

# 复合材料机械连接数值分析 研究进展\*

韩小进<sup>1,2</sup>, 孙慧玉<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室, 南京 210016;

2. 国机集团北京飞机强度研究所有限公司, 北京 100083)

**[摘要]** 数值计算方法可以有效解决工程实际中的力学问题, 针对复合材料机械连接结构, 根据有限元数值分析的一般流程, 从力学建模、载荷计算、后处理分析及参数优化几个方面对当前复合材料连接性能方面的数值研究进行了总结, 对影响复合材料连接强度的因素进行了归纳, 列举了部分采用有限元方法进行湿热环境下的强度、疲劳分析的研究成果, 最后对未来复合材料连接力学问题数值研究的方向提出了展望。

**关键词:** 复合材料; 机械连接; 有限元; 渐进损伤; 载荷分布

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.20.049



韩小进

博士研究生, 工程师, 主要从事疲劳载荷谱测试以及复合材料力学研究。

纤维增强复合材料以其特有的力学性能优势, 在结构设计中占据越来越重要的地位。特别在航空领域,

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(11572153)。

复合材料的使用量成为衡量现代飞机先进性的指标之一<sup>[1]</sup>。随着复合材料的广泛使用, 复合材料的连接问题受到越来越多的关注。

机械连接具有连接效率高、可重复装卸的优势, 是最常见的一种连接方式<sup>[2]</sup>。与传统金属材料机械连接不同, 纤维增强复合材料由于组分结构的非连续性和非均匀性, 在连接处的受力情况复杂。机械连接时的开孔会破坏纤维的连续性, 造成应力集中和初始缺陷, 对连接强度带来不利影响。

目前, 复合材料连接性能的研究方法主要有数值仿真、试验研究以及二者结合的方法。试验方法能够准确得到在外界载荷(拉伸、压缩、剪切、弯曲)作用下, 真实的复合材料连接结构的应力分布、破坏强度以及失效形式。但是通过试验方法全面地获得影响连接性能的因素需要进行大量的试验, 研究成本较高。通过

数值仿真计算结合代表性试验研究的方法能够有效地节省研究成本, 并得到较为理想的结果。随着通用有限元软件的发展, 采用有限元数值仿真对复合材料连接性能进行模拟成为较常用的数值计算方法。通过建立仿真模型计算复合材料连接性能, 将计算结果与试验结果对比验证模型的有效性, 进而利用该模型分析影响复合材料连接性能的因素, 对设计参数进行优化设计以提高复合材料连接效率, 成为当前最常用的一种研究手段。

## 有限元模型

建立有效的有限元模型的关键是定义连接件与复合材料板的接触与约束关系, 准确模拟复合材料真实的连接情况。目前通用有限元软件发展比较成熟, 功能全面并且提供了二次开发接口, 为各类有限元分析问题提供了平台, 得到了广泛

的应用。

彭湃等<sup>[3]</sup>采用 Patran 中的 Quad4 壳单元来模拟复合材料板,采用圆形截面梁单元 Bar 单元模拟螺栓,通过 Gap 单元实现板与螺栓之间接触力的传递,计算了单搭接和双搭接结构的钉载分配比例。李琳等<sup>[4]</sup>利用 MSC.Nastran 有限元分析软件,采用 PShell、CBeam 和 CGap 单元组合的方式建立有限元模型,计算了复合材料板的钉载分配。Gray 等<sup>[5]</sup>用壳单元模拟复合材料层合板,螺栓由耦合到刚性接触表面的梁单元的组合表示,计算了多螺栓接头的载荷分布。

采用一维或二维单元可以占用较小的计算机资源快速地计算出结构整体的载荷分布,对结构整体分析带来了很大的便利,但是不能全面地模拟板与螺栓的接触关系,计算结果不能反映厚度方向上的载荷信息,对连接结构局部分析时更多采用的是三维单元或叠层二维单元。

Liu 等<sup>[6]</sup>利用 Abaqus/Explicit 软件建立了两种模型,采用连续壳单元(SC8R)和接触单元建立二维模型模拟复合材料层合板的层间损伤,采用 8 节点实体单元(C3D8R)建立三维模型计算结构破坏强度。图 1 为利用 Abaqus 软件建立的复合材料螺栓连接结构的典型三维有限元模型<sup>[7]</sup>。刘向东等<sup>[8]</sup>用 Ansys 软件,复合材料层合板选用 Solid185 层合单元,金属板和螺栓选用 Solid185 实体单元,采用接触单元 Conta173 和目标单元 Target170 定义螺栓-金属板-复材板之间的接触关系,通过库伦摩擦来控制接触面之间摩擦力,并利用预紧力单元 Prets179 施加螺栓的预紧力。梅俊杰等<sup>[9]</sup>采用 Ansys 中的接触单元,并使用罚函数摩擦方程来模拟接触问题。Mccarthy 等<sup>[10]</sup>利用 MSC.Marc 中 149 号层合板单元,建立复合材料层合板模型,计算了复合材料单螺栓连接接头的强度。

针对复合材料有限元模型的建立和计算,各通用有限元软件均给出了相适应的方案,而对于不同类型的复杂问题进行研究时,有限元软件以及单元类型的选择则稍有不同:对于非线性问题,更多选用 MSC.Marc 和 Abaqus 来进行分析;对于航空航天结构的线性分析,更多采用 MSC.Nastran 进行计算;对结构进行多物理场耦合分析时,采用 Ansys 软件分析的更多一些。在对研究对象进行分析时,可根据研究问题的方向,选择相应的有限元软件和结构单元,建立有限元模型进行数值分析。

### 载荷分布

在建立的有限元模型上施加相应的载荷和约束边界条件,计算得到

相应载荷条件下复合材料板面和连接紧固件的载荷分布。对应力集中部位进行分析可以得到对应连接方式下的载荷分配情况,为强度校核和优化设计提供参考。

Tang 等<sup>[11]</sup>对单搭接复合材料连接结构的载荷进行仿真计算,结果表明,单搭接结构的应力集中部位为螺栓节点,由于二次弯曲,螺栓处承受较大的弯曲应力,容易发生破坏。张明星<sup>[12]</sup>建立了 T800 碳纤维复合材料层压板多钉连接件的有限元模型,对结构轴向拉伸时的钉载分布进行了仿真计算,结果表明应力集中部位为钉板连接区,其中首末两排钉承担载荷最大(见图 2)。与试验结果相比,首末两排载荷误差较小,中间第 3 排小载荷区误差最大。

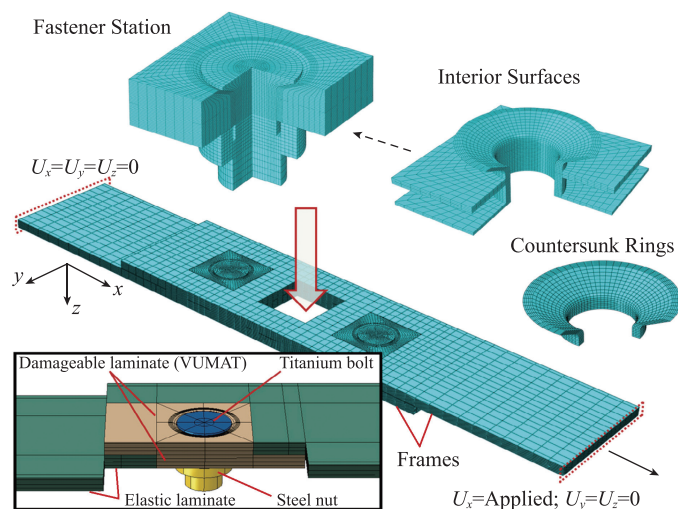


图1 复合材料连接结构三维有限元模型  
Fig.1 3D finite element model of composite joints



图2 复合材料多钉连接结构应力分布  
Fig.2 Stress distribution of multi-fastener joints composite laminates

Egan 等<sup>[7]</sup>建立了复合材料螺钉连接结构三维有限元模型,计算了结构的孔边应力,并绘制了载荷-位移曲线(图3),计算结果与试验对比吻合较好。

采用数值仿真方法能够直观地得到结构在受载情况下的载荷分布和应力集中位置,判断结构危险部位和破坏形式。与试验结果对比可以验证计算方法和有限元模型的正确性和有效性,为后续工作奠定基础。

### 渐进损伤分析

采用有限元二次开发的方法对有限元计算结果进行后处理,使得有限元计算更加灵活有效。选用适当的强度准则,根据有限元计算结果对单元进行刚度退化后继续计算,利用分步加载、迭代计算的方法模拟复合

材料连接的损伤扩展,能够更加精确地得到仿真试件损伤开始到完全破坏的演化过程<sup>[13-14]</sup>。

渐进损伤强度分析的关键是强度准则能否正确地判定材料单元失效,单元刚度折减系数的设置是否合理,非线性计算方法是否能够使计算结果收敛。

#### 1 失效准则

目前用来判断复合材料失效的准则有很多,如最大应力准则、最大应变准则、Hashin 准则、霍夫曼(Hoffman)准则、Yamada-Sun 准则、蔡-希尔(Tsai-Hill)准则、蔡-吴(Tsai-Wu)准则等。其中 Hashin 准则能够有效判断和描述复合材料各种破坏形式:基体拉伸开裂、基体压缩开裂、纤维拉伸失效、纤维压缩失效、纤维与基体剪切失效,在当前的

研究中应用最为广泛。

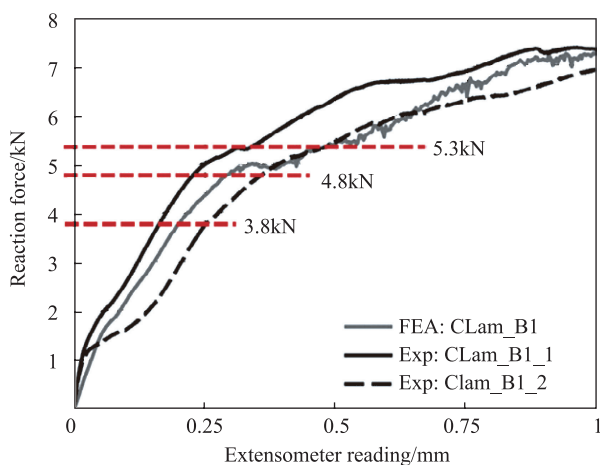
基于 Hashin 失效准则,刘斌等<sup>[15]</sup>建立了二维复合材料螺栓连接模型,考虑单向板的剪切非线性,对复合材料层合板螺栓连接件的强度进行有限元计算,较好地预测了层合板的破坏载荷以及损伤演化行为。王芳等<sup>[16]</sup>同时采用两种失效准则对复合材料螺栓连接层压板进行分析计算,以 Tsai-Wu 失效准则判断各铺层上的损伤区域,以 Hashin 准则判断损伤区域的损伤类型,根据损伤类型对损伤区域进行刚度退化,得到结构首层失效强度以及结构最终失效强度。Zou 等<sup>[17]</sup>建立了考虑销孔界面处的非线性剪切应力-应变关系和材料渐进损伤的模型,采用了一种结合 Hashin 准则、最大应力准则以及 Camanho 和 Matthews 退化准则的混合失效准则,预测了孔的安装载荷、应力和损伤。樊建平<sup>[18]</sup>基于 Hashin 准则,将其中纤维拉伸破坏准则替换为最大应力准则,采用一种“混合准则”模拟了复合材料连接处的失效过程。

Hashin 准则将不同失效形式分别进行判别,具有较强的适用性,但是判别结果偏保守,强度预测结果比试验结果小。因此当前研究更倾向于在 Hashin 准则基础上进行针对性的修改,形成“改进型”或“混合型”的强度准则,以适应各类不同的复合材料结构。

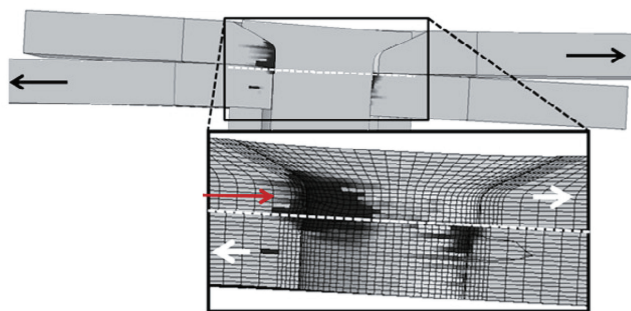
#### 2 刚度折减方法

在判断结构单元失效后进行刚度退化是有限元渐进损伤分析的一般步骤,对于刚度折减的方法,目前大多是在单元的弹性常数前乘一个 0~1 的系数来实现某个方向上的刚度退化。

Abaqus 中的 USDFLD 模块可以加入失效准则程序,程序主体为 Fortran 语言编写,根据失效类型引入变量场 FV 从而实现刚度退化算法<sup>[6]</sup>。



(a) 仿真与试验的载荷-位移曲线



(b) 应力分布与损坏

图3 试验和仿真的载荷-位移曲线与应力分布结果

Fig.3 Load-extension curve and stress distribution of composite joints

Abaqus 还可以采用 VUMAT 子程序进行动态显式算法<sup>[19]</sup>,通过失效准则的判别后对单元刚度进行折减,将折减后的刚度代入单元重新进行计算,直至计算完成。与采用 USDFLD 模块的隐式算法相比,VUMAT 动态显式算法具有较好的稳定性,在时间步长足够的情况下一般不存在收敛性的问题,对内存的需求也比隐式算法少,但是显式算法要求质量矩阵为对角阵,采用减缩积分方法时容易激发沙漏模式,影响计算结果的精度<sup>[20]</sup>。

Veisi 等<sup>[21]</sup>利用 Abaqus 子程序建立了渐进损伤模型,对碳/环氧复合材料板的承载失效进行了预测,计算其最大失效载荷,与试验结果相比具有较好的一致性,并研究了螺栓间距对最大破坏载荷的影响。在 Ansys 软件中利用 APDL 语言可以写入失效准则,直接对单元各方向上的刚度进行修改,达到刚度折减的目的<sup>[22]</sup>。

刚度折减系数的选择直接影响到损伤演化的过程及强度计算结果,具有代表性的刚度退化方法有 Chang 等<sup>[23]</sup>采用的刚度直接退化法,他们认为单元一旦失效就不再具有承载能力,将失效单元各方向的弹性常数直接退化为 0,即刚度折减系数为 0。另一种具有代表性的刚度折减方法为 Tan 等<sup>[24]</sup>采用的刚度渐进折减法,认为纤维和基体拉伸或压缩失效后仍然具有一定的刚度,根据失效形式的不同,在不同方向上折减不同的系数。

刚度直接退化法得到的结果偏保守,一般用于保守设计和初始损伤位置的判断。当前研究更多采用连续退化方法<sup>[25-27]</sup>,即根据失效形式判断其是否具有继续承载的能力,选择适合的折减系数实现刚度的退化。刚度渐进折减法能够反映结构的剩余刚度,较好地模拟渐进损伤破坏的过程。但是由于各类复合材料结构

组分材料、连接方式等因素的差异,对于各类失效模式对应的刚度折减系数的确定,目前还没有形成统一的标准。可以通过试验结果对比修正,或者考察组分材料性能估算的方法确定折减系数。

## 影响因素分析

将有限元仿真计算结果与试验进行对比,从而验证有限元模型与计算方法的有效性与正确性,在此基础上分析各类因素(包括连接件几何参数、层合板设计参数、连接结构的配合参数等)对计算结果的影响,可以节约试验时间和试验成本,为复合材料连接的改进设计提供依据。

### 1 几何参数的影响

几何因素分析,主要研究复合材料连接区开孔尺寸、开孔数量、开孔位置以及板的尺寸对载荷分配和连接性能的影响。顾亦磊等<sup>[28]</sup>研究了板的厚度对层合板螺栓连接挤压强度的影响,研究结果表明,在一定程度上,孔径与板厚度比( $D/t$ )越小,螺栓孔挤压失效区域距离螺栓孔中心线位置越近。张志宏等<sup>[29]</sup>对复合材料双钉单搭接连接中螺栓、螺母在静载荷作用下的应力进行仿真计算,结果表明,单搭接中偏心矩在螺栓上的螺纹位置产生较大的应力,使螺栓发生断裂破坏;在螺母中产生较大的弯曲应力,使螺母发生破坏;在连接区两端对层合板施加横向约束能够有效降低螺栓、螺母中的应力幅值;侧向约束可以降低螺栓螺母上因弯矩产生的轴向载荷。Xiang 等<sup>[30]</sup>基于弹簧法和有限元理论,以七螺栓双搭接模型为例,研究了板宽、板厚、螺栓间距和间隙对载荷分布的影响。龚潇等<sup>[31]</sup>使用载荷不均匀度  $U_e$  来描述多孔连接时各螺栓的载荷分配情况,分别研究了排距、边距、端距与孔径的比值对载荷不均匀度的影响,结果表明在保证连接效率的前提下,减小端距/孔径和排距/孔径比值,

增大边距/孔径比值,可以使螺栓载荷分配不均现象得到改善。

### 2 铺层参数的影响

层合板设计参数因素分析,主要研究复合材料铺层顺序和各方向铺层的比例对连接性能和破坏形式的影响。王雪峰等<sup>[32]</sup>研究了复合材料层合板铺层角度对连接强度的影响,结果表明,在单向拉伸情况下,单元从螺栓连接孔边开始失效并向板边缘扩展,不同的铺层角度引起的失效形式不同,90°铺层的损伤形式主要是基体开裂,0°铺层损伤的主要形式是纤维断裂,而  $\pm 45^\circ$  铺层的主要损伤形式是基体开裂-基纤维剪切破坏。顾亦磊等<sup>[33]</sup>对各角度铺层比例进行了数值分析,0°和 90°铺层对结构强度的影响最大,缺乏 0°铺层结构容易发生拉伸破坏,而缺乏 90°铺层结构容易发生劈裂, $\pm 45^\circ$ 铺层可以提升孔边  $\pm 45^\circ$  方向的强度。何柏灵等<sup>[34]</sup>研究发现,增加  $\pm 45^\circ$  铺层比例能够提高面内剪切强度和连接的 2% 偏移挤压强度,与前者结论一致。

### 3 装配条件的影响

安装配合因素分析,主要研究复合材料结构件连接配合间隙、拧紧力矩等因素对连接强度的影响。对于单搭接结构,在受轴向拉压时会产生偏心力矩,使螺栓受剪切的同时受到额外的轴向载荷,增加拧紧力可以有效降低偏心力矩的影响,提升连接强度<sup>[35]</sup>。对于双搭接结构,增大连接螺栓的拧紧力可以增加结构部件之间的摩擦力,减少螺栓孔附近的应力<sup>[36]</sup>。过大的拧紧力会导致材料压缩破坏,反而降低连接强度,通过增大垫片尺寸的方法可以降低拧紧应力集中,增大摩擦面积可提升连接性能<sup>[37]</sup>。王富生等<sup>[6]</sup>分析了螺钉的配合间隙、挤压面的摩擦系数和开孔形状对复合材料层合板单钉螺栓连接力学性能的影响,研究结果表明:采用较小的配合间隙、较大的挤压面切

向摩擦系数有利于提高连接强度,与椭圆形开孔相比圆形开孔连接更加可靠。曾昭炜等<sup>[38]</sup>研究了三钉单剪结构连接件中配合间隙和钉孔直径对钉载分配的影响,采用变直径的方式连接能够提升结构拉伸强度。Choi等<sup>[39]</sup>采用特征长度法结合 Tsai Wu 破坏准则,对具有夹紧力的复合材料接头进行分析,利用试验确定接头的拉伸和压缩特征长度,采用特征曲线对单搭接剪切螺栓节点进行失效载荷预测,将预测的破坏荷载与试验所得的实际破坏荷载进行比较,结果吻合较好。

综上所述,影响复合材料连接结构的因素有很多,其中影响权重较大的为几何设计,可在几何设计定型基础上进行其他因素的优化,若仅通过试验研究的方法,则需要大量系统的试验才能确定各类因素的影响情况,研究效率较低。通过数值仿真与代表性试验相结合的方法,将试验结果和仿真结果对比,在确认有限元模型与计算方法正确有效的基础上,通过更改模型的几何参数和材料参数以及边界条件,进行重复计算,能够高效地分析得到相同结构形式下,不同的设计参数对结构连接强度的影响,大大减少了试验所需的样本数量。利用数值仿真的方法,能够快速计算归纳各参数对结构强度的影响规律,为结构优化设计和强度预测提供依据。

## 其他分析

有限元软件除静力分析之外,还具有多场耦合计算、疲劳分析、二次开发等功能,为复合材料连接结构湿热分析、疲劳分析提供了计算平台<sup>[40]</sup>。

魏洪等<sup>[41]</sup>研究了由初始装配温度和工作温度差产生的热应力对连接性能的影响,二者温度差越大,连接螺栓受到的热应力越大。增加 $\pm 45^\circ$ 方向的铺层,可以增大复合材

料层压板的应变,从而降低螺栓的受力。连接螺栓的刚度过大会导致螺栓受载增大,金属连接件承受的应力也越大。

Shan等<sup>[42]</sup>提出了一种考虑湿热效应的疲劳损伤模型(PFDM),在应力分析模型、材料退化模型和疲劳破坏准则中采用湿热诱导材料性能,将湿热应变引入到本构方程中,提出了一种基于残余应变的材料退化模型和基于细观力学的突发性材料退化模型来描述复合材料在湿热环境中的损伤。

王景泽<sup>[43]</sup>通过仿真和试验研究了湿热环境对复合材料连接件力学性能的影响,随着时间的推移,湿热的环境会降低复合材料的压缩强度,对横向和剪切方向的模量和强度有一定影响,对拉伸强度影响较小。利用有限元软件计算得到了吸湿和预紧力衰减后复合材料机械连接的破坏形式为 $0^\circ$ 铺层的纤维断裂与 $90^\circ$ 铺层的基体开裂。

随着有限元软件的发展,数值分析方法为复合材料连接结构更加深入的研究提供了途径,使得各种类型的大规模、多变量、非线性的复杂计算成为可能。

## 结论

大量的研究与实践表明,数值仿真能够有效地模拟计算复合材料连接性能。通过与试验结合的方式,可以对复合材料连接件的力学性能和影响因素进行分析验证,利用软件进行后期参数的优化设计和行为预测。目前对于复合材料连接结构的载荷分布、静强度分析和渐进损伤分析的方法已经较为完善。

有限元软件功能的多样和二次开发接口为复合材料连接性能更加全面深入的研究提供了途径。未来在以下方面值得进行更加深入的探讨:考虑存放和使用环境,分析湿热环境对复合材料连接性能的影响;

考虑连接对象,建立合理的复材-金属连接结构模型,分析影响连接性能的因素;考虑制造工艺,对一体化成型的三维编织复合材料连接结构的力学行为进行分析。此外,复合材料连接结构中的动力学问题和疲劳寿命问题也值得进一步研究。

## 参考文献

- [1] RANA S, FANGUEIRO R. Advanced composite materials for aerospace engineering [M]. Amsterdam: Elsevier Science and Technology, 2016.
- [2] MCCARTHY M. BOJCAS: Bolted joints in composite aircraft structures[J]. Air & Space Europe, 2003, 3(3/4): 139-142.
- [3] 彭湃, 赵美英, 江红星. 复合材料多钉连接结构自动建模与钉载分析技术研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(6): 974-977.
- [4] PENG Pai, ZHAO Meiyang, JIANG Hongxing. Research on the auto-modeling and analytic method of load distribution for multi-bolt joints in composite structures[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(6): 974-977.
- [5] 李琳, 张明俊. 复合材料多钉连接有限元分析[C]//第三届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国科学技术协会, 2017: 106-110.
- [6] LI Lin, ZHANG Mingjun. Research by finite element analysis on multi-fastened composite laminate[C]//Proceedings of the Third China Aeronautical Science and Technology Conference. Beijing: China Association for Science and Technology, 2017: 106-110.
- [7] GRAY P J, MCCARTHY C T. A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multi-bolt composite joints[J]. Composites Part B, 2010, 41(4): 317-325.
- [8] LIU P, CHENG X Q, WANG S W, et al. Numerical analysis of bearing failure in countersunk composite joints using 3D explicit simulation method[J]. Composite Structures, 2016, 138: 30-39.
- [9] EGAN B, MCCARTHY MA, FRIZZELL

R M, et al. Modelling bearing failure in countersunk composite joints under quasi-static loading using 3D explicit finite element analysis[J]. Composite Structures, 2014, 108: 963–977.

[8] 刘向东, 李亚智, 李彪, 等. 复合材料机械连接数值模型和强度研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(6): 878–883.

LIU Xiangdong, LI Yazhi, LI Biao, et al. On numerical modeling and tensile strength of bolted composite Joints[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(6): 878–883.

[9] 梅俊杰, 倪爱清, 王继辉. 复合材料螺栓连接渐近失效分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(7): 40–44.

MEI Junjie, NI Aiqing, WANG Jihui. Progressive damage analysis of composite bolted joints[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(7): 40–44.

[10] MCCARTHY M A, MCCARTHY C T, LAWLOR V P, et al. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: Part I—model development and validation[J]. Composite Structures, 2005, 71(2): 140–158.

[11] TANG Y L, ZHOU Z G, PAN S D, et al. Mechanical and failure behavior of three-dimensional six-directional braided composites bolted joint[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36(10): 073168441769061.

[12] 张明星. T800 碳纤维复合材料多钉连接层压板钉载分布及有限元计算[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(1): 28–32.

ZHANG Mingxing. Load distribution and finite element analysis of multi-fastener joints T800 composite laminates[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(1): 28–32.

[13] LIU F R, LU X H, ZHAO L B, et al. Investigation of bolt load redistribution and its effect on failure prediction in double-lap, multi-bolt composite joints[J]. Composite Structures, 2018, 202: 397–405.

[14] YANG Y X, LIU X S, WANG Y Q, et al. An enhanced spring-mass model for stiffness prediction in single-lap composite joints with considering assembly gap and gap shimming[J]. Composite Structures, 2018, 187: 18–26.

[15] 刘斌, 赵亮, 徐红炉. 基于 Hashin

失效准则的复合材料螺栓连接损伤破坏研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(8): 1740–1744.

LIU Bin, ZHAO Liang, XU Honglu. The research about damage of composite laminate in bolted joints based on the Hashin failure criteria[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(8): 1740–1744.

[16] 王芳, 赵美英, 万小朋. 复合材料层压板机械连接失效分析[J]. 机械设计, 2006, 23(7): 40–43.

WANG Fang, ZHAO Meiyong, WAN Xiaopeng. Failure analysis on mechanical connection for composite material laminated board[J]. Journal of Machine Design, 2006, 23(7): 40–43.

[17] ZOU P, ZHANG K F, LI Y, et al. Bearing strength and failure analysis on the interference-fit double shear-lap pin-loaded composite[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016, 27(2): 179–200.

[18] 樊建平, 郭细伟. 复合材料层合板机械连接处失效过程的数值模拟[J]. 材料导报, 2010, 24(6): 68–70.

FAN Jianping, GUO Xiwei. Numerical simulation of failure process at the place of mechanical joint in composite laminates[J]. Materials Review, 2010, 24(6): 68–70.

[19] MANDAL B, CHAKRABARTI A. Numerical failure assessment of multi-bolt FRP composite joints with varying sizes and preloads of bolts[J]. Composite Structures, 2018, 187: 169–178.

[20] WANG Z Q, ZHOU S, ZHANG J F, et al. Progressive failure analysis of bolted single-lap composite joint based on extended finite element method[J]. Materials & Design, 2012, 37: 582–588.

[21] VEISI H, KORDKHEILI S A H, TOOZANDEHJANI H. Progressive bearing failure modeling of composites with double-bolted joints at mesoscale level[J]. Archive of Applied Mechanics, 2014, 84(5): 657–669.

[22] BARBERO E J, SHAHBAZI M. Determination of material properties for ANSYS progressive damage analysis of laminated composites[J]. Composite Structures, 2017, 176: 768–779.

[23] CHANG F K, LESSARD L B.

Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to compressive loadings: Part I—analysis[J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25(1): 2–43.

[24] TAN S C, PEREZ J. Progressive failure of laminated composites with a hole under compressive loading[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993, 12(10): 1043–1057.

[25] 刘忠献, 聂江, 郭璐璐. 复合材料结构多钉连接设计、分析与试验技术[J]. 航空制造技术, 2015, 58(1/2): 109–110, 114.

LIU Zhongxian, NIE Jiang, GUO Lulu. Design, analysis and test technology of composites joint with multi-fastener connection structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(1/2): 109–110, 114.

[26] 张浩宇, 侯波, 何宇廷, 等. 航空复合材料—金属连接结构的拉伸性能及其渐进损伤[J]. 机械工程材料, 2017, 41(8): 87–92.

ZHANG Haoyu, HOU Bo, HE Yuting, et al. Tensile property of aeronautical composite-metal joint structure and its progressive damage[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(8): 87–92.

[27] GOSWAMI S. A finite element investigation on progressive failure analysis of composite bolted joints under thermal environment[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2005, 24(2): 161–171.

[28] 顾亦磊, 赵美英. 复合材料层合板螺栓连接失效分析[J]. 航空计算技术, 2006, 36(2): 110–113.

GU Yilei, ZHAO Meiyong. Failure analysis of composite bolted joints[J]. Aeronautical Computing Technique, 2006, 36(2): 110–113.

[29] 张志宏, 张博平, 杨杰. 复合材料层合板单搭接机械连接横向力研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(1): 84–90.

ZHANG Zhihong, ZHANG Boping, YANG Jie. Study on the lateral force of the single lap joint of composite laminates[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(1): 84–90.

[30] XIANG J W, ZHAO S W, LI D C, et al. An improved spring method for calculating the load distribution in multi-bolt composite joints[J]. Composites Part B, 2017, 117: 1–8.

- [31] 龚潇, 于随然. 复合材料螺栓连接载荷分配的数值模拟[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2015, 41(4): 438–442.
- GONG Xiao, YU Suiran. Numerical simulation for load distribution of composite bolt joint[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2015, 41(4): 438–442.
- [32] 王雪峰, 李飞, 赵豪杰, 等. 复合材料螺栓连接的强度预测与失效分析研究[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(3): 26–28.
- WANG Xuefeng, LI Fei, ZHAO Haojie, et al. Strength prediction and failure analysis of composite bolted connections[J]. Mechanical Research & Application, 2017, 30(3): 26–28.
- [33] 顾亦磊, 赵美英, 王芳, 等. 复合材料层合板机械连接失效分析及铺层优化[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2006, 22(4): 13–17.
- GU Yilei, ZHAO Meiyang, WANG Fang, et al. Failure analysis of composite bolted joints and the ply scheme optimization[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Nature Science Edition), 2006, 22(4): 13–17.
- [34] 何柏灵, 葛东云, 莫与明, 等. T800 碳纤维增强复合材料双剪单钉连接的拉伸试验及强度估算[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1540–1552.
- HE Boling, GE Dongyun, MO Yuming, et al. Tensile tests and strength estimation for double-lap single-bolt joints in T800 carbon fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1540–1552.
- [35] HU X F, HARIS A, RIDHA M, et al. Progressive failure of bolted single-lap joints of woven fibre-reinforced composites[J]. Composite Structures, 2018, 189: 443–454.
- [36] LIU F R, SHAN M J, ZHAO L B, et al. Probabilistic bolt load distribution analysis of composite single-lap multi-bolt joints considering random bolt-hole clearances and tightening torques[J]. Composite Structures, 2018, 194: 12–20.
- [37] 梅俊杰, 倪爱清, 王继辉. 复合材料螺栓连接渐进失效分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(7): 40–44.
- MEI Junjie, NI Aiqing, WANG Jihui. Progressive damage analysis of composite bolted joints[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(7): 40–44.
- [38] 曾昭炜, 刘红武. 复合材料层合板多钉连接钉载分配分析[J]. 无线互联科技, 2017(14): 103–105.
- ZENG Zhaowei, LIU Hongwu. Analysis of nailing distribution of multi-nail connection of composite laminates[J]. Wireless Internet Technology, 2017(14): 103–105.
- [39] CHOI J I, HASHEMINIA S M, CHUN H J, et al. Failure load prediction of composite bolted joint with clamping force[J]. Composite Structures, 2018, 189: 247–255.
- [40] NAZARI F, SAFARABADI M. Experimental and numerical investigation of loading speed effect on the bearing strength of glass/epoxy composite joints[J]. Composite Structures, 2018, 195: 211–218.
- [41] 魏洪, 郑茂亮, 范瑞娟. 复合材料与金属结构连接热应力有限元分析[J]. 航空科学技术, 2015(9): 33–36.
- WEI Hong, ZHENG Maoliang, FAN Ruijuan. Finite element analysis on thermal stress of the connection structure between composite and metal sheet[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015(9): 33–36.
- [42] SHAN M J, ZHAO L B, HONG H M, et al. A progressive fatigue damage model for composite structures in hygrothermal environments[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111: 299–307.
- [43] 王景泽. 复合材料机械连接湿热效应及预紧力衰减规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- WANG Jingze. The research of hygrothermal effects and clamp force degradation for the composite bolted joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

通讯作者: 孙慧玉, 教授、博士生导师, 研究方向为复合材料力学、智能材料力学, E-mail: hysun@nuaa.edu.cn.

## Progress on Numerical Analysis of Composite Joints

HAN Xiaojin<sup>1,2</sup>, SUN Huiyu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structure, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. SINOMACH Beijing Aircraft Strength Institute Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**[ABSTRACT]** Numerical method can effectively solve the problem of mechanics in engineering practice. According to the basic process of finite element numerical analysis, the numerical research on the composite joints from several aspects is summarized: finite element modeling, load analysis, post-processing analysis. The factors affecting the joining strength of composite materials are reviewed, and some research of finite element method for strength and fatigue life of composite joint under hygrothermal conditions are enumerated. Finally, future research on mechanical problems of composite joint is discussed.

**Keywords:** Composite materials; Mechanically fastened joint; Finite element; Progressive damage; Load distribution

(责编 逸飞)