

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感度和冲击波感度。(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 10^2 m/s, 而常规推进剂的燃速多在 10^{-3} m/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 $\leq 0.2\mu\text{A}$,光电流 $\geq 21.0\text{mA}$,光电响应时间 $3.0\mu\text{s}$,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 $4.0\text{mm} \times 2.6\text{mm}$,基底尺寸 $8.4\text{mm} \times 4.2\text{mm}$ 。

2.3 装药

多孔装药是用切片机将 NEPE 推进剂试样切成 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 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。

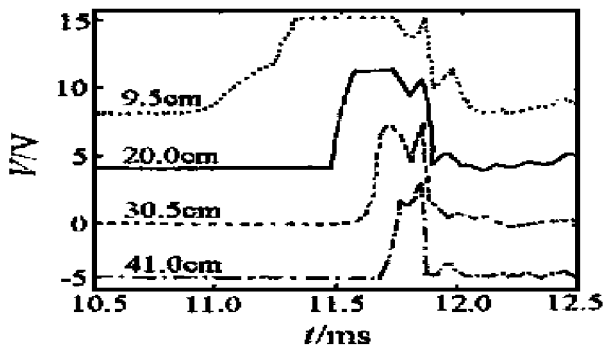


图1(a) No.1实验的光电管测量曲线

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

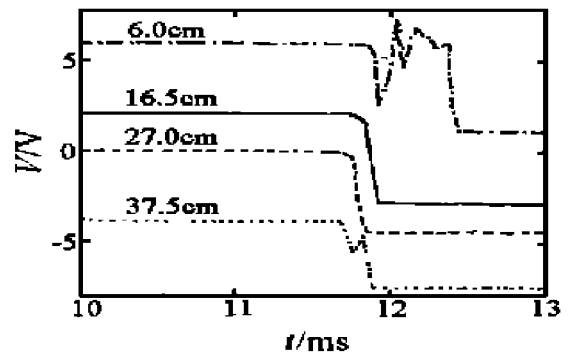


图1(b) No.1实验的应变片测量曲线

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

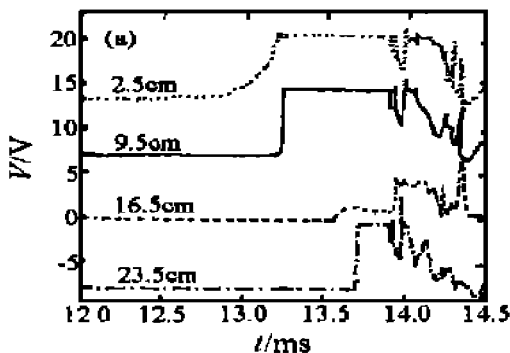


图2 No.3实验的光电管测量曲线

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

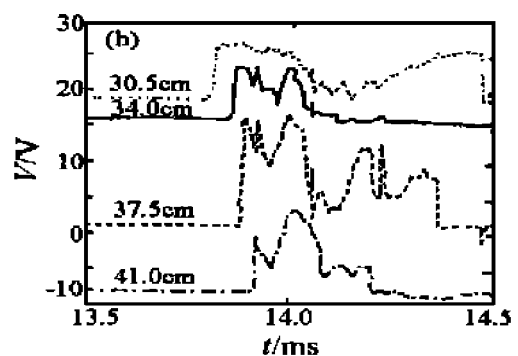


表1 No.1 实验的测量结果

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			
5	16.5	13.564	7.0	0.348	0.20
7	23.5	13.694	7.0	0.130	0.54
9	30.5	13.802	7.0	0.108	0.65
10	34.0	13.844	3.5	0.042	0.83
11	37.5	13.876	3.5	0.032	1.09
12	41.0	13.914	3.5	0.038	0.92

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

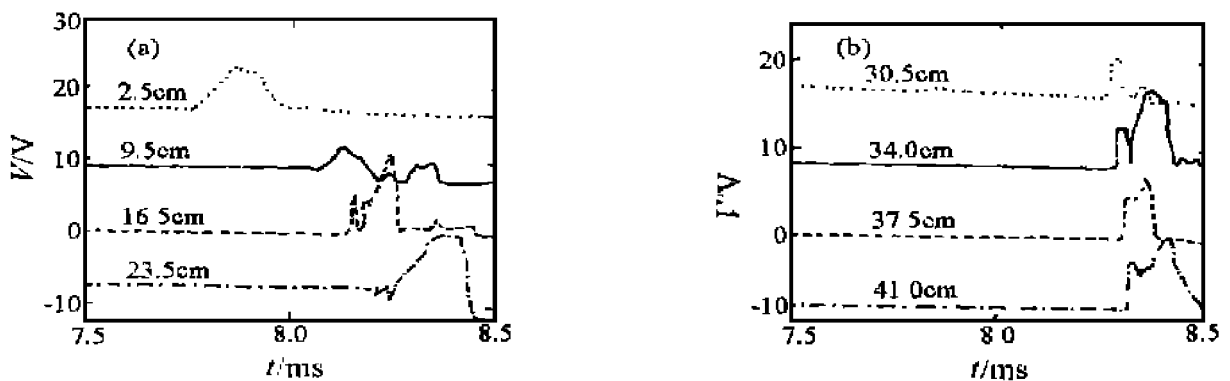


图3 No.9 实验的光电管测量曲线

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		0.096	0.73
5	16.5	8.148	7.0	0.066	1.06
7	23.5	8.214	7.0	0.036	1.94
9	30.5	8.250	3.5	0.027	1.30
10	34.0	8.277	3.5	0.021	1.67
11	37.5	8.298	3.5	0.014	2.50
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

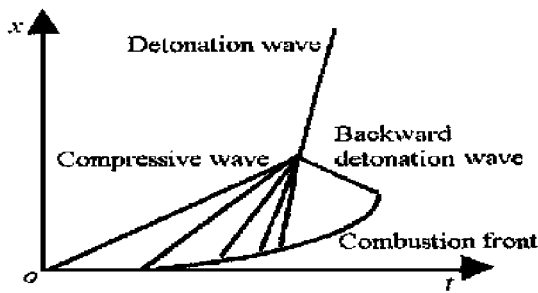


图4(a) 多孔装药的 DDT 形成机理示意图
Fig.4(a) DDT mechanism of porous propellants

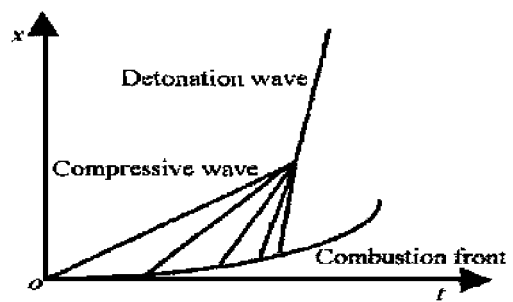


图4(b) 铸装药的 DDT 形成机理示意图
Fig.4(b) DDT mechanism of cast propellants

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。

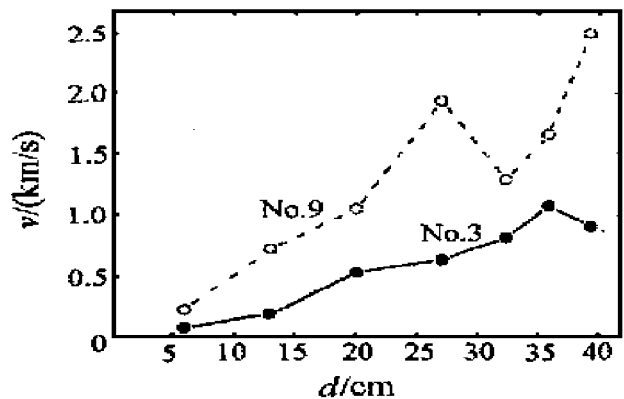


图5 多孔装药和铸装药的燃速对比
Fig.5 Comparison of combustion velocities for porous propellants and cast propellants

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

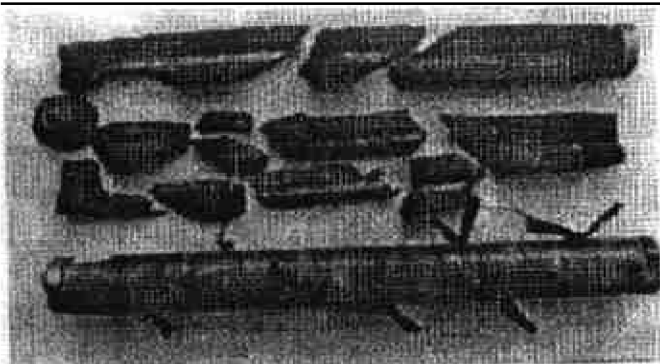


图6 No.1破碎管体和No.3装配好的管体
Fig.6 The No.1 tube broken and the No.3 tube charged

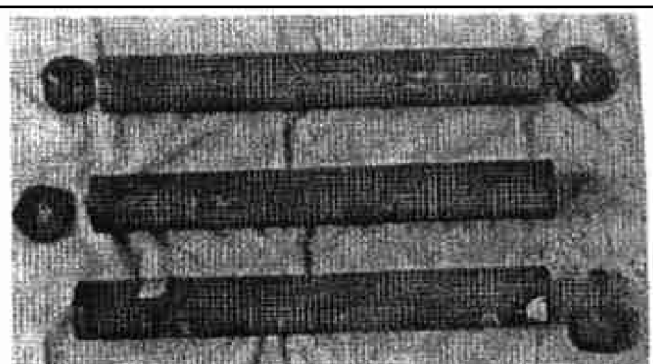


图7 No.8和No.9管体破坏
Fig.7 The No.8 tube broken and the No.9 tube broken

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