

文章编号: 1006-9941(2003)04-0191-03

含铝炸药爆压及能量释放过程的研究

韩勇, 韩敦信, 卢校军, 黄毅民, 何碧, 关立峰
(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用有机玻璃法计算了不同配方的含铝炸药的爆压, 并根据有机玻璃中冲击波的传播轨迹分析比较了不同含铝炸药的爆压及能量释放过程。结果表明, RDX/AP 比例一定时, 铝含量增加, 含铝炸药的爆压减小, 后期释放的能量增加。铝含量一定时, 随 RDX/AP 比值的增大, 含铝炸药的爆压增加, 后期释放的能量基本一致。

关键词: 爆炸力学; 含铝炸药; 爆压; 能量释放
中图分类号: TQ560.7

文献标识码: A

1 引言

利用有机玻璃作介质测试炸药爆轰波爆压在 20 世纪 70 年代就已得到了应用^[1]。它主要通过测定入射冲击波在惰性介质中传播的过程, 利用已知惰性材料的绝热冲击方程来计算出冲击波阵面后的粒子速度及炸药的爆压。1999 年, 波兰的 Stanislaw^[2] 通过电子探针测试了冲击波在有机玻璃中的传播速度, 首次用于定性比较分析含铝炸药的爆压及能量释放过程。2000 年, 黄毅民^[3] 不仅利用有机玻璃测定了 TNT、JO-9159 的爆压, 而且还定性分析了 TNT、JO-9159 炸药的爆轰反应区结构的特点。

本文通过有机玻璃法测试了不同配方含铝炸药的爆压, 根据对炸药爆轰作用下有机玻璃中冲击波的传播过程分析比较不同配方含铝炸药的爆压及能量释放过程。

2 实验设计

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 在实验中, 采用高速转镜扫描相机和单狭缝来测定冲击波在有机玻璃中沿中轴线传播的轨迹, 用充满氦气的乳白色气球作为背景光源, 以便获得柔和的背景光。由于被测炸药柱的长度为 100 mm, 故认为炸药输出波形近似为平面波。

2.2 实验样品

实验所测试的样品有 TNT 及含铝炸药, 含铝炸药

样品编号及配方如表 1 所示。

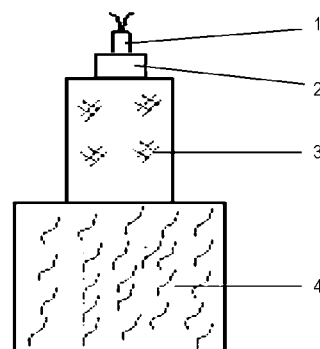


图 1 有机玻璃法测爆压试验装置

- 1—微秒级高压电雷管, 2—传爆药柱,
3— $\phi 50 \text{ mm} \times \phi 100 \text{ mm}$ 被测炸药,
4— $\phi 70 \text{ mm} \times \phi 70 \text{ mm} \times \phi 60 \text{ mm}$ 有机玻璃块

Fig. 1 Test set-up of detonation pressure by PMMA method

- 1—microsecond high pressure detonator, 2—booster,
3— $\phi 50 \text{ mm} \times \phi 100 \text{ mm}$ measured explosives,
4— $\phi 70 \text{ mm} \times \phi 70 \text{ mm} \times \phi 60 \text{ mm}$ PMMA block

表 1 实验所测试的含铝炸药样品配方

Table 1 Compositions of measured Al-containing explosives

炸药编号	炸药配方/%			
	RDX	AP	Al	粘结剂
1	20	44	26	10
2	25	39	26	10
3	30	34	26	10
4	22	45	23	10
5	23	47	20	10

收稿日期: 2002-12-12; 修回日期: 2003-06-10

作者简介: 韩勇(1976-), 男, 硕士, 主要从事爆轰物理方面的研究工作。

3 实验数据处理

采用高速转镜扫描相机(转速 $6 \times 10^4 \text{ rpm} \cdot \text{min}^{-1}$), 像点在底片上的扫描速度为 $3 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, 第一物镜焦距为 $F = 1 \text{ m}$, 扫描所得底片如图 2 所示。



图 2 试验扫描所得底片

Fig. 2 Typical film by high speed rotate mirror scan camera

根据底片记录的冲击波轨迹读出纵坐标与横坐标数组, 利用放大系数和相机转速将该坐标换算成冲击波传播距离 x - 时间 t 坐标关系, 用最小二乘法进行数值拟合。选取适当的解析表达式, 以求尽可能逼近 $x = f(t)$ 函数关系式, 在此我们借鉴函数表达式^[4]:

$$x = a_1 + a_2 t - a_3 e^{-a_4 t} \quad (1)$$

考虑到初始条件 $t = 0$ 时, $x = 0$, 给出如下指数表达式作为拟合函数:

$$t = -b_1 + \frac{1}{b_2} x + b_1 e^{-b_3 x} \quad (2)$$

炸药爆轰产物的加载将在有机玻璃中产生冲击波, 在波后或边侧稀疏作用下, 或因波阵面熵增、粘性阻尼损耗以及与应变率有关的本构关系等原因, 冲击波在传播中发生衰减, 波速和波头压力下降, 逐渐退化为应力波甚至声波。本文只考虑介质中因爆轰引起的冲击波的流体动力学衰减, 即因其背后稀疏波引起的衰减。当 $t \rightarrow \infty$ 时公式(2)右边第三项趋向于零, 冲击波已变成声波传播, b_2 为常态下有机玻璃中声速值, 其值为 $2.26 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ^[5]。

实验炸药拟合系数如表 2 所示。

表 2 实验炸药拟合系数

Table 2 Fitting coefficients of Eq. (2) for measured explosives

实验样品	拟合系数		
	b_1	b_2	b_3
1	22.17834	2.26	0.01016
2	19.93301	2.26	0.01222
3	19.86449	2.26	0.01322
4	18.32361	2.26	0.01309
5	16.80071	2.26	0.01505
TNT	35.24953	2.26	0.0077

4 结果分析与讨论

4.1 炸药爆压的确定

将方程(2)对位移微分, 并经简单变换, 即得冲击波速度 U_m 。

$$U_m = 1 / \left(\frac{1}{b_2} - b_1 b_3 e^{-b_3 x} \right) = \frac{b_2}{1 - b_1 b_2 b_3 e^{-b_3 x}} \quad (3)$$

$t = 0$ 时, 即得相应于距离 $x = 0$ 处的初始冲击波速度 U_{m0} :

$$U_{m0} = \frac{b_2}{1 - b_1 b_2 b_3} \quad (4)$$

有机玻璃的绝热冲击方程可表示为如下形式^[6]:

$$u_m = -1.692 + 0.656 U_m \quad (3.34 < U_m < 6.59) \quad (5a)$$

$$u_m = -2.418 + 0.766 U_m \quad (U_m > 6.59) \quad (5b)$$

将式(4)代入式(5a)即可得炸药和有机玻璃刚接触时的初始粒子速度 u_{m0} , 代入 Goranson 公式(6)即可求出爆压 p 。

$$p = \frac{p_m}{2\rho_{0m} U_{m0}} (\rho_0 D + \rho_{0m} U_{m0}) = \frac{1}{2} u_m (\rho_0 D + \rho_{0m} U_{m0}) \quad (6)$$

式中 ρ_{0m} 为有机玻璃的初始密度, ρ_0 为炸药的初始密度, D 为炸药的爆速, p_m 为有机玻璃中的压力。

TNT 及不同配方含铝炸药的爆压如表 3 所示:

表 3 有机玻璃法测爆压结果

Table 3 Results of detonation pressure measured by PMMA method

实验样品	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$U_{m0} / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$u_{m0} / \text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	p / Pa
1	1.829	5.721	4.605	1.329	10.567
2	1.818	6.053	5.028	1.606	13.605
3	1.811	6.629	5.560	1.955	18.154
4	1.812	5.816	4.934	1.545	12.642
5	1.804	5.224	5.274	1.768	13.837
TNT	1.631	6.912	5.846	2.143	19.477

4.2 含铝炸药的爆压释放过程

RDX/AP 基本一定,铝含量不同的含铝炸药爆轰在有机玻璃中冲击波速度随冲击波传播的距离的变化如图3所示。铝含量一定,RDX/AP 比例变化的含铝炸药爆轰在有机玻璃中冲击波速度随冲击波传播的距离的变化如图4所示。

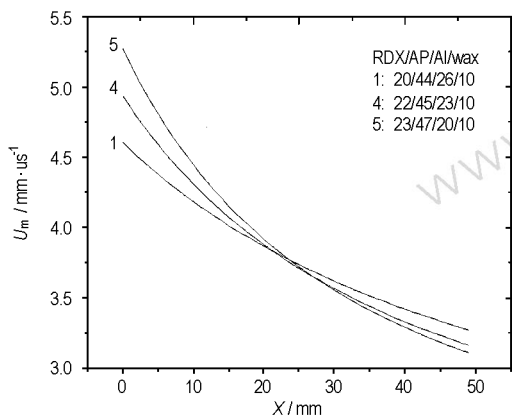


图3 RDX/AP 基本一定,铝含量不同对有机玻璃中冲击波影响的 U_m-x 图

Fig.3 Shock speed in PMMA for different explosives with fixed RDX/AP ratio

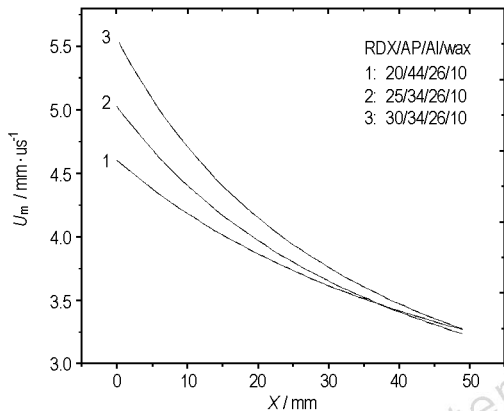


图4 铝含量一定,RDX/AP 比例变化对有机玻璃中冲击波影响的 U_m-x 图

Fig.4 Shock speed in PMMA for different explosives with fixed aluminum ratio

由图3、4及表3可以看出:随着含铝炸药 RDX 成份的增加,有机玻璃中的初始冲击波速度增加,炸药的爆压同时增加。由此可得,含铝炸药中 RDX 组分对含铝炸药的爆轰性能起着主导作用。如前所述,在有机玻璃中产生的冲击波,在波后或侧边稀疏作用下,或因波阵面粘性阻尼损耗以及与应变率有关的本构关系等原因,在传播中发生衰减,波速和波头压力下降,逐渐退化为应力波直至声波。在理想炸药的情况下,炸

药具有较窄的化学反应区长度,在上述原因下对应的现象应是爆压愈高,有机玻璃中的初始冲击波速度愈高,有机玻璃中冲击波速度衰减愈快,最终趋于声速值。有机玻璃中的冲击波速度在 U_m-x 图中应没有交叉点存在,只可能在接近声速的位置相重合。当 RDX/AP 比例一定时(图3),随着铝含量的减少,有机玻璃中冲击波的速度衰减较快,经过一定的时间,含铝量低的炸药,有机玻璃中冲击波速度将低于含铝量高的炸药。由此可以肯定,铝粉在接近 CJ 面处的反应或与爆轰产物的后续反应所释放的能量对有机玻璃中的冲击波速度产生了影响。铝含量一定,RDX/AP 比例变化的含铝炸药,其后续的能量释放情况应基本一致,图4中1,2,3号配方的冲击波速度在 $3.25 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 时就已基本一致,远高于有机玻璃的声速值。

5 结论

本文通过有机玻璃法研究了含铝炸药的爆压及能量释放过程。结果表明,采用有机玻璃法求爆压是有效的。在铝粉含量变化的一定范围内,RDX/AP 比例一定时,铝含量增加,含铝炸药的爆压减小,后期释放的能量增加。铝含量一定时,随 RDX/AP 比值的增大,含铝炸药的爆压增加,后期释放的能量基本一致。铝粉是在接近 CJ 面处的反应或与爆轰产物的后续反应所释放的能量对有机玻璃中的冲击波速度产生了影响。

致谢:感谢化工材料研究所爆轰性能测试小组人员提供的实验帮助。

参考文献:

- [1] Muhamed Sucesks. Test Method for Explosives[M]. New York: Spriger-Verlag. 1995. 130.
- [2] Stanistlaw, Andrzej, Waldemar, et al. Measurement of shock wave velocity in plexiglass for detection of energy release in aluminized nonideal explosives[J]. Energetic Materials, 1999, 7(1): 34-37.
- [3] 黄毅民,龙新平,鲁斌. TATB 基钝感高能炸药的有效爆压[A]. 黄辉. 2002 年火炸药技术及钝感弹药学术研讨会论文集[C]. 绵阳:中国工程物理研究院化工材料研究所含能材料编辑部,2002. 221-223.
- [4] Hornberg H, Volk F. The cylinder test in the context of physical detonation measurement methods[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1998, 14: 199-221.

(下转 200 页)

Study on the Curing of EMCDB Propellant Shaped by Granule-casting Process

LI Xiao-jiang, LIU Fang-li, FAN Xue-zhong, QIANG Jie-bing, LIU Chun
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Elastomeric modified cast double base (EMCDB) propellant was prepared by granule-casting process. The effects of various factors on the curing of EMCDB propellant, such as the resolvability of polymer binder in NG, the reactive activity of curing agent, and the sensitivity of curing reaction to combustion catalyst, were thoroughly studied. By the analysis of the curing mechanism of EMCDB propellant, the reasons for difficult plasticization and resolution of polymer binders in casting granule were found. The results show that the better the resolvability is, the more completely the polymer binder is plasticized and resolved. The low reactive activity of curing agent is advantageous to form perfect cross-linking network. Only those combustion catalysts, which are weakly sensitive to the curing reaction, can be used in EMCDB propellant.

Key words: material science; elastomeric modified cast double base (EMCDB) propellant; granule-casting process; curing mechanism; curing reaction

(上接 193 页)

- [5] 张宝平,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,2001. 444.
[6] Ashaev V K, Doronin G S, Levin A D. Cover-to-cover

translation in: Combustion [J]. Explosion and Shock Waves, 1988, 24: 95 - 99.

The Research of Effective Pressure and Energy-released Process of Al-containing Explosives

HAN Yong, HAN Dun-xin, LU Xiao-jun, HUANG Yi-ming, HE Bi, GUAN Li-feng
(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The effective pressure of various Al-containing explosives was calculated by PMMA method. Through the track of shock in PMMA, we analyzed and compared the energy-released process of various Al-containing explosives. The results indicated that when the ratio of RDX/AP kept constant, as aluminium content increased, the effective pressure of Al-containing explosives decreased at shock front and at the later stage the energy-released increased. When aluminium content kept constant, as the ratio of RDX/AP increased, the effective pressure of Al-containing explosives increased and at the later stage the energy-released almost reached consistent.

Key words: explosion mechanics; Al-containing explosives; effective pressure; energy-released