

## HTPB/AP 复合推进剂冲击波点火实验研究

雷卫国, 武全道, 韦国平, 袁铁刚, 霍红星

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 根据增效射孔器的实际作用, 以 AP-丁羟 (HTPB/AP) 复合推进剂为研究对象, 利用隔板试验研究了冲击波对 AP-丁羟复合推进剂的点火性能, 结果表明, 合理控制冲击波强度能够使 AP-丁羟复合推进剂可靠点燃, 并为其它推进剂的点火提供了一种新方法。

**关键词:** 爆炸力学; 射孔技术; 复合推进剂; 冲击波; 点火

**中图分类号:** TJ55; V512

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-7812(2005)03-0034-03

## Research of HTPB/AP Composite Propellant Shock Wave Ignition

LEI W eir-guo, WU Q uan-dao, W E I G uo-ping, YUAN T ie-gang, H U O H ong-xing

(Xi an Modern Chem istry Research Institute, Xi an 710065, China)

**Abstract:** The influence of shock wave on the detonation performance of HTPB/AP composite propellant used in plus penetrator is studied by means of clapboard experiments. The results show that the HTPB/AP composite propellant can be detonated reliably by means of reasonably controlling the shock wave intensity. A new method is provided for the initiation of other propellants.

**Key words:** explosion mechanics; perforation technique; composite propellant; shock wave; ignition

## 引 言

增效射孔器是一种新型射孔器材, 创造性地实现了炸药与火药同体组装, 同时点火, 脉冲加载于地层, 使射孔延缝深度达 1 930 mm 以上, 是提高油气井产能的一种重要手段。固体推进剂的点火是推进剂燃烧的初始阶段, 对推进剂应用具有实际意义<sup>[1]</sup>。随着科学技术的发展, 除击发药包、引信火帽、底火、点火具等常规点火方式外, E. Jamm es<sup>[2,3]</sup>研究了高比冲固体推进剂在塑性冲击波作用下的诱导点火。S. J. Ritchie 等人<sup>[4]</sup>研究了 JA 2 M 30 和 M 43 固体推进剂样品受到冲击波作用, 表明碎裂的固体推进剂表面容易发生剧烈的化学反应, 这为固体推进剂的点火和应用提供了新的方法。国内在增效射孔器的实际应用中发现, 其装填的 AP-丁羟复合推进剂由于受到射孔弹产生的冲击波作用而点火燃烧, 因此认为它的点火为冲击波点火。

本文根据增效射孔器实际作用, 研究了冲击波对 AP-丁羟复合推进剂的点火特性, 它直接影响增效射孔器的设计和施工安全性。

## 1 实验部分

## 1.1 实验原理

要想使冲击波点燃推进剂而不引起爆轰, 需研究冲击波强度点燃火药的规律以及其在介质中的衰减过程。冲击波在介质中的衰减通过隔板来实现, 与隔板介质的性质有关<sup>[5]</sup>, 当冲击波经过介质时, 由于介质的热传导和粘性, 冲击波能量一部分被介质所吸收, 使介质温度升高; 随冲击波在介质中传播距离的增加, 冲击波能量下降, 表现出冲击波波峰(压强)的下降, 即通过介质后冲击波强度减弱。冲击波通过界面各参数的变化情况可由下式计算:

$$P_2 = P_1 = \frac{2\rho_2 D_2}{\rho_2 D_2 + \rho_1 D_1}$$

式中,  $P_1$  为冲击波由介质 1 进入介质 2 的压力;  $P_2$  为冲击波通过介质 2 进入与介质 1 材料相同的介质的压力;  $\rho_1 D_1$  和  $\rho_2 D_2$  分别为相邻两种介质的冲击阻抗。

冲击波通过隔板的衰减规律为

收稿日期: 2004-05-14

作者简介: 雷卫国(1971-), 男, 工程硕士, 工程师, 主要从事民用爆破器材的研究与应用。

$$P = aP_0e^{-bt}$$

式中,  $a, b, P_0$  为与隔板材料有关的系数;  $t$  为冲击波通过的隔板厚度;  $P$  为通过隔板  $t$  处的压力。

从公式中可以看出, 冲击波衰减后的强度与隔板厚度成反比。隔板厚度越大, 冲击波强度越小。因此, 利用隔板厚度来控制作用于被发药柱表面的冲击波强度是可行的。

### 1.2 配方及理论计算

本研究选用的 AP-丁羟复合推进剂配方为端羟基聚丁二烯 (HTPB) 25%、高氯酸铵 (AP) 70%, 2, 4-甲苯二异氰酸酯 (TDI) 2% 和癸二酸二正辛酯 (DOS) 3%, 对增效射孔器来说, 需要使用在不同压力下燃烧时的产气量以及冲击波作用时推进剂的表面温度两种参数, 其理论计算结果如表 1 所示。

表 1 AP-丁羟复合推进剂配方的计算结果

Table 1 The calculated results of HTPB/AP composite propellants formulation

$P/\text{MPa}$	30	40	50	60	65	70	75	80
$T/\text{K}$	1575	1601	1622	1640	1647	1655	1661	1668
$V/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	23.66	18.13	14.79	12.54	11.67	10.93	10.28	9.71

被发药柱采用 5 L 材料捏合机浇铸  $\Phi 40 \text{ mm}$  的 AP-丁羟复合推进剂, 固化 7 d 后切成  $\Phi 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的药柱备用, 采用悬丝法测得的平均密度为  $1.461 \text{ g/cm}^3$ , 主发药柱选用聚能射孔弹主装药 RDX, 尺寸为  $\Phi 30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 密度为  $1.723 \text{ g/cm}^3$ , 8# 电雷管起爆。

### 1.3 实验装置

试验装置如图 1 所示。隔板采用 LY-12 合金铝隔板, 主要作用是衰减主发药柱产生的冲击波, 调节冲击波强度, 同时阻止主发药柱的爆炸产物对被测药柱的冲击。隔板直径为  $\Phi 40 \text{ mm}$ , 厚度分别为 5 mm, 3 mm, 2 mm。

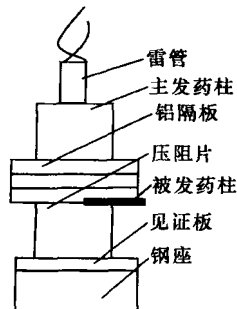


图 1 隔板实验装置图

Fig 1 Clapboard test device

试验依据见证板的燃痕和推进剂的残渣来判断药柱是否被点燃。当被点燃时, 测量此时的隔板厚

度, 用恒压法测冲击波压力。试验分为点火可行性和可靠性两组, 前组 9 发, 后组 10 发。

## 2 实验结果

### 2.1 隔板试验结果

从表 2 可以看到, 当冲击波压力达到一定值时, 推进剂有燃烧痕迹, 并且药柱破裂, 有些药块并没有完全燃烧。表 3 为点火可靠性试验结果。

表 2 AP-丁羟复合推进剂装药的冲击波点火实验结果

Table 2 Experimental data of HTPB/AP composite propellant ignition by shock wave

序号	隔板厚度/mm	冲击波强度/MPa	点火情况	药柱形状
1	5.60	87	燃烧	
2	9.05	79	燃烧	
3	10.96	73	燃烧	
4	11.40	71	燃烧	有药块燃痕
5	11.68	69	燃烧	有药块燃痕
6	12.03	67	未燃	破裂
7	12.56	66	未燃	裂开
8	13.21	63	未燃	变形
9	14.01	59	未燃	药块泛黄

表 3 AP-丁羟复合推进剂装药的冲击波点火可靠性

Table 3 The detonation reliability of HTPB/AP composite propellant ignition by shock wave

序号	隔板厚度/mm	冲击波强度/MPa	点火情况	实验现象	药柱形状
1	11.50	69	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
2	11.52	70	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
3	11.51	70	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
4	11.53	70	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
5	11.51	69	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
6	11.50	70	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
7	11.52	69	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
8	11.52	69	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
9	11.51	68	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂
10	11.50	69	燃烧	有燃痕, 残渣	破裂

通过对 AP-丁羟复合推进剂装药冲击波点火的重复实验可以看出, 在主发药柱产生的冲击波强度不变的情况下, 合理控制隔板厚度, 即作用于被发药柱的冲击波强度, 该复合推进剂能够被可靠点燃。

### 2.2 密度测试结果

AP-丁羟复合推进剂在冲击波的作用下, 内部微观结构发生变化, 当冲击波很小时, 药柱被压实, 密度变大, 随着冲击波强度的增大, 内部会产生裂纹和大颗粒被压碎, 甚至会出现破裂现象, 此时由于试

样体积的增大使其密度减小。试样密度的变化采用流体静力称量法,结果如表 4 所示。

表 4 药柱受冲击波作用后密度变化

Table 4 Density change of propellant after shock wave function

药柱尺寸/ mm	原始试样密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	隔板厚度/ mm	冲击波强度/ MPa	冲击后试样 密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
40 × 40	1.461	11.68	69	
40 × 40	1.459	12.03	67	1.286
40 × 40	1.461	12.96	62	1.337
40 × 40	1.459	14.21	57	1.382
40 × 40	1.458	15.01	53	1.440

### 2.3 扫描电镜结果

固体推进剂的损伤会直接影响其点火和燃烧性能。药柱损伤程度越大,热点形成时间也越快,点火越容易,利用扫描电镜观测 A P-丁羟复合推进剂未被点燃时,其微观形貌和内部结构,如图 2 所示。

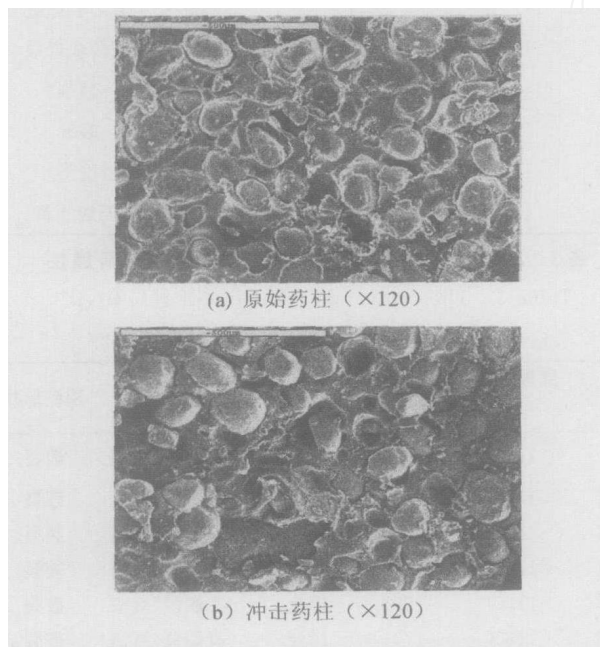


图 2 HTPB/AP 复合推进剂的扫描电镜图

Fig. 2 The SEM of original sample (a) and damaged sample (b) of HTPB/AP composite propellant

## 3 讨 论

推进剂在冲击波作用下,主要是由于药柱表面被加热形成热点,继而引发反应,导致燃烧或爆轰。究竟是燃烧还是爆轰取决于推进剂本身在力、热耦合作用时是否产生足够的高温 and 热点尺寸。有关热点形成的机理,一般认为有以下几点:裂纹或空隙中气体的绝热压缩,空穴塌陷;滑移或撞击表面的摩擦;晶体间引起的剪切带的形成,导致局部发热而形

成热点。

增效射孔器装填的 A P-丁羟复合推进剂是一种多组分固体颗粒填充的高分子含能复合材料,基体材料由羟基聚丁二烯黏合剂组成,固体颗粒由高氯酸铵氧化剂组成<sup>[6]</sup>。基体材料呈网状结构,固体颗粒做为填充材料被基体材料粘结固化为药柱。在隔板实验中,冲击波通过隔板衰减后作用于推进剂,对推进剂进行冲击加载。从图 2 观察可知,基体材料失去网状结构,高氯酸铵颗粒的破损程度随冲击波强度的增大而增大,密度减小,有的颗粒脱落形成疏松状态,甚至整个药柱试样撕裂。这种状态为 A P-丁羟复合推进剂的点火和燃烧提供了很好的条件。冲击波的作用使推进剂药柱的孔隙或裂纹中的气体产生绝热压缩,被迅速加热,理论计算结果当冲击波压力达到 50 MPa 以上时,推进剂表面温度可达到 1 500 K 以上,这样促使推进剂表面热点迅速形成,发生化学反应,反应所产生的高温高压气体沿裂缝和孔隙向推进剂内部渗透。当燃气流过推进剂裂缝和孔隙时,燃气向推进剂表面传递热量,传热有可能导致点火随着更多的燃流向裂缝和孔隙,火焰沿裂缝迅速传播,点火火焰的扩展是推进剂表面燃烧产生出更多的炽热燃气,引起局部压力的升高。同时推进剂本身受冲击波作用后,药柱也将因变形而改变压力,为点火燃烧提供了条件,也为燃气提供了额外的表面积,导致对流燃烧。通过调整隔板厚度(11.50 mm 左右)研究冲击波点火的可靠性。从试验结果来看,隔板厚度在 11.50 mm 左右冲击波的压力达到 6 MPa 左右,推进剂药柱点火燃烧,说明 A P-丁羟复合推进剂药柱通过冲击波能够可靠地点燃。

根据以上分析,认为 A P-丁羟复合推进剂的冲击波点火燃烧过程为破碎压缩燃烧,即冲击波压缩推进剂药柱,药柱内部 A P 颗粒脱裂,基体材料破裂,固体颗粒破碎,整个药柱撕裂破碎,药柱内的孔隙或裂纹处气体被绝热压缩,气体温度升高,药柱局部表面被加热发生化学反应,局部进行燃烧,燃气向药柱内部扩展,整个推进剂药柱发生燃烧。

## 4 结 论

(1) 冲击波通过隔板后,其强度被衰减,药柱内部被损伤,这种损伤主要有裂纹、大颗粒与基体材料脱离、基体材料撕裂、大颗粒破裂、整个药柱破碎等。

(2) 通过调整隔板厚度合理控制冲击波强度,使 A P-丁羟复合推进剂药柱能被有效地点燃。

(下转第 51 页)

由表 3 可以看出, 温度过高容易引起二次硝化中间体(3)的分解, ADN 收率明显降低, 适宜硝化温度为- 40~ - 45 之间。

### 3 结 论

(1) 氨基甲酸乙酯(有机法)合成 ADN, 以  $N_2O_5$  作为硝化剂, 该法处理简单, 收率可达 70% 以上;

(2) 二次硝化的最佳反应条件为: 以二氯甲烷作溶剂, 硝化剂与 N-硝基氨基甲酸乙酯铵盐的最佳料比为 1 0.7, 最适宜的硝化温度为- 40~ 45 ;

(3)  $N_2O_5$  工业化生产和储藏问题还需进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Schmitt R J, Bottaro J C, Penwell P E, et al Process for forming ammonium dinitramide salt by reaction between ammonia and a nitronium-containing compound[P] U S: 5316749, 1994
- [2] Bottaro J C, Schmitt R J, Penwell P E, et al Dinitramide salts and method of making same[P] WO: 9119669, 1991
- [3] Bottaro J C, Schmitt R J, Penwell P E, et al Dinitramide salts and method of making same[P] U S: 5254324, 1993
- [4] . C . C

- 11[J] , , 1996, 1 569-1 570
- [5] Langlet A. Method of preparing dinitramidic acid and salts thereof[P] WO: 06099, 1997.
- [6] . C 1[J] , , , 1994, 94-97.
- [7] . C 2[J] , . , 1994, 1 264-1 270
- [8] . C 10[J] , , , 1996, 908-912
- [9] Schmitt R J, Bottaro J C, Penwell P E, et al Process for forming a dinitramide salt or acid[P] WO: 9316002, 1993
- [10] Battaro J C, Schmitt R J, Penwell P E, et al Method of forming dinitramide salts[P] U S: 5198204, 1993
- [11] Battaro J C, Schmitt R J, Penwell P E, et al , Method of forming dinitramide salts[P] WO: 9119670, 1991.
- [12] 波多野日出男 の新合成法とその物理化学的特性[J] 火药学会志, 1996, 57: 160-165
- [13] 王伯周, 张志忠, 朱春华, 等 ADN 的合成及性能研究(I)[J] 含能材料, 1999, 7(4): 145-148
- [14] 张志忠, 王伯周, 朱春华, 等 ADN 的合成及性能研究(II)[J] 含能材料, 2001, 9(3).
- [15] 张志忠 新型含能材料和 ADN 合成成功[J] 火炸药学报(原火炸药), 1997, (10): 36

(上接第 36 页)

(3) 冲击波可靠点燃 AP-丁羟复合推进剂的阈值压力为 69 MPa, 为其它复合推进剂的点火提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 任务正 火炸药理论与实践[R] 北京: 中国北方化学工业总公司, 2001.
- [2] James E. Propellants and explosives in ballistic missiles[R] UCRL-RL-1 135 788, 1993
- [3] Ritchies S J. Shock-induced conductive ignition of so-

lid propellants[R] AD-A 276030, 1993

- [4] Liu C T. Cumulative damage and crack growth in solid propellant[R] AD-A 323 684, 1997.
- [5] Liu C T. Cumulative damage and crack growth in solid propellant[R] AD-A 323 684, 1997.
- [6] 蔡瑞娇 火工品设计原理[M] 北京: 北京理工大学出版社, 1999
- [7] 雷卫国, 武杰灵 破碎燃烧高能气体压裂装药损伤对 DDT 行为的影响[J] 火炸药学报, 2003, 26(3): 32-34