

干涉对复合材料机械连接强度的影响

Effect of Interference-Fit on Failure of Composites Bolted Joint

西北工业大学机电学院 曹增强 王 武
中航工业成都飞机设计研究所 杨 军

[摘要] 采用 ANSYS10.0 软件,以有限元分析为主要手段分别对间隙配合及干涉配合复合材料机械连接进行了三维模拟。在模拟过程中综合考虑了复合材料特性、螺栓与复合材料板及复合材料板与复合材料板之间的摩擦和接触以及螺栓和复合材料板的约束条件。解决了复合材料干涉配合高精度有限元模拟的关键技术,并通过预紧单元引入拧紧力矩。以此为基础,研究了间隙及干涉对复合材料机械连接强度的影响。结果表明:在复合材料机械连接中采用干涉量适当的干涉配合可以有效提高接头强度。

关键词: 复合材料 螺栓连接 干涉配合 强度预测

[ABSTRACT] A parametric finite element analysis is conducted to investigate the effect of interference-fit on failure of the composites bolted joints. The analysis is based on a three-dimensional finite element model developed by ANSYS 10.0 software. The influence of composites properties, preload and other vital factors are studied in this progress. The result shows that the failure strength of the composites bolted joint can be improved by using interference-fit.

Keywords: Composites Bolted-joint Interference-fit Strength predication

纤维增强复合材料具有比强度大、比刚度高、抗疲劳性能好以及材料性能可设计性等许多传统金属材料所不具备的优点,应用于航空领域中可以获得显著的减重效益,并改善结构性能。目前,先进复合材料已成为新一代飞机结构的四大主要材料之一。机械连接与其他连接方式(胶接、焊接等)相比,具有连接可靠、工艺简单等突出优点。飞行器设计中重要的复合材料受力构件均以机械连接为主,螺栓连接是最常采用的机械连接形式。

螺栓与螺栓孔之间的应力分布非常复杂,配合间隙是影响螺栓和孔壁材料应

力分布的一个主要因素。国内外有大量文献对间隙配合复合材料机械连接强度进行了研究^[1-3],主要结论均为不宜采用具有较大间隙的间隙配合,原因是增大间隙量将减小螺栓与螺栓孔间的接触面积,从而造成较大的接触应力。然而,少有文献涉及干涉对复合材料机械连接。另一方面,已发表文献研究对象主要为平头螺栓,少有涉及沉头螺栓。

本文以有限元分析为主要手段,以单搭接双沉头螺栓连接试件为研究对象,系统研究了干涉对复合材料机械连接强度的影响。在研究过程中,解决了复合材料干涉配合高精度有限元模拟、多紧固件预紧力计算和施加等关键技术,并得到了有益的结论。

1 问题描述

研究的试件为单搭接(单剪),上层材料为 T700 碳纤维/环氧树脂基复合材料,下层材料为 TC4 钛合金板,紧固件为 2 枚等刚度沉头钛合金螺栓。

试件几何尺寸如图 1 所示。其中,钉间距 $s=60\text{mm}$ 、左端距 $e_1=36\text{mm}$ 、右端距 $e_2=54\text{mm}$ 、板宽 $W=80\text{mm}$ 、板长 $L=290\text{mm}$ 、夹持区域长度 L_1 和 L_2 分别为 125mm 和 100mm 、复合材料板厚 $T=11.25\text{mm}$ 、复合材料板增强区域厚度分别为 $(T+1)\text{mm}$ 和 1mm 、钛合金板厚

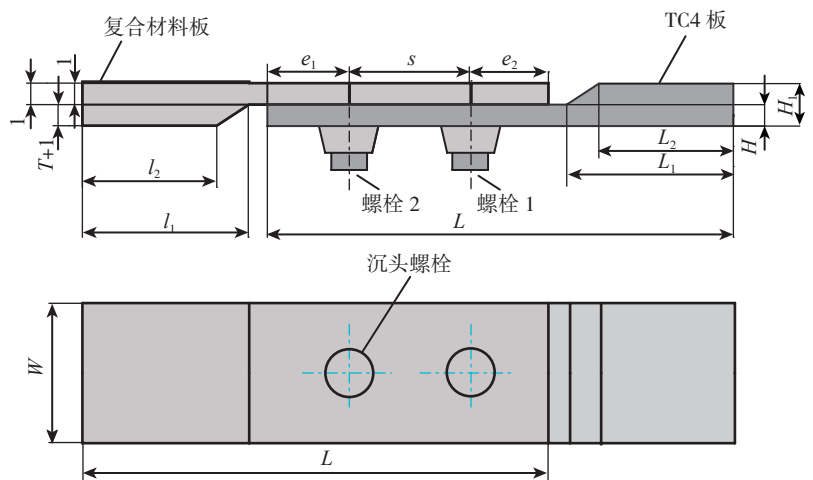


图1 试件几何尺寸
Fig. 1 Model geometry

$H=10\text{mm}$ 、钛合金板增强区域厚度 $H_1=20\text{mm}$ 。螺栓名义直径 $d=12\text{mm}$ 。

在以上基本几何参数的基础上,为研究干涉对连接强度的影响,通过 5 组试件将螺栓与螺栓孔之间的配合形式由间隙配合逐步过渡到干涉配合,如表 1 所示。

表1 试件分组列表

试件编号	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
配合形式	间隙 1%	间隙 0.5%	0	干涉 0.5%	干涉 1%

注: A_3 为间隙量为 0 的理想配合状态; 间隙 1% 表示间隙量为 1% 的间隙配合。

2 材料与有限元模型

2.1 材料参数

本文采用的层合材料为 T700 碳纤维 / 环氧树脂基复合材料(材料性能见表 2),其中 E_1 、 E_2 、 E_3 为复合材料各向弹性模量; G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 为复合材料各向剪切模量; ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 为复合材料各向泊松比。 X_t 为纵向拉伸强度, X_c 为纵向压缩强度, Y_t 为横向拉伸强度, Y_c 为横向压缩强度, S 为纵横剪切强度。

表2 复合材料性能

材料名称	材料弹性常数				单层厚度 /mm
	E_1/GPa	E_2/GPa	G_{12}/GPa	ν_{12}	
T700	125	10.4	6.12	0.310	0.125
	基本强度性能数据				
	X_t/MPa	X_c/MPa	Y_t/MPa	Y_c/MPa	S/MPa
	2845.5	1329	73.6	236	150

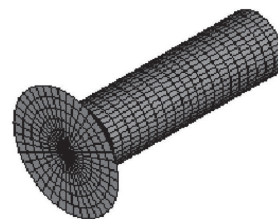
注: 复合材料采用正交模型,即 $E_2=E_3$, $G_{12}=G_{13}=G_{23}$, $\nu_{12}=\nu_{13}=\nu_{23}$ 。

金属板为 TC4 钛合金,螺栓材料亦为 TC4 钛合金,其弹性模量 $E=109\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.34$,拉伸屈服强度 $\sigma_b=900\text{MPa}$,剪切屈服强度 $\tau_b=600\text{MPa}$,失效强度 $\sigma_{yy}=1080\text{MPa}$ 。

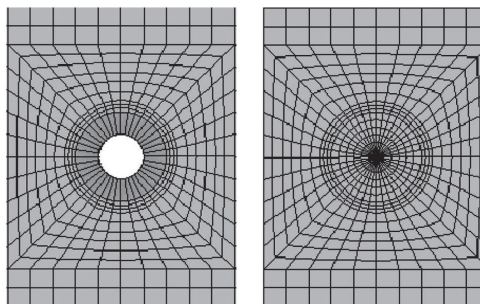
2.2 有限元网格

选择 8 节点三维实体铺层单元 SOLID46 对复合材料板进行离散化(即网格划分),为便于处理螺栓与复合材料之间的接触,选择 8 节点实体单元 SOLID45 对螺栓和 TC4 板进行离散化。在网格划分过程中,通过“引导面”技术和采用单元局部坐标等技术^[4],保证复合材料铺层走向的一致性。全部实体模型均采用映射网格划分方法,确保到均匀的网格模型。图 2 是本文采用的一种典型的接头区域网格划分方法。

2.3 干涉配合模拟



(a) 螺栓单元



(b) 复合材料单元

(c) 接触部分单元

图2 单元划分

Fig.2 FE mesh

针对研究试件的特点,采用静态接触算法模拟干涉配合过程。即按照两配合物实际干涉量建立有限元模型,并让其有限元网格按照实际过盈量重合,通过设置接触参数来决定发生接触的节点,计算中 ANSYS 能自探测接触表面,并将相应节点拉回到接触面。有大量文献证明该方法可有效模拟干涉配合过程^[5]。

2.4 边界条件及载荷

边界条件如图 3 所示,即固定试件左端,并对试件右端施加一定大小的位移载荷,同时通过引入预紧单元的方式模拟螺栓上的拧紧力矩。

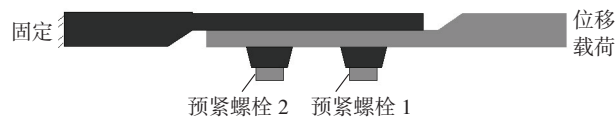


图3 边界条件及载荷

Fig.3 Boundary conditions and loading

2.5 破坏法则

复合材料层压板是由单向复合材料层片叠合而成的,属于单向复合材料正交各向异性,层合板在承受载荷后,各层在各个方向上的应力和强度是不同的。因此本文采用 Tsai-Wu (蔡-吴)法则来作为失效判断依据。以强度因子 ζ 作为衡量结构是否破坏的指标 (Inverse of Tsai-Wu Strength Ratio Index)^[6]。其中, ζ 由下式求得:

$$\xi = 1 / \left(-\frac{B}{2A} + \sqrt{(B/2A)^2 + 1/A} \right), \quad (1)$$

而 A 和 B 分别由下式得到:

$$A = -\frac{(\sigma_x)^2}{\sigma_{x_1}^f \sigma_{x_2}^f} - \frac{(\sigma_y)^2}{\sigma_{y_1}^f \sigma_{y_2}^f} - \frac{(\sigma_z)^2}{\sigma_{z_1}^f \sigma_{z_2}^f} + \frac{(\sigma_{xy})^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} + \frac{(\sigma_{yz})^2}{(\sigma_{yz}^f)^2} + \frac{(\sigma_{xz})^2}{(\sigma_{xz}^f)^2} + \frac{C_{xy} \sigma_x \sigma_y}{\sqrt{\sigma_{x_1}^f \sigma_{x_2}^f \sigma_{y_1}^f \sigma_{y_2}^f}} + \frac{C_{yz} \sigma_y \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{y_1}^f \sigma_{y_2}^f \sigma_{z_1}^f \sigma_{z_2}^f}} + \frac{C_{xz} \sigma_x \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{x_1}^f \sigma_{x_2}^f \sigma_{z_1}^f \sigma_{z_2}^f}} b, \quad (2)$$

$$B = \left(\frac{1}{\sigma_{x_1}^f} + \frac{1}{\sigma_{x_2}^f}\right) \sigma_x + \left(\frac{1}{\sigma_{y_1}^f} + \frac{1}{\sigma_{y_2}^f}\right) \sigma_y + \left(\frac{1}{\sigma_{z_1}^f} + \frac{1}{\sigma_{z_2}^f}\right) \sigma_z. \quad (3)$$

式中, C_{xy}, C_{yz}, C_{xz} 为 Tsai-Wu 耦合系数。本文计算接头强度的流程如图 4 所示。

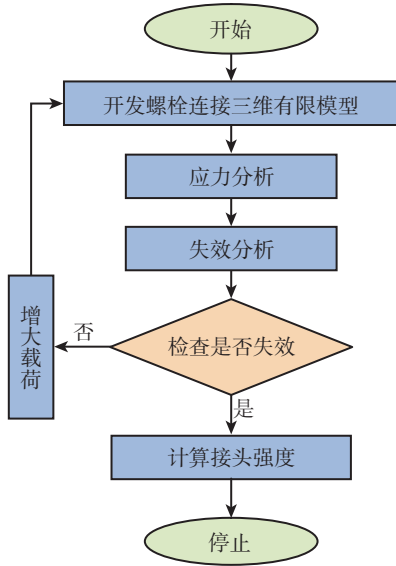


图4 接头强度分析流程图

Fig.4 Flow chart of strength predication

3 数据及分析

通过有限元计算,得到所有试件接头强度,并绘制曲线(图 5)。由图可见,采用干涉配合后可以有效地提高接头强度(图中数据与文献 6 符合地较好)^[6]。原因

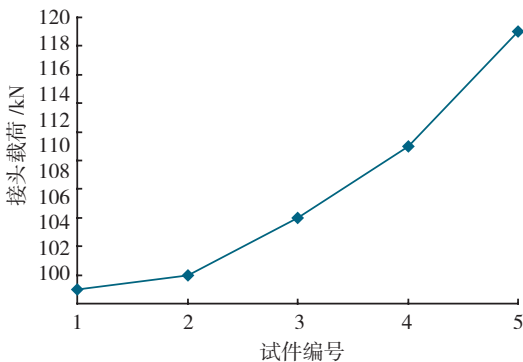


图5 不同配合精度的接头强度曲线

Fig.5 Strength curve of different fits

是干涉配合可有效增大螺栓与层合板之间的接触面积(增大接触角),有效降低螺栓孔周边应力集中系数,分散了复合材料上的挤压载荷集中程度,从而提高了接头的抗挤压破坏能力。

首先,较大的接触面积可以促使整个拉伸过程的受载较为均匀(试件拉伸过程载荷-位移曲线见图 6),从而提高接头的承载能力。

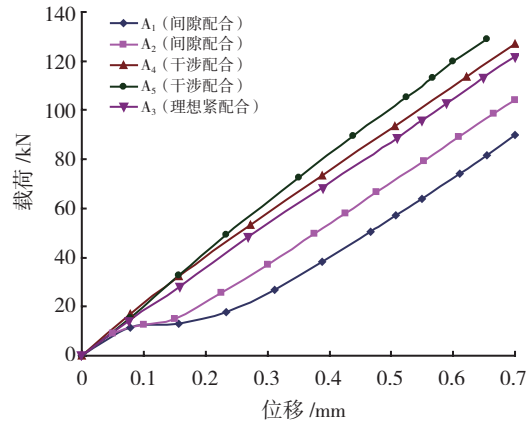


图6 试件载荷-位移曲线

Fig.6 Load-displacement curve of specimen

其次,在干涉配合的配合面之间(螺栓与螺栓孔间)将产生较均匀的接触压力,该接触压力有助于提高接头强度。随着干涉量的增大,接触压力也随之增大。试件接触压力计算结果如表 3、表 4 所示。

表3 间隙配合接触压力

试件名称	接触压力 /MPa	
	1 号螺栓	2 号螺栓
A_1	939	869
A_2	937	856
A_3	928	834

表4 干涉配合接触压力

试件名称	接触压力 /MPa			
	干涉配合后		拉伸后	
	1 号螺栓	2 号螺栓	1 号螺栓	2 号螺栓
A_4	113	115	937	847
A_5	339	345	1019	943

4 结论

通过研究分析,可得到以下结论:

Tsai-Wu (蔡-吴) 法则预测复合材料机械连接强度具有可行性,并可以获得较好的精度;在复合材料机

(下转第 67 页)

工以实现紧固件各部位之间的同轴度要求。由于钛合金紧固件螺纹一般通过滚压成形,因而螺纹部位、光杆部位及头部之间的同轴度完全取决于滚压螺纹毛坯部位、光杆部位及沉头面部位的同轴度。为了保证大长径比钛合金紧固件螺纹毛坯部位、光杆部位及沉头面部位的同轴度,需采用一次磨削工艺技术实现这3个部位的成形,从而满足较高的同轴度要求。通过整体型面无芯磨削工艺,大长径比紧固件的螺纹毛坯部位、光杆部位及沉头面部位之间的同轴度能够完全符合紧固件各部位同轴度要求。

螺纹毛坯部位、光杆部位与沉头面部位需采用不同磨削量,根据无芯磨削原理,沉头面的磨削是依靠在光杆和螺纹毛坯磨削时产生的拉力而实现的,光杆和螺纹毛坯磨削时产生的拉力大小和磨削部分长度及去除量有直接关系,所以沉头面磨削量的大小就直接取决于光杆和螺纹毛坯磨削长度及沿直径方向的去除量;另外,由于沉头面的磨削量直接影响到紧固件头部高度尺寸,因而在加工过程中应对沉头高度加工余量、光杆和螺纹毛坯直径及长度之间的关系进行严格控制,才能达到最理想的磨削效果。根据试验数据积累及统计分析,获得如下公式以确定沉头高度加工余量:

$$h = K \times (l/d) \quad (1)$$

式中, h 为沉头紧固件头部高度加工余量; K 为磨削系数; l 为钛合金紧固件光杆长度; d 为钛合金紧固件光杆直径。

1.4 高频抗拉疲劳测试

对于高频疲劳测试,试验过程中对同轴度具有一定的要求,即由于加载不同轴所产生的附加弯曲应力应不超过平均应力的6%,而大长径比紧固件在普通装夹方式下(GJB715.30-2008《紧固件试验方法抗拉疲劳》),紧固件头部和螺纹部分夹具之间距离过大,致使紧固件光杆部分在加载过程中产生横向颤震,使得所加载的轴向载荷产生弯曲应力,长度越长弯曲应力越大,该应力远远超过了设备所要求的不超过平均应力6%的指标,致使试验无法正常进行。

为避免这种情况的发生,对试验夹具进行了优化设计(见图4),加大了上拉头对紧固件的固定长度,减小了紧固件光杆部分空置长度,大幅度降低了试验中紧固件光杆部分的横向颤震,从而减小了加载载荷产生的弯曲应力,使测试设备能够按照标准要求的载荷和频率正常工作。通过试验验证,大长径比钛合金紧固件的高频抗拉疲劳性能完全达到要求。

2 结论

对于大长径比钛合金紧固件,可通过采用单打热敏

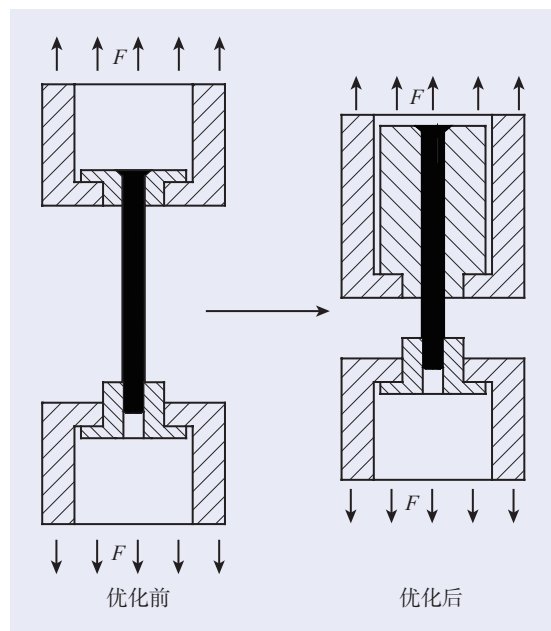


图4 高频抗拉疲劳测试装夹方式

Fig.4 Clamping method of high frequency tensile fatigue test

成形控制、料架热处理变形控制、整体型面成形同轴度控制及加工尺寸协调等先进工艺技术实现该类产品的加工。在产品性能测试中通过优化高频抗拉疲劳测试,保证试验的顺利及准确进行。大长径比钛合金紧固件加工工艺及检测技术的研究也为同类特殊钛合金紧固件的研制奠定了技术基础。(责编 夏宛)

(上接第64页)

械连接中采用适当的干涉配合可以提高接头强度。试验数据^[7]表明,对于复合材料机械连接不宜采用过大干涉量。

参考文献

- [1] Thoppul S D, Finegan J, Gibson R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—a review. *Compos Sci Technol*, 2009, 69(3/4): 301-329.
- [2] Lanza D, Scalea F, Cloud G L, et al. A study of the effects of clearance and interference fits in a pin-loaded cross-ply FGRP laminate. *Comp Mat*, 1998, 32(8): 783-802.
- [3] Pedersen P. On the influence of clearance in orthotropic disc-pin contacts. *Compos Struct*, 2007, 79(4): 554-561.
- [4] 王武,陶华,刘风雷,等.多排机械连接复合材料钉载分配的研究. *绝缘材料*, 2006, 39(1): 28-32.
- [5] 许小强,赵洪伦.过盈配合应力的非线性有限元分析. *机械设计与研究*, 2002(1): 33-35.
- [6] Binnur G K. Effect of the clearance and interference-fit on failure of the pin-loaded composites. *Materials and Design*, 2010, 31(1): 85-93.
- [7] 王武,陶华,刘风雷,等.干涉配合复合材料多排机械连接钉载分配的研究. *绝缘材料*, 2006, 39(4): 28-32. (责编 夏宛)