

考虑微动影响的搭接结构疲劳寿命研究

杨茂胜¹, 张涛², 陈跃良¹, 毕玉泉¹

(1. 海军航空工程学院 青岛分院, 山东 青岛 266041; 2. 中国人民解放军92514部队, 山东 烟台 264006)

摘要: 为研究微动对搭接结构疲劳寿命的影响, 采用ABAQUS软件建立了考虑微动影响的单搭接结构有限元全局模型和子模型, 运用该模型计算了接触区的应力分布。并在FRANC2D/L中把螺栓用等效的正应力和剪应力来代替, 重建子模型, 计算了裂纹尖端应力强度因子。最后建立了考虑微动影响下的搭接结构疲劳寿命预测模型, 并将计算值与试验值进行了对比。结果表明, 微动对搭接结构有较大的影响, 它可以较大幅度地降低搭接件的疲劳寿命; 考虑微动时的预测精度高于不考虑微动时的预测精度, 且直孔搭接件的预测精度明显高于沉孔搭接件。

关键词: 微动; 应力强度因子; 有限元; 单搭接件

中图分类号: V215.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)06-0048-06

Study on Fatigue Life of Single Lap Joint Considering Fretting

YANG Mao-sheng¹, ZHANG Tao², CHEN Yue-liang¹, BI Yu-quan¹

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China;

2. Unit 92514 of PLA, Yantai 264006, China)

Abstract: A global finite element model and sub-model of single lap joint considering fretting was performed using the commercial code ABAQUS to study the influence of fretting on fatigue life of lap joint. Distribution rules of contacting stress were calculated using this model. The sub-model with the fracture mechanics code FRANC2D/L was reconstructed by substituting bolts with their equivalent loads of normal and shear tractions. Also stress intensity factors along crack lengths were calculated. At last the fatigue life prediction model for single lap joint considering fretting was established, and the experimental data was compared to the computing results. The results showed that fretting has a great effect on the fatigue life of single lap joint. The prediction precision considering fretting is better than the unconsidering one; also the prediction precision of straight hole is better than that of the countersunk clearly.

Key words: fretting; stress intensity factor; finite element; single lap joint

微动就是在2个接触表面发生的一种磨损现象,按其损伤形式可分为微动磨损、微动腐蚀和微动疲劳,其中微动疲劳是最为常见也是危害最大的一种^[1]。它普遍存在于航空航天、机械、桥梁工

收稿日期: 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(50675221, 51075394)

作者简介: 杨茂胜(1976—),男,重庆人,博士,工程师,主要研究方向为飞机结构疲劳寿命。

程等领域的紧密配合件之中,已成为大量关键零部件的主要祸患之一^[2-3]。为了保证结构件的使用安全,需要对微动疲劳结构进行寿命评估,其中最为重要的研究内容之一是微动疲劳裂纹应力强度因子的计算,笔者采用 ABAQUS 和 FRANC2D/L 软件,对考虑微动影响的搭接结构进行了有限元分析。

搭接件的三维建模和计算比较耗时,但随着计算机和软件的发展,对搭接件进行三维有限元分析已变得相对容易,这样的分析也开始在公开文献中出现^[4-6]。一些早期的研究没有考虑螺栓与孔间的接触,用简化的方式来模拟螺栓的作用,如对孔边节点的径向位移进行约束。研究人员^[7-9]对螺栓与孔间接触建立了详细的模型,把螺栓看成固定的圆柱形接触面^[10-11],或者把螺栓看成弹性体并用三维有限元模型进行模拟^[12]。以上模型都对实际搭接件进行了大量简化,没有考虑螺栓与孔壁间以及2板间的微动接触与摩擦。文中利用 ABAQUS 软件对三螺

栓单排搭接件进行了三维有限元分析,并在关键部位建立有限元子模型,通过应力强度因子的计算,建立了考虑微动影响的搭接结构疲劳寿命预测模型,并将计算值与试验值进行了对比,证明了笔者所建模型的正确性。

1 单搭接结构件试验

1.1 材料和试件

试验件为厚 2 mm 的 LY12CZ 铝合金板制作的搭接件,沿 L-T 方向取材。采用三螺栓单排连接,螺栓与孔间无干涉配合,如图 1 所示。螺栓规格见表 1,试件代号与详细尺寸见表 2。表 1 中 D 为螺栓头直径、 D' 为螺栓直径、 d 为螺栓杆直径、 H 为沉头螺栓头高度、 H' 为螺栓的高度,表 2 中 S 为铆钉孔的间距、 T 为实验时施加在螺栓上的扭矩。试件装配时,每个螺栓螺帽上施加 0.5 N·m 的扭矩。

表 1 螺栓规格和尺寸

Table 1 The specification and size of bolt

螺栓代号	类型	材料	D /mm	D' /mm	d /mm	H /mm	H' /mm
CSD4	沉头	ML30CrMnSiA	7.8	6	4	1.2	1.6
FSD4	平头	ML30CrMnSiA	7.8	6	4	1.2	1.6
CLD4	沉头	LY10	7.8	6	4	1.2	1.6
CTD4	沉头	Ti-6Al-4V	7.8	6	4	1.2	1.6
CSD5	沉头	ML30CrMnSiA	9.5	7.8	5	1.4	2.0
CSD6	沉头	ML30CrMnSiA	11.5	8.7	6	1.7	2.4

表 2 试件模式

Table 2 Specimen mode

试验组号	试件编号	螺栓代号	S /mm	T /(N·mm)
基准试验	1—3	CSD4	20	轻微用力
A	D1	CSD5	20	轻微用力
	D2	CSD6	20	轻微用力
B	S1	CSD4	25	轻微用力
	S2	CSD4	18	轻微用力
C	H	FSD4	20	轻微用力
D	M1	CTD4	20	轻微用力
	M2	CLD4	20	轻微用力
E	K	CSD4	20	标准

1.2 试验方案

1) 静拉伸试验。以每秒 10 N 加载到 1 kN,用应变仪记录下各应变片随载荷的变化关系。

2) 疲劳试验。静拉伸后卸载到 0,对试件进行等幅疲劳试验,直至试件失效,每组试件做 3 件。加载波形为正弦波,应力比 $R=0.1$,载荷 $\sigma_{\max}=180$ MPa,频率为 6 Hz。

1.3 试验结果

试件分解后,在显微镜下进行观察,发现虽然所有螺栓的预紧力很小,但在每个试件的接触面螺栓孔处都出现了微动磨损。图 2 和图 3 分别是指编号

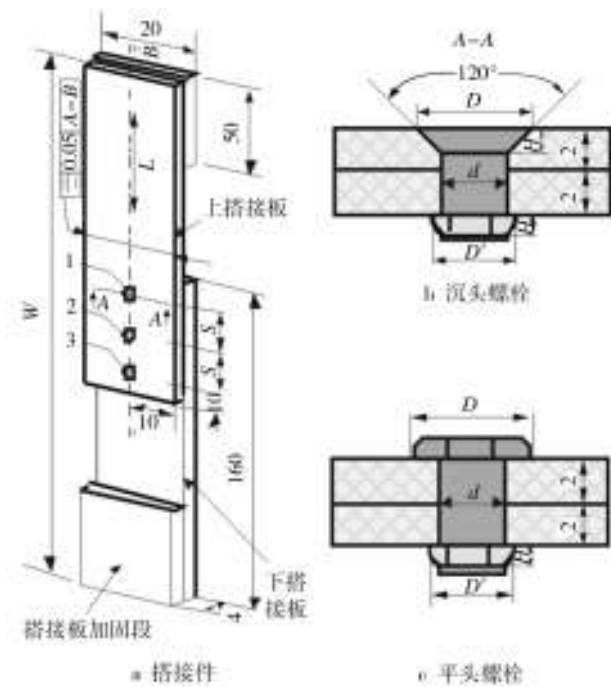


图1 搭接件几何尺寸

Fig. 1 Representation of lap joint

为D2和H1的试件1#孔处两板接触面和孔壁的微动磨损情形,可以看出上板的磨损比下板的磨损严重,沉孔的磨损比直孔的磨损严重,另外疲劳裂纹都萌生于上板微动磨损的边缘处,说明搭接件的断裂失效与微动疲劳损伤有关。

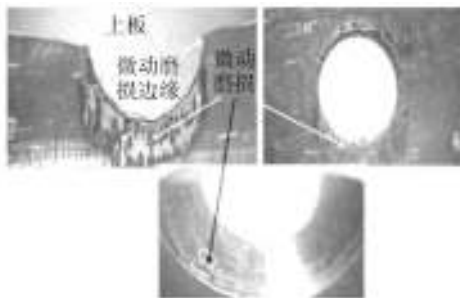


图2 D2-2试件1#孔边磨损状况

Fig. 2 Fretting status of 1# hole border of D2-2 specimen

2 应力强度因子计算

2.1 有限元全局模型

文中采用ABAQUS软件对搭接结构进行三维非线性有限元分析。上、下搭接板和螺栓都用20节点

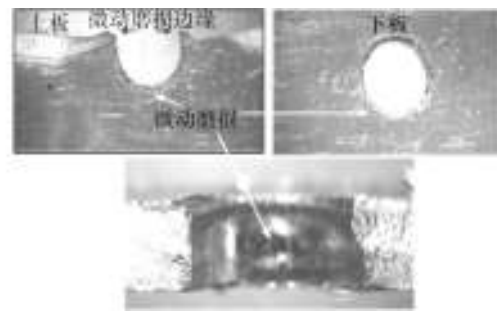


图3 H1-3试件1#孔边磨损状况

Fig. 3 Fretting status of 1# hole border of H1-3 specimen

六面体减缩积分单元C3D20R进行网格划分。为防止上、下板之间以及板与螺栓之间的互相穿透,在它们之间设立接触关系。螺栓与板间的接触取螺栓外表面为主面,螺栓孔内表面为从面,根据文献取钢和钛合金与铝合金的摩擦系数为0.2^[13]。上、下板间的接触取上板下表面为主面、下板上表面为从面,取两板间的摩擦系数为0.5^[11]。图4为设置接触后的搭接部位有限元模型。

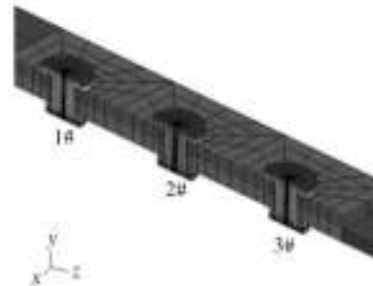


图4 搭接件接触关系

Fig. 4 Contact relation of lap joint

边界条件如图5所示,对上、下板的两端加固段(其长度约等于试验时的夹持段长度)z向位移进行约束,远方载荷施加在上板的截面A,下板截面B的所有节点的3个自由度都进行约束。



图5 搭接件模型边界条件

Fig. 5 Boundary conditions of lap joint

螺栓预紧力根据式(1)计算:

$$T = kF_0 d \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: T 为螺栓施加的扭矩; d 为螺栓公称直径; k 为拧紧力矩系数; F_0 为预紧力。由于螺栓、螺母和被连接件等摩擦面的状况和润滑情况不同,摩擦系数一般在0.1~0.2之间,文中 k 取值为0.2^[13]。

2.2 有限元子模型

在搭接件分析中,搭接部位是研究的重点区域,因此有必要对该接触区,尤其是螺栓孔与板间接触边缘(裂纹通常在此处萌生)进行网格细化以获得更为精确的局部应力、应变、位移场。

由于三维有限元分析比较耗时,为提高计算效率,在子模型中采用二维分析方法建模。图6为螺栓杆与上板接触的二维子模型结构示意图,螺栓左端的弹性支撑可以实现远场循环应力与螺栓间载荷传递的精确模拟,螺栓中心在 x 和 y 向的位移都受到约束,以防止其产生刚体运动。远场应力均匀施加在两个端面,螺栓与板间的接触用主-从面接触对来实现,所有的螺栓及板都用四节点平面应力单元模拟,整个模型有3 945个节点和3 852个单元。

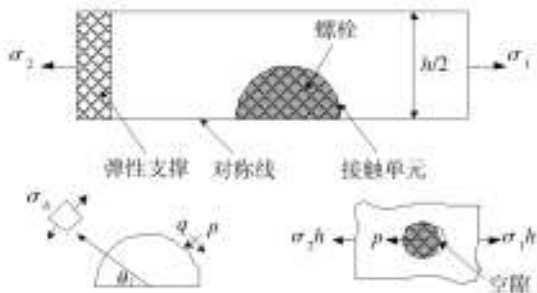


图6 二维子模型结构

Fig. 6 Schematic of 2-dimensional sub-model

2.3 应力强度因子影响系数

在不考虑微动的影响下,应力强度因子通常用式(2)来计算:

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (2)$$

式中: K 是应力强度因子; σ 是远场循环应力; a 是裂纹长度; Y 是裂纹形状参数, $Y=1.12$ 。当考虑微动影响时,其计算方法如下。

在FRANC2D/L中重建子模型,其中螺栓用等效的正应力和剪应力来代替。根据对称性,模型下边

在垂直方向的位移为0,螺栓中心处在 x 方向的位移也为0。左右端的拉应力 σ_1 和 σ_2 以及接触区的正应力 $p(\theta, r)$ 和剪应力 $q(\theta, r)$ 都由ABAQUS子模型计算所得。由搭接件试验结果可知,裂纹通常对称分布于接触区边缘,即 $\theta=90^\circ$ 处。因此,在该处插入一初始裂纹,其长度为 $24 \mu\text{m}$, 裂纹倾斜角为 45° ^[14],如图7所示。

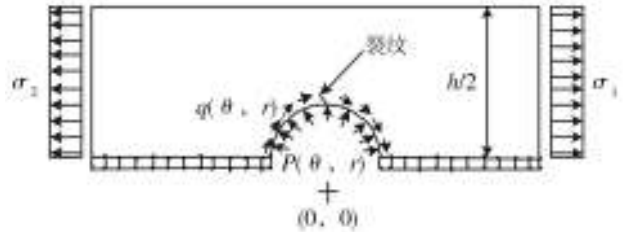


图7 在FRANC2D/L中重建子模型

Fig. 7 Reconstruction of sub-model in FRANC2D/L

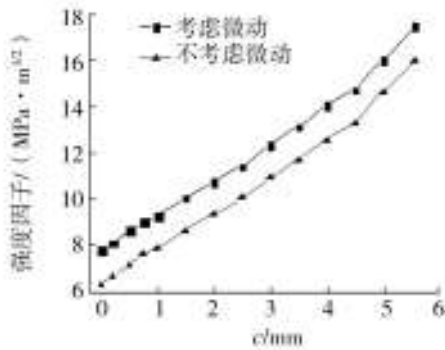
FRANC2D/L在进行裂纹扩展分析时,裂纹每扩展一步会基于最大周向应力准则决定裂纹的扩展方向,其应力强度因子大小与裂纹长度的关系历程可由FRANC2D/L中的裂纹扩展功能来实现。图8为2种计算方式得到的内表面应力强度因子的对比。从图8中可以看到,不管是直孔孔边裂纹还是沉孔孔边裂纹,2条曲线的形状很相似,只是考虑微动影响时的应力强度因子比不考虑微动时的略大,说明存在微动的情况下,裂纹扩展动力增大,搭接件的扩展寿命降低。

为了更深入地研究微动对搭接件孔边裂纹应力强度因子的影响程度,引入应力强度因子的影响系数 β , 定义为:同一裂纹长度时考虑微动影响的应力强度因子与不考虑微动影响的应力强度因子的比值。图9为直孔和沉孔时的应力强度因子影响系数 β 随孔边裂纹长度变化的关系曲线。从图9中可以看到:随着裂纹长度的增加,应力强度因子影响系数 β 逐渐降低,裂纹长度越大,降低的幅度越平缓。另外,从图9中还可以得知,在裂纹扩展的前期,沉孔的应力强度因子影响系数比直孔的大,随着裂纹长度的增加,二者的差距越来越小,说明微动对沉孔孔边裂纹的影响程度比直孔时的大。

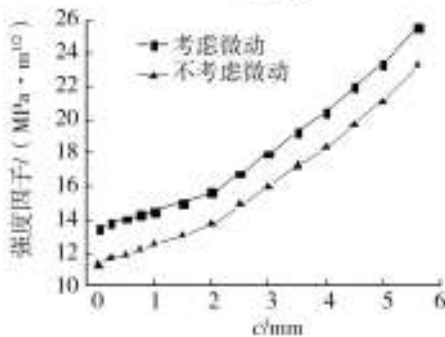
3 疲劳寿命预测

3.1 计算模型

对搭接件孔边裂纹来说,除了受远端的疲劳载



a 直孔



b 沉孔

图8 考虑微动力与不考虑微动力时应力强度因子对比

Fig. 8 Comparison of k whether considering fretting

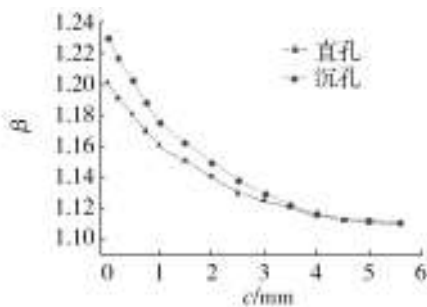


图9 直孔与沉孔应力强度因子影响系数对比

Fig. 9 Comparison of k of straight hole and countersunk

荷 S 外,还受到力偏移引起的第二弯矩 M 和孔壁钉载 p 的影响,如图 10 所示。

文中采用 AFGROW 中对 3 种载荷的处理方法,其中远端疲劳载荷可由应力传递比计算为 0.68,裂纹表面弯曲应力和孔壁承受应力与远端最大拉应力的比 $\sigma_{bending}/\sigma_0$ 和 $\sigma_{bearing}/\sigma_0$,分别为 1.72 和 0.365。另外,微动对裂纹的影响可通过 β 修正系数来实现。

通过对断口的分析发现,裂纹一般起源于孔壁与接触面相交处,为此采用 AFGROW 计算时选择了

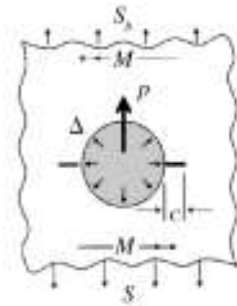


图 10 裂纹扩展分析模型示意

Fig. 10 Schematic of model used for crack growth analysis

直孔边存在两等尺寸径向角裂纹,计算模型如图 11 所示。计算时取初始裂纹长度等于 LY12CZ 材料的 K 值 $(0.1147 \text{ mm})^{[15]}$,并把 K 看成半圆形的表面裂纹 ($a=c$),裂纹扩展过程中不限制 a/c ,由软件根据应力状态自动改变。计算载荷等同于试验条件,并输入 LY12CZ 应力比为 0.06 时的裂纹扩展速率曲线。

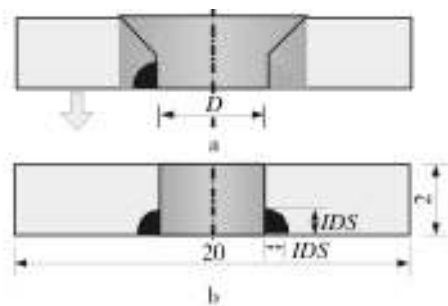


图 11 AFGROW 计算模型

Fig. 11 AFGROW model for crack growth analysis

3.2 计算结果分析

试验值以及考虑微动和不考虑微动的预测结果见表 3。

由表 3 可以看出,在不考虑微动影响情况下,预测值的误差大多在 20% 左右;在考虑微动影响后,预测精度有较大的提高,误差降到 10% 左右。这说明微动对搭接结构有较大的影响,它可以较大幅度地降低搭接件的疲劳寿命,在飞机结构疲劳设计时应将这一因素考虑进去。

另外,直孔搭接件的预测精度明显高于沉孔搭接件,如在不考虑微动时,直孔搭接件 H 的预测误差为 10.5%,而相同螺栓材料及尺寸的沉孔基准试件其误差达到了 23.51%;在考虑微动时,二者分别为 3.6% 和 11.2%。这主要是因为 AFGROW 软件不能分析沉孔孔边裂纹,在分析沉孔搭接件时采用直孔与

表3 预测值与试验值的对比

Table 3 Comparison of predicted and experimental data

试件编号	试验均值/ 置信区间	不考虑微动		考虑微动	
		预测值/(个循环)	误差/%	预测值/(个循环)	误差/%
基准试件	5 504/[4 570,6 620]	6 798	23.51	6 120	11.2
D1	1 180/[745,1 867]	1 426	20.82	1 294	9.7
D2	1 016/[698,1 478]	1 268	24.79	1 144	12.6
S1	3 843/[3 191,4 627]	4 582	19.23	4 169	8.5
S2	6 970/[4 680,10 195]	8 290	18.94	7 485	7.4
H	8 455/[6 395,11 176]	9 342	10.5	8 759	3.6
M1	5 512/[4 727,6 276]	6 692	21.41	6 036	9.5
M2	5 523/[4 500,6 779]	6 665	20.68	6 080	10.1
T	11 893/[10 594,13 353]	13 970	17.47	12 689	6.7

应力修正曲线相结合的方法。不管是直孔搭接件还是沉孔搭接件,预测值基本上都位于置信区间内,尤其是在考虑微动影响后,其预测值全部位于置信区间内(置信度为95%),这充分说明所建模型是有效可行的,且便于工程应用。

4 结论

运用有限元方法计算了搭接结构接触区的应力分布和应力强度因子,建立了考虑微动影响下的搭接结构疲劳寿命计算模型,并将模型预测值与试验值进行了对比,经研究得到如下结论:

1) 考虑微动影响下的预测值比不考虑微动时的预测值更接近于试验值,证明了所建模型的正确性、有效性;

2) 直孔搭接件的预测精度明显高于沉孔搭接件,主要是因为分析沉孔搭接件时采用直孔与应力修正曲线相结合的方法;

3) 微动对搭接结构有较大的影响,它可以较大幅度地降低搭接件的疲劳寿命,在飞机结构疲劳设计时应将这一因素考虑进去。

参考文献:

[1] 周仲荣. 微动磨损与微动疲劳[M]. 成都:西南交通大学出版社,1999.

[2] GOLDEN P J, GRANDT A F. Measurement of the Fatigue Crack Propagation Threshold of Fretting Induced Cracks in Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2004(26): 281—288.

[3] GOLDEN P J, GRANDT A F. Fracture Mechanics Based Fretting Fatigue Life Predictions in Ti-6Al-4V[J]. Engineering fracture mechanics, 2004(71):2229—2243.

[4] CAMANHO P P, MATTHEWS F L. A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates[J]. J Composite Mater. 1999,33(24):2248—2280.

[5] CAMANHO P P, MATTHEWS F L. Delamination Onset Prediction in Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates[J]. J Composite Mater. 1999,33(10):906—927.

[6] MCCARTHY M A, MCCARTHY C T. Finite Element Analysis of the Effects of Clearance on Single Shear, Composite Golted Joints[J]. J Plastic, Rubbers Composites, 2003, 32(2):65—70.

[7] 徐超,余绍蓉,郑晓亚,等. 机械螺栓法兰连接的有限元力学模型比较研究[J]. 机械设计与制造. 2009, 37(6): 37—39.

[8] 冯军军,刘麟,顾伯勤. 基于ABAQUS的承受外弯矩作用的螺栓法兰连接的参数化研究[J]. 润滑与密封,2010,35(10):55—58.

[9] 夏卫明,郑翔,杨晓俊. 基于ANSYS的盲孔螺栓联接的有限元仿真[J]. 机械设计与制造. 2009,37(7):47—50.

[10] 周芝庭,冯建芬,谷春笑. 基于ABAQUS螺栓接头的接触有限元分析[J]. 金陵科技学院学报,2008,24(4):9—12.

[11] 王萌,石永久,王元清. 高强度螺栓连接抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报,2011,12(3):42—44.

[12] 郁大照. 腐蚀和多处损伤(MSD)对飞机结构完整性的影响研究[D]. 烟台:海军航空工程学院,2008.

[13] 濮良贵,纪名刚. 机械设计[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

[14] 杨茂胜,陈跃良. 微动疲劳结构应力强度因子有限元分析[J]. 航空学报,2010,31(10):1968—1973.

[15] 卞贵学,陈跃良,张丹峰. 基于IDS铝合金预腐蚀疲劳寿命研究[J]. 航空学报,2008,29(6):1526—1530.