

球面型管路连接件密封 性能分析及力学性能测试

王建武, 刘军生, 陈少斌
(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对火箭发动机推进系统管路中广泛使用的球面密封结构, 选取四节点四边形板单元 PLANE182 作为基准单元对管路连接件进行有限元计算, 得出管路连接件的应力场、应变场以及位移场的函数表达式, 分析了其密封机理, 讨论了弹塑性变形对金属密封的重要作用。在此基础上, 采用非线性有限元法对接触单元进行了弹塑性分析和接触分析, 并对管路连接件进行了耦合接触分析, 在 ANSYS 平台上对耦合接触体进行了力学性能测试, 详细分析了管路连接件的位移、应变和应力分布状况。

关键词: 球面型管路连接件; 密封性能分析; 力学性能测试

中图分类号: V434 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2010) 06-0036-06

Sealing performance analysis and mechanical property testing of spherical tube connector

WANG Jian-wu, LIU Jun-sheng, CHEN Shao-bin
(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: Four-node quadrilateral plate element PLANE182 is taken as a reference element to conduct the finite element calculation for spherical sealing structure widely used in rocket engine propulsion system pipeline. The function expressions of stress field, strain field and displacement field of tube connector were obtained. The sealing mechanism of tube connector is analyzed. The importance of elastic-plastic deformation to metal sealing is discussed. Based on the above research, the elasto-plastic and contact analyses for the contact element and coupled contact analysis for the tube connector are conducted by means of non-linear finite element method. The mechanical property testing of coupled contact bodies was carried on ANSYS platform to determine the displacement, strain and stress distribution of the tube connector.

Keywords: spherical tube connector; sealing performance analysis; mechanical property testing

收稿日期: 2010-09-15; 修回日期: 2010-10-14

基金项目: 国家航天技术支撑项目

作者简介: 王建武 (1971—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机装配

0 引言

在液体火箭发动机总装工艺中, 球面型管路连接形式的装配占据相当重要的地位。发动机在工作过程中, 其密封性对整个发射的成功与否起到至关重要的作用。因此, 保证发动机各系统在工作过程的密封性具有十分重要的意义, 而发动机管路系统的密封性是保证发动机密封中最为重要的环节。

在管路装配过程中, 操作者施加的拧紧力矩转化为夹紧球面和锥面的预紧力。在安装预紧力的作用下, 球表面和锥表面相互贴合、相互压缩, 逐渐形成接触面。从宏观上来看, 两个面在初始接触后, 即可形成一密封环面。但从微观来看, 金属表面都有许多不同形状的凸峰和凹谷组成, 初始接触只发生在表面积的极小部分, 要实现表面接触的紧密接触, 需要一个逐渐压紧和磨合的过程。球面型管路连接件密封性能的分析实际上是球形接头与锥面接嘴接触问题的弹塑性分析。对于弹塑性接触问题的求解方法采用有限元方法。

1 球面型管路接头接触问题有限元解法

球面型管路连接形式如图 1 所示。

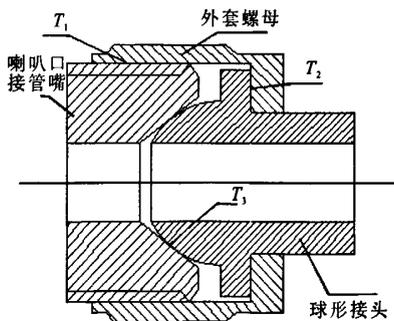


图 1 球形接头-喇叭口接管嘴密封结构

Fig. 1 Sealing structure of spherical connector-flare nipple

选取四节点四边形板单元 PLANE182, 该单元为由 4 节点组成的平面四边形板单元。矩形单

元由于形状简单、规范, 在有限元方法的研究中作为“基准单元”进行研究。在实际应用中可以根据真实情况将矩形单元“映射”为所需要的任意四边形单元。在球形接头和锥面接嘴实体上选取任一矩形单元, 单元的节点位移如图 2 所示。

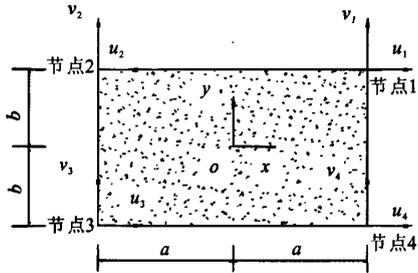


图 2 平面 4 节点矩形单元

Fig. 2 Four-node plane rectangular element

1.1 单元的几何和节点描述

图 2 为 4 节点矩形单元, 单元的节点位移有 8 个自由度 (DOF)。单元的节点位移编号为 1, 2, 3, 4, 相应的位置坐标为 (x_i, y_i) , $i=1,2,3,4$ 。各个节点的位移 (分别沿 x 方向和 y 方向) 为 (u_i, v_i) , $i=1,2,3,4$ 。

$$q^e_{(18 \times 1)} = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_4 \ v_4]^T \quad (1)$$

$$P^e_{(8 \times 1)} = [P_{x1} \ P_{y1} \ P_{x2} \ P_{y2} \ P_{x3} \ P_{y3} \ P_{x4} \ P_{y4}]^T \quad (2)$$

利用插值函数、集合方程、物理方程, 可以将单元的所有力学参量用节点位移列阵 q^e 及相关的插值函数来表示。

1.2 单元位移场表达式

从图 2 可看出, 节点条件共有 8 个, 及 x 方向 4 个 (u_1, u_2, u_3, u_4) , y 方向 4 个 (v_1, v_2, v_3, v_4) , 因此, x 和 y 方向的位移场可以各有 4 个待定系数。选取该单元的位移模式为:

$$\left. \begin{aligned} u(x,y) &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \\ v(x,y) &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

它们是具有完全一次项的非完全二次项, 其中第四项考虑到 x 方向和 y 方向的对称性选取, 而未选 x^2 或 y^2 项。

由节点条件, 在 $x=x_i, y=y_i$ 处有:

$$u(x_i, y_i) = u_i \quad v(x_i, y_i) = v_i \quad i=(1,2,3,4) \quad (4)$$

将(3)式带入(4)式,可以求解出待定系数 a_0, a_1, a_2, a_3 和 b_0, b_1, b_2, b_3 , 然后再将求解得到的待定系数回带到(3)式中,经整理后有:

$$\left. \begin{aligned} u(x,y) &= N_1(x,y)u_1 + N_2(x,y)u_2 + N_3(x,y)u_3 + N_4(x,y)u_4 \\ v(x,y) &= N_1(x,y)v_1 + N_2(x,y)v_2 + N_3(x,y)v_3 + N_4(x,y)v_4 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

写成矩阵形式:

$$\mathbf{u}^{(2 \times 1)}(x,y) = \begin{bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{bmatrix} = \mathbf{N}_{(2 \times 8)} \cdot \mathbf{q}^e \quad (6)$$

其中 $N(x,y)$ 为该单元的形状函数矩阵。

1.3 单元应变场表达式

由弹性力学平面问题的几何方程(矩阵形式),得到单元应变的表达式:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(3 \times 1)}(x,y) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial \\ \partial \\ \partial \end{bmatrix} \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \partial \\ \partial \\ \partial \end{bmatrix} \mathbf{u} \cdot \mathbf{q}^e = \mathbf{B} \cdot \mathbf{q}^e \quad (7)$$

1.4 单元应力场表达式

由弹性力学平面问题的物理方程,可得到单元力的表达式:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{q}^e \quad (8)$$

其中应力函数矩阵为: $\mathbf{S} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{B}$ 。

1.5 单元的刚度方程

单元的刚度方程: $\mathbf{K}^e \mathbf{q}^e = \mathbf{p}^e$ \mathbf{K}^e 为单元的刚度矩阵。

2 球面型管路接头密封性能有限元分析

由于球形接头和锥面接嘴都是围绕管轴线的轴对称结构,故可根据其二维剖面进行建模,

选取四节点四边形板单元 PLANE182。PLANE182 不仅可用于计算平面应力问题,还可用于分析轴对称结构问题。根据接触分析的原则,以锥面接嘴作为目标单元、以球形接头为接触单元,分别选取 TARGE169 单元和 CONTA172 单元建立接触对单元,对球形接头-锥面接嘴进行力学状态分析。

2.1 接触模型

以锥面接嘴为目标单元,球形接头为接触单元,在球形接头导管凸肩(与外套螺母接触的平面)施加位移载荷。有限元接触模型如图3所示(截取1/4周)。

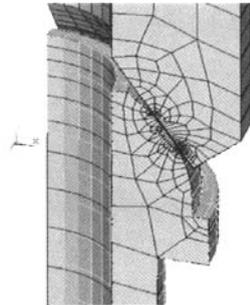


图3 接触模型(截取1/4周)

Fig. 3 Contact model of finite element(1/4 circumference)

2.2 接触状态

从接触中心沿接触面到两侧存在三种接触状态,依次为滑动接触区、近距离接触区和间隙区(图1中 T_3 密封面)。

2.2.1 滑动接触区

滑动接触区为紧密接触区。两接触面相互渗透,摩擦应力达到极限,在外套螺母拧紧的过程中两接触面之间会发生相对滑动。滑动接触区是起密封作用的核心区域

2.2.2 近距离接触区

近距离接触区域在微观状态下属于近距离接触状态。它形成于滑动接触区的边缘,近距离接触区不会对密封起作用,但随着位移加载量(外套螺母拧紧)的增加,会逐步发生从近距离接触区到滑动接触区的转化。

2.2.3 间隙区

间隙区远离接触区,对密封不起任何作用,

研究价值不高。球形接头弧线包含滑动接触区和近距离接触区。从接触开始, 滑动接触区开始形成并随着外套螺母的拧紧而加宽, 即形成密封带宽, 相反, 近距离接触区由于转化进入滑动接触区而变得越来越小。在加载条件 $U_1=0.8$ mm 时, 滑动接触区约占整个球面弧线的 40% 左右, 这相当于外套螺母转动角度 192 度。

2.3 接触渗透

滑动接触区为紧密接触区, 因此在滑动接触区会发生两接触面之间的相互渗透现象。最大相互渗透量为 $7.3 \mu\text{m}$ 。接触渗透量越大, 对密封的贡献也越显著。

2.4 接触压应力

在接触区应力为压应力 (图 1), 在两侧边缘处, 曲线爬升的很快。应力在很窄的范围内从零迅速增加到 1000 MPa 以上。

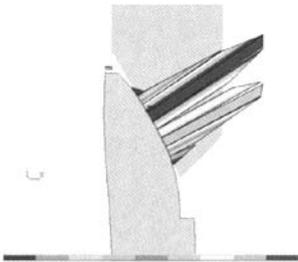


图 4 接触压应力分布

Fig. 4 Contact stress distribution

2.5 接触滑动距离

滑动接触区在载荷条件下发生相对滑动, 滑动距离从两侧为零开始, 随着滑动接触区的深入增加, 最大滑动距离为 0.66 mm。

2.6 球形接头位移矢量分布 (Vector plot)

从图 5 可以看出, 在球形接头实体内部的位移矢量分布差异很大, 各单元位移大小和方向都不相同。箭头的长度代表单元位移的大小, 箭头的指向表示单元的位移和运动方向。可以看出, 球头接近凸肩的部位位移量最大, 方向主要沿轴向上运动, 在滑动接触区位移量最小。在球头距上端面向下约 1 毫米处沿 X 方向的水平位移最大, 这也是球形接头内径收缩量最大的地方, 以

往认为球头上端面处内径收缩量最大, 这种感性认识与实际存在差异是错误的。

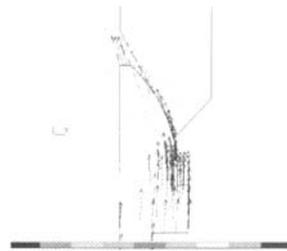


图 5 位移矢量分布图

Fig. 5 Displacement vector distribution

从接触渗透图和接触正压应力分布图可以看出, 在密封区域中点附近压应力最大, 接触渗透也最深, 在接触区域变化量也很小, 波动平稳。但在密封区域边缘部分, 接触压应力骤然下降直到零, 渗透深度也骤降到零点。密封性能主要依靠接触区域除去两端外的中间区域来保证, 因此, 一旦中间密封区域发生了轴向偏移, 从而导致在球形接头密封环向出现接触不均匀, 由于接触区域边缘效应非常明显和剧烈, 因此极容易出现密封薄弱环节或漏洞, 密封性能将大幅下降, 可靠性急剧降低。因此导管在装配时应充分保证球形接头与锥面之间的轴向对中性, 即安装紧度。这就是为什么导管在装配时要将安装紧度控制在一定的范围内, 即使这样, 在装配拧紧时必须修正导管的装配紧度, 才能达到密封效果。导管管径越大, 安装紧度有可能也很大, 修正需要的修正角度也越大, 实际中偏斜较大的导管, 修正角度和无偏斜状态导管的拧紧外套螺母转动角度几乎相当, 应予以高度重视。

3 管路接头耦合接触分析 (力学性能测试)

在研究球形接头与锥面接管嘴的接触问题时, 是在球形接头的凸肩上直接施加位移或压载荷来实现的, 这种加载条件并未考虑外套螺母的变形, 是将外套螺母作为一个不变形的刚体来研究的。同样对外套螺母的加载也是将球形接头

作为一个刚体来研究的。实际中,由于管接头包括三个零件,一方面球形接头不但与锥面接管嘴发生接触,同时与外套螺母也发生接触,在螺纹预紧力的作用下,外套螺母将螺纹预紧力转化为对球形接头的压紧力,使球形接头与锥面接管嘴发生接触,产生了复杂的位移变形,而且球形接头与锥面接管嘴的位移、应力和应变都是不断变化的,时刻都在变化中。另一方面,时刻变化的球形接头对外套螺母又产生不断变化的反作用载荷,在变化的反作用力条件下,外套螺母也开始发生相应的变化,使外套螺母的位移、应力和应变等发生复杂的变化。这种相互作用又相互反作用的复杂变化使接触问题的求解变得更加复杂,一个普通的接触问题演变成为一个复杂的耦合接触问题求解。这种复杂耦合问题,求解方法也必须采用耦合接触分析。

3.1 耦合接触模型

建立耦合接触模型的目的就是要将全部管路接头放在同一个系统中作为一个整体进行研究。根据管接头的实际接触条件,球形接头接触面有两个,因此也相应的建立两个接触对。分析单元仍然选取四节点四边形板单元 PLANE182,以锥面接管嘴作为目标单元、以球形接头为接触单元,分别选取 TARGE169 单元和 CON TA172 单元建立一个接触对单元。再以球形接头作为目标单元、以外套螺母为接触单元,分别选取 TARGE169 单元和 CON TA172 单元建立另一个接触对单元,耦合接触模型就建立了,其中球形接头在两个接触对中分别作为了接触单元和目标单元。如图 6 所示。

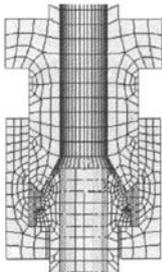


图 6 管路连接件耦合接触有限元模型

Fig. 6 Coupled contact finite element model of tube connector

3.2 耦合体应力分布

管路连接件耦合体应力分布见图 7。

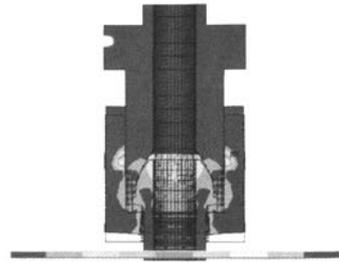


图 7 管路连接件耦合体应力分布图

Fig. 7 Stress distribution of tube connector coupled bodies

从图 7 可以看出,耦合体应力分布不均匀,有五处应力分布比较大。比较大的应力造成实体较大的位移,而实体内部应力分布不均匀产生较大的应变,也就是实体发生了畸变。下面对耦合体的力学性能进行测试。

第一处:配合螺纹前两扣,螺纹前两扣承担螺纹总载荷的 95%以上。在生产中,经常出现导管分解的情况,分解后的导管检查会发现螺纹前两扣比其他螺纹磨损较严重。如果外套螺母螺纹表面有镀层,在前两扣螺纹表面镀层会出现比较严重的磨损,露出金属机体本色。在工程中,如果螺纹前两扣有毛刺或其他缺陷,在装配时则容易造成螺纹咬死或烂牙等。因此,发动机导管在装配前对螺纹的检查和清洗应重点应放在配合部分前两扣,并做好充分润滑(螺纹涂油膏)。

第二处:外套螺母退刀槽处应力分布较大,在合力的作用下,退刀槽处产生缩颈现象。

第三处:外套螺母端面内孔边缘受到比较大的压应力作用,来自球形接头的反作用力。在压应力作用下,外套螺母端面发生倾斜,外观上出现端面凸出变形。

第四处:球形接头球头部分受到比较大的压应力作用。外力通过外套螺母对球形接头所做的功有一部分就积聚在球头上,这些积聚在球头上的弹性势能也就是密封作用的动力源,积聚的势能越多,密封效果越好。球形接头位移包括水平位移和轴向位移。水平位移称为内颈收缩量,轴

向位移就是拧紧过程中传递到球形接头上的进给量。在较大应力的作用下,球形接头球头部分也发生了比较大的畸变。由于材料弹性区的作用,畸变有回复到原位的趋势,这种复位趋势的强烈程度表示了密封性能的优劣程度。

第五处:在锥面接嘴密封接触部位有较大压应力分布,在压应力作用下锥面出现下凹现象。实际生产中,装配后分解的导管锥面上都存在周向均匀压痕,就是在压应力的作用下形成的。

4 结论

通过有限元计算分析,得到了管路连接件,包括球形接头、锥面接嘴和外套螺母的受力状况以及应力、应变和位移分布状况。管路连接件的受力来自外套螺母,因此,要保证接头的密封

性,必须对外套螺母的转角即轴向进给量进行严格控制,达到控制管路连接件中各零件变形量的目的。也就是保证球形接头内径收缩量、外套螺母缩径和端面外凸等不超出要求范围。本文最终就是要通过受力分析达到控制管路接头既保证最佳的密封性,又最大限度地保证各管路连接件位移变形量不会超标。

参考文献:

- [1] 曾攀. 有限元分析及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 邓凡平. ANSYS10.0 有限元分析[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [3] 徐灏, 邱宣怀, 蔡春源, 等. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [4] 陈汝训. 碳纤维壳体封头设计的几个问题[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(5): 75-79.

(编辑: 王建喜)

(上接第 14 页)

5 结论

1) 综合已有引射喷管一维流的数值计算方法, 提出了一种可以计算各种主流落压比下引射喷管抽吸特性的方法, 并用 Delphi 语言开发成可视化应用软件, 可快速进行引射系统的设计。

2) 以高空状态为设计点, 得出了不同飞行高度, 不同发动机转速, 不同飞行马赫数, 不同次流恢复系数下的抽吸特性规律。

3) 结合商用 fluent 软件, 对某型无人机引射冷却系统进行了设计, 研究说明应该重点考虑地面状态, 证明本文方法具有一定工程应用价值。

参考文献:

- [1] BERNSTEIN A. Compound-compressible nozzle flow, AIAA 1966-663 [R]. USA: AIAA, 1966.

- [2] WEBER H E. Ejector-nozzle flow and thrust[M]. USA: New York: [s. n.], 1960.
- [3] ANDERSON B H, BERNHARD H. Computer program for calculating the flow field of supersonic ejector nozzles, NASA 1974-7602 [R]. USA: NASA, 1974.
- [4] PEARSON H, MECH M I. Theory of the cylindrical ejector supersonic propelling nozzle, AIAA1968-665 [R]. USA: AIAA, 1968.
- [5] 姜正行. 飞机内流空气动力学 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [6] 陈晓龙, 何国强, 刘佩进, 等. 潜式喷管对燃烧室中压力振荡的影响[J]. 固体火箭技术, 2010, 33 (3): 22-25.
- [7] 王玉峰, 郭斌, 吴宝元. 冲压发动机燃烧室压力脉动对进气道的影响分析[J]. 火箭推进, 2010, 36 (3): 32-36.
- [8] 赵宏, 张海栋, 赵春宇. 超音速环形蒸汽引射器启动特性试验研究[J]. 火箭推进, 2010, 36 (2): 52-56.
- [9] 额日其太, 李喜喜, 王强. 轴对称喷管喉道面积射流控制数值模拟研究[J]. 推进技术, 2010, 31 (3): 108-112.
- [10] 王玉峰, 吴宝元, 王东东. 变比热对超燃冲压发动机尾喷管设计的影响分析[J]. 火箭推进, 2010, 36 (2): 47-51.

(编辑: 马杰)