

铆接干涉量对疲劳寿命的影响分析

杨悦,余路,蒋红宇,王宇波
(上海飞机制造有限公司,上海 200436)

摘要: 铆接作为飞机结构装配中常用的装配方法,其特点主要是连接可靠,工艺简单,适用于各类机体结构之间的连接,其质量是提高飞机疲劳寿命的重要因素。基于塑性力学中铆钉镦粗的变形受力特点和机械连接可靠性理论,采用主应力法,结合有限元仿真,分析铆接过程中试件的受力情况,构建铆接变形受力模型,通过工艺试验,获得干涉量影响疲劳寿命的影响规律,在机械连接可靠性前提下提出飞机铆接的最佳干涉量范围。

关键词: 飞机装配; 铆接工艺; 干涉量; 疲劳寿命; 有限元分析

中图分类号: V215.5; V262.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)02-0087-04

The Effects of Interference-fit Level on Fatigue

YANG Yue, YU Lu, JIANG Hongyu, WANG Yubo
(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

Abstract: As a common assembling method with reliable joint structure and simple process, riveting is used for all kinds of structure and its quality is an important factor to improve aircraft fatigue life. To achieve this, the analysis of the riveting deformation characteristic was completed by the plastic mechanics. Based on the theory of reliability of joint structure, the load of pieces was analysed and a riveting physical model was built. Through the tests, the effects of interference-fit level on fatigue were analyzed and the reasonable interference-fit level was obtained by main stress method and finite element simulation.

Keywords: aircraft assembly; riveting process; interference-fit level; fatigue; finite element analysis

0 引言

连接技术是机体装配的基础技术,提高连接质量是保障飞机机体长寿命的重要因素^[1-2]。铆接作为机械连接的一种,是飞机构件连接的主要方式,具有较稳定的连接结构,而且其操作容易,可以用于较复杂的复合材料和金属。例如一架普通民用飞机上的铆钉可达100多万件^[3]。铆钉主要是通过铆接工艺进行结构连接。因此,为了实现飞机安全可靠地服役,首要任务就是提高构件的铆接质量。

相对于传统铆接技术,干涉铆接技术^[4]可以实现构件连接的较高和较均匀的干涉量,不仅可以达到飞机减重的需求,而且可以成倍地提高构件的疲劳性能,减小构件裂纹的发生,是满足高质量、高寿命、低成本的主要方法之一^[5]。因此干涉铆接技术具有突出的技术优点,针对夹层厚度较大的铆接构件,也可实现整个钉杆的干涉配合^[6-7]。目前影响干涉量数值及均匀性的因素包括铆接力等工艺参数、铆钉材质等结构因素及铆接方法和设备。

1 铆接变形受力的有限元分析

1.1 铆接受力过程分析

根据铆接的成形机理,可将铆接过程分成4个变形阶段:自由镦粗变形、弹性变形、塑性变形、弹性回弹阶

段^[8-9]。通过采用deform软件进行铆接过程的有限元仿真分析,观察铆接受力过程的加载情况,如图1所示。

根据仿真的受力情况分析,结合铆接变形的特点,对铆接过程做进一步的简化分析:初始时为自由镦粗变形,变形过程平稳,材料的流动阻力相对较小,载荷保持平稳上升;随着行程的增加,变形受到孔周的约束,变形抗力增大,与接触面的摩擦力也增大,因此载荷迅速增大;直至铆接过程结束。

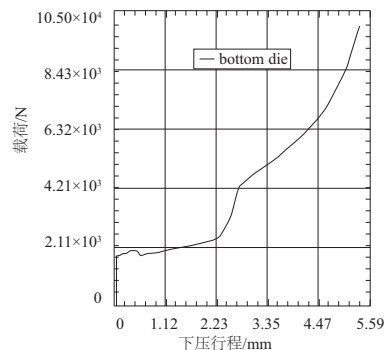


图1 承受载荷随下压行程的变化曲线

1.2 铆接仿真模型构建^[10]

本仿真采用的铆钉直径为4mm,连接构件为2024-T3铝

第一作者简介:杨悦(1987—),女,江苏连云港人,硕士,研究方向为飞机装配工艺。

合金。材料参数如表 1 所示,假设压铆设备为理想刚体。

表 1 金属材料性能

铝合金	弹性性质			塑性性质/MPa	
	E/MPa	ν	$\rho/(\text{g}/\text{mm}^3)$	σ_s	σ_b
2117	71 000	0.33	0.002 75	165	296
2024-T3	73 100	0.33	0.002 78	375	495

表 1 中: E 为杨氏模量; ν 为泊松比; ρ 为密度; σ_s 为屈服强度; σ_b 为拉伸强度。

仿真设置如下:

1) 模型导入:通过 CATIA 软件建立铆钉和连接构件的模型,导入 Deform 中。本试验以凸头铆钉工艺模型为研究对象。

2) 仿真属性设置:铆接过程属于冷铆,工作环境温度设为 20°C ,铝合金之间接触摩擦系数为 0.3,其他接触摩擦系数为 0.12。

3) 网格重划分:铆钉和连接件为塑性变形,按照四面体网格进行划分。

4) 设定模拟条件:存储步骤为 133 步,每 10 步存一次。

1.3 铆接过程及应力变化分析

通过有限元仿真,获得铆接后铆钉和连接板的应力状态,见图 2(行程下压 5.32 mm,即铆头高度为 1.98 mm 时应力情况)。通过应力分析,获得铆接中铆钉和连接板的应力集中部位。

结果表明:随着不断进行的铆接过程,铆钉的最大应力处为与工件接触的下表面。工件的最大应力处为孔周与铆钉铆头接触处,此两点是受力薄弱点,易产生疲劳裂纹,所以实际装配中,提高这两处部位的承载能力可以有效保证铆接质量,提高疲劳寿命^[11]。

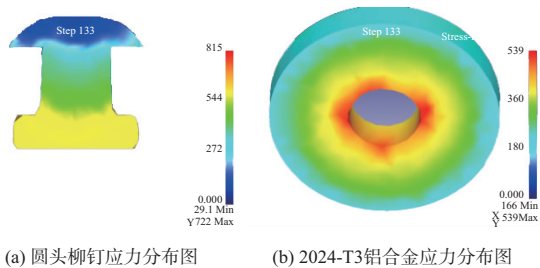


图 2 圆头铆铆接

1.4 铆接干涉量的有限元分析结果讨论

通过仿真过程中控制孔径和铆头尺寸,获得铆接干涉量的大小及均匀性,为后续减少试验次数,提供技术依据。

干涉量的测量方法:通过沿钉杆方向,每隔 0.4 mm,依次取 10 个点,然后按式(4)、式(5)计算干涉量。

$$\text{绝对干涉量: } E = D' - D \quad (4)$$

$$\text{相对干涉量: } I = [(D' - D) / D] \times 100 \quad (5)$$

式中: D' 为铆接后的铆钉直径; D 为铆接前紧固孔直径。

通过工艺参数的控制获得铆接沿钉杆方向的等效应变情况。仿真发现当铆模下压量为 5.32 mm,即铆头高度

为 1.98 mm 时,能获得最大的铆接干涉量,如表 2 所示。

表 2 铆接有限元干涉量数据分析

仿真试件	变形前孔径/mm	孔位(孔的轴向测量点)	变形后铆钉直径/mm	绝对干涉量/mm	相对干涉量/%
半圆头铆钉	4.1	1	4.100	0.001	0.0110
		2	4.107	0.007	0.1686
		3	4.108	0.008	0.1887
		4	4.103	0.003	0.0637
		5	4.109	0.009	0.214
		6	4.197	0.097	2.365
		7	4.377	0.277	6.768
		8	4.678	0.578	14.090
		9	5.136	1.036	25.270
		10	5.771	1.671	40.750

通过有限元仿真分析铆接过程,研究了铆接工艺过程和铆接后的应力、应变情况,通过铆头高度和孔径尺寸的工艺参数控制,分析了铆接干涉量大小及均匀性情况。仿真结果可以发现:

1) 仿真分析铆接过程中的铆接力随着铆接下压量的增加,呈现平稳变化后大幅度增加的趋势,铆接力的变化趋势与理论的铆接工艺过程吻合。

2) 仿真分析铆接干涉量的大小和均匀性情况,干涉量的大小呈现楔形形状,沿钉杆从铆头向钉头方向呈现递减的趋势,减少趋势逐渐平缓。

3) 仿真分析铆接后的应力情况,获得最易出现裂纹的危险截面,即铆钉和连接板的连接接触面,此处承受的应力最大。

4) 仿真分析发现通过工艺参数研究干涉量的情况,获得最佳的工艺参数,即铆头高度为 1.98 mm,孔径尺寸为 4.1 mm 的干涉量相对较大。

2 铆接疲劳寿命分析

2.1 铆接疲劳增益理论

基于塑性变形的最大主应力方法和受力机理分析,构建铆接物理模型,以进入屈服的金属板为研究对象,如图 3 所示。

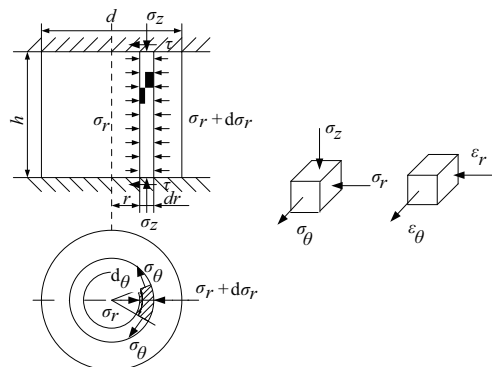


图 3 连接板受力分析示意图

建立受力平衡方程,求解得铆接变形受力模型,如下式:

$$\sigma'_r = -\sigma_s e^{-\frac{\mu d_2}{h} I} - \sigma_s \quad (1)$$

$$\sigma'_\theta = \sigma_s e^{-\frac{\mu d_2}{h} I} + \sigma_s \quad (2)$$

$$\sigma'_z = -\sigma_s e^{-\frac{\mu d_2}{h} I} \quad (3)$$

式中: h 为连接板的厚度; d_2 为紧固孔的直径; σ'_r 为孔边所受的径向干涉应力; σ'_z 为孔周受的轴向干涉应力; σ'_θ 为孔边所受的周向干涉应力; σ_s 为材料的屈服应力; μ 为摩擦系数; I 为铆接试件的相对干涉量。

分析上述的铆接变形受力模型,进行讨论分析:

根据疲劳增益理论,铆接产生的干涉应力可以显著提高疲劳性能。根据式(1)-式(3)的函数关系,干涉量范围在 $[0,4\%]$ 内,干涉应力与干涉量成正比关系。所以,在一定范围内,铆接干涉量越大,干涉应力也越大,对提高疲劳寿命越有益。

综上,通过控制工艺参数达到控制干涉量的大小,以期获得最佳的干涉应力,提高构件的疲劳性能,可以实现长寿命、高质量的装配。

2.2 试验方案验证

以疲劳寿命作为评价铆接干涉应力的评价指标,研究铆接干涉量大小对试件疲劳寿命的影响,验证铆接变形受力模型。

试验验证平台主要包括数控机床、气动压铆机、疲劳试验机和光学影像测量仪等。

连接件材料为航空用铝合金 2024-T3,采用叠层制孔,叠层区的长度为 20 mm,结构形式如图 4 所示。

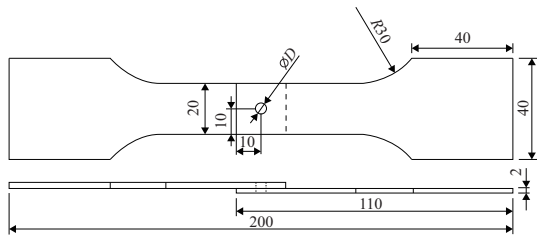


图 4 疲劳试件的结构形式

通过进行静载试验确定两个不同等级载荷下的疲劳试验,试验方案如表 3 所示。

表 3 疲劳试验方案

工艺参数/mm		试件编号	
孔径	镦头高度	平均载荷 1.19 kN	平均载荷 1.39 kN
4.00	1.6	5、6、7、8	9、12、13、14
	1.8	10、11、21、22	23、24、25、26
	2.0	34、35、36、37	38、39、40、41
	2.4	49、50、51、52	53、54、55、56
	2.8	64、65、66、67	68、69、70、71
	3.2	81、82、83、84	85、86、87、88

运用自动制孔和压铆进行疲劳试件制备,铆接干涉量影响疲劳性能的试验流程如下:

- 1) 材料准备、试件标记;
- 2) 机器制孔,控制孔径尺寸为 4.00 mm;
- 3) 清理、去毛刺;
- 4) 测量孔径并做记录;
- 5) 进行压铆,控制镦头高度为 1.6~3.2 mm;
- 6) 测量镦头尺寸并记录;
- 7) 剖切试验及干涉量测量;
- 8) 数据分析。

2.3 铆接试件疲劳试验结果分析和讨论

通过应力级别分别为 1.19 kN 和 1.39 kN 的共 90 组试件的干涉量测量和疲劳试验结果分析讨论,发现试件的疲劳裂纹都是出现在连接板上,其破坏形式是连接板受拉应力破坏,所以本论文的受力模型是以连接板为研究受力对象,该结果符合理论、仿真和试验情况。

通过测量铆接后的孔径,计算获得试件干涉量,去除干涉不完全及奇异点,获得两个应力水平下的试件干涉量和疲劳寿命,并利用 origin 进行数据拟合,得到两应力级别下干涉量与疲劳寿命的关系拟合曲线,如图 5 所示。

1) 试验获得的干涉量和干涉应力,干涉量与疲劳寿命干涉应力随着干涉量的增加,也不断增大,疲劳寿命呈递增变化;

2) 干涉量处于 $[0,3\%]$ 内,即最佳干涉量时,疲劳寿命处于最大值,此时的干涉量能最大限度地保证结构件的疲劳寿命;

3) 当干涉量继续增加时,此时的干涉应力过大,会造成孔边裂纹增长,导致结构件疲劳寿命降低。

讨论发现,试验获得干涉量对铆接寿命的影响与理论的铆接变形受力模型的干涉量范围基本一致,通过该模型,可以获得最佳干涉量的范围,对铆接变形的分析和铆接工艺具有工程指导意义。

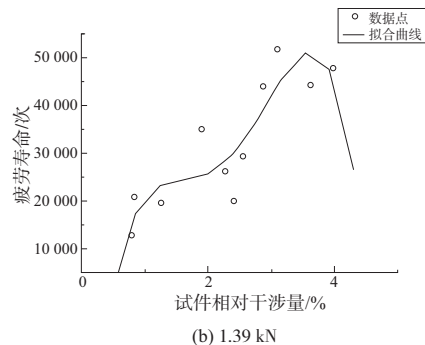
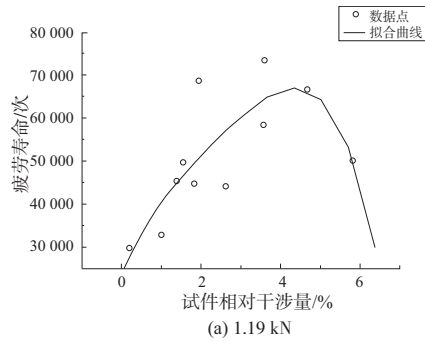


图 5 不同应力载下试件的拟合曲线

3 结语

本文基于塑性力学中铆粗的变形受力特点,采用仿真与试验研究手段,得出以下结论:

1) 基于铆接过程机理分析,结合有限元仿真结果,获得铆接过程的受力变化情况;铆接初始为自由铆粗变形,材料所受的流动阻力较小,载荷保持平稳上升;随着行程的增加,变形受到孔周的约束,变形抗力增大,与接触面的摩擦力也增大,因此载荷迅速增大,直至铆接过程结束。

2) 通过建立铆接变形受力模型,探讨获得铆接干涉量与干涉应力的关系:在一定范围内,干涉应力随着干涉量增加而变大,越大的干涉应力对提高疲劳寿命越有益。

3) 通过控制铆头高度获得不同干涉量数值,开展铆接干涉量大小对试件疲劳寿命的影响分析,随着干涉量的增加,干涉应力也不断增大,疲劳寿命呈现明显递增趋势,直到达到最佳干涉量的数值。所以,该方法可以获得能保证构件高质量长寿命连接的最佳干涉量范围。

4) 铆接干涉量决定了铆接干涉应力的大小,而铆接干涉应力直接影响了疲劳寿命,由于前期对于铆接试验件的干涉应力测量缺少方法,未做测量,所以导致铆接变形的受力模型无法进行定量的验证,只能进行定性分析,希望后期能通过试验进一步地进行验证。

参考文献:

[1] 洪华舟. 面向飞机长寿命连接的制孔工艺研究[D]. 南京:南

京航空航天大学,2012:2-8.

[2] 杨悦. 飞机薄壁件均匀合理干涉铆接工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013:2-3, 9-25.

[3] KEBIR H, ROELANDT J M, CHAMBON L. Dual boundary element method modelling of aircraft structural joints with multiple site damage[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(4):418-434.

[4] 杨亚文,李永策,段宝. 干涉铆接及其新的成形方法[J]. 沈阳航空工业学院学报,1999,16(4):3-5.

[5] 曹增强. 应对我国大飞机研制的装配连接技术[J]. 航空制造技术,2009,52(2):88-91.

[6] 田秀云,刘永. 干涉配合铆接对疲劳强度的影响[J]. 中国民航学院学报,2006,24(4):9-10,15.

[7] 张洪双. 铆接工艺参数分析[J]. 机械设计与制造,2011(6):241-243.

[8] 刘平. 铆接变形及其有限元分析[D]. 西安:西北工业大学,2007.

[9] 刘平,李原,张开富,等. 压铆过程阶段划分与压铆力计算[J]. 机械科学与技术,2009,28(4):514-516,521.

[10] 邹濛,王利霞,王杰,等. 基于 ABAQUS 的热辅助铆接分析[J]. 机床与液压,2019,47(8):62-66.

[11] SERGEEV B, MADENCI E, AMBUR D R. Influence of bolt spacing and degree of anisotropy in single-lap joints[J]. Computers & Structures, 2000, 76(1/2/3):89-103.

收稿日期:2019-12-13

(上接第 83 页)

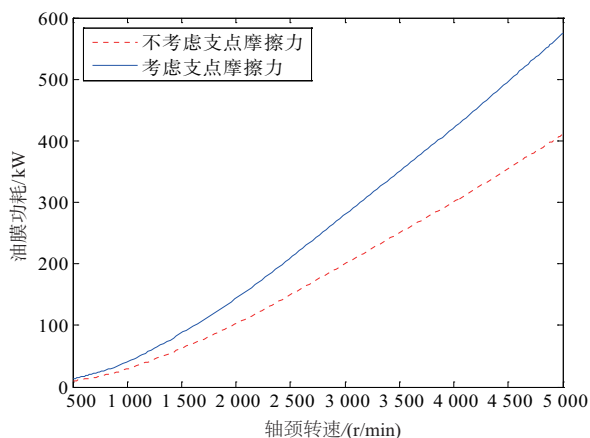


图 12 油膜功耗随轴颈转速的变化

3) 可倾瓦径向滑动轴承的润滑性能受支点摩擦力的影响较大,因此在轴承设计时,将支点摩擦力的影响因素考虑进来是很有必要的。

参考文献:

[1] WU Y H, FENG K, ZHANG Y, et al. Nonlinear dynamic analysis of a rotor-bearing system with porous tilting pad bearing support[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 94(2):1391-1408.

[2] CIULLI E, FORTE P, LIBRASCHI M, et al. Set-up of a novel test plant for high power turbomachinery tilting pad journal bearings[J]. Tribology International, 2018, 127:276-287.

[3] 田大成,孙淑凤,孙立佳,等. 可倾瓦径向气体轴承支点分析[J]. 低温与超导,2014,42(10):22-26.

[4] 王占朝,刘莹,郭飞,等. 支点变形对水润滑可倾瓦推力轴承启动过程影响[J]. 摩擦学学报,2018,38(2):180-188.

[5] SUH J, CHOI Y S. Pivot design and angular misalignment effects on tilting pad journal bearing characteristics: four pads for load on pad configuration[J]. Tribology International, 2016, 102:580-599.

[6] 刘思涌,肖忠会,闫志勇,等. 支点弹性、阻尼可倾瓦轴承动力特性数值仿真及试验研究[J]. 机械工程学报,2014,50(19):88-96.

[7] 李萌萌,王小静,蒋登峰,等. 可倾瓦轴承支点静刚度的有限元分析[J]. 润滑与密封,2015,40(8):109-111,132.

[8] SUH J, PALAZZOLO A, CHOI Y S. Numerical modeling and analysis of flexure-pivot tilting-pad bearing[J]. Journal of Tribology, 2017, 139(5):051704.

[9] CHILDS D, HARRIS J. Static performance characteristics and rotordynamic coefficients for a four-pad ball-in-socket tilting pad journal bearing[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(6):062502.

[10] TSCHOEPE D P, CHILDS D W. Measurements versus predictions for the static and dynamic characteristics of a four-pad, rocker-pivot, tilting-pad journal bearing[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2013; Turbine Technical Conference and Exposition, San Antonio, Texas, USA: 2013.

收稿日期:2020-01-16