

文章编号: 1003-1480 (2020) 02-0018-03

高可靠性电点火器的设计研究

杨 旗, 杨正才, 刘伟国, 郭攀峰, 陈 雨

(北方特种能源集团西安庆华公司, 陕西 西安, 710025)

摘 要: 为满足航天火工品高可靠性的要求, 同时适用于装配空间和降低成本, 设计了一种高可靠性电点火器, 对点火器的发火件、装药进行结构设计及试验验证, 并与传统电点火器进行可靠性对比。结果表明新设计电点火器的可靠性达到 0.999 9, 满足航天高可靠性的要求, 符合国军标的冗余设计。本研究为点火器的可靠性设计提供一种设计方法。

关键词: 电点火器; 冗余设计; 可靠度; 传火通道

中图分类号: TJ45⁺4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.005

Study on the Design of Electric Igniter with High Reliability

YANG Qi, YANG Zheng-cai, LIU Wei-guo, GUO Pan-feng, CHEN Yu

(Xi'an Qinghua Company North Special Energy Group, Xi'an, 710025)

Abstract: In order to meet the requirements of high reliability of initiator in aerospace, as well as small assembly space and low cost, an electric igniter with high reliability was designed. The structure design and verification test of ignition element and the main charge, and the comparison of the reliability of the designed igniter and the traditional electric igniter were carried out. The results show that the reliability of new designed electric igniter can reach 0.999 9, which satisfies the requirement of high reliability of spaceflight, and also in line with the international military standards of redundancy design requirement. This study provides a method for the reliability design of igniter.

Key words: Electric igniter; Redundancy design; Reliability; Fire channel

目前, 电点火器广泛用于各种发动机点火、伺服能源点火及利用燃烧产生的高温高压燃气点火或做工装置中^[1]。早期电点火器均为低能敏感型, 用较少药量就能激发, 随着技术的发展电点火器也向高能、高安全、高可靠性发展。1987 年的 GJB 344-1987 钝感电起爆器通用规范中对电起爆器可靠性提出了置信水平 0.95 时, 可靠度大于 0.99 的要求。一些复杂的航天、卫星系统对可靠性提出了更高的要求, 既要达到 0.995 甚至 0.999 9。通常点火器的可靠性主要由发火件的可靠性决定, 一般采用双桥丝冗余设计的可靠性高于单桥丝可靠性, 但是由于点火器内部的药剂为一体, 所以在新的国军标中明确双桥式火工品不能

作为冗余设计, 单独 2 发并联才认为是冗余设计^[2-3]。然而, 当由于空间的限制无法实现 2 发产品的安装, 同时又要满足国军标的要求时, 就需要设计一种小型化的高可靠性电起爆器。本研究提出了一种双冗余的电起爆器, 通过发火件、装药的双冗余满足了高可靠性的要求, 使得产品的可靠性达到了 0.999 9。

1 双冗余电点火器的设计

1.1 常规电点火器

常规电点火器主要由壳体、极针、电桥、装药、密封片等组成, 结构见图 1。该类产品广泛应用, 它

收稿日期: 2019-11-23

作者简介: 杨旗 (1977 -), 男, 高级工程师, 主要从事火工品的研发与制造。

的可靠性通常为 0.99 ~ 0.999。

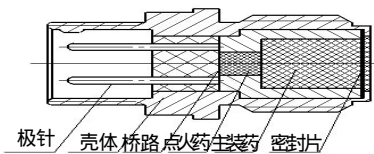


图 1 常规电起爆器结构图

Fig.1 General electric detonator structure diagram

1.2 双冗余电点火器的原理性设计

通过对产品进行分析,认为只有在系统中采用双发并联的冗余设计才能提高可靠性,在设计中可以考虑将 2 发集成在 1 发中,按照此设计思路对电点火器进行了结构设计。

1.3 结构设计

1.3.1 发火件设计

按照国军标要求,冗余设计中不再考虑双桥结构,而是采用单桥结构,将发火件设计为 4 个极针、2 路独立桥路的结构,同时在桥路之间设立隔挡,将 2 桥路完全独立。发火件上的起爆药剂处于独立隔挡内,互不影响。发火件的结构见图 2。

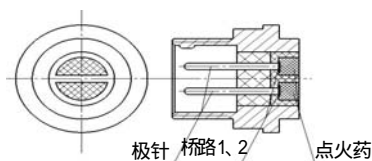


图 2 冗余设计的发火件结构图

Fig.2 Ignition structure diagram of redundancy design

1.3.2 主装药结构设计

主装药结构如果仍是一整体装药,电点火器的可靠性将依赖单一装药的可靠性,所以将主装药也设计成单独的 2 路。2 组装药单独装配,互不影响,但是每路的装药均可以被发火件点燃,同时任一路主装药燃烧即可以满足功能要求。主装药的结构如图 3 所示。

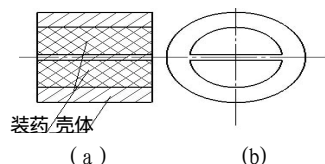


图 3 冗余设计的主装药结构图

Fig.3 The main charge structure diagram of redundancy design

1.3.3 电点火器的整体设计

完成发火件和主装药的设计后,将 2 个关键部件集成在 1 个壳体内部并进行相应的调整,得到了电点火器的整体结构,整体结构见图 4。

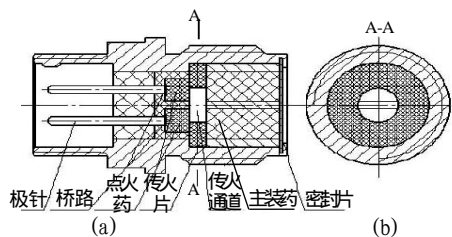


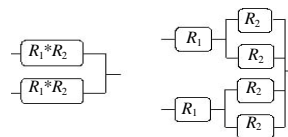
图 4 冗余设计的电点火器结构图

Fig.4 Electric igniter structure diagram of redundancy design

通过图 4 可以看出,双冗余的电点火器近乎 2 发独立的点火器,唯一区别是发火件和主装药之间设计有 1 个共用的传火通道。通过该通道的设计,可以保证任意 1 路发火件发火后可以同时点燃 2 路装药,2 路装药中的任意 1 路输出即可满足功能要求。既可以保证单独作用也可以在 2 个点火器之间建立联系,发火件和装药的独立冗余设计提高了发火件的可靠性。

2 可靠性计算

按照系统的功能原理,绘制出双发并联(独立输出)和单发双冗余点点火器的可靠性框图,如图 5 所示。



(a) 双发并联 (b) 单发双冗余

图 5 可靠性框图

Fig.5 Reliability block diagram

依据统计原理和可靠性框图对单桥、双发并联以及单发双冗余 3 种情况的可靠性进行计算^[4-5],假设: R_1 为发火件可靠度; R_2 为装药管可靠度, $R_1=R_2=0.995$,则有:

$$\text{单桥电点火器 } R_1: R_1 = R_1 \times R_2 = 0.990\ 025$$

$$\text{双发并联 } R_2: R_2 = 1 - (1 - R_1 \times R_2)^2 = 0.999\ 900$$

$$\text{单发双冗余 } R_3: R_3 = 1 - \{1 - R_1 \times [1 - (1 - R_2)^2]\}^2 = 0.999\ 975$$

计算结果证明 3 种设计的可靠度依次为 $R_3 > R_2 > R_1$,说明新设计的双冗余电点火器通过发火件、装药的结构设计提高了产品的可靠度,远高于传统单桥电点火器,也优于双发并联点火器。

3 设计验证

电点火器设计完成后,参考国军标,对电点火器

的性能等进行验证。

3.1 发火件验证

新设计的发火件结构中,由于桥路故障或点火药的故障存在单桥失效的可能。按照此种情况,设计了只给1路发火件涂覆点火药,验证是否正常点火,试验进行了2组,主装药采用设计装药。试验数据见表1。

表1 单路发火件发火验证

Tab.1 Ignition verification of single ignition element

序号	方案	数量	结果
1	单路点火单路输出	10	可靠点燃
2	单路点火双路输出	10	可靠点燃

由表1可知单路发火件点火可以可靠点燃2路主装药,其输出性能与双发火件同时点燃没有区别。

3.2 主装药验证

由于主装药存在失效的可能,设计了只有1路主装药和2路主装药的对比试验,试验情况见表2。

表2 主装药试验

Tab.2 Main charge test

序号	方案	数量	结果
1	双路点火单路输出	10	可靠点燃
2	双路点火双路输出	10	可靠点燃
3	单路点火双路输出	10	可靠点燃

通过试验证明:只要单路主装药药量设计合适,单装药电点火器可以实现点火功能。相同主装药时单路点火和双路点火对压力曲线的点火时间、峰值压力和峰值时间无影响。

3.3 传火通道失效验证

发火件和主装药之间留有1.5mm的传火通道,该传火通道在异常情况下可能被异物堵塞,设计验证试验,将传火通道用滑石粉堵住,观察电点火器是否能正常作用,试验情况见表3。

表3 传火通道验证

Tab.3 Fire channel verification

序号	方案	数量	结果
1	双路点火单路输出	10	可靠点燃
2	双路点火双路输出	10	可靠点燃
3	单路点火双路输出	10	可靠点燃
4	单路点火单路输出	10	可靠点燃

从试验结果看,传火通道被少量异物堵塞时,由

于点火药的火药及主装药的火焰敏感性,传火正常,不影响点火器的作用。

3.4 环境和系统匹配试验

电点火器完成设计后,按照钝感电起爆器的要求进行了力学和环境试验,结果均满足要求。在系统中进行了多次匹配试验,无论是低温单桥路发火或高温双桥路发火,点火器均正常作用,系统试验合格。

4 结论

双冗余电点火器在设计中对发火件、主装药进行了独立设计,在作用时可以实现协同反应,与传统的单桥电点火器、双发并联系统相比可靠度均有所提高。设计结构完全符合国军标的要求,经过了失效模式验证和环境、系统的实际使用考核,性能可靠,该设计也可用于电发火管、电起爆器的设计,具有普遍推广价值。

参考文献:

- [1] 刘竹生,等.航天火工装置[M].北京:中国宇航出版社,2012.
- [2] GJB 344A-2005 钝感电起爆器通用规范[S].国防科学技术工业委员会,2005.
- [3] GJB 1307A-2004 航天火工装置通用规范[S].国防科学技术工业委员会,2004.
- [4] 周正伐,等.可靠性工程基础[M].北京:中国宇航出版社,2009.
- [5] 金星等.单元存在短路、短路故障模式时串联和并联系统可靠性评定方法[J].弹箭与制导学报,2006,26(3):259-262.
- [6] 李福平,刘忠良,蒲若珩,等.火炸药手册(增订本·第一分册·单质炸药和混合炸药)[M].西安:第五机械工业部第二〇四研究所,1981.