

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2020.08.014

刘衍峰, 张达, 周振功, 等. 纤维金属层合板连接结构拉脱失效机理分析 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (08): 44-49.

纤维金属层合板连接结构拉脱失效机理分析

刘衍峰¹, 张达^{1*}, 周振功², 高志良¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 对面外钉载作用下纤维金属层合板螺栓结构拉脱失效机理进行了研究, 考查了纤维铺层方向和金属体积分数对其拉脱性能的影响。基于应变形式的 Hashin 失效准则、金属延性断裂准则及层间内聚力本构模型, 建立了复合材料连接结构三维渐进失效模型。通过有限元仿真方法, 预测了螺栓结构的拉脱强度, 并基于试验验证了数值模型的可靠性。研究表明, 拉脱载荷作用下, 复合材料开孔区域逐渐呈锥形隆起, 最终螺栓嵌入纤维金属层合板导致螺栓结构承载失效, 拉脱失效特征与冲击破坏相似。铝锂合金的压溃破坏及纤维金属界面的层间分离是结构拉脱破坏的主要机理。螺栓结构刚度折减至亚临界损伤值后, 受材料压缩效应, 刚度出现二次升高趋势。纤维沿 $\pm 45^\circ$ 方向对称铺层下的纤维金属层合板正交性最高, 拉脱强度最大。螺栓结构拉脱极限载荷与金属体积分数成正比。

关键词: 功能梯度复合材料; 螺栓连接; 渐进失效; 拉脱破坏

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492(2020)08-0044-06

Pull-through Failure Properties Analysis of Fiber-metal Laminates Bolted Joint Structure

Liu Yanfeng¹, Zhang Da^{1*}, Zhou Zhengong², Gao zhiliang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Institute of Composites and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The pull-out failure mechanism of fiber-reinforced metal laminate (FML) bolted structure under external nailing load was studied. The effects of fiber ply direction and metal volume fraction on the pull-out performance were investigated. Based on the Hashin failure criterion of strain form, the ductile fracture criterion of metal and the constitutive model of interlayer cohesion, a three-dimensional progressive failure model of composite connection structure was established. Through the finite element simulation method, the pull-out strength of the bolted structure was predicted, and the reliability of the numerical model was verified based on the test. The results show that under the pull-out load, the opening area of the composite material gradually presents a cone-shaped uplift, and finally the bolt embedded into the fiber metal laminate leads to the bearing failure of the bolted structure, and the pull-out failure characteristics are similar to the impact failure. The collapse failure of Al Li alloy and the interlayer separation of fiber metal interface are the main mechanisms of pull-out failure. After the stiffness of the bolted structure is reduced to the subcritical damage value, the stiffness increases twice due to the material compression effect. The results show that the orthogonality and pull-out strength of fiber metal laminates with symmetrical fiber ply along $\pm 45^\circ$ direction are the highest. The pull-out limit load of bolted structure is proportional to the volume fraction of metal.

Key words: functional gradient composites; bolted joint; progressive failure; pull-through failure

0 引言

纤维金属层合板 (Fiber-Metal Laminates, FML_s) 是一种由金属与纤维复合材料交替铺层后固化形成的混杂型复合材料^[1-3]。因其兼具复合材料的高比刚度、比强度及金属的抗冲击、高损伤容限性等优点, 广泛应用于航空航天领域^[4]。螺栓连接是复合材料主承载结构内部载荷传递的常用方式之一。由于存在各向异性特征, 复合材料螺栓结构法向承载性较差, 在面外载荷作用下极易发生拉脱破坏^[5-8]。拉脱强度预测及失效机理分析是复合材料连接结构设计的关键。

国内外学者深入研究了基体材料、纤维铺层方向、螺栓参数等因素对碳纤维树脂基复合材料螺栓结构拉脱性能的影响。Camanho^[9]提出复合材料结构内部的初始损伤主要由纤维层间分离导致; Pearce^[10]结合最大应力理论, 基于三维渐进失效的本构模型, 探究复合材料连接结构在面外载荷作用下的刚度退化特征。国内学者还通过非线性数值模型, 预测了复

合材料泡沫夹芯板^[11]、夹层预埋玻璃纤维板^[12]等螺栓结构的拉脱强度, 但关于纤维金属复合材料螺栓结构的相关研究较少, 且金属塑性、金属与纤维间的界面特性使得该材料的拉脱破坏机理与传统复合材料存在差异, 以往的数值研究结果不能准确表征纤维金属材料的的面外失效特征。

本文针对玻璃纤维增强铝锂合金复合材料, 基于应变形式的 Hashin 失效准则、延性断裂判据及层间内聚力本构方程, 建立三维渐进失效模型。利用数值仿真法研究连接结构在面外载荷工况下的拉脱失效特征及破坏机理。讨论纤维铺层方向、金属体积分数等复合材料设计参数对连接结构拉脱失效特征的影响。研究结果为复合材料连接结构性能优化设计提供参考。

1 纤维金属复合材料渐进失效模型

螺栓连接结构拉脱承载过程中, 功能梯度复合材料的损伤累积是导致其产生非线性响应的主要因素^[13]。针对玻璃纤

收稿日期: 2020-05-20

维增强铝锂合金复合材料连接结构, 本文结合 Hashin 三维失效判据、延性金属断裂准则, 建立纤维金属复合材料三维渐进失效模型。此外, 模型基于层间内聚力本构方程, 表征复合材料界面的面外失效情况。

1.1 玻璃纤维树脂基复合材料失效准则

复合材料初始失效判据常采用应力形式的 Hashin 破坏准则^[4], 但螺栓连接处应力分布不连续, 接触力变化幅值较大, 不适用于连接结构材料损伤的判定。因此, 选取损伤初始前后变化连续且光滑的应变作为 Hashin 准则的基本变量, 将纤维树脂基材料初始失效算子 $D_i(i=mt, mc, ft, fc, ld)$ 定义如下。

基体拉伸失效算子:

$$D_{mt}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33}}{Y_T^e} \right)^2 + \left(\frac{1}{S_{23}^{e2}} \right) \left(\varepsilon_{23} - \frac{E_{23} E_{33}}{G_{23}^2} \varepsilon_{23} \varepsilon_{33} \right) + \left(\frac{\varepsilon_{12}}{S_{12}^e} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{13}}{S_{13}^e} \right)^2 \quad \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \geq 0 \quad (1)$$

基体压缩失效算子:

$$D_{mc}^2 = \left(\frac{E_{22} \varepsilon_{22} + E_{33} \varepsilon_{33}}{2G_{12} S_{12}^e} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{Y_C^e} \right) \left[\left(\frac{E_{22} Y_C^e}{2G_{12} S_{12}^e} \right)^2 - 1 \right] + \frac{1}{S_{23}^{e2}} \left(\varepsilon_{23} - \frac{E_{22} E_{33}}{G_{23}^2} \varepsilon_{22} \varepsilon_{33} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{12}}{S_{12}^e} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{13}}{S_{13}^e} \right)^2 \quad \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \leq 0 \quad (2)$$

纤维拉伸失效算子:

$$D_{ft}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{11}}{X_T^e} \right)^2 \quad \varepsilon_{11} > 0 \quad (3)$$

纤维压缩失效算子:

$$D_{fc}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{11}}{X_C^e} \right)^2 \quad \varepsilon_{11} < 0 \quad (4)$$

纤维/基体层间分离失效算子:

$$D_{ld}^2 = \left(\frac{\varepsilon_{33}}{Z_T^e} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{13}}{S_{13}^e} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{23}}{S_{23}^e} \right)^2 \quad \varepsilon_{33} \geq 0 \quad (5)$$

式中: X_T^e 、 X_C^e 分别为纤维主方向拉伸、压缩许用强度的应变值; Y_T^e 、 Y_C^e 分别为垂直纤维方向拉伸、压缩许用强度的应变值; S_{12}^e 、 S_{13}^e 、 S_{23}^e 分别为各主方向剪切强度的应变值; Z_T^e 为复合材料面外拉伸强度的应变值。

复合材料受外载发生初始损伤后, 转入非线性刚度退化阶段^[15], 其内部纤维基体损伤状态变量 d_i 遵循的损伤演化规律如下:

$$d_i = \begin{cases} 0 & D_i < 1 \\ 1 - \frac{1}{D_i} & D_i \geq 1 \end{cases} \quad i=fc, ft, mc, mt, ld \quad (6)$$

式中: n 为材料刚度退化速率, 是无量纲量; D_i 为材料初始失效算子。

通过应变形式的 Hashin 失效准则判定纤维基体材料的损伤状态时, 当变量 $d_i=1$ 时, 材料彻底失效。损伤状态变量 d_i 的定义域为 $[0, 1]$ 。

1.2 铝锂合金失效准则

铝锂合金具有明显的塑性特征, 晶胞形变、晶间微孔洞及微裂纹扩展^[16]是材料断裂失效的主要因素。损伤状态变量

形式的延性断裂初始失效判据如下:

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_D^p(\eta, \bar{\varepsilon}^p)} = 1 \quad (7)$$

式中: ω_D 为金属损伤状态变量, 是塑性应变量的单调递增函数; $\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变, 是主塑性应变的函数; η 为材料应力三轴度参数; $\bar{\varepsilon}_D^p$ 为损伤初始时的塑性应变值。

损伤状态变量 ω_D 为 1 时, 铝锂合金处于临界失效点。拉脱试验中面外载荷采用准静态加载方式, 因此模型假设金属初始损伤的等效塑性应变值与应变率无关。模型中的等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 定义如下:

$$\bar{\varepsilon}^p = \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_1^p)^2 + (\varepsilon_2^p)^2 + (\varepsilon_3^p)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_i^p(i=1, 2, 3)$ 为各方向主塑性应变值。

基于断裂能变量 G_f , 建立损伤演化过程等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 与等效塑性位移 \bar{u}^p 间的转换方程为:

$$G_f = \int_{\bar{\varepsilon}_0^p}^{\bar{\varepsilon}^p} L \sigma_y d\bar{\varepsilon}^p = \int_0^{\bar{u}^p} \sigma_y d\bar{u}^p \quad (9)$$

式中: σ_y 为损伤演化过程中的应力张量; L 为有限元特征长度, 等于单元体积的立方根; $\bar{\varepsilon}_0^p$ 为初始损伤时的等效塑性应变值; $\bar{\varepsilon}_f^p$ 为材料失效时的等效塑性应变值; \bar{u}_f^p 为材料失效时的等效塑性位移。

模型中将铝锂合金刚度退化规律定义为线性形式。损伤变量 $d=1$ 时, 材料彻底失效。基于等效塑性位移 \bar{u}^p 定义材料损伤变量 d 如下:

$$d = \frac{L \bar{\varepsilon}^p}{\bar{u}_f^p} = \frac{\bar{u}^p}{\bar{u}_f^p} \quad (10)$$

1.3 界面失效准则

基于内聚力单元的黏性行为表征纤维金属复合材料层间分离失效。内聚力模型采用的拉伸分离 (Traction-Separation) 本构方程如下:

$$\sigma_i = \begin{cases} K_{ij} \delta_j & 0 \leq \delta \leq \delta_0 \\ (1-D) K_{ij} \delta_j & \delta_0 \leq \delta \leq \delta_f \\ 0 & \delta > \delta_f \end{cases} \quad (11)$$

式中: K_{ij} 为界面初始刚度; δ_j 为界面分离位移变量; δ_0 为损伤初始时的界面张开位移; δ_f 为失效时界面的张开位移; D 为界面刚度折减阶段的损伤变量, 变量遵循指数型损伤演化规律, 其定义如下:

$$D = 1 - \left(\frac{\delta_0}{\delta} \right) \cdot \left(\frac{1 - \exp \left[-\alpha \left(\frac{\delta - \delta_0}{\delta_f - \delta_0} \right) \right]}{1 - \exp(-\alpha)} \right) \quad (12)$$

模型中忽略压缩应力对层间损伤的贡献, 假设界面法向强度仅受拉伸应力因素影响, 采用二次应力准则判定界面损伤起始情况:

$$\left(\frac{\langle \sigma_n \rangle}{l_n} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{l_s} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{l_t} \right)^2 = 1 \quad (13)$$

式中: l_n 、 l_s 、 l_t 分别为法向拉伸强度值及 XY 平面主方向剪切强度值; σ_n 、 σ_s 、 σ_t 分别为内聚力单元的法向正应力及 XY 方向的剪切应力。

针对界面存在各型裂纹混杂的失效模式, 模型基于 Ben-

zeggagh-Kenane 断裂能方程^[17]，通过断裂韧性变量预测纤维金属复合材料分层损伤演化过程：

$$G_{IC} + (G_{IIc} - G_{IC}) \left(\frac{G_{IIc}}{G_T} \right)^\eta = G_C \quad (14)$$

式中： G_{IC} 、 G_{IIc} 分别为 I 型、II 型裂纹下界面的断裂韧性； G_T 为界面剪切断裂韧性； G_C 为纤维金属层间界面断裂能； η 为裂纹模式混合关联度指数。

2 连接结构拉脱失效分析

2.1 连接结构有限元模型

参考 ASTM-D7322 复合材料单板拉脱试验标准^[18]，通过 ABAQUS 软件建立了玻璃纤维增强铝锂合金层合板与盘头螺栓连接结构的有限元模型。图 1 所示为复合材料螺栓结构及尺寸参数，纤维金属层合板上下表面为 1 mm 厚度的 2060-T8 铝锂合金薄板，中间夹杂 HS4 玻璃纤维增强树脂基复合材料，共计 8 层，纤维铺层角度为 $[0]_8$ 。

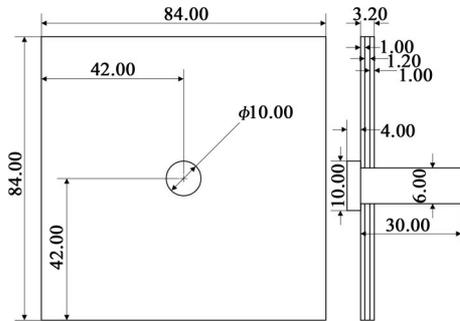


图 1 纤维金属层合板螺栓连接结构及尺寸参数

在金属与纤维材料层间界面处设置内聚力单元，模拟连接结构承载失效时复合材料法向脱粘现象。黏性单元厚度为 0.001 mm，通过中性轴算法扫略成 COH3D8 六面体网格。由于螺孔区域存在应力集中现象，通过单调递进布种方式对开孔区域进行网格细化处理，保证计算精度。螺栓与复合材料层合板使用 C3D8R 线性缩减积分单元划分。

基于纤维金属复合材料渐进失效模型，通过 Fortran 语言编写 UMAT 用户子程序。程序中首先定义初始化变量，根据各组材料力学参数，计算出螺接结构刚度矩阵。HS4 玻璃纤维增强树脂基复合材料性能参数如表 1 所示；2060-T8 铝锂合金性能参数如表 2 所示。以材料失效准则为判据进行迭代计算，初始损伤后刚度矩阵实时更新。

表 1 HS4 玻璃纤维增强树脂基复合材料参数

特性参数	数值	特性参数	数值
E_{11}/GPa	54.6	G_{12}/GPa	3.5
E_{22}/GPa	10.5	G_{23}/GPa	3.0
E_{33}/GPa	10.5	G_{13}/GPa	3.0
ν_{12}	0.252	X_T/MPa	1 735.0
ν_{23}	0.320	X_C/MPa	1 037.0
ν_{13}	0.252	Y_T/MPa	62.2
Z_T/MPa	50.0	Y_C/MPa	144.0

表 2 2060-T8 铝锂合金材料参数

特性参数	数值	特性参数	数值
杨氏模量 E/MPa	81 580	断裂应变 δ_f	9.8×10^{-2}
泊松比 ν	0.33	断裂位移 δ_s	2.67×10^{-2}
屈服应力 σ_s/MPa	404	应力三轴性 η	0.33
极限应力 σ_u/MPa	562		

采用面面接触 (Surface-to-surface) 形式对螺杆与螺孔、层合板表面与螺栓盘头接触面施加约束，共设置两对接触对。将刚度较大且网格较粗的螺栓接触面定义为主面，并基于有限滑移公式，模拟面外载荷在部件间通过接触传递的过程。上述接触关系中节点的更新及响应是基于螺栓接触面形态的，即发生接触后螺孔区域接触节点将约束在沿螺杆形状的路径上滑移。模型中允许部件间的大变形、大位移滑动。模型中库伦摩擦因数定义为 0.15，基于“硬接触”属性表征接触对间法向力学行为。

对载荷参考点与螺栓承载面施加均布耦合约束，进而使模型中各节点运动加权平均化。在参考点处施加 5 mm 法向位移载荷，且通过平滑分析步定义载荷幅值函数。基于显式动力学分析步对模型进行迭代计算，时域设置为 0.05，模拟拉脱试验中力的准静态加载方式。上述纤维金属层合板螺栓结构拉脱有限元模型如图 2 所示。

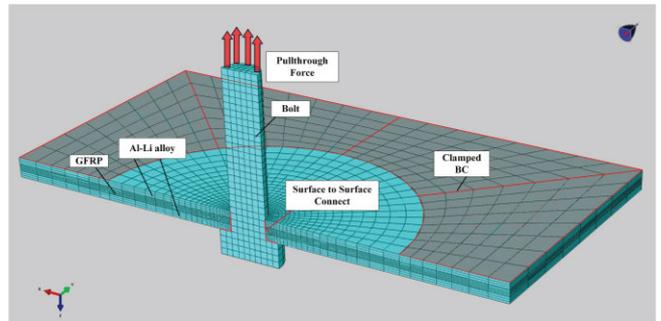


图 2 纤维金属层合板螺栓结构拉脱有限元模型

2.2 拉脱失效特征

为保证结果收敛性，本文使用动力学显式迭代法计算有限元模型。图 3 所示为螺接结构拉脱失效断面图。根据图中材

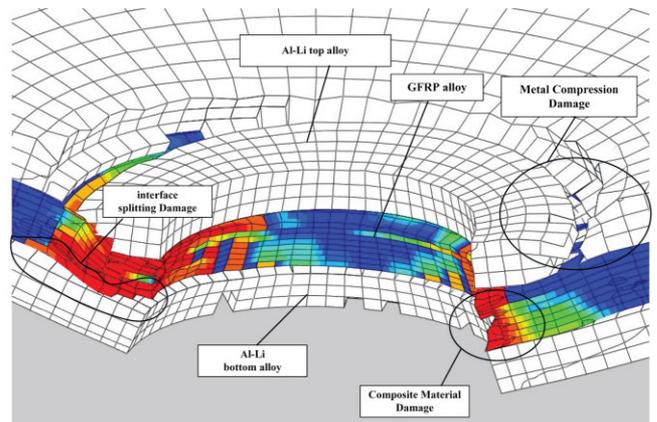


图 3 螺接结构拉脱失效断面

料破坏形貌看出, 纤维金属复合材料中铝锂合金顶层产生明显的压溃破坏, 底层金属产生宏观裂纹, 螺孔区域附近产生锥形隆起, 破坏形式与金属冲击失效特征近似; 玻纤树脂基复合材料层与金属层间界面发生局部脱粘破坏; 材料交界区域处的纤维发生剪切破坏; 复合材料层内产生剪切及拉压破坏, 由于底层纤维及基体法向挠度较大, 其破坏程度最为严重。

连接结构拉脱失效的力学响应特性如图4所示。当位移载荷增至3.49 mm时, 螺接结构承载失效, 其极限拉脱载荷值为13 057.8 N。有限元仿真失效参数与试验值对比分析如表3所示, 模型误差率为11.99%。本模型对亚临界失效单元(单元损伤变量接近1)进行实时删除, 因此模拟结果的失效载荷略小于试验测量值。预测的失效载荷值低于实际极限载荷可以保证螺栓连接结构实际应用时的安全性。

表3 拉脱失效载荷误差分析

	失效位移/mm	误差率/%	失效载荷/N	误差率/%
试验值	3.81	8.39	14 836.35	11.99
仿真值	3.49		13 057.80	

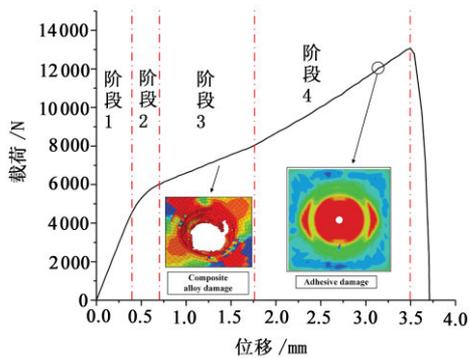


图4 螺接结构拉脱失效载荷-位移曲线

面外载荷作用下, 连接结构拉脱失效过程的力学响应存在以下4个阶段。

(1) 螺栓处于预紧阶段, 载荷通过模型接触对传递, 各组分材料处于弹性阶段, 连接结构未产生宏观损伤。模型中内聚力单元损伤变量值从0递增, 材料界面间存在微裂纹损伤。

(2) 铝锂合金处于塑性阶段, 连接结构刚度下降。螺孔两端产生微弱塑性形变, 载荷递增速率减缓, 螺栓与螺孔间的接触对产生微弱滑移。

(3) 纤维增强树脂基复合材料具备各向异性特征, 其平面内屈服强度远高于铝合金屈服应力值, 但拉脱载荷处于层合板法方向, 该方向纤维复合材料承载性能较差。载荷位移增至0.8 mm左右时, 模型中SDV5损伤变量值达到失效极限值1, 此时螺孔附近区域纤维层间分离, 导致纤维和基体材料产生拉压、剪切破坏。内聚力单元应力达到界面断裂韧性值, 铝板与纤维层产生局部脱粘。层合板内部产生微观间隙, 且螺孔处部分接触失效, 导致连接结构刚度性能下降。图5所示为拉脱破坏时各层纤维损伤分布情况。

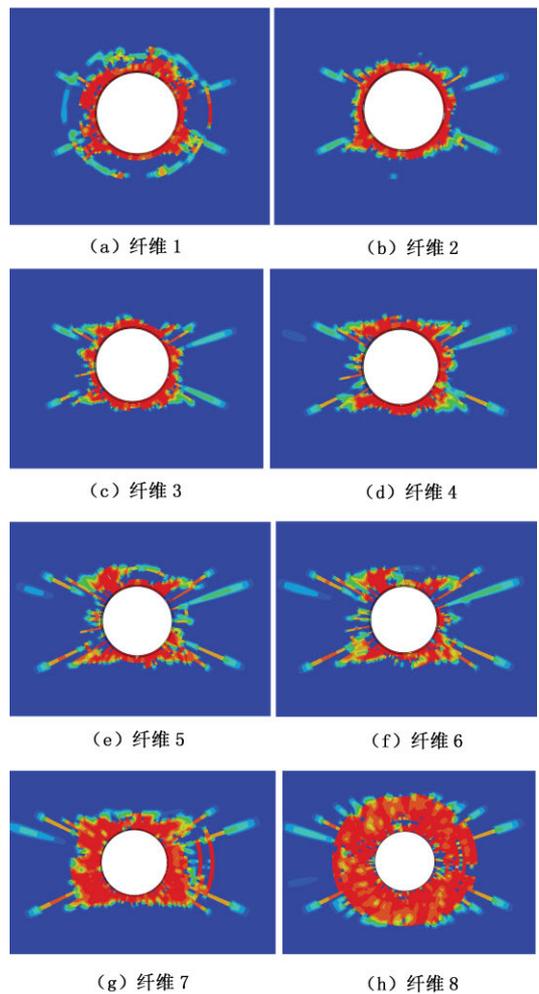


图5 纤维损伤分布

(4) 层合板螺孔附近区域产生锥形隆起, 铝锂合金产生较大塑性形变。受螺栓接触面挤压作用, 复合材料内部的微观间隙被压缩, 连接结构刚度适量提升, 其响应曲线斜率稍有增加。当顶层铝锂合金承载达到极限应力值时, 杯头环状区域处金属产生压溃破坏, 螺栓嵌入纤维金属层合板内部。此时连接结构彻底承载失效, 该极限载荷即为连接结构的拉脱强度。纤维金属层合板中铝锂合金损伤情况如图6所示。

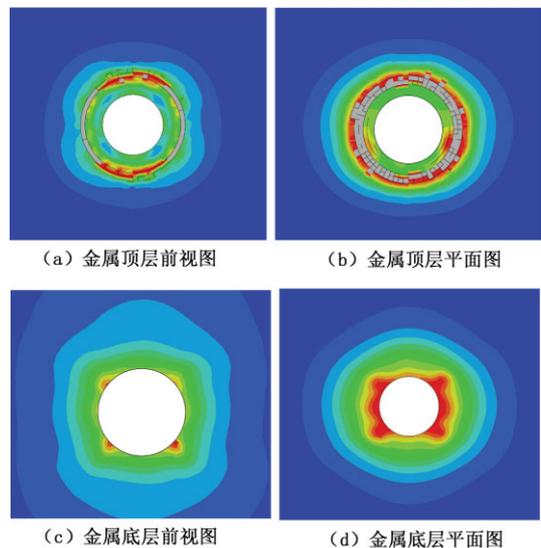


图6 铝锂合金损伤分布

3 材料设计参数对拉脱失效特征的影响

在工程应用中，通常对纤维铺层角度、金属体积分数等材料参数进行优化设计，进而提升纤维金属层合板的力学性能。本文基于控制变量法，分析材料参数对连接结构拉脱失效特征的影响。

3.1 纤维铺层方向的影响

基于上述玻璃纤维增强铝锂合金层合板连接结构的几何特征及材料参数，建立了 $[0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$ 、 $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ 、 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 、 $[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$ 不同纤维方向下的仿真模型。铺层方向对连接结构拉脱失效行为的影响如图7所示。

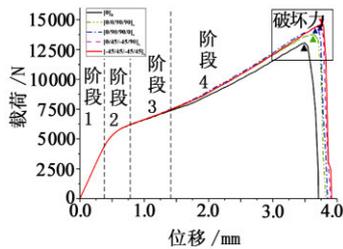


图7 纤维方向对连接结构失效行为的影响

由图可知，改变纤维铺设方向，不影响螺接结构拉脱失效过程中的力学响应趋势。位移加载的前两个阶段，层合板处于弹性及微屈服状态，铝锂合金材料是层合板结构中的主要承载对象；由于各组模型对铝锂合金材料、连接结构几何参数进行统一定义，因此该阶段内各组模型的力学响应几乎一致。后两阶段连接结构刚性衰减主要由纤维层间分离导致。相邻层间纤维夹角越大，基体间的层间分离越严重。相比于 $[0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$ 、 $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ 铺层方式， $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 、 $[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$ 纤维层间夹角更小，因此加载后期其刚度折减程度更弱，响应曲线斜率略高于其他组。表4所示为各组模型极限载荷及拉脱失效位移值。

表4 不同纤维铺层方向下螺接结构的拉脱性能

纤维铺层	失效位移 /mm	极限载荷 /N
$[0]_s$	3.498	13 057.8
$[0^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ]_s$	3.644	13 779
$[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$	3.665	14 387.3
$[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$	3.745	14 577.7
$[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$	3.747	14 616.8

连接结构面外拉脱失效与冲击破坏模式近似，材料正交性越高，层合板抗击法向载荷性能越好。 $[0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 、 $[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$ 铺设角度下复合材料正交性相近，两组模型的拉脱强度为14 577.7 N、14 616.8 N；拉脱载荷作用下的失效位移为3.745 mm、3.747 mm。螺纹孔处区域的集中载荷沿45°纤维方向分解，层合板法向变形后仍具备一定的承载性能。正交铺层的形式有利于提升复合材料螺接连接结构拉脱强度。

3.2 金属体积分数 MVF 的影响

MVF 是纤维金属复合材料中金属占层合板的体积分数，

是表征混杂复合材料内部金属含量的值。本文建立了 MVF 值为 0、0.25、0.375、0.625、0.875 等厚度纤维金属层合板连接结构有限元模型。金属体积分数对连接结构拉脱失效行为的影响如图8所示。

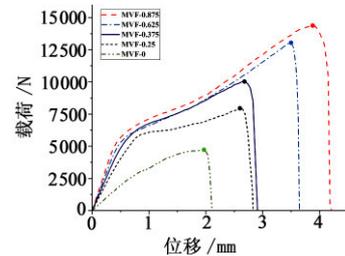


图8 金属体积分数 MVF 对连接结构失效行为的影响

盘头螺栓连接结构拉脱失效是由于较大塑性形变下的铝锂合金达到材料极限强度后，顶层金属产生压溃破坏。铝锂合金含量较高时，金属法向可承载的塑性形变值越大，连接结构抗拉脱性能越好。各组模型拉脱失效时铝锂合金损伤情况如图9所示。

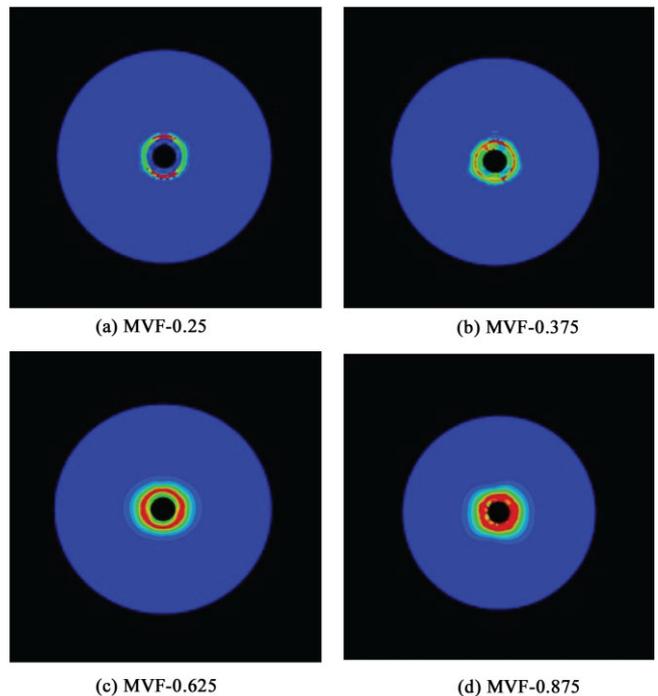


图9 金属体积分数 MVF 对铝锂合金损伤的影响

表5所示为不同 MVF 值的连接结构拉脱极限载荷及失效位移数据对照表。MVF 值为 0（即模型为单纯纤维增强树脂基复合材料螺接结构）的拉脱强度仅为 4 686.44 N，且失效位移为 1.96 mm。对比 MVF 等于 0.875 模型的极限载荷 14 426.5 N，

表5 不同金属体积分数下螺接结构的拉脱性能

MVF	失效位移 /mm	极限载荷 /N
0	1.960	4 686.44
0.25	2.641	7 926.10
0.375	2.714	10 030.8
0.625	3.498	13 057.8
0.875	3.901	14 426.5

提升约2倍。复合材料塑性特征影响连接结构的拉脱性能较大。金属体积分数越大,层合板韧性越强,螺接结构的拉脱强度及失效位移也相应增加。

此外,金属含量增多有利于提升连接结构法向刚度,因此面外载荷工况下的初段响应曲线斜率也随之增大。位移加载末期,MVF值较高的螺接结构刚度衰减后会二次升高,这是由于金属与螺栓间挤压作用产生的塑性位移使纤维层间分离产生的结构内部间隙压缩,导致结构刚度小幅提升。金属含量越低,加载后段与螺栓的挤压作用越不明显。当MVF值为0时,结构拉脱失效主要受复合材料层间分离、纤维拉压破坏影响,其力学响应也变为非线性单峰趋势。

4 结束语

本文建立的纤维金属复合材料三维渐进失效模型可以有效模拟拉脱工况下连接结构的损伤演化情况。数值仿真结果与试验对比误差为8.39%、11.99%,满足工程计算要求。

螺接结构在面外载荷作用下,力学响应呈非线性趋势,具有4个阶段性特征。拉脱失效特征与冲击破坏近似,连接孔区域锥形隆起,螺栓深嵌入层合板结构。铝锂合金的压溃破坏、纤维金属界面的层间分离是导致拉脱破坏的主要因素。

纤维铺层的正交性与连接结构拉脱强度成正比。相邻层间夹角越大,承载时层间分离情况越严重。适当增加 $\pm 45^\circ$ 铺层可以提升螺接结构力学性能。金属体积分数可以改变螺接结构面外承载时力学响应规律。MVF值越小,极限载荷及失效位移也随之降低。

参考文献:

- [1] C. A. J. R. Vermeeren. An Historic Overview of the Development of Fibre Metal Laminates[J]. Applied Composite Materials, 2003,10(4-5):189-205.
- [2] 张嘉振,白士刚,周振功.拉-压加载下纤维增强铝合金层板疲劳裂纹扩展的压载荷效应与预测模型[J].复合材料学报, 2012,29(04):163-169.
- [3] Ahmad S.M. Al-Azzawi,John McCrory,Luiz F. Kawashita,et al. Buckling and postbuckling behaviour of glare laminates containing splices and doublers. part 1: instrumented tests[J]. Composite Structures,2017(176):1158-1169.
- [4] Guocai Wu,YANG J-M. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures[J]. JOM,2005,57(1):72-79.
- [5] Junwu Mu,Zhidong Guan,Tianya Bian,et al. The Experiment and Numerical Simulation of Composite Countersunk-head Fasteners Pull-through Mechanical Behavior[J]. Applied Composite Materials,2014,21(5):773-787.
- [6] Sebastian Heimbs,Sebastian Schmeer, Jörg Blaurock,et al. Static and dynamic failure behaviour of bolted joints in carbon fibre composites[J]. Composites Part A,2013(47):91-101.
- [7] D. J. Elder, A. H. Verdaasdonk, R. S. Thomson. Fastener pull-through in a carbon fibre epoxy composite joint[J]. Composite Structures,2008,86(1):291-298.
- [8] Vincent Caccese,Jean-Paul Kabche,Keith A. Berube. Analysis

of a hybrid composite/metal bolted connection subjected to flexural loading[J]. Composite Structures,2006,81(3):450-462.

- [9] G. Catalanotti,P.P. Camanho. A semi-analytical method to predict net-tension failure of mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Composites Science and Technology,2013(76):69-76.
- [10] G.M.K. Pearce,A.F. Johnson,A.K. Hellier,et al. A study of dynamic pull-through failure of composite bolted joints using the stacked-shell finite element approach[J]. Composite Structures,2014(118):86-93.
- [11] 邹广平,张冰,唱忠良,等.复合材料泡沫夹芯板局部连接拉脱破坏试验与数值仿真[J].复合材料学报,2019,36(04):881-891.
- [12] 姜程飞,张金奎,张伟.夹层结构预埋玻璃纤维板拉脱强度研究[J].玻璃钢/复合材料,2017(07):74-76.
- [13] 李沛城,常楠,赵美英,等.一种非线性模型下的复合材料螺栓连接失效分析[J].航空工程进展,2019,10(02):171-178.
- [14] Gordon Kelly,Stefan Hallström. Strength and failure mechanisms of composite laminates subject to localised transverse loading[J]. Composite Structures,2004,69(3):301-314.
- [15] Mohammed Y. Abdellah,Mohammad S. Alsoufi,Mohamed K. Hassan,et al. Extended Finite Element Numerical Analysis of Scale Effect in Notched Glass Fiber Reinforced Epoxy Composite[J]. Archive of Mechanical Engineering,2015,62(2):217-236.
- [16] George S.E. Bikakis,Alexander Savaidis. FEM simulation of simply supported GLARE plates under lateral indentation loading and unloading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2016(83):2-10.
- [17] 杜丹丹. GLARE层板力学性能的数值模拟与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [18] Standard test method for measuring the fastener pull-through resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite[J]. astm, 2009.

第一作者简介: 刘衍峰(1993-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,研究实习员,研究领域为轻质复合材料结构设计及力学性能分析。

※通讯作者简介: 张达(1981-),男,辽宁铁岭人,研究员,硕士生导师,研究领域为空间遥感仪器的设计研制。

(编辑:刘诗寒)