

滚压钛合金导管振动疲劳特性分析

Vibration Fatigue Properties Analysis of Titanium Alloy Tubes Connected by Rolling

中航工业中国飞机强度研究所 邵 闯 李益莹
 中航工业沈阳发动机设计研究所 邱明星
 中航工业北京航空制造工程研究所 吴 为

[摘要] 按照振动疲劳试验方法和失效准则进行了滚压连接形式的钛合金导管振动疲劳极限寿命测试,利用激光位移传感器测试自由端位移,用电阻应变计测定了试件根部的应变,根据位移和应变响应谱确定试件第一阶频率,并进行定频振动疲劳极限测试。预试验发现,试件第一阶响应频率随载荷增加发生明显下降(超过1%)。为满足产品定寿要求,采用递进式扫频试验,消除滚压试件的连接间隙,直至试件频率响应稳定,再进行定频振动疲劳试验。通过此次测试得到滚压连接的钛合金导管在 2×10^7 循环基数,可靠度为95%时的振动疲劳极限为115MPa。

关键词: 振动疲劳 疲劳极限 扫频 定频

[ABSTRACT] The fatigue limit testing of titanium alloy tubes connected by rolling is carried out according to the vibration fatigue test method and the failure rule. The amplitude of the free end of the specimen and the boot strain of the specimen are measured. The sine-fixed-frequency method is used to do the vibration fatigue limit test. Because of the effects of rolling connected properties, the first resonance frequency declines obviously (exceeding 1%). In order to define the lives of the rolling tubes, the stair method of sweep test is used to remove the effect of connection gap, and then the vibration fatigue of every specimen is tested at the last resonance frequency. The testing results show that the vibration fatigue limit of the rolling tube is 115MPa at 2×10^7 cycles under 95% reliability.

Keywords: Vibration fatigue Fatigue limit Sweep-frequency Fixed-frequency

连接管件广泛用于航空航天、交通运输、石油化工、电力系统、管道工程等领域的气体、液体输送管路,在金属结构中的应用也十分广泛。随着对管件的高减重效果和高耐压力的要求不断提高,导管内径滚压连接技术应用于飞机发动机液压管路中薄壁高强钛合金导管的

连接成形,以适应新一代飞机和发动机液压管路系统轻量化、长寿命和高可靠性的需求。为适应技术在发动机钛合金导管中使用安全的需求,依据试验标准^[1],对滚压钛合金管路试件进行振动疲劳极限测定,以期确定管路在发动机整机状态动应力的限制值提供设计依据。

1 试件动响应的有限元分析

1.1 导管内径滚压连接成形过程

通过周向滚动的滚柱径向施加力的作用将管壁材料压入带槽的管套,从而使导管和管套实现连接,见图1。连接成形时首先是芯轴旋转,在摩擦力作用下驱动滚柱边自转边沿管坯内壁周向滚动,保持架又在滚柱的带动下随动,同时芯轴沿轴向不断送进,使滚柱径向进给,导管材料在滚压力作用下嵌入管套凹槽^[2]。

1.2 有限元分析

钛管材料参数:弹性模量 106GPa,密度 4.47kg/m^3 ,泊松比 0.39。建立钛合金导管有限元模型时,忽略导管与管套连接处的连接特性,做一体化处理,在管套被固定条件下进行有限元的模态分析:

(1) 钛管一阶弯曲频率为 200Hz;

(2) 在 Y 方向施加 200Hz、1g 的定频激励载荷,获得钛管试件自由端位移峰峰值为 3mm。

有限元获得的模态、响应结果将作为试验施加初始载荷的依据。

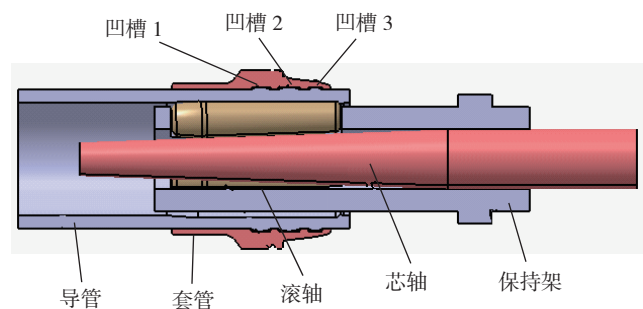


图1 内径滚压连接成形原理

Fig.1 Forming principle of internal rolling connection

2 测试

2.1 测试要求

(1) 用正弦扫频试验法确定钛管试验件的第一阶弯曲频率;

(2) 在试件第一阶弯曲频率点进行定频振动疲劳试验;

(3) 采用“升降法”进行疲劳极限测定。

2.1.1 疲劳极限和破坏的定义

滚压钛合金导管在第一阶弯曲振动下的振动疲劳极限 σ_{-1} 定义为 2×10^7 次循环下的疲劳强度。进行单个试件振动疲劳极限疲劳试验时,当试件任何部位产生裂纹或频率下降 1%^[1] 或循环数超过 2×10^7 时停止试验。

2.1.2 试验状态

在室温条件下,采用与发动机外部管路的制造工艺相同的专用试件、试验夹具和安装方式,利用电磁振动台试验系统、动态应变仪及激光测振仪,形成如图 2 所示测试系统进行钛合金导管试件的振动疲劳极限测试。

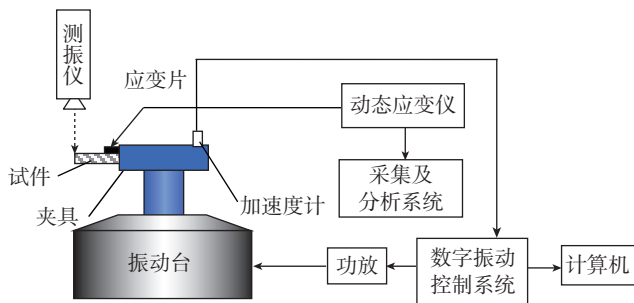


图2 振动疲劳测试设备示意图

Fig.2 Schematic of the test set-up of vibration fatigue

2.1.3 破坏模式及振动响应监测

在试件达到稳定的振动试验状态后,通过肉眼观察破坏现象或试件第一阶固有频率相对于试验开始时下降 1% 现象。采用加速度计、应变片和激光位移传感器监测试件的应变和振幅响应,选择和控制输入振动水平以产生预先确定的应力水平。采用激光位移传感器控制的目的在于应变片失效后,仍可实现钛合金导管的响应测试以保证试验过程中应力水平不变。

2.2 测试试验

2.2.1 测试方法

根据解析和有限元分析结果,先进行正弦扫频试验预试验,依据应变和激光位移的响应谱图确定共振频率点;以激光位移传感器进行钛管自由端的位移量作为控制参数,采用闭环控制方法进行定频振动疲劳试验^[3]。

2.2.2 预试验

通过 2~4 个试件进行预试验,确定一阶弯曲频率和

基本破坏模式。

(1) 扫频试验:以不大于 0.1oct/min 速率在 190~210Hz 范围内采用低量级正弦扫频试验谱对每个试件进行扫频试验,确定滚压导管的第一阶弯曲固有频率 f_1 ;

(2) 考虑到滚压钛管的加工特点,采用正弦扫频的振动时效法,在 $f_1 \pm 5\text{Hz}$ 之间不断增加扫频试验量值消除试件的滚压连接,直至确定试件的稳定共振频率 f_1' (图 3、图 4),并获得激光测点峰-峰位移值 6mm (折合最大应力点应力为 120MPa) 为滚压试件的振动疲劳试验初始应力值。

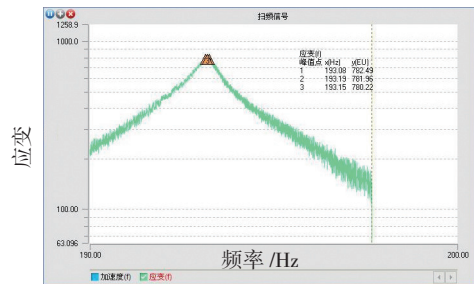


图3 应变响应频谱图

Fig.3 Strain response spectrum

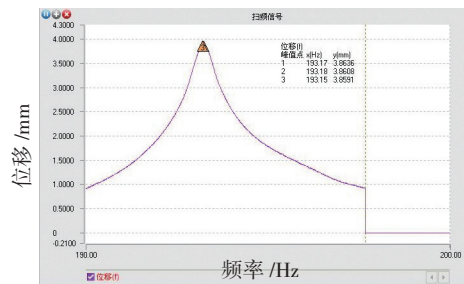


图4 位移响应频谱图

Fig.4 Displacement response spectrum

(3) 以 f_1' 为激振频率,利用钛管根部应变计监控根部应力,调整激振力,使其达到 0.5 倍静力极限拉伸强度,在此状态下进行振动疲劳试验,记录试验频率和破坏时间。

2.2.3 疲劳强度极限的测试

按下列步骤进行每一个试件的正式振动疲劳试验:

(1) 递进式台阶法正弦扫频试验,直至位置测试值接近起始点,确定初始激振频率,同时测量应变和位移;

(2) 依据升降法进行振动疲劳极限测试:若上个试件发生破坏(稳定后频率下降 1%),下一个试件应力水平降低 $\Delta\sigma$ 进行振动疲劳试验;若在规定寿命期内未破坏,下一个试件应力水平增加 $\Delta\sigma$ 进行试验,直至完成所用试件振动疲劳试验。应力级差 $\Delta\sigma$ 取为 $5\%\sigma_{-1}$ 。

2.3 结果处理

2.3.1 振动疲劳极限测试结果

试验测试结果升降图如图5所示。采用配对法得出的疲劳极限数据作为疲劳极限的数据点进行统计处理,即可得出疲劳极限的平均值 S_{-1} ,计算公式如下:

$$S_{-1} = \frac{1}{n'} \sum S_{-1} n'_i = 123.7\text{MPa} \quad (1)$$

其中, n' 为对子总数, $n' = \sum n'_i$ 。

2.3.2 应力统计结果

疲劳极限应力 $\sigma_{-1}=123.738\text{MPa}$;方差 $S^2=25.54$;变异系数 $C_v=4.08\%$,可靠度为95%时,振动疲劳极限应力约为115MPa。

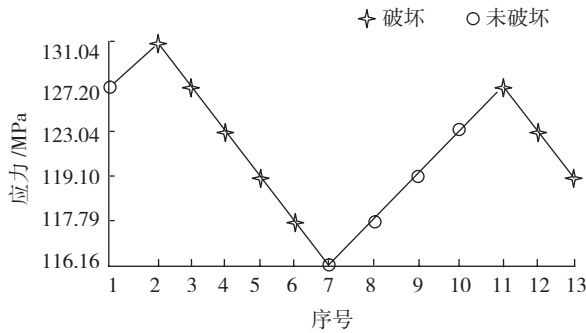


图5 测试结果升降图

Fig.5 Up-and-down map of testing results

3 分析与讨论

3.1 加工工艺质量的影响

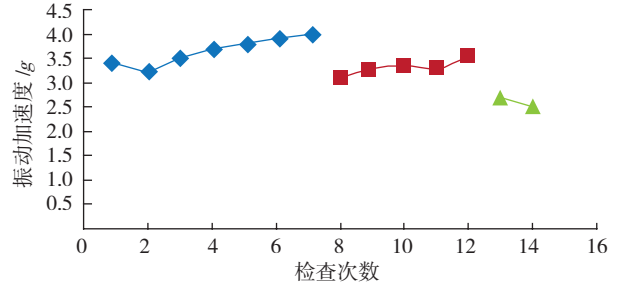
导管试件悬臂段通过滚压方式与管套连接,由于套管和导管均存在一定的加工误差和材料的组织不均匀等多种原因,不同试件的一阶响应频率存在一定差别,导致在位移变形一致的情况下激振载荷不同,表明在试件结构尺寸完全相同的情况下连接刚度有很大的不同^[4](图6中曲线不连续为试验中停机检测而造成内应力释放的表现),也造成了振动疲劳极限中测试数据成组性较差。

3.2 连接刚度的影响

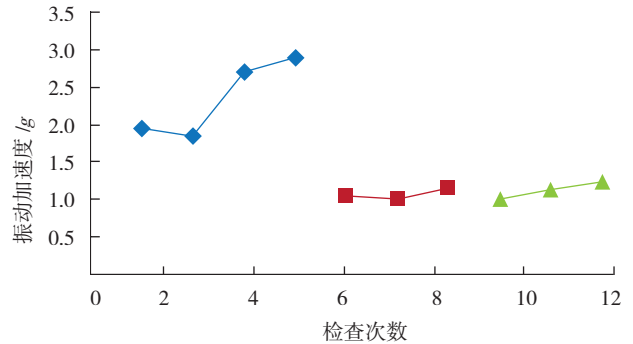
由于导管与套管的滚压连接处存在挤压变形^[2],同时套管和导管存在机械加工误差,使试件的导管与套管四周滚压连接的接触边界条件存在差异。根据文献[5]在对机械结合部动态刚度研究中提出的机械结合部可通过一组线性弹簧和阻尼器进行处理的方法(图7),可将整体滚压钛管试件结构划分为导管、管套和滚压区3部分,其中 b_1, \dots, b_n 表示 n 个结合部,是由于管套内壁圆周范围内凹槽中挤压区的力学性能不完全一致,从而形成的沿管壁四周结合部的 n 个弹簧和阻尼器单元。正是由于弹簧和阻尼器单元的个数、数值不同,造成了试件之间的频率测量值的差异(见表1)。

3.3 振动失效准则的影响

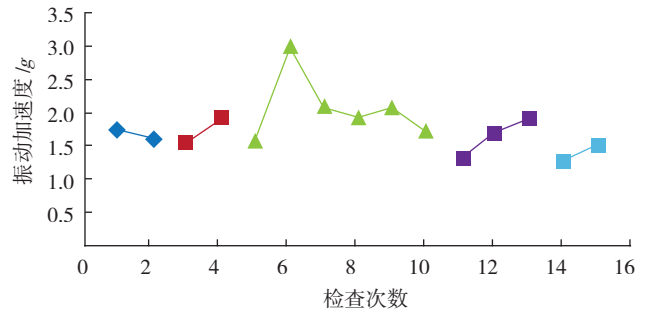
若试件未进行预试验中项规定的扫频预试验,在正



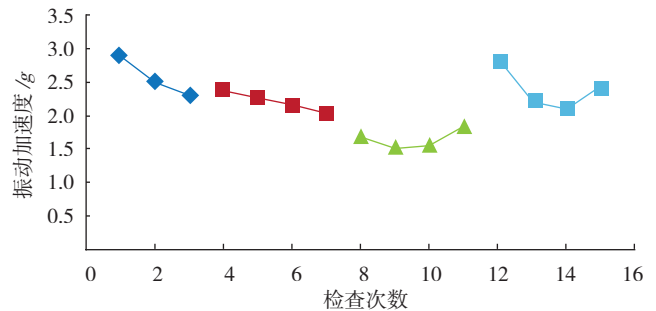
(a) 12号试件(6mm)



(b) 19号试件(5mm)



(c) 21号试件(5.4mm)



(d) 22号试件(5.7mm)

图6 试件的频率变化

Fig.6 Frequency changes of specimens

表1 试件的一阶频率测量值

试件号	12#	13#	15#	17#	19#	20#	21#	22#	24#	25#	计算值
一阶频率/Hz	199.6	196.8	193.9	192.1	197.3	200.4	200.6	199.9	194.9	192.5	200

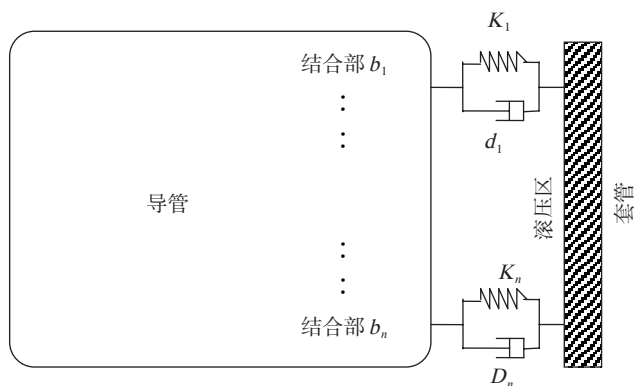


图7 悬臂梁模型

Fig.7 Cantilever-beam model

式试验初期共振频率会发生快速下降,容易根据试验标准判定试件失效,使得试验测试无法进行下去。

采用了逐渐增加量级(低于正式测试时的量级)的振动预试验,可以使试件滚压连接处得到充分锻炼,进而使得导管和套管之间的滚压连接区变得更加紧密和稳定。

经过预试验的试件依据频率下降1%为失效准则完成了振动疲劳极限测定,但对其功能是否失效,需通过金相分析、充压检查才能确定。

4 结论

通过焊滚压钛合金管振动疲劳试验研究,得到:

(1) 在 2×10^7 循环基数下,可靠度为95%的滚压导管振动疲劳极限为115MPa;

(2) 由于滚压区连接的不稳定性导致受试的滚压导管的动力学特性不一致,使得试验数据的成对性较低,在进行解析时应将滚压导管连接点处理成工程弹性边界;

(3) 对于具有连接特征的发动机结构部件,应探讨具体结构的失效准则,以提高产品的使用机率;

(4) 采用振动失效的方法使滚压连接处得到锻炼,可确保滚压连接刚度性能的稳定。

参考文献

- [1] 北京航空材料研究院,发动机叶片及材料振动疲劳试验方法.北京:中华人民共和国航空工业部,1984.
- [2] 张荣霞,吴为,曾元松,等.钛合金导管内径滚压连接数值模拟与试验研究.航空制造技术,2011(16):90-93.
- [3] 邵闯,邱明星.金属连接导管振动疲劳极限测试方法研究.实验力学,2013,28(3):403-408.
- [4] 李益萱,邵闯,张治君,等.振动环境中钛合金导管的连接特性试验研究.振动工程学报,2012,25(S):237-240.
- [5] 李玲,蔡力钢,郭铁能,等.机械结合部动态刚度辨识与实验研究.振动工程学报,2012,25(5):488-496.

(责编 深蓝)

(上接第97页)

3 管线反求建模试验

为了验证文中提出的算法,采用Atos三维光学扫描仪对某型号发动机管线进行了测量,获得100万个采样点的点云数据,利用本文提出的算法进行平面和圆柱面检测。为了避免过度分割,对Hough变换的参数空间进行了约束处理:参与Hough运算的最小点集数量为2000个,距离阈值为1mm,角度阈值为10rad。一个圆柱面表面采样率至少为30%、采样点数最小为80个,圆柱半径取值区间为[4mm,150mm],圆柱长度取值区间为[10mm,100mm]。通过测试大约55%~60%的点被自动检测出所属平面和圆柱面特征,其余为发动机管线其它特征所属点集。平面和圆柱面是航空发动机管线的常见特征,利用Hough变换实现平面和圆柱面特征的自动提取有利于提高航空发动机管线的重建效率。

4 结论

本文基于反求工程和Hough变换技术,系统地探讨了航空发动机管线三维反求建模方法,提出了基于Hough变换的管线平面、圆柱面特征的识别提取方法,最后基于约束求解模型对管线进行了CSG拟合重建,为航空发动机管线的数字化建模奠定了理论基础。本文所提出方法已经应用于某些航空发动机管线的数字化建模,并取得了良好的效果。

参考文献

- [1] 孔瑞莲.航空发动机可靠性工程.北京:航空工业出版社,1996.
- [2] 陈志英.面向并行工程的航空发动机外部系统设计研究[D].北京:北京航空航天大学,2003.
- [3] 扈震,徐狮.地下管网设施三维精细化模拟技术研究.中国给水排水,2012,28(17):68-72.
- [4] 罗凌燕,贺军政,李育东.城市地下管线三维快速建模技术研究及应用.测绘通报,2012(9):87-89.
- [5] 郝思宝,何春林,杨红军.基于三维激光扫描的工业管线测量应用研究.测绘与空间地理信息,2013,36(7):60-63.
- [6] 耿欣,曲兴华,江炜,等.大型管道快速测量与建模技术研究及应用.仪器仪表学报,2013,34(2):338-343.
- [7] Lee I K, Kim K J. Shrinking: another method for surface reconstruction//Proceedings of Geometric Modeling and Processing. Beijing: IEEE Computer Society, 2004:259-266.
- [8] Goulette F. Automatic CAD modeling of industrial pipes from range images//Proceedings first international conference on recent advances in 3D digital imaging and modeling. Ottawa: IEEE, Piscataway, NJ, United States, 1997:229-233.
- [9] 邱启荣.矩阵论与数值分析:理论及其工程应用.北京:清华大学出版社,2013.
- [10] 程鹏.复杂背景下的圆形识别技术研究[D].南京:南京大学,2013.

(责编 深蓝)