

碳纤维增强复合材料螺栓连接力学特性分析

王海艳, 冯岩, 王庆超, 于万春

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对碳纤维增强复合材料(CFRP)螺栓连接承受横向载荷时的变形以及受载情况,基于三维Hashin失效准则,建立了CFRP板钛合金螺栓连接抗拉强度预测模型,将CFRP板螺栓连接从加载开始到彻底破坏的载荷-位移曲线划分为静止阶段、滑移阶段、完全滑移阶段、螺栓杆承载阶段和破坏阶段共5个阶段,对每个阶段接触状态以及载荷传递方式进行了分析,研究了螺栓连接处在不同阶段弯矩、剪力的大小以及分布,并分析了CFRP板厚与螺栓预紧力对连接强度、连接处弯矩和剪力的影响。结果表明,螺栓连接处在滑移阶段和完全滑移阶段弯矩和剪力理论计算与仿真结果的最大误差不超过20%,在螺栓杆承载阶段和破坏阶段最大误差不超过15%。

关键词: CFRP; 螺栓连接; 数值模拟; 横向载荷; 力学特性

中图分类号: TB 33 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)05-0071-09

Mechanical Characteristic Analysis of Carbon Fiber Reinforced Polymer Bolted Joints

WANG Hai-yan, FENG Yan, WANG Qing-chao, YU Wan-chun

(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China. Corresponding author: WANG Hai-yan, E-mail: hywang 16@126.com)

Abstract: Aiming at the deformation of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) bolted joints subjected to transverse load as well as the loading situation, a model is established to predict the tensile strength of a titanium alloy bolted joint with CFRP plates based on the three-dimensional Hashin failure criterion, in which the load-displacement curve of the CFRP bolted joint from the beginning of loading to complete destruction is divided into five stages, i. e. the stationary stage, the slip stage, the complete slip stage, the bolted rod load-bearing stage and the failure stage. Then, the contact state as well as the mode of load transfer in each stage are analyzed, the magnitude of bending moment and shear force as well as the distribution of the bolted joint at different stages are investigated, and the effects of CFRP thickness and bolt preload on the strength of the joint, bending moment and shear force at the joint are analyzed. The results show that the maximum error between theoretical calculations and simulation results for bending moment and shear force at the bolted joint does not exceed 20% in the slip stage and the complete slip stage, and the maximum error does not exceed 15% in the bolted rod load-bearing stage and the failure stage.

Key words: CFRP; bolted joint; numerical simulation; transverse load; mechanical characteristic

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有较高的比强度、比刚性,轻量化效果十分明显,在航空、航天等领域应用十分广泛^[1-2]。在复合材料零件装配过程中,连接处的可靠安全性至关重要^[3],采用螺栓连接通常能提供足够的连接强度,因此广泛应

用于工程结构中。然而,由于螺栓孔边缘应力高度集中,CFRP板的周围区域容易发生变形和损伤破坏,因此对CFRP板螺栓连接处的接触状况以及受载情况进行分析十分重要。

针对CFRP接头性能预测,Xu等^[4]建立了基

于连续损伤动力学的三维各向异性非线性渐进损伤模型,揭示了CFRP板螺栓连接的损伤机理.在数值模拟中CFRP的基体和纤维损伤对应不同刚度退化模式,指数非线性退化模型比一次性刚度退化模型和双线性刚度退化模型具有更高的精确度^[5].对于CFRP的分层失效,Li等^[2]使用层间内聚单元模拟CFRP的分层,准确预测了CFRP板螺栓连接在拉伸载荷作用下的连接强度和损伤模式.在CFRP的螺栓连接中,由于CFRP的各向异性以及连接件之间的相互作用,表现出极其复杂的载荷-位移曲线响应,近年来,在考虑间隙、螺栓预紧力、摩擦系数等因素基础之上,三线性模型得到了广泛应用^[6].螺栓预紧力在外载荷作用下会有松弛现象,Liang等^[7]研究了单搭接螺栓连接的预紧力松弛机理,提出一种四阶段理论模型用来预测单搭接螺栓连接在不同情况下的载荷-位移曲线,然而没有单独划分出CFRP的损伤破坏阶段.Krishnadasan等^[8]利用三维模型分析剪切孔周围的应力分布情况,并提出摩擦力会减少连接处的剪切载荷,连接件产生的弯曲现象会增加接触力,却没有指出摩擦力对CFRP螺栓连接载荷-位移曲线的影响规律及程度.在拉伸载荷的作用下,Zhao等^[9]利用数值模拟研究了CFRP板螺栓连接的三维损伤破坏模式,并与实验结果作了对比,结果表明单搭接损伤是由螺栓倾斜和二次弯曲效应引起CFRP板翘曲造成的.

综上,当CFRP板承受横向载荷时,对单搭接

螺栓连接的接触状态、受载情况等分析的相关文献并不多,没有单独划分出CFRP的损伤破坏阶段且没有研究整个阶段的载荷分布.因此,本文分析了CFRP板钛合金螺栓连接从加载开始到彻底破坏5个阶段的不同接触状态以及载荷传递方式,着重研究连接处各阶段弯矩和剪力分布,讨论螺栓预紧力、CFRP板厚对连接强度、弯矩和剪力的影响.

1 有限元建模及数值模拟

CFRP本构关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: $C_{ij}(i,j=1,2,3,4,5,6)$ 为不同方向的刚度; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}(i,j=1,2,3)$ 分别为应力和应变张量的分量.

1.1 失效准则和材料退化规律

为了模拟CFRP的损伤和失效过程,采用三维Hashin失效准则^[10],当材料满足表1中的任意一个失效准则时,材料开始发生损伤,表1中 X_t, X_c, Y_t, Y_c 代表不同方向的强度(下标t代表拉伸,c代表压缩), $S_{ij}(i,j=1,2,3)$ 为剪切强度, $e_s(s=ft, fc, mt, mc)$ 为不同损伤类型的损伤初始系数.

表1 CFRP在不同模式下的失效准则

Table 1 Failure criteria for CFRP in different modes

损伤类型	失效准则
纤维拉伸破坏($\sigma_{11} \geq 0$)	$e_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$
纤维压缩破坏($\sigma_{11} < 0$)	$e_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1$
基体拉伸破坏($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$)	$e_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t}\right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$
基体压缩破坏($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)	$e_{mc} = \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}}\right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$

损伤发生以后材料性能开始退化,其刚度矩阵会发生相应变化^[11]:

$$\sigma = C\varepsilon. \quad (2)$$

式中: C 为损伤发生以后的刚度矩阵; σ 和 ε 分别表示应力和应变.

使用指数函数形式的刚度渐进函数来描述

CFRP的连续损伤变量^[12].

$$d_s = 1 - \frac{1}{e_s} \exp \frac{C_{ij}(\varepsilon_{ij}^s)^2 (e_s - 1) L_c}{-G_s}. \quad (3)$$

式中: $d_s(s=ft, fc, mt, mc)$ 分别对应纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸、基体压缩失效模式的连续损伤变量; ε_{ij}^s 表示不同方向、不同损伤形式的失效应

变; L_c 为特征长度; G_s 为不同损伤形式的断裂能. 连续损伤变量的变化范围为 0~1 (=1 时 CFRP 完全失效).

分层失效主要发生在连接孔处, Hasin 失效准则并没有考虑分层破坏, 因此采用双线性内聚力模型来模拟复合材料层间载荷的传递和分层失效, 采用偏移法在 CFRP 板层之间插入厚度为 0 的 cohesive 单元^[12].

1.2 螺栓连接建模

被连接件为不同厚度的 CFRP 板, 铺层顺序为 [45/0/-45/0/90/0/45/0/-45/0]s. 三维模型的几何尺寸如图 1 所示 ($t=t_a=t_b=3.7\text{ mm}$, $w/d=6$, $e/d=3$), 螺栓采用钛合金材料^[9]. 其中: w , e 分别为 CFRP 板的宽度和端距; t_a , t_b 分别为靠近和远离 $Z=0$ 的 CFRP 板厚度; d , D 分别为螺栓杆和螺栓孔的直径; 螺栓杆与螺栓孔的间隙 $\delta=0.1\text{ mm}$. 为简化模型并不失仿真精度, 将螺紋忽略^[13], 采用增强沙漏控制的 C3D8R 实体单元对各层厚度进行建模.

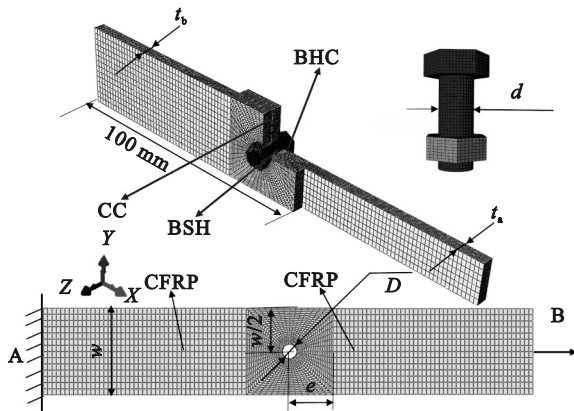


图 1 单搭接螺栓连接零件几何尺寸
Fig. 1 Geometry of single-lap bolted parts

如图 1 所示, 考虑到螺栓孔周围的应力集中, 试件孔附近选择局部网格尺寸为 0.4 mm, 选择全局网格尺寸为 1.5 mm, 螺栓选择全局网格尺寸为 0.5 mm 进行网格划分. 定义 CFRP 板与 CFRP 板、螺栓杆与螺栓孔、螺栓头与 CFRP 板的接触对, 分别命名为 CC, BSH 和 BHC, 这些接触的法向采用“硬”接触, 切向采用惩罚函数接触, CC 和 BSH 的摩擦系数为 0.11, BHC 的摩擦系数为 0.20^[14]. 对截面 A 施加完全固定约束, 截面 B 施加沿 X 方向的横向位移载荷, 对 CFRP 板沿法线方向的位移以及各个方向的转动进行限制, 给螺栓施加预紧力 F_{pre} . CFRP 板有 3 种不同厚度 ($t=t_a=t_b=3, 4, 5\text{ mm}$, $w/d=4$, $e/d=2$, $\delta=0.1\text{ mm}$), 其铺层不同角度的比例、尺寸相同, 只是厚度不同.

1.3 仿真与实验结果对比

在 INSTRON-8803 实验系统进行静态拉伸实验, 位移载荷以 1 mm/min 的恒定速率作用于截面 B, 直至螺栓连接处破坏, 施加的载荷和位移由计算机自动记录^[9], 其中 $t_a=t_b=3.7\text{ mm}$, $d=5\text{ mm}$, 螺栓扭矩 $M_{pre}=8.6\text{ N}\cdot\text{m}$. 图 2 为螺栓连接的载荷-位移曲线数值仿真与实验结果对比, 失效位移以及失效载荷分别为 1.9 mm 和 11.2 kN, 与实验结果拟合较好, 失效载荷和失效位移的预测结果与实验数据误差分别低于 5.2%, 10.4%, 表明所建立的渐进损伤模型能够预测连接处的初始刚度和随后的刚度退化, 同时也能够用来预测在实际工况环境中的失效载荷, 为避免连接处发生损伤破坏提供一定的参考.

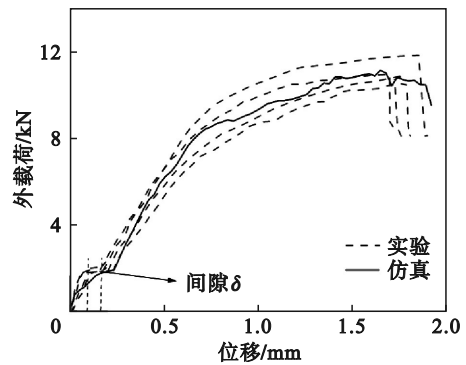


图 2 载荷-位移曲线仿真与实验结果对比
Fig. 2 Comparison between simulated and experimental results of load-displacement curves

2 理论分析计算

2.1 阶段划分

如图 3 所示, 根据螺栓与 CFRP 板的接触状态、载荷传递方式以及 CFRP 板是否损伤将载荷-位移曲线划分为 I 静止阶段、II 滑动阶段、III 完全滑动阶段、IV 螺栓杆承载阶段、V 破坏阶段 (初始破坏外载荷约为 8 kN) 5 个阶段. 图 4 为 CFRP 板螺栓连接在不同阶段的接触状态, 其中: U 为总位移, U_1 为 X 方向位移. F_I , F_{II} 分别为第 I, II 阶段 CFRP 板承受的载荷, $F_{I_{max}}$, $F_{II_{max}}$ 分别为第 I, II 阶段 CFRP 板承受的最大载荷. 在第 I 阶段, 如图 4a 所示, BHC 和 CC 界面没有宏观滑动, 外载荷 F_I 与螺栓预紧力 F_{pre} 在 BHC 和 CC 界面产生的静摩擦力相互作用, 此时的位移是由螺栓和 CFRP 板变形引起的, 可以忽略不计. 在第 II 阶段, 如图 4b 所示, 由于外载荷的持续增加导致 CC 界面静摩擦力被

完全克服,CC界面完全滑移,而BHC界面在螺栓预紧力的作用下大部分区域没有发生滑移,部分外载荷通过BHC界面传递,并通过螺栓杆的剪切刚度和弯曲刚度进行载荷的抵消.在第Ⅲ阶段,如图4c所示,BHC界面的静摩擦力也被克服,宏观滑移发生在BHC和CC界面的所有区域,外载荷基本保持不变,CFRP板相对螺栓移动,在此过程螺栓孔间隙逐渐被消除.在第Ⅳ阶段,如图4d所示,BSH界面相互接触,螺栓沿拉伸方向轻微旋转,此时外载荷持续增加,且主要由螺栓杆来承载载荷.在第Ⅴ阶段,螺栓和孔边缘发生明显变形和损伤,螺栓沿拉伸方向出现较大的旋转角度,随后,

CFRP板出现严重的损伤破坏,承载性能迅速下降.

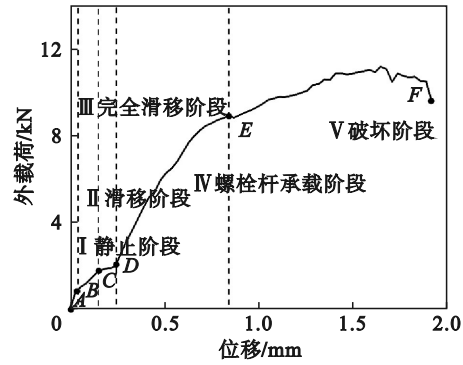


图3 载荷-位移曲线阶段划分
Fig. 3 Load-displacement curve stages division

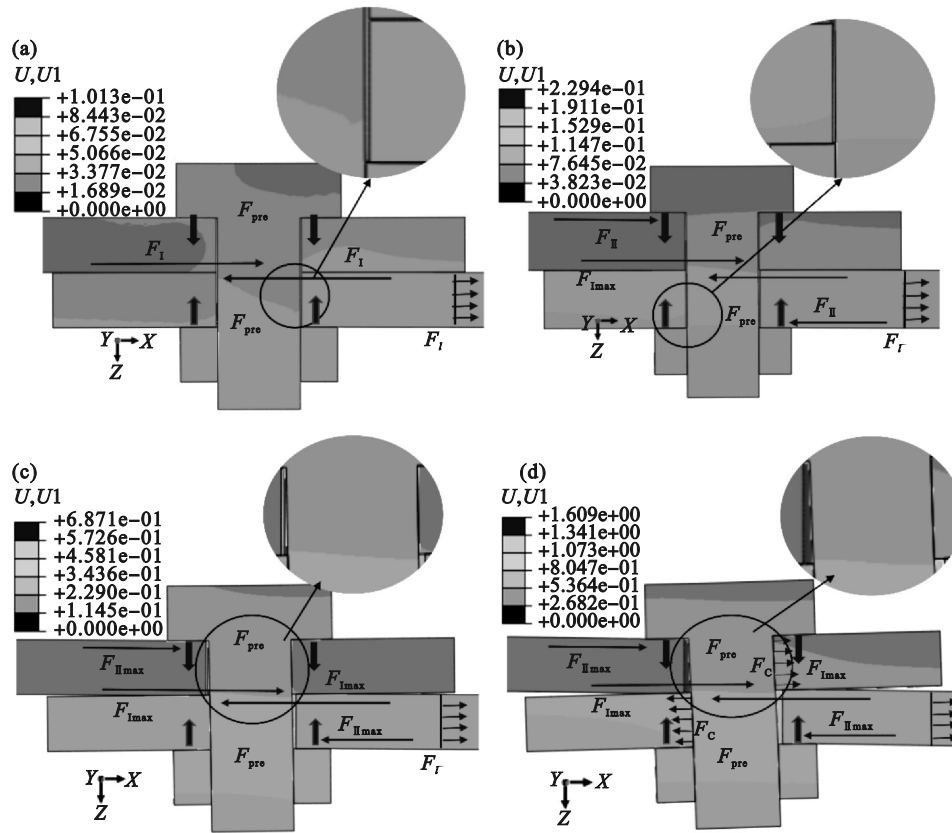


图4 螺栓连接在不同阶段的接触状态

Fig. 4 Contact state of bolted connections at different stages

(a)—I 静止阶段; (b)—II 滑移阶段; (c)—III 完全滑移阶段; (d)—IV 螺栓杆承载阶段.

2.2 弯矩和剪力计算

根据载荷的传递方式,将5个阶段再次划分为两个阶段: I~III, IV~V 阶段.

2.2.1 I~III 阶段

在第 I 阶段,载荷的传递大部分依靠CC界面静摩擦力,少部分依靠BHC界面静摩擦力,也就是说此时螺栓杆承受的弯矩和剪力很小.当载荷持续增加进入第 II 阶段,此时主要依靠CC和BHC界面传递载荷.在第 III 阶段,CC和BHC界

面完全滑移,直至BSH界面相互接触,此时载荷通过BHC和CC界面传递.

在 I, II 阶段的最大载荷可表示为^[7]

$$F_{I\max} = \begin{cases} F_{CC\max} + k_{BHC} \delta_1, & k_{BHC} \delta_1 \leq F_{BHC\max}; \\ F_{CC\max} + F_{BHC\max}, & k_{BHC} \delta_1 > F_{BHC\max}. \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{II\max} = \begin{cases} F_{CC\max} + F_{BHC\max}, & \delta > (F_{CC\max} + F_{BHC\max} - F_1)/k_2; \\ F_{I\max} + \delta k_2, & \delta \leq (F_{CC\max} + F_{BHC\max} - F_1)/k_2. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_{CC\max}, F_{BHC\max}$ 分别为CC, BHC界面的最大

静摩擦力; k_{BHC} 为BHC界面的刚度; k_2 为第II阶段的刚度; δ_1 为第I阶段的最大位移。

μ_k (动摩擦力系数)约为 μ_s (静摩擦力系数)的75%^[15],假设螺栓头和螺母在预紧力的作用下完全约束,则弯矩、剪力可表示为

第II阶段:

$$\left. \begin{aligned} T &= F_l - \mu_{\text{kcc}} F_{\text{pre}}, F_{\text{lmax}} \leq F_l \leq F_{\text{llmax}}; \\ M &= T(t - Z). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

第III阶段:

$$\left. \begin{aligned} T &= F_{\text{llmax}} - \mu_{\text{kcc}} F_{\text{pre}}; \\ M &= T(t - Z). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: M, T 分别为螺栓承受的弯矩和剪力; t 为CFRP板厚度; μ_{kcc} 为CC界面动摩擦系数。

2.2.2 IV~V阶段

在IV~V阶段,BSH界面相互接触,螺栓预紧力会约束螺栓与CFRP板来阻碍螺栓的旋转,假设螺栓在CFRP板的外表面受到弹性约束,螺栓中心线在弯矩、剪力的作用下产生位移 $v(Z)$,在螺栓杆与孔壁接触中存在单位长度的接触力 f_c 。

$$\frac{dM}{dZ} = T, \quad (8)$$

$$\frac{dT}{dZ} = -f_c. \quad (9)$$

假设单位长度接触力为^[16]

$$f_c = G_1 A_{\text{es}} \frac{d^2 v}{dZ^2} - kv. \quad (10)$$

式中: G_1 为CFRP板的面外剪切模量; A_{es} 为有效剪切面积; k 为CFRP板的面内刚度, $k = E_1 / (1 - d/w) / 0.8$ ^[17],其中 E_1 为CFRP板的杨氏模量.有效剪切面积与螺栓直径有关^[16],而且与CFRP板厚度也相关.因此,综合考虑螺栓直径和CFRP板厚提出有效剪切面积 $A_{\text{es}} = df(t)$,其中 $f(t)$ 是与CFRP板厚相关的函数,根据螺栓连接柔韧性有限元仿真测量,令 $f(t) = 0.2t$.螺栓杆截面的旋转是中心轴的弯曲旋转 θ 和剪切变形的总和,则

$$\frac{d^2 v}{dZ^2} = \frac{-f_c}{k_1 G_b A_b} + \frac{d\theta}{dZ}. \quad (11)$$

式中: k_1 为螺栓杆剪切修正系数; G_b 和 A_b 分别为螺栓杆剪切模量和横截面积.根据线弹性Timoshenko梁,可以得到

$$M = -E_b I_b \frac{d\theta}{dZ}. \quad (12)$$

式中: E_b 和 I_b 分别为螺栓的杨氏模量和面积惯性矩,结合式(8)~(12),得出

$$\left. \begin{aligned} M &= - \left(E_b I_b \frac{G_1 A_{\text{es}}}{k_1 G_b A_b} + E_b I_b \right) \frac{d^2 v}{dZ^2} + \frac{k E_b I_b}{k_1 G_b A_b} v; \\ T &= - \left(E_b I_b \frac{G_1 A_{\text{es}}}{k_1 G_b A_b} + E_b I_b \right) \frac{d^3 v}{dZ^3} + \frac{k E_b I_b}{k_1 G_b A_b} \frac{dv}{dZ}; \\ \theta &= \frac{dv}{dZ} - \frac{T}{k_1 G_b A_b}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

求解式(13),可得出以下等式:

$$\left(E_b I_b + E_b I_b \frac{G_1 A_{\text{es}}}{k_1 G_b A_b} \right) \frac{d^4 v}{dZ^4} - \left(\frac{k E_b I_b}{k_1 G_b A_b} + G_1 A_{\text{es}} \right) \frac{d^2 v}{dZ^2} + kv = 0. \quad (14)$$

则可得

$$v(Z) = \sum_{i=4j-3}^{4j} C_i e^{n_i}. \quad (15)$$

其中:当 $0 < Z < t_a$ 时, $j=1$;当 $t_a < Z < t_a + t_b$ 时, $j=2$.则可得

$$\left. \begin{aligned} M_j &= \sum_{i=4j-3}^{4j} C_i M_{ji}(Z); \\ T_j &= \sum_{i=4j-3}^{4j} C_i T_{ji}(Z); \\ \theta_j &= \sum_{i=4j-3}^{4j} C_i \theta_{ji}(Z); \\ v'_j &= \sum_{i=4j-3}^{4j} C_i v'_i(Z). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} M_{ji}(Z) &= - \left(E_b I_b \frac{G_1 A_{\text{es}}}{k_1 G_b A_b} + E_b I_b \right) e^{n_i} n_i^2 + \frac{k E_b I_b}{k_1 G_b A_b}; \\ T_{ji}(Z) &= - \left(E_b I_b \frac{G_1 A_{\text{es}}}{k_1 G_b A_b} + E_b I_b \right) e^{n_i} n_i^3 + \frac{k E_b I_b}{k_1 G_b A_b} n_i; \\ \theta_{ji}(Z) &= e^{n_i} n_i - \frac{T_{ji}}{k_1 G_b A_b}; \\ v'_i(Z) &= e^{n_i} n_i. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

边界条件:

$Z=0$ 时,

$$T_1 = -G_1 A_{\text{es}} \frac{dv_1}{dZ}, \quad M_1 = k_{r1} \theta. \quad (18)$$

$Z=t_a$ 时,

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= F_l - G_1 A_{\text{es}} \frac{dv_1}{dZ}, \quad M_1 = M_2; \\ T_2 &= F_l - G_1 A_{\text{es}} \frac{dv_2}{dZ}, \quad \frac{dv_1}{dZ} = \frac{dv_2}{dZ}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$Z=t_a + t_b$ 时,

$$T_3 = -G_1 A_{\text{es}} \frac{dv_2}{dZ}, \quad M_2 = -k_{r2} \theta. \quad (20)$$

其中:螺栓头和螺母的旋转约束因子 k_{r1}, k_{r2} 近似相等,与螺栓和CFRP板的变形有关,在线弹性阶段,给出旋转约束因子^[14]:

$$k_r = \frac{M}{\theta} = \frac{k_{cbc}k_{cbn}}{k_{cbc} + k_{cbn}} \quad (21)$$

式中: k_{cbc} 为 CFRP 板的弹性支撑刚度; k_{cbn} 为螺栓头或者螺母的弹性支撑刚度.

当对螺栓施加预紧力时, 连接件孔周围会受到向内的压力而产生翘曲、变形, 旋转因子随之发生变化, 在本文中螺栓有 3 种不同螺栓扭矩 ($M_{pre}=1.5, 9.6, 19.2 \text{ N}\cdot\text{m}$), 螺栓扭矩 M_{pre} 与螺栓预紧力 F_{pre} 可表示为

$$M_{pre} = K_n F_{pre} d. \quad (22)$$

式中, K_n 为 M_{pre} 与 F_{pre} 之间力矩系数.

在第 V 阶段, 螺栓和 CFRP 板发生变形和损伤破坏, 螺栓对板的约束减弱, 旋转约束因子将会发生变化, 此时旋转约束因子很难通过理论计算得到, 因此本文从仿真和实际出发, 得到旋转约束因子随 CFRP 板厚增加而减小, 随螺栓扭矩

增加, 开始增大, 然后减小, 如图 5 所示.

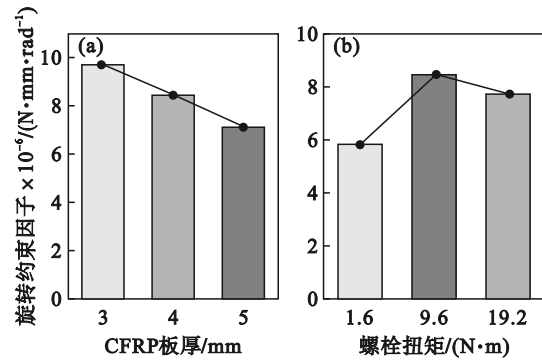


图 5 旋转约束因子随 CFRP 板厚和螺栓扭矩变化
Fig. 5 Variation of rotational restraint factor with CFRP plate thickness and bolt torque
(a)—CFRP 板厚; (b)—螺栓扭矩.

式(18)~(20)可表示为

$$\begin{bmatrix} T_{ji}(0) + G_1 A_{cs} v_i'(0) & \dots & 0 & \dots \\ M_{ji}(0) - k_{r1} \theta_{ji}(0) & \dots & 0 & \dots \\ T_{ji}(t_a) + G_1 A_{cs} v_i'(t_a) & \dots & 0 & \dots \\ M_{ji}(t_a) & \dots & -M_{ji}(t_a) & \dots \\ 0 & \dots & T_{ji}(t_a) + G_1 A_{cs} v_i'(t_a) & \dots \\ v_i'(t_a) & \dots & -v_i'(t_a) & \dots \\ 0 & \dots & T_{ji}(t_a + t_b) + G_1 A_{cs} v_i'(t_a + t_b) & \dots \\ 0 & \dots & M_{ji}(t_a + t_b) + k_{r2} \theta_{ji}(t_a + t_b) & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_l \\ 0 \\ F_l \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

式中: $j=1$ 时, $i=1, 2, 3, 4$ (第 1 个矩阵的 1~4 列); $j=2$ 时, $i=5, 6, 7, 8$ (第 1 个矩阵的 5~8 列), 由式(23)可得矩阵 C , 然后 v, M, T, θ 等未知数可获得.

3 结果分析与讨论

3.1 不同阶段的影响

图 6 展示的是当 $M_{pre}=9.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时, 不同厚度的 CFRP 板连接处弯矩和剪力的分布图. 其中: $F_{II3}=F_{II4}=F_{II5}=1\ 200 \text{ N}$, $F_{III3}=F_{III4}=F_{III5}=1\ 800 \text{ N}$, $F_{IV3}=F_{IV4}=F_{IV5}=6\ 000 \text{ N}$, $F_{V3}=10\ 000 \text{ N}$, $F_{V4}=12\ 000 \text{ N}$, $F_{V5}=6\ 000 \text{ N}$, M, T 分别表示通过理论计算得到的弯矩、剪力, M_f, T_f 分别表示通过仿真得到的弯矩、剪力, F_{ij} ($i=II \sim V, j=t3, t4, t5$) 表示施加的外载荷, 例如, F_{II3} 表示在第 II 阶段、CFRP 板厚为 3 mm 时施加的外载荷. 不同阶段弯矩、剪力变化非常明显, 在 II~III 阶段, 如图 6a~图 6d 所示, 弯矩和剪力沿 Z 方向呈线性分布, 最大弯矩出现在靠近螺母和螺栓头的位置; 剪力在整个螺栓杆上

变化不大. 在 IV~V 阶段, 如图 6e~图 6h 所示, 弯矩与剪力呈曲线分布, 最大弯矩仍然出现在靠近螺母和螺栓头的位置处, 但相比 II~III 阶段弯矩沿 Z 方向分布更加均匀, 也就是说不会出现严重的弯曲应力集中现象; 最大剪力出现在 CC 界面处且沿 Z 方向变化非常明显. 由图 6 可知, 弯矩、剪力的理论计算和仿真结果吻合度较高, 整体上 II~III 阶段的最大误差比 IV~V 阶段的最大误差大, 在 II~III 阶段连接处承受载荷较小, 忽略了此阶段的变形以及位移, 由此在变形最大处的误差最大. 当 CFRP 板厚为 4 mm 时, 在 II~III 阶段 M 和 T 的最大误差分别为 18.6%, 12.6%; 在 IV~V 阶段 M 和 T 的最大误差分别为 8.4%, 11.1%.

3.2 CFRP 板厚的影响

当 CFRP 板厚为 3, 4, 5 mm, 螺栓扭矩为 9.6 N·m 时, 其最终失效载荷分别为 10.5, 13.1, 15.1 kN, 如图 7 所示, 由此可知增加 CFRP 板厚可以提高连接处的承载能力, CFRP 板较厚时刚度大于较薄时刚度, 这是因为增加 CFRP 板厚会增加纤维数量, 减少了变形量.

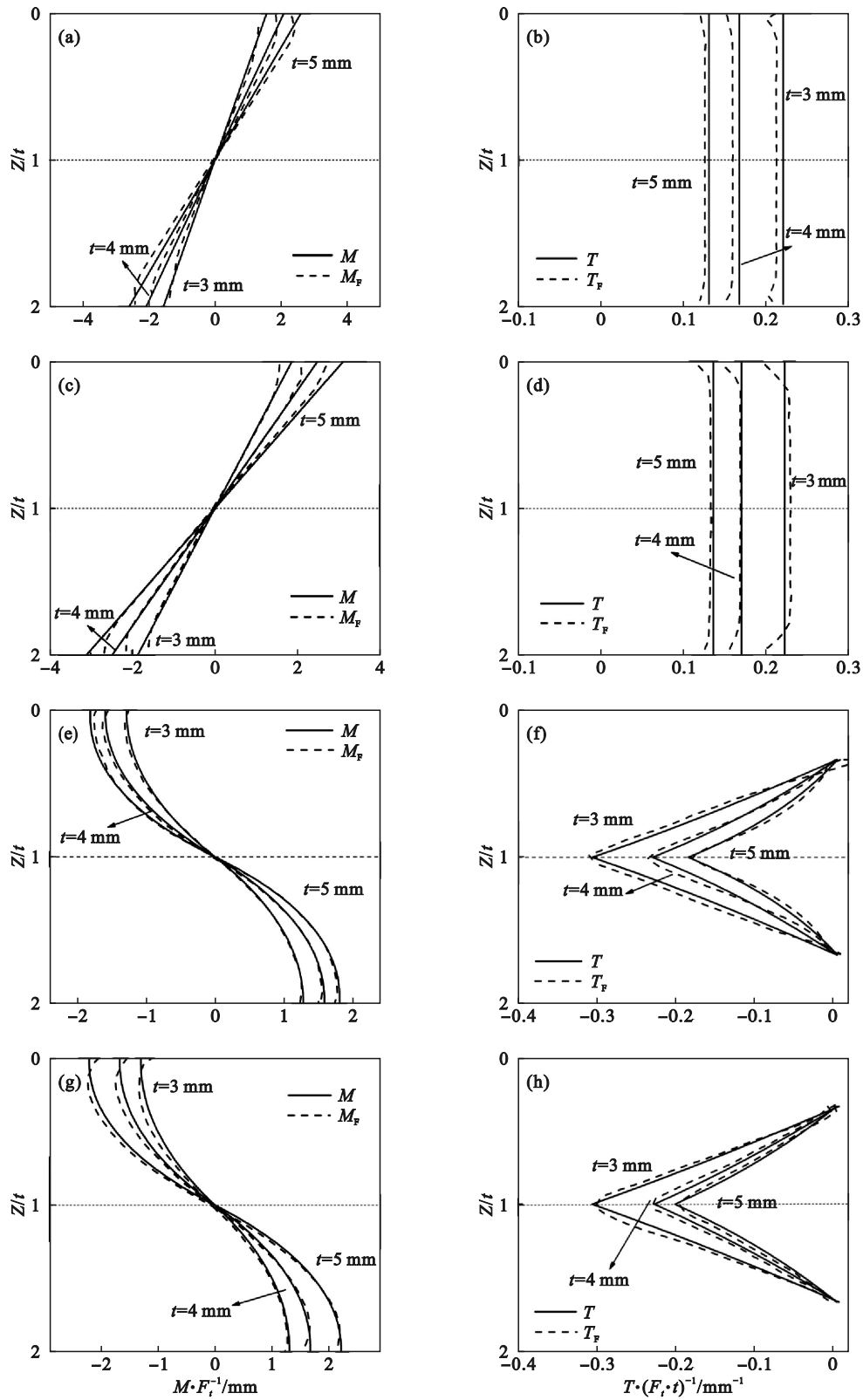


图 6 不同 CFRP 板厚的连接处弯矩、剪力对比

Fig. 6 Comparison of bending moment and shear force at the joint for different CFRP plate thicknesses

(a) — II 阶段弯矩; (b) — II 阶段剪力; (c) — III 阶段弯矩; (d) — III 阶段剪力;
 (e) — IV 阶段弯矩; (f) — IV 阶段剪力; (g) — V 阶段弯矩; (h) — V 阶段剪力.

如图 6a 和图 6b 所示,对于 II~III 阶段的不同 CFRP 板厚,最大弯矩都出现在靠近螺栓两端处,在相同外载荷情况下,随着板厚的增加最大弯矩

也随之增加,剪力并没有发生太大变化.在 IV~V 阶段增加 CFRP 板厚时,连接处弯矩、剪力分布更加均匀,剪力沿 Z 方向相同位置处还更小,同样也

能提高连接处的最大弯矩和最大剪力,这主要是由于增大板厚可以提高失效载荷,如图 6c,图 6d,图 7 所示.由图 6 可知在 II~III 阶段弯矩和剪力理论计算与仿真结果的最大误差随板厚的增加而减少,最大误差分别为 19.1% 和 14.6%;在 IV~V 阶段弯矩和剪力的最大误差随 CFRP 板厚变化不明显,最大误差分别为 8.4% 和 14.3%.

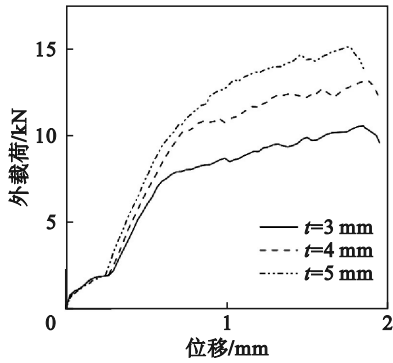


图 7 不同 CFRP 板厚的载荷-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves for different CFRP plate thicknesses

3.3 螺栓扭矩的影响

在如图 8 所示的载荷-位移曲线中,当 CFRP 板厚为 4 mm,螺栓扭矩分别为 1.5, 9.6, 19.2 N·m 时,其最终失效载荷分别为 11.4, 13.1, 11.7 kN,可知提高螺栓扭矩在一定程度上能够提高连接强度.这是因为随着螺栓扭矩的增加会在一定程度上提高螺栓对 CFRP 板的约束,减少连接处的变形,但是过分提高螺栓扭矩会提前使 CFRP 板在厚度方向上发生损伤,降低承载能力.

如图 8 所示,当螺栓扭矩增大时,载荷-位移曲线 I~III 阶段的位移节点向右移动,载荷节点向上移动,也就是说 I~III 阶段的最大弯矩和最大剪力也随之增加,II,IV 阶段的刚度有所增加.相同外载荷可能会对应不同的阶段,也就是说会有不同的接触状态,但在同一阶段、相同外载荷的情况下,螺栓扭矩对弯矩、剪力的影响并不明显,但螺栓扭矩会影响不同阶段的节点位置.在 V 阶段不同螺栓扭矩会影响失效载荷,进而影响最大弯矩和最大剪力,由图 9 可知,在不同螺栓扭矩的情况下,弯矩和剪力理论计算与仿真结果的最大误差分别达到了 9.59%, 7.54%,弯矩最大误差出现在相对位置 $Z/t=0$ 处,这是因为连接件在承受载荷时,施加外载荷的 CFRP 板在靠近上表面的连接处变形破坏最为严重,在第 V 阶段选择不同螺栓扭矩 ($M_{pre}=1.5, 9.6, 19.2 \text{ N}\cdot\text{m}$) 时,施加的外载荷分别为 10 000, 12 000, 11 000 N.

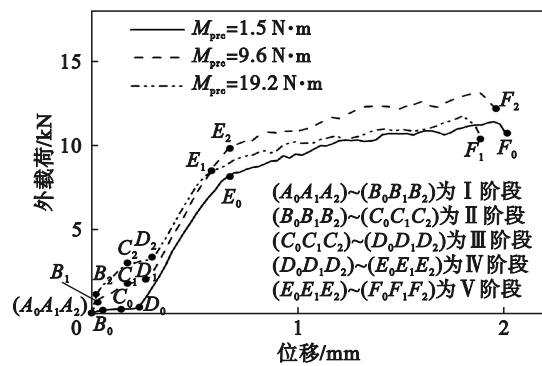


图 8 不同螺栓扭矩的载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves for different bolt torques

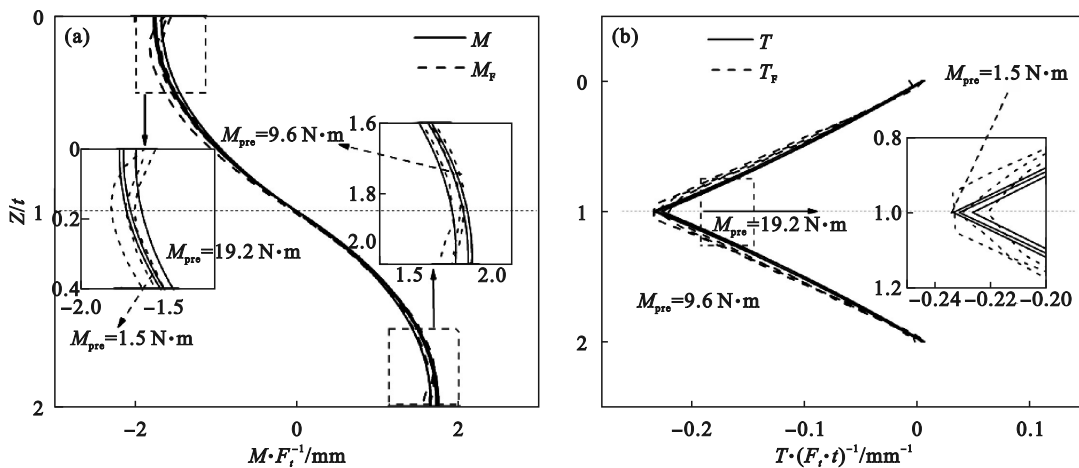


图 9 不同螺栓扭矩的连接处弯矩、剪力对比

Fig. 9 Comparison of bending moment and shear force at the joint for different bolt torques

(a)—连接处弯矩; (b)—连接处剪力.

4 结 论

1) 将CFRP板单搭接螺栓连接在承受横向载荷时的载荷-位移曲线划分为I静止阶段、II滑移阶段、III完全滑移阶段、IV螺栓杆承载阶段、V破坏阶段5个阶段,螺栓连接处在每个阶段的接触状态和载荷传递方式都有显著差异,在I~III阶段,螺栓杆与孔壁不发生接触,在IV~V阶段,螺栓杆与孔壁发生接触,随着载荷的增加,螺栓与CFRP板的变形进一步变大。

2) 当螺栓扭矩为 $9.6 \text{ N}\cdot\text{m}$,CFRP板厚从3 mm增加到4,5 mm时,最终失效载荷分别提高24.8%和43.8%,螺栓连接处在II~III阶段弯矩和剪力理论计算与仿真结果的最大误差分别为19.1%和14.6%,在IV~V阶段的最大误差分别为8.4%和14.3%,最大弯矩出现在靠近螺母和螺栓头的位置处,最大剪力出现在CC界面处,增大CFRP板厚可以提高最大弯矩和最大剪力。

3) 当CFRP板厚为4 mm,螺栓扭矩从 $1.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 增大到 $9.6, 19.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,其最终失效载荷分别提高14.9%和2.6%,最大弯矩和最大剪力随失效载荷的增加而增加。随着螺栓扭矩的增大,I~III阶段的位移节点向右移动,载荷节点向上移动,最大弯矩和最大剪力随之增加,在IV~V阶段,螺栓扭矩为 $1.5, 9.6, 19.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时,螺栓连接处弯矩和剪力理论计算与仿真结果的最大误差分别达到了9.59%,7.54%,验证了模型的正确性。

参考文献:

- [1] 李晖,徐忠浩,王东升,等.基于集中质量法的纤维增强复合材料的损伤定位[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(2):234-240.
(Li Hui, Xu Zhong-hao, Wang Dong-sheng, et al. Damage location of fiber-reinforced composites based on lumped mass approach [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(2): 234-240.)
- [2] 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.
- [3] 山美娟,赵丽滨. CFRP复合材料螺栓连接失效载荷不确定性的评估方法[J].复合材料学报,2021,38(5):1468-1475.
(Shan Mei-juan, Zhao Li-bin. An evaluation method for uncertainty in failure load of CFRP composite bolted joints [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(5): 1468-1475.)
- [4] Xu G H, Cheng H, Zhang K F, et al. Modeling of damage behavior of carbon fiber reinforced plastic composites interference bolting with sleeve [J]. *Materials & Design*, 2020, 194: 108904.
- [5] Pinho S T, Darvizeh R, Robinson P, et al. Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(19/20): 2313-2341.
- [6] Liu Z F, Zheng M P, Guo J F, et al. Experimental study on performance characterization of bolted joint under transverse loading [J]. *Measurement*, 2021, 182: 109608.
- [7] Liang Y C, Xu F, Zhang X Y, et al. An analytically improved four-stage model for single-lap torqued bolted joints accounting for preload relaxation [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 182: 110252.
- [8] Krishnadasan C K, Shanmugam N S, Sivasubramonian B, et al. Analytical studies and numerical predictions of stresses in shear joints of layered composite panels for aerospace applications [J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112927.
- [9] Zhao L B, Xin A, Liu F R, et al. Secondary bending effects in progressively damaged single-lap, single-bolt composite joints [J]. *Results in Physics*, 2016, 6: 704-711.
- [10] Hashi Z. Failure criteria for unidirectional fiber composite [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47: 3292334.
- [11] Zhang H Y, Zhang L, Liu Z, et al. Numerical analysis of hybrid (bonded/bolted) FRP composite joints: a review [J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113606.
- [12] Zheng Y P, Zhang C Y, Ying T I E, et al. Tensile properties analysis of CFRP-titanium plate multi-bolt hybrid joints [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(3): 464-474.
- [13] El Zaroug M, Kadioglu F, Demiral M, et al. Experimental and numerical investigation into strength of bolted, bonded and hybrid single lap joints: effects of adherend material type and thickness [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 87: 130-141.
- [14] Kou J F, Xu F, Xie W, et al. A theoretical 4-stage shear model for single-lap torqued bolted-joint with clearances [J]. *Composite Structures*, 2018, 186: 1-16.
- [15] Blau P J. The significance and use of the friction coefficient [J]. *Tribology International*, 2001, 34(9): 585-591.
- [16] Kapidžić Z, Granados D L Á, Arias J A M, et al. Bolt fatigue in CFRP joints [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 164: 107138.
- [17] Barrois W. Stresses and displacements due to load transfer by fasteners in structural assemblies [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1978, 10(1): 115-176.