

文章编号: 1000 8055(2008)10 1835-07

有拧紧力矩层合板接头静载损伤失效分析

王 丹 勇¹, 温 卫 东²

(1. 中国兵器工业集团 第五三研究所, 济南 250031;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 结合三维有限元分析技术,建立了有拧紧力矩工况下层合板接头静载损伤失效分析方法,模拟了不同尺寸类型层合板接头静载作用过程中损伤状况及内部各铺层损伤起始、发展与结构最终破坏整个累积过程,同时获得其最终破坏强度及破坏模式,并对损伤机理形式及其相互关联作用进行了分析探讨.损伤计算结果与试验试样 X 光进行了对比分析,结果表明,预测结果与试验结果吻合较好.

关 键 词: 损伤失效; 拧紧力矩; 层合板接头

中图分类号: V 231. 91; TB330. 1

文献标识码: A

Damage failure analysis for composite bolted joints with tightening torque subjected to static loadings

WANG Darr yong¹, WEN Wei dong²

(1. Institute 53 of China North Group Corporation, Jinan 250031, China;

2. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A damage failure method was developed to predict the static strength and failure modes of composite bolted joints along with three-dimensional finite element technique. The damage status for different types of joints, the whole process of failure initiation, propagation and catastrophic failure of the structure were also simulated. The predicted results and X-radiographs of specimens were compared. The results of experiments and simulation are very consistent, showing the successful ultimate strength simulation capability of the model.

Key words: damage failure; tightening torque; composites bolted joint

复合材料机械连接接头是连接结构件的关键部位,如何准确地预测连接部位强度以及失效模式与失效规律,对复合材料机匣结构设计是极为重要的.

层合板接头损伤失效目前已有许多研究,但其中基于平面应力假设模型^[1-3]、基于 Whitney 和 Nuismer^[4]提出的点应力与平均应力法以及结合损伤机理的累积损伤方法^[5-7]均在未施加螺栓

拧紧力矩工况下,对其损伤失效进行预测分析,而在工程实际应用中往往对连接螺栓施加一定拧紧力矩.

一些研究人员^[8-11]对施加螺栓拧紧力矩纤维增强层合板接头应力分布及损伤破坏进行了研究,结果表明:施加拧紧力矩可减少安装孔周围层间法向拉伸应力,增加其法向压缩应力;适当施加拧紧力矩,可使层合板接头断口平滑;在螺栓孔周

收稿日期: 2007 10 09; 修订日期: 2007 12 14

作者简介: 王丹勇(1973-),男,吉林通化人,博士,主要从事复合材料结构强度与寿命研究.

Q_j 可由经典单向复合材料应力应变关系求取。

为了实际求解, 本文对 $\Delta \varepsilon_j$ 及 $\Delta \sigma_j$ 进行线性化处理, 式(3)及式(5)可近似为

$$\Delta \varepsilon_j \approx \Delta e_{ij}, \Delta \sigma_j \approx {}^t C_{ijkl} \Delta e_{kl} \quad (8)$$

最终将式(1)转化为

$$\int_V {}^t C_{ijkl} \Delta e_{kl} \delta(\Delta e_{ij}) dV + \int_V {}^t \sigma_{ij} \delta(\Delta \varepsilon_{ij}) dV = \int_{S_0} {}^{t+\Delta t} \bar{T}_i \delta(\Delta u_i) dS - \int_V {}^t \sigma_{ij} \delta(\Delta e_{ij}) dV \quad (9)$$

上式方程变分的结果将得到关于位移增量的线性方程组, 可用有限元法对其进一步求解。

当载荷增加到 ${}^{t+\Delta t} P$ 时, 如果层合板接头内部材料出现损伤, 则导致损伤区材料性能退化, 即损伤区材料模量 ${}^t [Q_{rs}^{(kj)}]$ 部分值将发生变化, 具体的退化方式将在 1.3 节说明。随着损伤的出现, 结构应力、应变将重新分配, 重新用式(9)来计算, 该重复过程直到在该载荷步下没有新损伤出现为止。

1.2 破坏判定准则

为能清楚判断损伤过程中出现的各种损伤形式, 本文使用 Hashin 三维失效准则^[14]进行损伤判定分析, 具体形式见文献[14]。

当层合板接头损伤累积到一定程度, 接头结构将失去继续承载的能力, 发生结构最终整体破坏, 使用文献[12]提出的接头结构最终破坏判定准则对其进行判定。

1.3 损伤过程中材料性能退化

当复合材料结构内部出现损伤, 则在损伤区将发生材料性能退化。结合以往材料性能退化方法, 使用文献[15]提出的材料性能退化方法对其进行相应处理。

2 累积损伤失效与静强度预测分析流程

对层合板使用 ANSYS 软件中的八节点 SOLID46 三维层状体单元; 取单个铺层厚度作为相应单元厚度, 这样有利于分析层间剪切应力的影响; 对盖板、螺栓、螺母及垫圈使用 SOLID45 八节点体单元; 在本文中, 假设螺栓与层合板接头连接孔无间隙配合, 采用螺栓与其安装孔相互挤压接触面上共节点, 以保持结构的连续性; 上下盖板远离层合板接头端部固支; 使用非线性方法对其进行应力求解。

本文在层合板接头有限元建模时, 将连接螺栓拧紧力矩边界约束转化为均布载荷, 并将其施加在层合板接头与上下盖板相互接触的面上, 均

布载荷 q 的计算方法为^[16]

$$q = \frac{M}{0.2 \times d \times A} \quad (10)$$

式中 M 为拧紧力矩; A 为层合板接头与单个盖板相互接触的面积。

累积损伤失效与静强度预测分析具体流程同文献[12]。

3 层合板接头静载累积损伤强度分析与试验验证

使用本文建立的有拧紧力矩层合板接头静载损伤失效分析方法, 对 T300/BMP 316 含辅助铺层及主铺层层合板接头静拉伸损伤扩展、累积及强度进行预测分析, 其中分别考虑两种尺寸类型, 统一施加拧紧力矩为 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。接头层合板主铺层顺序为 $[\pm 45/90/0/-45/0/45/0/90/0]_s$, 辅助铺层顺序为 $[0_2/0_2/90_2/90_2/-45_2/45_2]$ 。

本文含辅助铺层层合板接头静强度统一取 $\sigma = P/(W \times \text{安装孔处厚度})$ 。根据该材料层合板接头试验结果, 取材料退化折减系数 $k = 0.04$ 。

T300/BMP 316 单层板材料属性为: $E_1 = 128.8 \text{ GPa}$, $E_2 = E_3 = 8.94 \text{ GPa}$, $G_{12} = G_{13} = 5.66 \text{ GPa}$, $G_{23} = 3.03 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.328$, $\nu_{23} = 0.477$, $X_T = 1298.2 \text{ MPa}$, $X_C = 1040.74 \text{ MPa}$, $Y_T = Z_T = 64 \text{ MPa}$, $Y_C = Z_C = 185 \text{ MPa}$, $S_{12} = S_{13} = 102 \text{ MPa}$, $S_{23} = 30 \text{ MPa}$; 单个铺层厚度为 0.125 mm ; 盖板、螺栓、螺母及垫圈材料常数为: 弹性模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 泊松比为 0.3 。

对于每种类型的层合板接头, 初始施加均布载荷 10 MPa , 每次施加均布载荷增量为 10 MPa , 使用材料非线性及几何非线性方法对其求解; 模拟过程中, 以层合板接头不能继续承载为其结构最终破坏标准。

3.1 有拧紧力矩层合板接头累积损伤强度分析与验证

1) 含辅助铺层层合板接头

本文建立的含辅助铺层层合板接头结构有限元分网如图 2 所示, 层合板单元数量为 12016 个。

对施加拧紧力矩的 $E/D = 3$, $W/D = 3$ 及 $E/D = 2$, $W/D = 5$ 类型含辅助铺层层合板接头进行强度预测及损伤累积分析。本文分析方法计算的层合板接头静拉伸强度结果与试验结果对比如表 1 所示(试验方法、过程及试样静拉伸破坏强度结果详见文献[15, 17])。从表可以看出, 本文预测结果与试验结果吻合性较好。

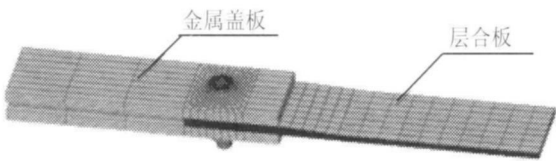


图 2 含辅助铺层层合板接头有限元模型示意图
Fig. 2 Finite element model of the composite joint with auxiliary plies

表 1 层合板接头静强度计算结果与试验结果对比
Table 1 Comparison between experimental and predicted results for the laminate joints

W/D	E/D	本文强度 计算值/MPa	本文强度试验 均值 ^[15,17] /MPa	误差/%
5	2	131.25	128.88	1.84
3	3	212.50	253.51	- 16.18

由于本文试验件有限,施加拧紧力矩工况时,并没对其进行分级加载试验研究.因此,仅用模拟得出的层合板接头最终损伤状态与试验中相应类型试样最终破坏 X 光照片损伤范围进行对比,如图 3 所示.从图可以看出,本文模拟的层合板接头最终破坏损伤范围与试验结果吻合较好.

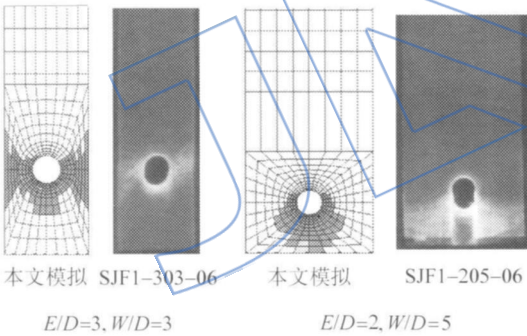


图 3 含辅助铺层层合板接头预测结果与试验 X 光照片对比

Fig. 3 Comparison between the predicted results and experimental X radiographs for the laminate joint with auxiliary plies

2) 主铺层层合板接头

本文建立的主铺层层合板接头结构有限元分网如图 4 所示,层合板单元数量为 8 000 个.

对施加拧紧力矩 $E/D=3, W/D=3$ 及 $E/D=2, W/D=5$ 类型主铺层层合板接头进行静强度预测及逐渐损伤扩展模拟.本文分析方法预测的静拉伸强度结果与相应试验结果对比情况如表 2 所示.从表中误差对比结果可以看出,用本模型计算的结果与试验结果吻合较好.

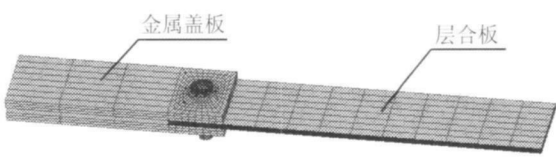


图 4 主铺层层合板接头有限元模型示意图
Fig. 4 Finite element model of the composite joint without auxiliary plies

表 2 主铺层层合板接头静强度计算结果与试验结果对比
Table 2 Comparison between experimental and predicted results for the composite joints without auxiliary plies

W/D	E/D	本文强度 计算值/MPa	本文强度试验 均值 ^[15,17] /MPa	误差/%
5	2	160	133.81	19.57
3	3	240	248.22	- 3.31

本文模拟得出的上述层合板接头最终损伤破坏与试验的 X 光照片损伤对比情况,如图 5 所示.从图可以看出,对于 $E/D=3, W/D=3$ 类型层合板接头,试验结果显示,试样发生明显分层,而本文模拟结果中分层损伤程度相对少些,但总体对比结果仍令人满意.

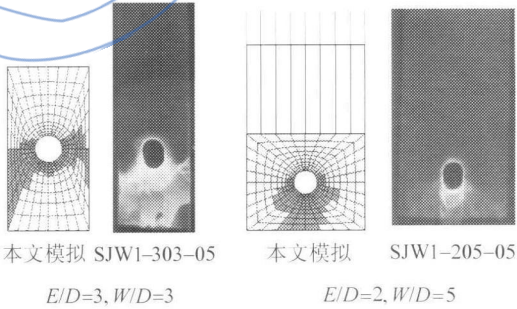


图 5 主铺层层合板接头预测结果与试验 X 光照片对比

Fig. 5 Comparison between the predicted results and experimental X radiographs for the laminate joint without auxiliary plies

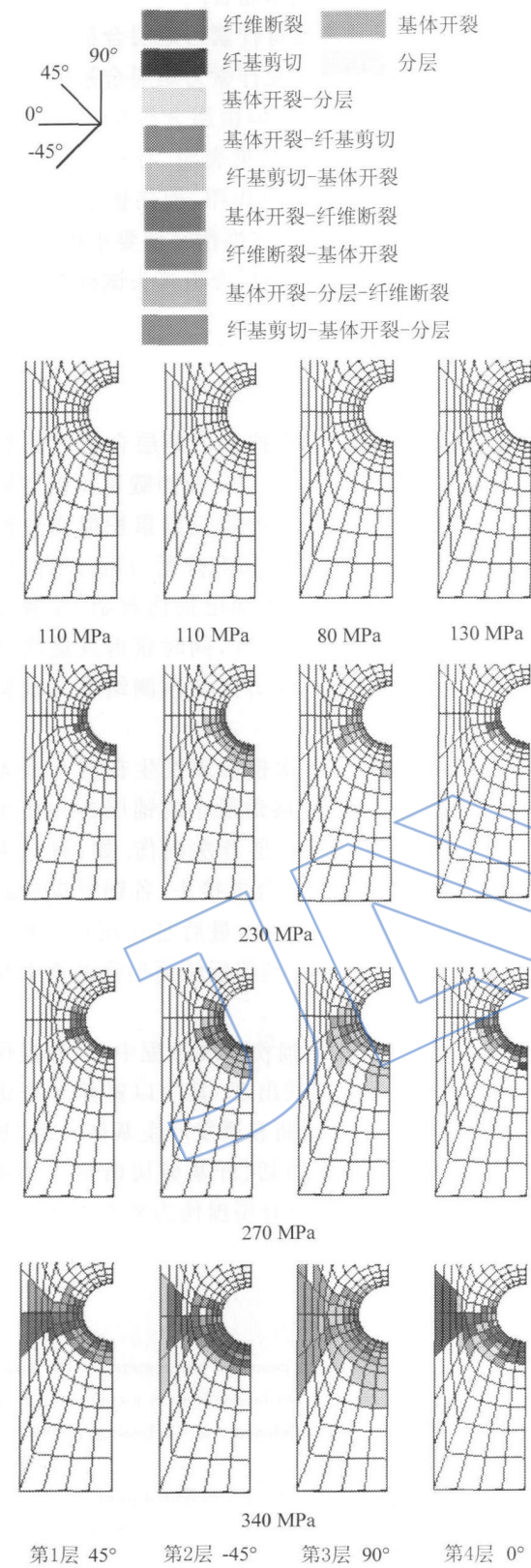
3.2 层合板接头静载累积损伤扩展规律进一步分析

本文以有拧紧力矩含辅助铺层层合板接头为例,对其静载累积损伤扩展规律做进一步模拟分析,施加拧紧力矩为 $8\text{ N}\cdot\text{m}$.

1) 有拧紧力矩 $E/D=3, W/D=3$ 类型含辅助铺层接头损伤规律分析

图 6 简要描述了有拧紧力矩 $E/D=3, W/D=3$ 类型含辅助铺层层合板接头静拉伸第 1, 2, 3, 4

铺层逐渐损伤扩展过程.



图中“基体开裂-分层”表示为: 单元先发生基体开裂损伤, 然后由此诱发产生分层损伤形式; “基体开裂-分层-纤维断裂”表示为: 单元先发生基体开裂损伤, 然后由此诱发产生分层损伤形式, 之后又由以上两种损伤基本类型诱发产生纤维断裂, 最终该单元出现三种损伤基本类型相互关联共存形式; 其它表示意思与此类似.

层合板接头在静拉伸载荷作用下, 当载荷增至 80, 110 MPa 及 130 MPa 时, 90°, ±45° 及 0° 铺层相继出现该层首次损伤. 随着载荷的增加, 各铺层损伤不断向层合板接头端部及板宽方向累积扩展. 损伤扩展后期, 层合板接头各铺层损伤沿板宽方向扩展速度已强于向端部方向扩展速度. 载荷达到 340 MPa 时, 各铺层损伤都扩展至板宽边缘, 层合板接头失去继续承载能力, 结构最终破坏, 破坏模式为挤压-拉伸组合破坏方式, 并以拉伸破坏为主, 与试验中该类型层合板接头静载破坏模式吻合.

对于第一铺层 45° 层, 损伤类型以纤维断裂与基体开裂相互关联损伤共存为主; 对于第二铺层 -45° 层, 由于其损伤受相邻 90° 铺层损伤影响, 其损伤形式与 45° 铺层损伤并不相同, 损伤类型更为多样, 纤维断裂、基体开裂-分层-纤维断裂、基体开裂-分层损伤形式都相当明显; 对于第三铺层 90° 层, 损伤主要以基体开裂-纤维基剪切、基体开裂及基体开裂-分层损伤形式为主, 其中分层损伤形式在 90° 铺层中非常明显; 对于第四铺层 0° 层, 损伤主要以纤维断裂为主, 损伤区夹杂着部分由纤维断裂诱发产生的多种损伤类型.

b) 有拧紧力矩 $E/D=2$, $W/D=5$ 类型含辅助铺层接头损伤规律分析

图 7 简要描述了有拧紧力矩 $E/D=2$, $W/D=5$ 类型含辅助铺层层合板接头静拉伸第 1, 2, 3, 4 铺层逐渐损伤扩展过程.

从图中可以看到, 与 $E/D=3$, $W/D=3$ 类型层合板接头一样, 不同角铺层首次损伤出现的顺序为 90°, ±45° 及 0° 铺层, 这是因为: 当 0° 方向受载时, 对于 90° 铺层, 承载能力主要依靠基体; 对于 ±45° 铺层, 承载能力依靠纤维及基体共同承担; 而对于 0° 铺层, 承载能力主要依靠纤维承担, 然而基体强度远远低于碳纤维强度, 因此基体裂纹群起始于 90° 铺层.

随着载荷增加, 层合板接头螺栓安装孔受挤压区各铺层损伤逐渐增多, 层合板接头损伤逐渐加重, 并主要沿螺栓挤压方向扩展. 当载荷增加至

图 6 层合板接头累积损伤示意图 $E/D=3$, $W/D=3$
Fig. 6 Illustration of damage propagation for the laminate joint $E/D=3$, $W/D=3$

210 MPa 时, 各铺层损伤都扩展至层合板接头端部, 导致层合板接头最终发生破坏, 失去继续承载能力。图中可以清楚看出, 层合板接头破坏模式为挤压-剪切组合破坏, 并以剪切破坏为主, 与该类型层合板接头静拉伸试验破坏模式吻合。

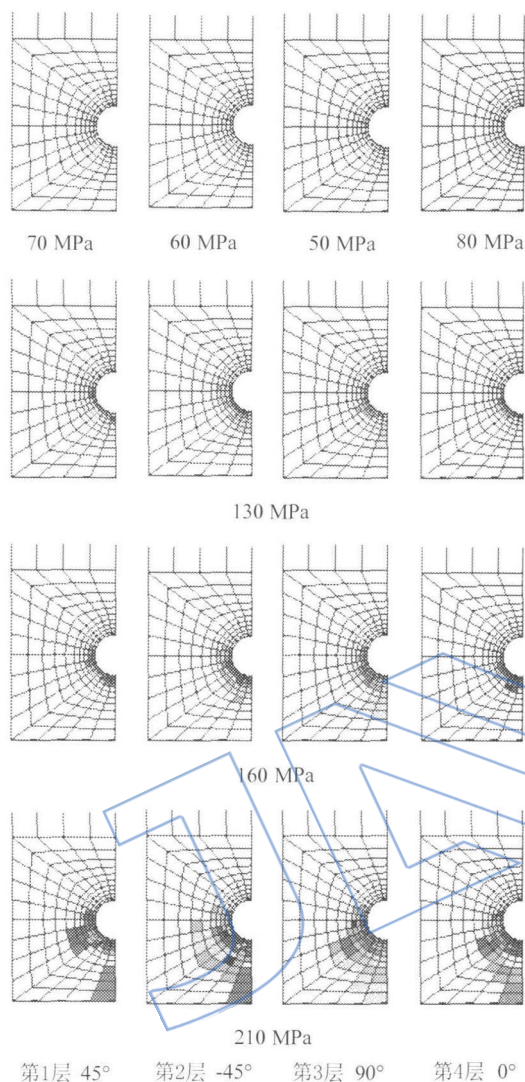


图7 层合板接头累积损伤示意图 $E/D=2$, $W/D=5$

Fig. 7 Illustration of damage propagation

for the laminate joint. $E/D=2$, $W/D=5$

此时, 对于 0° 铺层, 损伤以纤维断裂及纤维断裂-基体开裂相互关联形式为主, 同时并伴随着部分基体开裂纤维剪切等多种损伤形式; 对于 90° 铺层, 损伤以基体开裂分层、基体开裂-纤维断裂相互关联形式为主; 对于 $\pm 45^\circ$ 铺层, 在螺栓安装孔周围, 损伤以基体开裂-纤维断裂相互关联形式为主, 在外围, 则以基体开裂-纤维断裂损伤为主; 比较各铺层出现的损伤类型, 可以看出, 四种基本损伤类型往往都是相互关联出现, 在 90° 铺层中基体开裂诱发产生的分层损伤

比较明显, 这和试验该类型层合板接头试样最终破坏出现明显分层现象相吻合。

以上两种尺寸类型有拧紧力矩层合板接头各铺层损伤机理与同类型无拧紧力矩层合板接头破坏各铺层损伤机理相似, 但由层合板接头最终破坏各铺层损伤区域对比结果表明, 有拧紧力矩层合板接头由于受法向约束作用, 损伤扩展受到一定程度的制约, 各铺层最终损伤区域要小得多, 与试验中两种不同拧紧力矩层合板接头试样损伤程度相符。

4 结论

1) 通过不同类型有拧紧力矩层合板接头静强度预测结果与试验结果对比及静载累积损伤规律分析表明, 本文建立的静载三维累积损伤分析的强度预测方法可方便模拟有拧紧力矩时不同结构尺寸层合板接头内部各铺层损伤起始、发展及结构最终破坏整个累积过程, 同时获得其最终破坏强度及破坏模式, 本文方法的预测结果与试验结果吻合较好。

2) 层合板接头首次损伤多发生在拥有最大铺层角的铺层中, 而铺层角最小的铺层往往相比其它角铺层最后出现该层首次损伤。如: 对包含 0° 、 $\pm 45^\circ$ 及 90° 铺层的层合板接头, 各铺层损伤起始于 90° 层, 然后是 $\pm 45^\circ$ 层, 最后是 0° 层; 90° 铺层中产生的损伤直接影响到邻近铺层损伤的产生及扩展。

3) 层合板接头在损伤扩展过程中, 四种损伤基本类型相应互相关联出现。其中以基体开裂诱发产生纤维断裂、纤维断裂诱发产生基体开裂、基体开裂诱发产生纤维剪切、纤维剪切诱发产生基体开裂及基体开裂诱发产生分层损伤为最常见相互关联作用形式。

参考文献

- [1] Conti P. Influence of geometric parameters on the stress distribution around a pin loaded hole in a composite laminate[J]. Composites Science and Technology, 1986, 25: 1-19.
- [2] Eriksson L I. Contact stresses in bolted joints of composite laminates[J]. Composite Structures, 1986, 6: 57-75.
- [3] Ramamurthy T S. Recent studies on the behaviour of interference fit pins in composite plates[J]. Composite Structures, 1989, 13: 81-99.
- [4] Whitney J M, Nuismer R J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations[J]. Journal of Composite Materials, 1974, 8: 253-265.

- [5] Chang F K, Chang K Y. Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear out mode failure[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21: 809-833.
- [6] Lessard L B, Shokrieh M M. Two dimensional modeling of composite pinned joint failure[J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29: 671-697.
- [7] 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.
- [8] Cooper C, Turvey G J. Effects of joint geometry and bolt torque on the structural performance of single bolt tension joints in pultruded GRP sheet material[J]. Composite Structures, 1995, (32): 217-226.
- [9] Matthews F L, Kilty P F, Godwin E W. Load carrying joints in fibre reinforced plastics[J]. Plastic and Rubber Process and Application, 1982, 2: 19-25.
- [10] Kretsis G, Matthews F L. The strength of bolted joints in glass fibre/epoxy laminates[J]. Composites, 1985, 16: 92-105.
- [11] Chen W H, Lee S S, Yeh J T. Three dimensional contact stress analysis of a composite laminate with bolted joint[J]. Composite Structures, 1995, 30: 287-297.
- [12] 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.
- WANG Danyong, WEN Weidong, CUI Haitao. Three dimensional progressive damage analysis of single fastener joints in composite laminates[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2005, 22(3): 168-174. (in Chinese)
- [13] 王丹勇, 温卫东, 崔海涛. 含材料非线性的复合材料单钉接头累积损伤分析[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2): 186-190.
- WANG Danyong, WEN Weidong, CUI Haitao. Progressive damage analysis considering the material nonlinearity of composite laminates containing a hole[J]. Acta Mechanica Sinica, 2006, 27(2): 186-190. (in Chinese)
- [14] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47: 329-335.
- [15] 王丹勇. 层合板接头损伤失效与疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- WANG Danyong. Research on prediction of damage failure and fatigue life for composite bolted joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [16] 汪裕炳, 张全纯. 复合材料的结构连接[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992: 11-12.
- [17] 王丹勇, 温卫东. 复合材料单钉接头损伤失效试验[J]. 航空动力学报, 2007, 23(2): 286-292.
- WANG Danyong, WEN Weidong. Experiments on damage failure of single bolted joints in composite laminates[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 23(2): 286-292. (in Chinese)