

发射药颗粒床中对流燃烧的实验研究

国防科学技术大学 杨涛** 南京理工大学 金志明

【摘要】 设计了耐压值为 100MPa 的半密闭爆发器,研究了单基发射药颗粒床中的点、传火过程和压力波动现象,考察了实验参数(推进剂特性、空隙率、剪切片厚度等)对多孔床中对流燃烧特性的影响。实验观察到一维压力波的传播与反射;火焰传播过程中药床存在动态压缩现象,这是形成压力波的主要因素;在低的装填密度下,药床中未形成一维燃烧波。

主题词: 推进剂燃烧 压力波 内弹道实验 燃烧转爆轰

分类号: V512

1 实验装置

目前,对多孔透气性超高燃速推进剂的燃烧机理还没有完全认识,对其燃烧稳定性,燃烧转爆轰和安全性问题需要展开研究^[1]。A. C. Alkidas^[2]以枪炮推进系统为背景,对火药颗粒床中的点传火及压力波传播进行了实验研究,证实了一维压力波的存在,但实验中没有测量火焰峰的传播。

本文设计了耐压值为 100MPa 的半密闭爆发器装置,除了压力测量,还测量火焰阵面的传播。用该装置,对多-45 和 3/1 两种发射药所形成的多孔药床中的对流燃烧进行了研究。并考察各种因素对药床点、传火和压力波动特性的影响。

图 1 为半密闭爆发器,整个实验装置由点火系统、半密闭爆发器本体、装药、泄压系统、测试系统组成。点火系统由直流点火电源、点火塞和点火药包组成。点火药用 2[#] 烘干的硝化棉粉,按 10MPa 的点火压力计算的点火药量为 1 克。本体是由高强度炮钢制成的厚壁圆筒,经过高压自紧装置自紧,

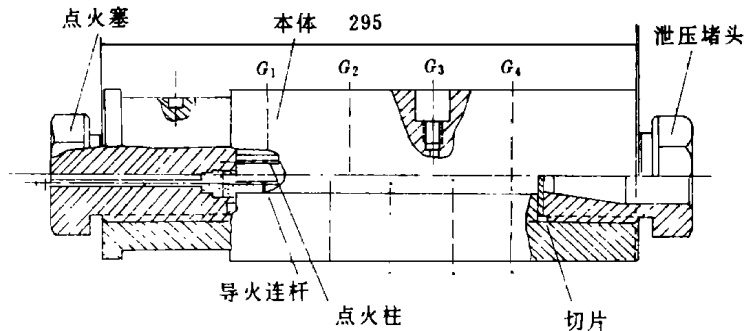
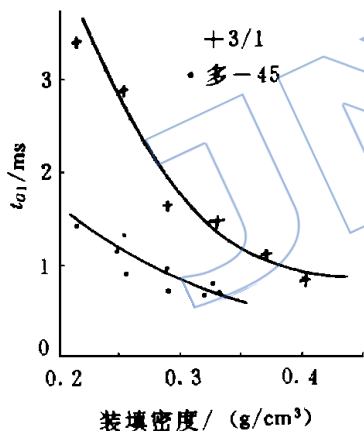
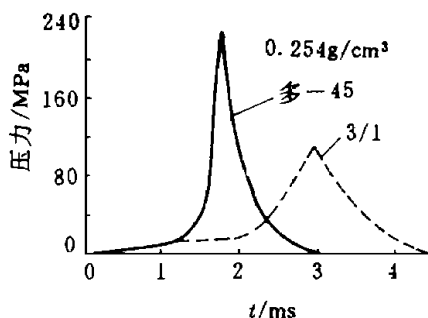


图 1 半密闭爆发器

耐压值为 100MPa 以上。本体外径为 90mm,内径为 20mm,药室长度为 167mm。本体壁面开有 4 个测压孔,5 个测速孔,为使开孔不影响壳体强度,5 个测速孔的第 1、3、5 孔位于同一直线,第 2、4 孔位于同一直线,测压孔和两组测速孔互成 120°角,装药为多-45(当量直径为

向燃烧室终端的剪切片处移动。从图 2 看出, 在 C 点 G_4 压力快速增加以前, G_1 、 G_2 和 G_3 的压力增加缓慢, 而 G_4 的压力几乎在点火峰到达的同时便开始迅速增加, 说明大量火药在 G_3 和 G_4 之间被点燃, 压力波几乎和点火峰同时到达 G_4 处。从 G_4 的压力梯度看出, 压力波在 G_4 处强度很大, 已具有冲击波的性质。这说明点火气流使颗粒床产生严重的动态压缩, 将原先位于点火塞端的火药压缩到剪切片一端, 大致位于 G_3 和剪切片之间。(3) 每个传感器的压力快速增加点依照从 G_4 到 G_1 的次序, 见图中 C 、 D 、 E 、 F 点。说明有一道压力波由 G_4 向 G_1 方向回传, 记录下压力快速上升点的时间 $t_{0,G1} = 0.9\text{ms}$, $t_{0,G2} = 0.84\text{ms}$, $t_{0,G3} = 0.79\text{ms}$, $t_{0,G4} = 0.75\text{ms}$ 。因传感器之间的距离为 45mm , 由此可算得反射压力波的传播速度, 在 G_4 和 G_3 之间, 传播速度为 $1.125\text{mm}/\mu\text{s}$, 在 G_3 和 G_2 之间, 为 $0.9\text{mm}/\mu\text{s}$, 在 G_2 和 G_1 之间, 为 $0.75\text{mm}/\mu\text{s}$, 由于壁面摩擦作用和热损失, 使得反射压力波的速度不断下降, 强度不断减弱。(4) 剪切片打开后, 膨胀波由 G_4 传向 G_1 , 见图 2 中的 G 、 H 、 I 、 J 点, 对应于各点的时间分别为 0.77ms 、 0.81ms 、 0.86ms 和 0.92ms , 由此推算出膨胀波从 G_4 到 G_1 之间的传播速度与压力波的传播速度相同, 膨胀波所到之处压力迅速下降。(5) 在 G_2 、 G_3 的压力曲线上, 有两个明显的峰。 G_2 上的二次压力峰 K 点在 G_1 的压力峰 J 点之后, G_3 上的二次压力峰 L 点在 G_2 的二次压力峰之后。二次压力峰的形成是反射压力波在点火塞再反射的结果。(6) 图中曲线 M 为点火丝烧断时给出的脉冲信号, 时间为 0.98ms 。这说明点火丝并不是被点火药烧断的, 从时间上看, 似乎是反射压力波冲断了点火丝。

图 3 t_{01} 随装填密度的变化图 5 $PCT_{1,max}$ 随装填密度的变化

曾用离子探针测量高装填密度 (大于 $0.7\text{g}/\text{cm}^3$) 药床中的火焰峰传播, 测得一维对流燃烧波和稳态爆轰波^[3]。在本实验中, 用该方法测低装填密度 (小于 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$) 多孔床中的对流燃烧波。结果显示离子探针的导通时间没有规律性。以 $0.408\text{g}/\text{cm}^3$ 的 3/1 火药实验为例, 从第 1 个离子探针到第 5 个离子探针, 探针导通时间分别为 54.580ms 、 54.611ms 、 49.740ms 、 54.624ms , 记时器记录的点火丝烧断的时间 Δt 为 55.000ms 。上述数字说明, 探针在点火丝烧断前导通, 这与前面结果相同。但探针导通的先后时间没有规律, 这可做如下解释, 在低装填密度下, 药床中的孔隙率很高, 火焰在装药孔隙中的渗透燃烧特性, 使得药床中不能形成一维燃烧波, 另外, 由于点火气体的作用, 药床首先被压缩到燃烧室右端, 当这一过程进行的特征时间与点火延迟时间相当时, 大部分发射药在燃烧室下游端被点燃, 而在此之前, 药床中也未形成

很好的一维燃烧波,而点火峰很弱,很难有效的导通离子探针。这证实了 Frolov 和 Korostelev 提出的透气性药床的无维燃烧模型^[4]。

药床的装填密度和两种发射药颗粒大小、线燃速上的差异对颗粒床中的传火及压力波传播规律均有很大影响。图 3 给出了 G1 传感器达到最大压力点的时间 t_{G1} 随装填密度的变化曲线,图 4 给出第一个传感器 G1 记录的两种火药的压力的比较,这里剪切片厚度为 0.8mm,破片压力约 57.6MPa。图 5 为第一个传感器的最大压力值随装填密度的变化曲线。

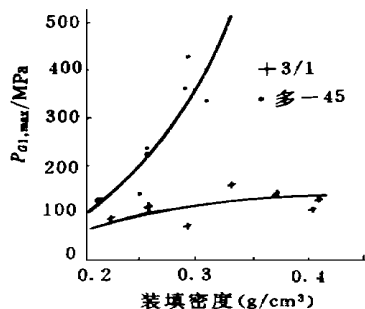


图 4 两种火药的压力的比较

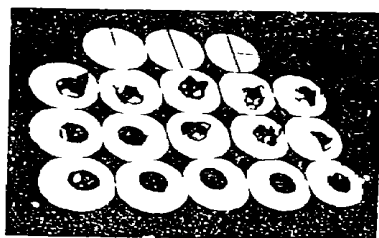


图 6 剪切片被剪切图

多-45 火药的实验结果对剪切片厚度不太敏感,3/1 的实验结果对剪切厚度相当敏感。装填密度不同,剪切片的破片情况是不一样的。图 6 给出了剪切片被剪切的照片,在较低装填密度下,剪切片沿十字形槽“吹”成喇叭形口,在高装填密度时,剪切片沿周向被剪断。

3 结 论

实验显示了约束条件下多孔药床中瞬变和对流燃烧的重要特征: (1) 压力波的最主要特点是: 沿着燃烧室方向, 传感器压力依次上升; 下游传感器的压力依次超过上游传感器的压力。说明跟随点火峰之后有一右传的压力波; 在剪切片破片之前, 有一反射压力波向上游传播; 剪切片破片之后, 有一膨胀波跟随压力波向上游传播; 第一次反射压力波在左固壁面反射形成第二道反射压力波, 向右运动, 最后由喷口传出。 (2) 高孔隙率药床的对流燃烧中, 未观察到一维燃烧波的传播。 (3) 药床孔隙率越小, 药粒直径越小, 燃速越高, 则点火延迟时间越短, 压力增加速率越大。

参 考 文 献

- 1 杨荣杰 超高燃速固体推进剂研究概况 推进技术, 1992, (4): 57- 61
- 2 Alkidas A C, et al Experimental Study of Pressure Wave Propagation in Granular Propellant Bed AIAA J., 1976, 14(6): 789
- 3 杨涛, 金志明 The Experimental and Theoretical Study of Deflagration to Detonation Transition (DDT) in Granular Gun Propellants 14th Int Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Coimbra Portugal, 1-6 August, 1993
- 4 Frolov Yu V and Korostelev V G Combustion of Gas-Pervious Porous Systems Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1989, 14: 140- 149

(责任编辑 杨再荣)

ty under bending load is obtained from researching the event. Two new random variables K_w and D_w are proposed to describe the random event of bending fatigue failure of the gear. K_w is the fatigue damage strength which indicates the inherent ability of the gear to resist the fatigue damage under bending load. D_w is the overall fatigue damage quantity which indicates the fatigue damage degree of the gear under bending load in the life span. A cumulative fatigue damage probabilistic model of the gear fatigue strength estimation under bending load is established by means of K_w and D_w . Based on the model, a predicting method is provided for the gear bending fatigue reliability.

Key words Gears Rotational bending fatigue Computational methods Reliability

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON CONVECTIVE BURNING IN A BED OF GRANULAR PROPELLANT BED

Yang Tao

(1th Dept., National University of Defense Technology, Changsha 410078)

Jin Zhiming

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210016)

ABSTRACT A semi-closed bomb with 100 MPa pressure limits was designed to investigate the ignition transient, flame spreading, and pressure wave propagation in a packed bed of granular propellant charge. The influences of parameters such as propellant properties, porosity, and blow-out diaphragm thickness on the convective burning characteristics were examined. The 1-D pressure wave propagation was observed in the experiment. The dynamic impaction of the bed exists during the flame spreading process, which is a main factor to cause the pressure wave. The 1-D combustion wave can not be formed in the bed with low loading density.

Key words Propellant combustion Pressure waves Internal ballistic tests
Combustion stability

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON FULL COVERAGE DISCRETE HOLE FILM COOLING

Wu Weineng

(Aero-gas Turbine Establishment)

Zhang Qingfan and Li Yafeng

(2nd Dept., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT A heat shield with full coverage discrete hole film cooling has practical application in some afterburners. Effects of geometric parameters and flow parameters of the heat shield on effectiveness of film cooling were investigated experimentally. A convective heat transfer coefficient of the film cooling was defined as $h_g = q_c / (T_g - T_w)$, where q_c is heat flux obtained by solving heat balance equation for the tested plate with discrete holes, and T_g and T_w are gas temperature and tested plate wall temperature, respectively. A semiempirical expression for calculating heat transfer coefficient is provided for a given diameter of the discrete holes and their distribution. It might be useful to calculating heat shield temperature.

Key words Air film cooling blades Cooling Experiment Combustion chambers

MULTI-HOLE COOLING TECHNOLOGY ANALYSES

Meng Xiangtai and Liu Gaoen

(4th Dept., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT This paper is to analyse the advantage of the multi-hole cooling technology. The calculation showed that the combustor liner temperature with multi-hole cooling technology would be 150K to 200K less than the wall temperature with film cooling technology, and the tem