

碳纤维增强环氧树脂复合材料与铝板胶螺混合连接接头失效仿真

刘志明^{*}，许昶

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘 要: 基于商用有限元软件 ABAQUS, 建立了碳纤维增强环氧树脂复合材料(CFRP)层合板和铝板双搭接胶螺混合连接接头强度预测模型, 并进行了仿真分析, 同时与试验结果进行对比, 探究了此类混合接头在拉伸载荷工况下的失效形式和承载能力。结果表明, 拉伸加载过程中, 螺栓通过分担部分载荷加强了胶接连接。混合接头的失效形式先表现为胶层的断裂失效, 最终表现为层合板孔边挤压失效。利用模型预测的接头承载能力与试验结果的误差为 9.7%, 具有较好的吻合性。该分析方法能够为复合材料-金属胶螺混合连接的分析和设计提供一定的参考。

关键词: 碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP); 胶螺混合连接接头; 有限元分析; 失效; 承载力

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)10-2308-08

Failure simulation of carbon fiber reinforced epoxy resin composite-aluminum bonded-bolted hybrid joint

LIU Zhiming^{*}, XU Chang

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the software ABAQUS, the strength prediction model of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-aluminum bonded-bolted hybrid double-lap joint was built and simulation analysis was carried out. Comparing with the test result, the failure modes and the carrying capacity of the joint were studied under the tensile load condition. It is shown that the adhesive joint can be reinforced with the load-sharing of the bolt. The hybrid joint firstly suffers the fracture failure of the adhesive and reaches the final failure when the bearing failure appears near the hole. The carrying capacity of the joint predicted by the model has the error value of 9.7%, which illustrates good consistency with the test result. This method can offer some references for the analysis and design of the composite-metal bonded-bolted hybrid joints.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); bonded-bolted hybrid joint; finite element analysis; failure; carrying capacity

随着复合材料制造技术的不断进步, 高性能复合材料在飞机、汽车、船舶等主承载结构中应用的占比越来越大。同时, 我国十三五期间轨道车辆研发的重点之一是碳纤维列车, 而探究车体中关键结构连接接头失效模式对于确定车体检修方式和维护周期十分重要。复合材料和金属的搭接形式广泛存在于这些主承载结构当中, 常见的连接方式有胶接连接、机械连接和混合连接三种, 混合连接作为一

种新型连接方式, 其应用较胶接连接和机械连接晚, 且设计之初仅仅是为了提高结构的安全冗余。但是随着研究的不断深入, 发现通过合理的结构设计, 混合连接相较于胶接连接和机械连接在静强度和疲劳性能方面都有较明显的提升。

目前, 针对复合材料和金属混合连接结构的研究多是以单搭接或者双搭接接头为研究对象, 通过试验对比混合接头和胶接接头、机械连接接头在静

收稿日期: 2018-09-29; 录用日期: 2018-11-22; 网络出版时间: 2018-12-20 16:32

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181217.002>

基金项目: 十三五国家重点研发计划(2016YFB1200505-011)

通讯作者: 刘志明, 博士, 教授, 研究方向为结构疲劳及其可靠性 zhmlui1@m.bjtu.edu.cn

引用格式: 刘志明, 许昶. 碳纤维增强环氧树脂复合材料与铝板胶螺混合连接接头失效仿真[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2308-2315.
LIU Zhiming, XU Chang. Failure simulation of carbon fiber reinforced epoxy resin composite-aluminum bonded-bolted hybrid joint [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(10): 2308-2315 (in Chinese).

强度和疲劳性能方面的差异, 并分析造成混合接头性能优于胶接接头和机械连接接头的参数特征^[1-8]。然而, 试验研究一般成本较高、耗时较长, 相比之下, 利用理论解析法和有限元方法预测混合接头的强度和失效形式更有效率, 且有利于参数化研究。Bois 等^[9]通过建立半解析模型的方法预测碳纤维增强环氧树脂复合材料(CFRP)层合板-铝板混合接头的强度, 考虑了胶层的塑性失效和螺栓的挤压失效、净拉伸失效两种失效模式, 并与试验和有限元结果进行比较, 验证模型的准确性。Paroissien 等^[10]利用一维梁理论模型分析了胶层剪应力和剥离应力分布, 并较准确地预测了混合接头的强度, 该模型对被粘物的材料属性没有限制, 适用于复合材料-金属混合接头的分析。马毓等^[11]利用复合材料胶螺混合接头传力机制和胶-螺之间的变形协调条件计算了胶接连接和螺栓连接承担的载荷, 进而得出混合接头的承载力, 理论值与试验值吻合较好。袁辉等^[12]在文献[11]的研究基础上通过理论分析与试验对比的方法, 研究了胶层厚度、螺栓位置、螺栓刚度等参数对胶-螺混合接头承载力的影响规律与机制, 分析了现有承载力计算公式的适用范围。程小全等^[13]基于 ANSYS 平台建立了平面编织复合材料-钢胶螺混合连接三维损伤扩展模型, 其中融入了非线性接触问题, 数值计算的结果与试验结果吻合良好。孟毛毛等^[14]则利用 ABAQUS 软件建立了复合材料-铝胶螺混合连接三维渐进损伤模型, 对比分析了胶接结构、螺接结构和混合结构的强度和承载机制, 并讨论了钉头形式及宽径比对混合连接结构强度和损伤形式的影响。

考虑到针对复合材料-金属胶螺混合搭接接头失效的有限元分析仍然较少, 本文在前人的试验研究基础上, 提出了一种同时考虑复合材料层合板渐进损伤模型和胶层弹塑性模型的 CFRP 层合板-铝板胶螺混合搭接接头强度预测模型, 并基于 ABAQUS 平台内部子程序 VUMAT 实现对 CFRP 和胶层的本构编写及失效判定, 进而对胶螺混合连接接头的承载能力和失效形式进行了分析。

1 CFRP 层合板-铝板胶螺混合连接接头

文献[15]对 CFRP 层合板-铝板胶螺双搭接混合连接接头进行了试验研究, 研究表明, 胶螺混合连接接头相较于纯胶接和机械连接接头强度均有提高, 且机械连接接头强度约为纯胶接接头强度的

2.4 倍。本文以此试验所用的试样结构及材料参数为基础, 将试验结果数据作为对比对象进行胶螺混合连接接头强度预测模型的验证。

使用 ABAQUS 有限元分析软件建立 CFRP 层合板-铝板胶螺混合连接接头三维有限元计算模型。混合接头尺寸示意图如图 1 所示^[15]。混合接头为双搭接结构, 上下被粘物为 CFRP 层合板, 中间被粘物为 Al 板, 搭接区为 25.4 mm×25.4 mm 的正方形。

CFRP 层合板由 USN125 碳纤维/环氧树脂复合材料预浸料固化形成, 铺层次序为 $[\pm 45/0/90]_{2s}$ 。单向板厚度为 0.114 mm, 单向板的基本材料属性如下^[15]: $E_1=131\text{ GPa}$, $E_2=8.2\text{ GPa}$, $\nu_{12}=0.281$, $G_{12}=4.5\text{ GPa}$, $X_T=2\text{ GPa}$, $X_C=1.4\text{ GPa}$, $Y_T=61\text{ MPa}$, $Y_C=130\text{ MPa}$, $S=70\text{ MPa}$ 。其中: E_1 、 E_2 分别为单向板纵、横向的杨氏模量; G_{12} 为单向板纵向的剪切模量; ν_{12} 为单向板纵向的泊松比; X_T 、 X_C 分别为单向板纵向拉伸、压缩强度; Y_T 、 Y_C 分别为单向板横向拉伸、压缩强度; S 为单向板剪切强度。其余材料属性为 $E_3=E_2$, $\nu_{13}=\nu_{12}$, $G_{13}=G_{12}$, $G_{23}=3.5\text{ GPa}$, $\nu_{23}=0.47$, $S_{13}=S_{12}=S$, $S_{23}=40\text{ MPa}$ ^[16]。依据复合材料横观各向同性假设, $Z_T=Y_T$, $Z_C=Y_C$ 。

铝板采用 7075-T62 铝材, 厚度为 3.224 mm, 杨氏模量为 71.0 GPa, 泊松比为 0.33, 屈服强度为 505 MPa。紧固螺栓采用美国航空标准紧固件 NAS6203-05, 直径为 4.763 mm, 螺栓材料的杨氏模量为 206.0 GPa, 泊松比为 0.3。螺栓通过施加 0.5 N·m 的预紧扭矩仅为起到连接作用^[17]。预紧力通过下式换算得出^[18]:

$$F_{\text{bolt}} = T/(kd) \tag{1}$$

其中: T 表示预紧扭矩; d 表示螺栓直径; k 取值 0.2。胶层材料采用 EA9394S, 胶层厚度为 0.12 mm。材料的实测拉伸应力-应变曲线如图 2 所示, 选取

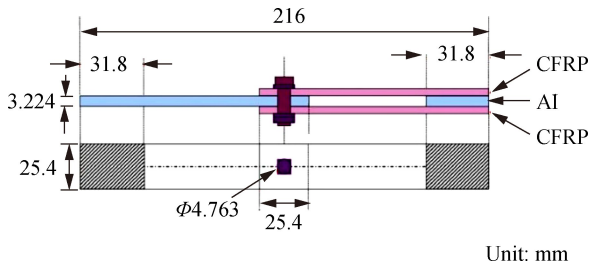


图 1 碳纤维增强聚合物复合材料(CFRP)层合板-铝板胶螺混合连接接头尺寸示意图
Fig. 1 Diagram of size of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-aluminum bonded-bolted hybrid joint

0.2%塑性变形对应的应力值为胶层材料屈服应力，应力-应变曲线最大应力为胶层材料强度极限，胶层材料的杨氏模量为4.2 GPa，泊松比为0.45，屈服强度为31.98 MPa，强度极限为43.59 MPa。

混合接头的三维有限元分析模型如图3所示。模型中CFRP层合板在厚度方向上每个铺层采用一个单元，单元类型为三维实体单元C3D8R。胶层采用内聚力单元COH3D8，在厚度上划分为一层。胶层单元与层合板单元通过共节点连接。在接头搭接区两侧端部和螺栓孔附近通过加密网格的方式以便更好地捕捉应力信息，考虑到胶层的厚度尺寸，搭接区两侧端部的网格尺寸设置为0.12 mm，且向远端部长度和厚度方向采用渐变种子布局，局部网格加密如图4所示。模型划分单元数量为138 992个，其中内聚力单元数量为3 328个。

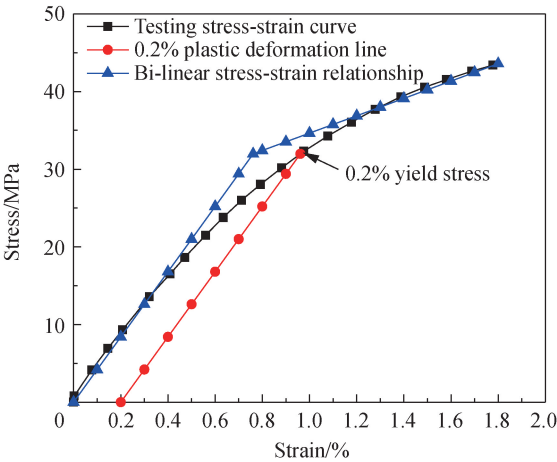


图2 胶层材料拉伸应力-应变关系

Fig.2 Stress-strain relationship of the adhesive material

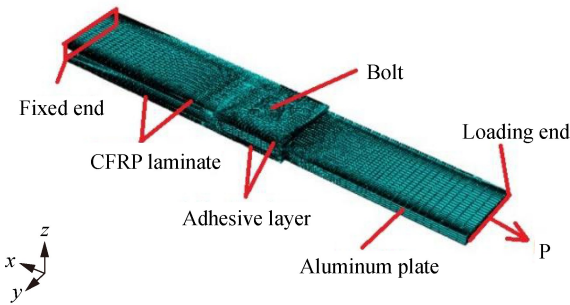


图3 CFRP层合板-铝板胶螺混合连接接头三维有限元模型

Fig.3 3D finite element model of the CFRP-aluminum bonded-bolted hybrid joint

2 胶螺混合连接接头力学失效模型

2.1 CFRP层合板渐进损伤模型

CFRP的损伤是一个渐进的过程，结构薄弱部

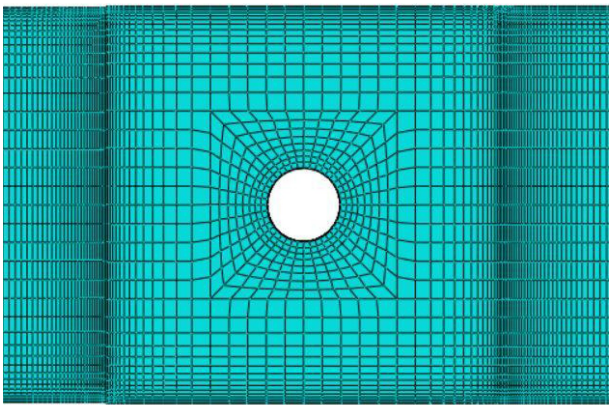


图4 CFRP层合板-铝板胶螺混合连接接头模型局部网格加密图

Fig.4 Local mesh refinement of CFRP-aluminum bonded-bolted hybrid joint model

位的失效会引起载荷的重新分配，损伤导致CFRP层合板的刚度不断衰减，最终达到失效。应用渐进损伤分析模型模拟CFRP层合板的失效行为，采用三维Hashin失效准则预测CFRP层合板的纤维和基体失效，采用Yeh准则预测CFRP层合板的分层失效，具体描述如下^[19]：

纤维拉伸模式 ($\sigma_1 \geq 0$)

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = \begin{cases} \geq 1 & \text{Failure} \\ < 1 & \text{No failure} \end{cases} \tag{2}$$

纤维压缩模式 ($\sigma_1 < 0$)

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 = \begin{cases} \geq 1 & \text{Failure} \\ < 1 & \text{No failure} \end{cases} \tag{3}$$

基体拉伸模式 ($\sigma_2 + \sigma_3 \geq 0$)

$$\left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S_{23}^2} = \begin{cases} \geq 1 & \text{Failure} \\ < 1 & \text{No failure} \end{cases} \tag{4}$$

基体压缩模式 ($\sigma_2 + \sigma_3 < 0$)

$$\left[\left(\frac{Y_C}{2 S_{12}}\right)^2 - 1\right] \left[\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{Y_C}\right] + \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2 S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_2 \sigma_3}{S_{23}^2} = \begin{cases} \geq 1 & \text{Failure} \\ < 1 & \text{No failure} \end{cases} \tag{5}$$

拉伸分层模式 ($\sigma_3 \geq 0$)

$$\left(\frac{\sigma_3}{Z_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = \begin{cases} \geq 1 & \text{Failure} \\ < 1 & \text{Nofailure} \end{cases} \tag{6}$$

剪切分层模式 ($\sigma_3 < 0$)

$$\left(\frac{\tau_{23}}{S_{23}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2 = \begin{cases} \geq 1 & \text{Failure} \\ < 1 & \text{No failure} \end{cases} \tag{7}$$

其中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 1、2、3 方向的正应力; τ_{12} 、 τ_{13} 、 τ_{23} 分别为 1-2、1-3、2-3 方向的剪应力。

CFRP 刚度退化准则选择改进的 Tan 退化准则^[20], 如表 1 所示。

2.2 胶层弹塑性模型

本文将胶层用内聚力单元模拟, 由于内聚力单元是一层界面单元, 单元应力仅包括垂直于界面的法向应力和两个面外的剪应力。同时, 考虑胶层的弹塑性本构, 将胶层的应力-应变曲线简化为双线性应力-应变关系, 如图 2 所示, 其表达式为

$$\sigma = \begin{cases} 4200\epsilon & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_s \\ 31.98 + 1117.88(\epsilon - \epsilon_s) & \epsilon_s \leq \epsilon \leq \epsilon_f \end{cases} \quad (8)$$

其中: ϵ_s 为胶层材料屈服应力对应的应变值; ϵ_f 为胶层材料强度极限对应的应变值。

表 1 CFRP 刚度退化准则

Failure modes	Stiffness degradation rules
Fiber tensile failure ($\sigma_1 \geq 0$)	$E'_1 = 0.07 E_1$
Fibercompressive failure ($\sigma_1 < 0$)	$E'_1 = 0.14 E_1$
Matrix tensile failure ($\sigma_2 + \sigma_3 \geq 0$)	$E'_2 = 0.2 E_2, G'_{12} = 0.2 G_{12}, G'_{23} = 0.2 G_{23}$
Matrix compressive failure ($\sigma_2 + \sigma_3 < 0$)	$E'_2 = 0.4 E_2, G'_{12} = 0.4 G_{12}, G'_{23} = 0.4 G_{23}$
Tensile delamination failure ($\sigma_3 \geq 0$)	$\nu'_{13} = 0.2 \nu_{13}, \nu'_{23} = 0.2 \nu_{23}, E'_3 = 0.2 E_3, G'_{13} = 0.2 G_{13}, G'_{23} = 0.2 G_{23}$
Shear delamination failure ($\sigma_3 < 0$)	$\nu'_{13} = 0.2 \nu_{13}, \nu'_{23} = 0.2 \nu_{23}, E'_3 = 0.2 E_3, G'_{13} = 0.2 G_{13}, G'_{23} = 0.2 G_{23}$

Notes: $E'_i(i=1,2,3)$ —Young's Modulus of the laminate in three directions after degradation; $G'_{13}, G'_{13}, G'_{23}$ —Shear Modulus of the laminate in three directions after degradation; $\nu'_{12}, \nu'_{13}, \nu'_{23}$ —Poisson's ratio of the laminate in three directions after degradation; Other parameters have been defined in the previous description.

胶层的塑性判定选用工程中常用的 Von-Mises 准则, 其等效应力表达式为

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} = \left[\frac{3}{2} (\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2 \tau_{12}^2 + 2 \tau_{23}^2 + 2 \tau_{31}^2) \right]^{1/2} \quad (9)$$

其中: σ_e 表示等效应力; σ_i 表示主应力大小, $i = 1, 2, 3$; σ_{ij} 表示应力张量分量大小, $i, j = 1, 2, 3$ 。

对于连续塑性, 等效应力还可以表示为

$$\sigma_e = \left[\frac{3}{2} \boldsymbol{\sigma}' : \boldsymbol{\sigma}' \right]^{1/2} \quad (10)$$

其中: $\boldsymbol{\sigma}'$ 表示应力偏量, 定义为 $\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3} Tr(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{I}$;

$\boldsymbol{\sigma}' : \boldsymbol{\sigma}'$ 二阶张量的计算公式为 $\boldsymbol{\sigma}' : \boldsymbol{\sigma}' = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}$ 。

考虑线性各向同性强化, 在连续塑性条件下, 屈服方程可以表示为^[21]

$$f(\boldsymbol{\sigma}, p) = \sigma_e(\boldsymbol{\sigma}) - \sigma_{y0} - r(p) \quad (11)$$

其中: $\sigma_e(\boldsymbol{\sigma})$ 表示等效应力; σ_{y0} 表示开始产生屈服时的应力; $r(p)$ 表示塑性强化应力。

胶层进入塑性阶段后, 当塑性强化应力超过胶层材料的强度极限或胶层的剪切应力超过胶层材料的剪切强度时, 胶层失效。

2.3 CFRP 层合板力学失效模型的 ABAQUS 实现

由于混合接头包含 CFRP 层合板、胶层、铝板和钢螺栓 4 个组成部分, 不同材料力学性能的差异使接头在纵向拉伸载荷的作用下呈现较复杂的力学行为, 加之开孔螺栓与各板和胶层之间存在非线性接触, 若用 ABAQUS 隐式分析, 材料的退化和失效极易造成分析的不收敛, 使结构未达到最大承载能力便停止计算。章继峰等^[22]在分析复合材料层合板螺栓连接试件时提出将复合材料层合板螺栓连接的静力拉伸作为一个准静态问题, 运用 ABAQUS 显式分析替代隐式分析进行结构的失效模拟, 数值计算的结果与试验结果有较好的一致性。考虑到基于 ABAQUS/Standard 求解模型产生的不收敛现象, 本文利用 ABAQUS/Explicit 模块, 结合相应的复合材料失效准则及刚度折减规律, 同时考虑胶层双线性弹塑性本构关系, 编写用户材料子程序 VUMAT 进行准静态求解。

考虑到显式求解器不能利用“BOLT-LOAD”模块施加螺栓预紧力, 本文先用隐式求解器进行螺栓预紧力的施加, 计算施加预紧力后螺栓孔边的应力场, 再将此应力场作为显式分析的初始状态, 进行后续准静态求解。模型中采用小位移滑移摩擦的主从面接触算法进行接触模拟, 在切向采用罚函数(Penalty)定义, 在法向使用硬接触, 螺栓头与复合材料板之间的摩擦系数设置为 0.3, 同时考虑到螺栓孔有较光滑的表面, 且螺栓有干性润滑剂薄膜, 螺杆与孔之间的摩擦系数设置为 0.1^[23]。文献[24]在研究复合材料机械连接问题时钉孔摩擦系数也采用 0.1。

对于子程序涉及的两种材料, 通过变量 CM-NAME()进行复合材料与胶层材料的区分。

复合材料层合板渐进损伤分析 VUMAT 流程图如图 5 所示。在计算一开始, 首先基于层合板的

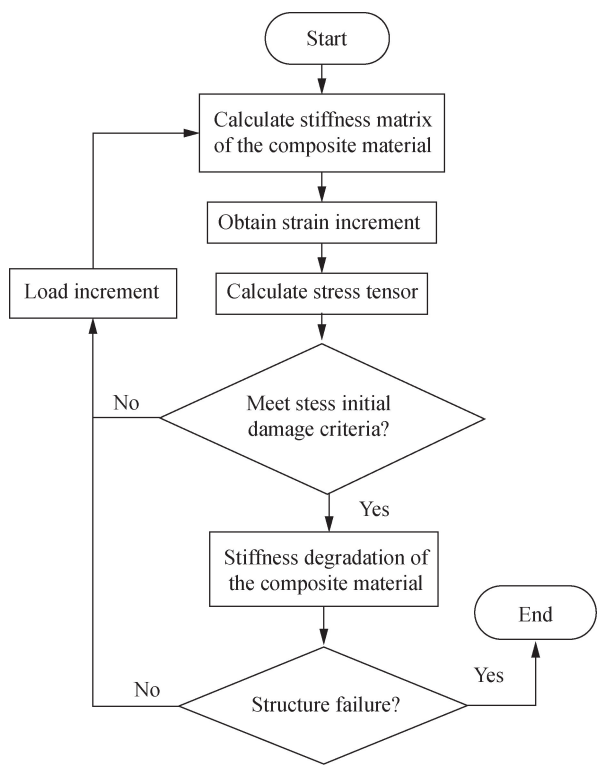


图 5 复合材料层合板渐进损伤分析 VUMAT 流程图
Fig. 5 VUMAT flowchart for progressive damage analysis of the composite laminate

本构进行初始应力的计算，随后对上一个增量步的状态损伤变量进行判别，若状态变量大于等于 1，则依据不同的损伤模式进行相应的刚度折减，否则不进行刚度折减，然后基于判别后的刚度进行应力的更新，使用更新后的应力带入损伤起始准则判别，若判据大于等于 1，相应损伤模式下的状态损伤变量变为 1，之后进入下一个增量步进行判别，如此循环，直至达到层合板的最大承载极限。

胶层失效分析 VUMAT 流程图如图 6 所示。借鉴计算塑性力学中的径向回归法^[21]，在计算一开始进行弹性尝试，随后对上一个增量步的状态变量进行提取，并利用线性插值更新当前增量步的塑性强化应力，然后计算试探应力张量和试探等效 Mises 应力，利用试探等效 Mises 应力进行塑性判断，如果进入塑性则根据等效塑性应变增量更新发生塑性后的柯西应力，并将等效塑性应变更新到状态变量当中，当塑性应力超过胶层强度极限或者当剪切应力超过胶层剪切强度时，利用状态变量进行单元的删除，模拟胶层的断裂，之后进入下一个增量步进行判别，如此循环，直至胶层破坏。

3 结果与分析

基于上述模型对 CFRP 层合板-铝板胶螺混合

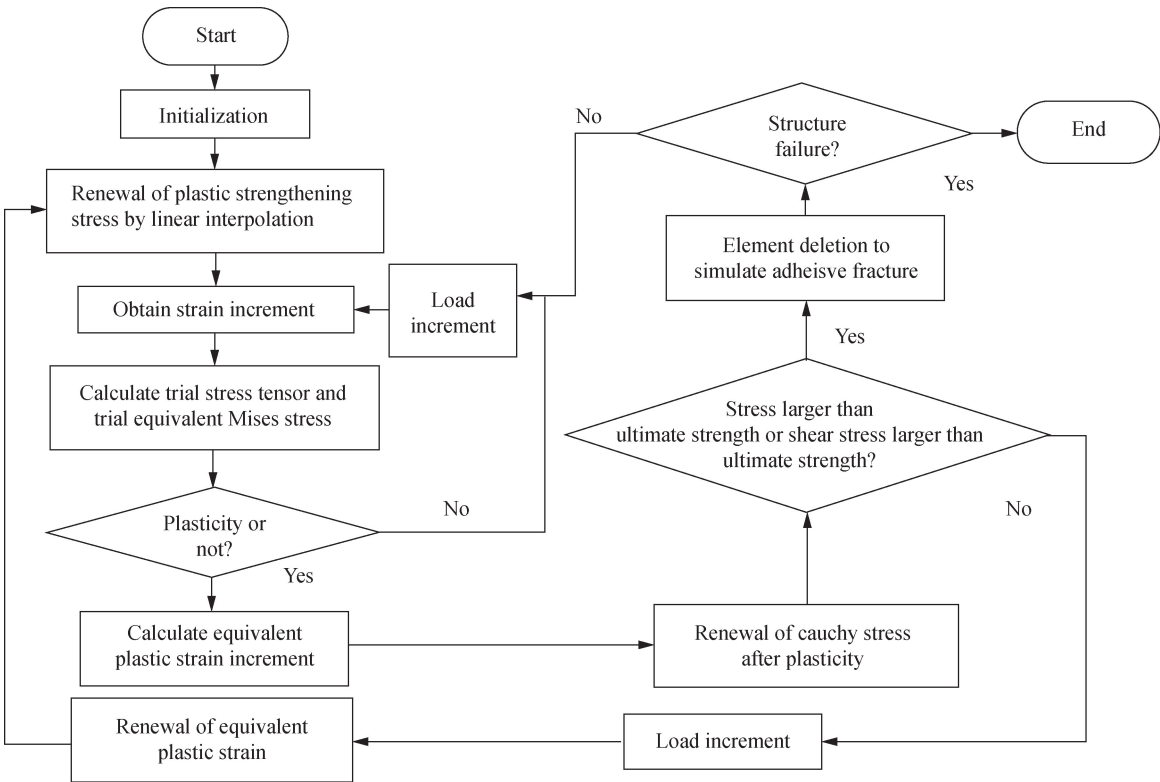


图 6 胶层失效分析 VUMAT 流程图
Fig. 6 VUMAT flowchart for failure analysis of the adhesive

连接双搭接接头进行有限元分析。为了与文献[15]中的试验结果进行比较, 定义接头失效强度为

$$S_j = P_{\max}/(2A) \tag{12}$$

其中, A 表示复合材料层合板端部横截面积。

有限元计算所得混合连接接头拉伸载荷-位移曲线如图 7 所示, 纵坐标拉伸载荷按照强度的定义给出。可知, 利用本文提出的胶螺混合接头失效预测模型计算的最终失效强度为 173.3 MPa, 相较于试验测试的平均值 192 MPa, 误差为 9.7%, 小于 10%, 与试验结果吻合较好。

混合接头的失效模式先表现为胶层的断裂, 裂纹由搭接区复合材料层合板一侧端部向内部扩展。当胶层失效后, 接头仅由螺栓承载, 载荷开始增大, 最终层合板孔边挤压破坏导致接头承载能力下降而发生最终失效。

同时, 由图 7 可以发现, 混合接头第一次出现载荷下降点对应的是胶层的失效, 失效载荷为 125.2 MPa, 相较纯胶接接头的试验测试平均值 (67.1 MPa) 高 86.6%, 说明螺栓在加载过程中分担了部分载荷使接头的承载能力显著提高。第二次出现载荷下降点对应的是层合板孔边挤压失效, 失效载荷为 173.3 MPa, 相较纯机械连接的试验测试平均值 (162 MPa) 高 7.0%。

对在轴向拉伸载荷作用下的层合板损伤破坏过程和胶层断裂进行逐步分析, 选取典型时间节点, 得到层合板孔边损伤和胶层的等效塑性应变图, 如图 8~12 所示, 其中, 图 8 和图 9 对应胶层刚刚进入塑性阶段, 图 10 和图 11 对应胶层即将失效, 图 12 对应混合接头最终失效。层合板损伤图里的

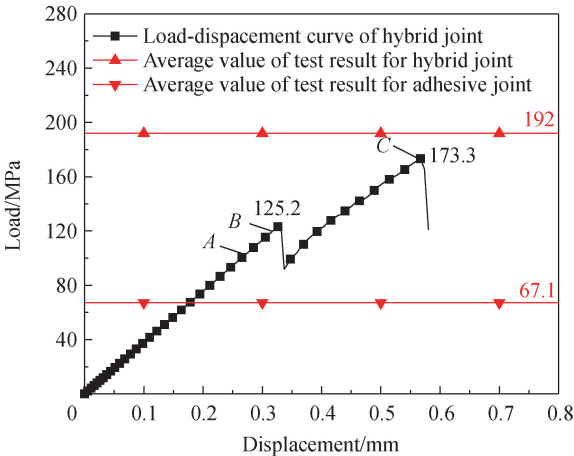


图 7 CFRP 层合板-铝板胶螺混合连接接头拉伸载荷-位移曲线
Fig. 7 Tensile load-displacement curve of the CFRP-aluminum bonded-bolted hybrid joint

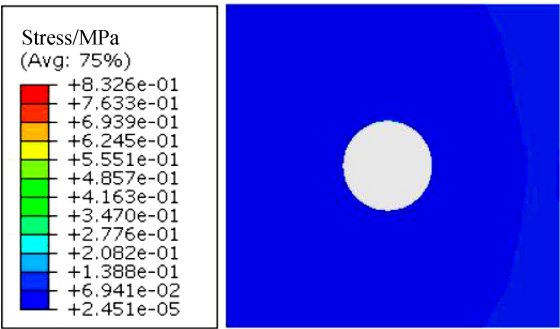


图 8 胶层刚进入塑性阶段 CFRP 层合板孔边损伤图
Fig. 8 CFRP laminate damage near the hole when the adhesive enters the plastic stage

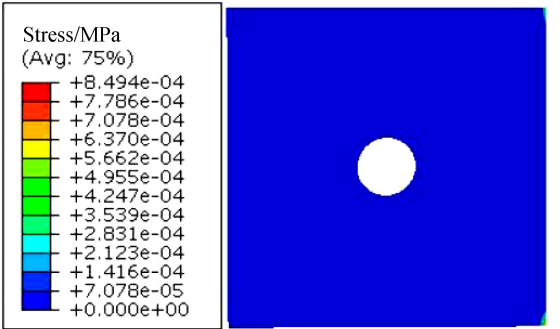


图 9 胶层刚进入塑性阶段等效塑性应变图
Fig. 9 Equivalent plastic strain when the adhesive enters the plastic stage

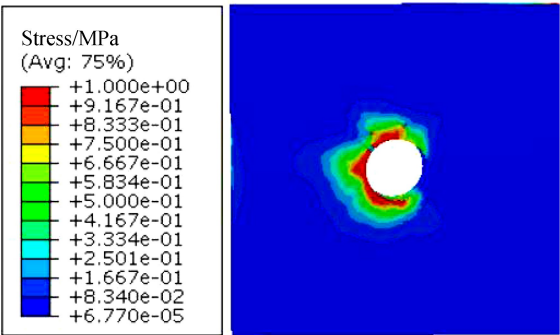


图 10 胶层即将失效时 CFRP 层合板孔边损伤图
Fig. 10 CFRP laminate damage near the hole when the adhesive is about to fail

SDV7 表示各失效模式产生损伤的叠加值。

由图 8~12 可知, 胶层刚刚进入塑性阶段时 (对应图 7 载荷-位移曲线 A 点, 载荷值为 107.7 MPa), 层合板孔边仅产生较小的损伤。从胶层进入塑性到胶层最终失效, 裂纹扩展很快。胶层即将失效时 (对应图 7 载荷-位移曲线 B 点, 载荷值为 121.2 MPa), 层合板孔边产生较大损伤, 主要以基体破坏为主。

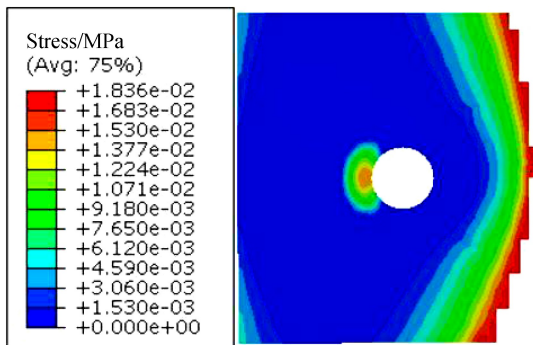


图 11 胶层即将失效时等效塑性应变图

Fig. 11 Equivalent plastic strain when the adhesive is about to fail

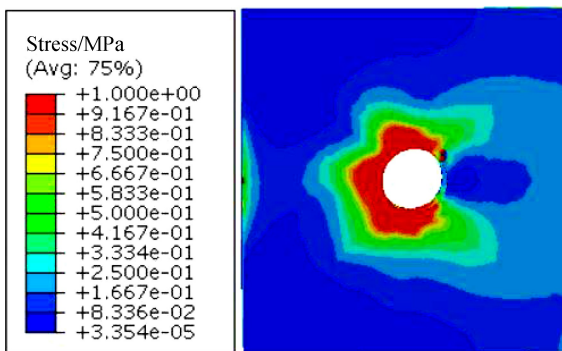


图 12 最终失效时 CFRP 层合板孔边损伤图

Fig. 12 CFRP laminate damage near the hole when the final failure happens

达到接头最终失效载荷时(对应图 7 载荷-位移曲线 C 点, 载荷值为 173.3 MPa), 层合板孔边产生大面积损伤, 接头最终失效表现为孔边挤压破坏失效。

4 结 论

通过建立碳纤维增强环氧树脂复合材料(CFRP)层合板-铝板胶螺混合连接接头拉伸强度预测模型, 与前人试验研究结果进行了对比。

(1) 该模型基于 ABAQUS 子程序 VUMAT 实现了层合板损伤和胶层断裂两种机制的判定, 同时利用初始状态定义的方式模拟显式分析中螺栓预紧力的施加, 为复合材料-金属胶螺混合连接接头有限元分析提供了一定的借鉴作用。

(2) 所建立的 CFRP 层合板-铝板胶螺混合连接接头拉伸失效预测模型及分析方法能够反映该结构的损伤机制与过程, 模型预测的拉伸强度与试验测试的平均值误差为 9.7%, 具有比较好的计算精度。

(3) CFRP 层合板-铝板胶螺混合连接接头的失

效形式与纯胶接接头和纯机械连接接头的强度大小和失效模式有关。当胶接接头的强度小于机械连接接头强度, 在拉伸载荷作用下先发生胶层的断裂, 最终发生机械连接失效。

(4) CFRP 层合板-铝板胶螺混合连接接头在拉伸加载过程中, 螺栓可以通过分担部分载荷而起到分担胶层承载的作用, 胶螺混合连接接头比纯胶接接头承载能力提高了 86.6%。胶螺混合连接接头比纯机械连接接头承载能力提高了 7.0%。

参考文献:

- [1] MATSUZAKI R, SHIBATA M, TODOROKI A. Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(2):154-163.
- [2] UCSNIK S, SCHEERER M, ZAREMBA S, et al. Experimental investigation of a novel hybrid metal-composite joining technology[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(3):369-374.
- [3] ZUCCARELLO B, FRANCO G D. Analysis and optimization of hybrid double lap aluminum-GFRP joints[J]. Composite Structures, 2014, 116(1):682-693.
- [4] MARANNANO G, ZUCCARELLO B. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 71:28-39.
- [5] LEE Y H, LIM D W, CHOI J H, et al. Failure load evaluation and prediction of hybrid composite double lap joints[J]. Composite Structures, 2010, 92(12):2916-2926.
- [6] ISLAM M S, TONG L. Influence of pinning on static strength of co-cured metal-GFRP hybrid single lap joints[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2016, 84:196-208.
- [7] FRANCO G D, FRATINI L, PASTA A. Analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 41: 24-32.
- [8] FIORE V, ALAGNA F, GALTIERI G, et al. Effect of curing time on the performances of hybrid/mixed joints[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1):911-918.
- [9] BOIS C, HERVÉ W, WAHL J C, et al. An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints[J]. Composite Structures, 2013, 97:252-260.
- [10] PAROISSIEN E, LACHAUD F, SCHWARTZ S. Simplified stress analysis of hybrid (bolted/bonded) joints[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2017, 77:183-197.
- [11] 马毓, 赵启林. 复合材料胶-螺混合连接接头承载力分析[J].

- 复合材料学报, 2011, 28(4):225-230.
- MA Yu, ZHAO Qilin. Analysis of the bonded-bolted hybrid composite joints' carrying capacity[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(4):225-230 (in Chinese).
- [12] 袁辉, 刘鹏飞, 赵启林, 等. 胶-螺混合连接承载力的参数影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013, 3: 66-71.
- YUAN Hui, LIU Pengfei, ZHAO Qilin, et al. Research on the influence factors of the bearing capacity for bonded-bolted hybrid joints[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013, 3:66-71 (in Chinese).
- [13] 程小全, 汪源龙, 张纪奎, 等. 平面编织复合材料胶螺混合连接接头拉伸性能分析[J]. 固体力学学报, 2011, 32(4): 346-352.
- CHENG Xiaoquan, WANG Yuanlong, ZHANG Jikui, et al. Tensile performance analysis of combined adhesive and bolted joints for plain woven composites[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(4):346-352 (in Chinese).
- [14] 孟毛毛, 赵美英, 弥晓亮, 等. 胶-螺混合连接结构强度分析及影响因素研究[J]. 航空工程进展, 2013, 4(2):186-192.
- MENG Maomao, ZHAO Meiyong, MI Xiaoliang, et al. Analysis of the bonded-bolted hybrid composite joints' strength and influences[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(2):186-192 (in Chinese).
- [15] JIN H K, JAE W J, TAE H K, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding[J]. Composite Structures, 2006, 75 (1): 192-198.
- [16] RYU C O, CHOI J H, KWEON J H. Failure load prediction of composite joints using linear analysis[J]. Journal of Composite Materials, 2007, 41(7):865-878.
- [17] MCCARTHY C T, MCCARTHY M A. Three-dimensional finite element analysis of single-bolt, single-lap composite bolted joints Part II: Effects of bolt-hole clearance[J]. Composite Structures, 2005, 71(2):159-175.
- [18] 曾昭炜, 刘红武. 复合材料层合板多钉连接钉载分配分析[J]. 无线互联科技, 2017, 14:103-105.
- ZENG Zhaowei, LIU Hongwu. Analysis of nailing distribution of multi-nail connection of composite laminates[J]. Wireless Internet Technology, 2017, 14: 103-105 (in Chinese).
- [19] 陈坤艳, 林志伟, MOHAMED Yasser Mahmoud, 等. 复合材料 π 接头渐进失效分析[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20 (3):19-24.
- CHEN Kunyan, LIN Zhiwei, MOHAMED Yasser Mahmoud, et al. Progressive failure analysis on composite π joint [J]. Computer Aided Engineering, 2011, 20(3):19-24 (in Chinese).
- [20] 姜华强. 复合材料层压板的损伤评估与修理研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011:15-16.
- JIANG Huaqiang. Research on damage assessment and repair of composite laminate[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 15-16 (in Chinese).
- [21] FIONN D, NIK P. Introduction to computational plasticity [M]. England: Oxford University Press, 2005: 175-176.
- [22] 章继峰, 谢永刚, 张璐. 接头局部增强的复合材料层合板螺栓连接试验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 191-196.
- ZHANG Jifeng, XIE Yonggang, ZHANG Lu. Experimental and numerical simulation of composite laminates bolted joints with local reinforcement[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6):191-196 (in Chinese).
- [23] 王志强. 复合材料层压板螺栓连接性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010:36-37.
- WANG Zhiqiang. Property analysis of the composite laminate bolted joints[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010:36-37 (in Chinese).
- [24] 吕霞. 复合材料机械连接局部应力与强度的影响因素研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013:8-9.
- LV Xia. Study on the effects affecting local stress and failure strength of composite mechanically fastened joints[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013:8-9 (in Chinese).