

摩擦系数对燕尾榫微动疲劳特性的影响

古远兴 温卫东

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京 210016)

文 摘 在燕尾榫连接接头的微动疲劳特性分析中,考虑接触表面质量,即摩擦系数的影响。给出了摩擦系数对接头应力水平、摩擦功和微动磨损参数之间的关系。分析表明:按照传统方法,将摩擦系数取为常数时所确定的裂纹萌生位置偏于危险,由于摩擦系数的变化,裂纹既可能在榫头上萌生,也可能在榫槽上萌生;摩擦系数对接头的切向应力和摩擦功等参数也有一定的影响。

关键词 微动疲劳,摩擦系数,燕尾榫

Effect of Friction Coefficient on Fretting Fatigue Performance of Dovetail Joint

Gu Yuanxing Wen Weidong

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract The surface condition i.e. the effect of friction coefficient, is considered in analyzing the fretting fatigue performance of dovetail joint. The relations among stress level, friction power and fretting wear parameter with friction coefficient are given. It shows that it is dangerous to predict the initial crack spot by using a constant friction coefficient. During the fatigue, friction coefficient is variable, and the initial crack spot is generated possibly on the tenon or on the mortise. Friction coefficient has some effect on the tangent stress and friction power.

Key words Fretting fatigue, Friction coefficient, Dovetail joint

0 引言

在众多的连接件故障中,微动疲劳会导致某些关键零件失效,其中叶片和轮盘的燕尾榫连接结构就是一种典型的微动结构形式。长期以来,微动疲劳问题的研究主要集中在损伤机理方面,对于微动疲劳寿命的研究从20世纪90年代以后,才逐渐深入。Ruiz等^[1]模拟典型叶片/盘的燕尾榫连接试验在微动疲劳试验机上进行试验,提出了微动损伤参数和综合参数的概念,并根据试验结果,将寿命拟合为以综合参数为自变量的预测公式。戴振东等^[2]提出了非平衡态热力学理论研究微动损伤机理。在微动疲劳寿命预测方面,何明鉴^[3]等提出附加应力法,并由 $S-N$ 曲线得到疲劳寿命。Golden等^[4-5]提出采用断裂力学方法进行微动疲劳寿命的预测,该方法认为应力奇异区或应力集中点可能为裂纹萌生位置。Jin^[6]则提出了寿命预测的累积损伤法等。

上述研究工作均假定材料的表面状态处于理想的工作条件,没有考虑到接触表面的摩擦系数等在微

动过程中的变化,本文在对接触表面的摩擦系数做进一步细致研究的基础上,给出了榫连接微动磨损参数与摩擦系数之间的影响规律,为榫连接的疲劳寿命预测和疲劳强度分析奠定基础。

1 微动疲劳寿命预测方法

通常情况下,估算微动疲劳寿命时,首先建立结构模型,计算接触面上的应力、应变和相对滑动距离,然后确定疲劳裂纹萌生位置,并进一步根据该点的应力状态和磨损情况,用相应的预测模型进行寿命预测。由于微动表面各处的磨损程度不同,在由微动磨损造成的表面微裂纹中,并不是所有微裂纹在微动的作用下都会扩展,因此针对微动疲劳裂纹扩展位置的问题,目前通常采用综合参数方法。

在综合参数方法中,为衡量接触表面各处微动磨损程度的大小,定义单位面积摩擦功 FD 为:

$$FD = \mu \times \Delta u / \Delta x \quad (1)$$

式中, μ 为接触面摩擦系数; Δu 为接触面节点对法向正应力; Δx 为接触面节点相对切向位移。由(1)式可

收稿日期:2006-11-16;修回日期:2006-12-25

作者简介:古远兴,1969年出生,研究员,主要从事发动机结构强度与振动方面的研究工作

可以看出,摩擦功恒为非负数。在此基础上,进一步考虑应力因素的影响,将综合影响参数 FFD 定义为:

$$FFD = FD \times \tau = \mu \times \sigma_n / \sigma \times \tau \quad (2)$$

式中, τ 为接触面节点的切向应力。当 τ 为负值,即处于压应力状态时, FFD 也为负值,不利于裂纹的萌生和扩展;反之,由于 τ 和 FFD 均为正值,为疲劳裂纹的萌生和扩展提供了可能。所以通常认为综合参数取最大正值的点为“危险点”,疲劳裂纹首先会从此点萌生。

2 摩擦系数对微动疲劳特性影响

分析榫连接接头的磨损特性和微动疲劳寿命时,一般将榫连接的摩擦系数取为常数 0.5,而实际上,在微动磨损过程中,该摩擦系数是变化的。以下针对

榫连接接头,分别研究摩擦系数对微动磨损和微动疲劳裂纹萌生位置的影响规律。

2.1 燕尾榫接头分析模型

榫槽和榫头的物理模型如图 1 所示,材料均为 TC11,其化学成分为 Ti 基, 6.4% Al, 3.67% Mo, 0.28% Si, 1.9% Zr, 0.08% Fe, 0.01% N, 0.025% C;在常温下的力学性能: $\sigma_s = 540$ MPa, $\sigma_b = 1130$ MPa, $E = 120$ GPa, $\mu = 0.33$ 。

图 2 为榫连接接头的有限元分析模型。模型采用 8 节点平面单元,面-面接触方式。模型共有 37 044 个节点,12 203 个单元,其中接触单元 60 个,目标单元 60 个。计算时,AB 边固支,沿 y 方向在 CD 端面施加大小相当于 15 kN 的均布拉力。

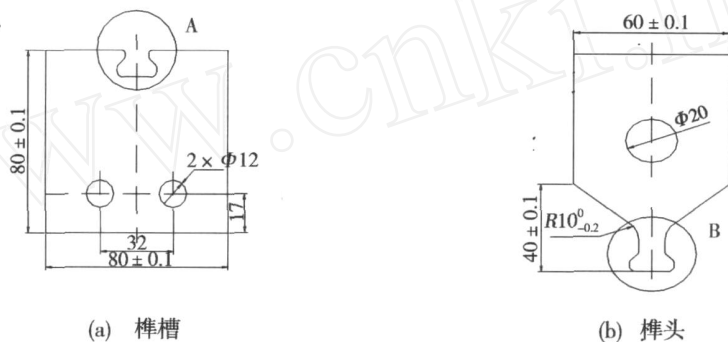


图 1 榫槽和榫头模型图

Fig 1 Geometrical models of mortise and tenon

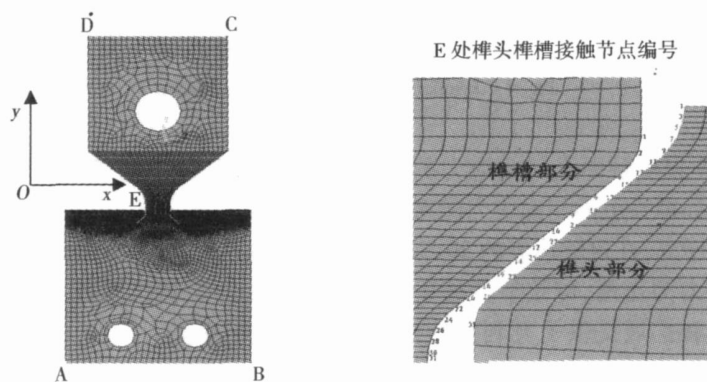


图 2 有限元模型图

Fig 2 Finite element mesh

2.2 摩擦系数的影响分析

对榫槽结构,取 6 种不同的 μ ,即 0.0、0.1、0.3、0.4、0.5 和 1.0;对榫头结构,计算时分别取 0.0、0.1、0.3、0.5 和 1.0 等 5 种不同的 μ ,用相同的有限元模型进行计算分析。

图 3 给出了榫槽和榫头的等效应力在不同的 μ 下的应力分布。可以看出,榫槽的接触区域内节点的等效应力值受 μ 影响很小;接触区域以外节点的等效应力随 μ 的增大而增加,而且增加幅度逐渐降低。榫

槽上 $\mu = 0$ 时,等效应力达最大值 836 MPa 位于节点 28 处; $\mu = 1.0$ 时,最大值 1 019 MPa 位于节点 21 处;榫头上 $\mu = 0$ 时,最大等效应力 727 MPa 位于节点 29 处; $\mu = 1.0$ 时,最大等效应力 824 MPa 位于节点 10 处。

图 4 给出了榫槽和榫头在不同 μ 下的接触面摩擦功。可以看出,榫槽和榫头任一节点的摩擦功在不同的 μ 下具有相同的变化规律,即摩擦功在接触区域的边界处达到极值,在接触区域外为 0,在接触区域

内部呈抛物线形变化。这主要是由于接触边界处对应节点的滑动距离较大的缘故。榫槽在节点 4 和节点 20、榫头在节点 13 和节点 28 处的摩擦功均较大。

此外,同一节点的摩擦功不随 μ 单调变化,当 μ 在 0.3 到 0.5 之间变化时,对应的摩擦功数值比较接近,并大于 μ 为 0 或 1.0 时的摩擦功。

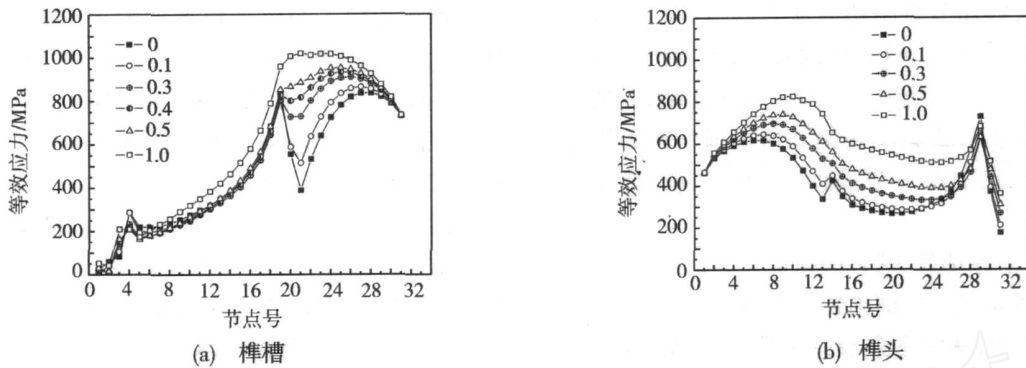


图 3 榫槽和榫头等效力分布
Fig 3 Equivalent stress of mortise and tenon

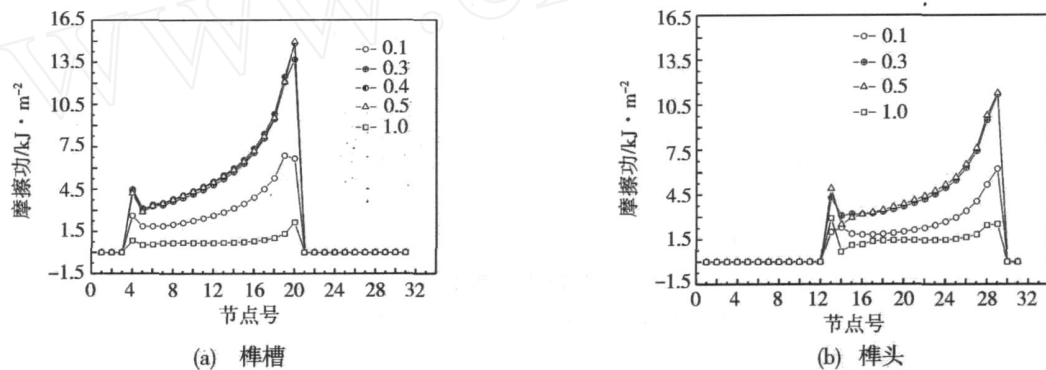


图 4 榫槽和榫头接触面摩擦功
Fig 4 Friction power of mortise and tenon

图 5 给出了榫槽和榫头接触面上切向应力的变化曲线。可以看出,榫槽和榫头上的切向应力随摩擦系数增加而增大;对榫槽而言,在接触边界的 20 节点处,当 $\mu < 0.4$ 时,切向应力为正值,即该节点处于拉应力状态,为裂纹的萌生和扩展提供了有利条件;当

$\mu < 0.4$ 时,20 节点的切向应力均为负值,即处于压应力状态,不利于裂纹的萌生和扩展。对榫头而言,在接触边界的 13 号节点, μ 在 0 到 1 范围取值时,基本上均为正值,该区域处于拉应力状态,也是一个可能的裂纹萌生点。

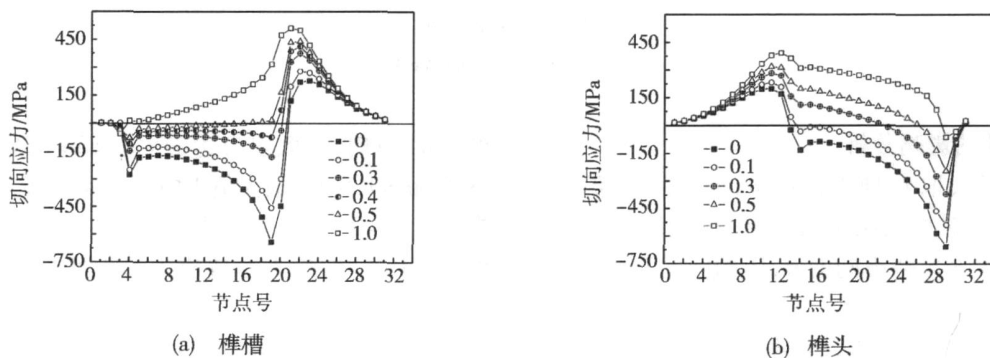


图 5 榫槽和榫头接触面上切向应力
Fig 5 Tangent stress of mortise and tenon

图 6 给出了榫槽和榫头综合参数的变化曲线。由于综合参数是判断裂纹萌生的重要参数,且综合参数取最大正值的点为“危险点”,疲劳裂纹首先会从此点萌生,因此仅关注图中的最大正值点的变化情况即可。从图 6 中可以看出,榫槽和榫头的综合参数随着 μ 的增加,均呈现先增后减的变化趋势,并在 $\mu = 0.5$ 时出现最大值;榫槽和榫头出现最大值的位置相同,分别在节点 20 和 13 处,相应的综合参数大小分别为 2.49×10^{12} 和 1.17×10^{12} ;榫槽上的 20 号节点

在 $\mu = 0.4$ 时,综合参数为正值,而榫头上的 13 号节点, μ 在 0 到 1 范围取值时,综合参数均为正值。由于接触边界 μ 在微动疲劳过程中是变化的,因此,榫槽的 20 号节点和榫头的 13 号节点附近均可能成为裂纹萌生点。而传统的将 μ 取为常数 0.5 时,按照综合参数最大值确定的裂纹萌生点只有榫槽的 20 号节点。通过上述分析可以看出,不能够排除榫头的 13 号节点附近也是裂纹萌生的可能位置。

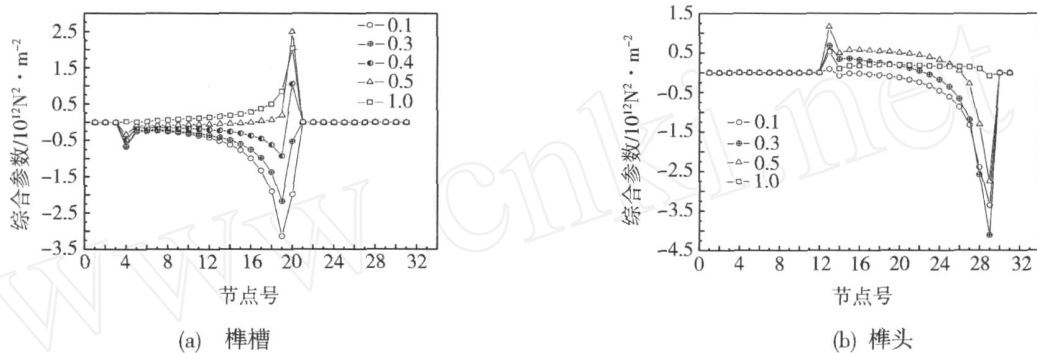


图 6 榫槽和榫头综合参数

Fig 6 Synthetical parameter of mortise and tenon

3 结论

μ 对榫连接接头的微动磨损和微动疲劳特性影响比较显著。按照传统方法,将 μ 取为常数时所确定的裂纹萌生位置偏于危险,随着榫连接接头表面 μ 的变化,裂纹即可能在榫头上萌生,也可能在榫槽上萌生,萌生位置均在接触边界处。

μ 对榫连接接头的切向应力和摩擦功等参数也有一定的影响。在实际的榫连接接头设计和使用过程中,要特别注意接触表面的质量状况。

参考文献

- 1 Ruiz C, Boddington P, Chen C. An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint. *Experimental Mechanics*, 1984; (24): 208 ~ 217
- 2 戴振东,薛群基. 摩擦磨损过程的非平衡态热力学研究. *自然杂志*, 1998; 20(4): 220 ~ 228

- 3 何明鉴,张德志. 确定微动疲劳寿命的附加应力法. *航空发动机*, 2003; 29(3): 27 ~ 29
- 4 Golden P J, Grandt A F. Fracture mechanics based fretting fatigue life predictions in Ti - 6Al - 4V. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004; (71): 2 229 ~ 2 243
- 5 Golden P J, Calcaterra J R. A fracture mechanics life prediction methodology applied to dovetail fretting. *Tribology International*, 2006; (1): 1 ~ 9
- 6 Jin O, Lee H. Investigation into cumulative damage rules to predict fretting fatigue life of Ti - 6Al - 4V under two-level block loading condition. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2003; (125): 315 ~ 323

(编辑 李洪泉)