

# 悬空衔铁式电磁阀中 S 形簧片的研制

许 闯, 王 强

(上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 介绍了一种悬空衔铁式电磁阀用 S 形簧片的研制, 该簧片用于航天器推进系统 150 N 发动机电磁阀。簧片研制的目标是高寿命、高可靠性和稳定性。根据要求设计生产了工程样机, 在研制过程中对簧片的设计, 仿真, 工艺制造和试验方法进行了探索, 并得到了较好的结果, 通过了鉴定试验, 即将进入工程应用阶段研制。

**关键词:** 悬空衔铁式电磁阀; S 形簧片; 高寿命簧片

**中图分类号:** V432-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2017)05-0058-05

## Development of S-shape spring insuspended armature solenoid valve

XU Chuang, WANG Qiang

(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** The development of S-shape spring in the suspended armature solenoid valve for 150 N engine in spacecraft propulsion system is introduced. In order to develop the S-shape spring with long life, high reliability and high stability, some engineering prototypes were designed and produced according to the requirements. The design, simulation, fabrication and test method of the S-shape spring were explored in the development process. The engineering prototypes have passed appraisal verification, and will go into the engineering application stage.

**Keywords:** suspended armature solenoid valve; S-shape spring; long-life spring

## 0 引言

航天器推进系统用发动机电磁阀是航天器的关键组件, 直接影响任务成败。阀门工作失效会带来致命的后果, 例如推进剂泄漏、姿态控制和轨道控制失败。因此, 为满足航天器长期在轨工作需求, 研制可靠性高、耐用性好的推进剂控制阀是首要任务。目前, 中小型推进剂控制阀多数

为电磁阀, 结构上主要有滑动配合式和衔铁悬空式(见图 1)。滑动配合式结构简单, 弹性件容易设计, 但存在摩擦表面, 降低了阀门动作寿命。衔铁悬空式电磁阀中衔铁组件通过两片 S 形簧片悬空, 实现衔铁无摩擦运动, 具有长寿命, 对机械环境和多余物适应性更好的优点, 在空间站、深空探测、卫星等航天器上有着广泛的应用前景。

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2017-03-09

作者简介: 许闯(1985—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机阀门设计

本文论述的S形簧片(以下简称簧片)是为空间站推进系统150 N双组元发动机电磁阀研制的,用于实现电磁阀断电时衔铁复位,并提供电磁阀密封力,该型簧片同时可用于120 N双组元发动机和25 N单组元发动机等一系列发动机电

磁阀。

该型簧片完成了试制和验证试验,为了评估方案可行性,明确设计和制造过程中的潜在风险,进行了电磁阀工程样机的试制、性能测试和鉴定试验。

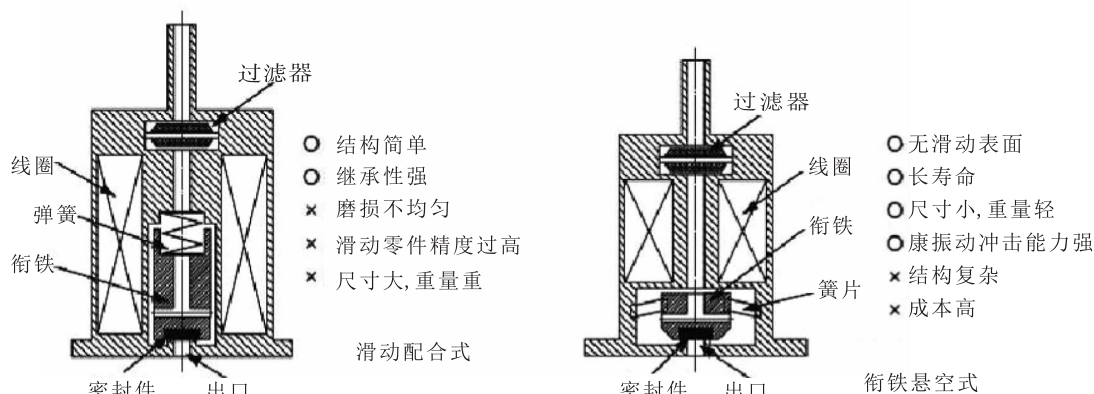


图1 滑动配合式和衔铁悬空式电磁阀比较

Fig. 1 Comparison of sliding fit type and suspended armature type valves

## 1 簧片的设计和仿真

簧片结构在载荷作用方向上尺寸较小,且能在很小变形时承受很大载荷,轴向空间紧凑。与普通弹簧相比,其单位体积材料的变形能较大,具有较好的缓冲吸振能力。正确设计、制造的簧片,具有很长的使用寿命。簧片的形状、厚度和表面状态对簧片特性的影响很大,因此簧片的设计和制造质量要求较高,限制了它的应用范围。

S形簧片的设计难点在于如何确定最优的结构和形状以减小应力。在初步设计时,参考片弹簧的计算:

$$K = \frac{n \cdot E \cdot b \cdot h^3 \cdot 1\,000\,000}{4 \cdot l^3} \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{n \cdot E \cdot h \cdot \varepsilon}{2 \cdot l^2} \quad (2)$$

式中:  $K$  为刚度, N/m;  $E$  为弹性模量, MPa;  $b$  为截面宽度, m;  $h$  为截面厚度, m;  $l$  为弯矩, m;  $\sigma_{\max}$  为极限应力, MPa;  $\varepsilon$  为变形量, m;  $n$  为分割片数。

簧片材料为不锈钢带,供方可保证的材料极限  $\sigma_b$  为 1 520 MPa,实际一般在 1 600 ~ 2 000 MPa,材料疲劳时应力远低于静载下材料的强度

极限,因而  $\sigma_b$  不能作为交变应力下的强度指标。疲劳试验表明,在同一循环特征的交变应力下,循环次数随最大应力的减小而增大,当最大应力减小到某一值时,趋于无限大,即疲劳极限  $\sigma_{-1}$ ; 经历无限次应力循环的试验是无法实现的。因此,人为的规定一个循环基数,经历这个基数循环而不破坏,即认为满足了经历无限次应力循环的条件,对于“应力—寿命曲线”(如图2)有水平渐近线的材料,如常见钢材,循环基数为  $10^7$ ,弯曲变形状态下钢材的疲劳极限  $\sigma_{-1}$  与其强度极限的关系一般为

$$\sigma_{-1} \approx (0.4 \sim 0.5) \sigma_b \quad (3)$$

簧片在工作过程中为弯曲变形,承受交变应力,且变化幅度基本为常值,为等幅交变应力,工作寿命要求大于 100 万次。因此,若簧片工作时最大应力不大于公式(3)给出的疲劳极限(760 MPa),一般可达到循环基数  $10^7$ ,即视为可满足 100 万次工作寿命要求。

根据公式(1)、(2)和(3),结合材料极限初步计算,确定了两种方案。

对初步设计的方案进行仿真分析,簧片的外端固定在阀体里,内端固定在衔铁组件里。簧片靠切割成形后的长槽工作,通过簧片径向刚度保

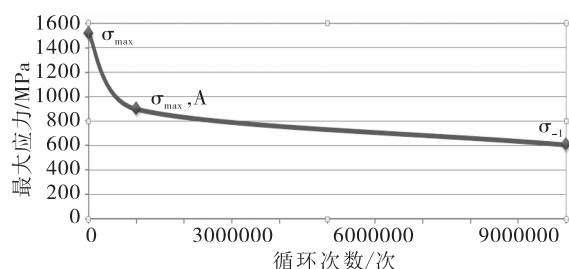


图2 应力—循环次数曲线

Fig. 2 Curve of stress-cycle index

证衔铁组件总在中心位置。采用有限元 (ANSYS) 对 S 形簧片的结构进行分析。图 3 为簧片变形量最严酷 (1mm) 时的应力云图, 从图上观察到最大应力出现在长槽的根部周围。根据仿真结果, 通过改变簧片的厚度、槽的宽度和槽的半径来优化形状, 达到最终减小应力的作用。

采用同批次材料按 A 和 B 两种簧片方案制造了试验件进行试验验证, A 方案取得了较好的结果, 在此方案基础上为电磁阀的工程样机设计了簧片, 并进行仿真分析, 见图 4。

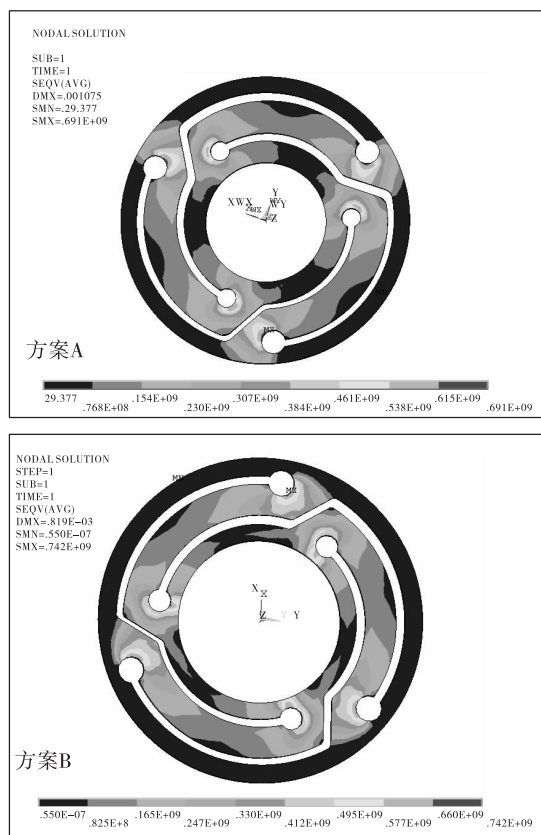


图3 试验簧片仿真分析图

Fig. 3 Simulation analysis of S-shape spring for test

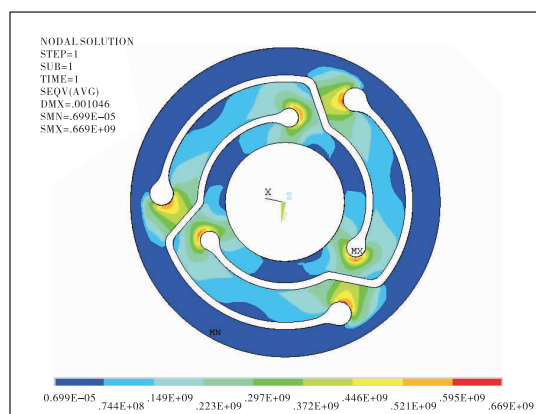


图4 工程样机用簧片仿真分析图

Fig. 4 Simulation analysis of S-shape spring used in engineering prototype

使用设备测量加工成型的簧片的实际弹性系数, 三种簧片理论计算和仿真结果与试验数据的对比情况见表 1。理论计算的刚度与试验结果有很大的偏差, 只能作定性分析和初步计算参考, 而仿真结果的刚度偏差不大于 10%, 和预期效果吻合。这一结果表明, 对簧片所做的结构分析有效, 可以真实反映试验的结果。从数据中可以发现, 簧片的刚度和厚度关系较大。同样外径下, 簧片越厚, 刚度越大, 抵抗变形能力越强。

## 2 簧片的制造和试验

### 2.1 簧片的制造

根据设计结果, 按图 4 结构制造了簧片, 用于电磁阀工程样机的试制和鉴定。

簧片的加工方法采用线切割, 为保证加工精度和表面粗糙度, 减少边缘产生毛刺等多余物, 采用低速走丝线切割, 工作液选择去离子水。

线切割后进行真空热处理。热处理是簧片制造过程中关键的步骤, 热处理结果直接决定簧片的力学性能。簧片所选择的材料是半奥氏体沉淀硬化不锈钢, 其主要通过冷变形及时效处理使材料得到强化。该钢经固溶处理后 (见图 5) 为奥氏体及少量铁素体组织, 在大变形量冷轧处理后奥氏体发生马氏体转变 (见图 6), 经时效处理后部分马氏体发生奥氏体逆转变提高了材料的韧性和塑性, 与此同时钼、铝等元素形成金属化合物在马氏体基体上析出产生沉淀强化 (见图 7),



表 1 理论计算和仿真结果与试验数据的对比

Tab. 1 Comparison of theoretical results and simulation results with experimental data		
产品	仿真刚度与试验测量刚度的偏差/%	寿命试验结果
电磁阀工程样机产品	0.42	3 台产品均通过 100 万次试验 1 台进行了 200 万次试验
试验方案 A	3 ~ 10	2 台试验件均通过了 100 万次试验
试验方案 B	2 ~ 9	一件 40 万次后断 一件 50 万次后断

从而获得最佳综合机械性能——即在足够韧性和塑性下获得最高的强度。在研制过程中, 摸索出了合适的工艺参数, 有效控制残余奥氏体和马氏体含量, 获得了簧片良好的弹塑性能, 试验结果也表明簧片热处理工艺是合理可行的。



图 5 固溶后的金相组织  
Fig. 5 Microstructure after solution treatment

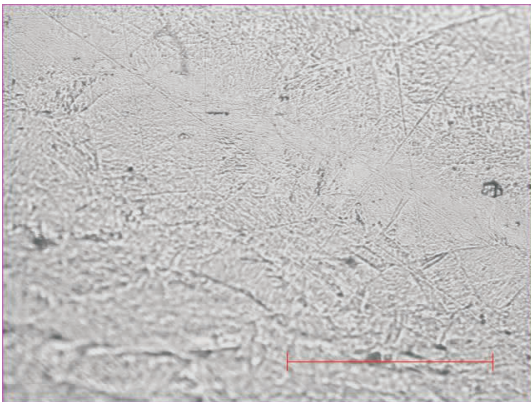


图 6 固溶 + 冷变形后的金相组织  
Fig. 6 Microstructure after solution treatment and cold deformation treatment

热处理后的簧片需进行电化学抛光, 去除边缘和表面毛刺等多余物。

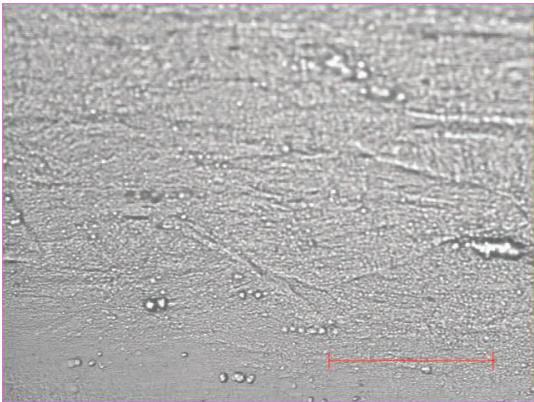


图 7 固溶 + 冷变形 + 时效后的金相组织  
Fig. 7 Microstructure after solution treatment, cold deformation treatment and aging treatment

2.2 簧片的试验

根据 A 和 B 两种方案制造了试验件进行试验验证, 测试了两种方案的弹性系数, 进行寿命验证试验, 寿命试验结果见表 1。A 方案两件产品通过了寿命试验, 未发生异常情况, B 方案两件产品在寿命进行到 40 万和 50 万次时发生了断裂, 见图 8。100 万次寿命试验后复测方案 A 簧片刚度, 两台试验件分别降低 2% 和 4%, 可满足任务要求。

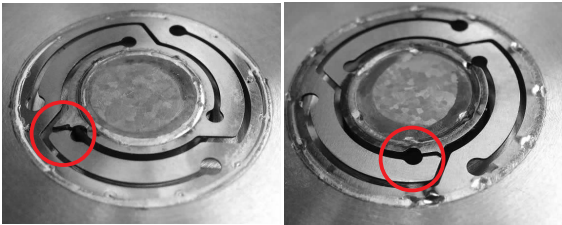


图 8 簧片方案 B 试验后  
Fig. 8 Scheme B of S-shape spring after test

2.3 电磁阀工程样机

根据两种簧片试验结果, 在 A 方案基础上设

计了簧片,并制造了3台电磁阀工程样机,进行验证和鉴定。3台样机各项性能均满足技术指标要求,进行了包括全部性能、环境试验和100万次寿命试验的鉴定试验,在鉴定试验后用工业CT对簧片进行检查(见图9),通过了鉴定试验。为验证疲劳强度,取其中一台样机进行了200万次的寿命试验,各项测试数据无明显变化,可满足使用要求。

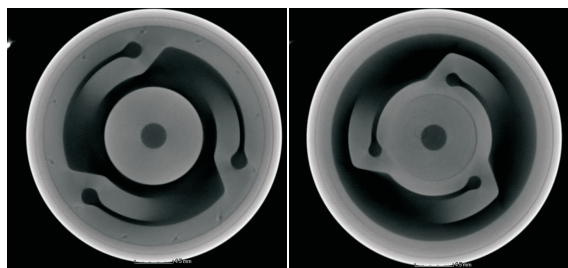


图9 工业CT检测图

Fig.9 CT detection results

### 3 结论

从理论计算和仿真结果与试验数据的对比分析可以看出:理论计算与试验结果之间的偏差很大,只能作为各参数对簧片性能影响的定性分析,无法作为定量设计的依据;而仿真结果与试验数据之间误差不大于10%,误差处于可接受范围内。因此,仿真结果的计算方法可作为簧片参数设计的依据,应用于未来簧片的设计。

簧片完成了试制和验证试验,进行了电磁阀工程样机的试制、性能测试和鉴定试验,并得到了较好的结果,即将进入工程应用阶段研制,进行电磁阀与发动机的匹配性试验和批量化生产。

结合该型簧片的研制,研究并形成了一套设计、仿真、制造和试验的方法。该方法通过工程样机的试制证明可行,后续将制定完整的规范,以指导未来簧片的研制。

#### 参考文献:

- [1] NAGATA T, KUSHIKI K, KAJIWARA K. The development of a Japanese 20 N thruster valve for a spacecraft propulsion system: AIAA2006-4876 [R]. USA: AIAA, 2006.
- [2] 温诗铸. 复合应力对接触疲劳的影响[J]. 机械工程学报, 1982, 18(4): 1-7.
- [3] 张少实. 新编材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 殷仁龙. 机械弹簧设计理论及其应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.
- [5] 苏德达. 弹簧失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [6] 许闯, 尤罡. 电磁阀磁路结构对动作寿命的影响[J]. 火箭推进, 2013, 39(5): 70-74.  
XU Chuang, YOU Gang. Influence of magnetic structure of solenoid valve on its motion life [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(5): 70-74.
- [7] 黄爱清, 曹明, 唐妹芳等. 一种无摩擦簧片式电磁阀的研制[J]. 火箭推进, 2015, 41(6): 41-45.  
HUANG Aiqing, CAO Ming, TANG Meifang. Development of non-friction S-spring valve [J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(6): 41-45.
- [8] 张英会, 刘辉航, 王德成. 弹簧手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [9] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

(编辑: 陈红霞)