

超声疲劳试验技术的应用

北京航空航天大学 倪金刚*

【摘要】 论述应用超声疲劳试验技术研究金属合金受高频(20000Hz)振动载荷下的疲劳寿命及裂纹扩展性能,研究材料受超声疲劳循环载荷的机械损伤和断裂机理。该试验技术应用于疲劳断裂研究领域具有省时、省力、省钱和无噪音等突出优点,并能很好地模拟航空发动机有关构件实际工作状态下的机械损伤模式。

主题词: 超声振动系统 疲劳强度 断裂机理

分类号: TB559 V 216 3

1 概述

航空发动机的关键构件涡轮盘和叶片,在飞机的一次起飞—执行任务—着陆的工作循环中,要承受一次低周的离心负荷、气动负荷和温度负荷的作用,同时还会承受由于振动引起的高周振动负荷的作用;这种高周振动负荷,虽然其应力幅很小,但是频率很高,可达数千赫兹,尤其是叠加在低周载荷上造成的复合损伤大大地加速了发动机构件的损坏,严重地威胁到发动机的工作安全和可靠性。所以国外在研究发动机构件的疲劳寿命中,特别重视振动负荷的影响,也很重视复合疲劳寿命问题的研究。

应用常规疲劳试验技术模拟发动机涡轮盘和叶片的机械损伤存在以下问题。首先是高周振动载荷频率不够高,高一低周复合疲劳试验设备的高周载荷频率一般不足一百赫兹,离发动机涡轮盘、叶片实际承受的高频振动载荷频率相差太远。再就是由于发动机构件在实际工况下,常常承受达 10^9 次循环的弹性疲劳载荷,这时如应用常规试验技术,假设其加载频率为 100Hz,完成一个 10^9 次循环的疲劳寿命试验需要连续运行 115 天,而建立一条应力—寿命(S—N)曲线不仅费时、费力、费钱,甚至是不可能的。

1950 年 Mason^[1]应用压电晶体和电磁共振技术使振动频率达到 20000Hz,开辟了超声振动技术在断裂力学研究领域的新阵地。最近二十年这一试验技术在欧美各航空大国得到迅速发展,研究领域也逐渐拓宽,并引起各国航空航天界的普遍重视。应用这一试验技术,完成 10^9 次循环的疲劳寿命试验仅需 14 小时。另外,应用超声疲劳技术确定裂纹扩展速率与应力强度因子的关系($\Delta K - da/dN$)以及应力强度因子门槛值 ΔK_{th} ,取得了重大的突破性进展。事实上,应用常规疲劳试验机($f < 100$ Hz)研究 ΔK 与 da/dN 的关系和 ΔK_{th} 值不仅费时、费力、费钱,而且当 da/dN 小于 10^{-8} mm/cycle时,将十分困难。众所周知,对每一种材料都存在一个门槛值 ΔK_{th} ,小于该值时,裂纹在一定循环数下不扩展,但这一循环数在工程上从来没有确切

地给出定义, 原因就是因为没有适当的试验手段。应用超声疲劳试验技术, 振动频率高达 20000 Hz, 裂纹扩展速率可以很容易达到 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ mm/cycle}$ 。

本文简要综述超声疲劳试验技术的理论基础、工作原理和获得的部分试验结果。并阐述几种合金材料在超声振动载荷下的损伤断裂机理。

2 试件设计及试验机工作原理

用于研究材料超声疲劳寿命的试件设计成图 1(a) 所示形状, 其两端为柱体, 中间为悬链状; 疲劳裂纹扩展试件设计成两端方板, 中间为指数剖面, 单侧边开缺口, 便于裂纹起裂及定位跟踪(图 1b)。

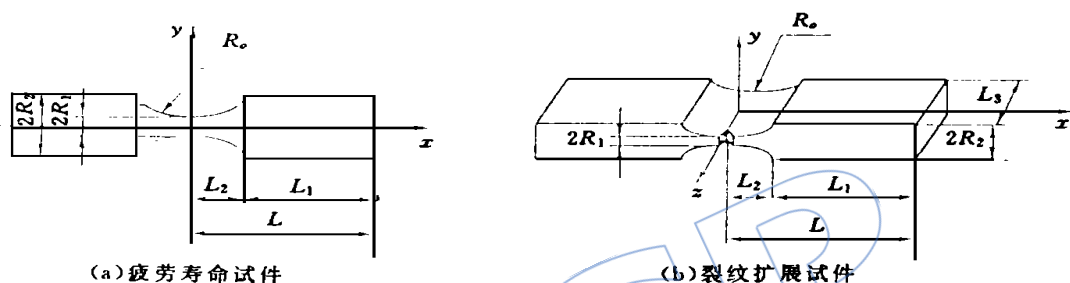


图 1 超声疲劳试件设计计算图

图 2 示出根据 Mason 原型机设计而研制发展的超声疲劳试验机结构图及部分测试仪器布局^[2,3]。

超声疲劳试验机主要由以下 4 个部分组成: (a) 功率放大器及能源转化器, 将常用的 50 Hz 电压转化为 20000 Hz 的高频电能, 输入到 (b) 压电晶体或电磁振子, 将 20000 Hz 的电压信号转化为 20000 Hz 的机械振动; 这一振动信号经 (c) 一级能量集中放大传到 (d) 试件上。

整个振动系统经过计算与调试, 使试件本身呈第一阶纵向半波长固有振动, 中间截面为位移节点, 应力峰值; 端部应力为零, 位移最大; 应用位移传感器测量试件端部位移循环幅值, 进而计算中间截面的应力。另外可以在试件中间截面粘贴微型动态应变计直接测量应变循环幅值, 用以验证计算结果。对于疲劳裂纹扩展实验, 应用摄像记录监测系统, 将试件表面裂纹处放大 150 倍, 通过录相投影到图像监视屏幕上, 同时记录振幅、裂纹长度及其随循环数的变化, 得到裂纹扩展速度 da/dN 与应力集中因子 ΔK 的关系。

为了实现在低周高应力循环上叠加高周超声疲

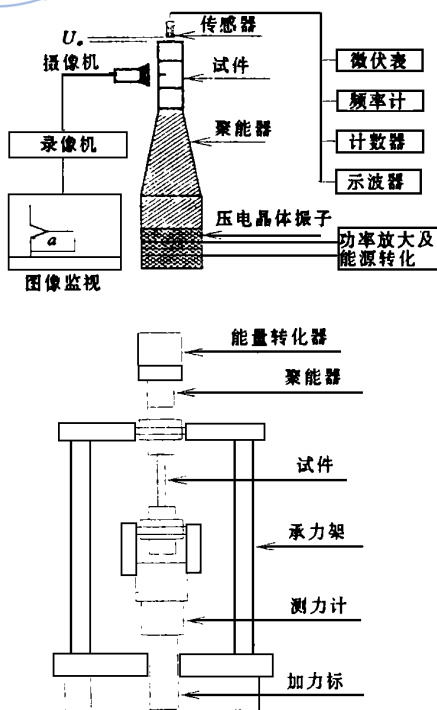


图 2 超声疲劳试验原理及测试设备布局

劳载荷, 可将超声疲劳机与常规液压疲劳机组合, 使低周载荷加力点落在超声共振系统的两个位移节点上, 从而保证系统的正常运转, 由计算机实现高一低周复合加载的匹配(见图 2)。

3 试验结果与讨论

3.1 应力—寿命(S-N)试验

对钛合金 TA6V4, 镍基合金 Udimet500 和镍铬铜合金 17-4PH 进行了常温下超声疲劳及常规频率下的应力—寿命(S-N)试验, 结果汇于图 3。

由以上试验结果看到, TA6V4 的超声疲劳强度明显高于常规频率下的疲劳强度; 17-4PH 也表现出类似的趋势, 在相同的应力循环下, 超声寿命高于常规试验频率下的寿命; 而对于 Udimet500, 两种频率下得到的 S-N 曲线基本一致。

上述现象可以从以下几个方面分析。首先超声疲劳载荷可以看成是控制应变的疲劳循环^[4]。Manson 等^[5]研究了金属及合金的疲劳规律, 认为, 当材料的极限抗拉强度 σ_u 与 0.2% 条件屈服强度 σ_y 之比值小于 1.2 时, 材料发生疲劳循环软化, 控制应变为常量时应力下降; 而当这一比值大于 1.4 时, 材料将发生疲劳循环硬化, 应变恒定, 循环应力渐增。分析结果表明, 17-4PH 和 TA6V4 两种材料的 $\sigma_u/\sigma_y < 1.2$, 而对于 Udimet500, $\sigma_u/\sigma_y > 1.4$ 。

当然, 由于各种材料对不同频率激励的高频响应特性不同, 而超声振动疲劳特性则由于振动频率太高, 材料的破坏失效机理则与常规疲劳载荷下有差别, 尚需更充分的试验分析研究才能得到具有普遍意义上的结论。我们用扫描电镜对试样断口做了观察分析, 结果表明^[3,4], 超声疲劳载荷下裂纹通常由试件表面某一点处或表皮底下某处材料缺陷起裂, 然后呈扇形向四周扩展, 疲劳条纹带完整地排列, 对所研究的 3 种材料, 裂纹穿晶扩展, 断口表面的擦伤及颈缩效应很小, 尽管此时应力比为 $R = -1$ 。

另外, 由于超声疲劳循环频率很高, 相应的变形速度 $d\epsilon/dt$ 也很大, 以至疲劳寿命的绝大部分将用于试件裂纹的起裂, 而裂纹扩展阶段所占的寿命相对很小。

3.2 裂纹扩展(ΔK - da/dN)性能试验

对 4 种合金材料—镍基合金 A stroloy (类似于 Udimet700); 镍铬铜合金 17-4PH, 钛合金 TA6V4 以及铝锂合金 AL-Li8090 进行了超声疲劳载荷及常规频率下的裂纹扩展性能试验研究, 结果和讨论已发表在文献[6]。结果表明, 超声振动载荷下 4 种合金材料表现出的性能与常规试验中 $R = 0.7$ 时基本符合。

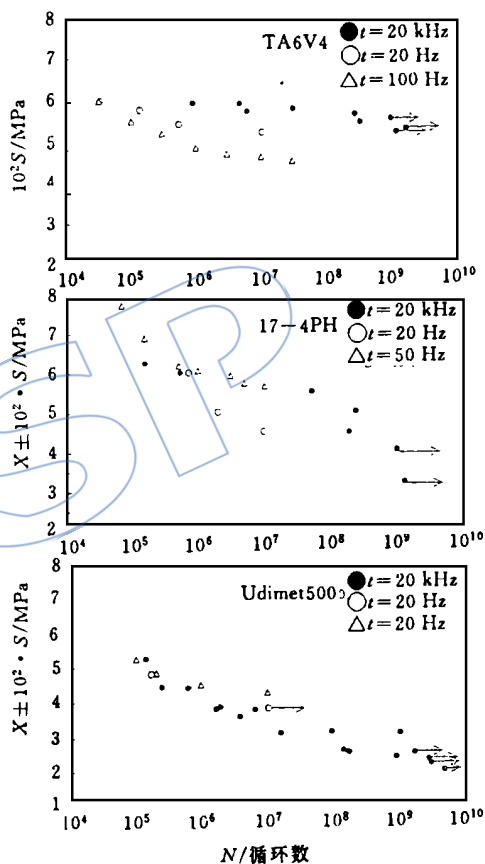


图 3 超声疲劳与常规频率下应力—寿命试验结果

4 结 论

应用超声共振技术,研究合金材料的疲劳寿命和裂纹扩展性能,能够较好地模拟飞机发动机上有关构件实际工作状态下的机械损伤,并具有省时、省力、省钱和无噪音危害等突出优点。试验研究结果表明:

(1) 几种合金对超声疲劳载荷的响应不一致,TA 6V 4 超声振动性能最好,17-4PH 次之,U dim et500 更次。这是由于每种合金的机械性能和超声振动品质的区别而造成的。

(2) 疲劳裂纹扩展试验结果表明,超声疲劳下($f = 20000 \text{ Hz}$, $R = -1$)裂纹扩展性能与常规频率($f = 20 \text{ Hz}$)下载荷比为 $R = 0.7$ 的情况类同。根据这一结果我们认为: (a) 超声疲劳载荷下裂纹尖端的闭合效应较弱,塑性较小; (b) 超声疲劳载荷下裂纹扩展机理与常规试验中无裂纹闭合情况类同。超声疲劳载荷下确定的应力强度因子 ΔK 与常规试验中确定的应力强度因子有效值 ΔK_{eff} 具有类同的意义。

(3) 试件在超声疲劳载荷作用下做纵向固有振动,变形速率大,对疲劳裂纹的起裂和扩展性能起主导作用;材料的机械性能和对超声激励的响应决定其超声疲劳循环寿命,材料在超声疲劳载荷作用下具有特定的损伤断裂机理。

参 考 文 献

- 1 Mason W P. Piezoelectric Crystals and Their Applications Van Nostrand, New York U SA, 1950: p. 61
- 2 Ni Jingang, Bathias C. Development of an Ultrasonic Fatigue Device and its Application in Fatigue Behavior Studies 10th Int Conf on Exp. Mech., Lisbon Portugal, July, 1994
- 3 Ni Jingang. Study on the Mechanical Behaviors and Damage Mechanisms of Alloys under Ultrasonic Fatigue Loading: [Ph. D Thesis]. CNAM Paris France, 1991
- 4 Bathias C, Ni Jingang. Study of Lifetime Behavior of Alloys in Ultrasonic Fatigue Testing ASTM E-9, 2nd Symposium, Pittsburgh, U SA 1992
- 5 Smith R W, Hirschberg M H, Manson S S. Fatigue Behavior of Materials under Strain Cycling in Low and Intermediate Life Range NASA TND-1574, 1963
- 6 倪金刚 超声振动载荷下合金的疲劳裂纹扩展性能研究 航空动力学报, 1994, 9(3): 298

(责任编辑 王震华)

Key words Composite material Load calculation Crack propagation

DEFORMATION AND STRESS ANALYSIS OF RUBBER O- RING

Ren Quanbin, Chen Ruxun, Yang Weiguo

(Shaanxi Power Machinery Institute, Xi'an 710000)

ABSTRACT

A model of multilateral frictional contact problem of two objects with far different stiffness was established. In addition, a stress relax model of rubber-like material was developed according to the poly-dimension stress creep theory. On the basis of the above models, the deformation and contact stress of the rubber O-ring was calculated by using a finite element method approaching large strain in ref. [1]. Some useful conclusions can serve as trustworthy principles for rubber O-ring design.

Key words Contact problems Stress relaxation Seal elements

APPLICATION OF ULTRASONIC FATIGUE TESTING TECHNIQUE

Ni Jingang

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

This paper deals with the application of ultrasonic fatigue testing technique to the study of fatigue life and fatigue crack growth behavior of metals and alloys under vibrational excitation at high frequency (20kHz). The mechanical damage and fracture mechanism of materials were investigated in the case of ultrasonic fatigue cycles. This testing technique has remarkable advantages in time-saving, economy and noiselessness and capability for investigating mechanical damage models of aeroengine and rocket structures in real service.

Key words Ultrasonic vibration systems Mechanism of fracture Fatigue strength

DYNAMIC PROCESS MODELLING IN ROCKET ENGINE WITH NEURAL NETWORKS

Cui Dingjun, Yang Erfu, Zhang Zhengpeng, Liu Guoqiu

(College of Space Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

According to principles of neural networks and BP algorithm, the relationship between the neural networks and nonlinear modelling is analyzed. A general idea and a basic method for modelling with neural networks are put forward on the basis of the study of dynamic process in liquid rocket engine was formulated. Then a new modelling approach to researching the parameters of the engine was formulated. An example given in this paper shows that the application of the neural networks to the investigation of the dynamic process in the liquid rocket engine is a great success.

Key words Neural networks Nonlinear Liquid rocket engines