

文章编号:1006-9941(2021)05-0422-06

# 爆炸作用下 Al/Mg/CuO 活性壳体的释能特性

郑腾<sup>1</sup>,梁晓璐<sup>1</sup>,郑佳辰<sup>2</sup>,赵向军<sup>1</sup>,贾宇<sup>1</sup>,胡宏伟<sup>1</sup>

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为了研究 Al/Mg/CuO 活性壳体战斗部的爆炸能量释放特性,通过超高速转镜摄像机以及冲击波超压测试,得到了活性壳体在爆炸加载作用下的破碎过程图像以及不同尺寸样弹在典型距离处的冲击波超压,分析了活性壳体参与爆炸的反应时间、活性材料粒径对冲击波超压的影响,获得了冲击波超压随比例距离的变化规律。结果表明:活性壳体在爆炸加载下能够参与爆炸反应,释放能量时间相对于爆轰反应有微秒级延迟,在比例距离 2.52~3.15 m·kg<sup>-1/3</sup> 范围内,提高了冲击波超压,火球持续燃烧时间延长 1 倍以上。粒径 7 μm 活性材料制成的活性壳体样弹比粒径 20 μm 活性材料制成的样弹冲击波超压提高了 13.3%~14.4%,较小粒径的活性材料更容易与爆轰产物反应;与裸装药和铝壳样弹相比,活性壳体样弹的冲击波超压、冲量均有明显提高,在比例距离 2.1~8.4 m·kg<sup>-1/3</sup> 范围,冲击波超压提高了 6%~32%,冲量提高了 13%~38%。

**关键词:** Al/Mg/CuO 活性材料;活性壳体;爆炸加载;释能特性;冲击波超压;冲量

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020147

## 1 引言

活性材料及其在弹药中的应用是高效毁伤领域的研究热点和前沿方向<sup>[1-2]</sup>,目前,主要用于制备破片或药型罩等,在爆炸加载下对目标产生侵彻、爆燃、扩孔等效应。活性材料作为壳体主要以两种形式参与毁伤:一种是装药爆轰后壳体形成活性破片,撞击靶标后发生化学反应,释放能量毁伤目标;另一种是在炸药爆炸作用下壳体碎裂成细小颗粒,颗粒参与爆炸过程中的化学反应释放能量,提高冲击波超压、冲量等。

国内外围绕活性破片配方设计及制备、冲击引发、能量释放特性等方面开展系列研究工作。Daniel 等<sup>[3]</sup>设计了多种活性材料配方,形成了金属-金属、金属-聚合物等配方体系。阳世清<sup>[4]</sup>探索了聚四氟乙烯/铝 (PTFE/Al) 活性壳体制备工艺,完善了压制-烧

结的活性壳体的制备方法。Ames 等<sup>[5]</sup>测试了 PTFE/Al 材料的冲击起爆行为,获取了该活性材料在高速撞击后变形、断裂行为诱发的燃爆反应阈值。俄罗斯科学研究所的 Alexander 等<sup>[6]</sup>对 Al/Hf 疏松活性材料进行了爆轰特性实验测试,研究了基于炸药爆炸诱发材料反应的机制,获取了 Al/Ni、PTFE/Al/Ni 等多种活性材料在高速侵彻钢靶情况下的反应阈值。Lee<sup>[7]</sup>研究了亚稳态分子间复合物和纤维复合活性材料等活性材料的配方和工艺,形成了 Al-Ni 等活性材料配方体系。王海福等<sup>[8]</sup>开展了金属-聚合物活性破片能量输出特性研究,提出了通过测量密闭靶标容器内部压力来评估活性破片所释放化学能的方法。李旭锋等<sup>[9]</sup>研究了 PTFE/Al 活性破片的终点效应,通过“升降法”得到了含能破片对不同盖板厚度带壳炸药的引爆速度阈值。陈进等<sup>[10]</sup>建立了撞击条件下 PTFE/Al 活性材料反应效率与准静态压力的函数关系,计算了该活性材料释放的比化学能平均值为 5583.8 J·g<sup>-1</sup>,反应效率平均为 38.34%。

爆破战斗部壳体通常采用铝合金、钢等惰性金属材料,其占战斗部的总重约 10%,如将惰性壳体材料换成活性材料,在保证强度的情况下,使活性壳体材料参与爆炸反应,可大幅提高战斗部的爆炸威力。国外

收稿日期: 2020-06-19; 修回日期: 2021-01-22

网络出版日期: 2021-01-27

作者简介: 郑腾(1970-),男,研究员,主要从事爆炸物理研究。

e-mail: ztcj@sohu.com

通信联系人: 胡宏伟(1982-),男,研究员,主要从事爆炸力学研究。

e-mail: hhw505@163.com

引用本文: 郑腾,梁晓璐,郑佳辰,等. 爆炸作用下 Al/Mg/CuO 活性壳体的释能特性[J]. 含能材料, 2021, 29(5):422-427.

ZHENG Teng, LIANG Xiao-lu, ZHENG Jia-chen, et al. Energy Release Characteristics of Al/Mg/CuO Reactive Shells Under Explosion Loads[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5):422-427.

已研发了 Al/Mg 基金属活性壳体<sup>[11]</sup>,其毁伤元主要为活性破片,壳体未参与爆炸反应,未能提高冲击波超压等威力性能。

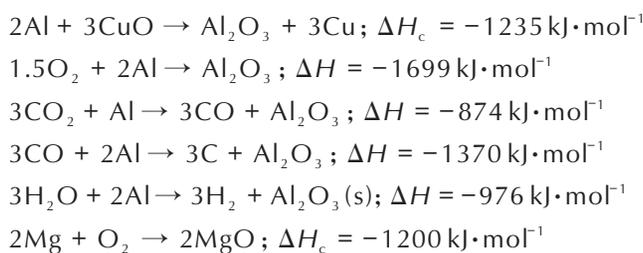
为此,本研究采用 Al、Mg、CuO 活性金属粉末为填充材料、纤维为衬层的复合材料为研究对象,开展活性壳体爆炸加载下释能特性试验,分析该活性壳体在爆炸过程中的反应时间范围和能量释放特性,研究活性材料粒度和壳体尺寸等对冲击波超压等性能的影响,为 Al/Mg 纤维复合活性壳体战斗部的设计提供理论支撑。

## 2 试验

### 2.1 材料与样弹

#### 2.1.1 活性材料

为了使活性材料参与爆炸反应,必须结合活性材料释放能量的大小、加工工艺以及爆炸环境选择活性材料。根据活性材料冲击释能研究,选择了 Al 和 Mg 作为活性材料;结合炸药的氧平衡设计理论,选择 CuO 作为氧化剂,纤维作为骨架材料,既可以保证强度,又可以参加反应,Al/Mg/CuO 在空气条件下发生了铝热反应,铝热反应不需要外界氧化剂参与反应,其自身在高温下就可以发生反应。Al 与 CuO/O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等发生反应。Mg 能够有效改善 Al 的燃烧性能。Al-Mg-CuO 体系活性材料发生的主要化学反应有:



#### 2.1.2 试验样弹

Al、Mg 及 CuO 活性颗粒首先进行机械研磨,再通过小型混合机与树脂进行搅拌混合,形成浸润混合料,然后以纤维为支撑体,通过浸润工艺,将 Al/Mg/CuO 浸润混合料充填在纤维缝隙内,最后加压固化。该工艺既可以保证壳体强度,又可以使壳体在爆炸强冲击作用下迅速破碎、分散并参与爆炸过程的化学反应释放能量。

设计了 9 个试验样弹,包括活性壳体样弹(1#、3#、5#、6#、7#)、铝壳体样弹(4#和 8#)和裸药柱(2#)三类,活性壳体密度 1.9 g·cm<sup>-3</sup>,铝壳体采用 2A12 铝合金材

料。样弹的装药均为聚奥铝炸药(95% HMX/5% 黏结剂),装药工艺为真空浇注,固化时间 3~5 天。其中 5# 样弹活性壳体材料粒径为 20 μm,1#、3#、6#、7# 活性壳体材料的粒径均为 7 μm。1# 样弹和 4# 样弹用于观察活性材料壳体的破碎过程,2#、3#、4# 样弹用于对比研究活性壳体的反应程度,5# 和 6# 样弹用于研究材料粒径大小对活性壳体能量输出特性的影响,7# 和 8# 样弹用于验证大尺寸样弹能量释放特性。

2# 样弹的结构如图 1 所示,其余样弹的结构如图 2 所示,铝壳体和活性壳体样弹分别如图 3a、3b 所示。

表 1 试验样弹参数

Table 1 Parameters of test bombs

Sample	Shell material	Shell formulation	D <sub>1</sub> /mm	D <sub>2</sub> /mm	H /mm	m <sub>1</sub> /kg	m <sub>2</sub> /kg	m <sub>1</sub> /m <sub>2</sub>
1#	reactive	Al/Mg/CuO	40	46	50	0.071	0.131	0.54
2#	charge	/	60	/	120	0.47	/	/
3#	reactive	Al/Mg/CuO	60	69	125	0.48	1.02	0.47
4#	aluminum	Al	60	67	125	0.48	1.0	0.48
5#	reactive	Al/Mg/CuO	60	69	123	0.45	0.99	0.45
6#	reactive	Al/Mg/CuO	60	69	123	0.46	1.0	0.46
7#	reactive	Al/Mg/CuO	200	220	400	4.5	27.5	0.16
8#	aluminum	Al	200	220	400	4.7	27.7	0.17

Note: D<sub>1</sub> is diameter of charge; D<sub>2</sub> is outer diameter of shell; H is height of test bomb; m<sub>1</sub> is quality of charge; m<sub>2</sub> is quality of test bomb.



图 1 裸药柱结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of bare charge

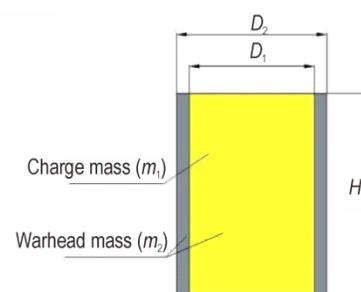


图 2 带壳体样弹结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of test bombs with shells

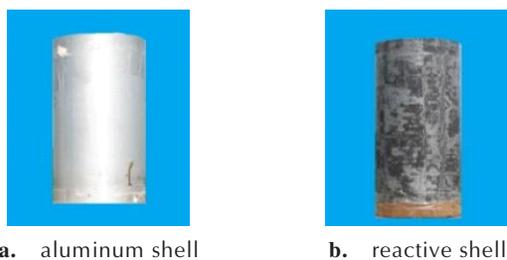


图3 铝壳体和活性壳体样弹

Fig.3 Diagram of test bombs with aluminum shells and reactive shells

## 2.2 试验布局

### 2.2.1 活性壳体的破碎试验

试验样品为1#号样弹, 样弹起爆方式为上端面中心点起爆, 装药起爆后, 爆轰产物强烈压缩壳体, 利用强光灯照射样弹, 并设置反光镜片, 通过超高速转镜摄像机(25×10<sup>4</sup> 幅/s)在另一方向拍摄活性壳体在爆炸加载作用下碎裂过程及形态。试验布局如图4所示。

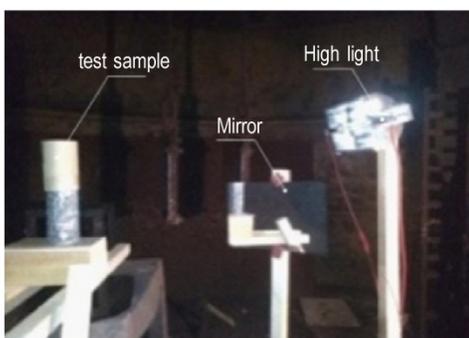


图4 壳体破裂试验场布局

Fig.4 Layout of a broken test of shells

### 2.2.2 活性壳体爆炸加载下释能试验

样弹固定在距地面1.5 m支架上, 2#~6#样弹设置1.5, 2.0, 2.5 m三个测试点, 试验布设情况如图5所示。7#和8#样弹设置3, 4, 6, 9, 12, 14, 18, 24 m共7个测量点, 试验布设情况如图6所示。传感器高度与样弹几何中心一致, 起爆方式为上端面中心起爆。

传感器为PCB137系列压力传感器, 量程0~3.45 MPa, 线性度≤1%, 数据采样速率≥1 MS·s<sup>-1</sup>, A/D

分辨率≥10 bit, 采样长度≥1 s。同时布设1台高速摄影仪, 高速摄影仪采集帧频为1×10<sup>4</sup>幅/s。

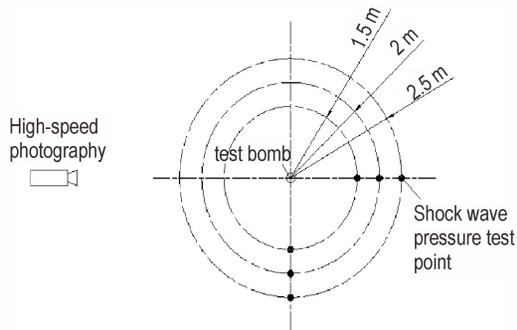


图5 小尺寸样弹(2#~6#)试验布局

Fig.5 Test layout of small size test bombs(2#-6#)

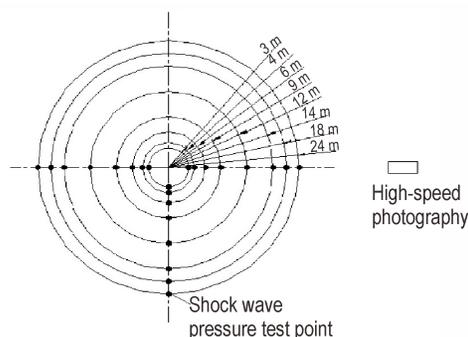


图6 30 kg级样弹(7#、8#)试验布局

Fig.6 Test layout of 30 kg test bombs(7# and 8#)

## 3 结果与讨论

### 3.1 爆炸加载作用下活性材料壳体的破碎过程

活性壳体(3#)和铝壳体样弹(4#)在爆炸加载作用下碎裂过程如图7a和图7b所示。

由图7可知, 活性壳体在炸药爆炸加载作用下能够破碎成微小粒子, 在高压炸药爆炸加载作用下, 活性壳体(图7a)呈现出均匀、细小的暗光点, 而铝壳碎裂(图7b)呈现出条状不均匀的亮带, 对比表明, 活性壳体碎裂成细小颗粒, 此时爆轰波阵面还没有和爆轰产物分离, 粉末状活性材料存在与爆轰产物混合并参与早期爆炸反应的可能。

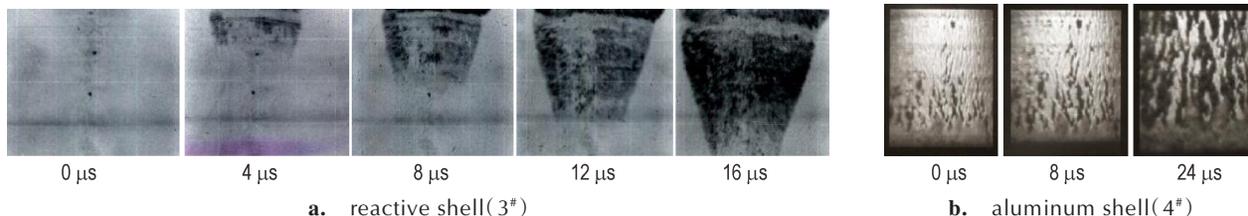


图7 活性壳体(3#)和铝壳体(4#)在爆炸加载下碎裂的高速摄像图片

Fig.7 High-speed images broken process of aluminum shell (3#) and reactive shell (4#) under explosion loads

### 3.2 活性材料壳体的释能反应时间尺度和释能特性

为了对比活性壳体的释能效果,对2<sup>#</sup>(裸药柱)、3<sup>#</sup>(活性壳体)和4<sup>#</sup>(铝壳)样弹开展了空中静爆试验。利用高速摄像机(采集帧频为1万幅/s)观察爆炸火球演化过程(图8),以验证活性材料壳体破碎后是否参加了爆炸反应,定性分析活性壳体材料的反应时间尺度。

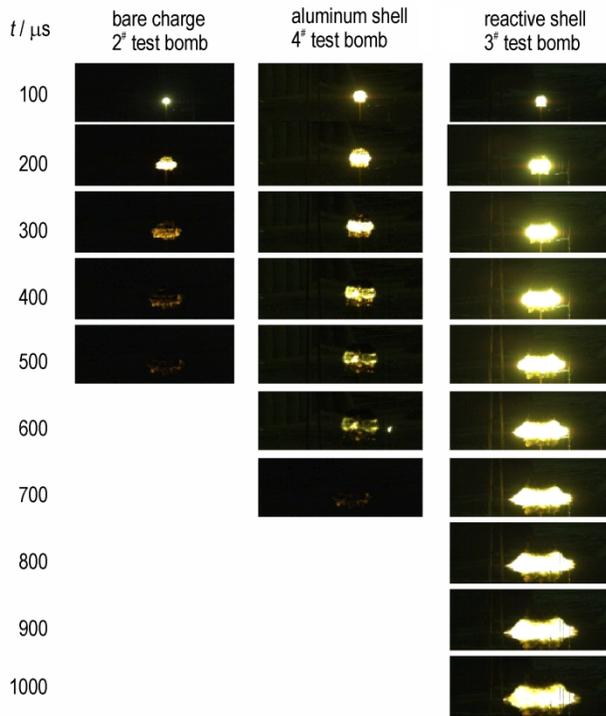


图8 高速摄像机拍摄的火球演化过程图像  
Fig.8 Evolution of fireballs recorded by a high-speed camera

由图8可看出,在爆炸加载作用下,200~1000 μs的时间范围,活性壳体样弹(3<sup>#</sup>)的爆炸火球大小、发光亮度均高于裸药(2<sup>#</sup>)和铝壳装药(4<sup>#</sup>),爆炸火球持续时间延长1倍以上,说明活性壳体破碎后参与了爆轰后燃烧反应。

2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>样弹的冲击波超压测试结果对比见表2。

由表2可知,与裸药(2<sup>#</sup>)相比,测试范围内,含铝壳体样弹(4<sup>#</sup>)冲击波超压均减少,原因为壳体的破碎消耗了爆炸能量。活性壳体样弹的冲击波超压出现了先低后高的特性,测试距离0~2.0 m(比例距离小于2.52 m·kg<sup>-1/3</sup>)范围内冲击波超压降低了3%~5%,测试距离2.5米处(比例距离3.15 m·kg<sup>-1/3</sup>)超压提高约12%。分析认为冲击波出现在近距离处较低,在远距离处较高的原因为:距爆心2.0 m以内,冲击波超压降低与活性材料参与爆炸反应时间有关,活性壳体破碎后需要与爆轰产物混合后才能参与反应,所以释放能量的时间相对滞后<sup>[12]</sup>,在比例距离2.52~3.15 m·kg<sup>-1/3</sup>范围内,

活性材料开始参与爆炸反应,冲击波超压提高。

表2 2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>号样弹的冲击波超压对比

Table 2 Comparison of shock wave overpressures of 2<sup>#</sup>-4<sup>#</sup> test bombs

R/m	$\bar{R}$	$\Delta p_2$ /MPa	$\Delta p_3$ /MPa	$\delta_3$ /%	$\Delta p_4$ /MPa	$\delta_4$ /%
1.5	1.89	0.588	0.559	-4.9	0.557	-5.3
2.0	2.52	0.215	0.208	-3.2	0.203	-5.5
2.5	3.15	0.104	0.117	12.5	0.100	-3.8

Note: subscripts 2, 3 and 4 represent 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> and 4<sup>#</sup> test bombs;  $\bar{R}$  is scaled distance;  $\delta$  is gain of shock wave overpressures.

### 3.3 活性材料粒度对爆炸加载反应释能特性的影响

活性壳体材料的粒度对其爆炸反应释能特性具有重要影响,利用5<sup>#</sup>(20 μm)和6<sup>#</sup>(7 μm)两种不同粒度的活性壳体样弹开展了爆炸加载下反应释能试验,其冲击波超压对比见表3。

表3 两种不同粒径的活性壳体样弹冲击波超压对比

Table 3 Comparison of overpressures of test bombs with reactive shells of two particle sizes

R/m	$\bar{R}$	$\Delta p_6$ /MPa	$\Delta p_5$ /MPa	$((\Delta p_6 - \Delta p_5) / \Delta p_5) / \%$
1.5	1.89	0.515	0.516	0
2.0	2.52	0.221	0.195	13.3
2.5	3.15	0.119	0.104	14.4

Note:  $\Delta p_5$  -shock wave overpressure of 5<sup>#</sup> test bomb;  $\Delta p_6$  -shock wave overpressure of 6<sup>#</sup> test bomb

由表3可知,当活性材料的粒径由20 μm减小到7 μm时,测试距离1.5m处活性壳体可能还未参与反应,冲击波超压未提高;测试距离2.0~2.5 m(比例距离2.52~3.15 m·kg<sup>-1/3</sup>)的范围,活性壳体破碎形成了颗粒参与了爆炸反应,与粒径20 μm(5<sup>#</sup>)活性材料壳体相比,粒径7 μm(6<sup>#</sup>)活性材料壳体冲击波超压提高了13.3%~14.4%,可见较小粒径的活性材料由于比表面积更大,更容易与爆轰产物反应。

### 3.4 活性壳体样弹的爆炸加载释能特性验证

由于2<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>样品均为公斤量级,为了研究活性壳体的尺寸及体积效应对其能量释放的影响,所以采用7<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>样弹,进一步开展了30 kg级活性与铝壳体样弹的释能试验,其冲击波超压和冲量对比见表4。

由表4可知,在相同尺寸下,活性壳体(7<sup>#</sup>)相比于铝壳体(8<sup>#</sup>)样弹在各测试距离上冲击波超压均有较大提升,距爆心6~18 m(比例距离2.1~6.3 m·kg<sup>-1/3</sup>)内,超压增幅18%以上,冲量增幅19%以上;在比例距离

8.4 m·kg<sup>-1/3</sup>处,超压增幅6%,冲量增幅13%。

两种30 kg样弹(7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>)不同距离的冲击波超压和冲量的变化曲线如图9和图10所示。

表4 30 kg活性与铝壳体样弹冲击波超压及冲量对比

Table 4 Comparison of overpressures and impulses of test bombs with reactive shells and aluminum shells

R/m	$\bar{R}$	$\Delta p_8/\text{MPa}$	$\Delta p_7/\text{MPa}$	$\delta_p/\%$	$I_8/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$I_7/\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\delta_i/\%$
6	2.1	0.449	0.552	23	351.35	484.9	38
9	3.15	0.150	0.198	32	233.65	322.4	38
12	4.21	0.066	0.087	32	212.15	277.9	31
14	4.91	0.054	0.066	23	174.45	208.3	19
18	6.31	0.039	0.046	18	138.9	175	26
24	8.41	0.026	0.027	6	103.55	116.8	13

Note: subscripts 7 and 8 represent 7<sup>#</sup> and 8<sup>#</sup> test bombs;  $\bar{R}$  is scaled distance;  $\delta_p$  is gain of shock wave overpressures;  $\delta_i$  is gain of impulses.

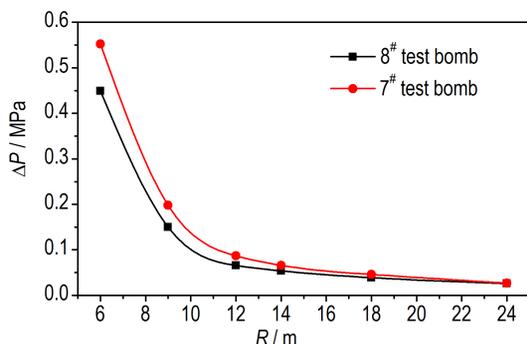


图9 7<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>样弹冲击波超压随测试距离的变化曲线

Fig.9 Overpressure vs. distance curves of 7<sup>#</sup> and 8<sup>#</sup> test bomb

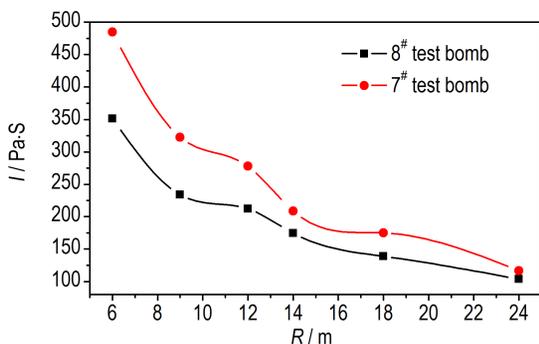


图10 7<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>样弹冲量随测试距离的变化曲线

Fig.10 Impulse vs. distance curves of 7<sup>#</sup> and 8<sup>#</sup> test bomb

由图9、图10可知,活性壳体样弹在测试距离范围内冲击波超压和冲量均有所增加,验证了3.2节和3.3节的试验结果。

## 4 结论

(1) 活性材料能够在爆炸加载下快速碎裂并在爆

轰膨胀阶段参加反应。对于千克级样弹,活性壳体样弹与裸药相比,活性壳体样弹的冲击波超压出现了近距离低、远距离高的特性。活性壳体释放能量时间相对于爆轰反应有微秒级延迟,在比例距离2.52~3.15 m·kg<sup>-1/3</sup>之间,活性材料逐步参与爆炸反应,冲击波超压逐渐提高;并且与铝壳体样弹相比,其火球持续燃烧时间提高1倍以上。

(2) 活性材料粒径对释能的反应有显著影响,活性材料的粒径由20 μm减小到7 μm时,冲击波超压提高了13.3%~14.4%,较小粒径的活性材料更容易与爆轰参物反应。

(3) 相比铝壳体战斗部,以30 kg活性壳体样弹为例,在比例距离超过2.1 m·kg<sup>-1/3</sup>时,活性壳体冲击波超压提高较大,最低为18%,随着比例距离增加到6.3 m·kg<sup>-1/3</sup>以上时,冲击波超压随着距离的增加而逐步减小,到比例距离8.4 m·kg<sup>-1/3</sup>处,其冲击波超压仅提高了6%。

## 参考文献:

- [1] Baker E L, Daniels A S, Ng K W. Barnie: a unitary demolition warhead[C]//19th International Symposium on Ballistics, Inter-laken, Switzerland, 2001.
- [2] Michael T R, Daniel W D, James R H, et al. Reactive material enhance projectiles and related methods: US, 0299323 [P]. 2005.
- [3] Nielson D B, Ashcroft B N, Doll D W. Reactive material enhanced munition compositions and projectiles containing same [P]. US: 12/127627, 2008-5-27.
- [4] 阳世清,徐松林,张彤. PTFE/A1反应材料制备工艺及性能[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 39-42. YANG Shi-qing, XU Song-lin, ZHANG Tong. Preparation and performance of PTFE/A1 reactive materials[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2008, 30(6): 39-42.
- [5] Ames R G. Energy release characteristics of impact initiated energetic materials[C]//Proceeding of Materials Research Society Symposium. Boston: Naval Surface Warfare Center, 2006: 78-83.
- [6] Alexander Y D, Michael N M. Detonation in metal—teflon mechanoactivated composites[C]//Proceedings of The 13th International Detonation Symposium. Norfolk, Virginia: [s.n.], 2006: 167-175.
- [7] Lee R J, Willis M J, Carney J R, et al. Reactive materials studies [C]//Shock Compression of Condensed Matter. Los Angeles: American Physical Society, 2005: 92-96.
- [8] 王海福,刘宗伟,俞为民,等. 活性破片能量输出特性实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(8): 663-666. WANG Hai-fu, LIU Zong-wei, YU Wei-min, et al. Experimental investigation of energy release characteristics of reactive fragments[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(8): 663-666.
- [9] 李旭锋. 含能破片对模拟战斗部的引爆机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.

- LI Xu-feng. Research on initiation mechanism of energetic fragments to warheads[D]. Nanjing: School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [10] 陈进,袁宝慧,梁争峰,等. 活性材料能量释放特性实验评估方法[J]. 火炸药学报, 2015, 38(3):49-53.
- CHEN Jin, YUAN Bao-hui, LIANG Zheng-feng, et al. An Experimental evaluation method of energy release characteristics of reactive materials[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2015, 38(3):49-53.
- [11] 宋玉强,李世春,耿相英,等. Al/Mg扩散层的形成规律和机理[J]. 焊接学报, 2011, 40(5): 421-428.
- SONG Yu-qiang, LI Shi-chun, GENG Xiang-ying, et al. Forming rule and mechanism of Al/Mg diffusion layer[J]. *Journal of Welding*, 2011, 40(5): 421-428.
- [12] 彭翠枝,张培,范夕萍,等. 世界火炸药技术发展分析. 北京:兵器工业出版社, 2014.
- PENG Cui-zhi, ZHANG Pei, FANG Xi-ping, et al. The technique analyses of world explosives & propellants[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2014.

## Energy Release Characteristics of Al/Mg/CuO Reactive Shells Under Explosion Loads

ZHENG Teng<sup>1</sup>, LIANG Xiao-lu<sup>1</sup>, ZHENG Jia-chen<sup>2</sup>, ZHAO Xiang-jun<sup>1</sup>, JIA Yu<sup>1</sup>, HU Hong-wei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to study the energy release characteristics of Al/Mg/CuO reactive shells, the images of broken process of reactive shells were observed by an ultra-high-speed rotating-mirror camera, and the shock wave overpressures of varying-sized test bombs were measured by shock wave test system. The reaction time of reactive shell under explosion loads and the effects of particle sizes of reactive materials on shock wave overpressures were analyzed, then the variation of shock wave overpressures with scaled distances was obtained. The results show that reactive shells could take part in explosive reaction and release energy in a few microseconds after detonation reaction. The shock wave overpressures are enhanced and the fireball duration increases more than one time within a scaled distance of 2.52-3.15 m·kg<sup>-1/3</sup>. The overpressure of reactive shell with particle size of 7 μm is 13.3%-14.4% higher than that of reactive shell with particle size of 20 μm, which indicates that reactive materials with smaller particle size can take part in explosive reaction more easily. Compared to bare charges and aluminum shells, the overpressures and impulses of reactive shells rise significantly, increasing 6%-32% and 13%-38% respectively within scaled distances of 2.1-8.4 m·kg<sup>-1/3</sup>.

**Key words:** Al/Mg/CuO reactive material; reactive shell; explosion load; energy release characteristic; shock wave overpressure; impulse

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2020147

(责编:王艳秀)