

# 复合材料结构多钉连接设计、分析与试验技术

## Design, Analysis and Test Technology of Composites Joint With Multi-Fastener Connection Structure

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 刘忠献  
海军驻哈尔滨地区航空军事代表室 聂江 郭璐璐

**[摘要]** 在理论研究的基础上,应用有限元法进行复合材料多钉连接的载荷分配,并通过有限元法预测连接孔的挤压强度,大大提高了分析的精度;同时利用非线性分析方法分析了复合材料对角接头多钉连接的强度,并通过试验进行了验证,为复合材料主承力结构连接强度设计、分析提供了依据,为复合材料在中、重型直升机上的应用提供了参考。

**关键词:** 复合材料 多钉连接 有限元法

**[ABSTRACT]** The load distribution of the composites joint with multi-fastener connection is studied by using finite element method on the basic of theoretical research, and the bearing strength of connection hole is predicted. The analysis accuracy is greatly improved. At the same time, nonlinear method is used to analyze the strength of composites diagonal joint with multi-fastener connection, and the results are verified by tests. The results provide the basic for composites structure connection strength design and analysis. It also provide references for composites application on heavy helicopters.

**Keywords:** Composites Multi-fastener connection Finite element method

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.109

在复合材料结构设计中,由于工艺和使用维护等方面的需要或限制,必须安排一定的设计和工艺分离面、维修口盖和多种外挂接口等,所以这些部位的连接设计成为直升机结构设计必不可少的关键环节。解决复合材料连接问题,对减轻结构重量、改善飞行器性能、促进复合材料在航空航天及其他民用工业上的应用具有重要意义。复合材料连接强度中一个比较关键的问题是多钉连接载荷分配和孔挤压强度的确定,以及复合材料对角接头强度分析,本文对此进行了分析、设计和试验研究。

## 1 复合材料多钉连接理论研究

### 1.1 多钉连接钉载分配有限元分析方法

有限元方法是进行多钉连接钉载分配的一种有效方法,其优点是既适用于多钉规则排列又适用于多钉非规则排列和复杂情况的连接。本文在有限元程序 PATRAN/NASTRAN 基础上开展了应用及二次开发研究。

传统有限元方法求解钉载分配的要点是将钉视为钉元素,将钉元素的两个端点置于被连接件的有限元网格节点上,并对两个端点的坐标有严格要求,否则会影响分析精度。本文采用 FASTENER 单元模拟螺栓,其两个端点不需要是连接面上有限元网格的节点,而只需要在两个面上就可以,当定义 FASTENER 单元时提供需要连接的两个面上连接区域的单元即可。FASTENER 单元能够承受拉伸、弯曲、扭转、剪切载荷,被连接件采用 CQUAD4 模拟。

### 1.2 承剪多钉连接模拟分析

在进行承剪多钉连接模拟时,因为螺栓主要承受面剪切载荷,连接件承受面内载荷,可以不考虑连接件的接触问题,重点是要模拟好钉元。承受面内剪切载荷的多钉连接钉载分配有限元模型见图 1,螺栓呈 3 排 3 列分布,通过分析可知各列的载荷比例基本一致。

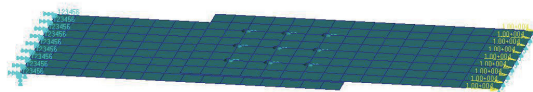


图1 承剪多钉连接钉载分配有限元分析模型  
Fig.1 Finite element analysis model of multi-fastener connection load distribution

#### (1) 受载孔周围的细节分析。

在钉载分配分析的基础上,通过建立受载孔周围的细节分析的有限元模型,计算钉孔周围的应力应变分布。受载孔细节分析位移和应力云图见图 2。

#### (2) 破坏载荷预示。

由孔边细节应力分析结果可以得到各个铺层的应力,将这些应力代入所选的失效判据,就可以得到铺层的破坏情况,从而判断钉孔的承载能力<sup>[1]</sup>。计算螺栓连接破坏的失效准则——平均应力准则和蔡-希尔失效准则,认为离开孔边某一距离  $\alpha_0$  之内的平均应力满足失效准则时,层压板发生破坏。

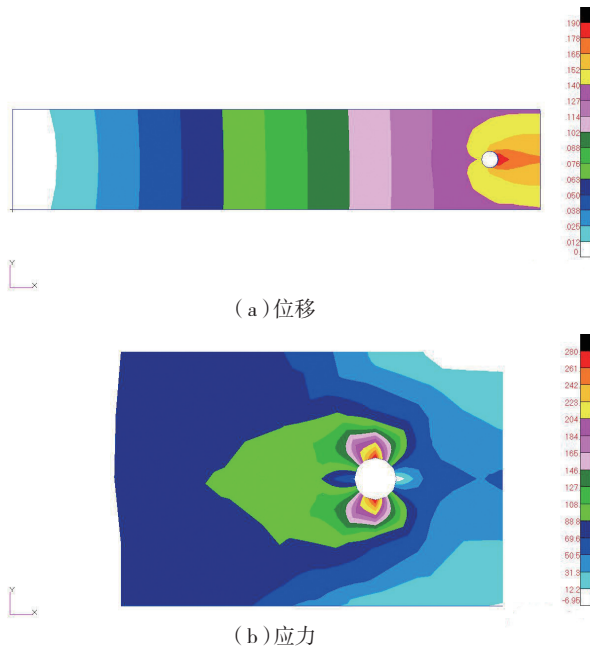


图2 受载孔细节分析位移和应力云图  
Fig.2 Displacement and stress nephograms of loaded hole's detailed analysis

蔡-希尔失效准则<sup>[2]</sup>表达式为:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1$$

其中,  $\sigma_1$  为沿纤维方向(沿材料主方向 1)的拉应力;  $\sigma_2$  为垂直于纤维方向(沿材料主方向 2)的拉应力;  $\tau_{12}$  为 1-2 面内的切应力;  $X$  为沿纤维方向(沿材料主方向 1)的强度;  $Y$  为垂直于纤维方向(沿材料主方向 2)的强度;  $S$  为 1-2 面内的抗剪强度。

失效准则:从数学意义上讲,失效的计算是载荷与强度的一个数学函数。失效因子(Failure Index, FI); 强度比(Strength Ratio, SR); 安全裕度(Margin of Safety, MoS),  $MoS=SR-1$ 。本文采用 Hill 准则<sup>[3-4]</sup>:

$$FI=F_{11}\sigma_y^2 + F_{22}\sigma_x^2 + 2F_{12}\sigma_x\sigma_y + F_{66}\tau_{xy}^2$$

其中,  $F_{ij}$  为 4 阶段强度张量,  $i, j=1,2,\dots,6$ 。

在有限元中,使用了一个连续厚度剪切载荷下基质失效的最大应力准则作为 Hill 准则的补充。

$$FI_m = \max\left(\frac{abs(\tau_{xy})}{SYZ}, \frac{abs(\tau_{xz})}{SXZ}\right)$$

$$SR_m = 1/FI_m, MoS_m = SR_m - 1$$

### 1.3 承拉螺栓连接模拟分析

复合材料角形对接接头在承载时,连接件之间往往存在接触应力,因此在进行承拉连接螺栓模拟时,为了提高分析精度,应该考虑连接件之间的接触,并将两个连接面设置为接触面,其对角连接见图 3。本文主要研究加筋对角接头双钉连接、加筋对角接头六钉连接、无筋对角接头三钉连接 3 种形式的结构。由于接触是边界条件高

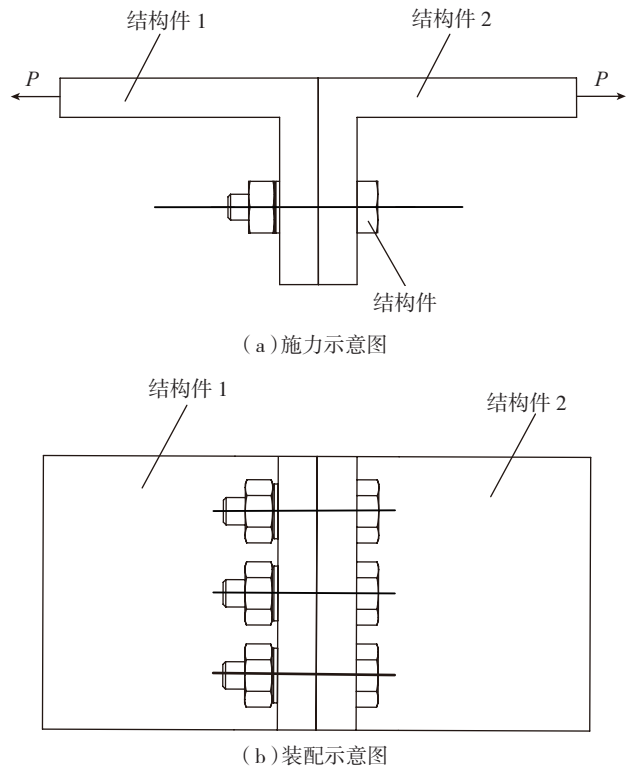


图3 对角连接示意图  
Fig.3 Diagram of diagonal connection

度非线性的复杂问题,因此在建立模型时采用非线性单元属性设置,利用有限元软件 NASTRAN,采用非线性分析方法进行连接模拟分析。对角接头破坏形式有限元分析结果见图 4,螺栓承受的载荷见表 1。

表1 试验结果与分析结果对比

结构形式	破坏总载荷 /kN		单个螺栓载荷 /kN		误差 /%
	试验	理论分析	试验	理论分析	
1	21.6	20.32	10.8	10.16	5.9
2	57.0	53.93	9.5	9.0	5.2
3	29.4	28.3	9.8	9.43	3.7

## 2 复合材料多钉连接试验研究

### 2.1 试验设计

为了考核复合材料角形对接接头刚度、强度,验证共固化结构连接区铺层设计的合理性,为复合材料结构多钉连接设计和强度分析提供依据,本文针对以上 3 种对角接头开展了螺栓连接试验研究。对角接头材料采用 5224/G803、5224/G827。

### 2.2 试验结果分析

3 种连接形式(双钉、三钉、六钉)的对角接头试验中  
(下转第 114 页)

接头剪切强度反而降低。

### 3 结论

(1) 液态镓可以穿透 1420 铝锂合金表面氧化膜并沿晶界向材料内部扩散,其镓的渗透距离随镓涂层厚度的增加而增大,从而为原子的相互扩散提供了有效通道。

(2) 镓中间层可以促进 1420 铝锂合金扩散连接过程,其中间层厚度对接头质量有着重要影响,中间层厚度为  $1\text{mg}/\text{cm}^2$ ,扩散连接界面实现冶金结合,接头剪切强度达  $58.35\text{MPa}$ ,断口形貌呈现韧性断裂特征。

#### 参考文献

[1] 张艳苓,郭和平,李志强,等. 细晶 1420 铝锂合金超塑性性能试验研究. 塑性工程学报, 2009,16(4):134-137.

[2] Shirzadi A A, Saindrenan G, Wallach E R. Flux-free diffusion brazing of aluminium-based materials using gallium(patent application: UK0128623.6). Mater Sci Forum, 2002(396):1579-1584.

[3] Shirzadi A A, Saindrenan G. New method for flux free diffusion brazing of aluminium alloys using liquid gallium(UK patent application 0128623.6).Sci Technol Weld Joining, 2003(8):149-153.

[4] Shirzadi A A, Ghoshouni E R, Wallach E R. Surface treatment of oxidizing materials[P]. 美国专利: US2003/0022597 AL, Jan.30, 2003.

[5] Shirzadi A A, Wallach E R. Novel method for diffusion bonding superalloys and aluminium alloys, Materials Science Forum, 2005(502):431-436.

[6] Shirzadi A A, Saindrenan G, Wallach E R. New method for joining aluminium alloys using liquid gallium, Proceedings of Joining of Al and Mg, 2002(9):101-106.

[7] Shirzadi A A, Assadi H, Wallach E R. Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films. Surface and Interface Analysis, 2001(31):609-618.

[8] Ferchaud E, Christien F, Barnier V, et al. Characterisation of Ga-coated and Ga-brazed aluminium. Materials Characterization, 2012(67):17-26.

[9] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. Discontinuous penetration of liquid Ga into grain boundaries of Al polycrystals. Acta Materialia, 2004(52):321-332.

[10] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. In situ investigation of Al bicrystal embrittlement by liquid Ga using synchrotron imaging. Acta Materialia, 2006 (54):4307-4316.

[11] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. Nanometric intergranular liquid layer penetration in the Al/Ga system: An X-ray projection microscopy investigation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006 (B246):226-231.

[12] Pereiro-Lopez E, Ludwig W, Bellet D. Grain boundary liquid metal wetting: A synchrotron micro-radiographic investigation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003 (B200):333-338.

[13] Ho-Seok Nam, Srolovitz D J. Effect of material properties on liquid metal embrittlement in the Al - Ga system. Acta Materialia, 2009 (57):1546-1553.

(责编 深蓝)

(上接第 110 页)

试验件破坏形式和仿真分析结果如图 4 所示。从对比图可以看出,分析结果与破坏试验结果具有高度符合性;从表 1 也可以看出,分析与试验结果的误差小于 6%,由此证明非线性分析方法具有较高的计算精度,是一种比较有效的复合材料多钉连接分析方法。

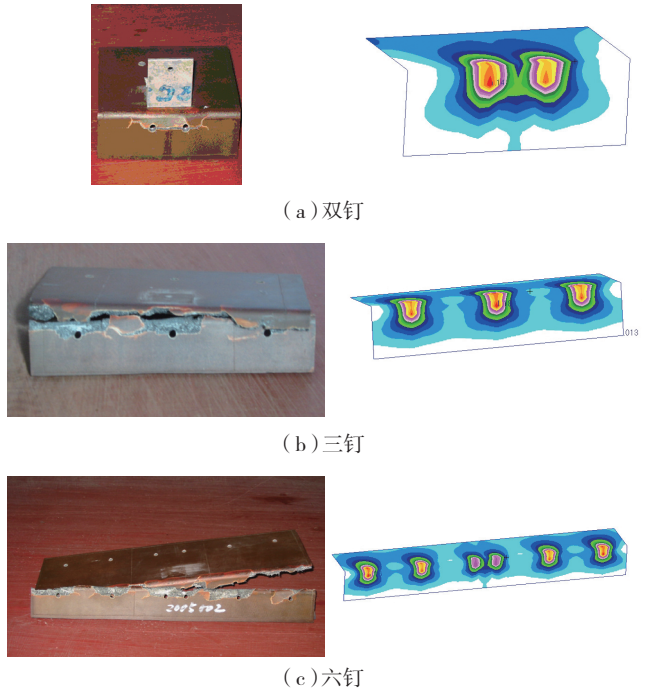


图4 双钉、三钉、六钉对角接头破坏形式  
Fig.4 Damage forms of twin fasteners, three fasteners, six fasteners diagonal joint

### 3 结论

本文在理论研究的基础上,应用有限元法进行复合材料多钉连接的载荷分配,并通过有限元法预测连接孔的挤压强度,大大提高了分析的精度;同时利用非线性分析方法分析了复合材料对角接头多钉连接的强度,并通过试验进行了验证。结果表明,分析与试验数据具有高度的符合性。本研究为复合材料主承力结构连接强度设计、分析提供了依据,为复合材料在中、重型直升机上的应用提供了借鉴。

#### 参考文献

[1] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[2] 赵渠森. 先进复合材料手册. 北京: 机械工业出版社, 2003.

[3] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册. 北京: 航空工业出版社, 2001.

[4] 中国航空研究院. 复合材料连接手册. 北京: 航空工业出版社, 1994.

(责编 谷雨)