

机械连接中螺栓轴向力的测试方法研究

汪厚冰¹, 陈琳², 柴亚南¹

(1. 中国飞机强度研究所, 西安 710065;
2. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

[摘要] 在总结近年来机械连接结构中螺栓轴向力测试方法的基础上, 针对基于应变测量方法中应变导线出线困难且在小载荷段测量不准确的缺点, 提出了一种螺栓连接结构中轴向力的测试方案。对螺栓中应变片布置方案和测量段的结构进行了设计, 制造了能测量轴向力的螺栓。用连接试验分别对此测力螺栓的轴向力-应变关系的线性和重复性进行了测试研究, 并将标定的测力螺栓的测量结果与轴向力理论计算结果、预紧力工程算法的计算结果进行了比较。结果表明: 测力螺栓的轴向力-应变关系具有良好的线性相关性和重复性, 满足作为测试设备的要求; 测量结果与螺栓的理论计算结果吻合, 而用预紧力工程算法计算的螺栓轴向力存在较大误差, 且比实测值大。

关键词: 螺栓连接; 轴向力; 测试方法; 预紧力; 钉载传感器

Study on Axial Force Measurement Method for Bolt of Joint

WANG Houbing¹, CHEN Lin², CHAI Ya'nan¹

(1. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China;
2. COMAC Beijing Aeronautical Science & Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

[ABSTRACT] Based on a brief survey of the test methods for axial load for joints, an instrumented bolt for axial load plan is presented to overcome the difficulty of lead outlet and the inaccuracy of the existed instrumented bolt at low load level. The stickup scheme of strain gauges and measurement part structure of the instrumented bolt for load were designed and further manufactured. The linearity and repeatability of load-strain behavior of instrumented bolt for load were experimentally investigated with joint. A brief results of instrumented bolt for axial load and theoretic calculation method, engineer calculation method are compared. The outcomes show the presented instrumented bolt for axial load satisfies the technical requirements for measuring axial load of bolts in engineering; the result of engineer calculation method is higher than the value of measuring axial load.

Keywords: Bolted joints; Axial force; Test measurement; Preload; Instrumented bolt for load

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.082

机械连接具有传递载荷大、受环境影响小、便于装配和拆卸的优点, 而且使用的螺栓标准化后易于大批量生产, 使得价格低、成本小。因此, 机械连接成为航空航天结构中使用最为广泛的连接方法^[1-4]。机械连接中螺栓的轴向力直接影响着结构连接的装配质量和可靠性, 轴向力太大容易造成螺栓的失效, 轴向力太小则容易引起螺栓的松动或脱落。

工程中通常采用扭矩法、转角法等间接方法实现螺栓轴向力的控制, 达到紧固连接的目的, 但由于扭矩系数不是常数, 导致机械连接结构中轴向力分散性大, 进而影响结构的整体可靠性。另外, 结构中的螺栓连接通常是包含多个螺栓的螺栓组, 其拧紧工艺增加了拧紧

顺序、复拧次数等因素, 使用扭矩法、转角法对螺栓组轴向力的控制更加困难。通过直接测量螺栓的轴向力可以快速有效地对螺栓的拧紧状态进行感知和评估。

目前测量螺栓轴向力有3种方法: 基于垫片式力传感器的测量方法^[5], 把一个特制的力传感器像垫片一样套在螺栓上, 传感器的压力即为螺栓的轴向力, 该方法需要根据空间和螺栓尺寸特制传感器, 过程较繁琐, 成本较高; 超声波法^[6], 该方法根据超声波时间与速度, 计算螺栓伸长量, 依据螺栓的轴向刚度计算螺栓的轴向力, 该方法测量的准确度与螺栓端面的平面度、平行度等因素有关, 准确度不高; 基于应变测量法^[7-10], 在螺栓上布置一个单片, 通过测量的应变, 依据螺栓的几何参

数和材料参数计算螺栓的轴向力,由于表面质量等因素的影响,螺栓除了承受轴向力外,还会承受弯矩,导致螺栓的应变-载荷曲线在小载荷段出现了非线性,而通常螺栓使用轴向力并不大,使得该方法测量准确度不高并限制了应用范围。

本文在应变测量法的基础上,提出螺栓轴向力的测试方案,对应变片方案、导线引出方法及测力螺栓的结构进行了设计,利用测力螺栓所受轴向力与测量应变之间的线性关系,计算螺栓的轴向力。

1 测试原理

测力螺栓的连接结构由测力螺栓、套筒、被连接件及螺母4部分组成,如图1(a)所示。

螺栓主要承受轴向载荷, z 方向的轴力为 N 。螺栓、螺母以及被连接件由于加工或装配误差,螺栓会承受两个方向的弯矩, x 方向的弯矩 M_x 和 y 方向的弯矩 M_y ,如图1(c)所示。这些载荷会使螺栓在4个切削平面的 A 、 B 、 C 、 D 处产生应变。假设各种外载荷引起的螺栓变形均为小变形,满足线性叠加原理,可先逐个分析螺栓截面上的载荷在 A 、 B 、 C 、 D 处引起的应变,然后通过叠加截面各载荷与 A 、 B 、 C 、 D 处应变之间的关系获得轴向力 N 与 A 、 B 、 C 、 D 处应变之间的关系。

各载荷作用下螺栓的 A 和 B 处的应变如图1(c)所示, x 方向的弯矩 M_x 在 A 和 C 处产生 z 方向的正应变,设正应变的大小为 ε_{z-M_x} ; y 方向的弯矩 M_y 在 B 和 D 处

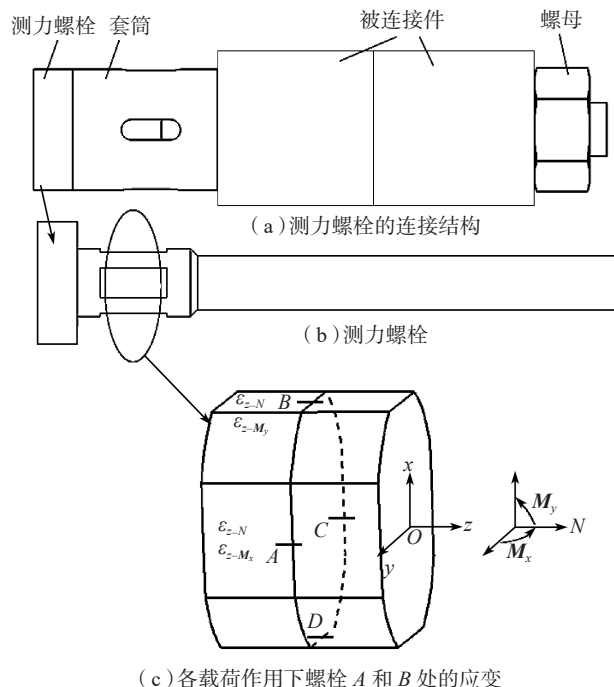


图1 测力螺栓的载荷与变形图

Fig.1 Schematic of load and deformation of bolt for load

产生 z 方向的正应变,设正应变的大小为 ε_{z-M_y} ;沿 z 轴的轴力 N 在螺栓的截面上产生 z 向正应变,设在 A 、 B 、 C 、 D 处应变大小均为 ε_{z-N} 。所以,在截面的 A 和 C 处产生的应变有 ε_{z-M_x} 和 ε_{z-N} ,在截面的 B 和 D 处产生的应变有 ε_{z-M_y} 和 ε_{z-N} 。根据材料力学螺栓在 A 、 B 、 C 、 D 处应变可表示为:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z^A &= \varepsilon_{z-N} + \varepsilon_{z-M_x} \\ \varepsilon_z^B &= \varepsilon_{z-N} + \varepsilon_{z-M_y} \\ \varepsilon_z^C &= \varepsilon_{z-N} - \varepsilon_{z-M_x} \\ \varepsilon_z^D &= \varepsilon_{z-N} - \varepsilon_{z-M_y}\end{aligned}\quad (1)$$

由此可用 A 、 B 、 C 、 D 处的应变表示螺栓的轴向应变为:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{z-N} &= \frac{\varepsilon_z^A + \varepsilon_z^C}{2} \quad \text{或} \\ \varepsilon_{z-N} &= \frac{\varepsilon_z^B + \varepsilon_z^D}{2} \quad \text{或} \\ \varepsilon_{z-N} &= \frac{\varepsilon_z^A + \varepsilon_z^B + \varepsilon_z^C + \varepsilon_z^D}{4}\end{aligned}\quad (2)$$

根据虎克定律,螺栓的轴向应力可表示为

$$\sigma_z = E \varepsilon_{z-N} \quad (3)$$

其中, E 为材料的弹性模量,设切削后螺栓横截面积为 A_s ,则螺栓的轴向力可表示为:

$$N = E \varepsilon_{z-N} A_s \quad (4)$$

由式(2)、(3)、(4)可看出,可通过测量螺栓表面均匀分布的2点或4点轴向应变获得螺栓轴向力。

2 测力螺栓的设计

测力螺栓见图1(b)。由于测力螺栓测量段需要布置应变片,应变片需要连接导线,应变片和连接导线都要占用一定的空间,而且应变片的引线很细、承力小,很容易在拉动过程断裂,为了不影响螺栓穿孔并提高应变片与导线的连接质量,将测力螺栓的测量段设置在螺栓的根部。由于螺栓的外表面为圆面,将应变直接贴在圆面上会使应变栅产生大的有害的初始变形,并使粘贴过程中应变片和黏接面之间产生气泡的可能性增大,影响黏接质量,为了保证应变片的黏接质量和测量的精度,并能使黏接位置更加准确,在测力螺栓的测量段切削出4个小平面,小平面的尺寸为 $4.4\text{mm} \times 10\text{mm}$,4个小平面沿圆周对称均匀分布。为了保证整个加载过程中,螺栓的轴向载荷均传到测量段,在测量段的外侧安装套筒,套筒的长度比测力螺栓测量段稍长;为了使测力螺栓受力更加均匀,套筒一端的内径与螺栓直径相同,用于在安装过程中对套筒的定位。由于应变片和连接导线需要占用一定空间,套筒除定位端部外,其余部分的内径较测力螺栓的直径大。为了给应变导线提

供出线的通道,在套筒的侧壁开4个条形孔,条形孔的尺寸为3mm×10mm,4个条形孔沿套筒圆周对称均匀分布,装配时套筒的条形孔与测力螺栓的应变片位置对应,避免导线在出线过程中弯折。测力螺栓的端头采用圆头的内六方,可使测力螺栓端头与套筒端面贴合更加紧密,使测力螺栓受载更加均匀。

3 测力螺栓测试

测力螺栓作为轴向力的测量仪器,需要满足一定的要求:(1)轴向力-应变的线性关系;(2)多次测量良好的重复性。下面通过试验验证测力螺栓满足上述要求。

3.1 试验装置

为了对测力螺栓的轴向力-应变关系进行标定测量,设计了一套试验装置,如图2所示。其中测力螺栓的主要尺寸如图3所示,材料为30CrMnSi。

3.2 试验过程

把图2试验装置的上下单耳夹持于试验机Instron-8801的夹头中,以力控制方式施加拉伸载荷。为了验证测力螺栓的轴向力-应变的线性关系,以1kN为加载级差逐级加载到最大载荷18kN;为了验证螺栓的轴向力-应变关系的重复性,以1kN为加载级差逐级加载到最大载荷5kN。试验机的加载相对误差不大于示值的0.5%,每级载荷测量应变,最大载荷级的测量

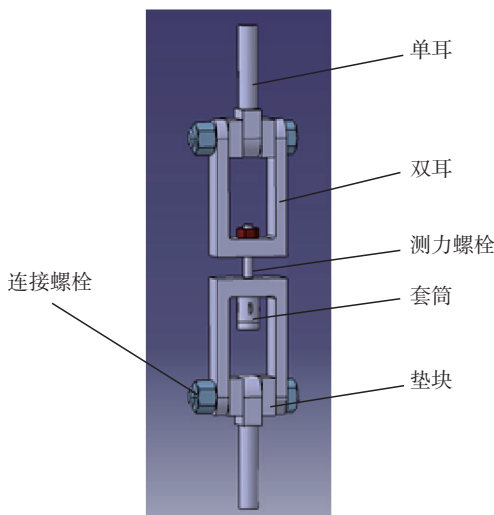


图2 试验装置
Fig.2 Fixture for test

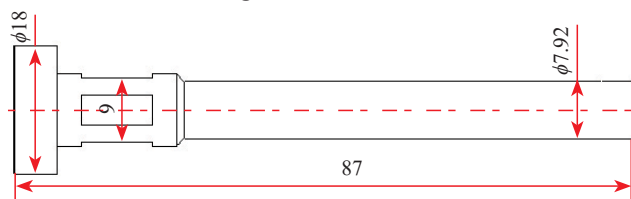


图3 测力螺栓尺寸
Fig.3 Geometrical schematic of bolt for load measurement

完成后绘制测力螺栓的轴向力-应变曲线。考虑存在的装配间隙,每次试验装置安装后第1次试验结果不采用。第1次试验完成后,卸载,进行第2次试验,以2次以后的试验结果作为测量结果。

3.3 试验结果及分析

3.3.1 测力螺栓轴向力-应变关系的线性分析

首先对测力螺栓的轴向力-应变线性关系进行了验证,试验结果见图4。图4中的点A、B、C、D的位置见图1,其中点A和点C对称,点B和点D对称。可看出,4点的轴向力-应变曲线在小载荷段(0~5kN)出现非线性,部分点还出现了压应变(而实际上整个过程螺栓的外载为拉伸载荷),其主要原因是贴合面贴合不紧密,使得螺栓在点A和点C承受弯矩 M_x ,点B和点D承受弯矩 M_y ,导致螺栓外表面的应变不均匀。随着载荷的增大,弯矩对螺栓应变影响逐渐减小,螺栓的轴向应变占据主导地位,轴向力-应变关系呈现良好的线性。但小载荷段对测力螺栓非常重要,因为对于直径为8mm的螺栓通常应用中承受的轴向载荷小于10kN,因此要将测力螺栓进行工程应用必须对轴向力-应变的非线性段进行处理。

由式(1)可知,弯矩在一侧引起轴向应变的增大,在对应的另一侧会引起轴向应变的减小,而且增大、减小在数值上相同。于是可通过式(2)对螺栓表面轴向应变进行修正,修正后轴向力-应变曲线如图5所示,3种修正方法修正后轴向力-应变的线性相关系数见表1,每种方法的线性相关系数 r 均超过0.999,表明了经3种方法修正后的轴向力-应变关系的线性相关度很高,可以满足使用要求,同时也验证了3种修正方法的有效性;采用直线方程 $\varepsilon=\lambda N$ 拟合测力螺栓的载荷-平均应变曲线,得到直线方程的斜率,结果见表1,可见3种方法得到斜率值很接近,验证了3种修正方法的等同性。

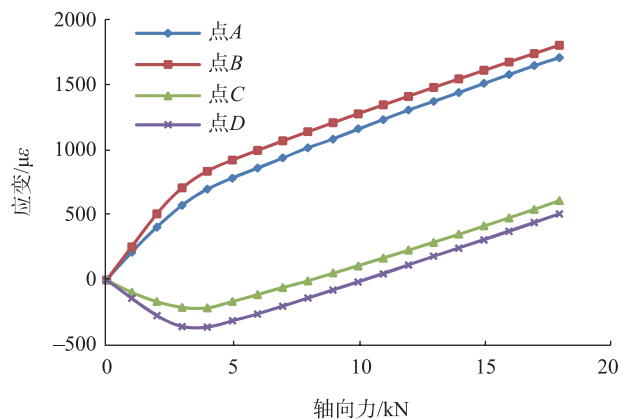


图4 测力螺栓轴向力-轴向应变曲线
Fig.4 Load-strain curves of bolt for load

3.3.2 测力螺栓轴向力-应变关系的重复性分析

对于图 2 使用的测力螺栓和试验装置,通过多次拆卸、多次安装、多次试验测得的 5 次安装状态下测力螺栓的载荷-平均应变曲线如图 6 所示,采用直线方程 $\varepsilon=\lambda N$ 拟合得到 5 次测量曲线的斜率,结果见表 2。可见,多次测量得到的直线斜率的离散系数为 1.597%,表明测力螺栓的测量结果重复性好,可以满足使用要求。

3.3.3 螺栓轴向应变与轴力关系的理论计算

测力螺栓轴力为垂直横截面的拉力 N ,横截面面积为 A_s 。根据材料力学理论,测量点 $A、B、C、D$ 处的平均拉应力为 N/A_s ,又因为拉应力为 $E\varepsilon_{z-N}$,由此可得到轴向

应变与轴力之间的关系式(5):

$$\varepsilon_{z-N} = \frac{1}{A_s E} N = \lambda N \quad (5)$$

其中, E 为螺栓的弹性模量,取值为 20℃时的 211GPa;面积 A_s 为 72.667mm²,应变 ε_{z-N} 为微应变,拉力 N 的单位为 kN,由此可计算常数 λ 的值为 65.219,与表 1 中的测量值很接近,验证了试验结果准确性和可靠性。

3.3.4 基于轴向力-应变标定关系的测力螺栓轴向力测量

将研制的测力螺栓直接连接图 2 中的 2 个双耳,用扭力扳手拧紧螺栓,减小两双耳间的间隙,测量螺栓应变,将测得的应变代入式(5)进行计算,得到各级拧紧力矩的螺栓轴向载荷,计算结果见表 3。

根据拧紧力矩,可由简单的工程计算方法计算螺栓的轴向力,通常的工程计算方法有两种,方法 1^[11] 见式(6):

$$P_t = \frac{T}{kd} \quad (6)$$

表1 测力螺栓柔度和线性相关系数

Table 1 Flexibility and linear correlation coefficient of force bolts

位置	$\lambda/(\text{mm}^{-2} \cdot \text{MPa}^{-1})$	r
点 A、C 平均值	64.981	0.999 52
点 B、D 平均值	65.057	0.999 53
点 A、B、C、D 平均值	65.019	0.999 40

表2 测力螺栓柔度系数重复性测量结果

Table 2 Repeatability measurement results of flexibility coefficient of force bolts

试验次数	$\lambda/(\text{mm}^{-2} \cdot \text{MPa}^{-1})$
1	64.443
2	63.771
3	64.636
4	65.743
5	66.343
平均值	64.987
离散系数 /%	1.597

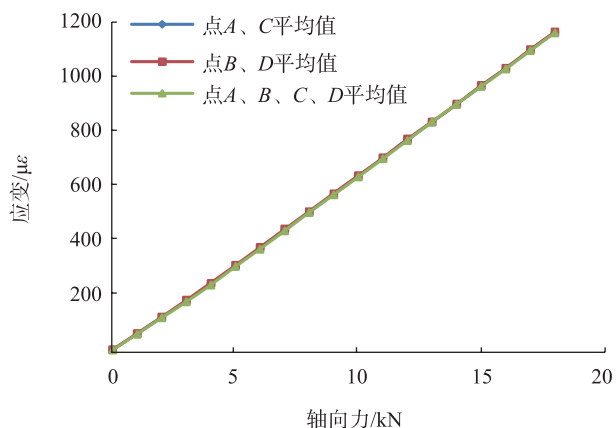


图5 测力螺栓轴向力-平均轴向应变曲线

Fig.5 Load-average strain curves of bolt for load

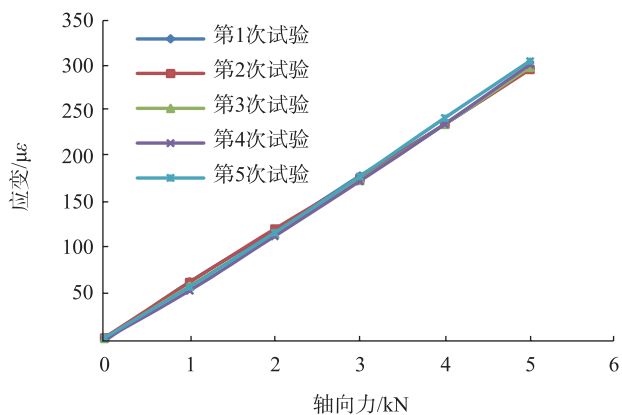


图6 测力螺栓5次试验的轴向力-轴向应变曲线

Fig.6 Load-average strain curves of bolt for load in five tests

表3 螺栓轴向载荷测量结果与计算结果比较

Table 3 Comparison between measured results and calculated results of bolt axial load

拧紧力矩 / (N·m)	平均轴向应变 / $\mu\varepsilon$	轴向载荷测量值 / kN	方法 1 轴向力 / kN	方法 1 轴向力误差 / %	方法 2 轴向力 / kN
5	118	1.86	3.13	68	3.57
10	319	5.03	6.25	24	7.15
15	490	7.74	9.38	21	10.72
20	638	10.07	12.50	24	14.30
25	728	11.49	15.63	36	17.87

其中, P_i 为螺栓轴向力; T 为拧紧力矩; k 为系数, 通常取常数 0.2; d 为螺栓直径, 计算结果见表 3。

方法 2^[12] 见式(7):

$$P_i = \frac{2\pi T}{p+2\pi\mu d} \quad (7)$$

其中, p 为螺纹间距; μ 为摩擦系数, 通常取 0.15, 方法 2 的计算结果见表 3。

由表 3 可看出, 拧紧力矩与螺栓的轴向应变、轴向力并不是线性关系, 如图 7 所示, 利用线性关系计算轴向力的工程方法 1 和工程方法 2 得到的计算结果较实测值偏大, 方法 2 的计算值比方法 1 高, 若系数 μ 取 0.175, 两种方法的计算结果很接近。表明工程上通常采用拧紧力矩估算螺栓轴向力的方法准确度不高, 同时也证明采用测力螺栓获取螺栓轴向力的必要性。

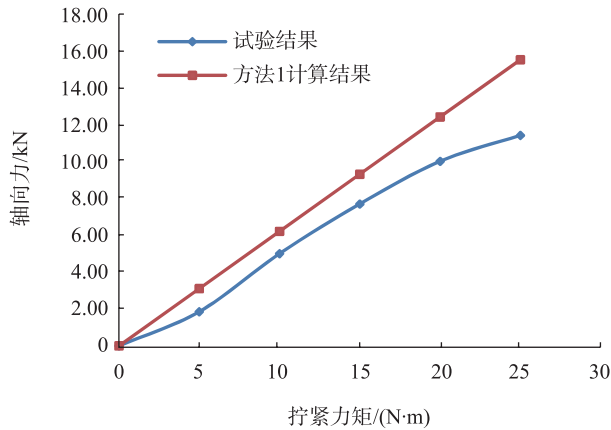


图7 测力螺栓拧紧力矩-轴向力曲线的计算结果与试验结果比较
Fig.7 Comparison of experimental and engineering calculation results for tightening torque-axial force of bolt for load

4 结论

基于应变测量的原理, 提出了一种测量螺栓轴向力的测试方法, 设计并制造了能测量轴向力的测力螺栓, 并通过试验进行了测力螺栓的测试和应用。

(1) 设计、制造的测力螺栓的轴向力-应变关系线性相关性、重复性好, 可以用于测量螺栓的轴向力。

(2) 为了准确获得螺栓的轴向力, 在螺栓表面需要至少布置 2 个单片, 并对测量结果进行修正。

(3) 通过工程算法得到的螺栓轴向力比实际值大, 证明测力螺栓测量螺栓轴向力的必要性。

参考文献

[1] 谢鸣九. 复合材料连接[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.

XIE Mingjiu, Joint for composites materials[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2011.

[2] 中国航空研究院. 复合材料连接手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994.

Institute of Aeronautics China. Handbook of joint for composites materials[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994.

[3] 中国航空研究院. 复合材料设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

Institute of Aeronautics China. Handbook of composites structure design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001.

[4] GRAY P J, MCCARTHY C T. A global bolted joint model for finite element analysis of load distributions in multi-bolt composite joints[J]. Composite: Part B, 2010, 41(4): 317-325.

[5] 刑堃, 刘检华, 唐承统, 等. 一种基于垫片式力传感器的螺栓组连接预紧力测量方法[J]. 航空制造技术, 2015, 58(16): 90-95.

XING Kun, LIU Jianhua, TANG Chengtong, et al. Bolt group preload measuring method based on gasket force sensor[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(16): 90-95.

[6] 杜刚民, 李东风, 曹树林. 螺栓轴向应力超声测量技术[J]. 无损检测 (试验研究), 2006, 28(1): 20-25.

DU Gangmin, LI Dongfeng, CAO Shulin. Bolt axial stress measurement by ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing (Test Research), 2006, 28(1): 20-25.

[7] 魏涛, 王洋, 李红松, 等. 基于应变的螺栓拧紧轴力测量研究[J]. 内燃机与动力装置, 2011(5): 1-3.

WEI Tao, WANG Yang, LI Hongsong, et al. Study on axis force of bolt tightening based on strain measurement[J]. Internal Combustion Engineer & Powerplant, 2011(5): 1-3.

[8] 刘岩, 李双喜, 蔡纪宁, 等. 螺栓连接零件受拉力和压力的无线测量新方法[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 860-864.

LIU Yan, LI Shuangxi, CAI Jining, et al. Novel method for wireless measuring the pulling and compressive external-force loaded on the elements connected by bolt[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7): 860-864.

[9] 张建宇, 刘丰睿, 山美娟, 等. 复合材料多钉连接钉载矢量传感器[J]. 复合材料学报, 2015, 32(5): 1420-1427.

ZHANG Jianyu, LIU Fengrui, SHAN Meijuan, et al. Instrumented bolt for load vector of composite multi-bolt joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(5): 1420-1427.

[10] LIU F R, LU X H, ZHAO L B, et al. An interpretation of the load distributions in highly torqued single-lap composite bolted joints with bolt-hole clearances[J]. Composites Part B, 2017, 138: 194-205.

[11] COLLINGS T A. The strength of bolted joints in multi-directional CFRP laminates, ARC CP1380[J]. Composites, 1975, 8(1): 43-55.

[12] LEE M C. Fatigue in graphite/epoxy bolted joints: AFIT-CI-80-14T[R]. Washton: Air Force Institute of Technology, 1981.

通讯作者: 汪厚冰, 硕士、高级工程师, 研究方向为复合材料结构强度, E-mail: wanghoby@sina.com。

(责编 铃兰)