

# 复合材料干涉连接钉载分配研究

## Research on Pin Load Distribution of Interference-Fit Composite Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 刘风雷 刘丹 刘健光

**[摘要]** 复合材料在飞机机体主承力结构中的使用越来越广泛,间隙连接使复合材料许用应变值难以发挥,影响了接头效率,为此提出采用用于复合材料结构的干涉连接紧固系统,以使孔周应力状态和应力集中系数得以改善,提高连接接头的钉载分配能力和结构抗载能力。

关键词: 复合材料 干涉 钉载分配

**[ABSTRACT]** The joint efficiency of gap joining of composite material structure is influenced because the permissible strain of composite material can not display completely, although composite material has been widely used in the key structure of aircraft. As a result, the interference joining fastening system is used in composite structures in order to improve the state of stress, the stress concentration factor at the round of hole. The pin load distribution and load-carrying ability of composite material structure are raised by using the interference joining fastening system.

**Keywords: Composite material Interference Pin load distribution**

先进树脂基复合材料在国内先进飞机主承力结构上的使用越来越广泛,为了发挥复合材料较好的性能,复合材料结构的成型大都采用如共固化和共胶接的整体成型技术,但由于复合材料还需与其他金属结构进行连接和满足各种开口结构等需要,仍存在大量设计分离面和工艺分离面,必须采用机械连接。但复合材料机械连接开孔比金属结构开孔会产生更高的应用集中,通常复合材料机械连接接头许用拉伸应力只能达到层合板抗拉极限强度的 20%~50%<sup>[1]</sup>,由于复合材料的塑性较差,仅有 0.5%~1% 的延伸率,在受外力情况下,复合材料本身仅具有很小的载荷分配能力。如图 1、图 2 所示<sup>[1]</sup>,金属结构通过弹性变形可将载荷重新分配给相邻紧固件,使得各排钉承受的载荷一致,而复合材料接头,在间隙配合时,由于材料没有屈服点,使得内外排紧固件承受的载荷极为不均匀,严重影响了复合材料的使用性能。本课题采用复合材料结构用干涉环槽紧固系统,通过模拟和试验的方法对复合材料接连接头进行了钉载

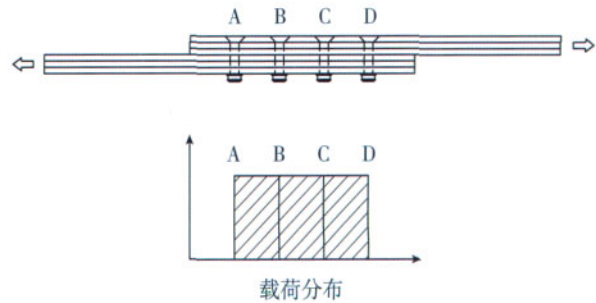


图1 铝合金接头的钉载分配

Fig.1 Pin load distribution of aluminium alloy joint

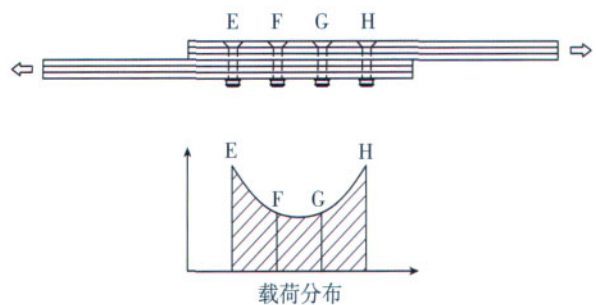


图2 复合材料间隙接头的钉载分配

Fig.2 Pin load distribution of gap joining of composite laminate

分配研究,采用间隙连接和干涉连接方法进行对比,模拟试验得出了理想的结果,从而为设计应用提供了理论基础。

### 1 试验采用的干涉钛环槽紧固系统条件

试验采用 5mm 规格复合材料干涉环槽紧固系统进行纯复合材料双搭接接头安装后的钉载模拟和加载试验研究,采用的复合材料板材是 QY8911/T300 碳纤维增强复合材料,铺层方向及铺层数量为  $[0^\circ/90^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_{4s}$ ,单板厚度为 4mm,双搭接的厚度为 12mm,复合材料干涉紧固系统结构见图 3,包括一个钛合金环槽钉、一个高温合金衬套、一个纯钛合金环帽,在安装过程中衬套装入沉头孔中,环槽钉拉入衬套中,使孔壁产生干涉配合,安装后的结构见图 4,双搭接接头试验件见图 5。

### 2 钉载分配模拟和试验研究

钉载分配采用单排四列钉双搭接接头进行钉载分



图3 干涉钛环槽钉  
Fig.3 Ti-lockbolt

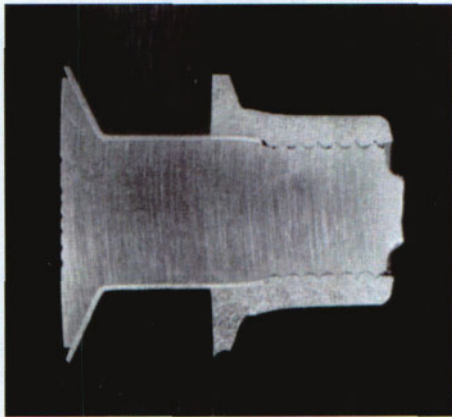


图4 干涉钛环槽钉安装在复合材料结构上的剖面图  
Fig.4 Cross-section of Ti-lockbolt assembled on composite structure

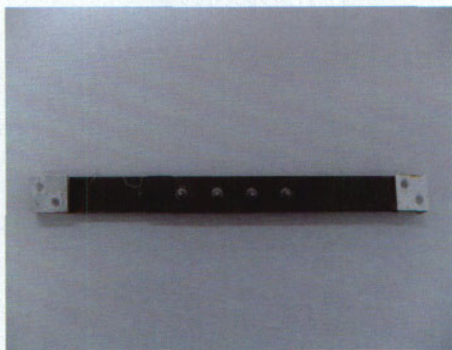


图5 复合材料双搭接接头  
Fig.5 Composite double lap joint

配研究,采用 ANSYS 软进行钉载分配研究,解决了模型建立、单元离散化、接触设置、边界条件设置、数据分析等关键技术,通过模拟可得出以下结论,复合材料单排四列双搭接间隙连接钉载分布呈盆状分布,即两端的紧固件所承担的载荷比例较大,中间 2 个紧固件所承担的载荷比例较小,如图 6 所示。

图 7 为干涉连接后的结果,与间隙配合相比,干涉连接大大缓解了钉载分配比例不均匀的现象,而且这个比例趋于一致。

对钉载分配研究,在模拟的同时进行了相应的力学

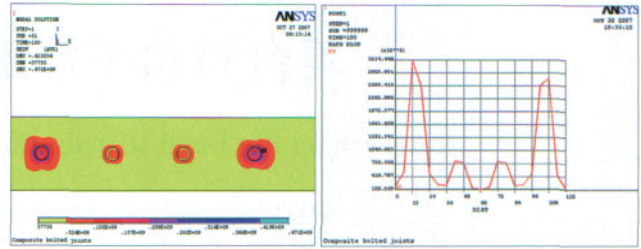


图6 复合材料结构间隙连接钉载分布

Fig.6 Pin load distribution of multiple bolt gap joining of composite laminate

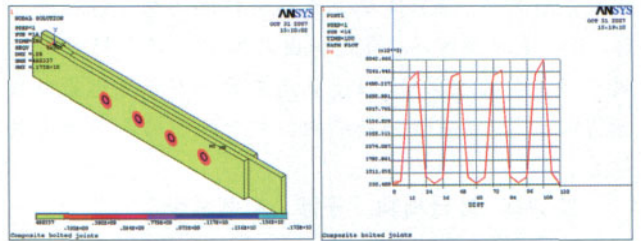


图7 复合材料结构干涉连接钉载分布

Fig.7 Pin load distribution of multiple bolt interference-fit joining of composite laminate

试验,在钉孔附近安装应变片,采用多通道记录仪记录试验结果,试验机如图 8 所示。

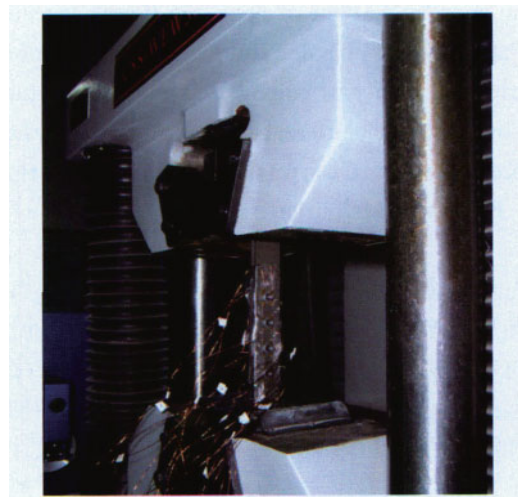


图8 钉载分配加载试验

Fig.8 Loading test of pin load distribution

经过数据处理,四列钉的钉载分配如图 9 所示,同时进行了间隙连接钉载试验结果比较<sup>[2]</sup>。由图 9 可以看出,复合材料在间隙连接时,外排钉与内排钉存在着极大的分配不均现象,而通过干涉连接,可将这种不均匀性大幅度降低,其主要原因有两个方面,一是干涉连接降低了孔周的应力集中,使孔壁产生了毛刷状的脱胶分层,使孔壁具有了一定的弹性空间,提高了抗载能力,最重要的一个方面是环槽钉与复材间增加了一个薄壁

(下转第 93 页)

## 参考文献

- [1] Jurgen Seidel, Stefan Siegel, Kelly Cohen, Thomas McLaughlin. POD based Separation Control on the NACA0015 Airfoil. AIAA 2005-297.
- [2] Willcox K. Unsteady Flow Sensing and Estimation via the Gappy Proper Orthogonal Decomposition. AIAA 2004-2415.
- [3] Patrick A LeGresley, Juan J Alonso. Airfoil Design Optimization Using Reduced Order Models Based on Proper Orthogonal Decomposition. AIAA 2000-2545.
- [4] Patrick A LeGresley, Juan J Alonso. Investigation of Non-Linear Projection for POD Based Reduced Order Models for Aerodynamics. AIAA 2001-0926.
- [5] 姚伟刚. 非线性气动弹性系统时域仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学. 2010.1.
- [6] Bui-Thanh T, Danodaran M, Willcox K. Aerodynamic Data Reconstruction and Inverse Design Using Proper Orthogonal Decomposition. AIAA Journal, 2004.
- [7] Bui-Thanh T, Danodaran M, Willcox K. Proper Orthogonal Decomposition Extensions for Parametric Applications in Compressible Aerodynamics. AIAA 2003-4213.
- [8] Sefan Volkwein. Proper Orthogonal Decomposition for Nonlinear Dynamical Systems. DISC Summerschool 2005.
- [9] 阎超. 计算流体力学方法及应用. 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [10] 黄守智. 基于动态变形网格的非定常粘性流动数值分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2005. (责编 侧卫)

(上接第 74 页)

衬套, 而这个衬套具有一定的弹塑性, 使接头在受外载时, 通过各自塑性, 改变了应力场, 使得各列钉受力近似

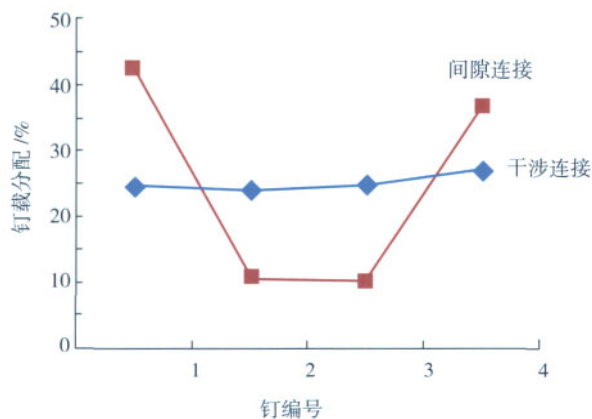


图9 干涉与间隙接头钉载分配结果对比

Fig.9 Comparison between pin load distribution of interference-fit joining and gap joining

一致, 从而提高了复合材料接头的钉载分配能力, 进而使得复合材料在飞机上达到较高的许用应变能力。

### 3 结论

采用模拟和试验的方法对复合材料干涉钛环槽紧

固系统连接的双搭接连接接头进行了钉载分配研究, 模拟分析研究和试验研究表明, 复合材料采用干涉连接后, 由于脱胶分层和中间金属衬套在受力中弹塑性的共同作用, 较大地改善了钉载分配能力, 进而提高了复合材料结构应变许用能力, 满足了设计对复合材料结构的减重、高寿命、高可靠性要求。

## 参考文献

- [1] 牛春匀. 飞机复合材料结构设计与制造. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [2] 王武, 陶华, 刘风雷, 等. 复合材料多排螺栓连接钉载分配的研究. 绝缘材料, 2006, 39(1):28-32. (责编 良辰)

(上接第 77 页)

和数学模型, 并利用 ANSYS 软件对其温度和电流密度分布进行了模拟, 数值模拟和试验测量的结果吻合较好。

(2) BGA 封装焊点的芯片端和基板端的温度随加载电流的增大而增加, 芯片边为热边, 基板边为冷边, 热边的温升大于冷边的温升。因此, 焊点两端的温度梯度也随加载电流的增大而增加, 并且增加方式满足抛物线规律。

(3) 互连焊点内部电流密度分布不均匀, 在电流入口处/出口处存在电流拥挤现象。在本模拟条件下, 其电流密度数值比平均电流密度大 2-3 数量级。

## 参考文献

- [1] 胡强. BGA 组装技术与工艺. 电子元件与材料, 2006, 25(6): 10-12.
- [2] 李禾, 傅艳军, 李仁增, 等. 球栅阵列倒装焊封装中的热应变值的测试. 半导体学报, 2002, 23(6):655-659.
- [3] 杨邦朝, 熊流锋, 杜晓松, 等. 集成电路封装的三维热模拟与分析. 功能材料, 2002, 33(1): 57-59.
- [4] TU K N, Gusak A M, LI M. Physics and materials challenges for lead-free solders [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(3): 1335-1353.
- [5] 卫国强, 石永华, 黄延禄, 等. 倒装芯片焊点中的热迁移. 材料科学与工艺, 2009.10(17):128-133.
- [6] 姚健, 卫国强, 石永华. 无铅电子封装中的电迁移. 焊接技术, 2010, 39(3): 1-5.
- [7] Kirsten W Z. Simulation of migration effects in solder bumps. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2008, 8(3):442-448.
- [8] Nah J W, Suh J O, Tu K N. Effect of current crowding and joule heating on electromigration induced failure in flip chip composite solder joints tested at room temperature. Journal of Applied Physics, 2005, 98: 013715.
- [9] Tu K N, Yeh C C, Liu C Y, et al. Effect of current crowding on vacancy diffusion and void formation in electromigration. Journal of applied physics, 2000, 76(8):988-990. (责编 晓立)