

# C/C 复合材料螺栓紧固特性

孙鹏军<sup>1,2</sup> 雷勇军<sup>1</sup> 吴宏伟<sup>2</sup> 安军<sup>2</sup> 李新涛<sup>3</sup>

(1 国防科学技术大学航天科学与工程学院,长沙 410073)

(2 空间物理重点实验室,北京 100076)

(3 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 为了获得 C/C 螺栓紧固特性,采用紧固力矩试验方法开展了不同结构 C/C 螺栓紧固特性研究,研究内容包括不同垫片材料、单螺母和双螺母、涂胶和不涂胶等组合情况下 C/C 螺栓  $K$  值的变化趋势,并研究了 C/C 螺栓的极限抗扭能力。结果表明:碳基螺栓的扭矩系数值  $K$  与金属螺栓差异很大,不同材料结构也有差异,涂胶对增加夹紧力有明显的提高作用。

**关键词** 螺纹扭矩,夹紧力,扭矩系数,紧固力矩

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.01.012

## Tightening Characteristic of C/C Composite Material Bolt

SUN Pengjun<sup>1,2</sup> LEI Yongjun<sup>1</sup> WU Hongwei<sup>2</sup> AN Jun<sup>2</sup> LI Xintao<sup>3</sup>

(1 College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073)

(2 Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076)

(3 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** In order to obtain the tightening characteristics of C/C composite material bolt, the tightening torque characteristics of C/C composite material bolt with different structures were studied in this paper. The research can include the variation trend of the torque coefficient  $K$  of the bolts in different combinations of gasket material, single nuts and double nuts, scribbling with adhesives and non-scribbling with adhesives. The ultimate torsional resistance of C/C composite material bolt was studied. The results show that the torque coefficient  $K$  of the bolts is different from that of the metal bolts. The scribbling with adhesives can obviously improve the clamping force.

**Key words** Thread torque, Clamp force, Torque coefficient, Tightening torque

### 0 引言

随着飞行器飞行时间的增加,飞行器温度越来越高,以往采用的金属螺栓不能适应高温使用环境,采用非金属螺栓成为必然趋势。国内外对于非金属螺栓开展了较多的研究工作<sup>[1-7]</sup>,如陶瓷、C/SiC 和 C/C 螺栓等,研究主要集中在抗拉能力和加工工艺等方面,虽然 C/C 螺栓高温抗氧化能力差,但当 C/C 螺栓所用部位的温度较低,同时在安装完成后再施加涂覆层,减少其氧化速度,所以可以予以应用。紧固件紧固力矩特性的研究和量化控制在各行业均得到了重视和研究<sup>[8-11]</sup>,积累了一定的经验,形成了一定的方法,尤其是金属螺栓研究<sup>[12-14]</sup>。但 C/C 螺栓和螺母由于应用领域较少,目前对于其紧固力矩研究还少有

报道,因而需要开展大量试验研究工作获得相关的试验参数,为实际使用提供依据。本文针对 C/C 复合材料 M16 螺栓的紧固力矩特性进行了试验研究,研究不同紧固力矩情况下螺栓紧固力的差异情况。

### 1 试验

#### 1.1 试验原理

螺栓紧固力矩试验方法见图 1,按照 GB/T16823.3—2010《紧固件扭矩—夹紧力试验》中规定的方法进行。对螺栓、螺母受力分析可知螺母与垫片之间的摩擦力矩  $T_1 = T - T_{th}$ 。通过各项测量数据,可计算获得扭矩系数值  $K$ :

$$K = \frac{T}{Fd}$$

收稿日期:2016-10-27

第一作者简介:孙鹏军,1974 年出生,研究员,主要从事复合材料的试验仿真研究工作。E-mail:sunpj1999@163.com

通信作者:雷勇军,1968 年出生,教授,博导,主要从事计算固体力学、固体导弹结构完整性研究工作。E-mail:leiyj108@nudt.edu.cn

式中,  $T$  为紧固扭矩,  $F$  为夹紧力,  $d$  为螺纹公称直径。

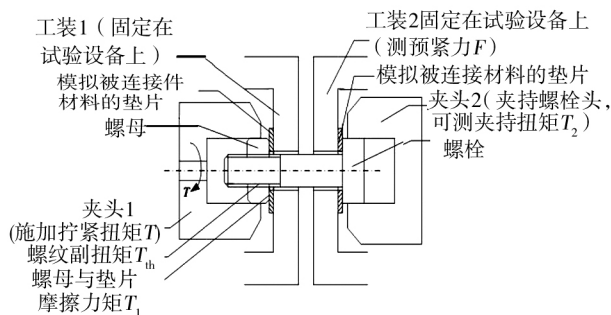


图1 紧固力矩试验方法原理图

Fig.1 Schematic diagram of tightening torque test

## 1.2 试验件

试验产品主要包括螺栓、螺母、螺栓头垫片、螺母垫片。螺栓规格为 M16, 结构为三向 C/C 和细编 C/C 两种。螺母垫片产品共有三种: 与试验件本身同种结构的三向和细编两种, 以及模拟金属舱体的铝合金材料。此外, 试验还有一种状态是增加了室温固化耐高温胶黏剂。

## 1.3 试验流程

为了保证紧固力矩试验过程中不出现螺钉拧断问题, 试验先进行极限紧固力矩试验, 具体工况见表 1。

表 1 紧固力矩试验内容

Tab.1 Test contents of tightening torque test

工况编号	螺母状态	螺母垫片	紧固力矩操作流程
A1a	单螺母	铝合金	紧固到 6.3→10→15→20 N·m
A1b	单螺母	C/C	紧固到 6.3→10→15→20 N·m
A2	双螺母	铝合金	内螺母紧固到 10→15→20 N·m
			外螺母紧固到 15→20→25 N·m

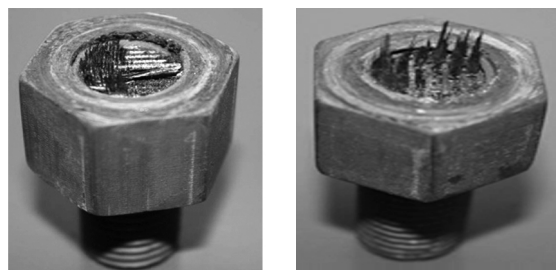
对整个螺钉试验件以恒定转速加载力矩直至试验件丧失承载能力, 由测试结果可得两种材料结构 M16 螺栓的极限扭矩均为 60 N·m 左右。为了保证

后续紧固力矩试验顺利, 规定后续紧固力矩试验最大紧固力矩不超过极限值的一半, 即 30 N·m, 而后进行紧固力矩试验。

## 2 结果及讨论

### 2.1 极限力矩

极限紧固力矩试验工况为: 单螺母、铝合金垫片、不涂胶, 螺栓破坏后的照片如图 2 所示。经试验获得极限紧固力矩的数据如表 2 所示。由表 2 可知虽然两种材料极限紧固力矩相差很小, 但其极限螺纹扭矩和极限夹紧力不同。断口处细编 C/C 要比三向 C/C 纤维短, 这主要是因为细编纤维每根纤维束细, 从而导致这种现象。极限夹紧力显著小于螺栓抗拉强度 (小 50% 以上), 极限紧固破坏以剪切断裂为主。



(a) 细编 (b) 三向

图 2 极限扭矩破坏后断口形貌图

Fig.2 C/C bolt's fracture morphology after ultimate torque failure

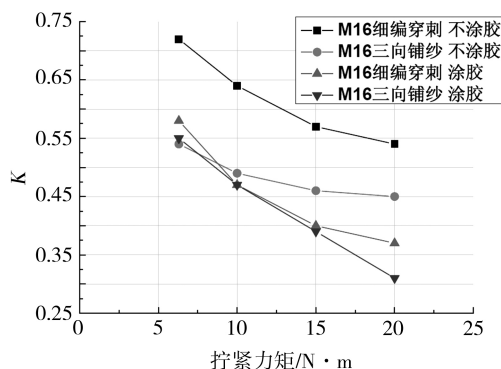
表 2 极限紧固力矩试验结果

Tab.2 Limit tightening torque test results

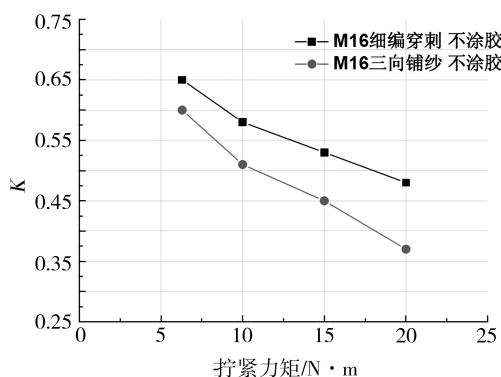
材料结构	极限紧固力矩 /N·m	极限螺纹扭矩 /N·m	极限夹紧力 /kN
细编	59.4	16.2	10.3
三向	59.7	20.3	8.58

### 2.2 单螺母工况

由试验获得单个螺母工况下的  $K$  值均值测量结果见图 3。



(a) A1a 工况 (铝合金垫片)



(b) A1b 工况 (C/C 垫片)

图 3 单螺母试验  $K$  值均值随紧固力矩的变化图

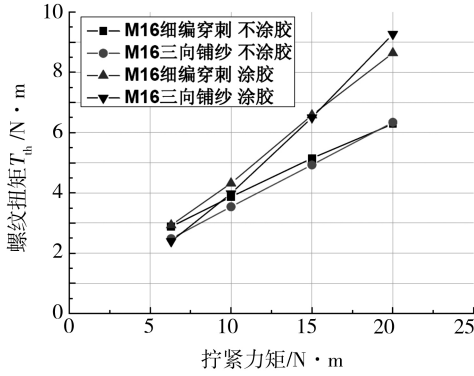
Fig.3 Diagram of average torque coefficient changed with tightening torque for the test of single bolt

由图 3 可见不论何种垫片材料, 细编结构的螺栓扭矩系数  $K$  值均高于三向结构, 这是因为细编结构

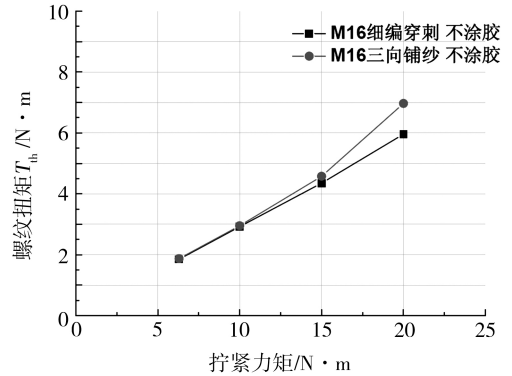
表面粗糙度大, 从而导致断面摩擦大, 所以  $K$  值高。相对比而言铝合金垫片所测得的  $K$  值要大于 C/C 垫

片,这是因为铝合金与工装之间以及与螺钉之间摩擦因数大,所以导致  $K$  值增大。比对涂胶和不涂胶情况可知涂胶的  $K$  值要变小,这是由于涂胶后立即开展试验,胶液尚未固化有一定的润滑作用,所以降低

了  $K$  值。各状态下的螺纹扭矩均值见图 4。由图 4 可见,同样紧固力矩的情况下采用铝合金垫片相对于 C/C 垫片情况其作用到螺纹上的扭矩要大,不涂胶情况比涂胶情况也要大。



(a) Al1a 工况 (铝合金垫片)



(b) Al1b 工况 (C/C 垫片)

图 4 单螺母试验螺纹扭矩  $T_{th}$  值随紧固力矩的变化

Fig.4 Diagram of average thread torque changed with tightening torque for single bolt test

### 2.3 双螺母工况试验

外螺母紧固对螺栓夹紧力的影响见表 3。外螺母紧固对螺栓夹紧力的影响较为明显,可见双螺母情况下,对于细编 C/C 螺栓即使外螺母紧固力矩等于单螺母情况,其所产生的夹紧力也小于单螺母;对于三向 C/C 则反之。但总体而言当外螺母紧固力矩增加到比内螺母大后其加紧力均是变大。

表 3 外螺母紧固力矩对螺栓夹紧力的影响

Tab.3 Effect of outer nut's tightening torque to bolt's clamp force

内螺母紧固力矩/N·m	外螺母紧固力矩/N·m	细编夹紧力变化/kN	三向夹紧力变化/kN
10	15	0.96→1.03	1.35→2.19
15	20	1.59→1.71	2.02→3.23
20	25	2.28→2.44	2.68→4.25

### 3 结论

(1) C/C 螺栓  $K$  值显著大于金属螺栓; C/C 螺栓无论垫片材料和涂胶与否,  $K$  值均随紧固力矩增大而减小; 相同紧固力矩下三向 C/C 的  $K$  值小于细编 C/C;

(2) 涂胶明显减小小螺纹副摩擦因数, 导致  $K$  值明显降低, 螺纹扭矩和夹紧力明显增大;

(3) 在双螺母情况下对于细编 C/C 螺栓即使外螺母紧固力矩等于单螺母, 其所产生的夹紧力也小于单螺母, 三向 C/C 则反之, 可见不同材料结构螺栓其双螺母紧固影响效果不同;

(4) 同样紧固力矩条件下 C/C 螺栓螺纹扭矩和夹紧力对表面摩擦特性较为敏感, 且破坏模式主要为螺纹扭矩导致的剪切破坏。

### 参考文献

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2017 年 第 1 期

[1] DIXON D G. Ceramic matrix composite-metal razed joints[J]. Journal of Materials Science, 1995, 30(6): 1539-1544.

[2] NAKAMURA M. Joining of carbon fiber reinforced silicon nitride composites with 2Ag-26Cu-2Ti filler metal[J]. Journal of Material Science, 1996(31): 4629-4634.

[3] DADRAS P, NGAI T T, MEHROTRA G M. Joining of carbon-carbon composites using boron and titanium disilicide interlayers[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(1): 125-132.

[4] HENRIKSEN A F. The nuts and bolts of ceramic fasteners[J]. Journal of Machine Design, 2006, 78(11): 72-74.

[5] 王杰, 李克智. 炭布叠层穿孔 C/C 复合材料螺栓连接件微观组织和力学性能[J]. 固体火箭技术, 2012, 35(2): 248-252.

[6] 刘杰, 李海滨, 刘小瀛. 3D 针刺 C/SiC 复合材料螺栓的低成本制备及力学性能[J]. 航空学报, 2013, 34(7): 1724-1730.

[7] [美] CMH-17 协调委员会. 复合材料手册[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 492-502.

[8] 陈克, 陈智勇. 运载火箭拧紧力矩量化控制探索与实践[J]. 质量探索, 2015(3): 52-54.

[9] 贾晓娇, 等. 大规格螺栓螺母拧紧力矩与预紧力关系研究[J]. 航天标准化, 2015(3): 1-5.

[10] 刘旭波. 螺栓拧紧力矩对复合材料连接强度影响试验研究[J]. 科技创新导报, 2014(23): 26.

[11] 黄金昌, 王晓冬. 复合材料夹层连接螺栓拧紧力矩试验研究[J]. 飞机设计, 2009, 29(2): 32-35.

[12] 张振华, 应秉斌, 矫明. 螺栓拧紧力矩的确定方法及探讨[J]. 化学工程与装备, 2009(8): 105-107.

[13] 成大先. 机械设计手册(第五版)第 2 卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 71-72.

[14] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计(第七版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 67.