

航空燃油管路焊缝分区域建模及其对管路力学特性影响研究

郭长虹¹ 狄梦然¹ 宫瀚文¹ 权凌霄^{1,2*} 李斌^{1,2}

1.燕山大学机械工程学院,秦皇岛,066004

2.河北省重型机械流体动力传输与控制实验室,秦皇岛,066004

摘要:飞机燃油管路包含弯管、分支管和焊缝等多种结构,在外部载荷及内部流体耦合作用下表现出复杂的流固耦合力学行为。通过金相检测和微拉伸试验获取了焊接区域的微观结构参数,构建出具有不同局部结构的高精度燃油焊接管路有限元模型。模态试验结果表明,试验与仿真误差小于10%,验证了建模和仿真的准确性。针对不同分支管弯曲半径及不同管径比开展其对管路力学特性影响研究,发现增大弯曲半径和管径比有助于使管路内流速场和压力场分布更加均匀,固有频率会随弯曲半径的增大而降低;当弯曲半径减小但管径比增大时,随机振动应力峰值下降。采用对焊缝精确建模的燃油管路模型,剖析局部结构对管路力学特性的影响,可为管路设计和优化提供依据。

关键词:相贯焊接燃油管路;精细化建模;局部结构;流固耦合振动;力学特性;模态试验

中图分类号: V228; O324

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Modeling of Aviation Fuel Pipe Welds in Different Regions and Its Effect on Mechanics Properties of Pipes

GUO Changhong¹ DI Mengran¹ GONG Hanwen¹ QUAN Lingxiao^{1,2*} LI Bin^{1,2}

1.School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

2.Hebei Province Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: Aircraft fuel lines contained various structures such as bends, branches and welded seams, which exhibited complex fluid-solid coupling mechanics behaviors under external loads and internal fluid coupling. The microstructural parameters of the welded areas were obtained through metallographic testing and microtensile testing, and a high-precision finite element model of the welded fuel lines with different local structures was constructed. The modal test results show that the errors between tests and simulations are less than 10%, which verify the accuracy of modelling and simulation. The effects of different branch pipe bending radii and pipe diameter ratios on the mechanics properties of the pipelines were investigated. It is found that increasing the bending radii and pipe diameter ratios may help to make the distribution of the flow velocity and pressure fields in the pipelines more uniform, and the intrinsic frequency decreases with the increase of the bending radius; and when the bending radius decreases but the pipe diameter ratio increases, the peak of the random vibratory stresses decreases. The applications of a fuel line model that accurately models welded seams to analyze the effect of local structures on the mechanics properties of the line may provide a basis for line design and optimization.

Key words: coherently welded fuel line; refined modeling; local structure; fluid-solid coupling vibration; mechanics property; modal test

0 引言

近十年来,我国在飞机自主研发方面取得了重大进展。飞机燃油系统的健康服役是确保飞行安全的关键。燃油系统主要负责储存和供应燃油^[1],燃油管路系统作为核心部分,需确保燃油在

输送过程中的安全稳定。由于该系统的设计和布局较为复杂^[2],且还包括焊接管路、弯曲管路和分支管路等多种构型^[3-4],因此精确分析管路内流体流动状态及振动特性就显得尤为重要。同时,为满足飞行动力和高功重比需求,燃油管路具有薄壁大直径、支路多、分布广、结构复杂等特点,且在机载载荷作用下其流固耦合动力学行为较为复杂^[5]。燃油焊接管路是燃油管路系统的重要组成部分,但由于飞机空间结构受限,分支管路与主管

收稿日期:2024-07-28

基金项目:国家自然科学基金(51775477)

路常采用焊接方式进行连接以适应紧凑布局,而焊接各区域间的力学和物理性能差异较大,管路在安装过程中存在较大预应力且受外部载荷作用明显,故在多种因素影响下,管路故障频发,我国由于燃油系统故障导致飞机损毁占比高达80.5%^[6]。因此,对带有焊缝及分支结构的飞机燃油管路进行流固耦合力学特性的研究具有重要的工程意义^[7]。

在航空工业中,铝合金由于其轻质和高强度的特性,被广泛应用于飞机燃油管路,同时焊接接头是燃油管路结构中的关键部位。国内外许多学者对铝合金焊接接头的力学性能进行了研究。徐育焯等^[8]采用自熔焊技术对6061-T6铝合金板进行了直接对焊试验,发现所有试样的断裂均发生在焊接区域。OZTURK等^[9]分析了时效时间对接头力学性能的作用。CHOUDHARY等^[10]研究了搅拌摩擦焊接中刀具转速对铝合金接头力学性能的影响。因此,精准评估管路焊接区域的力学特性是研究管路整体力学性能的关键。

为更加准确地对焊接接头进行分析,对焊缝进行精确建模尤为关键,国内外专家学者对此开展了相关研究。初冠南等^[11]基于激光焊接接头的材料性能分布特征,指出合理的焊缝建模会影响仿真精度。CHIOCCA等^[12]考虑几何不连续性和材料非均质微观结构等因素建立了焊缝精准模型,通过试验验证了模型的正确性。GHAFOURI等^[13]通过建立精准焊缝有限元模型,预测了高强度钢T型焊接接头的焊接变形和残余应力。

目前,学者们对燃油管路的研究主要集中在弯管^[14]和连续折弯^[15]等简单管路结构,针对带有焊缝及分支结构管路的研究仍不充分,尤其在燃油焊接管路建模方面,往往都简化或忽略了焊接区域的具体影响,未能详细揭示出不同焊接区域间复杂的相互作用^[16]。

此外,局部结构特征对管路力学性能的影响逐渐成为研究焦点。彭刚等^[17]发现,航空发动机外部管路的外径、跨度和弯曲角度是影响管路振动特性的重要因素。ZHU等^[18]采用流固耦合计算方法研究了三支管的流动侵蚀和变形,发现90°合并角会导致严重的流动侵蚀和变形。

综上所述,国内外学者开始逐渐关注局部结构特征对管路流体流动状态及力学性能的影响。然而,针对飞机燃油焊接管路局部结构特征对其力学特性影响的研究目前仍是亟待深入的工作。基于此,本文对燃油焊接管路进行精细建模和力

学特性分析,研究分支管路弯曲半径及管径比对流体流动状态及力学性能的影响。

1 燃油焊接管路流固耦合数学模型

1.1 固体结构控制方程

在燃油管路的流固耦合分析中,采用有限元法将复杂固体结构离散为多个小单元,单元通过节点连接,每个单元被假定为弹性体,节点处的位移插值函数用于表达单元内部的位移变化^[19]。

首先,在不考虑结构阻尼的情况下建立管路固体场方程:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho_s \ddot{x}_i \quad (1)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为管路结构应力分量; f_i 为管路体积力分量; ρ_s 为管路材料密度; \ddot{x}_i 为管路结构振动加速度分量。

管路力及位移边界条件如下:

$$\sigma_{ij} n_{sj} = \bar{T}_i \quad (2)$$

$$u_i = \bar{u}_i \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 为结构应力张量的分量; n_{sj} 为管路结构边界的单位外法向量在 j 方向的分量; \bar{T}_i 为管路已知面力分量; u_i 为管路已知位移分量; \bar{u}_i 为管路已知结构位移分量。

1.2 流体结构控制方程

由于实际工程应用中燃油管路中流体流动通常处于或接近稳态,所以可以假设流动受到的是稳态附近的小扰动^[20]。通过联立流体流动的连续性方程、运动方程、状态方程以及根据上述假设,得到场方程:

$$p = -k u_{i,i} \quad (4)$$

式中: p 为扰动引起的压力变化; k 为体积模量; $u_{i,i}$ 为体积应变。

燃油刚性固定面边界方程如下:

$$\frac{\partial p}{\partial n_i} = 0 \quad (5)$$

式中: n_i 为燃油边界单位外法线向量。

燃油自由表面边界方程如下:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{g} \ddot{p} = 0 \quad (6)$$

式中: z 为空间坐标,表示竖直方向的坐标分量; g 为重力加速度。

1.3 流固耦合控制方程

在流固耦合分析中,为了确保流体与固体之间的力和运动传递,在耦合界面上流体和弹性体应具有相同的速度和压力,使得流体对弹性体的作用力通过压力传递,而弹性体的表面运动又影响到流体的流动状态。将这些边界条件应用于流固耦合方程,将固体运动方程与流体动力学方程相结合,得到描述整个耦合系统动态行为的方程。

根据上述分析,耦合界面上的法向速度和法向力应保持连续,则有

$$v_{in} = v_f \cdot n_f = v_s \cdot n_s = -v_s \cdot n_s = v_{sn} \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} n_{sj} = \tau_{ij} n_{ij} = -\tau_{ij} n_{sj} \quad (8)$$

式中： v_{in} 为流体在界面处的法向速度分量； v_f 为流体的速度矢量； v_s 为固体的速度矢量； n_s 为结构边界的单位外法向量； v_{sn} 为结构在界面处的法向速度分量； n_{ij} 为流体侧法向量在*j*方向的分量； τ_{ij} 为流体应力张量的分量。

整合上述方程和条件后，利用有限元软件 ANSYS Workbench 进一步分析管路的流固耦合振动问题。

2 燃油焊接管路有限元模型

2.1 铝合金焊接接头参数

2.1.1 金相检测试验

对铝合金焊接接头区域进行金相检测，确定各区域的尺寸参数。具体的相贯焊接试验件及焊接区域金相图见图1。

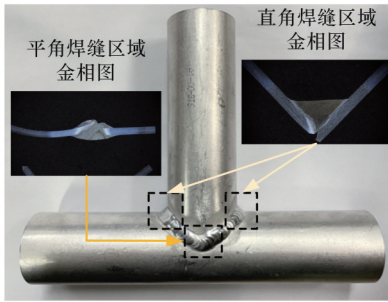


图1 试验件及焊接区域金相图

Fig.1 Test piece and welded area metallograph

通过上述试验，获取T型相贯焊试验件焊接区域各部分尺寸参数，具体如图2和表1所示。

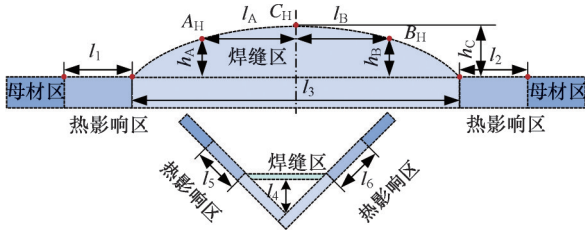


图2 相贯焊试验件焊接区域尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of weld area dimensions for coherence welding test piece

2.1.2 静力微拉伸试验

通过静力微拉伸试验测量母材区、焊缝区及热影响区的试样，获得其弹性模量和泊松比等力学性能参数，具体如表2所示。

2.2 管路物理模型

以带弯头的飞机燃油焊接管路为研究对象，其主管和分支管之间成90°夹角。

2.2.1 管路实体模型

依据金相检测试验结果，建立管路焊接区域精细化模型，具体如图3所示。

表1 焊接区域尺寸参数

Tab.1 Welding area size parameters

参数	尺寸/mm
焊缝厚度 l_4	2.60
直角焊缝支管热影响区宽度 l_5	7.81
直角焊缝主管热影响区宽度 l_6	8.02
外侧余高 h_C	0.72
外侧宽度 l_3	6.61
A点高度 h_A	0.20
A点距中线距离 L_A	1.76
B点高度 h_B	0.31
B点距中线距离 L_B	3.15
平角焊缝支管热影响区高度 l_1	4.74
平角焊缝主管热影响区高度 l_2	6.06

表2 各区域材料性能参数

Tab.2 Material performance parameters by region

区域名称	弹性模量/MPa	泊松比
母材区	75 000	0.35
焊缝区	81 800	0.32
热影响区	74 000	0.29

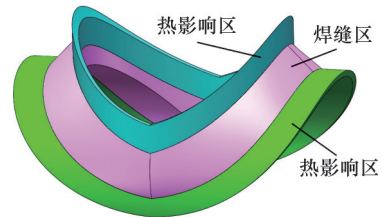


图3 管路焊接区域模型

Fig.3 Pipe welding area model

管路基本几何形状由主管路与分支管路外径 D_w 、主管路长度 L_u 、主管路端面距支管路轴线垂直距离 L_z 等参数进行表征，具体结构参数见表3。根据上述参数，建立图4所示的燃油焊接管路实体域物理模型。

表3 管路结构参数

Tab.3 Pipe structure parameters

参数	设计数据/mm
主管路与分支管路外径 D_w	31.75
主管路与分支管路上内径 D_n	29.97
主管路长度 L_u	550
主管路端面距支管路轴线垂直距离 L_z	350
支管路直管长度 L_l	150
支管路弯曲半径 R_z	116
卡箍与管路接触部分宽度 B_j	15
支管卡箍端面距主管路端面距离 L_k	30
直管卡箍端面距支管路弯头端面距离 L_d	20

飞机燃油管路通常使用卡箍进行约束。文献[21-23]中对管路的分析并未考虑卡箍的影响，仅是对其进行简化约束处理。为真实模拟管路的装机环境，本文研究使用P型卡箍对管路进行约束，

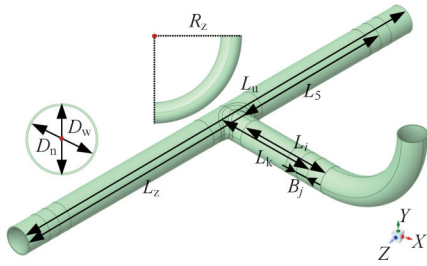


图4 燃油焊接管路实体域物理模型

Fig.4 Physical model of fuel weld line solid domain

并对支架进行分析,以充分考虑支架质量对管路系统振动特性的影响。P型卡箍与支架之间通过螺栓螺母连接,基于此,构建了包括螺栓螺母的管路-卡箍-支架装配模型,如图5所示。

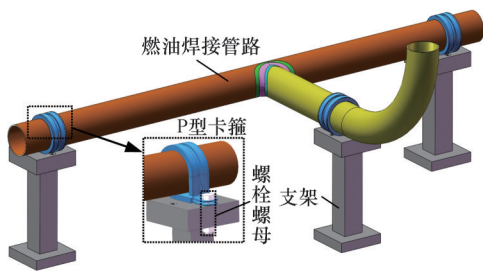


图5 管路与卡箍、支架装配图

Fig.5 Piping with clamps and brackets assembly diagram

2.2.2 管路流体域模型

为深入分析流体流动特性及流体与结构间的耦合效应,构建了燃油焊接管路的流体域模型,具体如图6所示。

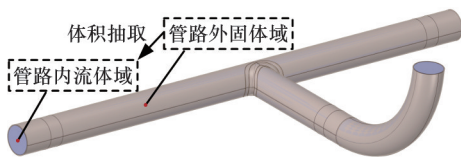


图6 燃油焊接管路流体域模型

Fig.6 Fluid domain model of fuel weld line

2.3 网格模型及无关性

网格质量是影响计算仿真准确性和收敛性的关键因素。ANSYS Workbench软件常用单元质量、纵横比、正交质量和偏斜度来评估网格质量^[24]。依据这些方法,对燃油焊接管路、卡箍及支架的网格模型质量进行了评估,具体如表4所示。

表4 管路各区域及零部件网格质量

Tab.4 Grid quality of pipeline regions and components

名称	单元质量	纵横比	正交质量	偏斜度	网格质量
固体域	0.648	2.438	0.876	0.438	优
流体域	0.793	1.977	0.915	0.151	优
卡箍	0.876	1.646	0.953	0.003	优
螺栓螺母	0.928	1.379	0.702	0.219	优
支架	0.825	1.883	0.991	0.244	优

通过上述划分方法得到燃油焊接管路、卡箍及支架网格模型如图7所示。

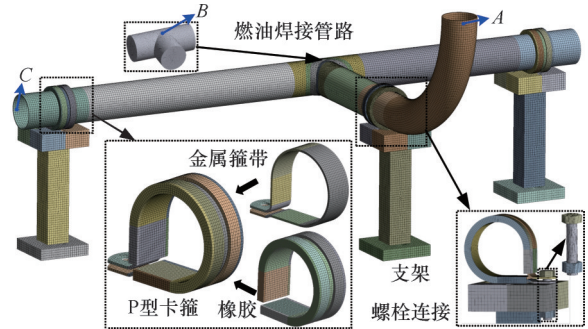


图7 管路、卡箍及支架网格模型

Fig.7 Mesh modeling of pipes, clamps and brackets

使用多参数和多节点的方法对管路进行网格无关性验证。在控制流体域入口速度为9 m/s、出口压力为0.5 MPa的条件下,选择管路支管入口端外表面的关键点A,比较不同网格数下的应力;选择流体域焊接区域的关键点B,比较不同网格数下的流速;选择管路内表面出口端的关键点C,比较不同网格数下的随机振动应力值。具体关键点位置的应力、流速和随机振动应力值随网格数量变化的情况如图8所示。由图8可知,当网格数达到200 000后,参数值波动影响可以忽略。因此,本文使用213 932个网格进行分析,同时,后续其他模型的网格划分也将采用相同方法进行网格无关性验证。

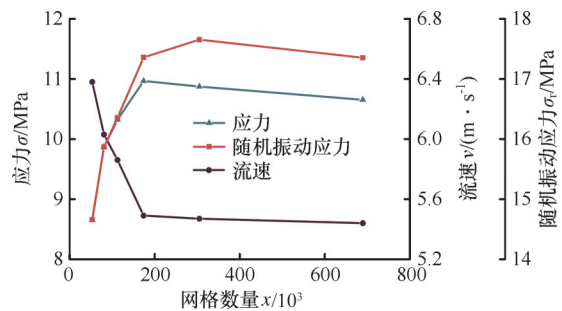


图8 多参数和多节点下网格无关性验证

Fig.8 Verification of mesh-independence under multi-parameter and multi-node

2.4 边界条件设定

2.4.1 固体边界条件设定

在实际管路系统中,卡箍与管路之间几乎没有相对运动,因此使用线性接触模式,忽略摩擦效应的影响,将卡箍与管路之间设置为绑定接触,具体边界条件设定如图9所示。

2.4.2 流体边界条件设定

在流体分析中,管内介质为航空燃油,密度为779.6 kg/m³,动力黏度为0.001 154 kg/(m·s)。根据雷诺数 Re 值判断流体的流动状态:

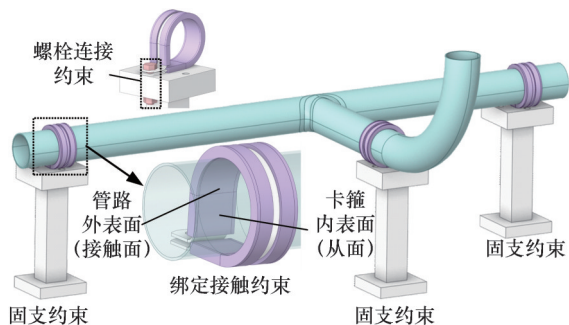


图9 固体边界条件设定

Fig.9 Solid boundary condition setting

$$Re = \frac{\rho_f v D_n}{\mu} \quad (9)$$

式中： ρ_f 为流体的密度； v 为流速； D_n 为管路的内径； μ 为流体的动力黏度。

计算得到燃油的雷诺数为 20 246, 远大于 2300, 故管路内流体的流动为湍流状态。本研究以带有焊缝和分支结构的飞机燃油管路为研究对象, 不同几何结构会导致流体流动状态的复杂性, 包括流动分离、二次流等现象。Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型在模拟复杂几何结构中的湍流流动时具有优势, 能够更好地反映燃油在管路中的真实流动状态。为准确模拟流固耦合力学行为, 选择适用于强耦合情况的 Coupled 耦合算法进行求解, 以确保计算结果的准确性^[25]。

3 管路局部结构特征对力学特性影响

3.1 支管弯曲半径对力学特性影响

3.1.1 不同弯曲半径支管模型

为探究支管弯曲半径对管路力学性能的影响, 同时依据飞机在不同飞行阶段的流量变化确定流速工况, 并根据燃油各子系统工作压力选择合适的压力工况, 基于此分别控制流体域入口速度为 9 m/s、出口压力为 0.5 MPa, 后续均使用此参数进行分析。支管弯曲半径 R 分别为 50、80、116、150 mm, 具体如图 10 所示。

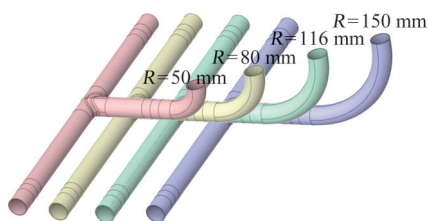


图10 支管不同弯曲半径管路模型

Fig.10 Modelling of pipelines with different bending radii for branch pipes

3.1.2 管路流体域速度场及压力场分析

由图 11 可知, 在 4 种弯曲半径下, 弯管外侧的速度分布高于内侧。这是因为流体流经弯管时,

受惯性作用向外侧移动, 导致外侧流速增大。当弯曲半径 R 较小时, 内外侧速度差异显著, 而在 R 为 116 mm 和 150 mm 的弯管中, 速度分布较为均匀。

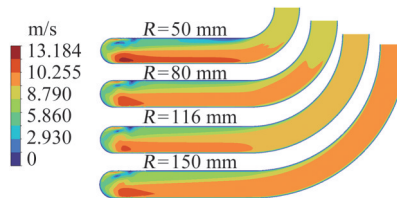


图11 不同弯曲半径下弯管区域横截面速度场分布

Fig.11 Velocity field distribution in the cross-section of the bend region under different bending radii

根据图 12 可知, 由于流体受到弯管半径的影响, 其内部受到离心力作用, 向外侧壁面挤压, 产生较高的压力。同时, 局部支管内沿径向存在显著的压力梯度, 内侧壁面附近区域的压力较小, 外侧壁面附近区域的压力较大。

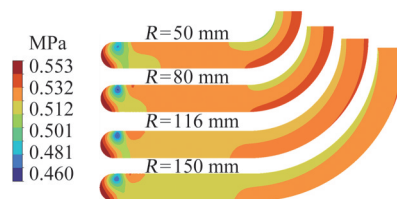


图12 不同弯曲半径下弯管区域横截面压力场分布

Fig.12 Pressure field distribution in the cross-section of the bend region under different bending radii

3.1.3 管路固体域应力分析

由图 13 可知, 在 4 种不同弯曲半径下, 管路整体应力分布呈现波纹式不均匀特征。随着弯曲半径的增大, 管路内壁面最大应力水平相应增大, 并且弯曲应力与弯曲半径近似成正比。因此, 在设计管路时, 应根据系统的空间布局和材料的弯曲应力承受范围, 合理选择弯曲半径, 以避免应力集中和材料疲劳。

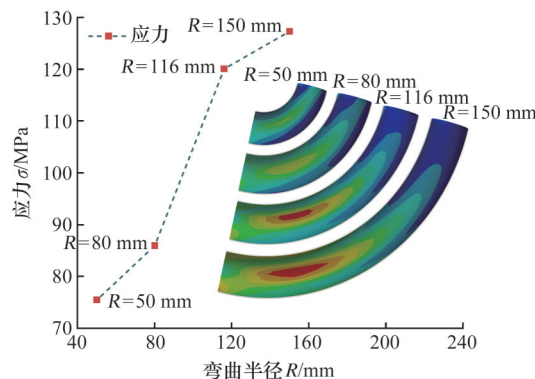


图13 不同弯曲半径下弯管内壁面应力曲线及应力

Fig.13 Stress curves and stress diagrams of the inner wall surface of the pipe under different bending radii

3.1.4 管路固体域随机振动特性分析

由图 14 可知,随着弯曲半径的增大,管路的固有频率普遍减小。这是因为较大的弯曲半径会降低管路刚度,同时增大系统质量,使管路更容易发生振动,从而导致固有频率降低。

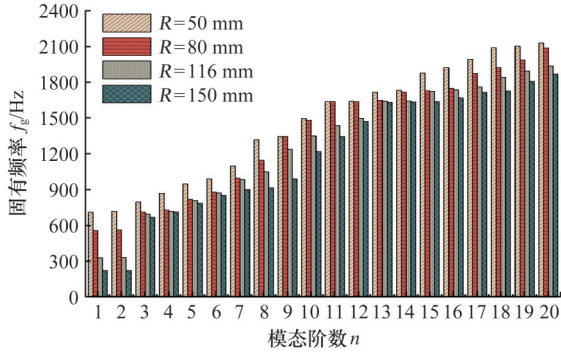


图 14 不同弯曲半径下管路前 20 阶固有频率对比

Fig.14 Comparison of the first 20 orders of intrinsic frequency of the pipeline under different bending radii

以管路进口弯管与进口直管交界处为监测点,分析不同弯曲半径的弯管在 x 轴向激励下的随机振动应力-频率响应,探究其对随机振动响应的影响规律。如图 15 所示,随着弯曲半径的减小,一阶固有频率的应力峰值降低,且频率移向更高范围。这是因为较小的弯曲半径增大了管路的局部刚度,同时减小了系统质量,提高了系统的固有频率。此外,弯管与直管交界处的惯性随着弯曲半径的减小而减小,导致该处应力峰值较低。因此,对于较高频率环境下工作的管路,减小弯曲半径可以提高固有频率,从而减小由外部振动激励引起的应力响应。

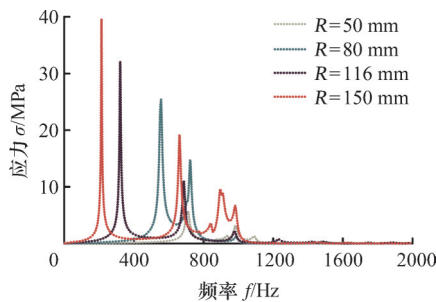


图 15 不同弯曲半径下监测点应力-频率响应曲线

Fig.15 Stress-frequency response curves at monitoring points under different bending radii

3.2 管路支管与主管管径比力学特性影响

3.2.1 支管与主管不同管径比模型

依据 3.1 节设置的初始条件,选取支管与主管的管径比分别为 1:2、2:3、5:6 和 1:1 的管路作为研究对象,具体如图 16 所示。

3.2.2 管路流体域速度场及压力场分析

由图 17 可知,在较小的管径比下,如 1:2 和

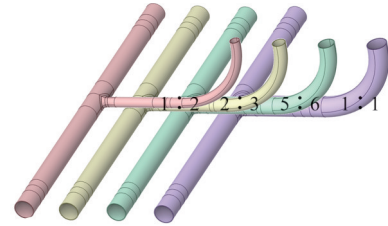


图 16 支管与主管不同管径比模型

Fig.16 Modeling of different pipe size ratios for branch and mains

2:3,支管与主管交界处的流速增大,形成明显的速度峰值。同时,在各管径比下均可观察到流体在焊接区域中间管壁处的速度突然降低,这是由于流体流动分离,分离后的流体会在管路后某处重新附着,导致湍流和混合增强。

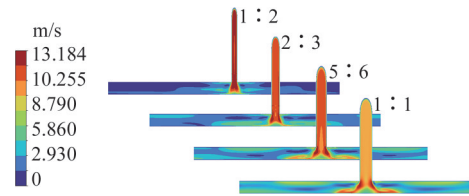


图 17 不同管径比下流体域横截面速度场分布

Fig.17 Cross-sectional velocity field distribution in fluid domain under different pipe diameter ratios

由图 18 可知,随着管径比的减小,主管区域的压力峰值降低。在较小管径比的支管中,压力场的非均匀性更加明显,而在较大管径比的支管中,压力场分布更为均匀。

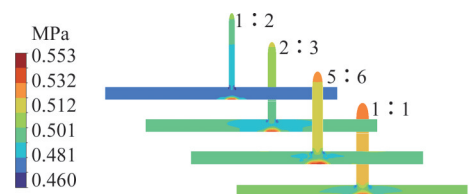


图 18 不同管径比下流体域横截面压力场分布

Fig.18 Cross-sectional pressure field distribution in fluid domain under different pipe diameter ratios

由图 19 可知,随着管径比的增大,速度峰值减小,速度场分布趋于均匀。较小的管径比增大了支管内的流速,而较大的管径比提供了更大的流动空间,降低了速度变化梯度,使流动更顺畅。

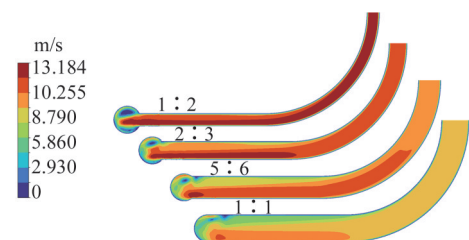


图 19 不同管径比下流体域竖截面速度场分布

Fig.19 Vertical sectional velocity field distribution in fluid domain under different pipe diameter ratios

在实际工程应用中,为减小流体摩擦损失,应选用更大的管径比。若需在特定区域内增大流速以促进混合,则较小的管径比更为适用。

由图20可知,随着管径比的增大,压力场分布逐渐均匀,流体进入直管区域后,保持相对一致的压力分布。

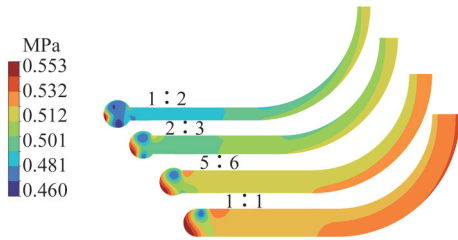


图20 不同管径比下管路流体域横截面压力场分布
Fig.20 Cross-sectional pressure field distribution in pipeline fluid domain under different pipe diameter ratios

3.2.3 管路固体域应力分析

由图21可知,当管径比为1:2时,应力达到最小值,而在管径比为2:3时,应力值最高。同时,管径比为1:2时应力分布较均匀,而在2:3时应力集中较为明显。这表明,在管路设计中,管径比对应力分布的影响较为复杂,不仅受几何尺寸影响,还与加载情况和边界约束等条件有关。

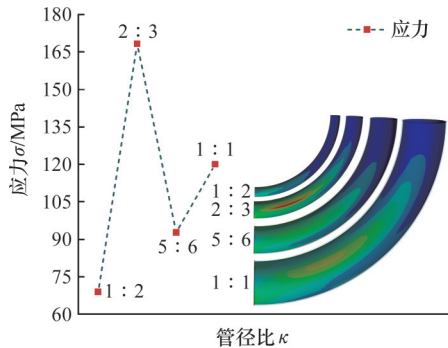


图21 不同管径比下管路弯管区域应力分布云图
Fig.21 Stress distribution of pipe bending region under different pipe diameter ratios

3.2.4 管路固体域随机振动特性分析

由图22可知,在低阶频率阶段,不同管径比间的频率差异明显。第1阶频率中,管径比为1:1时的频率最高,而管径比为1:2时的频率最低,说明较小的管径比会降低固有频率。中间阶数的频率中,不同管径比间的频率值有交叉,固有频率大致相同。这表明特定振动模态受管径比影响较小,或不同的影响因素在这些模态上相互抵消。

以管路进口弯管与进口直管交界处为监测点,分析不同管径比下监测点在x轴向激励下x方向的随机振动应力-频率响应,探讨不同管径比对随机振动响应的影响规律。由图23可知,在低

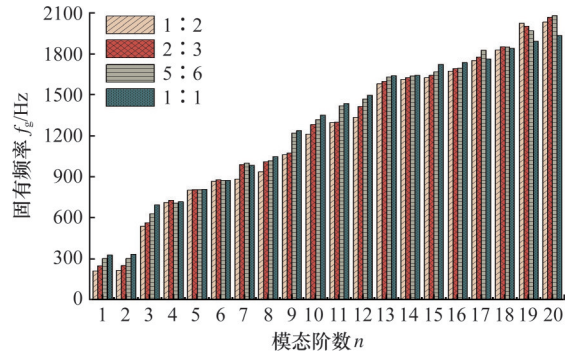


图22 不同管径比下管路前20阶固有频率对比
Fig.22 Comparison of the first 20 orders of intrinsic frequency of pipelines under different pipe diameter ratios

频区间出现显著的应力峰值区域,对应管路的基频模态,随后出现多个较小的峰值区域。不同管径比的基频峰值高度不同,随着管径比的增大,应力峰值逐渐降低,说明管径比的变化直接影响管路的动态特性。

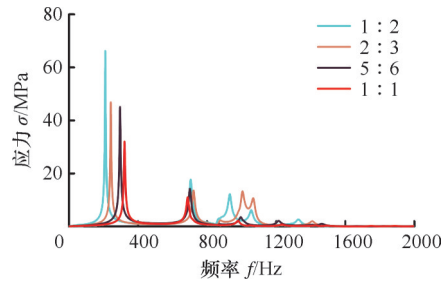


图23 不同管径比下监测点应力-频率响应曲线
Fig.23 Stress-frequency response curves at monitoring points under different pipe diameter ratios

4 燃油焊接管路力学特性试验研究

开展燃油焊接管路自由模态和约束模态试验,以验证所建立流固耦合模型的正确性,具体模态试验如图24所示。

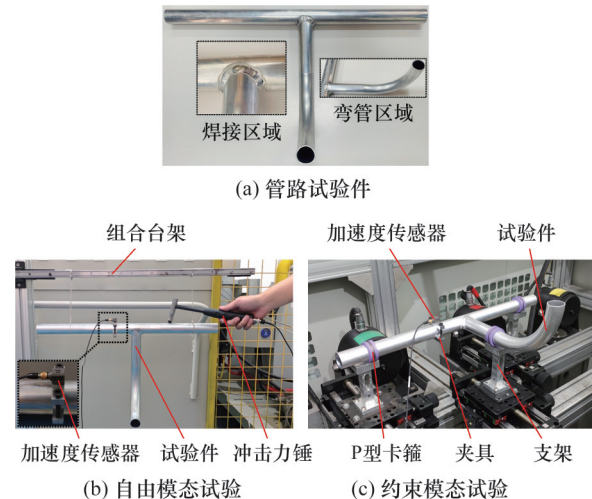


图24 模态试验件及管路安装
Fig.24 Modal test piece and piping installation

分别将仿真计算得到的固有频率 f_g 与试验结果进行对比,发现自由模态仿真与试验最大误差为7.92%,约束模态仿真与试验的最大误差为8.09%,具体如图25和图26所示。结果表明,仿真与试验数据具有较高的一致性,验证了所建立的流固耦合模型及参数设置的正确性。

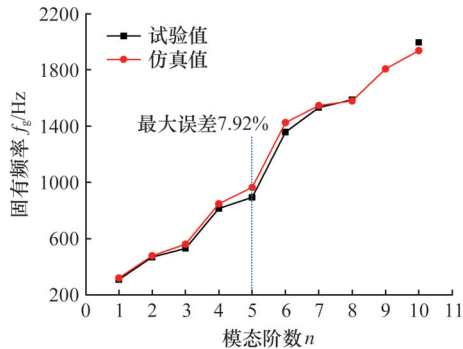


图25 自由模态试验与仿真固有频率对比

Fig.25 Comparison of intrinsic frequencies between free mode test and simulation

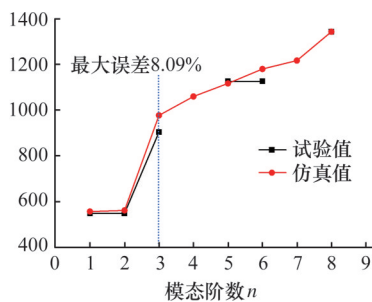


图26 约束模态试验与仿真固有频率对比

Fig.26 Comparison of intrinsic frequencies between constrained modal test and simulation

5 结论

1)通过金相检测和微拉伸试验获取焊接管路焊接区域的微观结构尺寸和力学性能参数,构建了高精度燃油焊接管路有限元模型。模态试验验证表明,自由模态仿真与试验的最大误差为7.92%,约束模态最大误差为8.09%,验证了所建立有限元模型及参数设置的正确性。

2)研究了管路弯曲半径和管径比对飞机燃油焊接管路力学性能和振动特性的影响,结果表明,增大弯曲半径有助于流场和压力场分布更加均匀,但同时会导致内侧壁面应力上升和固有频率下降。提高管径比也能使流场和压力场分布更均匀,但对应力分布的影响较为复杂,受到几何尺寸、材料属性、载荷和约束条件的共同影响。在低阶频率处,不同管径比的频率差异显著,中阶频率时,频率值相近。随着管径比的增大,随机振动应力峰值逐渐降低。

参考文献:

- [1] LI Jiajin, KING S, JENNIONS I. Intelligent Fault Diagnosis of an Aircraft Fuel System Using Machine Learning—a Literature Review [J]. Machines, 2023, 11(4):481.
- [2] 刘德刚,王澍,朱德轩.民用飞机燃油系统管路设计研究[J].装备制造技术,2014(8):223-225.
LIU Degang, WANG Shu, ZHU Dexuan. Civil Aircraft Fuel System Conveyance Design Research [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014 (8):223-225.
- [3] 温锐杰.民机燃油焊接管路单元可靠性研究[D].秦皇岛:燕山大学,2022.
WEN Ruijie. Study on Reliability of Fuel Welding Pipeline Unit of Civil Aircraft [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [4] 彭远卓.飞机供油系统汇流三通管入口流量均衡性研究及优化[D].南昌:南昌航空大学,2021.
PENG Yuanzhuo. Research and Optimization of Inlet Flow Equilibrium of Confluence Tee in Aircraft Fuel Supply System [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2021.
- [5] 周瑞祥,李娜,苏新兵.飞机复杂燃油管路压力动态研究[J].液压与气动,2006,30(10):23-25.
ZHOU Ruixiang, LI Na, SU Xinbing. Research on Pressure Dynamic Characteristic of Airplane Complex Fueling Pipelines [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2006, 30(10):23-25.
- [6] 车世超.民用飞机燃油管路流固耦合振动频域特性分析[D].秦皇岛:燕山大学,2021.
CHE Shichao. Frequency Domain Characteristic Analysis of Fluid-structure Interaction Vibration of Civil Aircraft Fuel Pipeline [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [7] 丁亚红,顾伟,李洪林,等.LF2铝合金燃油导管接头焊缝开裂原因及改进[J].理化检验-物理分册,2021,57(10):68-71.
DING Yahong, GU Wei, LI Honglin, et al. Cracking Causes and Improvement of Joint Weld of LF2 Aluminum Alloy Fuel Pipe [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2021, 57(10):68-71.
- [8] 徐育焱,李超然,李敬勇,等.工艺参数对6061-T6铝合金激光焊接接头组织及性能的影响[J].热加工工艺,2023,52(21):26-31.
XU Yulang, LI Chaoran, LI Jingyong, et al. Influence of Process Parameters on Microstructure and Properties of 6061-T6 Aluminum Alloy Laser Welded Joint [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (21):26-31.
- [9] OZTURK F, SISMAN A, TOROS S, et al. Influ-

- ence of Aging Treatment on Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(2):972-975.
- [10] CHOUDHARY S, CHOUDHARY S, VAISH S, et al. Effect of Welding Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al6061 Aluminum Alloy Joints[J]. *Materials Today:Proceedings*, 2020, 25:563-569.
- [11] 初冠南, 王小松, 刘钢, 等. 激光焊管内高压成形焊缝有限元建模方式[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(22):34-39.
CHU Guannan, WANG Xiaosong, LIU Gang, et al. Laser Weld-seam Modeling for Finite Element Analysis during Tailor-welded Tube Hydroforming [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(22):34-39.
- [12] CHIOCCA A, FRENDO F, AIELLO F, et al. Influence of Residual Stresses on the Fatigue Life of Welded Joints. Numerical Simulation and Experimental Tests[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 162:106901.
- [13] GHAFOURI M, AHOLA A, AHN J, et al. Welding-induced Stresses and Distortion in High-strength Steel T-joints; Numerical and Experimental Study[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 189:107088.
- [14] 张林. 航空发动机燃油管路振动分析[D]. 太原:中北大学, 2023.
ZHANG Lin. *Vibration Analysis of Aero-engine Fuel Pipeline*[D]. Taiyuan:North University of China, 2023.
- [15] 廖桔, 赵紫豪, 朱林峰, 等. 飞机燃油管道随机振动分析与设计优化[J]. *管道技术与设备*, 2021(5):1-6.
LIAO Ju, ZHAO Zihao, ZHU Linfeng, et al. Random Vibration Analysis and Design Optimization of Aircraft Fuel Pipeline[J]. *Pipeline Technique and Equipment*, 2021(5):1-6.
- [16] 齐晓燕, 陆清. 基于ANSYS的飞机液压管路系统流固耦合分析[J]. *液压与气动*, 2015, 39(10):71-74.
QI Xiaoyan, LU Qing. Fluid-structure Interaction Analysis Based on ANSYS for Airplane Hydraulic Tube System[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2015, 39(10):71-74.
- [17] 彭刚, 于乃江, 贾文强. 航空发动机外部管路的结构与动力学特征参数分析[J]. *航空发动机*, 2017, 43(5):1-6.
PENG Gang, YU Naijiang, JIA Wenqiang. Analysis of Structural and Dynamical Characteristic Parameters of External Pipes for Aeroengine[J]. *Aeroengine*, 2017, 43(5):1-6.
- [18] ZHU Hongjun, ZHANG Wenli, FENG Guang, et al. Fluid-Structure Interaction Computational Analysis of Flow Field, Shear Stress Distribution and Deformation of Three-limb Pipe[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2014, 42:252-262.
- [19] PAÏDOUSSIS M P, LI G X. Pipes Conveying Fluid: a Model Dynamical Problem[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1993, 7(2):137-204.
- [20] BATHE K J, ZHANG Hou. Finite Element Developments for General Fluid Flows with Structural Interactions [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 60(1):213-232.
- [21] 张忠义. 航空发动机管路流固耦合振动特性分析及主动控制技术研究[D]. 烟台:烟台大学, 2023.
ZHANG Zhongyi. *Vibration Analysis of Aeroengine Pipeline Considering Fluid-Structure Interaction and Active Vibration Control Technology*[D]. Yantai: Yantai University, 2023.
- [22] 秦政, 滕云楠. 航空发动机外部管路的振动特性分析[J]. *机械设计*, 2022, 39(增刊1):1-5.
QIN Zheng, TENG Yunnan. Analysis of Vibration Characteristics on Aeroengine External Pipelines[J]. *Journal of Machine Design*, 2022, 39(S1):1-5.
- [23] YU Tao, ZHANG Zhongyi, ZHANG Decong, et al. Vibration Analysis of Multi-branch Hydraulic Pipeline System Considering Fluid-Structure Interaction[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(24):12902.
- [24] 邓记松. 单元与网格密度对有限元分析结果的影响[J]. *石油化工设备技术*, 2017, 38(1):12-15.
DENG Jisong. Effect of Element and Mesh Density on the Results of Finite Element Analysis[J]. *Petro-Chemical Equipment Technology*, 2017, 38(1):12-15.
- [25] 张安龙. 脉动参数对波壁管内流体流动与传热特性的影响研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2022.
ZHANG Anlong. *Study on the Influence of Pulsation Parameters on Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Wave Wall Tube*[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.

(编辑 王昱珺)

作者简介:郭长虹,女,1977年生,博士研究生。研究方向为材料学、流体传动控制。E-mail:guochanghong@ysu.edu.cn。权凌霄* (通信作者),男,1977年生,教授、博士研究生导师。研究方向为飞机管路系统动力学分析。E-mail:lingxiao@ysu.edu.cn。

本文引用格式:

郭长虹,狄梦然,宫瀚文,等. 航空燃油管路焊缝分区域建模及其对管路力学特性影响研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(9):1916-1924.

GUO Changhong, DI Mengran, GONG Hanwen, et al. Modeling of Aviation Fuel Pipe Welds in Different Regions and Its Effect on Mechanics Properties of Pipes[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(9):1916-1924.