

doi: 10.7690/bgzdh.2022.09.018

一种改进型远程火箭弹发动机点火装置

杨青山¹, 赵成文², 刘波¹, 李泽亨¹, 王旭兵², 尚育生³

(1. 驻太原地区第三军事代表室, 太原 030008; 2. 晋西工业集团江阳公司技术部, 太原 030041;
3. 山西晋东化工厂科研所, 山西 阳泉 045000)

摘要: 针对火箭弹作战远程化的装备发展趋势, 对适用于远程火箭弹发动机的点火装置设计进行改进。对满足其功能要求的结构设计、数值计算、技术环节、功能验证等进行研究, 介绍某改进型远程火箭弹固体火箭发动机点火装置的设计和试验情况。结果表明, 该研究的相关改进和试验可为后续系列火箭弹发动机点火装置的设计提供参考。

关键词: 设计; 点火装置; 改进; 功能验证

中图分类号: TJ415 **文献标志码:** A

An Improved Ignition Device for Long-range Rocket Engine

Yang Qingshan¹, Zhao Chengwen², Liu Bo¹, Li Zeheng¹, Wang Xubing², Shang Yusheng³

(1. No. 3 Military Representative Office in Taiyuan District, Taiyuan 030008, China;
2. Technology Department, Jiangyang Co., Ltd. of Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030041, China;
3. Scientific Research Institute, Shanxi Jindong Chemical Plant, Yangquan 045000, China)

Abstract: Aiming at the equipment development trend of long-range rocket, the design of ignition device for long-range rocket engine was improved. The structural design, numerical calculation, technical links and functional verification to meet the functional requirements were studied. The design and test of the ignition device of certain type improved long-range rocket solid rocket motor were introduced. The results show that the related improvement and test can provide a reference for the design of the ignition device of the following series of rocket motors.

Keywords: design; ignition device; improvement; functional verification

0 引言

发动机点火装置作为火箭弹的首发火工元件, 当火箭弹发火线路通以预定电流时, 点火装置作用, 可靠点燃发动机装药, 实现火箭弹作战飞行, 完成其预定功能。火箭弹作战远程化是当前装备发展的必然趋势, 其发动机工作时间长, 发动机装药长径比增大, 自由容积较大, 发动机装药和点火药量增加后要求稳定的点火压力和燃烧速度^[1-2]。

点火装置的功能要求决定了其结构组成。早期的远程火箭弹发动机点火装置结构设计为薄壁棒式, 整体嵌入发动机装药内, 侧面和尾部释放燃气, 壳体采用熔点较低的合金铝材, 在发动机装药燃烧作用下, 点火装置壳体逐渐消融。这种结构既减少点火装置自身的消极质量, 又不产生火箭弹飞行总重。随着该系列产品的射程和发动机装药量增加, 点火装置在发动机中安装空间相对狭小, 侧面排气对发动机装药造成的冲击, 产生过高的点火峰值, 壳体消融后的残渣部分堵塞发动机喷嘴, 引起燃烧

压力的波动, 点火装置的结构设计进行了一个阶段的改动。改动后优选的设计思路采用头部点火方式, 点火药燃烧产物全部流经装药表面, 能量损失小, 点火效果好。

笔者论述了适用于远程火箭弹发动机的点火装置设计与改进, 对满足其功能要求的结构设计、数值计算、技术环节和功能验证等进行了分析。

1 功能要求

点火装置一般结构由点火电路、半导体桥、黑火药、点火药包和传火通道等组成。当点火装置接收到预定电流, 点火元件作用, 点燃点火药包, 点火药包燃烧火焰将药环点燃, 在药环燃烧能量的作用下, 点火药被全面点燃, 产生的高温炽热粒子流, 从喷火孔喷出并持续一定的时间, 点燃发动机装药, 使火箭弹发动机进入正常工作状态, 将火箭弹推送进入作战轨道。

点火元件设计采用具有瞬发性、高安全性和高可靠性的钝感半导体桥作为换能元, 实现作用迅速、

收稿日期: 2022-05-24; 修回日期: 2022-06-23

作者简介: 杨青山(1973—), 男, 山西人, 高级工程师, 从事弹药和战斗部结构特点的设计、分析与质量监督研究。E-mail: 1097625084@qq.com。

高安全性和发火可靠性。将半导体桥作为点火装置的初始激发元件，黑火药作为引燃药，点火装置通以点火电流后发热，引燃黑火药，继而引燃高能点火药，火焰从喷火孔喷出，点燃火箭发动机装药。早期的设计中，点火装置壳体上均匀预制传火孔，点火药中间设计中心传火管结构以保证点传火的一致性，点火药燃烧后产物喷向发动机装药表面将装药点燃，并且在发动机装药燃烧作用下，点火装置壳体逐渐消融。

2 结构设计

2.1 壳体设计

点火装置设计为消融薄壁棒状结构，采用强度较高、质量较轻且熔点适中的铝材作为壳体的材料，通过壁厚设计计算，保证在发动机工作过程中逐渐消融，减轻火箭弹的消极重量。壳体结构如图 1 所示。



图 1 壳体

经过壳体内部压力的强度校核公式计算和对比选择，壳体材料采用 2A12 合金铝材，其材料需用应力 $[\sigma]=\sigma_b/f=210\text{ MPa}$ ，其中： σ_b 为 2A12 材料的强度极限，依据铝合金材料标准指标为 420 MPa； f 为安全系数，取 2.0。

通过计算，厚度值为 0.71 mm 即能满足要求，

表 1 6J20 镍铬合金桥丝和 LTNR 发火件的安全电流和感度

桥径/ μm	电极塞结构下安流/mA	电极塞结构下 50%发火值/mA	点火头结构下的安流/mA	点火头结构下的 50%发火值/mA
7~8	60	80		
9	70	90	65	80
10	90	120	75	90
12	120		100	115
16	200	240		
30			230	320
40	400	480	370	427
50			430	500
90		1 550		

上表中各种不同的桥丝直径对应的安全电流较高，与满足基本要求的 50%发火电流值比较接近，显示上表中列举的各种结构具有较高的安全性和发火可靠度。在本次产品设计中，从上表中可供选择的桥丝直径范围较大，可供参考的种类较多，最终设计选择的结构，经过多次验证，表现出较高的可靠性。

参考制式应用的 53 号电点火装置的设计经验，壳体厚度设计为 1 mm。

2.2 点火元件

点火元件设计采用具有瞬发性、高安全性和高可靠性的钝感半导体桥作为换能元，实现作用迅速、高安全性和发火可靠性。

其作用机理是在电脉冲作用下，半导体材料产生的热等离子体以微对流的方式将热量和冲击波能量传递到黑火药中，进而引燃火工药剂，这种热交换方式具有更高的效率，实现发火能量的降低与作用时间的缩短。

微对流的方式将热量和冲击波能量渗入初级装药中，使其受热达到着火温度起爆并点燃点火药，点火药燃烧并输出点火能量。其结构如图 2 所示。

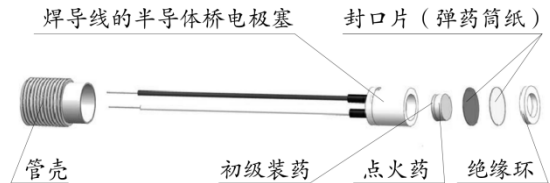


图 2 点火元件结构

初级装药选用热感度较高的三硝基间苯二酚铅 (lead trinitroresorcinol, LTNR)，引燃输出能量适中的次级装药，设计参考了早期系列远程火箭发动机点火装置的应用经验，点火方式的设计通过调整桥丝直径来满足安全电流和发火可靠度要求。

参考常用的电发火件如 6J20 镍铬合金桥丝和 LTNR，其安全电流和桥丝直径的经验对应关系如表 1 所示^[3]。

考虑实际使用中电磁环境的复杂和不可预见性，在点火回路结构中增加设计静电防护电路，可提高武器系统的安全性。

2.3 点火序列

点火装置导线选用考虑耐高温、耐低温、柔软性好、耐老化和抗干扰等特点，以满足火箭弹发动

机作战需求。传火原理采用中心传火的功能，传火药选取黑火药药盒，黑火药具有火焰感度好，易于被点燃且传火速度快的特点，选用粒度适中的5类黑火药，可进一步提高点火的一致性。

点火药采用高能点火药，其燃烧生成物中固体粒子多、气体少，主要靠热传导的方式将发动机装药点燃，对发动机装药的冲击小。通过计算得：点火药量 $G_{ig}=252\text{ g}$ ，最终结合试验确定点火药量为 300 g 。

3 改进试验

改进前后作用对比如图3所示。采用轴向输出结构，输出端设计为 X 度扩张角的轴向单孔结构，整体嵌入发动机装药内，头部点火，燃烧产物从轴向端面释放，点传火一致性较好，有利于发动机装药完整性，实现了该发动机装药从局部到全面的可靠点火。

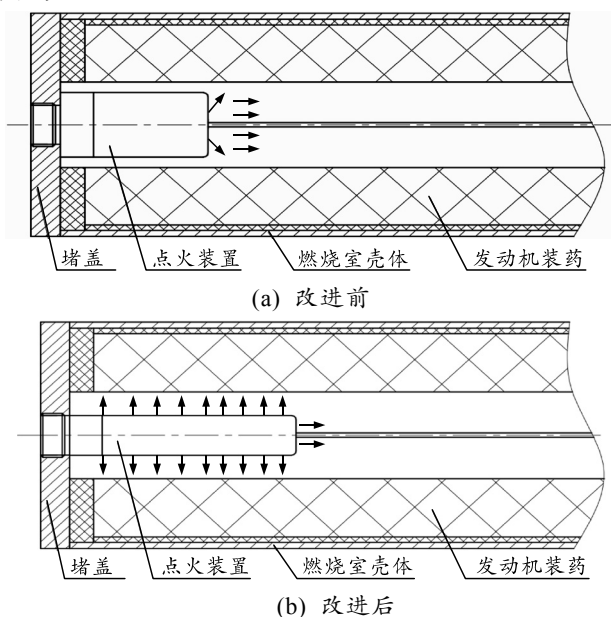
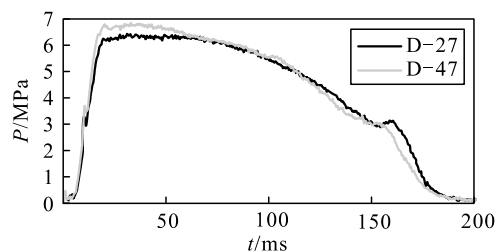
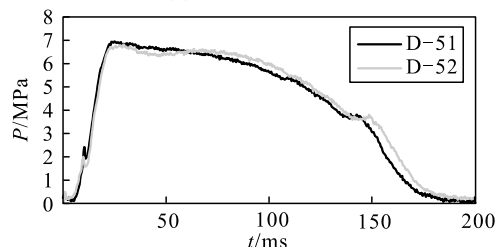


图3 发动机点火形式对比

改进后的点火装置结构确定后，进行了高温 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、常温内燃烧性能测试，产品指标要求不大于 10 MPa 。点火装置序号分别为高温：16、24、44、46；低温：27、47、51、52，常温吸湿：50、53、57，测试曲线如图4—6所示。同时结合高速影像对其燃烧火焰长度进行判读，从喷管喷出到从喷管消失火焰持续时间 $163\sim 217\text{ ms}$ ，满足工作时间 $130\sim 230\text{ ms}$ 的技术指标要求。从不同深浅与线宽的曲线图看出，该传火序列实现了装药燃烧的平台效应，高、低、常温燃烧性能稳定，一致性好。

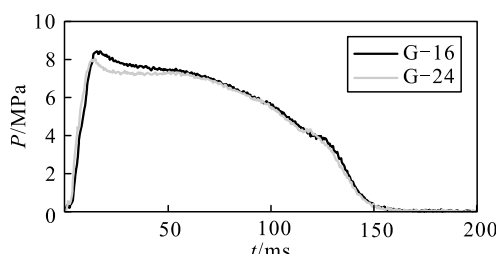


(a) 序号 27、47

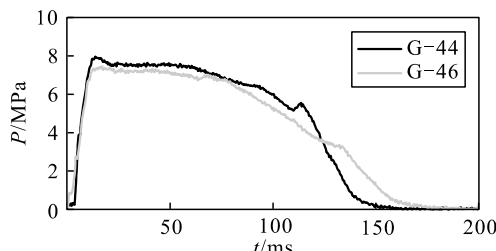


(b) 序号 51、52

图4 低温内压曲线



(a) 序号 16、24



(b) 序号 44、46

图5 高温内压曲线

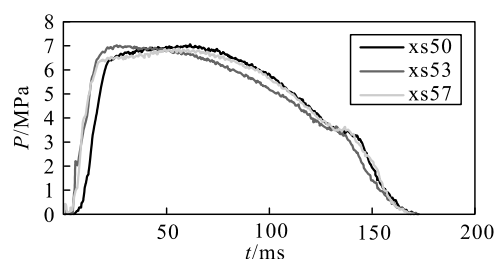


图6 常温吸湿内压曲线

4 关键技术

4.1 钝感点火技术

点火装置作为火箭弹的首发火工元件，直接影响武器系统的安全性和可靠性；因此，武器系统要求点火装置具有较高的安全性和可靠性。点火装置的点火元件设计采用钝感半导体桥，可以实现高安

全性和发火可靠度的技术要求。

4.2 抗静电技术

考虑实际使用中电磁环境的复杂和不可预见性,对点火装置脚-脚、脚-壳的防静电结构进行加固设计,解决了桥式发火装置的静电干扰问题。以电感器实时监控点火装置静电电压,当大于压敏电阻的敏感电压时,则导通泄放电路,保证在发火回路中的抗静电功能,以提高武器系统的安全性。其设计思路采用了常见的 2 种解决途径:1)“堵”,在火工品内部设计绝缘系统,增加脚-壳的防静电强度,避免在静电电压下击穿;2)“泄放”,采用保护性静电泄放装置设计,构成静电的泄放通道^[4]。

4.3 冗余点火和传火序列

固体火箭发动机的点火装置同时具有瞬和延期 2 种点火功能,点火装置设计时一般配置 2 套相互独立的点火线路,设计结构并行,其点火方式在电连接上互相独立,点火时互不干扰,安全可靠^[5]。

为消除点火元件点火时对主点火药的影响,采用逆向点传火序列,点火元件在电流作用下发火,点燃本体内嵌的黑火药,黑火药火焰通过传火孔传入中心药管,进而点燃高能点火药,产生的高温高压燃烧产物将发动机推进剂药柱点燃。这样的传火序列有利于合理地控制点火猛度,保证点传火的最优性能。

5 功能验证

5.1 环境适应性

5.1.1 温度适应性

有关统计表明,武器装备由于温度因素诱发的故障占环境因素的 40%^[6]。点火装置使用的药剂、原材料应多选制式产品,通过各项性能考核证明,应保证在-45~63℃条件的安全性和结构的完整性,以及在-40~50℃条件下的作用可靠性。

5.1.2 密封性

壳体内壁粘贴弹药筒纸,在外孔内涂以虫胶漆,保证壳体的密封性能;并在各零部件连接处、导线进出口均涂密封胶,保证良好的密封防潮性能。

5.2 电磁兼容性和测试性

点火元件选用制式产品用点火元件,采用高安全性的半导体桥钝感点火技术,具有防静电、防射频的性能,使用低电阻测试仪或电雷管测试仪可检

测产品点火回路电阻。

5.3 安全性和可靠性

点火装置作为火箭弹的初始作用火工元件,其安全程度直接威胁整个武器系统的安全。点火装置设计和验证选用了常规通用的零部件、元器件,一般采用钝感型点火元件,合并相同或近似功能,达到简化设计的效果。选用的药剂为成熟的金属基钝感药剂,零件标准化程度较高,具有较高的设计裕度。整体设计过程制定了零部件、元器件、原材料的选择与使用控制要求并形成控制文件,对元器件的选择、采购、监制、验收、筛选、保管、使用、故障分析和相关信息进行了全面管理^[7],保证了装配、使用、试验、运输、销毁时具有较好的安全性和可靠性。

建立点火装置可靠性计算模型时,分析确认其组成单元的连接方式为组合式,制作其系统可靠性框图,根据可靠性框图建立可靠性计算模型^[8]。

根据点火装置的功能框图建立其作用可靠性框图如图 7 所示。

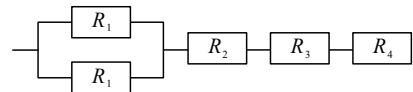


图 7 可靠性框图

图中: R_1 为点火元件的发火可靠度; R_2 为点火药包的可靠度; R_3 为中心药管的可靠度; R_4 为点火药的可靠度;故点火装置作用可靠度 $R = [1 - (1 - R_1)^2] \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4$ 。

点火元件采用已定型的制式产品中的点火元件,其发火可靠度可达到 $R_1 = 0.999\ 9 (\gamma = 0.90)$ 。

点火装置中点火药包、中心药管可选用火箭弹发动机中常用的制式黑火药和高能点火药,将可靠度分配为: $R_2 = 0.999\ 9$; $R_3 = 0.999\ 9$; $R_4 = 0.999\ 9$ 。

通过数据分析计算,点火装置可靠度能达到系统要求的指标 $0.999\ 7 (\gamma = 0.90)$ 。

6 结束语

点火装置的设计在历年系列产品中经过了较多的验证,主要功能还包括工艺性、经济性、保障性、贮存性和维修性等要求,在此不过多论述,但其结构与功能在系列产品的性能考核中得到了证明,可以满足设计功能和使用要求。设计的不同思路、相关改进和试验情况,可为后续系列火箭弹发动机点火装置的设计提供参考。