

C/C 复合材料螺栓受拉破坏模式分析

孙鹏军^{1,2}

雷勇军¹

刘晓华²

崔鹏飞²

张宏宇²

(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)

文 摘 采用试验的方法研究了两种不同结构 C/C 复合材料螺栓的拉伸破坏形式。结果表明,螺栓头的结构决定了其破坏模式。对于受拉而导致的螺栓头剪切破坏,不是由单方向的层间剪切和面内剪切决定,而是两个方向剪切综合作用的结果,因此细化螺栓头结构设计能最大程度发挥复合材料的力学性能极限。

关键词 螺栓,复合材料,破坏模式,应力,剪力

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.06.006

Failure Modes Analysis of C/C Composites Bolt in Tensile Strength

SUN Pengjun^{1,2}

LEI Yongjun¹

LIU Xiaohua²

CUI Pengfei²

ZHANG Hongyu²

(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)

Abstract Experimental method was used to investigate the tensile failure modes of two different C/C composites bolts in this paper. Test results indicated that the failure modes were determined by the type of the structure of the bolt head. For the shear failure of the bolt head caused by the tensile load, the comprehensive effect of both the interlaminar and intralaminar shear load is the main factor, but not a single shear load. As a result, improve the design of the structure of the bolt head can enhance the strength of the composites.

Key words Bolt, Composite, Failure mode, Stress, Shear force

0 引言

高温情况下金属螺栓的使用遇到了很多瓶颈,所以选用 C/C 螺栓成为必然趋势。国内外对于复合材料螺栓开展了较多的研究工作^[1-5],主要集中在抗拉性能和加工工艺等方面。复合材料螺栓连接松弛问题也有较多的研究^[6-7],J.B. Ickford, S.D. Thoppul 等人^[8-9]深入研究了螺栓连接的力学行为、预紧力响应以及螺栓连接预紧力松弛时变行为;T. H. Sun、K. I. Tserpes 等人^[10-11]采用三维有限元建模方法模拟复合材料螺栓连接,其结果与实验值较为接近;S. C. Tan、P. P. Camanho 等人^[12-13]引入并完善了渐进损伤有限元分析方法,对复合材料连接进行模拟;M. L. Dano^[14]通过有限元数值模拟,研究了材料失效准则与特性退化方法对渐进失效模型的影响。复合材料连接件拧紧力矩特性的研究也在各行业得到了重

视^[15-18],对于 C/C 螺栓的细节设计还未见报道,国内外研究重点还是金属螺栓^[19-20]细节优化上。本文针对两种 C/C 螺栓破坏形式的不同,开展了机理分析工作,并和实测参数进行了比对分析。

1 试验

1.1 结构简介

C/C 螺栓设计目前处于初期阶段,图 1 为这种螺栓连接形式简图。

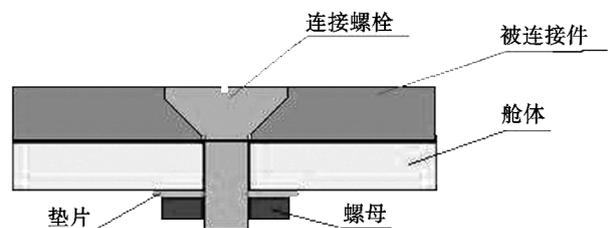


图 1 C/C 螺栓连接形式简图

Fig.1 Sketch of the C/C bolt joint

收稿日期:2017-06-29;修回日期:2017-07-18

第一作者简介:孙鹏军,1974 年出生,研究员,研究方向:试验仿真

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

螺栓头设计是综合了金属螺栓头的设计方法和 C/C 材料的特点,其中螺栓头上的锥面是为了保证安装过程中的配合精度,并起到导向作用;螺栓头上面的圆柱段,是避免 C/C 材料脆性特点而出现崩裂等情况。这种螺栓头结构形式已经在三向正交结构 C/C 螺栓和细编穿刺结构 C/C 螺栓上得到了应用,目前这两种螺栓结构尺寸相同。

1.2 试验结果

进行了三向正交及细编穿刺结构 C/C 螺栓的拉伸试验。实验在拉伸机上进行,加载速率为 2 mm/min。三向正交结构 C/C 螺栓共进行了 5 件拉伸试验,其均值为 26.04 kN;细编穿刺结构 C/C 螺栓共进行了 3 件拉伸试验,其均值为 24.83 kN。图 2 为三向正交结构 C/C 螺栓试件破坏后的形貌,可以看到是从螺栓头中剪切破坏。细编穿刺结构 C/C 是螺纹中部拉断,与金属螺栓相似。

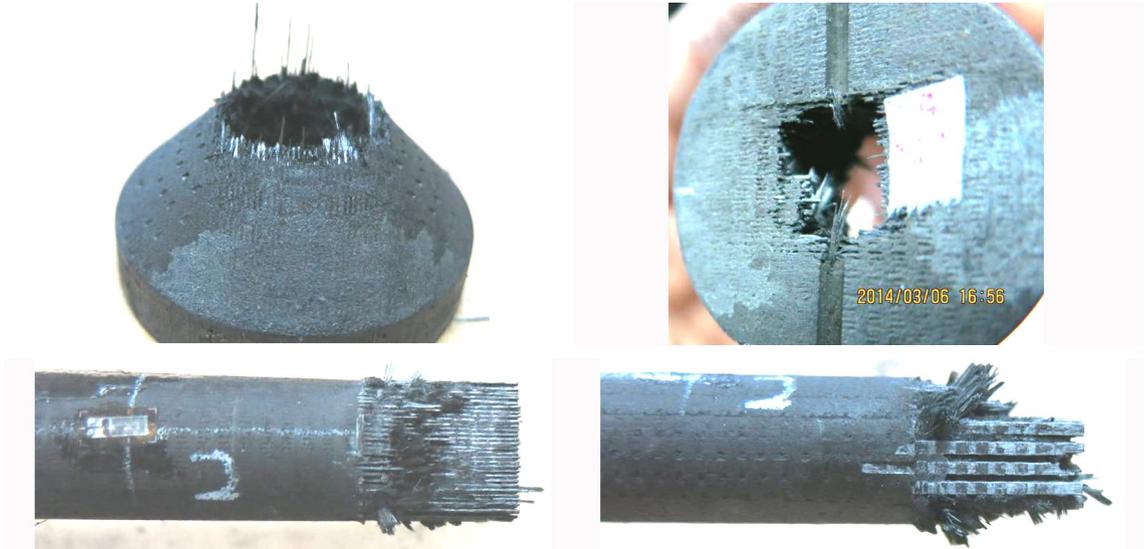


图 2 三向正交结构铺纱螺栓拉伸破坏形貌

Fig.2 Tensile broken interface morphology of three-dimensional fiber placement bolt

由试验数据对比可知在同样尺寸情况下,虽然三向正交结构 C/C 螺栓破坏形式表现为螺栓头拉脱,但其抗拉强度要高于细编穿刺结构 C/C 情况。依据试验过程可知两种螺栓拉伸破坏为脆性破坏。

2 螺栓头受力分析

结合试验结果可知三向正交结构 C/C 螺栓破坏表现出从螺栓头处拉剪断裂。在螺栓受拉的情况下,设其受到的拉力为 F ,则被连接件提供给螺栓头合力也为 F ,这两个力是通过图 3(沉头角取 90°)中的剪切面进行传递,则剪切面上受到剪力同样为 F 。

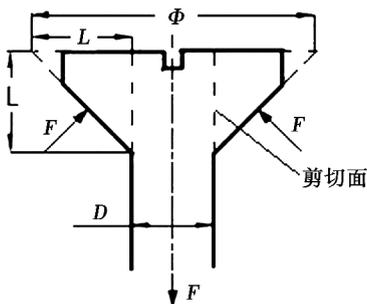


图 3 螺栓头尺寸及受力简图

Fig.3 Structure and force analysis sketch of bolt head

剪切面上受到的力 F 与剪应力 τ 的关系为

$$F = \tau \pi D L \quad (1)$$

螺栓上受到的力 F 与拉伸应力 σ 的关系为

$$F = \frac{\sigma \pi D^2}{4} \quad (2)$$

由于这两个力是相等的,消除公约量可得

$$\tau L = \frac{\sigma D}{4} \quad (3)$$

实际设计中若要保证不从剪切面破坏,依据上面公式则剪切长度的表达式为

$$L \geq \frac{D \sigma_b}{4 \tau_b} \quad (4)$$

即,在螺栓头沉头锥角为 90° 情况下,按式(4)设计的螺栓可以保证不出现从剪切面破坏问题,其他仰角情况可以参照设计。

3 破坏模式分析

依据公式(2),则螺栓光杆试验情况下拉伸应力的计算公式如下:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d_1 d_2} \quad (5)$$

式中, σ 为螺栓光杆上的拉伸应力, F 为螺栓所承受的拉伸载荷, d_1 为第一次测量光杆直径, d_2 则为转过 90° 之后测量的螺栓光杆直径。

螺栓头处剪切应力的计算公式如下:

$$\tau = \frac{2F}{\pi L (d_1 + d_2)} \quad (6)$$

依据试验前测量数据,采用以上两个公式得到三向正交和细编穿刺 C/C 两种结构螺栓光杆部分拉伸应力和螺栓头部位等效剪应力(层剪和面剪的合成)均值见表 1。根据结构实际图纸可知,该螺栓的小径为 13.835 mm,参考式(5)计算得到螺纹小径拉伸应力均值结果见表 1。表 2 为两种结构螺栓本体实测力学性能。

表 1 M16 螺栓拉伸试验计算应力值表

Tab.1 Calculating stress datasheet of M16 bolt in tensile experiment MPa

结构	光杆拉伸应力	螺纹小径拉伸应力	螺栓头部位等效剪应力
三向正交	130.56	173.22	28.89
细编穿刺	124.96	165.17	27.61

表 2 螺栓材料实测力学性能

Tab.2 Mechanical properties datasheet of bolt material in tensile measurement MPa

结构	x-y 向拉伸强度	面内剪切强度	层间剪切强度	面内和层间剪切强度均值
三向正交	240	35	20	27.5
细编穿刺	160	46	28	37

由表 1 三向正交结构 C/C 等效剪应力值与表 2 中三向正交结构 C/C 面内和层间剪切强度均值比较可见两者相差很小;而三向正交结构 C/C 拉伸强度要大于螺纹小径拉伸应力均值,可见三向正交结构 C/C 螺栓破坏确实是由于剪切引起,这主要是因为螺栓头结构形式决定的。同样由表 1 和表 2 中细编穿刺结构 C/C 数据可见细编穿刺结构 C/C 螺栓的破坏是由于螺纹小径处受拉破坏引起的。

在螺栓受拉情况下,螺栓头部会受到剪应力作用,由于螺栓结构特点导致当在某一个面上受到的是层间剪应力,而与该面垂直的方向上的面受到的是面剪应力,所以图 5 中受剪面实际上是面剪和层剪的混合剪切应力作用,其破坏不能简单以某一种剪应力进行评估,而是综合作用的结果。同时通过试验数据对比可见,其综合剪应力破坏值是面内和层间剪切强度的均值。

4 结论

- (1) 螺栓头剪切破坏是面内和层间剪切综合作用的结果,其剪切破坏强度是面内和层间剪切两者均值;
- (2) C/C 螺栓拉伸破坏断裂要用螺栓小径进行评估,其破坏强度可以直接用螺栓受拉方向上材料拉伸强度;
- (3) 螺栓头的设计决定了螺栓的破坏形式,当螺栓头结构设计合理的情况下,可以最大发挥复合材料拉伸和剪切性能极限。

参考文献

[1] NAKAMURA M, Shigematsu I. Joining of carbon fibre-reinforced silicon nitride composites with 72Ag-26Cu-2Ti filler metal[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(17): 4629-4634.

[2] 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, 2010, 80(1): 125-132.

[3] 王杰,李克智,郭领军,等.炭布叠层穿刺 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.

[4] 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(7): 1724-1730.

[5] 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.

[6] 裴瑞光,肖毅,陈豪麟,等.复合材料螺栓连接预紧力松弛的温度-时间依存行为[J].复合材料学报, 2016, 33(4): 768-778.

[7] 张振,肖毅,刘彦清,等.基于振动疲劳试验的复合材料螺栓连接预紧力松弛特性[J].复合材料学报, 2016, 33(1): 163-173.

[8] BICKFORD J. An introduction to the design and behavior of bolted joints, revised and expanded [M]. Los Angeles: CRC Press, 1995: 24-31.

[9] THOPPUL S D, FINEGAN J, GIBSON R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures—A review[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3): 301-329.

[10] SUN H T, CHANG FUKUO, QING XINLIN. The response of composite joints with bolt-lamping loads [J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36(1): 47-67/69-92.

[11] TSERPES K I, LABEAS G, PAPANIKOS P, et al. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates [J]. Composites Part B Engineering, 2002, 33(7): 521-529.

[12] TAN S C. A progressive failure model for composite laminates containing openings [J]. Journal of Composite Materials, 1991, 25(5): 556-577.

[13] CAMANHO P P, MATTHEWS F L A. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates [J]. Composites Part A, 1997, 28A: 529-547.

[14] DANO M L, GENDRON G, Picard A. Stress and failure analysis of mechanically fastened joints in composites laminates [J]. Composite Structures, 2000, 50(1): 287-296.

[15] 孙鹏军,雷勇军,吴宏伟,等. C/C 复合材料螺栓紧固特性[J].宇航材料工艺, 2017, 47(1): 59-61.

[16] 闵昌万,谭志勇,龙丽平. C/C 复合材料螺栓在拧紧力矩条件下的力学性能研究[J].强度与环境, 2012, 39(3): 1-6.

[17] 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): 26-26.

[18] 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.

[19] 姜大成,吕长生,张新军. 某型直升机侧垂尾螺栓结构改进设计[J].机械工程师, 2014(4): 119-120.

[20] 郭家平,熊璇,党晓娟,等. 钉头型式对复合材料层合板机械连接强度的影响[J].南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 21-28.