

# 固体火箭发动机工作压强对柔性接头性能的影响

李国才<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1</sup>, 王亦松<sup>1</sup>, 李瑾<sup>1</sup>, 郑永秋<sup>2</sup>

(1. 西安航天动力技术研究所, 陕西 西安 710025;

2. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:** 高工作压强对柔性接头会产生各种不良影响, 甚至会导致柔性接头产生工作失稳现象, 以往的研究并未给出高压下柔性接头摆动力矩降低甚至失稳的原因, 因而给柔性接头设计带来困扰。为研究高工作压强下柔性接头的受力与工作机理情况, 本文以某高压强工况柔性接头为研究对象, 通过ABAQUS有限元软件建立了柔性接头仿真模型, 数值模拟了不同压强柔性接头的变形及摆动工况, 并分析了容压对柔性接头高度及摆动力矩的影响; 对柔性接头不同容压下的高度及摆动力矩进行了试验测试, 可以得出柔性接头高度变化最大偏差在12%以内, 摆动力矩最大偏差在10%以内, 验证了有限元模型的正确性; 最后得到了柔性接头高度及摆动力矩与容压的关系, 给出了计算公式并进行了简便计算, 相关结果可用于指导工程设计。本文根据柔性接头的变形以及摆动力矩变化的趋势, 从宏观角度分析了柔性接头摆动力矩在高容压下降低的原因, 即随着容压的升高, 柔性接头因变形引起的受力不对称性导致摆动力矩不断降低直至失稳; 另外, 本文给出了评价柔性接头稳定性的方法, 为后续柔性接头设计提供了参考。

**关键词:** 柔性接头; 失稳; 高压强; 摆动力矩

**中图分类号:** V435

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2023.10.0007

**引用格式:** 李国才, 刘凯, 王亦松, 等. 固体火箭发动机工作压强对柔性接头性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 157-164.

LI Guocai, LIU Kai, WANG Yisong, et al. Influence of solid rocket motor working pressure on the performance of flexible joints[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(2): 157-164.

## Influence of Solid Rocket Motor Working Pressure on the Performance of Flexible Joints

LI Guocai<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, WANG Yisong<sup>1</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, ZHENG Yongqiu<sup>2</sup>

(1. Xi'an Institute of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710025, China;

2. State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** High working pressure can result in various adverse effects on the flexible joints, and even cause operational instability. Previous research has been inadequate in explaining the factors contributing to the diminished shaking torque or its instability in flexible joints subjected to high pressure, which brings troubles to the design of flexible joints. In order to study the force and working mechanism of flexible joints under high working pressure, flexible joints under high pressure and strong working conditions were taken as the research object in this paper, a simulation model of flexible joint was established by

收稿日期: 2023-10-12

作者简介: 李国才(1987-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事固体火箭发动机设计的研究。

通信作者: 郑永秋(1986-), 男, 教授, 博士, 主要从事航天动力燃烧场测试技术的研究。E-mail: zhengyongqiu@nuc.edu.cn。

ABAQUS finite element software. Numerical simulations were performed to analyze the influence of pressure on the height and swing torque of flexible joints, and further experimental tests were carried out. The maximum deviation of the flexible joint height change is within 12%, and the maximum deviation of the swing torque is within 10%, thus confirming the precision of the finite element model. The relationship between the height and the shaking moment of the flexible joint and the pressure was ultimately determined. Calculation formulas were provided to streamline the guidance for engineering design. Considering the trends of deformation and shaking moment of the flexible joint, a macroscopic analysis was conducted for the first time to investigate the decrease in shaking moment of the flexible joint under high volumetric pressure. With the increase of volumetric pressure, the asymmetry of forces caused by deformation of the flexible joint results in decrease of the shaking moment until instability. A method was proposed to assess the stability of the flexible joint, offering guidance for subsequent flexible joint design.

**Key words:** flexible joints; instability; high pressure; swing torque

## 0 引言

柔性喷管是固体火箭发动机推力矢量控制的一种重要方式,其中柔性接头作为柔性喷管推力矢量控制的执行部件,对固体火箭发动机正常工作极其重要<sup>[1-4]</sup>。随着固体火箭发动机技术的不断进步,对发动机比冲和质量比提出了更高的要求,因此高压强轻质柔性接头应用更加广泛。当发动机工作压强较高时,柔性接头弹性件及增强件会发生较大的变形,喷管摆动角度会发生较大偏差,会给飞行器的控制精度及飞行稳定性带来负面影响,从而降低飞行器的飞行轨道精度,需引起重视<sup>[5]</sup>。

万诺等<sup>[6]</sup>通过将S-N曲线法与有限元分析(FEA)相结合,预测了某个柔性接头在不同压力水平下的摆动性能,但为了建立数据库,S-N曲线法必须使用实际产品进行测试,测试成本较高。Zhang等<sup>[7]</sup>在分析柔性接头高压工作情况时引入了裂纹能量密度(CED)方法,通过有限元分析计算得出了接头在不同工况下的CED分布,该方法为柔性接头结构的可靠性设计提供了理论指导,并在实际测试中表现出较好的准确性和实用性。Emelyanov等<sup>[8]</sup>结合现代计算流体动力学(CFD)研究了喷射流与主流之间的相互作用,预测了柔性接头在不同压力水平下的摆动性能,为结构的强度和耐久性设计提供了重要参考,确保系统在不同工况条件下的可靠性和安全性。Sonneveld等<sup>[9]</sup>利用封闭的不可压缩流体来提高柔性接头的支撑刚度,使支撑刚度不再受旋转和屈曲的影响,从而让柔性接头在模拟的高压工作环境中具有相对稳定的摆动力矩。Airoldi等<sup>[10]</sup>利用Simu-

lia/Abaqus标准程序建立了有限元模型,对柔性接头在高压下的力学性能进行了分析,但柔性接头在直面高温高压气体时必须引入热保护,会带来根本性的额外复杂性,该研究并未在柔性接头结构低成本方向做过多研究。

国内外已经有很多学者关注了柔性接头的生产设计以及高压工作时的力学响应,对其结构可靠性、强度、稳定性做出了很多分析<sup>[11-15]</sup>,对柔性接头高压下的屈曲响应和界面损伤密封进行了研究<sup>[16-19]</sup>,但有关高压工况对变形及摆动力矩引起的分析及原因的分析不够透彻,且均未对高压条件下柔性接头稳定性进行评价。高压工况柔性接头存在问题主要表现在两个方面:1)在高压强下,柔性接头的高度变化明显,从而影响喷管安装伺服的零位长度,这对飞行器系统的控制精度产生影响;2)在高压强下,柔性接头摆动力矩相比低压下会有明显降低,甚至出现失稳失效情况,这对柔性接头的可靠工作及飞行器系统正常工作都会产生影响。因此,研究高压下柔性接头变形及摆动力矩带来的影响,可以为固体火箭发动机推力向量的精确控制提供依据,并为后续柔性接头的设计提供参考<sup>[20-22]</sup>。不同压力工况下柔性接头性能研究对比如表1所示。

针对以上问题,本文创新性地提出了数模联合驱动的方法,通过试验数据拟合橡胶材料的本构模型,基于有限元软件ABAQUS建立了某型柔性接头的三维有限元模型,数值模拟了不同容压下的摆动过程,并对比了试验结果与数值模拟结果。在此基础上,结合柔性接头的失稳机理,对高压下柔性接头的稳定性进行了分析,给出了柔性接头高压稳定性的评估方法。

表 1 不同压力工况下柔性接头性能研究  
Tab. 1 Research on the performance of flexible joints under different pressure conditions

研究文献	研究方法	研究内容	问题及本文改进
[6]	S-N曲线法与有限元分析(FEA)相结合	预测了某个柔性接头在不同压力水平下的摆动性能	
[7]	裂纹能量密度(CED)方法	获得了柔性接头在不同工况下的CED分布	1) 对高压工况下柔性接头的变形及摆动力矩引起的影响及原因分析不够透彻
[8]	现代计算流体动力学(CFD)	预测了柔性接头在不同压力水平下的摆动性能	2) 均未对高压条件下柔性接头稳定性进行评价
[9]	封闭的不可压缩流体法	提高了柔性接头的支撑刚度,使其具有相对稳定的摆动力矩	
[10]	基于Simulia/Abaqus标准程序的有限元模型法	分析了柔性接头在高压下的力学性能	
本文	数模联合驱动的方法	通过试验数据拟合,验证了所建立有限元模型的正确性	1) 增加了高压下柔性接头稳定性的分析 2) 给出了柔性接头高压稳定性的评估方法

### 1 柔性接头高压摆动数值模拟

#### 1.1 弹性件的本构模型

对柔性接头进行有限元计算时,弹性件的橡胶材料的本构模型的准确性对计算结果有较大的影响。本文采用柔性接头较为普遍使用的“三阶五项式”模型来拟合弹性件橡胶材料的本构,它是在三阶 Mooney-Rivlin 模型的基础上改型得到的。在文献[23-24]都验证了在大应变区域,该模型具有较高的精度,其应变函数为<sup>[23-24]</sup>。

$$W(J_1, J_2) = C_{10}(J_1 - 3) + C_{01}(J_2 - 3) + C_{20}(J_1 - 3)^2 + C_{11}(J_1 - 3)(J_2 - 3) + C_{30}(J_1 - 3)^3 + \dots \quad (1)$$

本文对所研究的柔性接头弹性件材料进行了单轴拉伸试验和平面剪切试验,试件按 GB/T12830 - 2008 标准制备,试验仪器为 INSTRON4505 材料试验机。利用弹性件所用橡胶的单轴拉伸试验和平面剪切试验数据,拟合得到式(1)中的常数,见表 2。

表 2 拟合所得常数  
Tab. 2 Fitted constants kPa

$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{11}$	$C_{20}$	$C_{30}$
148.436	12.872	4.820	0.547	0.067 5

#### 1.2 计算模型

基于 ABAQUS 有限元软件建立了某型柔性接头摆动装置的计算模型,由于柔性接头弹性件与增强件及前、后法兰采用胶粘剂粘接,前后法兰与摆动工装件连接非关注重点,因此模型中各部件采用 Tie 绑定连接。为简化计算,摆动工装堵盘采用壳单元,摆杆采用梁单元。有限元模型中网格划分为六面体单元,由于橡胶材料近似体

积不可压缩,弹性件材料采用杂交实体单元,单元网格总量 219 867 个。

#### 1.2.1 边界条件

模型中不考虑粘接剂的变形影响。由于柔性接头为轴对称结构且容压及单摆载荷为平面对称边界,因此模型采用 1/2 模型,不影响计算结果。

固定体大端采用固定边界条件,在固定体、柔性接头及堵盘内表面施加压强载荷,在上支点位置建立参考点(Reference point),并以此参考点为 0 点建立局部圆柱坐标系,在下支点施加集中力载荷模拟伺服机构,集中力载荷方向通过建立的局部坐标系实现。

#### 1.2.2 材料参数

所采用的弹性件材料为天然橡胶,性能参数采用三阶五常数表征,具体参数见表 2。其它零件材料为钢锻件,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。

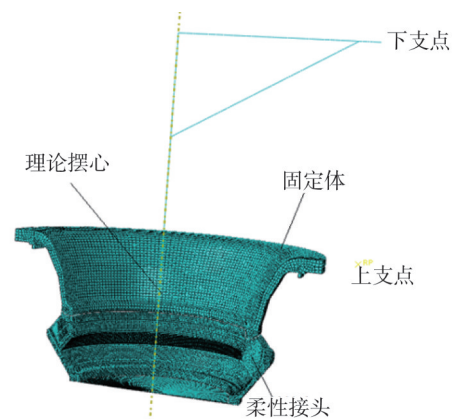


图 1 柔性接头有限元模型

Fig. 1 Finite element model of flexible joint

#### 1.2.3 控制方程

有限元软件中单元应力的控制方程为

$$M_s \ddot{d} + C_s \dot{d} + K_s d + \tau_s = 0, \quad (2)$$

式中:  $M_s$  为固体单元质量矩阵;  $d$  为固体单元的

位移矢量;  $C_s$ 为固体单元阻尼矩阵;  $K_s$ 为固体单元刚度矩阵;  $\tau_s$ 为固体单元受到的应力。

### 1.3 计算工况

发动机工作时,柔性接头的压强及摆角会连续变化,即柔性接头会在不同工作压强下进行不同大小摆角的摆动,因此,计算中选取典型的压强及摆角工况来综合评估柔性接头的变形及力矩情况。压强选取低压0.15 MPa及最大工作压强的折算压强7 MPa,并选取中间压强1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0和6.0 MPa,以便发现柔性接头变形随压强变化的规律。柔性接头摆角选取 $0^\circ$ 及最大角度 $6^\circ$ 。

## 2 数值模拟的柔性接头变化分析

### 2.1 柔性接头高度变化

柔性接头摆角为 $0^\circ$ 时,在柔性接头受气体压力面输入不同的压强,获得柔性接头的变形情况。以前、后法兰安装面的距离为柔性接头高度,提取柔性接头前、后法兰安装面在不同压强下的高度减小值,得到高度减小值随压强变化的关系如图2所示。

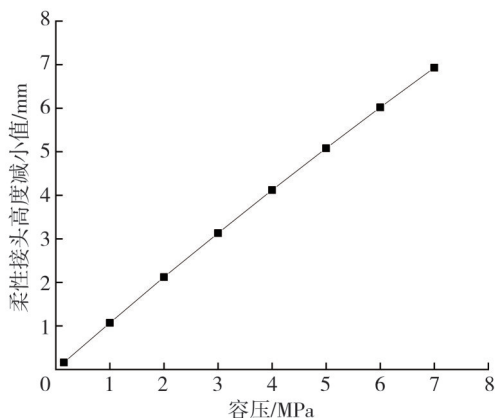


图2 柔性接头高度减小值与压强的关系

Fig. 2 Relationship between the height reduction value of the flexible joint and the pressure

由图2可以看出,柔性接头高度在7 MPa时减小了6.93 mm,且随压强的升高而不断减小。减小值与容压近似呈线性关系,这是由于橡胶在300%剪切应变范围内,剪切模量变化较小,基本为固定值,而在7 MPa容压下柔性接头剪切应变在80%左右,因此柔性接头的高度变化体现出较明显的线性关系。

### 2.2 摆动力矩变化情况

柔性接头输入角度为 $6^\circ$ 时,在柔性接头受气体压力面施加不同压强,获得柔性接头下支点的支反力,从而计算出柔性接头的摆动力矩。为研究摆动力矩与压强的关系,提取了不同压强下的柔性接头的摆动力矩,得到柔性接头摆动力矩与压强的关系如图3所示。

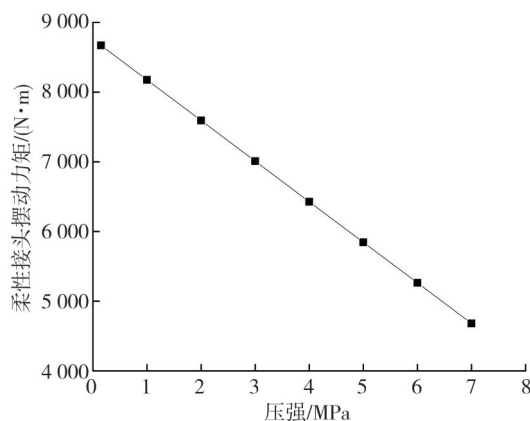


图3 摆动力矩与工作压强的关系

Fig. 3 Relationship between swing torque and working pressure

由图3可以看出,柔性接头在0.15 MPa时摆动力矩为8671 N·m,摆动力矩随工作压强的增加而不断减小,至工作压强为7 MPa时,柔性接头的摆动力矩降为4680 N·m,摆动力矩与工作压强近似呈线性关系,这是由于柔性接头在7 MPa下摆动,摆动力矩的产生主要是由弹性件的剪切变形引起的,而在此工况下,弹性件的剪切应变在200%左右,橡胶在300%剪切应变范围内,剪切模量变化较小。文献[19]的研究表明弹性件用橡胶材料的剪切模量随压力升高略有增加的趋势,因此认为高压下柔性接头的变形使得压强对柔性接头产生了不对称载荷,进而造成了摆动力矩的减小。

## 3 试验验证的柔性接头变化分析

### 3.1 试验设计

为了验证容压对柔性接头高度及摆动力矩的影响规律,采用该型号柔性接头进行摆动验证试验。摆动试验装置见图4,主要由柔性接头、冷试容器、固定壳体、堵盖、摆杆支架、支耳、伺服系统和测压系统等组成。测压系统采用高精度数字压力传感器进行测量,压强的测量精度为0.05%。

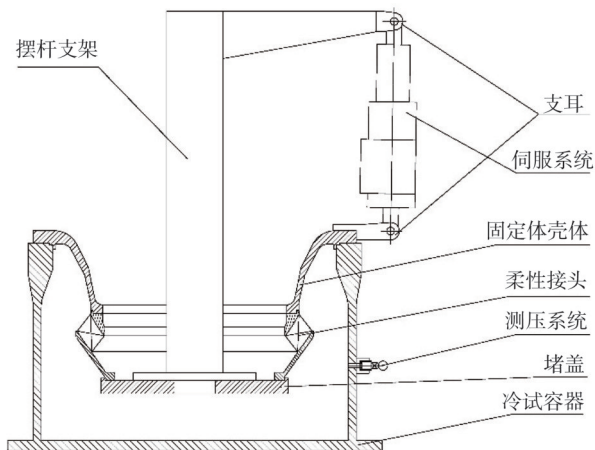


图 4 试验工装  
Fig. 4 Test tooling

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 柔性接头高度分析

试验过程中伺服处于脱开状态, 柔性接头摆动角度为 $0^\circ$ , 不断升高容器内压强, 先由 0.15 MPa 升至 1 MPa, 再以步长 1 MPa 升至 7 MPa, 在每个状态下测得柔性接头高度的减小值, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 随着压强的升高, 柔性接头高度减小值不断增大, 基本呈正比例关系, 这是由于在高压下柔性接头的高度减小是柔性接头剪切变形引起的, 而由压强引起的剪切变形在 200% 以内, 在此剪切变形下, 弹性件剪应力-应变关系基本呈线性, 未体现出超弹性特性。

由表 3 可以看出, 除 0.15 MPa 下的情况外, 柔性接头高度变化试验值与有限元计算值的偏差都较小, 这是由于柔性接头试验工装之间的安装存在不

同程度的间隙, 压强在升至 0.15 MPa 的过程中, 除压强影响柔性接头高度外, 工装的安装间隙也会影响柔性接头高度, 因此, 0.15 MPa 压强下柔性接头高度试验值与仿真值的偏差较大。除 0.15 MPa 工况外, 试验值与仿真值的最大偏差为 4.57%, 考虑压强测试精度 0.05% 的影响, 偏差值不大于 5%, 此项偏差主要与材料参数的选取有关, 由于每台柔性接头的具体橡胶参数与有限元输入值不完全吻合, 增大了模拟值与实测值的偏差, 但有限元计算值满足工程应用的使用, 能够指导工程实践, 该偏差在工程应用允许的误差范围内。

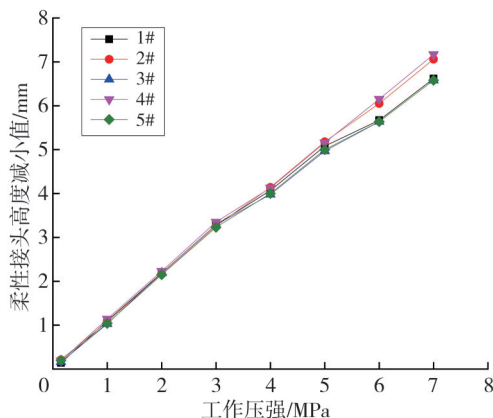


图 5 柔性接头高度减小值与工作压强的关系

Fig. 5 Relationship between the height reduction value of the flexible joint and the working pressure

柔性接头的高度随压强的变化可表示为

$$H = h - \Delta \times (p - 0.15), \quad (3)$$

式中:  $H$  为柔性接头高度, mm;  $h$  为柔性接头初始高度, mm;  $\Delta$  为柔性接头每升高 1 MPa 的减小值, mm;  $p$  为柔性接头的工作压强, MPa。

表 3 柔性接头的高度减小值

Tab. 3 Height reduction values of flexible joints

工作压强/MPa	高度减小值的试验值/mm					试验平均值/mm	仿真值/mm	偏差/%
	1#	2#	3#	4#	5#			
0.15	0.14	0.21	0.16	0.19	0.2	0.18	0.16	11.11
1	1.1	1.08	1.03	1.14	1.04	1.08	1.07	0.93
2	2.19	2.17	2.19	2.23	2.15	2.19	2.12	3.20
3	3.29	3.26	3.29	3.35	3.23	3.28	3.13	4.57
4	4.07	4.14	3.98	4.13	4.00	4.06	4.12	1.48
5	5.08	5.18	4.97	5.16	5.00	5.08	5.08	0.00
6	5.67	6.05	5.64	6.15	5.64	5.83	6.02	3.26
7	6.62	7.06	6.58	7.17	6.58	6.80	6.93	1.91

#### 3.2.2 摆动力矩变化

试验过程中伺服与工装相连, 不断升高容器内的压强, 由 0.15 MPa 升至 1 MPa, 再以步长 1 MPa 升至 7 MPa, 每个压强台阶下的摆角角度为  $6.0^\circ$  (以 0.1 Hz 正弦波摆动, 较慢的正弦波能够有效避免惯

性力矩对柔性接头摆动力矩的影响), 通过压力测试系统测得伺服内油液的压力, 由压力与其作用的横截面积来计算作用力, 因作用力力臂已知, 因而可以得到柔性接头的摆动力矩。1#~5# 柔性接头在  $6^\circ$  下的摆动力矩见表 4, 变化趋势见图 6。

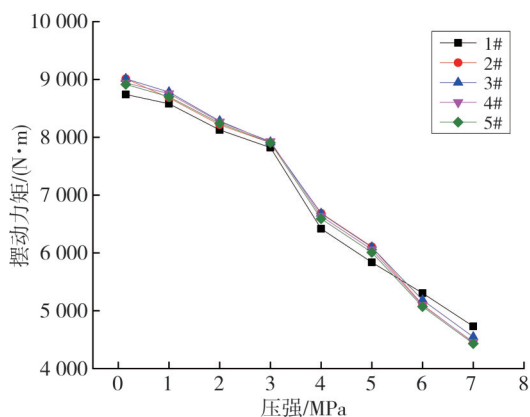


图6 柔性接头摆动力矩与压强关系

Fig. 6 Relationship between swing torque of flexible joints and pressure

由表4和图6可以看出,摆动力矩随压强的升高而不断减小,与有限元计算结果相比,最大偏差为9.7%,考虑压强测试精度0.05%的影响,最大偏

表4 柔性接头摆动力矩

Tab. 4 Swing torque of flexible joints

工作压强/MPa	摆动力矩的试验值/(N·m)					试验平均值/(N·m)	仿真值/(N·m)	偏差/%
	1#	2#	3#	4#	5#			
0.15	8 740	9 013	9 012	8 943	8 915	8 925	8 671	2.8
1	8 580	8 682	8 782	8 756	8 702	8 700	8 175	6.0
2	8 127	8 215	8 282	8 267	8 243	8 227	7 592	7.7
3	7 821	7 906	7 917	7 929	7 907	7 896	7 130	9.7
4	6 417	6 688	6 681	6 635	6 590	6 602	6 427	2.7
5	5 837	6 107	6 098	6 058	6 009	6 021	5 845	2.9
6	5 304	5 103	5 185	5 097	5 071	5 152	5 263	2.2
7	4 730	4 452	4 547	4 456	4 431	4 523	4 680	3.5

#### 4 高压下柔性接头摆动力矩降低的原因及稳定性分析

随着固体火箭发动机技术的不断发展,小力矩柔性接头成为发展趋势,由于固体火箭发动机性能的提升,发动机工作压强不断提高,而在高压强作用下,柔性接头的摆动力矩进一步降低,易发生力矩过小而失稳的现象,失稳情况下柔性接头的正常工作将受到影响,为避免此种情况,需对柔性接头的高压下摆动力矩降低原因进行研究分析。

从本文柔性接头摆动力矩与压强的关系可以看出,随着压强升高柔性接头摆动力矩不断降低。以某型号柔性接头为例,在高压下柔性接头会产生变形,高度发生变化,进而理论摆心发生移动,压强在柔性接头非对称面会产生两个力矩作用, $M_{正}$ 为促使柔性接头摆角增大的力矩, $M_{负}$ 为抵抗柔性接头摆动的力矩。根据有限元计算结果,在高压下 $M_{正}$ 的数值明显大于 $M_{负}$ 的数值,因此,工作压强的作用代替

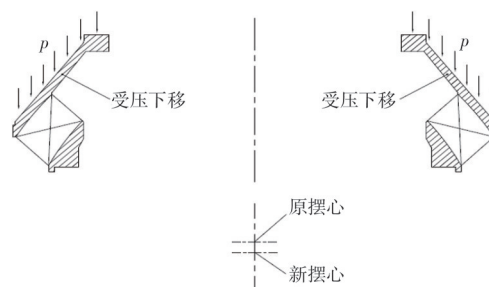
差不超过10%,这主要与有限元模型中材料参数的输入有关,三阶五常数模式材料参数与真实的橡胶非线性变形情况有一定的偏差,还有在大的剪切变形下,有限元网格发生了较大的变化,可能使有限元计算结果偏离真实值,但此种偏差在工程应用可以接受的范围内。在有限元计算中柔性接头弹性件的性能并未发生变化,但柔性接头的摆动力矩仍随压强的升高而不断降低,验证了高压下柔性接头摆动力矩的降低并非材料参数的变化引起的。在工程实践中,鉴于柔性接头摆动力矩与工作压强的近似线性关系,可以用式(4)表达不同压强下的摆动力矩。

$$M = m - \delta \times (p - 0.15), \quad (4)$$

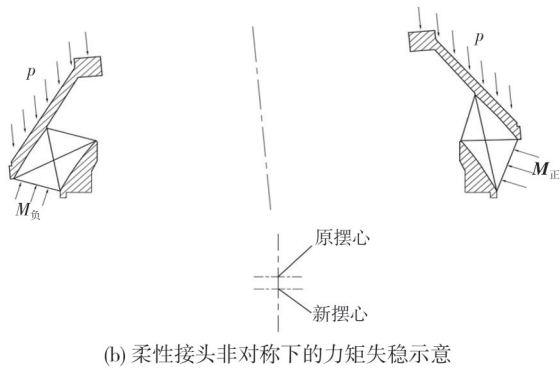
式中: $M$ 为任一压强下柔性接头的摆动力矩, $N \cdot m$ ;  $m$ 为0.15 MPa下柔性接头的摆动力矩, $N \cdot m$ ;  $\delta$ 为每升高1 MPa柔性接头摆动力矩的减小值, $N \cdot m$ ;  $p$ 为柔性接头的工作压强,MPa。

了伺服的部分作用力,当工作压强对柔性接头的作用力矩大于柔性接头的摆动力矩时,柔性接头就会在无伺服作用下摆动,且摆角越来越大,从而发生失稳现象,如图7所示。在低压下,摆心移动及柔性接头变形均较小,力矩下降很不明显。

基于柔性接头的失稳机理,在某一摆动角度下,当满足 $M_{正} - M_{负} < M_{剪切}$ 时,柔性接头是稳定的,反之则会发生失稳现象,其中, $M_{剪切}$ 为弹性件剪切变形产生的力矩。



(a) 柔性接头未发生变化时的稳定示意



(b) 柔性接头非对称下的力矩失稳示意

图 7 压强在柔性接头上产生的力矩作用

Fig. 7 Moment effect of pressure on flexible joint

## 5 结 论

本文建立了某型柔性接头的有限元模型,分析了柔性接头高度及摆动力矩与工作压强的关系,为柔性接头高压稳定性的预估提供了工程方法。结论如下:

1) 采用本文所述有限元模型能够较好地模拟柔性接头的高度及摆动力矩,高度变化最大偏差在 12% 以内,摆动力矩最大偏差在 10% 以内;

2) 柔性接头高度及摆动力矩与工作压强均近似呈线性关系,柔性接头高度及摆动力矩均随工作压强的升高而不断降低;

3) 柔性接头的稳定性与压强对喷管摆动的推动作用有关,采用工程公式能够初步预估柔性接头高压工作的稳定性。

### 参考文献:

- [1] 樊博璇, 陈桂明, 高琛, 等. 固体火箭发动机柔性接头用弹性材料研究进展[J]. 特种橡胶制品, 2021, 42(5): 62-66.  
FAN Boxuan, CHEN Guiming, GAO Chen, et al. Research Progress of elastic material for flexible nozzle of solid rocket motor [J]. Special Purpose Rubber Products, 2021, 42(5): 62-66. (in Chinese)
- [2] SHANI S, PUTTER S, PERETZ A. Development of a high-performance flexible joint for thrust vector control [C]//31st Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1995: 3017.
- [3] SHERARD H. Development of advanced flex joint technology [C]//9th Propulsion Conference, 1973: 1262.
- [4] AKIBA R, KOHNO M, INOHARA H, et al. Development of movable nozzle for solid rocket motor [C]//Guidance and Control Conference, 1983: 2285.

- [5] 陈汝训, 刘铭初, 李志明, 等. 固体火箭发动机设计与研究[M]. 北京: 宇航出版社, 2007.
- [6] 万诺, 史宏斌, 屈转利, 等. 柔性接头疲劳摆动寿命分析研究[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 264-272.  
WAN Nuo, SHI Hongbin, QU Zhuanli, et al. Analysis of fatigue properties and vectoring life of flexible joint [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(5): 264-272. (in Chinese)
- [7] ZHANG J, REN J, XUE M, et al. Fatigue analysis of flexible joint elastomers combining ogden second-order constitutive model with cracking energy density [J]. Aerospace, 2023, 10(2): 123.
- [8] EMELYANOV V, YAKOVCHUK M, VOLKOV K. Multiparameter optimization of thrust vector control with transverse injection of a supersonic underexpanded gas jet into a convergent divergent nozzle [J]. Energies, 2021, 14(14): 4359.
- [9] SONNEVELD D D, NIJSSEN J P A, VAN OSTAYEN R A J. Compliant joints utilizing the principle of closed form pressure balancing [J]. Journal of Mechanical Design, 2023, 145(8): 083601.
- [10] AIROLDI A, BOIOCCHI M, NATALI M, et al. Feasibility of a morphing rocket nozzle for thrust vector control based on corrugated composite laminates [J]. Applied Composite Materials, 2023, 30(2): 399-429.
- [11] 阮崇智. 大型固体火箭发动机研制的关键技术[J]. 固体火箭技术, 2005, 28(1): 23-28.  
RUAN Chongzhi. Critical techniques in development of large-size solid rocket motors [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2005, 28(1): 23-28. (in Chinese)
- [12] REN J, ZHANG X, YANG J, et al. Structural analysis and testing of a miniature flexible joint under pressure and vector loading [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3637-3643.
- [13] DONAT J. Solid rocket motor nozzle flexseal design [C]//Aerospace Design Conference, 1993: 1122.
- [14] 杨敬贤. 小型固体火箭发动机摆动喷管设计技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [15] 刘文芝, 陶健, 王天祥, 等. 柔性喷管接头优化及承载性能分析[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(1): 30-35.  
LIU Wenzhi, TAO Jian, WANG Tianxiang, et al. Optimization of flexible nozzle joint and analysis of carrying capacity [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2019, 42(1): 30-35. (in Chinese)
- [16] 黄朝晖, 张潇, 刘伟凯. 基于弧长法对柔性接头高压下屈曲响应研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017

- (4): 102-106.
- HUANG Chaohui, ZHANG Xiao, LIU Weikai. Research on the Buckling Response of the Flexible Joint Based on Risks Method [J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(4): 102-106. (in Chinese)
- [17] 史宏斌, 王才, 屈转利, 等. 宽温域下柔性接头界面损伤及密封可靠性数值研究[J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2313-2324.
- SHI Hongbin, WANG Cai, QU Zhuanli, et al. Numerical research on interfacial damage and sealing reliability of flexible joint under wide temperature range [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(10): 2313-2324. (in Chinese)
- [18] 王才, 史宏斌, 屈转利, 等. 固体火箭发动机柔性接头摆动密封可靠性研究[J]. 固体力学学报, 2021, 42(2): 189-199.
- WANG Cai, SHI Hongbin, QU Zhuanli, et al. Vector sealing reliability of flexible joint in solid rocket motor [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2021, 42(2): 189-199. (in Chinese)
- [19] 王才, 史宏斌, 刘沛, 等. 温度循环载荷对柔性接头界面损伤的影响[J]. 计算力学学报, 2021, 38(2): 256-263.
- WANG Cai, SHI Hongbin, LIU Pei, et al. The effect of temperature cycling load on interfacial damage of flexible joint [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2021, 38(2): 256-263. (in Chinese)
- [20] PRINS W, MEYER S, COX P. Advanced solid rocket motor nozzle thrust vector control flexseal development status [C]//28th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1992: 3553.
- [21] ZHANG G X, LIU Y, REN J X, et al. Solid rocket motor nozzle flexible joint design and fabrication [J]. Advanced Materials Research, 2013, 2200 (631/632): 905-909.
- [22] 吴文辉, 李兵. 推力矢量火箭发动机柔性接头力学特性仿真分析[J]. 水雷战与舰船防护, 2015, 23(3): 21-26.
- WU Wenhui, LI Bing. Simulation and analysis on mechanical behavior of flexible joint for thrust vector rocket motor [J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2015, 23(3): 21-26. (in Chinese)
- [23] 徐明. 橡胶类超弹性材料本构关系研究及有限元分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [24] 曹翠微, 陈伟民, 蔡体敏, 等. 固体火箭发动机柔性接头弹性件力学性能研究[J]. 宇航材料与工艺, 2005, 35(6): 36-40.
- CAO Cuiwei, CHEN Weimin, CAI Timin, et al. Elastomer analysis on flexible nozzle of solid rocket motor [J]. Aerospace Materials & Technology, 2005, 35(6): 36-40. (in Chinese)