

装填密度对高能推进剂燃烧 转爆轰特性的影响

贾祥瑞

(北京应用物理与计算数学研究所, 计算物理实验室, 北京 100088)

池军智 黄风雷

(北京理工大学机电工程系, 北京 100081)

浣石

(国防科技大学科研部, 长沙 410003)

摘要 建立燃烧转爆轰(DDT)实验系统,对高能推进剂多孔床DDT过程的宏观参数进行了测量,得到了其速度增长规律、诱导爆轰距离、爆轰速度和爆轰压力。实验表明,在一定范围内,装填密度与诱导爆轰距离呈“U”型曲线关系,装填密度与爆速呈线性增长关系,从理论上对实验结果作了定性分析。

关键词 推进剂 燃烧转爆轰 对流燃烧

1 引言

高能固体推进剂具有很高的能量比冲和优良的综合性能。由于推进剂中奥克托今(HMX)含量高达50%左右,因此其安全性备受关注,特别是燃烧转爆轰的危险程度更是人们关注的焦点^[1]。本实验设计了高强度厚壁钢管,建立了速度和压力测试系统。测量了不同装填密度下DDT的宏观参量,确定了装填密度对DDT特性的影响。

2 实验

2.1 实验装置

实验装置包括DDT管、点火具和多孔颗粒床三部分。研究推进剂的DDT过程,必须在密闭容器中进行。实验中采用高强度厚壁钢管,管体材料为45#钢,内径为15mm,外径为48mm,药床长度为372mm,其两端用钢螺密封。

点火具由钢外壳、电热丝和点火药组成。点火药由双基推进剂、氯酸钾(KClO₃)、硫氰酸铅[Pb(CNS)₂]和铬酸铅(PbCrO₄)组成,其质量配比为50/25/23.5/1.5,重量为450mg。点火具和药床紧密接触。

制造某一密度药床时,为了保证药床各处密度均匀,采用分次压药法,每次压入一定重量的药粒(药粒平均直径为1000μm),然后在同样压力下保压。

2.2 测试系统

a. 速度测量

速度测量采用电离探针技术^[2],用示波器记录时序信号。DDT过程初期火焰波速度低,时间间隔跨度大,因此应采用高精度大量程瞬态记录仪。实验中前四段采用美国 Tektronix 公司生产的 TDS540,后六段采用 2430A,测试系统如图 1 所示。

b. 压力测量

燃烧转爆轰过程中,压力是影响对流燃烧波速度的重要因素,因此测量流场压力,对其传播与成长规律非常重要。本实验采用锰铜压阻传感器,传感器位于药床底部,将传感器安装在有机玻璃板上,药床和有机玻璃板紧密接触,由此可测得有机玻璃板界面初始压力,换算得到爆轰波阵面压力。

如图所示,第一个探针距药床初始端面为 66mm,探针间距 25mm,沿管壁等距离分布 11 个探针(第一个网络最后一个探针与第二个网络第一个探针位于同一界面)。

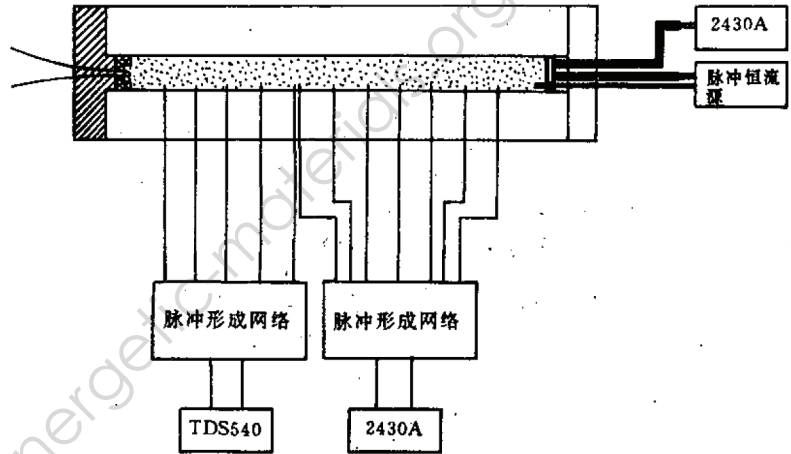


图 1 实验系统

Fig. 1 Schematic of experimental setup

3 实验结果与分析

3.1 DDT 实验结果

为了确定密度对 DDT 过程的影响,在不同装填密度下进行了实验,测试结果见表 1。结果发现,当药床装填密度在 67.1% 到 90.0% TMD 范围时,钢管在某一位置均被炸碎,在相应位置速度出现突增,这说明在该位置开始形成爆轰。图 2 为实验后回收的残管照片。我们把药床初始端面到爆轰形成位置的距离称为诱导爆轰距离,它是衡量 DDT 难易程度的重要参量。当药床装填密度为 50% 和 94% TMD 时,管子未碎,速度也未出现突变,仅维持对流燃烧,说明药床装填密度很小和很大时,都不易实现由燃烧到爆轰的转变。其中 No. 11 实验在距药床端部 256mm 处出现碎裂,而由探针记录结果看,由此位置开始出现拐点,其平均爆速仅为 $4.5\text{mm}/\mu\text{s}$,尚未形成稳态爆轰。图 3 为 No. 3~No. 10 稳态爆速与装填密度的关系,可见装填密度在 67.1%~88.7% TMD 范围内,其爆速与装填密度呈线性关系。图 4 为诱导爆轰距离 (PCL) 与装填密度之间的关系,在该密度范围内,随着装填密度的增加,诱导距离减小,在约 80.0% TMD 时诱导爆轰距离最小,随后随着装填密度的增加,诱导爆轰距离也将增加,诱导爆轰距离与装填密度呈“U”型曲线。

用测压系统分别对 No. 4, No. 7 和 No. 8 号实验的尾部压力进行了测量,得到了爆轰

波阵面压力, 测量结果见表 2, No. 7 和 No. 8 实验条件相同, 实验测得的压力, 爆速和诱导爆轰距离等特征参数也很相近, 图 5 为典型压力波形。

表 1 DDT 特性实验结果

Table 1 DDT experimental results

No.	药床装填密度 (%TMD)	实验后管子状况	诱导爆轰距离 (mm)	平均爆速 (km/s)
1	50.0	未碎裂	>320	
2	50.0	未碎裂	>320	
3	67.1	碎裂	219	4.5
4	73.6	碎裂	186	5.1
5	75.0	碎裂	180	5.0
6	82.0	碎裂	177	6.1
7	83.5	碎裂	182	6.2
8	83.5	碎裂	176	6.1
9	84.5	碎裂	181	6.2
10	88.7	碎裂	190	6.5
11	90.0	碎裂	256	4.5
12	94.0	未碎裂	>320	
13	94.0	未碎裂	>320	

表 2 爆轰波阵面压力

Table 2 Detonation wave pressure

No.	信号电压/(mV)	爆轰波阵面压力/(GPa)
4	276	11.2
7	332	16.2
8	342	16.5



图 2 实验残管照片

Fig. 2 Radiograph of the broken tube

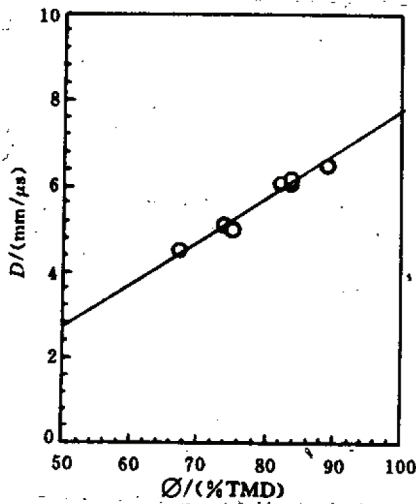


图3 爆速与装填密度的关系

Fig. 3 Detonation velocity vs. density

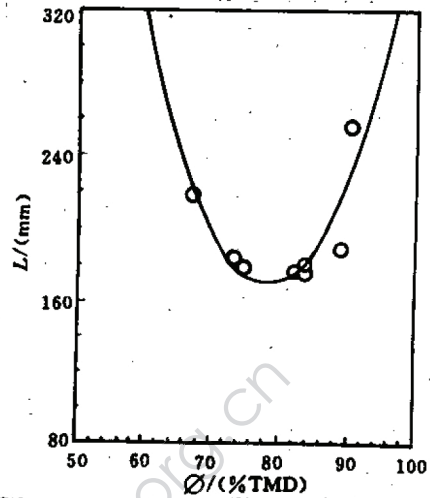


图4 诱导爆轰距离与装填密度之间的关系

Fig. 4 Predetonation column length vs. density

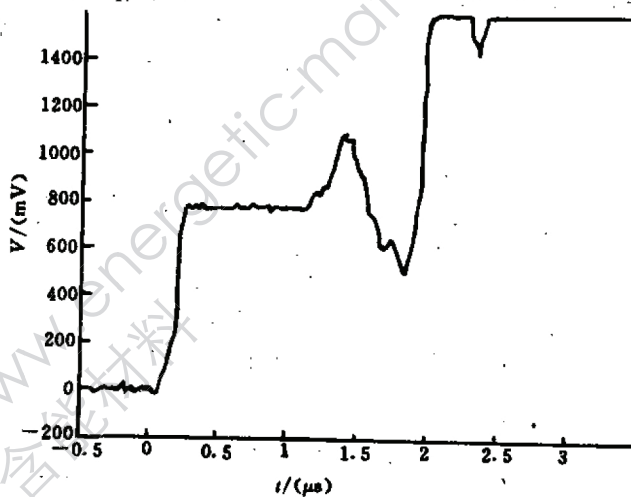


图5 压力波形

Fig. 5 Profile of detonation wave

3.2 实验结果分析

装填密度与起爆过程中热点温度密切相关,对燃烧过程质量燃耗率也有很大影响。多孔床冲击起爆过程是十分复杂的过程,形成热点的机理也不同,为了简化,采用平均弹塑性空穴闭合模型可推导出热点温度^[3]。

$$T = \frac{1}{2\rho_0 c_v} (\rho + \rho_0) (\alpha - \alpha_0) \quad (1)$$

式中, $\rho_0 = \frac{2}{3} Y \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1}$; $\alpha = 1/\Phi$; Y 为介质的屈服强度; c_v 为质量定容热容; ρ_0 为基体的

密度; p_0 为初始压力; p 为终态压力; α 为受压后的空隙度; α_0 为初始空隙度; Φ 为装填密度。由多孔材料 Hugoniot 曲线可知, 不同空隙度材料, 冲击绝热压缩到相同的比容 (α 相同), 介质越疏松 (α_0 值越大), 其终态压力值 p 越大; 由 (1) 式可见, α_0 越大形成热点温度越高, 因而越易起爆, DDT 过程诱导距离相应就越短。这对应于“U”型曲线的右半支, 可见随空隙度增加其诱导距离不断减小。

但是另一方面, 药床的空隙率是影响燃烧区中质量燃耗率的重要因素, 对多孔床, 质量燃耗率 $m = n_p r_b s_p \rho_0$, 式中, n_p 为单位体积内的药粒数; r_b 为线性燃烧速率; s_p 为药粒表面积。

若药床空隙率增大, 单位容积内药粒数将减小, 致使燃烧区内质量燃耗率减小, 产生的能量及压力梯度将减小, 推迟冲击波的形成。由图 6 看出, 药床被压实到相同的比容, 初始空隙率越大, 消耗的能量越多, 即冲击波在疏松介质中更易于衰减, 可见随着空隙度的增加药床有越难起爆的趋势, 因此当药床空隙度增加到一定程度时, 若空隙度再增加, DDT 诱导爆轰距离将逐渐增加, 这对应于“U”型曲线的左半支。

由此看出, 药床空隙度增加将同时引起热点温度上升和质量燃耗率减小, 这一对矛盾综合作用的结果将使诱导爆轰距离在某一空隙度下达到最小, 即诱导爆轰距离与装填密度呈“U”型曲线关系。

4 结 论

(1) 建立了 DDT 的测压、测速实验系统, 实验证明该系统能够对 DDT 过程进行较好的测量。

(2) 用测压系统对药床尾部的压力进行了测试, 得到了某些实验的爆轰压力。

(3) 研究了装填密度对 DDT 的影响规律, 发现当装填密度很大或很小时在该实验系统均不能出现爆轰现象; 而在一定装填密度范围内, 诱导爆轰距离与装填密度呈“U”型曲线关系; 平均爆轰速度与装填密度呈线性增长关系。



图 6 不同空隙度的 Hugoniot 曲线

Fig. 6 Hugoniot curves of different voidage

感谢了徽教授、孙锦山教授和段卓平博士的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 McAfee J M, Asay B W, Cambell A W, and Ramsay J B. Deflagration to Detonation in Granular HMX. Proceedings 9th Symposium (Int.) on Detonation, 1989.
- 2 Kooker D E. Predictions for the Piston-Driven-Compaction Experiment Based on a Transient Shock Wave Model. JANAF Propulsion Systems Hazards Meeting, 1989.
- 3 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学. 北京: 国防工业出版社, 1991.

INFLUENCE OF DENSITY ON DEFLAGRATION-TO-DETONATION TRANSITION OF HIGH-ENERGY PROPELLANT

Jia Xiangrui

(The Laboratory of Computational Physics,

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088)

Chi Junzhi Huang Fenglei

(Department of Mechatronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Huan Shi

(National University of Defence Science and Technology, Changsha 410003)

ABSTRACT The deflagration-to-detonation transition (DDT) process of high-energy propellant was experimentally investigated and the velocity of flame, predetonation column length (PCL), detonation velocity and pressure were obtained. It is found that in a certain density (ρ) range, the PCL- ρ is a U-shaped curve and the detonation velocity linearly increases with the density. The experimental results are theoretically analyzed.

KEYWORDS convective combustion, deflagration-to-detonation transition, propellant.



作者简介 贾祥瑞 (Jia Xiangrui), 1964 年生于河北省新河县, 1985 年毕业于军械工程学院战斗部工程专业; 曾从事火炸药热分解和含能材料燃烧转爆轰研究, 目前做博士后研究工作。