

闸板式常开电爆阀密封结构的设计与仿真研究

张晓东¹, 李路路², 柳 珊², 唐妹芳²

(1.上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2.上海空间推进研究所, 上海 200233)

摘 要: 为选择合理的闸板式常开电爆阀的结构方案, 采用 LS-DYNA 分析软件对闸板式常开电爆阀的密封过程进行了数值仿真, 得到了不同设计结构下密封零件配合时的时间、应力曲线及运动过程图。参考仿真结果选择了常开电爆阀密封结构的设计方案, 并在最终的试制生产中取得了成功。

关键词: 常开电爆阀; 闸板式; 密封结构; 数值仿真

中图分类号: V414.1-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2011) 01-0051-06

Design and simulation research of seal configuration in flashboard-type normally open pyro-valve

ZHANG Xiao-dong¹, LI Lu-lu², LIU Shan², TANG Mei-fang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

Abstract: The sealing process of a flashboard-type normally open pyro-valve is simulated with LS-DYNA software in order to select a suitable structure for it. Both of the relationship between stress curve and time as well as the moving process figure during the matching period of seal parts are gained from different structures. According to the simulation, the seal configuration of the flashboard-type normally open pyro-valve is selected. It is proved to be successful in prototype manufacture.

Keywords: normally open pyro-valve; flashboard-type; seal configuration; numerical simulation

0 引言

宇航推进系统中使用的电爆阀可分为常闭电爆阀和常开电爆阀两大类。常开式电爆阀根据结构的不同又可以分为柱塞式和闸板式。闸板式常

开电爆阀, 是常开电爆阀中使用较为广泛的类型。闸板式电爆阀的工作原理是, 采用类似闸板一样的切刀零件, 在高温高压燃气推动下快速切断管嘴的薄弱处, 利用切刀零件的侧面与管嘴的被切断面密封, 阻断介质流动。这种电爆阀优点是在工作时产生很少的水击, 也基本不受流体介

收稿日期: 2010-10-15; 修回日期: 2010-11-12

基金项目: 总装备部预研项目

作者简介: 张晓东 (1977—), 男, 工程师, 研究领域为推进系统阀门设计

质的压缩阻力影响，相对其他结构常开电爆阀，适用性更广。

本文通过使用 LS-DYNA 分析软件，对闸板式常开电爆阀动作密封的动态过程进行仿真分析，为某型号用的闸板式常开电爆阀的研制提供了合理的结构方案。

1 产品结构设计

闸板式常开电爆阀由于其密封形式的独特性，很难得到理想的密封效果。产品设计时，经常需要用实际产品反复试验摸索，才能得到最终可靠的产品。某预研型号，需要使用一种常开电爆阀，用于飞行器入轨后，永久切断增压气体和贮箱的通道，保证飞行器的安全。初步设计采用闸板式电爆阀结构，如图 1 所示。

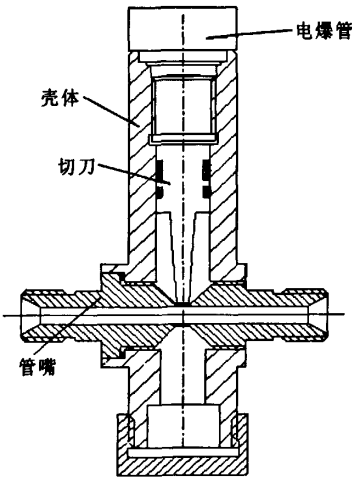


图 1 闸板式常开电爆阀结构示意图

Fig. 1 Scheme of flashboard-type normally open pyro-valve

设计理想中的闸板式常开电爆阀的工作过程分为两个过程：

- 1) 当电爆阀通电电爆时，电爆管产生高压燃气推动切刀向下快速移动，切刀切落管嘴零件薄弱段；
- 2) 切刀继续下移，从初始接触位置开始，切刀侧面与切断的管嘴端面挤压并逐渐压紧，形成密封面。挤压力做功完全抵消切刀下移的能量，最后切刀停止运动，嵌入管嘴中，最终完全

阻断介质流道。

切刀挤压管嘴形成的密封效果是闸板式常开电爆阀工作过程中最为关键的问题。总结以往相关产品的研究经验，预测可能出现的密封失效形式有两类：1)切刀侧面由于是有一定斜度的，因此，如切断后切刀下移不到位，则管嘴下端会形成泄露，密封失效；2)如果切刀下移过深，则切刀受到的推力过大，导致切刀零件下移后在插入管嘴密封后还会与管嘴其他位置碰撞，破坏了密封结构，产生密封失效。上述两种失效模式见图 2 所示。

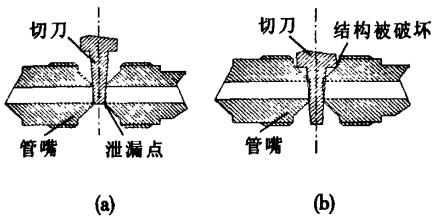


图 2 两种失效模式

Fig. 2 Two invalidated modes

由于切刀切入管嘴的过程比较复杂，其大量的中间过程如切刀、管嘴接触面运动规律，接触过程中应力分布与传播，以及管嘴的变形情况等难以通过理论分析与计算得到。

数值分析方法通过研究切刀及管嘴在切入过程中网格变化，记录切刀与管嘴作用过程的全部信息，从而反映真实的切入过程，其结果可信度较高，能为闸板式常开电爆阀的研制提供理论依据参考。因此，数值分析方法为研究切刀切入管嘴的密封问题提供了良好的手段。

2 结构仿真分析

2.1 机构模型设计

参照某预研型号的产品尺寸，运用三维建模软件 PRO/E 绘制切刀和管嘴的实体模型，切刀和管嘴的三维建模见图 3，在设置零件的密度后，直接可以从软件中读取零件的物理特征。根据管嘴材料和切刀材料为不同的金属合金材质，其主要参数如表 1 所示。

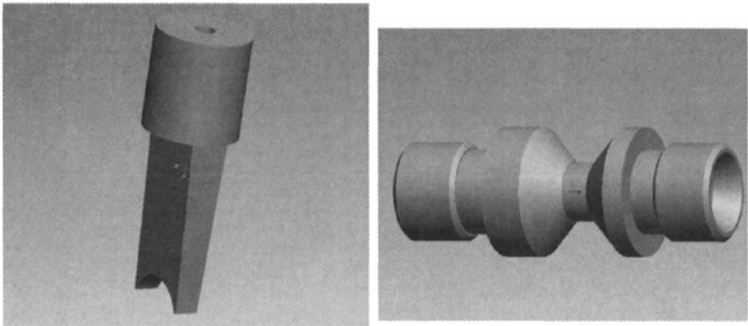


图 3 切刀和管嘴三维模型
Fig. 3 Three-dimensional models of cutter knife and nipple

表 1 材料力学性能
Tab. 1 Mechanical properties of materials

	弹性模量 /GPa	密度 /(g·cm ⁻³)	泊松比	屈服点 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%	ψ/%
切刀	115~117	4.5	0.30	812~830	890~915	10	25
管嘴	115~117	4.5	0.33	315~326	420~450	18	35

2.2 仿真模型建立和计算

设计最为关心的是切刀切入管嘴后的密封过程, 根据现有掌握的材料和技术参考, 简化切刀切掉管嘴薄弱处再进行切入管嘴的挤压密封的整个过程, 仅对切刀切入管嘴的过程进行仿真, 以及及时得到关心的设计参数。

实际电爆阀在电爆后, 高压燃气推动切刀在垂直通道内加速运动, 假设切落管嘴薄弱处后切刀与切落部位速度一致, 根据能量守恒知: 切落后的动能 = 电爆管转化的最大初始动能 - 冲断管嘴所需的最大冲击功。

按照电爆管的输出能量极限值 E 为 5~12 MPa/50 ml, 火工品总能量转化为动能的转化率 $\psi \approx 28\% \sim 32\%$ ^[1], 由 PROE 建模得到切刀的质量 m_1 、管嘴薄弱处的质量 m_2 、应力集中处 (切断处) V 形槽的面积 s , 可得

$$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 = E\psi - \frac{A_k}{F} s \tag{1}$$

式中: A_k 为管嘴材料的冲击功值; F 为冲击试样断口截面积, 取 $0.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 经推导

$$v = \sqrt{\frac{2(E\psi F - A_k S)}{(m_1 + m_2) F}} \tag{2}$$

实际计算时, 取 E 和 ψ , 取统计值的中间值, 将各参数数据代入公式可知切刀切落管嘴薄弱处后, 切入管嘴前的相对速度 $v=180 \text{ m/s}$ 。

本文运用仿真软件 ANSYS/LS-DYNA 对切刀挤压管嘴形成密封的过程进行模拟, 切刀体与管嘴体网格模型如图 4 所示, 为了提高计算的精度, 在划分网格过程中, 细划了管嘴与切刀接触的部分。其余部分的划分采用了自适应网格划分方法, 以提高计算的效率。

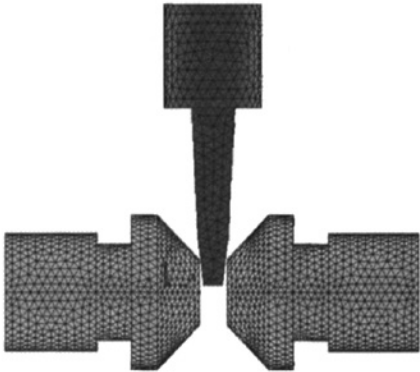


图 4 仿真模型及网格化
Fig. 4 Simulation model and gridding

材料模型采用 Bilinear Kinematic 模型,其基本公式如下^[4]

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \quad (3)$$

式中: σ_0 为初始屈服应力; ε 为应变率; C 、 P 为 CompowerSymonds 应变率参数; β 为硬化参数; E_p 为塑性硬化模量; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为有效塑性应变。

计算中所用的材料属性为实际设计采用的材料属性,材料单位才用闭环单位形式,质量单位为 g,距离单位为 mm,时间单位为 s。

按照实际设计尺寸和初始相对速度设置边界条件。Lagrange 方法多用于固体结构的应力应变

分析,采用这种方法时,分析结构形状的变化和有限元网格的变化是完全一致的,物质不会在单元和单元之间发生流动,能够非常准确的描述结构边界的运动。此次仿真运用三维 Lagrange 计算方法进行计算。

2.3 仿真结果分析

1) 切刀切入过程

切刀的切入过程见图 5 所示,按照现有结构的电爆阀电爆后,运动情况为:在由切刀和管嘴初始接触、管嘴先接触变形以挤压为主、然后产生塑性变形向流道内部弯曲、切刀运动能量足够以致出现切刀二次碰撞管嘴的情况。

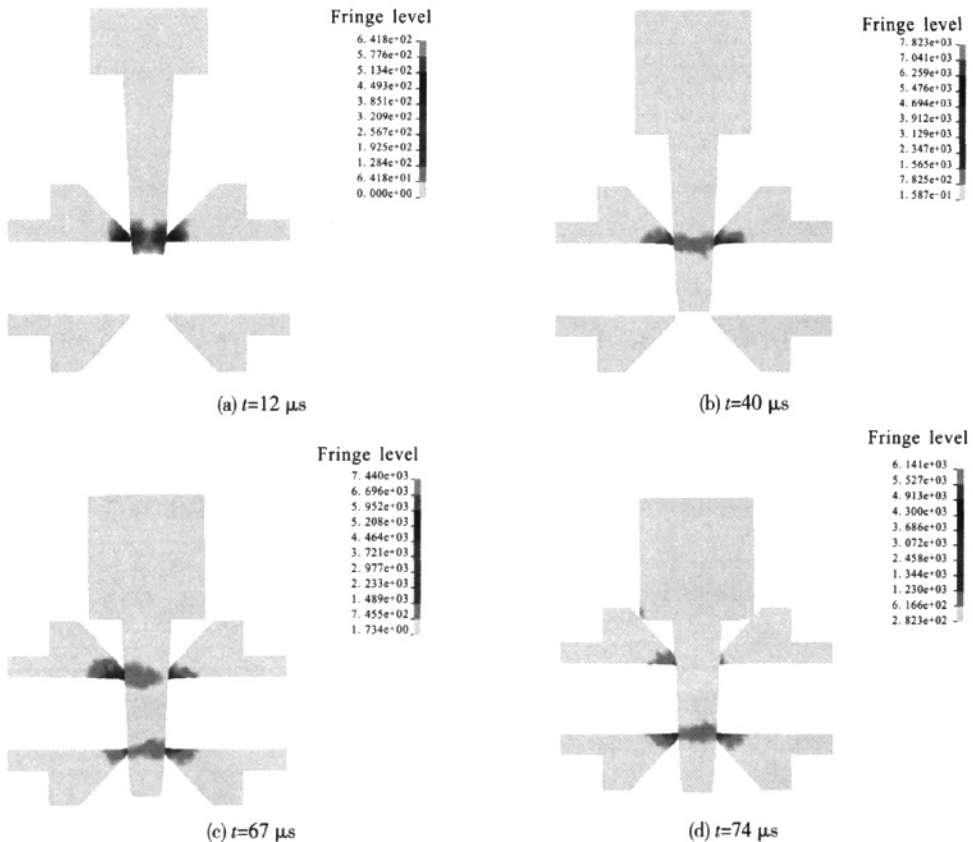


图 5 切刀切入过程

Fig. 5 Cut-in process of cutter knife

2) 压力变化情况

按照现有尺寸设计的闸板式常开电爆阀,在切刀挤压管嘴面过程中管嘴零件接触处受应力影响产生塑性变形,紧紧贴合到切刀上。

对管嘴与切刀接触处某临近位置的所受应力进行分析,值从起初为零迅速上升到 3300 MPa 数值后基本稳定在此数值见图 6。

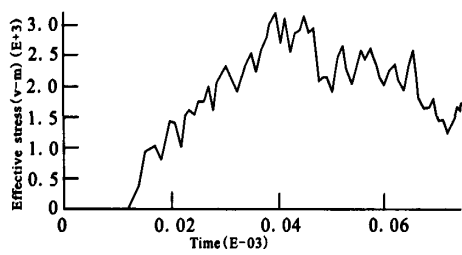


图 6 应力变化情况

Fig. 6 Stress versus time

3 结论的应用

通过对切刀切入管嘴的密封过程进行理论计算和有限元分析,可以得到以下结论:在现有结构的产品状态下,电爆阀电爆后,切刀切入管嘴分为四个阶段:切刀与管嘴初始接触阶段、切刀切落管嘴薄弱处、切刀切入密封阶段及切刀二次撞击管嘴阶段。

根据对仿真结果的分析,对初步的设计方案进行改进,改进方案需避免仿真模拟出的切刀二次碰撞的失效模式。最为易行的改进方案为:在壳体中部增加锥形段,使切刀与管嘴密封后,再利用锥形段与切刀产生挤压作用并吸收能量阻止切刀向下运动撞击管嘴,详细见图 7 所示。

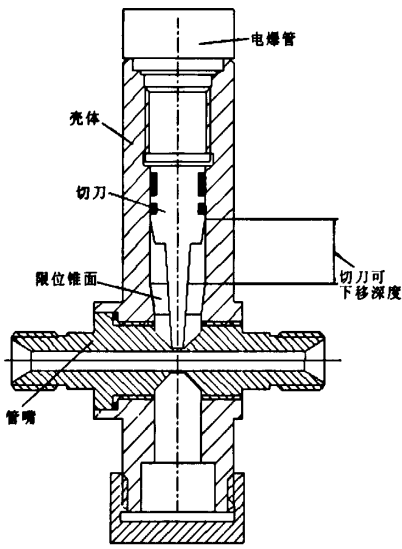


图 7 产品结构的改进

Fig. 7 Amelioration of product configuration

重新对新结构的设计建模仿真,建模中增加了壳体锥面和切刀锥面结构,借鉴初次仿真所采用的方法进行分析。

仿真分析得出,新结构的设计可以使切刀在与壳体锥面挤压过程中的动能完全被吸收,消除了切刀向下运动撞击管嘴引起密封失效隐患,图 8 为切刀停止时的应力情况。

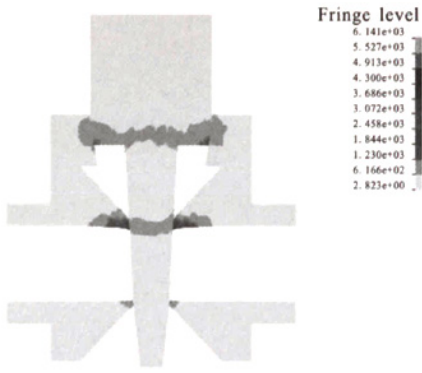


图 8 新结构的密封情况仿真

Fig. 8 Sealing process simulation of new configuration

改进后的产品,目前已经过方案阶段的生产,并通过了批次验收检验,通过对电爆后产品的分解、观察,可看出切刀运动到壳体锥面位置就被限位停止运动,试验情况与仿真分析结果基本一致,限位结构避免了切刀撞击管嘴的不利影响。闸板式常开电爆阀的仿真分析起到了理论指导实践的效果。

4 结束语

本次闸板式常开电爆阀的设计采用了理论与实践相结合的设计手段,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件分析复杂三维非线性结构的高速碰撞问题的特点,对切刀切入管嘴的过程进行仿真,预示了产品在初步设计时结构存在的薄弱环节,指导了实际的产品设计。

电爆阀作为宇航推进系统中一个重要的组件,本文的研究仅是对电爆阀工作过程中单一的密封过程进行分析,这样的计算结果可能存在一定的误差。在今后的研究中有必要对电爆阀工作

的整个过程进行模拟分析, 整阀的电爆工作仿真属非线性课题, 难度与复杂性较大, 需要在许多方面展开工作。

参考文献:

- [1] 刘国球. 液体火箭发动机原理 [M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [2] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下) [M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [3] 金志明. 枪炮内弹道学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [4] 张柏生, 李云娥. 火炮与火箭内弹道原理 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [5] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [6] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [7] 付平, 常德功. 密封设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [8] 吴成, 于国辉. 电爆活门活塞体驱动过程的研究 [J]. 火箭与制导学报, 2005, 25 (2): 151-153.
- [9] 郑鑫, 焦志刚. 用 LS-DYNA 模拟柱状弹丸侵彻薄钢板过程 [J]. 沈阳理工大学学报, 2009, 28 (5): 91-94.
- [10] 庄建华, 毛佳, 张为华, 等. 固体火箭发动机枪击过程数值模拟 [J]. 固体火箭技术, 2009, 32 (4): 422-426.

(编辑: 马 杰)

(上接第 50 页)

4 结论

应用结果表明, 文中提供的纤维缠绕/金属内衬复合材料气瓶应力分析方法, 是一种有效的面向设计的结构分析方法。该方法基于薄膜理论和经典层合板理论建立分析模型, 可以方便地确定纤维缠绕/金属内衬复合材料气瓶的自紧压力, 并分析纤维缠绕层和金属内衬在自紧压力、自紧后零压力、工作压力和最小设计爆破压力等载荷状态下的应力分布, 为改进气瓶设计、提高设计水平和效率提供了有效手段。

参考文献:

- [1] LIFSHITZ J M. Filament-wound pressure vessel with thick metal liner [J]. Composite Structures, 1995, 32: 313-323.
- [2] 赵正修. 石油化工压力容器设计 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.
- [3] 晏飞. 空间系统纤维缠绕压力容器结构分析与设计技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [4] 晏飞, 朱智春. 面向设计的纤维缠绕复合材料压力容器结构分析方法 [J]. 强度与环境, 2003 (4): 21-26.
- [5] TEPLY J L, HERBEIN W C. Failure modes for filament wound aluminum natural gas cylinders [C]// Proc. of Inter. Conf. & Exposition on Fatigue, Corrosion Cracking, Fracture Mechanics and Failure Analysis. Salt Lake City, Utah ASME: [s. n.], 1986: 327-337.
- [6] 张志民. 复合材料结构力学 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993.
- [7] 刘伟, 徐红艳, 沈同俊. 航天复合材料热导率测量的实验研究 [J]. 低温工程, 2010 (1): 22-24.

(编辑: 马 杰)