

文章编号: 1006-9941(2010)01-0051-04

单点三脉冲推冲器感应点火影响因素研究

郭宁, 严楠, 汪佩兰

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 单点三脉冲推冲器是在逻辑点火电路作用下有序地引燃三个点火具, 实现对弹体的三次弹道修正。从主装药量、膜片厚度和燃烧室体积三方面对点火具间发生感应点火的影响因素进行了分析, 增加主装药量有利于提高输出性能, 但主装药量过大容易引起感应点火, 取 175~200 mg 为宜; 增大膜片厚度可以有效防止感应点火, 但膜片厚度过大会导致能量损失过大, 取 0.3 mm 为宜; 增大燃烧室体积可以有效防止感应点火, 但燃烧室体积过大会增大推冲器整体尺寸, 取 3.7 mL 为宜。

关键词: 军事化学与烟火技术; 火工动力源; 单点三脉冲推冲器; 感应点火; 输出性能; 总冲量

中图分类号: TJ45; TJ5

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.013

1 引言

战争的发展对武器的打击精度提出了愈来愈高的要求, 发展精确打击弹药已是军界和军火工业界的共识^[1]。精确打击弹药首推导弹, 但是导弹造价昂贵, 不可能大量装备。为了满足战争的需求, 具有一定弹道修正能力的弹道修正弹便应运而生^[2]。弹道修正脉冲推冲器的基本原理是在旋转弹丸质心附近布置多个脉冲推冲器, 依靠脉冲推力产生的直接横向反作用控制力, 快速修正弹丸的飞行弹道。目前国外对常规弹药弹道修正用推冲器的应用研究包括美国的增程拦截弹 ERINT(装有 10 排共 180 个推冲器)^[3] 和超高速灵活截击弹(Quickshot)^[4], 德国的 227 mm 多管火箭系统的火箭弹(装有 32 个推冲器)^[5], 瑞典的 120 mm Strix 末制导反坦克迫击炮弹(装有 12 个推冲器)^[6] 等。国内主要是北京理工大学张平等^[7-8] 参考美国的研究经验, 从固体火箭发动机的设计角度对“T”形和“I”形单脉冲火箭发动机结构及输出性能进行了研究。

本研究采用共用一个燃烧室的单点三脉冲推冲器, 实现在逻辑点火电路的作用下有序地引燃三个点火具, 对弹体进行三次弹道修正。并行排列的三个点火具彼此有可能发生感应点火, 导致推冲器推力和作用时间的偏差。感应点火是一种炸药燃烧产生的能量

能够引起与其相距一定距离的被惰性介质隔离的另一种炸药燃烧或者爆炸的现象, 前者称为主发装药, 后者称为被发装药。分析感应点火的影响因素, 防止三个脉冲之间的感应点火是单点三脉冲推冲器结构设计的核心问题。根据火工药剂燃烧理论, 从主装药量、膜片厚度和燃烧室体积三个方面对单点三脉冲推冲器三个点火具间的感应点火进行探讨。

2 试验部分

2.1 试验装置

单点三脉冲推冲器感应点火试验装置如图 1 所示。为实现作用迅速、可靠性高和安全性好的目的, 采用半导体桥作为点火元件; 考虑实际工艺和推冲器小型化的要求, 设计点火具间距为 2 mm; 燃烧室压强由压力传感器测得, 型号 CL-YD-205, 量程为 60 MPa; 喷出气体产生的推力根据牛顿第三定律, 测得推力的反作用力即可, 由推力传感器测得, 型号 CL-YD-315, 量程为 5000 N; 为防止点火具作用产生微小振荡时推冲器重力产生转动力矩, 推冲器尾部设计一个配重, 使重心位于喷管中轴线上。

2.2 试验原理

单点三脉冲推冲器的作用原理为: 当接受到外部的发火控制逻辑电路的点火指令后, 点火器的半导体桥迅速作用并引燃点火药, 点火药燃烧产生的高温高压气体和灼热的固体粒子迅速进入粒状主装药床的空隙, 通过对流传热的方式给药粒提供强烈的热刺激, 点燃主装药床。当主装药室内的压力达到密封膜片的破膜压力时, 主装药的燃烧产物和未燃烧完全的药粒迅速破膜进入共

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-09-14

基金项目: 总装备部预研项目(51305080302)

作者简介: 郭宁(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事弹道修正用火工动力源技术研究。e-mail: guoning_ren_2001@126.com

用燃烧室,最终燃烧产物从共用喷管喷出产生推力脉冲。

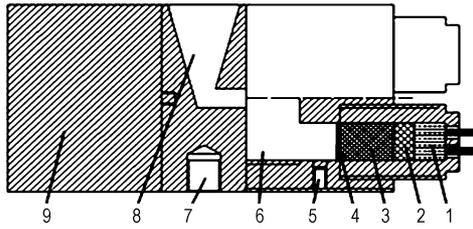


图1 单点三脉冲推冲器结构简图

1—半导体桥, 2—点火药, 3—主装药, 4—膜片, 5—压力传感器, 6—燃烧室, 7—推力传感器, 8—喷管, 9—配重

Fig.1 Structure diagram of three-impulse-at-one-spot thruster
1—semiconductor bridge, 2—igniting charge, 3—main charge, 4—sealing film, 5—pressure sensor, 6—combustion chamber, 7—thrust sensor, 8—nozzle, 9—extra weight

主发装药爆燃产生的能量通过下面三种方式传递至被发装药^[9]:

(1) 热爆炸气体。主发装药爆燃时本身产生的高温高压气体通过惰性介质后冲击被发装药,可能引起感应点火。

(2) 冲击波。主发装药爆燃时在其周围介质中产生冲击波,当冲击波通过惰性介质进入被发装药后仍具有足够的强度时,就可能引起被发装药的爆燃或爆轰。

(3) 抛射的固体颗粒。主发装药爆燃时抛射出的固体颗粒包括外壳破片、金属射流等具有很高的速度和温度,冲击到被发装药时就可能引起感应点火。

单点三脉冲推冲器的第一个点火具主装药经点火药引燃后迅速发生爆燃,生成的高温高压气体等燃烧产物和未燃烧完全的药粒进入共用燃烧室,伴随产生的高温高压的热爆炸气体、冲击波以及少量高温高速固体颗粒冲击未作用的两个点火具,可能引起感应点火。热爆炸气体的能量大小与主发装药的药量和燃烧室体积有关;冲击波的能量大小与主发装药的药量和

密封膜片的厚度有关;高温高速固体颗粒的能量大小与主发装药的药量和燃烧室体积有关。

2.3 试验制备

(1) 点火药采用钛粉/高氯酸钾混合物(以 TK 表示),黏合剂为 4% 酚醛树脂($C_{48}H_{42}O_7$),根据最小自由能原理确定理论最佳组分配比为 $Ti/KClO_4/C_{48}H_{42}O_7 = 41/59/4$ 。主装药一般选用高能高燃速含能材料,选用苦味酸钾、黑索今和硝棉漆(浓度 8%)为基本组分(以 KR 表示),理论最佳组分配比为 80 : 10 : 10。

(2) 增大主发装药的药量直至发生感应点火,得到该条件下能够发生感应点火的最小主装药量。

(3) 依据上述方法分别得到 0.12 mm、0.2 mm 和 0.3 mm 密封膜片条件下发生感应点火的最小主装药量。

(4) 减小燃烧室体积直至发生感应点火,得到该条件下能够发生感应点火的最小燃烧室体积。

3 结果与讨论

3.1 主装药量对感应点火的影响

固定点火药 TK 药量为 40 mg,压药压力为 21.3 MPa,膜片厚度取 0.3 mm,主装药 KR 的药量(m_p)分别取 125, 150, 175, 200, 225 mg,压药压力为 14.2 MPa。三个推冲器在逻辑电路的作用下间隔 4 ms 依次进行电点火,推力和燃烧室压强在 0.5 ms 以内迅速达到峰值,然后在 2 ms 以内迅速衰减完成弹道修正。得到典型的输出性能推力(F)、燃烧室压强(p_c)和总冲量(I)与时间(t)的曲线如图 2 所示,总冲量可以由公式(1)得到。

$$I = \int F dt \quad (1)$$

不同药量的主装药作用下的输出性能参量如表 1 所示。由表 1 可以看出随着主装药量的增加,爆燃产生的能量增加,表现为推力、燃烧室压强和总冲量都随之增大。当药量增大到 250 mg 时,推冲器发生感应点火,其输出性能如图 3 所示。

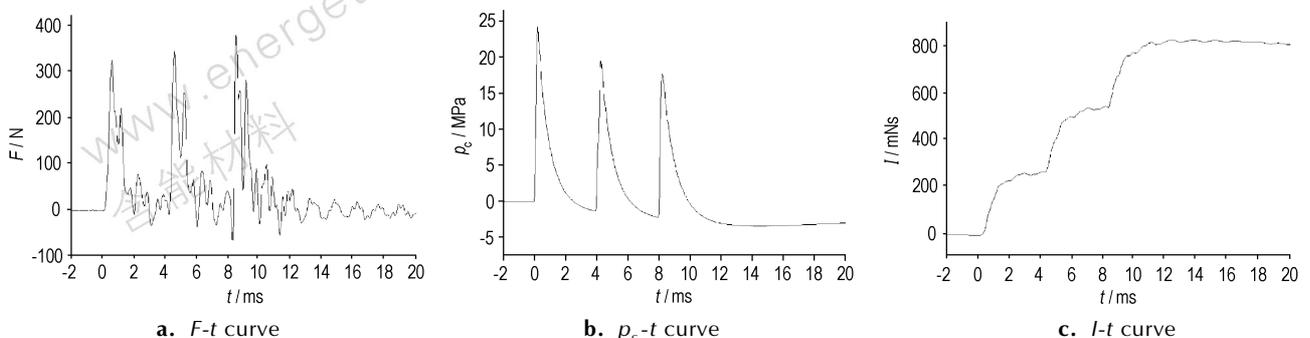


图2 典型的输出性能推力、燃烧室压强和总冲量与时间关系的曲线

Fig.2 Typical curves of output thrust, pressure in combustion chamber and total impulse vs time

表 1 不同主装药量下的输出性能参量

Table 1 Output parameters with different amounts of main charge

m_p /mg	F/N			p_c /MPa			I/N·s		
125	201	198	223	17.2	10.5	10.9	0.205	0.208	0.203
150	358	216	299	21.7	21.2	17.0	0.224	0.262	0.265
175	392	259	259	25.1	23.3	21.7	0.287	0.283	0.317
200	413	419	352	29.7	26.4	23.1	0.303	0.326	0.344
225	496	564	347	25.5	23.5	20.5	0.394	0.396	0.391

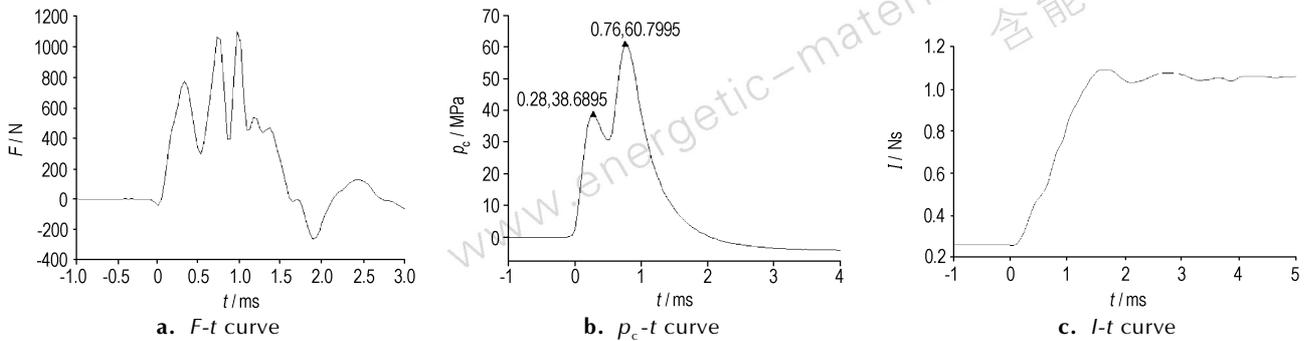


图 3 感应点火时输出性能推力、燃烧室压强和总冲量与时间关系的曲线

Fig. 3 Curves of output thrust, pressure in combustion chamber and total impulse vs time at sympathetic ignition

当逻辑电路点燃第一个点火具后 0.32 ms 内推力就达到了 778 N,在 0.58 ms 时第二个点火具被感应点火,0.14 ms 内推力达到 1067 N,在 0.86 ms 时第三个点火具也被感应点火,0.10 ms 内推力达到 1106 N,瞬间得到的燃烧室压强为 60.8 MPa。最终得到的推力和总冲量都不稳定,难以达到要求。

可见,主装药量增大,产生的冲击波能量增大,有利于提高输出性能,但过量的主装药量容易引发感应点火,当前条件下取 175~200 mg 为宜。

3.2 膜片厚度对感应点火的影响

铝片的破膜压力与切应力有关,由工程力学知识可知,破膜压力可由公式(2)得到^[10]。

$$p_{\text{破膜}} = 4\delta\sigma_b\gamma/d \quad (2)$$

式中, δ 为铝片厚度; σ_b 为许用应力,本试验采用的铝片根据 WJ2211-94《火工品专用铝带规范》,取许用应力为 $\sigma_b = 59 \sim 98$ MPa; γ 为许用应力系数取 1.5; d 为铝片受力直径,设计为 3 mm。由式(2)可以得到铝片厚度 δ 与计算得到的破膜压力 $p_{\text{破膜}}$ 之间的关系见表 2。

固定点火药 TK 药量为 40 mg,取膜片厚度为 0.12, 0.20, 0.30 mm,逐步增加主装药量直至发生感应点火。膜片厚度和发生感应点火时的主装药量关系见表 2。可见其他条件相同时,随着膜片厚度的增加,推冲器越来越不容易发生感应点火;但如果膜片厚度过大,导致破膜压力过大,破膜时冲击波能量的衰减也过大,造成过多的能量损失。因此膜片厚度取 0.3 mm 为宜。

表 2 铝片厚度和破膜压力之间的关系

Table 2 Relationship between thickness of aluminum film and breaking pressure

thickness of aluminum film/mm	breaking pressure /MPa	main charge amount/mg
0.12	14.2~23.5	125
0.20	23.6~39.2	150
0.30	35.4~58.8	250

3.3 燃烧室体积对感应点火的影响

为了使从点火具破膜出来未完全燃烧的主装药充分燃烧,单独设计了三个点火具共用的燃烧室。根据理想气体状态方程,燃烧室的大小与热爆炸气体的压强成反比。根据公式 $p_c = f\rho / (1 - \alpha\rho)$ 估算燃烧室的容积,式中 p_c 为燃烧室压强,MPa; f 为火药力, $J \cdot kg^{-1}$; α 为余容, $m^3 \cdot kg^{-1}$; ρ 为装药密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。

固定点火药 TK 药量为 40 mg,膜片厚度取 0.3 mm,主装药 KR 药量取 175 mg,燃烧室体积分别取 3.7, 3.3, 2.9, 2.5, 1.9 mL 共五种情况,当体积为 2.5, 1.9 mL 时发生感应点火,另外三种情况的输出性能参量见表 3。

可见燃烧室体积大于 2.9 mL 时点火具之间不会发生感应点火,且随着燃烧室体积的增大,热爆炸气体的压强减小,也导致输出推力减小。这是因为在同等主装药量且燃烧完全的情况下,产生的热爆炸气体的物质的量应该相同,而根据理想气体状态方程 $pV =$

nRT 可知, 随着体积增大, 压强减小, 推冲器越来越不容易发生感应点火。但是燃烧室体积的增大会导致推

冲器整体尺寸增大, 不利于小型化的要求, 因此燃烧室体积取 3.7 mL 为宜。

表 3 燃烧室体积不同时的输出性能参量

Table 3 Output parameters with different volumes of combustion chamber

combustion chamber volume/mL	thrust/N			pressure in combustion chamber/MPa			$I/N \cdot s$		
3.7	314	405	233	23.5	21.9	20.6	0.290	0.300	0.306
3.3	618	257	212	28.5	23.2	21.9	0.321	0.349	0.389
2.9	479	354	388	29.9	26.7	25.4	0.252	0.260	0.273

4 结论

影响单点三脉冲推冲器三个点火具之间感应点火的因素主要有主装药量、膜片厚度和燃烧室体积。增加主装药量可以增大产生的冲击波能量, 有利于提高输出性能, 但主装药量过大就容易引起感应点火, 试验证明用 KR 作为主装药时选取 175 ~ 200 mg 为宜; 增大膜片厚度可以增大膜片的剪切应力, 从而使膜片的破膜压力增大, 有效防止感应点火, 但膜片厚度过大会导致能量损失过大, 试验证明膜片厚度采用 0.3 mm 为宜; 增大燃烧室体积可以减小燃烧室压强, 防止感应点火, 但燃烧室体积过大会增大推冲器整体尺寸, 试验证明燃烧室体积采用 3.7 mL 为宜。

参考文献:

- [1] 谭凤岗. 弹道修正弹的概念研究[J]. 火箭技术, 1998(4): 1-10.
TAN Feng-gang. Concept development of trajectory correction projectile[J]. *Projectile and Rocket Technology*, 1998(4): 1-10.
- [2] 赵金强, 龙飞, 孙航. 弹道修正弹综述[J]. 制导与引信, 2005, 26(4): 16-19.
ZHAO Jin-qiang, LONG Fei, SUN Hang. The summary of trajec-

- tory correction projectile[J]. *Guidance and Fuze*, 2005, 26(4): 16-19.
- [3] Linick J M. Impulse motor and apparatus to improve trajectory correctable munitions including cannon launched munitions, glide bombs, missiles, rockets and the like: USP 20010015396[P].
- [4] Magness R W. Impulsive control for hypervelocity missile[R]. ADA 103844, 1981.
- [5] Herman R. Subsystems for the extended range interceptor (ERINT-1) missile[R]. AIAA-92-2750.
- [6] Srivastava B. Lateral jet control of a super-sonic missile: CFD predictions and comparison to force and moment measurements[R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997: 1-45.
- [7] ZHANG P, ZHOU J M, FANG X W, et al. Experimental diagnoses of interior ballistic anomalies for an impulsive T-thruster[R]. AIAA 92-3051.
- [8] ZHANG Ping, SUN Xiao-tuan. Preliminary analysis of internal ballistic performances of an igniter type impulsive control motor[R]. AIAA 94-3332.
- [9] 赵耀辉, 焦清介, 臧充光, 等. 雷管在密实介质中殉爆特性的实验研究[J]. 含能材料, 2006, 14(3): 224-227.
ZHAO Yao-hui, JIAO Qing-jie, ZANG Chong-guang, et al. Characteristics of detonator sympathetic explosion in densified mendium[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(3): 224-227.
- [10] 梁春光, 庄严. 工程力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.

Factors Affecting Sympathetic Ignition of Three-impulse-at-one-spot Thruster

GUO Ning, YAN Nan, WANG Pei-lan

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology of Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Three-impulse-at-one-spot thruster is a device which initiates three igniters by logic igniting circuit, and achieves trajectory correction for various flight vehicles. The effects of different main charge amounts, thickness of sealing film and combustion chamber volume on sympathetic ignition of the igniters were analyzed. Results show that output performance improves by increasing main charge amount while sympathetic ignition taking place after excessive charge, so 175-200 mg charge amount is suggested. The sympathetic ignition is effectively prevented by increasing thickness of sealing film while excessive thickness brings too much energy loss, so 0.3 mm thickness of sealing film is suggested. The sympathetic ignition is effectively prevented by increasing combustion chamber volume while too large volume will result in excessive whole dimension, so 3.7 mL chamber volume is suggested.

Key words: military chemistry and pyrotechnic technology; explosive actuated device; three-impulse-at-one-spot thruster; sympathetic ignition; output performance; total impulse

CLC number: Tj45; Tj5

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.013