【装备理论与装备技术】　　doi：10.11809/bqzbgcxb2020.S1.015

一体式半导体桥点火装置在火箭橇发动机中的应用

李天祥，张　斐，郭　峰，袁新钊，蒙　鹤，宋建兴

（西安航天化学动力有限公司，西安　710025）

摘要：对火箭橇多级发动机串联运行以电网形式点火进行仿真，结果表明结构简单和低成本的一体式半导体桥点火装置安装位置的应力和应变很小，影响因素为发动机工作内压。点火装置单项试验和发动机地面静止点火试验结果表明：点火装置的响应时间短，满足电网点火要求，本体和连接结构的密封性和可靠性以及发火性能满足发动机工作要求，适用于多级火箭橇发动机电网点火。

关键词：点火装置；半导体桥；火箭橇；固体火箭发动机；电网点火；发动机试验

本文引用格式：李天祥，张斐，郭峰，等. 一体式半导体桥点火装置在火箭橇发动机中的应用[J]. 兵器装备工程学报，2020，41(S1)：59－62.

Citation format：LI Tianxiang, ZHANG Fei, GUO Feng, et al. Application of Integrated Semiconductor Bridge Ignition Device in Rocket Sled Motors[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering，2020，41(S1)：59－62.

中图分类号：TJ45；TJ53　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096－2304(2020)S1－0059－04

Application of Integrated Semiconductor Bridge Ignition Device in Rocket Sled Motors

LI Tianxiang, ZHANG Fei, GUO Feng, YUAN Xinzhao, MENG He, SONG Jianxing

(Xi'an Aerospace Chemical Propulsion Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: An integrated semiconductor bridge ignition device is presented for applications in rocket sled motors, possessing some advantages such as short response time, simple structure and low cost. By using such an ignition device, the speed can be increased effectively for rocket sleds with multi-stage motors in series undergoing electric grid ignition. The simulation results showed that the stress and strain at the position where the ignition device is mounted are quite low as rocket sled motors are running, arising from operating pressure inside the motor. It has demonstrated in item tests of the ignition device and static motor firing tests that the integrated semiconductor bridge ignition device is applicable for grid ignition of the multi-stage motors for rocket sleds, based on acceptable response time of ignition device for grid ignition, satisfactory gas-tightness and reliability of the body and connecting structure for operation, and acceptable initiation property for motor operation as well.

Key words: ignition device; semiconductor bridge; rocket sled; solid rocket motor; grid ignition; motor test

HIFEX 火箭橇在 16 k 滑轨上创造了约 8.5*Ma* 的最高陆地试验速度记录，一级使用 6 台推力为 1 948 kN 的固体火箭发动机并联同时点火，二级使用 6 台推力为 2 558 kN 的固体火箭发动机通过电网同时点火[1]。固体火箭发动机作为火箭橇动力装置具有工作时间短、推力大等特点，直径为∅600 mm 时，复合固体推进剂燃速基本达到了 40 mm/s 的安全使用上限，所以提高火箭橇的速度的途径之一就是将多级发动机串联并以电网形式点火。当火箭橇在滑轨上的运行速度

收稿日期：2019－11－04；**修回日期：**2019－11－28

作者简介：李天祥(1988—)，男，工程师，主要从事固体火箭发动机研究。

大于 1*Ma* 时,通过电网的时间约 2 ms,运行速度越高通过电网的时间就越短,为保证火箭橇发动机通过电网时能可靠工作,就必须将点火装置的响应时间控制在 2 ms 以内甚至更低。

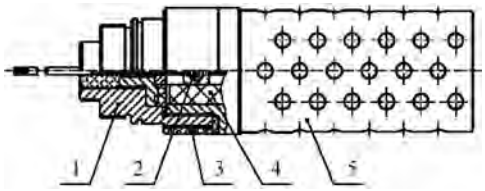
目前,国内广泛使用的火箭橇发动机均采用头部点火方式,点火线从发动机尾部引出。点火装置使用桥带结构的点火头或电发火管,电发火管成本约是点火头的 3 ~ 5 倍,所以在火箭橇发动机中基本全部使用点火头。桥带结构在 5 ~ 10 A电流作用下的响应时间约 5 ~ 10 ms,极限发火电流 22 A 作用下的响应时间约 3 ms,不满足电网点火响应时间的要求,部分桥丝结构的响应时间比桥带结构短,但不满足 1 A 1 W 5 min 不发火的安全使用要求。点火装置的安装位置,使最长 6 m 的点火线在点火装置和堵盖之间处于悬空状态,未工作级的火箭橇发动机在工作级作用下会产生高频振动和径向过载[2],可能造成点火线折断导致瞎火故障,使火箭橇系统可靠性下降。所以,目前的火箭橇点火装置在性能上不适用于电网点火,而且存在点火可靠性下降隐患。

半导体桥火工品出现于 1968 年[3],具有爆发时间短、可靠性高、安全性高和所需发火能量低等优点[4]。刘忠山等[5]组装了 10 余发半导体桥雷管,进行半导体桥芯片爆发时间检测,测得爆发时间为 25 ~ 200 μs。任炜等[6]设计了 1 Ω 和 3 Ω 的半导体桥点火器,由壳体、电极塞、始发装药、输出装药、绝缘环和密封板等组成,测得发火时间为 363 μs 和 147 μs。这种点火器在固体火箭发动机中也称作电发火管,是分装式或组合式点火装置的重要组成部分[7-8],常用于战略、战术武器型号,其结构和安装复杂,用于火箭橇大量消耗性试验时的成本很高。所以,半导体桥火工品的爆发时间在几十到几百微秒之间,用于点火装置时的响应时间远小于 2 ms,性能上满足对点火装置响应时间的要求,适用于火箭橇电网点火。

本文基于半导体火工品爆发时间短的特点,研制出一体式半导体桥点火装置,具有点火响应时间短、结构简单、可靠性高和低成本特点,从点火装置单项试验和发动机地面静止点火试验验证了产品结构的合理性和可行性,为这种点火装置在多台火箭橇发动机电网点火中的应用打下基础。

1 点火装置结构

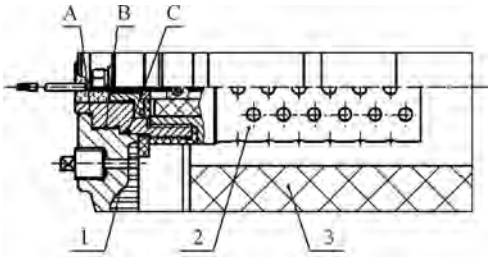
一体式半导体桥点火装置采用结构简单、成本较低的篓式结构,由底座、半导体桥点火头、隔热环、点火药和药盒等部分组成。点火装置使用两个单独的半导体桥点火头,双回路冗余结构保证点火可靠性,较半导体桥电发火管成本下降了 4 ~ 8 倍;每个点火头包裹黑火药和 BPN 混合药剂,用于发火能量放大输出;点火线与点火头焊接后与底座玻璃烧结,并从点火装置头部引出,避免了电网点火情况下点火线悬空折断的可能性;药盒采用环向和尾端多孔结构,与底座连接螺纹连接;点火药使用压块的镁/聚四氟乙烯,药量按 $m_{ig} = 5.8P_{ig}V_{ig} \times 10^{-3}$ 计算[9],这种点火药与 BPN 输出能量相当但成本下降了 2 ~ 3 倍。一体式半导体桥点火装置结构如图 1 所示。



1. 底座;2. 半导体桥点火头;3. 隔热环;4. 点火药;5. 药盒

图 1 一体式半导体桥点火装置结构示意图

点火装置通过螺纹形式安装在发动机头部,从绝热顶盖内侧向外旋合。发动机工作时,图 2 为一体式半导体桥点火装置安装示意图,图中 A 处端面 O 形圈、B 处螺纹涂敷硅橡胶密封剂和 C 处侧面 O 形圈的冗余密封结构,实现点火装置与发动机的密封与承压;点火装置玻璃烧结结构实现内部结构密封与承压,试验表明玻璃烧结位置的承压能力达到 100 MPa 以上,远高于发动机的工作压强。点火装置药盒与底座之间的隔热环是产品完整性结构,在药柱燃烧产生 3 400 K 以上的燃烧温度时[10],该部位的金属不会过热或烧穿,点火装置玻璃烧结位置的隔热垫也起到相同的作用。



1. 绝热顶盖;2. 点火装置;3. 火箭橇发动机药柱

图 2 一体式半导体桥点火装置安装示意图

2 结构仿真计算

根据火箭橇发动机的使用工况,对点火装置连接结构部位进行仿真计算,计算条件为:发动机工作内压 18 MPa,运动速度 3*Ma*,外壁摩擦加温 150 ℃,轴向过载 65*g*,径向过载 35*g*,仿真计算结果见图 3 ~ 图 5。

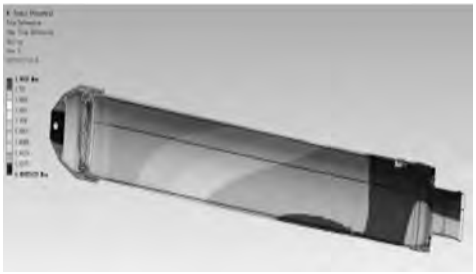


图 3 火箭橇发动机应变仿真计算结果

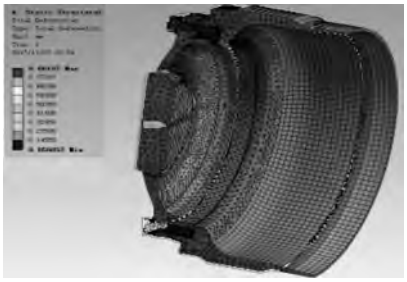


图 4　安装点火装置位置应变仿真计算结果

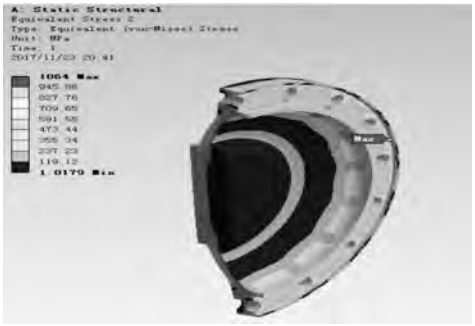


图 5　安装点火装置位置应力仿真计算结果

仿真计算结果表明,火箭橇运行时的最大应变在发动机尾部,为滑轨的反方向,最大值为 1.993 5 mm。一体式半导体桥点火装置的安装位置在顶盖的平板部分,安装位置在发动机内压作用下整体向外偏移,最大偏移量 0.861 6 mm,最大应力为 237.23 MPa,均在点火装置密封和结构强度允许范围内,所以火箭橇运行工况对点火装置的密封性和结构强度影响很小。

3　试验

3.1　点火装置单项试验

为验证一体式半导体桥点火装置的性能和工作可靠性,制造了 4 件产品进行单项点火试验,镁/聚四氟乙烯点火药量 160 g,产品编号为 M1 ~ M4。点火装置试验用的密闭容器见图 6,试验前和试验后状态见图 7,试验数据见表 1。

图 6　试验用密闭容器

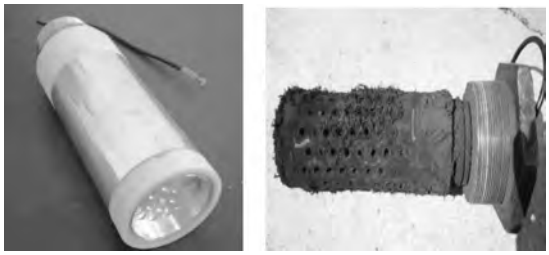


图 7　点火装置试验前(左)和试验后(右)状态

表 1　一体式半导体桥点火装置单项试验数据

产品编号	试验结果	响应时间/μs	发火电流	密闭容器最大压强/MPa
M1	可靠发火	44	单路 5 A	2.73
M2	可靠发火	36	单路 5 A	2.82
M3	可靠发火	45	单路 5 A	2.66
M4	可靠发火	48	单路 5 A	2.51

结果表明,点火装置密闭容器单项试验后结构完好,测得响应时间 36 ~ 48 μs,满足不大于 2 ms 的电网点火要求。密闭容器最大压强 2.51 ~ 2.82 MPa,满足点火装置密闭容器试验压强不大于 3 MPa 的一般性要求。

为验证点火装置完成点火功能后本体和连接结构的密封性和可靠性,将点火装置壳体截断进行水压检测试验,如图 8。

图 8　点火装置完成点火功能后水压试验装置

试验加压至 18 MPa,保压 1 min 无压降,点火装置本体和连接结构无渗漏,继续加压至 25 MPa,试验结构也满足要求,点火装置技术状态达到了发动机试验条件。

3.2　发动机地面静止点火试验

结合某电网点火的火箭橇试验系统,设计了一、二、三级火箭橇发动机,平均推力分别为 100 kN、65 kN 和 35 kN,对应一体式半导体桥点火装置的点火药量为 160 g、90 g 和 60 g。点火装置见图 9,发动机地面静止点火试验见图 10 ~ 图 12,试验结果见表 2。

试验中,点火装置本体和连接结构的技术状态稳定可靠,拆分后与密闭容器试验后状态一致。在相同发火电流的情况下,测得发动机 - 40 ~ + 50 ℃ 点火延迟时间 28 ~ 47 ms,满足发动机点火延迟不大于 100 ms 的要求,点火装置技

术状态能保证发动机可靠工作。

图 9 火箭橇发动机使用的一体式半导体桥点火装置

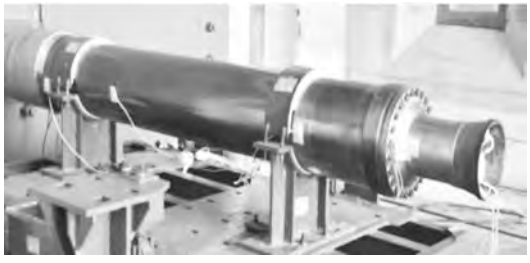


图 10 一级火箭橇发动机试验装置

图 11 二级火箭橇发动机试验装置

图 12 三级火箭橇发动机试验装置

表 2 发动机地面静止点火试验数据

项目	试验结果	试验数量	发火电流	发动机点火延迟/ms
一级	可靠工作	1	单路 5 A	46
二级	可靠工作	3	单路 5 A	28 ~ 41
三级	可靠工作	3	单路 5 A	36 ~ 47

通过点火装置单项试验和发动机地面静止点火试验验证,一体式半导体桥点火装置结构合理可行、可靠性高、响应时间短,满足多级火箭橇发动机电网点火要求。

4 结论

1) 火箭橇发动机运行时的应力和应变为 237.23 MPa 和 0.861 6 mm,本体和连接结构的密封性可靠;

2) 单项试验测得点火装置的响应时间为 36 ~ 48 μs,满足不大于 2 ms 的电网点火要求;

3) 火箭橇发动机在 -40 ~ +50 ℃的点火延迟时间为 28 ~ 47 ms,满足发动机点火延迟不大于 100 ms 的要求;

4) 点火装置的技术状态适用于多级火箭橇发动机电网点火。

参考文献:

[1] LT MATTHEW L. Lawrence. HIFEX sled train[C]. High-speed trials,2010:28 - 31.

[2] 董治华,肖军,张林锐,等. 火箭橇减振系统设计[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(8):15 - 20.

[3] HOLLANDER L E Jr. Semiconductor explosive igniter[P]: USP 3366055,1968.

[4] XU Zhengxiang,ZHOU Bin,CHEN Xiwu,et al. The development and application of microelectronics Pyrotechnics [J]. Explosive Materials,2004(Suppl.):29 - 34.

[5] 刘忠山,刘国应,莫元玲. 半导体桥芯片性能影响因素的研究[J]. 火工品,2015(4):13 - 16.

[6] 任炜,周智,刘举鹏. 半导体桥点火器的设计与研究[J]. 火工品,2007(6):43 - 46.

[7] 杨月诚. 火箭发动机理论基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.

[8] 唐金兰,刘佩进. 固体火箭发动机原理[M]. 北京:国防工业出版社,2013.

[9] 官鹏,王峰,李天祥,等. 小型固体火箭发动机点火器试验研究[J]. 兵器装备工程学报,2018,39(08):21 - 25.

[10] 李天祥,郭峰,袁新钊,等. 端面燃烧发动机中提高推进剂比冲的实验研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(08):90 - 93,140.

(责任编辑 周江川)