

# 粒状火药床燃烧转爆轰的研究<sup>\*</sup>

金志明 杨 涛 袁亚雄 张小兵 翁春生

(南京理工大学 南京 210014)

**摘要** 以多-45火药为研究对象,采用离子探针测速和应变片测压的技术,对强约束(钢管)条件下火药颗粒床燃烧转爆轰全过程中的火焰峰和压缩波进行了测量。提出了粒状火药燃烧转爆轰的机理。还研究了不同实验条件下火药燃烧转爆轰的敏感性。

**关键词** 燃烧 爆轰 火药 内弹道学

目前,大多数火炮的装药都采用不同几何形状的粒状火药。随着火炮性能的提高,出现长药室、高装填密度的装药结构。某些火炮的装填密度已接近 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。研制中的小颗粒密实装药,其装填密度已达 $1.1\sim 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 。实验证明,这种高装填密度火药颗粒床的装药结构容易产生压力波,甚至发生燃烧转爆轰(简称 DDT)。对膛内压力波的形成机理及抑制技术目前已进行了大量研究,但对燃烧转爆轰的危险性却未引起人们的关注。开展高装填火药颗粒床燃烧转爆轰特性的研究,对火药装药设计具有指导意义。

粒状火药和高能固体推进剂燃烧转爆轰的机理仍是个有争议的问题,其主要分歧在于对诱发爆轰的冲击波的形成解释不一致。造成这一现象的原因是对 DDT 这样一个高压、高温、高速的瞬变过程中的火焰峰和压缩波难以精确测定。R. R. Bernecker 用贴于 DDT 管外表面的应变片测得了对流燃烧前期 DDT 管内压缩波,提出了相应的 DDT 机理<sup>[1]</sup>。但实验中仅用了三个应变片,难以反应压缩波形成并发展成强冲击波的全过程,所提出的机理有待进一步验证。

本文以多-45火药为研究对象,采用厚壁无缝钢管,通过对 DDT 全过程中火焰峰和压缩波的测量,研究粒状火药燃烧转爆轰的机理及敏感性。

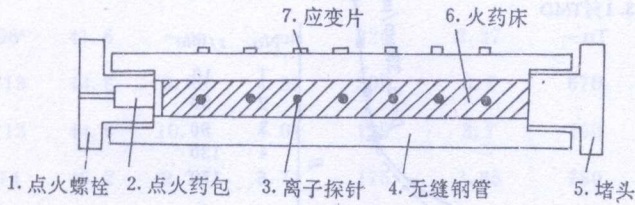
## 1 实验装置和实验结果

DDT 实验装置如图1所示。DDT 管采用  $\phi 36 \times 9$  的45号无缝钢管,耐压值为 $0.25\text{GPa}$ 。管长 $400\text{mm}$ ,装药长为 $350\text{mm}$ 。火药为多-45,其特点是颗粒小,着火迅速,线燃速高。火药床由置于点火螺栓内的点火药包点燃。沿 DDT 管轴向均匀分布有离子探针,并用六通道电子计时仪记录管内火焰峰到达离子探针的时间。在离子探针孔的相同轴向位置贴有应变片,用六通道应变仪记录管内压缩波到达应变片的时间。由于对应变片难以进行动态标定,本文直接给出应变仪输出的电压随时间的变化曲线。实验前,在 DDT 管下放置 $3\text{mm}$ 厚的铅板作为验证板。整个实验在 $25 \pm 2\text{C}$ 下进行。

国家自然科学基金资助项目。

1992年11月20日收到原稿,1993年3月12日收到修改稿。

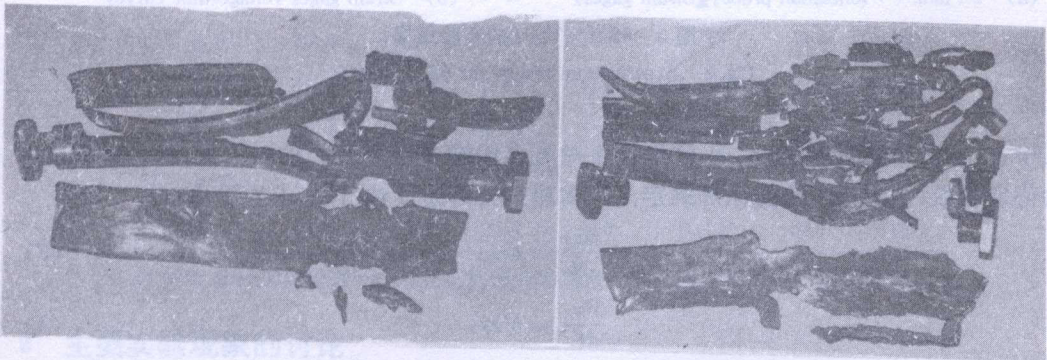
装填密度从  $0.55\text{g}/\text{cm}^3$  到  $1.21\text{g}/\text{cm}^3$  (理论最大密度从 34.4%TMD 到 75.6%TMD) 共做了十七次实验。图 2 给出了试验后回收的碎片和验证板的照片。装填密度为 34.4% TMD 时,只观察到对流燃烧,未发生爆轰。长度为 400mm 的管子仅被撕成几大块,见图 2 (a)。发生爆轰后的情况见图 2(b),从爆轰点开始,管子被炸成许多碎片,而管子前端仅被撕裂。验证板和碎片显示的爆轰点位置比较吻合。



1. Ignitor bolt; 2. Ignitor; 3. Ionization probe; 4. Seamless steel tube;  
5. Far end closure; 6. Propellant bed; 7. Strain gages

图 1 DDT 管

Fig. 1 DDT Tube



(a) 34.4%TMD; 未发生转变  
(a) 34.4%TMD; No transition

(b) 63.1%TMD; 燃烧转爆轰  
(b) 63.1%TMD; DDT

图 2 管的碎片

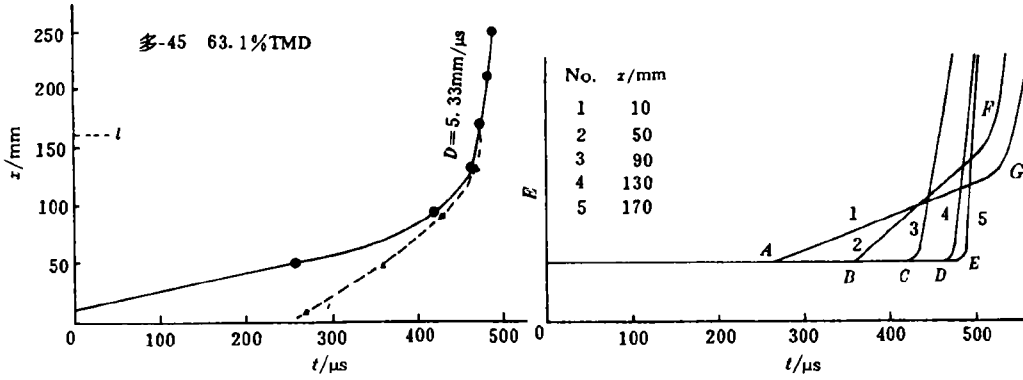
Fig. 2 Tube fragments

图 3 给出了 63.1%TMD 火药床的实验结果。图 3(a)中圆点为离子探针测得的火焰峰传播的  $x-t$  数据,图 3(b)为应变仪输出的  $E-t$  曲线。由图 3(a)可以看出,火药床的燃烧分为两个阶段,在  $475\mu\text{s}$  以前为对流燃烧阶段。在此之后为稳态爆轰阶段。对流燃烧前期,在约  $420\mu\text{s}$  的时间内,火焰峰加速缓慢,速度小于  $0.5\text{mm}/\mu\text{s}$ 。对流燃烧后期,火焰峰以指数

形式加速,最后达稳态爆轰速度  $5.33\text{mm}/\mu\text{s}$ 。若用一指数关系描述对流燃烧过程中火焰峰的传播规律,则从对流燃烧后期到稳态爆轰,火焰峰的传播可用以下公式描述。

$$x_p = ae^{bt} \quad t \leq t_* \quad (1)$$

$$x_D = F + Dt \quad t > t_* \quad (2)$$



(a)  $x-t$  数据(·离子探针;▲应变片) (b) 应变片的  $E-t$  曲线  
 (a)  $x-t$  data (· Ionization probe;▲Strain gages) (b) Strain gages voltage-time curves

图 3 63.1%TMD 的实验结果

Fig. 3 Experimental results for 63.1%TMD

式中: $t_*$ 为诱导爆轰时间, $x_p$ 、 $x_D$ 分别代表对流火焰峰和爆轰波的轴向位置, $D$ 为爆速, $a$ 、 $b$ 为待定参数,用最小二乘法原理确定。其物理意义可通过对(1)式求导看出:

$$\frac{dx_p}{dt} = bx_p \quad (3)$$

$$\frac{d^2x_p}{dt^2} = b^2x_p \quad (4)$$

由上式可以看出: $b$ 为一比例系数, $b$ 值越大,对流火焰峰的速度和加速度越大;参数  $a$  为初始时刻火焰峰的位置。表 1 列出了实验测得的对流火焰峰和爆轰波的参数值。表中  $l$  为诱导爆轰长度, $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  分别为火焰峰通过第一和第三个离子探针到发生爆轰的时间间隔,称为相对诱导爆轰时间。

由图 3(b)可见,在第一、二两个应变片的  $E-t$  曲线上,电压出现两次明显升值。第三、四、五个应变片的电压只出现了一次升值。电压的每次升值都是一次压缩波的经过, $dE/dt$  的大小代表了压缩波的强弱。显然, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  代表了一道压缩波的轨迹,即为图 3(a)中“ $\Delta$ ”符号表示的点。第一、二应变片记录的第二道压缩波( $F$ 、 $G$ 点),是爆轰波向点火区的回传。

表 1 对流火焰峰与爆轰波的参数值

Table 1 Parameters of convective flame front and detonation wave

序号	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	密度 %TMD	对流峰参数		爆轰参数			
			a	b	l /(mm)	D /(mm/μs)	Δ <sub>1</sub> /(μs)	Δ <sub>2</sub> /(μs)
1	0.55	34.4	9.25	2.14	—un	—un	—un	—un
2	0.666	41.6	—un	—un	223	3.37	705	131
3	0.666 <sup>a)</sup>	41.6	—un	—un	220	3.37	—nT	—nT
4	0.713	44.6	9.60	4.37	200	3.7	670	96
5	0.713	44.6	10.11	4.01	199	3.7	460	103
6	0.74	46.2	9.73	3.71	175	3.85	780	101
7	0.80 <sup>a)</sup>	50.0	11.8	7.36	171	4.0	368	74
8	0.84	52.5	9.74	6.13	170	4.17	468	70
9	0.881	55.1	9.3	5.75	164	4.44	466	60
10	0.881 <sup>a)</sup>	55.1	—nT	—nT	165	—nT	—nT	—nT
11	0.936	58.5	10.14	6.82	164	5.0	442	58
12	1.01	63.1	9.26	6.57	161	5.33	405	42
13	1.01 <sup>a)</sup>	63.1	10.26	5.57	162	5.33	475	54
14	1.046	65.4	10.38	7.62	158	5.46	340	40
15	1.10	68.8	10.37	9.98	151	5.72	280	38
16	1.156	72.2	10.11	8.68	157	5.92	290	42
17	1.21	75.6	9.98	8.6	166	6.14	310	48

a) DDT 管经过热处理, un 未观察到燃烧转爆轰, nT 无法进行正常的数据分析。

## 2 主要实验现象的讨论

### 2.1 装填密度对 DDT 过程的影响

#### 2.1.1 对流火焰峰与诱导爆轰时间

火药颗粒床的燃烧特点是已燃区的高温燃气能渗透到未燃火药床, 以对流形式向未燃区火药传热。对流燃烧速度比传导燃烧速度高几个数量级。图 4 给出了不同装填密度下火焰峰传播实验曲线。离子探针测出的数据显示, 对流燃烧后期, 随装填密度的变化, 对流火焰峰的传播速度可达 1.0mm/μs 到 3.0mm/μs。由表 1 可知, 从 34.4%TMD 到 68.8%TMD, b 值随装填密度的增大呈增大趋势; 从 68.8%TMD 到 75.6%TMD, b 值略有下降。对流火焰峰在 68.8%TMD 时传播速度最大。同时, 由表 1 和图 4 可以看出, 在一定范围内, b 值的变化呈现了某种随机性。我们认为, 出现这种随机性的原因主要有三个方面: 点火气流的影响; 对流燃烧的不稳定性; 选择指数形式描述对流峰传播规律带来的误差。

在对 DDT 现象的研究中, 一个重要的量是诱导爆轰时间, 即从点火激励点燃火药床到发生爆轰的时间。实验中, 没有在火药床的端面位置装置离子探针, 这一时间无法知道, 但可以用相对时间  $\Delta t_1$ 、 $\Delta t_2$  表示。 $\Delta t_1$  为火焰峰通过第一个离子探针(距药床端面 10mm)到发生爆轰的时间间隔,  $\Delta t_2$  为火焰峰通过第二个离子探针(距药床端面 90mm)到发生爆轰的时间间隔。实验表明, 随装填密度的增大, 相对诱导爆轰时间  $\Delta t_2$  呈“U”字形变化, 在 68.8%TMD 时达最小值, 见图 5。 $\Delta t_1$  的变化呈现了某种随机性。这主要是点火气流对药床前端的影响造成的。

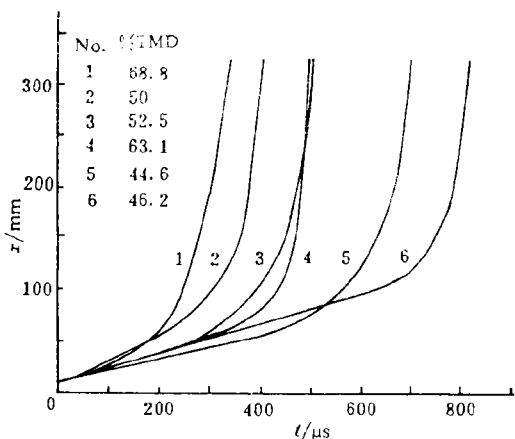


图 1 不同装填密度下的火焰峰曲线

Fig. 1 Curves of flame front for various densities

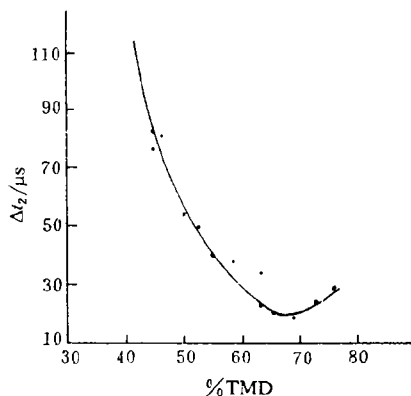


图 5 相对诱导爆轰时间随装填密度的变化曲线

Fig. 5 Curve of relative time to detonation vs. %TMD

### 2.1.2 诱导爆轰长度和爆速

从装药端面到发生爆轰点的长度称为诱导爆轰长度。实验中分别用验证板刻痕, 试验后回收的碎片, 离子探针和应变片测出的数据三种方法确定了诱导爆轰长度。三种方法测出的长度比较一致, 误差在 5mm 以内。从 41.6%TMD 到 75.6%TMD 诱导爆轰长度  $l$  随装填密度的增大呈“U”字形变化, 如图 6 所示。装填密度小于 50.0%TMD 时, 随装填密度的增加,  $l$  下降很快。在 50.0%TMD 后, 下降变得缓慢。在 68.8%TMD 时,  $l$  达最小值 151mm。这一变化规律与文献[1][2]中的结果一致, RDX/WAX 的诱导爆轰长度在 90.0%TMD 达最小值<sup>[1]</sup>。硝酸火药的诱导爆轰长度在 66.7%TMD 达最小值<sup>[2]</sup>。

对火药颗粒床, 实验表明, 稳态爆速与初始装填密度为线性关系, 见图 7。拟合的曲线满足以下关系:

$$D = -0.087 + 0.084\%TMD \quad (\text{mm}/\mu\text{s}) \quad (5)$$

### 2.1.3 “U”字形曲线的解释

已燃区压力的快速上升是燃烧转爆轰的必要条件,  $d^2p/dt^2$  越大, 诱导爆轰长度越短<sup>[1]</sup>。压力增长率的大小主要取决于以下三个因素: ① 火药、炸药能量的大小; ② 气体产物的释放速率; ③ 气体产物能量的损失率。改变火药床初始装填密度(即改变药床的透气

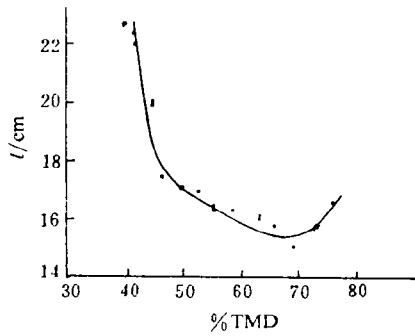


图 6 诱导爆轰长度随装填密度的变化曲线

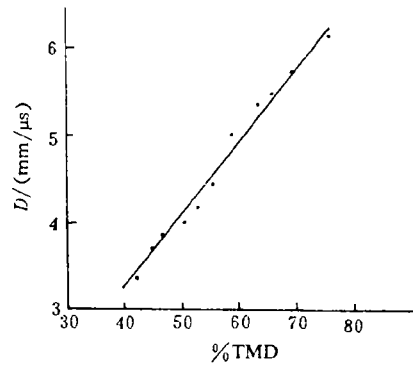


图 7 爆速随装填密度变化的曲线

Fig. 6 Predetonation length as function of compaction Fig. 7 Detonation velocities as function of compaction

性), 将影响气体产物的释放速率和气体产物能量损失率, 从而影响管内 DDT 的形成。在 100%TMD 情况下, 药床不可渗透, 药床为端面传导燃烧。气体产物的释放速率很慢, 不利于已燃区的压力快速增长, 因此难以形成爆轰。随着装填密度的降低, 一方面, 药床容易渗透, 火焰区变长, 燃烧表面积增加, 气体产物释放速率加快, 有利于形成爆轰; 另一方面, 低的装填密度使单位体积内的火药减少, 降低了气体产物的释放速率, 同时, 火焰区长度的增加, 使得已燃区的能量损失增大, 结果不利于形成爆轰。这两方面相互矛盾因素的综合作用, 使得只有在某一适当的装填密度下, DDT 最易实现。装填密度对诱导爆轰长度  $l$  的影响可用下式表示<sup>[5]</sup>

$$l = AM + \frac{B}{M} \quad (6)$$

式中:  $M = \%TMD$ ,  $A$ 、 $B$  为由实验确定的正常数, 对 (6) 式求导:

$$\frac{dl}{dM} = A - \frac{B}{M^2} \quad (7)$$

$$\frac{d^2l}{dM^2} = \frac{2B}{M^3} \quad (8)$$

令  $dl/dM$  等于零, 可见  $l$  在  $M = \sqrt{B/A}$  处取极值, 又因  $d^2l/dM^2$  恒大于零, 可见  $l \sim M$  曲线为一“U”形曲线,  $l$  在  $M = \sqrt{B/A}$  处达最小值。

## 2.2 DDT 管强度对 DDT 过程的影响

在以往的 DDT 研究中, 均未考虑 DDT 管强度对 DDT 过程的影响。当 DDT 管耐压值低于对流燃烧时的管内压力时, DDT 管在未达到正常爆轰前就被破坏。实验中对 4 根 DDT 管进行了热处理, 使其强度提高约一倍, 结果表明: 在相同装填密度下, 两种管子的诱导爆轰长度相同。这说明, 对流燃烧期间, 管内压力低于 0.25GPa, 转变过程是在很短时间内完成的。

## 2.3 多-45 火药的燃烧转爆轰机理

根据实验和分析, 多-45 火药的 DDT 过程分为以下几个阶段: 1) 火药床着火前, 高温的点火气流进入火药床, 以对流形式向火药床传热。燃气所形成的压力梯度压缩火药床,

压缩程度取决于点火具的强弱和火药床的初始装填密度。2) 对流燃烧与压缩波的形成。火药床端面火药首先被点燃,并迅速转化为对流燃烧,对流峰线性加速传播。对流燃烧使点火具附近的压力迅速增加,连续驱动压缩波进入火药床,形成一道一定强度的压缩波,速度约  $0.6\text{mm}/\mu\text{s}$ 。该压缩波与 H. W. Sandusky 和 T. P. Liddiard<sup>[3]</sup>动态压缩实验测得的压缩波相符。3) 对流/压缩燃烧。压缩波加速传播,在 90mm 处落后火焰峰约 5mm,此时,火焰峰在压缩波驱动下,以指数形式加速。加速燃烧又使压缩波进一步加强,结果火药床被压缩得非常密实<sup>[4]</sup>。气体流动被滞止,火药床内部形成热点。由热点点燃火药床,对流燃烧转为压缩燃烧。4) 冲击波转爆轰。压缩燃烧使火焰阵面的压力迅速上升,并得到燃烧区加速燃烧的支持。这时压缩波迅速转化为一道强冲击波,由燃烧转为爆轰。然后是冲击波引导的爆轰波的稳定传播。

### 3 结 论

在本实验条件下,多-45 火药床在 41.6%TMD 和 75.6%TMD 之间发生了燃烧向爆轰的转变。所观察到的转变过程为:点火气流压缩并点燃火药床;对流燃烧与压缩波的形成;对流峰的指数加速与压缩燃烧;冲击波转爆轰。诱导爆轰长度和诱导爆轰时间随装填密度的增加呈“U”字形变化,在 68.8%TMD 达最小值。点火气流会使火药床产生着火前的动态压缩并对前期对流燃烧有影响。初始装填密度越低,这种压缩和影响越大。对流燃烧期间,管内压力低于  $0.25\text{GPa}$ 。爆速和装填密度的关系为一直线。本文成功的用应变片测量了 DDT 管内压缩波的传播。这种钢管中的动态压缩现象不能用光学手段直接测量。

### 参 考 文 献

- 1 Bernecker R R, Price D. Studies in the Transition from Deflagration to Detonation in Granular Explosives- II. Combustion and Flame, 1974,22;119~127,161~170
- 2 曲作家,等. 粒状硝胺火药燃烧转爆轰的研究. 华东工学院学报,1989,(2):14~20
- 3 Sandusky H W, Liddiard T P. Dynamic Compaction of Porous Beds. AD-A164883.
- 4 Zeng Simin, Huang Xinhua, Jin Zhiming. X-Ray Detection of Phenomena in a Gun Barrel During the Firing Process. Acta Armamentarii Sinica, 1991,1(3)

## STUDIES OF DEFLAGRATION TO DETONATION TRANSITION (DDT) IN GRANULAR PROPELLANT BEDS

Jin Zhiming, Yang Tao, Yuan Yaxiong,  
Zhang Xiaobing, Guan Hanzhang

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210014)

**ABSTRACT** The flame front and compressive wave in the process of DDT in granular propellant beds at high confinement (Steel tube) have been measured with ionization probes and strain gages respectively. A mechanism for DDT in granular propellant beds is proposed. The sensitivity of DDT to various experimental conditions has also been studied in this paper.

**KEY WORDS** combustion, detonation, propellant, interior ballistics