

模型复合推进剂燃烧转爆轰研究

刘德辉 彭培根

(国防科学技术大学, 长沙 410073)

摘要 本文较详细地研究了模型推进剂(AP/wax, AP/Al/wax, AP/RDX/Al/wax)由燃烧转爆轰(DDT)的过程,分析了装药密度和铝粉含量对装药 DDT 的影响。结果表明:模型推进剂当其配比接近零氧平衡时较易产生 DDT;含与不含铝粉的 AP/粘合剂系复合推进剂药柱以及硝酸含量为20%的 AP/硝酸炸药/Al 粘合剂系复合推进剂药柱都不可能产生 DDT。

关键词 固体推进剂 爆燃转爆轰 硝酸推进剂

1. 前言

复合固体推进剂不仅是一种能按一定规律燃烧的物质,而且还存在着爆轰的危险性,尽管燃烧和爆轰是两个本质不同的过程,但在一定条件下,推进剂的燃烧可以转化为爆轰,因此,燃烧转爆轰(简称 DDT)是固体推进剂危险性的一个重要标志。在国外,燃烧转爆轰一直是一个重要的研究课题,而且对炸药和炸药混合物的 DDT 已作了许多实验和理论研究的工作^[1-4],对高能推进剂的 DDT 过程也进行过一些探索性的工作^[5]。在国内,关于这方面的报导,尤其是对固体推进剂 DDT 的研究报导却很少,因此,开展复合推进剂燃烧转爆轰行为的研究不仅具有重要的理论价值,而且对于推进剂的配方设计,安全生产和使用等都具有实际意义。

复合固体推进剂(简称复合推进剂)的基本组分主要是氧化剂(常用的是高氯酸铵,即 AP)、橡胶粘合剂和金属燃料(常用 Al 粉)。为了使研究的问题简化,同时又能体现复合推进剂的燃烧转爆轰行为,在本研究中我们用石蜡(wax)来替代推进剂中的橡胶粘合剂,研究二组份(Al/wax)、三组份(AP/Al/wax)以及四组份(AP/硝酸炸药/Al/wax)模型推进剂的 DDT 过程,以期找出它们的 DDT 特性,从而为复合固体推进剂的配方设计提供防止产生 DDT 的依据。

2. 实验

1. 实验装置

本研究中,DDT 实验是在一个末端可封闭的钢管(DDT 管)内进行的,在管壁上钻有小孔,以作离子探针的插入口,DDT 管如图1所示。

DDT 管的材料为45号钢,管的外径57mm,内径20mm,推进剂的装药长度300mm,管末端用2mm厚的钢片密封。

选用3.8V,0.3A的手电筒灯泡丝作点火丝,点火丝外包复点火药(过氯酸钾,硫氢酸铅和铬酸铅混合物用硝化棉溶液粘结),用这种点火头直接点燃装药,用自制探针配用多

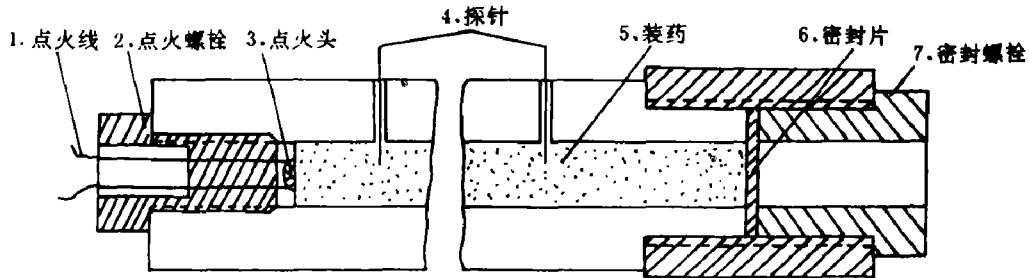


图 1 DDT 管

Fig. 1 DDT tube

1. Ignitor wire; 2. Ignitor bolt; 3. Ignitor; 4. Ionization probe;
5. Propellant charge; 6. Closure; 7. Sealing bolt

段测速仪测定管内不同位置处点火波的到达时间,进而可得知管内点火波的传播速度。

2. 原材料准备

高氯酸铵(AP)为推进剂等级,其粒度为 188—268 μm ;铝粉(Al)为推进剂等级,平均粒度为 16 μm ;石蜡(wax)的密度测得为 0.89g $\cdot\text{cm}^{-3}$,熔点为 49 $^{\circ}\text{C}$,其分子式为 $\text{C}_{21}\text{H}_{44}$,粒度低于 315 μm ;黑索金(RDX)用钝化 RDX,含有 5%的蜡。

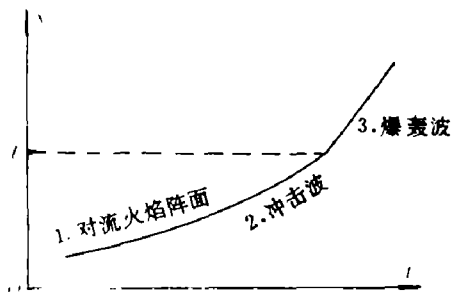


图 2 燃烧转爆轰示意图

Fig. 2 The scheme of DDT

1. Convective flame front; 2. Shock wave;
3. Detonation wave

模型推进剂是通过将配方中的各个组分人工混合而得,用手工方式将其装入 DDT 管中。

3. 数据处理方法

根据实验所记录到的距离(x)和时间(t)的数据,描绘出 $x-t$ 关系曲线,如图 2 所示。冲击波段和爆轰波段两直线的交点确定为爆轰开始点,该点与装药初始端之间的距离 l 定义为诱导爆轰段长度(l 值越小,表示装药的 DDT 能力

越大),并且从实验后回收的 DDT 管残片上的痕迹核对爆轰开始的位置,由这两种方法所得 l 值是十分吻合的^[6]。

3. 结果与讨论

1. 二组分(AP/wax)模型推进剂的 DDT

这种模型推进剂在 TMD(理论最大密度, $\text{TMD} = \text{实际装填密度} / \text{理论装填密度}$)为 65—80%内进行了 DDT 实验,为了考察模型推进剂的 DDT 能力,选取离装药初始端 250mm 处管内波的传播速度 v_{250} 作比较,DDT 实验结果如表 1 所示。

由表 1 十分明显地看出,AP/wax 模型推进剂在零氧平衡附近时,装药表现出了向爆轰转变,而贫氧较多的模型推进剂都未产生 DDT。这是由于装药在零氧平衡时的爆热最大,因而在单位时间内反应放出的热量较多,这将导致燃烧反应的速率增加,从而使得单位时间内生成的气体产物增多,压力变大,即压力上升速率(dp/dt)加大,有利于冲击波的

形成和发展,有利于DDT的产生。当装药贫氧较多时,可燃元素不可能完全燃烧,从而释放

表 1 AP/wax 模型推进剂的 DDT 实验结果

Table 1 DDT Experimental results of Ap/wax model propellants

组成(AP/wax)	OB(氧平衡)	TMD/%	$V_{250}/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	实验现象
100/0	0.34	75	0.643	DDT 管完好
92/8	0.04	77	2.50	爆轰($l=228\text{mm}$)
91/9	0.00	70	2.36	爆轰($l=234\text{mm}$)
90/10	-0.04	68	3.22	爆轰($l=202\text{mm}$)
89/11	-0.08	71	1.41	DDT 管中部隆起且破碎
85/15	-0.23	70	1.20	DDT 管破碎
80/20	-0.42	81	1.00	DDT 管后部稍有膨胀
75/25	-0.61	75	0.650	DDT 管完好

出的热量较少,使反应速率增加较慢,压力上升速率(dp/dt)较慢,不利于 DDT 的产生。利用这种原理可以解释文献[3]中的结论:在 HMX 中加入铝使 HMX 的 DDT 可能性下降,但其降低 DDT 的能力不及 wax 有效。这是由于 $OB_{\text{HMX}} = -0.216$, $OB_{\text{Al}} = -0.889$, 因此当在 HMX 中加入铝时使装药的氧平衡值下降(更负),从而使其 DDT 可能性下降。而 wax 是比铝更为贫氧的物质($OB_{\text{wax}} = -3.456$),因此它对降低 HMX 的 DDT 的能力比铝还要强,

由于一般常用的 AP/粘合剂系复合推进剂都是贫氧较多的,因此根据上述模型对推进剂的研究结果,我们知道它是不可能产生 DDT 的。然而,对于 AP/粘合剂推进剂贫氧较少时,是否能产生 DDT 还需实验验证。为此,对 AP/wax 为零氧平衡(91/9)和贫氧较少(90/10)的两种模型推进剂的 DDT 作了进一步研究。对 AP/wax 为(91/9)和(90/10)的两个配方,分别在 76%TMD 和 74%TMD 下又进行了 DDT 实验,两者均未产生爆轰,前者的 v_{250} 为 $1.13\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 后者的 v_{250} 为 $1.00\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。那么,如何解释同一配方在不同装填密度下可产生与不产生 DDT 这一实验现象,我们认为,当装填密度增加(亦即 TMD 加大)时,一方面由于单位体积中的装药量加大,因而单位时间内进行燃烧的药量增多,也就使产生的气体增多,压力变大,即压力上升速率(dp/dt)加大,有利于 DDT。另一方面,随 TMD 的增加,装药的孔隙率减小,那么高温燃气渗入装药内部变得困难,即单位时间内渗透的距离变短,从而燃烧表面积减少,使得单位时间内反应的药量反而下降,使装药的 DDT 能力下降。由于在 TMD 较低时第一个作用较明显,而在 TMD 较大时,则第二个作用较明显,因此两方面综合作用的结果是使装药的 DDT 能力随 TMD 的增加而增加(l 下降),但当 TMD 超过某一值以后却随 TMD 的增加而下降(l 上升)。因此,诱导爆轰距离 $l \sim \text{TMD}$ 的关系曲线应呈现典型的 V 字形,这一点已被双基推进剂的 DDT 实验所证实^[6]。对 AP/wax 为(91/9)和(90/10)的配方来说,实验结果表明当 TMD 大于 74%以后第二个作用已很明显,因此装药未能产生 DDT。由于现代固体推进剂制造中的装填工艺技术能使装药达到很高的密实度(TMD > 99%以上),因此即使 AP/粘合剂系推进剂贫氧较少时,由于上述第

二个作用的显著影响,也不可能在推进剂中产生 DDT。

2. 三组分(AP/Al/wax)模型推进剂的 DDT

为了提高推进剂的能量,常在配方中加入一定量的铝粉,因此研究 AP/Al/wax 模型推进剂的 DDT 是很有必要的。由于推进剂中氧化剂的含量常为 70%,因此,在本研究中固定 AP 含量为 70%,改变 Al 和 wax 的配比,进行了 AP/Al/wax 模型推进剂的 DDT 实验研究,结果见表 2。

表 2 铝含量对 AP/Al/wax 模型推进剂 DDT 的影响

Table 2 The effects of aluminium content on DDT of AP/Al/wax model propellants

组成(AP/Al/wax)	70/20/10	70/17/13	70/15/15	70/13/17	70/10/20	79/15/6
OB	-0.29	-0.36	-0.41	-0.46	-0.54	-0.07
TMD/%	73	73	79	69	76	73
$v_{250}/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	0.662	0.536	0.504	0.370	0.280	2.32

由表 2 可以看出,对贫氧较多的 AP/Al/wax 模型推进剂仍然不可能产生 DDT,但随铝含量的增加($\text{Al} \leq 20\%$),反应中的放热增多,使燃烧加快,导致管内波的传播速度增加,有利于 DDT。实际上,铝含量为 20%和 17%的这两发实验后 DDT 管后部已经胀大,而铝含量为 15%、13%和 10%的这三发实验后的 DDT 管都是完好的,这也证实了上述结论。因此,实际的推进剂配方中,为尽可能避免产生 DDT,铝含量不应太高,最好低于 17%。

实验结果还表明,配比接近零氧平衡的 AP/Al/wax(79/15/6)模型推进剂也能实现 DDT($l=102\text{mm}$)。但实际的 AP/Al/粘合剂系推进剂配方中,考虑到推进剂的力学性能,工艺性能等,粘合剂的含量不可能很少(一般超过 10%),因此 AP/Al/粘合剂系复合推进剂都是贫氧较多的,而且由于其较高的密实度($\text{TMD} > 99\%$ 以上),因而不可能产生 DDT。

我们还研究了 AP/Al 二元混合物的 DDT。对零氧平衡的 AP/Al(72/28)混合物在 72%TMD 下实验并未产生爆轰。由于零氧平衡物的 DDT 可能性最大,因此可以断言,在 70%TMD 附近,AP/Al 混合物不可能产生 DDT。

3. 四组分(AP/RDX/Al/wax)模型推进剂的 DDT

在固体推进剂中添加适量的硝酸炸药(如 RDX, HMX)是实现推进剂少烟化和高能化的一条重要途径,但是 RDX 或 HMX 是一种高效猛炸药,它本身具有较高的机械作用感度和冲击波(爆轰波)感度,因而人们十分关心含硝酸的 AP 推进剂的安全问题,因此研究 AP/RDX/Al/wax 模型推进剂的 DDT 具有十分重要的实际意义。本研究中我们固定氧化剂的含量为 70%(AP 为 50%,RDX 为 20%),观察铝粉含量对装药 DDT 的影响,实验结果见表 3。

由表 3 看出,保持 AP/RDX(50/20)不变时,模型推进剂未产生 DDT,但随铝含量增加,氧平衡值也加大,离装药初始端 250mm 处的波速(v_{250})增大,有利于 DDT,然而当 $\text{Al} > 19\%$ 以后,随铝含量增加, v_{250} 又下降,阻碍了 DDT 过程。产生这种现象的原因我们认为主要在于铝粉对推进剂的 DDT 产生两种相反的影响。一方面,铝粉的加入使得燃烧放出较多的热量,提高了燃气温度,对推进剂中点火波(对流火焰阵面)传播有利,因而有利于 DDT。另一方面,铝粉的加入使得燃气减少,压力上升速率(dp/dt)下降,阻碍了 DDT 过程。

表 3 铝含量对 AP/RDX/Al/wax 模型推进剂 DDT 的影响

Table 3 The Effects of Aluminium content on DDT of AP/RDX/Al/wax Model Propellants

AP/RDX/Al/wax	OB	TMD/%	$v_{250}/(\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$
50/20/15/15	-0.52	71	0.524
50/20/17/13	-0.47	67	0.640
50/20/19/11	-0.42	72	1.46
50/20/21/9	-0.37	68	0.731
50/20/23/7	-0.32	70	0.500

当铝粉含量较少时,第一个作用较明显,因此随铝粉的加入,点火波传播速率增加,有利于 DDT,但当铝粉含量大于某一值后(AP/Al/wax 以及 AP/RDX/Al/wax 的 DDT 实验表明该值为 19%),由于此时粘合剂含量太低,产生的燃气很少,第二个作用较明显,于是随铝粉的进一步加入,点火波传播速率反而下降,阻碍了 DDT 过程。

基于上述分析,对 AP/硝酸炸药/Al/粘合剂系复合推进剂,从尽可能避免 DDT 的角度来看,铝粉含量在 19%左右是不利的,最适宜的铝粉含量为 $\leq 17\%$ 或 $\geq 21\%$ 。由于在推进剂配方设计时需要推进剂的各种性能综合考虑,如既要考虑能量特性,也要考虑产物的两相流等性质,因此一般铝粉的含量 $< 17\%$,而且其燃烧条件也难以达到本实验所选的两端封闭的高限制条件,于是由本文的研究结果可以得知硝酸炸药含量为 20%的含铝 AP 推进剂是不可能产生燃烧转爆轰的。

4、结论

1. 模型推进剂当其配比接近零氧平衡时较易产生 DDT。
2. 铝粉对复合推进剂 DDT 产生两种相反的影响。当铝含量小于 19%时,随铝粉的加入推进剂的 DDT 能力逐渐增加;但当铝含量大于 19%以后,随铝粉的加入推进剂的 DDT 能力却逐渐下降。从推进剂的能量特性和尽可能避免产生 DDT 的角度来看,推进剂中铝粉的含量最好在 15%~17%的范围内。
3. 含与不含铝粉的 AP/粘合剂系复合推进剂药柱不可能产生 DDT。
4. AP/硝酸炸药/Al/粘合剂系复合推进剂药柱在炸药含量为 20%时不可能产生 DDT。
5. 在 70%TMD 附近,AP 和 Al 组成的二元混合物不会产生 DDT。

参 考 文 献

- [1] Bernecker R R, Price D. Combustion and Flame. 1974, 22(1): 119-129
- [2] Price D et al. Combustion and Flame. 1975, 25(1): 91-100
- [3] Price D et al. Propellants and Explosives. 1979, 4(6): 132-136
- [4] Price D et al. Propellants and Explosives. 1981, 6(1): 5-10
- [5] Bernecker R R et al. AD-A080315 (NSWC/TR-79-351).
- [6] 刘德辉,彭培根等,兵工学报(火化工分册),1990,(2):30-36

STUDIES IN THE TRANSITION FROM DEFLAGRATION TO DETONATION IN MODEL COMPOSITE PROPELLANTS

Liu Dehui Peng Peigen

(*National University of Defense Technology, Chang Sha 410073*)

ABSTRACT In this paper, the deflagration to detonation transition (DDT) processes of AP/wax, AP/Al/wax and AP/RDX/Al/wax model propellants have been studied in detail and the effects of charge density and aluminium content on the DDT of propellants have been analysed. The results showed that the DDT of model propellants which the oxygen balance values of them are near to zero can easily take place and that the DDT in charges of AP/binder composite propellants, containing and uncontainng aluminium, and AP/nitramine explosive/Al/binder composite propellants, containing 20% explosive, can not occur.

KEY WORDS solid propellant, deflagration to detonation transition, nitramine propellant