

柔性接头有效摆心漂移特性

王超¹, 任军学¹, 郝文强¹, 刘宇¹, 杨敬贤²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;

2. 上海新力动力设备研究所, 上海 200125)

摘 要: 设计了带缠裹式防热套的柔性接头, 弹性件和防热套材料均采用硅橡胶. 研究了柔性接头有效摆心和几何球心的关系, 采用 2 阶四项式 Mooney-Rivlin 模型模拟弹性件的本构关系, 利用 ANSYS 软件分别仿真计算柔性接头在压强为 0.9 MPa 下不同摆角条件的有效摆心和几何球心漂移, 得到了两者的漂移包络线, 把仿真的有效摆心漂移结果与试验测量值进行比较, 并利用间隙碰撞试验验证了几何球心漂移仿真结果的准确性, 在此基础上研究了有效摆心漂移的原因. 结果表明: 摆心包络线的仿真结果与试验结果吻合较好, 有效摆心和几何球心是两个不同的概念, 柔性接头的有效摆心漂移在半径为 2.5 mm, 高为 1.4 mm 的圆柱包络面内, 而几何球心的漂移在半径为 0.013 mm, 高为 0.6 mm 的圆柱包络面内, 有效摆心漂移是由接头各层增强件和弹性件的变形不同引起的.

关 键 词: 摆心漂移; 几何球心; 柔性接头; 推力矢量控制; 固体火箭发动机

中图分类号: V435⁺.23

文献标志码: A

Characteristics of effective pivot point excursion for flexible joint

WANG Chao¹, REN Jun-xue¹, HAO Wen-qiang¹,
LIU Yu¹, YANG Jing-xian²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shanghai Xinli Power Equipment Institute, Shanghai 200125, China)

Abstract: A miniature flexible joint using silicone rubber elastomer and wrapped insulating boot was designed. The relation between effective and geometric pivot points was studied. The quadrinomial second order Mooney-Rivlin invariant model was used to describe the constitutive relationship of the elastomer. The excursions of effective and geometric pivot points of flexible joint at different vector angles under 0 MPa and 9 MPa vessel pressure were calculated respectively using ANSYS. Both effective and geometric pivot point cylinders were obtained. The simulation and experiment results of effective pivot point were compared. The accuracy of the geometric pivot point excursion was verified by the experiment of clearance crash. In addition, the reason of the effective pivot point excursion was also studied. Results show that the simulated effective pivot point cylinder has a good agreement with the experiment. The effective and geometric pivot points are of different concepts. The effective pivot point excursion is limited to a radius of 2.5 mm, 1.4 mm high cylindrical envelope while the geometric pivot point excursion is limited to a radius of 0.013 mm, 0.6 mm high cylindrical envelope. The effective pivot point excursion is caused by different strains of each reinforcement and elastomer.

收稿日期: 2013-10-21

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST201258)

作者简介: 王超(1987—), 男, 陕西渭南人, 博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究. E-mail: wang_chaowin@163.com

Key words: pivot point excursion; geometric pivot point; flexible joint;
thrust vector control; solid rocket motor

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,主要由活动体、柔性接头和固定体3部分组成。一般用在大型战略导弹和固体助推器上^[1],近年来由于战术导弹对垂直发射快速转弯、越肩发射等高机动性能要求的提高,小型柔性接头得到了各国的青睐并已有相关型号应用^[2-5],如美国的 SM-3 和 Terrier LEAP 第3级发动机、欧洲的 Aster15/30 等^[6-9]。

通常柔性接头在燃烧室压强及作动器操纵力作用下的有效摆心和几何球心是两个不同的概念^[10],所谓柔性喷管或接头平面摆动的有效瞬时摆心,实质是喷管活动体或其连接法兰的瞬时回转中心。当柔性喷管或柔性接头作平面摆动时,喷管活动体或其连接法兰的运动可视为刚体的受约束平面运动。由刚体动力学理论,对于某一瞬时角速度不为零的平面运动刚体,必存在且仅存在一个瞬时速度为零的点,该点称为速度瞬心,而刚体在该瞬时的运动等效于绕速度瞬心的定轴转动^[11]。因此,喷管活动体或其连接法兰的速度瞬心即为柔性喷管或柔性接头平面摆动的有效瞬时摆心。当柔性喷管或柔性接头从某一角度摆动至另一角度且角度增量较小时,可以两摆角位置间的平均摆心来近似瞬时摆心。有效摆心的漂移量与柔性接头的结构、材料、载荷等因素有关,漂移量的大小对接头摆动的作动力臂、行程与摆角的关系及前后包络线影响很大^[10]。而前法兰的几何球心漂移则会导致整个喷管或法兰的轴向和径向移动,漂移量的大小对喷管摆动间隙的设计产生很大的影响。由于小型战术导弹高燃烧室压强、小

空间的特点,准确预测柔性接头的有效摆心和几何球心漂移对整个柔性喷管、伺服机构及导弹总体的设计意义重大。在公开发表的文献中,涉及摆心漂移仿真的较少,且计算所用的模型和方法也较粗放。刘志武^[12]计算了柔性接头受压强载荷作用变形后各层增强件的几何中心并取平均作为近似摆心,这样的做法值得商榷,摆心是其喷管活动件或前法兰的摆心,与各层增强件的几何球心无关;史宏斌等^[13]以弹簧模型取代柔性接头结构,仅考虑其轴向刚度,计算了柔性喷管在作动器载荷作用下几何中心的轴向位移作为摆心的轴向漂移量,显然,轴向刚度恒定的假设与其实体的非线性特性不符,尤其是在高燃烧室压强下的差别会更大,而且由于忽略了径向刚度,因此无法计算摆心的径向漂移量,另外,以几何球心为摆心也是不合适的。

本文基于 ANSYS 软件建立了某柔性接头三维有限元模型,数值模拟压强 $p=0.9\text{ MPa}$ 条件下的摆动过程,计算其有效摆心和几何球心,并对该柔性接头进行摆动试验,测得两种压强条件下不同摆角的有效摆心,对比数值模拟与试验结果,研究了有效摆心和几何球心的关系,给出了有效摆心漂移对作动力臂的影响,得到了摆角和作动力臂的关系,研究结果可为柔性接头摆心漂移预测、摆动间隙设计、伺服机构选型及导弹总体推力矢量的控制等提供参考。

1 柔性接头及试验系统

1.1 柔性接头结构

图1所示是缠裹式防热套柔性接头的结构示

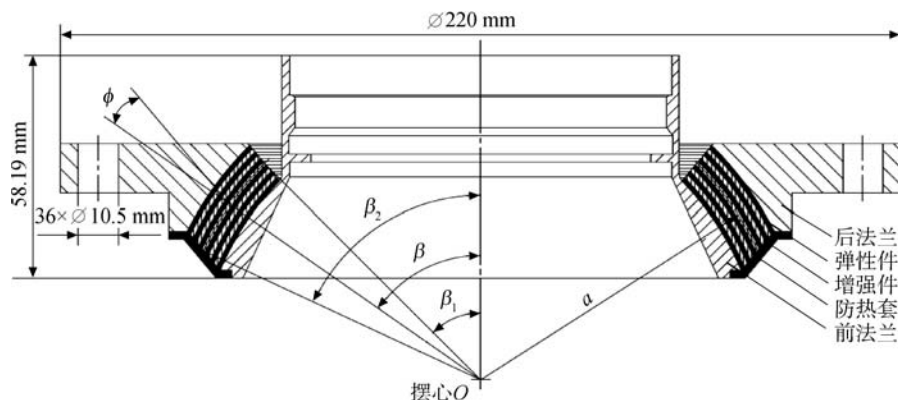


图1 缠裹式防热套柔性接头

Fig.1 Flexible joint with wrapped boot

意图,由增强件、弹性件、前后法兰和防热套组成,主要结构参数如表 1 所示.增强件及前后法兰由高比强度的 30CrMnSiA 材料制造,弹性件和防热套用硅橡胶材料,与文献[14]一致.

表 1 柔性接头结构参数
Table 1 Structure parameters of flexible joint

参数	数值
接头回转半径 a/mm	80
接头角 $\beta/(\text{^\circ})$	55
接头内角 $\beta_1/(\text{^\circ})$	45
接头外角 $\beta_2/(\text{^\circ})$	65
锥角 $\phi/(\text{^\circ})$	15
弹性件厚度 t_e/mm	1
弹性件层数 n_e	6
增强件厚度 t_r/mm	1.2
增强件层数 n_r	5

1.2 试验系统

柔性接头冷试试验系统装置如图 2 所示,在压力容器中充填高压氮气模拟燃烧室压强环境,电动伺服机构通过驱动器产生不同振幅、不同频率的正弦激励信号,用于提供柔性接头摆动所需作动力矩.两个水平安装的位移传感器用于测试柔性接头摆角,铅垂安装的位移传感器结合两水平位移传感器用于测试柔性接头的摆心^[14],拉压力传感器用于测试伺服机构所提供的作动力,测得摆心和作动力后则可按照文献[15]中的方法计算出作动力矩.

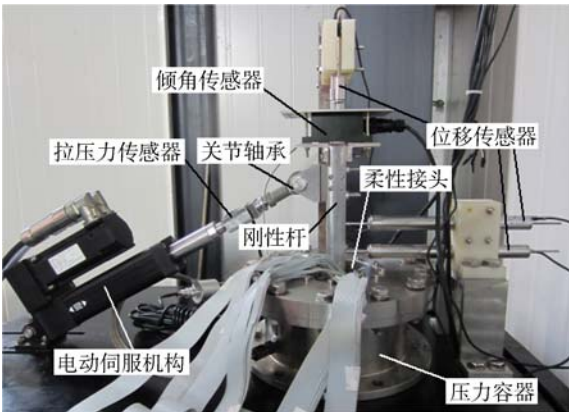


图 2 柔性接头冷试试验系统
Fig.2 Flexible joint bench test fixture

2 物理模型及计算方法

2.1 物理模型

2.1.1 有限元网格

柔性接头为轴对称体,但由于加载过程中变形及载荷非对称^[16],采用三维有限元模型进行数值模拟,弹性件选择六面体 8 节点的 SOLID185 号单元,增强件选择 SOLID45 号单元,各层弹性件、增强件沿厚度方向划分 3 等份,沿宽度方向划分 20 等份,沿圆周方向划分 30 等份,见图 3,球坐标系 (r, θ, φ) ,坐标原点 O 位于柔性接头几何回转中心,作动器位于 $\varphi=0^\circ$ 平面内.

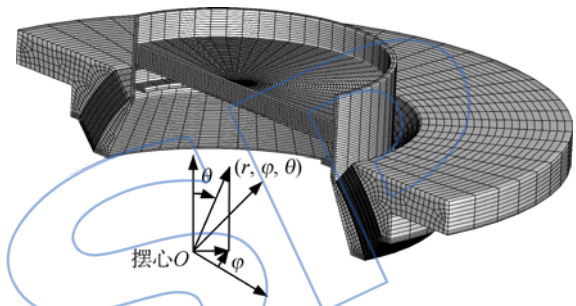


图 3 柔性接头有限元计算网格
Fig.3 Finite element computational meshes of flexible joint

2.1.2 边界条件

对称面 $\varphi=0^\circ, 180^\circ$ 施加对称边界条件,后法兰上顶面、中顶面、外侧面和防热套的上外侧面设为固定端,压强载荷均匀作用于柔性接头所有和气体接触的湿表面,在前法兰的关键点上施加等效的作动力载荷模拟柔性接头的摆动.

2.1.3 材料属性

柔性接头增强件及前后法兰材料 30CrMnSiA 为线弹性材料,其弹性模量 $E=205.8\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,弹性件采用 2 阶四项式 Mooney-Rivlin 模型描述其本构关系,利用橡胶材料的单轴拉伸、平面剪切试验数据,拟合得到弹性件材料参数如表 2 所示,拟合对比图如图 4 所示.

表 2 弹性件材料参数
Table 2 Material parameters of elastomer

C_{10}	C_{01}	C_{11}	C_{20}
19102.9	51479	2883.2	-58.095

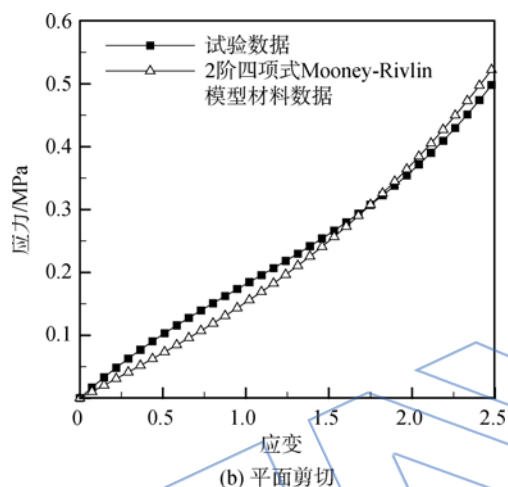
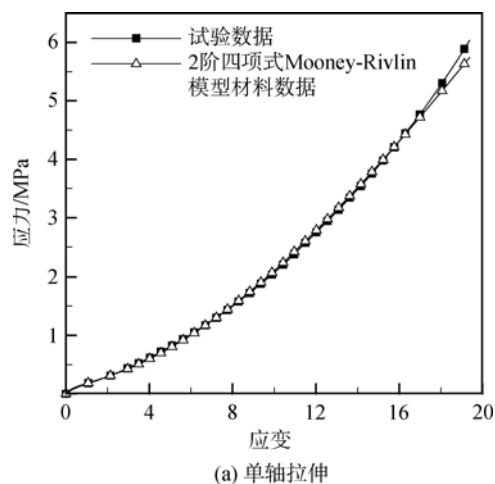


图4 2阶四项式 Mooney-Rivlin 模型材料数据拟合对比图
Fig. 4 Correlation of quadrinomial second order invariant Mooney-Rivlin model with test data

2.2 计算方法

如图5所示,取柔性接头活动体前法兰上两点A和B,当柔性接头由摆角位置 δ_{i-1} 摆动至 δ_i 时,A和B两点分别由 A_{i-1} 和 B_{i-1} 摆动至 A_i 和 B_i ,作线段 $A_{i-1}A_i$ 和 $B_{i-1}B_i$ 的中垂线,其交点 P_i 即为对应摆角增量 $\Delta\delta_i$ 的平均摆心位置,以此方

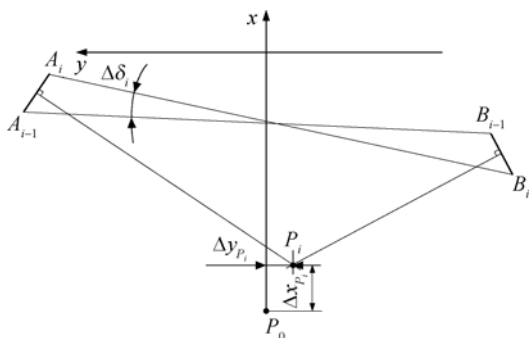


图5 有效摆心计算方法

Fig. 5 Calculation method for effective pivot point

法分别计算试验中 $p=0.9$ MPa不同摆角条件下的柔性接头有效摆心漂移量,而几何球心则是通过取柔性接头摆动至 δ_i 时前法兰上的3点来计算。

3 数值模拟及试验结果

3.1 有效摆心

图6和图7分别为压强 $p=0.9$ MPa条件下有效摆心的数值模拟和试验对比图(所有的漂移量以原始几何球心为参考计算),从图中可以看出,在 $p=0.9$ MPa,摆角(δ)为 6° 范围内的条件下,有效摆心的数值模拟和试验结果在各个角度虽有差异,但工程上所关心的摆心包络面基本相同,由此可知,数值模拟结果是可信的,柔性接头

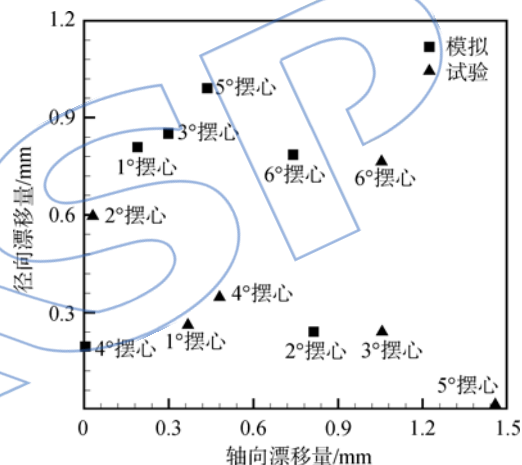


图6 有效摆心漂移结果($p=0$ MPa)

Fig. 6 Result of effective pivot point excursion ($p=0$ MPa)

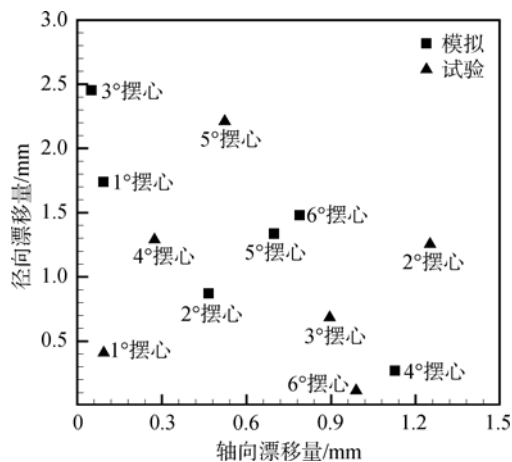


图7 有效摆心漂移结果($p=9$ MPa)

Fig. 7 Result of effective pivot point excursion ($p=9$ MPa)

的摆心包络面大致在半径为 2.5 mm, 高为 1.4 mm 的圆柱包络面内, 造成各个摆角下摆心漂移有差异的原因有以下几点:

1) 有限元建模并未考虑到柔性接头实际生产中的制造偏差, 如弹性件、增强件的厚度不均匀等.

2) 橡胶弹性件处于复杂的应力应变状态, 有限元模拟所用的橡胶本构模型不能完全真实地模拟实际情况.

3) 中垂线相对法测试摆心时对铅垂位置传感器的位置非常敏感, 很难保证其完全处在接头的中心轴线上.

3.2 几何球心

图 8 为 $p=0, 9 \text{ MPa}$ 条件下不同摆角时前法兰几何球心漂移的数值模拟结果, 从图中可以看出, 柔性接头的几何球心漂移包络面明显小于有效摆心, 且其径向漂移量比有效摆心的径向漂移量小 2 个量级, $p=9 \text{ MPa}$ 轴向漂移量大是由于轴向压缩位移引起的, 柔性接头在 $p=9 \text{ MPa}$ 下的轴向压缩位移为 0.5189 mm, 所以以几何球心作为摆心是不合适的, 会造成力臂变化估计过小.

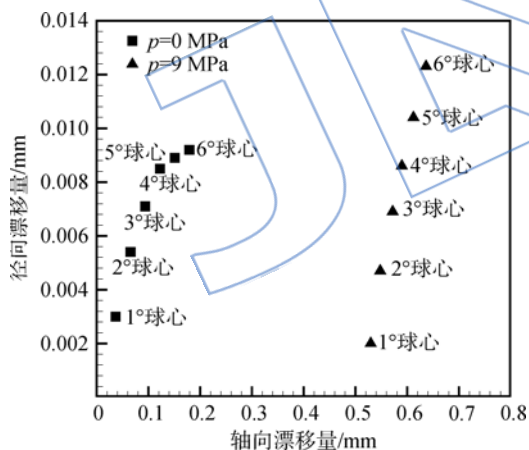


图 8 几何球心漂移数值模拟结果 ($p=0, 9 \text{ MPa}$)

Fig. 8 Numerical simulation result of geometric pivot point excursion ($p=0, 9 \text{ MPa}$)

为从直观上验证几何球心漂移模拟结果的可靠性, 进行了摆动间隙分别为 0.1 mm 的柔性喷管活动体与固定体的摆动碰撞试验, 见图 9, 铝制活动体与柔性接头前法兰连接, 用于模拟柔性喷管的活动件, 铝制固定体放置在压力容器中模拟喷管的固定体, 试验结果表明, 活动体和固定体并未发生碰撞, 定性验证了仿真结果的准确性.

柔性接头的有效摆心和几何球心是两个不同

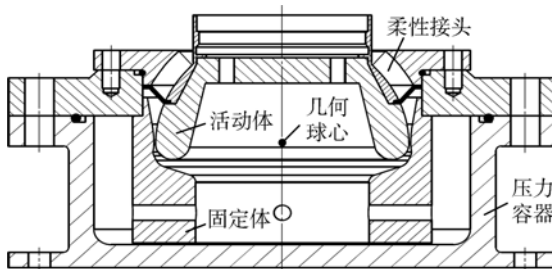


图 9 柔性喷管活动体与固定体间隙碰撞试验

Fig. 9 Experiment for clearance crash between moveable part and fixed part of flexible nozzle

的概念, 摆心漂移并不等同于柔性接头前法兰的漂移 (即几何球心的漂移).

4 摆心漂移原因分析

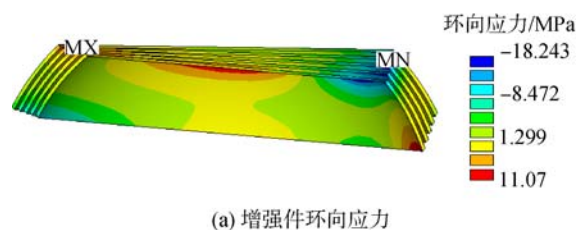
正如引言中所说, 柔性接头或柔性喷管平面摆动的有效摆心应是其前法兰或活动体的速度瞬心, 而与几何球心无关, 但是有效摆心漂移却与接头所受的载荷有关^[10, 17]. 由于在载荷作用下, 接头每层增强件和弹性件的应力会有所不同, 从而造成前法兰的约束分布发生变化, 影响其有效摆心的位置, 在无压强条件下, 只有作动器产生的载荷对摆心造成影响, 而在 $p=9 \text{ MPa}$ 时则增加了压强对其造成的影响.

图 10 和图 11 分别是柔性接头在 $p=0, 9 \text{ MPa}$ 条件摆角 (δ) 为 6° 时的计算结果, 其中图 10 (a) 和图 11 (a) 是各层增强件在 6° 摆角不同压强下的环向应力云图, 图 10 (b) 和图 11 (b) 为各层弹性件及防热套的切应力云图.

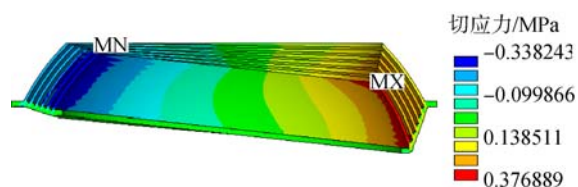
规定从前法兰到后法兰的增强件依次定义为第 1 层到第 5 层, 从图中可以看出, 增强件环向应力在 $\varphi=0^\circ, 180^\circ$ 呈现出相反的规律, 在 $\varphi=0^\circ$ 平面内增强件内侧为压缩应力, 外侧为拉伸应力, 而在 $\varphi=180^\circ$ 平面内则相反, 各层增强件的受力大小也不同, 其中中间第 3 层增强件受力最为恶劣, 无压强下的增强件环向应力明显小于 $p=9 \text{ MPa}$ 下的结果.

图 10 (b) 和图 11 (b) 为各层弹性件及防热套的切应力云图, $\varphi=0^\circ$ 剖面内出现了拉切应力, 而 $\varphi=180^\circ$ 平面内则以压切应力为主, 从图中可以看出, $p=0, 9 \text{ MPa}$ 下拉切应力和压切应力在弹性件的分布区域及大小是不同的, 根据柔性接头力矩平衡的计算方法^[18], 即其所有弹性件的切应力对某点的积分之和与作动器施加的作动力矩平衡, 该积分点才是有效摆心, 由于在载荷作用下各层

增强件和弹性件变形不同造成该点和几何球心并非重合的,其漂移量也和几何球心的漂移量不同,文献[17]指出减小接头锥角从而减小增强件及弹性件应力可以减小有效摆心漂移,也说明有效摆心是和各层增强件和弹性件的变形相关的.但此变形对几何球心的影响并不大.



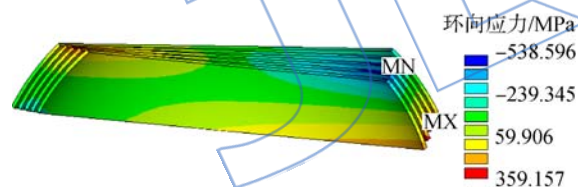
(a) 增强件环向应力



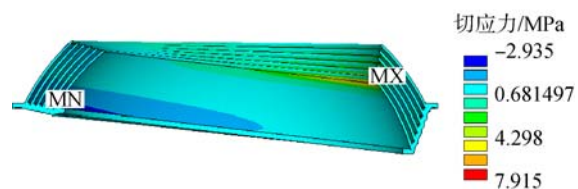
(b) 弹性件及防热套切应力

图 10 柔性接头应力分布 ($p=0\text{ MPa}$, $\delta=6^\circ$)

Fig. 10 Flexible joint stress distribution
($p=0\text{ MPa}$, $\delta=6^\circ$)



(a) 增强件环向应力



(b) 弹性件及防热套切应力

图 11 柔性接头应力分布 ($p=9\text{ MPa}$, $\delta=6^\circ$)

Fig. 11 Flexible joint stress distribution
($p=9\text{ MPa}$, $\delta=6^\circ$)

5 结论

本文建立了柔性接头的三维有限元模型,模拟了柔性接头在 $p=0, 9\text{ MPa}$ 下的摆动过程,给

出了柔性接头有效摆心的计算方法,研究了其和几何球心的关系,得到以下结论:

1) 柔性接头的有效摆心和几何球心是两个不同的概念,平面摆动时有效摆心是前法兰的速度瞬心,摆心漂移不等于几何球心漂移,利用本文提出的方法可以得到较符合实际的有效摆心包络面.

2) 有效摆心漂移是由于在压强和作动器载荷作用下各层增强件、弹性件和防热套的变形不同引起的.

3) 柔性接头在压强和作动载荷作用下,各层增强件在 $\varphi=0^\circ$ 剖面内增强件内侧为压缩应力,外侧为拉伸应力,而在 $\varphi=180^\circ$ 剖面内则相反,各层弹性件和防热套在 $\varphi=0^\circ$ 剖面内为拉切应力,在 $\varphi=180^\circ$ 剖面内为压切应力.

参考文献:

- [1] Shani S, Putter S, Peretz A, et al. Development of a high-performance flexible joint for thrust vector control [R]. AIAA 95-3017, 1995.
- [2] 林培基, 高峰. 推力矢量对防空导弹作战效能的影响 [J]. 飞航导弹, 2009(1): 56-57, 64.
LIN Peiji, GAO Feng. The influence of thrust vector control to the anti-aircraft missile combat efficiency [J]. Winged Missiles Journal, 2009(1): 56-57, 64. (in Chinese)
- [3] 吉礼超, 宋贵宝. 防空导弹控制方法的研究现状及展望 [J]. 战术导弹技术, 2009(3): 54-59.
JI Lichao, SONG Guibao. Current study status and future prospect of control mode of air-defense missile [J]. Tactical Missile Technology, 2009(3): 54-59. (in Chinese)
- [4] Wassom S R, Faupell L C, Perley T. Integrated aerofin/thrust vector control for tactical missiles [J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(3): 374-381.
- [5] ATK Techsystems Inc. ATK space propulsion products catalog [EB/OL]. [2008-05-14]. http://www.atk.com/capabilities_space/documents/atk_catalog_may_2008.pdf.
- [6] Caveny L H, Geisler R L, Ellis R A, et al. Solidrocket enabling technologies and milestones in the United States [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1038-1066.
- [7] Olsen K E, Walsh J J, Thomas E L. Navy terrier LEAP third-stage propulsion [R]. Monterey, CA: AIAA Missile Sciences Conference, 1994.
- [8] Uhrig G, Roussille C. Design drivers and technologies for solid propulsion of interceptors [R]. Arcachon, France: 1st AAAF International Conference on Missile Defense, 2003.
- [9] Uhrig G. Propulsion of interceptors: masters technologies in Europe [R]. Seville, Spain: 3rd AAAF International Conference on Missile Defense, 2006.
- [10] Woodberry R F H, Zeamer R J. Solid rocket thrust vector

- control[R]. NASA SP-8114, 1974.
- [11] 谢传峰. 动力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:155-163.
- [12] 刘志武. 柔性接头受轴向对称载荷时大变形有限单元法计算介绍[J]. 推进技术, 1986, 7(4):15-21.
- LIU Zhiwu. Introduce of finite element method for the large deformation of flexible joint with the axially symmetric load[J]. Journal of Propulsion Technology, 1986, 7(4): 15-21. (in Chinese)
- [13] 史宏斌, 侯晓. 控制力作用柔性喷管轴向摆心漂移计算[C]//中国宇航学会固体推进专业委员会第十九届学术年会论文集. 昆明:中国宇航学会, 2002:47-48.
- [14] 张晓光, 刘宇, 任军学, 等. 小型柔性接头推力矢量性能试验研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12):2836-2841.
- ZHANG Xiaoguang, LIU Yu, REN Junxue, et al. Experimental investigation of miniature flexible joint thrust vector characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12):2836-2841. (in Chinese)
- [15] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究:下[M]. 北京:中国宇航出版社, 2005.
- [16] Dunham R S, Nickell R E. Finite analysis of axisymmetric solids with arbitrary loading[R]. Berkeley, CA: University of California, SEL-67-6(AD-655253), 1967.
- [17] Wilson J W. Final report: poseidon C3 joint venture joint [R]. NASA TWR-2486, 1967.
- [18] 王春光, 史宏斌, 王雪坤, 等. 高压下喷管柔性接头摆动力矩数值分析[J]. 推进技术, 2012, 32(2):202-206.
- WANG Chunguang, SHI Hongbin, WANG Xuekun, et al. Numerical analysis of deflection torque of flexible joint with high pressure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 32(2):202-206. (in Chinese)