

发射药在强约束条件下的 燃烧转爆轰特性*

杨 涛 夏智勋 雷碧文

(国防科技大学航天技术系, 长沙, 410073)

摘 要: 以 D-45, S-14, 3/1 三种发射药为研究对象, 对钢管约束条件下的高密实火药颗粒床的燃烧转爆轰 (简称 DDT) 机理和敏感性进行了实验研究。分别用应变片和离子探针测量了药床中的压缩波和燃烧波的传播, 通过对压缩波阵面和燃烧波阵面的分离, 发现压缩波形成于火焰峰后的已燃区, 它将不断加速与加强, 最后赶上火焰峰形成强冲击波而诱发爆轰。提出了点火处的压力快速上升是形成压缩波的必要条件, 从而对三种发射药的 DDT 特性的差别做了很好的解释。此外, 还考察了实验参数 (火药特性, 装填密度, 约束条件) 对 DDT 特性的影响。

主题词: 发射药燃烧, 燃烧化学动力学, 冲击波引爆, 火焰传播

分类号: TQ560.1 V512.3

DEFLAGRATION TO DETONATION TRANSITION CHARACTERISTICS OF GUN PROPELLANTS UNDER STRONG CONFINEMENT

Yang Tao Xia Zhixun Lei Biwen

(Dept. of Aerospace Technology, National Univ.
of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: The mechanism and sensitivity of deflagration to detonation transition (DDT) in highly packed granular propellant beds confined in steel tube have been experimentally studied for D-45, S-14, and 3/1 propellants. The compressive wave and flame front in the DDT processes were monitored by strain gages and ionization probes, respectively. By separating the compressive wave front and the combustion wave front, it was found that the compressive wave formed in the burning region behind the flame front, with the increase of its strength and velocity, would overtake the flame front and forms a strong shock wave to initiate the detonation. The analysis for the experimental data showed that a rapid pressure increase near the ignitor was a necessary condition for

* 本文 1994 年 12 月 25 日收到

the formation of the compressive wave, which could explain the difference in DDT characteristics of the three propellants mentioned above. The influence on DDT characteristics of the experimental parameters (propellant properties, loading density, confinement) has also been investigated.

Subject terms: Gun propellant combustion, Combustion chemical kinetics, Shock wave initiation, Flame propagation

1 前言

对含能颗粒材料的燃烧转爆轰现象虽然进行了广泛的研究,但DDT机理仍是个引起争议并有待于进一步研究的问题。争议较大的是对诱发爆轰的冲击波形成机理解释不一致。Macek^[1]认为冲击波形成于燃烧波阵面之前;Grocock^[2]认为冲击波形成于燃烧波阵面之上;Price^[3]认为冲击波形成于燃烧波阵面之后。可见,弄清机理的关键是要将强压缩波(冲击波)和燃烧波阵面分离。国内在对高能固体推进剂的燃烧转爆轰的研究中,多采用离子探针测量技术^[4],考察DDT管内火焰阵面的传播规律,由于对强压缩波的运动规律缺乏了解,很难确定燃烧转爆轰的机理。本文除了用离子探针测量火焰传播外,还采用了国外用得较多的应变片测压技术(见文献[3]),将应变片贴在DDT管外表面,通过测量DDT管的变形来反映管内压缩波或冲击波的传播规律。虽然这种测量有些误差,但却能反映出波的传播情况,对得到强压缩波到达各应变片所处位置的相对时间,能够给出比较满意的测试结果。

2 实验装置

实验系统由DDT管、点火系统、装药和测试系统组成。图1给出了DDT管示意图。DDT管采用 $\Phi 36 \times 9$ 的45号钢碳素无缝钢管,外径36mm,内径18mm,长400mm,耐压值约0.25GPa。DDT管一端为点火螺栓,另一端为密封堵头,实验时,DDT管下放置3mm厚的铅板作为验证板,根据铅板的破坏情况,可确定爆轰点的位置。火药床由置于点火螺栓内的点火药包点燃,点火药为1号小粒黑火药。装药为D-45、3/1、S-14三种发射药,其主要参数见表1。整个装药长度为350mm,为保证装药均匀,采用分段压药的方法,每次压药高度与管子内径之比小于1。实验中分别采用离子探针和应变片测量药床中火焰阵面和强压缩波阵面的传播。

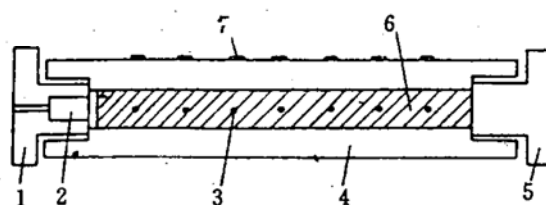


Fig. 1 DDT tube

1. Ignitor bolt 2. Ignitor 3. Ionization probes 4. Steel tube 5. Far end closure
6. Propellant bed 7. Strain gages

Table 1 Property parameters of propellants

Propellants		D-45	3/1	S-14
Parameters				
Force of propellant	(J/kg)	1.0×10^6	1.02×10^6	1.17×10^6
Average molecular weight	(g)	24.14	24.34	25.89
Ratio of specific heat		1.2362	1.2331	1.2141
Density	(kg/m ³)	1600	1600	1600
Burning rate coefficient	(m/s · Pa ⁻ⁿ)	0.758×10^{-8}	0.8257×10^{-7}	0.18×10^{-7}
Burning rate index		0.96	0.76	0.86
Particle size	Average burning layer thickness (mm)	0.27~0.37	0.3~0.38	0.12~0.16
	Average pore diameter (mm)	0.1~0.2	0.1~0.2	
	Average length (mm)	<1.3	1.7~2.3	

3 实验结果与分析

对 D-45、S-14、3/1 三种发射药, 在不同初始装填密度下进行了 DDT 实验。结果显示, 对 D-45 火药, 除装填密度为 34.4%TMD 的一次实验未发生爆轰外, 装填密度从 41.6%到 75.6%TMD 的各发实验均观察到燃烧转爆轰现象; S-14 火药四种装填密度下的实验均观察到爆轰; 3/1 火药的各发实验中, 只观察到对流燃烧, 未发生爆轰。从实验后的管子碎片照片可见, 发生爆轰后, 管子从爆轰点开始炸成许多碎片, 而未发生爆轰时, 管子仅被撕成几块。

3.1 离子探针的测试结果

Table 2 Parameters for convective flame front and detonation wave

Prope- llants	No.	Density		Convective		Related	Detonation parameters				
		g/cm ³	%TMD	wave parameters			coefficient	<i>l</i> (mm)	<i>D</i> (mm/μs)	Δt_1 (μs)	Δt_2 (μs)
				a	b						
D-45	1	0.55	34.4	9.25	2.14	0.9894	—a	—a	—a	—a	
	2	0.666	41.6	—b	—b		223	3.37	705	131	
	3	0.666*	41.6	—b	—b		220	3.37	—b	—b	
	4	0.713	44.6	9.6	4.37	0.9968	200	3.37	670	96	
	5	0.713	44.6	10.11	4.01	0.9912	199	3.7	460	103	
	6	0.74	46.2	9.73	3.71	0.9973	175	3.85	780	101	
	7	0.80*	50.0	11.18	7.36	0.9921	171	4.0	318	74	
	8	0.84	52.5	9.74	6.13	0.9917	170	4.17	468	60	

(To be continued)

Table 2-continued

Prope- llants	No.	Density		Convective wave parameters		Related coefficient	Detonation parameters			
		g/cm ³	%TMD	a	b		l	D	Δt_1	Δt_2
							(mm)	(mm/ μ s)	(μ s)	(μ s)
D-45	9	0.881	55.1	9.3	5.75	0.9895	164	4.44	466	60
	10	0.881 *	55.1	—b	—b		165	—b	—b	—b
	11	0.936	58.5	10.14	6.82	0.9951	164	5.0	442	58
	12	1.01	63.1	9.26	6.57	0.9896	161	5.33	405	42
	13	1.01 *	63.1	10.26	5.57	0.9931	162	5.33	475	54
	14	1.046	65.4	10.38	7.62	0.9903	158	5.46	340	40
	15	1.10	68.8	10.37	9.98	0.9824	151	5.72	280	38
	16	1.156	72.2	10.11	8.68	0.9932	157	5.92	290	42
	17	1.21	75.6	9.98	8.6	0.9897	166	6.14	310	48
S-14	1	0.881	55.1	9.4	4.387	0.9937	126	4.22	629	95
	2	0.98	61.2	9.18	5.834	0.9796	120	5.0	463	61
	3	1.08	67.5	9.52	16.05	0.9916	92	5.48	160	17
	4	1.1	68.8	9.2	7.806	0.9772	103	5.71	336	28

* DDT tube was heat treated

a: No transition to detonation observed

b: Normal analysis data not possible

图 2 给出了 63.1%TMDD-45 火药的离子探针测试结果, 图 2 (a) 为火焰峰的传播轨迹, 图 2 (b) 是火焰峰的速度曲线。在约 475 μ s 以前为对流燃烧阶段, 此后为稳态爆轰阶段。在约 300 μ s 以前, 火焰峰速度线性增加, 速度小于 300m/s, 火焰峰传播距离约 60mm; 随后, 火焰峰以近似于指数形式加速传播。在约 475 μ s 时达稳态爆轰速度 5.33mm/ μ s, 火焰峰从 60mm 传到 160mm 处。火焰峰传播的轨迹可用一段函数表示, 对流燃烧期间用一指数函数表示, 稳态爆轰阶段则为一线性关系。

$$x_F = ae^{bt} \quad t < t_0 \quad (1)$$

$$x_D = L + Dt \quad t > t_0 \quad (2)$$

式中 t_0 为诱导爆轰时间, 这里定义为火焰峰从第一个离子探针传至爆轰点的时间, x_F , x_D 分别为 t 时刻对流火焰峰和爆轰波所处的轴向位置, L 为爆轰开始时的轴向距离, 即所谓诱导爆轰长度, D 为稳态爆轰, a , b 为待定系数, 由最小二乘法原则确定。通过对 (1) 式求导可知, b 值越大, 对流火焰峰的速度与加速度越大, 对 (1) 式两边取对数:

$$\ln x_F = \ln a + bt \quad (3)$$

显然, 用指数关系 (1) 拟合对流燃烧段的火焰传播曲线, 实际上是在 $\ln x_F$ - t 坐标系中进行线性回归, 其线性相关程度可用相关系数 r 表示。

表 2 给出了对流火焰峰与爆轰波的参数值。表中 Δt_1 与 Δt_2 分别为爆轰相对于第一和第三

个离子探针的时间,叫做相对诱导爆轰时间。可见,相关系数均大于 0.959,说明用指数关系(1)描述对流火焰峰的传播规律是可行的。

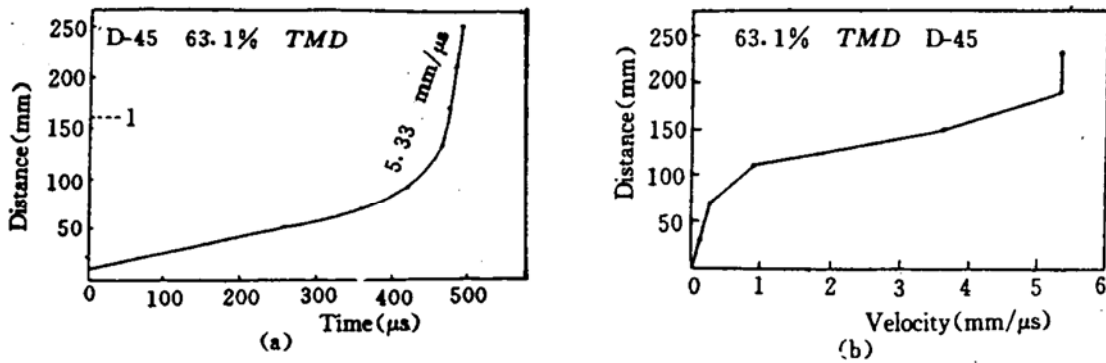


Fig. 2 Ionization probes data for 63.1% TMD D-45 propellant

(a) Distance-time data

(b) Velocity curves

3.2 应变片的测试结果

经过强压缩波或冲击波,压力不连续跳跃上升,这一特点通过管子变形反映在应变片的输出信号上,输出电压上升,电压的导数 dE/dt 有一明显增加。当压力缓慢连续上升时,应变片的输出电压基本上是缓慢线性上升的, dE/dt 保持不变。图 3 是 63.1% TMD D-45 应变片的电压-时间曲线。在第一、三两个应变片的 $E-t$ 曲线上, dE/dt 有两次明显的增加,说明有两道强压缩波经过,后三个应变片的 $E-t$ 曲线上, dE/dt 只有一次明显上升,说明只有一道压缩波经过后 3 个应变片。显然,ABCDE 代表了一道压缩波的轨迹,FG 代表了另一道压缩波的轨迹。

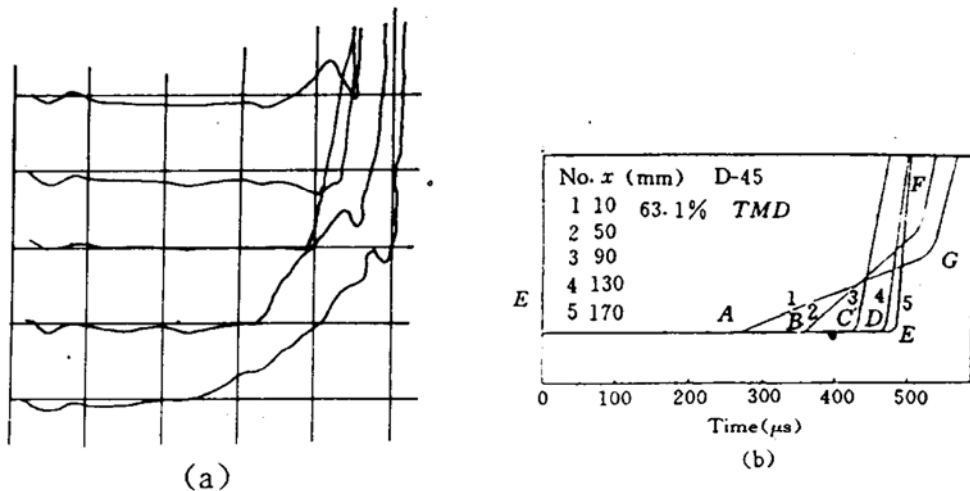


Fig. 3 Strain gages voltage-time data for 63.1% TMD D-45

3.3 燃烧转爆轰机理探讨

燃烧转爆轰机理的分歧在于对诱发爆轰的强压缩波(冲击波)的形成机理解释不一致。要解决这一问题,首先要确定强压缩波和燃烧波的相对位置。我们选择稳态爆轰点作为压缩波和燃烧波的共同时间参考点,将离子探针数据和应变片的数据联合起来分析。图 4 为 63.1%

TMD D-45 火药的实验结果。图中实验为火焰峰传播轨迹,虚线为强压缩波的传播轨迹。由图可见发射药的燃烧转爆轰过程经过了以下几个阶段:

1) 低速对流燃烧。火药床被点燃后,便迅速进入对流燃烧,对流火焰峰以线性加速方式传播;2) 快速对流燃烧。在某一时刻,由点火具处发送的压缩波加强成具有一定强度的压缩波,从此点开始,火焰峰以近似于指数形式加速传播;3) 冲击波形成与爆轰。压缩波的不断加强与加速,在某一位置赶上火焰峰,形成冲击波,最后由冲击波点燃爆轰,从爆轰点处有回爆波传向点火具方向。在上述 DDT 过程中,点火具处的压力增加速率非常重要,当压力增加速率较低时,由点火具处发送的压缩波会很快在多孔介质中衰减,只有当压力增加速率达到某一临界值后,压缩波头才会得到加强并发展成冲击波。

3.4 各种因素对 DDT 过程的影响

3.4.1 火药性能差别对 DDT 的影响

D-45、S-14、3/1 三种火药的差别表现在其化学释放能 q 、线燃速 r 、当量直径 d_p 不同。设单位时间、单位体积内火药燃烧释放的化学能为 Q_{ch} , 则

$$Q_{ch} = \frac{6}{d_p} \rho_p (1 - \varphi) r_b q \quad (4)$$

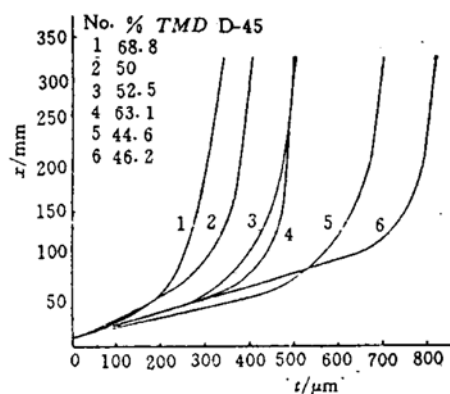


Fig. 5 $x-t$ curves of flame front for D-45 propellant

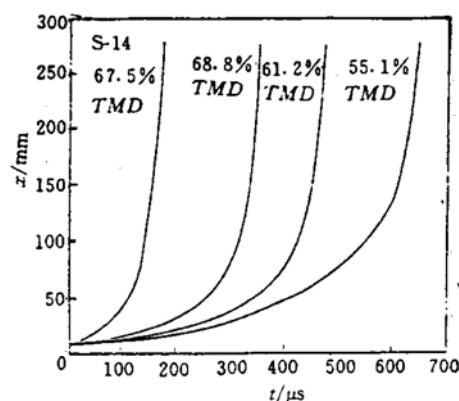


Fig. 6 $x-t$ curves of flame front for S-14 propellant

式中 ρ_p 为火药物质密度, φ 为空隙率。一般说来, Q_{ch} 越大, 压力上升速率越大。由 (4) 式知, 高能、高燃速、高初始装填密度的小颗粒火药床有利于压力快速上升。具有较高能量和较小颗粒的 S-14 火药与高燃速的 D-45 火药的压力上升速率很快, 火焰峰后形成了强压缩波, 并观察到了爆轰现象。而低燃速、大颗粒的 3/1 火药的压力上升缓慢, 没有形成强

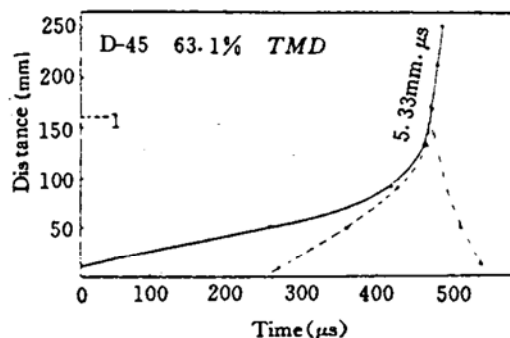


Fig. 4 Experimental results for 63.1% TMD propellant
(• Ionization probes; ▲ Strain gages)

压缩波, 实验中只观察到对流燃烧。图 5、6、7 分别给出了由离子探针测出的 D-45、S-14、3/1 火药床中火焰峰传播曲线。由图可见, 3/1 火药床中火焰峰在管内传播时间比 D-45 和 S-14 的高了一个数量级。

3.4.2 装填密度对 DDT 过程的影响

初始装填密度的大小对对流燃烧和稳态爆轰都有很大的影响。图 8~11 分别给出了 D-45 和 S-14 两种火药的相对诱导爆轰时间和诱导爆轰速度随初始装填密度的影响。结果表明, 相对诱导爆轰时间和诱导爆轰速度随装填密度的增加呈“U”字形变化。对 D-45 火药, 在 68.8% TMD 处达最小值。对 S-14 火药, 在 75.5% TMD 处达最小值。文献对“U”字形曲线作了解释。图 12 给出了爆速 D 随初始装填密度的变化。稳态爆轰与 % TMD 为一线性关系。拟合的关系式为

$$D = -0.087 + 0.084 \times \%TMD \quad (\text{mm}/\mu\text{s}), \text{D-45} \quad (5)$$

$$D = 1.1556 + 0.0625 \times \%TMD \quad (\text{mm}/\mu\text{s}), \text{S-14} \quad (6)$$

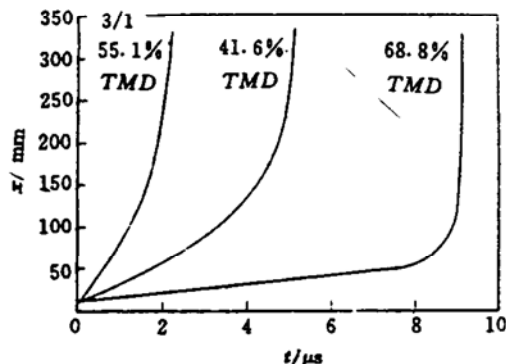


Fig. 7 $x-t$ curves of flame front for 3/1 propellant

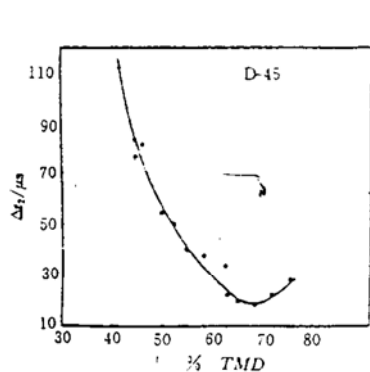


Fig. 8 Relative time to detonation vs. %TMD for D-45 propellant.

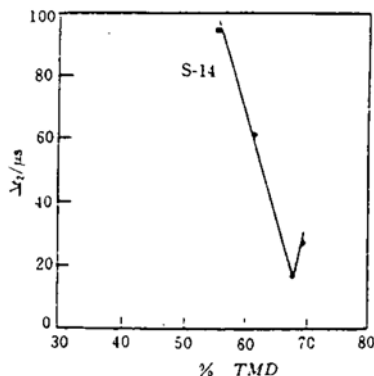


Fig. 9 Relative time to detonation vs. %TMD for S-14 propellant.

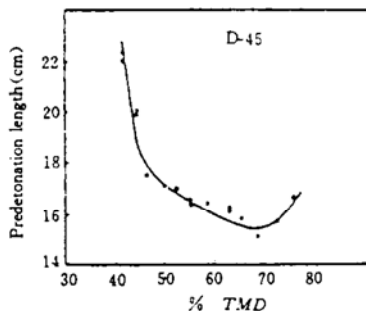


Fig. 10 Predetonation length vs. % TMD for D-45 propellant predetonation length (cm)

3.4.3 DDT 管强度对 DDT 过程的影响

实验中对 4 根 DDT 管进行了热处理, 使其强度提高了约一倍。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, 管内压力低于管的耐压值 0.2GPa, 转变过程是在很短的时间内完成的。

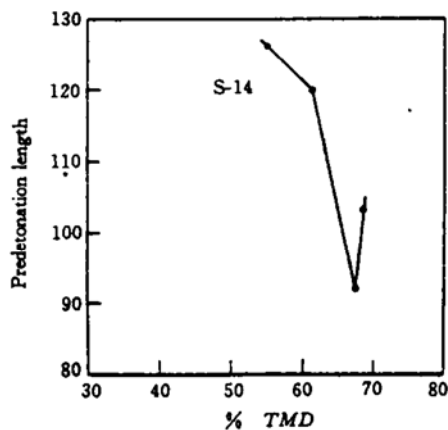


Fig. 11 Predetonation length vs. %TMD for S-14 propellant

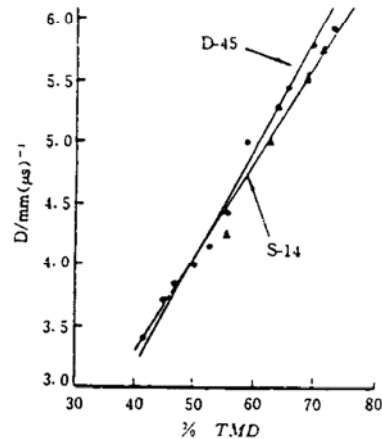


Fig. 12 Detonation wave speed vs. %TMD for D-45, S-14 propellant

4 结 论

在本文实验范围内, D-45 和 S-14 火药分别在 41.6%~75.6%TMD 和 55.1%~68.8%TMD 之间观察到燃烧转爆轰现象, 3/1 火药只观察到对流燃烧, 未发生爆轰。实验表明, 火药能量越高, 燃速越快, 颗粒越小, 越容易由燃烧向爆轰转变, 反之亦然。诱导爆轰长度和相对诱导爆轰时间随初始装填密度的增加呈“U”字形变化。DDT 过程中火焰峰的传播分为低速对流燃烧, 快速对流燃烧和稳态爆轰三个阶段。压缩波形成于已燃区, 它将不断加速与加强, 最后赶上火焰峰, 形成强冲击波。爆轰的形成是火焰峰与压缩波各自不断发展, 且相互支持, 相互作用的结果。

参 考 文 献

- [1] Macek A. Transition from Deflagration to Detonation in Cast Explosives. J of Chemical Physics, 1959 (31): 162~167
- [2] Griffiths N, Grocock J M. The Burning to Detonation Transition of Solid Explosive. J Chem Soc London, 1960 (11): 4154~4162
- [3] Price D, Berneket R R. Studies in the Transition from Deflagration to Detonation in Granular Explosives. Combustion and Flame, 1974 (22): 111~117, 119~129, 161~170
- [4] 刘德辉, 彭培根, 王振芳. 多孔床复合固体推进剂燃烧转爆轰实验研究. 推进技术, 1992 (3): 79~86