

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.03.010

拧紧力矩对线束与卡箍装配体的数值分析

裴龙涛, 闫静, 陆珊珊, 张忆鑫

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:采用 Mooney-Rivlin 本构模型描述卡箍橡胶衬垫的力学特性,借助 Workbench 有限元软件建立线束与卡箍装配的有限元模型,采用数值计算的方法研究不同拧紧力矩作用下线束与卡箍装配体的受力变化规律。结果表明:在卡箍耳片贴合后,不同力矩下卡箍与线束之间的受力变形特点相似,卡箍应力和接触面内的接触压力随力矩变化呈现先增大后不变的趋势。结合拉脱力试验平台,验证了仿真分析的准确性,可为飞机线束与卡箍装配研究提供参考。

关键词:卡箍;拧紧力矩;Mooney-Rivlin 本构模型;有限元分析

中图分类号:V241.05 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)03-0050-04

Numerical Analysis of Tightening Torque on Harness and Clamp Assembly

PEI Longtao, YAN Jing, LU Shanshan, ZHANG Yixin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:The Mooney Rivlin constitutive model is used to describe the mechanical properties of the clamp rubber gasket, and the finite element model of the harness and clamp assembly is established with the help of the workbench finite element software. The stress variation law of the harness and clamp assembly under different tightening torque is studied by numerical calculation. The results show that the stress deformation characteristics between the clamp and the harness are similar under different torques after the clamp lugs are fitted. The clamp stress and the contact pressure in the contact surface show a trend of first increasing and then changing with the torque. Combined with the pull-out force test platform, the reliability of simulation analysis is verified, which provides reference for further research on aircraft harness and clamp assembly.

Keywords:clamp; tightening torque; Mooney-Rivlin constitutive model; finite element analysis

0 引言

电气线路互联系统 (electrical wiring interconnection system, EWIS) 最早由美国航空局于 2007 年提出将其作为飞机的一个独立系统进行解释说明^[1],并在 2011 年由中国民航局修订的 CCAR-25^[2]标准中引入。线束作为 EWIS 的主要组成部分,其功能实现对机上各用电设备之间的互联互通,发挥着重要的作用。线束在飞机上是通过带有螺栓连接的金属卡箍进行安装固定的,螺栓拧紧力矩的大小对于卡箍及线束之间的固定作用有直接的影响。目前对于卡箍螺栓拧紧力矩的研究主要集中在管道型卡箍上。刘中华等^[3]通过建立航空发动机卡箍与管路的数学模型,推导了卡箍装配应力和结构参数与拧紧力矩之间的数学关系,并结合应力测试试验分析了卡箍在不同拧紧力矩下的应力变化特点。李波等^[4]在对飞机发动机引气导管卡箍的断裂原因分析过程中建议

在卡箍装配时,应规定螺栓的拧紧力矩,使卡箍工作在适当的应力状态下。谭海等^[5]通过对某 V 型卡箍的有限元模型仿真,分析了在不同螺栓预紧力下对气体管道密封性能的影响。线束型装配卡箍的研究主要集中在分类和选型上。王丹等^[6]针对航空带垫金属卡箍的选用问题,提出了基于构型和材料两方面的选用建议。郑敏等^[7]介绍了常见航空卡箍的分类及使用情况,分析了固定类卡箍的选用原则。

针对线束型卡箍拧紧力矩研究较少等问题,本研究旨在借助数值分析的手段分析拧紧力矩对线束与卡箍装配体之间的作用规律,为之后两者之间进一步装配提供参考。

1 橡胶材料的本构模型

卡箍的衬垫属于橡胶材料,橡胶材料作为一种具有可逆形变的超弹性材料,其受力变形呈现非线性的特点;同时橡胶材料也被视为一种不可

基金项目:国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金资助项目 (SAMC13-JS-15-024)

第一作者简介:裴龙涛 (1996—),男,河南林州人,硕士研究生,研究方向为飞机线束装配,pltxglearn@163.com。

压缩材料,在变形过程中,体积和密度保持不变。橡胶材料的力学性能通过应变能密度函数来描述,基于对应变能密度函数的求解可以得到各种形式的本构模型,用来反映橡胶材料的应力-应变关系。

工程上常用的本构模型有 Mooney-Rivlin 本构模型,该模型适用于 100% 拉伸和 30% 压缩的小应变范围;Neo-Hookean 模型适用于 30%~40% 拉伸和 80%~90% 的纯剪切应用条件^[8];Yeoh 模型适用于变形量超过 150% 的大应变范围。结合本研究衬垫压缩变形较小的特点,选用 Mooney-Rivlin 本构模型作为卡箍衬垫的有限元分析模型。

1.1 Mooney-Rivlin 本构模型理论

对于各向同性材料,应变能密度函数 W 是变形张量 I_1 、 I_2 和 I_3 的函数,即

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为 3 个方向上的主伸长率。由于橡胶材料的不可压缩性, $I_3 = 1$, 变形张量 I_3 对应变能密度函数就不再产生影响,应变能函数最一般的表达式是由 Rivlin 提出的:

$$W = \sum_{i,j=0}^{\infty} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (3)$$

式中 C_{ij} 为材料参数。将式(3)保留前两项,即可得到 Mooney-Rivlin 模型,该模型在工程上被广泛应用于弹性体变形研究。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

1.2 Mooney-Rivlin 本构模型参数的确定

在式(4)中, C_{10} 和 C_{01} 为模型未知参数,不同橡胶材料对应不同的模型参数,这里给出了基于橡胶硬度计算模型参数的方法。

对于橡胶材料,在小应变条件下,其弹性模量 E 与切变模量 G 有下述关系^[9]:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (5)$$

由橡胶材料的不可压缩性,泊松比 $\mu = 0.5$,代入上式得

$$E = 3G \quad (6)$$

$$G = \frac{E}{3} = 2(C_{01} + C_{10}) \quad (7)$$

即

$$E = 6 C_{10} \left(1 + \frac{C_{01}}{C_{10}} \right) \quad (8)$$

根据橡胶硬度 H_A 与弹性模量 E 两者之间的关系式

$$E = \frac{15.75 + 2.15 H_A}{100 - H_A} \quad (9)$$

即有

$$6 C_{10} \left(1 + \frac{C_{01}}{C_{10}} \right) = \frac{15.75 + 2.15 H_A}{100 - H_A} \quad (10)$$

通过测量橡胶的邵氏硬度 H_A , 由 $C_{01}/C_{10} = 0.25$, 最终可求解得出 C_{10} 和 C_{01} 。

2 卡箍与线束装配的有限元分析

2.1 有限元模型的简化建模

通过 Workbench 软件自带的 Design Model 几何建模模块建立线束和卡箍装配的几何模型。模型包括箍带、衬垫、线束、螺栓、角片和螺母共 6 个部分。其中卡箍箍带和衬垫根据实际模型尺寸建模,线束中各导线视为圆柱体,分为线芯层和绝缘层。螺栓和螺母为标准件,为了便于后续网格的划分及分析,对螺栓和螺母的圆弧部分以及螺栓杆上的螺纹进行简化处理。角片是模拟卡箍安装在飞机上的结构件,这里也做了简化处理。有限元模型如图 1 所示。

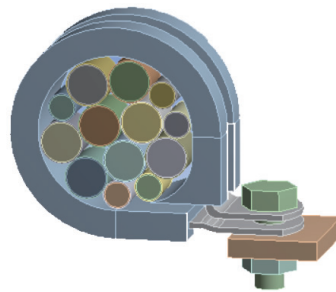


图 1 有限元模型图

2.2 材料赋予和网格划分

有限元模型中各部分材料及参数如表 1 所示。

表 1 有限元模型材料及参数

几何体	材料	弹性模量/GPa	泊松比
箍带	不锈钢	193	0.31
螺栓	不锈钢	193	0.31
角片	结构钢	200	0.30
线芯	铜	110	0.34
绝缘层	聚四氟乙烯	1.551	0.40

通过测量橡胶衬垫的硬度计算出两个模型参数 $C_{10}=0.844$, $C_{01}=0.211$ 。

由于该有限元模型和载荷具有对称性,为了减少网格划分的数量,缩减计算机计算的时间,取模型的一半作为分析对象。衬垫作为线束与卡箍的接触部分,对其进行局部网格的细化,共划分网格数 26 442,节点数 62 231,如图 2 所示。

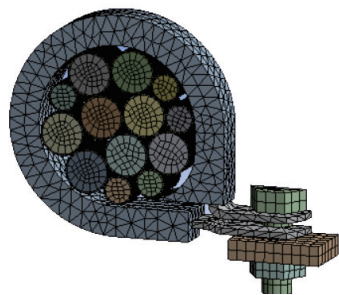


图 2 网格划分图

2.3 载荷条件的施加

线束和卡箍是通过螺栓上施加的拧紧力矩固定在飞机结构上,为了分析拧紧力矩对线束与卡箍装配的影响规律,分别从 0.5 Nm、1.0 Nm、1.5 Nm 和 2.0 Nm 这 4 个工况条件下对螺栓施加拧紧力矩。根据 $T=kFd$, k 取 0.2, d 取 5 mm, 4 种转矩下分别对应的预紧力为 500 N、1 000 N、1 500 N、2 000 N。根据载荷的对称性,实际施加在螺栓上的载荷为预紧力的一半。

2.4 有限元结果及分析

由图 3 整体应力云图可知,不同转矩下应力主要分布在箍带上,图 4 为箍带应力云图,最大应力分别为 202.24 MPa、202.67 MPa、202.87 MPa、202.88 MPa,均分布在箍带 3/4 圆弧部位离螺栓孔最远处。4 种转矩下箍带的最大应力值增长变化率仅为 0.32%,应力值及应力分布几乎没有发生变化。

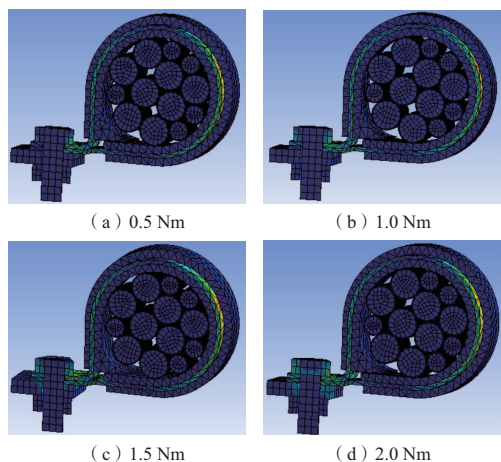


图 3 4 种转矩下装配整体应力云图

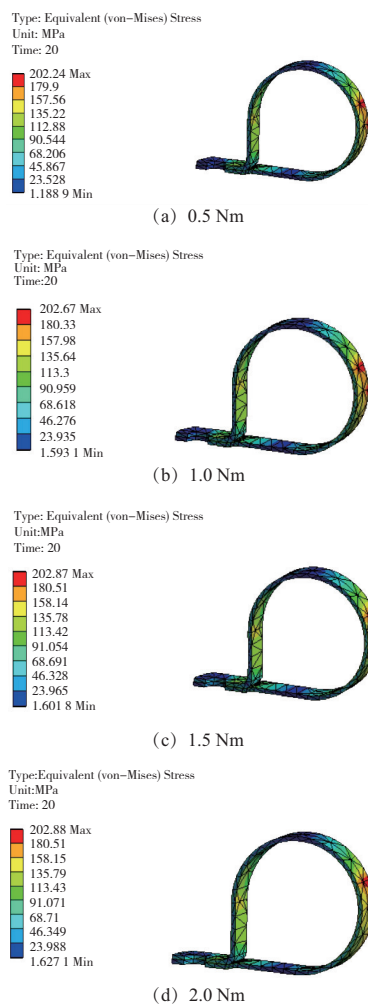


图 4 4 种转矩下箍带应力云图

图 5 为 2.0 Nm 转矩下箍带最大应力随载荷力变化曲线图。从图中可以看出,随着加载力的增大,应力曲线呈现先增大后稳定的趋势,当加载力到达 102 N 后,应力值便不继续增大,而是趋于平稳。图 6 为衬垫接触面最大应力随加载力变化曲线图。从图中可以得到相同结论,当加载力达到 102 N 后,衬垫接触面接触应力趋于稳定不再发生变化。图 7 为上耳片向下耳片移动的距离。由图 7 可知,这种变化特点产生的原因是由于卡箍的结构导致的。箍带上耳片在螺栓载荷作用下向下耳片运动,耳片之间间隙减少,箍带弯曲产生应力,箍带的圆弧半径也随之减小。半径的减小使得衬垫与线束之间产生接触挤压,线束因此得以固定;当上下耳片之间处于贴合状态后,继续增大螺栓上的加载力,箍带不再继续弯曲,半径不再继续减小,所以箍带应力值趋于稳定,线束和衬垫之间的接触应力也不再继续增大。从上述分析中可以得出当上下耳片处于贴合状态后,继续增大

螺栓拧紧力矩,箍带以及线束与衬垫之间的接触挤压作用不再继续增大,线束并不会随着拧紧力矩的持续增大在卡箍内固定的越来越紧。

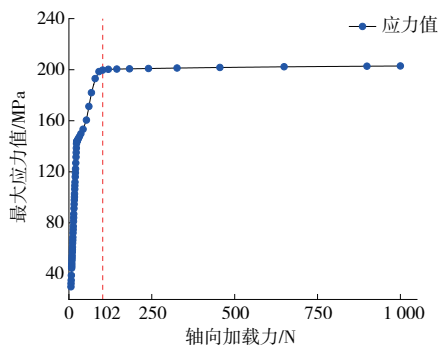


图5 箍带最大应力随加载力变化曲线

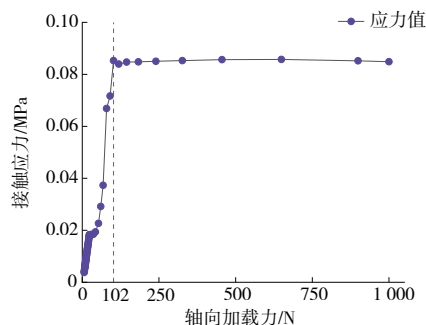


图6 衬垫接触压力随加载力变化曲线

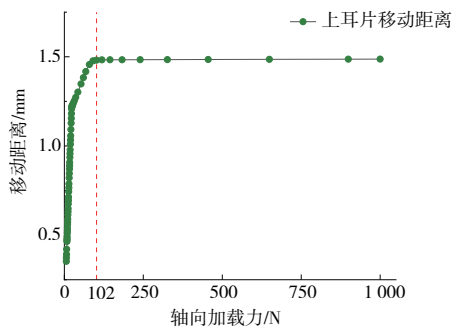


图7 上耳片向下耳片移动距离

3 试验验证

将线束从卡箍内拉出的拉脱力在数值上等于线束与卡箍接触面产生的摩擦力,摩擦力等于摩擦因数与接触压力的乘积。当摩擦因数一定时,拉脱力和接触压力的大小成正比例关系,因此可以通过拉脱力的变化来判断接触压力的变化。

试验采用指针式推拉测力计来测量拉脱力大小。测力计量程为 100 N,最小分度值为 0.5 N,并具有峰值模式和追踪模式两种测量方式,如图 8

所示。为了记录线束从卡箍内刚好拉脱时的最大拉力,将测力计的测量模式设置为峰值模式。利用数显式力矩扳手将 4 种转矩下的线束与卡箍装配到结构件上后,将测力计的拉力端与线束一端连接,缓慢施力拉动线束,拉动过程中保持测力计与测试台面平行,当线束从卡箍内拉脱时停止拉动,记录此时测力计上的示数值,如图 9 所示。为减小试验误差,单个转矩下重复操作 5 次,并取平均值作为该转矩下线束的拉脱力值。



图8 指针式推拉测力计

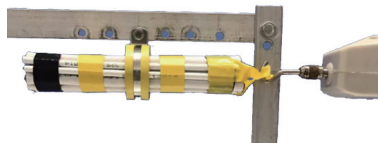


图9 拉脱力测量图

表 2 为 4 种拧紧力矩下线束拉脱力测试数据。从数据中可以看出不同力矩下的拉脱力变化很小,证明了拧紧力矩对线束与卡箍装配的影响不大。拉脱力的仿真值与实测值如表 3 所示。

表 2 不同拧紧力矩下的拉脱力测试表

拧紧力矩/ Nm	拉脱力/N					
	1	2	3	4	5	平均值
0.5	3.6	3.6	3.7	3.6	3.6	3.62
1.0	3.5	3.7	3.6	3.5	3.6	3.58
1.5	3.6	3.7	3.7	3.5	3.6	3.62
2.0	3.7	3.5	3.3	3.4	3.4	3.46

表 3 拉脱力的仿真值与实测值

拧紧力矩/ Nm	拉脱力		
	仿真值/N	实测值/N	相对误差/%
0.5	3.20	3.62	11.60
1.0	3.40	3.58	5.02
1.5	3.40	3.62	6.08
2.0	3.60	3.46	4.05

(下转第 83 页)

5 结语

本文将针刺 C/C 中针孔结构纳入多尺度渐进损伤失效分析中。采用协同多尺度和应力-应变放大因子方法进行多尺度信息传递,结合各组分材料的失效准则进行弹性参数的退化以及计算退化后的平均弹性参数,进而针对针刺 C/C 复合材料开展了渐进损伤分析。结论如下:

1) 采用协同多尺度和应力-应变放大因子能较好地模拟针刺复合材料的渐进损伤过程;

2) 模拟结果略小于试验结果。

参考文献:

- [1] 李翠云,李辅安. C/C 复合材料的应用研究进展[J]. 化工新型材料,2006,34(3):18-20.

- [2] 刘杰明. 2.5 维编织复合材料振动非线性特性试验研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(4):48-51.
- [3] SONG C Y, FAN W, LIU T, et al. A review on three-dimensional stitched composites and their research perspectives[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 153: 106730.
- [4] MOURITZ A P. Review of z-pinned composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(12): 2383-2397.
- [5] YU J, ZHOU C, ZHANG H. A micro-image based reconstructed finite element model of needle punched C/C composite[J]. Composites Science and Technology, 2017, 153: 48-61.

收稿日期:2022-11-15

(上接第 53 页)

表 3 中,仿真值与实测值最大相对误差为 11.6%,在允许接受的范围以内,证明了有限元仿真的可靠性。

4 结语

本研究借助有限元分析软件对不同拧紧力矩下线束与卡箍装配体的受力变形特点进行了数值计算,通过研究发现:

1) 线束与卡箍装配体的受力分布主要集中在卡箍的箍带上,且箍带应力沿箍圈呈现不规则分布,应力最大的位置处于离螺栓孔最远的箍圈处;

2) 卡箍箍带的应力分布相似且数值变化很小,最大应力值增长仅为 0.32%;应力值随力矩的增大呈现先增大后不变的规律;

3) 当螺栓轴向加载力达到 102 N 以后,线束与卡箍之间的接触压力不再继续增加,即卡箍对线束的固定作用不会随着螺栓拧紧力矩的增大而增大,因此实际装配过程中螺栓拧紧力矩的选取并不需要越大越好,建议在考虑螺栓强度的同时应当选取拧紧力矩值。

参考文献:

- [1] 闫静,顾嘉炜. 基于系统分离规则的线束通道研究[J]. 航空计算技术,2021,51(6):112-116.
- [2] ISO/R 355-41968 运输类飞机适航标准[S].
- [3] 刘中华,贾铎,王鑫,等. 航空发动机卡箍装配应力试验与装配参数控制方法[J]. 航空动力学报,2020,35(2):368-377.
- [4] 李波,王志宏,彭萌. 可拆卸卡箍断裂原因分析[J]. 失效分析与预防,2015,10(3):181-184,189.
- [5] 谭海,司庆九. V 形卡箍密封性能数值仿真[J]. 计算机辅助工程,2013,22(增刊 2):67-72.
- [6] 王丹,金鑫. 民用航空带垫金属卡箍的选用研究[J]. 中国科技信息,2016(12):69-70.
- [7] 郑敏,王宗武,张艳,等. 航空卡箍选用装配研究[J]. 航空标准化与质量,2015(2):23-26,42.
- [8] 朱艳峰,刘锋,黄小清,等. 橡胶材料的本构模型[J]. 橡胶工业,2006,53(2):119-125.
- [9] 潘宇,何云峰,何志兵. 一种橡胶衬套静态特性仿真及实验分析[J]. 机械强度,2015,37(6):1052-1056.

收稿日期:2022-10-11