

TC4 紧固件性能的试验研究

Performance Research of TC4 Bolt

西北工业大学中法联合虚拟设计与制造研究室 陈磊 陶华 张杰
北京航空制造工程研究所 刘风雷
沈阳飞机设计研究所 张广来

[摘要] 验证了航空飞行器结构中以滚压 MJ 螺纹的 TC4 螺栓替代常规 M 螺纹的 30CrMnSiA 螺栓的可行性。试验证明 30CrMnSiA 螺栓的拉伸性能略高于 TC4 螺栓,而 TC4 螺栓的拉伸疲劳性能优于 30CrMnSiA 螺栓。对破坏试件进行断口分析,确定螺栓断裂属于疲劳破坏。分析了螺栓制造工艺,发现 TC4 螺栓滚压工艺产生的残余应力和 MJ 的螺纹形状是影响螺栓疲劳性能的主要因素。

关键词: 疲劳 螺栓 滚压

[ABSTRACT] The feasibility of substituting 30CrMnSiA bolt with M thread by TC4 bolt with MJ thread is testified. In experiments, the tensile properties of 30CrMnSiA bolts are superior to TC4 bolts while the fatigue properties of TC4 are better than 30CrMnSiA bolts. The fractographic analysis is done to make certain that the rupture is fatigue destroy. The process of bolt manufacture is considered. The residual stress and MJ thread which generate from the rolling process are the main factors which effect the fatigue performance of bolt.

Keywords: Fatigue Bolt Rolling

航空制造领域大量采用了如螺栓连接的紧固件连接。其中,紧固件的抗拉伸性能、抗剪切性能和疲劳性能等都必须在航空紧固件使用前进行试验研究。

试验是决定航空紧固件能否在飞行器制造过程应用的主要方法。本课题对批量螺栓的拉伸性能和疲劳拉伸性能进行试验,验证航空飞行器结构中以滚压 MJ 螺纹的 TC4 螺栓替代常规 M 螺纹的 30CrMnSiA 螺栓的可行性;并对破坏试件进行断口分析。

1 螺栓材料性能及试件模型

1.1 试件

试验件为 MJ 螺纹 TC4 钛合金和 M 螺纹 30CrMnSiA 螺栓,具体参数见表 1。

1.2 试件特征

钛合金 TC4 组成为 Ti-6Al-4V,属于 $\alpha + \beta$ 型钛合

金,具有良好的综合力学机械性能。常用 30CrMnSiA 的热处理条件为 870 ~ 890℃ 油淬加 510 ~ 570℃ 油冷。试样材料的主要力学性能^[1]如表 2 所示。

表1 螺栓试验件直径 mm

材料(类型)	头型					
	90° 沉头			120° 半沉头		
	5	6	8	5	6	8
TC4 (MJ)	5	6	8	5	6	8
30CrMnSiA (M)	5	6	8	5	6	8

表2 螺栓试样材料的主要性能

材料	σ_b /MPa	E /GPa	比强度 / (Pa · kg ⁻¹ · m ³)
TC4	1 100	109	26.4
30CrMnSiA	1 080	196	14.1~15.4

30CrMnSiA 螺栓试验件是按 HB1-218 制成的常规 M 螺纹螺栓;TC4 钛合金螺栓试验件是按 HB6568 制成的 MJ 螺纹螺栓。工艺过程中需要对螺栓头下圆弧进行滚压强化,并通过滚压成形工艺加工 MJ 螺纹。

MJ 螺纹是区别于常规 M 螺纹的一种广泛应用于航空领域的螺纹。30CrMnSiA 螺栓试验件采用常规的 M 螺纹,而 TC4 钛合金试验件采用滚压成形的 MJ 螺纹。MJ 螺纹将普通螺纹基本牙型上内螺纹小径处的削平量由 H/4 加大到 5H/16,相应的外螺纹牙底采用了 0.18042P 最大圆弧半径^[2]。

2 螺栓性能试验过程

2.1 单向拉伸对比试验

试验在拉伸试验机上完成,分别对 TC4 钛合金和 30CrMnSiA 螺栓进行单向拉伸试验。每种试件取 3 件,试验的平均数据如表 3 和表 4 所示。

螺栓试件的单向拉伸试验结果表明,30CrMnSiA 螺栓的拉伸强度普遍高于 TC4 螺栓,而相比之下 120° 半沉头螺栓的这种差异比 90° 沉头螺栓更明显。

2.2 拉伸疲劳对比试验

螺栓的疲劳拉伸试验按照国家军用标准 GJB715-

表3 90° 沉头螺栓单向拉伸试验数据 kN

公称直径/mm	$\phi 5$	$\phi 6$	$\phi 8$
TC4 (MJ)	18.17	26.79	50.03
30CrMnSiA(M)	21.23	31.33	52.7

表4 120° 半沉头螺栓单向拉伸试验数据 kN

公称直径/mm	$\phi 5$	$\phi 6$	$\phi 8$
TC4 (MJ)	20.3	25.8	45.53
30CrMnSiA(M)	21.53	31.37	53.7

30《紧固件试验方法—拉伸疲劳》进行,采用JXG-100高频疲劳试验机对螺栓试件施加拉-拉交变载荷。

2.2.1 疲劳试验机

疲劳试验设备为JXG-100谐波式高频疲劳试验机,其静载为 $\pm 100\text{kN}$,动载为 $\pm 50\text{kN}$,频率范围为 $80 \sim 200\text{Hz}$ 。

2.2.2 试验步骤

疲劳试验中TC4钛合金MJ5-90°沉头螺栓的初始载荷按照螺栓静拉伸试验的数据取加载系数 $K=0.37$ 进行试验,应力比 $R=0.1$,取 $\Delta K=0.01$,采用升降法确定应力水平。对TC4钛合金MJ5-120°半沉头螺栓,按照相应直径下90°沉头螺栓应力的90%进行试验。其他规格螺栓以MJ5螺栓为参考,在相应的应力范围内有所调整进行试验。30CrMnSiA螺栓的初始应力取TC4钛合金最低应力水平进行验证。

2.2.3 TC4-MJ螺栓试验数据

由于螺栓疲劳拉伸数据的离散度很大,根据以前的试验步骤会浪费大量试验件,因此在试验过程中对 ΔK 进行了适当调整。

表5~7给出了不同公称直径钛合金90°沉头

表5 MJ5-90-TC4螺栓试验数据

加载系数	最大载荷/kN	平均载荷/kN	载荷幅值/kN	循环次数/ $\times 10^4$ 次	平均寿命/ $\times 10^4$ 次
0.46	8.36	4.60	3.76	7.47	7.47
0.45	8.18	4.50	3.68	12.57	7.57
				3.71	
				6.42	
0.44	8.00	4.40	3.60	13.00	11.53
				13.00	
				8.58	
0.42	7.63	4.20	3.43	13.00	13.00
				13.00	
				13.00	

MJ螺栓的试验数据。据统计,80%以上的90°沉头MJ螺栓的破坏位置发生在螺栓螺纹部分。可见,90°沉头MJ螺栓的应力集中部位大部分在螺纹部分。

表6 MJ6-90-TC4螺栓试验数据

加载系数	最大载荷/kN	平均载荷/kN	载荷幅值/kN	循环次数/ $\times 10^4$ 次	平均寿命/ $\times 10^4$ 次
0.53	14.20	7.81	6.39	8.60	7.41
				3.49	
				10.15	
0.48	12.86	7.07	5.79	5.36	11.00
				13.00	
				10.64	
0.45	12.06	6.63	5.43	13.00	12.49
				13.00	
				11.46	
0.42	11.25	6.19	5.06	12.40	12.40
0.40	10.70	5.90	4.80	13.00	13.00
				13.00	
				13.00	

表7 MJ8-90-TC4螺栓试验数据

加载系数	最大载荷/kN	平均载荷/kN	载荷幅值/kN	循环次数/ $\times 10^4$ 次	平均寿命/ $\times 10^4$ 次
0.46	23.02	12.66	10.36	7.47	6.74
				8.66	
				6.35	
0.42	21.02	11.56	9.46	10.80	11.43
				13.00	
				10.56	
0.40	20.02	11.01	9.01	13.00	12.23
				10.68	
				13.00	
0.38	19.02	10.46	8.56	13.00	13.00
				13.00	
				13.00	

表8和9给出了不同公称直径的钛合金120°半沉头MJ螺栓的试验数据(MJ8-120-MJ螺栓由于试验数据的离散度太大、数据混乱而未列出)。据统计,98%以上的120°半沉头MJ螺栓的破坏位置发生在螺栓头下部分。可见,120°半沉头MJ螺栓的应力集中部位大部分在头下部分。对断口的分析发现,120°半沉头MJ螺栓的十字槽设计得太深,镦制的十字槽在很大

程度上减少了螺栓头下部分的有效承载截面积,最终导致这种螺栓在螺栓头下部分产生疲劳破坏。MJ8-120-TC4 螺栓头下部分断裂的断口如图 1 所示,这与十字槽的深度和形状有很大关系,而且裂纹源的部分分布在环螺栓头下一周。

2.2.4 30CrMnSiA-M 螺栓试验

与 TC4-MJ 螺栓相同应力水平下,30CrMnSiA-M 螺栓的疲劳寿命远远低于 TC4-MJ 螺栓。其他试验条件相同时,取低于 TC4-MJ 螺栓 13 万疲劳寿命相应的应力对不同规格的 30CrMnSiA-M 螺栓进行试验。数据如表 10 所示,其疲劳寿命均远低于 13 万次。

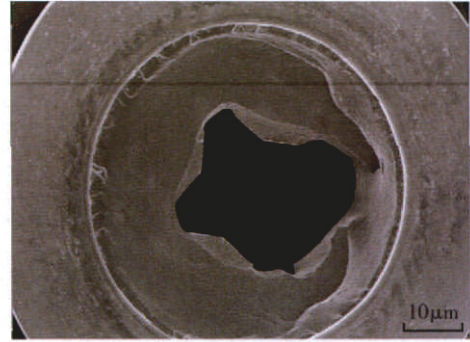


图1 MJ8-120-TC4螺栓断口
Fig. 1 Fracture of MJ8-120-TC4 bolt

表8 MJ5-120-TC4螺栓试验数据

加载系数	最大载荷 /kN	平均载荷 /kN	载荷幅值 /kN	循环次数 / $\times 10^4$ 次	平均寿命 / $\times 10^4$ 次
0.36	7.36	4.05	3.31	8.01	7.24
				7.27	
				6.43	
0.34	7.03	3.87	3.16	11.37	10.14
				6.06	
				13	
0.32	6.54	3.60	2.94	11.67	12.89
				13.00	
				13.00	
0.31	6.39	3.51	2.87	13.00	13
				13.00	
				13.00	

表9 MJ6-120-TC4螺栓试验数据

加载系数	最大载荷 /kN	平均载荷 /kN	载荷幅值 /kN	循环次数 / $\times 10^4$ 次	平均寿命 / $\times 10^4$ 次
0.43	11.09	6.10	4.99	3.38	5.9
				4.5	
				6.4	
0.41	10.60	5.83	4.77	10.80	11.50
				13.00	
				11.72	
0.39	10.13	5.57	4.56	13.00	9.54
				4.61	
				11.10	
0.37	9.64	5.30	4.34	13.00	13
				13.00	
				13.00	

表10 30CrMnSiA-M螺栓试验数据

头形	规格 /mm	最大载荷 /kN	循环次数 / $\times 10^4$ 次	平均寿命 / $\times 10^4$ 次
90°	$\phi 5$	5.08	3.54	4.54
			5.2	
			4.89	
	$\phi 6$	8.19	3.54	3.56
			3.47	
			3.67	
$\phi 8$	14.90	4.59	4.67	
		5.23		
		4.2		
120°	$\phi 5$	5.22	2.88	3.27
			2.84	
			4.08	
	$\phi 6$	7.37	3.72	3.52
			3.06	
			3.78	
	$\phi 8$	13.41	3.38	3.54
			3.51	
			3.72	

试验数据表明,30CrMnSiA 螺栓的拉伸性能略高于 TC4 螺栓,而 TC4 螺栓的拉伸疲劳性能优于 30CrMnSiA 螺栓,因此以滚压 MJ 螺纹的 TC4 螺栓替代常规 M 螺纹的 30CrMnSiA 螺栓是可行的。

3 试验对比

由于螺栓试验数据的离散度过大,对 MJ8-90-TC4 螺栓和 M8-90-30CrMnSiA 螺栓有选择性地进行了疲劳试验对比。

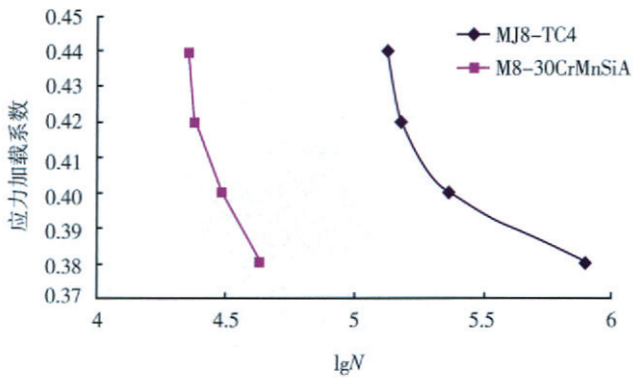


图2 两种螺栓S-N曲线
Fig. 2 S-N curves of the two bolts

3.1 试验数据及处理

表 11 和 12 分别给出了 MJ8-90-TC4 和 M8-90-30CrMnSiA 螺栓在 4 个应力水平下的疲劳寿命试验数据。图 2 给出了相同尺寸、不同材料和螺纹形状螺栓的疲劳寿命 $\sigma_{max}-lgN$ 对比曲线。

3.2 试件断口分析

应用 S450 扫描电镜,取螺纹部分断裂的试件 MJ8 进行断口分析,螺栓的断口如图 3 所示。

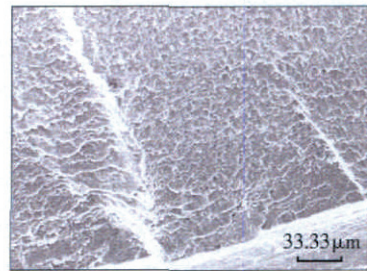
由图 3 可见,瞬时断裂区的面积约为疲劳裂纹扩展区的 1/4,断口为典型的疲劳破坏断口。图 3(a)为疲劳源放大图,未发现气孔、夹杂物等缺陷,可判断裂纹是从螺纹牙底萌生的,应由牙底应力集中与牙底微损伤结合引起的。图 3(b)为裂纹扩展区局部高倍放大图,裂纹扩展面与主应力线轴线约成 90° 。图 3(c)为瞬时断裂区局部高倍放大图,这一部分存在大量韧窝,是塑性断裂的表现。

表11 MJ8-90-TC4螺栓试验数据

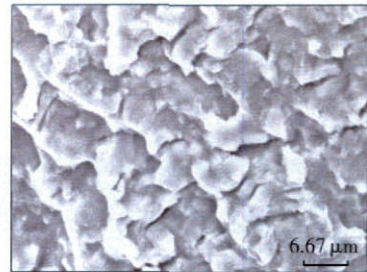
加载系数	最大载荷 /kN	平均载荷 /kN	载荷幅值 /kN	循环次数 / $\times 10^4$ 次	平均寿命 / $\times 10^4$ 次
0.44	22.01	12.11	9.90	15.00	13.30
				11.60	
				13.40	
0.42	21.02	11.56	9.46	16.20	15.27
				13.00	
				16.60	
0.40	20.02	11.01	9.01	35.60	23.13
				17.40	
				17.00	
0.38	19.02	10.40	8.56	30.20	79.90
				21.10	
				28.60	

表12 M8-90-30CrMnSiA螺栓试验数据

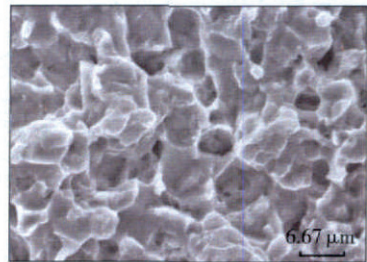
加载系数	最大载荷 /kN	平均载荷 /kN	载荷幅值 /kN	循环次数 / $\times 10^4$ 次	平均寿命 / $\times 10^4$ 次
0.44	22.01	12.11	9.90	1.99	2.28
				2.10	
				2.74	
0.42	21.02	11.56	9.46	2.31	2.41
				2.63	
				2.29	
0.40	20.02	11.01	9.01	3.05	3.10
				3.20	
				3.04	
0.38	19.02	10.40	8.56	3.98	4.37
				4.34	
				4.80	



(a) 疲劳源



(b) 疲劳条带



(c) 韧窝

图3 螺栓断口

Fig.3 Fracture of the bolt

(下转第 91 页)

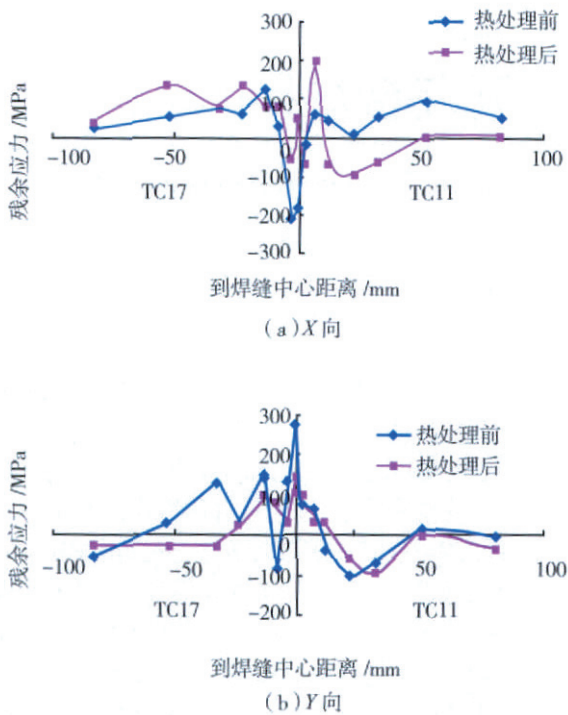


图4 590℃下3.5h工艺热处理前后残余应力测试

Fig.5 Residual stress test before and after heat treatment at 590℃ for 3.5h

向的拉力从而发生塑性流动,塑性金属被挤出不断形成飞边。飞边挤出并冷却,冷却过程中无法靠塑性变形来消除拉应力,从而在焊缝中心留下部分沿Y向的拉应力。焊接过程中,试件受到沿X向持续作用的顶锻力,焊接结束顶锻力消失,焊接界面高温金属的冷却收缩造成焊缝中心沿X向的残余压应力。但在个别点,测到与整体应力情况不同的压应力,其形成原因还需进行深入的试验研究,进一步的工作正在进行中。沿Y向的拉应力由飞边的产生和界面高温金属收缩2部分组成,所以Y向的应力值明显高于X向。

经真空热处理后,试件上各区域残余应力值都有不同幅度的降低。从整体来看,试件上的残余应力趋于均匀化。对比620℃下2.5h和590℃下3.5h两种热处理工艺,二者对焊缝残余应力都有一定的均匀化作用,但590℃下3.5h热处理后,焊缝中心残余应力峰值较低,且整个焊缝均匀化程度较高,所以对于TC11/TC17钛合金线性摩擦焊,590℃下3.5h的热处理工艺更为合理。

4 结论

(1) TC11与TC17线性摩擦焊焊缝中心X、Y两向的残余应力均为拉应力,Y向应力值明显高于X向,热影响区为压应力,由焊缝向外应力逐渐趋向于零。

(2) 焊缝两侧X向应力情况与材料无关,Y向应

力情况与材料有关,TC17一侧应力较小且为拉应力,TC11一侧为压应力,应力值较大。

(3) 经真空热处理后,试件上各区残余应力值均有不同程度的降低,整个试件应力都趋于均匀化。

(4) 对于TC11/TC17钛合金线性摩擦焊,590℃下3.5h热处理工艺比620℃下2.5h应力消除效果更好。

参考文献

- [1] 陈光. 整体叶盘在国外航空发动机中的应用. 航空发动机,1999(1):1-7.
- [2] 张田仓,韦依,周梦慰. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术,2004(11):56-58.
- [3] Daymond M R,Bonner Neil W. Measurement of strain in a titanium linear friction weld by neutron diffraction. Physica B, 2003,325:130-137.
- [4] 张持重,李冬梅,庞绍平,等. 采用X射线法测算金属材料内部残余应力的研究. 吉林化工学院学报,2001,18(4):73-75.
- [5] 张亦良,黄惠茹,李想. 车削加工残余应力分布规律的实验研究. 北京工业大学学报,2006,32(7):582-586.

(责编 淡蓝)

(上接第88页)

4 结束语

试验表明,30CrMnSiA螺栓的拉伸性能略高于TC4螺栓,而TC4螺栓的拉伸疲劳性能优于30CrMnSiA螺栓,用TC4螺栓替代现有30CrMnSiA螺栓是可行的。

与M螺纹的30CrMnSiA螺栓相比,不考虑材料,MJ螺纹的TC4螺栓采用了热处理后滚压成形的工艺。结构上,TC4螺栓的MJ螺纹有效降低了螺栓结构的应力集中;实际加载应力上,滚压产生的残余应力有力地减小了轴向疲劳载荷,从根本上提高了螺栓的抗疲劳性能。

此外,滚压工艺还提高了螺栓表面的质量,改变了表面层的物理机械性能,提高了螺栓的疲劳性能。滚压工艺有效地降低了螺栓特别是应力集中部位的表面粗糙度,清除了材料表面原有的划痕和裂纹等表面缺陷,而这些往往是造成疲劳破坏的疲劳源,从而提高了螺栓的抗疲劳性能。

参考文献

- [1] 王向东,郝斌. 钛的基本性质、应用及我国钛工业概况. 钛工业进展,2004,21(1):6-10.
- [2] 郭可谦,杨育中. 紧固件连接设计手册. 北京:国防工业出版社,1990.

(责编 良辰)