

## 考虑整机变形的氢氧发动机管路结构静强度分析

柳恺骋<sup>1,2</sup>, 刘墨俞<sup>1,2</sup>, 王新军<sup>1,2</sup>, 郑孟伟<sup>1,2</sup>, 李晶<sup>3</sup>

(1. 北京航天动力研究所, 北京 100076; 2. 低温液体推进技术实验室, 北京 100076;  
3. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:**为了在液体火箭发动机管路结构静强度分析时考虑整机变形的影响,采用以实体单元、壳单元和梁单元为主的建模方法,建立了大推力补燃氢氧发动机试验装置的有限元模型,在热载荷、压力载荷和重力载荷的共同作用下,基于整机模型对管路结构进行了静力计算,并将计算结果与试验测量结果进行了对比。在此基础上,计算了不同类型载荷作用下的整机变形,重点分析了温度载荷的影响。对于典型管路,进一步采用子模型方法计算了不同类型载荷作用下的管路应力,对比了是否考虑整机变形对管路应力水平的影响。结果表明:基于整机模型进行的静力仿真基本能够正确反映出发动机热试验状态下各管路结构的受力状态;对氢氧发动机而言,温度载荷对整机变形的影响最大,整机变形对管路结构应力水平的影响较大且不容忽视,故有必要考虑整机变形对管路结构的影响来进行静强度分析。

**关键词:**氢氧发动机;管路;静强度分析;整机变形;子模型

中图分类号:V414.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9374(2024)03-0083-07

## Static structural analysis of pipeline structures of hydrogen/oxygen rocket engine considering structural integral deformation

LIU Kaicheng<sup>1,2</sup>, LIU Zhaoyu<sup>1,2</sup>, WANG Xinjun<sup>1,2</sup>, ZHENG Mengwei<sup>1,2</sup>, LI Jing<sup>3</sup>

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

2. Laboratory of Cryogenic Liquid Propulsion Technology, Beijing 100076, China;

3. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to take the structural integral deformation into consideration during the static structural analysis for pipeline structures of the liquid rocket engine, the finite element model of the large-thrust staged combustion cycle hydrogen/oxygen engine was established using solid, shell and beam elements. Meanwhile, the static structural analysis was performed under the joint action of the thermal, pressure and gravity loads. The simulation results were compared with the measured data from the ground firing test. Based on this, the integral deformation of the engine was calculated under different types of loads and the influence of thermal load was analyzed. For typical pipeline structures, the stress distribution was

收稿日期:2022-01-16 修回日期:2024-02-25

基金项目:中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XY-06)

作者简介:柳恺骋(1990—),男,博士,工程师,研究领域为液体火箭发动机结构强度、振动。

引用格式:柳恺骋,刘墨俞,王新军,等.考虑整机变形的氢氧发动机管路结构静强度分析[J].火箭推进,2024,50(3):83-89.

LIU K C, LIU Z Y, WANG X J, et al. Static structural analysis of pipeline structures of hydrogen/oxygen rocket engine considering structural integral deformation[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(3): 83-89.

calculated under different types of loads with the submodel method and the influence of the integral deformation on stress level was further investigated. The results show the static structural analysis of the established finite element model could basically reflect the stress state of the engine under the ground firing test state. For hydrogen/oxygen rocket engine, the thermal load has the greatest influence on the integral deformation of the engine, which need to be considered during strength analysis for pipeline structures of the engine.

**Keywords:** hydrogen/oxygen rocket engine; pipeline structures; static structural analysis; integral deformation; submodel

## 0 引言

在液体火箭发动机领域,从推进剂的角度而言,液氢相较于煤油、甲烷等其他燃料具有高比冲且无污染的显著优势<sup>[1]</sup>;从循环方式的角度而言,补燃循环相较于发生器循环或膨胀循环等其他循环方式可以实现更高的室压和更大的推力<sup>[2]</sup>。因此,大推力补燃氢氧发动机的研制为重型运载火箭的研制奠定了重要基础<sup>[3-4]</sup>。

管路系统作为液体火箭发动机重要组成部分,承担着介质运输和结构连接的重要作用。在发动机工作环境下,管路结构不仅需要承受高温燃气或低温推进剂所带来的温度载荷,同时还承受着介质压力载荷,尤其对于大推力补燃氢氧发动机,温度和压力载荷环境均更为严苛<sup>[4]</sup>。在严苛的载荷环境以及液体火箭发动机追求极致推重比的背景下,管路结构承受的静态应力水平往往已经较高,同时,由涡轮泵、推力室等振动量级较大的结构所传来的动载荷不可避免。在多振源、强振动、高压、高低温的恶劣工作环境中,管路结构故障频发<sup>[5-7]</sup>,作为故障率最高的组件之一,管路结构强度问题对整机结构完整性构成了严重威胁。

在管路结构强度问题研究方面,大部分研究聚焦于单个管路的强度分析。例如,Rouse 等<sup>[8]</sup>采用轴对称三维实体模型对内压作用下的弯管强度进行了分析;崔海涛等<sup>[9]</sup>在对复合材料弯管强度分析时,对弯管两端施加固支约束,应变计算值和测量值取得了较好的一致性;Weber 等<sup>[10]</sup>则在弯管两端连接足够长的直管段以尽可能降低边界条件对计算结果的影响。对于单个管路,可以采用三维实体模型、施加端部固支约束来进行初步的强度仿真,然而在管路系统中,特别是在液体火箭发动机整机结构中,一方面,全部采用三维实体单元建模将极大地增加计

算量,因此,有必要对高计算效率的建模方法展开研究;另一方面,管路两端往往与涡轮泵、推力室或阀门等组件通过法兰连接,单个管路分析所采用的端部固支无法模拟相连组件对边界条件的影响,尤其对于氢氧发动机,推进剂和燃气带来的高低温环境所引起的整机结构热变形使得管路两端边界条件变得更加复杂,然而在工程中,在管路的结构强度设计时,往往并未考虑整机结构变形对管路结构强度问题的影响。在火箭发动机追求极致性能的背景下,为进一步提高管路结构强度计算的准确性,有必要考虑相邻组件连接边界的影响,即考虑整机结构变形的影响,对管路结构进行强度分析。

近年来,随着对航空航天装备性能的追求和计算能力的进步,开始有学者尝试基于整机模型对结构强度问题展开研究。王开明等<sup>[11]</sup>基于航空发动机整机模型开展了支点刚度与变形分析研究,为发动机总体结构方案评估及优化提供了重要输入。陈晓豫等<sup>[12]</sup>采用先整体后局部的分析思路,结合使用 CAEPIPE 和 ABAQUS 软件,给出了一种飞机管路系统强度快速分析方法。Yoo 等<sup>[13]</sup>建立了某液体火箭发动机整机有限元模型,计算获得了不同载荷状态下的整机应力分布以及低阶自由模态。Tani 等<sup>[14]</sup>基于三维流场计算了 LE-X 发动机的压力和温度分布,并对推力室进行了失效风险评估。

基于整机结构进行管路强度分析,不仅能够考虑整机变形影响,从而获得更加准确的结构静力计算结果,基于静力结果还可以在后续动强度分析时对结构刚度进行修正并且在动力学响应中考虑静态载荷的贡献,从而为开展更精确的动强度评估奠定基础<sup>[15-16]</sup>。故考虑整机变形影响的管路静强度仿真将是结构迈向高可靠性以及重复使用的必经环节<sup>[17]</sup>。

综上,本文基于某型号大推力补燃氢氧发动机试验装置建立了整机有限元模型,考虑热载荷、压

力载荷和重力载荷的共同作用,对发动机中主要管路结构进行了静强度计算,并与由发动机热试验状态应变测量结果转化得到的等效应力结果进行了对比。在此基础上,通过仿真计算了不同类型载荷作用下的整机变形,并重点对温度载荷的影响进行了分析。对于典型管路,进一步采用子模型方法在不同类型载荷作用下进行了静强度计算,从而对比分析了是否考虑整机变形对管路应力水平的影响。

## 1 有限元建模

### 1.1 零组件建模

图 1 给出了大推力补燃氢氧发动机试验装置的有限元模型。试验装置主要由机架、推力室模拟器、预燃室、氢涡轮泵、氧涡轮泵、阀门、管路和伺服拉杆等组件构成。进行有限元建模时,为在保证计算精度的同时尽可能提高计算效率,采用了以实体单元、壳单元和梁单元为主的混合单元类型的建模方法。其中,机架、推力室模拟器、管路等薄壁结构采用壳单元建模,涡轮泵、阀门、多通等采用实体单元建模,伺服拉杆采用梁单元进行建模。组件间主要采用绑定接触连接,需要指出的是:伺服拉杆与支耳连接处实际通过球铰连接,因此,在有限元模型中,拉杆端部节点与支耳孔边节点间建立约束方程,仅保留相应节点的转动自由度以模拟球铰连接,如图 2(a)所示;管路身部为壳单元,与管路相连法兰为实体单元,二者间同样采用约束方程建立连接<sup>[18]</sup>,如图 2(b)所示。

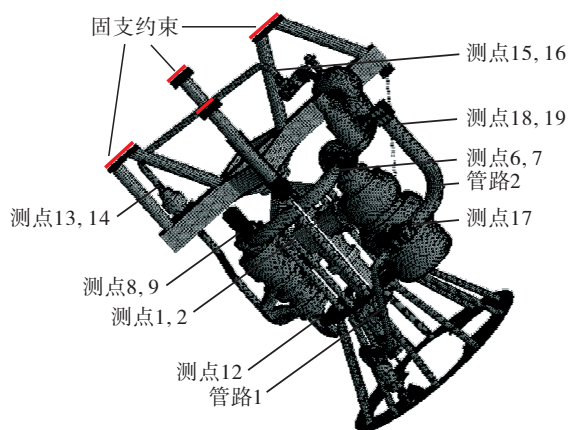


图 1 发动机整机有限元模型及应变测点布置

Fig. 1 Finite element model of the engine and the arrangement of strain measuring points

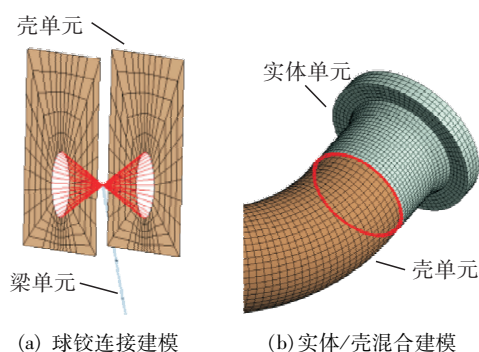


图 2 典型组件建模方法

Fig. 2 Modeling method of typical components

### 1.2 边界条件及载荷

试验时,试验装置斜  $45^\circ$  与试验台对接安装,因此,边界条件方面,在机架顶部施加固支约束,如图 1 所示。载荷方面,由于试验装置在预冷状态和稳定工作状态所承受的温度和压力载荷差异较大,因此,分别针对这两种试验状态的载荷工况进行了两组静力仿真。在稳态阶段,施加的温度载荷包括:基于系统仿真并结合试验温度测点数据进行适当修正获得的温度参数;对氢泵、液氢介质管路及相连阀门施加液氢介质温度;对氧泵、液氧介质管路及相连阀门施加液氧介质温度;对预燃室头部施加壁温测点温度;对热端部件如预燃室身部、氢涡轮、氧涡轮、燃气导管和燃气四通施加壁温测点温度;其余结构为常温,稳态温度载荷分布如图 3(a)所示。施加的压力载荷包括:基于系统仿真获得各管路及相连法兰内壁的压力参数,部分管系中包含阀门,忽略阀门压降对其内壁施加同样的压力载荷,稳态压力载荷如图 3(b)所示。在预冷阶段,由于介质压力极低,因此忽略压力载荷,仅对氢、氧两路预冷系统施加相应的温度载荷,其余结构为常温,如图 3(c)所示。此外,由于管路内压载荷的施加会产生对相连接结构的轴向载荷,从而表现出管路法兰与相邻结构法兰产生分离趋势的效果,因此,在进行整机状态下的管路结构强度分析时,在对管系结构施加内压载荷的同时,还需对相应管系与外部结构相连位置的法兰端面施加分离载荷  $F_s$ ,分离载荷大小为  $F_s = pA$ ,其中,  $p$  为管路内介质压力,  $A$  为管路内截面面积,如图 3(d)所示。

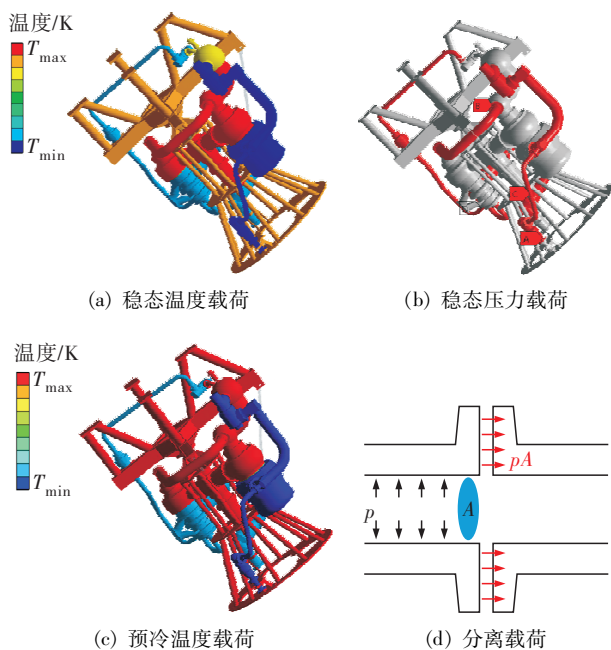


图3 载荷示意图

Fig.3 Schematic of load conditions

## 2 结果与讨论

### 2.1 仿真与测量结果对比

为验证本文采用仿真方法的有效性,首先将稳定状态和预冷状态下的静力仿真结果与试验测量结果进行了对比。试验中,共布置了 19 个应变测点,测点主要布置于各导管法兰附近,其中,主要测点分布如图 1 所示,发动机上管路法兰附近典型测点黏贴位置如图 4 所示。应变片选用了日本 TML 公司生产的 CEFLA-17 型单向低温应变片,采用 1/4 桥三线制接法,以消除温度变化引起的导线电阻变化的影响。另外,通过提前开展零度和液氮温度下的预试验,以获取应变片典型温度下的热输出从而实现实测信号的修正。发动机试车应变测量时,应变片采样频率为 50 kHz,测量获得的应变信号经 10 Hz 低通滤波后作为静应变测量结果<sup>[19-20]</sup>。典型稳态应变测量信号及相应低通滤波信号如图 5 所示。

仿真结果与测量结果对比时,无论预冷状态还是稳定状态,均在仿真模型相应测点位置提取测点附近单向应力最大值,与应变测量低通滤波信号最大值通过乘以材料弹性模量转化得到的应力结果进行比较。



图4 典型管路应变测点

Fig.4 Typical strain gauge instrumentation on the pipe

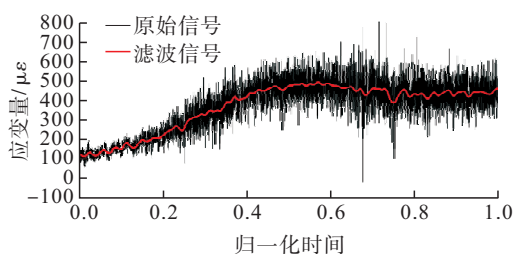


图5 典型稳态应变测量信号

Fig.5 Typical strain measured signal of steady state

稳定状态和预冷状态下共 19 个测点的应力对比结果分别如图 6 和图 7 所示。稳定状态下,测点 6、测点 10、测点 17 和测点 19 的测量值偏高,其余测点仿真结果与测量结果相近;预冷状态下,测点 10 的测量值偏高,测点 17、测点 18、测点 19 的计算值偏高,其余测点仿真结果与测量结果相近。总体而言,无论稳定状态还是预冷状态,仿真结果与测量结果应力水平总体变化趋势吻合较好,仿真与测量获得测点位置的应力状态(拉应力或压应力)基本一致。由此可见,尽管仿真模型中组件连接形式、热载荷的简化处理、不同温度下材料参数以及提取应力结果时测点位置的不同均可能造成仿真结果与测量结果间的差异,但总体而言,建立的仿真模型基本能够正确反映整机结构的受力状态。

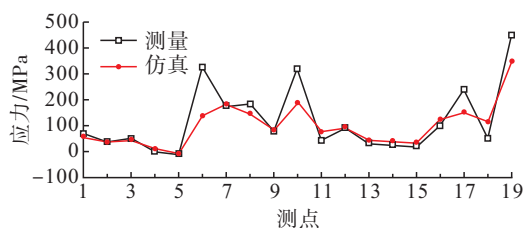


图6 稳定状态仿真与测量结果对比

Fig.6 Comparison of simulation and measured results of steady state



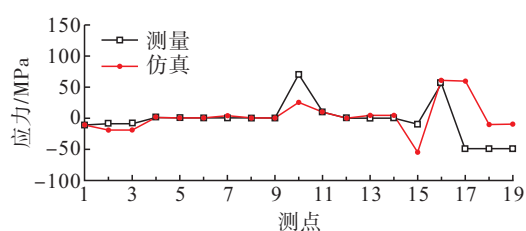
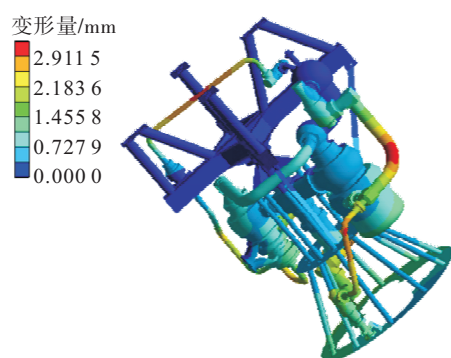


图 7 预冷状态仿真与测量结果对比

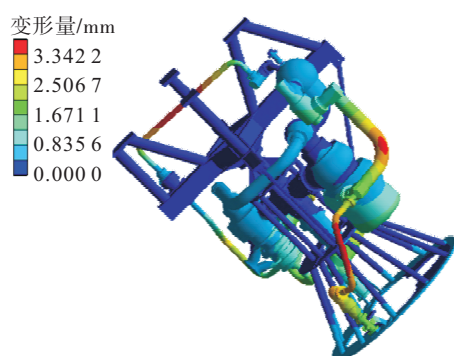
Fig. 7 Comparison of simulation and measured results of pre-cooling state

## 2.2 整机变形对管路结构应力水平的影响

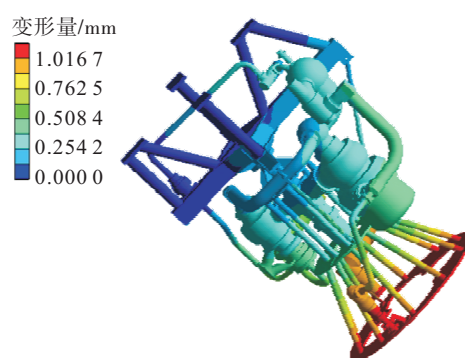
为研究整机变形对管路结构应力分布的影响,基于整机模型,在稳态载荷工况下,考虑各载荷共同作用以及在温度载荷、管路压力载荷和重力载荷的单独作用的情况下,对整机结构进行静力计算,不同载荷作用下的整机变形结果如图 8 所示。由图 8 可知:当载荷单独作用时,温度载荷相较于重力载荷和压力载荷引起的结构变形最大,且变形主要位于管路结构,如图中管路 1 和管路 2 的弯管部分;对比不同载荷引起结构变形的幅值和分布,以综合载荷作用下的变形结果为参照,温度载荷相较于重力载荷和压力载荷对结构变形贡献最大,并且温度载荷作用下的变形结果与综合载荷作用下的变形结果更加相似。



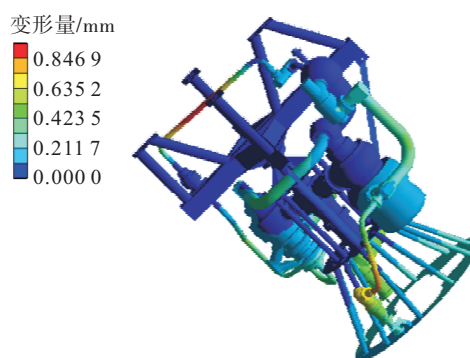
(a) 综合载荷



(b) 温度载荷



(c) 重力载荷



(d) 压力载荷

图 8 不同载荷作用下的整机变形

Fig. 8 Deformation results under different types of loads

在获得不同载荷作用下整机变形计算结果的基础上,为了对变形较大的管路 1 和管路 2 进行精细化强度分析,同时为了避免因管路、法兰两部分单元类型不同造成连接位置应力不连续的问题,进一步采用子模型方法,分别考虑综合载荷、温度载荷和压力载荷这 3 种载荷的情况下,对管路 1 和管路 2 进行静力仿真,从而研究整机变形对管路应力分布的影响。由于重力载荷对管路应力水平影响极小,因此,略去重力载荷单独作用的情况。

建立管路子模型时,管路身部沿壁厚方向采用实体单元划分 3 层网格,子模型切割边界从整机计算结果中提取,如图 9 所示。不同载荷作用下管路 1 和管路 2 的应力计算结果如图 10 所示,由图可知:管路 1 和管路 2 的最大应力,在综合载荷作用下分别约为 408 MPa 和 450 MPa,在温度载荷作用下分别约为 114 MPa 和 214 MPa,在压力载荷作用下分别约为 349 MPa 和 390 MPa,最大应力均位于弯管处。对比图 10(a) 和图 10(c) 可知:温度载荷的作用使得管路 1 和管路 2 的最大应力水平分别提高了 17% 和 15%。综上所述,尽管压力载荷对管路结构

应力水平贡献最大,但对于承受高低温的氢氧发动机,温度载荷引起整机变形进而对管路结构应力水平的影响不容忽视。

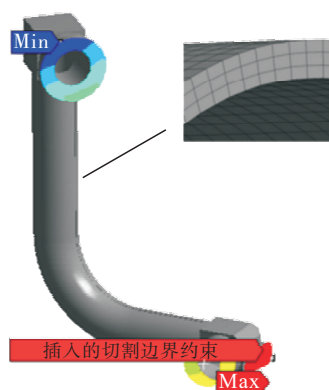


图 9 典型管路子模型

Fig. 9 Submodel of typical pipeline

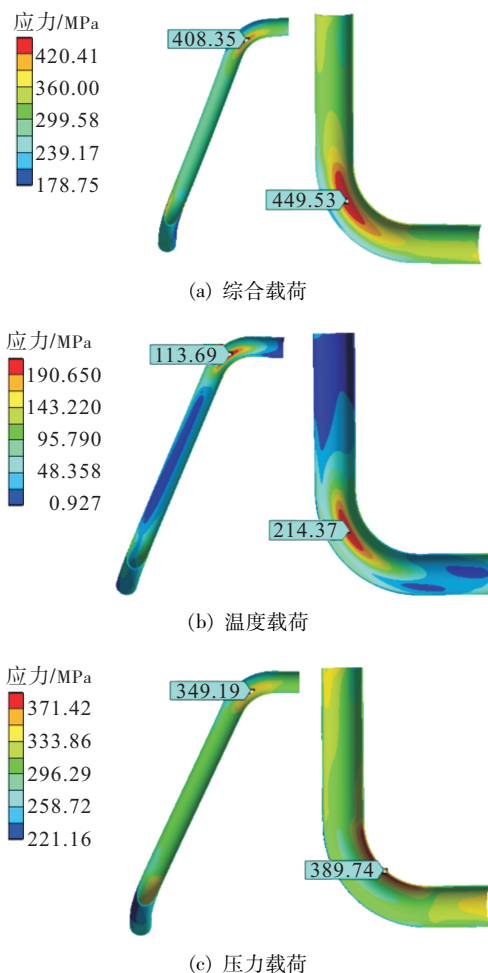


图 10 不同载荷作用下典型管路应力结果

Fig. 10 Stress distribution of typical pipelines under different types of loads

### 3 结论

本文基于某型号大推力补燃氢氧发动机试验装置建立了整机有限元模型,在热载荷、压力载荷和重力载荷的共同作用下对整机进行了静力仿真,对比了主要管路结构的应力仿真结果和发动机热试验测量结果,通过仿真获得了不同类型载荷作用下的整机变形,并重点对温度载荷的影响进行了分析,在此基础上,采用子模型方法,进一步研究了典型管路在不同类型载荷作用下的应力水平,从而明确了以温度载荷为主的综合载荷所引起的整机变形对管路结构应力水平的影响,主要结论如下。

1)采用混合单元建立的整机有限元模型在提高计算效率的同时,基于该整机模型进行静力仿真基本能够正确反映出发动机热试验状态下各管路结构的受力状态。

2)对于氢氧发动机,温度载荷对整机变形的影响最大,以温度载荷为主的各载荷所引起的整机变形对管路结构应力水平的影响较大且不容忽视。在大推力补燃氢氧发动机管路结构静强度设计及分析时,应当充分考虑整机变形对结构强度的影响。

### 参考文献

- [1] 岳文龙,郑大勇,颜勇,等. 我国高性能液氧液氢发动机技术发展概述[J]. 中国航天, 2021(10): 20-25.  
YUE W L, ZHENG D Y, YAN Y, et al. Overview of technical development of high performance LOX/LH<sub>2</sub> in China [J]. Aerospace China, 2021(10): 20-25.
- [2] 金平,蔡国飙. 全流量补燃循环发动机及其特点[J]. 火箭推进, 2003, 29(4): 43-47.  
JIN P, CAI G B. FFSC engine and its characteristics [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2003, 29(4): 43-47.
- [3] 孙纪国,岳文龙. 我国大推力补燃氢氧发动机研究进展[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 19-23.  
SUN J G, YUE W L. Advances of large-thrust staged combustion cycle hydrogen/oxygen rocket engine in China[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(6): 19-23.
- [4] 郑孟伟,岳文龙,孙纪国,等. 我国大推力氢氧发动机发展思考[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(2): 12-17.  
ZHENG M W, YUE W L, SUN J G, et al. Discussion

- on Chinese large-thrust hydrogen/oxygen rocket engine development [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2019, 3(2): 12-17.
- [5] 杜大华, 穆朋刚, 田川, 等. 液体火箭发动机管路断裂失效分析及动力优化[J]. *火箭推进*, 2018, 44(3): 16-22.
- DU D H, MU P G, TIAN C, et al. Failure analysis and dynamics optimization of pipeline for liquid rocket engine[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(3): 16-22.
- [6] 周帅, 林磊, 杜大华, 等. 液体火箭发动机对接焊管道振动疲劳性能研究[J]. *火箭推进*, 2021, 47(3): 90-97.
- ZHOU S, LIN L, DU D H, et al. Study on vibration fatigue of butt welded pipe of liquid rocket engine [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2021, 47(3): 90-97.
- [7] ZHANG W. Failure characteristics analysis and fault diagnosis for liquid rocket engines [M]. Berlin: Springer, 2016.
- [8] ROUSE J P, SUN W, HYDE T H, et al. A method to approximate the steady-state creep response of three-dimensional pipe bend finite element models under internal pressure loading using two-dimensional axisymmetric models [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2014, 136(1): 011402.
- [9] 崔海涛, 温卫东, 佟丽莉. 纤维缠绕复合材料弯管强度分析[J]. *宇航材料工艺*, 2003, 33(6): 39-42.
- CUI H T, WEN W D, TONG L L. Strength analysis of filament-wound pipe [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2003, 33(6): 39-42.
- [10] WEBER J, KLENK A, RIEKE M. A new method of strength calculation and lifetime prediction of pipe bends operating in the creep range [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2005, 82(2): 77-84.
- [11] 王开明, 方雯, 王卫国. 航空发动机支点刚度与整机变形分析方法[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2018, 31(4): 30-36.
- WANG K M, FANG W, WANG W G. A method for evaluating bearing support stiffness and whole engine deformation [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2018, 31(4): 30-36.
- [12] 陈晓豫, 钱文清, 鲍益东, 等. 飞机管路强度快速分析方法[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(21): 85-91.
- CHEN X Y, QIAN W Q, BAO Y D, et al. Rapid analysis method of strength for aircraft pipeline [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(21): 85-91.
- [13] YOO J, JEON S M. Static and dynamic structural analyses for a 750 kN class liquid rocket engine with TVC actuation [J]. *CEAS Space Journal*, 2020, 12(3): 331-341.
- [14] TANI N, YAMANISHI N, KUROSU A. An end-to-end high fidelity numerical simulation of the LE-X engine [C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2012.
- [15] 王帅, 张明明, 刘桢, 等. 预载荷作用下管路结构动强度评估方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(4): 745-750.
- WANG S, ZHANG M M, LIU Z, et al. Dynamic strength valuation method of pipeline structures under preload [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(4): 745-750.
- [16] 王帅, 荣克林, 李佰灵, 等. 航天飞行器管路结构的动力学强度分析与试验[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(2): 93-100.
- WANG S, RONG K L, LI B L, et al. Dynamics strength analysis and test for pipe structures of aerospacecrafts[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, 49(2): 93-100.
- [17] 李斌, 闫松, 杨宝锋. 大推力液体火箭发动机结构中的力学问题[J]. *力学进展*, 2021, 51(4): 831-864.
- LI B, YAN S, YANG B F. Mechanical problems of the large thrust liquid rocket engine [J]. *Advances in Mechanics*, 2021, 51(4): 831-864.
- [18] 叶增荣. 基于 MPC 简化模型的非对称换热器有限元分析[J]. *压力容器*, 2017, 34(5): 38-45.
- YE Z R. Finite element analysis of non-axisymmetric heat exchanger based on MPC simplified model [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2017, 34(5): 38-45.
- [19] 张霁, 翟晓, 刘兵, 等. 固体发动机静强度试验应变数据的分析与处理[J]. *测控技术*, 2016, 35(9): 36-39.
- ZHANG J, ZHAI X, LIU B, et al. Analysis and processing of strain measurement data of solid rocket motor [J]. *Measurement & Control Technology*, 2016, 35(9): 36-39.
- [20] 中国航天工业总公司. 液体火箭发动机应变测量方法: QJ 2967—97 [S]. 北京: 中国航天工业总公司, 1997.