

文章编号:1000-8055(2011)11-2468-07

高低周复合载荷对 TC11 钛合金疲劳性能的影响

赵振华, 陈 伟

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了解高周振动应力对 TC11 钛合金疲劳性能的影响,进行了 TC11 的低周疲劳、高周疲劳、以及高低周复合疲劳试验. 试验结果表明:高低周复合循环降低了 TC11 钛合金的抗疲劳性能;复合循环载荷中,高周平均应力水平 σ_{major} 和应力比 R_{minor} 对高低周复合寿命有较大的影响. 采用扫描电子显微镜(SEM)比较分析了不同类型载荷下的断口宏观和微观形貌特征,高低周复合疲劳断口与高周断口有较明显的区别,高低周复合载荷中的低周循环引起的较大滑移是引起疲劳寿命降低的主要原因.

关 键 词: 钛合金 TC11; 高周疲劳; 高低周复合疲劳; 断口分析; 滑移

中图分类号: V231.95

文献标志码: A

Effect of combined cycle load upon the fatigue performance of titanium alloy TC11

ZHAO Zhen-hua, CHEN Wei

(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to ascertain the effects of the combined cycle situation on the fatigue life, the high and low combined cycle fatigue tests, high cycle fatigue tests and low cycle fatigue tests on titanium alloy TC11 were performed. The results indicate that the combined cycle loading degrades the fatigue resistance of TC11 related to low cycle or high cycle fatigue loading. The CCF life is highly effected by the mean stress σ_{major} and stress ratio R_{minor} of the minor stress cycles. Fractograph and macrograph of fracture aspects under different kinds of loadings were investigated using scanning electron microscope (SEM). The fractograph of CCF fracture surfaces obviously differs from that of high cycle fatigue fracture surfaces. The slippage due to low cycle is the main reason of reducing the CCF life.

Key words: titanium alloy TC11; high cycle fatigue (HCF);
high and low combined cycle fatigue (CCF); fractography; slippage

航空发动机风扇、压气机转子叶片是疲劳的敏感部件^[1]. 航空发动压气机叶片和风扇叶片在工作中,主要受离心力引起的低周载荷作用,同时受到飞行中的高频振动引起的高周载荷作用,可能引起叶片的高低周复合疲劳(high and low combined cycle fatigue,简称 CCF).

20 世纪 70 年代中末期,Fuchs H O 等开始注意到复合载荷下的疲劳问题^[2]. 近年来,国内外

对高低周复合疲劳的研究有了很大的发展,研究的问题主要集中在高低周复合载荷下的疲劳性能、高低周复合疲劳载荷下裂纹的扩展、高周疲劳载荷下的裂纹扩展阈值、高低周复合疲劳寿命估算和微动磨损等方面^[3-8]. Nicholas 的研究表明,低周疲劳(low cycle fatigue,简称 LCF)和高周疲劳(high cycle fatigue,简称 HCF)载荷的交互作用对钛合金等材料的高周疲劳性能有较大影

收稿日期:2010-12-15; 修订日期:2011-09-02

作者简介:赵振华(1979—),男,湖南衡东人,博士生,主要从事航空发动机结构强度振动与疲劳研究.

响^[9].

从低周疲劳寿命角度,很多研究表明叠加的高周载荷作用会降低材料的低周疲劳寿命^[10-14].陶表福等^[10]对 GH901 开展了高低周复合疲劳及其累积损伤的研究,研究表明在低周主循环载荷上迭加高周循环,明显地降低了试样的疲劳寿命,并研究了复合疲劳寿命及裂纹扩展的预测方法.侯静泳等^[11]采用控制最大循环载荷并改变高周应力幅与低周应力幅比值的试验方法,研究了高周振动应力对 TC11 钛合金的疲劳寿命的影响.研究表明,梯形波上迭加高周振动应力对 TC11 的低周疲劳寿命有明显影响,试验温度上降低 TC11 的高低周复合疲劳寿命,线性损伤累积模型可以预测 TC11 钛合金室温复合疲劳寿命.许风旌等^[12]通过试验研究了高低周复合载荷中的高周与低周载荷频率之比对碳钢的疲劳寿命的影响规律,随着频率比的增大低周疲劳寿命降低越多,温度循环对疲劳寿命降低的影响也较大;引入低周和高周损伤度,研究了小频率比和大频率比两种情况的高低周复合疲劳寿命的预测方法.王时越等^[13]和侯学勤等^[14]对 45 钢和 FGH95 合金材料的高低周复合疲劳的研究,也得到了高周振动载荷降低了材料的低周疲劳寿命的结论.

Matikas^[15]设计了高周频率为 20 kHz 的设备进行高低周复合疲劳试验,疲劳试验结果及断口分析表明,相对于低周疲劳载荷,高周疲劳载荷是引起损伤的主要原因,采用线性累积方法估算得到的高低周复合疲劳寿命偏于危险.Jelaska 基于线性损伤累积模型,采用等寿命曲线和 Goodman 公式,开展了高低周复合疲劳寿命及疲劳极限预测方法的研究^[16],而 Morrissey, Golden 和 Nicholas 等从小裂纹扩展特性角度对高低周复合疲劳极限的预测方法进行了研究^[5].

Dungey 等^[17]考虑到风扇叶片设计中通常采用的是抗高周疲劳设计,通过高低周复合疲劳与高周疲劳的对比试验,认为在接近真实工作载荷条件下,高低周复合载荷会提高 Ti-6Al-4V 材料的高周疲劳寿命.

Mall, Lanning 和 Nicholas 等研究了低周预先加载对钛合金光滑和缺口试验件高周疲劳极限的影响^[4,18].

本文通过试验,从低周疲劳和高周疲劳两个角度分析高低周复合载荷对航空发动机风扇、压气机叶片用钛合金材料抗疲劳性能的影响.

1 试 验

1.1 试验件及设备

试验所使用的材料为 TC11 合金,沿试验材料的横向切取了试块,在抛光、腐蚀后进行了金相组织观察,如图 1 所示.设计加工了 TC11 合金圆截面疲劳试验件(如图 2 所示);为安装引伸计,静拉伸试验件的工作段比疲劳试验件长 5 mm.试验设备为 MTS809 疲劳试验机.

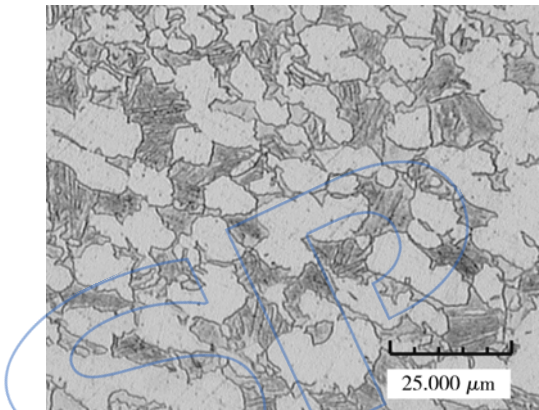


图 1 TC11 的微观结构
Fig. 1 Bi-model microstructure of TC11

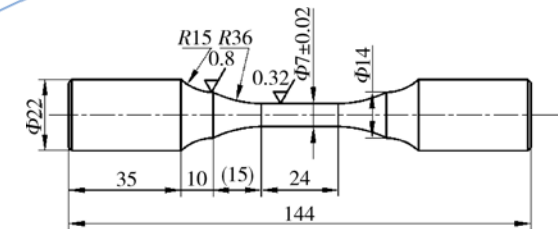


图 2 TC11 疲劳试验件(单位:mm)
Fig. 2 TC11 test specimen(unit:mm)

两个静拉伸试验件的结果重复性较好,基本力学性能测试结果见表 1.

表 1 静拉伸试验结果
Table 1 Result of tensile test

	S1	S2	均值
E/MPa	115 616. 4	116 106. 5	115 861. 5
$\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	986. 14	990. 92	988. 53
$\epsilon_{p0.2}/\%$	1. 053	1. 054	1. 054
σ_b/MPa	1 081. 61	1 084. 47	1 083. 04
$\epsilon_b/\%$	10. 21	10. 62	10. 42

1.2 疲劳试验载荷

疲劳试验分为低周疲劳试验、高周疲劳试验和高低周复合疲劳试验。

令低周疲劳试验的应力比 $R=0$, 在 $900 \sim 1030$ MPa 范围内进行了 4 个最大载荷水平的试验, 试验载荷条件见表 2。

表 2 低周疲劳试验载荷

Table 2 Parameter of low cycle fatigue load

$\sigma_{\max}$ /MPa	R	频率 f /Hz
900	0	1
950	0	1
1000	0	1
1030	0	1

高低周复合疲劳载荷是由低周疲劳载荷与叠加在低周疲劳载荷峰值上的高周正弦载荷构成的, 一个低周载荷循环叠加的高周循环载荷个数 m 即为高低周复合循环比 (本文中的 $m=1000$), 疲劳试验载荷谱如图 3 所示。

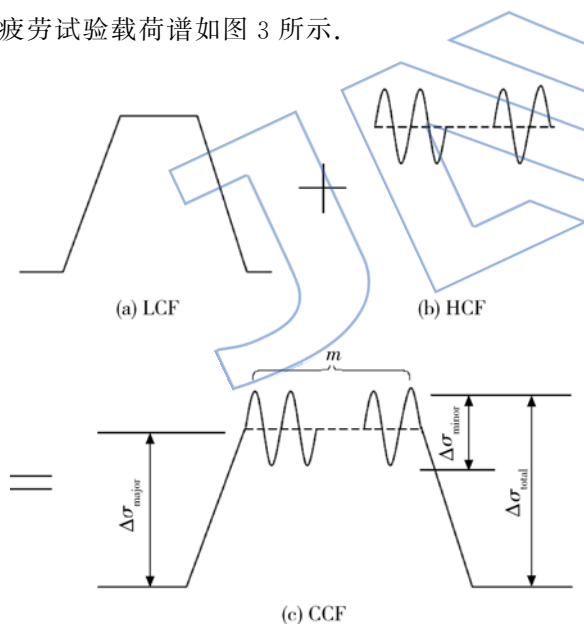


图 3 疲劳试验载荷谱示意图

Fig. 3 Fatigue loadings

相对于低周载荷, 高周载荷产生的损伤较小, 根据本文的 TC11 材料静拉伸试验结果, 参考航空材料手册^[19]中的 TC11 材料应力-寿命 (S-N) 曲线和等寿命曲线, 选取的寿命区间在 $10^5 \sim 10^6$ 左右的疲劳载荷作为高周载荷。

对于高低周复合疲劳, 复合循环中的高周应力比 R_{minor} 采用下面的公式表示:

$$R_{\text{minor}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{total}} - \Delta\sigma_{\text{minor}}}{\Delta\sigma_{\text{total}}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{major}} - \frac{1}{2}\Delta\sigma_{\text{minor}}}{\Delta\sigma_{\text{major}} + \frac{1}{2}\Delta\sigma_{\text{minor}}} \quad (1)$$

式中 $\Delta\sigma_{\text{total}}$ 为复合疲劳载荷的总应力范围, $\Delta\sigma_{\text{minor}}$ 为叠加的高周疲劳载荷的应力范围, $\Delta\sigma_{\text{major}}$ 为低周疲劳载荷的应力范围。

在两种平均应力 (σ_m 或 σ_{major}) 水平下分别进行了 3 种应力比 (R_m 或 R_{major}) 的高周疲劳试验和高低周复合疲劳试验, 试验载荷条件见表 3。高低周复合疲劳块谱中的低周梯形载荷 (见图 3(c)) 的上升和下降时间均为 2 s, 两复合载荷块的间隔时间为 1 s, 高低周复合疲劳块谱中高周载荷的加载频率与高周疲劳试验频率相近, 在 12~16 Hz 之间 (根据试验载荷的幅值略有调整)。

表 3 高周和高低周疲劳试验载荷

Table 3 Parameter of high cycle fatigue and combined cycle fatigue load

Loading mode	σ_m or σ_{major} /MPa	R or R_{minor}	频率 f /Hz
High cycle fatigue	800	0.50	12
		0.55	16
		0.60	16
	750	0.45	12
		0.50	16
		0.55	16
Combined cycle fatigue	800	0.50	12
		0.55	16
		0.60	16
	750	0.45	12
		0.50	16
		0.55	16

1.3 疲劳试验结果

开展低周疲劳、高周疲劳、高低周复合疲劳载荷条件下的疲劳试验, 得到了不同载荷条件的试验循环次数。

低周疲劳试验结果见图 4, 采用最小二乘法拟合, 得到了用双对数表示的 TC11 低周疲劳 S-N 曲线的幂函数表达式

$$\lg N_{\text{lcf}} = 85.41 - 27.27 \lg \sigma_{\max} \quad (2)$$

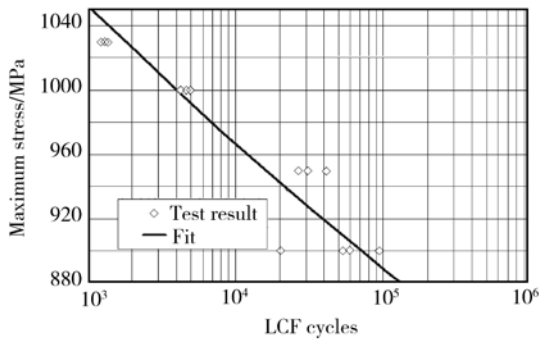


图 4 低周疲劳试验结果及 S-N 曲线

Fig. 4 S-N curve for low cycle fatigue tests

图 5 中的数据点为平均应力 σ_m 分别为 800 MPa 和 750 MPa 的 3 种不同应力比 R 的高周疲劳试验结果. 采用最小二乘法拟合, 分别得到了 TC11 的高周疲劳 S-N 曲线的幂函数表达式(其中公式(3)对应的 $\sigma_m = 800$ MPa)

$$\lg N_{\text{hcf}} = 97.58 - 30.61 \lg \sigma_{\text{max}} \quad (3)$$

$$\lg N_{\text{hcf}} = 113.50 - 35.99 \lg \sigma_{\text{max}} \quad (4)$$

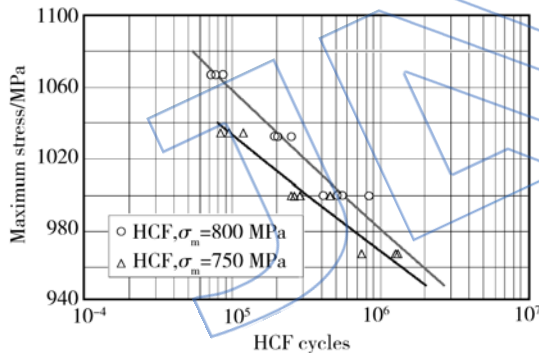


图 5 高周疲劳试验结果及 S-N 曲线

Fig. 5 S-N curves for high cycle fatigue tests

图 6 中的数据点为 σ_{major} 分别为 800 MPa 和 750 MPa 的三种 R_{minor} 的高低周复合疲劳试验结果. 为便于同高周疲劳试验结果比较, 图 6 中的寿命 (HCF life) 为只计复合循环块中的高周循环的次数. 采用最小二乘法拟合, 得到了 TC11 的高低周复合载荷条件下的高周循环 S-N 曲线的幂函数表达式 (800 MPa), 其中公式 (5) 对应的 $\sigma_{\text{major}} = 800$ MPa

$$\lg N_{\text{hcf, ccf}} = 89.33 - 27.90 \lg \sigma_{\text{max}} \quad (5)$$

$$\lg N_{\text{hcf, ccf}} = 79.19 - 24.30 \lg \sigma_{\text{max}} \quad (6)$$

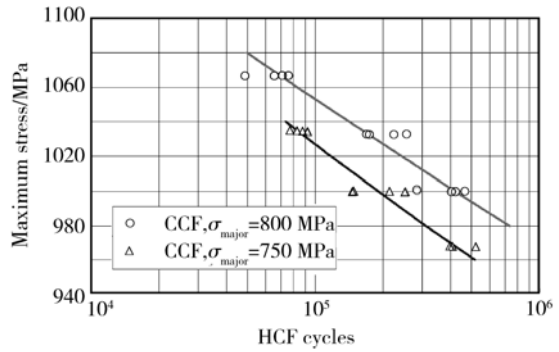


图 6 高低周复合疲劳试验结果及高周 S-N 曲线

Fig. 6 S-N curves for combined cycle fatigue tests

2 讨论

2.1 复合循环对低周疲劳寿命的影响

将高低周复合疲劳试验结果中的低周循环次数与低周疲劳试验的循环次数进行对比, 定义低周疲劳寿命比 α 为

$$\alpha = N_{\text{b, ccf}} / N_{\text{lcf}} \quad (7)$$

其中 N_{lcf} 为纯低周疲劳寿命, $N_{\text{b, ccf}}$ 为高低周复合载荷块的试验次数.

由表 4 可知, 叠加的高周振动循环大大降低了 TC11 的低周疲劳寿命, 不同 R_{minor} 下 α 的差别较大, α 与 R_{minor} 不存在单调变化关系, 且不同的高周平均应力水平 σ_{major} 下的 α 变化规律不相同. 图 7 为低周疲劳寿命和复合疲劳试验结果的低周寿命 S-N 曲线的比较.

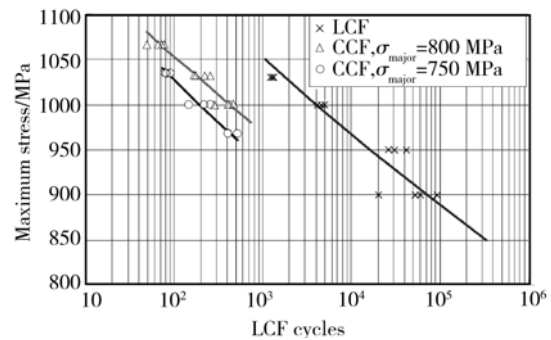


图 7 低周和复合疲劳试验 S-N 曲线

Fig. 7 S-N curves for both low cycle fatigue and combined cycle fatigue tests

2.2 复合循环对高周疲劳寿命的影响

将高低周复合疲劳试验结果中的高周循环次数与高周疲劳试验的循环次数进行对比, 定义高周疲劳寿命比 β 为

$$\beta = \frac{N_{\text{hcf,ccf}}}{N_{\text{hcf}}} \quad (8)$$

式中 N_{hcf} 为纯高周疲劳寿命, $N_{\text{hcf,ccf}}$ 为高低周复合疲劳 S-N 曲线中的高周循环次数。

高低周复合循环中的低周循环降低了 TC11 的高周疲劳寿命(见表 4)。在复合循环块中,当高周循环的幅值较小时,低周循环对 TC11 的高周疲劳性能影响较大,不同 R_{minor} 下 β 的差别较大。 β 与 R_{minor} 也不存在单调变化的关系。不同高周平均应力水平 σ_{major} 下的 β 变化规律也不相同,从本文的试验条件看来,高周平均应力水平较低时低周循环的交互作用明显。图 8 为高周疲劳寿命和复合疲劳试验结果的高周寿命 S-N 曲线的比较。

表 4 复合循环对低周疲劳寿命的影响分析

Table 4 Comparative properties for low cycle fatigue, high cycle fatigue and combined cycle fatigue tests

	$\sigma_{\text{major}} = 750 \text{ MPa}$			$\sigma_{\text{major}} = 800 \text{ MPa}$		
R_{minor}	0.45	0.50	0.55	0.50	0.55	0.60
α	0.053	0.047	0.044	0.094	0.120	0.097
β	0.872	0.609	0.399	0.829	0.953	0.695

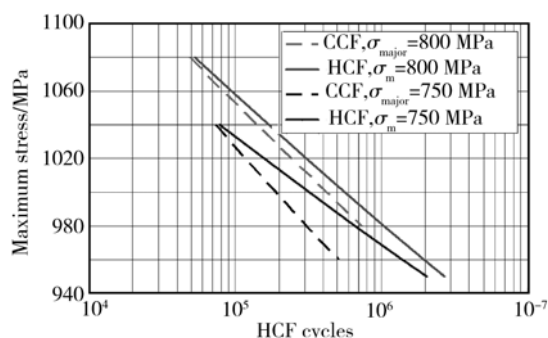


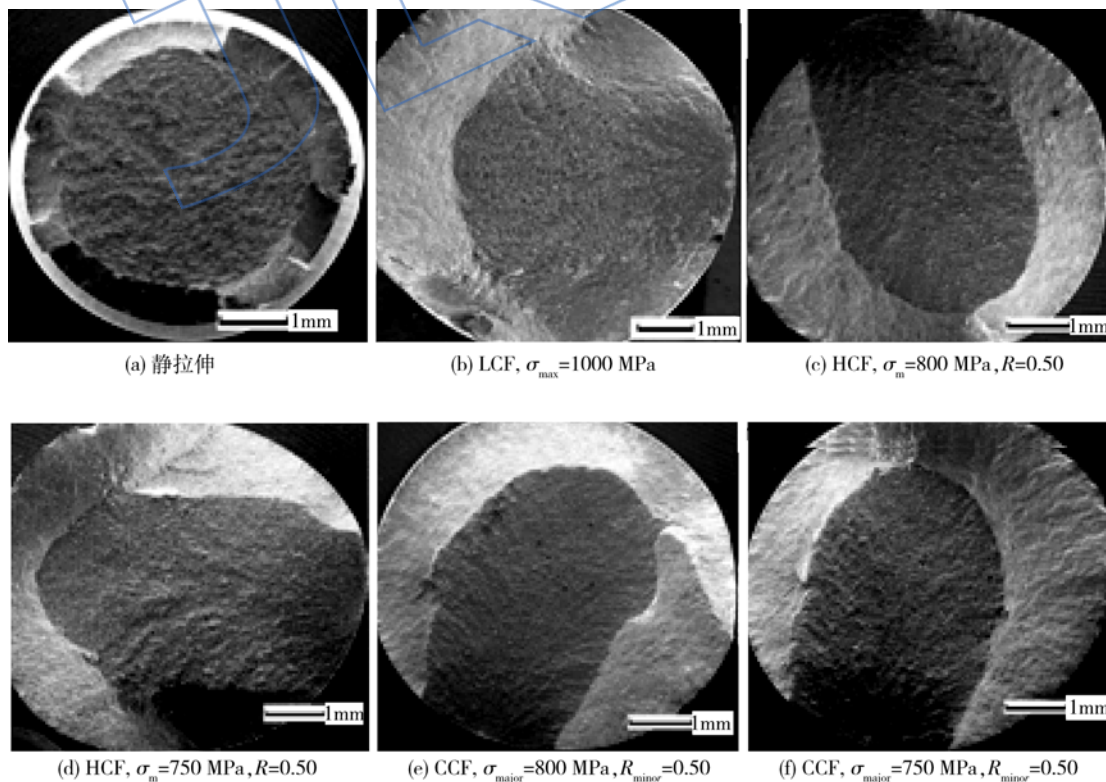
图 8 高周和复合疲劳试验 S-N 曲线

Fig. 8 S-N curves for both high cycle fatigue and combined cycle fatigue tests

2.3 试样断口形貌分析

对试样的断口进行了扫描,图 9(a)为静拉伸试样断口的宏观形貌,断口主要分为纤维区和剪切唇区,纤维区的面积较大而放射区不明显,表明 TC11 的塑性很好。

图 9(b)为 $\sigma_{\text{max}} = 1000 \text{ MPa}$ 的低周疲劳试样的断口宏观形貌,图 9(c)和 (d)分别为 $R = 0.50$ 的 σ_m 等于 800 MPa 和 750 MPa 的高周疲劳试样的断口宏观形貌,图 9(e),(f)分别为 $R_{\text{minor}} = 0.50$ 的 σ_{major} 等于 800 MPa 和 750 MPa 的高低周复合疲



(a) 静拉伸

(b) LCF, $\sigma_{\text{max}} = 1000 \text{ MPa}$

(c) HCF, $\sigma_m = 800 \text{ MPa}, R = 0.50$

(d) HCF, $\sigma_m = 750 \text{ MPa}, R = 0.50$

(e) CCF, $\sigma_{\text{major}} = 800 \text{ MPa}, R_{\text{minor}} = 0.50$

(f) CCF, $\sigma_{\text{major}} = 750 \text{ MPa}, R_{\text{minor}} = 0.50$

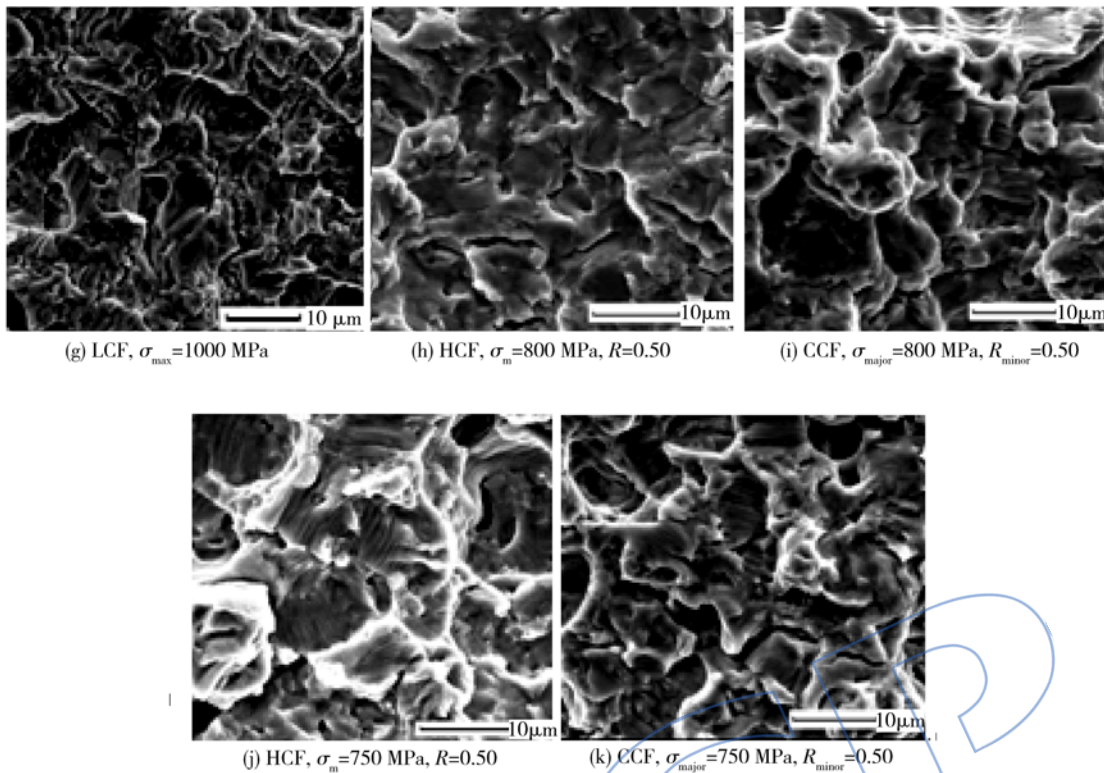


图 9 断口的扫描电镜照片
Fig. 9 SEM photos of fracture section

疲劳试样的断口宏观形貌。疲劳试样断口均可见光泽度较高的月牙形疲劳扩展区和放射状向内扩展的疲劳棱线,瞬断区较粗糙且边缘为与轴向近似成 45° 的剪切唇。这五种断口的宏观形貌在疲劳裂纹扩展区、瞬断区的面积大小和瞬断区的粗糙程度等方面有细微的差别。在断口微观特征方面:疲劳源区有解理特征,扩展起始区有较少的二次裂纹,距离源区越远,疲劳条带越宽,扩展区的二次裂纹越多,并有云朵花样产生。低周试样断口的解理特征比高周和高低周复合疲劳的断口明显,二次裂纹的数量较多,尺寸也较大。

$\sigma_{\text{major}} = 800 \text{ MPa}$ 的高低周复合疲劳断口与 $\sigma_m = 800 \text{ MPa}$ 高周疲劳断口相比(见图 9(h), (i)),疲劳扩展区相近部位的相邻疲劳条带区域(扩展小平面)的高度差较明显且面积较小,高周平均应力为 750 MPa 的断口比较也有此特征(见图 9(j), (k)),说明高低周复合载荷中的低周循环引起了较大的滑移。

3 结 论

由以上的分析可知,高低周复合疲劳存在如下特点:

1) 高低周复合循环降低了 TC11 的抗疲劳

性能;

2) 考虑到低周载荷的交互作用,在风扇和压气机叶片的抗疲劳设计中,应将叶片的振动应力水平控制在比仅考虑高周载荷条件的更低范围内;

3) 复合循环载荷中,不同的高周平均应力水平 σ_{major} 对 TC11 的疲劳性能影响规律不同,应力比 R_{minor} 对高低周复合寿命有较大的影响;

4) 疲劳试验件的断口分析表明,高低周复合载荷中的低周循环引起的较大滑移是引起疲劳寿命降低的主要原因;

5) 高低周载荷对材料的抗疲劳性能影响与载荷的应力水平和应力比等都相关,较为复杂,需进一步深入研究。

致谢:

吴铁鹰、陈茉莉老师和江苏大学的刘红光老师在试验中给予了无私的帮助和指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Suresh. 材料的疲劳[M]. 王中光,译. 北京:国防工业出版社,1999.
- [2] Fuchs H O, Nelson D V, Toomay T L. Fatigue under complex loading[R]. Warrendale, PA: Society of Automotive

- Engineers, 1977.
- [3] Nicholas T. Recent advance in high cycle fatigue[C]//Proceedings of 9th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, Geneva, Switzerland: [s. n.], 2003.
- [4] Mall S, Nicholas T, Park T W. Effect of pre-damage from low cycle fatigue on high cycle fatigue strength of Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(9): 1109-1116.
- [5] Morrissey R J, Golden P, Nicholas T. The effect of stress transients on the HCF endurance limit in Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(9): 1125-1133.
- [6] Walls D P, de Laneuville R E, Cunningham S E. Damage tolerance based life prediction in gas turbine engine blades under vibratory high cycle fatigue[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1997, 119(1): 143-146.
- [7] Jelaska D, Glodez S, Podrug S. Closed form expression for fatigue life prediction at combined HCF/LCF loading[J]. *Mechanics, Automatic Control and Robotics*, 2003, 3(3): 635-646.
- [8] Byrne J, Hall R F, Powell B E. Influence of LCF overloads on combined HCF/LCF crack growth[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(9-11): 827-834.
- [9] Nicholas T. Critical issues in high cycle fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 1999, 21 (Supplement 1): 221-231.
- [10] 陶表福, 侯静泳, 谢济洲. GH901 合金的高低周复合疲劳及其累积损伤研究[J]. *航空材料学报*, 1990, 10(9): 35-43. TAO Biaofu, HOU Jinyong, XIE Jizhou. The investigation of high and low cycle combine fatigue behaviours and accumulation damage for superalloy GH901 [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 1990, 10(9): 35-43. (in Chinese)
- [11] 侯静泳, 蔡肇云, 屠一鹤. TC-11 钛合金高低周复合疲劳及损伤累积研究[J]. *航空动力学报*, 1992, 7(2): 135-138. HOU Jingyong, CAI Zhaoyun, TU Yihe. Research on high-low cycle complex fatigue and accumulative damage for Ti-alloy TC11[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1992, 7(2): 135-138. (in Chinese)
- [12] 许风旌, 聂景旭, 赵长占. 平板构件的高低周复合疲劳研究[J]. *航空动力学报*, 1992, 7(2): 121-124. XU Fengjing, NIE Jingxu, ZHAO Changzhan. A compound fatigue investigation of plate specimen under low-cycle load superposed on high cycle load[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1992, 7(2): 121-124. (in Chinese)
- [13] 王时越, 迟珊, 邵剑飞, 等. 45 钢高低周复合疲劳寿命的试验研究[J]. *云南工业大学学报*, 1998, 14(1): 65-67. WANG Shiyue, CHI Shan, SHAO Jianfei, et al. Experimental investigation of high-low cycle complex fatigue life of 45 steel[J]. *Journal of Yunnan Polytechnic University*, 1998, 14(1): 65-67. (in Chinese)
- [14] 侯学勤, 刘新灵, 陶春虎. FGH95 合金高低周复合疲劳行为[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2008, 13(4): 201-207. HOU Xueqin, LIU Xinling, TAO Chunhu. Combined fatigue behavior of low-and-high cycle stresses for FGH95 alloy[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2008, 13(4): 201-207. (in Chinese)
- [15] Matikas T E. A high-cycle fatigue apparatus at 20 kHz for low-cycle fatigue/high-cycle fatigue interaction testing[J]. *Fatigue & Fracture Engineering Material & Structures*, 2001, 24(10): 687-697.
- [16] Jelaska D. Fatigue assessment for combined HCF/LCF loading[R]. New Orleans: ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2002: 135-139.
- [17] Dungey C, Bowen P. The effect of combined cycle fatigue upon the fatigue performance of Ti-6Al-4V fan blade material[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004(153-154): 374-379.
- [18] Lanning D, Haritos G K, Nicholas T, et al. Low-cycle fatigue/high-cycle fatigue interactions in notched Ti-6Al-4V[J]. *Fatigue & Fracture Engineering Material & Structures*, 2001, 24(9): 565-578.
- [19] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册: 第4卷 钛合金铜合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.