

基于渐进损伤有限元的 复材厚板连接分析

A Study of Thick Composite Laminates Joints Based on Progressive Failure FEM Analysis

匡国强 叶聪杰 / Kuang Guoqiang Ye Congjie

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

摘要:

针对复合材料厚板连接件,建立三维累积损伤有限元模型预测复合材料厚板连接件的挤压性能。对复合材料层板中的纤维失效、基体失效和分层等损伤类型进行分析模拟,预测厚板连接件的破坏模式及损伤扩展过程,并分析尺寸参数与复材厚层合板连接强度的关系。

关键词:复合材料厚板;渐进损伤;连接强度

中图分类号: V215

文献标识码: A

[**Abstract**] A three-dimensional progressive damage model was set up for predicting the bearing performance of thick composite laminates under tensile loading. Analyzing and simulating the fibre damage, matrix damage and delamination. The 3D model has the capability of assessing the ultimate bearing strength of joints and simulating the whole process of damage initiation, propagation and catastrophic failure of the structure. The finite element method could also be used to predict the relationship between structure design parameters and load carrying capabilities.

[**Key words**] thick composite laminates; progressive damage; joint strength

0 引言

复合材料具有比强度高、比模量大、耐疲劳性能好和力学性能可设计等优良特性,在航天、航空领域得到广泛应用。就航空领域而言,复合材料从最初应用于垂尾、方向舵等一些次要受力构件发展到应用于机翼、机身等主要承力构件。国内某型民机中央翼盒与外翼盒对接区采用复材厚板连接设计,传载接头存在很大附加弯曲应力,力学问题突出。复材接头结构的螺栓孔周围存在应力集中严重影响接头的连接强度导致结构损伤情况复杂。本文应用工程方法、三维有限元模型^[1],对厚板连接件强度进行分析,研究复合材料的渐进损伤破坏过程。

1 试验介绍

复合材料和钛合金连接的热应力是一种严重

情况。试验选择高温湿态环境。试验加载环境:温度 $70\pm 3^{\circ}\text{C}$,相对湿度(RH) $85\pm 3\%$ 。

试验件设计如图1所示。试验机加载方案和贴片布置如图2、图3所示。

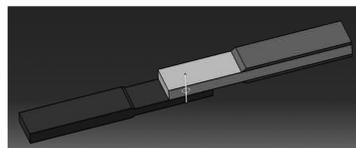
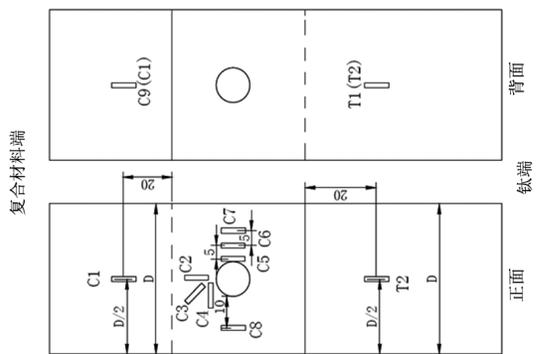


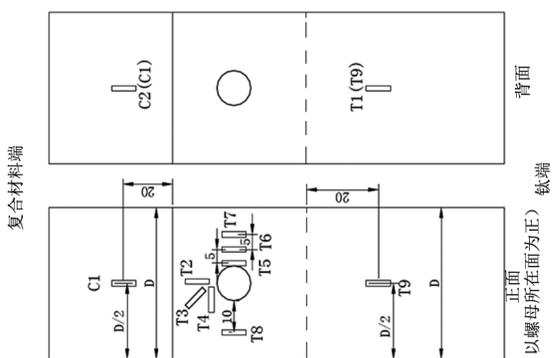
图1 复材厚板连接件数模



图2 试验加载方案



(a) 单剪贴片图



(b) 双剪贴片图

图3 试验件贴片示意图

试验包含不同铺层厚度、铺层比例、单双剪切连接形式。试件用12~18号高锁螺栓连接。铺层编号、紧固件信息如表1、表2所示。

表1 复材厚板铺层表

| 铺层编号 | 铺层比例 [0/±45/90] | 总层数 | 单层厚度 | 总厚度 |
|------|--------------------|-----|-------|-------|
| A1 | (50/40/10) | 40 | 0.188 | 7.52 |
| B1 | (25/50/25) | 40 | 0.188 | 7.52 |
| C1 | (70/20/10) | 40 | 0.188 | 7.52 |
| D1 | (30/60/10) | 40 | 0.188 | 7.52 |
| A2 | (50/40/10) | 60 | 0.188 | 11.28 |
| B2 | (25/50/25) | 64 | 0.188 | 12.03 |
| C2 | (70/20/10) | 60 | 0.188 | 11.28 |
| D2 | (30/60/10) | 60 | 0.188 | 11.28 |
| A3 | (50/40/10) | 80 | 0.188 | 15.04 |
| B3 | (25/50/25) | 80 | 0.188 | 15.04 |
| C3 | (70/20/10) | 80 | 0.188 | 15.04 |
| D3 | (30/60/10) | 80 | 0.188 | 15.04 |

表2 紧固件性能

| 紧固件 | 名称 | 牌号 | 直径/mm | 抗剪极限/kN | 抗拉极限/kN |
|------|--------------|---------|-------|---------|---------|
| 高锁螺栓 | 钛合金抗剪型凸头高锁螺栓 | 10号高锁螺栓 | 7.94 | 32.47 | 40.9 |
| | | 12号高锁螺栓 | 9.53 | 46.70 | 62.3 |
| | | 14号高锁螺栓 | 11.11 | 63.61 | 84.1 |
| | | 16号高锁螺栓 | 12.8 | 82.96 | 113.9 |
| | | 18号高锁螺栓 | 14.3 | 105.0 | 144.1 |

2 复材厚板孔壁挤压应力分析

2.1 两种分析方法

试板受均匀拉伸载荷时,孔壁名义挤压应力 $\sigma_{\text{名义挤压}} = P/Dt$ 。连接件传递载荷时,孔壁挤压应力向剪切面集中。

本文通过 ABAQUS,线性接触模拟 15mm 厚 80 层单剪试件,受拉伸载荷时孔壁挤压应力情况。模型采用 8 节点缩减积分单元, C3D8R 模拟复材板, C3D4 单元模拟钛板, C3D8R 模拟高锁螺栓, 应力结果如图 4 所示,孔壁挤压应力如表 3 所示。

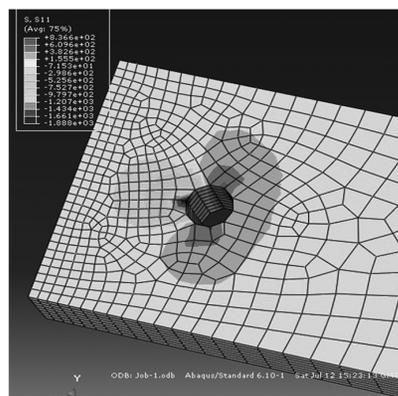


图4 沿厚度方向孔壁挤压应力云图

表3 沿厚度方向孔壁挤压应力结果

| 厚度 t/mm | 孔壁挤压应力 σ /MPa |
|---------|----------------------|
| 0.00 | -566.99 |
| 1.88 | -570.51 |
| 3.76 | -595.56 |
| 5.64 | -646.06 |
| 7.51 | -702.51 |
| 9.39 | -836.03 |
| 11.26 | -1 026.53 |
| 13.14 | -1 499.41 |
| 15.00 | -1 887.88 |

把厚度 t 和孔壁挤压应力 σ 正则化,得到厚度方向孔壁挤压应力曲线变化,如图 5 所示,进行数据拟合。

$$Y\left(\frac{x}{t}\right) = 0.019\left(\frac{x}{t}\right)^3 - 0.058\left(\frac{x}{t}\right)^2 + 0.247\left(\frac{x}{t}\right) \quad (1)$$

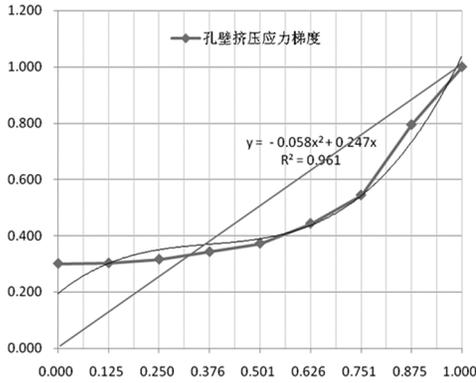


图 5 沿厚度方向孔壁挤压应力变化

下文比较有限元数值拟合应力分布假设结果和工程的三角形分布假设。比较两种假设孔壁薄弱部位应力集中。

(1)算例 1:有限元分析结果拟合的应力分布假设孔边挤压应力沿厚度分布函数:

$$\sigma_{bru} = \lambda' \frac{P}{Dt} Y\left(\frac{x}{t}\right), \quad (2)$$

其中,多项式函数:

$$Y\left(\frac{x}{t}\right) = 0.019\left(\frac{x}{t}\right)^3 - 0.058\left(\frac{x}{t}\right)^2 + 0.247\left(\frac{x}{t}\right)$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{x}{t}, \text{ 则 } P = \int_0^t \left(\lambda' \frac{P}{Dt} Y\left(\frac{x}{t}\right) \right) d\left(t \times \frac{x}{t}\right) = \lambda' P \int_0^1 Y(\alpha) d\alpha$$

$$\lambda' = \frac{1}{\int_0^1 Y(\alpha) d\alpha}$$

$$\sigma_{bru, \max} = \frac{P/Dt}{\int_0^1 Y(\alpha) d\alpha} \times [0.019(\alpha)^3 - 0.058(\alpha)^2 + 0.247(\alpha)] \Big|_{\alpha=1} = \frac{P}{Dt} \times \frac{0.208}{0.1089} = 1.91 \frac{P}{Dt}$$

有限计算结果:孔边挤压应力是名义挤压应力的 1.91 倍。

(2)算例 2:三角形假设应力分布

剪切面处孔壁挤压应力最大,挤压应力沿厚度方向线性分布,孔壁挤压应力函数:

$$\sigma_{bru} = \frac{\lambda P}{Dt} Y(x), Y(x) = \frac{X_L}{t} \quad (3)$$

$$P = \int_0^t \left(\lambda \frac{P}{Dt} \times \frac{X_L}{t} \right) D dX_L = \frac{\lambda P}{2}, \sigma_{bru, \max} = \frac{2P}{Dt} \quad (4)$$

式中, X_L 为离自由面的距离。

两种假设的应力梯度情况如图 6 所示。

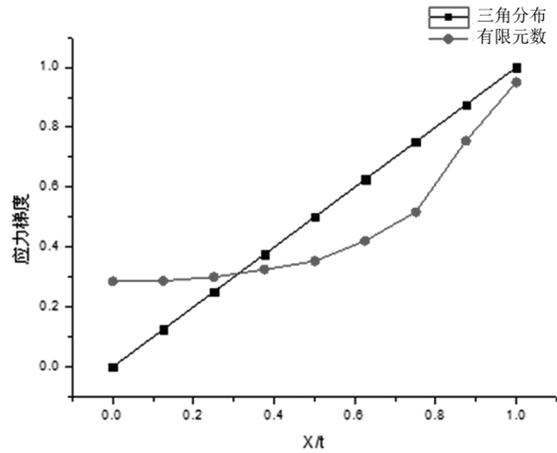


图 6 两种假设下孔壁挤压应力分布比较

综合比较两种假设,发现有限元计算的孔壁最大挤压应力与工程三角形假设所得最大挤压应力相近;而且工程假设偏保守。

下文通过有限元模拟孔边挤压变形达 4% 孔径初始失效破坏,同试验数据对比。

2.2 弹性模量工程计算

表 4 某类单向带力学性能

| 中模高强碳纤维增韧环氧树脂预浸料 (单向带) | 参考平均值 |
|-------------------------|-------|
| 单向层压板纵向拉伸模量 $E1t$ (GPa) | 185.5 |
| 单向层压板纵向压缩模量 $E1c$ (GPa) | 169.6 |
| 单向层压板主泊松比 $\nu12$ | 0.34 |
| 单向层压板横向拉伸模量 $E2t$ (GPa) | 9.03 |
| 单向层压板横向压缩模量 $E2c$ (GPa) | 暂缺 |
| 单向层压板纵横剪切模量 $G12$ (GPa) | 4.27 |

由于湿热环境,弹性模量降低;查参考数据,发现 $E1t$ 在湿热环境下降低到 164 GPa。按照经典层板理论,计算 $E11$ 、 $E22$ 、 $\nu12$ 、 $G12$,结果如表 5 所示。

表 5 复材层板弹性模量

| 铺层厚度 | 试件编号 | E11 | E22 | V12 | G12 |
|------|-------|------|------|-------|------|
| 40 层 | D40A1 | 111 | 38.2 | 0.432 | 19.3 |
| | D40B1 | 69 | 69 | 0.293 | 22.9 |
| | D40C1 | 145 | 29.6 | 0.293 | 11.9 |
| | D40D1 | 76.9 | 43.8 | 0.514 | 26.6 |

注: D40A1 中 D 表示双剪试件, S 表示单剪。

分析试验件过渡段应变片数据,取试验加载过程中段数据同实测应变计算弹性模量,具体结果如

表6所示。

表6 过渡段应变结果比较

| 铺层厚度 | 试件编号 | 测算应变片值 | 应变片实测值 | 误差 | 铺层比例 [0/±45/90] |
|------|-------|---------|---------|---------|-----------------|
| 40层 | D40A1 | 1 597.3 | 1 833.9 | -12.90% | (50/40/10) |
| | D40B1 | 2 569.6 | 2 569.0 | 0.03% | (25/50/25) |
| | D40C1 | 1 069.9 | 1 363.9 | -21.55% | (70/20/10) |
| | D40D1 | 2 305.7 | 2 312.9 | -0.31% | (30/60/10) |

注:应变片实测值是过渡段上下对应位置测量结果的平均值,测算应变片值 $\varepsilon = F/E_{equiv}A$ 。

表中测算 A1 和 C1 铺层的 ε 误差较大,按试验数据修正层板弹性模量 E_{equiv} ,如表7所示。

表7 复材层板弹性模量修正

| 铺层厚度 | 试件编号 | 理论 E_{11} GPa | 修正后的 E_{11} GPa |
|------|-------|-----------------|-------------------|
| 40层 | D40A1 | 111 | 127.4 |
| | D40B1 | 69 | 69.0 |
| | D40C1 | 145 | 184.8 |
| | D40D1 | 76.9 | 77.1 |

3 试验结果分析

复合材料厚板连接件的失效模式、连接强度与试验件的设计参数密切相关。不同铺层厚度、铺层比例、铺层顺序、螺栓孔径板厚比、单双剪连接形式等,都对复材厚板连接强度有影响。本文仅考虑孔径板厚比、铺层厚度和铺层比例的影响。

试验中,厚板连接件的主要破坏形式包括:螺栓剪断裂-复材板孔边挤压破坏,复材板剪切破坏,如图7和图8所示。

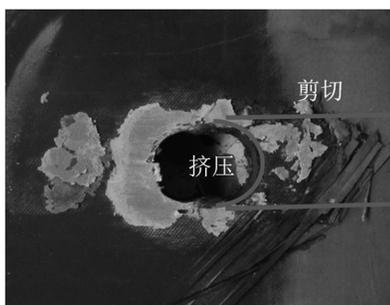


图7 试板挤压-剪切破坏模式

3.1 单双剪连接件试验结果

由表8可见:单剪试件较双剪的孔壁应力集中

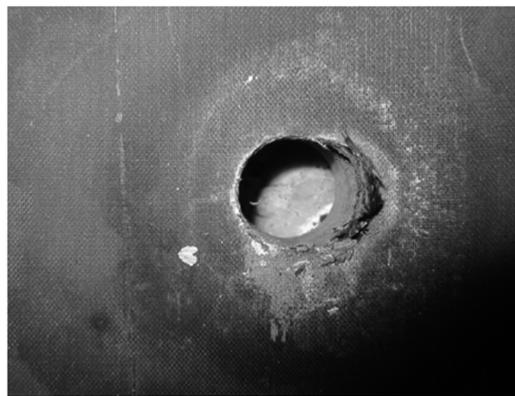


图8 孔壁挤压破坏模式

表8 单双剪不同厚度试验件破坏载荷情况

| 铺层代码 | 初始破坏载荷/kN | 最终破坏载荷/kN | 备注 |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| S40A1 | 29.74 | 60.46 | 孔挤压破坏 |
| S60A2 | 49.66 | 87.58 | 螺栓剪断 |
| S80A3 | 55.25 | 110.84 | 螺栓剪断 |
| D40A1 | 60.46 | 88.94 | 复材挤压+螺栓剪断 |
| D60A2 | 101.3 | 152.2 | 复材挤压+螺栓剪断 |
| D80A3 | 146.05 | 209.06 | 复材挤压+螺栓剪断 |

注1:初始破坏指螺栓孔挤压变形达4%孔直径即判定为初始失效^[2],通常工程上判定为失效;

注2:最终破坏指连接件完全失去承载能力。

严重,且随着铺层厚度增加而增大。因此,单剪厚板试件最易初始失效,孔壁失效应力水平低。

3.2 不同铺层比例试验结果

表9 不同铺层比例试验结果

| 铺层厚度 | 试件编号 | 初始破坏载荷/kN | 最终破坏载荷/kN | 离散系数 | 破坏形式 |
|------|-------|-----------|-----------|-------|---------|
| 40层 | D40A1 | 60.46 | 88.94 | 1.1% | 挤压-剪切破坏 |
| | D40B1 | 51.78 | 90.72 | 3.24% | 挤压-剪切破坏 |
| | D40C1 | 57.83 | 78.04 | 1.57% | 剪切破坏 |
| | D40D1 | 54.6 | 87.92 | 0.85% | 挤压-剪切破坏 |

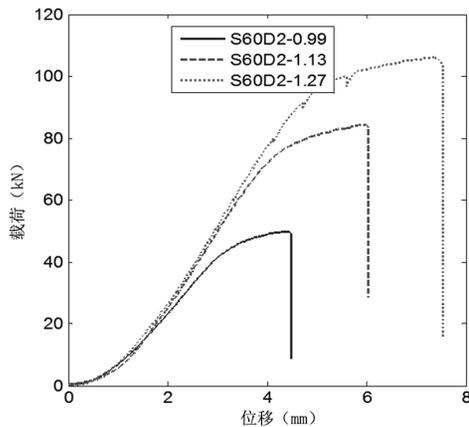
由表9可见:试验件铺层比例不同,连接件失效形式可能不同。当试板45°铺层比例低,导致层板面内剪切强度低,则易出现剪切破坏模式。

3.3 不同孔径板厚比试验结果

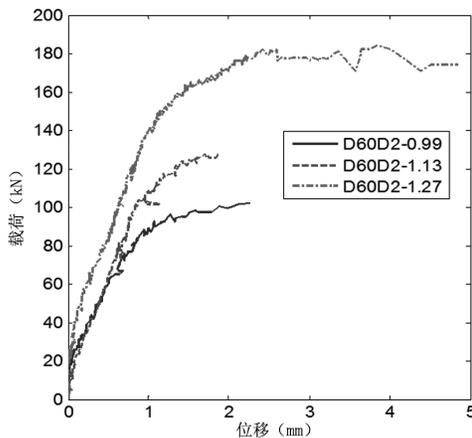
由表10可见:厚板连接试验件孔径板厚比(D/t)很小,螺栓剪切强度相对于层板孔壁挤压强度不再是“足够强”,连接件失效模式多样。单剪试验件,以螺栓剪断裂失效为主;双剪试件有两个剪切面,以孔壁挤压-剪切破坏为主,如图9所示。

表 10 不同孔径板厚比试验结果

| 铺层厚度 | 试件编号 | 孔径板厚比 D/t | 初始破坏载荷 /KN | 最终破坏载荷 /KN | 备注 |
|------|------------|-----------|------------|------------|---------|
| 60 层 | S60D2-0.99 | 0.99 | 29.75 | 51.4 | 挤压-剪切破坏 |
| | S60D2 | 1.13 | 44.81 | 82.73 | 螺栓剪断裂 |
| | S60D2-1.27 | 1.27 | 48.02 | 105.7 | 螺栓剪断裂 |
| | D60D2-0.99 | 0.99 | 56.36 | 100.2 | 挤压-剪切破坏 |
| | D60D2 | 1.13 | 97.18 | 135.05 | 挤压-剪切破坏 |
| | D60D2-1.27 | 1.27 | 120.02 | 181.08 | 挤压-剪切破坏 |



(a) 不同 D/t 比单剪试验件的载荷位移曲线



(b) 不同 D/t 比双剪试验件的载荷位移曲线

图 9 不同 D/t 比单剪、双剪试验件的载荷位移曲线

4 复合材料强度准则及刚度退化

复合材料在使用过程中产生损伤情况主要有：基体压缩失效、基体断裂失效、纤维断裂失效、纤维屈曲失效和层间分层失效等情况。本文研究的中央翼盒与外翼盒对接区复材厚板连接件，在偏心弯矩作用下易产生分层失效，且孔边应力情况复杂，传统的复合材料中厚层合板的挤压强度校核方法

不再适用。

4.1 复合材料层板强度失效准则

基于 Mindlin 经典层板的等效单层板理论，忽略了层板的弯曲效应，假设螺栓纯剪切破坏，复材层板受均匀应力作用，与实际情况不符合；本文基于连续体的三维弹性理论，采用三维损伤模型和接触算法进行模拟。通过 ABAQUS 的 UMAT 子程序，模拟复材厚板连接件逐步失效过程。

复合材料的强度失效准则很多，不同材料体系可能适用不同的复合材料强度准则。最大应力失效准则、最大应变失效准则、蔡-希尔 (Tsai-Hill) 准则、霍尔曼 (Hoffman) 准则、蔡-吴 (Tsai-Wu) 准则、Hashin 准则、Chang 准则、Puck 准则等都是较常用的准则。复合材料层合板在承受螺栓挤压载荷作用时，由于各应力分量的作用，可能出现多种损伤形式，本文进行三维有限元计算，选取基于各个不同损伤形式的 Hashin 强度准则为判断依据。

Hashin 三维强度准则：

纤维拉伸失效模式 $\sigma_{11} \geq 0$,

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right) + \frac{1}{S^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) \text{ 或 } \sigma_{11} = X_t \quad (5)$$

纤维压缩失效模式 $\sigma_{11} < 0$,

$$|\sigma_{11}| = X_c \quad (6)$$

基体拉伸失效模式 $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$

$$\frac{1}{Y_t^2}(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_t^2}(\sigma_{23}^2 + \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (7)$$

压缩基体模态 $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$,

$$\frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_t}\right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4S_t^2} (\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_t^2} (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S^2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (8)$$

S_t 代表横向剪切强度，即剪应力 σ_{23} 的许用值 (σ_{13} 和 σ_{12} 都是 S)。

分层失效 ($\sigma_{33} > 0$)

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

Z_t 代表厚度方向拉伸强度；

分层失效 ($\sigma_{33} < 0$),

$$\left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

4.2 层合板材料参数假设

复合层合板材料性能数据一般仅为单层平面

内的数据,缺少沿厚度方向弹性模量、剪切模量、泊松比及层间强度数据,且很难通过试验的手段获得这些数据。因此,目前在三维的应力分析中,沿厚度方向的弹性模量和强度参数参照经验假设。例如,复合材料纤维纵向为 1 方向,单层面内横向为 2 方向,单层厚度方向为 3 方向,则材料的弹性参数满足:

$$E_2 = E_3, v_{12} = v_{13}, G_{12} = G_{13}, G_{23} = E_2 / 2(1 + v_{23}),$$

$$v_{23} = v_{12}(1 - v_{12}E_2/E_1) / (1 - v_{12})$$

(11)

其中, v_{23} 是通过张量变换将二维层合板理论推广到三维得到的,强度参数满足:

$$Z_t = Y_t, Z_c = Y_c, S_{13} = S_{12}$$

(12)

其中, S_{23} 取树脂基体的剪切强度。

通过 ABAQUS 子程序 UMAT 实现损伤模拟,程序结构框图如图 10 所示。

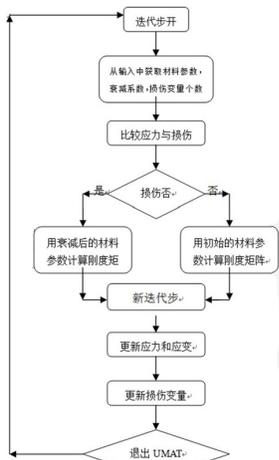


图 10 损伤子程序 UMAT 结构框图

5 有限元分析

5.1 复合材料厚板连接件结构介绍

复合材料厚板连接件依据复材中央翼壁板与金属 1 号肋的连接结构设计,受篇幅限制,本文仅针对特征连接进行分析。

建模采用 8 节点缩减积分单元 C3D8R 模拟复材厚板,用 C3D4 单元模拟钛板,用 C3D8R 模拟高锁螺栓,利用模型的对称性取半边试验件建模模拟。试验件长度方向为 U_y , 试验件宽度方向为 U_x , 厚度方向为 U_z , 有限元模型如图 11 所示。

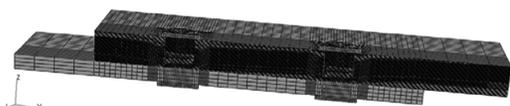


图 11 复材厚板连接件有限元模型

边界条件:

约束钛板夹持端 $U_x = 0, U_y = 0, U_z = 0$ 自由度,中性对称面约束 $U_x = 0$ 。复合材料夹持端施加均匀拉伸载荷进行求解。

复合材料损伤按 Hashin's 的渐进损伤模型分析。当单层板工作应变 ε 大于许用应变 ε_0 时,引入刚度折减更新刚度阵迭代步,折减系数与能量 G_c 和工作应变 ε' 相关,趋势关系如图 12 所示。

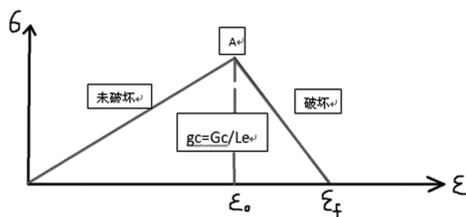


图 12 Hashin's 渐进损伤模型

5.2 复合材料厚板连接件计算结果

有限元模型计算,以孔壁挤压变形达 4% 孔径工程失效判定,预测试件初始破坏载荷。有限元分析结果如表 11 所示。

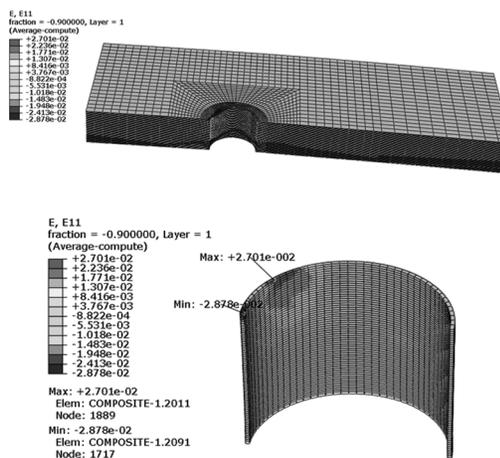


图 13 单剪试验件初始破坏应变云图

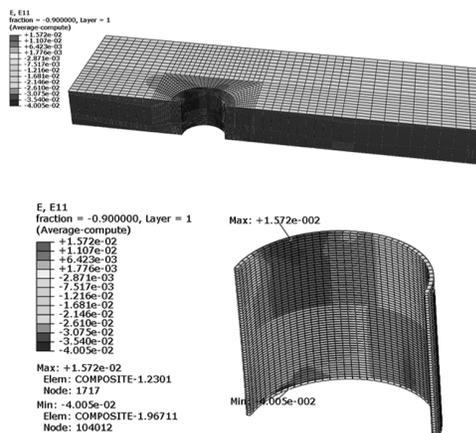


图 14 双剪试验件初始破坏应变云图

表 11 单双剪试验件破坏情况

| 试件编号 | 试验初始破坏载荷/kN | 模拟初始破坏载荷/kN | 误差 |
|-------|-------------|-------------|--------|
| S40A1 | 29.74 | 29.48 | -0.9% |
| S40D1 | 39.57 | 37.69 | -4.8% |
| D40A1 | 60.46 | 58.73 | -2.9% |
| D40B1 | 51.78 | 50.7 | -2.1% |
| D40C1 | 57.83 | 56.71 | -1.9% |
| D40D1 | 54.6 | 52.75 | -3.4% |
| S60A2 | 49.66 | 43.13 | -13.1% |
| S60D2 | 45.74 | 41.17 | -10.0% |
| D60A2 | 101.13 | 104.82 | 3.6% |
| D60B2 | 91.36 | 96.34 | 5.5% |
| D60C2 | 98.89 | 102.76 | 3.9% |
| D60D2 | 97.18 | 96.95 | -0.2% |
| S80A1 | 55.25 | 58.1 | 5.2% |
| S80D1 | 52.54 | 56.2 | 7.0% |
| D80A1 | 146.05 | 150.1 | 2.8% |
| D80B1 | 139.61 | 137.15 | -1.8% |
| D80C1 | 142.17 | 146.8 | 3.3% |
| D80D1 | 141.05 | 140.7 | -0.2% |

由表 11 可见,除个别算例外有限元分析结果与实测结果误差在 7% 以内,满足工程要求。

本文用有限元模拟试件的初始破坏,按 $\sigma_{bru} = P/Dt$ 计算试件的工程许用挤压应力。

5.2.1 单双剪切试验件破坏情况

单双剪切连接的 60 层试验件,双剪试件工程许用挤压应力明显高于单剪试件。单剪试验件,孔壁挤压应力集中严重,试件初始破坏应力水平低,受二次弯矩影响较大,如表 12 所示。

表 12 单双剪试验件破坏情况

| 铺层厚度 | 试件编号 | 初始破坏载荷/kN | 工程许用名义应变 | 工程许用挤压应力/MPa |
|------|-------|-----------|----------|--------------|
| 60 层 | S60D2 | 45.74 | 4 210 | 317 |
| | D60D2 | 97.18 | 8 940 | 673 |

5.2.2 不同铺层比例试验件破坏情况

不同铺层比例的复材厚板初始破坏应变差别大,在 4 800 ~ 9 150 微应变之间。其中,45°铺层比例较低的 A 和 C 类层合板初始破坏应变较低。而复材厚板初始破坏应力接近,双剪试件许用挤压应

力在 600MPa ~ 700MPa 之间,如表 13 所示。

表 13 不同铺层比例试验件破坏情况

| 铺层厚度 | 试件编号 | 初始破坏载荷/kN | 工程许用名义应变 | 工程许用挤压应力/MPa |
|------|-------|-----------|----------|--------------|
| 60 层 | D60A2 | 101.13 | 6 410 | 700 |
| | D60B2 | 91.36 | 9 150 | 633 |
| | D60C2 | 98.89 | 4 810 | 685 |
| | D60D2 | 97.18 | 8 940 | 673 |

6 结论

本文通过工程计算和有限元模拟,对复合材料厚板连接试验件破坏模式、失效载荷进行分析研究,结论如下:

(1) 复材厚板试件孔壁挤压应力分布在厚度方向上向剪切面集中,工程上的三角形应力梯度分布假设偏保守,可用。

(2) 工程判定孔壁挤压变形达 4% 孔径即试件失效,并结合有限元方法。预测试件的初始破坏载荷与试验测试结果接近,满足工程要求。

(3) 复材厚板试件的铺层比例不同,连接件失效形式不同。对于双剪连接试件,若 45°铺层比例高,以孔边挤压破坏为主;若 45°铺层比例低,以复材板剪切破坏为主。

(4) 复材厚板试件孔径板厚比 (D/t) 均很小。单剪切试验件的破坏会出现螺栓剪断失效;双剪试验件的破坏则多为孔边挤压破坏。

(5) 双剪试件工程许用挤压应力高达 600MPa ~ 700MPa,明显高于单剪试件的工程许用挤压应力。

参考文献:

- [1] 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,2005,3.
- [2] 中国航空研究院. 复合材料连接手册[M]. 北京:航空工业出版社. 1994.
- [3] Z. Hashin, A. Rotem. A Fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Materials[J]. Journal of Composite Material, 1973, 7.
- [4] 赵丽滨,秦田亮,李嘉玺,付月. 复合材料结构三维有限元分析的材料参数[J]. 北京:北京航空航天大学学报,2010,7.
- [5] Navin Jaunky, Damodar R. Ambur, Carlos G. Dávila, and Mark Hillburger. Progressive Failure Studies of Composite Panels with and Without[R]. NASA/CR-2001-211223 ICASE Report, No. 2001-27.
- [6] 庄茁. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南[M]. 北京:清华大学出版社,1997.