

文章编号: 1000-8055(2002)05-0623-06

复合材料层合板单排多钉双剪联接 接头强度分析

崔海涛 温卫东

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 双剪联接接头是复合材料结构连接设计的主要环节。针对 T300/KH304 复合材料层合板的单排多钉双剪联接接头, 考虑到孔间距离对接头强度的影响, 用三维有限元模型对接头的静强度进行数值分析。以应力分析为基础, 采用 Yamada-Sun 准则预测了该层合板结构双剪联接接头的破坏载荷。试验结果表明, 该接头的破坏模式主要呈现为挤压破坏, 并伴随有净拉伸和剪切破坏模式; 接头的位移—载荷曲线近似为直线; Yamada-Sun 准则可以较好地预测该结构的破坏载荷; 所预测的接头的破坏载荷及破坏模式, 试验结果与数值分析结果比较一致。

关键词: 复合材料层合板; 双剪联接接头; 强度分析

中图分类号: V 231.91

文献标识码: A

Strength Analysis for Multiple Double-Lapped Joints in CFRP Laminates

CUI Hai-ao, WEN Wei-dong

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Double-lapped bolted joints are the main structure in design of composite laminates. The effect of the distance between holes is taken into consideration, strength of multiple double-lapped joints of T300/KH304 CFRP is analyzed by three-dimensional finite element model. Based on the result of stress analysis, Yamada-Sun criterion is used to predict the ultimate strength of the joints. Experimental results show that bearing failure is the main failure type, together with the net-tension and shear-out types, the curve of displacement-load approximate a straight line, and Yamada-Sun criterion is suitable for prediction of the ultimate strength. Compared with the predictions, a good agreement between experimental and numerical predictions is obtained.

Key words: CFRP laminates; double-lapped joints; strength analysis

1 引言

先进复合材料因具有比强度和比刚度高、可设计性强等优异特性而广泛应用于工程实际中。

由于其各向异性以及多模式的缺陷或损伤形式等, 复合材料结构的连接问题已成为研究的重点。复合材料结构机械连接接头的破坏模式主要有: 被连接件的挤压破坏、拉伸破坏和剪切破坏, 以及

收稿日期: 2001-11-14; 修订日期: 2002-01-07

作者简介: 崔海涛(1971-), 男, 内蒙古赤峰人, 南京航空航天大学能源与动力学院副教授, 博士, 主要从事复合材料结构强度、优化设计和可靠性设计研究

紧固件的剪切破坏等。其中,拉伸和剪切破坏会导致结构的突然失效,挤压破坏则是一个逐渐损伤过程,不会导致结构整体承载能力的衰减。因此,挤压破坏是复合材料结构中螺栓连接接头的主要破坏形式。端部约束的复合材料连接接头是一个三维问题,目前国外已经对此开展了很多有益的研究。Grutta 等^[1]采用 ABAQUS 软件对弯矩作用下的层合板螺栓连接接头强度进行了分析。Camanho 等^[2]采用三维有限元模型,利用 ABAQUS 软件对层合板螺栓连接接头的损伤进行了预测。结果表明接头的夹紧力以及垫片与层合板之间的摩擦力对损伤的产生及增长有很大的影响。Nguyen^[3]在 SAMCEF 程序中引入三维有限元模型,对含中心孔的复合材料层合板的损伤破坏进行了分析。结果表明,有限元网格对损伤预测的影响较小,而基于连续损伤力学的三维有限元模型可以较好地预测横向基体开裂破坏模式的累积损伤。Lin 等^[4]采用 MARC 有限元分析软件,考虑到多孔对接头的影响,对单剪连接的层合板接头强度进行了分析。Tong^[5]针对不同的端部约束,对双剪连接接头的挤压失效问题进行了研究。Morais^[6]提出了分析准各向同性含孔层合板拉伸强度的二维、三维混合有限元模型。分析表明,在孔附近,易采用精细的三维单元;而远离孔处可采用二维单元进行分析。Gong 等^[7]采用三维有限元分析技术,在 Tsai-Wu 准则基础上,对扭矩作用下的含缺口的层合板的初始损伤进行了预测分析。国内在有关三维问题方面的研究成果则较少。

本文针对 T300/KH304 复合材料层合板的单排多钉双剪联接接头,考虑到孔间距离对接头强度的影响,采用三维有限元模型,利用 ANSYS 有限元分析程序对接头的静强度进行数值分析。采用 Yamada-Sun 准则预测了该接头的破坏载荷。最后通过试验验证了数值分析方法与结果的正确性。

2 复合材料双剪联接结构多钉联接接头的强度分析

2.1 多钉联接接头强度的数值分析

双剪联接结构多钉联接接头是工程中广泛应用的联接形式。鉴于结构的对称性,可选取典型的 3 孔联接接头结构进行分析。T300/KH304 复合材料层合板结构如图 1 所示。图中,端距 $e=20\text{ mm}$,孔径 $d=6.3\text{ mm}$, w 为板的宽度, s 为孔心间的距离。从主铺层 $[\pm 45/90/0/-45/0/45/0/90/0]_s$ 开始的辅助铺层 $[0_2/0_2/90_2/90_2/-45_2/45_2]$ 中,每两层辅助铺层的长度减少 5 mm,直至最外层,即 45 层为层合板的外表面。辅助铺层共 12 层,有 6 个阶梯。其中,盖板和螺栓的材料为 30CrMnSiA。

运用有限元法对双剪联接结构进行数值分析。采用整体建模方法,对复合材料板采用八节点三维层状单元,对金属盖板和螺栓采用八节点实体单元划分网格。对多钉联接接头划分的有限元网格如图 2 所示,其中复合材料板共划分为 6096

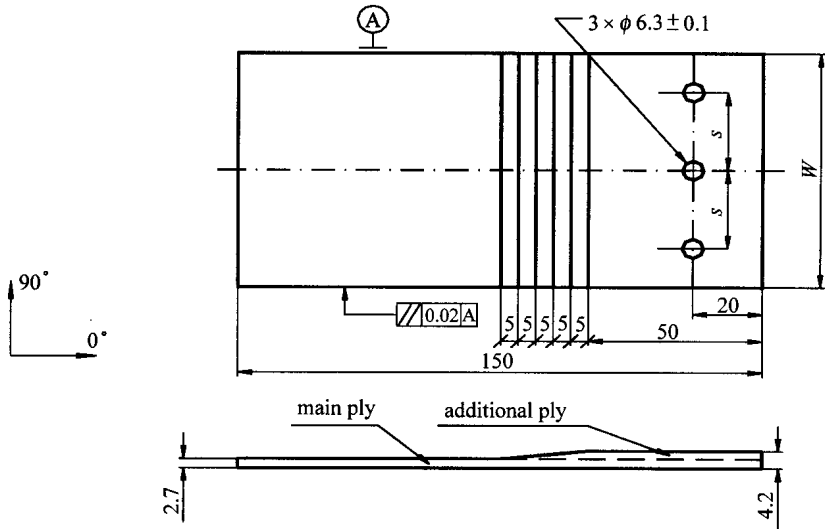


图 1 试样的几何形状

Fig. 1 Geometry shape of specimen

个单元, 8739 个节点; 金属盖板共分为 3600 个单元, 3548 个节点; 螺栓共分为 8112 个单元, 7858 个节点。本文用此模型对 3 种不同孔心距离的双盖板结构进行强度分析。

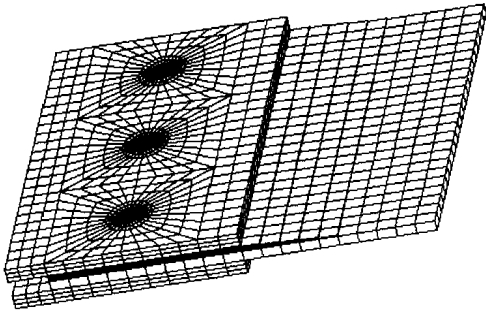


图 2 双盖板接头的有限元网格
Fig. 2 Mesh of double-lapped joints

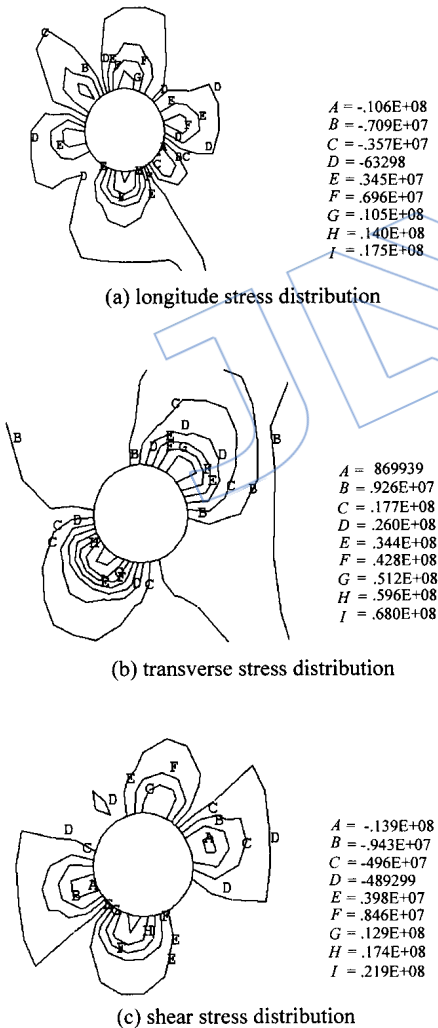


图 3 45 铺层的应力分布
Fig. 3 Stress distribution of 45 ply

以孔径为 6.3 mm, 孔心距离为 25 mm 的试

件为例 (拧紧力矩为 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$, 拉伸载荷为 200 MPa), 中间孔孔边复合材料板主铺层单元在单元坐标系下的应力分析结果如图 3~ 图 5 所示。由图可见, 其主要破坏模式与单钉联接时基本相同。

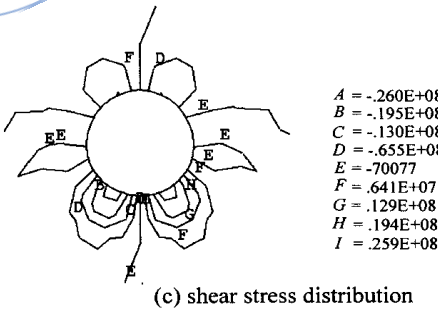
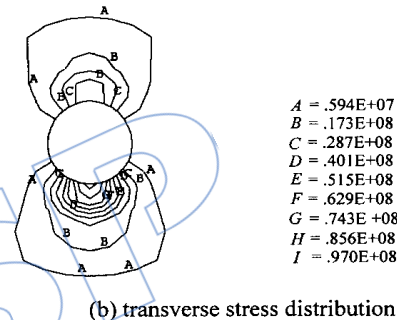
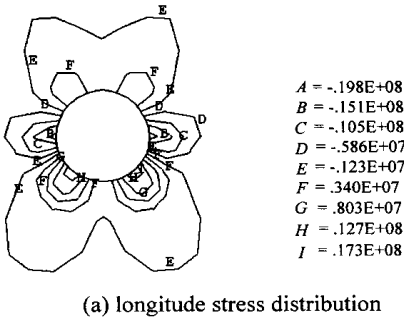


图 4 90 铺层的应力分布

Fig. 4 Stress distribution of 90 ply

不同之处在于, 除主要破坏模式外, 还伴随有其他破坏模式的产生。例如, 45 铺层中剪应力除了对孔边造成挤压破坏外, 还可能产生净拉伸破坏等。在引起挤压破坏模式的铺层中, 90 铺层的应力最大, 为 973 MPa 。因此, 复合材料板的挤压破坏首先发生在 90 铺层。

2.2 多钉联接接头破坏载荷的计算

在对双剪联接接头进行应力分析的基础上, 利用载荷与节点应力线性相关的性质, 选用 Yamada-Sun 准则计算破坏载荷。计算破坏载荷的方法如下:

- (1) 在复合材料板的末端施加载荷 P_1 ,

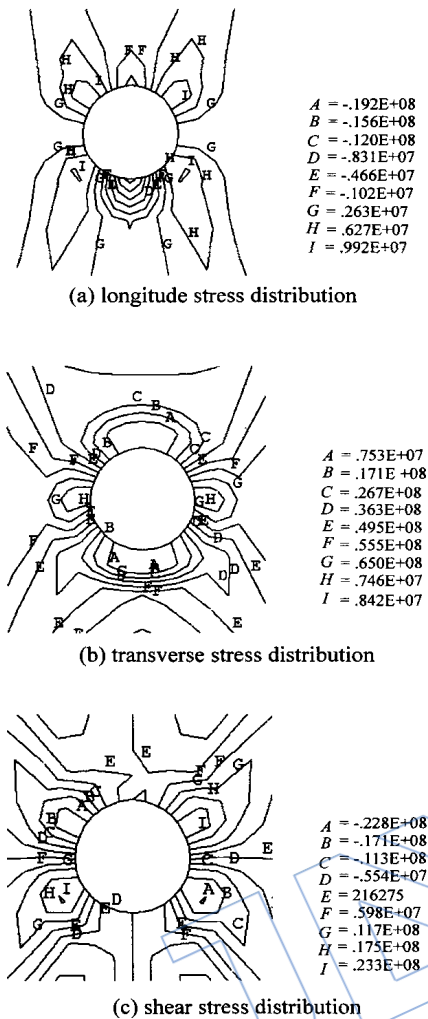


图 5 0 铺层的应力分布

Fig 5 Stress distribution of 0° ply

对结构进行应力分析, 确定可能的破坏点或破坏区域。

(2) 在载荷 P_1 的基础上, 施加任意载荷增量, 对结构进行应力分析。

(3) 记录破坏点或破坏区域在两个载荷水平下的沿纤维方向的正应力和面内的剪切应力。

(4) 利用载荷与节点应力的线性相关的性质, 即可计算出结构的破坏载荷。

以孔心距离为 25 mm 的 3 孔复合材料板为例, 假设应力与外载呈线性关系, 则在 100 MPa 均布载荷作用下, x 轴负方向离钉孔中心 6 mm 的节点的正应力和剪切应力分别为 11.696 MPa 和 0.4434 MPa。当载荷增加 100 MPa 时, 正应力和剪切应力分别为 23.392 MPa 和 0.8866 MPa。由此可得算出载荷增量为 100 MPa 时正应力和剪切应力的增量, 将其带入 Yamada-Sun 破坏准

则, 即可求得破坏载荷为 67150 N。

同理, 孔心距离为 20 mm 及 30 mm 的 3 孔复合材料板, 其相应的破坏载荷分别为 56830 N 和 72320 N。由此可以看出, 破坏载荷随着孔心距离的增加而增大, 且破坏载荷的增加幅度在减小, 趋势复合实际情况。

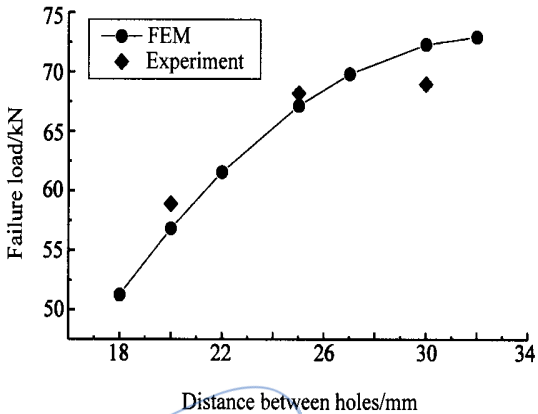


图 6 不同孔间距离下的失效载荷曲线

Fig 6 Failure load curve under difference distance between holes

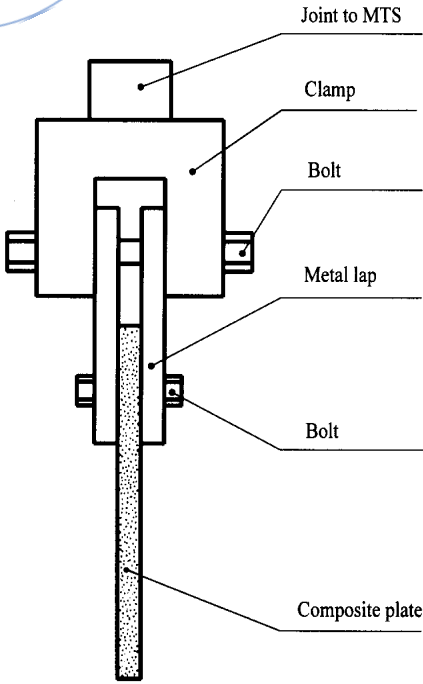


图 7 双盖板接头的试验模型

Fig 7 Experimental model of double-lapped joints

按照上述方法, 对不同孔心距离的多钉联接接头进行有限元分析, 计算结果如图 6 所示。从图中可以看出, 破坏载荷随复合材料板的孔心距离

的增加而增大。在孔心距离 $s \approx 5d = 30\text{ mm}$ 时, 结构的破坏载荷变化趋向于平稳。即当孔心距离大于 $5d$ 时, 破坏载荷的变化较小。另外, 当 $e/d = 3$ 时, 孔心距离分别为 $3d, 4d$ 和 $5d$ 时, 计算出破坏载荷分别为 $56830\text{ N}, 67150\text{ N}$ 和 72320 N 。可见, 复合材料板的宽度由 $3d$ 增加到 $4d$ 时, 其破坏载荷的增量为 10320 N , 而宽度由 $4d$ 增加到 $5d$ 时, 破坏载荷的增量为 5170 N , 即孔心距离增加一倍, 破坏载荷增加 5150 N , 约增加 0.5 倍。因此, 可以考虑选用孔心距离 $s = 4d$ 或 $s = 5d$ 的设计方法。

2.3 多钉联接接头强度分析的试验验证

对 T300/KH-304 复合材料层合板多钉联接接头, 在 MTS810 试验机进行如图 7 所示的拉伸试验(试验环境: 温度 13°C , 干态)。

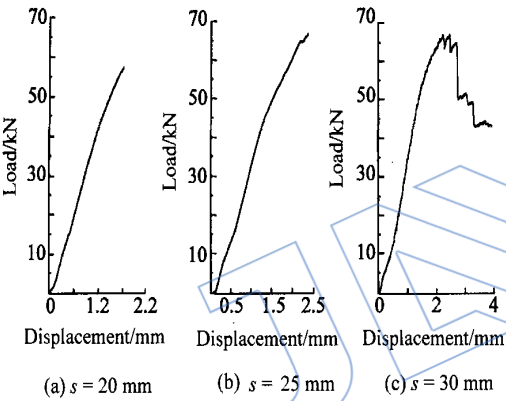


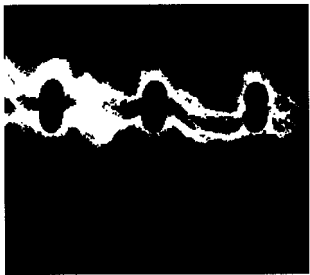
图 8 不同孔间距下的位移—载荷试验曲线
Fig. 8 Displacement-load curve under different distance between holes

拉伸试验的位移—载荷曲线如图 8 所示。损伤后试件的 X- 光照片如图 9 所示。由图 8 可见, 位移—载荷曲线近似为直线。其中, 图 8(b) 的曲线中, 在初始位移处有一个小的波动, 主要是由于联接金属盖板和试件的螺栓与孔之间有一定的间隙, 开始所加的载荷主要是平衡由螺栓的预紧力所产生的盖板与试件之间的摩擦力。由图 8 和图 9 可以看出, 随着孔心距离逐渐增大, 试件的破坏由净拉伸断裂破坏转变为挤压破坏。其中, 孔心距为 20 mm 的试件为净拉伸破坏, 其位移—载荷曲线的线性度较好。孔心距为 25 mm 的试件则出现较复杂的破坏形式, 左边的孔在试件端部发生了剪切(为主)破坏, 中间孔则出现了挤压(为主)破坏, 而右边的孔基本上是净拉伸(为主)破坏。试件的位移—载荷曲线近似为直线, 但在最

大载荷出现之前, 曲线稍有波动。孔心距为 30 mm 的试件的破坏模式中, 左边的孔发生了拉伸——剪切或净拉伸破坏, 中间和右边的孔基本上均为挤压破坏。从中可以看出, 孔心距离增加到一定程度($s = 5d$), 则孔与孔之间的破坏已不再相互影响, 而是按各自的破坏模式发生破坏。X 光片中三个孔的变形不一样, 其中右端的孔变形最大, 中间孔次之, 左端的孔变形最小。在加载过程中, 右端的孔边首先发生破坏, 这时在曲线上出现最大载荷, 由于该孔孔边的破坏, 导致载荷的重新分配, 所以复合材料板的承载能力急剧下降。然后, 中间孔的孔边发生挤压破坏, 只有左端孔处可以承载, 这时势必导致复合材料板在夹具中倾斜, 由此产生载荷方向与试件的长度方向不共线的情况, 因此导致复合材料板在左端孔处出现拉伸断



$s = 20\text{ mm}$



$s = 25\text{ mm}$



$s = 30\text{ mm}$

图 9 3 孔试件的 X 光片

Fig. 9 X-photos of 3 holes specimens

表 1 试件破坏载荷的试验值和计算值

Table 1 Experimental and computation results of failure load

孔心距离/mm	试验值/ N	离散系数/%	计算值/ N	相对误差/%
20	58910	4.67	56830	3.5
25	68180	5.78	67150	1.5
30	68980	2.39	72320	4.8

裂破坏。从图 8 中孔心距为 30 mm 的试件的位移——载荷曲线中还可以看出,当其中一个孔处失去承载能力后,其它孔处承载能力急剧下降,而且持续时间很短。

表 1 中列出了试件在实际拉伸时的破坏载荷及相应的计算值。从表中可以看出,试验数据波动不大,结果是可靠的。复合材料板的破坏载荷随着孔心距离的增加而增大,且破坏载荷的增加幅度在减小。该方法预测出的破坏载荷与试验值较接近,二者吻合较好。

3 结 论

(1) 双盖板螺栓联接的破坏模式主要受复合材料板宽度的影响,受端距的影响较小。其破坏模式在复合材料板宽度较小时呈现净拉伸破坏,当板宽逐渐增加,其破坏模式逐渐转变为剪切破坏。当板宽增加的一定程度时,则造成复合材料板在孔边的挤压破坏。

(2) 采用 Yamada-Sun 准则可以有效地预测 T300/KH304 复合材料双盖板多钉连接结构的破坏载荷。

(3) 根据多钉联接的试验与计算结果表明,在进行双盖板结构设计时,建议端距应大于 3 倍的孔径,孔心距离应大于 5 倍的孔径,位于复合材料接头最靠近板边的孔,其孔心距板边应大于

2.5 倍的孔径。

参考文献

[1] Grutta J T,M iskioglu I Strength of Bolted Joints in Composites under Concentrated Moment [J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34(15): 1242- 1262

[2] Cananho P P,M atthew s F L. A Progressive Damage Model for Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(24): 2248- 2280

[3] Nguyen B N. Damage Modeling of Laminated Composites by the Use of Multilayer Volume Elements[J]. Composites Science and Technology, 1998, 58: 891- 905

[4] Lin W H, Jen M H. The Strength of Bolted and Bonded Single-Lapped Composite Joints in Tension[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 33(7): 640- 666

[5] Tong L Y. Bearing Failure of Composite Bolted Joints with Non-Uniform Bolt-to-Washer Clearance[J]. Composites Part A, 2000, 31: 609- 615

[6] Morais A B. Open-Hole Tensile Strength of Quasi-Isotropic Laminates[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 1997- 2004

[7] Gong X L, Gong X J. Application of Tsai-Wu Criterion to Notched and Unnotched Composite Laminates under Torque Loading[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34(6): 460 - 478

(责任编辑 吴一黄)