

多孔颗粒火药床燃烧转爆轰的 敏感性研究

于津平 高耀林 范钦文 王荪源

(华东工学院)

摘要 本文以不同粒度硝胺火药RDU-4, 硝胺火药RPB, 3/1-S为研究对象, 探讨了多孔颗粒火药床燃烧转爆轰的敏感性。研究结果表明, 火药颗粒尺寸越小, 硝胺火药燃烧转爆轰越易实现; 硝基胍组分具有抑制燃烧转冲击的作用。就同一装填条件下燃烧转冲击的难易而言, 以RPB最易, 3/1-S次之, RDU-4最难。

关键词 火药 燃烧 爆轰 内弹道学

一、引言

硝胺火药是一种高能量的火药, 目前关于它燃烧特性的研究主要是通过密闭爆发器实验来实现的。对于它在高密度、小药粒多孔药床中的燃烧发展趋势, 人们还未能有一个深刻的认识。国外对多孔颗粒床燃烧转爆轰(DDT)的研究主要以猛炸药和部分固体推进剂为研究对象, 对炮药的DDT研究很少, 研究中所采用的火药也多是粉状(20~500 μm)、球形的。本文对1000 μm 以上的大粒硝胺火药和粒状火药3/1-S进行DDT研究, 具有实际意义。通过研究, 可以对硝胺火药、3/1-S火药DDT特性有所了解, 为火药设计、装药设计提供依据。

二、多孔颗粒床燃烧转爆轰(DDT)机理

燃烧转爆轰过程可以分为由燃烧至冲击波形成和冲击波至稳态爆轰的两个过程^[1,2]。这两个过程分别简称为燃烧转冲击(DST)和冲击转爆轰(SDT)。目前, 关于多孔颗粒床DDT机理主要有两种假说^[1,2,3]。一种认为爆轰的激励因素为火药床加速燃烧导致的已燃区内形成的压缩波。这些压缩波最后超出火焰面, 形成冲击波, 诱发高速稳态爆轰^[1,2]。另一种假说认为, 在已燃区高压作用下, 火焰前有一受挤压的区域, 随着已燃区压力的提高, 这一压缩区内的颗粒造成“壅塞”, 如同活塞一样向未燃区推进。由于挤压、摩擦、剪切变形, 导致该区产生热爆炸, 形成冲击波, 最后发展成稳态爆轰^[3]。

根据已有的研究, 硝胺火药及单基药的燃烧转爆轰机理符合前一假说^[1,2]。燃烧转爆轰形成过程如图1所示。DDT管(如图2)一端点火后, 火药首先以热传导、热辐射的方式传递能量, 即为传导燃烧阶段。随着已燃区压力升高, 大量高温燃烧产物向多孔药床空隙内渗透, 以对流方式换热, 加热未燃区。一旦满足如下条件, 将产生对流燃烧: ①燃气进入空隙内部的速度大于稳定燃烧的速度; ②火药间空隙表面加热时间大于加热到发火点的时间; ③燃气建立加热层的厚度大于稳定燃烧时加热层的厚度。当对流燃烧产生以后, 火焰面传播速

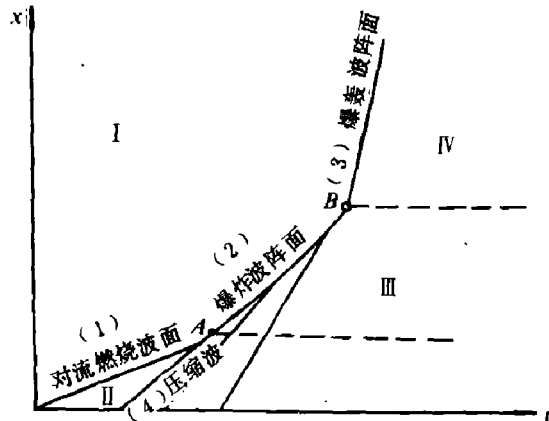


图1 多孔颗粒床DDT形成机理示意图

I、未燃区 II、燃烧区
III、爆炸反应区 IV、爆轰反应区

A点：冲击形成点 B点：爆轰形成点

Fig. 1 Proposed DDT mechanism for porous granular charge

I. Unburned region, II. Combustion region,
III. Explosion region, IV. Detonation region.

A. Shock wave formation point, B. Detonation formation point

- (1) Convective combustion wave front.
- (2) Explosive wave front.
- (3) Detonation wave front.
- (4) Compressive wave.

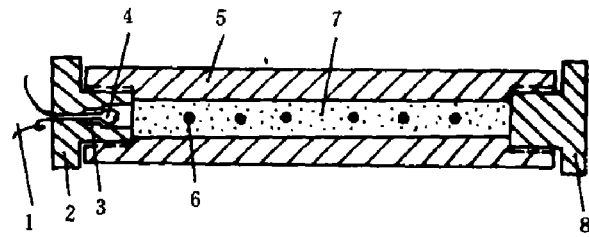


图2 DDT管结构示意图

1. 点火引线, 2. 点火堵头, 3. 电点火头, 4. 黑火药包, 5. 钢管, 6. 探针孔, 7. 多孔药床, 8. 密封堵头.

Fig. 2 DDT tube illustration

1. Ignitor line, 2. Ignitor bolt, 3. Electric ignitor, 4. Black powder, 5. Steel tube.

6. Ionization probe, 7. Porous propellant charge, (8) Far end closure

度大大提高，它是传导燃烧速度的几十倍，乃至几百倍。

对流燃烧产生之后，药床内的情形很复杂，由于加速燃烧，火焰面上压力梯度加大，在已燃区和未燃区均产生较强的压缩波。在多孔颗粒床中，未燃区内的压缩波很快衰减，而已燃区内的压缩波传播至点火端部得以反射，以当地音速向火焰面传播，并超出火焰面，形成冲击

波^[5]。冲击波的能量主要消耗于加热、挤压火焰面附近的未燃药粒，使药粒温度进一步升高，形成爆炸反应，使火焰面传播速度再次跃升。一定时间后，冲击波在爆炸反应的驱动下加强到一定程度，导致高速稳态爆轰的形成，即实现燃烧至爆轰的转变。

三、实验方法及研究对象

表1 研究对象及药粒尺寸

Table 1 The samples and partical sizes of the studied propellants

研究对象	标记	形状	平均尺寸/(μm)	几何平均直径/(μm)
RDU-4	RDU-g	球形粉末	直径: 68	68
	RDU-P1	圆柱状	直径: 1000 高: 1000	1145
	RDU-P2	圆柱状	直径: 1000 高: 2000	1442
	RDU-P3	圆柱状	直径: 1000 高: 3500	1738
	RDU-P4	圆柱状	直径: 9200 高: 2000	8000
RPB	RPB-P2	圆柱状	直径: 1000 高: 2000	1442
3/1-S	3/1-S	圆管状	外径: 350, 孔径: 150, 高2000	633

实验装置如图2所示，它由DDT管，验证板及测时系统组成。DDT管的内、外径分别为14mm，30mm，长为500mm。管的耐压值为 6.9×10^8 Pa，点火系统采用4 Ω 电点火头及0.4 g³*小粒黑药。实验在 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下进行，实验装填密度均为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。

研究对象，药粒形状及其尺寸如表1所示，研究对象的主要组分及能量示性数示于表2。

表2 火药主要组分及能量示性数

Table 2 The main contents and energy indications of the studied propellants

药类	组分/(%)					爆热/(kJ/kg)	火药力/(kJ/kg)
	NC	RDX	NG	NGU	其它		
RDU-4	28.0	32.5	24.0	8.0	7.5	4577	1215
RPB	35.0	32.0	28.5	0	4.0	4473	1231
3/1-S	97.0	0	0	0	3.0	3887	1027

四、研究结论与分析

1. 颗粒尺寸对硝酸火药燃烧转爆轰的影响

颗粒尺寸对多孔药床燃烧转爆轰的影响主要表现在如下两方面：①对透气性的影响。透气性主要是由药形、药粒尺寸、装药密度所决定的。透气性大有利于已燃区热气体向未燃区渗透，另一方面它也使已燃区热散失大，较大的压力及其梯度难以形成。因此，只有在一定的透气性下燃烧才易于转成爆轰。对于小颗粒多孔药床，在药形、装药密度一定的情况下，药粒越大，透气性越好。②对燃烧比表面积的影响。燃烧比表面积是指单位体积药粒的表面积。比表面积越大，实现热交换的面积也越大，着火燃烧面积也就越大，有利于点火的实现和燃烧的传播。

图3、图4为RDU-8, RDU-P1, RDU-P2, RDU-P3, RDU-P4五种粒度尺寸药粒。在

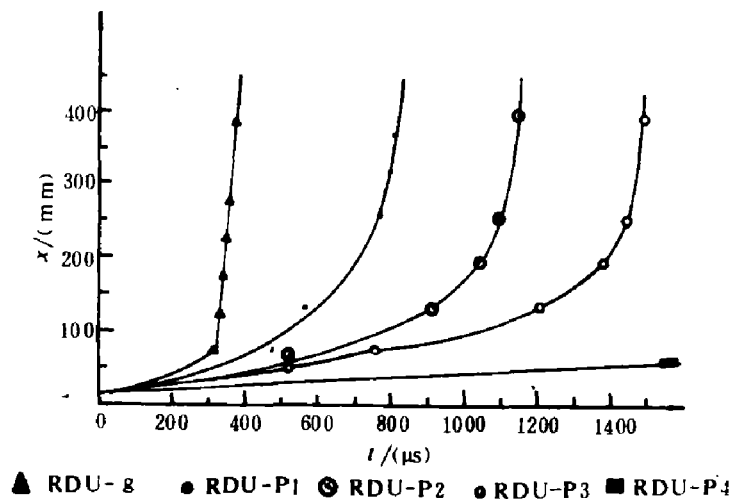


图3 硝酸火药在DDT管内火焰面传播位置(x)-时间(t)曲线

Fig. 3 Experimental flame front location (x)-time (t) curves for nitramine propellants in DDT tube

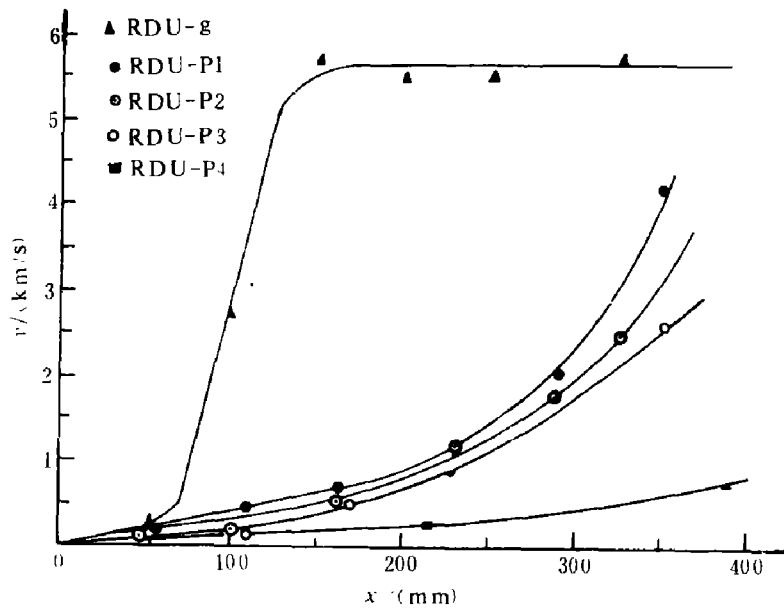


图4 硝胺火药在DDT管内火焰面传播速度(v)—位置(x)曲线

Fig. 4 Experimental flame front velocity (v)—location (x) curves for nitramine propellant in DDT tube

DDT管中测得的燃烧面传播情况。从图中我们可以找出 $x-t$ 曲线的拐点,这一点即为火焰面传播速度的跃变点。从图中可以发现RDU-g火焰面传播速度的跃变点出现在距点火端约70mm处,在 $x=100\text{mm}$ 附近,火焰面传播速率达到 5700m/s ,并保持恒定。这一速度等于RDU Kamlet公式的稳态爆轰爆速计算值。结合碎片和验证板刻痕显示,发现RDU-g在DDT管内形成了高速稳态爆轰^[4]。RDU-P1, RDU-P2, RDU-P3的火焰面传播情形基本相似。 $x-t$ 曲线的拐点出现在距点火端约230mm处。在这一位置,火焰面传播速度均达到 1000m/s 。Bernecker等认为^[2],当压缩波超出火焰面,导致冲击波作用下的爆炸反应时,其火焰面传播速率可达 $800-1700\text{m/s}$ 。结合管壁碎片及刻痕,可以发现稳态爆轰均未形成。分析硝胺火药DDT机理,不妨取火焰面传播速度达到 1000m/s 的位置为冲击波形成点。由图4可知RDU-P1的冲击波形成点在 $x=220\text{mm}$, RDU-P4在 $x=230\text{mm}$, RDU-P3在 $x=250\text{mm}$ 。这三种粒度的试验结果,管壁断裂及明显刻痕均出现在 $x=240\text{mm}$ 附近,而且由图3也可以发现,这些位置也就是各自 $x-t$ 曲线的拐点,由此可以说明我们确定的冲击波形成位置有一定的可靠性。RDU-P4的 $x-t$ 曲线比较平滑,测出的最大火焰面传播速度小于 800m/s ,而且试验完毕后,DDT管保持完整,显然RDU-P4未能形成冲击波,从以上实验可知,随着药粒尺寸的增加,燃烧转冲击越难形成。

尽管RDU-P1, RDU-P2, RDU-P3在冲击波形成前燃速差别很小,但冲击波形成后,火焰面传播速度的差异越来越明显。这是因为这三种粒度的火药比表面积相差很小(为1.2:1:0.9),点火后气体生成速率基本相当,从而在压力上升、燃烧加速上无明显差别,所以冲击波形成位置相近。然而一旦冲击波形成之后,由于压力很高,粒度、比表面积的一点差异会给爆炸反应区宽度、感度造成较大的影响,因此,在冲击波向高速稳态爆轰的发展上,粒度的影响很明显。RDU-g粒度比RDU-P1要小得多,由冲击波至高速爆轰的发展非常快,

所以，随着药粒的增加，冲击波转成爆轰的难度明显增加。

2. 硝基胍的加入对硝胺火药燃烧转爆轰的影响

图 5 为 3/1-S、RDU-P2、RPB-P2 的 $x-t$ 曲线，图 6 为这三种火药的火焰面传播速度随位置变化的 $v-x$ 曲线。实验表明，点火后 RPB-P2 火焰加速传播现象比 RDU-P2 要明显得多。在 RPB-P2 的实验中常出现图 7 所示的现象；即点火端附近的 DDT 管管壁破裂，点火堵头压垮。而 RDU-P2 的试验，从未发生这一现象。RPB-P2 冲击波形成的位置距点火端面为 110mm，而 RDU-P2 冲击波形成的位置距点火端面 230mm。因此，我们认为 RDU-P2 冲击波形成（即燃烧转冲击）要比 RPB-P2 难得多。

产生上述区别的主要原因在于硝基胍组分的影响。硝基胍的存在，增加了硝胺火药的致密性，点火后，RDU 火药表面上有一层熔融层，它既降低了燃烧表面的温度，又阻止了燃气向火药内部的渗透，抑制了黑索今（RDX）的爆燃。此外，硝基胍组分的加入，也改善了火药的力学性能，使其在高压下不易产生破碎，这样也有利于提高燃烧的稳定性和抑制药床内冲击波的形成及其爆炸反应的发生。相反，对于硝胺火药 RPB，由于点火易于实现，当燃烧火焰面压力在 50—180MPa 时，燃速指数大于 1 的现象比较明显^[6]，因而，其已燃区压力上

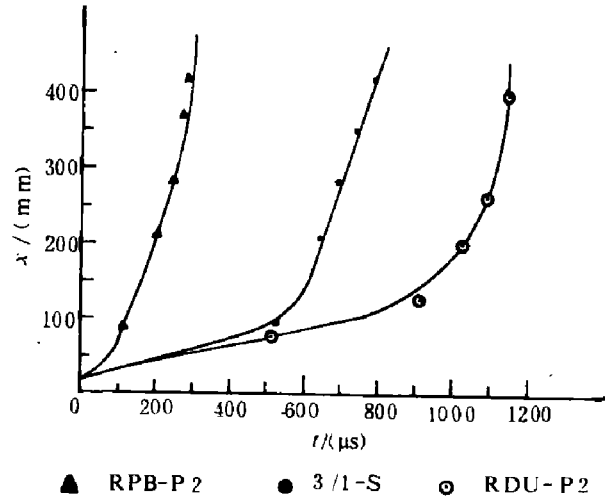


图 5 3/1-S, RDU-P2, RPB-P2 三种火药在 DDT 管内火焰面传播位置 (x)—时间 (t) 曲线
Fig. 5. Experimental flame front location (x)—time (t) curves for graphited 3/1-S, RDU-P2 and RPB-P2 in DDT tube

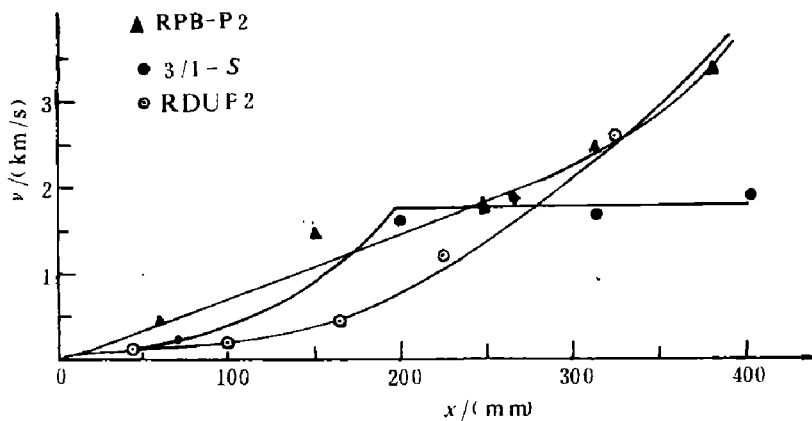


图 6 3/1-S, RDU-P2, RPB-P2 三种火药在 DDT 管内火焰面传播速度 (v)—位置 (x) 曲线

Fig. 6 Experimental flame front velocity (v)—location (x) curves for graphited 3/1-S, RDU-P2 and RPB-P2 in DDT tube

升快, 加速燃烧现象比较显著, 以致 DDT 管内冲击波易于形成。也正因 RPB 火药这一特征, 所以在点火之后, 点火端部压力较高, 点火端受到的压力波冲击也较严重, 故其试验后, DDT 管常出现图 7 所示的现象。当 DDT 管内冲击波形成之后, 由于 RDU、RPB 均在高压下进行爆炸反应, RPB 火药也早已超出了燃速指数大于 1 的区域, 由于爆热、基本组成的相似, RPB 向高速稳态爆轰的发展趋势又与 RPB 基本相同。

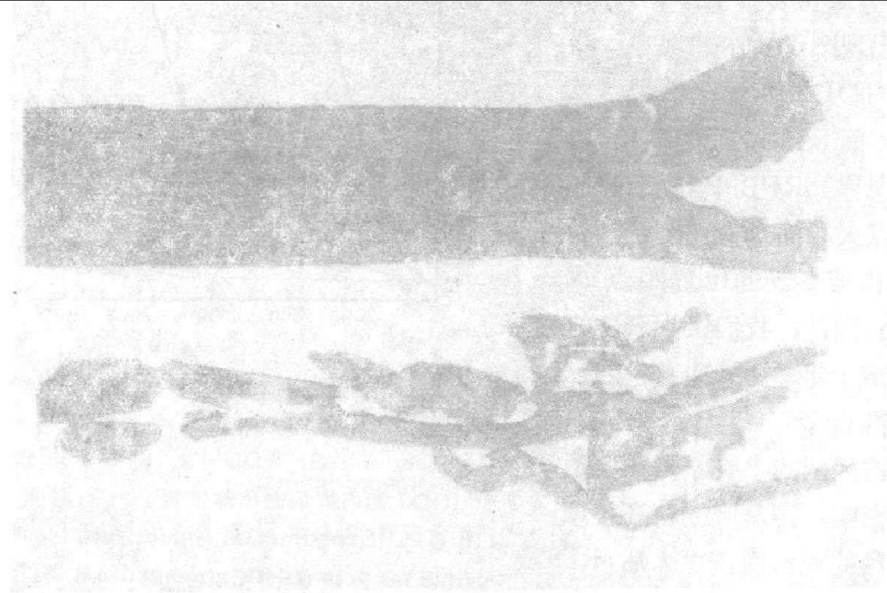


图 7 RPB-P2 试验中常出现的点火端管壁破裂现象

Fig. 7 Text plate and tube fragments recovered from RPB-P2 experiment

3. 硝酸火药与 3/1-SDDT 研究比较

比较 3/1-S, RPB-P2, RDU-P2 冲击波形成位置, 可知, RPB-P2 为 $x = 110\text{mm}$, 3/1-S 为 $x = 150\text{mm}$, RDU-P2 为 $x = 230\text{mm}$. 冲击波形成之后, 3/1-S 的火焰面传播速度保持在 1700m/s . 而 RPB、RDU 火焰面传播速度仍具有不断增长的趋势 (如图 5、图 6 所示)。

由上述现象可知, 就冲击波形成位置而言, 以 RPB-P2 最快, 3/1-S 次之, RDU-P2 最慢。就向高速稳态爆轰发展而言, RDU-P2, RPB-P2 相当, 而 3/1-S 要差。

点火后, 硝酸火药 RDU 点火延迟时间比 3/1-S 长, 因此, 加速燃烧形成较晚。而 RPB 火药与 3/1-S 相比, 由于硝酸粒子的爆燃等因素起主要作用, 因而加速燃烧现象又比 3/1-S 明显。但当冲击波形成之后, 决定冲击转爆轰的重要因素就是火药的冲击波感度, 由于硝酸火药是非均质体系, 又含冲击波感度较高的 RDX 和 NG, 因而容易转为爆轰。而 3/1-S 为单基药, 属于均质火药, 又有石墨这一钝感剂包覆, 所以出现了 3/1-S 冲击波向高速稳态爆轰转变困难的现象。

五、结 论

(1) 随着硝酸火药颗粒尺寸的增大, 燃烧比面积的减小, 燃烧转冲击的形成越难。细粒粉状硝酸火药与颗粒状硝酸火药相比, 具有大得多的爆轰危险性。

(2) 不同粒度的粒状硝酸火药, 如果比表面积相差不大, 燃烧转冲击的难度基本相当。但冲击向高速稳态爆轰发展对粒度有很大的敏感性。

(3) 硝基胍组分具有抑制硝酸火药由燃烧向冲击发展的作用, 但其对冲击转爆轰无明显影响。

(4) 含硝基胍的硝酸火药, 具有一定的燃烧可靠性, 粒度为 $1442\mu\text{m}$ 的硝酸火药 RDU-P2, 其燃烧转冲击的形成难度要大于3/1-S。

本文得到了华东工学院曲作家、赵宝昌两位教授的帮助, 特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Donna Price, Richard R. Bernecker, *Combustion and Flame*, 42 (1981), 307.
- [2] Donna Price, Richard R. Bernecker, *Combustion and Flame*, 25 (1975), 91.
- [3] Campbell, A.W., *Proc. 7th (Int.) Symposium on Detonation*, Annapolis (1981), 1483.
- [4] 曲作家, 于津平等, 粒状硝酸火药燃烧转爆轰的研究, 华东工学院学报, 2 (1989), 14.
- [5] Griffiths N. Grocock, J.M., *J. Chem. Soc.*, (1960), 4154.
- [6] Zhao Baochang, Zhao Zhijian, *Proc. 22nd (Int.) Symposium on Combustion*, Seattle, (1988), 1835.

A STUDY ON DDT SENSITIVITY OF POROUS GRANULAR PROPELLANTS

Yu Jinping, Gao Yaolin, Fan Qinwan, Wang Sunyuan

(East China Institute of Technology)

ABSTRACT The deflagration to detonation (DDT) sensitivity of various granulated propellants were studied in this paper. The propellants studied were nitramine propellant RDU-4, nitramine propellant RPB and graphited single base propellant 3/1-S. It is shown that, at the same loading density, the finer the particle size of the nitramine propellant, the more easy the DDT process. The existence of nitroguanidine (NGU) in nitramine propellant has the function of retarding the deflagration to shock transition (DST). The sensitivity of the studied propellants to DST is decreased in the following sequence: RPB, graphited 3/1, RDU-4.

KEY WORDS propellant, combustion, detonation, interior ballistics