

微动垫夹持刚度对微动疲劳寿命的影响分析

文长龙, 崔海涛, 董磊

(南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 以单卡头式微动疲劳试验装置为对象, 设计了不同微动垫夹持型式的微动疲劳试验装置, 建立了两种试验装置的物理模型, 结合理论分析和有限元数值仿真, 从微动垫夹持刚度的角度分析了影响微动疲劳寿命的主要因素, 并进行了试验对比验证。结果表明: 夹持刚度的减小对 SWT (Smith-Watson-Topper) 微动疲劳损伤参量的最大值及位置影响较小, 且使其在接触区域的分布趋于对称, 可显著地降低相对滑移幅值, 进而减小微动疲劳过程中的磨损程度; 与夹持刚度较大的试验装置相比, 夹持刚度较小的试验装置测试得到的微动疲劳试验寿命较长。

关 键 词: 微动疲劳; 夹持刚度; SWT (Smith-Watson-Topper) 损伤参量; 相对滑移幅值; 疲劳寿命
中图分类号: V231.95 **文献标志码:** A

Analysis on effect of contact pad gripping rigidity on fretting fatigue life

WEN Changlong, CUI Haitao, DONG Lei

(Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An apparatus with different contact pad gripping rigidity was designed on the basis of single clamp fretting fatigue apparatus. The mechanical models of two apparatuses were developed. By the investigation of the experimental results and numerical analysis, the effect of contact pad gripping rigidity on fretting fatigue damage was discussed. Results indicate that, with the decrease of the contact pad gripping rigidity, the maximum SWT (Smith-Watson-Topper) fatigue parameter value remains almost the same and tends to have a symmetrical distribution over contact interface. As a result, the relative slip amplitude and fretting wear decrease correspondingly; the smaller contact pad gripping rigidity of the apparatus means the longer fretting fatigue life.

Key words: fretting fatigue; gripping rigidity; SWT (Smith-Watson-Topper) fatigue parameter; relative slip amplitude; fatigue life

微动疲劳损伤广泛存在于结构连接件中, 能显著降低结构疲劳寿命, 甚至可达 30% 以上。研究表明^[1], 相对滑移幅值、摩擦因数和接触压力等 50 多个因素影响微动疲劳损伤。为了测试连接

结构的微动疲劳寿命, 研究者针对具体问题设计了不同的微动疲劳试验装置。微动疲劳试验装置按性质可分为工程实际构件和简化模型两类^[2]; 按试验加载装配方式可分为桥式、单卡头式和爪

收稿日期: 2016-01-23

基金项目: 航空科学基金(20151052018)

作者简介: 文长龙(1991—), 男, 硕士生, 主要从事结构疲劳研究。

引用格式: 文长龙, 崔海涛, 董磊. 微动垫夹持刚度对微动疲劳寿命的影响分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(9): 2238-2242. WEN Changlong, CUI Haitao, DONG Lei. Analysis on effect of contact pad gripping rigidity on fretting fatigue life[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(9): 2238-2242.

式 3 类^[3]。由于可以更好地对不同参量进行控制,简化模型类的单卡头式微动疲劳试验装置越来越受到研究者的青睐。Walvekar 等^[4]以单轴疲劳试验机为基础,通过与试验机立柱相连的夹具提供法向载荷并完全限制微动垫竖直方向的运动,使得微动垫夹持刚度为无穷大。石炜^[5]通过将微动垫夹持器置于与立柱相连的厚底板上达到同样的目的。根特大学的 Soete 实验室^[6]通过将微动垫与弹簧单元相连接,接触区域的摩擦力作用在微动垫上导致弹簧变形,微动垫在竖直方向产生滑移,通过调节弹簧刚度一定程度上控制了微动垫滑移值。

从上述分析可见,截至目前还未形成统一的标准微动疲劳试验平台。美国材料与试验协会 2015 年通过的《微动疲劳试验标准指南》^[7]也只是对目前存在的微动疲劳试验进行了总结,定义了相关术语。由于缺少试验标准,不同试验装置对工程实际结构的微动损伤环境符合程度亦不易评估。因此,本文尝试从微动垫夹持刚度的角度,研究不同横向加载设备对微动疲劳寿命的影响,以期微动疲劳试验装置标准的建立以及更好地研究微动疲劳问题提供参考。

1 不同微动垫夹持刚度试验装置

图 1 给出了微动垫简支约束型式的微动疲劳试验装置物理模型示意图。文献[5]采用该型试验装置完成了航空发动机榫连接结构简化模型的微动疲劳试验。作者通过将微动垫夹持器置于厚底板上,厚底板与单轴疲劳试验机立柱相连,微动垫和微动试件之间的微动靠试件承受轴向载荷后变形产生。试验载荷为拉-拉疲劳,整个循环载荷

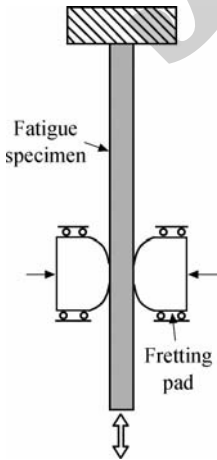


图 1 装置 A 微动疲劳试验装置示意图

Fig. 1 Fretting fatigue test apparatus configuration of apparatus A

作用过程中微动垫承受竖直向下的接触剪切力 Q 作用,因此厚底板能够完全限制微动垫竖直方向的运动,可以认为微动垫夹持刚度为无穷大,即微动垫夹持处是简支约束,以下简称装置 A。

文献[5]共进行了 9 种工况下的 TC11 微动疲劳试验,应力比为 0.1,部分试验结果如表 1 所示。裂纹萌生位置为裂纹萌生处到初始接触区域中心的距离,可以发现试验结果中裂纹萌生位置都出现在接触区域边缘靠近试验机下夹头一侧,是典型的微动疲劳破坏现象。

表 1 装置 A 微动疲劳寿命试验结果^[5]

Table 1 Result of fretting fatigue life test of apparatus A^[5]

工况编号	法向应力/ MPa	轴向应力/ MPa	裂纹萌生 位置/mm	试验寿命/ 循环
TC_1	65.45	200	2.58	172997
TC_2	65.45	300	2.58	26002
TC_3	65.45	400	2.54	25065

为了研究微动垫夹持刚度的影响,本文自行设计了微动垫夹持装置如图 2 所示,该装置对微动垫竖直方向的运动进行一定程度的限制,试验装置整体示意图如图 3,简称装置 B。将微动垫置于滑块中形成过盈配合,通过锁紧盖板将滑块固定于水平槽中。试件承受轴向载荷接触区域竖直方向变形量为 δ_s ,微动接触区域产生的循环剪切力 Q 使微动垫整体跟随微动试件有竖直方向的位移 δ_c ,相对滑移量为 $\delta_s - \delta_c$ 。由此可见,该装置微动垫夹持刚度较装置 A 小,相当于刚度为 K 的弹簧与微动垫整体相连。当微动试件 δ_s 一样时,由于 δ_c 的存在,使得相对滑移幅值减小,甚至使微动疲劳接触区由完全滑移转为局部滑移。装置 B 的物理模型示意图如图 4 所示。

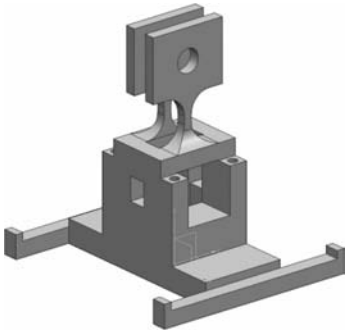


图 2 装置 B 微动疲劳试验夹具图

Fig. 2 Fretting fatigue test clamp diagram of apparatus B

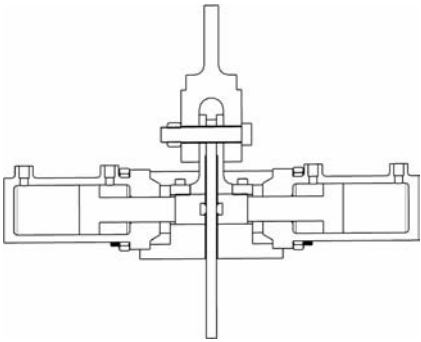


图 3 微动疲劳试验装置简图(装置 B)

Fig. 3 Fretting fatigue test apparatus sketch (apparatus B)

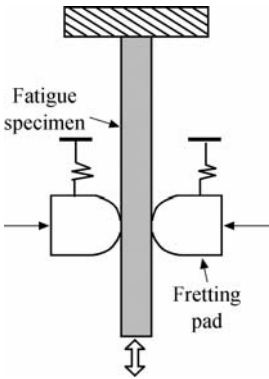


图 4 微动疲劳试验装置示意图(装置 B)

Fig. 4 Fretting fatigue test apparatus configuration (apparatus B)

采用本文微动疲劳试验装置(装置 B),参考文献[5]中工况进行了 TC11 材料微动疲劳试验,应力比为 0.1,试验结果见表 2。

表 2 装置 B 微动疲劳寿命试验结果
Table 2 Result of fretting fatigue life test
of apparatus B

工况 编号	法向应力/ MPa	轴向应力/ MPa	试验寿命/ 循环	平均试验 寿命/循环
Ti_A	65.45	400	105 223	88 863
			82 750	
			78 616	
Ti_B	40.00	400	133 233	106 599
			79 450	
			104 500	
			109 214	

从表 1 和表 2 可以看出,在轴向载荷同为 400 MPa,法向应力为 65.45 MPa 时,连接副的微动疲劳寿命由装置 A 的 25 065 循环提升到装置 B 的 88 863 循环,且相同载荷下试验件寿命分散性较小;对装置 B,轴向应力不变,法向应力由 65.45 MPa 降低为 40.00 MPa 时,微动疲劳寿命

由 88 863 循环提升到 106 599 循环。可以发现:同等应力水平,装置 B 测试得到的微动疲劳寿命较装置 A 长。究其原因,主要是两种试验装置中微动垫的夹持刚度不同,装置 A 夹持刚度大,可以认为是简支约束,即 $\delta_c = 0$;装置 B 夹持刚度小,使得 $\delta_c > 0$ 。因此本文所使用的微动疲劳试验装置会导致同载荷工况下微动疲劳相对滑移幅值减小,降低微动磨损量,一定程度上延长了结构的微动疲劳寿命。

2 微动垫夹持刚度影响分析

微动疲劳是由代表“力影响”的普通疲劳和代表“表面磨损”的两接触表面之间小幅度的相对运动耦合作用的结果^[8]。微动疲劳接触区域处于多轴应力状态,许多研究者^[11-15]采用基于临界平面法的多轴疲劳参数来预测微动疲劳寿命,其中应用较多的是基于应变能准则且包含应力和应变影响的 SWT 损伤参量^[16]。本文即选取 SWT 损伤参量代表“力影响”,并选取相对滑移幅值代表“表面磨损”^[17-18],从上述两因素出发,研究微动垫夹持刚度对微动疲劳寿命影响的主要原因。

2.1 微动疲劳试验装置有限元模型的建立

以下对前述两种微动疲劳试验装置(装置 A 和装置 B)进行有限元建模。由于结构的对称性,选取试件半宽度进行建模,采用 PLANE82 单元,接触区域网格尺寸为 $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$,目标单元 TARGE169,接触单元 CONTA172,摩擦因数取 0.5^[5]。试件左端完全固定约束,底端对称约束。

对装置 A,微动垫左右两侧施加简支约束,以模拟试验装置中厚底板的作用。对本文模型,即装置 B,通过在微动垫上施加 COMBIN14 弹簧单元以模拟微动垫的夹持刚度,弹簧左端固定且只承受 X 方向力,微动垫左右两侧节点 X 方向耦合。通过对试验夹具的有限元分析,计算得到微动垫夹持处竖直方向的刚度为 $1 \times 10^9\text{ N/m}$ 。轴向力均布施加在试件右侧,法向力均布施加于微动垫顶端,建立的有限元模型(FEM)如图 5 和图 6 所示。以下针对表 1 中给出的 3 种工况进行有限元分析。

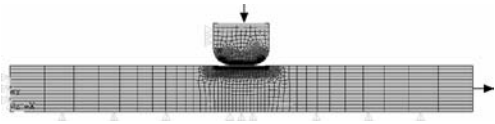


图 5 装置 A 有限元模型
Fig. 5 FEM of apparatus A

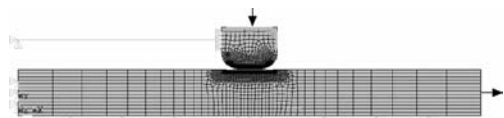


图 6 装置 B 有限元模型
Fig. 6 FEM of apparatus B

2.2 微动垫夹持刚度对 SWT 损伤参数的影响

Smith, Watson, Topper 提出的 SWT 多轴疲劳损伤参量基于应变能准则, 结合临界平面法认为疲劳裂纹的萌生主要是受临界平面上正应力和正应变的影响, 能有效的对微动疲劳裂纹萌生位置和疲劳寿命进行预测, SWT 损伤参量(量符号记为 D_{SWT})表示为

$$D_{\text{SWT}} = \sigma_{\max} \frac{\Delta \epsilon}{2}$$

式中 $\sigma_{\max}$ 为峰值载荷下某位置对应的最大正应力, $\Delta \epsilon$ 为同一位置对应的循环正应变范围。每个位置算出的 SWT 损伤参量值最大的平面为临界平面。通过文中第 2.1 节建立的有限元模型, 提取两种试验装置 3 种工况下接触区域每个位置临界平面上的 SWT 损伤参量, 如图 7 和图 8 所示。

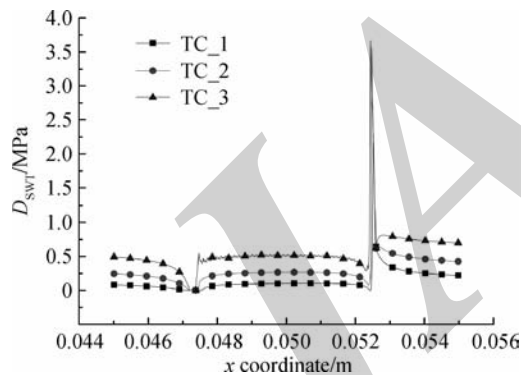


图 7 装置 A 不同工况 SWT 损伤参量分布
Fig. 7 SWT fatigue parameter distribution of apparatus A under different conditions

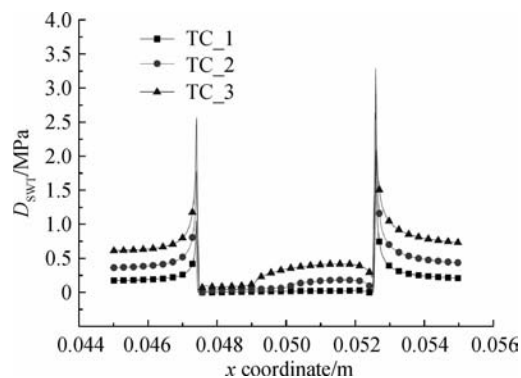


图 8 装置 B 不同工况 SWT 损伤参量分布
Fig. 8 SWT fatigue parameter distribution of apparatus B under different conditions

从图 7 和图 8 两种不同微动垫夹持刚度的试验装置在接触区域 SWT 损伤参量分布情况可以看出, 由于装置 B 中的微动垫夹持刚度较小, 会使接触区域 SWT 损伤参量趋于中间小两侧大的对称分布, 但对 SWT 损伤参量的最大值数值影响较小, 且最大值位置都出现在右侧接触边缘处, 即靠近试验机下夹头一侧, 与表 1 试验结果裂纹萌生位置相符。法向应力相同时, 轴向应力的增加使 SWT 损伤参量最大值增加, 使微动疲劳寿命降低。

2.3 微动垫夹持刚度对相对滑移幅值的影响

两种试验装置在 3 种工况下接触区域的相对滑移幅值 δ 计算结果分别如图 9 和图 10 所示。

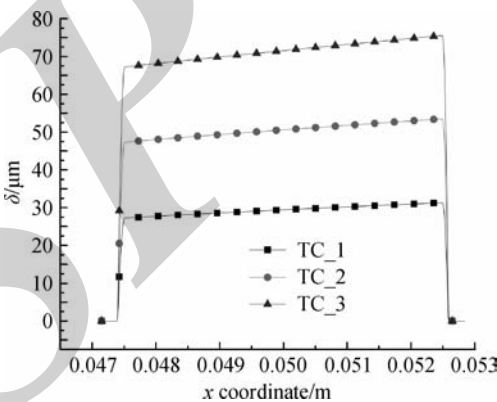


图 9 装置 A 不同工况相对滑移幅值分布
Fig. 9 Relative slip amplitude distribution of apparatus A under different conditions

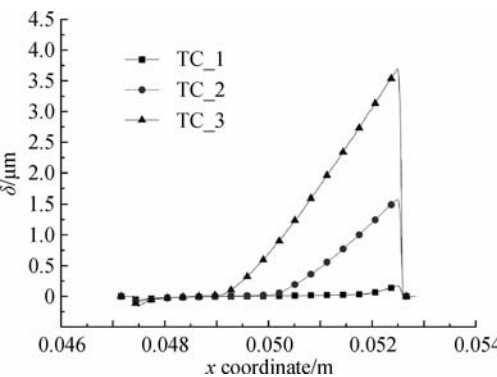


图 10 装置 B 不同工况相对滑移幅值分布
Fig. 10 Relative slip amplitude distribution of apparatus B under different conditions

从图 9 和图 10 可以看出: 微动垫夹持刚度和法向应力相同时, 轴向应力增大使试件在接触区域的轴向变形量 δ_s 增大, 从而导致相对滑移幅值增大。和装置 A 相比, 本文装置微动垫夹持刚度的降低使微动垫整体跟随试件存在位移 δ_c , 从而大幅度地减小了相对滑移幅值, 与文中第 1 节理

论分析结果相符。相对滑移幅值的减小使得微动表面磨损程度急剧降低,减缓了微动疲劳损伤,延长了微动疲劳寿命。

3 结 论

1) 设计了不同微动垫夹持刚度的微动疲劳试验装置,并开展了微动疲劳试验,发现微动垫夹持刚度对微动疲劳寿命影响显著,为微动疲劳试验装置标准的建立以及更好地研究微动疲劳问题提供参考。

2) 理论分析和试验研究均表明:微动垫夹持刚度的减小会导致微动疲劳寿命的增长。其主要原因在于微动垫夹持刚度的减小,会显著降低接触区域的相对滑移幅值,减小接触区域的表面磨损程度,从而延长了微动疲劳寿命。

3) 夹持刚度的减小对微动疲劳损伤参量(如SWT参量)的最大值及位置影响较小,但其在接触区域的分布趋于对称。

参考文献:

- [1] 何明鉴. 机械构件的微动疲劳[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
- [2] DE PAUW J, DE BAETS P, DE WAELE W. Review and classification of fretting fatigue test rigs[J]. Sustainable Construction and Design, 2011, 2(1): 41-52.
- [3] NEU R W. Progress in standardization of fretting fatigue terminology and testing[J]. Tribology International, 2011, 44(11): 1371-1377.
- [4] WALVEKAR A A, LEONARD B D, SADEGHI F, et al. An experimental study and fatigue damage model for fretting fatigue[J]. Tribology International, 2014, 79: 188-196.
- [5] 石炜. 航空发动机榫连接结构微动疲劳寿命研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
SHI Wei. Research on fretting fatigue life of dovetail joint in aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [6] SCHAMPHELAERE D, PAUW D, BAETS D. Conceptual design of a fretting fatigue testing device[J]. Sustainable Construction and Design, 2011, 2(3): 370-377.
- [7] American Society for Testing and Materials International. ASTM E2789-10 Standard Guide for Fretting Fatigue Testing[S]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2015: 506-515.
- [8] SHEN F, HU W, MENG Q. A damage mechanics

approach to fretting fatigue life prediction with consideration of elastic-plastic damage model and wear[J]. Tribology International, 2015, 82: 176-190.

- [9] HOJJATI-TALEMI R, WAHAB M A. Fretting fatigue crack initiation lifetime predictor tool: using damage mechanics approach[J]. Tribology International, 2013, 60(7): 176-186.
- [10] NISHIDA T, KONDOH K, XU J Q, et al. Observations and analysis of relative slip in fretting fatigue[R]. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials (ASTM) International, 2003.
- [11] 徐友良, 崔海涛, 陈伟. 基于临界面法的燕尾榫连接结构微动疲劳寿命预测[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 489-493.
XU Youliang, CUI Haitao, CHEN Wei. Fretting fatigue life prediction based on critical plane approach for dovetail joint[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 489-493. (in Chinese)
- [12] LYKINS C D, MALL S, JAIN V. An evaluation of parameters for predicting fretting fatigue crack initiation[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22(8): 703-716.
- [13] 崔海涛, 汪震, 温卫东, 等. 微动疲劳寿命可靠性分析方法[J]. 航空动力学报, 2009, 24(6): 1279-1283.
CUI Haitao, WANG Zhen, WEN Weidong, et al. Reliability analysis method of fretting fatigue life[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1279-1283. (in Chinese)
- [14] 刘斌. 圆弧接触面和激光淬火对微动疲劳寿命的影响研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
LIU Bin. Study on the effect of Arc contact surface and laser hardening on fretting fatigue life[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [15] JAYAPRAKASH M, MUTOH Y, ASAI K, et al. Effect of contact pad rigidity on fretting fatigue behavior of NiCrMoV turbine steel[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(11): 1788-1794.
- [16] SMITH K N, TOPPER T H, WATSON P. A stress-strain function for metal fatigue including mean stress effect[J]. Journal of Materials, 1970, 5(4): 767-778.
- [17] 霍永忠, 尹东, 赵杰江, 等. 微动磨损与微动疲劳寿命的计算与分析方法[J]. 力学季刊, 2015, 36(2): 165-178.
HUO Yongzhong, YIN Dong, ZHAO Jiejiang, et al. Calculation and analysis method of fretting wear and fretting fatigue life[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(2): 165-178. (in Chinese)
- [18] NORAPHAIPHAKSA N, KANCHANOMAI C, MUTOH Y. Numerical and experimental investigations on fretting fatigue: relative slip, crack path, and fatigue life[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 112(11): 58-71.

(编辑:王碧珺)