

TC4 紧固件性能试验和数值仿真

Experiment and Numerical Simulation on Performance of TC4 Fastener

西北工业大学中法联合虚拟设计与制造研究室 张杰 陶华 陈磊
北京航空制造工程研究所 刘风雷
中航工业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远优于 30CrMnSiA 螺栓。应用 ANSYS 软件,以有限元方法计算了两种螺栓的应力集中系数,证明 MJ 螺纹 TC4 螺栓的应力集中系数较小是其抗疲劳性能提高的主要因素。

关键词: 疲劳 螺栓 ANSYS 应力集中

[ABSTRACT] The research validates the feasibility of using TC4 bolt with MJ thread to substitute 30CrMnSiA bolt with M thread in the aircraft manufacturing. The experiment proves that the tension intensity of 30CrMnSiA bolt is higher than that of TC4 bolt. But compared to the 30CrMnSiA bolt with M thread, the TC4 bolt with MJ thread obtains the far higher fatigue properties. Combined with the ANSYS FEA to calculate the concentration coefficient, the result shows that the concentration coefficient of TC4 bolt with MJ thread is lower is the main factor which improves the fatigue properties.

Keywords: Fatigue Bolt ANSYS Stress concentration

飞机结构自重是决定飞机性能的重要因素,飞机结构中大量采用螺纹连接,螺栓是重要的航空紧固件。采用比强度高螺栓可以有效减轻飞机自重,所以选择 TC4 钛合金螺栓,并采用滚压成形 MJ 螺纹可以有效提高螺栓的抗疲劳性能,从而提高飞机的性能。

本课题对 MJ 螺纹 TC4 钛合金螺栓进行了拉伸试验和拉伸疲劳试验;并与 M 螺纹 30CrMnSiA 螺栓进行性能对比,以便为飞机结构中以 TC4 钛合金螺栓替代现有 30CrMnSiA 螺栓提供设计依据。通过 ANSYS 有限元仿真方法对试验结果进行了计算,并分析了试件的疲劳断口进行了分析了试验结果和螺栓的疲劳断裂机理。

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 光杆公差带 f9 的直径 8mm 的 90° 沉头螺栓。

钛合金 TC4 的组成为 Ti-6Al-4V,属于(α+β)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,材料主要力学性能如表 1 所示。

表 1 螺栓试样材料的主要性能

材料	σ_b /MPa	ρ / (g·cm ⁻³)	E/GPa
TC4	1 100	4.5	109
30CrMnSiA	1 080	7.85	196

30CrMnSiA 螺栓试验件是常规 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。

1.2 MJ 螺纹特征

MJ 螺纹的特点是在普通螺纹基本牙型上,内螺纹小径处的削平量由普通螺纹的 H/4 加大到 5H/16,相应的外螺纹牙底采用 0.180 42P 最大圆弧半径。H 为螺纹牙的理论高度,即牙顶尖在尖的径向测量距离;P 为螺纹的螺距。

MJ 螺纹螺栓还对易发生疲劳破坏的螺纹根部进行螺纹收尾,且在热处理后进行滚压,使零件表面质量提高,滚压过程中产生的牙底残余应力提高了螺栓的抗疲劳强度。

2 螺栓性能试验

2.1 单向拉伸试验

试验在拉伸试验机上完成,分别对材料为 TC4 钛合金和 30CrMnSiA 的 90° 沉头螺栓进行单向拉伸试验,

每种试件取 3 件,试验数据如表 2 所示。

表 2 螺栓单向拉伸试验数据 kN

材料	试件 1	试件 2	试件 3	平均
TC4	49.2	49.9	51	50.03
30CrMnSiA	52.4	53.7	51.6	52.57

螺栓试样的单向拉伸试验结果证明,30CrMnSiA 沉头螺栓的拉伸强度略高于 TC4 沉头螺栓。

2.2 拉伸疲劳试验

按照国家军用标准 GJB715-30《紧固件试验方法——拉伸疲劳》,采用 JXG-100 高频疲劳试验机对螺栓试件施加拉—拉交变载荷,TC4 钛合金螺栓目标寿命为 13 万周。疲劳试验中 TC4 钛合金 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 $K=0.46$ 进行试验,取 $\Delta K=0.02$ 降低应力水平,在 4 个应力水平上进行试验,应力比 $R=0.1$ 。试验数据如表 3 所示。

表 3 MJ8-TC4 螺栓拉伸疲劳试验

加载系数 K	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/万周
0.46	23.02	12.66	10.36	7.47	5.98
				4.13	
				6.35	
0.42	21.02	11.56	9.46	10.80	11.45
				13.00	
				10.56	
0.40	20.02	11.01	9.01	13.00	12.23
				13.00	
				10.68	
0.38	19.02	10.46	8.56	13.00	13
				13.00	
				13.00	

30CrMnSiA90° 沉头螺栓的疲劳试验加载系数参照了 TC4 钛合金 90° 沉头螺栓试验,试验数据如表 4 所示。

螺栓试样的拉伸疲劳试验表明,在相同的应力水平下,TC4 沉头螺栓的拉伸疲劳性能高于 30CrMnSiA 沉头螺栓,特别是在 $K=0.38$ 这一加载系数下,TC4 沉头螺栓可达到目标寿命 13 万周,而 30CrMnSiA 沉头螺栓的平均疲劳寿命只有 2.44 万周,无法达到飞机结构件连接长寿命的要求。 $K=0.44$ 的应力水平上试件的离散度过大和试件数据不足,故未引用。

表 4 M8-30CrMnSiA 螺栓拉伸疲劳试验

加载系数 K	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/万周
0.46	23.02	12.66	10.36	1.72	1.56
				1.44	
				1.52	
0.42	21.02	11.56	9.46	2.39	1.79
				1.72	
				1.25	
0.38	19.02	10.46	8.56	2.53	2.44
				2.37	
				2.41	
0.30	14.9	8.20	6.71	4.59	5.38
				5.23	
				6.32	

2.3 数据处理和分析

从表 2 可以看出,TC4 钛合金螺栓的拉伸性能略低于 30CrMnSiA 螺栓。图 1 为螺栓的疲劳寿命 $S\text{-lg}N$ 线,数据表明 TC4 螺栓的抗疲劳性能远优于 30CrMnSiA 螺栓。

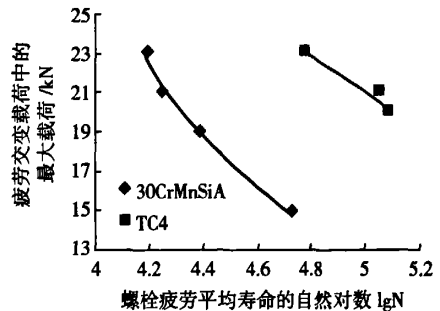


图 1 螺栓的疲劳寿命 $S\text{-lg}N$ 曲线
Fig.1 $S\text{-lg}N$ curves for fatigue of bolt

TC4 螺栓的抗疲劳性能的高低取决于螺栓结构和螺栓制造工艺。从结构上看,TC4 螺栓为 MJ 螺纹(和螺栓头下部分的圆弧),可以有效地降低螺栓的应力集中系数。从工艺上看,TC4 螺栓的螺纹和头下圆弧都是滚压成形的,成形过程中产生的残余应力有效地降低了螺栓承受疲劳载荷的应力水平,提高了螺栓的抗疲劳性能。

试验中,TC4 的 90° 沉头螺栓的疲劳破坏基本上发生在螺纹部分,而 30CrMnSiA 的 90° 沉头螺栓的疲劳破坏基本上发生在螺栓头下部分。在螺栓的仿真分析过程中发现,30CrMnSiA 的 90° 沉头螺栓的应力集中很明

显发生在螺栓的头下部分,最终导致大部分 30CrMnSiA 螺栓在头下部分破坏;TC4 螺栓的最大应力集中转移到了螺纹部分,导致大部分 TC4 螺栓在螺纹部分破坏。

2.4 试样断口分析

除了螺栓的结构和加工工艺对螺栓的疲劳性能有影响外,螺栓材料的微观组织、螺栓的表面缺陷和材料内部缺陷等对螺栓的疲劳性能也都有影响。

试验后,应用 S450 扫描电镜,取螺纹部分断裂的试件(MJ8 破坏试件)对螺栓进行断口分析,螺栓的断口如图 2 所示。

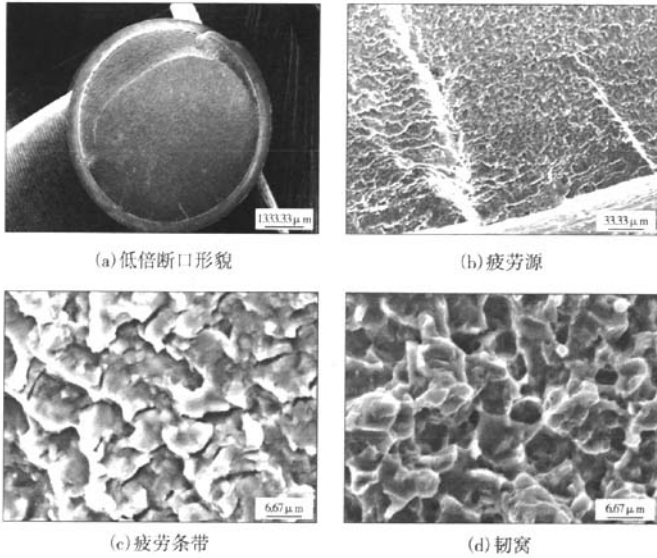


图 2 螺栓的断口形貌
Fig.2 Fracture morphology of bolt

图 2 (a)为断口放大图,可以看到裂纹的疲劳源、疲劳裂纹的扩展区和裂纹瞬时断裂区,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 2 (b)为疲劳源放大图,未发现有气孔、夹杂物等缺陷,可判断裂纹是从螺纹牙底萌生的,由牙底应力集中与牙底微损伤结合引起。图 2 (c)为裂纹扩展区局部高倍放大图,裂纹扩展面与主应力线轴约成 90°。图 2 (d)为瞬时断裂区局部高倍放大图,这一部分存在大量的韧窝,是塑性断裂的表现。

3 螺栓试验过程的仿真

螺栓的疲劳仿真在一定程度上可以反映螺栓在试验过程中的受力情况。虽然现在的商业软件对于试验过程的具体数据无法达到精确仿真,但是实践证明仿真

所得的受力趋势与实际情况是很相似的,这一点对分析螺栓的拉伸和抗疲劳性能很有意义。

目前对螺栓进行的仿真分析都是基于二维的,在建模时,螺纹部分都按平面对称结构处理,而实际中螺纹是螺旋线,对称处理导致了计算精度降低。本文基于对螺栓三维模型的建立分析了螺栓的拉伸受力情况,并利用仿真结构计算了螺栓的应力集中系数,为螺栓的性能分析提供了依据。

3.1 螺栓模型的建立

建立 MJ 螺纹螺栓模型时,应注意螺纹形状(牙底圆弧和牙形尺寸)、螺纹收尾和头下滚压圆弧,这是区别于 M 螺纹螺栓模型的主要方面,也是 MJ 螺纹螺栓抗疲劳性能提高的主要原因。鉴于 MJ 螺栓的特点,通过 UG 软件对螺栓进行三维造型,模型中缩短了螺栓光杆部分长度以减少模型单元数,提高计算速度。

将螺栓 UG 模型导入 Hyper Mesh 中进行网格划分。接着,约束螺栓头部下表面的所有自由度,并对螺栓螺纹面进行加载,可得到高质量的螺栓模型,将建立好的模型所有节点导入到 ANSYS 中,如图 3 所示。

最后,在 ANSYS 软件中对以上模型进行计算。计算结果如图 4 和图 5 所示。

3.2 应力集中系数的计算

应力集中是造成螺栓拉伸及疲劳破坏的主要因素。螺栓的应力集中一般发生在螺栓的螺纹和螺栓的头下部分,试验证明,螺栓的破坏均发生在这两个部位。应力集中系数 K_t 是反映应力集中程度的参数:

$$K_t = \frac{\text{最大等效弹性应力}}{\text{名义应力}}$$

应力集中部位的最大等效弹性应力 σ_{\max} 是螺栓在受到低于材料屈服极限的载荷作用时应力集中部位的



图 3 螺栓有限元模型
Fig.3 Finite element model of bolt

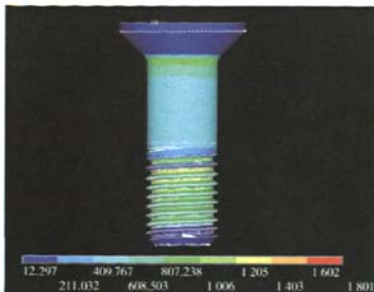


图4 MJ8-TC4 螺栓计算结果

Fig.4 Calculate result of MJ8-TC8 bold

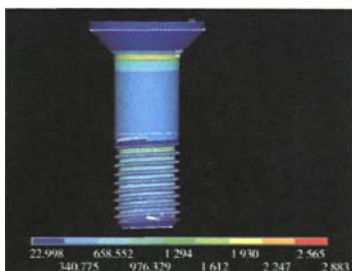


图5 M8-30CrMnSiA 螺栓计算结果

Fig.5 Calculate result of MJ8-30CrMnSiA bolt

应力,也是在此应力下螺栓受到的最大应力,即螺栓在此拉力下的最大等效应力。根据 MJ8 和 M8 螺栓的拉伸试验数据,取拉力 $F=30\text{kN}$ 对螺栓螺纹面进行加载计算,其等效应力如图 4 和图 5 所示。图 4 给出了 MJ8-TC4 螺栓单向拉伸的有限元计算结果中螺栓的等效应力图,图 4 显示螺栓在 $F=30\text{kN}$ 状态单向拉伸应力的情况下,等效应力的最大值 $\sigma_{\max}=1\ 801\text{MPa}$,最小值为 $\sigma_{\min}=12.297\text{MPa}$,应力集中发生在螺栓的螺纹部分距螺纹收尾处第二扣;图 5 给出了 MJ8-30CrMnSiA 螺栓单向拉伸的有限元计算结果中螺栓的等效应力图,图 5 显示螺栓在 $F=30\text{kN}$ 单向拉伸应力的情况下,等效应力的最大值为 $\sigma_{\max}=2\ 883\text{MPa}$,最小值为 $\sigma_{\min}=22.998\text{MPa}$,应力集中发生在螺栓的头下部位。

螺栓的名义应力为外力 F 作用下应力集中部位的截面平均应力:

$$\sigma_a = \frac{4F}{\pi d_c^2}$$

式中, d_c 为应力集中部位的计算直径。在螺纹部分, d_c

可按下式计算:

$$d_c = \frac{d_2 + d_1 - \frac{H}{6}}{2}$$

式中, d_1 和 d_2 分别为螺纹的小径和大径, H 为螺纹牙的理论高度^[4],以上数据都可以在紧固件的相关设计手册上查到。通过上述计算,可得到螺栓头部和螺纹部分的应力集中系数,见表 5。

以上数据显示,经过滚压工艺成形后的头下圆弧部分的应力集中问题已很好地得到了解决,螺纹部分的应力集中系数也有所降低,这是提高螺栓抗疲劳性能的关键。

表5 螺栓的应力集中系数

材料	头下部分	螺纹部分
TC4	1.404	2.118
30CrMnSiA	4.837	2.523

4 结果及分析

4.1 螺栓结构对螺栓抗疲劳性能的影响

螺栓结构对螺栓抗疲劳性能的影响主要表现在两种螺栓结构应力集中系数的差异上。3.2 节计算结果证明 TC4 的 MJ8 应力集中系数相对较小,即在同样的拉伸力作用下 TC4 螺栓在应力集中部位产生的拉应力相对较小,进而相对降低了螺栓应力集中部位的疲劳应力水平,提高了螺栓的抗疲劳性能。

TC4 的 MJ8 螺栓通过滚压成形工艺加工螺纹,螺纹牙底被滚压为圆弧状,螺纹收尾部分也通过滚压使螺纹逐渐过渡到光杆部分,从而降低了螺纹部分的应力集中系数。螺栓头下部分滚压为 $r=0.7\text{mm}$ 的圆弧,有效地降低了头下部分的应力集中系数。

4.2 螺栓加工工艺对螺栓抗疲劳性能的影响

和 M8-30CrMnSiA 螺栓相比, MJ8-TC4 螺栓热处理后滚压成形工艺除了在结构上降低了螺栓应力集中系数之外,还提高了螺栓表面的质量,改变了表面层的物理机械性能,提高了螺栓的抗疲劳性能。

滚压工艺有效地改善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。

滚压工艺产生的残余应力有利于提高螺栓抗疲劳性能。残余应力是指在没有外力作用的状态下,加工表

(下转第 87 页)

实现可拓制造“超网络”链所采取的使能技术中,有4项技术具有突出作用。

4.1 模块化技术

模块化通过对标准化的、基本的制造系统模块进行重构,快速得到面向定制产品的制造系统,是一种高生产率和柔性化的制造技术。可以有效地降低生产系统的复杂性、资本资产和组装成本,并加快创新步伐、提高产品质量。通过模块分解,复杂产品制造商将不同的子模块交给不同的模块供应商研发和制造,利用集成优势和快速创新的资源,适应日益复杂的技术需求;模块供应商则通过发展核心专长,进行模块研发和制造,找到充分发挥比较优势的市场空间;在模块集成的框架下,复杂产品制造商、模块供应商和使用者都获得了更大的灵活性。

4.2 制造网格技术

制造网格能够实现企业和社会资源共享和集成,支持企业群体协同运作和管理的集成支撑环境,它基于网格和相关的先进计算机与信息技术,通过网络将分散在不同企业和社会群体中的设计、制造、管理、信息、技术、智力和软件资源,通过封装和集成,屏蔽资源的异构性和地理分布性,以透明的方式为用户提供各类制造服务,使企业或者经营个体能够以请求服务的方式方便地获得所有与制造相关的服务,实现各类资源的集成和优化运行,并为构建面向企业协同制造特定需求的制造网格应用系统提供协同工作支持环境,从而实现企业间的商务协同、设计协同、制造协同和供应链协同,使基于制造网格支撑环境运行的制造企业群体能够以低的成本和短的开发周期,制造出符合市场需求的高质量产品。

4.3 快速协同关系构造技术

网络中成员的协调和集成是敏捷协同可拓制造的基础,取决于每一个成员相互之间能力的互补性和核心优势的集成能力,文化的一致性、经营理念的相容性,新技术情况,产品开发时间与成本、柔性等。

4.4 管理技术

主要包括项目管理技术,解决可拓制造的“超网络”链的风险预测、进度控制、共同管理等。供应链技术,解决可拓制造“超网络”链的运输管理、交易管理、库存管理和产品数据库管理技术等。

5 结束语

可拓制造“超网络”链是面向应急情况下大型工程装备快速变批量生产的先进制造模式,本文基于可拓协同制造资源概念,提出了面向应急情况下大型工程装备

快速变批量生产需求的可拓制造“超网络”链制造模式。在超网络链环境下,研究了其基本构成要素,即可拓制造单元的RKCQ流模型,并构建了可拓制造“超网络”链的模型体系,研究了可拓制造“超网络”链的组建过程模型,并给出了其组建的使能技术框架体系。下一步的研究方向主要是可拓制造“超网络”链的预案研究。

参 考 文 献

- [1] 马辉,谭建荣,张树有.一种面向大批量定制的产品可拓设计方法.中国机械工程,2005(18):1344.
- [2] 李扬,杨春燕,李立希.企业资源矛盾问题分析与求解系统设计及实现.哈尔滨工业大学学报,2006(7):90-96.
- [3] Kerstin Johansen, Mica Comstock, Mats Win Roth. Coordination in collaborative manufacturing mega-networks: A case study. Manage. J. Eng. Technology, 2005(22): 226-244.
- [4] 吉锋,何卫平,王东成,网络制造环境下面向复杂零件的协同制造链研究.计算机集成制造系统,2006(1):72-73.
- [5] 杨春燕,吴福芝.可拓集合在资源开拓研究中的应用.华南理工大学学报(自然科学版),2001(11):102-103.
- [6] 傅荣.协同性资源交互的神经网络模型与仿真.系统工程理论与实践,2003(7):24-28.
- [7] Florent Frederix. An extended enterprise planning methodology for the discrete manufacturing industry. European Journal of Operational Research, 2001(129):317-325.
- [8] Xue H, Kumar V, Sutherland J W. Material flows and environmental impacts of manufacturing systems via aggregated input-output models. Journal of Cleaner Production, 2007(15):1349-1358.
- [9] Tony Kinder. Go with the flow—a conceptual framework for supply relations in the era of the extended enterprise, Research Policy, 2003(32):503-523.
- [10] 沈镛,刘晓洁.资源流研究的理论与方法探析.资源科学,2006(3):9-10.
- [11] 范玉顺.制造网格的概念与系统体系结构,航空制造技术,2005(10):43.

(责编 凌蓝)

(上接第81页)

面内部为了保持平衡而存在的应力。一般情况下,当螺栓进行滚压时,会使表面层产生伸长的塑性变形,表面积趋于增大,加工结束后,表层在里层弹性恢复的作用下产生残余压应力,里层产生与其平衡的残余拉应力。螺栓表层产生的残余压应力抵消了一部分作用在螺栓上的疲劳载荷,特别对于前期疲劳裂纹的萌生来说,残余应力起到了一定的抵制作用,这些都直接提高了螺栓的抗疲劳性能。

试验表明,通过计算滚压过程中的残余应力而改进螺栓的滚压工艺以提高螺栓的抗疲劳性能是可行的。

(责编 傅正)