

自动均载传力件的调节特性分析

石家庄铁道学院 杜彦良* 赵维刚 刘献栋 朱信群
马立明 郝华增 张筑平

【摘要】 本文针对结构联接受力不均易产生变形或断裂等问题,提出了在螺栓组中加装由形状记忆合金材料制作的自动均载传力件构成具有感知和调节功能的智能结构,并对螺栓组联接加装均载传力件后的均载防断功能进行了力学特性分析,特别是对螺栓组传力件自动均载和防断的调节原理进行了研究,最后进行了实验验证。

主题词: 自动均衡 形状记忆合金 螺栓
分类号: TH131.9

1 前 言

许多重要的结构多采用螺栓组联接,在承受预紧力和工作载荷的紧螺栓联接中,预紧力及工作动载荷的大小对螺栓的寿命及联接可靠性产生极大影响。如活塞发动机缸盖、连杆螺栓承受着相当于本体材料 σ_s 的60~70%的预紧力^[1],如果工作中不严格按工艺标准安装,则螺栓承受的预紧力会产生较大的改变。当预紧力超过额定标准时,则易造成螺栓变形或断裂。另外测试结果表明,螺栓组中由于加工误差、安装误差、受载不均匀或各螺栓所在位置点的温度不同而产生不等的热应力等易造成各螺栓所承受的载荷亦各不相同,均会造成螺栓受载不均匀,使个别受载过大的螺栓提早发生变形、疲劳、破损以致断裂,严重影响结构的可靠性、安全性^[2~4]。针对这一问题,本文提出了利用形状记忆合金的拟弹性性能在螺栓组中加装由形状记忆合金材料制作的自动均载传力件,使螺栓组成为具有感知和调节功能的智能结构,以改善螺栓组的受力特性。试验结果表明,利用这一方法可以有效地解决这一问题,从而提高了结构联接的可靠性和安全性。

2 自动均载螺栓组受力特性分析

2.1 形状记忆合金的拟弹性性能

形状记忆合金与一般金属材料相比具有许多独特的力学和物理性能,其中重要的特性之一就是它的拟弹性性能。图1为TiNi合金的力—变形曲线。当载荷超过 F_e 点后,其变形曲线呈非线性变化,即载荷上升缓慢,材料变形增大。而在卸载过程中,

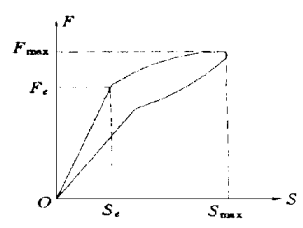


图1 NiTi合金的力—变形曲线

随着载荷的降低, 变形也随之减小, 使加载过程中产生的应变得以回复, 具有这种特性的材料, 称之为拟弹性^[2]。由于 TiNi 合金的变形很大(可达 10% 左右), 因此采用这种具有拟弹性能的形状记忆合金制作成传力件, 将其拐点 F_e 设定为螺栓承受的最大限定载荷, 并与原螺栓组相组合, 使其成为具有自动均载和防断功能的智能结构。

2.2 自动均载螺栓组受力特性分析

图 2 所表示的为装配有自动均载传力件的结构示意图(图中: 1- 联接螺栓, 2- 螺母, 3-

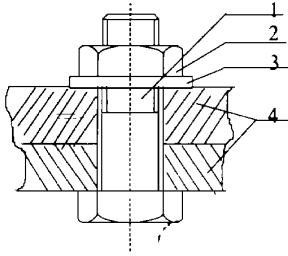


图 2 螺栓组联接示意图

自动均载传力件, 4- 被联接件), 图 3 所表示的为传力件受力变形调节示意图。假设

当螺栓承受的预紧力为 Q_p 时, 螺栓、被联接件、传力件的变形分别为 λ_b , λ_m 和 λ_e 。螺栓的变形刚度为 C_b , 被联接件的变形刚度为 C_m 。而传力件的变形刚度 $C_d(Q)$ 为一非线性函数, 当总轴向力 Q 小于传力件的拐点载荷 F_e 时, 传力件的变形刚度为一近似常数; 当总轴向力 Q 超过拐点载荷 F_e 后, 则传力件的刚度值将随 Q 的增加而减小, 如图 1 所示。当工作载荷 F 通过被联接件及传力件作用于螺栓上时, 被联接件的变形量将恢复 $\Delta\lambda_m$, 其变形协调方程为:

$$\Delta\lambda_m = \lambda_b + \Delta\lambda_d \quad (1)$$

从图 3 可以看出, 螺栓、被联接件和传力件的变形与载荷的关系可表示为:

$$\frac{\Delta F}{F - \Delta F} = \frac{\Delta\lambda_b \tan \theta_b}{(\lambda_b + \Delta\lambda_d) \tan \theta_m} \quad (2)$$

式中: ΔF 因工作载荷 F 的作用而导致的螺栓轴向力增加量。

又因 $\Delta F = \Delta\lambda C_b$ 和 $\Delta F = \Delta\lambda C_d$, 故:

$$\Delta\lambda_d = \Delta\lambda_b (C_b / C_d) \quad (3)$$

于是解 (2) 式, 可得螺栓承受的工作载荷增加值 ΔF :

$$\Delta F = \frac{1}{1 + C_m [1/C_b + 1/C_d(Q)]} F \quad (4)$$

被联接件的残余预紧力 Q_p' 为:

$$Q_p' = Q - F = (Q_p + \Delta F) - F = Q_p - \frac{1/C_b + 1/C_d(Q)}{1/C_m + 1/C_b + 1/C_d(Q)} F \quad (5)$$

在某些情况下, 残余预紧力 Q_p' 应满足一定的要求。

若取 $1/C_d = 0$, 则可得到普通螺栓组(不加均载传力件)的受力。

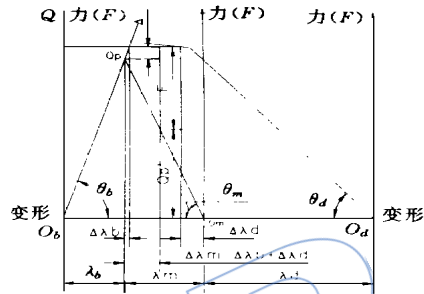


图 3 螺栓变形协调原理图

3 自动均载传力件的调节原理及其特性

3.1 静态载荷不同的螺栓的均载过程

假设静态载荷包括预紧力、热应力等轴向载荷。假定有两个承受不同静载的螺栓 I 和 II ($Q_2 > Q_1$), 当有外载荷作用时, 若螺栓 I 和 II 的变形协调, 即:

$$\Delta \lambda_I + \Delta \lambda_{II} = \Delta \lambda_{II} + \Delta \lambda_{II} \quad (6)$$

由于外载作用, 使得螺栓 I 和 II 轴向力增量分别为 ΔF_1 和 ΔF_2 则有:

$$\Delta F_2 / \Delta F_1 = (1/C_b + 1/C_d) / (1/C_b + 1/C_d') \quad (7)$$

由于 $Q_2 > Q_1$, 第 2 传力件的变形量较大, 而有外载时又有协调关系—(6) 式, 故第 2 传力件的变形量必大于第 1 传力件的变形量, 即外载较大时第 2 传力件变形先超过拐点, 有 $C_d' < C_d$, 所以此时据(7)式可得到: $\Delta F_1 > \Delta F_2$, 螺栓 1 和 2 承受的轴向力之差为:

$$Q_2 + \Delta F_2 - (Q_1 + \Delta F_1) = (Q_2 - Q_1) - (\Delta F_2 - \Delta F_1)$$

显然它小于 $Q_2 - Q_1$ 。可见当传力件变形超过拐点工作时, 它对不均匀载荷具有均载调节作用。

当有外载载荷作用时, 若螺栓 I 和 II 分配的载荷协调, 即: $F_1 = F_2$, 那么根据(4)式可得:

$$\begin{aligned} \Delta F \left(1 + \frac{C_m}{C_b} + \frac{C_m}{C_d} \right) &= \Delta F_2 \left(1 + \frac{C_m}{C_b} + \frac{C_m}{C_d'} \right) \\ \frac{\Delta F_2}{\Delta F_1} &= \frac{1 + \frac{C_m}{C_b} + \frac{C_m}{C_d}}{1 + \frac{C_m}{C_b} + \frac{C_m}{C_d'}} \end{aligned} \quad (8)$$

同理, 可得到上述的对不均匀载荷的均载调节作用。

3.2 螺栓组超载工作时的受力特性分析

在一般情况下, 螺栓及传力件工作在限定载荷 F_e 以下, 当由于热应力或其它因素使传力件受载超过拐点 F_e 工作时, 其受力特性将会发生改变。假设螺栓初始安装时预紧力小于拐点载荷 F_e , 当温度升高时, 若预紧力 Q_p 与热应力 ΔQ 之和超过拐点的载荷, 此时随着工作载荷的增加, 螺栓总轴向力为:

$$Q = Q_p + \Delta Q + \frac{1}{1 + C_m(1/C_b + 1/C_{d1})} F \quad (9)$$

式中: C_{d1} 为载荷增加超过 F_e 点后传力件的刚度。当工作载荷 F 卸载至零时, 由于传力件在超过拐点工作时, 其应力卸载曲线与加载曲线有滞后存在, 并且传力件、螺栓及被联接件三者之间的变形协调, 因此在工作载荷降低的过程中, 螺栓缩短的变形量 $-\Delta \lambda_b$ 与传力件回复的变形量 $-\Delta \lambda_l$ 之和等于被联接件被压缩的变形量 $-\Delta \lambda_m$ 。即 $\Delta \lambda_b + \Delta \lambda_l = \Delta \lambda_m$, 则:

$$Q' = Q_p + \Delta Q + \frac{(1/C_{d2} - 1/C_{d1}) / [1 + C_m(1/C_b + 1/C_{d1})]}{1/C_b + 1/C_m + 1/C_{d2}} F \quad (10)$$

式中: Q' 为工作载荷卸载至零时螺栓的总轴向力; C_{d2} 为传力件卸载过程中的变形刚度。

由于 $C_{d2} > C_{d1}$, 使加工作载荷前的轴向力由 $Q_p + \Delta Q$ 变为 Q' , 则由动态外载引起的螺栓轴向力变化幅度为: $\Delta F = \frac{F}{1 + C_m(1/C_b + 1/C_{d2})}$

由上述可以看出, 由于传力构件的拟弹性, 使得螺栓组承受的动载荷减小, 使螺栓组对外载荷的变化具有较强的自适应调节能力。

4 实验验证

为了验证本文理论分析的正确性, 进行了模拟实验, 模拟实验测试系统简图如图 4 所示。

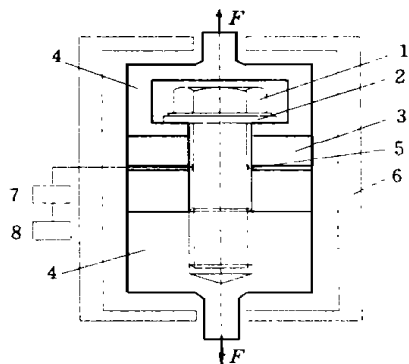


图4 模拟实验测试系统简图

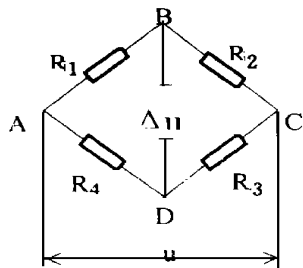


图5 应变片组桥接线图

其加载和温控装置采用 Shimazu- AG- 25T A 实验机; 螺栓轴力的变化经应变片组成的全桥电路(见图 5, 图中: 1 和 3 为纵向应变片; 2 和 4 为横向应变片; $R_{1,2,3,4} = 12 \Omega$ 感受, 经 YD- 15 应变仪放大, 最后由数字电压表显示; 温度由控温箱控制和显示; 螺栓所受外载荷 F 由 AG- 25T A 提供并读取。实验结果表明, 传力件线性阶段工作时与无传力件的情况相比使螺栓承受的动态载荷减小 18%, 非线性阶段工作时使动态载荷减小 28%, 可见起到了明显的均载、限载作用; 螺栓的内力系数(内力增加值与外载的比值 $\Delta F/F$), 无传力件时为 0. 1416, 有传力件时为 0. 1156, 从而提高了螺栓的疲劳寿命。

5 结 论

本文对自动均载传力件的调节特性进行了力学分析, 并且提出了对受载不均匀或易超载的螺栓组可加装利用形状记忆合金的拟弹性性能制作而成的自动均载传力件。这样不仅可起到均载调节作用, 而且可使其动载荷明显降低, 从而使螺栓组具有一定的均载防断功能。试验结果表明, 其均载防断调节效果是显著的。

参 考 文 献

- 1 杜彦良, 赵维刚, 朱信群. 发动机缸盖螺栓动态测试分析. 第八届全国实验力学学术会议, 1995
- 2 舟久保, 熙康著. 形状记忆合金. 机械工业出版社, 1992
- 3 杜彦良. 自动探测裂纹和主动控制裂纹扩展的智能材料结构研究: [博士论文]. 北京航空航天大学, 1993
- 4 杜彦良等. 自动均载传力构件研究. 医学生物力学学报, 1995

(责任编辑 王震华)

clude two rise and fall profiles, a maneuver profile and a high cycle fatigue test spectrum.

Key Words Trainer Aircraft engines Accelerated test

REGULATION BEHAVIOR ANALYSIS OF AUTO- EVEN- LOAD CONNECTING COMPONENT

Du yanliang, Zhao Weigang, Liu Xiandong, Zhu Xinqun

Ma Liming, Hao Huazen, Zhang Zuping

(*Dept. of Mechanical Eng. Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043*)

ABSTRACT

According to the deformation or fracture caused by uneven loads on the structural connection, the smart structure with sensible and regulative functions has been proposed to be used in bolt groups. The smart structure is constituted with the auto- even- load connecting component made of the shape memory alloy material. The mechanical behavior of the auto- even- load component in the bolt groups is analyzed. Its auto- even- load and the regulative principle to prevent the fracture are also studied.

Key Words Automatic equalization Shape memory alloy Bolts

INTEGRAL STRESS ANALYSIS TECHNIQUES AND SOFTWARE DESIGN FOR A COMPOSITE ROTOR

Zhou Chuanyue, Sheng Huiyu, Lin Xiangdong, Li Ming

(*Harbin 703 Research Institute, Harbin 150036*)

ABSTRACT

A mathematical and mechanical model for analyzing the integral stress of a composite rotor is presented, which takes into account such factors as mating relations of the various components of the rotor, rotating centrifugal forces and thermal expansion, etc. A general- purpose software (REC) for the analysis of the rotor integral stress has been designed, which can be employed not only for a complicated rotor incorporating both radial and axial pretightening, but also for a rotor with any arbitrary axisymmetrical structures. With the help of the software it is possible to ascertain automatically whether the mating surface among the various components loosens, and to determine a rational radial interference and axial pretightening. The analysis of numerical examples and practical engineering applications indicates that the provided method is correct, the software design rational and the calculation precision and the speed quite high.

Key Words Rotors Stress analysis Programming

RESEARCH ON COUPLED LATERAL TORSIONAL VIBRATION OF ROTOR- GEAR COUPLING SYSTEM

Li Ming, Zhang Yong, Jiang Peilin, Yu Lie

(*Institute of Lubrication Theory & Bearing, Xi'an JiaoTong University, Xi'an 710049*)

ABSTRACT

Based on the meshing condition of the gears, the constraint equa-