

飞机液压系统管路密封性的多因素 影响规律仿真分析

夏芝玮¹, 樊新田¹, 赵旭升², 张杰毅², 陈果²

(1. 西安飞机工业(集团)有限责任公司制造工程部, 西安 710089;

2. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106)

[摘要] 本文针对飞机液压系统管路连接件, 分析了管路连接件密封性能的多个影响因素, 提出了有效密封的判定条件。建立了飞机管路连接件有限元模型, 通过仿真分析研究了管路密封性能的多因素影响规律, 结果表明: 拧紧力矩的增加会使密封性能增强; 管接头与管道接触面的摩擦系数增加, 密封性能降低; 轴向装配偏差对密封性影响很大, 甚至会导致管路失去密封性; 径向偏差和角度偏差对密封性影响较小。

[关键词] 液压系统; 管路连接件; 密封性; 装配偏差; 有限元分析

[中图分类号] V214.1, V233.91

[文献标识码] A

[文章编号] 1003-5451(2021)03-0005-06

Simulation and Analysis of Multi-factor Influencing Law of Pipe Sealing in Aircraft Hydraulic System

XIA Zhi-wei, FAN Xin-tian, ZHAO Xu-sheng, et al.

(1. Xi'an Aircraft Industry (Group) Company LTD., Xi'an 710089

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106)

[Abstract] Aiming at the pipe connector of aircraft hydraulic system, the factors affecting the sealing performance of the hydraulic system of aircraft were analyzed. The determination conditions of effective sealing were put forward. The finite element model of aircraft pipe connection was established. The multi-factor influence law of pipe sealing performance was studied through simulation analysis. The results show that the increase of tightening torque will enhance the sealing performance; the friction coefficient between pipe joint and pipe contact surface increases and the sealing performance decreases; the axial assembly deviation has a great influence on sealing performance, and even causes the pipeline to lose sealing performance; the radial deviation and angle deviation have little influence on sealing performance.

[Keywords] hydraulic system; pipe connection; sealing; assembly deviation; finite element analysis

现代飞机液压系统逐渐向更高压力发展造成泄漏故障居高不下, 成为了飞机管路系统的主要故障, 严重影响了飞机的运行可靠性和安全性。

目前, 国内外学者对管路泄漏进行了广泛研究。李松梅、刘建华等^[1]研究了航空镀镉 45# 钢和钛合金

作者简介: 夏芝玮(1986-), 女, 硕士, 高级工程师。

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。王小刚^[2-3]、冉光斌等人^[4]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, 分析了设计参数对密封性的影响。王振兴等^[5]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,采用有限元方法定量分析了连接副的密封性。曹增强等^[6]采用正交试验研究了润滑条件、支承面材料以及表面处理状态对拧紧力矩系数的影响。赵华^[7]和程改霞^[8]分析了管接头在弹塑性小变形条件下,载荷及应力沿密封面的分布规律。Chris^[9]采用试验和仿真相结合的方法分析管接头在动力学载荷条件下的应力松弛情况。丁建春^[10]基于有限元分析软件计算了管接头在拧紧力矩作用下密封带宽度,还建立管接头拧紧力矩与密封带之间关系。刁俊通^[11]研究了3种载荷条件下载荷在各螺牙上的载荷分布,得出了载荷分布的不均匀性对套管螺纹接头的连接性能有重要影响的结论。

但是,目前,关于管路连接件密封性的研究中均未考虑装配偏差所带来的管道系统连接件装配应力对连接件密封性能的影响。在工程实际中,由于装配偏差所带来的管路连接件装配应力是飞机导管渗漏的关键因素,因此,研究装配应力对导管密封性能的影响具有重要的工程实际意义和价值。

本文基于有限元分析方法,建立管道连接件模型,通过静力学仿真计算研究不同装配偏差下密封面参数的变化规律及影响参数,最终为实际飞机管道安装中的装配偏差控制提供理论依据和技术支撑。

1 飞机管路连接件有限元模型

1.1 结构简述

本文采用扩口式管接头,并选取常用的37°扩口角,主要由扩口式管接头、扩口管、平管嘴和外套螺母4部分组成。其管接头和外套螺母的连接采用螺纹紧固的方式,在管接头和扩口管的连接过程中,管端在加工过程中形成的扩口锥面与管接头锥面相互配合,面与面紧贴在一起,从而形成金属接触的面面密封,同时平管嘴处于扩口管和外套螺母之间,在压紧扩口管与管接头的同时可以避免管路在复杂工作环境中在扩口交界处产生的应力集中,将扩口管路的剪切应力分散,可以有效提高管接头连接强度。管接头与外套螺母在拧紧力矩作用下压紧扩口管与管接头并出现塑性形变,形成密封面。如图1所示本文选取内径为10mm的管道连接件为研究对象。

1.2 材料本构模型

在液压管路系统中,扩口管道为5A02材料^[15],平

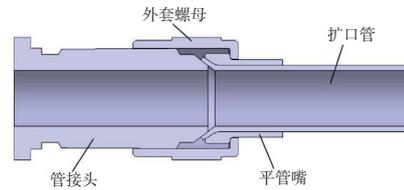


图1 管接头组件

管嘴使用45钢材料^[16],外套螺母与直通管接头使用2A12材料^[17]。表1给出了材料的属性与力学性能。

表1 材料力学特性

材料	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服极限/ MPa	强度极限/ MPa
5A02	2680	70	0.32	98	205.3
45钢	7810	200.1	0.269	355	696.6
2A12	2800	71	0.3	314	610

1.3 有限元模型

在将CATIA中构建好的三维模型导入Hypermesh后,采用的solid185六面体单元进行网格划分。图2为管路连接件的有限元模型。最后,管接头、扩口管、平管嘴和外套螺母网格数分别为47088、42408、7884和14724,共计112104个。

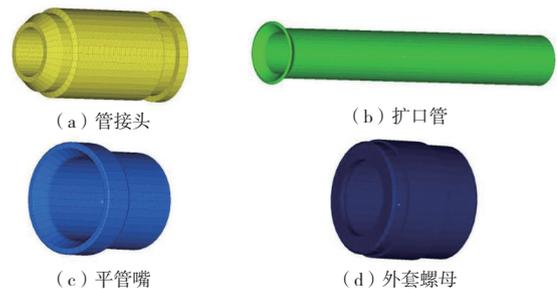


图2 管接头有限元模型

1.4 接触对设置

扩口管路连接件需要明确和各部件间的接触问题,根据本文探讨的扩口处密封性问题,考虑采用柔-柔接触和面-面接触。根据不同接触类型的特点,为了模拟管接头和外套螺母处螺纹约束的状态,采用no separation接触,而其余3个接触要考虑摩擦产生的相对滑动等影响,均采用standard接触。如图3所示。

1.5 边界条件及载荷

①预紧力施加方案

扩口管路系统属于典型的螺纹连接,在ANSYS仿

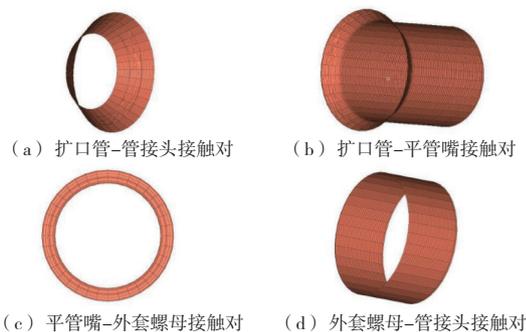


图3 有限元模型中的接触对

真软件中,要求将拧紧力矩转化为预紧力以方便后续的加载。本文选用《机械设计手册》^[18]所提供的螺栓连接拧紧力矩转化预紧力公式,结合本文扩口管路连接具体分析简化得出拧紧力矩同预紧力关系式。拧紧力矩转化为轴向预紧力的示意图如图4所示。

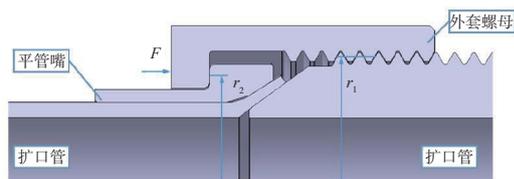


图4 拧紧力矩转化为轴向预紧力的示意图

拧紧力矩 T 为平管嘴和外套螺母处摩擦力矩 T_1 和螺纹连接处摩擦力矩 T_2 之和,即

$$T = F \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu r_1}{\cos \theta} + \mu r_2 \right) \quad (1)$$

根据航空工业标准 HB4-4-2002 查阅管路连接的结构尺寸可知螺距 P 取值 1.5mm,螺纹半角 取值 30° , r_1 取值 8.51mm, r_2 取值 7.55mm,因此将已知量代入式(1),可得拧紧力矩、轴向预紧力和摩擦系数之间的关系为

$$T = F (0.02387 + 17.377 \mu) \quad (2)$$

②边界条件和载荷的设置

拧紧力矩转化为轴向载荷,施加到外套螺母右端面节点上,以此模拟管路的预紧状态,管接头的右端面节点施加固定约束,除了上述边界条件,本文还需要分析偏差对管路应力状态和密封特性的影响,本文将偏差以强制位移的形式加在扩口管的左端面,如图5所示。

1.6 密封性评价指标及提取方法

①密封性评价指标

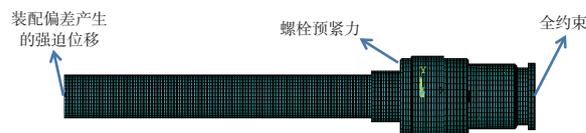


图5 约束及载荷的施加

密封宽度:是指接触面上接触压力超过扩口管(低硬度面)屈服极限部分的宽度。密封宽度越大则密封性能越好,反之亦然,密封宽度能够最为直观的表现出密封与否,在管道受到外载时,密封宽度可能不均匀,此时可选择最窄的宽度评价密封性能。

密封面平均接触压力:该值越大表明塑性变形越充分,接触面之间的缝隙填充的越充分,则密封性能越好。

②密封性能指标提取方法

由扩口管路材料 5A02 力学特性可知,其屈服强度为 98MPa,而管接头材料为 2A12,屈服强度达到 355MPa,因此,当接触压力大于 98MPa 时,扩口管与管接头金属面接触间产生一定的塑性变形,从而填充两金属面间细小的缝隙,从而达到一定的密封效果,因此,本文认为当接触应力达到 98MPa 的位置处于密封状态,并根据处于密封状态的最小宽度确定密封面宽,进而判断扩口管和管接头面面接触整体的密封状态如图6所示。

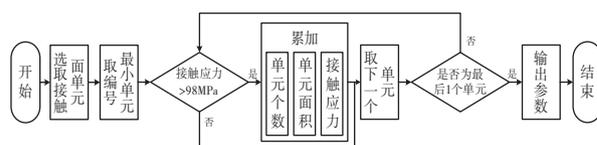


图6 密封面接触参量提取流程图

2 计算结果与分析

2.1 拧紧力矩和摩擦系数对密封性能的影响

密封接触对表面粗糙度直接影响着扩口式管路连接件密封性能的好坏,作为扩口式管路连接件密封最关键的接触对,HB 4-52 与 HB 4-3 分别对扩口导管扩口部内锥面与管接头对应锥面做了表面加工精度的要求:表面粗糙度不大于 $0.8 \mu\text{m}$ 。由于表面粗糙度属于表面形貌特征,较难引入有限元计算,因此引入摩擦系数来研究表面粗糙度对扩口式管路连接件密封性能的影响。

摩擦系数受摩擦副材料及润滑状态影响较大,在

实际装配时,为避免对工作介质的污染,一般不会对导管扩口部内锥面与管接头锥头外表面进行润滑,所以在这里只考虑干摩擦状态下金属-金属密封接触时的摩擦状态,可以认为摩擦系数与表面粗糙度是正相关的,即表面粗糙度越大,摩擦系数越大。常用的金属-金属接触摩擦系数取值为 0.15~0.3。

轴向预紧力越大,密封接触对所受的挤压力越大,密封效果越好。根据轴向预紧力与拧紧力矩、摩擦系数的关系式,可以绘制出三者之间的关系如图 7 所示。图中红色代表轴向预紧力很大,蓝色代表轴向预紧力很小,从图中可以看出当摩擦系数不变时,拧紧力矩越大,轴向预紧力越大;当拧紧力矩不变时,摩擦系数越大,轴向预紧力越小。

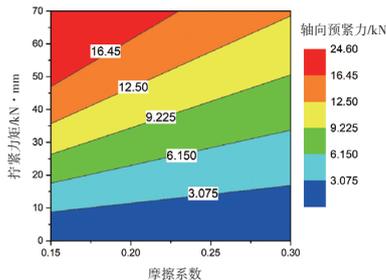


图7 预紧轴向力随摩擦系数变化曲线

先分析定拧紧力矩时摩擦系数变化对管路密封性能的影响规律,接着分析定摩擦系数时拧紧力矩变化对管路密封性能的影响规律,最后分析两者对管路密封性能的耦合影响规律。

①摩擦系数对管路密封性能的影响规律

HB 4-1-2002《扩口管路连接件通用规范》中规定口导管、管接头和外套螺母中任何一种铝制品时保证扩口式管路连接件密封性能所要求的拧紧力矩范围为 20.60~35.30kN·mm。选取拧紧力矩大小为 20.60kN·mm,摩擦系数变化范围为 0.15~0.3,通过二维模型的仿真计算可以得到不同摩擦系数下扩口式管路连接件轴向预紧力以及 3 种密封接触参量的变化规律如图 8 所示。图中 4 个纵轴分别对应轴向预紧力、密封面宽、有效密封面积及有效密封比压。从图中可以看出,随着摩擦系数的增大,轴向预紧力、密封面宽、有效密封面积及有效密封比压都在减小。管内径为 10mm 的扩口式管路连接件密封面宽取 1mm 较为合理,此时,对应的摩擦系数为 0.185,即当密封接触面之间的摩擦系数小于等于 0.185 时,可以保证在 20.60kN·mm 力矩

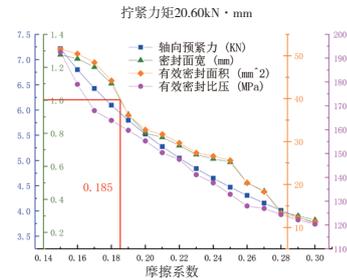


图8 轴向预紧力及3种密封接触参量随摩擦系数变化曲线

下装配的管路连接件的密封可靠性。

②拧紧力矩变化对管路密封性能的影响规律

选定摩擦系数大小为 0.18,通过二维模型的仿真计算可以得到不同拧紧力矩下扩口式管路连接件轴向预紧力以及三种密封接触参量的变化规律如图 9 所示。图中四个纵轴分别对应轴向预紧力、密封面宽、有效密封面积及有效密封比压。从图中可以看出,随着拧紧力矩的增大,轴向预紧力、密封面宽、有效密封面积及有效密封比压都在增大。经分析可得,在摩擦系数为 0.18 时保证管路连接件密封性能的最小拧紧力矩为 19.63kN·mm,即当拧紧力矩大于等于 19.63kN·mm 时,可以保证在摩擦系数为 0.18 时装配的管路连接件的密封可靠性。

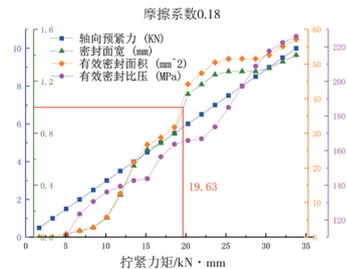


图9 轴向预紧力及3种密封接触参量随拧紧力矩变化曲线

管路连接件各组成零件等效力最大值随拧紧力矩变化如图 10 所示,从图中可以看出,随着拧紧力矩不断增大,各组件的等效力最大值也不断增大。由表 1.3 可知,直通管接头与外套螺母所使用的 2A12 铝合金强度极限为 610MPa,平管嘴扩口导管所使用的 45 号钢强度极限为 696.6MPa,扩口导管所使用的 5A02 铝合金强度极限为 205.3MPa,因此在拧紧力矩达到 33.7kN·mm 时扩口导管会先出现结构损伤,从而导致密封失效,在工程上应尽量避免这种情况的发生。

由此可知,在摩擦系数为 0.18 时,拧紧力矩取值应小于 $33.7\text{kN}\cdot\text{mm}$,称这一力矩值为最大拧紧力矩。

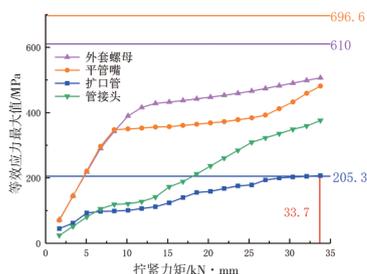


图10 各组件等效应力最大值随拧紧力矩变化曲线

2.2 轴向偏差对密封性能的影响

根据 GJB3054-97 飞机液压管路系统设计安装要求中的规定,管路轴向偏差每 100mm 不超过 0.3mm,因此本文选取拧紧力矩为 $20.60\text{kN}\cdot\text{mm}$,摩擦系数为 0.18,轴向偏差从 -0.4mm 取到 0.4mm ,步长 0.05mm ,共计 17 组进行计算。其中轴向偏差为负数代表扩口管远离管接头,轴向偏差为正代表扩口管向管接头挤压。

计算结果如图 11 和图 12 所示,根据图 11 和图 12 中可知,当扩口管路远离管接头时,随着轴向偏差的增大,扩口管和管接头的接触越来越少,接触面上平均接触压力随之减小,密封面宽减少,而当扩口管路挤压管接头时,随着轴向偏差的增加,扩口管和管接头的挤压越来越严重,接触面上平均接触压力越来越大,同时密

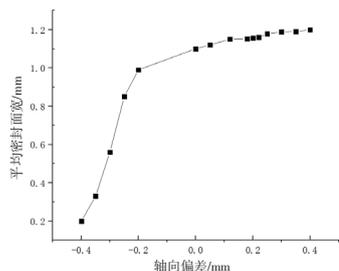


图11 轴向偏差对密封面宽的影响

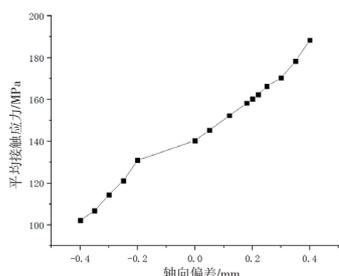


图12 轴向偏差对平均接触应力的影响

封面宽也变大。

2.3 径向偏差对密封性能的影响

根据 GJB3054-97 飞机液压管路系统设计安装要求的规定,扩口管路每 100mm 径向偏差不大于 0.2mm 。本文选取拧紧力矩为 $20.60\text{kN}\cdot\text{mm}$,摩擦系数为 0.18 的管路连接件研究,由于管路连接件的轴对称性,径向偏差不需要设置负值,采用从 0 到 0.4mm 的径向偏差,步长 0.1mm 共 5 组进行计算。对于径向偏差的添加,采用和轴向偏差相同的添加方式,把强制位移加在扩口管路左端面的节点上。由图 13 和图 14 可知,在较小的径向偏差下,随着径向偏差的增加,密封面宽度和平均接触压力急剧下降。

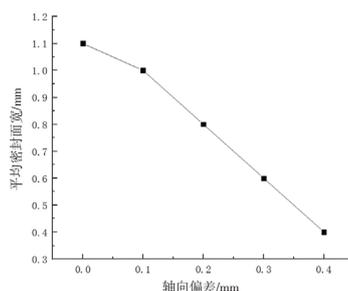


图13 径向偏差对密封面宽的影响

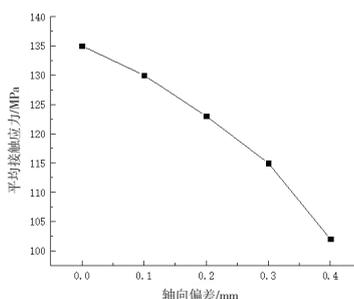


图14 径向偏差对平均接触应力的影响

2.4 角度偏差对密封性能的影响

角度偏差是指扩口管轴线同管径接头轴线在装配时形成的相对角度,当角度偏差为 0° 时表示扩口管同管接头同轴,在 GJB3054-97 飞机液压管路系统设计安装要求中规定,允许角度偏差不超过 2° 。

选取 $20.6\text{kN}\cdot\text{mm}$ 的拧紧力矩,摩擦系数为 0.18 时,探究角度偏差对密封性能的影响。图 15 和图 16 为角度偏差下密封环上平均接触应力和密封面密封面宽的变化情况,据图可知,随着角度偏差的增加,密封面整体密封面宽也随之变小,但总体变化不大。随着角度偏差的加大,密封面上的平均接触应力逐渐变大,这是

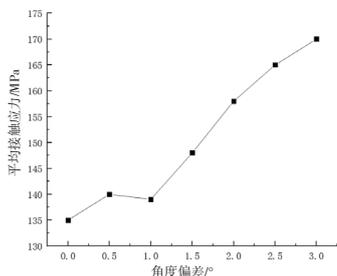


图15 角度偏差对接触应力的影响

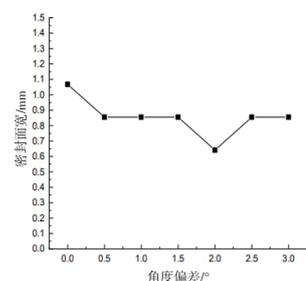


图16 角度偏差对密封面宽的影响

由于随着角度偏差的变大,扩口管锥面同管接头锥面部分位置挤压出现应力集中。

3 结论

通过对管接头接触面摩擦系数,管接头拧紧力矩,以及管道装配偏差(轴向、径向及角度)对管接头连接件密封性能影响规律的仿真分析,得出如下结论:

①摩擦系数增大,相同拧紧力矩下密封面宽和平均接触压力将减小。

②相同摩擦系数下,拧紧力矩增加,密封面宽和平均接触压力将增大。

③轴向偏差往负方向增大,密封区域由于受拉力作用,密封面宽减小,甚至减小至0,平均接触压力将低于扩口管材料的屈服极限。轴向偏差往正方向增大时,密封区域由于受压,密封面宽和平均接触压力均将增大。

④径向偏差和角度偏差增大时密封面宽将减小,平均接触压力将增大,但影响较轴向偏差要小。

参考文献

[1] 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

[2] 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

[3] 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

[4] 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

[5] 王振兴,邱明星,王建军. 拉伸载荷下管路连接副的密封性分析[J]. 航空动力学报,2011,26(8):1866-1870

[6] 曹增强,林水福. 管接头拧紧力矩系数的影响因数研究[J]. 航空制造技术,1994(4)

[7] 赵华. 螺接管接头的弹塑性应力分析[J]. 机械工程学报,1997,33(1):88-92

[8] 程改霞,姜晋庆. 管接头的接触密封与受力分析[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(1):252-254

[9] Chris L Pettit. Measurements and modeling of variability in the dynamics of a bolted joint[J]. AIAA,2004,1622

[10] 丁建春,王细波,杨燕,雒宝莹. 拧紧力矩对典型管接头密封带宽度影响研究[J]. 强度与环境,2012,39(2):9-13

[11] 习俊通,聂钢,梅雪松,吴序堂. 套管螺纹接头连接性能的接触有限元分析[J]. 西安交通大学学报,1999,33(11):63-66

[12] 周鑫,庞贺伟,刘宏阳. 球面密封结构的漏率预估[J]. 宇航学报,2007,28(3):762-766

[13] 周鑫,洪晓鹏,张益丹,刘小布. 球面密封结构密封性能初步测试[J]. 航天器环境工程,2006,23(1):56-59

[14] 周鑫,庞贺伟,闫少光,刘宏阳. 球头-锥面连接结构非线性接触分析[J]. 航天器环境工程,2005,22(4):211-214

[15] 邱明星. 航空发动机管路系统振动和密封特性研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2013

[16] 范志强,覃志贤,姜涛,等. 1Cr11Ni2W2MoV 冲击拉伸力学性能实验研究[C]. 第十三届发动机结构强度振动学术会暨中国一航材料院50周年院庆系列学术会议论文集,2006:259-262

[17] 刘贺,鄂大辛. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管滞后回弹的黏弹塑性建模和有限元模拟[J]. 精密成形工程,2015,7(6):65-69

[18] 成大先. 机械设计手册(第六版)[M]. 第2卷. 北京:化学工业出版社,2016:670-671

(收稿日期 2020-12-28)