的低周疲劳循环周次							
Table 3 Cycle numbers under different stress swing of two typical microstructures for TC18 titanium alloy							
Structure type	$K = \sigma_{max} / \sigma_b$	σ_{max}	σ_{min}	N / cycle			
				Sample number	Actual value	Average value	Standard deviation
Bi modal structure	0.8	904	90.4	A23	3048	3168	106
				A24	3210		
				A25	3247		
				A13	4819		
	0.7	791	79.1	A14	4936	4965	162
				A15	5139		
				A18	18737		
				A19	15583		
Lamellar structure	0.8	904	90.4	A20	14398	16239	2243
				D23	3270		
				D24	3259		
				D25	3354		
	0.7	791	79.1	D13	4838	5116	416
				D14	5594		
				D15	4916		
				D18	15903		
	0.5	565	56.5	D19	19273	16833	2132
				D20	15324		

Note: Ultimate tensile strength adopts TC18 titanium alloy forging representative value, $\sigma_b = 1130$ MPa

力振幅下的低周疲劳循环周次, 相应的趋势图见图 3。由图 3 可见, 在选定的应力区间, 不同组织类型的 TC18 钛合金低周疲劳寿命无明显差异, 静强度稍高的片状组织疲劳寿命也略高些。疲劳寿命随应力振幅提高而降低, 加载系数 $K (\sigma_{\max} / \sigma_b)$ 与疲劳寿命 N (3 个试样平均值) 之间呈对数关系, 相关系数高达 0.99 以上, 如表 4 所示。已有的研究表明, TC18 钛合金的塑性、冲击韧性、断裂韧度等性能对显微组织都具有高度敏感性。当组织类型由双态组织变成片状组织时, 合金断面收缩率 Ψ 和冲击韧性 a_{KU} 最多会降低 50% 以上, 断裂韧度 K_{IC} 可提高 30% 以上。本次试验结果表明, TC18 合金的应力控制低周疲劳性能与显微组织没有很大关系。这可能是因为低周疲劳是在缺口试样上进行的, 当外加载荷很大时, 裂纹很快在缺口处萌生并迅速扩展, 决定试样疲劳寿命的主要是加载的应力振幅。

2.2 断口分析

图 4 给出了两种典型组织在不同应力振幅下疲劳源区附近的断口形貌。由图 4 可见, 裂纹均沿试样外表面开始萌生, 由于应力振幅高, 疲劳源区面积占整个断口面积较小, 肉眼可见的主要是裂纹扩展区。双态

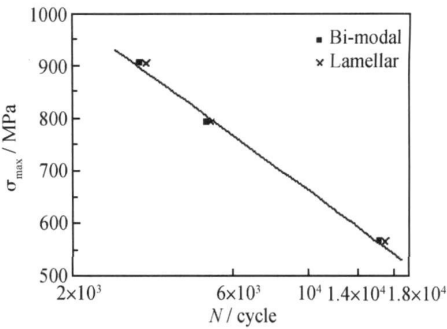


图 3 两种典型显微组织类型的 TC18 钛合金 $K-N$ 曲线
($K_t = 2.4$, $R = 0.1$, $f = 0.167\text{Hz}$)

Fig. 3 $K-N$ curves of two typical microstructures for TC18 titanium alloy ($K_t = 2.4$, $R = 0.1$, $f = 0.167\text{Hz}$)

表 4 两种典型组织的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of two typical microstructures

	$\sigma_{\max}-N$ regress formula	R^2
Bi modal structure	$\sigma_{\max} = -204.02 \ln(N) + 2539.6$	0.9959
Lamellar structure	$\sigma_{\max} = -204.04 \ln(N) + 2546.9$	0.9959

组织晶粒细小, 对应的断口较平坦; 片状组织晶粒较粗大, 对应的断口相对粗糙。

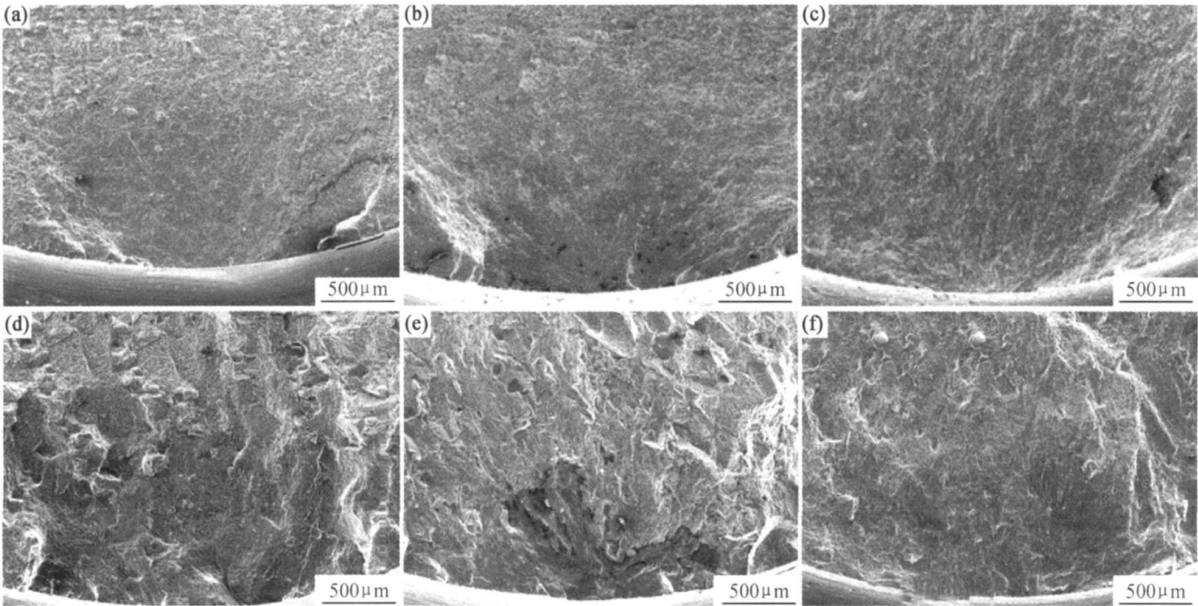


图 4 两种典型组织的 TC18 钛合金在不同应力振幅下疲劳断口形貌

- (a) $\sigma_{\max} = 904\text{MPa}$, $N = 3048$, 双态组织; (b) $\sigma_{\max} = 791\text{MPa}$, $N = 4819$, 双态组织;
(c) $\sigma_{\max} = 565\text{MPa}$, $N = 18737$, 双态组织; (d) $\sigma_{\max} = 904\text{MPa}$, $N = 3270$, 片状组织;
(e) $\sigma_{\max} = 791\text{MPa}$, $N = 4838$, 片状组织; (f) $\sigma_{\max} = 565\text{MPa}$, $N = 19273$, 片状组织

Fig. 4 Fracture surface under different stress swing of two typical microstructures for TC18 titanium alloy

- (a) $\sigma_{\max} = 904\text{MPa}$, $N = 3048$, bi modal structure; (b) $\sigma_{\max} = 791\text{MPa}$, $N = 4819$, bi modal structure;
(c) $\sigma_{\max} = 565\text{MPa}$, $N = 18737$, bi modal structure; (d) $\sigma_{\max} = 904\text{MPa}$, $N = 3270$, lamellar structure;
(e) $\sigma_{\max} = 791\text{MPa}$, $N = 4838$, lamellar structure; (f) $\sigma_{\max} = 565\text{MPa}$, $N = 19273$, lamellar structure

2.3 静强度对低周疲劳性能的影响

为进一步考察静强度对应力控制低周疲劳性能的影响,对比分析了 TC4^[7]、TC6^[7]和 TC18 三个合金应力控制低周疲劳性能,如图 5 所示。这三个合金的铝含量相当,其强度水平主要与它们各自的 β 稳定元素含量有关,三个合金的 β 稳定系数 K_β 分别为 0.3、0.6 和 1.1,对应的抗拉强度使用值分别为 900、980、1080 MPa。由图 5 可见,应力控制低周疲劳性能与静强度有较好的对应关系,静强度水平高的 TC18 钛合金低周疲劳性能最高,其次是 TC6、TC4 最低。

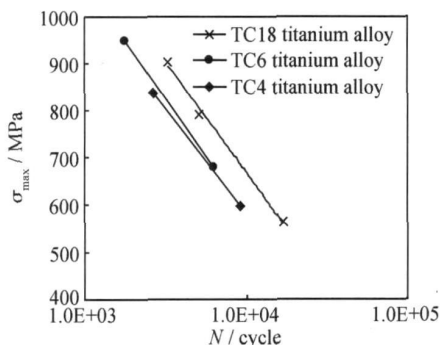


图 5 TC4、TC6 和 TC18 钛合金的 $S-N$ 曲线

Fig 5 $S-N$ curves of TC4, TC6 and TC18 titanium alloys

3 结论

(1) 在 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$ 寿命区间,显微组织类型对 TC18 钛合金应力控制低周疲劳性能无明显影响,疲劳寿命主要取决于加载的应力振幅, σ_{max} 与疲劳寿命 N 之间呈对数关系,相关系数高达 0.99 以上。

(2) 钛合金的应力控制低周疲劳性能与静强度有较好的对应关系,静强度水平高的 TC18 钛合金低周疲劳性能明显优于静强度水平较低的 TC6 和 TC4 钛合金。

参考文献

- [1] 王金友,葛志明,周彦邦.航空用钛合金[M].上海:上海科学技术出版社,1985. 106.
- [2] POLKIN S, RODIONOV V L, STROSHKOV A N, et al. Structure and mechanical properties of VT22($\sigma + \beta$) high strength titanium alloy semiproducts[A]. FROES I H, CAPLAN I. Titanium Science and Technology[C]. San Diego: TMS, 1992. 1569 - 1572.
- [3] 盛险峰,丁志文,朱益藩.变形量和热处理工艺对 Ti-5Al-5Mo-5V-1Cr-1Fe 钛合金组织和性能的影响[J].金属学报,1999, 35 (S1): 465- 468.
- [4] 沙爱学,李兴无.热变形温度对 TC18 钛合金显微组织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2005, 8: 1167- 1172.
- [5] 丁剑,张荻.应力控制条件下奥氏体不锈钢的低周疲劳性能[J].金属学报,2002, 12: 1261- 1265.
- [6] 李云飞,姚念奎.某型飞机主起落架机轮半轴断裂原因分析[J].飞机设计,2006, 2: 45- 47.
- [7] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册,第 4 卷[M].北京:中国标准出版社,2002. 104- 146.

收稿日期:2007-11-26;修订日期:2008-12-15

作者简介:冯抗屯(1966-),男,高级工程师,从事金属材料及锻造工艺研究工作,联系地址:陕西城固县汉江路 18 号 1 分箱工艺所(723200), E-mail: fengchao200@sina.com

(上接第 52 页)

- [11] 陈仁松,何彬,王红霞.碳纳米管 8~12 GHz 电磁波衰减实验研究[J].复合材料学报,2007, (3): 126- 130.
- [12] 赵东林,卢振明,沈曾民.镀 Ni-P 和 Ni-BN 合金碳纳米管的磁性能及其复合材料的微波吸收性能[J].复合材料学报,2004, 21 (3): 54- 58.
- [13] 吴晓光,车晔秋.国外微波吸收材料[M].长沙:国防科技大学出版社,1990. 62- 75.
- [14] 何燕飞,龚荣洲,何华辉.双层吸波材料吸波特性研究[J].功能材料,2004, (6): 782- 784.
- [15] 崔晓冬,刘顺华,管洪涛,等.双层吸波材料吸波特性研究[J].材料科学与工程学报,2006, (5): 725- 729.
- [16] 崔晓冬,李长茂,刘顺华.双层雷达波吸收平板吸波特性研究[J].材料开发与应用,2006, 21(4): 8- 10,15.
- [17] 何燕飞,龚荣洲,李享成,等.多层复合吸波材料的制备及其吸波

性能[J].无机材料学报,2006, 21(6): 1449- 1453.

- [18] 罗洁,徐国亮,蒋刚,等.双层结构碳团簇型微波隐身材料的吸波性能研究[J].功能材料,2004, 33(4): 401- 402.
- [19] 骆武,胡传.涂层与镀层复合雷达波吸收性能研究[J].材料工程,2006, (增刊 1): 128- 131.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50372013);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050562002);广东省自然科学基金资助项目(07001769);广东省教育厅自然科学研究重点项目(04Z005)

收稿日期:2008-05-29;修订日期:2008-11-28

作者简介:曾国勋(1968-),男,在职博士,讲师,研究电磁波吸收材料,联系地址:广州大学城广东工业大学(510006),E-mail: zenggx@gdut.edu.cn