

复合材料胶-螺混合单搭连接结构的胶层切应力分布

张 圣¹ 朱福先¹ 胡可军¹ 张坤龙¹ 张 振²

(1. 江苏理工学院 材料工程学院, 常州 213001)

(2. 中国机械总院集团江苏分院有限公司, 常州 213164)

摘要:【目的】针对复合材料胶-螺混合单搭连接结构胶层失效问题,建立胶层切应力解析模型,为连接结构强度设计与失效防控提供参考。【方法】首先,基于胶接结构切应力计算公式与双弹簧模型,推导胶-螺混合连接结构胶层切应力解析公式,计算螺栓反作用力,提出胶层切应力计算方法;其次,参照ASTM D5961标准制备碳/玻混杂复合材料试样,开展拉伸试验,获取载荷-位移曲线;然后,采用Abaqus软件建立有限元模型,引入渐进损伤模型与内聚力模型,模拟结构失效过程;最后,对比理论计算、试验与仿真结果,验证模型准确性并分析胶层切应力分布规律。【结果】结果表明,胶-螺混合单搭连接结构承载分为胶层承载、胶层失效、纯螺栓承载3个阶段;胶层切应力呈两端高、中间低的U形分布;胶层失效从两端向中间逐步扩展;有限元仿真与试验最大失效载荷误差小于3.3%,解析模型计算结果与仿真结果吻合良好。

关键词: 胶-螺混合连接; 切应力; 双弹簧模型; 失效; 有限元仿真

中图分类号: TB332 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.013

0 引言

纤维增强复合材料具有高比强度、高比刚度、轻量化等优点,广泛应用于航空航天、轨道交通等领域^[1-5]。随着复合材料零部件向大型化发展,受其成型工艺的限制,复合材料零部件之间存在大量的连接结构。工程应用表明,这些连接处是整个结构强度最薄弱的位置,直接影响整个结构的强度^[6]。胶-螺混合连接是常见的3种复合材料连接方式之一,其连接结构是在螺栓连接基础上加入胶层,既缓解了孔边应力集中带来的不利影响,又优化了连接结构的载荷分配比例,使连接部位的载荷分布更趋于均匀^[7]。研究表明,胶-螺混合连接中,胶层的应力分布直接影响连接结构强度,分析胶层的应力对研究复合材料连接结构的损伤失效起到重要作用。

胶-螺混合连接结构综合螺栓连接和胶接的优点,直接影响连接结构的强度和失效损伤形式。程小全等^[8-9]基于拉伸强度试验与有限元仿真,探究了复合材料胶-螺混合连接结构的连接强度、损伤机制,认为连接结构的损伤过程存在梯次性,表现为最先发生胶层破坏,然后转为螺栓承载直至结构失效。刘峰等^[10]通过碳纤维层合板与铝合金板单钉连接及胶-螺连接静强度拉伸试验,对板间胶层脱黏机制进行了研究,发现高强度胶黏剂能提高单钉胶-螺连接结构强度和安全裕度。

杨晓等^[11]基于有限元法建立了拉伸载荷下正交编织碳纤维复合材料层合板和铝合金板双钉混合连接结构失效分析模型,分析了螺栓连接结构和胶-螺混合连接结构失效模式和承载能力的差异,证实胶-螺混合连接可以降低螺栓孔附近的应力集中,其承载力相较于纯螺栓连接的承载力提高了27.8%。上述研究表明,胶-螺混合连接结构的损伤失效一般开始于胶层,胶层对其结构强度的提高起到重要作用。

为了进一步研究胶-螺混合连接结构的失效机制,研究者致力于对胶层应力变化的精准分析和对胶层在连接结构中损伤演化作用机制的探讨。Her^[12]提出一种简化的理论模型,用于分析单搭接接头和双搭接接头胶层中的切应力、纵向应力。Nguyen等^[13]基于有限元法建立了纯胶接单搭接接头的数值模型,研究了拉伸载荷作用下胶层的剥离应力、切应力和纵向应力。Marchione^[14]依据欧拉梁与弹性理论,构建了双搭接胶接结构中法向应力和剪切应力的解析式,以此确定了其胶层的应力分布。Veisytabar等^[15]基于微分原理,提出了一种基于4参数黏弹性本构关系的分析模型,计算纯胶接结构胶层的剪应力、法向应力和轴向应力。Paroissien等^[16]利用一维梁理论模型,分析了胶层剪应力和剥离应力分布规律,并较准确地预测了胶-螺混合连接结构的强度,分析表明,胶-螺混合连接结构胶层的变形关系和应力分布相对纯胶接

收稿日期: 2024-10-22 修回日期: 2024-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075232); 常州市重点研发计划项目(CE20230039)

作者简介: 张圣,男,1999年生,浙江宁波人,硕士研究生; 主要研究方向为轻量化设计与分析; E-mail: 1196611324@qq.com。

朱福先(通信作者),男,1979年生,江苏东台人,博士,副教授; 主要研究方向为复合材料结构设计与优化; E-mail: jxzfz@jst.edu.cn。

引用格式: 张圣,朱福先,胡可军,等. 复合材料胶-螺混合单搭连接结构的胶层切应力分布[J]. 机械强度, 2026, 48(7): 110-119.

Zhang Sheng, Zhu Fuxian, Hu Kejun, et al. Shear stress distribution in the adhesive layer of composite hybrid bonded-bolted single-lap joint structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 110-119.



免费获取

结构更加复杂,胶层的应力分布直接影响了连接结构的强度和失效损伤机制。现有研究大多采用弹性力学的理论研究纯胶接结构中胶层的应力分布解析解,对于胶-螺混合连接结构中胶层应力的研究较少。在胶-螺混合连接结构中,外载荷通过胶层和螺栓同时传递,形成超静定结构,其胶层承担的载荷不同于纯胶接结构。另外,由于存在螺栓连接,复合材料层合板的结构发生变化,均会引起胶层应力重新分布。

基于胶接结构的胶层剪切模型和胶-螺混合连接结构的双弹簧模型,建立胶-螺混合单搭连接结构胶层应力解析模型,推导胶层内切应力计算式,结合有限元数值模拟,分析胶-螺混合连接结构在拉伸载荷作用下,其胶层内的切应力分布规律及胶层失效损伤演化过程。

1 胶-螺混合连接结构胶层切应力理论模型

1.1 连接结构受力分析

为了建立胶-螺混合连接结构胶层的受力模型,提出与纯胶接分析类似的基本假设^{[12]674[14]102780[15]104907}:

- 1) 胶层厚度足够小,其剪切应力与附着物的纵向应力不随厚度的变化而变化。
- 2) 层合板和胶层均为线弹性。
- 3) 胶层内的剪切应力与上、下层合板的相对位移成正比。

图 1 所示为胶-螺混合单搭连接结构的受力模型。由图 1 可知,连接结构中的上、下复合材料层合板在拉伸载荷 P 作用下发生相对位移,从而使胶层内产生剪切应力。螺栓紧固后,螺栓对层合板产生反作用力 F_b ,使得上、下层合板在螺栓孔处满足变形协调关系。因此,胶-螺混合连接结构中的胶层切应力可以看成由开孔层合板胶接结构在 2 种情况下所产生切应力的叠加:① 拉伸载荷 P 作用下的胶层切应力,② 螺栓反作用力 F_b 作用下的胶层切应力。

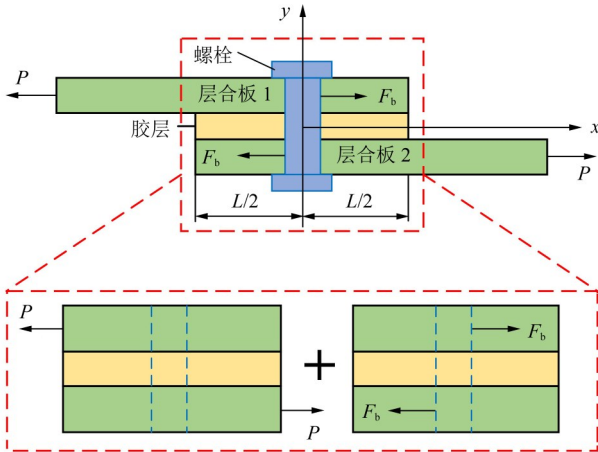


图 1 胶-螺混合连接受力模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the force model for hybrid bonded-bolted joint

1.2 拉伸载荷作用下胶层切应力

Her^{[12]674} 假设胶层中的剪切变形在整个胶层厚度范围内保持不变,提出纯胶接单搭接结构的应力为

$$\begin{cases} \tau = \frac{P}{2} \lambda \left[\frac{\cosh \lambda x}{\sinh(\lambda L)/2} - \frac{E_2 t_2 - E_1 t_1}{E_1 t_1 + E_2 t_2} \frac{\sinh \lambda x}{\cosh(\lambda L)/2} \right] \\ \lambda = \sqrt{\frac{2G}{H(E_1 t_1 + E_2 t_2)}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, L 为搭接区域的长度; t_1 、 t_2 分别为上、下层合板的厚度; E_1 、 E_2 分别为上、下层合板的弹性模量; G 为胶层的剪切模量; H 为胶层的厚度; x 为胶层位置。

当上、下层合板的材料和厚度相同时(弹性模量 $E_1 = E_2 = E$, 厚度 $t_1 = t_2 = t$), 切应力为

$$\begin{cases} \tau = \frac{P}{2} \lambda (\cosh \lambda x) / (\sinh \frac{\lambda L}{2}) \\ \lambda = \sqrt{\frac{G}{HEt}} \end{cases} \quad (2)$$

图 2 所示为复合材料开孔层合板单搭接胶接结构。由图 2 可知,复合材料层合板因为开孔导致中间部分区域的板宽变窄,改变了层合板开孔区域的有效横截面积。

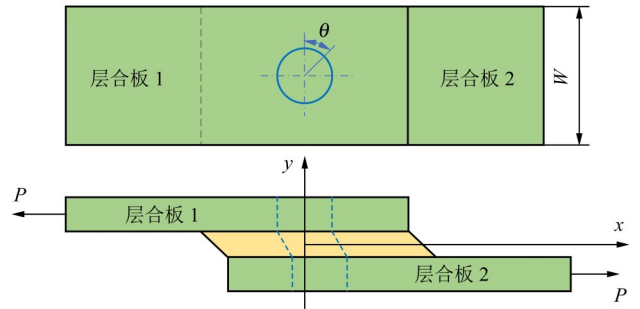


图 2 开孔层合板单搭接胶接结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the single-lap adhesive joint for open-hole laminates

因为胶层切应力与上、下两搭接板的相对位移成正比,基于抗拉刚度等效原则,将上、下层合板开孔区域的抗拉刚度等效为

$$EA' = E(W - D \cos \theta)t = \frac{E(W - D \cos \theta)}{W} Wt = E'A(3)$$

式中, A' 为层合板开孔后的横截面积; W 为复合材料板的宽度; D 为开孔直径; A 为横截面积, $A = Wt$; E' 为开孔后的等效弹性模量。 E' 表示为

$$E' = \frac{E(W - D \cos \theta)}{W} \quad (4)$$

其中, θ 为

$$\theta = \arcsin \frac{2x}{D} \quad (5)$$

将式(4)代入式(2)可得

$$\lambda' = \sqrt{\frac{2G}{HE't}} \quad (6)$$

式中, λ' 为特征参数。

将式(6)代入式(1),可知复合材料开孔板单搭接胶接连接的胶层应力分布表示为

$$\tau_{c1} = \begin{cases} \frac{P\lambda'}{2} (\cosh \lambda'x) / (\sinh \frac{\lambda'L}{2}), & 0 \leq x \leq \frac{D}{2} \\ \frac{P\lambda}{2} (\cosh \lambda x) / (\sinh \frac{\lambda L}{2}), & \frac{D}{2} < x \leq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (7)$$

1.3 螺栓反作用力作用下胶层切应力

螺栓反作用力引起的位移变形导致胶层的切应力发生变化,根据螺栓反作用力产生的位移变形量,求解该状态下的胶层应力分布。

该状态下的位移变形量由连接结构中心提供的反作用力产生。为了便于分析整体模型的受力,选取搭接的一半区域进行分析;同时,为方便分析该状态下的应力情况,建立重叠区域中微单元应力分析模型,如图3所示。

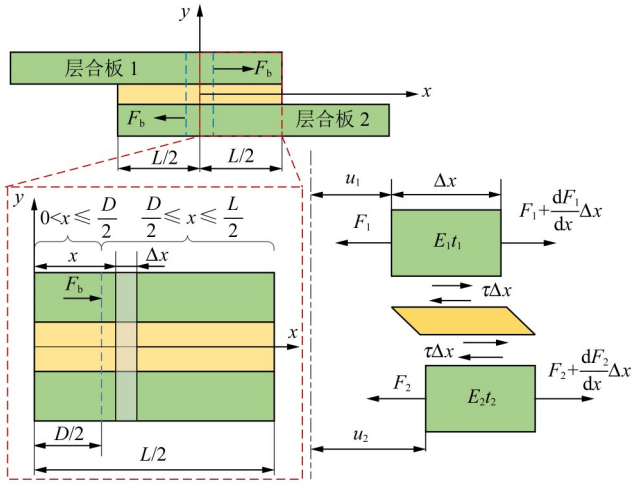


图3 螺栓反作用力作用下胶层切应力分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the shear stress analysis in adhesive layer under bolt reaction force

由图3可知, u_1 、 u_2 分别为上、下两板受到螺栓反作用力产生的纵向位移。根据微单元应力分析模型,建立 x 方向的平衡方程为

$$\begin{cases} \frac{dF_1}{dx} \Delta x + \tau \Delta x = 0 \\ \frac{dF_2}{dx} \Delta x - \tau \Delta x = 0 \end{cases} \quad (8)$$

根据胶层的本构方程以及复合材料板纵向应力应变关系式,得出

$$\tau = G/H\Delta u \quad (9)$$

$$\begin{cases} \sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon \\ \varepsilon = \frac{du}{dx} \end{cases} \quad (10)$$

对式(9)进行求导,可得

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{G}{H} \left(\frac{du_2}{dx} - \frac{du_1}{dx} \right) \quad (11)$$

根据两端的受力形式,以孔边为界,将受力区域分为两部分

$$F_1 + F_2 = \begin{cases} -F_b, & -\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{D}{2} \\ 0, & -\frac{L}{2} \leq x < -\frac{D}{2} \cup \frac{D}{2} < x \leq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (12)$$

1) 当 $-\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{D}{2}$, 对式(11)进行微分并代入式(12),

可得2阶微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d^2 F_1}{dx^2} = -\frac{G}{H} \left(\frac{F_b - F_1}{E_2 t_2} - \frac{F_1}{E_1 t_1} \right) \\ \frac{d^2 F_2}{dx^2} = \frac{G}{H} \left(\frac{F_2}{E_2 t_2} - \frac{F_b - F_2}{E_1 t_1} \right) \end{cases} \quad (13)$$

其边界条件为

$$\begin{cases} x = \frac{D}{2}: F_1 = -F_b, F_2 = 0 \\ x = -\frac{D}{2}: F_1 = 0, F_2 = -F_b \end{cases} \quad (14)$$

当 $E_1 = E_2 = E, t_1 = t_2 = t$ 时,求解微分方程得

$$\begin{cases} F_1 = (-F_b) / [2 \sinh(\frac{\lambda' D}{2})] \sinh \lambda' x + \frac{F_b}{2} \\ F_2 = F_b / [2 \sinh(\frac{\lambda' D}{2})] \sinh \lambda' x + \frac{F_b}{2} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(8),则该状态下的胶层切应力为

$$\tau'_{c2} = \cosh \lambda' x \quad (16)$$

2) 当 $-\frac{L}{2} \leq x < -\frac{D}{2} \cup \frac{D}{2} < x \leq \frac{L}{2}$, 对式(11)进行微分并代入式(12),可得2阶微分方程为

$$\begin{cases} \frac{d^2 F_1}{dx^2} = -\frac{G}{H} \left(\frac{-F_1}{E_2 t_2} - \frac{F_1}{E_1 t_1} \right) \\ \frac{d^2 F_2}{dx^2} = \frac{G}{H} \left(\frac{F_2}{E_2 t_2} - \frac{-F_2}{E_1 t_1} \right) \end{cases} \quad (17)$$

其边界条件为

$$\begin{cases} x = \frac{L}{2}: F_1 = 0, F_2 = 0 \\ x = \frac{D}{2}: F_1 = -F_b, F_2 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

当 $E_1 = E_2 = E, t_1 = t_2 = t$ 时,求解微分方程得

$$\begin{cases} F_1 = -F_b \cosh(\frac{\lambda L}{2}) \sinh \lambda x / [\cosh(\frac{\lambda L}{2}) \sinh(\frac{\lambda D}{2}) - \cosh(\frac{\lambda D}{2}) \sinh(\frac{\lambda L}{2})] - F_b \sinh(\frac{\lambda L}{2}) \cosh \lambda x / [\cosh(\frac{\lambda D}{2}) \sinh(\frac{\lambda L}{2}) - \cosh(\frac{\lambda L}{2}) \sinh(\frac{\lambda D}{2})] \\ F_2 = F_b \cosh(\frac{\lambda L}{2}) \sinh \lambda x / [\cosh(\frac{\lambda L}{2}) \sinh(\frac{\lambda D}{2}) - \cosh(\frac{\lambda D}{2}) \sinh(\frac{\lambda L}{2})] + F_b \sinh(\frac{\lambda L}{2}) \cosh \lambda x / [\cosh(\frac{\lambda D}{2}) \sinh(\frac{\lambda L}{2}) - \cosh(\frac{\lambda L}{2}) \sinh(\frac{\lambda D}{2})] \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)代入式(8),得到该状态下的胶层切应力为

$$\tau''_{c2} = \lambda F_b \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \cosh \lambda x / \left[\cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \sinh\left(\frac{\lambda D}{2}\right) - \cosh\left(\frac{\lambda D}{2}\right) \sinh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \right] + \lambda F_b \sinh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \sinh \lambda x / \left[\cosh\left(\frac{\lambda D}{2}\right) \sinh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) - \cosh\left(\frac{\lambda L}{2}\right) \sinh\left(\frac{\lambda D}{2}\right) \right] \quad (20)$$

1.4 胶-螺混合连接结构的胶层切应力分布

将复合材料开孔板单搭接胶接在轴向拉伸状态下的胶层应力与在螺栓反作用力作用下的胶层应力叠加,根据分析模型的对称性,可以求得胶-螺混合连接结构的胶层切应力分布为

$$\tau_c = \begin{cases} \tau_{c1} + \tau'_{c2}, & -\frac{D}{2} \leq x \leq \frac{D}{2} \\ \tau_{c1} + \tau''_{c2}, & -\frac{L}{2} \leq x < -\frac{D}{2} \cup \frac{D}{2} < x \leq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (21)$$

1.5 螺栓反作用力

第 1.3 节的分析表明,若要得到胶-螺混合连接结构胶层的应力,螺栓反作用力的计算是关键。Xu^{[17]105606}在单弹簧模型的基础上引入胶层弹性属性,构建了适用于胶-螺混合连接结构螺栓载荷计算的双弹簧模型,如图 4 所示。

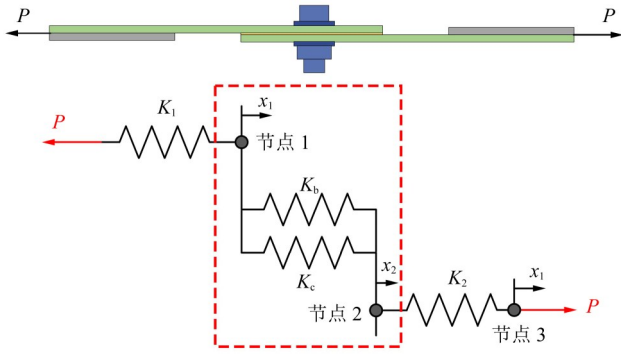


图 4 胶-螺混合连接双弹簧模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the double spring model for the hybrid bonded-bolted joint

由图 4 可知,双弹簧模型将整个连接结构分为 3 个弹性区域,即上、下层合板和中间连接区域。图 4 中, K_1 、 K_2 为上、下层合板的刚度值, K_b 、 K_c 分别为中间连接区域螺栓和胶层的刚度值。

上、下层合板的刚度值与层合板的材料属性以及连接结构几何尺寸相关,表达式^{[18]356-357}为

$$K_i = \frac{2E_{i,x}W_i t_i}{L - D}, i = 1, 2 \quad (22)$$

式中, $E_{i,x}$ 为层合板沿轴向的弹性模量; W_i 为层合板的宽度。

中间连接区域胶层刚度值的计算式为

$$K_c = \frac{G}{H} S \quad (23)$$

式中, S 为胶层搭接区域的面积。

Olmedo 等^{[18]356-357}推导了中间连接区域螺栓刚度

的计算式为

$$\frac{1}{K_b} = \frac{2(t_1 + t_2)}{3G_b A_b} + \frac{2(t_1 + t_2)(1 + 3\beta)}{t_1 t_2 E_b} + \frac{1 + 3\beta}{t_1 (\sqrt{E_{1,x} E_{1,y}})} + \frac{1 + 3\beta}{t_2 (\sqrt{E_{2,x} E_{2,y}})} \quad (24)$$

式中, G_b 、 A_b 和 E_b 分别为螺栓的剪切模量、横截面积和弹性模量;附加因子 $(1+3\beta)$ 代表弯矩的影响, β 的取值为 $0.15 \sim 0.5$ ^[19]; $E_{1,x}$ 、 $E_{1,y}$ 分别为层合板 1 轴向和横向的弹性模量; $E_{2,x}$ 、 $E_{2,y}$ 分别为层合板 2 轴向和横向的弹性模量。

根据图 4 中的双弹簧模型,将胶-螺混合连接结构在拉伸载荷作用下的响应分为 5 个阶段^{[17]105606}。

1) 阶段 1(初始阶段):连接结构未承受拉伸载荷,受螺栓侧向预紧力作用。

2) 阶段 2:连接结构开始承受拉伸载荷,且拉伸载荷较小,连接结构中的垫片与层合板之间产生静摩擦力,螺栓侧向预紧力逐步消失,上、下层合板间发生较小的相对位移,胶层内产生的剪切力较小。

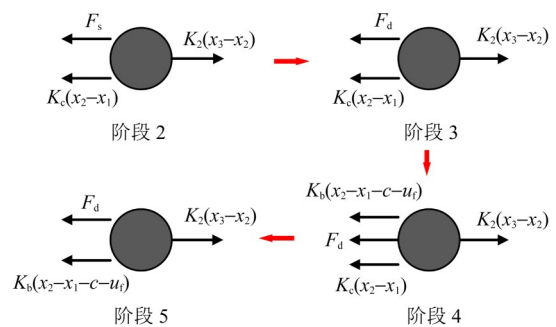
3) 阶段 3:随着拉伸载荷逐渐增大,垫片与层合板之间的静摩擦力转变为滑动摩擦力,上、下层合板间的相对位移增大,胶层内产生的剪切力也逐渐增大,但仍在胶层强度范围内。

4) 阶段 4:拉伸载荷进一步增大,上、下层合板间的相对位移进一步变大,螺栓与层合板孔边的间隙消失,螺栓对层合板产生反作用力,垫片与层合板之间存在滑动摩擦力,胶层内存在剪切力,且胶层未发生强度失效。

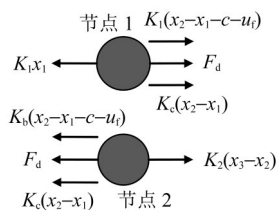
5) 阶段 5:拉伸载荷继续增加,胶层内的应力达到强度极限而发生失效,胶-螺混合连接转化为螺栓连接,螺栓对层合板的作用力增大,垫片与层合板之间仍存在滑动摩擦力。

根据上述分析,以双弹簧模型的节点 2 为例,连接结构拉伸过程中,阶段 2~阶段 5 的受力分析如图 5(a) 所示,阶段 4 中节点 1 和节点 2 的受力分析如图 5(b) 所示。

图 5 中, F_s 为静摩擦力; F_d 为滑动摩擦力; c 为螺栓孔与螺栓之间的间隙; u_i 为摩擦力引起螺栓的微变形; $x_i (i=1, 2, 3)$ 为节点 i 的位移。



(a) 各阶段节点 2 受力分析



(b) 阶段4节点1和节点2受力分析

图5 胶-螺混合连接结构节点受力分析示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the nodal force analysis for hybrid bonded-bolted joint

根据上述分析,在拉伸过程的5个阶段中,螺栓的反作用力在阶段4中开始出现,此时胶层和螺栓同时受力。阶段4重叠区域,节点1与节点2的平衡方程方程为

$$\begin{bmatrix} 0 & -K_2 & K_2 \\ K_b + K_c & -(K_2 - K_b - K_c) & K_2 \\ K_1 + K_b + K_c & -(K_b + K_c) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ -K_b c - K_b u_f + F_d \\ -K_b c - K_b u_f + F_d \end{bmatrix} \quad (25)$$

通过求解方程(25),得到不同节点的位移变形量 x_i 的值,再根据 $K_b(x_2-x_1-c-u_f)$ 可求得螺栓反作用力 F_b 。当忽略螺栓与螺栓孔之间的间隙和螺栓的变形时,螺栓的反作用力为

$$F_b = K_b(x_2 - x_1) \quad (26)$$

2 试验介绍

2.1 试验装置

试验在MTS Landmark 液压拉伸试验机上进行。在室温条件下,采用位移控制方式加载,加载速率为1 mm/min,试验装置如图6(a)所示。

2.2 试样结构

参照ASTM D5961/D5961M-17标准^[20]设计试样结构。其中,宽度 $W=36$ mm,上、下层合板厚度 $t=3.12$ mm,胶层厚度 $H=0.1$ mm,层合板长度 $L_a=135$ mm,连接结构搭接长度 $L=48$ mm,试样结构如图6(b)所示。螺栓的预紧转矩为20 N·m,未考虑螺栓与层合板螺栓孔的间隙,螺栓的侧向预紧力为0。

2.3 试样材料

试样由上、下两块碳/玻混杂复合材料层合板组成,层合板在中间搭接区通过黏结胶、螺栓、螺母以及垫片连接而成。层合板由T300碳纤维(C)单向预浸料和EW200玻璃纤维(G)单向预浸料通过层间混杂,经热压罐成型工艺制成,其中预浸料的基体为环氧树脂,其含量为42.4%。层合板由8层0.2 mm的玻璃纤维及8层0.19 mm的碳纤维交错堆叠而成,层合板总厚度为3.12 mm,其铺层顺序为 $[G/C/C/G/G/C/C/G]_s$,对应的铺层角度为 $[90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/90^\circ]_s$ 。

碳纤维和玻璃纤维预浸料的力学性能参数如表1^[21-22]所示。其中, ν_{11} 、 ν_{22} 、 ν_{33} 分别表示碳纤维(玻璃纤维)层合板3个主方向弹性模量; ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{23} 为泊松比; G_{12} 为面内剪切模量; G_{13} 和 G_{23} 为不同方向的层间剪切模量; S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 为剪切强度; X_T 、 X_c 分别纵向、横向拉伸强度; Y_t 、 Y_c 分别为纵向、横向压缩强度。层合板的力学性能如表2所示。 E_{xx} 、 E_{yy} 分别为层合板纵向和横向弹性模量; G_{xy} 为层合板面内剪切模量。中间胶层采用Araldite 2015黏结胶,其材料力学性能参数如表3^[23]所示。连接结构的螺栓、螺母和垫片均为钢制材料,其弹性模量为209 GPa,泊松比为0.3,屈服强度为240 MPa。

表1 碳纤维与玻璃纤维预浸料力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of carbon and glass fiber prepreps

材料属性	碳纤维	玻璃纤维
E_{11} /GPa	180	60
E_{22} /GPa	10.3	13
E_{33} /GPa	10.3	13
ν_{12}	0.28	0.28
ν_{13}	0.3	0.28
ν_{23}	0.28	0.42
G_{12} /GPa	3.7	3.4
G_{13} /GPa	3.7	3.4
G_{23} /GPa	3.7	3.4
X_t /MPa	1 396	1 062
X_c /MPa	1 030	610
Y_t /MPa	33.9	31
Y_c /MPa	167	118
S_{12} /MPa	65.5	80
S_{13} /MPa	65.5	80
S_{23} /MPa	65.5	46.1

表2 碳/玻混杂层合板力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of carbon/glass hybrid laminates

力学属性	值
E_{xx} /GPa	28.96
E_{yy} /GPa	28.96
G_{xy} /GPa	19.65

表3 Araldite 2015胶层力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters of the Araldite 2015 adhesive layer

参数	值
E_{nn} /GPa	2.21
$E_{ss}=E_{tt}$ /GPa	0.78
σ_n^0 /MPa	33.6
σ_s^0 /MPa	18.5
σ_t^0 /MPa	18.5
G_{1c} /(N/mm)	1
$G_{IIc}=G_{IIIc}$ /(N/mm)	2
η	1.45

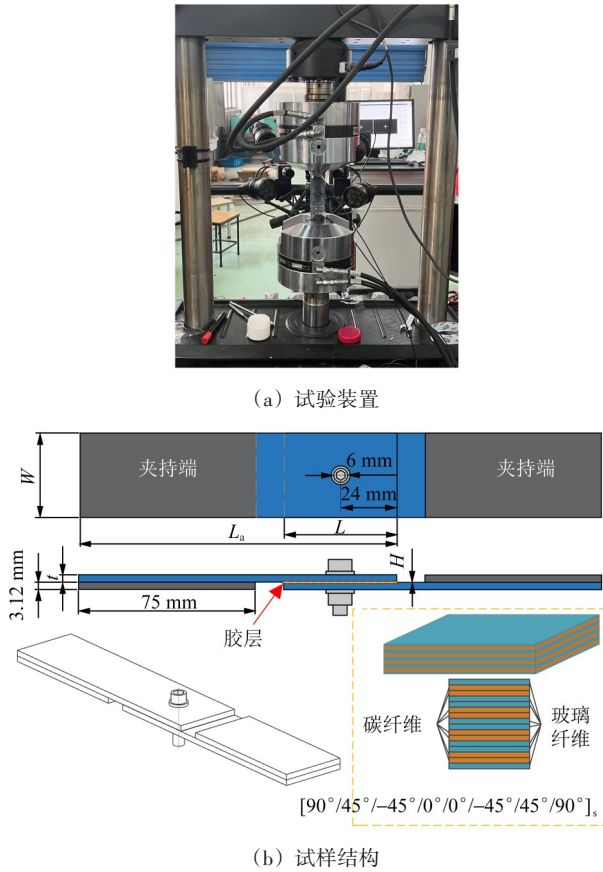


图 6 拉伸试验装置与试样结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the tensile test setup and specimens structure

3 数值仿真

3.1 有限元建模

采用 Abaqus 有限元分析软件,建立碳/玻混杂复合材料单搭接胶-螺混合连接结构的有限元模型。复合材料层合板采用三维实体单元 C3D8R 划分网格,搭接区域的胶层采用内聚力单元 COH3D8 模拟,胶层与上、下层合板建立面-面绑定约束,并在螺栓孔附近进行局部的网格加密;其他结构部件采用 C3D8R 单元进行网格划分。在螺栓、垫片和复合材料层合板之间设置通用接触,在切向采用罚函数(Penalty)设置摩擦因数,在法向使用硬接触,摩擦因数为 0.15^[24]。在连接结构的左侧夹持端设置固定约束,在右侧夹持端施加位移载荷。连接结构的有限元模型如图 7 所示。

3.2 复合材料层合板渐进损伤模型

碳/玻混杂复合材料在拉伸载荷作用下,首先发生局部损伤,然后其材料性能逐渐退化,损伤逐渐积累,最终导致结构断裂失效。在 Abaqus 软件中,采用基于连续介质损伤力学理论的渐进损伤分析模型模拟复合材料层合板的渐进损伤行为,其失效形式分为基体失效和纤维失效 2 种形式。分析胶-螺混合连接结构的拉伸力学性能时,层合板的纤维与基体主要承受拉

伸载荷、螺栓与层合板螺栓孔之间的接触载荷、胶层传递而来的剪切载荷,选用三维 Hashin 失效准则判断纤维失效和基体失效,其渐进损伤分析模型通过子程序 Vumat 实现,相关描述见文献[25]、[26]。

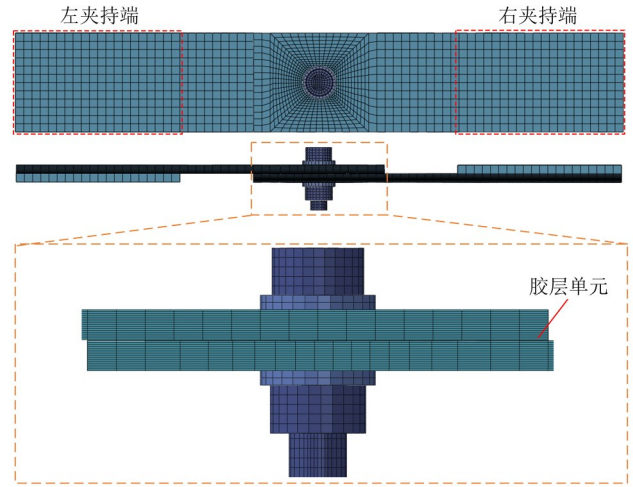


图 7 胶-螺混合连接结构有限元模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the finite element model for the hybrid bonded-bolted joint

3.3 胶层内聚力模型

上、下复合材料层合板之间的胶层选用内聚力模型模拟,即采用双线性本构关系的 Cohesive 单元。本构关系具体表达式为

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{Bmatrix} = (1 - d) \begin{bmatrix} K_{nn} & & \\ & K_{ss} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{cases} K_{nn} = \frac{E_{nn}}{T_0} \\ K_{ss} = \frac{E_{ss}}{T_0} \\ K_{tt} = \frac{E_{tt}}{T_0} \end{cases} \quad (28)$$

式中, σ_n 、 σ_s 以及 σ_t 分别为 3 个方向上的应力; δ_n 、 δ_s 、 δ_t 分别为 3 个方向上的拉伸分离位移; K_{nn} 、 K_{ss} 、 K_{tt} 分别为法向及 2 个切向的内聚力单元的初始界面刚度; E_{nn} 为法向弹性模量; E_{ss} 、 E_{tt} 分别为胶层 2 个正交方向的剪切模量; T_0 为胶层的初始厚度; d 为损伤变量, $0 \leq d \leq 1$, 从 0 增加到 1, 意味着材料从初始损伤($d=0$)演变为最终失效($d=1$), 相关描述见文献[27]。

选用二次应力准则^[28]作为损伤起始判据, 其表达式为

$$f_{quads} = \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_n^0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s^0} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_t^0} \right)^2 = 1 \quad (29)$$

式中, σ_n^0 、 σ_s^0 、 σ_t^0 为黏结元件法向及 2 个切向方向的初始应力; f_{quads} 为损伤起始变量, 当 $f_{quads}=1$ 时, 损伤开始发生。

选用基于能量的 B-K 准则^[29]作为损伤扩展准则,

其表达式为

$$G_c = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{shear}}{G_T} \right)^\eta \quad (30)$$

式中, G_c 为单元失效时总临界状态下的能量释放率; G_{IC} 、 G_{IIC} 、 G_{IIIC} 为 3 种不同断裂失效状态下的临界能量释放率; G_i ($i = I, II, III$) 是 Cohesive 单元具有的应变能释放率, $G_{shear} = G_{II} + G_{III}$, $G_T = G_I + G_{shear}$; η 为 Cohesive 单元内的修正系数。进行有限元建模时, 胶层厚度按试验试样为 0.1 mm, 胶层的力学参数按表 3 所示数值设置。

4 模型验证与结果讨论

4.1 胶-螺混合连接结构有限元模型验证

基于上述模型对碳/玻混杂复合材料单搭接胶-螺混合连接结构进行有限元分析。图 8 所示为试验与有限元仿真的拉伸载荷-位移曲线。

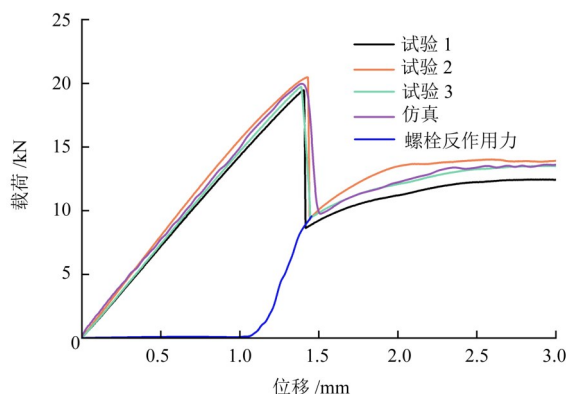


图 8 胶-螺混合连接结构拉伸载荷-位移与螺栓反作用力曲线
Fig. 8 Tensile load-displacement and bolt reaction force curves for the hybrid bonded-bolted joint

由图 8 可知, 试验结果与有限元数值仿真的载荷-位移曲线基本一致。胶-螺混合连接结构在拉伸载荷作用下, 胶层和螺栓的承载可分为 3 个阶段: 胶层承载阶段、胶层失效阶段、纯螺栓承载阶段。首先, 当连接结构承载载荷较小时, 结构所受拉伸载荷基本由胶层承担, 螺栓反作用力较小, 为胶层承载阶段; 然后, 随着拉伸载荷的增大, 胶层两端的应力首先达到强度极限, 并逐渐发生失效, 胶层所能承受的载荷减小, 为胶

层失效阶段, 螺栓反作用力逐渐增大; 当胶层完全失效时, 结构所受的载荷全部由螺栓承担, 结构刚度减小, 在位移一定的情况下载荷瞬间变小, 结构进入纯螺栓连接阶段。

表 4 所示为试验与有限元仿真最大失效载荷的对比。由表 4 可知, 仿真与试验得到的最大失效载荷的误差较小, 验证了有限元模型的正确性。

表 4 试验与有限元仿真最大失效载荷对比

Tab. 4 Comparison of the maximum failure load between test and finite element simulation

试样	最大失效载荷/kN		误差/%
	试验	仿真	
1	19.47		3.3
2	20.48	20.12	1.7
3	19.73		1.9

4.2 胶-螺混合连接结构胶层切应力理论模型验证

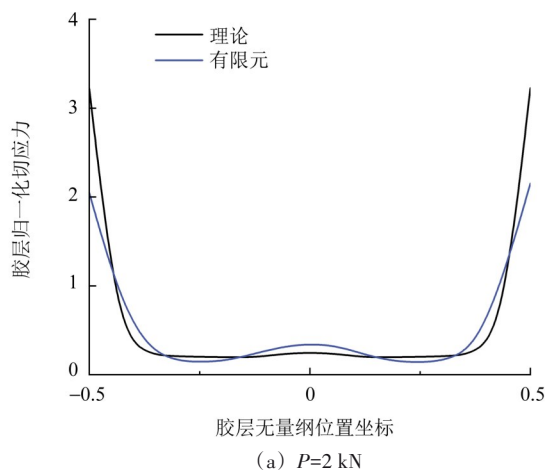
第 4.1 节的分析表明, 在胶层承载阶段中连接结构胶层承担大部分的拉伸载荷。通过式 (25) 和式 (26) 计算连接结构中螺栓的反作用力, 并代入式 (7)、式 (16)、式 (20)、式 (21) 计算得到连接结构胶层内的切应力。

图 9 所示为不同拉伸载荷作用下胶层切应力的理论计算结果和有限元分析结果。由图 9 可知, 在不同拉伸载荷下, 两者均呈现两端高中间低的 U 形, 在胶-螺混合连接中的中间螺栓孔处的胶层切应力趋于增大。理论计算和有限元仿真得到胶层切应力分布规律基本一致。

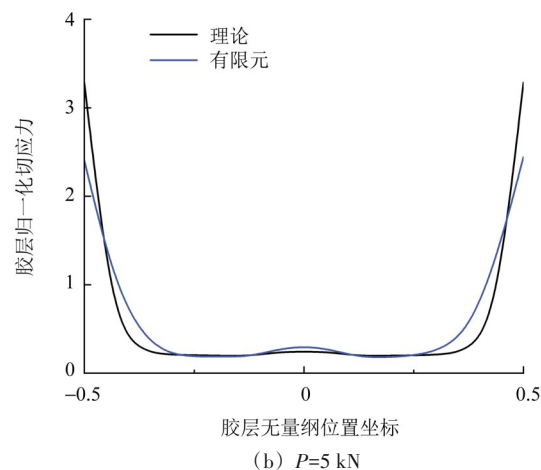
图 10 所示为不同拉伸载荷下胶层平均切应力及螺栓反作用力。其中, 理论解的平均切应力计算式为

$$\tau_m = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \tau_c dx \quad (31)$$

由图 10 可知, 有限元仿真得到的胶层平均切应力和螺栓反作用力与理论计算的结果相近, 进一步验证了所提出的胶-螺混合连接结构胶层切应力理论模型的正确性。同时, 在胶层未失效前, 螺栓的反作用相对较小, 连接结构的载荷主要由胶层承担。



(a) $P=2$ kN



(b) $P=5$ kN

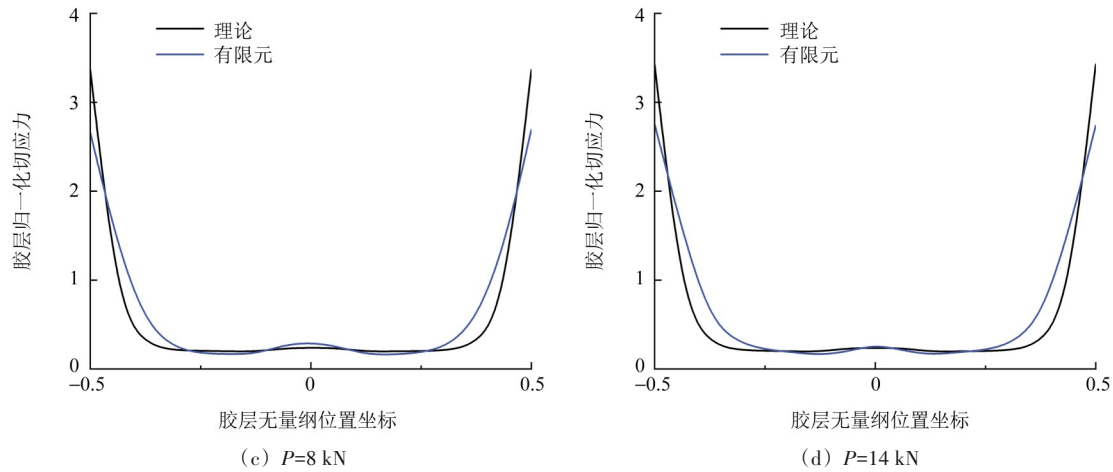


图 9 不同拉伸载荷下胶层切应力分布曲线

Fig. 9 Shear stress distribution curves of the adhesive layer under different tensile loads

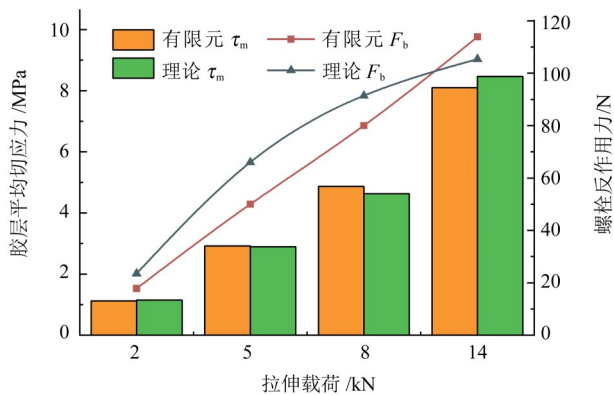


图 10 拉伸载荷下胶层平均切应力与螺栓反作用力曲线

Fig. 10 Average shear stress of the adhesive layer and bolt reaction force curves under the tensile load

4.3 胶-螺混合连接结构胶层切应力的分布规律

图 11 所示为不同拉伸载荷作用下胶层切应力的分布。由图 11 可知,在胶层失效前,随着结构拉伸载荷的增大,胶层两端的切应力数值逐渐增大,中间螺栓孔周围的切应力趋于平缓。其原因为:当载荷较小时,在层合板中间开孔区域,层合板的刚度相对较小,导致该区域胶层的剪切变形较大,切应力会高于开孔区域两侧;当载荷增大,中间区域受刚度较大的螺栓的约束,使得该区域胶层的剪切变形变化不大;但胶层两端与复合材料板直接接触,受螺栓约束的影响较小,因此随着拉伸载荷的增大,胶层两端的切应力会显著增加。

根据试验和有限元仿真结果,当拉伸载荷达到 14 kN 时,胶层在两端开始失效,材料刚度开始折减,且满足 $K_c' = K_c(1-d)$ 关系式,损伤变量 d 随着载荷的增大,从 0 逐渐增至 1,连接结构的弹性刚度开始减小,最终在载荷为 20 kN 左右时达到 1,胶层全部失效。

在胶层失效阶段,随着载荷的增大,胶层失效区域逐渐变大,并由两端逐渐向中间扩展,其损伤扩展过程如图 12 所示。随着胶层逐渐失效,胶层有效承载

面积变小,所能承担的载荷也逐渐减小,则螺栓承担的载荷逐渐变大,最终变为纯螺栓连接结构。

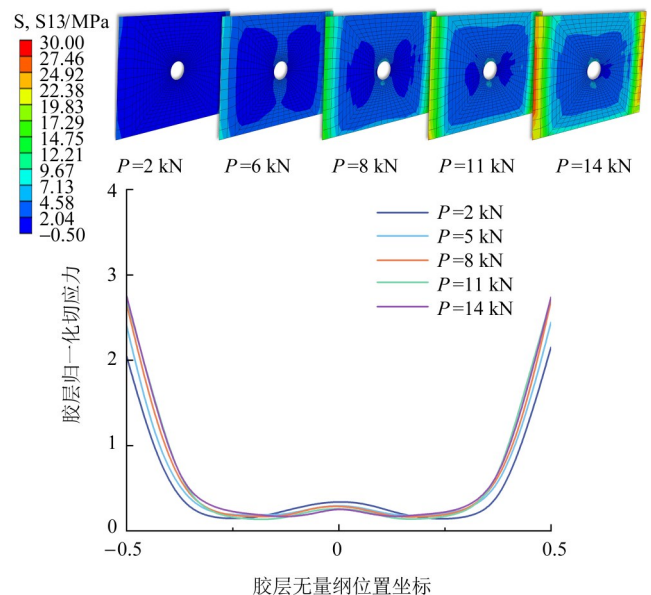


图 11 不同拉伸载荷下胶层切应力分布云图

Fig. 11 Contour plots of shear stress distribution in adhesive layer under different tensile loads

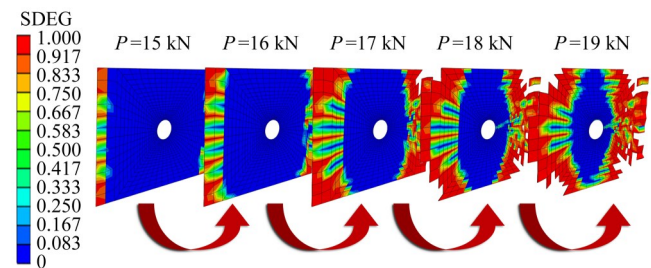


图 12 不同载荷下胶层损伤演化云图

Fig. 12 Contour plots of the adhesive layer damage evolution under different loads

静载作用下的胶层切应力分布规律,其结果对一定条件下动载荷响应的分析也有参考意义。比如:当胶接结构受交变载荷作用时,该切应力的计算结果是疲劳强度校核的基础,将其乘以修正系数并与材料

(胶层)的 $S-N$ 曲线对照,可以初步确定胶接结构中胶层的疲劳寿命;当胶接结构受低速冲击载荷作用时,胶层内的应力波的传播相对平缓,应力峰值较低,应力局部效应较小,其整体应力分布与静载应力相比变化较小,静载下的胶层切应力分布规律对低速冲击下胶层失效分析也具有一定参考意义。

5 结论

根据胶接结构的切应力分析方法和胶-螺混合连接结构的双弹簧模型,建立了胶-螺混合单搭连接结构的胶层应力分析模型。并通过试验和有限元仿真,研究了复合材料胶-螺混合单搭连接结构的胶层切应力分布规律,得到以下主要结论。

1)胶-螺混合单搭连接结构中,胶层和螺栓的承载可分为3个阶段:胶层承载阶段、胶层失效阶段、纯螺栓承载阶段。

2)胶-螺混合单搭连接结构中,胶层的切应力分布呈现两端高中间低的U形,胶层未失效前,随着拉伸载荷的增大,连接区域两端的切应力逐渐增大,中间螺栓区域的切应力趋于平缓。

3)在胶层失效阶段,随着载荷的增大,胶层失效区域逐渐变大,并由两端逐渐向中间扩展,直至胶层全部失效。

参考文献(References)

- [1] 栗海波,陈波,吴熙,等. 纤维增强复合材料多模式内聚断裂的相场模型[J]. 工程设计学报,2024,31(3):301-308.
Su Haibo, Chen Bohui, Wu Xi, et al. Phase-field model for multi-pattern cohesive fracture in fiber reinforced composite material[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2024, 31(3): 301-308. (In Chinese)
- [2] Al-Furjan M S H, Shan L, Shen X, et al. A review on fabrication techniques and tensile properties of glass, carbon, and Kevlar fiber reinforced polymer composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 2930-2959.
- [3] 皮骏,崔红利,贾元琨. 碳-芳纶纤维复合材料高速冲击响应数值模拟[J]. 机械强度, 2024, 46(2): 416-423.
Pi Jun, Cui Hongli, Jia Yuankun. Numerical simulation of high-speed impact response of carbon aramid fiber composites[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(2): 416-423. (In Chinese)
- [4] 李成良,杨超,倪爱清,等. 复合材料在大型风电叶片上的应用与发展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1274-1284.
Li Chengliang, Yang Chao, Ni Aiqing, et al. Application and development of composite materials in large-scale wind turbine blade[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1274-1284. (In Chinese)
- [5] 单奕萌,弥世青,周健,等. 碳纤维复合材料铆接接头力学性能与失效机制研究[J]. 机械强度, 2023, 45(6): 1483-1492.
Shan Yimeng, Mi Shiqing, Zhou Jian, et al. Study on mechanical performance and failure mechanism of carbon fiber composite riveted joints[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(6): 1483-1492. (In Chinese)
- [6] Kang Y G, Kou S J, Meng K J, et al. Credal identification of damage patterns in ultra-thin-ply composite bonded/bolted interference-fit joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 162: 108371.
- [7] Feng J M, Zhang J D, Jin W J, et al. Damage evolution modeling of CFRP/Al single-lap screw type blind riveted joints during realistic installation process[J]. Composite Structures, 2024, 337: 118023.
- [8] 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]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 32(4): 346-352. (In Chinese)
- [9] 李桂洋,李健芳,张娅婷,等. 国产MT700碳纤维复合材料螺栓连接强度实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(10): 75-79.
Li Guiyang, Li Jianfang, Zhang Yating, et al. An experimental study on bolted connection strength of MT700 carbon fiber composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(10): 75-79. (In Chinese)
- [10] 刘峰,王卓煜,豆广征. 胶接对碳纤维层合板与铝合金板单钉连接静强度的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2022(12): 46-53.
Liu Feng, Wang Zhuoyu, Dou Guangzheng. Bonding influence on static strength of single bolted joint of carbon laminates and aluminum alloy plate[J]. Composites Science and Engineering, 2022(12): 46-53. (In Chinese)
- [11] 杨晓,贺娜,肖鹏,等. 拉伸载荷作用下玻璃纤维复合材料-铝合金双钉混合连接接头失效行为数值研究[J]. 复合材料科学与工程, 2025(5): 22-30.
Yang Xiao, He Na, Xiao Peng, et al. Numerical study of failure behavior of glass fiber composite material and aluminum alloy double-bolt hybrid joint under tensile loading[J]. Composites Science and Engineering, 2025(5): 22-30. (In Chinese)
- [12] Her S C. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints[J]. Composite Structures, 1999, 47(1/2/3/4): 673-678.
- [13] Nguyen T H, Le Grogne P. Analytical and numerical simplified modeling of a single-lap joint[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2021, 108: 102827.
- [14] Marchione F. Stress distribution in double-lap adhesive joints: effect of adherend reinforcement layer[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2021, 105: 102780.
- [15] Veisytbar M, Reza A, Shekari Y. Stress analysis of adhesively-bonded single stepped-lap joints with functionally graded adherends based on the four-parameter fractional viscoelastic model[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2023, 98: 104907.
- [16] Paroissien E, Lachaud F, Schwartz S. Modelling load transfer in single-lap adhesively bonded and hybrid (bolted/bonded) joints[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2022, 130: 100811.
- [17] Xu P F, Zhou Z G, Liu T Z, et al. A novel double-spring analytical model for hybrid GLARE joints: model development, validation, parameter study and global sensitivity analysis[J]. International

- Journal of Mechanical Sciences, 2020, 177: 105606.
- [18] Olmedo A, Santiuste C, Barbero E. An analytical model for the secondary bending prediction in single-lap composite bolted-joints [J]. Composite Structures, 2014, 111(1): 354-361.
- [19] McCarthy M A, McCarthy C T, PADHI G S. A simple method for determining the effects of bolt-hole clearance on load distribution in single-column multi-bolt composite joints [J]. Composite Structures, 2006, 73(1): 78-87.
- [20] ASTM D5961/D5961M-17 Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates[S].
- [21] Liu J H, Xu Y X, Yi X B, et al. Experimental and numerical simulation study on Near-edge/On-edge Low-Velocity impact and residual compressive strength of T300/69 laminates[J]. Composite Structures, 2022, 280: 114887.
- [22] Zheng Y X, Hu K J, Zhang M, et al. Characterizing damage patterns and evolution in multi-hole GLARE laminates under tensile load via integrated AE and DIC techniques[J]. Composite Structures, 2024, 331: 117911.
- [23] Xu P F, Zhou Z G, Liu T Z, et al. Propagation of damage in bolt jointed and hybrid jointed GLARE structures subjected to the quasi-static loading[J]. Composite Structures, 2019, 218: 79-94.
- [24] 王强, 贾普荣, 张龙, 等. 碳纤维增强复合材料沉头螺栓连接失效分析[J]. 航空材料学报, 2020, 40(6): 59-70.
- Wang Qiang, Jia Purong, Zhang Long, et al. Failure analysis of carbon fiber reinforced composite countersunk bolt joint [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40 (6) : 59-70. (In Chinese)
- [25] 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)
- [26] Hashin Z. Fatigue failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1981, 48(4): 846-852.
- [27] Li X, Li Y Z, Li F, et al. Failure analysis and experimental study on bolted composite joints based on continuum damage mechanics [J]. Composite Structures, 2023, 303: 116274.
- [28] Hu C X, Huang G B, Li C. Experimental and numerical study of low-velocity impact and tensile after impact for CFRP laminates single-lap joints adhesively bonded structure[J]. Materials, 2021, 14(4): 1016.
- [29] Benzeggagh M L, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(4): 439-449.

Shear stress distribution in the adhesive layer of composite hybrid bonded-bolted single-lap joint structure

ZHANG Sheng¹ ZHU Fuxian¹ HU Kejun¹ ZHANG Kunlong¹ ZHANG Zhen²

(1. School of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

(2. Jiangsu Branch of China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Changzhou 213164, China)

Abstract: [Objective] Adhesive layer failure frequently occurs in composite bonded-bolted hybrid single-lap joint structures. An analytical model for shear stress in the adhesive layer was established to provide reference for strength design and failure prevention of joint structures. [Methods] Firstly, an analytical formula for shear stress in the adhesive layer of hybrid bonded-bolted joints was derived based on the shear stress calculation formula of adhesive structures and the double spring model, and bolt reaction forces were calculated to propose a calculation method for adhesive layer shear stress. Secondly, carbon/glass hybrid composite specimens were fabricated according to ASTM D5961 standard, and tensile tests were carried out to obtain load-displacement curves. Then, a finite element model was established by Abaqus software, and progressive damage model and cohesive zone model were introduced to simulate the structural failure process. Finally, theoretical calculation, test and simulation results were compared to verify the model accuracy and analyze the shear stress distribution law of the adhesive layer. [Results] The results show that the loading process of composite bonded-bolted hybrid single-lap joint structures can be divided into three stages: adhesive layer bearing stage, adhesive layer failure stage and pure bolt bearing stage. The shear stress distribution of the adhesive layer presents a U-shape with high values at both ends and low value in the middle. The adhesive layer failure expands gradually from both ends to the middle. The error of maximum failure load between finite element simulation and test is less than 3.3%, and the calculation results of the analytical model are in good agreement with the simulation results.

Key words: Hybrid bonded-bolted joint; Shear stress; Double spring model; Failure; Finite element simulation

Corresponding author: ZHU Fuxian, E-mail: jxzf@jst.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (52075232); Changzhou Key R&D Programme Funded Projects (CE20230039)

Received: 2024-10-22 Revised: 2024-12-11

(编辑: 李凯阳)