二次弯曲作用下复合层合板螺栓连接的刚度特性

李 玲，江志文，妙东浩，解妙霞，程福安

（西安建筑科技大学 机电工程学院，西安 710055）

摘 要：针对二次弯曲作用下的复合材料层合板单搭接连接结构，提出了一种更准确的螺栓连接刚度模型。首先，通过考虑偏心载荷产生的二次弯曲来计算弯曲刚度。其次，通过ABAQUS有限元软件建立碳-铝单搭接模型，并与M-G模型进行对比。最后，分析摩擦因数、螺栓孔间隙、金属板厚度、铺层顺序等参数对螺栓连接结构各阶段刚度的影响，揭示连接接触面接触状态对螺栓连接结构的影响规律。结果表明：摩擦因数的增大会导致粘滞阶段的临界摩擦力增大，但不影响螺栓连接结构刚度；螺栓孔间隙的增大会导致螺栓孔与螺杆之间的接触面积减小，从而降低螺栓连接结构刚度；金属板厚度对粘滞阶段和接触阶段螺栓连接结构刚度的影响更显著；0°铺层会提高层合板的刚度和承载能力，45°铺层会提升孔周围的抗挤压强度。

关键词：复合材料；单搭接连接；二次弯曲；刚度；接触状态

中图分类号：TB332 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2025)08-2520-10

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231187

Stiffness characteristics of bolt connection of composite laminates under secondary bending

LI Ling，JIANG Zhi-wen，MIAO Dong-hao，XIE Miao-xia，CHENG Fu-an

（*School of Mechanical and Electrical Engineering，Xi'an University of Architecture and Technology，Xi'an* 710055，*China*）

Abstract：A more accurate bolt connection stiffness model is proposed for the single lap joint structure of composite laminates under secondary bending. Firstly，the bending stiffness is calculated by considering the secondary bending caused by eccentric loads. Secondly，the carbon-aluminum single lap model is established by ABAQUS finite element software and compared with the M-G model. Finally，the influence of friction coefficient，bolt hole clearance，metal plate thickness and ply sequence on the stiffness of bolted connection structure at each stage is analyzed，and the influence of contact state of connection contact surface on bolt connection structure is revealed. The results show that the increase of the friction coefficient will lead to the increase of the critical friction force in the viscous stage，but it does not affect the

收稿日期：2023-11-01.

基金项目：国家自然科学基金项目(51975449)；陕西省重点研发计划项目(2021GY-309)；陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ032).

作者简介：李玲(1981-)，男，教授，博士. 研究方向：机械动力学和接触力学. E-mail：lee_liling@163.com

通信作者：解妙霞(1977-)，女，副教授，博士. 研究方向：机械动力学. E-mail：liling@xauat.edu.cn

stiffness of the bolt connection structure. The increase of the bolt hole clearance will lead to the decrease of the contact area between the bolt hole and the screw, thus reducing the stiffness of the bolt connection structure. The metal plate thickness has a more significant effect on the stiffness of the bolt connection structure in the viscous stage and the contact stage. The 0°ply can improve the stiffness and bearing capacity of the laminate, and the 45°ply can improve the compressive strength around the hole.

Key words: composite; single lap joint; secondary bending; stiffness; contact state

0　引　言

碳纤维增强聚合物(Carbon fibre reinforced polymer, CFRP)由于其优异的强度和耐久性而越来越多地作为层合板材料应用于航空航天领域[1]。在螺栓连接服役的过程中发现螺栓连接结构的刚度受到连接件几何参数和力学参数的影响,如连接件与被连接件的厚度、孔轴间隙以及结合面的摩擦因数等参数[2]。因此,螺栓连接结构的性能会受到上述参数设计的影响,如何更合理地分析复合材料螺栓连接结构的刚度是需要研究的核心。

与金属连接结构不同,复合材料连接结构由于没有局部的屈服状况,导致其应力集中问题更为严重[3],并且螺栓连接结构要对连接件进行开孔处理,也会导致应力集中现象[4]。目前,涉及复合材料的螺栓连接设计方案分为实验法、解析法和有限元法。实验法的优点是具有较高的真实性和可靠性,但是需要耗费大量的时间和人力,对设施具有一定要求。而解析法中弹簧质量法成为一种预测螺栓连接结构刚度的常用方法。弹簧质量法最初由 Tate 等[5]提出,用来研究螺栓连接结构的刚度。之后的学者 McCarthy 等[6]研究了不同螺栓转矩和螺栓孔间隙对三螺栓、单搭接连接结构载荷分布的影响。Liu 等[7]提出了一种考虑螺栓孔间隙对螺栓连接结构刚度的三线性刚度模型,并结合有限元法,预测了多螺栓节点的荷载分布。在有限元法的应用中,Stocchi 等[8]建立了复合螺栓连接结构的有限元模型,讨论了 CFRP 板和钛螺栓的应力状态,分析了螺栓与孔间接触的变化,并研究了不同参数对螺栓连接结构性能的影响。Guerrero 等[9]提出了两种简化有限元建模方式的方法,一种基于连续介质的壳元素,另一种基于传统的壳元素。结果表明,连续介质壳模型在精度和计算代价之间具有较好的平衡。

单搭接螺栓连接结构在拉伸力的作用下,由于偏心载荷的影响会在螺栓处产生弯矩,进而导致螺栓连接结构的面外变形,也就是“二次弯曲”。Liu 等[10]研究发现,双搭接层合板的连接强度高于单搭接层合板,这是由于偏心载荷引起的二次弯曲造成的影响。Tang 等[11]通过实验结果发现,由于二次弯曲,单搭接螺栓连接结构的承载力降低,破坏模式发生改变。Zhou 等[12]建立了三维复合材料损伤模型,该模型更好地预测二次弯曲、间隙等情况下的损伤情况。Gray 等[13]研究了复合材料飞机机身结构中机械紧固连接设计的相关问题,结果表明不同连接类型对螺栓连接结构的二次弯曲有显著影响,从而影响螺栓连接结构的最终破坏模式。

螺栓间隙、摩擦因数等参数会影响复合层合板螺栓连接结构的刚度响应。研究证明,摩擦系数是一个重要的参数,因为实验中确定摩擦因数相当复杂,所以针对摩擦因数的研究较少。Mccarthy 等[14-18]通过实验研究了螺栓间隙配合对复合材料螺栓连接结构强度和刚度的影响,通过两种不同的摩擦模型来模拟加载过程中螺栓连接结构之间的摩擦,将所得到的孔周围的应力分布与之前的分析研究结果进行了比较,并对两种摩擦模型的适用情况进行了说明。复合层合板的铺层设计方案是由单层材料的性能所决定的。许多学者[19-25]通过有限元法和实验法对螺栓连接结构进行研究,发现层合板中各单层材料的纤维取向、铺层顺序、各铺层角度相对于总层数的比例和总层数均会影响层合板的整体性能。

本文通过弹簧质量理论建立了螺栓单搭接刚度模型,考虑到螺栓连接结构的几何尺寸对二次弯曲的影响,对螺栓单搭接接触阶段的刚度进行修正。同时,建立三维有限元模型与刚度模型进行对比验证。有限元模型通过模拟螺栓预加载和静态拉伸的方式进行建模,研究了螺栓单搭接连接结构中摩擦因数、螺栓孔间隙、金属板厚度和铺

层顺序对模型刚度的影响,进而讨论了拉伸阶段的不同刚度阶段和接触面的演化过程。

1 螺栓连接刚度模型

通过弹簧质量理论和考虑到偏心载荷对螺栓连接结构的作用,对三阶段刚度分析模型进行改进[6]。三刚度阶段分别为粘滞阶段、滑动阶段和接触阶段。相比于三刚度模型,新模型考虑了螺栓连接结构几何尺寸对二次弯曲刚度的影响。

新模型通过沉头螺栓将金属板和复合层合板进行连接,尺寸参数如图1所示。其中包含了:①由60层材料构成的CFRP复合层合板,总厚度为7.8 mm;②厚度为6 mm的金属板;③直径为4.78 mm、沉头角度为100°的钢制沉头螺栓。

单搭接螺栓连接结构视为弹簧质量模型质量块和具有刚度的弹簧,如图2所示。图2中,螺栓连接结构的质量施加在3处。

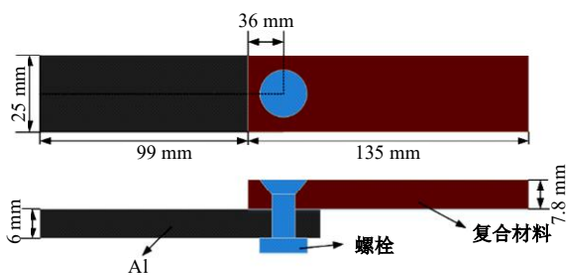


图1 碳-铝单搭接螺栓连接结构模型

Fig. 1 Carbon-aluminum single lap bolt connection structure model

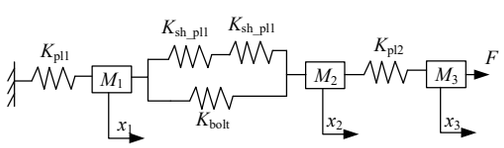


图2 螺栓连接弹簧质量模型

Fig. 2 Bolt-connected spring mass model

拉伸载荷下的复合材料板和金属板的刚度分别用K_{pl1}和K_{pl2}表示。复合材料板和金属板在剪切载荷作用下的刚度分别为K_{sh_pl1}和K_{sh_pl2}。随着右端施加的载荷值达到连接板之间可以传递的摩擦力的最大值,连接板之间开始产生相对位移并且不增加载荷,最终螺栓孔轴产生接触。

考虑到质量块只能在x方向上自由移动,由图1所示弹簧质量模型可得一个线性方程组,即:

$$[\boldsymbol{M}]\cdot\{\ddot{\boldsymbol{x}}\}+[\boldsymbol{K}]\cdot\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{F}\} \tag{1}$$

式中:$[\boldsymbol{M}]$、$[\boldsymbol{K}]$、$\{\boldsymbol{x}\}$、$\{\ddot{\boldsymbol{x}}\}$分别为质量矩阵、刚度矩阵、位移矩阵和加速度矩阵。由于外力F为准静态载荷,加速度可以忽略,由此可得:

$$[\boldsymbol{K}]\cdot\{\boldsymbol{x}\}=\{\boldsymbol{F}\} \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} K_{pl1}+K_{shear} & -K_{shear} & 0 \\ -K_{shear} & K_{pl2}+K_{shear} & -K_{pl2} \\ 0 & -K_{pl2} & K_{pl2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F \end{bmatrix} \tag{3}$$

式(3)为粘滞阶段下的线性方程,通过将载荷矢量F与刚度矩阵$\boldsymbol{K}$的逆相乘来求解位移,其中K_{shear}为2块串联连接板的剪切刚度。

$$\begin{bmatrix} K_{pl1}+K_{bolt} & -K_{bolt} & 0 \\ -K_{bolt} & K_{pl2}+K_{bolt} & -K_{pl2} \\ 0 & -K_{pl2} & K_{pl2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}= \begin{bmatrix} -K_{bolt}\cdot c-K_{bolt}\cdot u_f+F_{uf} \\ K_{bolt}\cdot c+K_{bolt}\cdot u_f-F_{uf} \\ F \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)为接触阶段下的线性方程,其中u_f为式(3)中可以达到的最大位移,c为螺栓孔间隙,K_{bolt}为螺栓刚度,F_{uf}为获得螺栓连接结构可以传递的最大摩擦力。

承受拉伸载荷的复合材料层合板的刚度可以表达为:

$$K_{pli}=\frac{E_{lci}-W_{ci}\cdot t_{ci}}{p_{ci}-D/2} \tag{5}$$

式中:E_{lci}为使用层合板理论计算的纵向等效弹性模量;W_{ci}和t_{ci}分别为复合板的宽度和厚度;p_{ci}为孔中心和施加载荷的板自由端之间的距离;D为孔直径。

$$K_{shear}=\left[\frac{1}{K_{sh_pl1}}+\frac{1}{K_{sh_pl2}}\right]^{-1} \tag{6}$$

$$K_{sh_pli}=\frac{A_{wpli}\cdot G_{xzi}}{t_{ci}} \tag{7}$$

式中:G_{xzi}为连接板剪切模量;A_{wpli}为连接板接触的面积。

$$F_{uf}=\mu\cdot F_{torque} \tag{8}$$

式中:μ为考虑到摩擦因数;F_{torque}为螺栓扭矩产生的法向力。

考虑到螺栓剪切刚度K_{sh_b}、螺栓弯曲刚度K_{bend_b}、复合材料板和金属板的承载刚度K_{be_pli}以及实验系数β来计算螺栓刚度[5,24],即:

$$K_{bolt}=\left[\frac{1}{K_{sh_b}}+\left(\frac{1}{K_{bend_b}}+\frac{1}{K_{be_pl1}}+\frac{1}{K_{be_pl2}}\right)(1+3\beta)\right]^{-1} \tag{9}$$

式中:螺栓的刚度强烈依赖于二次弯曲系数β,Nelson等[24]提出的普通螺栓的二次弯曲系数为

0.15,并已被其他作者[5]使用。

$$K_{\mathrm{sh_b}}=\frac{3G_{\mathrm{b}}A_{\mathrm{b}}}{2(t_1+t_2)} \tag{10}$$

$$K_{\mathrm{bend_b}}=\frac{E_{\mathrm{b}}t_1t_2}{2(t_1+t_2)} \tag{11}$$

式中:G_{b}为螺栓剪切模量;A_{b}为螺栓横截面面积;E_{b}为螺栓的弹性模量。

$$K_{\mathrm{be_pl1}}=t_1\cdot\sqrt{E_{\mathrm{Lc1}}\cdot E_{\mathrm{Tc1}}} \tag{12}$$

$$K_{\mathrm{be_pl2}}=t_2\cdot\sqrt{E_x\cdot E_y} \tag{13}$$

式中:E_{Tc1}为用层压理论计算的复合板横向等效弹性模量;E_x、E_y分别为金属板横向和纵向弹性模量。

$$K_{\mathrm{bolt}}=\left[\frac{1}{K_{\mathrm{sh_b}}}+\frac{1}{K_{\mathrm{bend_b}}}+\frac{1}{K_{\mathrm{be_pl1}}}+\frac{1}{K_{\mathrm{be_pl2}}}+\frac{1}{K_{\phi 1}}+\frac{1}{K_{\phi 2}}\right]^{-1} \tag{14}$$

式中:$K_{\phi 1}$、$K_{\phi 2}$为弹簧刚度。

二次弯曲受螺栓连接结构的几何参数、弹性特性、堆积顺序等因素影响。本模型中包含了2个弹簧刚度$K_{\phi 1}$和$K_{\phi 2}$,这就避免使用二次弯曲系数β。本模型通过考虑螺栓连接结构向复合材料层合板和金属板传递横向载荷F和力矩M_{ci},见图3。式(15)中,施加在复合板上的力矩与偏心载荷路径等式产生的力矩保持平衡。由此得到复合材料层合板和金属板的二次弯曲刚度$K_{\phi i}$。

$$M_{\mathrm{c1}}+M_{\mathrm{c2}}=F\cdot t_{\mathrm{m}} \tag{15}$$

应用层压理论建立旋转和横向位移的协调方程,即:

$$\phi_{\mathrm{c1}}=\phi_{\mathrm{c2}}=Ft_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}(L^3_{\mathrm{Lefc2}}E_{\mathrm{Lc1}}I_{\mathrm{c1}}+L^3_{\mathrm{Lefc1}}E_xI_{\mathrm{c2}}/[L^4_{\mathrm{Lefc2}}E^2_{\mathrm{Lc1}}I^2_{\mathrm{c1}}+2L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}E_{\mathrm{Lc1}}E_xI_{\mathrm{c1}}I_{\mathrm{c2}}\cdot(2L^2_{\mathrm{Lefc1}}+3L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}+2L^2_{\mathrm{Lefc2}})+L^4_{\mathrm{Lefc1}}E^{22}_{x}{}_xI_{\mathrm{c2}}] \tag{16}$$

式中:t_{m}为以连接板中间平面之间的距离估计的荷载路径偏心;ϕ_{ci}为连接板在偏心载荷作用下弯曲的角度;$L_{\mathrm{Lefc}i}$为孔表面与施加载荷的板自由端之间的距离;I_{c1}为复合板的惯性矩;I_{c2}为金属板的惯性矩。

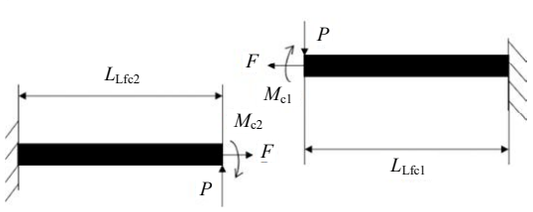


图3　连接板的加载条件

Fig. 3　Loading condition of the connecting plate

纵向位移定义为旋转和板的厚度的函数,即:

$$u_{ci}=\phi_{ci}\cdot\frac{t_{ci}}{2} \tag{17}$$

二次弯曲刚度$K_{\phi i}$可以定义为平面内位移与施加在螺栓连接结构上的载荷F之间的比值,即:

$$K_{\phi i}=\frac{F}{u_{ci}} \tag{18}$$

因此,2块连接板的二次弯曲刚度分别为:

$$K_{\phi 1}=2[L^4_{\mathrm{Lefc2}}E^2_{\mathrm{Lc1}}I^2_{\mathrm{c1}}+2L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}E_{\mathrm{Lc1}}E_xI_{\mathrm{c1}}I_{\mathrm{c2}}\cdot(2L^2_{\mathrm{Lefc1}}+3L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}+2L^2_{\mathrm{Lefc2}})+L^4_{\mathrm{Lefc1}}E^2_xI_{\mathrm{c2}}]/t_{\mathrm{c1}}t_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}(L^3_{\mathrm{Lefc2}}E_{\mathrm{Lc1}}I_{\mathrm{c1}}+L^3_{\mathrm{Lefc1}}E_xI_{\mathrm{c2}}) \tag{19}$$

$$K_{\phi 2}=2[L^4_{\mathrm{Lefc2}}E^2_{\mathrm{Lc1}}I^2_{\mathrm{c1}}+2L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}E_{\mathrm{Lc1}}E_xI_{\mathrm{c1}}I_{\mathrm{c2}}\cdot(2L^2_{\mathrm{Lefc1}}+3L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}+2L^2_{\mathrm{Lefc2}})+L^4_{\mathrm{Lefc1}}E^2_xI_{\mathrm{c2}}]/t_{\mathrm{c2}}t_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{Lefc1}}L_{\mathrm{Lefc2}}(L^3_{\mathrm{Lefc2}}E_{\mathrm{Lc1}}I_{\mathrm{c1}}+L^3_{\mathrm{Lefc1}}E_xI_{\mathrm{c2}}) \tag{20}$$

1.1　有限元模型

使用ABAQUS软件建立一个碳-铝单搭接螺栓连接结构三维模型,并使用隐式静态求解器框架。表1说明了所使用的不同材料及其相应的材料性能。所有的部件都是单独建模的,并组装在ABAQUS装配模块中。本文认为螺栓与螺母之间的运动并不重要,因此螺母与螺栓被建模为一个整体。

表1中3种材料(CFRP、铝和合金钢)都被建模为线弹性。CFRP复合材料层合板被建模为一种正交各向异性弹性材料,并使用ABAQUS/标准中的"复合层"特征来定义复合材料层合板。

在碳-铝单搭接螺栓连接结构三维模型中采用有限元法进行分析,采用整体建模的方法,使用C3D8R元素进行网格划分,其中在螺栓孔外侧绘制R9的同心圆,并进行切分,最后对螺栓孔周边进行网格细化,细化尺寸为1 mm,碳-铝单搭接螺栓连接结构最终网格如图4所示。相互作用通过ABAQUS中的面面接触来实现,解释了接触表面之间的摩擦和滑动,以及法向上的硬接触。模型

表1　材料属性

Table 1　Material properties

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(g·cm^{-3})	剪切模量/MPa
合金钢	21 000	0.3	8	—
铝	73 100	0.33	2.7	—
CFRP	165 000(E_{11})	0.35(v_{12})	1.5	5 080(G_{12})
	9 300(E_{22})	0.35(v_{13})		5 080(G_{13})
	9 300(E_{33})	0.487(v_{23})		3 127.1(G_{23})

的边界条件如下:下层左端面限制实体单元的3个平动自由度和3个转动自由度;上层右端面设置参考点1与右端面耦合约束,限制自由度U_2、U_3和转动自由度,并在U_1施加指定的位移载荷。

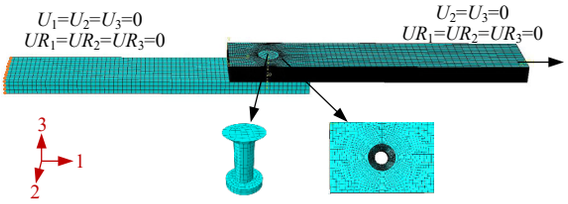


图4 碳-铝单搭接螺栓连接结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of carbon-aluminum single lap bolt connection structure

1.2 模型验证

为了验证模型的准确性,将数学模型与有限元模型的载荷-位移曲线进行对比,如图5所示。数学模型采用MATLAB软件进行计算。

由图5可见,粘滞阶段理论计算值比有限元模型(FEM)的低11.8%,这是由于粘滞区域的面积与有限元模型中的粘滞区域面积存在差异。滑动阶段数学模型与有限元模型曲线基本一致。接触阶段数学模型比有限元模型的数值低13%,误差在允许的范围之中。因此,数学模型和有限元模型的结果是一致的。

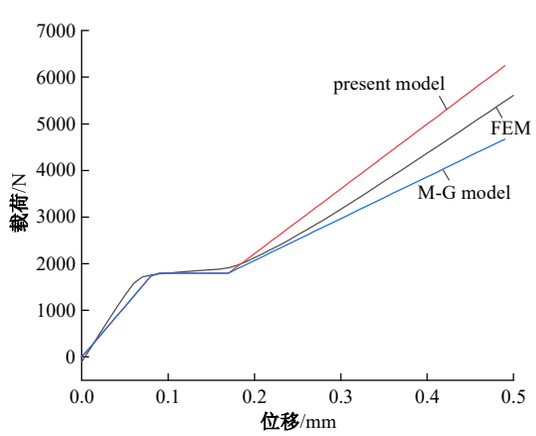


图5 复合层合板螺栓连接数学模型和有限元模型的载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of bolt connectoin structures in mathematical models and finite element models of composite laminates

2 结果与讨论

2.1 参数研究

以图4模型作为研究对象,相关参数设置如表2所示。采用控制变量法研究主要因素对模型刚度的影响规律。

表2 参数设置

Table 2 Parameter setting

参数	摩擦因数	间隙/μm	厚度/mm
摩擦系数	0.6 0.3 0.15	60	6
孔间隙	0.3	200 130 60	6
连接板厚度	0.3	60	8 6 4

图6为受拉伸载荷作用下的载荷-位移图,摩擦因数0.3、预紧力6 000 N、孔轴间隙60 μm、连接板厚度6 mm为基准值。图6表明接触阶段具有3个阶段的最高刚度,说明了2块连接板之间的接触区域与板接触的螺栓轴区域之间接触状态的演变。

第一阶段为粘滞阶段,其特征表现为2个连接板之间的粘滞接触状态。第二阶段为滑动阶段,其特征为板的滑动,在超过摩擦传递的载荷时开始,滑动阶段的刚度远低于粘滞阶段。由预紧力导致的连接板之间的闭合接触状态转变为滑动,随即连接板之间开始相对运动,直到螺栓轴与板的孔接触。第三阶段为接触阶段,接触阶段时板的滑动继续进行,螺栓轴与孔之间接触面积增大。

图7为有限元结果中螺栓连接结构的载荷-位移曲线图。F_2为ABAQUS软件中提取的复合材料层合板与金属板之间的摩擦力,F_3为螺栓与板之间的接触力,F_4为螺栓与板之间的摩擦力,F_5为螺母与金属板之间的摩擦力。对F_2、F_3、F_4、F_5进行求和得到F_1,F_1对应的载荷-位移曲线与基准条件下螺栓连接结构载荷-位移曲线基本一致。

通过图7中位移-载荷曲线可以看出,粘滞阶段的总载荷由复合材料层合板与金属板之间的摩擦力F_2提供,在大约0.07 mm位移时,复合材料层合板与金属板之间开始产生相对滑动,这意味着滑动阶段的开始,当2块连接板之间开始滑动时,螺母与金属板之间的摩擦力F_5开始增大,直至螺栓孔与螺栓接触。当施加位移载荷0.16 mm时,螺栓孔与螺栓发生接触,随即接触阶段开始。在接触阶段螺栓施加在板上的接触力F_3开始增

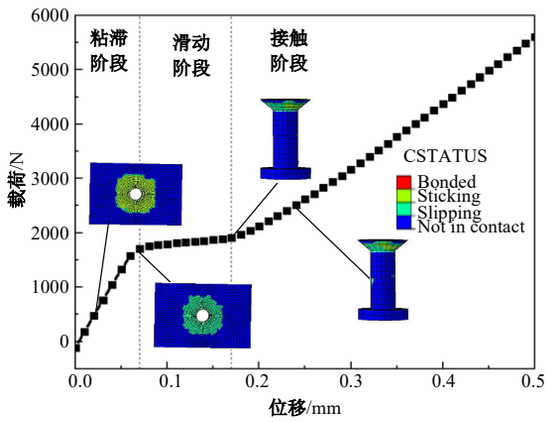


图 6　基准下螺栓连接结构的不同刚度阶段的载荷-位移及其接触状态演变

Fig. 6　Load-displacement and contact state evolution of bolt connection structures at different stiffness stages under datum

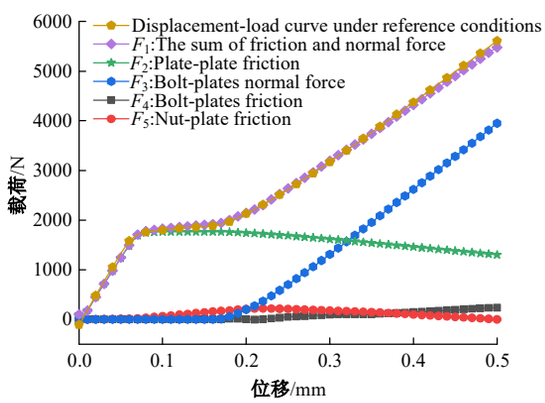


图 7　不同载荷贡献于单搭接剪切螺栓连接结构上的载荷-位移曲线

Fig. 7　Different loads contribute to the load-displacement curves of the single lap shear bolt connection structure

大,并且随着位移的增加,螺栓开始经历更大的弯曲过程,这就导致了螺栓与板之间的接触力 F_3 和螺栓与板之间的摩擦力 F_4 的增加,只是相较于 F_3 而言 F_4 的分量要小得多。由图 7 可知,不同的分力总和就是螺栓连接结构的总施加载荷。

2.2　摩擦因数对螺栓连接结构的影响

摩擦系数也是研究中重要的参数,为了探究不同摩擦系数对模型的影响,选取 3 组不同的摩擦系数,其数值分别为 0.6、0.3 和 0.15,图 8 为不同摩擦系数下单搭接螺栓连接结构的载荷-位移曲线。

由图 8 可见,在板间没有任何相对运动的情况下,摩擦力数值的增加可以提高粘滞阶段的承载能力,同时不影响刚度。

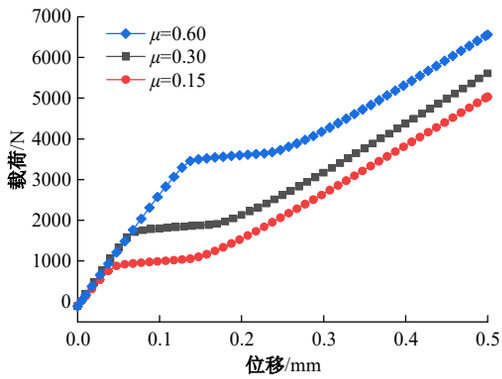


图 8　不同摩擦因数下单搭接螺栓连接结构的载荷-位移曲线

Fig. 8　Load-displacement curves of single lap bolt connection structures with different friction coefficients

2.3　螺栓孔间隙对螺栓连接结构的影响

一般的航空航天结构在螺栓连接结构上使用 60～200 之间的螺栓孔间隙(定义为孔和螺栓轴之间的直径差)[6]。为了探究不同孔间隙对模型的影响,设立 3 组不同螺栓孔间隙进行讨论,其数值分别为 60、130、200 μm,图 9 为不同螺栓孔间隙下单搭接螺栓连接结构的载荷-位移曲线。

比较 3 种不同螺栓孔间隙下的情况,结果表明,间隙值的变化并不影响粘滞阶段的启动与结束,这是因为粘滞阶段启动与结束完全取决于摩擦系数和螺栓预紧力数值的大小。但滑动阶段的扩展受到间隙值影响较大,螺栓与螺栓孔之间的间隙值越大,板之间产生的滑动就越大,这也就意味着滑动阶段滑移越大。同时发现,较高的间隙值延迟了接触阶段的开始,并且随着间隙值从 60

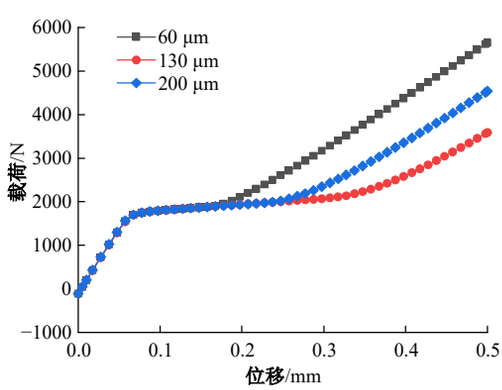
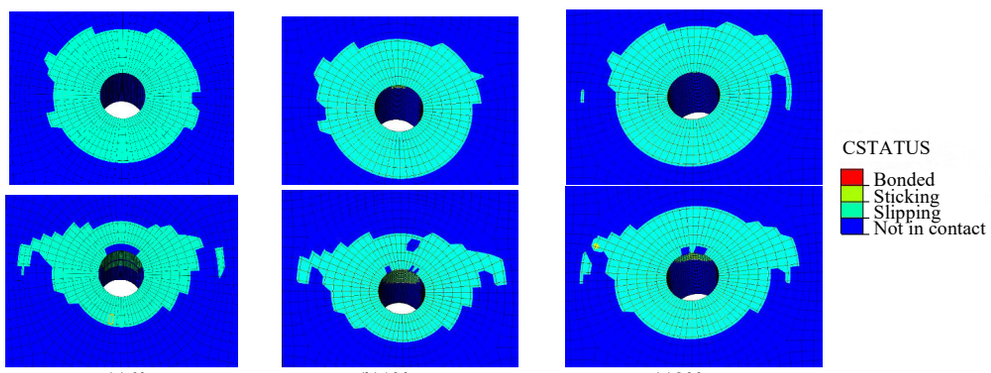


图 9　不同螺栓孔间隙下单搭接螺栓连接结构的载荷-位移曲线

Fig. 9　Load-displacement curves of single lap bolt connection structure with different bolt hole clearance

μm增大至200 μm,接触阶段的刚度变小。这是因为对于较高的螺栓孔间隙,在切向位移载荷和法向载荷作用下螺杆会发生弯曲,孔轴接触面积减小。由图10可见接触区域的变化情况,发现螺栓孔与螺杆之间的接触面积减小,会导致螺栓连接结构刚度降低。



(a)60 μm (b)130 μm (c)200 μm

图10 在螺栓与孔的初始接触点和最终接触点时金属板的接触状态

Fig. 10 Contact state of the metal plate at the initial and final contact points between the bolt and the hole

2.4 金属板厚度对螺栓连接结构的影响

为了探究不同金属板的厚度对模型的影响。除了以6 mm厚的金属板为参考外,还探究了较薄的(4 mm)金属连接板和较厚的(9 mm)金属连接板对碳-金属单搭接模型的影响。

由图11可以看出,不同金属板厚度下,粘滞阶段和接触阶段的刚度随着金属板厚度的增加呈现增大的趋势,发现金属板厚度的改变导致粘滞阶段的刚度发生变化。通过图11可以发现,粘滞阶段所获得的最大载荷在3种不同金属板厚度情况下最大载荷都保持相同,这是因为通过摩擦传递的载荷与板的厚度无关;在滑动阶段,金属板厚度不同情况下的响应没有差异。同时发现,每种情况下的螺栓连接结构刚度不同,较厚的金属板显示出最高的螺栓连接结构刚度。

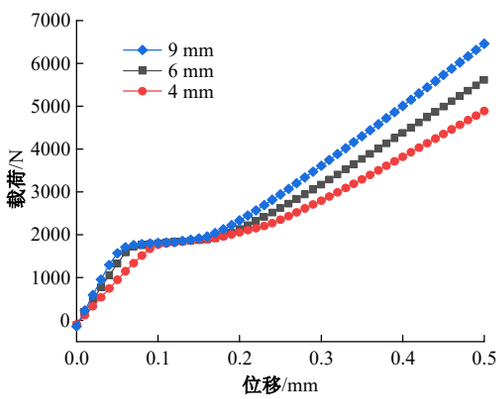


图11 不同金属板厚度下单搭接螺栓连接结构的载荷-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curves of single lap bolt connection structures with different metal plates thickness

2.5 铺层顺序对螺栓连接结构的影响

复合材料层合板的铺层设计方案是由单层材料的性能所决定的,层合板中各单层材料的纤维取向、铺层顺序、各铺层角度相对于总层数的比例和总层数均会影响层合板的整体性能。因此,针对-45°、0°、45°、90°这4个角度对连接结构强度的影响进行研究。通过改变不同的铺层比例来研究铺层角度对模型的影响。

针对4种不同铺层方案(见表3)进行强度分析,对比不同铺层方案的应力云图,分析其铺层设计对结构强度的影响。图12为各方案下单搭接螺栓连接结构的载荷-位移曲线,可以发现对于不同铺层顺序,粘滞阶段、滑动阶段的趋势基本一致,接触阶段的刚度随着0°铺层比例的减小呈现减小的趋势,因此铺层设计主要影响接触阶段的

表3 铺层顺序方案

Table 3 Layup sequence scheme

铺层方案	层合方式	45°比例/%	0°比例/%	90°比例/%
A	[45/0/-45/90/45/0/0/-45/0/0]	40	50	10
B	[45/0/-45/90/45/0/-45/0/45/0] [45/0/-45/90/45/0/-45/0/-45/0]	50	40	10
C	[45/0/-45/0/45/90/-45/0/45/-45]	60	30	10
D	[45/-45/90/45/-45/0/-45/0/45/-45] [45/-45/90/45/-45/0/-45/0/45/45]	70	20	10

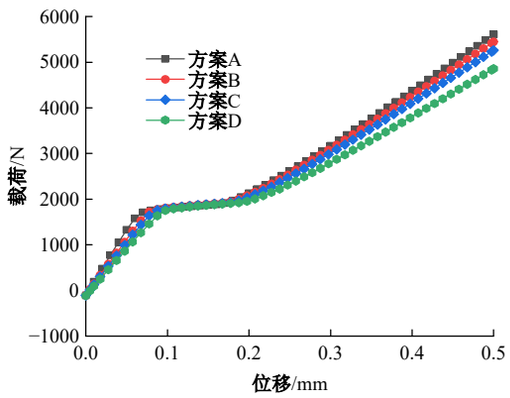


图 12　不同铺层顺序下单搭接螺栓连接结构的载荷-位移曲线

Fig. 12　Load-displacement curves of single lap bolt connection structures with different layup sequences

刚度。

根据图 13 中 4 种方案的铺层应力情况,对比复合材料层合板 4 种铺层方案中螺栓的应力情况和层合板的应力情况,图 13(a)、(b)为方案 A 的应力云图,图 13(c)、(d)为方案 B 的应力云图,图 13(e)、(f)为方案 C 的应力云图,图 13(g)、(h)为方案 D 的应力云图。方案 A 的层合板的应力最小,在该铺层比例下层合板拉伸时应力集中情况相较其他方案较好;比较螺栓的应力情况可以发现,方案 D 的螺栓的应力集中情况相较其他方案较好;结合载荷-位移曲线可知,方案 A 复合材料层合板具有较高的刚度。结果表明,0°铺层比例高可以使得复合材料层合板具有较高的刚度,从而承受更高的荷载;45°铺层比例高可以提升孔周

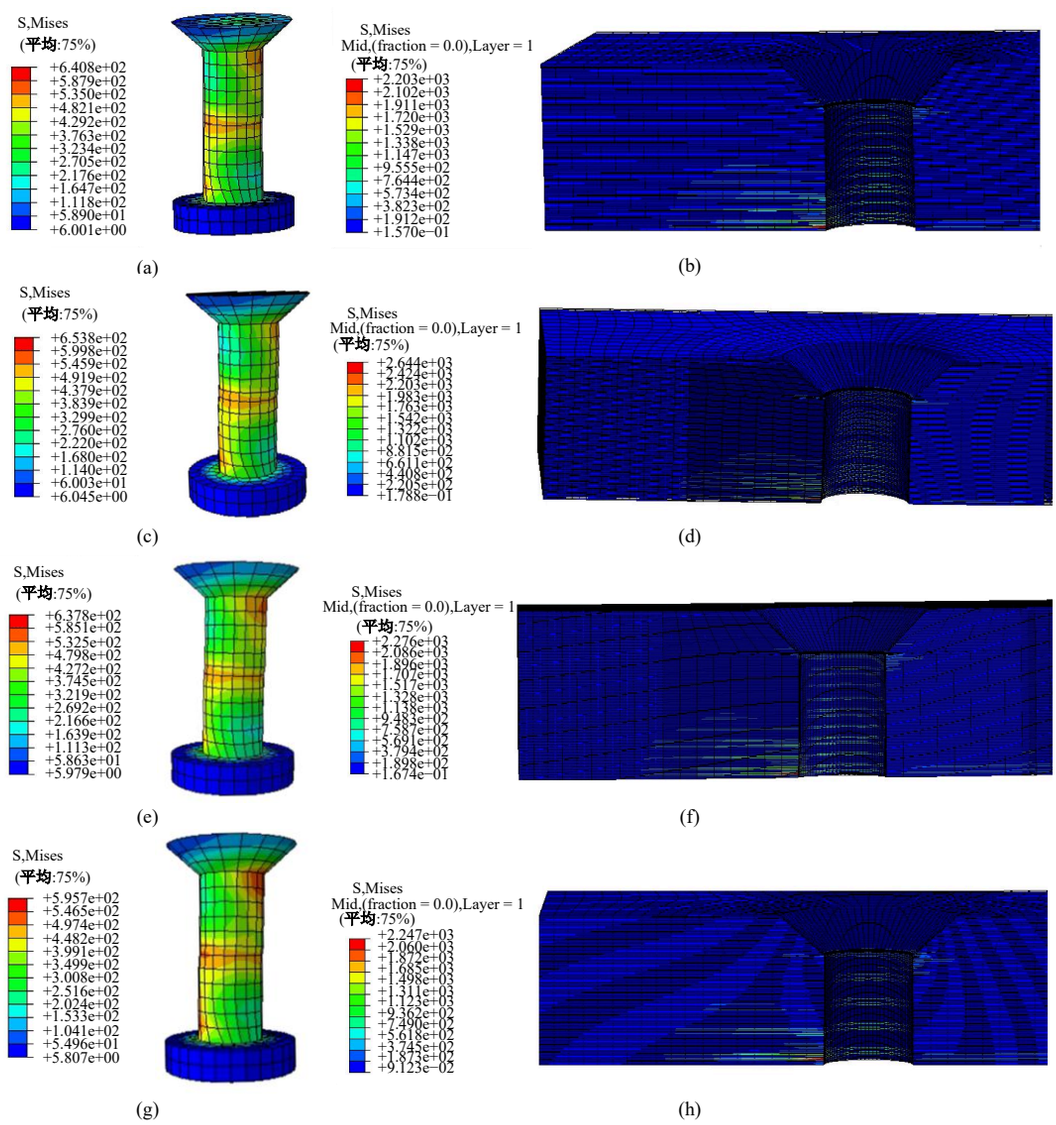


图 13　不同铺层方案下加载结束时螺栓和复合层合板的应力图

Fig. 13　Stress diagram of bolts and composite laminates at the end of loading under different layup schemes

围的抗挤压强度。

综上所述,铺层角度比例对于结构应力水平影响作用较为明显,铺层角度设计需按照结构承载方向铺设。

3 结 论

(1)摩擦因数的增大会影响粘滞阶段的临界摩擦力,并提高粘滞阶段的承载能力,而粘滞阶段的刚度大小与连接板厚度显著相关。

(2)孔间隙对滑动阶段有较大影响,孔间隙的增大会导致滑动阶段滑移越大,孔轴之间的接触面积减少,最终导致螺栓连接结构刚度降低。

(3)不同铺层顺序会显著影响接触阶段的刚度,0°铺层比例的增大可以提高接触阶段的刚度,45°铺层比例的增大可以提升孔周围的抗挤压强度。

参考文献:

[1] Garg A, Chalak H D. A review on analysis of laminated composite and sandwich structures under hygro-thermal conditions[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 142: 205-226.

[2] 寇剑锋, 徐绯, 张笑宇, 等. 考虑装配间隙的双搭接螺栓连接剪切刚度的解析求解方法[J]. 复合材料学报, 2018, 35: 1510-1517.
Kou Jian-feng, Xu Fei, Zhang Xiao-yu, et al. Analytical method for solving shear stiffness of double lap bolted joint considering assembly gap[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 35: 1510-1517.

[3] 寇剑锋, 徐绯. 螺栓连接层合板孔边挤压应力三维分布[J]. 复合材料学报, 2018, 35:3360-3367.
Kou Jian-feng, Xu Fei, et al. Three-dimensional compression stress distribution at hole edge of bolted laminates[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 35 : 3360-3367.

[4] Chishti M, Wang C H, Thomson R S, et al. Numerical analysis of damage progression and strength of countersunk composite joints[J]. Composite Structures, 2012, 94: 643-653.

[5] Tate M B, Rosenfeld S J. Preliminary investigation of the loads carried by individual bolts in bolted joints [J]. NASA Technical Reports Server, 2013, 8: 19930081668.

[6] McCarthy C T, Gray P J. An analytical model for the prediction of load distribution in highly torqued multi-bolt composite joints[J]. Composite Structures, 2011, 93: 287-298.

[7] Liu F R, Zhang J Y, Zhao L B, et al. An analytical joint stiffness model for load transfer analysis in highly torqued multi-bolt composite joints with clearances [J]. Composite Structures, 2015, 131:625-636.

[8] Stocchi C, Robinson P, Pinho S T, et al. A detailed finite element investigation of composite bolted joints with countersunk fasteners[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 52: 143-150.

[9] Guerrero J M, Sasikumar A, Llobet J, et al. A computationally efficient methodology to simulate hybrid bolted joints including thermal effects[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2021, 30(1): 1-19.

[10] Liu K, Tie Y, Li C. Effects of pre-tightening force and connection mode on the strength and progressive damage of composite laminates with bolted joint[J]. Materials Physics and Mechanics, 2013, 18:18-27.

[11] Tang Y, Zhou Z, Pan S, 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): 739-753.

[12] Zhou Y, Nezhad H Y, Hou C, et al. A three dimensional implicit finite element damage model and its application to single-lap multi-bolt composite joints with variable clearance[J]. Composite Structures, 2015, 131:1060-1072.

[13] Gray P J, Higgins R M, Mccarthy C T. Effect of thickness and laminate taper on the stiffness, strength and secondary bending of single-lap, single-bolt countersunk composite joints[J]. Composite Structures, 2014, 107: 315-324.

[14] Mccarthy M A, Lawlor V P, Stanley W F, et al. Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints[J]. Composites Science and Technology, 2002, 62: 1415-1431.

[15] 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: 140-158.

[16] Mccarthy C T, Mccarthy M A, Lawlor V P, et al. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances[J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36: 290-305.

[17] Mccarthy C T, Mccarthy M A, et al. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints: effects of bolt-hole clearance[J]. Composite Structures, 2005, 71: 159-175.

[18] Mccarthy C T, Mccarthy M A, Stanley W F, et al. Experiences with modeling friction in composite bolted joints[J]. Journal of Composite Materials, 2005, 39: 1881-1908.

[19] 黄河源, 赵美英, 万小朋, 等. 复合材料中厚板沉头连接结构强度与损伤失效[J]. 复合材料学报, 2017, 34: 557-563.
Huang He-yuan, Zhao Mei-ying, Wan Xiao-peng, et al. Structural strength and damage failure of heavy plate countersunk joint of composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 34:557-563.

[20] 李玲, 张东, 王晶晶, 等. 复合层压板单螺栓连接的刚度建模[J]. 复合材料学报, 2021,38:2935-2945.
Li Ling, Zhang Dong, Wang Jing-jing, et al. Stiffness modeling of single bolted composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 38: 2935-2945.

[21] 李静雯, 张博明, 孙义亮, 等. 不同铺层方式下连续玻璃纤维/聚丙烯复合材料波纹夹芯板的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36: 1074-1082.
Li Jing-wen, Zhang Bo-ming, Sun Yi-liang, et al. Mechanical properties of continuous glass fiber/polypropylene composite corrugated sandwich panels under different layering methods[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 36: 1074-1082.

[22] 张建国, 岳金, 宋春生, 等. 碳纤维复合材料螺旋桨铺层角度研究[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2014, 36: 207-210.
Zhang Jian-guo, Yue Jin, Song Chun-sheng, et al. Study on layup angle of carbon fiber composite propeller[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information and Management Engineering), 2014, 36: 207-210.

[23] 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: 1540-1552.
He Bo-ling, Ge Dong-yun, Mo Yu-ming, et al. Tensile test and strength estimation of T800 carbon fiber reinforced composite with double shear and single nail[J]. Journal of Composite Materials, 2016, 33: 1540-1552.

[24] Nelson W D, Bunin B L, Hart L J. Critical joints in large composite aircraft structure[J]. NASA Technical Reports Server, 1983, 1: No. 19870001540.

[25] 王天宇, 段跃新, 向经伟, 等. 铺层顺序对预成型体搭接复合材料拉伸性能影响的仿真与验证[J]. 复合材料学报, 2018, 35: 2745-2752.
Wang Tian-yu, Duan Yue-xin, Xiang Jing-wei, et al. Simulation and verification of effect of lay-up sequence on tensile properties of preformed lapped composites[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 35: 2745-2752.