

弹箭星用电爆阀可靠性验证及评估

黄清伟, 袁洪滨, 李海
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 针对电爆阀可靠性验证及评估难度大、所需试验样本数量多等问题, 提出了一种强化试验的小子样可靠性评估及验证方法, 对样本观测值利用数理统计方法计算产品的可靠性。经实际应用检验, 本方法可以采用较少的试验样本获得较高的可靠性, 降低了可靠性试验验证成本, 使试验评定成为可能, 满足了电爆阀可靠性评估及验证的工程需要。

关键词: 电爆阀; 可靠性验证; 可靠性评估

中图分类号: V431-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 06-0051-04

Reliability validation and assessment of pyrovalve used in missile, rocket and satellite

HUANG Qingwei, YUAN Hongbin, LI Hai
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of pyrovalve reliability validation and assessment, and requirement of large number of samples, a small sample reliability verification method of strenuous test is put forward. The product reliability is calculated with sample observation value by means of mathematical statistics method. Practical application proves that this method can obtain high reliability by using less test samples. It reduced the cost of reliability test, made the test evaluation possible and met the requirement of engineering reliability assessment of pyrovalve

Keywords: pyrovalve; reliability validation; reliability assessment

0 引言

电爆阀广泛用于各类导弹、火箭和卫星中, 用以实现控制工作介质的通断。电爆阀的可靠性对于飞行的成败及航天员的安全性至关重要, 因而合理确定可靠性验证试验方法, 对在定型阶段和批生产阶段电爆阀的研制具有十分重要的意

义。

电爆阀为一次动作阀门, 属于成败型。目前, 国内没有统一的标准来评估电爆阀可靠性。如果采用传统的成败型方法对电爆阀的可靠性进行评估, 制定可靠性验证方案, 需进行大量的抽样电爆试验, 花费大量研制时间和巨额的研制经费。由于没有考虑到电爆阀的作动特点, 所以评

收稿日期: 2015-01-15; 修回日期: 2015-03-20

基金项目: 国家 863 项目(2008AA705313)

作者简介: 黄清伟 (1983—), 男, 工程师。研究领域为液体火箭推进系统阀门设计

估结果比较保守,而且反映不出电爆阀的性能指标。航天系统内主要以少量的拉偏电爆管装药量来定性考核,无法定量给出可靠性指标,同时也不能真实反映电爆管输出爆压变化。法国、美国及俄罗斯等国采用了一种所需试验次数极少的可靠性评定方法,即:加严试验考核方法^[1-2]。2002年邵德生提出了基于裕度思想的火工装置的可靠性设计方法,以及减少试验样本的强化试验验证可靠性方法^[3]。上述评估方法未考虑电爆阀的产品特点,具有一定的局限性。

本文从电爆阀的力学特点出发,提出了一种评估电爆阀可靠性和试验验证的新思路,所提出的方法同样适用于成败型产品的可靠性评定。

1 电爆阀结构原理

典型的电爆阀工作原理如图1所示,通常由电爆管、阀体、活塞-切刀组件、接管嘴-衬套组件以及密封圈组成。工作时电爆管通电,产生高温高压燃气,推动活塞-切刀组件运动,切断接管嘴,并楔紧在阀体锥面上。

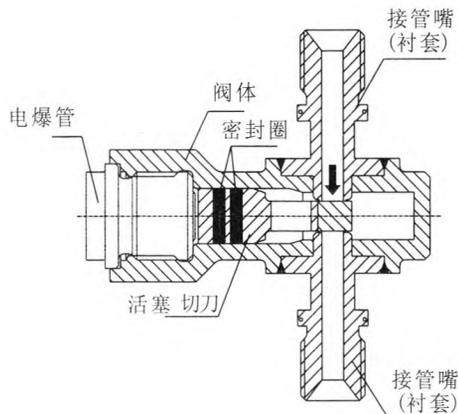


图1 电爆阀工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of pyrovalve

2 可靠性模型

电爆阀的可靠性是指电爆阀在规定的时间内和规定的条件下完成规定任务的能力。电爆阀可靠性可分为点火可靠性、火药爆炸产生爆压可靠性和机构可靠性3部分,三者之间是串联关系,如图2所示。

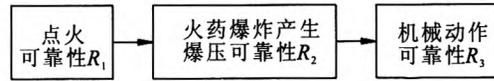


图2 电爆阀可靠性框图

Fig. 2 Reliability block diagram of pyrovalve

目前,点火一般采用高可靠电爆管,在置信水平为0.95时,可靠性可达到0.999 9,同时,对于机械作动结构来说,过程质量控制使其可靠性能已经比较稳定,用传统的计数和计量方法检验,即可满足可靠性要求。基于以上原因,假定:点火可靠度 R_1 与机构动作可靠度 R_3 均为1,这样电爆阀的可靠度 R_L 即为火药产生爆压可靠性 R_2 。

由以上假设,得到电爆阀可靠性等于火药爆炸产生的压力大于所需最小压力同时小于所需最大压力时的概率,即

$$R_L = p, \quad (p_B^U \geq p \geq p_B^L) \quad (1)$$

式中: p 为火药爆炸产生的压力; p_B^L 为电爆阀作动所需最小压力,用来模拟实现电爆阀的功能特性,如切断、密封及回退等; p_B^U 为电爆阀作动所需最大压力,用来确保火药腔承压功能。

火药爆炸产生的压力决定于火药爆炸产生的燃气压力 p 。由于环境温度、压强、药粒厚度及均匀性等存在一定散差,这些独立随机因素的影响造成了火药爆炸时产生的压力值并非某一确定值,而是呈正态统计分布特性^[4]。这种分布特性也造成了电爆阀在某种情况下可能会出现超压的不可靠情况。同样所需的压力也是受不同的独立的随机误差影响,由中心极限定理可知其近似服从正态分布。因此,电爆阀两个参数服从正态分布,其可靠性评估模型如图3所示。

图3(a)为电爆管爆炸产生压力在电爆阀所需的压力范围内,此时电爆阀正常动作,其可靠性为1。图3(b)中阴影是电爆管爆炸产生的压力与电爆阀所需的压力有重叠部分,此时电爆阀有可能失效,阴影部分即为失效区。

由于在实际试验中电爆阀可靠动作所需压力可以通过设计、加工及装配等方式很好地控制,

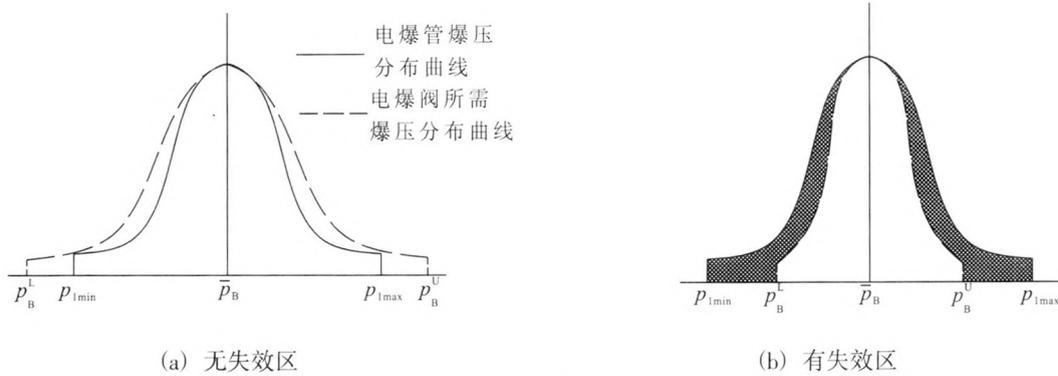


图 3 电爆阀可靠性模型

Fig. 3 Reliability model of pyrovalve

使其方差接近于 0, 此时电爆阀可靠动作所需压力可视为常值, 其可靠性模型简化为如图 4 所示, 可靠性为:

$$R_L = \Phi\left(\frac{p_B^U - \bar{p}_B}{S_B}\right) - \Phi\left(\frac{p_B^L - \bar{p}_B}{S_B}\right)$$

式中: $\Phi(x)$ 为标准正态分布函数; \bar{p}_B 和 S_B 分别为电爆管爆压的均值与方差。

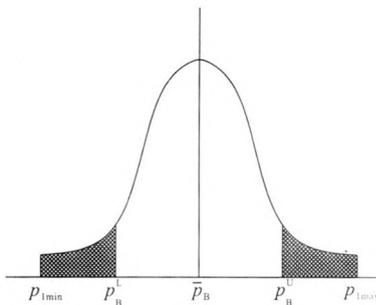


图 4 简化的可靠性模型

Fig. 4 Simplified reliability model

3 可靠性验证及评估原理

将产品放到恶劣的环境下, 通过增大或者减小电爆管内爆压, 以降低其可靠性, 用经典方法推断在额定环境下产品的可靠度。根据目前使用经验, 电爆管装药量改变量与其输出爆压无法定量描述, 因此采用改变电爆容腔容积模拟电爆管爆压改变。

在设计电爆阀时, 火药燃气充填内腔的容积 ∇_V^N 按照工程经验, 由以下原则设计:

$$\nabla_B \times p_B = \nabla_V^N \times p_V \quad (2)$$

式中: ∇_B 为电爆管在标准测压弹中的体积, 常数; p_B 为电爆管在标准测压弹中的爆压; ∇_V^N 为电爆阀内腔容纳电爆管火药爆炸燃气的额定设计体积, 电爆阀产品定型后, 是一个定值; p_V 为电爆管在电爆阀内腔的爆压。

为了利用 p_B 的统计量评估电爆阀的可靠性, 假设有如下对应关系:

$$\nabla_B \times \bar{p}_B = \nabla_V^N \times p_V^N \quad (3)$$

改变电爆额定容腔体积后, 由式(3)可得 p_B^L 和 p_B^U , 见式(4)和式(5):

$$\frac{p_B^L}{p_B} = \frac{\nabla_V^N}{\nabla_V^{\max}} \quad (4)$$

$$\frac{p_B^U}{p_B} = \frac{\nabla_V^N}{\nabla_V^{\min}} \quad (5)$$

由式(3)~式(5)表明: 如果被试电爆阀所抽到的电爆管在标准测压弹中的爆压是 \bar{p}_B , 在电爆阀内额定容腔体积 ∇_V^N 内爆压就是 p_V^N 。设想如果将同一电爆管放在电爆阀内容腔体积已经改变为 ∇_V^{\min} (或者 ∇_V^{\max}) 的阀内爆炸, 其爆压就变为 p_V^{\max} (或者 p_V^{\min}), 对应于该电爆管在标准测压弹中的爆压就是爆压上限 p_B^U (或者爆压下限 p_B^L)。显然这是一种理想情况。因为无论是额定工况

∇_V^N 下, 还是在设定的 ∇_V^{\min} (或者 ∇_V^{\max}) 工况下, 所抽到的电爆管不可能正好是 $\overline{p_B}$, 但是只要设定的 ∇_V^{\min} (或者 ∇_V^{\max}) 足够合理, 而且试验的子样数适当, 那么就可以平均地得到上述对应关系。

p_B^U, p_B^L , 可靠性 R_L , 置信度 r 及试验子样数 n 之间有函数关系式:

$$R_L = f(r, k_1, k_2, n) = 1 - \rho_1 - \rho_2 \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{\overline{p_B} - p_B^L}{S_B} \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{p_B^U - \overline{p_B}}{S_B} \quad (8)$$

式中: ρ_1 和 ρ_2 分别为标准正态分布的上侧概率和下侧概率。

根据已知的 r, R_L , 查 GB/T4086.1 或者 QJ1384, 得到 n 与 k_1, k_2 的对应关系。由于 n 与 k 成反比关系, 试验子样 n 大, 成本增大; 试验子样 n 小, 则 k 值增大, p_B^L 减小、 p_B^U 增大, 导致产品试验工况过于恶劣, 甚至不可能存在, 因此应根据可靠性要求合理选择 k 值, 确保 $p_B^L \geq p_{1\min}, p_{1\max} \geq p_B^U$ 。

一般取 $k_1=k_2$, 结合式(3)~式(8)可以设计出极限容腔, 然后按照极限容腔加工产品, 并根据产品使用环境进行试验。试验后按照实际试验产品极限容腔、试验台数、试验成功台数进行可靠性评估。

4 可靠性验证及评估示例

4.1 已知条件

一种火箭用电爆管的可靠性要求及设计参数如下:

- 1) 用户要求: 置信度 $r=0.85$ 时, $R_L \geq 0.99$;
- 2) 电爆管验收参数: $\nabla_B=30 \text{ cm}^3, p_{1\min}=7 \text{ MPa}, p_{1\max}=14 \text{ MPa}$;
- 3) 电爆管爆压试验统计数据: $\overline{p_B}=10 \text{ MPa}, S_B=0.56 \text{ MPa}$;

4) 电爆阀设计参数: $\nabla_V^N=1.0 \text{ cm}^3$ 。

4.2 可靠性验证

1) 根据 $r=0.85, R_L=0.99$, 查阅 GB/T4086.1 或者 QJ1384, 得到 n 与 k_1, k_2 有如下对应关系:

$n=2$	5	7	9	12	20
$k_1=k_2=16.6$	5.05	4.35	4.01	3.72	3.38

取 $n=9$, 则 $k_1=k_2=4.01$ 。

2) $k_1=k_2=4.01$ 和已知 $\overline{p_B}$, 带入式 (7) 和式 (8), 得到 $p_B^L=7.8 \text{ MPa} \geq p_{1\min}=7 \text{ MPa}$ 和 $14 \text{ MPa} = p_{1\max} \geq p_B^U=12.2 \text{ MPa}$, 满足要求。

3) 将 p_B^L, p_B^U 和 ∇_V^N 带入式(4)和式(5), 得到 $\nabla_V^{\max}=1.28 \text{ cm}^3$ 和 $\nabla_V^{\min}=0.82 \text{ cm}^3$ 。

4) 按照表 1 生产了大小极限容腔产品各 9 台, 根据使用要求进行了力学环境试验、热环境试验、电爆试验、电爆前后漏率检查和爆破压力等, 产品结构和性能均满足使用要求。

表 1 极限容腔试验

Tab. 1 Test of limit volume

极限容腔体积/cm ³	试验数量/台	试验成功数量/台	试验失败数量/台
∇_V^{\max}	1.40	15	0
∇_V^{\min}	0.75	15	0

4.3 可靠性评估

1) 根据表 1 中实际的 $\nabla_V^{\max}=1.4 \text{ cm}^3, \nabla_V^{\min}=0.75 \text{ cm}^3$, 带入式 (4) 和式 (5), 计算出 $p_B^L=7.1 \text{ MPa}$ 和 $p_B^U=13.3 \text{ MPa}$;

2) 根据 p_B^L 和 p_B^U , 带入式 (7) 和式 (8), 计算出 $k_1=5.1, k_2=5.8$;

3) 根据 $k_1, k_2, r, n=15$, 反查 GB/T4086.1 或者 QJ1384 得到 $\rho_1=0.000 086, \rho_2=0.000 01$;

4) 将 p, p_2 带入式 (6), 得到 $R_L=0.999 904$, 满足用户“置信度 $r=0.85$ 时, $R_L \geq 0.99$ ”的要求。

本方法与成败型二项分布所需试验次数对比见表 2。
(下转第 109 页)

- [6] 徐惊涛. 30000m³/h 氧气压缩机冷却器燃爆事故分析及预防[J]. 冶金动力, 2014 (11): 28-29.
- [7] 黄承蔚, 周文等. 氧气管道爆燃事故技术分析 [J]. 化工设备与管道, 2013 (4): 76-78.
- [8] 陈光利. 浅谈氧气管道安装注意事项 [J]. 特钢技术, 2009 (4): 54-55.
- [9] 廖贵华. 煤化工氧气管道安全设计 [J]. 广东化工, 2014 (10): 122-123.
- [10] 赵伯平. 多元料浆气化装置氧气输送管线事故的防范 [J]. 化工生产与技术, 2014 (4): 41-44.
- [11] 崔海莉, 胡登辉, 等. 氧气管道安全运行措施的分析[J]. 管道技术与设备, 2010 (4): 15-43.
- [12] 胡庆丽, 唐亮. 壳牌煤气化装置氧气管道和渣水管道布置设计的优化[J]. 化肥设计, 2014 (5): 83-84.
- [13] 洪运武. 合成气装置氧气管线选材与脱脂工艺探讨[J]. 煤油与化工, 2014 (3): 19-20.
- [14] 王赞社, 顾兆林, 赵红轩, 等. 低温贮箱多路管道增压的一种模糊算法研究[J]. 火箭推进, 2008 (2): 7-12+23. WANG Zanshe, GU Zhaolin, ZHAO Hongxuan, et al. Research on fuzzy control algorithm of cryogenic propellant-tank pressurization[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2008 (2):7-12+23.
- [15] 陈香林, 周文禄. 压力管道流固耦合振动特性分析[J]. 火箭推进, 2007 (5): 27-31. CHEN Xianglin, ZHOU Wenlu. Vibration characteristic analysis of pressure pipes with fluid-structure interaction [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007 (5): 27-31.

(编辑: 王建喜)

(上接第 54 页)

表 2 本方法与成败型二项分布所需试验数量对比
Tab. 2 Quantity of test samples needed by this method and pass-fail method binomial distribution

可靠性 R_L ($r=0.85$)	本方法所需 样本数量/台	成败型二项分布 所需样本数/台
0.99	大小容腔各 5	188
0.999	大小容腔各 8	1 896
0.999 9	大小容腔各 15	18 970

由表 2 可知, 在验证置信度 $r=0.85$, 可靠性 $R_L=0.999 9$ 时, 利用成败型二项分布所需无失效样本数量为 18 970 台, 利用本文提出方法所需无失效样本数量为 30 台, 因此本文提出的方法具有极大的优越性。

5 结论

本文提出的电爆阀可靠性验证及评估方法,

是通过改变电爆容腔的安全裕度试验方法, 已经成功用于弹箭星用多种电爆阀的可靠性验证及评估。该方法可以用极少的试验次数验证极高的可靠性, 尤其是当可靠性要求高时, 优越性更加显著。该方法不但可以用于电爆阀, 还可推广到成败型产品的可靠性验证及评估, 产生巨大的经济效益。

参考文献:

- [1] BEURTEY X. Reliability prediction on Ariane 5 pyrotechnical devices using the hardened test method [C]// Proceedings of Probabilistic Safety Assessment and Management. Crete Greece: Springer London Ltd, 1997: 1687-1695.
- [2] [苏]卓洛托夫, 季托夫. 空间运载器的可靠性保证[M]. 潘绍珍, 译. 北京: 宇航出版社, 1996.
- [3] 邵德生. 关于火工装置的可靠性设计与验证问题[J]. 质量与可靠性, 2002, (增刊 2): 34-36.
- [4] 胡昌寿. 航天可靠性设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

(编辑: 马 杰)