

文章编号: 1006-9941(2010)02-0148-04

含铝炸药冲击波感度的实验和数值计算研究

曾代朋¹, 谭多望¹, 李尚斌², 李涛¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 炸药的冲击波感度是选择武器装药的重要指标, 为了比较分析新研含铝炸药的冲击波感度, 通过大隔板实验和入射冲击波压力剖面的数值计算, 研究了两种带金属外套的新研含铝炸药 HL-10-L-1 和 HL-109-L-1 在长脉冲低压幅值冲击波作用下的引发行为, 给出了这两种炸药不发生爆轰反应和不发生强烈反应的边界隔板厚度和 $\int p^2 dt$ 边界, 分析认为采用 $\int p^2 dt$ 值来推断评估炸药在低幅值压力脉冲作用下所发生的反应情况比临界隔板厚度更加合理。

关键词: 爆炸力学; 大隔板实验; 冲击波感度; 含铝炸药; DYNA2D**中图分类号:** TJ55; O389**文献标识码:** A**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.02.006

1 引言

弹丸在侵彻目标过程中, 其装药承受相当长时间的载荷, 并且侵彻介质的复杂多样性也使载荷变得复杂, 这要求所用高能炸药的爆炸威力和感度必须有一个合理的匹配。为了避免战斗部主装药在侵彻过程中提前引爆或发生强烈化学反应, 主装药应采用低感或钝感炸药配方。针对这种背景, 含铝炸药的研究已成为一个重要课题^[1-4], 化工材料研究所新研制了 HL-10-L-1 和 HL-109-L-1 两种高威力含铝炸药。它们在低压冲击波作用下的引发行为是我们所关心的问题。为此, 设计了大隔板实验来研究评定它们的冲击波感度, 这种方法是用于测定炸药冲击起爆性能的典型实验方法, 可以通过回收见证板以及入射压力的测量, 确定炸药的爆轰阈值和反应阈值, 从而给出炸药的冲击波感度特性参数。

隔板实验已较广泛地应用于炸药冲击波感度研究中。卫玉章^[5]利用大隔板实验方法考察了以 HMX 为基的 GO-924 高能炸药在穿甲时的安定性, 通过回收见证板, 分析了炸药的反应烈度, 得到了 GO-924 不发生强烈反应的边界隔板厚度。李涛^[6]用隔板实验观

察到了不同隔板厚度下炸药 (HMX/HTPB) 中有不同烈度的化学反应发生, 给出了不发生强烈反应的隔板厚度边界。美国海军水面实验中心 Ayers 等^[7]用小隔板实验测出了 20 多种炸药的感度。洛斯阿拉莫斯国家实验室 Urizar 等^[8]用小隔板和大隔板实验测出了多种炸药 50% 爆炸概率的隔板厚度。Kramer^[9]用隔板实验给出了 TATB 为主要成分的不敏感炸药的 50% 爆炸概率的隔板厚度。Woolfolk^[10]还把隔板实验用于对液体炸药感度的研究和测量中。鉴于隔板实验在炸药冲击波感度研究中的广泛应用, 对于新研的较钝感的含铝炸药, 采用大隔板实验来研究它的冲击波感度是适合的, 并且在原隔板实验技术的基础上改进测量了入射压力波形, 结合数值计算, 更细致地给出了不发生爆轰反应和不发生强烈反应的边界隔板厚度和 $\int p^2 dt$ 边界, 分析了在低冲击作用下用 $\int p^2 dt$ 值来评估炸药反应烈度阈值的合理性。

2 实验部分

实验装置如图 1 所示。通过炸药网络平面波发生器引发低密度 R/C 炸药, 产生平面爆轰波作为加载手段。R/C 炸药密度 $0.875 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 爆速 $4.35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 爆压 4.8 GPa 。可以通过改变隔板材料和厚度来控制入射脉冲的压力幅值, 在外侧加钢套的主炸药中产生低幅值长脉冲载荷加载。本实验中仅采用低碳钢作为隔板材料, 主要调节隔板厚度来控制入射的压力脉冲。被

收稿日期: 2009-07-13; 修回日期: 2009-11-26

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理国防重点实验室基金 (批准号: 9140C6709010604)

作者简介: 曾代朋 (1977-), 男, 助研, 主要从事爆炸力学研究。

e-mail: zengdaipeng@163.com

测炸药安放在隔板下面,尺寸为 $\Phi 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。在样品端面可设置压力计(根据压力幅值,一般采用猛铜压力计或者PVDF压力计)测量入射压力的变化历程。通过观察见证板的变形或者破坏情况、回收炸药碎片的数量和大小以及其表面的反应迹象,可以判断样品中的反应情况。

3 实验结果及分析

共进行了8发实验,其中HL-10-L-1炸药3发,HL-109-L-1炸药5发。表1归纳了这些实验结果,实验后的见证板和回收炸药碎片的照片见图2和图3。

对于HL-10-L-1炸药:钢隔板厚度为8 mm时,见证板仍为整板,呈锅底状,向下凹陷33 mm,回收到的炸药颗粒较小,特征尺寸约为4 mm,判断为温和反应到强烈反应边界;隔板厚度为5 mm时,见证板被冲出直径大于炸药直径的孔,冲出的外环只有一处被撕

开,没有回收到炸药,判断为强烈反应到爆轰的边界。而HL-109-L-1炸药在这两种隔板厚度下都发生爆轰。

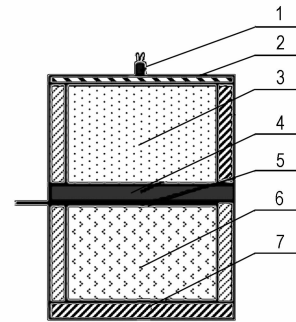


图1 实验装置图

1—雷管,2—炸药网络平面波发生器,3—R/C炸药,4—隔板,5—压力计,6—待测炸药,7—见证板

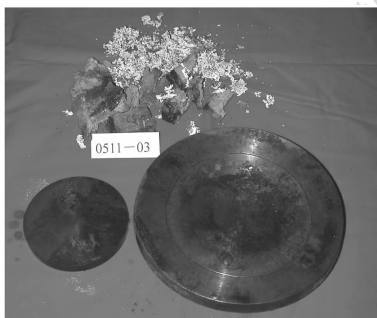
Fig. 1 The experimental setup

1—detonator, 2—net planar detonation wave generator, 3—R/C Explosive, 4—gap, 5—pressure gauge, 6—explosive specimen, 7—witness plate

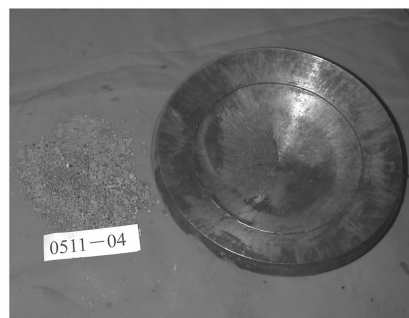
表1 见证板回收实验结果

Table 1 Reclaiming results of witness plate

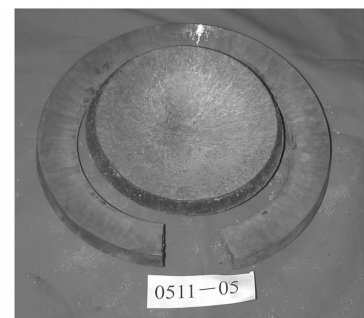
No.	explosive	gap thickness/mm	test result
0511-03	HL-10-L-1	12	见证板为整板,向下凹陷19 mm,呈锅底状。回收到大块被撕碎但仍有弹性的炸药块,特征尺寸约为30 mm,填充机油在R/C炸药爆轰作用下被点燃,引起部分被测炸药燃烧,判断为未反应。
0511-04	HL-10-L-1	8	见证板仍为整板,但变形很大,几乎快要被撕裂,向下凹陷33 mm,回收到的炸药颗粒较小,特征尺寸约为4 mm,判断为温和反应到强烈反应边界。
0511-05	HL-10-L-1	5	见证板被冲出直径大于炸药直径的孔,冲出的外环只有一处被撕开,没有回收到炸药,判断为强烈反应到爆轰的边界。
0511-06	HL-109-L-1	8	见证板中心被冲出直径略大于炸药直径的圆板,见证板周围被撕成碎块,没有回收到炸药,判断发生了正常爆轰。
0511-07	HL-109-L-1	12	类似上一发,只是见证板周围被撕裂的碎块稍大些,判断发生正常爆轰。
0511-08	HL-109-L-1	18	见证板为整板,微弯曲,向下凹陷18.5 mm,回收到大块炸药,特征尺寸约为30 mm,判断为未反应。
0511-11	HL-109-L-1	15	见证板为整板,较弯曲,向下凹陷22 mm,回收到少许炸药块,由于炸药被隔板压在见证板上,难以判断其特征尺寸,判断为温和反应。
0511-12	HL-109-L-1	13	见证板被冲出直径大于炸药直径的孔,见证板外环被撕裂为大小不等的4块,没有回收到炸药,判断发生了爆轰反应。



a. 12 mm



b. 8 mm



c. 5 mm

图2 HL-10-L-1 炸药不同厚度隔板试验结果

Fig. 2 Gap tests of HL-10-L-1 explosive

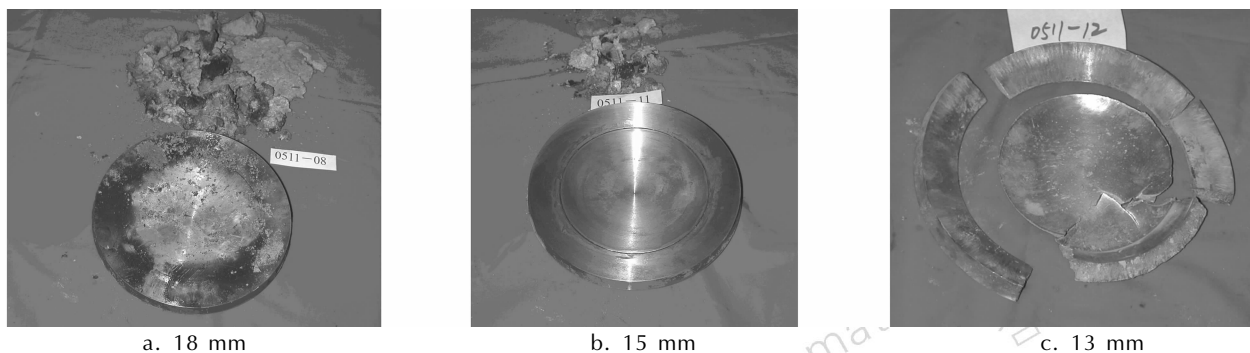


图3 HL-109-L-1 炸药不同厚度隔板试验结果

Fig. 3 Gap tests of HL-109-L-1 explosive

对于 HL-109-L-1 炸药: 钢隔板厚度为 15 mm 时, 见证板为整板, 较弯曲, 向下凹陷 22 mm, 回收到少许炸药块, 炸药发生温和反应; 隔板厚度为 13 mm 时, 见证板被冲出直径大于炸药直径的孔, 见证板外环被撕裂为大小不等的 4 块, 没有回收到炸药, 判断发生了爆轰反应。可以预估, 温和反应到强烈反应边界隔板厚度约为 14.5 mm, 强烈反应到爆轰的边界隔板厚度约为 13.5 mm。从以上实验结果可以判断, HL-10-L-1 炸药比 HL-109-L-1 炸药钝感。

4 入射压力的测试和数值计算

在确定入射到炸药中的能量 $p^2\tau$ 或 $\int p^2 dt$ 时, 是将炸药作为惰性介质材料考虑的。入射界面处发生反应会使压力升高, 从而使 $\int p^2 dt$ 增大, 因而通常用与炸药冲击阻抗接近的聚四氟乙烯代替被发炸药来测量入射压力波形, 然后计算得到 $\int p^2 dt$ 值。图 4 中实线是按这种方法测得的入射压力波形, 虚线是用 DYNA2D 的计算结果, 峰值压力为 2.7 GPa, 计算 $\int p^2 dt = 46.0 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$, 计算结果与实验结果相当吻合。对不同隔板厚度计算得到的压力峰值和输入能量 $\int p^2 dt$ 见表 2, 入射压力波形见图 5。

由计算结果可知, 虽然峰值压力变化很小, 但入射到炸药中的 $\int p^2 dt$ 有显著变化, 隔板厚度从 5 mm 到 15 mm, 峰值压力降低了 0.65 GPa, 而入射到炸药中的 $\int p^2 dt$ 值减少了 50.5 $\text{GPa}^2 \cdot \text{s}$ 。因而, 很难用峰值压力来评估炸药的冲击起爆及反应阈值, 用 $\int p^2 dt$ 值来评估炸药的冲击起爆及反应更加合理。计算结果表明, 对于 HL-10-L-1 炸药, 温和反应到强烈反应边界 $\int p^2 dt = 59.2 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$, 强烈反应

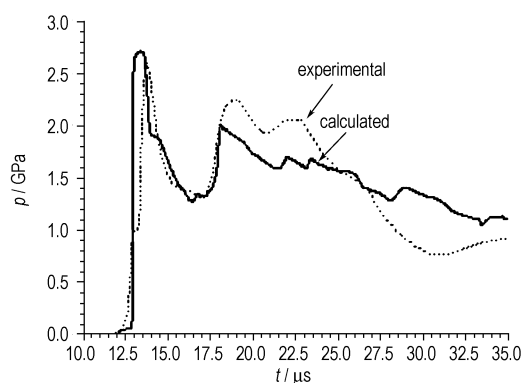


图4 计算的入射压力与文献[1]中实验测量结果的比较(隔板厚度: 10 mm)

Fig. 4 Comparison of calculated and experimental results of the incident pressure

表 2 隔板厚度与入射压力峰值以及输入能量的关系

Table 2 The relationship between gap thickness, incident peak pressure and incident energy

gap thickness/mm	peak pressure/GPa	incident energy/ $\text{GPa}^2 \cdot \text{s}$
15	2.40	31.5
13	2.56	37.1
8	2.90	59.2
5	3.05	82.0

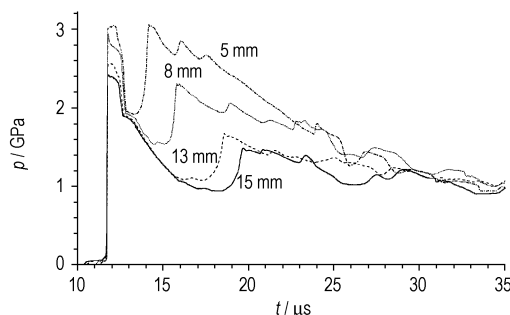


图5 计算的入射压力波形

Fig. 5 Curves of calculated incident pressure

到爆轰反应边界 $\int p^2 dt = 82.0 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$; 对于 HL-109-L-1 炸药, 温和反应到强烈反应的边界 $\int p^2 dt = 32.9 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$, 强烈反应到爆轰反应的边界 $\int p^2 dt = 35.7 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$ 。

5 结 论

通过对 HL-10-L-1 和 HL-109-L-1 两种钝感高威力含铝炸药的大隔板实验及结果的分析, 以及不同隔板厚度下入射压力的数值计算, 可以得到以下结论:

(1) 虽然对这两种炸药的实验数量有限, 但是实验前进行了理论预估和隔板厚度的精心选择, 使得这两种炸药在这轮实验中能够发生不同烈度的反应, 根据对回收的残余炸药以及隔板的破坏形式和程度等实验现象的分析, 仍然可以大致判断这两种炸药的边界隔板厚度, 对于 HL-10-L-1 炸药: 温和反应到强烈反应边界隔板厚度约为 8 mm, 强烈反应到爆轰的边界隔板厚度约为 5 mm; 对于 HL-109-L-1 炸药: 温和反应到强烈反应边界隔板厚度约为 14.5 mm, 强烈反应到爆轰的边界隔板厚度约为 13.5 mm;

(2) 数值计算表明, 用峰值压力评估炸药的冲击起爆及反应阈值较为困难, 用 $\int p^2 dt$ 值评估炸药的冲击起爆及反应烈度阈值更加合理。HL-10-L-1 炸药, 温和反应到强烈反应的临界 $\int p^2 dt = 59.2 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$, 强烈反应到爆轰反应的临界 $\int p^2 dt = 82.0 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$; HL-109-L-1 炸药, 温和反应到强烈反应的临界 $\int p^2 dt = 32.9 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$, 强烈反应到爆轰反应的临界 $\int p^2 dt = 35.7 \text{ GPa}^2 \cdot \text{s}$;

(3) HL-10-L-1 炸药比 HL-109-L-1 炸药钝感。

参考文献:

- [1] 罗观, 黄辉, 张明, 等. 可浇注固化 PBX 类含铝炸药低易性研究[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 20-22.
LUO Guan, HUANG Hui, ZHANG Ming, et al. Study on low unlnherability of cast-cured PBX aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(1): 20-22.
- [2] 卢校军, 王蓉, 黄毅民, 等. 两种含铝炸药做功能力与 JWL 状态方程研究[J]. 含能材料, 2005, 13(3): 144-147.
LV Xiao-jun, WANG Rong, HUANG Yi-ming, et al. Study on work ability and JWL equation of state of two aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 144-147.
- [3] 陈荣, 卢芳云, 林玉亮, 等. 一种含铝炸药压缩力学性能和本构关系研究[J]. 含能材料, 2007, 15(5): 460-463.
CHEN Rong, LV Fang-yun, LIN Yu-liang, et al. Mechanical behavior and constitute model of pressed aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(5): 460-463.
- [4] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药 Miller 能量释放模型的应用[J]. 含能材料, 2008, 16(4): 436-440.
XING Chun-liang, XU Geng-guang, LIU Ke-zhong, et al. Application of Miller energy release model for aluminized explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(4): 436-440.
- [5] 卫玉章. 某战斗部主装药在低压冲击波作用下不发生爆轰和强烈燃烧 $\int p^2 dt$ 边界[R]. 科技档案, CW0014G02: 1989.
- [6] 李涛. 低幅值冲击条件下带壳炸药反应烈度的研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 2003.
- [7] Ayers J N, Montesi L J, Bauer R J. Small scale gap test (SSGT) data compilation: 1959-1972[C]//Volume 1-Unclassified Explosive, U. S. Naval surface weapons center, white oak laboratory, silver spring, MD, NOLTR73-132, AD-773743; 1973.
- [8] Urizar M J, Peterson S W, Smith L C. Detonation sensitivity tests [R]. los alamos national laboratory, los alamos, NM, LA-7193-MS; 1978.
- [9] Kramer P E. TATB sensitivity testing [R]. Mason and Hanger-silas Mason Co., inc., Pantex Plant, Amarillo TX, MHSMP-74-35T; 1974.
- [10] Dobratz B M, Crawford P C 著. 化学炸药及炸药模拟材料性能 [M]. 陈颂汾, 董海山译. 中国工程物理研究院化工材料研究所科技信息室, 204-211.

Experimental and Numerical Calculation Study on Shock Sensitivity of Aluminum Explosive

ZENG Dai-peng¹, TAN Duo-wang¹, LI Shang-bin², LI Tao¹

(1. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to compare and analyze the shock wave sensitivity of a new aluminum explosive, the initiation behavior of two aluminum explosives (HL-10-L-1 and HL-109-L-1) under long period and low value impulse loading were studied using big gap test and numerical calculation. The critical gap thickness and $\int p^2 dt$ of nondetonation and nonviolence reaction were obtained.

Analysis shows that adopting $\int p^2 dt$ value to infer the reaction behavior of explosive under low value pressure pulse is more reasonable than the critical gap thickness.

Key words: explosion mechanics; big gap test; shock sensitivity; aluminuls explosive; DYNA2D

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.02.006