

文章编号: 1001-1455(2000)04-0296-07

多孔和铸装高能推进剂的燃烧转爆轰^{*}

张泰华¹, 白以龙¹, 王世英², 刘培德²

(1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080;

2. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究多孔和铸装高能推进剂的危险性能, 设计加工了燃烧转爆轰的实验装置, 并建立了以光电管为主的测试系统。经实验发现, 多孔装药在燃烧向爆轰的转变过程中有冲击波/爆轰波的回传现象, 而铸装药则没有。

关键词: 高能推进剂; 多孔装药; 铸装药; 燃烧转爆轰

中图分类号: O381 **文献标识码:** A

1 引 言

随着现代武器性能的提高和发展, 对作为其发射能源的固体推进剂提出新的要求。(1) 为提高导弹的射程, 在推进剂配方中大量添加高能炸药, 如奥克托今(HMX)、黑索今(RDX)等; 同时采用铸装工艺, 提高装药密度。NEPE 推进剂配方中的固相含量已达 80% 左右, 其中高能炸药 HMX/RDX 的含量多达 40%~50%, 有的甚至更高。而 HMX/RDX 本身就具有较高的机械敏感度和冲击波敏感度。(2) 为满足高速拦截导弹、高速动能弹和火炮随行装药等能瞬间产生大推力、高初速的要求, 需大幅度提高推进剂的燃烧速度, 要求燃速达到 1m/s 以上, 有的甚至超过 10²m/s, 而常规推进剂的燃速多在 10⁻³m/s。这种新型推进剂是近 20 年来才发展起来的, 通常称为微孔推进剂、透气性推进剂或超高燃速推进剂^[1]。能量和燃速的提高增加了推进剂燃烧向爆轰的转变的可能性, 大大降低了使用安全性。

燃烧转爆轰(DDT)是固体推进剂危险性能中的一项重要指标。开展 DDT 过程、规律性及机理的研究不仅具有重要理论价值, 而且对新型高能推进剂的研制、燃烧性能的控制以及安全使用等均有实际意义^[2]。

国外对凝聚态含能材料(炸药、推进剂和发射药)的燃烧转爆轰研究始于 40 年代初, 大规模、系统性的研究工作则是从 60 年代开始的。目前, 国内外实验室研究方法基本采用一种所谓 DDT 管(多为钢管, 对于易转爆的试样也有采用玻璃钢或塑料管的)。主要采用光纤^[3]、电离探针^[3]、高速摄影法^[4]等测其燃烧波速度和形成的爆轰速度, 采用盖帽探针^[3]、应变片^[4]和锰铜压阻计^[3]等测压力波和冲击波形成情况, 利用 X 射线摄影技术等测未反应装药中预压缩情况等^[3]。研究内容主要集中在 DDT 的形成机理及其影响因素(点火方法和强度、装药密度、限制条件、添加剂、试样的热化学反应和动力学特征等)。

本文中, 我们针对 NEPE 推进剂的多孔(用颗粒装药模拟)和浇铸两种装药形式, 设计加工

* 收稿日期: 1999-10-26; 修回日期: 2000-06-13

作者简介: 张泰华(1966—), 男, 博士, 助理研究员。

了DDT实验装置,并建立了光电管和应变片配合使用的测试系统,旨在研究两种装药的DDT形成过程、机理和危险效应,为其配方研制和危险性评估提供参考依据。

2 实验

2.1 实验装置

用 $\phi 65\text{mm}$ 的45#钢棒加工成内径20mm、外径64mm、长500mm的DDT管。为用光电管测燃烧波走时,需在DDT管上钻测时孔,孔为台阶孔,孔径分别为 $\phi 2.2\text{mm}$ 和 $\phi 1.5\text{mm}$ 。为保证DDT管耐压强度,孔分三排钻,每排4个,间距105mm,三排孔沿环向相错 90° ,三排孔的第一孔离点火端壁分别相距70mm、105mm、140mm,以保证沿轴向相邻两孔间距为35mm。为有效密封高压燃气,点火端螺栓(前螺栓)的螺纹长40mm,后螺栓螺纹长30mm。实验时,涂上环氧树脂,再分别拧到管子的两端。根据钢管耐压试验结果^[5],估计钢管的耐压值为1.3GPa左右。

2.2 测试系统

选用光电三极管测量燃烧波的光信号,应变片测量压缩波或冲击波的压力信号,用两台TDS544A瞬态示波器记录信号。实验时,光电管外表面涂上环氧树脂,再分别插到DDT管的测时孔内;应变片粘在相应测时孔圆周的管壁上。光电管和应变片的具体参数:(1)光电三极管的型号为3DU2D,最高工作电压30V,暗电流0.2 μA ,光电流21.0mA,光电响应时间3.0 μs ,外径 $\phi 2\text{mm}$ 。(2)应变片是航空工业总公司中原电测仪器厂应变计分厂生产的BH350-4AA应变片,敏感栅尺寸4.0mm \times 2.6mm,基底尺寸8.4mm \times 4.2mm。

2.3 装药

多孔装药是用切片机将NEPE推进剂试样切成5mm \times 5mm \times 5mm的颗粒,然后将150g药粒自然装填到DDT管中,药床总长420mm,相对装填密度为60%(TMD为理论最大密度,相对装填密度=实际装填密度/理论最大密度)。

铸装药在浇铸前,为减轻对管壁的烧蚀和防止蹿火,先用硝基布漆(一种暗红色粘稠液体)均匀涂覆在清洗好的DDT管内,烘干后形成包覆层。把DDT管后螺栓拧上,放置于真空柜中,把预先准备好的药浆注入DDT管中的预定高度,然后放置于固化坑中高温固化7天。相对装填密度可达98%以上。

用市售点火头点燃1.5g粉末状硝化棉(被点火螺栓压紧后的厚度为5mm),然后再点燃NEPE试样。

3 实验结果及分析

由于两台TDS544A只能记录8路信号,实验分别采用两种测试方法进行:第一种是4个应变片和4个或4个以上光电管配合使用,主要研究DDT的形成机理;第二种安装8个光电管,主要研究DDT的形成能力。

实验时,用加在点火头上的直流电压触发示波器,图1至图3中零点对应于加电压的瞬间。光电管和应变片信号曲线中的图例数字为它们在药床上的对应位置。应变片曲线和光电管曲线基准电压均为零,为便于比较,进行平移。应变片曲线的拐点为压缩波或冲击波到达时刻,光电管曲线的拐点为燃烧波火焰阵面的到达时刻。在表1至表4中,平均速度=孔间间距/时间间隔。

3.1 多孔装药

在点火阶段,硝化棉燃烧时会产生大量高温气体产物。在厚壁钢管的限制下,气体产物将多孔药床沿轴向预压缩,同时点燃药床,然后再进入对流燃烧阶段。在整个药床燃烧过程中,该阶段所需时间较长。从图1(a)和图2(a)的第1条光电信号测量可知,大致需10ms。由于药床中存在大量空隙,燃烧气体产物向未反应药床中渗透并传递热量,使之加热并点燃,在光电信号上表现为图1(a)和图2(a)第一条曲线上升缓慢。这时,燃速增加较快,燃烧区压力不断升高,药床被产生的压缩波进一步压实。若压力增加得足够强、足够快,在燃烧波阵面处的压力梯度将会变得相当陡峭,加速的对流燃烧将转变为压缩燃烧(第5孔之后)。在压缩燃烧阶段,药床不再由对流加热,而是直接通过压缩波的作用在孔隙中形成热点,这时燃烧阵面变薄,光电信号曲线上升变得陡峭。在燃烧表面积变小和压力增大两因素的共同影响下,燃速增加变得缓慢。随着压缩波的不断汇聚,形成不断加强的冲击波。当冲击波达到一定强度时,在孔隙处就会形成大量高温热点,最终在第11孔附近形成低速爆轰,低速爆轰波同时向前和向后传播,见表1数据。第11孔和第12孔之间燃速的降低,与DDT管的膨胀破碎有关。从上可看出,从对流燃烧的开始到爆轰的形成仅需1ms左右。

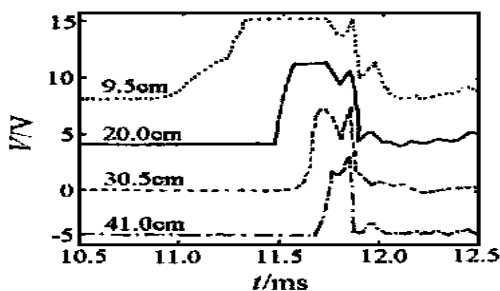


图1(a) No.1实验的光电管测量曲线

Fig. 1(a) The optoelectronic triode curves for test No. 1

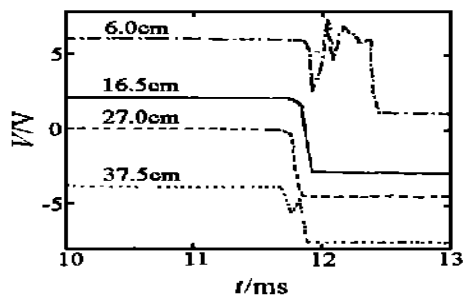


图1(b) No.1实验的应变片测量曲线

Fig. 1(b) The strain gauge curves for test No. 1

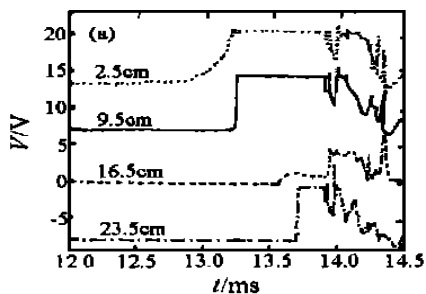


图2 No.3实验的光电管测量曲线

Fig. 2 The optoelectronic triode curves for test No. 3

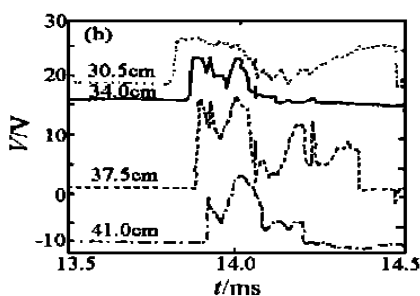


表 1 No. 1 实验的测量结果

Table 1 Results of test No. 1

测试方法	孔号	药床位置/cm	时间/ms	孔间间距/cm	时间间隔/ms	平均速度/(km/s)
光电管	3	9.5	10.92	10.5	0.56	0.19
	6	20.0	11.48			
	9	30.5	11.60			
	12	41.0	11.68			
应变片	2	6.0	11.88	10.5	- 0.04	- 2.60
	5	16.5	11.84			
	8	27.0	11.76			
	11	37.5	11.68			

表 2 No. 3 实验的光电管测量结果

Table 2 Results from optoelectronic triodes of test No. 3

孔号	药床位置/cm	时间/ms	孔间间距/cm	时间间隔/ms	平均速度/(km/s)
1	2.5	12.468	7.0	0.748	0.09
3	9.5	13.216		0.348	0.20
5	16.5	13.564		0.130	0.54
7	23.5	13.694		0.108	0.65
9	30.5	13.802		3.5	0.042
10	34.0	13.844	3.5	0.032	1.09
11	37.5	13.876		0.038	0.92
12	41.0	13.914			

3.2 铸装药

在点火阶段,硝化棉燃烧时会产生大量高温气体产物。由于药床密度(98 %TMD 以上)很大和厚壁钢管的限制,气体产物很难将药床沿轴向预压缩。点燃后的药床先进行传导性的层流燃烧,在光电信号上表现为图 3(a)第 1、2 条曲线(第 1 孔和第 3 孔)上升缓慢。在 No. 8 实验中,从第 4 孔开始,应变片比光电管响应要早,说明压缩波在燃烧波之前传播,见表 3。随着压力的增高,药床可能发生破碎,然后再进入对流燃烧阶段,在光电信号上表现为图 3(a)第 3、4

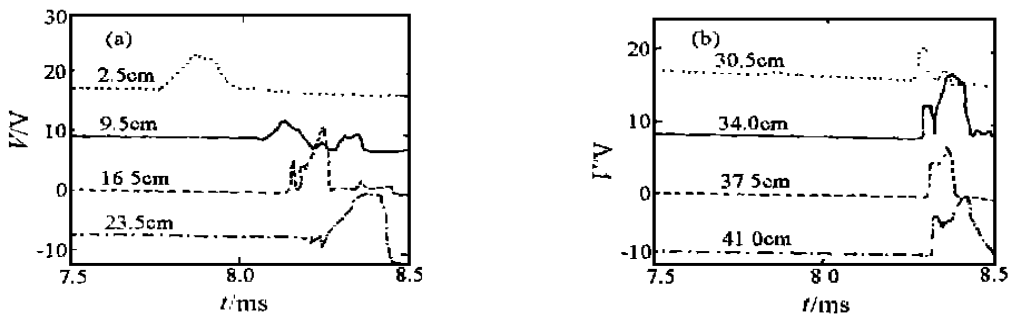


图 3 No. 9 实验的光电管测量曲线

Fig. 3 The optoelectronic triode curves for test No. 9

条曲线(第 5 孔和第 7 孔)上升缓慢,且光电信号幅值变大。在对流燃烧阶段,燃速增加较快,燃烧区压力不断升高,药床被产生的压缩波进一步压实。若压力增加得足够强、足够快,在燃烧波阵面处的压力梯度将会变得相当陡峭,加速的对流燃烧将转变为压缩燃烧(第 9 孔之后)。在压缩燃烧阶段,药床通过压缩波的作用在孔隙中形成热点,这时燃烧阵面变薄,光电信号曲线上升变得陡峭,见图 3(b)和 4 条信号。在整个燃烧过程中,压力不断增大,使燃速加快。管体在第 9 孔附近(对应于压缩燃烧的起始段)膨胀,燃速又会降低,然后再加速。在药床的尾部,随着压缩波的缓慢汇聚,仅形成弱冲击波。在整个燃烧过程中,压缩波与燃烧波的传播方向相同,无多孔装药燃烧转爆轰过程中的回爆现象。

相对说来,铸装药较难发生燃烧转爆轰。一方面,药床中的空隙较少,对流燃烧较难进行;另一方面,冲击波起爆压力较高。从理论上讲,如果管体强度足够高、药床长度足够长,铸装药燃烧总会转爆轰的。在本文铸装药条件下,未发生转爆轰现象。

表 3 No. 8 实验的测量结果

Table 3 Results of test No. 8

测试方法	孔号	药床位置/cm	时间/ms	孔间间距/cm	时间间隔/ms	平均速度/(km/s)
光电管	1	2.5	8.361	10.5	0.371	0.28
	4	13.0	8.732			
	7	23.5	9.044			
	10	34.0	9.126			
应变片	1	2.5	8.384	10.5	0.306	0.34
	4	13.0	8.690			
	7	23.5	8.802			
	10	34.0	9.088			

表 4 No. 9 实验光电管测量结果

Table 4 Results from optoelectronic triodes of test No. 9

孔号	药床装置/cm	时间/ms	孔间间距/cm	时间间隔/ms	平均速度/(km/s)
1	2.5	7.760	7.0	0.292	0.24
3	9.5	8.052			
5	16.5	8.148	7.0	0.096	0.73
7	23.5	8.214			
9	30.5	8.250	7.0	0.036	1.94
10	34.0	8.277			
11	37.5	8.298	3.5	0.021	1.67
12	41.0	8.312			

4 多孔装药和铸装药实验结果的对比分析

4.1 燃烧转爆轰过程

多孔装药的燃烧转爆轰形成过程大致可分五个阶段:点火,对流燃烧,压缩燃烧,冲击波形成,转爆轰。铸装药的燃烧转爆轰形成过程大致可分六个阶段:点火,层流燃烧,对流燃烧,压缩燃烧,冲击波形成,转爆轰。多孔装药在冲击波形成后,在冲击波/低速爆轰向前和向后传播,而铸装药则没有。

4.2 点火过程

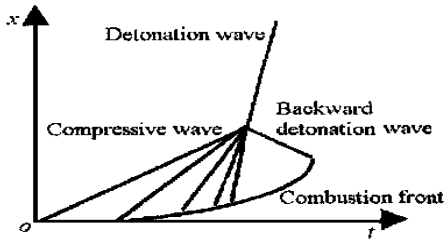


图 4(a) 多孔装药的 DDT 形成机理示意图

Fig. 4(a) DDT mechanism of porous propellants

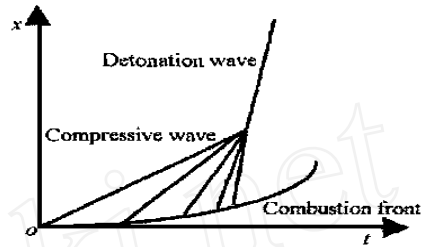


图 4(b) 铸装药的 DDT 形成机理示意图

Fig. 4(b) DDT mechanism of cast propellants

将表 1 和表 3、表 2 和表 4 比较可知,多孔装药从点火头开始点火到第一个光电管记录到信号为止,所需时间比铸装药长,即多孔装药在此条件下不易点火。

颗粒药床是自然装填的(60% TMD),孔隙较铸装药多。在点火药(硝化棉)燃烧的初始压力作用下,药床端部沿轴向被压缩,于是点火压力降低,点燃药床需较长时间。而铸装药在点火药燃烧压力作用下,由于装药密度大,点火端药床压缩较少,点火压力较高,药床易被点燃。

4.3 燃速

在等压燃烧时,燃烧表面积对燃速的影响较大。在本实验条件(密闭的瞬态变高压)下,单位体积铸装药的燃气质量生成率比颗粒装药的大,则燃烧时的环境压力即燃气压力就高。再由燃速公式 $v = ap^n$ (v 为燃速; a 为燃速系数; p 为压力; n 为压力指数,本实验条件下 n 接近于 1.0) 可知,铸装药燃速较大,见图 5。

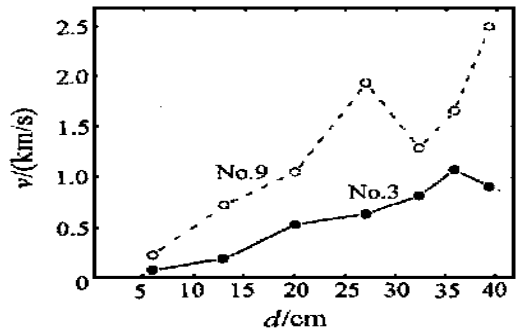


图 5 多孔装药和铸装药的燃速对比

Fig. 5 Comparison of combustion velocities for porous propellants and cast propellants

4.4 管体破碎程度

多孔装药(No. 1 和 No. 3)的 DDT 管在实验后均破裂成大小不等的碎块。图 6 上面为 No. 1 实验后的管体破碎情形(No. 3 管体破碎情形

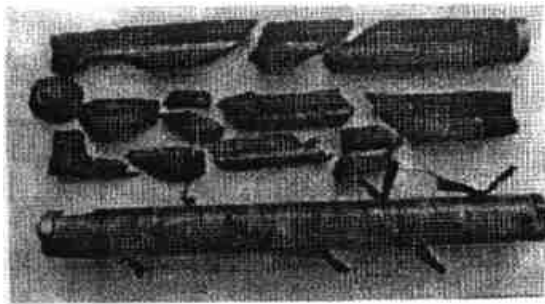


图 6 No. 1 破碎管体和 No. 3 装配好的管体

Fig. 6 The No. 1 tube broken and the No. 3 tube charged

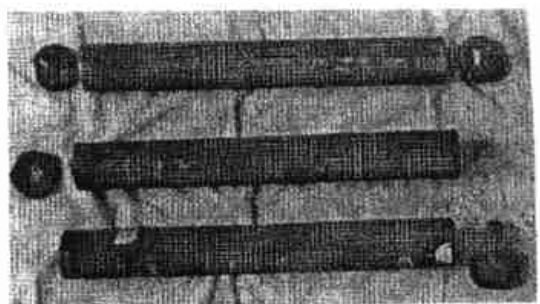


图 7 No. 8 和 No. 9 管体破坏

Fig. 7 The No. 8 tube broken and the No. 9 tube broken

与之相似),下面为装配好的 No. 3 实验的 DDT 管。铸装药 (No. 8 和 No. 9) 的 DDT 管径向膨胀处最大不超过 1mm,仅把螺栓根部拉断,管子未破裂。图 7 下面两根为 DDT 管,上面一根为未装药的空 DDT 管。

在燃烧向爆轰转变的过程中,管体承受燃气压力和压缩/冲击波压力的作用。相对而言,在多孔药床中,冲击波已形成且速度较大(2.6km/s),燃烧速度较小,所以冲击波强度大,燃气压力低;这时,管体的破碎是由强冲击波引起的。而在铸装药中,压缩波速度小,尽管燃烧速度大,压缩波强度和燃气压力仍均小于管体的强度;因此,主要是管体的螺栓被破坏。

5 结 束 语

(1) 从上述实验结果分析可知,多孔装药较铸装药易形成爆轰。多孔药床在燃烧时会形成强度较高的冲击波;同时,大量孔隙的存在,提高了药床的冲击波敏感度。较强的冲击波和对冲击波敏感是推进剂燃烧转爆轰的两个基本条件。从燃烧到爆轰的转变经历了冲击波形成阶段,转爆是由一定强度的冲击波引起的。

(2) 光电管测试技术在本实验条件下是一种理想的测试技术。它克服了电离探针因电离度低而不可靠的缺点,又克服了光纤测试线路复杂的不足,具有可靠、方便、经济等优点。

参 考 文 献 :

- [1] 王伯羲,冯增国,杨荣杰. 火药燃烧理论 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1997. 241.
- [2] 张端庆. 固体火箭推进剂 [M]. 北京:兵器工业出版社,1991. 159.
- [3] McAfee J M, Asay B W, Campbell A W, et al. Deflagration to Detonation in Granular HMX [A]. Morat W J. Proceeding of 9th Symp (Int) on Detonation [C]. Arlington Va:OCNR,1989. 265.
- [4] Price D, Bernecker R R. Studies in the Transition from Deflagration to Detonation in Granular Explosives [J]. Combustion and Flame, 1974, 22: 111—170.
- [5] 机械设计手册联合编写组. 机械设计手册·第一分册上册 [M]. 北京:化学工业出版社,1987. 564.

Deflagration-to-Detonation Transition in Porous Propellants and Cast Propellants

ZHANG Tai-hua¹, BAI Yi-long¹, WANG Shi-ying², LIU Pei-de²

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics,
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an Shanxi 710065, China)

Abstract: In order to study the burning and explosion properties of porous and cast NEPE propellants, experimental arrangements have been set up for deflagration-to-detonation transition (DDT). The results indicate that the porous propellants, during DDT, can form forward shock-waves and backward shock-waves, and the cast propellants only form forward shock-waves.

Key words: high-energy propellants; porous charges; cast charges; DDT