

航空管路接头密封特性及流体温度影响

闫洋洋¹, 庄保顺¹, 高培鑫², 翟敬宇¹, 韩清凯¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116000;

2. 烟台大学 机电汽车工程学院, 山东 烟台 264000)

摘 要: 对多尺度有限元模拟开展管路接头密封特性研究。基于管接头各部件粗糙表面的实测数据,建立具有粗糙表面的管路接头密封区域多尺度模型,通过接头拧紧过程的模拟计算获得了接头密封状态和密封性能。研究结果表明:多尺寸模型可以真实反映出管路接头拧紧过程中的密封状态和特性变化规律,从而提高管路接头装配方法计算精度;另外,在接头拧紧过程中,管路与卡套结合处高应力区是通过两个高应力区域向四周扩散的,管路接头密封性能变化呈现线性变化,并且管路接头最佳装配状态需要达到特定装配位置,合理可靠的装配对管路接头使用尤为重要;同时,流体温度在允许范围内,对管路接头的密封特性有一定影响。

关 键 词: 航空管路接头; 多尺度接触模型; 密封特性; 拧紧过程模拟; 流体温度

中图分类号: V233

文献标志码: A

Sealing characteristics of aviation pipeline fittings and influence of fluid temperature

YAN Yangyang¹, ZHUANG Baoshun¹, GAO Peixin²,

ZHAI Jingyu¹, HAN Qingkai¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116000, China;

2. School of Electromechanical and Automotive Engineering,

Yantai University, Yantai Shandong 264000, China)

Abstract: The multi-scale finite element simulation method was used to study the sealing characteristics of pipeline fittings. Based on the measured data of rough surfaces, the multi-scale model of pipeline fittings was modelled, sealing state and sealing performance of fittings were obtained by simulating the tightening process of fittings. The results showed that the calculation results based on the multi-scale model could really present seal characteristics of pipeline fittings, and improve the calculation accuracy of pipeline fittings assembly method. In addition, during the process of fittings tightening, the high stress zone between pipeline fittings and ferrule diffused to all sides through two high stress zones, and the change of sealing performance of pipeline fittings presented linear change. When the displacement of ferrule reached certain position, the pipeline fittings achieved the optimal assembly state, making it particularly important for the application of pipeline fittings. Besides, the fluid temperature in the allowable range had certain influence on the sealing char-

收稿日期: 2019-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51805462)

作者简介: 闫洋洋(1987—),男,博士生,主要研究方向密封技术与结构振动。

引用格式: 闫洋洋,庄保顺,高培鑫,等.航空管路接头密封特性及流体温度影响[J].航空动力学报,2019,34(11):2414-2422. YAN Yangyang, ZHUANG Baoshun, GAO Peixin, et al. Sealing characteristics of aviation pipeline fittings and influence of fluid temperature[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(11): 2414-2422.

acteristics of pipeline fittings.

Key words: aviation pipeline fittings; multi-scale contact model; sealing characteristics; simulation of tightening process; fluid temperature

由于卡套式管路接头装配方便并可以适用于高压和低压等特点,被广泛应用于航空发动机和飞机液压系统种。作为管路系统的基础连接和流体密封构件,管路接头既要实现管路内流体密封,又要完成管路之间连接^[1],管路接头的密封特性和拧紧方法直接影响了飞机的安全性和稳定性。因此,有必要开展管路接头密封特性和拧紧方法研究,从而提高航空发动机和飞机液压系统安全性和可靠性。

关于管路接头密封特性的研究,王振兴等^[2]进行了管路接头在拉伸载荷下的密封性分析。夏茂松^[3]详细讨论了卡套式接头的分类和应用场合。Mihsein 等^[4]基于有限元仿真进行了卡套式接头装配状态模拟,并通过 X 光照影技术验证了模拟结果的准确性。颜斌等^[5]研究了卡套接头的密封原理,并基于所获得的密封机理完善了接头装配工艺。陈胜等^[6]基于 SolidWorks Simulation 有限元平台进行了卡套式接头装配后的应力、应变分析,通过计算分析获得了接头的密封状态。上述研究从宏观角度开展了接头部件之间的接触分析,获得了接头部件之间的接触状态,并没有涉及到接头的密封机理和密封状态特性变化。目前,基于多尺度模型对密封结构的密封特性分析已经得到了广泛的关注,Wenk 等^[7]利用三维多尺度模型分析了径向唇式密封结构的接触和变形特性。Pérez-Ráflós 等^[8]基于金属粗糙表面开展了粗糙表面之间的接触性能和粗糙空隙之间的流体流动。Jia 等^[9]基于多尺度有限元计算模型预测了从空气端到流体端旋转唇式密封的泵送率。Zhang 等^[10]以三维有限元接触模型通过经典方法计算了粗糙表面之间的泄漏通道和泄漏率。Thatte 等^[11]建立了多尺度模型研究了黏弹性对液压活塞杆密封行为的影响。上述研究都是国外学者以粗糙表面接触模型进行了密封特性和泄漏通道的研究。

目前,温度对密封结构密封性能影响的研究也得到了广泛的关注。Allec 等^[12]开发了一种用于纳米集成电路设计的多尺度热分析方法。Lan 等^[13]基于多工质模型,分析了一种由混合对流和强制对流冷却的基片安装式离散热源阵列。李力等^[14]研

究了多尺度热模拟及参数对砷化镓 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)热特性的影响。Mizushina 等^[15]提出了一种简单的模拟方法,允许现有电路及其温度数据的这些标度共存。黄玉琦等^[16]利用中冷器力学的多尺度热分析方法计算了 CFD/CHT (computational fluid dynamics/computational heat transfer) 模拟的精度。Lan 等^[17]提出了一种适用于大尺度共轭传热系统的多网格增强多尺度分析方法。上述研究主要集中在考虑温度影响的粗糙表面之间的密封特性和泄漏问题上。

本文基于接头密封区域的多尺度有限元模型,开展接头拧紧过程中的密封性能研究。讨论了接头的应变和应力分布,并且详细分析了接头密封结合面的密封状态。最后,基于图像处理技术实现了拧紧过程中的卡套与管路之间的密封面积统计,获得了拧紧过程接头密封面积的变化规律,为接头拧紧工艺确定提供科学参考。

1 管路接头多尺度建模

卡套式管路接头由前卡套、后卡套、接头体和锁紧螺母组成,如图 1 所示。卡套式管路接头的金属密封是通过卡套与管路外表面挤压成形和卡套与接头体表面接触实现流体密封,同时也可以实现管路之间的连接。管路接头拧紧后,卡套的塑性变形和接触状态如图 1 所示,由图可以看出,卡套与管路之间明显存在金属接触密封区域,可以实现管路内流体的密封。

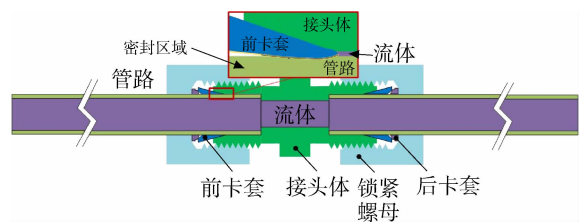


图 1 管路接头结构与密封区域示意图
Fig. 1 Structure and seal zone of pipeline fittings

1.1 管路接头多尺度有限元建模

多尺度有限元计算方法是一种考虑宏观结构尺寸和微动形貌的跨尺度分析方法,根据管路接

头特点,通过多尺度有限元分析计算可以获得包括卡套与管路宏观变形以及接头密封结合面粗糙表面的微变形。金属与金属之间结合表面的微观形貌对它们的接触状态和密封特性等有显著的影响,对金属结合面微观形貌进行准确、客观的描述是开展其密封特性研究的关键。

利用 NEW view5022 型三维表面轮廓仪 (Zygo) 可以获得卡套和管路表面的三维表面形貌数据。该设备是基于白光干涉原理进行试件表面形貌测试,仪器的垂直分辨率为 0.1 nm,横向分辨率为 110 nm,最大扫描深度为 2~150 μm 。最终分别获得卡套和管路表面上 1.41mm $\times$ 1.06mm 范围的表面形貌数据如图 2 所示,覆盖了管路 with 卡套密封区域周向对应测试范围大小的某一位置。其中轴向上包含了 631 个等间距的数据点,周向上包含了 471 个等间距的数据点,即获得 631 $\times$ 471 均布的表面形貌数据扫描点阵,轴向间隔和周向间隔分别为 2.234 μm 和 2.25 μm 。由于卡套和接头体之间的密封特性以单一的金属挤压变形为主,表面形貌对变形过程影响很小,因此在建模过程中忽略了卡套和接头体之间的三维形貌信息。

在表面形貌测试过程中,由于受到光学干扰和表面缺陷的影响,形貌数据会存在缺失点和噪声,因此利用小波分析对离散数据进行处理,以获得可用的表面形貌数据,即对形貌数据进行逐层

的小波分解实现缺失点填补和无用的形貌数据过滤。最后,在三维笛卡儿坐标系下,将处理后均布的 631 $\times$ 471 数据点阵生成表面形貌数据,处理后的表面形貌如图 3 所示,图中 X、Y 分别为零件轴向、周向方向, R_a 为零件表面粗糙度。图 3 中,由于不锈钢制卡套由车削加工获得,管路表面经过抛光处理,所以卡套表面呈现车削加工后的波纹,而管路表面比较光滑。

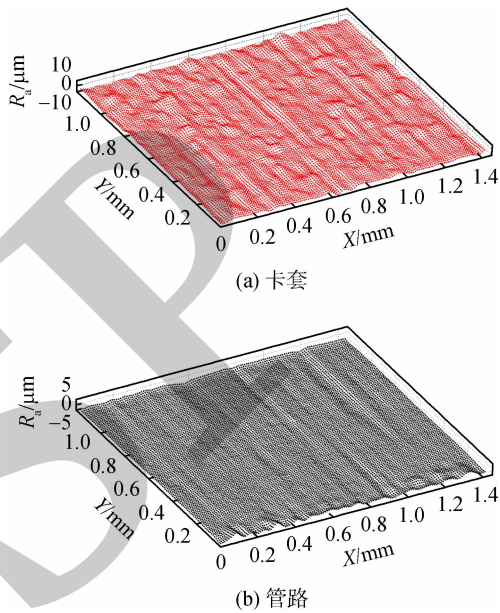


图 3 卡套和管路表面形貌
Fig. 3 Surface of ferrule and pipeline

依托 CATIA 软件逆向建模工程,按照由点-曲线-曲面的顺序,建立三维真实粗糙表面。即将小波分析处理后的卡套表面粗糙数据导入到 CATIA 中,将表面形貌数据点阵重构成连续几何粗糙面,从而实现了能反映卡套表面粗糙度的三维重构,进而以卡套密封区域实际宏观尺寸进行具有粗糙表面卡套三维模型的建模。同时,基于上述的模型重构方法建立考虑表面粗糙度的管路多尺度模型,模型宽度为 1.01mm,其他模型尺寸见图 4 所示。

通过 ANSYS 进行多尺度模型的网格划分,单元类型选择 SOLID 185 单元,该单元常用于构造三维实体结构,具有超弹性、大变形和大应变计算能力,符合多尺度模型大变形的计算要求。另外,为了有效保证表面粗糙度的仿真精度,多尺度模型网格尺寸需要小于 Zygo 测试的轴向间隔和周向间隔。同时,通过对比不同网格大小的管路接头密封性能结果可知,由于网格尺寸已经足够小,网格大小对管路接头密封性能计算结果影响有限。在保证计算精度的前提下,为了降低多

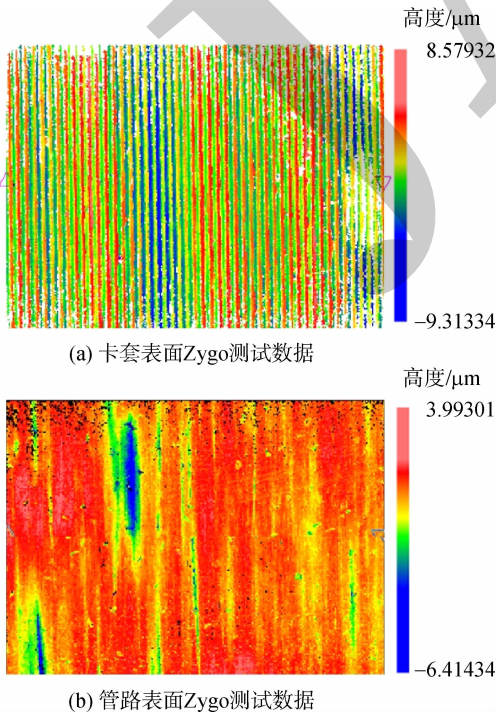


图 2 卡套表面和管路表面二维轮廓
Fig. 2 Two-dimensional profile of ferrule and pipeline

尺度模型的计算量,多尺度模型选择最小网格尺寸为 $2\mu\text{m}$ 。这样采用的单元尺寸既能够有效地保证表面粗糙度的仿真精度,又较好地保证了多尺度模型计算的收敛性。

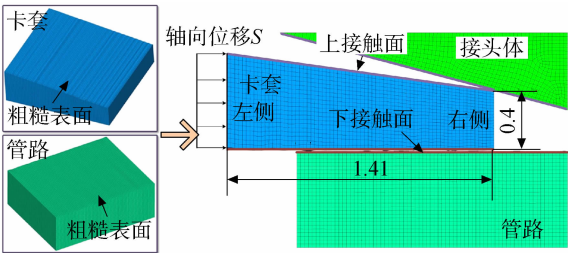


图 4 管路接头多尺度接触模型(单位:mm)
Fig. 4 Multi-scale contact model of pipeline fittings
(unit:mm)

1.2 多尺度模型边界条件及载荷条件

针对管路接头结构特点和接头密封特点,多尺度有限元模型采用轴对称边界条件^[18],即约束多尺度模型各个面法向自由度。无内流压力作用下的多尺度模型以卡套侧面施加位移模拟卡套在接头拧紧过程,如图 4 所示。结合管路接头工作环境 and 拧紧工艺特点,在卡套左侧施加位置载荷,管路接头载荷施加位置如图 4 所示。

在螺母的拧紧作用下,卡套会产生不断地轴向位移,卡套和接头体之间的楔形面又会使卡套受到径向挤压力,并且由于卡套和管路材料的屈服极限相对较低,因此在它们的接触表面上产生了塑性变形,从而实现管路内流体的密封。另外,在拧紧力作用下,卡套与接头体产生大变形,而不仅仅是微凸体变形,因此在多尺度建模中忽略卡套与接头体之间接触对接头密封特性影响。同时,在接头拧紧过程中,接头体仅内表面结构涉及到多尺度有限元计算结果,同时为了减小模型的计算量,在保证接头体内表面楔形面结构特征和有限元计算结果的提前下对接头体模型进行了一定的模型简化,即由于卡套与接头体之间的塑性变形范围很小,所以在建模时只考虑了发生塑性变形的材料部分,对于接头体上远离接触面的材料部分不给予考虑,这种简化模型的方法并不会影响到管路接头密封特性的仿真精度。

多尺度模型中卡套、接头体和管路材料为 304 不锈钢,具体材料属性见表 1 所示。由于接头多尺度模型模拟了管路接头周向上的某一块密封区域,因此模型中采用轴对称边界条件,将垂直于周向平面上的节点固定以约束模型的周向位

移,径向约束条件与周向相同,除了卡套上的轴向面,轴向约束条件也采用相同的约束方法。

表 1 管路接头材料属性
Table 1 Material properties of pipeline fittings

参数	数值
密度/(kg/m ³)	7 930
弹性模量/GPa	195
泊松比	0. 247
屈服强度/MPa	208

卡套的上、下表面分别与接头体表面和管路表面设置成摩擦接触对,同时采用接触单元 CONTA174 和目标单元 TARGE170 完成接触模拟,其中目标单元 TARGE170 适用于目标面为三维实体面的有限元计算,接触单元 CONTA174 是 8 节点的高阶四边形单元,更加适合具有粗糙表面模型的接触分析,接触面之间的摩擦因数设置为 0.1。管路接头多尺度模型采用弹塑性模型进行了准静态分析和计算。在模拟中,接头会产生塑性变形,因此计算中考虑了屈服准则,材料性能考虑了材料的屈服应力。

2 管路接头密封性能分析

2.1 管路接头应力应变分析

管路接头的装配预紧状态对管路连接的可靠性和密封性影响显著,因此有必要借助多尺度模型来分析和计算管路接头在装配拧紧过程中的接触状态变化,以及卡套表面的应力应变发展规律。如图 5 所示,展现了卡套在拧紧过程中的应变分布变化情况。在平缓的拧紧力作用下,卡套发生连续的轴向位移,其与接头体接触处首先发生弹塑性变形($S=0.23\text{ mm}$),在楔形接触面的挤压下,卡套前端表面的材料开始向后方移动。通过多尺度模型仿真结果可以知道,接头体与卡套接触表面上的微凸体在挤压作用下发生了塑性变形,接触面之间的材料相对流动并紧密融合,使管路的密封性能逐渐增强。当卡套轴向位移量达到 0.286 mm 时,由于其前端挤压力极具升高,使卡套整体出现屈曲变形,下表面应变得得到释放。卡套继续前行,当轴向位移达到 0.338 mm 时,其前端材料脱离楔形面的作用,屈曲变形消失,全部变形能集中在卡套前端的上下表面上,实现了接头的有效密封,卡套的行程也由此结束。

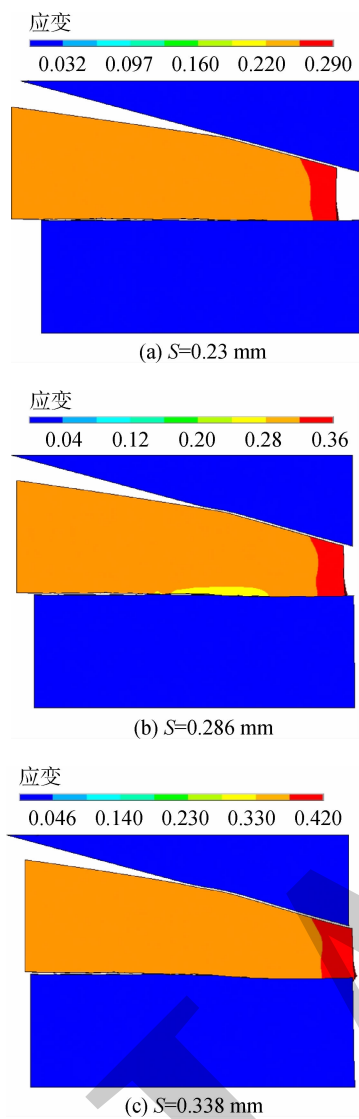


图 5 卡套不同轴向位移下接头应变分布

Fig. 5 Strain distribution of fittings under different axial displacements of ferrule

金属与金属之间的良好接触是其实现有效密封的前提条件。当接触应力大于材料的屈服强度时,表面材料会发生塑性流动,使微凸体接触数量增加,两个表面之间的有效接触面积增大,从而保证了金属之间的有效密封。根据管路接头装配体的结构特点,在卡套发生轴向位移的过程中,其上下表面会分别受到接头体和管路的摩擦力、挤压力的作用,使其表面材料发生弹塑性变形,表面局部材料的轴向位移分量会小于卡套的整体轴向位移量,并在表面局部形成材料阻滞,进而在卡套、接头体和管路的相应位置形成高应力区。较高的应力会进一步导致材料的塑性变形,使微凸体接触状态得到优化,最终实现对管路内部高压流体的有效密封。

多尺度模型考虑了卡套表面的形貌特征,因

此它可以有效地模拟出卡套在装配过程中表面接触应力分布的变化规律,以及能量在各个接触面之间的传递形式。与图 5 相对应,图 6 表现了管路接头在装配过程中的接触应力分布发展规律。在卡套的装配过程中,其前端由于楔形面的挤压首先发生了弹塑性变形。由于卡套前端与接头体接触处可以看成线、面接触,因此高应力区首先在那里形成,伴随着弹塑性变形的不断发展,高应力区逐渐向卡套后方蔓延,如图 6(a)所示。在卡套的轴向作用力下,管路与接头体之间的楔形空间逐渐膨胀,接触面上的微凸体不断融合,密封性能逐渐增强。当楔形空间的膨胀速度小于卡套的进给速度时,卡套整体发生了屈曲变形,其最大应力点移动在屈曲导致的应力集中处,如图 6(b)所示。卡套继续前行,当到达图 6(c)所示的位置

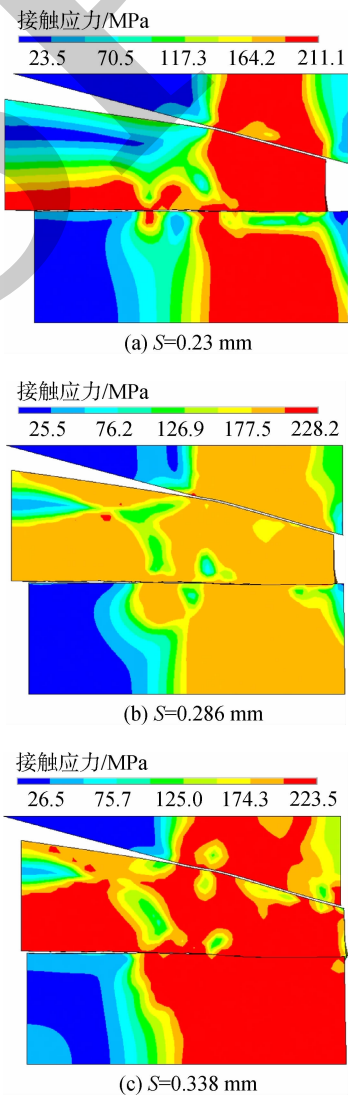


图 6 卡套不同位移下的接头接触应力分布

Fig. 6 Contact stress distribution of fittings under different displacements of ferrule

时,其前端已脱离了楔形面的作用,屈曲变形逐渐缓解并消失,高应力区再次分布在接触面附近,最终保证了构件接触面之间的紧密贴合及接头的有效密封。

2.2 接头密封结合面密封状态分析

在楔形面的作用下,卡套上表面与接头体始终紧密贴合在一起,良好的应力应变状态使两个接触面之间的微凸体具有较好的融合性,密封性能较高。而卡套下表面与管路表面的接触状态在整个装配过程中并不是时刻贴合紧密的,卡套的屈曲变形会使这个接触面的密封性能弱化。图 7 展示了装配过程中管路表面的应力状态变化规律,其表面的等值应力区始终呈带状分布。在装配过程的初始阶段,管路表面中部始终处于高应力状态,当屈曲发生时,这里的应力值达到整个变化过程的峰值。但它并不是管路密封的主要区域,密封应力值并不是很高。当卡套前端脱离了楔形面的作用后,其屈曲状态消失,卡套与管路接触面的前端达到了良好的应力应变状态,微凸体融合充分,这才使接头的密封状态达到最佳。

与图 7 相对应,图 8 展示了卡套下表面应力分布的变化趋势。由于卡套在装配过程中出现了屈曲变形,导致其下表面中部与管路之间的贴合程度降低,应力值减小,且应力分布状态没有呈现出规则的带状分布形式,这也表明了接触程度不

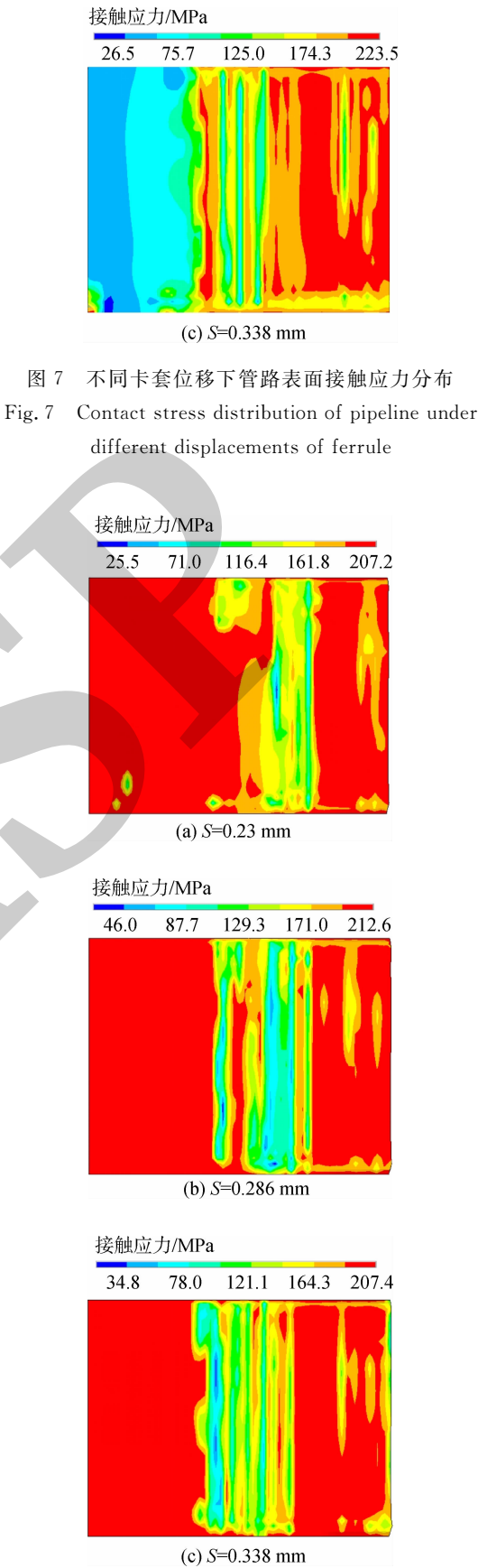
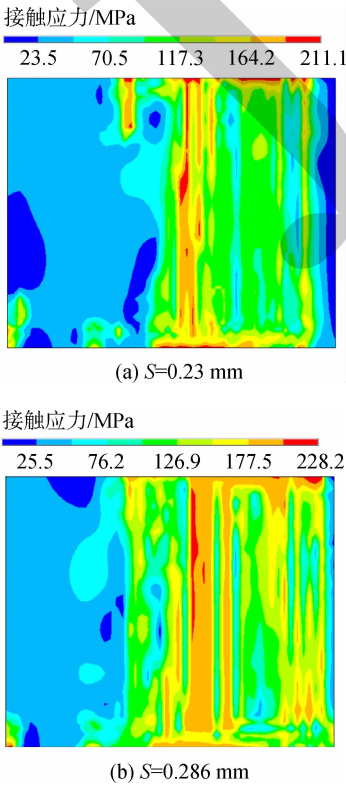


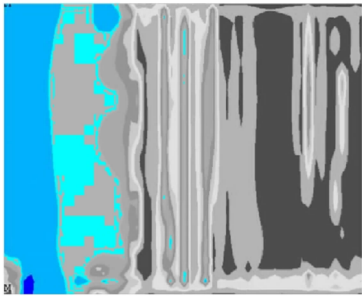
图 8 不同卡套位移下卡套下表面接触应力分布
Fig. 8 Contact stress distribution of ferrule surface under different displacements of ferrule

均匀,密封性较差。当卡套的屈曲状态消失时,其中部区域呈现出了规则的带状应力分布,前端区域即主要的密封区应力值升高,高应力覆盖面积增大。当卡套达到了指定的装配位置时,变形能在其前端区域集中,导致局部材料发生了明显的弹性变形甚至是塑性变形,接触面之间的微凸体大面积融合,从而使接头达到了良好的密封状态。

2.3 接头密封特性与多尺度模型准确性分析

由于管路接头特殊的楔形结构,在接头拧紧过程中,卡套前端内表面与管路表面逐渐贴合,将卡套与管路结合面上微凸体进行了优化,从而形成流体密封带,即管路表面应力分布区域就是接头接触密封面积。

通过管路接头拧紧过程的分析,可知管路接头的密封性能变化即为管路表面的接触密封状态变化。基于 MATLAB 软件的图像处理技术,拾取出管路表面不同接触应力等级的区域图,即首先基于 MATLAB 软件获得图像处理技术,将管路表面接触压力分布图导入到 MATLAB 中进行图像处理,获得不同接触应力等级与整个区域的百分比。在图像处理过程中,获得用以统计接头拧紧过程中有效密封面积如图 9 所示。图中管路接触密封区域会变成不同深度的灰色,未接触区域为原有颜色,接触应力值越大灰色深度越大,其中灰色深度由深到浅分别为塑性变形区、弹塑性变形区和弹性变形区。另外,根据管路接头结构和功能特点,接头密封接触区域无论接触应力大



(c) $S=0.338\text{ mm}$

图 9 图像处理不同卡套位移下接头接触区域
Fig. 9 Contact zone of fittings under different displacements of ferrule after image processing

小都被视为管路接头密封接触区域。

如图 10 所示,展示了装配过程中管路表面的接触面积占有效密封面积的百分比(γ)变化规律,横坐标为卡套的轴向位移,纵坐标为接触面积占有效密封面积的百分比,可以看到两者基本上呈现正相关关系。在接头密封特性分析中,需要同时考虑接头密封面积与接头密封接触应力分布状态,接头既要达到一定的密封面积,又要具有良好的密封接触应力状态,使得管路接头粗糙表面接触密封状态充分融合。

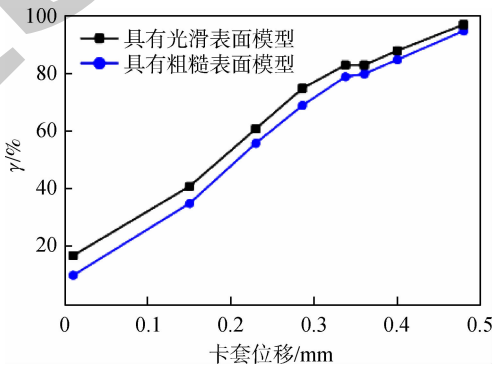
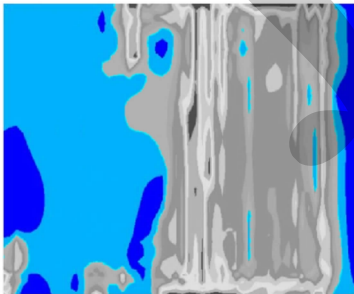


图 10 卡套位移与管路接头接触面积关系
Fig. 10 Relationship between displacement of ferrule and contact area of pipeline fittings

当卡套轴向位移达到 0.338 mm 时,经过接头拧紧过程后管路接头各个部件都处于高应力状态下,这样的应力作用过程使得管路接头密封结合面上的微凸体得到了优化,结合面又在均匀的高应力作用下,可以更好地实现对管路内部高压流体的有效密封。卡套轴向位移未达到 0.338 mm 时,管路接头密封特性不完备;当卡套轴向位移超过 0.338 mm 时,卡套前端将发生较大变形,容易产生结构失效。

利用表面形貌测试信息和多尺度仿真模型可



(a) $S=0.23\text{ mm}$



(b) $S=0.286\text{ mm}$

以真实反映出结合面的表面形貌,进而反映出接头的接触状态和密封性能。为了确定多尺度模型的真实性和密封性能,以具有光滑表面的接头在与上述的相同条件下进行接头的密封性能分析。通过与光滑表面模型计算结果的对比分析可知,在相同的卡套轴向位移下,具有光滑表面的接头模型接触面积总是大于具有粗糙表面的接头模型的接触面积,同时具有光滑表面的接头模型的接触面积变化规律类似于具有粗糙表面的接头模型。导致这种接触面积的变化原因为光滑表面之间的接触为连续的面与面的接触,而粗糙表面接触由于表面凸凹的存在导致结合面的接触存在不连续状态。因此,可以得出结论,多尺度模型可以呈现实际的接触状态和精确的接触面积。此外,接触状态也可以为接头拧紧工艺确定提供科学依据。

2.4 流体温度对接头密封性能影响分析

在液压系统工作过程中,需要压缩流体达到系统所需压力,这样的运动会引起流体温度升高;另外,由于飞机空间的局限性,液压系统油箱容积较小,导致流体散热慢,这些因素很容易引起流体温度急剧升高。为了明确流体温度对管路接头密封性能的影响,从而开展不同温度下管路接头密封性能影响分析。根据文献[19]可知飞机液压系统的温度在-54~232℃,因此为了明确流体问题对管路接头密封特性影响规律,选择 30、100、200℃等 3 种不同的流体温度来评价温度对接头密封特性影响规律。

管路接头在不同温度下接触面积与位移的关系如图 11 所示。随着管路内流体温度的升高,接头接触密封面积变化趋势与图 10 相似。在不同的流体温度下比较接头密封面积可以看出,在较大的流体温度下,接头具有较大的接触面积,并且

在不同的温度下管路接头的密封特性变化规律一致。由此可知,流体温度在航空液压系统许用范围内,流体温度对管路接头密封性能有一定影响;但是流体温度的升高不会改变的管路接头材料的属性,并且由于管路接头具备的特殊楔形结构,流体温度对管路接头密封性能影响有限。

3 结 论

基于多尺度模型,开展对管路接头紧固过程中密封特性的研究,并分析了液体温度对密封特性的影响,得出以下结论:

根据管路接触结合面上的应力分布,可以看出由于多尺度模型具有实际的粗糙表面,呈现出不规则、随机分布的应力分布形式,因此相对光滑接触表面的管路接头模型,多尺度模型可以更准确地反映出管路接头密封性能变化规律,从而提高了管路接头装配方法的计算精度,进一步保证了管路接头安装使用的可靠性。

卡套的变形是由接头体的挤压力和前卡套与管路之间的摩擦力引起的。卡套与管路之间的密封应力从两个高应力区扩散,并且拧紧过程中接头密封特性变化呈现线性变化趋势。另外,当管路接头密封面积和密封区域接触应力分布两者同时满足要求时,管路接头获得最佳的密封特性,即当卡套轴向位移达到 0.338 mm 时管路接头获得了最佳装配状态,未达到此装配位置,管路接头密封特性不完备,超过此装配位置,管路接头密封件卡套变形量过大,容易产生密封件结构失效。因此在工程使用中,应保证控制管路接头装配方法,保证接头服役期间的可靠性。在允许范围内,流体温度对管路接头密封特性有一定影响,随着液体温度的升高,不同温度下的管路接头密封特性变化有类似的趋势。

参考文献:

[1] LU C, WANG S, WANG X. A multi-source information fusion fault diagnosis for aviation hydraulic pump based on the new evidence similarity distance[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 71: 392-401.

[2] 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.

WANG Zhenxing, QIU Mingxing, WANG Jianjun. Sealing analysis of pipeline connection pairs under tensile load[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1866-1870. (in Chinese)

[3] 夏茂松. 卡套接头及其应用[J]. 液压气动与密封, 2000 (2): 46-47.

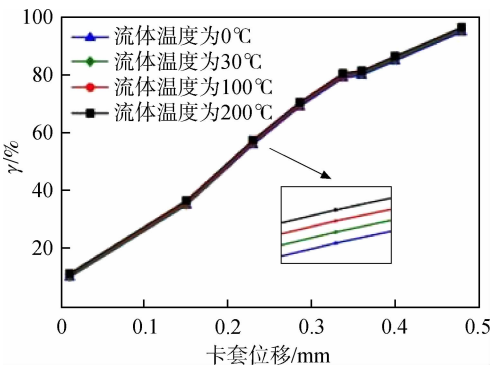


图 11 不同温度下管路接头密封面积影响规律

Fig. 11 Seal area of pipeline fittings at different temperatures

XIA Maosong. Sleeve fittings and its application[J]. Hydraulic Pneumatic and Sealing, 2000 (2): 46-47. (in Chinese)

[4] MIHSEIN M, SEYMOUR M D. Intermixing twin ferrule tube fittings-is it safe? [J]. Journal of Engineering Design, 1999, 10(4): 391-416.

[5] 颜斌, 孙念友, 刘安平. 24°锥卡套接头的密封原理及防漏油分析[J]. 现代制造技术与装备, 2015(4): 64, 79.

YAN Bin, SUN Nianyou, LIU Anping. Sealing principle and oil leakage prevention analysis of 24 degree tapered sleeve fittings[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2015(4): 64, 79. (in Chinese)

[6] 陈胜, 章海. 卡套式管接头 SolidWorks Simulation 分析[J]. 机械工程师, 2012(6): 99-101.

CHEN Sheng, ZHANG Hai. SolidWorks Simulation analysis of cased pipe fittings[J]. Mechanical Engineer, 2012 (6): 99-101. (in Chinese)

[7] WENK J F, STEPHENSL S, LATTIME S B, et al. A multi-scale finite element contact model using measured surface roughness for a radial lip seal[J]. Tribology International, 2016, 97: 288-301.

[8] PÉREZ-RÂFLOS F, LARSSON R, ALMQVIST A. Modelling of leakage on metal-to-metal seals[J]. Tribology International, 2016, 94: 421-427.

[9] JIA X, JUNG S, HAAS W, et al. Numerical simulation and experimental study of shaft pumping by plunge ground shafts with rotary lip seals[J]. Tribology International, 2012, 48: 155-161.

[10] ZHANG F, LIU J, DING X, et al. An approach to calculate leak channels and leak rates between metallic seal surfaces[J]. Journal of Tribology, 2017, 139(1): 011708. 1-011708. 11.

[11] THATTE A, SALANT R F. Effects of multi-scale viscoelasticity of polymers on high-pressure, high-frequency seal dynamics[J]. Tribology International, 2012, 52: 75-86.

[12] ALLEC N, HASSAN Z, LI Shang, et al. ThermalScope: multi-scale thermal analysis for nanometer-scale integrated circuits[J]. IEEE/ACM International Conference on Computer-aided Design, 2008, 28(6): 603-610.

[13] LAN T, YOGENDRA K J. A multigrid based multi-scale thermal analysis approach for combined mixed convection, conduction, and radiation due to discrete heating[J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127(1): 18-26.

[14] LI Li, COCCIOLI R, NARY K, et al. Multi-scale thermal analysis of GaAs RF device[R]. San Jose, CA, US: Semiconductor Thermal Measurement and Management IEEE Twenty First Annual IEEE Symposium, 2005.

[15] MIZUSHINA H, HIROKAWA M, KAMIYA J, et al. A simple multi-scale thermal analysis technique for printed wiring board models[J]. Jie Meeting, 2008, 22(1): 83-85.

[16] HUANG Y Q, LIU Z T, LU G D, et al. Multi-scale thermal analysis approach for the typical heat exchanger in automotive cooling systems[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014, 59: 75-87.

[17] LAN T, YOGENDRA K J. A multi-grid based multi-scale thermal analysis approach for combined mixed convection, conduction, and radiation due to discrete heating[J]. Journal of Heat Transfe, 2005, 127(1): 18-26.

[18] LIU S G, MA Y H, ZHANG D Y, et al. Studies on dynamic characteristics of the joint in the aero-engine rotor system[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 29: 120-136.

[19] 郭辉, 王平军. 飞机液压系统温度控制[R]. 西安: 中国航空学会控制与应用第十二届学术年会, 2006.

(编辑: 陈 越)