

# 复材结构中螺栓拧紧过程影响因素分析

李汝鹏<sup>1,2</sup>, 肖睿恒<sup>2</sup>, 王耀<sup>2</sup>, 安鲁陵<sup>3</sup>, 蔡跃波<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 2. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201324;  
3. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 针对许多因素会影响复合材料结构装配中预紧力和拧紧力矩的关系, 使得预紧力的产生有偏差的问题, 以复合材料结构单螺栓连接为研究对象, 利用有限元仿真技术模拟螺栓的拧紧过程。研究表明: 在弹塑性阶段, 施加相同的拧紧力矩, 接触面摩擦系数、螺栓直径会显著影响预紧力, 钉孔配合间隙、螺距对预紧力有一定的影响。

**关键词:** 复合材料结构; 螺栓连接; 预紧力; 有限元

**中图分类号:** TH31 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2022)05-0054-04

## Analysis on Influence Factors of Bolt Tightening Process in Composite Structures

LI Rupeng<sup>1,2</sup>, XIAO Ruiheng<sup>2</sup>, WANG Yao<sup>2</sup>, AN Luling<sup>3</sup>, CAI Yuebo<sup>3</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China; 3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** With respect to many factors affecting the relationship between the preload and the tightening torque which cause the deviation of preload, and the single bolt connection of composite structure being the research subject, the bolt tightening process was simulated by finite element method. The results show that the friction coefficient of the contact surface and the bolt diameter, at elastic and plastic stage, may significantly affect the preload when the same tightening torque is applied, while bolt-hole clearance and pitch have certain effects on clamping force.

**Keywords:** composite structures; bolted connection; preload; finite element

## 0 引言

复合材料具有较高的比强度和比模量, 广泛应用于飞机结构的制造中<sup>[1]</sup>。在飞机复合材料构件装配连接过程中, 螺栓连接是常用的机械连接方式, 通过转矩扳手或者拧紧轴施加一定的拧紧力矩, 产生的轴向力使得螺栓被拉长和被连接件被压缩, 这个力就是预紧力。在螺栓拧紧过程中, 很多因素会对预紧力产生影响, 包括摩擦系数、螺距、钉孔配合间隙、牙型角、螺栓直径等。这些因素导致了预紧力与拧紧力矩曲线的不确定性, 使得工程实际中无法准确产生合适大小的预紧力。

目前研究螺栓拧紧过程中预紧力的影响因素已经有不少的成果。OH J H 等<sup>[2]</sup>用一个简单的经验公式表达了拧紧力矩与预紧力的关系, 即  $T = KFd$ , 其中转矩系数  $K$  是表征拧紧力矩和预紧力关系最直接的变量, 其与许多因素相关, 有学者和标准<sup>[3-4]</sup>推荐使用具有普适性的转矩系数 ( $K=0.2$ ), 但是在面对关键部位或者特殊材料的螺栓连接, 比如复合材料螺栓连接时, 该  $K$  值并不适用。YAMAMOTO A<sup>[5]</sup>研究了螺栓弹性拧紧区拧紧力矩与预紧力的关系, 在经验公式的基础上提出了更细化的公式, 公式把转矩系数  $K$  和摩擦系数、螺栓接头的几何尺寸结合在一起。CROCCOLO D 等<sup>[6]</sup>研究了摩擦系数对拧紧力矩

与预紧力关系的影响, 发现当摩擦系数较低时, 相同的拧紧力矩可能会产生较大的预紧力, 当摩擦系数较大时, 预紧力会不足。ZHU L B 等<sup>[7]</sup>研究了牙型角对转矩系数  $K$  的影响。有限元分析结果表明转矩系数  $K$  随着牙型角的增大而增大。

本文以复合材料结构单螺栓连接为研究对象, 采用有限元分析方法进行研究, 建立了带螺纹升角的螺栓、螺母网格模型, 对复合材料结构螺栓拧紧过程进行有限元仿真, 根据理论分析曲线对有限元模型的准确性进行验证, 分析了接触面摩擦系数、钉孔配合间隙、螺距、螺栓直径对螺栓拧紧过程中预紧力的影响。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 网格模型的建立和装配

有限元模型由螺栓、螺母和带螺栓孔的被连接件组成。在建立螺栓和螺母的网格模型时, 考虑了螺距、螺纹升角、螺纹牙型、牙型角等特征细节。螺纹的尺寸标准参照 MIL-S-8879 统一螺纹规范, 螺栓和螺母的几何尺寸参照 NAS6204 和 NASM21042。螺栓和螺母精细网格模型的建立按照线面体的思路建立, 即根据文献[8]的介绍得到螺纹截面曲线的表达式, 绘制外、内螺纹的截面曲线, 然后

将曲线转换为曲面,建立三维网格。复合材料板的尺寸考虑了列距/孔径、排距/孔径和孔径/板厚等因素,网格采用扫掠形成的 C3D8R 网格。装配好的复合材料结构螺栓拧紧网格模型如图 1 所示。

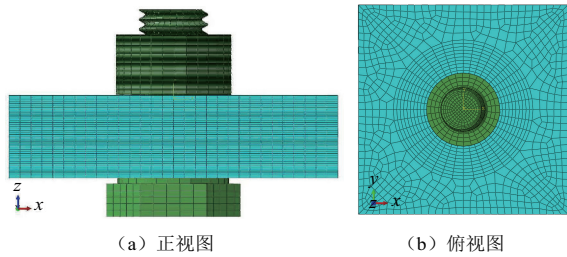


图 1 复合材料结构螺栓拧紧网格模型

## 1.2 材料参数设置

GH2132 是一种高温合金,在高温下具有优异的力学性能,广泛应用于航空发动机零部件的制造中。本文以 GH2132 作为螺栓螺母的材料进行分析。在设置螺栓和螺母的材料属性时,需要考虑弹塑性变形的影响,材料弹塑性的参数均要设置。根据文献[9] GH2132 模锻件拉伸的真实应力-应变曲线如图 2 所示,力学性能如表 1 所示。

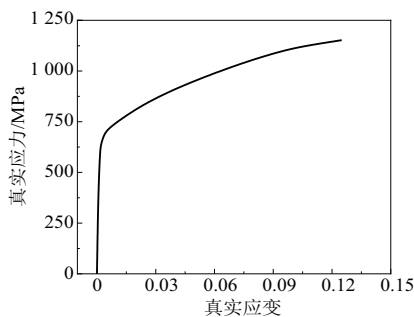


图 2 GH2132 的真实应力-应变曲线

表 1 GH2132 的力学性能

弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	真实应力 $\sigma_{\text{true}}/\text{MPa}$	塑性应变 $\epsilon^t$
$1.98 \times 10^5$	0.3	660.0	0
		699.6	0.002
		771.1	0.013

在初始有限元模型中,被连接件的材料选用的是碳纤维增强环氧树脂基复合材料,复合材料具体的力学性能如表 2 所示。

表 2 复合材料的性能

性能	值	性能	值
纵向弹性模量 $E_1/\text{MPa}$	156 000	面内切变模量 $G_{12}/\text{MPa}$	4 200
横向弹性模量 $E_2/\text{MPa}$	8 350	面外切变模量 $G_{13}/\text{MPa}$	4 200
厚度方向弹性模量 $E_3/\text{MPa}$	8 350	面外切变模量 $G_{23}/\text{MPa}$	2 520
主泊松比 $\mu_{12}$	0.33	厚度方向泊松比 $\mu_{13}$	0.33
厚度方向泊松比 $\mu_{23}$	0.55		

## 1.3 定义接触行为

模型中定义了螺栓、螺母和复合材料板之间的 4 个接触对。为了接触的稳定性 and 仿真的收敛性,螺纹副的法向接触方式定义为软接触,设定零间距时的接触压力值和零接触压力时的间距,其他接触面的法向接触方式均定义为硬接触。用罚函数定义接触面的切面摩擦行为,摩擦系数均设置为 0.15。螺纹副的接触选择有限滑移,其余均选择小滑移。

## 1.4 定义分析步和载荷边界条件

在有限元模型中通过改变转角来模拟复合材料结构螺栓拧紧过程,输出的历史变量是拧紧力矩和预紧力。分析步的类型设置为 Static、General,边界条件和载荷设置如下:

- 1) 初始分析步:固定螺栓头部,约束其任意方向的移动和转动,约束复合材料板两侧面;
- 2) 第一个分析步:将参考点 RP-1 和螺母外表面进行耦合约束,对参考点施加转角载荷,  $U_{R3}$  的数值设定为  $-1.0472 \text{ rad}$  (相当于转动  $60^\circ$ ),把  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_{R1}$ 、 $U_{R2}$  的数值设为 0,不约束  $U_3$  的数值;
- 3) 后续分析步:继续对  $U_{R3}$  的数值叠加  $-1.0472 \text{ rad}$ ,使螺母下表面逐渐接触复合材料板,产生预紧力。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 有限元模型的验证

本文采用的有限元模型准确性的验证方法是,将有限元模型得到的预紧力与拧紧力矩曲线同理论分析得到的曲线进行对比,理论分析中预紧力和拧紧力矩的关系式参考文献[5],对比结果如图 3 所示。因为理论曲线是建立在螺栓不发生屈服的前提下,所以只对比弹性阶段的预紧力与拧紧力矩曲线,两条曲线的预紧力误差约为 2.77% ~ 7.96%。总体来说,有限元仿真的结果与理论分析结果在螺栓屈服前的吻合度比较好,说明有限元建模过程的合理性。

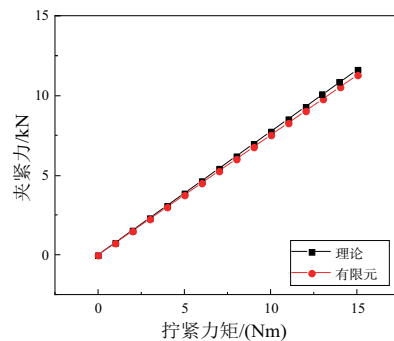


图 3 有限元模型的验证

### 2.2 接触面摩擦系数对螺栓拧紧过程中预紧力的影响

在螺栓拧紧过程中,如果改变接触面摩擦系数,转矩

系数会发生变化,最终影响到螺栓拧紧过程中的预紧力。本文需要研究的是接触面摩擦系数包括端面摩擦系数和螺纹间摩擦系数。为了能单独研究某个摩擦系数对预紧力的影响,研究的基本方法是保证一个摩擦系数不变,改变另一个摩擦系数,在螺纹间摩擦系数为 0.15 时,端面摩擦系数依次取 0.05、0.10、0.15、0.20;在端面摩擦系数为 0.15 时,螺纹间摩擦系数依次取 0.05、0.10、0.15、0.20。

按照两种摩擦系数的数值修改有限元模型的参数,端面摩擦系数对螺栓拧紧过程中预紧力影响的对比曲线如图 4 所示,螺纹间摩擦系数对螺栓拧紧过程中预紧力影响的对比曲线如图 5 所示。从图中可以看出,两种摩擦系数对预紧力与拧紧力矩曲线的影响均比较显著。其中,端面摩擦系数越大,施加相同的拧紧力矩,得到的预紧力越小。这是因为端面摩擦系数越大,转矩系数越大,预紧力越小;同理,螺纹间摩擦系数越大,转矩系数越大,预紧力越小。在弹性阶段,预紧力和拧紧力矩的曲线是线性的,当螺栓达到屈服,拧紧曲线会逐渐平缓,曲线斜率不再是一定的。根据曲线弯曲的时刻可知,端面摩擦系数对曲线屈服的影响不大,螺纹间摩擦系数对拧紧曲线的屈服有较大的影响。

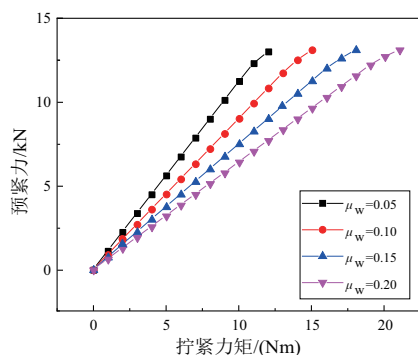


图 4 不同端面摩擦系数下的预紧力与拧紧力矩曲线对比

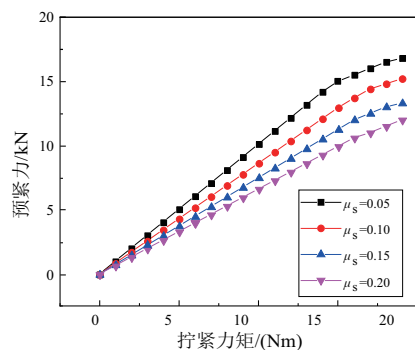


图 5 不同螺纹间摩擦系数下的预紧力与拧紧力矩曲线对比

当拧紧力矩均为 10 Nm 时,端面摩擦系数从 0.05 增大到 0.20 时,预紧力的值从 11.24 kN 减小到 6.42 kN,下降幅度是 42.9%;当螺纹间摩擦系数从 0.05 增大到 0.20 时,预紧力的值从 10.12 kN 减小到 6.62 kN,下降幅度是 34.58%。由于设置的摩擦系数一定,弹性阶段曲线是线性的,该差值比例基本不变;塑性阶段曲线是非线性的,该差值比例可能会变化,但是影响规律基本一致。由此可见,在螺栓拧紧过程中,微小间隙对预紧力的影响不大。

性的,该差值比例基本不变;塑性阶段曲线是非线性的,该差值比例可能会变化,但是影响规律基本一致。由此可见,在螺栓拧紧过程中,端面和螺纹间摩擦系数对预紧力的影响均比较大,其中端面摩擦系数的影响更显著。

## 2.3 钉孔配合间隙对螺栓拧紧过程中预紧力的影响

在进行螺栓连接之前,必须要对复合材料构件进行制孔,孔的直径大小使得螺栓与孔间隙发生变化,改变了等效摩擦直径和转矩系数,从而影响到螺栓拧紧过程中的预紧力。本文需要研究的钉孔配合间隙分别为 0.05 mm、0.10 mm、0.15 mm,对有限元模型进行参数设置。

图 6 是不同钉孔配合间隙下的预紧力与拧紧力矩曲线。从图中可以看出,0.05 mm、0.10 mm、0.15 mm 间隙下预紧力与拧紧力矩曲线非常接近,说明螺栓与孔间隙很小的情况下,拧紧曲线几乎没有变化。施加相同的拧紧力矩,间隙越大,预紧力越小。这是因为间隙越大,等效摩擦直径越大,转矩系数越大,预紧力越小。

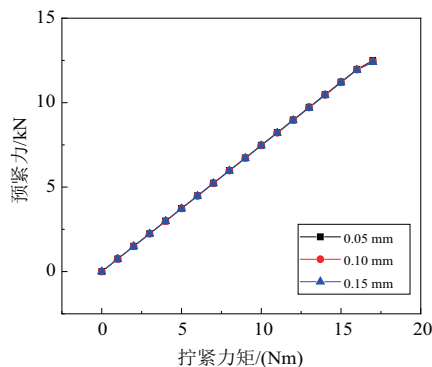


图 6 不同螺栓与孔间隙下的预紧力与拧紧力矩曲线对比

当拧紧力矩均为 10 Nm、螺栓与孔间隙从 0.05 mm 增大到 0.15 mm 时,预紧力的值从 7.48 kN 下降到 7.46 kN,下降幅度是 0.26%。由于设置的摩擦系数一定,弹性阶段曲线是线性的,该差值比例基本不变;塑性阶段曲线是非线性的,该差值比例可能会变化,但是影响规律基本一致。由此可见,在螺栓拧紧过程中,微小间隙对预紧力的影响不大。

## 2.4 螺距对螺栓拧紧过程中预紧力的影响

对于同一直径的螺栓而言,由于每英寸螺纹的扣数不同,螺距的大小不一样,可分为粗牙和细牙螺纹,其中粗牙螺距大,细牙螺距小。本文比较了 4 种不同螺距,分别是 0.794 mm、0.907 mm、1.058 mm、1.270 mm。在有限元模型中改变相应参数,得到了如图 7 所示的不同螺距下的预紧力与拧紧力矩曲线。从图中可以看出,4 种螺距下的预紧力与拧紧力矩曲线有一定的差异,施加相同的拧紧力矩,螺距为 0.794 mm 的螺栓产生的预紧力最大;随着螺距的增大,产生的预紧力越来越小,因为螺距越大,转矩系数越大,预紧力越小。

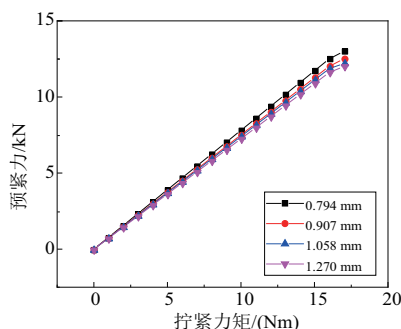


图7 不同螺距下的预紧力与拧紧力矩曲线对比

在拧紧力矩均为 10 Nm 时,当螺距从 0.794 mm 增大到 1.270 mm 时,预紧力的值从 7.81 kN 下降到 7.25 kN,下降幅度是 7.17%。由于设置的摩擦系数一定,弹性阶段曲线是线性的,该差值比例基本不变;塑性阶段曲线是非线性的,该差值比例可能会变化,但是影响规律基本一致。由此可见,在螺栓拧紧过程中,螺距对预紧力有一定的影响。

## 2.5 螺栓直径对螺栓拧紧过程中预紧力的影响

螺栓的直径有很多种,大螺栓用于大型复合材料构件的对接,小螺栓用于空间狭窄部位或者非主承力构件的连接。本文一共比较了 3 种直径的螺栓,分别是 6.35 mm、7.94 mm、9.53 mm。在螺栓拧紧的有限元模型中改变相应参数,得到了如图 8 所示的不同螺栓直径下的预紧力与拧紧力矩曲线。从图中可以看出,螺栓直径对预紧力与拧紧力矩曲线影响比较显著,施加相同的拧紧力矩,大直径螺栓产生的预紧力更小,因为螺栓直径越大,螺纹中径和等效摩擦直径越大,预紧力越小。

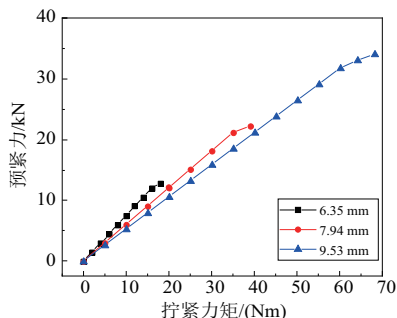


图8 不同螺栓直径下的预紧力与拧紧力矩曲线对比

在拧紧力矩均为 10 Nm 时,当螺栓直径从 6.35 mm 增大到 9.53 mm 时,预紧力的值从 7.50 kN 下降到 5.28 kN,下降幅度是 29.6%。由于设置的摩擦系数一定,弹性阶段曲线是线性的,该差值比例基本不变;塑性阶段曲线是非线性的,该差值比例可能会变化,但是影响规律基本一致。由此可见,在螺栓拧紧过程中,螺栓直径对预紧力的影响比较大。

## 3 结语

本文针对复合材料结构中的螺栓连接,考虑了螺栓和螺母的螺纹,建立了精细的有限元模型,通过改变转角来模拟螺栓拧紧。通过有限元模型仿真得到了不同接触面摩擦系数、钉孔配合间隙、螺距、螺栓直径下的拧紧曲线,进而分析了其对螺栓拧紧过程中预紧力的影响。

### 参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] OH J H, KIM Y G, LEE D G. Optimum bolted joints for hybrid composite materials [J]. Composite Structures, 1997, 38(1/2/3/4): 329-341.
- [3] JUVINALL R C, MARSHEK K M. Fundamentals of machine component design[M]. New York: Wiley, 1983.
- [4] NASSAR S A, MATIN P H, BARBER G C. Thread friction torque in bolted joints[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2005, 127(4): 387-393.
- [5] YAMAMOTO A. Principle and design of screw joint[M]. Tokyo: Yokendo Ltd., 1995.
- [6] CROCCOLO D, DE AGOSTINIS M, VINCENZI N. Failure analysis of bolted joints: effect of friction coefficients in torque-preloading relationship[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(1): 364-373.
- [7] ZHU L B, HONG J, JIANG X J. On controlling preload and estimating anti-loosening performance in threaded fasteners based on accurate contact modeling[J]. Tribology International, 2016, 95: 181-191.
- [8] FUKUOKA T, NOMURA M. Proposition of helical thread modeling with accurate geometry and finite element analysis[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2008, 130(1): 011204.
- [9] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第 2 卷: 变形高温合金, 铸造高温合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 280-281.

收稿日期: 2021-06-04