

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0006-05

# 高输出能量火工分离装置密封强化技术研究

张菲, 夏冬星, 赵晓雨, 张玉若, 马骏, 乔睿华

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

**摘要:** 针对某火工分离装置在高输出能量条件下的烟雾泄漏问题, 进行了原因分析, 提出改进方案并对改进后火工分离装置的输出性能和密封性能进行了试验验证。结果表明: 密封圈压缩率低 (2.1%) 是造成密封失效的主要原因; 提出去掉螺杆与壳体间的密封圈, 并在活塞与壳体间设计 2 道密封圈, 优化活塞密封槽尺寸, 将密封圈最小压缩率增加至 15%, 以及在装药组件和活塞之间增设可变形不锈钢挡火圈的改进措施。验证试验表明改进后的火工分离装置输出性能满足要求, 分离过程中无烟雾或其他气体产生, 达到了无污染目的; 作用后挡火圈呈内凹状, 起到了阻隔燃气的作用。

**关键词:** 火工分离装置; 无污染; 密封技术

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.002

## Seal Enhancement Technology of Pyrotechnic Separation Device with High Output Energy

ZHANG Fei, XIA Dong-xing, ZHAO Xiao-yu, ZHANG Yu-ruo, MA Jun, QIAO Rui-hua

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** Aimed at the smoke leakage problem of some pyrotechnic separation device under the condition of high output energy condition, the cause analysis was carried out, the improvement scheme was proposed and the output performance and sealing performance of the improved pyrotechnic separation device were tested and verified. The results show that the low compression rate of the sealing ring (2.1%) is the main reason for sealing failure. The improvement measures were put forward, which include removing the sealing ring between the screw and the shell, and designing two sealing rings between the piston and the shell; Optimizing the size of the piston sealing groove to increase the minimum compression rate of the sealing ring to 15%; And adding a deformable stainless steel ring for stopping gas and smoke between the charging component and the piston. The verification test shows that the output performance of the improved pyrotechnic separation device meets the requirements; No smoke or other gas generate during the separation process, which achieve the pollution-free goal; The stainless steel ring forms an inner concave shape after action, which plays a role in blocking gas flow.

**Key words:** Pyrotechnic separation device; Non-pollution; Seal technology

火工分离装置利用火炸药爆炸产生能量驱动活塞做功, 以实现预定分离功能<sup>[1]</sup>。其工作过程中会产生高压燃气及药剂燃烧残渣, 如果密封不可靠, 则会对周围设备产生影响。并且, 火工分离装置在飞行器的安装及应用过程中, 要施加适当的预紧力以承担舱段内气体压力以及飞行时的载荷, 这就要求火工分离

装置分离后不能有碎片及污染气体产生<sup>[2-4]</sup>。因此, 火工分离装置的污染性和结构密封性是决定其能否应用的重要条件之一, 也是评价飞行器级间分离系统的关键指标<sup>[5-8]</sup>。某火工分离装置用于飞行器侧窗的连接及抛出功能, 需以较高速度完成窗体抛出, 由于飞行器内含有红外制导窗口, 因此要求火工分离装置在高

收稿日期: 2023-04-16

作者简介: 张菲 (1987-), 女, 高级工程师, 从事火工系统及单元火工品技术研究。

输出能量（负载大于等于 1 kg、阻力大于 1 500 N、分离速度不小于  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）条件下不能有碎片及污染气体产生。但是在随飞行器进行地面抛窗试验中，通过高速摄影观测到火工分离装置在分离过程中有少量烟雾泄漏，对红外导引头观测产生了一定影响。

本文对高输出能量条件下火工分离装置烟雾泄漏的原因进行了分析，采用“双 O 型密封圈+挡圈”的组合密封结构对火工分离装置结构进行了改进设计，并对改进后火工分离装置的输出性能和密封性能进行了试验验证。

## 1 问题概述

某火工分离装置由装药组件、接头、密封垫圈、活塞、密封圈 I、挡圈、壳体、橡胶垫、密封圈 II、螺杆和销钉等组成，其结构如图 1 所示。其中，螺杆与玻璃保护盖载荷连接，壳体法兰盘与飞行器舱段连接。接收到发火指令后，装药组件被点燃，产生高温燃气推动活塞剪断销钉，螺杆推动保护盖以较高速度飞出，完成分离功能。

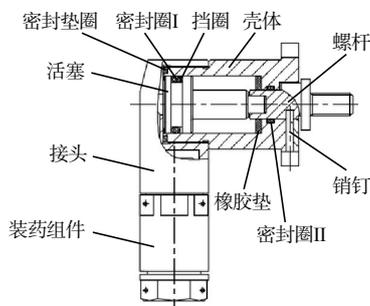


图 1 某火工分离装置结构示意图

Fig.1 Structural diagram of some pyrotechnic separation device

在随飞行器进行地面抛窗试验中，通过高速摄影观测到火工分离装置在分离过程中有少量烟雾泄漏，如图 2 所示，对红外导引头观测产生了一定影响。



图 2 某火工分离装置试验中烟雾泄漏照片

Fig.2 The photo of smoke leakage of some pyrotechnic separation device during testing

## 2 故障定位及原因分析

### 2.1 故障定位

根据高速摄影观测确定泄漏发生在螺杆分离界面，说明火工分离装置各部件间连接界面的密封性不满足要求，结合装置结构判断是密封圈 I 或密封圈 II 失效造成的。而造成密封圈失效的原因可能是密封圈有损伤或其压缩率不符合要求。根据产品装配工艺要求，密封圈在装配前均经过 20 倍显微镜检测，确定无裂纹、缺口等损伤，并且在装配过程中有专用的密封圈装配工装，因此可排除因密封圈损伤而引起的失效。密封圈压缩率是其装入密封槽后，因受挤压而在截面产生的压缩变形率，压缩率过小易引起火工分离装置作用过程中的燃气泄漏<sup>[9]</sup>。因此，需对密封圈 I 和密封圈 II 的压缩率进行核算。

### 2.2 密封圈压缩率计算

#### 2.2.1 密封圈 I 压缩率

密封圈 I 用于活塞与壳体间的界面密封。壳体内径  $d_1$  为  $20_0^{+0.033} \text{ mm}$ ；活塞直径  $d_2$  为  $20_{-0.041}^{-0.020} \text{ mm}$ ；密封槽直径  $d_4$  为  $15.8_{-0.043}^0 \text{ mm}$ ；密封槽的最大深度  $H_{1\text{max}}$  为壳体内径最大值（20.033 mm）与密封槽直径最小值（15.757 mm）之差的一半，经计算为 2.138 mm；密封圈 I 的内径为  $(15.7 \pm 0.08) \text{ mm}$ ，截面直径  $d_3$  为  $(2.5 \pm 0.05) \text{ mm}$ ，截面直径最小值  $d_{3\text{min}}$  为 2.45 mm。因此，密封圈 I 的最小压缩率  $E_{1\text{min}} = (d_{3\text{min}} - H_{1\text{max}}) / d_{3\text{min}} = 12.7\%$ 。

#### 2.2.2 密封圈 II 压缩率

密封圈 II 用于螺杆与壳体间的界面密封。螺杆直径  $d_5$  为  $10_{-0.028}^{-0.013} \text{ mm}$ ；密封槽直径  $d_8$  为  $(13.3 \pm 0.1) \text{ mm}$ ；密封槽的最大深度  $H_{2\text{max}}$  为密封槽直径最大值（13.4 mm）与螺杆直径最小值（9.972 mm）之差的一半，经计算为 1.714 mm；密封圈 II 截面直径  $d_7$  为  $(1.8 \pm 0.05) \text{ mm}$ ，截面直径最小值  $d_{7\text{min}}$  为 1.75 mm。因此，密封圈 II 的最小压缩率  $E_{2\text{min}} = (d_{7\text{min}} - H_{2\text{max}}) / d_{7\text{min}} = 2.1\%$ 。

航空工业部标准 HB 4-56-1987 圆截面橡胶圈密封结构中规定：内部活动密封圈最小压缩率应大于 7%<sup>[10]</sup>。由此可见，密封圈 II 的压缩率不符合标准要求，

当火工分离装置内部压力较大时存在密封失效的风险。为进一步明确原因,对火工分离装置的输出性能进行仿真研究,计算其内部峰值压力。

### 2.3 火工分离装置内部峰值压力计算

在预定高输出能量(负载 1 kg,分离速度不小于 25 m·s<sup>-1</sup>)条件下,火工分离装置作用过程中的压力、速度和推力变化情况的仿真结果如图 3 所示。

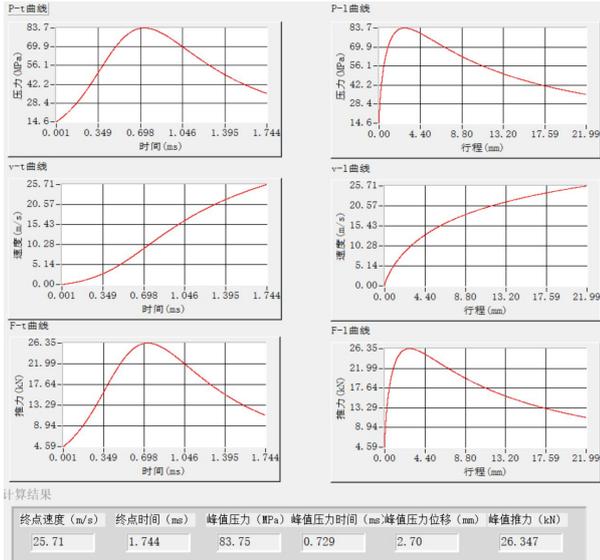


图 3 火工分离装置输出性能仿真结果

Fig.3 Simulation results of output performance of pyrotechnic separation device

由图 3 可知,火工分离装置作用过程中的峰值压力  $P_m$  为 83.75 MPa,峰值推力  $f$  为 26.35 kN。而密封圈材料均为橡胶 5171,其邵氏硬度为 72 HA ~ 82 HA,在拉伸率和压缩率满足要求的条件下,单个密封圈理论上能承受 80 MPa 压力,但由于密封圈 II 压缩率较小 (2.1%),因此在内部峰值压力为 83.75 MPa 的情况下存在密封失效的风险。综上所述,密封圈 II 压缩率不满足要求是造成密封失效的主要原因。此外,由于活塞与螺杆通过台阶卡接固定,在分离速度较高的情况下,螺杆飞出会造成密封圈 II 截面面积变大,活塞运动过程中存在挤出密封圈 II 的风险。因此,需对火工分离装置内部密封结构进行改进设计。

## 3 密封结构改进设计

### 3.1 改进方案

改进后的密封结构设计为“双 O 型密封圈+挡圈”

的组合密封结构,如图 4 所示。具体改进措施为:将螺杆与壳体间的密封圈 II 去掉,并在活塞与壳体间设计 2 道 O 型密封圈(尺寸参数同密封圈 I),从而将燃气阻隔在动力腔内,提高密封性能,同时使燃气效能更充分施加在活塞断面;并通过优化活塞密封槽尺寸,提高密封圈压缩率,缩小壳体与活塞间的间隙,提高密封性能。此外,在活塞与装药组件间设计可变形不锈钢挡火圈,将作用后燃气与活塞运动方向容腔隔离,进一步提高密封性能。

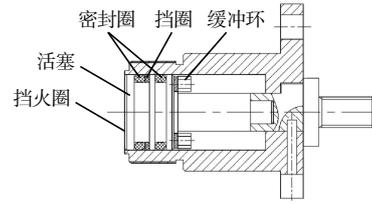


图 4 改进后的密封结构图

Fig.4 Improved sealing structure diagram

### 3.2 活塞密封槽尺寸优化

#### 3.2.1 密封槽深度

标准 HB 4-56-1987 推荐:内部活动密封圈的压缩率在 15% ~ 20% 时,密封效果较好。密封直径较大或用多个并列密封圈进行密封时可适当减小压缩率<sup>[10]</sup>。因此将改进后的密封圈压缩率  $E'_{min}$  设计为 15%。而密封圈截面直径最小值  $d_{3min}$  为 2.45 mm,根据压缩率公式  $E'_{min} = (d_{3min} - H'_{max})/d_{3min}$  可得密封槽的最大深度  $H'_{max}$  为 2.0825 mm;根据  $H'_{max} = (20.033 - d'_{4min})/2$  计算可得改进后的密封槽直径最小值  $d'_{4min}$  为 15.868 mm,则优化后的密封槽直径  $d'_4$  为 15.9<sup>0</sup><sub>-0.032</sub> mm。

#### 3.2.2 密封槽宽度

O 形密封圈的横向变形率  $E_b = (B_1 - d_3)/d_3 = E'_{min} \cdot 1.5$ ,其中,  $B_1$  为 O 型圈受压后的横向宽度,  $d_3$  为 O 形圈截面直径 2.5 mm,计算可知  $B_1 = 2.645$  mm。根据标准 HB 4-56-1987 要求:O 形密封圈密封槽最小宽度  $B_{min} = (1.05 \sim 1.2) B_1$ ,取中间系数 1.1,则密封槽宽度  $B = (2.9 \pm 0.1)$  mm。因第 1 道密封圈右侧设置有聚四氟密封挡圈,根据标准要求,挡圈厚度取 1 mm,所以第 1 道密封槽宽度  $B' = (3.9 \pm 0.1)$  mm。

#### 3.2.3 改进后的最大压缩率核算

改进后密封圈的最大压缩率  $E'_{max} = (d_{3max} - H'_{min})/d_{3max}$ ,其中,  $d_{3max}$  为密封圈截面直径最大值, 2.55 mm,

$H'_{\min}$ 为密封槽的最小深度,即壳体内径最小值(20 mm)与密封槽直径最大值(15.9 mm)之差的一半,2.05 mm。计算可得 $E'_{\max}$ 为19.6%,满足标准HB 4-56-1987中密封圈最大压缩率不大于20%的要求。

### 3.2.4 密封圈拉伸率核算

改进后密封圈的最大拉伸率 $S_{\max}=(d'_{4\max}-d_{\min})/d'_{4\max}$ ,其中, $d'_{4\max}$ 为密封槽直径最大值,15.90 mm; $d_{\min}$ 为密封圈内径最小值,15.62 mm。计算可得 $S_{\max}$ 为1.8%,满足标准HB 4-56-1987中密封圈最大拉伸率不大于2%的要求。

### 3.3 可变形挡火圈设计

为进一步将高温燃气阻隔在动力容腔内,在装药组件和活塞之间增设了可变形的不锈钢挡火圈,挡火圈与活塞通过激光焊接在一起,搭接在壳体断面,如图5所示。火工分离装置作用后产生高温高压燃气推动活塞及挡火圈向前运动,在燃气压力及筒体内壁约束作用下,挡火圈形成内凹状态(图5中红色圆圈),其侧面与筒体内壁紧贴,有效阻止了高压燃气冲刷活塞与筒体密封处。

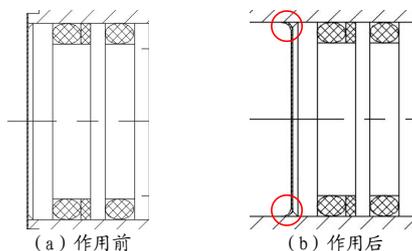


图5 作用前后挡火圈示意图

Fig.5 Schematic diagram of steel ring before and after action  
挡火圈开始变形的启动力 $F_1$ 为:

$$F_1 = \sigma_{0.2} \pi d h \quad (1)$$

式(1)中: $\sigma_{0.2}$ 为挡火圈材料屈服强度,MPa; $d$ 为挡火圈受力直径,mm; $h$ 为挡火圈厚度,mm。挡火圈材料选用易于焊接和变形的不锈钢带022Cr19Ni10,其抗拉强度 $\sigma_b$ 为520 MPa,屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为205 MPa;挡火圈厚度 $h$ 为0.13 mm,与活塞焊接后搭接在内径 $d$ 为 $\Phi 20$  mm的台阶断面,其受力直径取20 mm,经计算 $F_1$ 为1 674 N。

活塞的启动力 $F$ 为挡火圈的启动力 $F_1$ 、密封圈与壳体间的摩擦力 $f_{\text{摩}}$ 与销钉的承载力 $F_{\text{销}}$ 之和:

$$F = F_1 + f_{\text{摩}} + F_{\text{销}} \quad (2)$$

式(2)中: $F_{\text{销}}$ 的设计值为3 000 N; $f_{\text{摩}} = \mu F$ ,其中 $\mu$ 为摩擦系数,取0.15, $F$ 为活塞径向载荷,根据装置工况取9.8 N,计算可得 $f_{\text{摩}}$ 为1.47 N,远小于 $F_1$ 及 $F_{\text{销}}$ ,可忽略不计。因此,活塞的启动力为4 674 N,即14.87 MPa,而火工分离装置峰值压力为83.7 MPa,可以满足增设挡火圈后的启动压力要求。

## 4 验证试验

### 4.1 密封性试验

按照125%设计装药装配了6发大药量产品,对改进后的火工分离装置密封性进行试验验证,采用V311型Phantom高速摄影仪监测分离过程中有无气体泄漏等现象,拍摄精度为15 000帧/s。试验结果表明6发大药量产品在分离过程中均无烟雾或其它气体产生,表明火工分离装置密封性好,满足飞行器的密封、无污染要求。高速摄影照片如图6所示。



图6 火工分离装置高速摄影照片

Fig.6 The high-speed photography photos of pyrotechnic separation device

按照75%设计装药装配了6发小药量产品进行发火试验,结果6发产品均正常分离。试验后对6发火工分离装置进行X射线拍摄,观测其内部挡火圈形态,如图7所示。由图7可见,挡火圈作用后成内凹状,达到了阻挡高压燃气的密封效果。

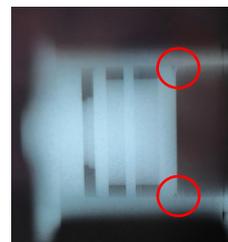


图7 发火后挡火圈变形X射线照片

Fig.7 Deformation of the steel ring after ignition by X-ray

### 4.2 断-通靶测速试验

在负载1 kg、正常装药条件下,通过断-通靶测

试火工分离装置的分离速度，测试结果如表1所示。由表1可见，3发火工分离装置的分离速度均大于 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，满足输出性能要求。

表1 断-通靶测速试验情况

Tab.1 Results of velocity measurement test by on-off target

序号	$t_1/\text{ms}$	$t_2/\text{ms}$	$t_3/\text{ms}$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.82	1.42	2.42	30.00
2	0.82	1.48	2.50	29.41
3	0.90	1.50	2.55	28.57

注： $t_1$ 为火工分离装置从通电到开始作用的时间； $t_2$ 为负载分离的时间； $t_3$ 为负载分离后匀速运动 $30\text{ mm}$ 的时间。

## 5 结论

针对某火工分离装置随飞行器进行地面抛窗试验时产生烟雾泄漏的问题，开展了原因分析及改进设计，并对改进的有效性进行了试验验证。结论如下：

(1) 密封圈压缩率低(2.1%)是造成密封失效的主要原因。此外，由于活塞与螺杆通过台阶卡接固定，在分离速度较高的情况下，螺杆飞出会造成密封圈截面面积变大，活塞运动过程中存在挤出密封圈的风险。

(2) 通过将螺杆与壳体间的密封圈去掉，同时在活塞与壳体间设计2道密封圈，并对活塞密封槽尺寸进行优化，将密封圈最小压缩率增加至15%，提高装置密封性；同时，密封圈最大压缩率为19.6%，最大拉伸率为1.8%，均满足标准HB 4-56-1987要求。

(3) 通过在装药组件和活塞间增设可变形的不锈钢挡火圈，将燃气阻隔在动力腔内，进一步提高了装置密封性。

(4) 对改进后的火工分离装置进行分离试验，在125%设计装药条件下无烟雾或其他气体产生；在

75%设计装药条件下正常分离，试验后挡火圈呈内凹状，符合设计预期。试验结果表明改进后火工分离装置的密封性得到显著提升，对火工分离装置密封结构的改进设计合理有效，能够满足高输出能量下的无污染要求。

## 参考文献：

- [1] 叶耀坤, 严楠. 楔块式火工分离机构的设计与强度校核[J]. 火工品, 2010(5): 1-4.
- [2] Peffer A. Development and transition of low-shock spacecraft release devices for small satellites[C]//14th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2000.
- [3] Fosness E, Buckley S, Gammill W. Development and release devices efforts at the Air Force Research Laboratory space vehicles directorate[R]. AIAA 2001-4601, 2001.
- [4] 薛园园, 程涛, 张国兴, 等. 一种无污染分离螺栓的设计优化[J]. 火工品, 2020(2): 13-17.
- [5] 高滨. 火工分离装置的性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [6] 何春全, 严楠, 叶耀坤. 导弹级间火工分离装置综述[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(3): 70-77.
- [7] 高滨. 火工驱动分离装置的应用[J]. 航天返回与遥感, 2004, 25(1): 55-59.
- [8] 张建华. 航天产品的爆炸冲击环境技术综述[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(3): 30-36.
- [9] 卢黎明. “O”形密封圈压缩率的应用分析[J]. 中国设备工程, 2003(4): 57-58.
- [10] HB 4-56-1987 圆截面橡胶圈密封结构[S]. 中华人民共和国航空工业部, 1987.