

文章编号: 1000-8055(2003) 02-0264-05

固体火箭发动机柔性接头拉伸载荷下 强度分析

刘勇琼, 尤军锋

(航天科技集团公司 四院四十一所, 陕西 西安 710025)

摘要: 柔性接头是固体火箭发动机摆动喷管的执行部件, 由若干同心的环状球体的弹性件、增强件以及前后法兰相互交替地粘接在一起而成, 采用轴对称有限元法对柔性接头在拉伸载荷下进行了强度分析, 得到了在 0.5 MPa 弹射压强的拉伸载荷作用下柔性接头应力分布, 由此计算弹性件与增强件之间界面最大拉应力及层间剪应力分别为 2.34 MPa 和 0.28 MPa, 界面粘接强度满足使用要求。

关键词: 航空、航天推进系统; 固体火箭发动机; 强度分析; 柔性接头; 有限元法
中图分类号: V431 **文献标识码:** A

Strength Analysis of SRM Flexible Joint under Tensile Load

LIU Yong-qiong, YOU Jun-feng

(The 41st Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025, China)

Abstract: The solid rocket motor (SRM) flexible joint is the main part of the flexible bearing nozzle that allows nozzle to deflect in any given direction for motor thrust vector control. It consists of elastomer rings, reinforcement rings, front and rear flanges which are concentric spherical sections bonded. The finite element method is used to analyze the strength of flexible joint under tensile load. The stress field of flexible joint under 0.5 MPa distributing tensile load is acquired. Because the maximal tensile stress and layer shear stress at the interface between elastomers and reinforcement rings are 2.34 MPa and 0.28 MPa respectively, thus the strength of bonded interface can satisfy the design need.

Key words: aerospace propulsion; solid rocket motor; strength analysis; flexible joint; finite element method

1 概 述

柔性喷管是固体火箭发动机的一个关键部件, 它主要由活动体、固定体及柔性接头 3 大部件组成, 喷管摆动的执行部件是柔性接头, 它由若干同心的环状球体的弹性件(橡胶)和增强件(钢或复合材料)相互交替地粘接在一起, 前后各有法兰

组成的一个完整部件, 如图 1 所示。

由于柔性接头的结构特点, 柔性接头可以承受较大的压缩方向的载荷, 而承受拉伸的能力较差。因此为了保证柔性喷管的可靠性, 对喷管使用提出了比较严格的要求。如要求柔性喷管在充气保护下才能进行摆动, 在喷管运输、贮存过程中采用 4 根支撑杆对柔性接头进行保护等。

但是柔性接头有可能要在特殊情况下承受拉伸载荷, 比如对取消尾罩状况时导弹在弹射时, 接头要承受来自弹射时燃气发生器的燃气压强(约 0.5 MPa) 对其产生的拉伸力。这对柔性接头来说是一个新的考验, 因此需要进行认真的分析与研究, 重点考核柔性接头粘接界面强度能否满足使用要求。

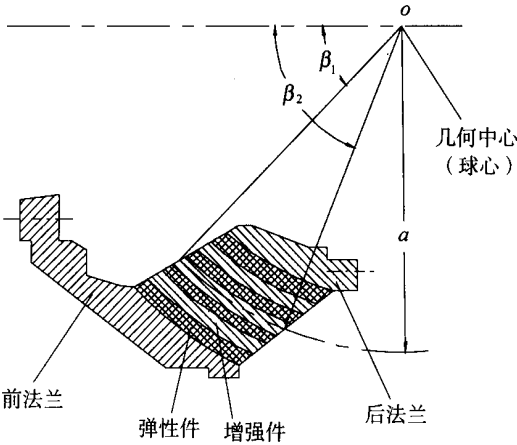


图 1 柔性接头结构示意图
Fig. 1 The structure of flexible joint

2 强度分析

有限元素法是分析计算柔性接头应力应变的有力工具。当喷管不摆动处于零位时, 柔性接头不受摆动力矩的作用, 仅受轴对称均布压强的作用, 所以, 采用轴对称问题的有限元法来对柔性接头进行分析。

2.1 有限元基本方程

在有限元结构分析中, 有限单元法的控制方程是:

$[K]\{\delta\} = \{F_C\} + \{F_B\} + \{F_S\} + \{F_T\}$ (1)

$[K]$ 为结构的总刚度矩阵:

$[K] = \sum_{e=1}^e [K]^e$ (2)

$[K]^e$ 为单元刚度矩阵:

$[K]^e = \int_{\Omega^e} [B]^T [D] [B] d\Omega$ (3)

$\{F_C\}$, $\{F_B\}$, $\{F_S\}$, $\{F_T\}$ 分别为由于集中力、体力、表面力及初始应变而引起的节点载荷向量, $\{\delta\}$ 为节点位移向量。由于在本文计算中只存在表面力, 所以支配方程简化为:

$[K]\{\delta\} = \{F_S\}$ (4)

将物体中每一单元的表面力向量 $\{Q\}^e$ 按节

点编号的顺序叠加起来就形成了结构的节点载荷向量 $\{F_S\}$ 。

对于轴对称问题, 单元刚度矩阵及单元表面载荷向量如下:

$[K]^e = 2\pi \int_{\Omega^e} [B]^T [D] [B] r dr dz$ (5)

$\{Q\}^e = 2\pi \int_{\Gamma^e} [N]^T \{q\} r d\Gamma$ (6)

其中, $\{q\}$ 为表面力向量, 这里 $[B]$ 为应变矩阵, $[D]$ 为弹性矩阵, $[N]$ 为形函数矩阵。

2.2 4 节点等参元轴对称问题

对于轴对称问题, 可采用 4 节点等参元。4 节点等参元实际单元和基本单元分别如图 2、图 3 所示, z 轴为对称轴, r 为径向坐标轴。实际单元的位移模式为:

$u = a_1 + a_2 r + a_3 z + a_4 r z$

$w = a_5 + a_6 r + a_7 z + a_8 r z$

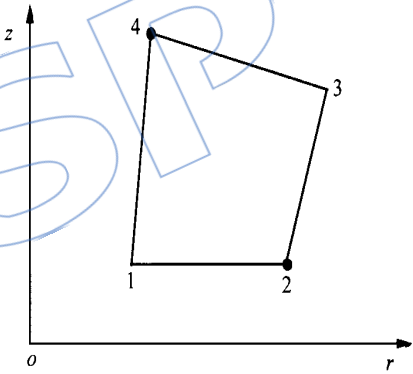


图 2 实际单元
Fig. 2 Actual element

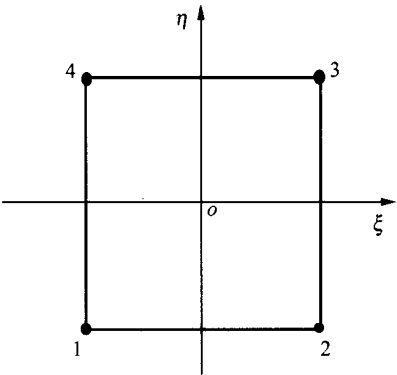


图 3 基本单元
Fig. 3 Basic element

可以通过坐标变换, 将 rz 平面上的任意四边形单元变为 $\xi\eta$ 平面上以原点为中心, 边长为 2 的

正方形单元, 而 rz 平面上的节点 1, 2, 3, 4 分别对应于 $\xi\eta$ 平面上节点 1, 2, 3, 4。坐标变换不是对整个求解域进行, 而是针对每个单元进行的, $\xi\eta$ 是一种局部坐标, 而 rz 称为整体坐标。其中待定常数可由节点位移唯一决定, 将节点位移代入上式, 在局部坐标下的位移模式就可以写成为:

$$u = \sum_{i=1}^4 N_i u_i, \quad w = \sum_{i=1}^4 N_i w_i$$

其中:

$$N_i = (1/4)(1 + \xi_0)(1 + \eta_0)$$

$$\xi_0 = \xi \xi_i, \quad \eta_0 = \eta \eta_i$$

$$(i = 1 \sim 4)$$

根据等参数的概念, 在每个单元上, 把坐标变换式取为:

$$r = \sum_{i=1}^4 N_i r_i, \quad z = \sum_{i=1}^4 N_i z_i$$

该坐标变换在 4 个节点处给出了节点的整体坐标, 而且在单元的 4 条边上, 一个局部坐标等于 ± 1 , 而另一个局部坐标是线性变化的, 从而整体上也是线性变化的。则:

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\theta \\ \epsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial r} \\ \frac{u}{r} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} = [B] \{\delta\}^e = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4] \{\delta\}^e$$

其中:

$$\{\delta\}^e = [u_1 \ w_1 \ u_2 \ w_2 \ u_3 \ w_3 \ u_4 \ w_4]^T$$

而式中:

$$[B_i] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \\ N_i & 0 \\ \sum_{i=1}^4 N_i r_i & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial r} \end{bmatrix} \quad (i = 1 \sim 4)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix}$$

根据复合函数求导法则, 则有:

式中 $[J]$ 是雅可比矩阵的行列式, $[J]$ 可表示为:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial r}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial r}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \sum_{i=1}^4 N_i r_i & \frac{\partial}{\partial \xi} \sum_{i=1}^4 N_i z_i \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \sum_{i=1}^4 N_i r_i & \frac{\partial}{\partial \eta} \sum_{i=1}^4 N_i z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & \dots & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & \dots & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & z_1 \\ r_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots \\ r_4 & z_4 \end{bmatrix}$$

单元中的应力可表示为:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = [D] [B] \{\delta\}^e$$

式中 $[D]$ 是轴对称问题的弹性矩阵, 即:

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & & & \\ \nu/(1-\nu) & 1 & & \\ \nu/(1-\nu) & \nu/(1-\nu) & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/[2(1-\nu)] \end{bmatrix}$$

单元刚度矩阵式(5)变为:

$$[K]_{8 \times 8}^e = 2\pi \iint_{\Omega} [B]^T [D] [B] r dr dz = 2\pi \sum_{i=1}^4 r_i \int_1 \int_1 [B]^T [D] [B] N_i |J| d\xi d\eta$$

考虑结构只受面力载荷,若设单元在 $\xi=1$ 的边上有面力 $\{q\} = [q_r \ q_y]^T$ 作用,则表面力向量的计算公式(6)式变为:

$$\{Q\}^e = \begin{Bmatrix} Q_{ir} \\ Q_{iz} \end{Bmatrix}^e = 2\pi \cdot \sum_{i=1}^4 r_i \int_1 N_i \begin{Bmatrix} q_r \\ q_z \end{Bmatrix} N_i \left[\left(\frac{\partial r}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \eta} \right)^2 \right] d\eta \quad (i,j,k,l)$$

将单元刚度矩阵装配成结构总刚度矩阵 $[K]$,并将总刚度矩阵 $[K]$ 按约束条件进行处理,最后形成有限单元法支配的方程(4)式。解此方程组,便得到结构上每个节点的位移,进而计算出每

个单元的应变与应力。

3 载荷及边界条件处理

在 0.5 MPa 弹射压强的拉伸载荷作用下,喷管扩张段内型面受力情况如图 4 所示。已知喷管出口内径为 1011.5 mm,则通过喷管扩张段壳体传递到柔性接头上的轴向力为 401783.1 N,折算到柔性接头前法兰对接面上的面力为 11.1 MPa,和固定体连接的后法兰端面边界条件取为固定,如图 5 所示。

4 计算结果及分析

4.1 计算结果

对某喷管柔性接头进行了分析,4 节点等参元网格如图 6 所示。弹性件共划分了 1053 个单元,增强件共划分了 936 个单元,前后法兰共划分了 303 个单元。

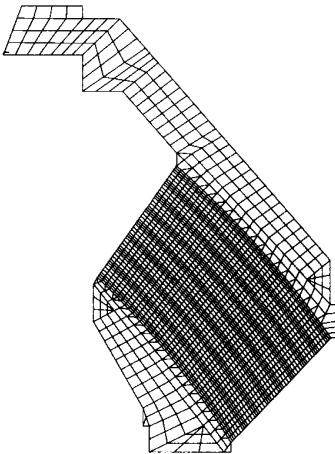


图 6 计算网格
Fig. 6 Calculation mesh

柔性接头变形情况如图 7 所示,从应力计算结果看,与后法兰相连的弹性件应力最大(见图 5 弧 OAB),各向应力沿弧 OAB 方向的分布分别如图 8~图 11 所示,该层上最大的应力点的应力为:轴向应力 2.27 MPa、径向应力 2.373 MPa、剪切应力 0.138 MPa、环向应力 2.32 MPa,根据这

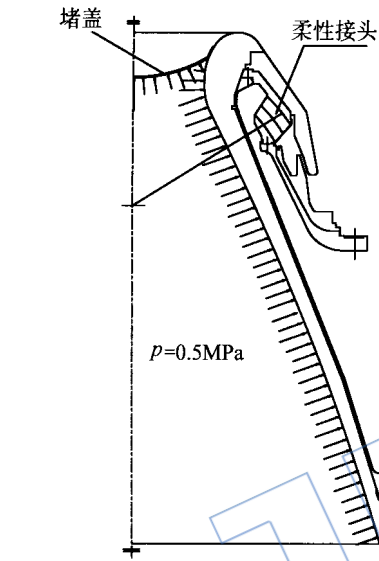


图 4 喷管所受弹射载荷
Fig. 4 Transmit load

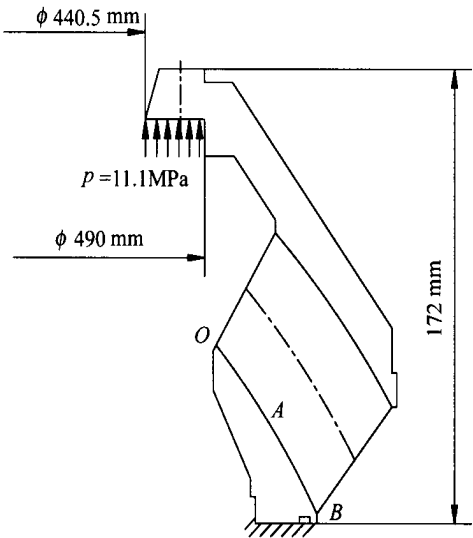


图 5 载荷及边界条件
Fig. 5 Load and boundary condition

些应力分量可以计算出弹性层在粘接面法向正应力和剪应力分别为 2.34 MPa 和 0.28 MPa。

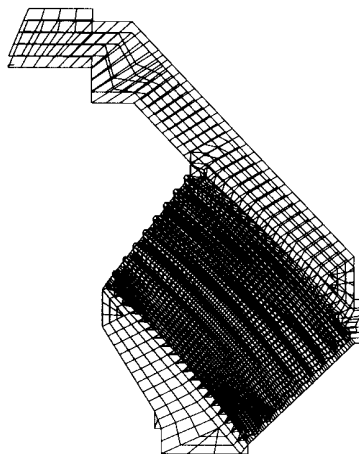


图 7 变形示意图

Fig. 7 Deformation schematic diagram

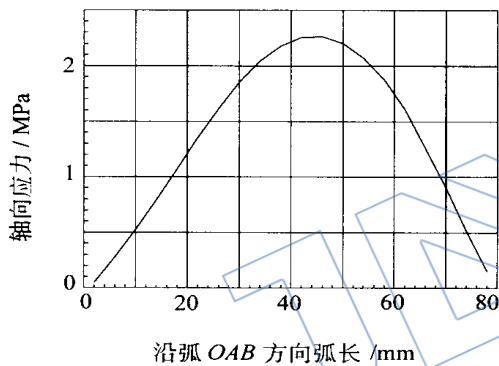


图 8 第一层弹性层轴向应力分布

Fig. 8 Axial stress on the first elastomer

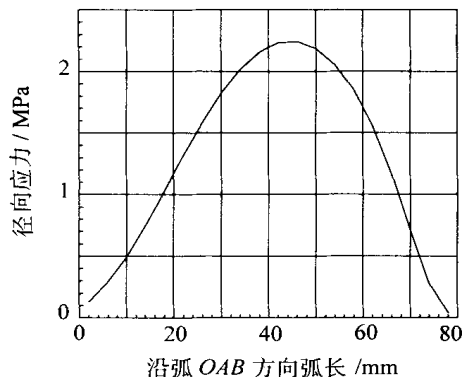


图 9 第一层弹性层径向应力分布

Fig. 9 Radial stress on the first elastomer

4.2 分析及结论

在 0.5 MPa 弹射压强的拉伸载荷作用下, 柔性接头粘接层方向的拉应力最大约 2.34 MPa, 剪应力约 0.28 MPa, 这个拉应力小于柔性接头粘接

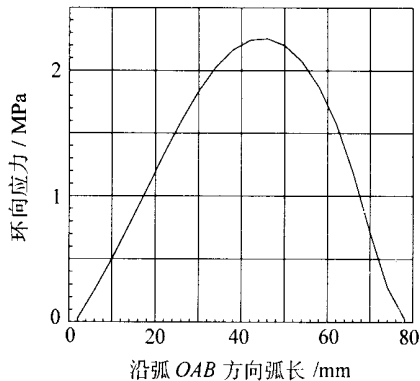


图 10 第一层弹性层环向应力分布

Fig. 10 Hoop stress on the first elastomer

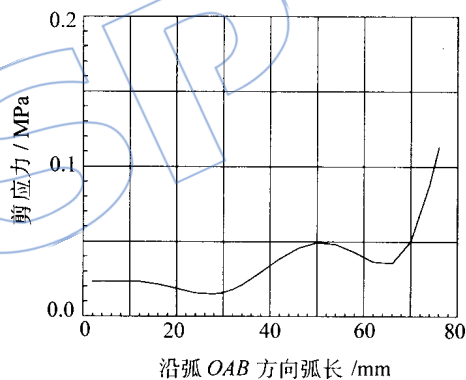


图 11 第一层弹性层剪应力分布

Fig. 11 Shear stress on the first elastomer

强度(4.5 MPa), 满足柔性接头安全使用要求; 值得指出的是, 由于目前对柔性接头是依靠高强度胶将十几个界面粘接而成, 存在粘接缺陷情况是在所难免的, 理论上进一步开展存在粘接缺陷情况下在拉伸作用下的发展规律的研究具有更大的实际意义, 通过实物试验来验证也是十分必要的。

参考文献:

[1] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究(下册)[M]. 北京: 宇航出版社, 1992.
[2] 谢贻权, 何福保. 弹性和塑性力学中的有限元素法[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.