

文章编号: 1006-9941(2015)10-0989-05

不同粒度铝粉在 HMX 基炸药中的能量释放特性

金朋刚, 郭 炜, 王建灵, 任松涛, 高 赞, 王晓峰

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为研究铝粉在 HMX 基炸药中的能量释放特性, 采用压力传感器对不含铝粉的 HMX/HTPB 88/12 炸药及含有粒度为 13, 130 μm 铝粉的 HMX/ Al/HTPB 53/35/12 炸药在密闭空间中爆炸后的准静态压力进行了测量。结果表明: HMX/HTPB 88/12 和 HMX/ Al/HTPB 53/35/12 炸药爆炸后在密闭条件下均能产生准静态压力。HMX/Al/HTPB 53/35/12 炸药的准静态压力是 HMX/HTPB 88/12 炸药的 1.24 倍。铝粉颗粒度分别是 13 μm 和 130 μm 的 HMX/ Al / HTPB 53/35/12-炸药在密闭空间中爆炸产生的准静态压力分别是 378 kPa 和 347 kPa, 说明内爆条件下, 当铝粉含量为 35% 时, 与含大颗粒铝粉炸药相比, 含小粒度铝粉炸药能够释放更多能量, 提高密闭空间中的准静态压力。

关键词: 爆轰; 铝粉粒度; 准静态压力; 密闭条件; 含铝炸药

中图分类号: TJ55; O384

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.013

1 引 言

随着现代战场中作战需求的变化, 需要打击的地下及地面加固目标越来越多, 发展有效打击密闭条件下军事目标的弹药成为现代武器发展的重要方向和主要趋势, 而炸药是这类武器的能量源和毁伤源, 如何合理设计炸药以适合这类环境, 达到高效毁伤的目的, 是武器发展的重要研究内容之一^[1-4]。含铝温压炸药是一种可以与环境相互作用, 实现高能毁伤的新型炸药, 这种炸药在密闭空间中爆炸除了产生冲击波压力外, 还将产生另外一种压力波——准静态压力波, 这种压力波的脉宽较冲击波压力宽, 在密闭空间中能够产生更强的绕射效应, 对距爆源较远软目标杀伤效果较好^[5-6]。

国内关于含铝温压炸药的内爆特性开展了大量研究。在爆炸场温度和冲击波压力研究方面, 李媛媛等在自行设计的密闭容器中研究了不同铝粉含量炸药内爆温度场和压力场特性^[7-8]。仲倩等^[9]采用谱线测温系统研究了温压炸药燃烧过程中的温度特性。辛春亮等^[10]采用水下爆炸能量测量方法研究了含铝炸药的能

量输出及二次燃烧的特性。在后燃烧特性研究方面, 曹威等^[11]采用自制的水下爆炸装置测量了后燃释放的能量, 可达炸药爆热的 78%。姬建荣等^[12]对 TNT 基含铝炸药的后燃烧过程进行了光学观测, 捕捉到了试样二次燃烧过程的图像。裴明敬等^[13]介绍了含片状铝粉温压炸药的爆炸特性。随着对温压炸药特性的认识不断深入, 国内也出现了温压炸药密闭空间中准静态压力特性的研究报道。李芝绒等^[14]在研究温压及 TNT 炸药密闭空间中爆炸的压力特性时提出了准静态压力; 金朋刚等^[15]研究了 TNT 炸药密闭空间中爆炸准静态压力的准确测量技术, 建立了准静态压力的测量方法。

国外对含铝温压炸药的能量释放特性进行了大量的研究。韩国 Ki-Bong Lee 等^[16]进行了两种温压炸药的内爆试验, 得到了准静态压力和总燃烧热之间的关系式。美国 Richard G Ames 等^[17]通过测量二次燃烧的过程, 定量区分了封闭空间中的爆轰和二次燃烧的能量累积。但含铝炸药组分对准静态压力贡献方面研究较少, 对含铝温压炸药的设计不能提供足够的指导。

为此, 本课题组采用自行设计的试验装置, 测量了 HMX 及 HMX 基温压炸药在密闭空间中爆炸后二次燃烧产生的准静态压力; 比较了不同试样二次反应产生的准静态压力特点, 分析了铝粉粒度对含铝温压炸药在密闭空间中准静态压力的影响, 并结合相关文献的结果, 对不同粒度铝粉在 HMX 基炸药中的能量释放特性进行了分析。

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2015-03-19

基金项目: 国防科技重大基础专项项目 (JSC20133208B004)

作者简介: 金朋刚 (1978-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事炸药性能评估工作研究。e-mail: jinpenggang204@126.com

通信联系人: 王晓峰 (1963-), 男, 博士, 中国兵器工业集团公司首席科学家, 主要从事炸药及装药技术研究。e-mail:

2 试验部分

2.1 试验装置及测点的布置

为了模拟密闭环境,设计了一个能够密封的爆炸罐体,尺寸为 $\Phi 900$ mm 高 800 mm 的圆柱形罐体,在距离罐体顶端 400 mm 处有两个测压窗口,如图 1 所示。压力传感器采用 PCB piezoelectric 公司压电式不涨钢传感器,每个测压窗口布放一个压力传感器,两个传感器及试样在同一个水平面上。数据采集用南汇科技 VXI(一种数据采集器的总线技术)瞬态数据采集器,采用速率为 $1 \text{ M} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

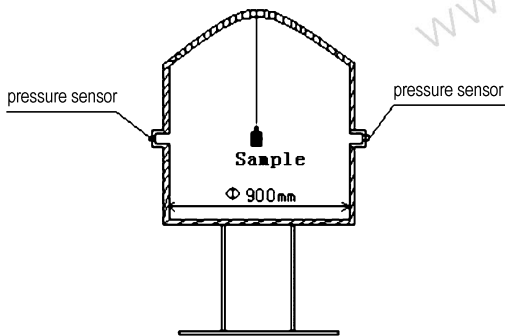


图 1 爆炸用密闭装置示意图

Fig.1 Sketch of sealed device used for explosion

2.2 试验样品及安装方式

试验所用 3 种炸药试样见表 1,其中,奥克托今(HMX)是兵器 805 厂生产,两种不同粒度(13, 130 μm)的铝粉为河南远洋铝业公司生产,端羟基聚丁二烯(HTPB)由黎明化工研究院生产。将试样采用模压法压制直径 40 mm 的药柱,悬挂于容器的中心位置(见图 1),试样均采用 JH-14 炸药作为起爆药,8 号铜壳雷管引爆,药柱装配示意图如图 2 所示。试样质量均为 100 g。

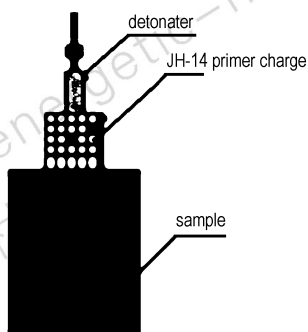


图 2 样品装配示意图

Fig.2 Sketch of sample assembly

表 1 样品配方

Table 1 Formulaion of three samples

No.	HMX	mass fraction/% Al	HTPB
1 [#]	53	35 (13 μm)	12
2 [#]	53	35 (130 μm)	12
3 [#]	88	0	12

3 结果与讨论

3.1 准静态压力实验结果

实验测得的压力-时间曲线如图 3 所示。爆轰产物或未反应的可燃剂在有限空间中的继续燃烧产生了另外一种压力,国外研究者称其为准静态压力,准静态压力的计算方法报道较多,金朋刚等^[15]采用一定时间段内平均压力表示准静态压力;Richard^[18]及 Davidtassia^[19]等也采用平均值的方法读取准静态压力。因此,本研究采用 5 ~ 20 ms 时间段内平均压力的方法计算准静态压力,计算结果见表 2。从表 2 可以看出,试验结果的重复性较好,最大相对标准偏差为 1.7%。美国海军面武器中心试验结果^[19]的相对标准偏差最小为 2.4%,最大为 5.7%。因此可见本研究数据精度较高。

对比表 2 中不同配方的试验结果可以看出,含铝配方(1[#],2[#])的准静态压力均高于不含铝粉的炸药配方(3[#]),含 13 μm 铝粉配方(1[#])的准静态压力是不含铝粉配方(3[#])的 1.24 倍,可以认为,将 HMX/HTPB(3[#])配方中 35% 的组分采用铝粉代替后,准静态压力无论是从持续时间还是压力幅值两个方面均有所增加(结合图 3c),这说明铝粉在爆炸反应中释放的能量是炸药密闭空间中准静态压力的一个重要能量来源。

3.2 准静态压力曲线特性分析

从图 3a 和 3b 中可以看出,配方 1[#]和 2[#]在有限空间内爆炸产生冲击波,冲击波在有限空间内经多次反射并与准静态压力叠加形成了图 3a 和 3b 的有限空间中特有的压力-时间曲线。从图 3c 可以看出,主要含有 HMX 的配方 3[#],爆炸后在有限空间内爆炸产生了冲击波压力,爆轰产物之间的二次反应也形成了一定的准静态压力^[19];但 3[#]配方的准静态压力持续时间很短,且一直处于降低的过程中。

对于 3[#]炸药配方而言,可燃剂是爆轰反应中未完全反应的爆炸产物^[17],而 HMX/Al/HTPB 炸药的可燃剂除了未完全反应的爆轰产物外,还有金属铝粉。金属粉反应热比爆轰产物高,可以为还未反应的可燃剂

提供更高的环境温度,这进一步提高了可燃剂的反应完全性。上述两点可能是导致 1# 和 2# 含铝炸药的准静态压力在 20 ms 内基本保持恒定不变,而不含铝粉

的炸药在 20 ms 的时间内准静态压力曲线是下降的(如图 3c 所示)主要原因。由此可见,可燃剂的燃烧是密闭空间中炸药爆炸形成准静态压力能量来源。

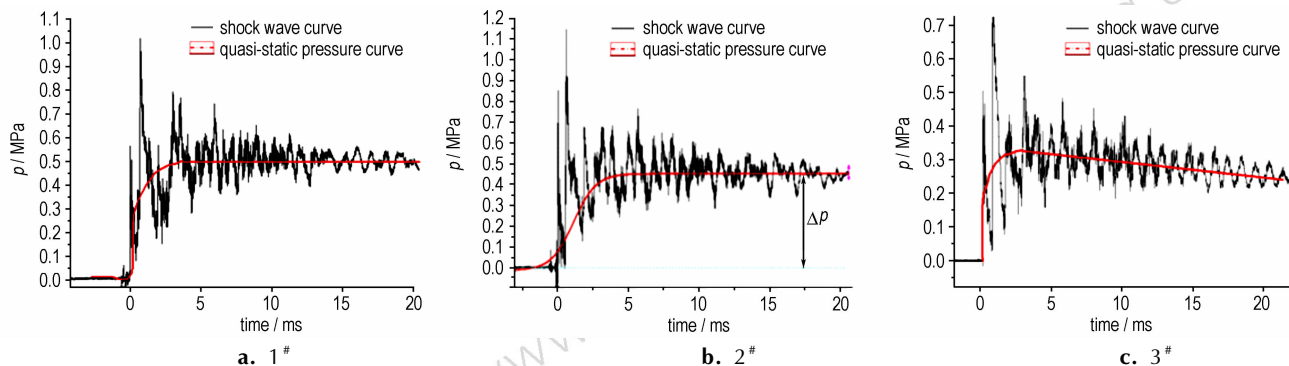


图 3 三种样品的压力时间-曲线

Fig. 3 Curves of pressure vs time for three samples

表 2 准静态压力测量结果

Table 2 Test results of quasi-static pressure for three samples

No.	p_{qs}/kPa				average	standard deviation/kPa	relative standard deviation/%
	1	2	3	4			
1#	381	376	385	370	378	6.5	1.7
2#	348	353	341	346	347	4.9	1.4
3#	302	307	310	298	304	5.3	1.7

Note: p_{qs} is quasi-static pressure.

3.3 不同粒度铝粉的能量释放特性分析

从表 2 结果可以看出,小颗粒铝粉(13 μm)炸药在密闭空间中爆炸后产生的准静态压力比大颗粒铝粉提高了 14%。这主要是由于不同粒径铝粉反应完全性不同所致。爆轰反应中配方反应完全性可以从热力学和动力学两个角度分析。

在反应动力学方面,裴明敬等^[20]关于爆炸反应中铝粉反应特性的研究结果表明,粒径小于 15 μm 的铝粉反应速率远高于 150 μm 铝粉,在几毫秒内能够完全反应。当配方中铝粉含量为 35% 时,根据全氧氧化法计算^[21],主炸药 HMX 已经不能完全氧化配方中的铝粉。因此,结合裴明敬等的研究结论可以推测,在铝粉含量为 35% 的配方中,部分小颗粒(13 μm)铝粉在几毫秒内完全反应并释放能量,大颗粒铝粉(130 μm)在几毫秒内基本不参加反应。未反应的铝粉随着爆轰产物向外扩散,铝粉在扩散过程中的剥离、破碎、传热最终达到点火温度并燃烧。与小颗粒铝粉相比,由于厚度较大,大颗粒铝粉的这一过程持续时间较长,从而扩散的空间范围较大;爆炸产物的扩散过程中温度下降十分迅速^[22],这导致大量大颗粒铝粉处

于温度较低的环境中;而小颗粒铝粉扩散空间范围相对小,所处环境温度较高,因此,反应速率也较高。相同时间条件下,小颗粒铝粉在爆炸反应中的反应完全性更高。而这一爆炸后续反应释放的能量主要贡献给了准静态压力^[23],因此,含小颗粒铝粉的炸药在密闭空间中爆炸准静态压力也更高。

从反应热力学的角度考虑,13 μm 的铝粉颗粒度小,在同样质量时(配方中的质量比例均为 35%),单位体积的颗粒数量较多,在爆轰反应过程中被抛洒至相同大小的空间中后,相对浓度较大,比 130 μm 的铝粉接触到空气中氧气的概率更高,从而导致小颗粒铝粉的反应完全性更高,这是含小颗粒铝粉炸药准静态压力高的热力学原因。

4 结论

从实验可以看出,三种炸药在密闭空间中爆炸均能产生准静态压力。相同质量、不同组成的 HMX 基炸药密闭空间中产生的准静态压力结果表明,铝粉可以提高 HMX 基炸药密闭空间爆炸准静态压力;不同铝粉粒度配方的实验结果表明,小颗粒铝粉有利于提

高炸药爆炸准静态压力。

(1) 结合铝粉在炸药爆炸反应中的相关研究与本实验结果可知, 炸药密闭空间中爆炸产生准静态压力的主要能量来源是炸药二次反应中释放出的能量。

(2) 不同粒度铝粉配方准静态压力的差异可从化学反应动力学和热力学两方面理解。在反应动力学方面, 小颗粒铝粉能够在更有利于提高化学反应速率的高温环境中反应; 在反应热力学方面, 当配方中铝粉含量相同时, 小颗粒铝粉的颗粒数量多, 温压炸药爆炸抛洒后, 其在空间中的浓度越大, 与未完全反应的氧化剂接触的几率更高, 因此, 反应完全性更高, 从而使配方准静态压力最高。

(3) 在 HMX 基炸药配方中, 13 μm 铝粉比 130 μm 铝粉配方的反应完全性更高, 其准静态压力是后者的 1.24 倍。

参考文献:

- [1] Neil D, Nick L. Bradford non-lethal weapons research project [R]. Bradford: University of Bradford, 2005.
- [2] Smith K T. Pressable thermobaric explosives. Aluminum containing compositions based HMX and RDX [C] // 36th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2005.
- [3] Ruth A S. Development and evaluation of new high blast explosives [C] // Proceeding of the 36th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2005.
- [4] 中国科学技术协会 主编. 兵器科学技术学科发展报告 2008-2009 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009, 96.
- [5] Aron Hahma, Karri Palovuori, Yair Solomon. TNT-equivalency of Thermobaric Explosives [C] // 36th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2005.
- [6] 胡宏伟, 宋浦, 赵省向, 等. 有限空间内部爆炸研究进展 [J]. 含能材料, 2013, 21(4): 539-546.
HU Hong-wei, SONG Pu, ZHAO Sheng-xiang, et al. Progress in explosion in confined space [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(4): 539-546.
- [7] 李媛媛, 南海. 半密闭条件下爆炸场的温度与压力测量 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 48-52.
LI Yuan-yuan, Nan Hai. Detonation field temperature and pressure test under semi-enclosed conditions [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2008, 31(1): 48-52.
- [8] 李媛媛, 王建灵, 徐洪涛. Al-HMX 混合炸药爆炸场温度的实验研究 [J]. 含能材料, 2008, 16(3): 241-243.
LI Yuan-yuan, WANG Jian-ling, XU Hong-tao. Experimental study on blasting temperature of Al-HMX compound explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(3): 241-243.
- [9] 仲倩, 王伯良, 王凤丹, 等. 温压炸药爆炸过程的瞬态温度 [J]. 含能材料, 2011, 19(2): 204-208.
ZHONG Qian, WANG Bo-liang, WANG Feng-dan, et al. Explosion temperature of thermobaric explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 204-208.
- [10] 辛春亮, 徐更光. 含铝炸药与理想炸药能量输出结构的数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 6-9.
XIN Chun-liang, XU Geng-guan. Numerical simulation of energy output structure for aluminized explosive and idealized explosive in underwater explosion [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2007, 30(4): 6-9.
- [11] 曹威, 何中其, 陈网华, 等. 水下爆炸法测量含铝炸药后燃效应 [J]. 含能材料, 2012, 20(2): 229-233.
CAO Wei, HE Zhong-qi, CHEN Wang-hua, et al. Measurement of aluminized explosives by underwater explosion method [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2): 229-233.
- [12] 姬建荣, 苏建军, 王胜强. 小型爆炸容器中 TNT/Al 炸药的后燃烧性能 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 46-49.
JI Jian-rong, SU Jian-jun, WANG Sheng-qiang. After-burning performances of TNT/Al explosive in small explosion vessel [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(3): 46-49.
- [13] 裴明敬, 毛根旺, 胡华权, 等. 含铝温压燃料性能研究 [J]. 含能材料, 2007, 15(5): 441-463.
PEI Ming-jing, MAO Gen-wang, HU Hua-quan, et al. The research of aluminized explosive fuel performance [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(5): 441-463.
- [14] 李芝绒, 王胜强, 殷俊兰. 不同气体环境中温压炸药爆炸特性的试验研究 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 59-61.
LI Zhi-rong, WANG Sheng-qiang, YIN Jun-lan. Experiment study of blast performance of thermobaric-explosive under different gas environment [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(3): 59-61.
- [15] 金朋刚, 郭炜, 王建灵, 等. 密闭环境下 TNT 的爆炸压力特性 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 39-41.
JIN Peng-gang, GUO Wei, WANG Jian-ling, et al. Explosion pressure characteristics of TNT under closed condition [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(3): 39-41.
- [16] Ki-Bong Lee, Keun-Deuk Lee, Jeong-kook Kim. Relationship between combustion Heat and blast performance of aluminized explosives [C] // 36th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar, Karlsruhe, Germany, June 28-July 1, 2005.
- [17] Richiard G Ames, Jason T Drotar, Joseph Silber, et al. Quantitative distinction between detonation and after burn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [C] // 13th International Detonation Symposium, Norfolk Virginia, 2006.
- [18] Richard J Lee, Kirk E. Newman, et al. Combined initial air blast and quasi-static overpressure assessment for pressed aluminized explosives [C] // 13th International Detonation Symposium, Norfolk Virginia, 2006.
- [19] David tasia P E. Internal blast test to support the tomahawk and APET programs [C] // Insensitive Munitions Technology Symposium, San Diego, 1996.
- [20] 裴明敬, 胡华权, 陈立强, 等. 铝粉在温压炸药爆炸过程中的响应分析 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(4): 7-12.
PEI Ming-jing, HU Hua-quan, CHEN Li-qiang, et al. The behavior of aluminium powder in thermobaric explosive detonating [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2013, 36(4): 7-12.
- [21] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂, 编著. 军用混合炸药 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 315-316

- SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao. Military explosive [M]. Beijing: Arms Industry Publishment, 1995: 315-316.
- [22] 李秀丽, 惠君明. 温压炸药的爆炸温度[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(5): 471-475.
- LI Xiu-li, HUI Jun-ming. Detonation temperature of thermobaric explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(5): 471-475.
- [23] 金朋刚, 郭炜, 任松涛, 等. TNT 密闭环境中能量释放特性研究[J]. 爆破器材, 2014, 43(2): 10-13.
- JIN Peng-gang, GUO Wei, REN Song-tao, et al. Research on TNT energy release characteristics in enclosed condition[J]. *Explosive Materials*, 2014, 43(2): 10-13.

Energy Releasing Characteristics of Aluminum Powder in HMX-based Explosives

JIN Peng-gang, GUO Wei, WANG Jian-ling, REN Song-tao, GAO Zan, WANG Xiao-feng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To study the energy releasing characteristics of aluminum powder in HMX based explosives, the quasi-static pressure of HMX/HTPB 88/12 and HMX/Al/HTPB 53/35/12 explosives containing aluminum powder with granularity of 13 μm and 130 μm respectively after explosion in an enclosed space was measured by pressure sensor. Results show that the quasi-static pressure after explosion of HMX /HTPB 88/12 and HMX/ Al /HTPB 53/35/12 explosives in an enclosed condition can be produced. The quasi-static pressure of the HMX/Al/HTPB 53/35/12 explosive is 1.24 times greater than that of the HMX/HTPB 88/12 explosive. The quasi-static pressure of HMX/Al/HTPB 53/35/12 explosives containing aluminum powder with granularity of 13 μm and 130 μm respectively, produced by explosion in an enclosed space is 378 kPa and 347 kPa, respectively, meaning that under implosion condition when the content of aluminum powder is 35%, compared with the explosive with the large particle aluminum powers, the explosive with small particle aluminum powder can release more energy and improve the quasi-static pressure in an enclosed space.

Key words: detonation; granularity of aluminum powder; quasi-static pressure; enclosed condition; aluminized explosive

CLC number: TJ55; O384

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.013