

ANSYS 二次开发在火箭发动机 法兰结构设计中的应用

刘 博, 许 健

(北京航天动力研究所, 北京 710000)

摘 要: 氢氧液体火箭发动机密封连接形式常采用一种法兰面贴合的榫槽式密封法兰结构, 设计时主要采用有限元方法进行结构强度和密封性分析。为提高设计效率、简化有限元操作, 利用 ANSYS 提供的用户界面设计语言 (UIDL) 和参数化设计语言 (APDL) 二次开发环境, 开发结构分析程序模块。该程序模块能够将法兰结构有限元分析的前后处理和计算封装在后台操作, 用户只需输入结构和材料参数, 程序可自动进行有限元计算。利用有限元计算结果, 通过垫片应力预测泄漏率进行密封性分析, 结合螺栓和法兰最大应力, 可确定垫片规格等结构参数和拧紧力矩等装配参数。通过实际应用验证, 根据程序计算结果满足发动机热试车使用要求, 验证计算方法合理。

关键词: 火箭发动机; 法兰结构; 有限元法; ANSYS 二次开发

中图分类号: V431-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0039-07

Application of ANSYS secondary development in design of flange structure for rocket engine

LIU Bo, XU Jian

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 710000, China)

Abstract: The flange structure with tenon-mortise sealing is widely used in LOX/LH rocket engine. FEM is usually used to analyze the sealing performance and structural strength in the design process of the flange structure. To improve the efficiency of design and simplify finite element operation, the secondary development environment of the user interface design language (UIDL) and ANSYS parameter design language (APDL) provided in ANSYS is used to develop the structure analysis program module. The program module can package the preprocessing-postprocessing and calculation of the flange structure finite element analysis for operation at backstage. The program can make the FEM calculation automatically when users input the structure and material parameters only. The leakage rate is predicted by means of the gasket stress to perform the hermeticity analysis

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-05-13

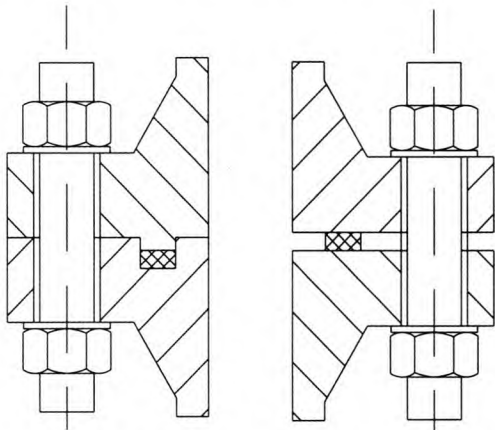
作者简介: 刘博 (1984—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

according to the FEM calculation results. The gasket specifications and tightening torque can be determined in combination with the maximum stress of bolt and flange. The practical application result proves that the program calculation result can meet application requirements of the engine fire test, and the verification calculation method is rational.

Keywords: rocket engine; flange structure; FEM; ANSYS secondary development

0 引言

螺栓法兰连接结构具有较好的强度，因结构简单、可重复拆卸，在液体火箭发动机中被大量采用。氢氧液体火箭发动机推进剂最低温度是 20 K，发动机密封件采用能耐低温的柔性石墨密封垫，其密封连接形式采用一种法兰面贴合的榫槽式密封法兰结构，如图 1(a)所示。这种结构通过榫槽控制垫片压缩量以保证密封性能，与法兰面不贴合的法兰连接结构相比，垫片不会发生压溃失效，如图 1(b)所示，而且可以施加较大的螺栓预紧力，充分保证密封的有效性。



(a) 法兰面贴合 (b) 法兰面不贴合

图 1 法兰结构密封形式

Fig. 1 Sealing type of flange structure

对于的法兰面不贴合的垫片密封法兰连接形式，GB/T150-1998 规定了用预紧密封比压 γ 和垫片系数 m 作为垫片基本性能的规范设计方法。ASME 还提出了基于紧密度要求的螺栓法兰载荷计算方法^[1]，采用具有紧密度或泄漏率特性的垫片系数 G_b 、 a 和 G_s 代替了预紧密封比压 γ 和垫片系数 m 。氢氧火箭发动机所采用的法兰面贴合的

法兰结构通过控制垫片压缩量保证密封，其螺栓拧紧力矩不完全作用在垫片上，螺栓拧紧力矩与垫片密封比压间难以建立直接的量化对应关系，也没有相应规范方法对其设计计算进行规范，设计时主要采用有限元方法对结构进行强度和密封性分析。

对榫槽式垫片密封的法兰结构进行有限元计算时，建模、网格划分、载荷施加等前处理过程需要花费大量时间。计算过程中，在物理模型的简化处理、垫片单元的非线性定义、网格划分精度的控制、结构接触对的设置及计算收敛性控制等方面还需要具有一定的分析经验和操作技巧。为避免设计时大量计算带来的重复性工作，本文利用 ANSYS 提供的二次开发环境进行法兰结构有限元模块化设计，通过提供参数输入等交互窗口，将具体的计算过程工作封装到后台操作，快速实现榫槽式垫片密封法兰结构的有限元分析。

1 ANSYS 二次开发技术介绍

ANSYS 不仅提供强大的 GUI 前台应用功能，还提供了强大的二次开发接口可满足各个专业领域用户的需要和求解特殊问题的需求，通常在作 ANSYS 二次开发时，使用 UIDL 和 APDL 相结合的方法。

APDL 指 ANSYS 参数化设计语言，具有参数、数组表达式、函数、流程控制、重复执行命令、宏及用户程序等功能。用户可以利程序设计语言将 ANSYS 命令组织起来，编写出参数化的用户程序，实际开发时以宏命令的形式进行组织，实现有限元分析的全过程^[2]。

UIDL 指 ANSYS 用户界面设计语言，主要使用 APDL 语言编写或改造 ANSYS 图形界面的专用设计语言。UIDL 语言可对 ANSYS 系统菜单进

行扩充,使其具有针对某种特定功能进行有限元分析的专用菜单、对话框及帮助系统。通过 UIDL 用户可以在扩充 ANSYS 功能的同时建立起对应的图形驱动界面,如在主菜单的某位置增加菜单项,设计对应的对话框、拾取对话框,实现参数的输入和其它程序运行的控制^[9]。

2 程序设计

2.1 程序计算流程

程序模块主要针对氢氧发动机榫槽式垫片密封的法兰结构进行强度和密封性分析,程序遵循有限元分析前处理-求解-后处理的过程,将法兰结构分析流程分为材料属性定义、结构参数输入及参数化建模、网格划分、载荷施加、求解以及计算结果 6 个子模块。在 ANSYS 主菜单中对应添加 Flange 模块菜单,在 Flange 菜单下建立了 6 个子菜单: Material, Model, Meshing, Loads, Solve 及 Result,程序模块展开菜单如图 2 所示。

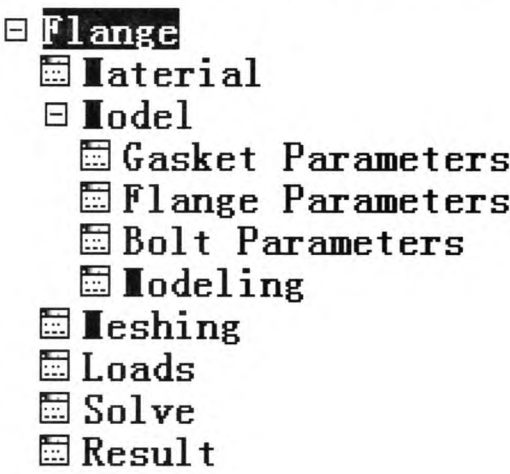


图 2 程序模块展开菜单界面

Fig. 2 Expanding menu interface of program module

模块程序主要包含 3 种文件: ANSYS 启动文件、控制文件和外部宏文件。ANSYS 启动时首先调用 ANS 启动文件,程序根据启动文件提供的地址调用控制文件,从而实现 ANSYS 的 GUI 界面调用。程序首先修改启动文件,将控制文件地址指向新编译的包含法兰计算程序的控制文件。利用 APDL 将 ANSYS 有限元分析的建模、分网、求解和后处理的命令组织起来,编写成参数化的

计算程序宏文件。运用 UIDL 将相应的菜单结构块、命令结构块内嵌到控制文件的菜单脚本中,每个主菜单和各级子菜单都相对应一个控制函数,通过菜单、窗口的交互操作,调用已编译的控制函数,控制函数再调用外部宏文件,从而实现相应功能。图 3 是法兰结构分析模块的系统框架图。

使用模块化程序时,用户仅通过输入模型材料特性参数和结构参数,程序将自动选择网格单元类型,进行三维建模和优化的网格划分,添加接触单元,施加边界条件,选择求解器求解,计算完成后根据用户选择后处理方法处理结果。法兰结构设计时,设计者可根据设计经验进行初步设计,利用模块程序实现快速计算,进行密封性和强度分析校核;再根据分析结果对螺栓规格、垫片厚度、垫片压缩量及拧紧力矩等关键参数进行优化,之后再对优化设计进行验证计算,程序主要简化了多轮设计优化与有限元计算分析之间的重复性工作。通过实际使用统计,利用本程序模块进行计算时,单次计算可节省 80% 的前处理时间。

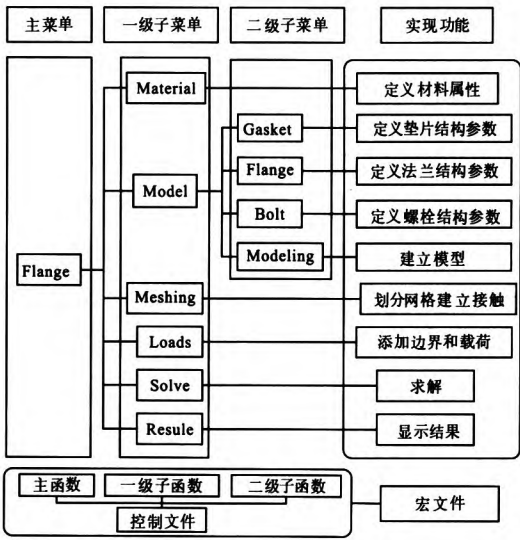


图 3 法兰连接结构分析模块系统框架图

Fig. 3 Framework of analysis module for flange connection structure

2.2 材料本构模型

法兰结构模型分为槽法兰、榫法兰、螺栓、

螺母和柔性石墨垫片5部分,其中金属材料使用弹性本构模型,程序提示用户输入材料的弹性模型和泊松比;柔性石墨垫片考虑材料非线性性质和应力应变时滞效应,即垫片压缩和回弹过程的应力-应变曲线均为非线性,且压缩回弹过程的应力-应变曲线不重合。图4为4 mm厚柔性石墨垫片压缩量和应力关系曲线示意图。柔性石墨垫片材料性能内嵌到宏文件中,用户选择垫片厚度即可得到相应的垫片材料属性。

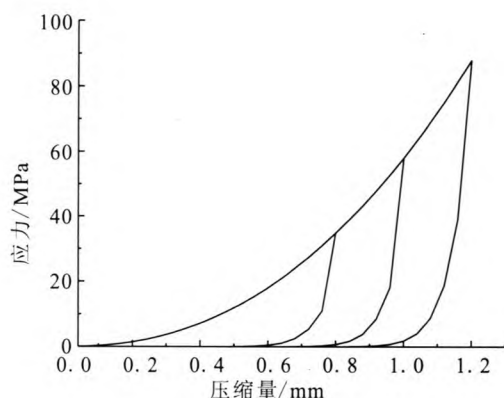


图4 4 mm厚垫片压缩量和应力关系曲线

Fig. 4 Relation between stress and compression of gasket with 4 mm thick

2.3 几何建模

参数化模型采用榫槽式垫片密封的法兰结构,为了使建模各功能函数独立,同时界面清晰且便于维护,程序通过垫片参数、法兰参数及螺栓螺母参数3个子菜单独立输入结构参数,共通过17个结构参数完成建模。考虑法兰结构的周期对称性,模型采用 $1/n$ 法兰结构(n 为螺栓数),以简化计算,节约计算资源。为了消除管路端头应力对法兰处应力的影响,管路的长度取大于 $2.5\sqrt{R \cdot t}$,其中: R 为管路内径; t 是管壁厚^[4]。由于螺栓、螺母与法兰端面的接触面为圆面,简化螺母为空心圆柱体,螺母和螺栓间采用固定连接。

2.4 网格划分

网格划分主要采用六面体八节点单元SOLID185。程序在网格划分之前,先通过对模型进行区域分割,将其分割为可划分映射网格或可

扫掠网格的结构,采用六面体网格以减小网格数量,提高计算精度。对于锥颈带铤平的法兰,法兰锥颈部结构不规则,难以采用六面体分网。程序判断结构存在铤平时,可自动在锥颈处采用四面体网格过渡,2种网格划分方式见图5。垫片网格采用垫片单元INTER195,垫片上下表面分别与法兰榫槽接触面粘接。在螺栓轴向中截面添加预紧力单元PRET179加载螺栓预紧力。在两法兰接触面,螺母和上下法兰端面接触面、榫槽结构周向接触面等5处添加接触单元CONTA174和目标单元TARGE170构建接触对模拟接触。

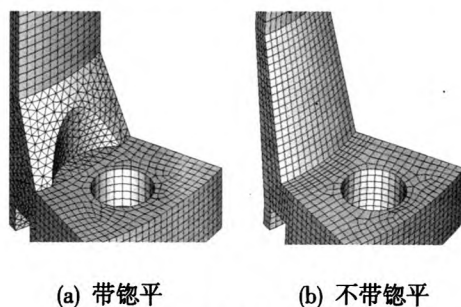


图5 法兰网格划分

Fig. 5 Mesh generation of flange

2.5 边界条件

程序考虑螺栓预紧力和介质压力载荷影响,分两载荷步分别计算螺母拧紧的预紧工况和管路加内压的工作工况。由于模型采用 $1/n$ 周期对称模型,在截断面施加对称约束条件;在榫法兰一侧管路端面施加固定约束;在螺栓的预紧力单元施加轴向预紧力;在法兰内表面施加内压,在槽法兰端部截断面施加内压引起的当量压力。

2.6 求解和结果处理

程序自动建立两载荷步文件,分预紧和工作2个工况计算:预紧工况仅包含螺栓预紧力载荷,工作工况在预紧工况的基础上增加介质压力载荷。结果后处理模块提示选择需要显示的工况及结构的应力云图。

3 实例应用

以某火箭发动机推力室氢集合器入口法兰为研究对象,使用本程序模块进行计算分析,本文主要给出螺栓拧紧力矩和垫片厚度设计的相关计算。

3.1 模型和工况

法兰螺栓等金属材料均为 GH4169, 弹性模量 $E=205\text{ GPa}$, 泊松比 $\mu=0.3$, 屈服强度 $\sigma_{0.2}=1\ 030\text{ MPa}$, 安全系数 1.5 时, 许用应力 $[\sigma]=687\text{ MPa}$; 柔性石墨垫片尺寸为 $\Phi 74\times\Phi 84$, 厚度分别选取 4 mm 和 5 mm。预紧力矩分别施加 30 N·m, 35 N·m, 40 N·m, 45 N·m, 50 N·m 及 55 N·m, 工作压力 16.5 MPa。

计算共建立两个有限元模型, 其垫片厚度分别为 4 mm 和 5 mm, 同一模型的不同拧紧力矩通过 Loads 子菜单输入相应力矩值, 根据输入结构参数程序生成的有限元模型如图 6 所示。



图 6 法兰结构有限元模型

Fig. 6 Finite element model of flange structure

3.2 密封性分析

通过试验, 在获取氢氧发动机常温和低温密封性能对应关系的基础上, 氢氧发动机静密封设

计采用一套常温设计、常温检查, 并通过限制各部分法兰静密封常温氦检漏允许泄漏率, 从而满足发动机低温使用要求的工程设计方法。

在进行法兰密封性分析时, 基于柔性石墨垫片密封性试验数据, 利用有限元计算得到垫片应力进行氦检泄漏率预测。从密封机理的角度, 泄漏率是介质压力和密封圈残余压紧应力的函数, 三者的关系可由以下公式表示:

$$Q_y=A_q p p_d^{N_q}$$

(1)

式中: Q_y 为预测泄漏率, $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$; p 为介质压力, Pa ; p_d 为取垫片径向平均压紧应力, MPa ; A_q , 上标 N_q 为曲线拟合系数。根据试验数据, 4 mm 厚垫片系数为 5.38×10^{-5} , -3.938 ; 5 mm 厚垫片系数为 3.015×10^{-7} , $-3.2321^{[9]}$ 。

计算得到的预测漏率后, 可结合静密封设计要求对法兰连接的密封性进行评价, 密封性评价准则为

$$Q_y\leq [Q]$$

(2)

式中 $[Q]$ 为设计允许氦检泄漏率, $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。此法兰 $[Q]=2\times 10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。

根据计算结果, 不同预紧力矩下两种垫片在预紧工况和工作工况下的应力见表 1。各工况下, 两垫片压紧应力均由内侧向外侧逐渐增大; 由于介质压力作用, 垫片压紧应力在工作工况下较预紧工况大幅减少; 两种垫片的压紧应力均随拧紧力矩的增大而增大, 5 mm 垫片的压紧应力大于 4 mm 垫片的压紧应力。

表 1 不同拧紧力矩垫片应力
Tab. 1 Gasket stress at different tightening torque

力矩/(N·m)	4 mm 垫片应力/MPa		5 mm 垫片应力/MPa	
	预紧状态	工作状态	预紧状态	工作状态
30	80.8~82.9	58.3~68.2	104.2~107.3	85.3~94.2
35	82.2~84.4	60.2~70.1	107.0~109.9	87.5~96.4
40	83.5~85.4	62.1~72.0	109.2~112.0	89.4~98.3
45	84.1~86.0	64.0~73.8	110.9~113.6	91.1~100.0
50	84.5~86.3	65.8~75.6	112.2~114.8	92.8~101.7
55	84.7~86.6	67.5~77.3	112.7~115.3	93.9~102.7

由于垫片应力由内侧向外侧逐渐增大,采用垫片径向平均应力计算预测漏率。通过计算得到的预测漏率和预紧力矩的关系见表 2。此法兰结构静密封的允许氦检漏率 $[Q]$ 为不大于 2×10^{-7} $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。当力矩从 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 增至 $55\text{ N}\cdot\text{m}$ 时, 4 mm 垫片的预测泄漏率与设计允许漏率比值均大于

12.75 , 不满足设计要求, 不适合用于此处密封结构; 力矩从 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 增至 $55\text{ N}\cdot\text{m}$ 时, 5 mm 垫片漏率从 $1.47\times 10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 降至 $1.09\times 10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$, 其整体密封性能远优于 4 mm 垫片, 预测漏率为设计允许漏率的 $55\%\sim 74\%$, 满足设计密封性要求, 因此, 5 mm 垫片可用于此处密封结构。

表 2 不同拧紧力矩垫片漏率
Tab. 2 Leak rate of gasket at different tightening torque

力矩/(N·m)	4 mm 垫片漏率 Q_{y4} /($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	$Q_{y4}/[Q]$	5 mm 垫片漏率 Q_{y5} /($\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	$Q_{y5}/[Q]$
30	4.35×10^{-6}	21.75	1.47×10^{-7}	0.74
35	3.87×10^{-6}	19.35	1.36×10^{-7}	0.68
40	3.45×10^{-6}	17.25	1.27×10^{-7}	0.64
45	3.11×10^{-6}	15.55	1.20×10^{-7}	0.6
50	2.81×10^{-6}	14.05	1.13×10^{-7}	0.57
55	2.55×10^{-6}	12.75	1.09×10^{-7}	0.55

3.3 结构强度分析

法兰结构强度分析时, 要求螺栓、法兰最大等效应力 S_{max} 应小于材料许用应力, 即

$$S_{b\text{ max}} \leq [\sigma]_b \tag{3}$$

$$S_{f\text{ max}} \leq [\sigma]_f \tag{4}$$

式中: $S_{b\text{ max}}$, $S_{f\text{ max}}$ 为螺栓、法兰最大等效应力; $[\sigma]_b$, $[\sigma]_f$ 为螺栓、法兰材料许用应力。

5 mm 垫片模型在 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩下螺栓和法兰等效应力云图见图 7。螺栓在预紧和工作状态的应力分布的基本趋势相同, 其应力较大的区域出现在螺栓和螺母连接处。法兰整体应力水平较低, 最大等效应力的区域出现在螺栓孔与螺母接触的边缘处, 局部应力集中不影响法兰整体强度。由于模型未考虑孔边缘圆角等微小结构特征, 一定程度上加大孔边缘的应力集中。法兰锥颈处应力水平较低, 远小于材料许用强度。

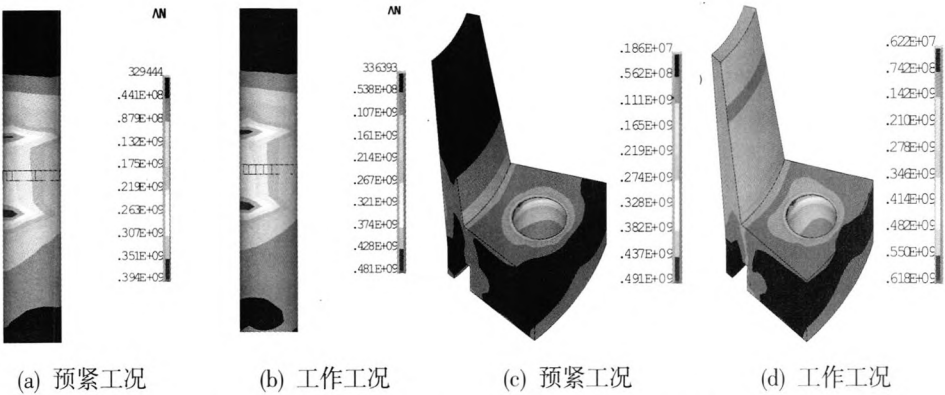


图 7 螺栓和法兰在 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 拧紧力矩下等效应力

Fig. 7 Equivalent stress of bolt and flange at tightening torque of $30\text{ N}\cdot\text{m}$

表 3 不同拧紧力矩下螺栓和法兰最大等效应力

Tab. 3 Max equivalent stress of bolt and flange at different tightening torque

力矩/(N·m)	螺栓最大应力/MPa		法兰最大应力/MPa	
	预紧状态	工作状态	预紧状态	工作状态
30	394	481	491	618
35	401	485	533	654
40	422	497	584	686
45	455	524	638	726
50	500	558	709	777
55	546	594	779	836

表 3 表明拧紧力矩在 30 N·m 至 40 N·m 时, 螺栓和法兰的等效应力均小于材料许用应力, 可满足强度要求。所以, 设计方案选择法兰结构拧紧力矩为 40 N·m, 满足结构强度要求; 且此力矩下的计算预测漏率为 1.27×10^{-7} Pa·m³/s, 低于设计允许氦检漏泄漏率, 满足密封性要求。

3.4 试验验证

发动机法兰氢集合器入口法兰结构设计最终采用 5 mm 柔性石墨垫片, 拧紧力矩要求为 35~40 N·m, 实际氦检漏率约为 1×10^{-7} Pa·m³/s, 与计算的漏率 1.27×10^{-7} Pa·m³/s 相吻合。经过发动机数十次热试车考验, 此处法兰结构密封性良好, 未发生氢泄漏导致的漏火故障。

4 结论

利用 UIDL 和 APDL 开发基于 ANSYS 的液体火箭发动机法兰连接结构分析程序, 该程序通过输入材料特性参数和模型结构参数, 自动完成有限元分析的前后处理和计算, 以分析法兰结构强度和密封性。实际应用表明, 程序计算结果满足发动机使用要求, 表明计算方法合理。使用该程序可为液体火箭发动机法兰结构设计提供便利, 提高设计效率。

参考文献:

[1] 顾伯勤, 李新华, 田争. 静密封设计技术[M]. 北京: 中国

标准出版社, 2004.

[2] ANSYS Inc. ANSYS parametric design language guide release 15.0 [M]. USA: ANSYS Inc., 2013.

[3] ANSYS Inc. UIDL programmer's guide release 10.0 [M]. USA: ANSYS Inc., 2009.

[4] 刘容, 顾伯勤. 基于 FEM 的承受附加载荷的法兰连接安全评价[J]. 化工设备与管道, 2008 (2): 11-15.

[5] 吴洋洲. 柔性石墨密封圈性能试验[J]. 航天推进与动力, 2009, 24(3): 3-5.

[6] 顾伯勤, 陈晔. 高温螺栓法兰连接的紧密性评价方法[J]. 润滑与密封, 2006 (6): 39-41.

[7] 叶先磊, 史亚杰. ANSYS 工程分析软件应用实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[8] 刘容, 顾伯勤, 陈晔. 附加载荷作用下螺栓法兰连接的强度和紧密性分析[J]. 化工机械, 2007, 34(5): 264-268.

[9] 栾宇, 刘松, 关振群, 等. 小变形下螺栓法兰连接结构静刚度非线性特性[J]. 强度与环境, 2011, 38(3): 29-35.

[10] 栾希亭, 范威, 韩先伟, 等. 混合室对零二次流环形超声速引射器性能的影响[J]. 火箭推进, 2011, 37(3): 22-26.

LUAN Xiting, FAN Wei, HAN Xianwei, et al. Effects of mixing chamber structure on performance of zero-second-flow annular supersonic ejector[J]. Journal of rocket propulsion, 2011, 37(3): 22-26.

[11] 喻健良, 张忠华, 闫兴清. 高温螺栓法兰垫片系统密封性能研究[J]. 压力容器, 2012, 29(5): 5-9.

(编辑: 马 杰)