

高强度螺栓高温条件下预紧力松弛的有限元模拟

戴志成,王唱舟,周丽

沈阳理工大学

摘要: 为了研究高温条件下高强度螺栓预紧力的松弛特性,螺栓材料分别选用 40Cr 合金钢和 Ti-6Al-4V 钛合金。应用 ABAQUS 有限元软件建立装配体模型,定义了材料的本构模型和装配体各部件之间的接触,分析了常温预紧力状态下及高温条件下螺栓的受力及变形。分析结果表明,在高温条件下,Ti-6Al-4V 钛合金预紧力松弛现象明显好于 40Cr 合金钢,Ti-6Al-4V 钛合金高强度螺栓比 40Cr 合金钢螺栓拥有更高的强度和更好的延展性。得出的结论可为高温条件下高强度螺栓的材料选用提供理论依据。

关键词: 高温;高强度螺栓;有限元;预紧力松弛

中图分类号: TG141;TH131.3

文献标志码: A

Finite Element Simulation Preload Relaxation of High Strength Bolt at High Temperature

Dai Zhicheng, Wang Changzhou, Zhou Li

Abstract: In order to study the preload relaxation of high strength bolts, 40Cr steel and Ti-6Al-4V Ti are used separately as the bolt materials. The assembly model is built by using ABAQUS finite element software. The material constitutive model and the contact between each part of the assembly body are defined. The stress and deformation of the bolt under preload condition are analyzed at normal temperature and high temperature. The results show that under high temperature conditions, the preload relaxation of Ti-6Al-4V alloy is significantly better than that of 40Cr steel, and the bolt made of Ti-6Al-4V alloy has higher strength and better ductility than that of 40Cr steel bolt. The conclusion can provide a reasonable theoretical basis for the material selection of high strength bolt at high temperature.

Keywords: high temperature;high strength bolts;finite element;preload relaxation

1 引言

螺栓是应用最广泛的机械基础件,低强度普通螺栓对硬度、强度、抗拉力和扭力要求不高,使用频率较高。随着各类机械、设备、建筑工程的不断大型化以及功率、转速的不断提高,螺栓类零件的工作条件要求明显提高^[1]。目前许多设备应用于高温环境,普通螺栓已经不能满足要求,高强度螺栓随之出现。高强度螺栓的连接是通过螺栓杆内极大的预紧力夹紧被连接件,产生极大的摩擦力,从而提高连接的整体性和刚度,因此合适的预紧力有利于高强度螺栓的疲劳强度^[2]。

近年来,国内外对螺栓预紧力进行了各种研究。文献[3,4]通过理论及实验的方法研究高温情况下预紧力的损失情况。刘海波等^[5]通过预紧后的螺栓蠕变松弛现象研究其对数控机床几何精度的影响。莫易敏等^[6]利用横向振动试验得出六角法兰螺栓的防松性能较好,弹簧垫圈在预紧力较小时具有一定的防松作用。在一定范围内,随着预紧力和

摩擦系数的增大,防松性能越好;粗牙螺栓的防松性能优于细牙螺栓^[7]。文献[8]从螺栓的受力状况和材料强度理论出发,推导出高强度螺栓预紧力与螺纹表面摩擦系数的关系。此外,许多学者还运用有限元方法对螺栓预紧力进行了分析。邱凯等^[9]通过有限元方法分析了导弹联接螺栓在预紧力与弯矩组合载荷作用下的受力及变形,优化了预紧力范围,并推导出预紧力与工程安装扭矩之间的转换关系。还有通过预紧力单元法和温度收缩法^[10]、采用直接加载法、等效应变法和不考虑螺栓预紧力等^[11]各种预紧力施加方法并进行螺栓预紧力分析。文献中提及的螺栓材料多为合金钢。

随着航空航天工业的快速发展,钛合金因其优异的物理、力学性能,如强度高、耐腐蚀性好、耐热性高等特点而被广泛应用于航空航天结构件连接。迄今为止,关于钛合金螺栓预紧力的分析鲜有报道。本文通过对常用 40Cr 合金钢和 Ti-6Al-4V 钛合金两种材质的螺栓在常温预紧力状态下及高温条件下螺栓的受力及变形进行有限元分析,比较不同材料的高强度螺栓在高温条件下的松弛特性,从而为高强度螺栓材料的选择提供理论参考。

2 有限元分析

2.1 建立螺栓连接模型

如图1所示,螺栓连接有限元模型由螺栓、夹板和下基底构成。中间的夹板通过螺栓和下基底拧紧固定,在分析过程中分别赋予螺栓40Cr合金钢和Ti-6Al-4V钛合金两种不同的材料。

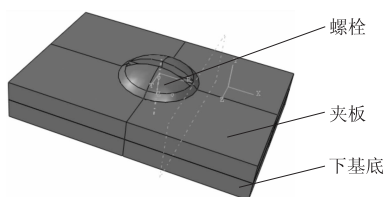


图1 螺栓连接有限元模型

2.2 材料本构模型

材料采用双线性本构模型,应力—应变关系可表示为

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \varepsilon \leq \frac{\sigma_y}{E} \\ \sigma_y + H(\varepsilon - \frac{\sigma_y}{E}) & \varepsilon > \frac{\sigma_y}{E} \end{cases} \quad (1)$$

式中, σ 为应力, E 为弹性模量, ε 为应变, σ_y 为屈服应力, H 为应变硬化率。

不同温度下,有限元模型螺栓的材料常数^[12]如表1所示。

表1 有限元模型中输入的材料常数

材料	密度 (g/cm ³)	温度 (°C)	弹性模量 (GPa)	泊松 比	温度 (°C)	热膨胀 系数 1 × 10 ⁻⁶ /K	屈服 应力 (MPa)
40Cr	7.8	20	196	0.3	100	11	835
		300	167	0.3	300	12.92	
		500	157	0.3	500	13.90	
Ti-6Al-4V	4.44	20	109	0.34	100	9.1	1100
		300	88	0.35	300	9.3	
		500	80	0.37	500	9.7	

2.3 边界条件和载荷

ABAQUS软件中定义接触时能够提供各种不同的接触方式,本文在各个接触面之间定义为“Surface-to-surface contact”接触,螺栓与下基底之间定义为“Tie”接触,同时定义螺栓和部件之间的摩擦系数为0.2。约束下基底垂直方向位移,以便消除计算中的刚性位移。施加预紧力后,将整个装配体升温到500℃,分析升高温度后螺栓预紧力的松弛特性。按照经验公式计算预紧力,有

$$F_0 = (0.5 - 0.6)\sigma_s A_1 \quad (2)$$

式中, σ_s 为螺栓材料的屈服极限, A_1 为螺栓危险截面的面积。

3 结果分析

3.1 室温预紧力作用下螺栓的受力及变形

图2和图3显示了两种材料施加预紧力后的受力及变形情况。由图2a和图3a可以看出,在施加预紧力后,von Mises等效应力在螺栓的螺帽和螺杆的交接处达到最大值,该处的等值线分布密集,然后向周围逐渐减小,说明交接处是应力变化较大的集中区域。图2b和图3b为两种材料螺栓总位移的分布情况。根据位移变化云图可知,螺栓的位移在螺帽顶端和螺杆中间以上部位达到最大。由图2c和图3c可以看出,在施加预紧力后,总应变在螺栓的螺帽和螺杆的交接处达到最大值,该处的等值线分布密集,然后向周围逐渐减小,说明交接处是应变变化较大的集中区域。在螺帽和螺杆交界处应力和应变值达到最大,是由于该处没有过渡圆角,出现了应力集中现象。

比较两种材料的云图可知,40Cr合金钢螺栓的最大von Mises等效应力、应变及位移都小于TC4钛合金螺栓,这是由于钛合金的弹性模量远小于合金钢。在相同的预紧力情况下,钛合金的变形大于合金钢。

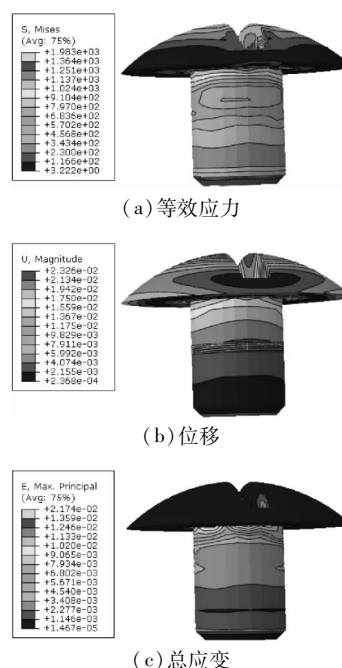


图2 40Cr合金钢螺栓的应力、应变及位移

3.2 高温条件下螺栓的受力及变形

图4显示了在时间1-2s阶段螺栓组件温度由室温升高至500℃时,两种材料螺栓预紧力的变化曲线。可以看出,随着温度的逐渐升高,螺栓预紧力逐渐下降,从而产生预紧力松弛的现象。从图4预

紧力变化曲线可知,在温度升高的初始阶段,40Cr合金钢螺栓和Ti-6Al-4V钛合金的预紧力下降趋势差别不大,但随着温度达到高温阶段,Ti-6Al-4V钛合金螺栓的预紧力下降趋势明显小于40Cr合金钢,说明TC4钛合金在高温情况下的预紧力松弛现象明显好于40Cr合金钢。

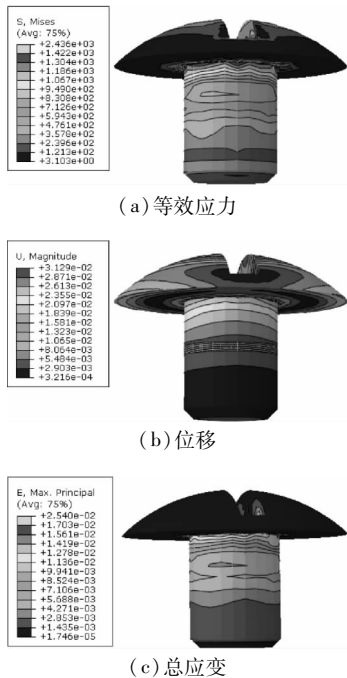


图3 Ti-6Al-4V钛合金螺栓的应力、应变及位移

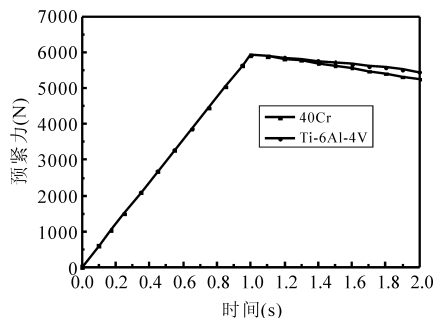


图4 螺栓预紧力变化曲线

图5和图6显示了两种材料在500℃高温条件下的应力、应变和位移变化。随着温度的升高,螺栓的应力、应变及位移值都出现不同程度的减少,产生了高温预紧力松弛现象。由图5a和图6a可以看出,温度达到500℃后,Von Mises等效应力在螺栓的螺帽和螺杆的交接处达到最大值。该处的等值线分布密集,说明交接处是应力变化较大的集中区域。图5b和图6b为两种材料螺栓的总位移分布情况,显示螺栓的位移在螺帽顶端的部位达到最大。由图5c和图6c可以看出,在达到最高温度后,总应变在螺栓的螺帽和螺杆的交接处是应变变化较大的集中

区域。在相同的高温条件下,Ti-6Al-4V钛合金的等效应力及应变值均小于40Cr合金钢,而Ti-6Al-4V钛合金的变形大于40Cr合金钢。

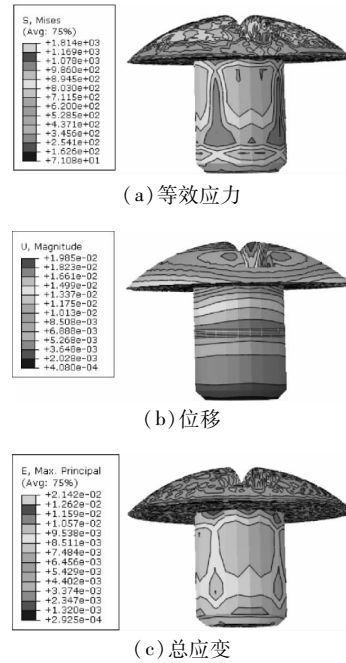


图5 40Cr合金钢螺栓高温条件下的应力及变形

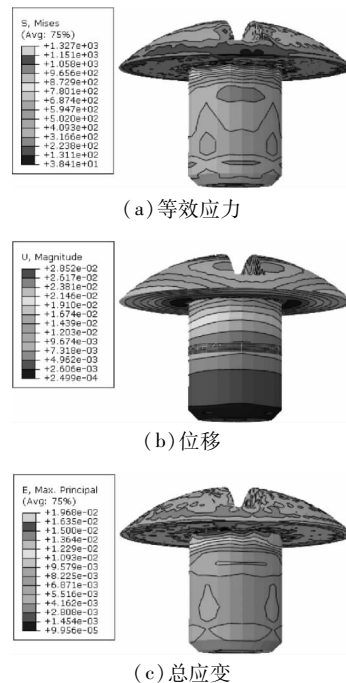


图6 Ti-6Al-4V钛合金螺栓高温条件下的应力及变形

4 结语

(1)由于40Cr合金钢的弹性模量远大于Ti-6Al-4V钛合金,所以在相同预紧力条件下,40Cr合金钢螺栓产生的应力、应变及位移值小于Ti-6Al-4V钛合金。

(2)施加预紧力的螺栓随着使用温度逐渐升高,螺栓预紧力逐渐下降,从而产生预紧力松弛的现象。在温度升高的初始阶段 40Cr 合金钢螺栓和 Ti-6Al-4V 钛合金的预紧力下降趋势差别不大,但随着温度达到高温阶段,Ti-6Al-4V 钛合金螺栓的预紧力下降趋势明显小于 40Cr 合金钢,所以 Ti-6Al-4V 钛合金高温情况下的预紧力松弛现象明显优于 40Cr 合金钢。所得结论可为螺栓材料的选择和使用环境提供理论依据。

参考文献

- [1]刘雷,李培耀. 高强度螺栓材料的研究现状与趋势[J]. 上海工程技术大学学报,2010,24(2):173-179.
- [2]陈新华. 高强度螺栓连接摩擦面抗滑移系数试验[J]. 建筑结构,2010,40:209-212.
- [3]徐浩王,嵇马跃,刘晓卫,等. 高温螺栓蠕变松弛的理论分析[J]. 润滑与密封,2013,38(7):57-60.
- [4]陈建锋,周天华. 火灾后高强螺栓连接预拉力松弛试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014,34(3):86-90.
- [5]刘海波,吴嘉锟,王永青. 地脚螺栓蠕变松弛对大型数控机床几何精度衰退的影响[J]. 西安交通大学学报,

2015,49(9):14-17.

- [6]莫易敏,梁绍哲,晏熙,等. 汽车高强度螺栓的防松性能的影响因素研究[J]. 机械设计与制造,2015(9):89-92.
- [7]王萌,石永久,王元清. 高强度螺栓连接抗剪性能研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(3):27-34.
- [8]周湘衡,廖晓玲. 高强度螺栓预紧力与螺纹表面摩擦系数的关系[J]. 有色设备,2014(5):18-21.
- [9]邱凯,曹鲁光,郇光周. 导弹关键舱段螺栓联接的有限元分析及预紧力研究[J]. 机械设计与制造,2015(2):221-228.
- [10]余娟,余明友,金建伟. 螺栓连接中预紧力的有限元分析[J]. 软件导刊,2013,12(9):64-66.
- [11]陈黎涛,刘义,薛玉君,等. 螺栓预紧力的球磨机筒体应力有限元分析[J]. 机械设计与制造,2014,(7):4-7.
- [12]黄伯云,李成功,石力开,等. 中国材料工程大典[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

第一作者:戴志成,硕士研究生,沈阳理工大学机械工程学院,110159 沈阳市

First Author: Dai Zhicheng, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China

飞旋科技研制的磁悬浮轴承取得新突破

磁悬浮轴承技术是能源、节能减排、真空机械等重大战略领域的核心技术,此前一直被国外的少数几个公司掌握。伴随 2014 年天津飞旋科技研发有限公司研制的磁悬浮大功率高速发电机成功下线,标志着我国磁悬浮轴承产业化取得新的突破。目前,飞旋科技研发的真空分子泵、高速大功率电机、鼓风机等诸多产品开始产业化,在助力我国制造业转型升级的同时,预计到 2020 年,飞旋科技将实现产值超 20 亿元的目标。

飞旋科技科研成果将在中国制造业转型升级中发挥巨大的推动作用。以磁悬浮大功率高速电机为例,原来一台齿轮增速的 180 千瓦高速机组有几吨重,而我们的产品重量只有 400 公斤,而且要比传统电机节能 30% - 40%。同时,为了适应产业化需求,研发团队还研发与高速电机相适应的高频驱动器等部件,为企业用户提供整套解决方案。依托磁悬浮核心技术研发的类似高效、洁净、节能产品还有很多。

更为重要的是,作为自主知识产权的产品,本身价格比国外产品低了一半,可以采取节能降耗奖励以及融资租赁的方式与企业合作。企业可先行使用,用节省下来的电费、

水费当作设备采购费分批支付,这种模式可帮助国有大型企业降低设备升级换代的成本,也响应了国家供给侧改革的要求。

技术的突破带来了强烈的市场需求,飞旋科技产品接连问世。作为国内第一家实现磁悬浮产业化的公司,飞旋发展速度快,辐射领域广,其技术水平几乎与世界同步,已成为国内众多传统制造企业争相合作的对象。

2006 年,洪申平和几位清华校友创立了飞旋科技,从“八年磨一剑”到十年打通产业化之路,洪申平和他的清华团队走过了最艰难的研发年头。2006 年,飞旋科技投入大笔资金开展研发。

早在上世纪 90 年代初,洪申平就走出校园进行了第一次创业,投身 IT 行业,公司做得很好,持续发展下去也许就是第二个联想。但在几年之后,洪申平开始思考自己的转型之路。“创业成功之后,也逐渐投资一些项目,从我自身角度,还是希望能做出一个属于自己的事业。后来发现了磁悬浮轴承这个领域,就把做 IT 的资金全部投入进来。创业这几年,我们清华创业团队始终有一个信念,那就是国外的磁悬浮轴承卖得那么贵,而且在一些领域还垄断或是禁运,因此,磁悬浮轴承这项技术国内一定要掌握,打造出属于中国人的世界一流产品。”