

文章编号:1006-9941(2009)06-0704-04

高燃速烟火型做功器件燃烧特性研究

刘 玲, 李国新, 蒋新广, 劳允亮

(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:为了研究高燃速做功器件内部燃烧波传播速度的变化规律和燃烧特性,保证该器件作用迅速、稳定,采用光导纤维测速法,对烟火型短脉冲推冲做功装置点火-燃烧过程的传火速度以及不同密度下推冲器的稳定燃速进行测试。结果表明:其燃烧过程具有非平行层燃烧的特性,沿燃烧波传播方向,推进剂燃烧存在不同特征的 3 个区域,平行层燃烧区,过渡燃烧区以及稳定对流区;装药密度为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,推冲器的稳定燃速达到最大。

关键词:爆炸力学;燃速;烟火型推进剂;光纤;燃烧特性

中图分类号:TJ55;TQ562;O389

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.015

1 引 言

随着精确打击武器的发展,对利用含能材料燃烧做功器件的性能也提出了更高的要求,要求其响应快,输出稳定,因此做功器件的装药需要具有燃烧速度高,燃烧稳定等特点。对于高燃速做功器件,测试其轴向输出方向燃烧波传播速度的分布规律,能以此调整药剂配比和装药结构,最终通过控制燃烧室内的燃速,稳定气体输出,防止燃烧转爆轰。

已有研究者通过透明燃烧室,用高速摄影机拍摄超高燃速推进剂燃烧过程图像^[1],用靶线法测试高燃速推进剂的燃速得出其燃烧性能^[2]以及用激光燃速仪测量燃烧系数和压力指数的关系分析推进剂的燃烧性能^[3]。这些研究都未对燃速在燃烧波阵面传播方向上的分布进行研究。本文采用光纤测速法,对烟火型短脉冲推冲做功装置的点火-燃烧过程的传火速度进行测试,求得燃烧波沿药剂燃烧方向传播速度的分布规律,以及不同装药密度下装药的稳定燃速,以便控制燃速改进做功器件的输出性能。这种测试方法的特点是:微直径光探头有利于测量小区域燃速变化、响应速率高、抗电磁干扰能力强^[4]。

2 实验部分

2.1 做功器件的选取

燃气喷流型推冲器是一种利用主装药燃气的高速

喷流形成垂直于弹轴的反作用力^[5],实现对弹体的飞行轨道修正的做功器件,如图 1 所示。推冲器能量输出是通过引燃药、点火药、烟火推进剂依次传递,本实验选用这种结构的推冲器,研究高燃速烟火型做功器件的燃烧特性。

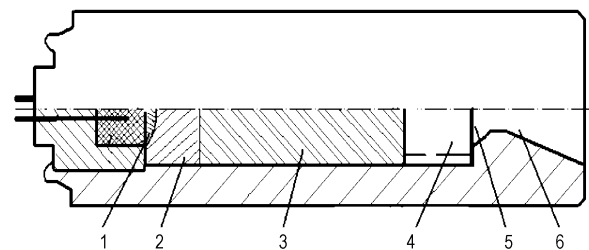


图 1 推冲器结构

1—点火头, 2—点火药, 3—主装药,
4—缓冲室, 5—密封膜片, 6—喷管

Fig. 1 The structure of thruster

1—ignition head, 2—ignition composition, 3—main charge,
4—buffer room, 5—sealing element, 6—spout

2.2 主装药的选取

主装药选用具有高燃速的烟火型推进剂。硝酸(含 RDX 或 HMX)类推进剂具有燃温低、燃气产物分子量低、烧蚀性小、烟雾少,既能提高推进剂能量又能降低烧蚀以及毒性低等^[6]。因此选用在黑索今(RDX)中加入高火焰感度的苦味酸钾(KP)能解决点火难的问题^[7],同时用硝化棉(NC)作为粘合剂。将 RDX/KP/NC 按质量比为 82 : 10 : 8 混合均匀,总药量为 480 mg,为保证密度一致,压成三段密度为 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、直径与测试用密闭爆发器内径(6 mm)一致的实心药柱装入测试装置。

收稿日期:2009-03-20;修回日期:2009-06-04

基金项目:国家重大安全基础研究项目基金资助(513390303)

作者简介:刘玲(1984-),女,在读硕士研究生,主要从事弹道修正用推冲器研究。e-mail: 717144@qq.com

通讯联系人:李国新, e-mail: lgx84@sohu.com

3 测试原理与方法

3.1 光纤测试系统组成

光纤测试系统包括信号采集、信号转换和放大、信号输出三大功能块。

(1) 信号采集。信号采集由光纤完成,光纤直径小于 400 μm 垂直于燃烧面法线方向安置,接受燃烧产生的光信号并传输。

(2) 信号转换和放大。当光信号传输到光纤端部时,通过光电转换器中的光电晶体管将其转换成电信号,再由运算放大器放大后送至脉冲形成网络,形成尖脉冲或者矩形脉冲。

(3) 信号输出。信号最后被送至示波器,显示出时间、电压值等信息。

3.2 光纤测速方法

光纤法测燃速的原理是通过测试燃烧药柱燃烧过程中,燃烧波阵面到达不同光纤位置的时间,从而得出两光纤之间火焰传播的速度。图 2 为测速用的密闭爆发器,装药结构和内部构造均与图 1 所示的推冲器一致。如图 3 所示,起始装药位置为零点,沿装药轴线方向建立坐标轴,在 3.5 mm 处插入标号为 1 的光纤以后每隔 6 mm 分别置入 2,3,4,5,6 号光纤,用来测试燃烧波传播到光纤所处截面的时间。

4 测试结果与分析

通过多次实验整理得到药柱燃烧过程中燃烧波阵面到达不同光纤位置的时间。相邻两光纤的距离 $\Delta S = 6 \text{ mm}$,测得的时间差为 Δt ,平均燃速 $u = \Delta S / \Delta t$ 。实验结果见表 1,图 4 是光纤信号随时间的历程图。

从表 1 中各段药柱的燃速可以看出:从点火到 15.5 mm 和 21.5 mm 处,燃速经历快速变化并趋于稳定;21.5 mm 至 27.5 mm 范围内,膜片破裂,燃速快速降低。从图 4 中可以看出在光纤信号在前三个测试点间速度变化非常大,因此在光纤 1,2 和 2,3 之间分别等间距加入光纤 1',1''和 2',2'',来研究该段药柱燃速变化的细节。试验结果见表 2。分别以轴向位置和燃速为坐标轴,将各段燃速拟合成曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,在 8.5 mm,10.5 mm,13.5 mm 和 15.5 mm 处,燃速曲线出现诸多拐点,表明推冲器内部燃速的增长率变化的规律性。由此得到此做功器件各段的燃烧特性:

(1) 平行层燃烧区

在装药 4.5 mm 处到 8.5 mm 处,该区速度-位

置曲线基本呈线性,即药柱依据平行层燃烧规律进行层状燃烧,平均燃速 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。该段燃烧的主要特征是点火药及其与烟火推进剂界面附近热量的传播是通过热传导形式完成的,燃烧比较慢,速度梯度的变化很小。

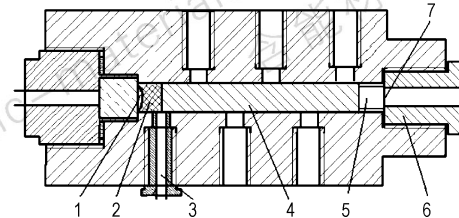


图 2 试验装置示意图

1—电火头, 2—点火药, 3—光纤, 4—烟火推进剂, 5—缓冲室, 6—堵片, 7—密封

Fig. 2 Sketch map of test

1—ignition head, 2—ignition composition, 3—fiber, 4—main charge,

5—buffer room, 6—stopper, 7—sealing element

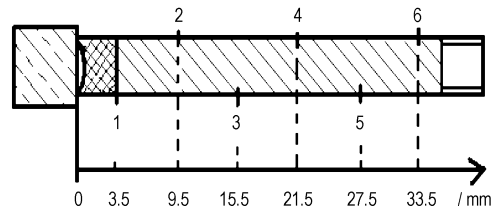


图 3 光纤位置示意图

1,2,3,4,5,6—光纤标号

Fig. 3 Sketch map of optical fibers position

1,2,3,4,5,6—optical fiber serial number

表 1 光纤测速实验结果

Table 1 The test results of burning rate

optical fiber	optical fibers position/mm	Δs /mm	Δt / μs	u / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1-2	3.5 - 9.5	6	1005	6
2-3	9.5 - 15.5	6	23	260
3-4	15.5 - 21.5	6	10	600
4-5	21.5 - 27.5	6	10	600
5-6	27.5 - 33.5	6	20	300

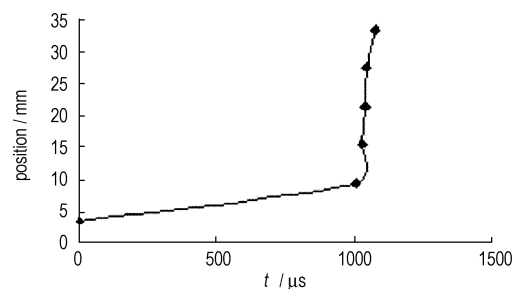


图 4 光纤信号时间-历程图

Fig. 4 Curve of position vs time of optical fibers signal

表2 小间距测速实验结果

Table 2 The test results of burning rate at short intervals

optical fiber	optical fibers position/mm	Δs /mm	$u/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			average u / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
			1#	2#	3#	
1-1'	3.5-5.5	2	3	10	5	6
1'-1"	5.5-7.5	2	35	23	35	31
1"-2	7.5-9.5	2	63	68	58	63
2-2'	9.5-11.5	2	135	144	150	143
2'-2"	11.5-13.5	2	343	296	360	333
2"-3	13.5-15.5	2	590	595	615	600
3-4	15.5-21.5	6	596	612	592	600

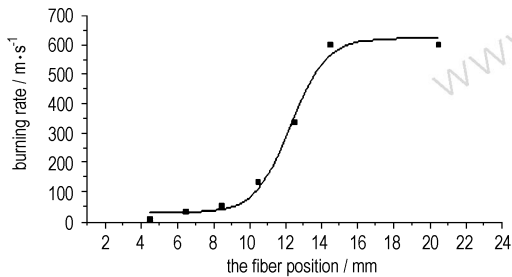


图5 位置-燃速曲线

Fig. 5 Curve of optical fibers position vs burning rate

(2) 过渡对流燃烧区

从 8.5 mm 处到 14.5 mm, 燃速变化较大, 从 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 升至 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这是由于药剂采用压成药柱的形式装填, 密度远小于最大理论密度, 药剂颗粒之间存在大量微孔, 燃烧时部分高温高压气体产物透入到孔隙中, 点燃孔隙壁, 形成对流燃烧, 瞬间燃烧面积和能量传递强度都远远超过了平行层燃烧时的状况, 因而燃速迅速增大。

可见该区域应属于非平行燃烧区或称过渡对流燃烧区, 即不稳定对流燃烧区。在这个区内, 在 10.5 mm 处曲线的斜率变化大, 是燃速曲线的第一个拐点, 标志着药剂燃烧从平行层燃烧进入对流燃烧。

(3) 稳定对流燃烧区

从 14.5 mm 到 30 mm, 该区的燃速变化不大, 保持在 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这是由于火焰前方的药柱不断形成微孔和热气流的不断渗入, 燃烧开始保持稳定, 进入高燃速稳定对流燃烧区, 燃烧机理是通过对流进行热传递。燃速曲线在 14.5 mm 处出现第二个拐点, 标志着药剂燃烧从不稳定对流燃烧进入稳定对流燃烧。

以上结果表明, 该烟火型推进剂燃烧过程具有对流燃烧的特性, 装药密度对对流燃烧影响较大, 因此测试不同装药密度下, 推冲器稳定燃烧段的燃速能指导选择装药密度。图 6 是不同密度下推冲器稳定燃烧的燃速。

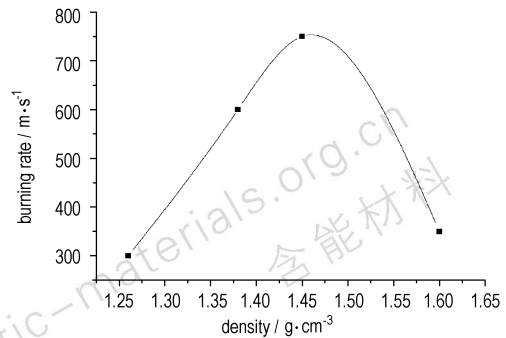


图6 密度-燃速曲线

Fig. 6 Curve of density vs burning rate

由图 6 可知, 当推进剂装填密度在 $1.26 \sim 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 燃速随密度的增大而增大, 当密度大于 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 燃速有下降的趋势。

装药密度对燃速的影响有两方面: 一方面, 由于出现对流燃烧, 燃烧加速, 气体压力迅速上升, 产生压力扰动, 压力扰动产生压缩波, 装药密度大有利于压缩波的叠加。不断叠加增强的压缩波使得热气流渗透速度加快, 从而燃烧速度不断增大, 甚至出现爆燃; 另一方面, 对流燃烧速度大的原因是由于药粒之间微孔的存在和热气流的渗透作用, 密度增大, 药剂孔隙度降低, 热气流的渗透作用减少, 燃速降低, 密度过大甚至会出现“压死”现象, 火焰无法传播而熄燃。

当密度在 $1.26 \sim 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 压缩波的叠加作用大于孔隙的影响作用, 所以燃烧速度随密度的增大而增大; 当密度大于 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以后, 孔隙的影响效果强于压缩波的作用, 因此燃烧速度随密度的增大而减少。密度在 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 能使燃烧速度达到最大。

5 结论

(1) 通过采用光纤测速法, 对烟火型短脉冲推冲做功装置的点火-燃烧速率进行测试, 结果表明, 沿药剂燃烧方向, 火焰传播速度的分布存在不同燃速特征的 3 个区域, 距点火 4.5 ~ 8.5 mm 为平行层燃烧区, 8.5 ~ 14.5 mm 处为非平行层燃烧区即过渡燃烧区, 14.5 ~ 30 mm 处为稳定对流区。

(2) 可以通过改变主装药的密度来调节推冲器的作用时间, 在本文条件下, 主装药密度为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 燃速最大, 可使推冲器作用最迅速。

参考文献:

[1] 杨荣杰. 超高燃速固体推进剂研究概况[J]. 推进技术, 1992(4):

- YANG Rong-jie. A survey of development of porous solid propellants with ultra-high burning rate [J]. *Journal of Propulsion technology*, 1992(4): 57-61.
- [2] 马玉英,郭效德,刘云志. 一种新型高燃速推进剂的燃烧性能[J]. *火炸药学报*,2004(5): 38-40.
- MA Yu-ying, GUO Xiao-de, LIU Yun-zhi. Burning properties of a new kind of high-burning rate propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004(5): 38-40.
- [3] 依云峰,桑秉诚. 用激光燃速仪测量固体推进剂的燃烧特性[J]. *兵工学报*,1990(11): 83-87.
- YI Yun-feng, SANG Bing-cheng. Measurement of the burning properties of solid propellants using laser servo-controlled strand window bomb [J]. *Acta Armamentarii*, 1990(4): 83-87.
- [4] 李明明,李国新. 光纤在燃速及爆速测试中的应用[J]. *火工品*, 2000(3): 13-16.
- LI Ming-ming, LI Guo-xin. Application of optical fibers for measuring combustion and detonation velocities [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2000(3): 13-16.
- [5] 杨庆,汪佩兰,金建峰. 常规弹药弹道修正用推冲器的国内外研究概况[J]. *含能材料*,2008,16(4): 474-479.
- YANG Qing, WANG Pei-lan, JIN Jian-feng. Review on impulse thruster used for trajectory correction of conventional munitions in domestic and abroad [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008,16(4): 474-479.
- [6] 阳建红,徐景龙,刘朝丰,等. 硝酸推进剂燃烧性能研究[J]. *上海航天*,2004(1): 48-51.
- YANG Jian-hong, XU Jing-long, LIU Chao-feng, et al. A study of combustion characteristics of nitramine propellants [J]. *Aerospace Shanghai*, 2004(1): 48-51.
- [7] 盛涤伦,马风娥. 苦味酸钾的合成、性能及其应用[J]. *含能材料*, 2004,12(2): 93-96.
- SHENG Di-lun, MA Feng-e. Preparation, properties and applications of potassium picrate [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004,12(2): 93-96.

Combustion Characteristics of Thruster with High Burning Rate Pyrotechnics

LIU Ling, LI Guo-xin, JIANG Xin-guang, LAO Yun-liang

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

Abstract: In order to study the regulation of burning rate and combustion characteristics in high burning rate work device, and ensure the thrust output stability of the device, a burning rate test by optical fiber was introduced and the ignition-combustion rate of pyrotechnic short-pulse propelling work device was tested. Results show that the combustion process has a non-parallel layer burning characteristic, and the distributions of burning rate exist in three different diagnostic burning zones (the parallel layer combustion zone, the transition combustion zone and the stable convection zone) along the burning direction, the stable burning rate of the propelling device reaches the maximum when the charge density is $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Key words: explosive mechanics; burning rate; pyrotechnic propellant; optical fiber; combustion characteristic