

CFRP 双剪单钉连接接头强度分析

崔海涛 温卫东

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京 210016)

文 摘 双剪连接接头是复合材料结构连接设计的主要环节。针对 T300/ KH304 复合材料层合板的双剪连接形式,分析了单钉连接情况下的接头强度,并采用 Yamada-Sun 准则预测了该层合板结构双剪连接接头的破坏载荷。结果表明:该接头的破坏模式主要呈现为挤压破坏;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,双剪连接接头,强度分析,有限元法

Strength Analysis of Single-bolted Double-lapped Joints in CFRP

Cui Haitao Wen Weidong

(Department of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract Double-lapped bolted joints are the main structure in design of composite laminates. The strength of single-bolted double-lapped joints of the T300/ KH304 CFRP laminate is analyzed. Yamada-Sun criterion is used to predict the failure load of the joints. Experimental results show that bearing failure is the main failure type, and Yamada-Sun criteria is suitable for prediction of the failure load. Compared with predictions, a good agreement between experimental and numerical predictions is obtained.

Key words CFRP laminates, Double-lapped joints, Strength analysis, FEM

1 引言

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、剪切破坏和劈裂破坏以及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,而挤压破坏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,挤压破坏常常被认为是复合材料结构中螺栓连接接头的主要破坏形式。另外,针对端部约束的复合材料连接接头三维问题,目前国外已经对此开展了很多有益的研究和探索。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^[2,3]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^[4]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^[5]采用 MARC 有限元分析软件,对单剪连接的层合板接头强度进行了分析,分析中考虑的多孔对接头的影响。Liu 等^[6]则针对含孔的厚层合板结构的单钉连接接头进行了分析,给出了区别钉弯曲和挤压两种损伤情况的参数,即层合板的厚度与孔直径之比的平方。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

收稿日期:2003-09-10;修回日期:2003-11-24

崔海涛,1971 年出生,博士,主要从事复合材料结构强度分析和优化设计等方面的研究工作

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钉双剪连接形式,分析了接头的连接强度,并采用 Yamada-Sun 准则预测了该层合板结构双剪连接接头的破坏载荷。

2 复合材料双剪连接结构单钉连接接头的强度分析

2.1 单钉连接接头强度的数值分析

T300/ KH304 复合材料层合板结构如图 1 所示。

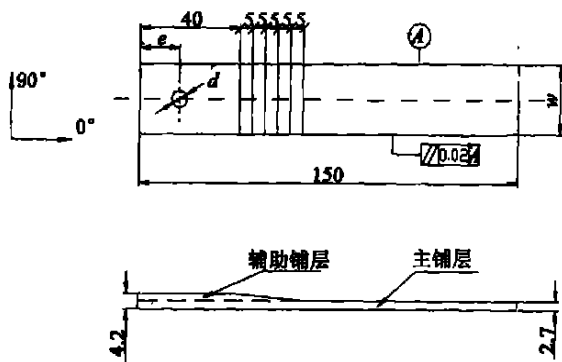


图 1 复合材料层合板的几何形状

Fig. 1 Geometric shape of the composite laminate

图 1 中, e 表示端距, d 为板的孔径, w 为板的宽度。从主铺层 [45°/ -45°/90°/0°/ -45°/90°/45°/0°/90°/0°], 开始的辅助铺层 [0°/0°/90°/90°/ -45°/45°] 中, 每两层辅助铺层的长度减少 5 mm, 直至最外面的两层, 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, 孔的直径为 6.3 mm, 盖板和螺栓的材料为 30CrMnSiA 钢。

在双剪连接结构的数值分析中, 采用有限元数值解技术分析结构的强度。在有限元分析中, 采用整体建模方法, 对复合材料板采用八节点三维层状结构体单元, 对金属盖板和螺栓采用八节点三维实体单元划分网格。对单钉连接接头结构划分的最终网格如图 2 所示, 其中复合材料板共划分为 2 032 个单元, 3 009 个节点, 金属盖板和螺栓分别为 1 200 个单元、1 224 个节点和 2 704 个单元、2 680 个节点。

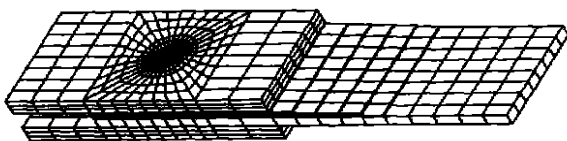


图 2 复合材料双盖板结构的有限元网格划分

Fig. 2 FEM mesh of double-lapped composite joint

选用 Yamada-Sun 准则, 几种尺寸的复合材料层合板在拉伸载荷作用下的破坏载荷计算结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 复合材料板宽度一定时, 随着端距的增加, 其承载能力逐渐增大; 当复合材料板的端距一定时, 其破坏载荷随着板宽度的增加而增大, 即复合材料板的破坏载荷与板的宽度和端距呈正相关关系。

表 1 试件破坏载荷的试验值及计算值¹⁾

Tab. 1 Results of the experiment failure load and calculation

| e/d | w/d | 试验值 /N | 平均值 /N | 离散系数 / % | 计算值 /N | 相对误差 / % |
|-------|-------|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 2.0 | 3 | 16 730 | 16 371 | 2.19 | 16 687 | 1.9 |
| | | 16 012 | | | | |
| 2.0 | 4 | 17 279 | 17 232 | 0.27 | 17 339 | 0.7 |
| | | 17 214 | | | | |
| 2.0 | 5 | 17 726 | 17 536 | 1.08 | 17 666 | 0.7 |
| | | 17 345 | | | | |
| 2.5 | 3 | 18 312 | 18 554 | 1.30 | 19 174 | 3.3 |
| | | 18 795 | | | | |
| 2.5 | 4 | 21 447 | 21 400 | 0.22 | 20 387 | 4.7 |
| | | 21 637 | | | | |
| 2.5 | 5 | 21 513 | 21 645 | 0.61 | 20 989 | 3.1 |
| | | 21 776 | | | | |
| 3.0 | 3 | 20 663 | 20 110 | 2.75 | 20 408 | 1.5 |
| | | 19 557 | | | | |
| 3.0 | 4 | 24 289 | 22 682 | 7.08 | 22 090 | 2.6 |
| | | 22 912 | | | | |
| 3.0 | 5 | 24 201 | 23 817 | 1.61 | 22 946 | 0.1 |
| | | 24 342 | | | | |

注: 1) 试验值一栏中数值表示不同试件的破坏载荷。

按照上述分析方法, 对不同的宽度/孔径比和端距/孔径比双盖板结构进行有限元分析, 计算结果如图 3、图 4 所示。

从图 3 和图 4 中可以看出, 当复合材料板的端距一定时, 破坏载荷随板宽的增加而增大。当 $w/d > 5$ 时, 破坏载荷的变化较小, 即在 e/d 为定值时, 增加板的宽度, 对复合材料板的承载能力影响不显著。当

宽度一定时,破坏载荷亦随端距的增加而呈上升趋势。当 $e/d > 3$ 时,破坏载荷随端距的变化曲线增加幅度较小,说明当板的端距大于3倍的孔径时,基本上可以认为破坏载荷不再受复合材料板端距的影

响。另外,从表1中还可以进一步得出,当 $e/d = 3$ 时,复合材料板的宽度由 $3d$ 增加到 $4d$ 时,其破坏载荷的增量为 1682 N ,而宽度由 $4d$ 增加到 $5d$ 时,破坏载荷的增量为 856 N ,增加幅度明显减小。

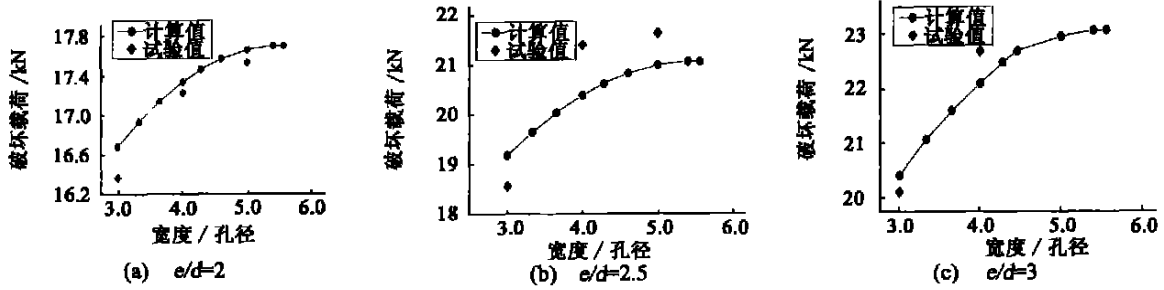


图3 不同的端距/孔径比时破坏载荷随板宽的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of failure load vs laminate width at different e/d

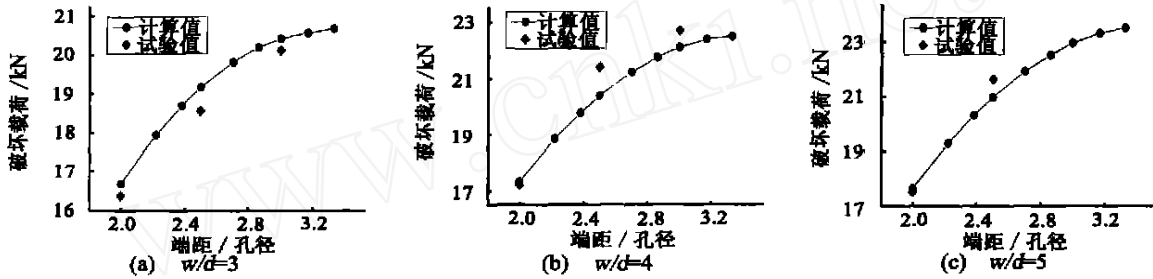


图4 不同的宽度/孔径比时破坏载荷随端距的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of failure load vs distance at different w/d

2.2 单钉连接接头强度分析的试验验证

对 T300/KH-304 复合材料层合板单钉连接接头,在 MTS810 试验机进行拉伸试验(试验环境:温度 13°C 左右,干态)。

拉伸试验中部分试件的位移—载荷曲线如图5所示。由图5可见,该曲线近似为直线。有的曲线中在初始位移处有一个小的波动,主要是由于连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。

部分损伤试件的 X 光片见图6。由图6看出,当宽度 w 与孔径 d 之比为3时,试件的破坏形式基本上均为净拉伸破坏。此时可以认为当 w/d 较小时,试件的端距 e 不起主导作用,这种破坏模式在结构设计时应该尽量避免。当 w/d 为4时,随着 e/d 的增加,试件的破坏形式有所变化:当 e/d 较小时($e/d = 2$),试件

的破坏呈现挤压破坏模式;随着 e/d 的增加,试件的破坏在呈现以挤压破坏模式为主的同时还伴随有剪切破坏模式的发生,这一点在 $e/d = 3, w/d = 4$ 时体现得较为明显(其中, $e/d = 2.5, w/d = 4$ 时的图片中试件的左上角被拉出,主要原因是试件在装夹的过程发生偏心,由于剪切破坏的发生,该试件的左上角被拉脱)。随着试件宽度的进一步增加,当 $w/d = 5$ 时,试件的破坏模式则主要呈现为挤压破坏,这是在结构设计时期望出现的破坏模式,因为此时结构的破坏是一个渐进的过程,不会出现突然失效的情况。

从表1中列出的试件在实际拉伸时的破坏载荷及相应的计算值可以看出,试验数据波动不大,结果是可靠的;该破坏载荷的计算值与试验值比较接近,相对误差均在5%以内,二者吻合较好;复合材料板的破坏载荷随着板宽度和端距的增加而增大,呈现正相关关系,其趋势与试验情况相吻合,符合工程实际。

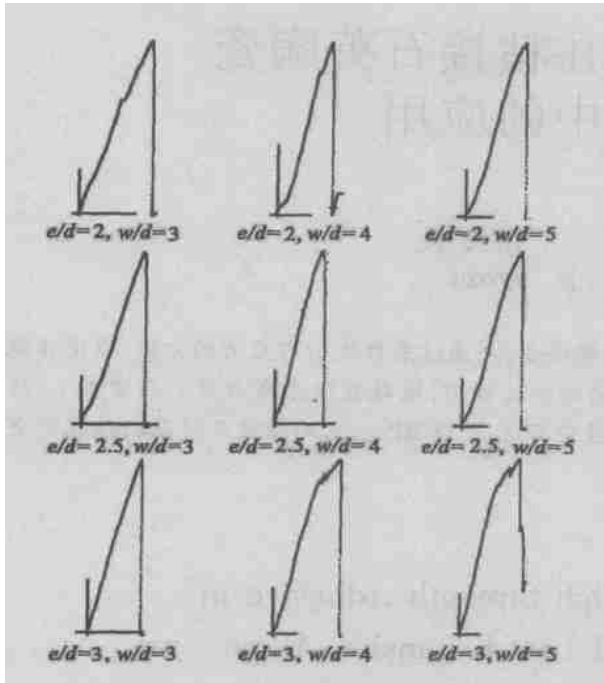


图5 X-Y函数记录仪记录位移—载荷曲线
Fig. 5 Displacement vs load curve

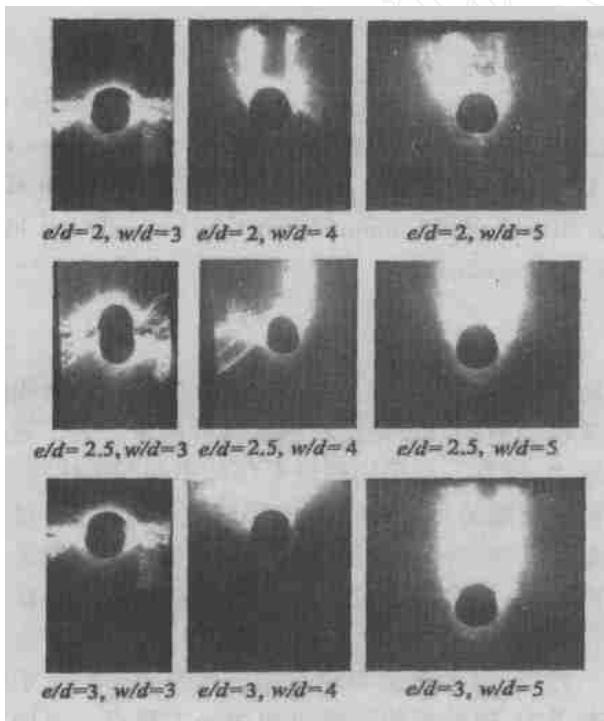


图6 单孔试件的X光片
Fig. 6 X-photo of laminates with one hole

3 结论

(1) 单钉连接接头的试验与计算结果表明,在进行双盖板结构设计时,端距应大于3倍的孔径,板的宽度应大于5倍的孔径。

(2) 双盖板螺栓连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;当板宽增加到一定程度时,则造成复合材料板在孔边的挤压破坏。

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

参考文献

- 1 Grutta J T, Miskioglu I. Strength of bolted joints in composites under concentrated moment. *Journal of Composite Materials*, 2000; 34(15): 1 242 ~ 1 262
- 2 Camanho P P, Matthews F L. Delamination onset prediction in mechanically fastened joints in composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 1999; 33(10): 906 ~ 927
- 3 Camanho P P, Matthews F L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 1999; 33(24): 2 248 ~ 2 280
- 4 Nguyen B N. Damage modeling of laminated composites by the use of multilayer volume elements. *Composites Science and Technology*, 1998; 58(6): 891 ~ 905
- 5 Lin W H, Jen M H. The strength of bolted and bonded single-lapped composite joints in tension. *Journal of Composite Materials*, 1999; 33(7): 640 ~ 666
- 6 Liu D, Raju B B, You J. Thickness effects on pinned joints for composites. *Journal of Composite Materials*, 1999; 33(1): 2 ~ 21
- 7 Gong X L, Gong X J. Application of Tsai-Wu criterion to notched and unnotched composite laminates under torque loading. *Journal of Composite Materials*, 2000; 34(6): 460 ~ 478