

引文格式: 高学敏, 闫路, 何娅梅, 等. 基于拉剪复合载荷下钛合金螺栓力学性能的试验研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(12): 85-89.

GAO Xuemin, YAN Lu, HE Yamei, et al. Experimental research on mechanical properties of titanium alloy bolt under tension-shear combined load[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(12): 85-89.

## 基于拉剪复合载荷下钛合金螺栓力学性能的试验研究\*

高学敏<sup>1,2</sup>, 闫路<sup>3</sup>, 何娅梅<sup>4</sup>, 冯德荣<sup>1,2</sup>, 冯韶伟<sup>3</sup>

(1. 河南航天精工制造有限公司, 信阳 464000;

2. 河南省紧固连接技术重点实验室, 信阳 464000;

3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

4. 航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610000)

[摘要] 加工了拉伸-剪切复合载荷的测试装置, 并开展了钛合金螺栓在纯拉伸、纯剪切、拉伸-剪切耦合等受力状态下的力学试验, 分析了拉应力与螺栓轴线角度变化对试验结果的影响及其相应变化的规律。研究表明, 一是加工的拉伸-剪切复合载荷的测试装置可以准确满足纯拉伸、纯剪切、拉伸-剪切等单一载荷与复合载荷不同受力状态的力学性能测试; 二是钛合金螺栓在拉应力和切应力耦合作用下的力学性能指标较纯拉性能明显下降, 降幅最高达 40%。

关键词: 螺栓; 钛合金; 拉伸; 剪切; 复合载荷

### Experimental Research on Mechanical Properties of Titanium Alloy Bolt Under Tension-Shear Combined Load

GAO Xuemin<sup>1,2</sup>, YAN Lu<sup>3</sup>, HE Yamei<sup>4</sup>, FENG Derong<sup>1,2</sup>, FENG Shaowei<sup>3</sup>

(1. Henan Aerospace Precision Machining Co., Ltd., Xinyang 464000, China;

2. Henan Key Laboratory of Fastening Connection Technology, Xinyang 464000, China;

3. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China;

4. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610000, China)

[ABSTRACT] A testing device for tension-shear combined load was processed, and mechanical properties tests were carried out under pure tension, pure shear, tension-shear combined load. The influence of tensile stress and bolt axis angle on the test results and the corresponding variation law were analyzed. The results show that the mechanical properties of titanium alloy bolts under the tensile and shear combined load are obviously lower than those under pure tensile load, with a maximum decrease of 40%.

Keywords: Bolt; Titanium alloy; Tensile; Shear; Composite load

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.12.085

一代材料决定一代装备, 武器装备性能的提高越来越依赖于先进材料和先进工艺。其中钛合金材料由于其重量轻、韧性好、强度高、耐腐蚀等特点, 广泛运用于

航空航天领域。同时航空航天型号上的机械连接也大量采用钛合金紧固件, 使用量少则上万件, 多则百万件, 以“数以万计、类以群分、连结构、接系统”, 形成紧固连

\* 基金项目: 中国科协青年托举人才工程资助项目(2017QNRC001)。

接系统,铸就型号的钢筋铁骨,保障了装备型号的质量可靠性。但在紧固件服役过程中,损伤和失效并非都是由单一载荷引起,经常是由多重载荷共同作用引起,而拉伸-剪切复合载荷就是其受力形式之一,随着新材料的广泛使用,复合载荷的测试变得越来越重要<sup>[1-3]</sup>。

1729年,根据杠杆原理制成的第一台材料力学测试试验机在法国问世,而我国的力学性能测试起步比较晚,1930年北洋大学教授邓曰研制出我国第一台材料力学性能测试装置。随着科学技术的不断发展,我国的试验机技术与国外的差距不断缩小,力学性能测试理论方面也进行了大量的研究。其中拉伸性能测试作为最早和最典型的测试手段<sup>[4-7]</sup>被广泛应用,叶丽燕等<sup>[8]</sup>研究了拉伸速率对不锈钢材料拉伸性能的影响,分析了马氏体转变与拉伸速率的关系;孙瑞雪等<sup>[9]</sup>开展了不同热处理状态下应变速率对铝合金的行为研究,得出5083铝合金在低应变速率条件下以剪切断裂为主,高应变速率条件下以穿晶断裂为主。另外剪切试验也是作为材料评估的一种重要手段,西北工业大学吴建军等<sup>[10]</sup>开展了金属材料剪切试验方法研究,概述了各种剪切试验的试验方法、优缺点及应用现状;长安大学杜强等<sup>[11]</sup>开展了复合板材双剪切试验方法与装置研究,研究了复合板材双剪试验方法,设计了双剪试验装置,并进行了双剪试验,分析了破坏形态和力学性能。

可见,国内学者在对材料在受单一载荷下(拉伸、剪切等)的分析与研究做了大量的工作,并建立了理论公式与分析模型,但对材料在受拉伸-剪切复合载荷下的试验方法和失效模式研究较少。本文将采用电子万能试验机对国家某重点型号用螺栓在受拉伸-剪切复合载荷下的试验方法和失效特性进行研究,并建立剪切过程失效的分析模型,其研究成果不仅保障国家型号飞机用紧固件的质量可靠性,也具有重要学术理论价值和广泛的应用前景。

## 1 试验理论模型

### 1.1 拉伸理论分析

拉伸试验是材料力学性能试验最基本的试验方法,典型塑性金属材料拉伸过程可以分为弹性、屈服、强化、局部变形4个阶段,通过测试材料的应力-应变曲线(图1),获得材料基本的力学性能指标,并作为后续结构设计时选材和强度计算的主要依据。

材料的力学性能指标与试样标距 $L_0$ 和原始截面积 $A$ 有关,为了消除试样尺寸对材料力学性能的影响,引入了应力 $\sigma$ 和应变 $\varepsilon$ 两个参数,便可以得到与标距 $L_0$ 和原始截面积 $A$ 无关的应力 $\sigma$ 、应变 $\varepsilon$ 关系及曲线图。应力 $\sigma$ 和应变 $\varepsilon$ 可分别由式(1)、式(2)求得。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

其中, $F$ 为作用在试样上的拉伸力; $\Delta L$ 为试样标距的伸长量; $E$ 为试样材料的弹性模量,是材料的固有特性,即为 $\sigma$ - $\varepsilon$ 曲线(图1)中弹性阶段直线的斜率。

### 1.2 剪切理论分析

剪切试验,即在静压缩或拉伸力作用下,通过剪切试验装置使试件垂直于其纵轴的一个或两个横截面受剪切直至断裂,以测定其抗剪性能的试验。常用的试验方法有双剪、单剪等,如图2和3所示。

材料的剪切性能与试样的剪切面积 $A$ 有关,在单剪试验中,由受力平衡可知,剪切面 $m$ - $m$ 上的剪切力 $F_Q=F$ ;在双剪试验中,剪切面 $m$ - $m$ 上的剪切力 $F_Q=F/2$ 。

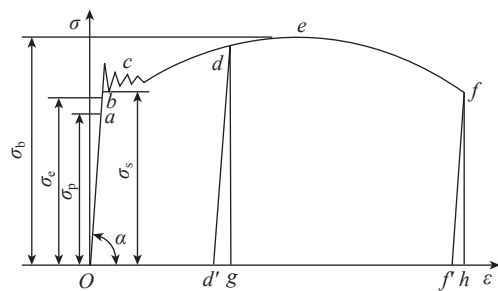
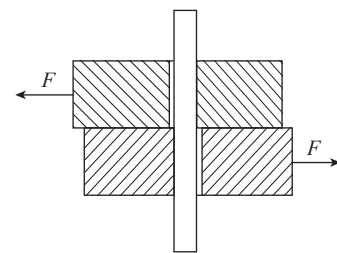
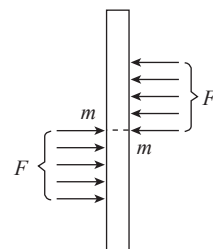


图1 典型塑性材料的应力应变曲线图

Fig.1 Stress-strain curves of typical plastic materials



(a) 受力图



(b) 受力分析图

图2 单剪试验受力模型

Fig.2 Stress model of single shear test

则剪切应力  $\tau$  为:

$$\tau = \frac{F_Q}{A} \quad (4)$$

### 1.3 拉伸-剪切理论分析

拉伸-剪切复合载荷通过垂直加载使力施加于试样之上。本课题是将试样两端固定夹持,试样两端相当于各有一个限制 5 个自由度的约束,在 X 方向自由度不受限,可以产生拉伸和压缩力,受力如图 4 所示。

如图 4 (b),在试样中心附近有两组对称的均布力,在小变形情况下,均布力简化为在  $m-m$  剪切面上的一对对称力和一个力偶。

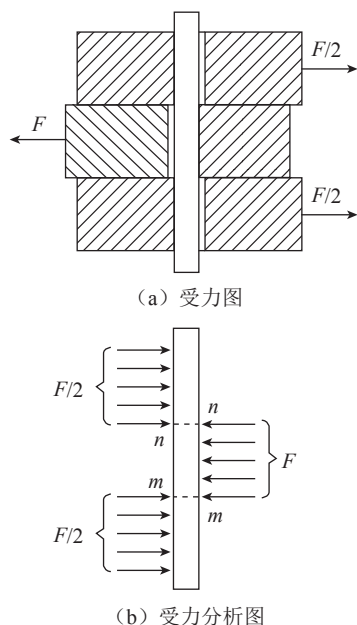


图 3 双剪试验受力模型

Fig.3 Stress model of double shear test

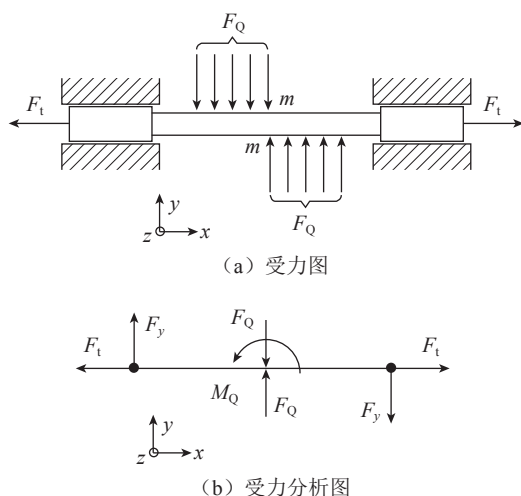


图 4 拉剪复合载荷试验受力模型

Fig.4 Stress model of double shear test

## 2 试验方法与材料

### 2.1 试验方法

拉伸-剪切试验装置如图 5 所示,试验装置由两个紧固加载单元组成,用于配合使用以对钛合金螺栓试样进行拉剪复合试验,各紧固加载单元分别包括一个转接杆、一个紧固夹块和在前后方向上间隔布置的两个连接侧板,紧固夹块上设有试样穿孔,用于紧固穿装钛合金螺栓试样,所述紧固夹块与两个连接侧板紧固装配,转接杆与两连接侧板连接,以使得转接杆的加载施力方向指向钛合金螺栓试样的轴线;各紧固加载单元中,紧固夹块与相应的两连接侧板可拆紧固装配。在各紧固加载单元中,紧固夹块和相应的两连接侧板可拆紧固装配,这样可以不同规格类型的螺栓选取不同的紧固夹块,只要更换夹块即可,不需要更换整个紧固加载单元,可以有效降低成本。

试验装置通过连接微机控制电子万能试验机施加力,变换转接杆与侧板孔位置,获得拉应力与螺栓轴线不同角度的测试数据。转接杆与侧板通过销连接,侧板(图 6)连接孔与螺栓轴线角度分别加工为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ ,拉伸-剪切复合载荷角度为  $0^\circ$  时,试样受纯拉伸力;角度为  $90^\circ$  时,试样受纯剪切力;角度为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  时受拉伸-剪切复合载荷。

### 2.2 试验设备

试验设备采用微机控制电子万能试验机(图 7 (a)),设备精度 1 级,主要用于金属材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切等试验;拉伸-剪切试验装置实物如图 7 (b) 所示。

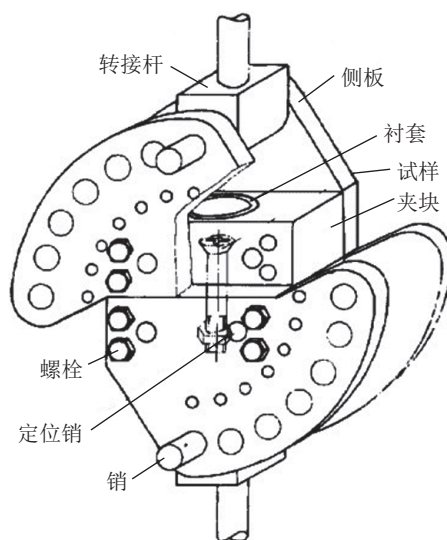


图 5 拉伸-剪切试验装置

Fig.5 Tension-shear experimental device

### 2.3 试验材料

试验采用的螺栓材料为国产钛合金 TC4,规格为 MJ6 × 1,头型为六角头,螺纹精度为 4h6h,强度等级为 1100MPa,表面状态为涂覆二硫化钼 + 涂十六醇,采用不同角度状态各 3 件进行试验。

### 3 试验结果与分析

纯拉伸、纯剪切、拉伸 - 剪切 3 种状态分别拉至破坏,破坏拉力结果见表 1。

侧板连接孔与螺栓轴心角度为 15°、30°、45°、60°、75° 时试样受拉伸 - 剪切复合载荷;角度为 0 时试样受纯拉伸力;角度为 90° 时试样受纯剪切力。试验结果平均值见表 2。

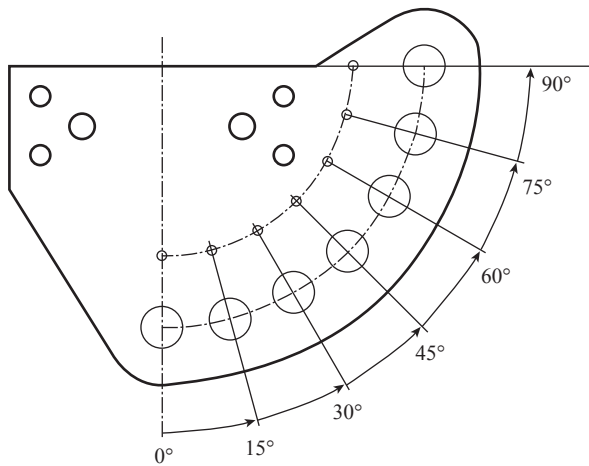


图 6 侧板工装图

Fig.6 Side plate tooling diagram



(a) 试验设备



(b) 试验装置

图 7 试验设备及试验装置

Fig.7 Experimental equipment and experimental device

随着拉应力与螺栓轴线角度的增大,钛合金螺栓在拉应力和切应力耦合作用下的破坏载荷值逐渐降低,拉应力与螺栓轴线角度为 75° 时,降幅最大,较纯拉力时低 40%。拉应力与螺栓轴线角度为 90° 时试样受纯

表 1 试验结果

Table 1 Results of experimental

组号	序号	角度 / (°)	受力状态	试验结果 /kN
1	1	0	纯拉伸力	24.73
	2	0	纯拉伸力	26.00
	3	0	纯拉伸力	26.50
2	1	15	拉剪力	22.57
	2	15	拉剪力	22.08
	3	15	拉剪力	21.45
3	1	30	拉剪力	16.84
	2	30	拉剪力	19.20
	3	30	拉剪力	22.90
4	1	45	拉剪力	18.37
	2	45	拉剪力	15.56
	3	45	拉剪力	16.83
5	1	60	拉剪力	16.23
	2	60	拉剪力	15.43
	3	60	拉剪力	15.52
6	1	75	拉剪力	14.90
	2	75	拉剪力	14.64
	3	75	拉剪力	15.26
7	1	90	纯剪切力	15.83
	2	90	纯剪切力	15.09
	3	90	纯剪切力	14.93

表 2 各角度试验结果平均值

Table 2 Mean value of experimental results

序号	角度 / (°)	受力状态	试验均值 /kN
1	0	纯拉伸力	25.74
2	15	拉剪力	22.04
3	30	拉剪力	19.65
4	45	拉剪力	16.92
5	60	拉剪力	15.73
6	75	拉剪力	14.93
7	90	纯剪切力	15.28

剪切力,破坏载荷稍有提升。

如图8所示,以纵坐标为拉伸载荷,以横坐标为剪切载荷,将试验平均载荷标注在试验角度分度线上,绘制复合载荷图,连接图上各平均载荷点,并适当修正,得到平滑的复合载荷图。随着拉应力与螺栓轴线角度的增大,钛合金螺栓所受拉应力在逐渐变小,切应力在逐渐增大。

#### 4 结论

结合钛合金螺栓在拉应力和切应力耦合作用的受力特点,加工了拉伸-剪切复合载荷的测试装置,测试装置结构参照美国军用标准《NASM1312—2 紧固件试验方法 复合载荷》,能够准确测试紧固件在拉伸-剪切复合载荷状态下的力学性能,得到了钛合金螺栓在纯拉伸、纯剪切、拉伸-剪切等力状态下的力学性能参数,以及拉应力与螺栓轴线角度变化对试验结果的影响,得到如下结论:

钛合金螺栓在拉应力和切应力耦合作用下的力学性能指标明显较纯拉力性能明显下降,降幅最高达40%,因此针对型号用钛合金螺栓受拉-剪复合载荷的特殊环境,应根据安装与拉伸角度的不同,合理考虑设计安全余量。

#### 参考文献

- [1] 李英亮. 紧固件概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.  
LI Yingliang. Fasteners basics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

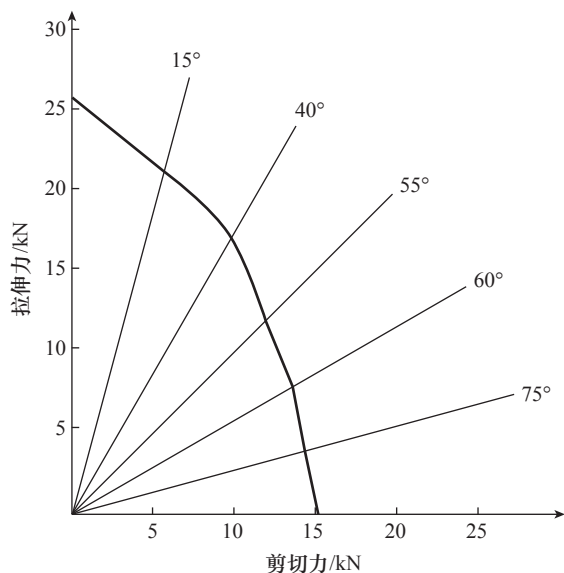


图8 复合载荷图  
Fig.8 Compound load

- [2] 《紧固件连接设计手册》编写委员会. 紧固件连接设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1990.

Editorial Committee of Fastener Connection Design Manual. Fastener connection design manual[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.

- [3] 王先逵, 李旦. 机械加工工艺手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.

WANG Xiankui, LI Dan. Manual of machining technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

- [4] 林金保, 王心怡, 任伟杰, 等. 挤压态 AZ31 镁合金室温拉伸力学各向异性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 479-482.

LIN Jinbao, WANG Xinyi, REN Weijie, et al. Research on mechanical anisotropy of extruded AZ31 magnesium alloy in tensile condition at room temperature[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2018, 39(4): 479-482.

- [5] LIN Y C, CHEN M S, ZHONG J. Effect of temperature and strain rate on the compressive deformation behavior of 42CrMo steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1-3): 308-315.

- [6] CHOI I C, LEE D H, AHN B, et al. Enhancement of strain-rate sensitivity and shear yield strength of a magnesium alloy processed by high-pressure torsion[J]. Scripta Materialia, 2015, 94: 44-47.

- [7] 田晨超, 焦磊, 张娟, 等. 纯钛板材室温拉伸塑性变形的各向异性[J]. 焊管, 2018, 41(10): 18-21.

TIAN Chenchao, JIAO Lei, ZHANG Juan, et al. Anisotropy of plastic deformation of pure titanium sheet during tensile test at room temperature[J]. Welded Pipe and Tube, 2018, 41(10): 18-21.

- [8] 叶丽燕, 李细锋, 陈军. 不同拉伸速率对 SUS304 不锈钢室温拉伸力学性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(2): 89-93.

YE Liyan, LI Xifeng, CHEN Jun. Influence of tensile strain rates on mechanical properties of 304 austenitic stainless steel at room temperature[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(2): 89-93.

- [9] 孙瑞雪, 徐磊, 赵文博. 不同应变速率下 5083 铝合金的拉伸性能及断口形貌[J]. 轻金属, 2012(8): 59-61.

SUN Ruixue, XU Lei, ZHAO Wenbo. The tensile properties and fracture morphologies of 5083 aluminum alloy under different strain rates[J]. Light Metals, 2012 (8): 59-61.

- [10] 郭洪飞, 吴建军, 王明智, 等. 金属材料剪切试验方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(18): 53-59.

WU Hongfei, WU Jianjun, WANG Mingzhi, et al. Shear test methods for metallic material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(18): 53-59.

- [11] 杜强, 丁荣, 吕晶, 等. 复合板材双剪切试验方法与装置[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(6): 85-90, 116.

DU Qiang, DING Rong, LÜ Jing, et al. Double shear testing method and device for composite panels[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(6): 85-90, 116.

通讯作者: 高学敏, 高级工程师, 研究方向为航天领域检测技术与失效分析研究。

(责编 阳光)