

# 基于三维模型的复合材料层合板单钉螺栓连接件力学性能分析\*

## Analysis on Mechanical Property of Single-bolted Composites Laminate Based on Three-Dimensional Model

西北工业大学力学与土木建筑学院 王富生 岳珠峰  
陕西地方电力监理有限公司 张红运

**[摘要]** 在给定位移载荷作用下,基于复合材料层合板单钉螺栓连接三维有限元模型,通过编写材料失效准则和刚度退化规则的 ABAQUS 用户子程序 UMAT,实现了未考虑预紧力时配合间隙、开孔形状以及采用不同螺栓材料时预紧力对连接件力学性能影响分析。

**关键词:** 层合板螺栓连接 配合间隙 开孔形状 预紧力 损伤

**[ABSTRACT]** Under the given displacement load and based on the three-dimensional FE model of single-bolted composites laminate, factors influencing on the mechanical properties are analyzed such as the clearance between bolt and the hole and the hole shape when pre-tightening force isn't taken into account and pretightening force when the different bolt material was selected by implementing the material failure criterion and property degradation rules into the user material program UMAT in ABAQUS software.

**Keywords:** Bolted joint of composites laminate Clearance between bolt and hole Hole shape Pre-tightening force Failure

采用不同的失效准则及其相应的刚度退化模型的二维有限元分析技术已广泛应用于复合材料连接件损伤的数值模拟中<sup>[1-4]</sup>,虽然其可以节省计算量,但不能考虑铺层顺序和预紧力等因素对螺栓强度的影响。三维有限元分析技术可以弥补这一点,如 K.I. Tserpes 等<sup>[5]</sup>采用三维有限元模型分析了失效准则和刚度退化模型对不同几何尺寸和铺层下单搭接层合板单钉螺栓连接力学性能的影响;王丹勇等<sup>[6]</sup>采用三维有限元模型发展了双搭接层合板单钉螺栓连接静拉伸逐级损伤模型,分

析了不同损伤模式及其相关性;G. Kretsis 等人<sup>[7]</sup>和 P.P. Camanho 等人<sup>[8]</sup>采用三维有限元模型对层合板螺栓连接接头损伤进行预测时,考虑了螺栓预紧力的影响。本课题在三维有限元分析的基础上,研究了未考虑螺栓预紧力时配合间隙和开孔形状对一般铺层复合材料连接件力学性能的影响;同时,针对不同螺栓材料研究了螺栓预紧力对一般铺层复合材料连接件力学性能的影响。虽然文献[9-11]也有相关研究,但其均未考虑复合材料铺层的损伤失效因素。

### 1 损伤模拟方法及实现

复合材料层合板在拉伸载荷作用下存在不同失效模式,Hashin<sup>[12]</sup>于1980年提出了三维应力状态下的层合板分段失效判据,其形式如下。

纤维断裂  $\sigma_{11} \geq 0$ :

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

纤维屈曲  $\sigma_{11} < 0$ :

$$-\frac{\sigma_{11}}{X_c} = 1 \quad (2)$$

拉伸基体断裂  $\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$ :

$$\left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{1}{S_{23}^2}\right)(\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{22}^2}{Y_t^2} + \frac{2\sigma_{12}^2/G_{12} + 3\alpha\sigma_{12}^4}{2S_c^2/G_{12} + 3\alpha S_c^4} = 1 \quad (\text{计入非线性剪切}$$

影响)。

压缩基体失效  $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$ :

$$\frac{1}{Y_c} \left[ \left(\frac{Y_c}{2S_c}\right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}}\right)^2 + \frac{1}{S_{23}^2} (\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

\* 国防科技工业技术基础科研项目(Z142006B001),西北工业大学博士基金项目(N6CJ0001)。

拉伸分层失效  $\sigma_{33} > 0$ :

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \quad (5)$$

压缩分层失效  $\sigma_{33} < 0$ :

$$\left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \quad (6)$$

上式中,字母下标 1 为纤维方向,2 为横向方向,3 为厚度方向,  $X_t$ 、 $X_c$  分别为纤维方向拉伸和压缩强度,  $Y_t$ 、 $Y_c$  为横向方向拉伸和压缩强度,  $S_{12}$ 、 $S_{13}$ 、 $S_{23}$  分别为单个铺层面内剪切强度、纵向剪切强度、

刚度降方法如下<sup>[13]</sup>:

(1) 纤维拉伸或压缩破坏,仅  $E_1$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{12}$ 、 $\nu_{13}$  和  $\nu_{12}$  退化到 0;

(2) 基体拉伸或压缩破坏,仅  $E_2$ 、 $G_{23}$ 、 $G_{12}$ 、 $\nu_{23}$  和  $\nu_{12}$  退化到 0;

(3) 拉伸或压缩分层,仅  $E_3$ 、 $G_{23}$ 、 $G_{13}$ 、 $\nu_{23}$  和  $\nu_{13}$  退化到 0。

采用 Solid 单元可以对复合材料所有损伤形式进行模拟,在 ABAQUS 软件中编制 UMAT 材料子程序来定义实体单元上的材料力学行为,在计算每一载荷步时更新雅可比矩阵 DDSDE,从而可以实现复合材料实体单元的损伤力学行为的数值模拟,对于每一载荷步长采用标准 Newton-Raphson 方法进行逐步迭代。

## 2 配合间隙和开孔形状对力学性能的影响

### 2.1 模型描述

本文分析未考虑预紧力时配合间隙和开孔形状对复合材料层合板连接件力学性能的影响,采用基于小滑动摩擦的主-从平面接触算法,将复合材料板每一铺层在厚度方向划分为 2 个单元,单元类型为各向异性实体单元 C3D8;定义层合板和螺栓之间法向和切向的接触关系,切向摩擦系数为 0.3。由于连接件的对称关系,为简化问题分析,只取 1/4 模型作为研究对象。

(1) 在进行配合间隙影响分析时,复合材料开圆孔,图 1 给出连接件有限元模型,其中复合材料板几何模型尺寸如表 1 所示。

取层合板孔径为  $D$ ,螺栓直径为  $d$ ,定义配合间隙为

$$\delta = \frac{D-d}{d}$$

(2) 在进行开孔形状影响分析时,分别选取孔径为 4mm 的圆孔、长轴平行于载

表1 几何模型尺寸 mm

板长	板厚	孔径	板宽	孔中心距右端距离
180	2	4	24	20

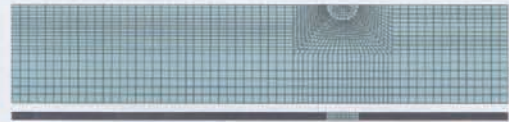


图1 连接件有限元模型  
Fig.1 FE model of bolted joint

荷方向的椭圆孔 1 和长轴垂直于载荷方向的椭圆孔 2;两椭圆孔的长轴均为 2.2mm、短轴均为 2mm;螺栓直径  $d$  取 4mm。

### 2.2 材料参数

复合材料层合板采用 T300/QY8911,其铺层顺序为  $[0/90/0/90/45/-45/0/90]_s$ ,材料性能如表 2 所示。

螺栓材料采用 45# 钢,其弹性模量为 196 000MPa,泊松比为 0.3。

### 2.3 边界条件和载荷

模拟的边界条件为左端加固定约束 ( $U_1=U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$ ),连接件厚度方向和板宽方向对称面上加对称约束 ( $U_3=U_{R1}=U_{R2}=0$  和  $U_2=U_{R1}=U_{R3}=0$ ),载荷为对螺栓加向右、大小为 0.1mm 的位移载荷。

### 2.4 计算结果

图 2 给出了不同配合间隙下应力随位移的变化曲线。

从图中可以看到:不同配合间隙下应力-位移曲线基本呈线性关系;对于不同的配合间隙,随着位移载荷的增大,应力均呈增大趋势;对某些配合间隙,随着位移载荷的增大,部分单元不断扭曲变形,当载荷足够大时计算程序自动中止,不能继续增大载荷;总的来看,在位移载荷相同时,随着配合间隙的增大,应力随之下降,表明大的配合间隙不利于提高连接件应力;相对其他配合间隙,配合间隙为 0 可以明显提高连接件应力。

图 3 给出不同开孔形式下应力随位移的变化曲线。

从图中可以看到:不同开孔形式下应力-位移曲线

表2 T300/QY8911材料特性 MPa

$E_{xx}$	$E_{yy}$	$E_{zz}$	$\nu_{xy}$	$\nu_{xz}$	$\nu_{yz}$	$G_{xy}$	$G_{xz}$	$G_{yz}$	$X_t$	$X_c$	$Y_t$	$Y_c$	$S_{12}$	$S_{13}$	$S_{23}$	$Z_t$
135 000	8 800	8 800	0.33	0.33	0.48	4 470	4 470	3 200	1 548	1 226	55.5	218	110.5	110.5	89.9	65.6

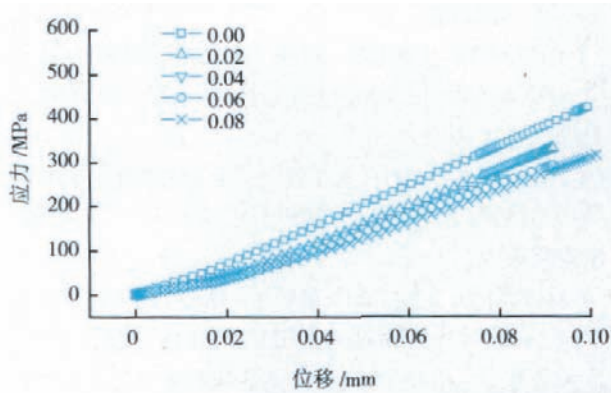


图2 不同配合间隙下应力随位移变化曲线

Fig.2 Stress-displacement curves for different clearances

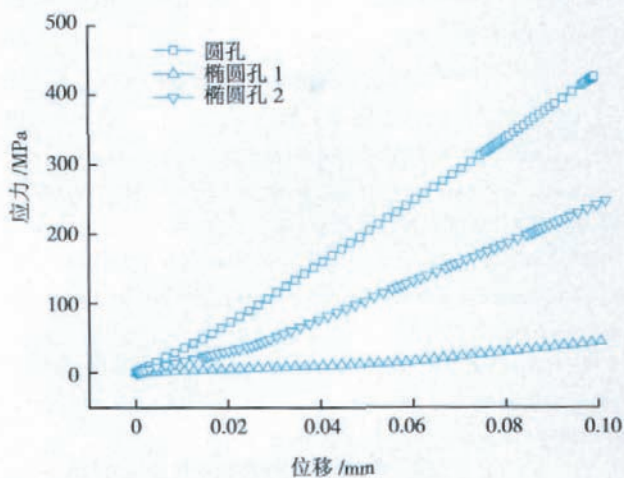


图3 不同开孔形状下应力随位移变化曲线

Fig.3 Stress-displacement curves for different hole shape

基本呈线性关系；对于不同的开孔形式，随着位移载荷的增大，应力均呈增大趋势；在位移载荷相同的条件下，开孔形状依次为圆孔、椭圆孔 2 和椭圆孔 1 时，应力呈减小趋势，表明三种开孔形式中圆孔最有利于提高连接件最大应力，而两种椭圆孔形中椭圆孔 2 有利于提高连接件最大应力；相对椭圆孔形，采用圆孔可以显著提高连接件最大应力。

### 3 预紧力对力学性能的影响

#### 3.1 模型描述

这里分析配合间隙为 0、采用不同螺栓材料时预紧力对复合材料层合板连接件力学性能的影响。采用基于小滑动摩擦的主—从平面接触算法，将复合材料板每一铺层在厚度方向划分两个单元，单元类型为各向异性实体单元 C3D8；盖板、螺栓、螺母和垫片采用 C3D8R 单元模拟。定义层合板和螺杆之间为法向和切向接触关系，切向摩擦系数为 0.3；定义螺帽和盖板之间、盖板和

层合板之间、盖板和垫片之间为切向接触关系，切向摩擦系数为 0.3。由于复合材料连接件的对称关系，为简化问题分析，取 1/2 模型作为研究对象。图 4 给出考虑预紧力时螺栓连接件有限元模型，包括复合材料层合板、盖板、螺栓、螺母和垫片。图 5 (a) ~ (e) 分别给出复合材料层合板、盖板、螺栓、螺母和垫片的有限元模型。

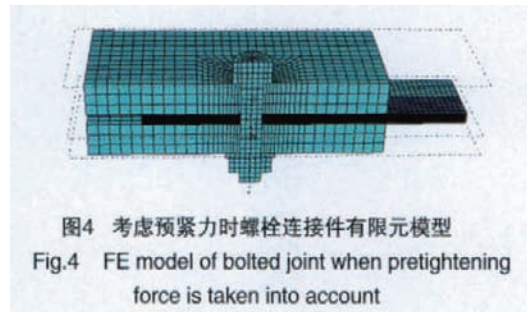


图4 考虑预紧力时螺栓连接件有限元模型

Fig.4 FE model of bolted joint when pretightening force is taken into account

#### 3.2 材料参数

复合材料层合板材料参数与 2.1 中相同，盖板、螺母和垫片为 45# 钢弹性材料，螺栓分别为 45# 钢和铜合金弹性材料。铜合金材料的弹性模量为 100 000MPa，泊松比为 0.35。

#### 3.3 边界条件和载荷

边界条件为右端复合材料层合板加固定约束 ( $U_1=U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$ )，复合材料层合板、盖板、螺栓、螺母和垫片对称面上加对称约束 ( $U_2=U_{R1}=U_{R3}=0$ )；定义垫片和螺母之间以及螺杆和垫片、螺母之间为 Tie 约束；载荷为对上下盖板加向左、大小为 0.1mm 的位移载荷，螺栓预紧力大小为 600N。

#### 3.4 计算结果

图 6 给出未考虑预紧力和考虑预紧力时不同螺栓材料下的应力随位移的变化曲线。

当计入盖板、螺母和垫片影响并加入预紧力时，从图中可以看到：对不同螺栓材料，在位移载荷作用初期，应力—位移曲线呈非线性关系；随着位移载荷的增大，应力—位移曲线呈线性关系。对不同螺栓材料，随着位移载荷的增大，未考虑预紧力和考虑预紧力时应力均呈增大趋势。对不同螺栓材料，在位移载荷作用初期，考虑预紧力时连接件应力大于未考虑预紧力的应力；随着位移载荷的增大，未考虑预紧力时连接件应力大于考虑预紧力的应力。对于连接件未考虑预紧力和考虑预紧力两种情况，与螺栓材料采用铜合金相比，螺栓材料采用 45# 钢时可明显提高连接件应力。

### 4 结论

在给定位移载荷作用下，考虑复合材料铺层的损伤

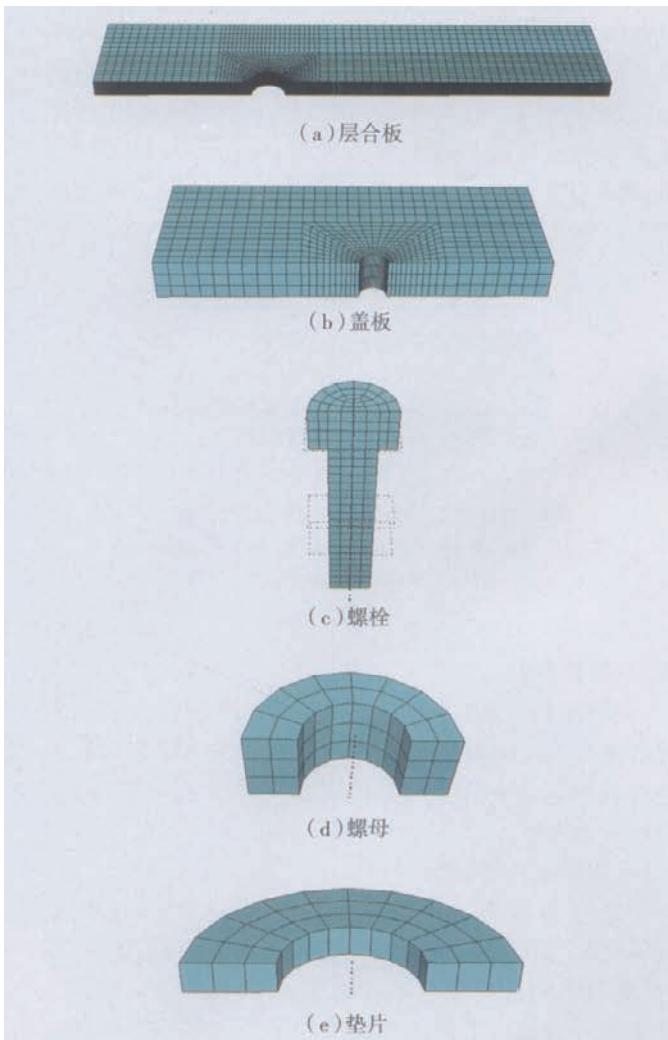


图5 复合材料螺栓连接件各部分有限元模型  
Fig.5 FE model of each part of composites bolt

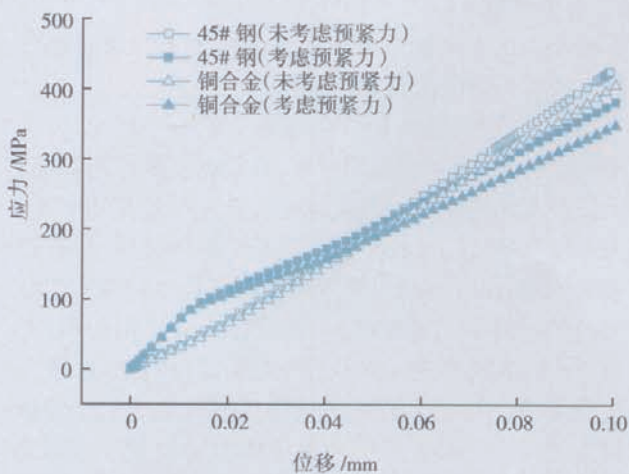


图6 不同螺栓材料应力随位移变化曲线  
Fig.6 Stress-displacement curves for different bolt materials

失效因素,本文通过在 ABAQUS 有限元软件中加入编制的 UMAT 材料子程序进行复合材料螺栓连接件影响

因素分析,可以得到以下主要结论:

(1) 未考虑预紧力时,对于不同的配合间隙,连接件应力随位移载荷的增大呈增大趋势;大的配合间隙不利于提高连接件应力。

(2) 未考虑预紧力时,3 种开孔形式中圆孔最有利于提高连接件应力;2 种椭圆孔形中,椭圆孔 2 有利于提高连接件应力。

(3) 当计入盖板、螺母和垫片,螺栓采用不同材料时,在位移载荷作用初期,考虑预紧力时连接件应力大于未考虑预紧力的应力;随着位移载荷的增大,未考虑预紧力时连接件应力大于考虑预紧力的应力。对于连接件未考虑预紧力和考虑预紧力两种情况,采用合适的螺栓材料可以提高连接件应力,所以在进行数值模拟时应引起足够重视。

### 参考文献

[1] Dano M L, Gendron G, Prcard A. Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Composite Structures, 2000, 50: 287-296.

[2] Dono M L, Kamal E, Gendron G. Analysis of bolted joints on composite laminate: Strains and bearing stiffness predictions [J]. Composite Structures, 2007, 79: 562-570.

[3] Okutan B. The effect of geometric parameters on the failure strength for pin-loaded multi-directional fiber-glass reinforced epoxy laminates[J]. Composites Part B, 2002, 33: 567-578.

[4] 姜云鹏,岳珠峰. 复合材料层合板螺栓连接失效的数值模拟. 复合材料学报 [J], 2005,22(4): 177-182.

[5] Tserpes K I, Labeas G, Papanikos P, et al. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates[J]. Composites Part B, 2002, 33: 521-529.

[6] 王丹勇,温卫东,崔海涛. 复合材料单钉接头三维逐渐损伤破坏分析 [J]. 复合材料学报, 2005,22(3): 168-174.

[7] Kretsis G, Matthews F L. The strength of bolted joints in glass fibre/epoxy laminates[J]. Composites, 1985, 16: 92-105.

[8] Camanho P P, Matthews F L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(24): 2248-2280.

[9] 姜云鹏,岳珠峰. 单剪螺栓连接复合材料叠层板螺栓孔周边应力场分布 [J]. 机械强度, 2006,28(2): 271-275.

[10] Hyer M W, Klang E C, Cooper D E, et al. The effect of pin elasticity, clearance and friction on the stresses in a pin-load orthotropic plate [J]. Journal of Composite Materials, 1987,21(3): 190-206.

[11] 高宗战,岳珠峰. 带孔复合材料板和螺栓连接复合材料板的有限元计算分析 [J]. 飞机设计, 2003(4): 24-28.

[12] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47: 329-335.

[13] Xi Liu, Wang Guoping. Progressive failure analysis of bonded composite repairs. Composite Structures, 2007,81(3): 331-340.

(责编 侧卫)