

高、低周复合疲劳及其试验技术

西北工业大学 梁国炜

摘 要

文中介绍了一种简单易行的复合疲劳试验机,在此试验机上进行了高、低周复合疲劳试验。结果表明,随着次循环的频率和载荷幅增大,铝合金(LY12-CZ)试件的裂纹萌生寿命显著下降。然而,当次循环频率很低时,寿命也下降,这似乎属于“变形损伤”,因缺口附近的应变出现“棘轮”现象。复合疲劳的损伤模型尚有待研究。

一、研究概况

1973年加拿大P.K.Venkiteswaran等^[1]在研究Inconel Alloy X-750(燃气涡轮叶片材料)的蠕变行为时,叠加上一小幅值的横向振动应力,发现蠕变率降低和断裂寿命延长;若与纯蠕变比较,几乎相差一个数量级,其断口是沿晶疲劳和解理的混合。但是,当振动应力进一步增大时,蠕变寿命即下降。由此予见到,振动应力似乎有一门槛值(对应于轴向应力),若低于此门槛值时,振动应力是有益的,反之,是有害的。

1982年B.E.Powell等^[2]在室温下对钛合金(Ti-6Al-4V)研究了高周小幅值振动对低周疲劳的影响,发现主循环在低周疲劳形成裂纹时起主导作用,叠加的次循环则只有超过次循环损伤的始点时才起作用,超过这一点以后,次循环将导致很大的损伤,加速裂纹扩展。

1983年涂柏林等^[3]对GH36的复合疲劳断裂特性进行了研究,得出的结论与上述作者类似。然而,他们对疲劳断口的分析表明,复合疲劳(与纯低周疲劳比较)使裂纹尖端塑性区尺寸显著减小,其微观形貌也与低周疲劳显著不同。拿涡轮叶片榫头裂纹的断口与复合疲劳的比较,它们的微观形貌、特征完全相似。由此证明,这些构件是在低周疲劳载荷上叠加振动而损坏的,从而指出研究复合疲劳的工程实用价值。

1985年牛康民等^[4]的表明,在低循环载荷上叠加较小的振动,寿命反而增加,认为这是低周-蠕变-高频振动三者交互作用的结果。文献^[4,5]还提出,不同材料对高、低周复合疲劳的敏感性差异问题。

有关高、低周复合疲劳的各种现象虽然提出来了,但是,试验研究还是很少,数据积累不够。1984年我们改装成功一台复合疲劳试验机,并初步开展了这方面的试验研究。

二、试验技术

国内外现有的电液伺服疲劳试验机,由于加载频率的限制(最高约10Hz左右),不能满足复合疲劳试验要求。这类试验机,其关键在于如何产生高周载荷(要求有一定的加载幅值),以及高、低周载荷的复合问题。

加拿大Waterloo大学的蠕变疲劳复合试验机的低周载荷采用液压-杠杆轴向加载,高周载

荷则用电磁激振, 模拟叶片的横向振动应力。按当前的试件 (模拟一对叶片) 可得到 5.28 kg/mm^2 (7500 Lb/in^2) 应力, 其自振频率在 $900\text{--}1000 \text{ Hz}$ 范围。

英国 Instron 公司的复合疲劳试验机则采用同轴加载, 它的高频载荷也是采用电磁激振, 其频率范围在 $200\text{--}600 \text{ Hz}$, 低频载荷采用液压作动筒。在两者之间有一隔离元件, 使高、低频载荷互不干扰, 能独立调节。高、低频载荷分别由两个回路控制。由于高频激振器的功率大, 需采用水冷却, 给工艺制造带来困难。

国内航空材料研究所亦有专门设计的复合疲劳试验机, 其加载方式与加拿大的^[1]相同。

我们的复合疲劳试验机由下列几部分组成: (1) 动力系统 (液压泵组), (2) 承力构架, (3) 高、低频加载及控制系统, (4) 测量记录装置, (5) 安全装置。承力构架及加载、控制系统见图 1。

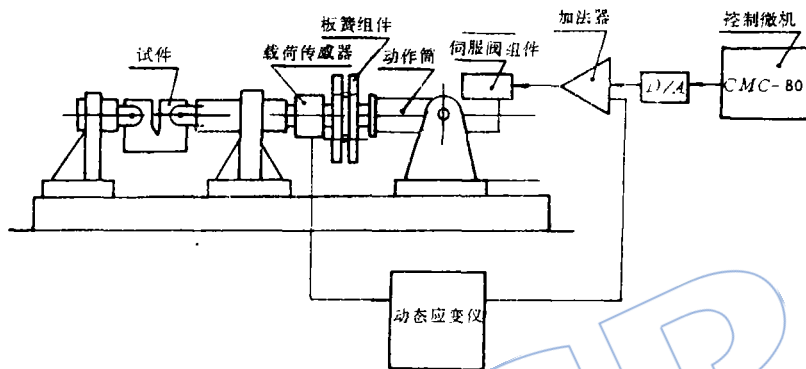


图1 微机控制单回路复合疲劳试验机

承力构架为卧式, 由三个支座组成, 固定在平台上, 中间支座为滑动支点。试件夹头对中误差不大于 0.015 mm 。构架有良好的刚性, 安装方便, 价廉, 但试件重量有一定限制。

高、低周载荷均为轴向, 由一个作动筒提供。其波形由微机产生 (见图 2), 经过 D/A

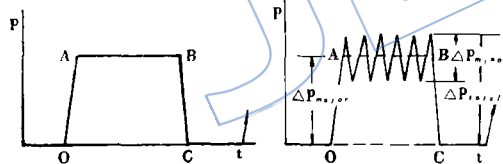


图2 低周及高、低周复合载荷

转换, 至伺服控制器, 控制伺服阀和作动筒, 获得所需载荷谱。同时, 由载荷传感器输出讯号, 经过动态应变仪至加法器, 与 CMC-80 的给定讯号比较, 构成闭合回路, 调节板簧组件的刚度, 使高频载荷获得适当的响应。高频载荷的频率受伺服阀的频响特性限制, 当频率小于 60 Hz 时, 实测讯号与控制讯号相同, 接近

100 Hz 时, 实测讯号有些衰减, 超过 110 Hz 时, 则衰减很大。若更换伺服阀, 有可能提高次循环的频率。

试验机建成后, 进行过 50 个高、低周复合疲劳试验, 取得数据见下节表 1。为了检验其工作可靠程度, 又用中心孔板试件在本试验机和 MTS

疲劳试验机上作比较试验, 结果如右。

两者试验结果 (就低频部分而言) 相当接近。

经过上述试验研究, 我们认为方案是可行的, 能初步满足高、低周复合疲劳试验的要

	寿命 N_f			平均值
本试验机	237	288	273	266.00
MTS 机	268	261	271	266.66

求, 结构简单, 能充分利用一般实验室的现有设备, 成本低廉, 与英国 INSTRON 的双回路控制方案比较, 我们的方案大为简化, 若采用特性较好的伺服阀, 其高频频率有可能达到 400-500Hz。但是, 若作长期试验时 (含高频载荷), 伺服阀的损耗可能较大。

三、LY12-CZ 铝合金高、低周复合疲劳

1984 年李俊等^[6]用 LY12-CZ 制的紧凑拉伸试件和中心孔板在室温下进行高、低周复合疲劳试验。加载波形如图 3 示。次循环频率 $f_2 = 10, 60, 100\text{Hz}$ 时, 拉保持时间 t_h 分别为 36, 6, 3.6s, 幅值比 Q 定义为 $Q = \Delta P_{\text{minor}} / \Delta P_{\text{major}}$ 。

试验过程中, 用 30 倍读数显微镜观察裂纹的萌生和扩展, 初始寿命统一定义在 0.2mm 裂纹长度, 寿命以低周循环的次数计算。

在高、低周复合疲劳试验机上试验结果见表 1。从试验结果发现:

1. 与纯低周疲劳比较, 叠加高周小幅值载荷后, 裂纹萌生寿命显著降低, 并且, 随着次循环频率 f_2 和幅值比 Q 的增大, 寿命下降更多。关于 Q 值增大导致寿命 N_i 下降, 比较容易理解, 因为最大载荷 $\left(P_{\text{max}} + \frac{1}{2} \Delta P_{\text{minor}} \right)$ 随 Q 而增大。频率 f_2 增大时, 每一主循环中的次循环数并不改变 (恒等于 360 次), 仅仅是次循环的加载速率增大, 即单位时间内输入较多的能量, 又由于此高频载荷是在高应力水平叠加于试件的, 故导致寿命下降。

2. 当次循环频率很低时 ($f_2 = 10\text{Hz}$), 寿命也下降。应注意, 此时主循环的拉保持时间延长了。文献^[6]认为可能由于蠕变的作用, 使寿命降低。但是, 在试验过程中发现,

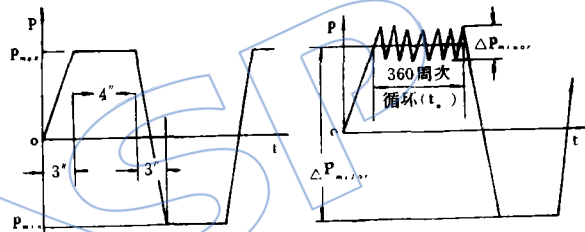


图 3 加载波形

表1 低周(LCF)及高低周复合疲劳量试验结果 (f_2 为高频, $\bar{N}_r$ 为平均剩余寿命)

No	试件	个数	P_{max} (kg)	P_{min} (kg)	f_2 (Hz)	Q	初始寿命 N_i (循环)	平均 $\bar{N}_i$	全寿命 N_f (循环)	平均 $\bar{N}_f$	$\bar{N}_r$
1	CT	3	1000	-1000	(LCF)		209, 165, 135	169	300, 211, 288	266	97
2	CT	5	1090	-1000	60	0.09	114, 115, 133, 152, 155	133	180, 182, 208, 196, 220	197	64
3	CT	3	1160	-1000	60	0.16	—, 73, 80	76	88, 120, 84	97	21
4	CT	2	1090	-1000	100	0.09	85, 57	71	108, 109	108	37
5	孔板	3	2200	-2200	(LCF)		139, 195, 202	178	237, 273, 288	266	88
6	孔板	3	2398	-2200	60	0.09	158, 150, 161	156	188, 256, 246	230	74
7	孔板	4	2442	-2200	100	0.11	93, 95, 91, 104	95	184, 169, 150, 162	163	68
8	孔板	3	2552	-2200	60	0.16	99, 81, 70	83	190, 125, 148	154	71
9	孔板	3	2486	-2200	100	0.13	71, 81, 89	80	111, 146, 122	126	46
10	孔板	4	2552	-2200	10	0.16	56, 68, 70, 46	60	82, 99, 77, 77	83	23

当次循环加载幅值恒定时, 试件缺口边缘的应变范围不变, 但峰、谷值却不断增大。此现象作者认为属于“棘轮”现象 (Ratchetting), 其寿命取决于“变形损伤” (Deformation Failure)。

3. 在试验中亦可看到, 随 f_2 和 Q 值增大剩余寿命 N_r 下降, 即裂纹扩展率提高。这问题在其他文献中又有较多论述, 在此不赘。

关于高、低周复合疲劳的寿命预测, 若沿用一般低周疲劳模型, 显然是不合理的, 因为没有包含复合疲劳的主要影响因素 (f_2 和 Q 值)。文献[3、6]均提出了经验公式, 但由于积累数据很少, 这些寿命模型尚有待研究。

对涡轮及压气机叶片榫头 (或盘上榫槽), 既经受低周疲劳 (或加上蠕变交互作用), 同时往往受到振动载荷, 根据目前研究结果表明, 高、低周复合疲劳 (或加上蠕变交互作用), 无论对裂纹萌生寿命或裂纹扩展的影响, 都是不可忽略的。由于试验设备的限制, 对于这种复合疲劳的试验研究 (无论在损伤机理, 损伤模型, 或在结构上的应用研究), 目前开展较少。因此, 解决试验手段, 实为当务之急。作者认为, 进口设备不仅价值昂贵, 又受外汇限制, 一般单位不易获得, 故独立自主地开展疲劳试验设备研究, 也是疲劳研究工作者的一项课题。

参 考 文 献

- [1] Venkiteswaran, P. K. et al, "Combined Creep-Fatigue Behavior of Inconel Alloy X-750", ASTM STP520, pp.462-472.
- [2] Powell, P. E. et al, "The Influence of Minor Cycles on LCF Crack Propagation" Int. J. Fatigue, Jan.1982.
- [3] 涂柏林等, "一种涡轮钢振动叠加低循环复合疲劳断裂特性研究——盘缘及叶根疲劳的模拟", 航空材料研究所研究报告, 1983.
- [4] 牛康民等, "高温合金高、低周复合疲劳寿命的研究", 第二届全国蠕变、高温疲劳会议。
- [5] Труфяков, В.Е.; "Проблемы Прочности", 1982, No.10 p.15.
- [6] 李俊, "高频低幅载荷与低频高幅载荷叠加作用下缺口件断口特征、机理及寿命预测", 西北工业大学, 硕士论文 (Part 4), 1985, 2。
- [7] Roberts, D.R., "Aerospace Materials and Structural Testing" The 48 Group Technical Exchange Programme Aerospace Seminar, Apr.1983.
- [8] 李俊, "利用普通加载平台设计液压伺服高、低频复合疲劳试验设备的可行性研究", 西北工业大学 硕士论文 (Part 1), 1985, 2。

temperature and to research heating and controlling techniques of temperature field. In this case, the surface of outer edge of the disk is wrapped with heating tape which is a polyester film coated by carbon. The temperatures of the model are measured with thermocouples EA2 embedded in the surface or indepth of the model, and are autocontrolled.

Secondly, the photothermoelastic experiment and theoretical calculation of a plane disk have been carried out. Both results of experiment and calculation are in good agreement. It is proved that the methods and techniques proposed can be useful for practice.

Thirdly, the photothermoelasticity model test of a turbine disk has been completed. The data of the test can be used as a reference for turbine disk design.

OPTIMUM DESIGN FOR PROFILE CONTOUR OF TURBINE DISK

Lin Xiurong

(Northwestern polytechnical University)

Abstract

A combined optimization method for searching the minimum disk weight and the best disk profile contour is provided which uses the random-walk method and the random-try method alternately. The whole disk profile contour can be linearized by linear segments, and thus the disk can be treated as a series of trapezoid-section ringlets. A subroutine for automatical generation of calculation sections is developed. Taking the disk weight as objective function, the geometric parameters and the axial thickness of the ringlets as design variables, and the five stress criteria as constraints, we applied the combined optimization method to a practical disk and obtained a feasible point within 5—7 minutes on an IBM-PC. After one hour calculation the disk weight has been reduced 12.22%. It is proved that this method increases convergence rate obviously.

HIGH- AND LOW-CYCLE COMBINED FATIGUE AND ITS TEST TECHNIQUE

Liang Guowei

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract

A simple combined fatigue test facility is introduced, which produces and controls high- and low-frequency combined load spectra by means of a closed circuit consisting of a microcomputer and a hydraulic servo unit. The minor-cycle frequency attains 100Hz with a force amplitude of about 500kg, but higher frequency (say, 400—500Hz) may be attained if a better servo unit be available.