

固体火箭发动机柔性接头的结构分析^{*}

曹翠微^{1,2}, 陈伟民³, 蔡体敏¹, 李 敏⁴

(1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2. 二炮驻西安地区专装军代室, 陕西 西安 710072; 3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 4. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了进行固体火箭发动机柔性接头结构分析, 建立了三维超弹结构有限元模型, 用单轴拉伸与简单剪切橡胶材料试验数据, 采用三阶橡胶本构模型, 载荷跟随变形的的方式处理驱动载荷方向的变化, 给出了典型载荷状态下的计算结果。获得了柔性接头应力应变分布, 随着容压增大, 弹性件径向拉应力的区域迅速减少, 获得相同转角的驱动载荷将会减小, 该现象与试验结果吻合较好。

关键词: 超弹性⁺; 弹性体; 力学性能; 有限元法; 固体推进剂火箭发动机

中图分类号: V435⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2006) 05-0450-05

Structural analysis on solid rocket motor flexible joint

CAO Cui-wei^{1,2}, CHEN Weimin³, CAI Timin¹, LIMin⁴

(1. Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China; 2. The Representative Office of the PLA in Xi'an, Xi'an 710072, China; 3. Inst. of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China; 4. School of

Aeronautics Sciences and Technology, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The 3D hyperelastic finite element model of the solid rocket motor flexible joint was set up to analyze structural characters. The experimental data of axial-tension and simple shear test were fitted to achieve the hyperelastic behavior parameters. The 3rd order deformation rubber stress-strain model was adopted and the load direction changed with the deformation was taken into account. The calculated results under the condition of typical loads and the stress and strain distributions of the flexible joint were obtained. The domain and amplitude of radial tension stress and the load achieving same angle of rotation decrease with enhancing pressure. The results agreed with the data of experiments well.

Key words: Hyperelastic⁺; Elastomer; Mechanical performance; Finite element; Solid propellant rocket engine

1 引 言

柔性接头把喷管的可动部件与固定部件连接起来, 并实现可动部件与固定部件之间的密封。柔性接头是固体火箭发动机推力矢量控制的主要结构形式, 因而在众多的导弹型号上得到了广泛的应用^[1]。柔性接头承受的载荷有燃烧室均压载荷和伺服机构的摆动载荷, 在柔性接头的摆动过程中, 橡胶产生较大的变形, 控制力的作用点随着喷管摆动而变化, 在进

行结构分析时, 载荷主要考虑了压强和随作用点变化的跟随力作用, 同时, 摆动中作动筒也要变形。国内外传统上采用线性模型、模型试验与经验系数修正, 目前开始采用三维超弹模型, 利用有限元进行柔性接头的结构分析^[2-5]。

本文建立了柔性接头结构三维有限元模型, 考虑到几何非线性、载荷非线性、材料超弹性和作动筒的刚度等几个因素。给出了典型载荷状态下结构的计算结果。

* 收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-02-27。

作者简介: 曹翠微 (1968—), 女, 博士生, 研究领域为固体火箭发动机。E-mail: nwpuccw@yahoo.com.cn

2 物理模型与计算方法

尽管目前仍有大量针对橡胶类材料本构的研究,但有限元数值模拟与工程实际中广泛使用多项式本构模型,其源于 Rivlin (1948) 的工作。Rivlin 从数学的角度,考虑了应变能函数可能采用的最一般形式,导出各向同性、不可压材料的应变能函数为

$$W = \sum_{i,j=0} C_{ij} (J_1 - 3)^i (J_2 - 3)^j \quad (1)$$

式中 C_{ij} 是常数, J_1, J_2 是右 Cauchy-Green 应变张量的第一、第二主不变量。在工程分析中,获得完整的、不同变形模式的试验数据并不容易^[6~9]。

文献 [10] 给出了橡胶材料的单轴拉伸与简单剪切实验数据,拟合了不同材料本构模型系数,并建立试样的有限元模型。计算结果证实,对于以剪切变形为主要变形模式的柔性接头,在较大应变区域(工程应变大于 300%),采用三阶模型更为精确。本文采用三阶模型讨论柔性接头的受力分析,其应变函数 W 的形式

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

式(2)中具体的材料常数利用橡胶材料的单轴拉伸与简单剪切实验数据拟合得出,如表 1 所示。

Table 1 Material constant of 3rd order deformation model

C_{10}	C_{01}	C_{11}	C_{20}	C_{30}
148.00	-102.24	-3.09	5.78	0.05

柔性接头为轴对称体,但由于载荷非对称,需使用三维有限元模型进行数值模拟。根据载荷的作用形式,本文建立的三维模型如图 1 所示。模型共有不同单元约 15000 个,计算自由度约 50000。其中橡胶元件 9 层,增强件 8 层,沿周向划分 20 等份,宽度方向划分 15 等份,厚度方向划分从 1 层至 4 层。橡胶元件全部采用三维六面体 8 节点单元的 Hyperelastic Formulation 模式。增强件、前后法兰、加压盖板以及加载部分使用 8 节点六面体或 6 节点五面体单元,其弹性模量为 210GPa,泊松比为 0.3。

对称面施加位移约束条件 y 向位移 $v = 0$; 后法兰固定;伺服作动筒下端固定,上端与加载横臂外侧节点协调平动自由度。

柔性接头在摆动时承受的载荷为容压与作动筒驱动载荷。在柔性接头转动过程中,容压本身保持不变,但对于结构单元而言,在加载过程中由于位移与

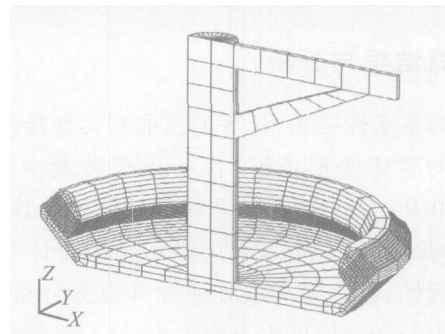


Fig 1 Finite element model of the flexible joint

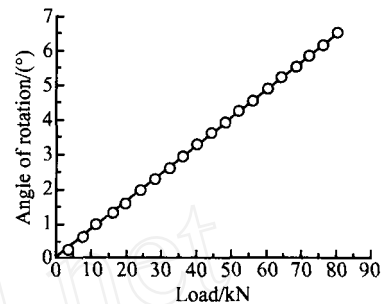


Fig 2 Rotation angle of the outermost layer midpoint on 0° cross section

变形,作用于单元上的压力方向会变化;对于作动筒驱动载荷,其大小与方向均随柔性接头转动而改变。为了解决该问题,工程上处理的一般过程为在不考虑摆杆刚度的情况下,首先计算出柔性接头在多个摆角下作动筒轴线与喷管轴线的夹角,然后根据此时作动筒压差计算作动筒轴向力;再根据柔性接头摆动的角速度,找出对应点作动筒轴向分力和径向分力;按载荷处理法计算出折合压强,将众多折合压强和对应点连接,形成柔性接头摆动过程中的载荷曲线。该载荷曲线再用于柔性接头的非线性加载过程。由于中间过程较多,对计算效率与计算精度均有影响。

本文采用 MSC/NASTRAN 提供的随动载荷模拟作动筒载荷,该载荷的作用方向定义为两节点指向,在非线性的每一加载步载荷方向可随这两节点位置的变化而变化。伺服作动筒使用杆元模拟,初始轴向刚度 $6.0 \times 10^5 \text{ N/m}$ 。同样使用随动压力模拟容压载荷,该载荷的方向沿压力作用面的法向,在非线性的过程中载荷方向可随作用面法向的变化而变化。

计算过程采用非线性静力分析,考虑大变形与跟随载荷特性,迭代过程共 20 个载荷增量步,主动更新步长的 Newton-Raphson 方法迭代求解,位移、载荷平衡与应变能残差为收敛判据。

3 计算结果与分析

针对某柔性接头,计算的目的是有柔性接头在载荷作用下的整体变形情况,包括虚拟转动中心(0, 0, 310.0)的位移状态、非橡胶件的位移状态、结构变形的对称性。这些结果可显示结构设计与计算结果的合理性;柔性接头橡胶弹性件应力分布形式,包括剪应力与径向拉压应力的大小,这与粘接面破坏直接相关,也是结构设计的关键点;不同容压下驱动载荷与转角的关系,即二者非线性程度的影响等。

本文计算状态为驱动载荷 80kN,容压 0/0.15/0.5/1.0/3.0/5.0MPa 的组合形式。计算中 2 次加载,首先分步加载压力,然后保持容压,再分步加载驱动载荷。

3.1 基本状态下的整体变形情况

基本状态定义为驱动载荷 80kN,压力 0.5MPa。

首先考察虚拟转动中心(0, 0, 310.0)的位移,柔性接头的结构设计需保证整体结构在加载过程中绕转动中心转动。计算结果显示压力加载完成后位移为(0, 0, 0.81),保持压力驱动载荷完成后位移为(1.50, 0, 0.37),所有加载步该点位移数量小于 1.55mm,证实了转动中心设计的可靠性。

其次考察加载机构包括加压盖板的转动,全部加载完成后刚度较大的加载机构包括加压盖板/垂直杆/上横臂的平均转角分别为 6.58°/6.90°/7.10°;加载机构的弹性导致的转角约 0.5°;说明结构的主要弹性变形来源于橡胶弹性件。

图 2 显示了结构对称面右侧(0 剖面)第 9 层橡胶与外法兰粘接面中点绕虚拟转动中心的转角随载荷变化的数值,加载完成时转角为 6.48°;其对称的左侧点(180 剖面)转角基本相同,最终转角比右侧大 0.1°;曲线显示转角随载荷的变化基本呈线性。

3.2 柔性接头橡胶弹性件应力分布

对于容压 0.5MPa 的基本状态,考察橡胶弹性件的柯西剪应力与剪应变分布,其对应的工程剪应变的最大数值超过 400%,说明使用超弹材料模型,特别是高阶模型是十分必要的。图 3 为 0 剖面与 180 剖面第 1, 5, 9 层弹性件柯西剪应力的具体数值。图中显示 180 剖面上的弹性件主要表现为压剪应力,且每层压剪应力分布、变化规律基本相同,靠近后法兰处(内层)的弹性件剪应力数值最大,靠近前法兰处(外层)的剪应力数值最小,从后法兰到前法兰,弹性件的柯西剪应力数值逐渐减小。柔性接头 0 剖面上的弹性件以拉剪应力状态为主,剪应力数值相对较小,其余各分层间的剪应力变化规律基本相同,数值差别不大。在柔性接头 0 剖面 and 180 剖面上,弹性件剪应力数值并不对称,180 剖面的剪应力明显大于 180 剖面的剪应力,这是由于作动筒载荷是通过前法兰传递给弹性件不对称而造成的。

当容压为 0.15MPa 时,其剪应力、剪应变的分布与基本状态非常类似(见图 4),但数值稍小,如 0 剖面最大与最小剪应力分别由 0.5MPa 时的 0.15~0.39MPa 变为 0.15~0.38MPa;180 剖面由 -0.34~-0.62MPa 变为 -0.31~-0.60MPa。值得注意的是,橡胶弹性件的径向拉应力的范围明显增加,但最大拉应力的数值仅为 0.30MPa,最大压应力减小为 1.79MPa。

当容压为 5.0MPa 时,剪应力的分布与基本状态有一定差异,0 剖面与 180 剖面第 1, 5, 9 层柯西剪应力的分布(如图 5)显示中间区域的应力呈中间大、两端小形式,与基本状态的剪应力数值单调增加有所不同,最大与最小剪应力数值也有较大变化。此时橡胶弹性件的径向应力全为压应力,最大应力为 53.80MPa。

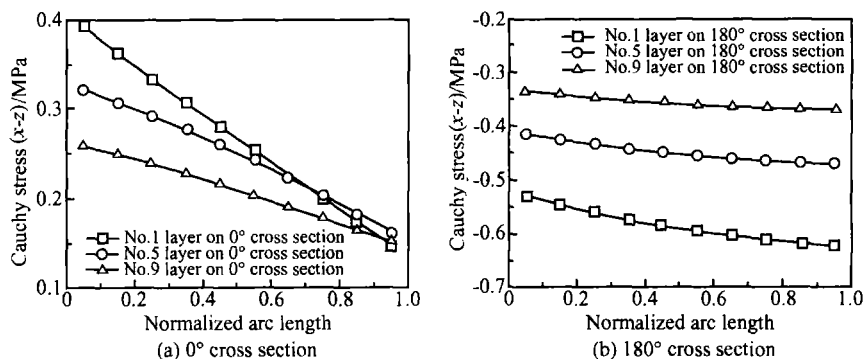


Fig 3 Cauchy shear stress distribution of No. 1, No. 5, No. 9 layer under 0.5 MPa

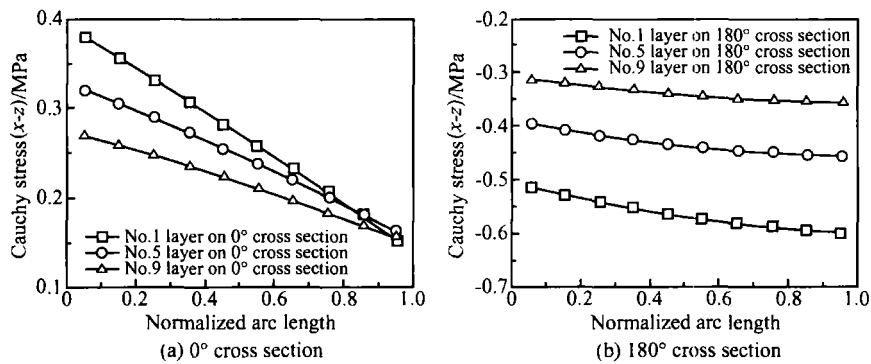


Fig 4 Cauchy shear stress distribution of No. 1, No. 5, No. 9 layer under 0.15 MPa

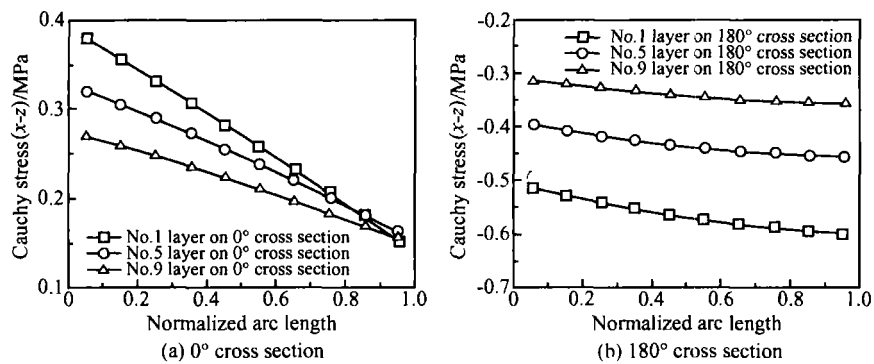


Fig 5 Cauchy shear stress distribution of No. 1, No. 5, No. 9 layer under 5 MPa

图 6~8 分别给出了 0.15, 0.5, 5.0 MPa 三种典型容压下的弹性件径向应力分布, 从图中数据可以看出, 随着容压的提高, 拉应力的区域迅速减少。计算结果说明在较低的容压下进行摆动, 此时橡胶弹性件要承受径向拉应力, 而且压力愈低, 径向拉应力的范围愈大。对这种粘接件而言, 较低的容压下进行摆动比较苛刻。通过计算发现当容压为 1.0 MPa 时, 可以使橡胶弹性件全部承受压应力。

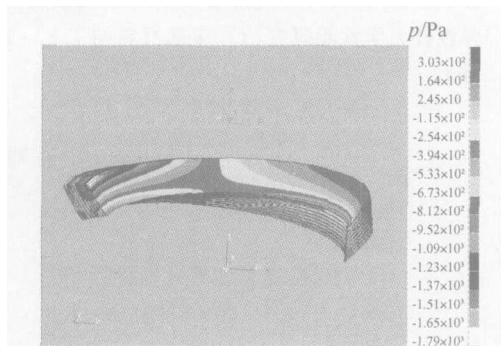


Fig 6 Positive radial tension distribution on the elastomer under 0.15 MPa

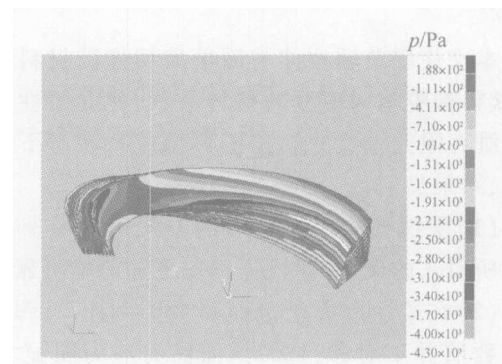


Fig 7 Positive radial tension distribution on the elastomer under 0.5 MPa

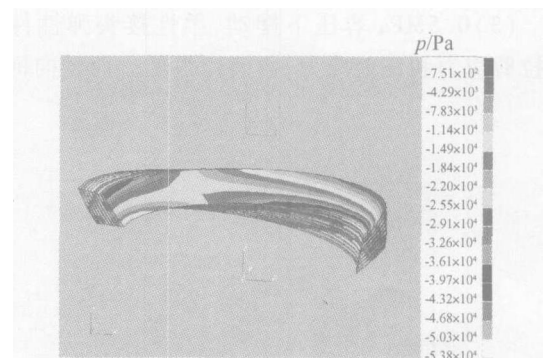


Fig 8 Positive radial tension distribution on the elastomer under 5 MPa

3.3 不同容压下角与驱动载荷的关系

当压力为 0.15 MPa 时, 80 kN 驱动载荷下对应转

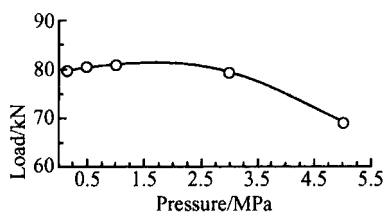


Fig 9 Drive load under different pressure

角为 6.54° ; 当压力为 5.0 MPa 时, 80 kN 驱动载荷下对应转角为 7.33° , 比 0.5 MPa 的标准状态明显增加。为了显示不同压力对转角的影响, 图 9 给出 0° 剖面第 9 层橡胶与外法兰粘合面中点绕虚拟转动中心的转角为 6.5° 时, 不同压力所对应的伺服作动筒驱动载荷。图中数据显示随着压力增加, 获得 6.5° 转角的驱动载荷将会较小, 该现象在压力较高时比较明显, 压力 5 MPa 相对压力 0.15 MPa 该载荷减小近 15% 。本文计算模型得出的规律与试验现象吻合。从机理性而言, 与直接承受切向载荷相比, 当橡胶体材料承受压力之后再施加切向载荷, 相同载荷可获得更大的剪切变形。因此为了获得相同的摆动角度, 随着压力的升高, 需要较小的驱动力。

4 结 论

本文使用单轴拉伸与简单剪切橡胶材料试验数据, 获得橡胶本构模型的材料系数, 建立柔性接头结构三维有限元模型并给出了典型载荷状态下的计算结果, 结果显示:

(1) 采用载荷跟随变形的方式可避免驱动载荷折算所引入的误差, 使计算过程更加清晰可靠。

(2) 在柔性接头 0° 剖面和 180° 剖面上, 弹性件剪应力数值并不对称, 180° 剖面的剪应力明显大于 0° 剖面的剪应力。因此, 计算时弹性件不能按理想纯剪切摆动处理。

(3) 0.5 MPa 容压下摆动, 柔性接头弹性件无论是拉剪应力和压剪应力, 数值均很低。而径向柯西应

力以压应力为主且拉应力较小。减小容压将增加径向柯西拉应力的数值与范围, 但计算状态中最大径向拉应力的数值均小于 1.0 MPa ; 增大容压将消除径向柯西拉压力区域, 避免橡胶件与增强件之间出现脱粘。

(4) 随着容压增加, 获得相同转角的驱动载荷将会减小, 该现象在压力较高时比较明显, 压力 5 MPa 相对压力 0.15 MPa 该载荷减小近 15% , 该规律与试验现象吻合。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 安春利. 柔性接头低压摆动载荷分析和性能研究 [D]. 第二炮兵工程学院硕士学位论文, 2004.
- [3] Shimon Shani, Shlomo Putter, Arie Peretz. Development of a high-performance flexible for thrust vector control [R]. A AA 95-3017.
- [4] Keamey J, Moss D. Advanced solid rocket motor nozzle thrust vector control flexseal development status [R]. A AA 92-3553.
- [5] James R. Donat. Solid rocket motor nozzle flexseal design sensitivity [R]. A AA 93-1122.
- [6] Boury D, Munoz M. ARJANE 5 SRM nozzle evolution [R]. A AA 2002-4193.
- [7] 何春明, 郑幕桥. 测定橡胶 Mooney-Rivlin 模型的一种新方法 [J]. 北京理工大学学报, 1997, 17 (2).
- [8] 郑明军, 王文静, 陈郑南, 等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定 [J]. 橡胶工业, 2003, 50 (8).
- [9] 徐 明. 橡胶类超弹性材料本构关系研究及其有限元分析 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
- [10] 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).

(编辑: 刘萝威)