

文章编号:1000-8055(2011)08-1866-05

拉伸载荷下管路连接副的密封性分析

王振兴¹, 邱明星², 王建军¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 研究了航空发动机钛合金管路连接副在拉伸载荷下的密封性能. 首先, 建立了连接副的等效刚性模型, 分析其在拉伸载荷下的受力, 研究了密封面的接触力随拉伸载荷的变化规律, 从机理上分析了拉伸载荷下管路连接副的密封性. 第二, 建立了管路连接副在拉伸载荷下的多体弹性接触模型, 并对其进行了有限元分析. 采用初始渗透接触法, 实现连接副的预紧状态, 在此基础上施加拉伸载荷, 然后再进行有限元求解. 同时, 研究了连接副密封面的接触力、接触面积和接触应力随拉力的变化规律, 从而定量地分析连接副的密封性.

关 键 词: 管路连接; 密封; 多体接触; 有限元法; 拉伸载荷

中图分类号: TB42

文献标志码: A

Sealing performance of pipeline connection under the tensile load

WANG Zhen-xing¹, QIU Ming-xing², WANG Jian-jun¹

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The sealing performance of aircraft engine pipeline connection was investigated under the tensile load in two aspects. Firstly, the contact force change of the pipeline connection sealing surface was studied to make a mechanical analysis of the sealing performance, by establishing the equivalent rigid model and the force balance equations of the pipeline connection under tensile load. Secondly, the multi-body contact elastic model of pipeline connection was established and the numerical simulation was made by finite element method (FEM) under the pre-tightening force and tensile load, whilst the contacts with initial penetration were established to realize the implementation of preload. On the basis of the simulation results, this paper made a detailed quantitative analysis of pipeline connection's sealing performance, through investigation of contact forces, contact area and contact stress on the sealing surface.

Key words: pipeline connection; sealing; multi-body contact; finite element method; tensile loading

被视为飞机心脏的发动机上有数以百计的管路, 它们就像发动机的血管网, 源源不断地把燃油

和滑油送到发动机的各个部位. 管路系统的可靠性和持久性严重影响发动机的可靠性和维修成

收稿日期: 2010-09-18; 修订日期: 2010-11-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2008AA04Z403)

作者简介: 王振兴(1987—), 男, 江西余干人, 硕士生, 主要从事航空发动机强度振动方面的研究.

通讯作者: 王建军(1956—), 男, 教授、博士生导师, 主要从事航空发动机结构强度与振动、振动抑制与可靠性方面的研究.

E-mail: wangjjb@263.net

本^[1-2]. 其中,管路系统的连接件工作在极为复杂和苛刻的环境中,承受安装应力、机体振动、液压冲击和温度等因素的作用,所以容易发生应力腐蚀、电化学腐蚀、磨损失效和疲劳破坏.

目前在国内,导管连接相关的研究工作主要有以下几个方面:李松梅、刘建华等采用自制的航空导管连接件腐蚀试验系统,分别研究了航空镀铬 45# 钢和钛合金导管连接件在模拟服役环境中的气密性、油压气密性以及应力腐蚀、表面腐蚀等性能^[3-4]. 中国工程物理研究院的王小刚、冉光斌等人^[5-7]利用有限元法,对管路锥形密封结构和双锥形管接头密封连接结构的密封性进行了研究,主要分析了设计参数对密封性的影响. 张森、孟庆春等^[8]利用有限元法,结合损伤力学的损伤理论对无扩口管路连接件进行了疲劳寿命预估.

但是,在内压作用和其他载荷下,管路连接最基本的失效模式是泄漏. 拉伸是比较常见的载荷形式,航标明确提到,管路连接件在大批量使用前,必须做足够的拉伸试验. 试验中,在拉伸载荷达到一定大小之前,管路连接件不能出现泄漏或者破坏^[9].

论文研究了航空发动机钛合金管路连接副在拉伸载荷下的密封性能. 基于管路连接副的等效刚性模型,从机理上分析了连接副的密封性. 同时,利用商用有限元软件 ANSYS,建立了管路连接副的多体弹性接触有限元模型,施加预紧力和拉力的作用,进行数值计算. 重点关注密封面的接触状态随拉力的变化规律,分析连接副在拉伸载荷下的密封性能.

1 密封机理分析

1.1 密封原理

管路连接副的关键密封面是管套与管接头的接触面,其结构如图 1 所示. 这种锥形密封结构的密封原理是:通过施加一定的轴向预紧力,使锥面产生挤压变形,从而形成一圈封闭环. 实际接触时,这圈封闭环的接触面积很小. 为保持密封性,施加的轴向预紧力必须使封闭环具有一定的面宽(密封面宽),并且达到一定的密封比压(单位面积所承受的接触压力)^[5]. 但是密封条件很难确定,与摩擦副的尺寸、密封副的材料和密封面粗糙度等因素有关,往往需要通过试验得到.

1.2 受力分析

考察连接副在拉伸载荷下的密封性,主要关

注关键密封面接触状态的变化. 要弄清楚密封面的接触状态,就必须搞明白各连接零件在拉伸载荷下的受力情况. 图 1(a)是连接副在受到拉伸载荷时的受力图. 将整个连接副的受力进行简化,得到图 1(b)所示的受力简图. 由于管套在轴向的力是平衡的,得

$$F = F_{n1} \sin \theta_1 + F_{\tau1} \cos \theta_1 - (F_{n3} \sin \theta_3 + F_{\tau3} \cos \theta_3) \quad (1)$$

其中 F 是拉力, F_{n1} 是 1 号接触面上的正压力; $F_{\tau1}$ 是 1 号接触面上的摩擦力, F_{n3} 是 3 号接触面上的正压力, $F_{\tau3}$ 是 3 号接触面上的摩擦力. 采用库伦摩擦模型,所以 $F_{\tau1}$ 和 $F_{\tau3}$ 分别满足 $|F_{\tau3}| \leq f \cdot F_{n3}$ 和 $|F_{\tau1}| \leq f \cdot F_{n1}$ (f 是摩擦因数).

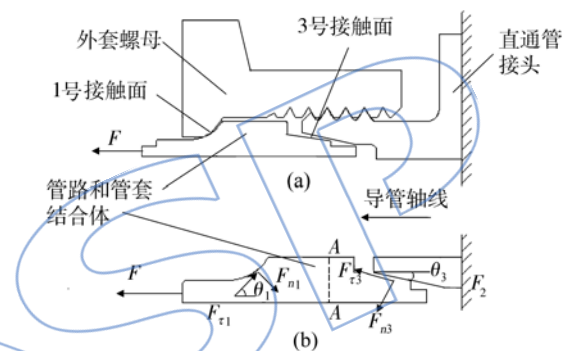


图 1 拉伸载荷下的管路连接副及其受力简图

Fig. 1 Pipeline connection and its force analysis under tensile load

1.3 等效刚性模型分析

不考虑管套径向和轴向的变形对接触状态的影响,视管套为刚体,其他件为弹性体,得到连接副的等效刚性模型. 基于这个模型,具体分析接触面上接触力随拉力的变化情况. 其中,3 号接触面(密封面)上的接触力变化如图 2 所示.

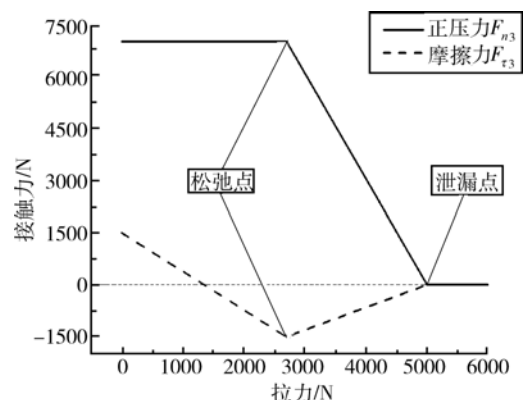


图 2 基于刚体假设的接触力随拉力的变化曲线

Fig. 2 Contact force curves with the tension based on rigid body assumption

当拉力 F 为零时,此时由于预紧力的作用,1 号和 3 号接触面上的接触力的方向如图 1(b) 所示. 拉力 F 由零开始增大,当载荷 F 还较小时,由于预紧力的作用,各接触面不会相对滑动,此时各接触面的正压力 F_{n1} 和 F_{n3} 保持不变,由式(1)可知,摩擦力 F_{c1} 随拉力 F 增大而增大,而摩擦力 F_{c3} 减小. 随着拉力的进一步增加, F_{c1} 增大到 $f \cdot F_{n1}$ 后不再增大,而 F_{c3} 继续减小甚至变为负值(反向了,见图 2 虚线),直到其绝对值等于 $f \cdot F_{n3}$. 此时,两个摩擦力都达到了最大值,两个接触对会同时滑动,此时外套螺母和管套的接触越来越紧,而管套与接头的接触越来越松, F_{n1} 随之增大,而 F_{n3} 变小,它们对应的摩擦力的大小也相应地增大和减小. 当拉力 F 继续增大,3 号接触面将会脱离接触状态. 此时,该面上的法向和切向接触力都为零.

经过以上分析,能得到 3 号接触面接触力的变化趋势,如图 2 所示. 整个变化过程存在两个转折点,转折点反映接触状态的突变. 随着拉力 F 的增加,第一个转折点对应的是 3 号接触对由相对静止状态到相对滑动状态的突变,正压力开始快速下降,摩擦力的数值在达到最大之后,也开始变小,接触状态越来越松,密封效果越来越差. 因此,定义该点为松弛点. 第二个转折点对应的是 3 号接触对由相互挤压到相互脱离的突变,正压力和摩擦力均变为零,此时必然出现泄漏,故定义该点为泄漏点.

2 有限元模拟

2.1 有限元模型

管路采用螺纹副连接,为了简化模型,视连接副为轴对称结构. 由于这里不关注导管与管套的连接,所以模拟过程中将管套与导管视为一体. 从而得到管路连接副在拉伸载荷下的多体弹性接触模型,如图 3 所示. 一共建立了 10 个接触对,同时约束管接头底部的轴向位移为零. 连接副的材料为钛合金,其材料属性如表 1 所示.

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
TC4	4 440	109	0.34

划分网格的时候,应该注意接触面上网格的匹配. 为保证良好的计算结果,接触面上的网格应

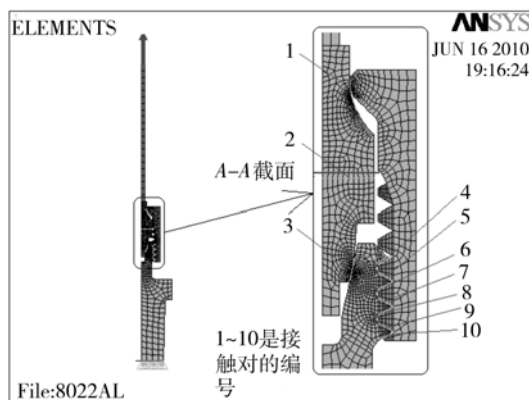


图 3 拉伸载荷下的管路连接副有限元模型

Fig. 3 Finite element model of pipe connections

适当地划细,特别是 1 号和 3 号接触面. 同时,要注意细网格到粗网格的过渡要平缓,不能出现严重畸变的网格.

2.2 载荷条件

管路连接副正常工作时,存在很大的预紧力,它对连接副的密封具有重要的作用. 目前关于预紧状态的模拟文献[10-13]中,主要有螺栓的预紧和由过盈装配而产生的预紧. 通常使用以下三种方法:直接法、降温法和初始渗透接触法. 这里采用初始渗透接触法来实现连接副预紧力的作用. 在 A-A 截面处将管套分割为两个体(见图 3),在该界面上建立 2 号接触对. 通过它定义初始的渗透,从而使连接副内部产生预紧力的作用. 定义好各接触面的初始接触状态,即在 2 号接触面上定义初始渗透,而其他接触面定义为无间隙、无渗透的刚好接触状态. 这样,给定轴向位移约束之后,进行静力分析便可以产生预紧力. 在此基础上,在导管端施加拉伸载荷,进行第二步的分析,便可以模拟连接副在拉伸载荷下的受力情况.

应该注意到,2 号接触对原先是不存在的,应该将它定义为 ANSYS 中提供的绑定接触类型,即整个过程该接触面不允许发生相对滑动和分离.

2.3 有限元分析的结果

上一节基于刚体的假设,定性地分析了连接副接触面的受力. 下面结合数值模拟的结果,定量地分析连接副密封面的密封状态.

2.3.1 接触力

利用图 3 的有限元模型,施加预紧力和拉伸载荷,进行数值求解. 根据数值模拟的结果,得到 3 号接触对上的接触力随拉伸载荷的变化情况,

如图 4 所示,当拉力从 0 开始增大,正压力缓慢下降,摩擦力减小较快,并反向变为负值.这个过程中该接触面基本上没有什么松动;当拉力继续增大到某值时,接触面开始出现松动,正压力快速下降,摩擦力也由最小的负值开始增加.随着拉力的进一步增加,直到正压力和摩擦力同时变为零,此时该接触面彻底分开,管内流体必然泄漏.

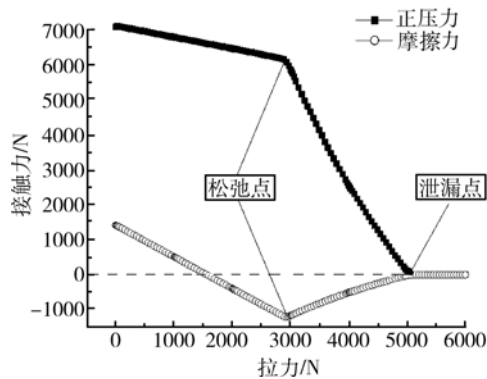


图 4 接触力随拉力的变化曲线

Fig. 4 Contact force curves with the tension on finite element method

对比图 4 和图 2 发现,基于等效弹性模型的有限元分析得到的接触力变化规律和基于等效刚性模型分析的结果基本一致.整个接触状态的变化过程中,同样也存在两个转折点,即松弛点和泄漏点.这说明了利用有限元法模拟管路连接副的拉伸状态是可行的,并且能够定量地得到密封面的接触状态,分析连接副的密封性.

2.3.2 密封面宽和密封比压

连接副的密封条件由密封面的密封面宽和密封比压(接触压应力)决定.因此,下面关注这两个参数随拉力的变化情况.图 5 所示的就是密封面宽和密封面上最大接触压应力随拉力变化的曲线.它们与接触力变化趋势相一致.在松弛点之前,密封面宽基本不变化,最大接触压应力缓慢减小.过了松弛点之后,密封面宽逐阶变小,最大接触压应力快速下降.在泄漏点,密封面宽和最大接触压应力同时降为零,出现泄漏.密封面宽随拉力的变化呈现出阶梯状,这是因为在接触问题的有限元法求解中,接触面边界被离散化处理,所以密封面宽随拉力变化不连续.

2.3.3 预紧力的影响

很明显,如果连接副的松弛点和泄漏点所对应的拉力越大,连接副的密封性越好.它们的大小和很多因素有关,如轴向预紧力的大小、外套螺母

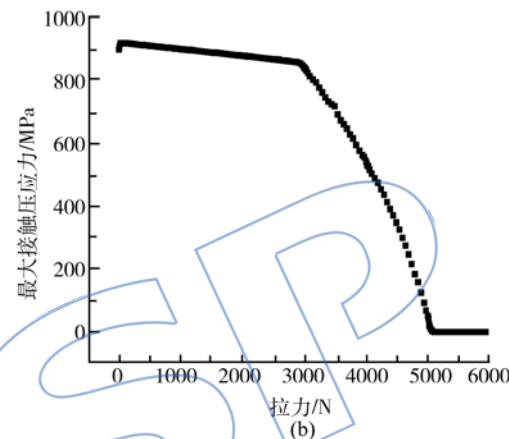
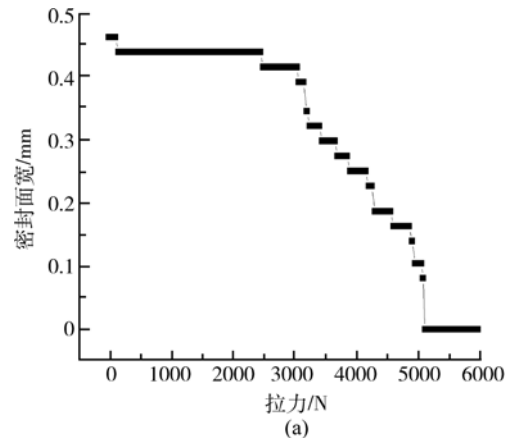


图 5 密封面宽和最大接触压应力随拉力的变化曲线

Fig. 5 Width curve of sealing surface and the maximum contact stress curve with the tension

的轴向刚度、密封面的摩擦因数和几何设计尺寸等等.这里主要分析轴向预紧力对它们的影响.在保持其他参数不变的情况下,改变 2 号接触面的初始渗透量,施加拉伸载荷.从而得到不同预紧轴向力下,密封面发生接触松弛和泄漏的临界点,见图 6.由图中可以看出,松弛点和泄漏点都随预紧力的增加而增加,并表现出较好的线性.即预紧力愈大,其密封效果愈好.

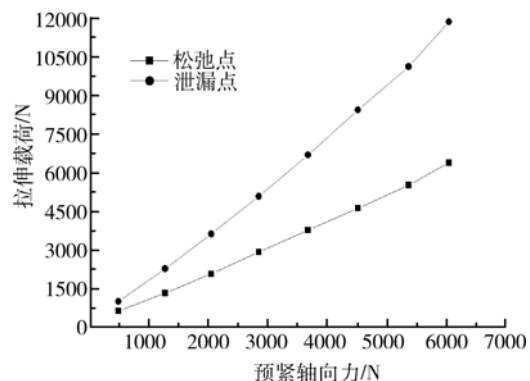


图 6 松弛点和泄漏点随预紧轴向力的变化曲线

Fig. 6 Relaxation point and leakage point curves with the axial preload

3 结 论

在拉伸载荷下,通过对管路连接副密封性能的研究和分析,得到以下结论:

1) 建立管路连接副的多体接触弹性模型,通过有限元法模拟得到密封面的接触力随拉伸载荷的变化规律与基于等效刚性模型分析的结果基本一致,这说明了利用有限元法模拟管路连接副的拉伸状态是可行的。

2) 密封面的接触力、密封面宽和密封比压随拉伸载荷的变化曲线均存在两个转折点,即松弛点和泄漏点。它们反映了接触状态的突变。松弛点过后,密封面的接触随拉伸载荷的增加快速松弛,而泄漏点过后,密封面彻底分开,必然出现流体外泄。

3) 预紧力越大,连接副的密封性越好。松弛点和泄漏点所对应的拉力随预紧力的增加而增加,并表现出良好的线性关系。

4) 密封面的密封条件由密封面宽和密封比压决定。在无法确定密封条件的情况下,利用本文采用的有限元法,不能准确地确定连接副在多大的拉伸载荷下出现密封失效。只能保守地估计在泄漏点附近,连接副一定会发生泄漏。但是,该方法可以用来比较不同设计方案的连接副在拉伸载荷下密封性能的优劣,从而节省试验成本,便于设计方案的改进。

参考文献:

- [1] 彭艳萍,曾凡昌,王俊杰,等. 国外航空钛合金的发展应用及其特点分析[J]. 材料工程,1997(10):3-6.
PENG Yanping, ZENG Fanchang, WANG Junjie, et al. Development, application and feature of titanium alloys in foreign aviation industry[J]. Journal of Materials Engineering, 1997(10):3-6. (in Chinese)
- [2] Adib A M L, Baptista C A R, Barboza M J R, et al. Aircraft engine bleed system tubes: material and failure mode analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(8): 1605-1617.
- [3] 李松梅,蒋唯沧,刘建华,等. 新型航空 T-31 钛合金导管连接件在模拟服役环境中的抗腐蚀性能研究[J]. 材料工程, 2004(2):32-36.
LI Songmei, JIANG Weicang, LIU Jianhua, et al. Study on corrosion resistance of aircraft conduit connector of T-31 titanium alloy at simulated service environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2004(2):32-36. (in Chinese)
- [4] 李松梅,刘建华,孙忠志,等. 模拟服役环境中航空导管连接件耐蚀性能研究[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(4):430-433.
LI Songmei, LIU Jianhua, SUN Zhongzhi, et al. Study on corrosion resistance of aircraft conduit connector at simulated service environment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(4):430-433. (in Chinese)
- [5] 王小刚,张方晓,黄鹏. 基于 ANSYS 的管路锥形密封结构参数分析[J]. 兵工自动化,2009,28(8):25-27.
WANG Xiaogang, ZHANG Fangxiao, HUANG Peng. Analysis of parameters of pipeline cone sealing structures based on ANSYS[J]. Ordnance Industry Automation, 2009, 28(8):25-27. (in Chinese)
- [6] 王小刚,张方晓,黄鹏. 基于 ANSYS 的锥头-锥孔管路锥形密封结构分析[J]. 机械,2009,36(8):37-40.
WANG Xiaogang, ZHANG Fangxiao, HUANG Peng. Design of cone-head & cone-hole pipeline cone sealing structure based on ANSYS[J]. Machinery, 2009, 36(8):37-40. (in Chinese)
- [7] 冉光斌,张方晓. 双锥形接头密封管路联接结构的稳健设计[J]. 润滑与密封,2008,33(5):88-90.
RAN Guangbin, ZHANG Fangxiao. Robust design method of the sealing pipeline joint structure with double-cone pipe union[J]. Lubrication Engineering, 2008, 33(5):88-90. (in Chinese)
- [8] 张森,孟庆春,张行. 无扩口管路连接件疲劳寿命预估的损伤力学-有限元法[J]. 航空学报,2009,30(3):435-443.
ZHANG Miao, MENG Qingchun, ZHANG Xing. Damage mechanics-finite element method for fatigue life prediction of flare-free pipeline connection assemblies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3):435-443. (in Chinese)
- [9] 李俊昇,罗建平,孙忠志,等. HB5966-2008 24°无扩口导管连接件通用规范[S]. 北京:中国航空综合技术研究所, 2008:1-14.
- [10] 李会勋,胡迎春,张建中. 利用 ANSYS 模拟螺栓预紧力的研究[J]. 山东科技大学学报,2006,25(1):57-59.
LI Huixun, HU Yingchun, ZHANG Jianzhong. Study on simulating bolt pretension by using ANSYS[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2006, 25(1):57-59. (in Chinese)
- [11] 祖炳辉,付光琦,徐玉梁,等. 车用柴油机缸孔在缸盖螺栓预紧力下变形的数值模拟和试验研究[J]. 内燃机工程, 2010,37(2):98-104.
ZU Binghui, FU Guangqi, XU Yuliang, et al. Numerical simulation and experimental investigation on cylinder bore deformation of automotive diesel engines under cylinder-head bolt pretightened[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 37(2):98-104. (in Chinese)
- [12] 李婕,蔡纪宁,张秋翔,等. 机械密封环过盈联接的有限元分析[J]. 润滑与密封,2009,34(8):62-65.
LI Jie, CAI Jining, ZHANG Qiuxiang, et al. The finite element analysis of interference fit in mechanical seal ring[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(8):62-65. (in Chinese)
- [13] 周鹤群,汪中厚,谢云波,等. 基于 FEA 的传动轴过盈配合精密分析[J]. 机械传动,2010,34(1):60-65.
ZHOU Hequn, WANG Zhonghou, XIE Yunbo, et al. Precision analysis of interference fits for drive shaft based on FEA[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(1):60-65. (in Chinese)