

文章编号: 1000-8055(2010)10-2188-07

NiTi 合金榫接结构微动疲劳研究及数值模拟

胡殿印, 王荣桥, 王晓雪, 樊江, 申秀丽
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 利用 NiTi 合金的独特性质, 提出了将 NiTi 合金作为压气机榫接结构的材料. 通过有限元软件 MSC. Marc 进行数值模拟, 研究在低周、高低周复合载荷作用下 NiTi 合金抗微动疲劳特性, 并提出利用节点的微动综合参数(FFD)值确定危险点, 用名义应力法预测构件的微动疲劳寿命的方法. 结果表明: 提出的微动疲劳寿命预估方法是合理有效的, NiTi 形状记忆合金的抗微动疲劳特性明显优于 TC11 等普通材料.

关 键 词: NiTi; 形状记忆合金; 微动疲劳; 寿命预测; 高低周复合疲劳

中图分类号: TG139.6; V231.9

文献标识码: A

Investigation and numerical simulation on fretting fatigue of NiTi

HU Dian yin, WANG Rong qiao, WANG Xiao xue,
FAN Jiang, SHEN Xiu li

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the unique properties of NiTi shape memory alloys (SMA), a new type of dovetail joints was presented in this paper. Finite element analyses (FEA) were performed by using software MSC. Marc to research the fretting fatigue at low cycle fatigue (LCF) and low and high cycle combine fatigue (L-H CCF). Fretting fatigue life was predicted by using nominal stress method, whereby the initiating position of the crack was determined according to fretting fatigue damage (FFD) value. As a consequence, the method of predicting the fretting fatigue life is reasonable and valid, and fretting fatigue resistance of NiTi SMA is much better than traditional materials such as TC11.

Key words: NiTi; shape memory alloys (SMA); fretting fatigue; life prediction; low and high cycle combine fatigue

榫接结构微动疲劳破坏是航空发动机主要失效形式之一, 这极大地限制着其使用可靠性和寿命^[1]. NiTi 形状记忆合金(shape memory alloys, 简称 SMA)是一种新型功能材料, 其形状记忆效应(SME)和超弹性(PE)的特有性质展现出良好的耐磨性和抗疲劳性^[2-5].

根据 NiTi 形状记忆合金良好的抗微动疲劳性能, 提出将 NiTi 合金应用于压气机榫头结构^[6]. 首先, 通过选定 NiTi 形状记忆合金的本构

模型, 与单轴拉伸试验结果的对比验证了选取的 NiTi 合金热-机模型的正确性; 在此本构模型的基础上, 建立了微动桥试验装置的有限元模型并成功实现了数值模拟, 证明了微动疲劳寿命预估的合理性, 可将其应用于压气机榫接结构的寿命预测; 最后, 建立了某型压气机榫接结构的接触摩擦有限元模型, 从抗微动特性、微动寿命等方面与原始结构进行对比说明提出的新型榫接结构的合理性.

收稿日期: 2009-09-11; 修订日期: 2010-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(50575009); 新世纪优秀人才计划(NECT-07-0042); 航空支撑科技基金(05B51004)

作者简介: 胡殿印(1980-), 女, 辽宁朝阳人, 博士生, 主要从事航空发动机结构强度、可靠性及智能材料研究.

本文的研究方法和思路对航空发动机压气机棒接构件微动疲劳损伤抑制起到积极的作用,可大幅提高结构的微动寿命,为 NiTi 涂层的数值模拟及试验研究打下基础,同时可作为 NiTi 合金的抗疲劳特性应用其他领域的技术储备。

1 NiTi 合金本构模型的数值验证

迄今为止,国内外专家提出了多种形式的形状记忆合金的本构关系,从不同理论出发对形状记忆合金各种特性做了很好描述,本文选取 MSC. Marc 软件中的 Saeedvafa & Asaro 的热机模型。根据文献[7],该模型以小应变运动学为基础,应变增量是下面分量的叠加

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{el}} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{h}} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ph}} \tag{1}$$

其中 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{el}}$, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{h}}$, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}}$, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ph}}$ 分别为弹性应变率增量(栅格应变率),热应变增量,黏塑性应变增量和与热弹性相变相关的应变增量。

相变导致应变是方向成形的结果,应力和自由的热力方向的重新定位导致马氏体。为计算此值, $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ph}}$ 表示为

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ph}} = \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{trip}} + \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{twin}} \tag{2}$$

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{trip}} = \Delta f^{(+)} g(\sigma_{\text{eq}}) \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{eq}}^{\text{t}} \frac{3}{2} \frac{\sigma'}{\sigma_{\text{eq}}} + \Delta f^{(-)} \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{I}} + \Delta f^{(-)} \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{h}} \tag{3}$$

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{twin}} = f \Delta g(\sigma_{\text{eq}}) \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{eq}}^{\text{t}} \frac{3}{2} \frac{\sigma'}{\sigma_{\text{eq}}} \{ \alpha_{\text{eq}} \} \{ \alpha_{\text{eq}} - \alpha_{\text{tr}} \} \tag{4}$$

其中 f 是马氏体体积率, $\Delta f = \Delta f^{(+)} + \Delta f^{(-)}$, $\Delta f^{(+)}$ 代表马氏体形成的速率, $\Delta f^{(-)}$ 是奥氏体构成的变化,例如马氏体体积率衰减的速率, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{eq}}^{\text{t}}$ 是相变应变的偏量的等效值, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是相变应变的体应变,方程 $g(\sigma_{\text{eq}})$ 即为马氏体相变应变和应力偏量的关系, α_{eq} 是等效应力, $\{ \}$ 代表 McCauley 括号

$$\{x\} = \frac{1}{2} \left(\frac{x + |x|}{|x|} \right), \quad x \neq 0$$

在 MSC. Marc 中已经实现了一种函数表格可以用来充分拟合多数试验数据。

$$g(\sigma_{\text{eq}}) = 1 - \exp \left[g_a \left(\frac{\sigma_{\text{eq}}}{g_0} \right)^{g_b} + g_c \left(\frac{\sigma_{\text{eq}}}{g_0} \right)^{g_d} + g_e \left(\frac{\sigma_{\text{eq}}}{g_0} \right)^{g_f} \right] \tag{5}$$

本构模型的验证采用二维单轴拉伸的有限元数值模拟,并与试验结果[8]进行对照。加载条件与试验相符,采用位移控制,分别取 4 个温度下的单轴拉伸结果进行对比。数值模拟及试验的应力-应变曲线如图 1 所示(图中 σ^{s} 代表马氏体相变开

始应力, σ^{f} 代表马氏体相变结束应力, σ^{a} 代表马氏体逆相变开始应力, σ^{sa} 代表马氏体逆相变结束应力),数值模拟体现了 NiTi 合金的超弹性行为,数值解和试验结果基本一致。故此热-机模型可应用于结构的数值模拟。

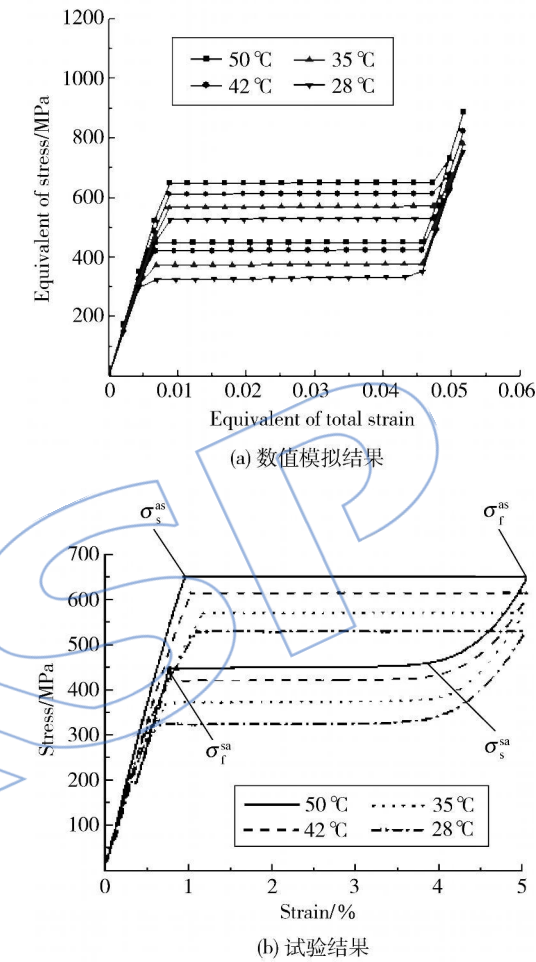


图 1 单轴拉伸应力-应变曲线
Fig. 1 Stress-strain curves under uniaxial tension

2 微动疲劳研究方法的验证

通过数值模拟桥式微动疲劳试验装置(如图 2 所示)并与试验结果[9]进行对比以验证微动疲

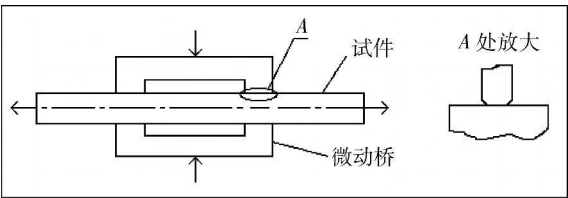


图 2 实验装置示意图
Fig. 2 Sketch of experimental facility

劳研究方法的正确性.

利用有限元软件 MSC. Marc 建立微动桥结构的有限元模型, 取微动桥与试件两个接触面之一进行研究. 试件材料为 GX8, 微动桥材料为 TC11. 指定桥脚表面为接触面, 试件表面为目标面. 根据试验要求, 微动桥受 200 MPa 载荷正压力, 试件承受 100-500-100MPa 的三角波, 见图 3. 材料参数见表 1^[10].

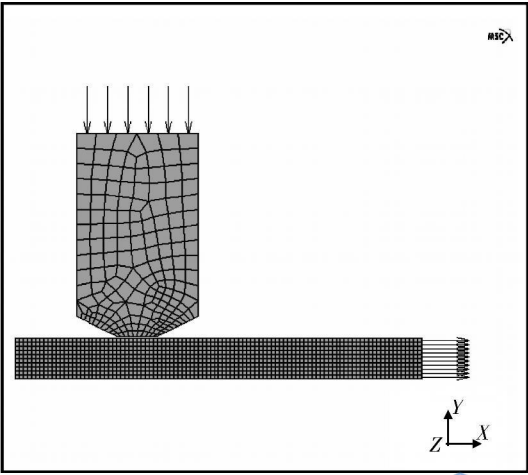


图 3 边界条件
Fig. 3 Boundary conditions

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

材料 牌号	弹性模量/ GPa	强度极限/ MPa	疲劳极限/ MPa	循环基数/ 10 ⁶ 次
GX8	190	1340	647	3
TC11	120	1130	540	0.16

接触区应力、位移的计算涉及边界非线性和材料非线性. 在接触区域边缘, 应力大、应力梯度大, 如何快速、准确计算出接触副在复杂载荷历程下的响应是微动疲劳理论分析的基础. 为此, 本文采用接触问题的有限元数值计算方法. 在进行有限元分析时, 一旦探测出发生接触, 便将接触所需的运动约束(即法向无相对运动, 切线可滑动)和节点力(法向压力和切向摩擦力)作为边界条件直接施加在产生接触的节点上.

把接触表面节点编号(见图 4), 通过计算各节点的微动综合参数(FFD)^[11]来确定危险点, 其表达式为

$$F_{fd} = \mu \sigma_n \sigma_{tt} \Delta$$

(6)

其中 μ , σ_n , σ_{tt} 和 Δ 分别为接触面间的微动摩擦系数、接触的法向应力、与相对滑动方向平行的切向应力和相对滑动幅度.

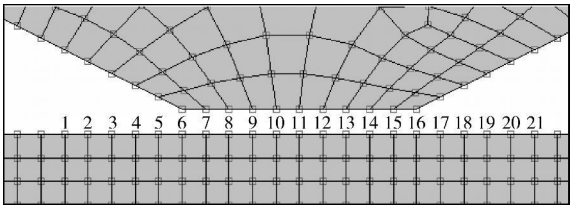


图 4 节点编号
Fig. 4 Node number

数值模拟结果表明(见图 5) GX8 材料的 5 号节点 F_{fd} 值最大, 说明裂纹最有可能在此处扩展, 为寿命考核点.

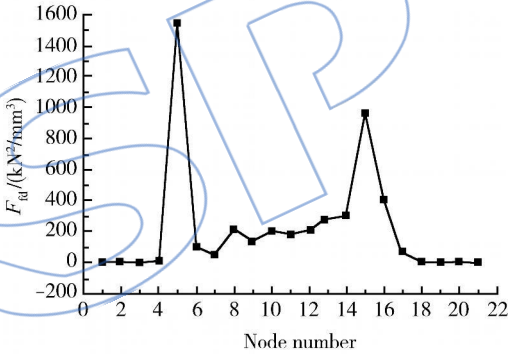


图 5 GX8 材料的微动综合参数
Fig. 5 Fretting fatigue damage for GX8 material

微动疲劳可以看作是微动磨损和普通疲劳共同作用的结果. 在其微动表面上, 力学参数法向应力 σ_n 、切向应力 σ_t 、体内边界切向应力 σ_{tt} 和相对滑动位移 Δ 共同决定其微动疲劳状况. 本文提出利用节点的 F_{fd} 值确定危险点, 用名义应力法预测构件的微动疲劳寿命的方法, 其中考虑了尺寸系数、疲劳缺口系数和表面加工系数的影响.

设交变应力 σ 的应力幅为 σ_a , 平均应力为 σ_m , 其循环次数为 N . 在 σ_m - σ_a 坐标系中, 以材料的 N 次循环的疲劳极限应力 σ_{1N} 和强度极限 σ_b 作 Goodman 极限应力线 AB , 如图 6 所示. 过点 $P(\sigma_m, \sigma_a)$ 作 AB 的平行线, 交纵轴于 σ_{1d} . σ_{1d} 为变应力 σ 的等效对称循环变应力. 由图中几何关系可得

$$\sigma_{1d} = \sigma_a + \left[\frac{\sigma_{1N}}{\sigma_b} \right] \sigma_m$$

(7)

以此方法, 分别求出 σ_n , σ_t 和 σ_{tt} 的等效对称循环变应力 $(\sigma_n)_{-1d}$, $(\sigma_t)_{-1d}$ 和 $(\sigma_{tt})_{-1d}$. 由强度理

论得当量应力 α_{ldN} 为

$$\alpha_{ldN} = \sqrt{(\alpha_h)^2 + (\alpha_{lt})^2 - (\alpha_h)_{-ld}(\alpha_{lt})_{-ld} + 3(\alpha)_{-ld}^2}$$

(8)

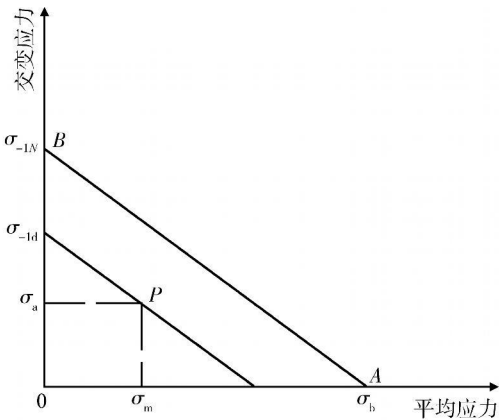


图 6 Goodman 曲线图
Fig. 6 Goodman diagram

考虑尺寸系数 ε 、疲劳缺口系数 K_σ 和表面加工系数 β_1 影响后的寿命表达式为

$$\lg \alpha_{ldN} = \lg \alpha_{ld} + \frac{\lg N_0 - \lg N}{\lg N_0 - 3} [\lg(0.9\alpha_b) - \lg \alpha_{ld}]$$

(9)

其中

$$\alpha_{ld} = \frac{\alpha_1}{K_{qt}}, \quad K_{qt} = \frac{K_\sigma}{\varepsilon} + \frac{1}{\beta_1} - 1$$

这样构件的微动疲劳寿命为

$$\lg N = \lg N_0 - (\lg N_0 - 3) \frac{\lg \alpha_{ldN} - \lg \alpha_{ld}}{\lg(0.9\alpha_b) - \lg \alpha_{ld}}$$

(10)

参考材料手册取 $\beta_1 = 0.95$, $\varepsilon = 0.95$, $K_\sigma = 1.4$ 对微动桥寿命进行预测, 并与试验结果进行对比(见表 2)。结果表明寿命误差在可接受范围内, 即本文提出的微动疲劳寿命预估方法是可行的。

表 2 GX8 计算寿命与试验寿命对比
Table 2 Life comparison of calculation and experimentation for GX8 material

预测寿命/ 10^7 次	试验寿命/ 10^7 次	误差/ %
1. 623	1. 78	- 8. 82

3 压气机榫接结构材料的改进

根据 NiTi 合金良好的抗疲劳特性, 本文提出将其应用于某型压气机榫接结构用以延缓微动损

伤的发生和扩展, 进而提高结构的寿命. 本文以某型发动机燕尾形榫接结构为例, 通过与传统材料的榫接结构进行对比验证选取的新型压气机榫接材料的可行性.

3.1 有限元模型

某型压气机榫接结构中的榫槽/榫头材料为 TC11, 材料参数见表 1. 考虑到模型的对称性, 有限元计算选取 1/2 模型进行分析, 见图 7 所示. 二维模型采用平面应变全积分四节点单元, 所受约束为 AB 边 Y 向位移为 0, BC 及 DE 边 X 向位移为 0, 沿径向对叶片施加拉力载荷, 大小为 0~15 kN·0 的三角波, 频率为 1 Hz. 榫头和榫槽互为接触体, 两者均定义为变形体, 摩擦因数为 0.5.

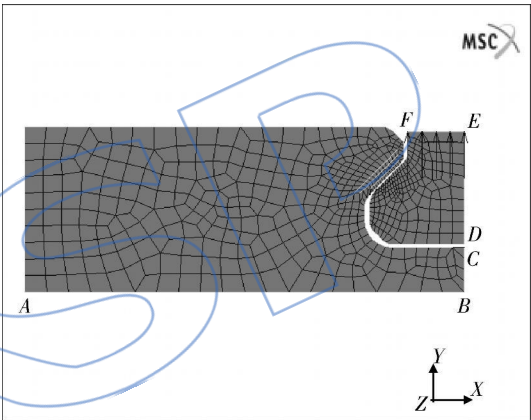


图 7 有限元模型
Fig. 7 Finite element model

3.2 结果讨论

3.2.1 F_{fd} 值的对比

将接触面上的节点编号(见图 8), 计算其 F_{fd} 值(见图 9), 找到裂纹可能萌生的位置. 图 9 表明, 榫头/榫槽接触的中间部分 F_{fd} 值小且平稳, 接

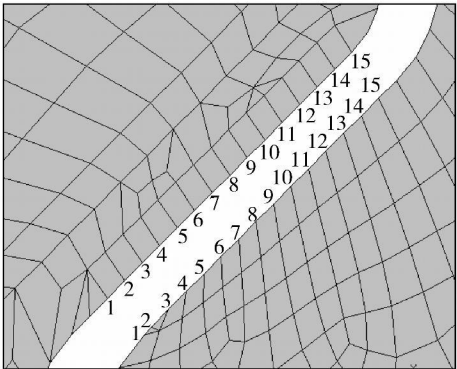


图 8 接触面节点编号
Fig. 8 Node number at contact area

触部位边缘的 F_{fd} 值较大, 尤其是接近槽底的边 F_{fd} 值急剧增大. 榫头的最大 F_{fd} 值远大于榫槽, 这说明榫头产生裂纹的概率大于榫槽.

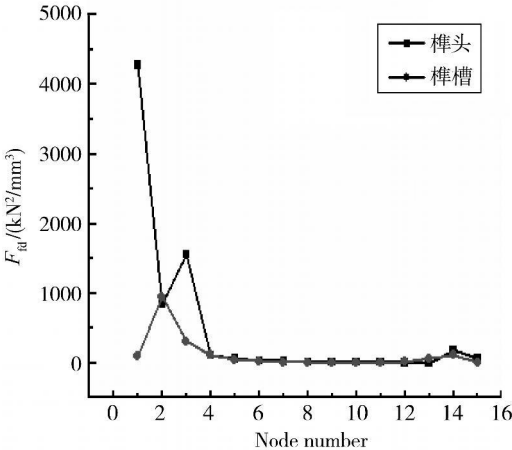


图 9 榫头榫槽 F_{fd} 比较(TC11 材料)
Fig. 9 Comparisons of F_{fd} between tenon and mortise for TC11 material

若改进榫接结构的材料, 首先从改进榫头材料着手. 本文提出将榫头材料变为 NiTi 合金, 材料参数见文献[8]. 榫头应用两种不同材料后榫头/榫槽的 F_{fd} 值对比见图 10 所示, 可以发现: 两种材料下的榫接结构的危险点位置不变; 当榫头材料为 NiTi 形状记忆合金时, 榫头、榫槽的 F_{fd} 值均有明显减小, 相差近乎一倍, 即产生裂纹的几率明显减小. 这说明 NiTi 合金具有良好的抗微动疲劳特性, 即展示了优越的耐磨性能.

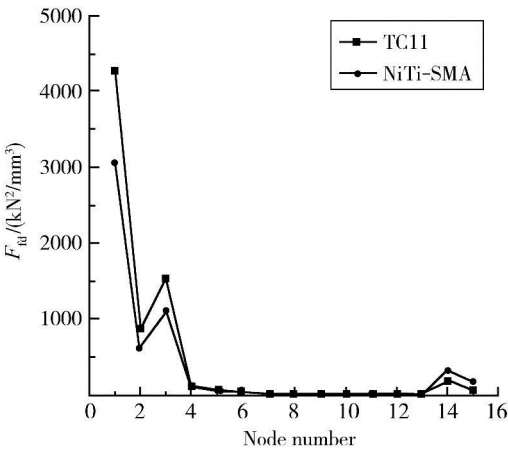
3. 2. 2 低周载荷作用下微动疲劳寿命的对比

采用 2 节的寿命评估方法对榫接结构在低周载荷作用下的微动疲劳寿命进行预测, 其中选取榫头材料分别为 TC11 和 NiTi 合金进行比较, 结果见表 3.

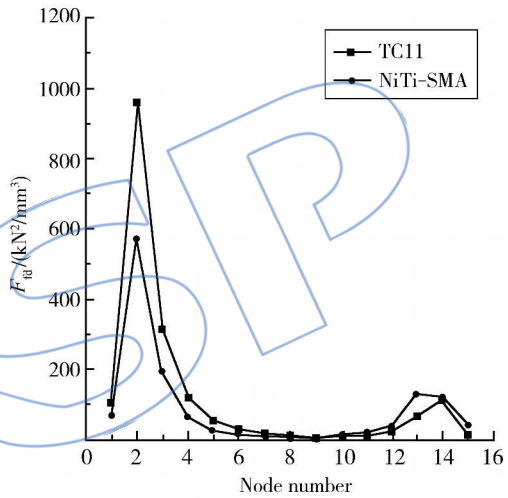
从寿命预测结果的对比可以发现: 榫头材料由 TC11 改为 NiTi 合金时, 不仅榫头的微动疲劳寿命提高近两个数量级, 而且使榫槽的寿命提高一个数量级. 这说明, NiTi 合金具有优质耐磨性的同时还对榫槽起到保护作用; NiTi 合金的工作温度越高, 榫头的寿命增加的越少. 这说明, 低温时 NiTi 合金的耐磨性更好.

3. 2. 3 高低周复合载荷作用下的微动疲劳寿命对比

发动机榫联接结构的受载特点更接近在“启动-工作-停止”的低周载荷上迭加高周载荷, 如图 11 所示. 鉴于此, 本文对压气机榫接结构施加了



(a) 榫头



(b) 榫槽

图 10 榫槽材料 NiTi 和 TC11 时的 F_{fd} 值对比
Fig. 10 Fretting fatigue damage comparisons for mortise made of NiTi and TC11

表 3 低周载荷作用下的计算微动疲劳寿命
Table 3 Fretting lives at low cycle fatigue

结构	材料	榫接	等效应力 σ_{1dN}/MPa	寿命/ 10^5 次
结构 1	28 ℃ NiTi	榫头	362. 9065	112. 49
	TC11	榫槽	180. 9405	140. 59
结构 2	35 ℃ NiTi	榫头	366. 6122	103. 45
	TC11	榫槽	182. 8731	132. 57
结构 3	42 ℃ NiTi	榫头	372. 878	89. 96
	TC11	榫槽	186. 1353	120. 21
结构 4	50 ℃ NiTi	榫头	381. 868	73. 92
	TC11	榫槽	190. 8058	104. 81
原始结构	TC11	榫头	424. 1101	4. 26
	TC11	榫槽	298. 9217	8. 75

高低周复合载荷, 即在每个低周载荷周期中迭加 100 个幅值为低周最大载荷的 10% 的高周载荷.

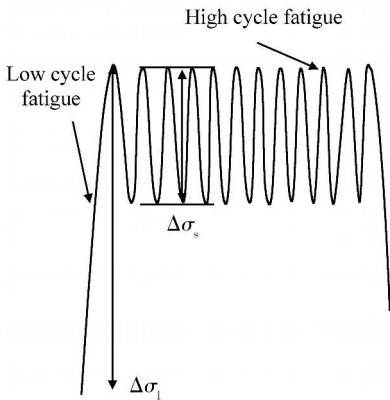


图 11 高低周复合载荷示意图

Fig. 11 Sketch of low and high cycle combined loads

高低周复合载荷作用下的微动疲劳寿命预测采用文献[12]的方法: 对结构进行有限元分析得到疲劳裂纹附近的等效对称循环应力幅的当量应力 σ_{1e} , 低周摩擦功 W_l 和高周摩擦功 W_h , 进而计算压气机榫接结构的高低周复合微动疲劳寿命. 计算结果见表 4.

表 4 高低周复合载荷作用下的计算微动寿命

Table 4 Fretting lives at low and high cycle combined loads

结构	材料	榫接	复合微动疲劳寿命/ 10 ⁵ 次
结构 1	28 °C NiTi	榫头	40. 6
	TC11	榫槽	48. 8
结构 2	35 °C NiTi	榫头	40. 3
	TC11	榫槽	48. 5
结构 3	42 °C NiTi	榫头	39. 7
	TC11	榫槽	48. 2
结构 4	50 °C NiTi	榫头	38. 9
	TC11	榫槽	47. 6
原始结构	TC11	榫头	1. 31
	TC11	榫槽	1. 82

通过数值模拟及高低周复合微动疲劳寿命的对比, 可以发现高低周复合载荷作用下, 榫头为 NiTi 合金的寿命始终比 TC11 材料的寿命有 1 个数量级以上的提高; 而且榫头改进材料后, 榫槽的寿命也得到了提高. 这说明 NiTi 材料不仅具有

高的抗微动疲劳特性, 而且对其他材料起到保护作用.

通过榫接结构的 F_{fd} 值、低周微动寿命及高低周复合微动疲劳寿命这三个方面的对比说明选取 NiTi 形状记忆合金作为压气机榫接结构的榫头材料是合理可行的.

4 结 论

- 1) 榫接构件的危险点不随材料的改变而变化, 裂纹萌生扩展危险点位置不变.
- 2) 榫头材料为 NiTi 合金时, 榫接结构的综合微动参数 FFD 值明显减小.
- 3) 无论受力状况、还是高低周复合微动寿命, 温度变化对 NiTi 合金的性能影响不大, 但对低周微动寿命影响较大.
- 4) 低周载荷和高低周复合载荷作用下 NiTi 合金的微动疲劳寿命比普通材料 TC11 有超过一个数量级的提高.
- 5) 榫头改进材料后, 榫槽寿命也得到了提高. 这说明 NiTi 材料具有优质耐磨性的同时还对接触部件起到保护作用.

研究表明, 利用 NiTi 合金的超弹性提高压气机榫接结构的微动疲劳寿命是有效可行的. 本文提出的新构想为后续的试验及其应用提供了基础.

参考文献:

[1] Cowles B. High cycle fatigue in aircraft gas turbines- an industry perspective[J]. International Journal of Fracture, 1996, 80: 147-163.

[2] 金家陵, 王宏亮. NiTi 合金耐磨性研究[J]. 金属学报, 1988, 24(1): 66-69.

JIN Jialing, WANG Hongliang. Wear resistance of NiTi alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1998, 24(1): 66-69. (in Chinese)

[3] 阎晓军, 聂景旭, 孙长任. 用于高速转子振动主动控制的智能变刚度支承系统[J]. 航空动力学报, 2000, 15(1): 63-66.

YAN Xiaojun, NIE Jingxu, SUN Changren. Intelligent support system for passing through critical speed of high speed rotor by changing stiffness[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(1): 63-66. (in Chinese)

[4] 王永善, 贺志荣, 王启, 等. TiNi 形状记忆合金性能及应用研究进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(20): 18-21.

WANG Yongshan, HE Zhirong, WANG Qi, et al. Research progress on properties and application of TiNi shape memory alloys[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(20): 18-21. (in Chinese)

[5] Duerig T, Pelton A, Stockel D. An overview of nitinol medical applications [J]. Materials Science & Engineering, 1999, A273 275: 149 160.

[6] 王晓雪. NiTi 合金微动疲劳寿命研究及其数值模拟[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.

WANG Xiaoxue. Investigation on fretting fatigue of NiTi and numerical simulation[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)

[7] MSC Software Corporation. MSC. Marc volume A: theory and user information [M]. California: MSC Software Corporation, 2003.

[8] 王心美. NiTi 形状记忆合金疲劳断裂性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

WANG Xinmei. Investigation on fatigue and fracture behavior of NiTi shape memory alloys[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)

[9] 朱如鹏, 潘升材, 高德平. 微动疲劳中的应力状态参数和微动磨损参数的研究[J]. 工程力学, 1998, 15(4): 116 121.

ZHU Rupeng, PAN Shengcai, GAO Deping. A numerical study of stress state parameters and fretting wear parameters in fretting fatigue[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(4): 116 121. (in Chinese)

[10] 赵少汴. 抗疲劳设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

[11] 王春明. 高周、低周及高低周复合载荷作用下微动损伤的实验研究[D]. 南京: 南京航空学院, 1989.

WANG Chunming. Experimental research on the fretting damage under high and low cycle load[D]. Nanjing: Nanjing Aeronautical Institute, 1989. (in Chinese)

[12] 朱如鹏, 潘升材. 高低周复合载荷作用下微动疲劳寿命预测研究[J]. 机械强度, 1996, 18(3): 37 40.

ZHU Rupeng, PAN Shengcai. Study of prediction of fretting fatigue life under high-low cycle complex loading [J]. Journal of Mechanical Strength, 1996, 18 (3): 37 40. (in Chinese)

