DOI: 10.11883/bzycj-2016-0209 文章编号: 1001-1455(2018)02-0367-06

复合装药空气中爆炸冲击波传播特性*

李 梅,蒋建伟,王 昕
(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 为了研究复合装药超压爆轰时的径向能量输出特性,选择典型的 TNT、JO-8、海萨尔等理想、非理想高能炸药,进行了单一装药、内外层复合装药冲击波超压测试实验。采用自由场压电传感器测量了距爆心 2、3、4 m 处的冲击波压力,通过 Origin 软件对实验数据进行去除"零漂"和积分处理,获得了冲击波超压、冲量随距离的变化规律,分析了装药结构、装药类型对实验结果的影响。研究结果表明:与同体积单一装药相比,内外层复合装药对提高径向冲击波超压无优势,但对径向冲击波冲量增益显著,且冲量随传播距离的增加而增大;装药类型对内外层复合装药径向冲击波冲量增益影响较大,非理想/理想复合装药在 4 m 处的冲量增益大于 20%,比理想/理想复合装药更有利于提高战斗部的径向输出威力。

关键词: 复合装药;冲击波;传播;超压;冲量
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

提高弹药毁伤威力一直是研究者不断追求的目标,在装药类型、加工工艺一定的情况下,弹药威力与装药结构密切相关。复合装药是近年来的热点研究问题之一,它是将两种或多种炸药采用内外层、上下层叠加等装药结构方式组合起来的一种装药结构,在低易损性战斗部、可选择战斗部以及高效毁伤战斗部中均展现出了可观的应用前景。

研究人员围绕复合装药在聚能、爆破、可选择战斗部中的应用问题均展开了研究。Andrews 等[1]通过圆筒试验发现,低爆速非理想/高爆速理想复合装药与高爆速炸药的膨胀速度几乎相同。Kato 等[2-3]研究了加钨粉的高密度炸药和高爆速炸药组成的复合装药结构,发现复合装药爆速明显提高,压强提高了两倍多。Zhang 等[4]和张先锋等[5-6]指出内外层复合装药的内层装药形成了较为明显的超压爆轰现象,爆轰压力最高可达 65 GPa,远远大于炸药的 CJ 爆轰压力。向梅[7]和章少方[8]指出外层为钝感炸药与内层为高能炸药的复合装药,能够得到比单一钝感炸药较高的能量输出。Mayseless 等[9]研究了内外层复合装药聚能射流的形成特性,发现复合装药聚能射流的头部速度提高约 30%。Colclough[10]提出了一种可选择战斗部装药结构,通过 2 种起爆模式实现"高静态超压+后燃效应"和"高冲击波超压+高破片速度"2 种毁伤模式。Slyke 等[11]通过数值模拟研究指出内外层复合装药半径比对轴线处爆速影响较大,当外层装药厚度小于 2 mm 时,中心线爆速基本不变。

以上文献显示,复合装药可以实现炸药的低易损性要求,可以提高聚能射流的头部速度,提高炸药的轴向驱动能力。但是,复合装药在提高径向输出威力及射流侵彻能力方面仍有待研究。本文中通过单一、内外层复合装药的冲击波超压测试实验,探索理想/理想复合装药、非理想/理想复合装药与单一理想、非理想装药的冲击波超压、冲量等特性参数,评价复合装药的径向输出威力。

1 实验设计

1.1 实验原理及场地布置

实验系统组成及现场布置如图 1 所示,由试验弹、冲击波超压测试系统(压电传感器、电荷放大器、数据采集仪)、支架、起爆系统等组成。试验弹由圆柱形主装药(TNT、JO-8、TNT/JO-8、海萨尔、海萨

* 收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-12-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(11502020)
第一作者: 李 梅(1984—),女,博士,讲师; 通信作者: 蒋建伟,bitjjw@hit.edu.cn。

尔/JO-8)、传爆药(JH-2)、8#电雷管、雷管座等组成。试验弹直立放置在高 1.5 m 的弹架上,在距离药柱轴心 2、3、4 m 处分别布置 2 个压电传感器,传感器与试验弹中心位于同一水平面。采用 CY-YD-202 型自由场压电传感器、YE6601 型电荷放大器及配套的 32 通道 PCI-506112 型数据采集仪器记录爆炸冲击波压力。试验弹体周围缠绕铜丝,装药起爆后,铜丝断裂,产生断靶信号,触发数据采集仪,记录冲击波压力随时间的变化曲线。

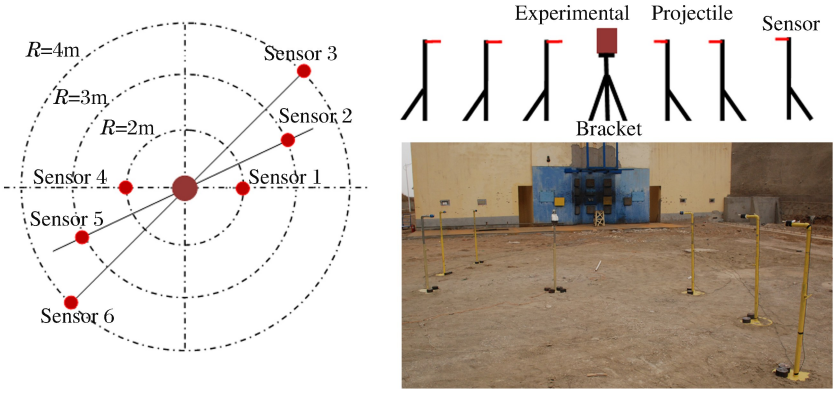


图 1 冲击波超压测试现场布置图

Fig. 1 Schematic diagram of the shock wave overpressure test setup

1.2 实验方案

实验工况如表 1 所示。实验包含单一 TNT 装药、单一 JO-8 装药、单一海萨尔装药、TNT/JO-8 复合装药、海萨尔/JO-8 复合装药 5 个工况,由于单发实验存在数据跳动,其中 3 个工况进行了重复实验。试验弹主装药为等体积圆柱形药柱,药柱直径 56 mm,高度 60 mm,TNT、JO-8 和海萨尔的装药密度分别为 1.58、1.83、1.87 g/cm^3。TNT/JO-8 复合装药为外层圆柱形装药结构,内层装药为 TNT 或海萨尔,外层为 JO-8,内层装药直径∅44.8mm,外层装药直径 56 mm。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental conditions

工况	装药结构	装药类型		实验次数/发
		中心	外层	
1	单一装药	TNT		2
2	单一装药	JO-8		2
3	单一装药	海萨尔		1
4	内外复合装药	TNT	JO-8	2
5	内外复合装药	海萨尔	JO-8	1

2 实验结果

数据采集仪记录的冲击波压力曲线存在不同程度的“零漂”现象,采用 Origin 软件进行消除“零漂”处理,获得了 5 种工况下不同距离处的冲击波超压曲线,如图 2 所示。

由图 2 可以看出,冲击波曲线出现了强反射波现象,产生这现象的原因为:实验中用于固定传感器的支架为钢管(见图 1),其断面为刚性壁面且直径较大,使得入射冲击波产生刚性壁面反射,反射波作用于压电传感器敏感面,获得的冲击波出现强反射波现象,但反射波对冲击波超压数据并无影响。

此外,实验获得的部分冲击波波形出现了“削峰”现象。剔出被“削峰”数据,对重复性实验获得的冲击波超压取平均值,得到 5 种装药在 2、3、4 m 处的峰值超压 Δp_2、Δp_3、Δp_4,如表 2 所示。

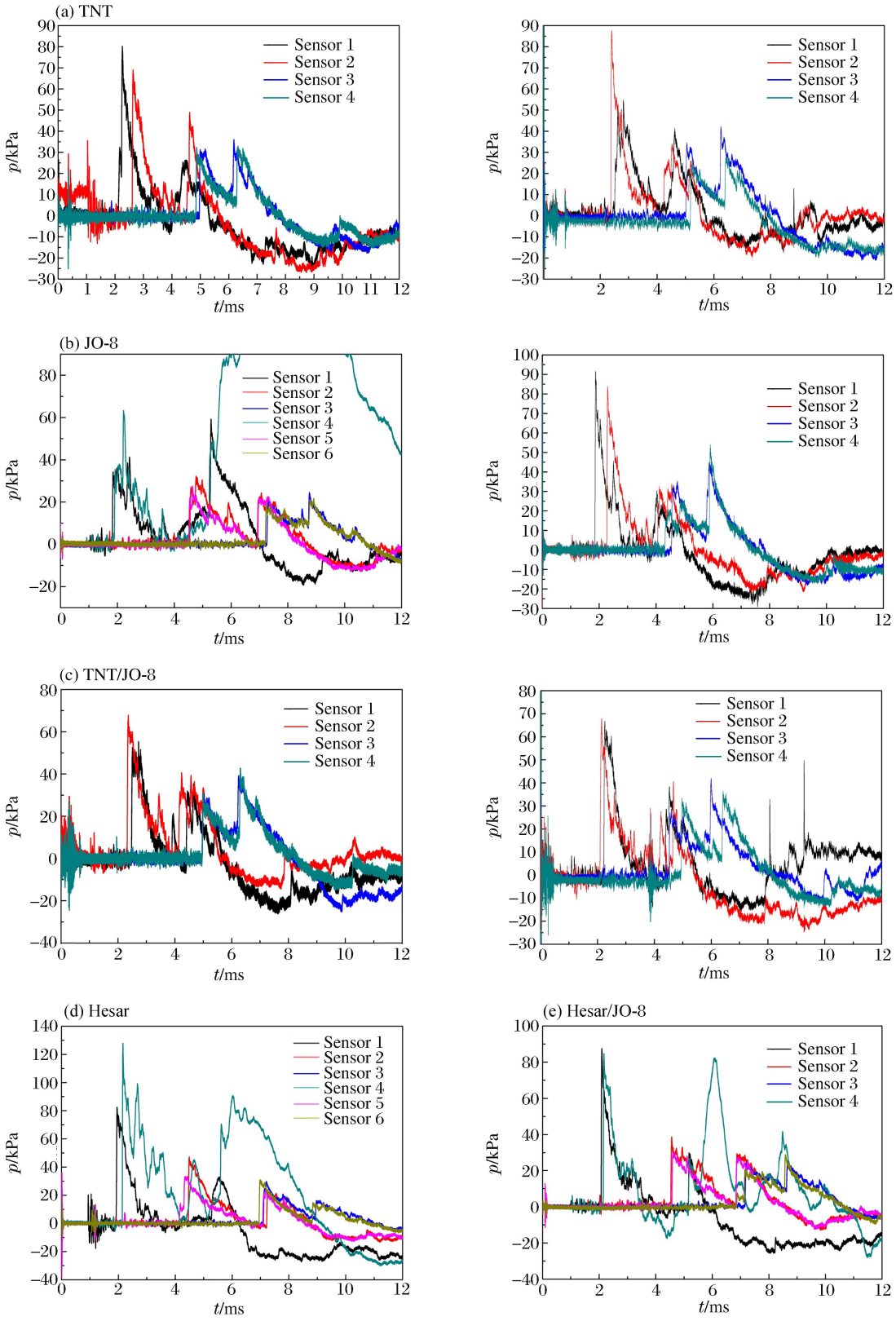


图 2　冲击波超压随时间的变化曲线

Fig. 2　Shock wave overpressure varying with time

表 2 冲击波超压测量结果

Table 2 Measured results of shock wave overpressure

工况	Δp_2/MPa			Δp_3/MPa			Δp_4/MPa		
	测量值 1	测量值 2	平均值	测量值 1	测量值 2	平均值	测量值 1	测量值 2	平均值
1-1	0.080 6	0.069 0	0.074 8	0.031 5	0.032 5	0.032 0	--	--	--
1-2	0.087 4	--	0.087 4	0.034 7	0.027 1	0.030 9	--	--	--
2-1	--	--	--	0.030 9	0.027 8	0.029 4	0.020 4	0.018 5	0.019 4
2-2	0.091 1	0.083 8	0.087 4	0.035 9	--	0.035 9	--	--	--
3	0.075 8	0.127 8	0.101 8	0.047 5	0.031 1	0.039 3	0.029 7	0.022 3	0.026 0
4-1	--	0.068 1	0.068 1	0.031 0	0.031 1	0.031 1	--	--	--
4-2	0.068 0	0.067 8	0.067 9	0.028 9	0.033 2	0.031 0	--	--	--
5	0.086 6	0.083 3	0.085 0	0.037 9	0.029 5	0.033 7	0.023 6	0.020 9	0.022 3

3 分析与讨论

3.1 冲击波超压随距离的变化

记录各工况下,冲击波超压平均值及复合装药相对单一装药冲击波超压增益,如表 3 所示。由表 3 可知:(1) 理想/理想复合装药(TNT/JO-8)与同体积单一装药(TNT、JO-8)相比,在 2 m 距离处,冲击波超压下降约 20%,在 3 m 距离处,冲击波超压相当;(2) 非理想/理想复合装药(海萨尔/JO-8)与同体积单一 JO-8 装药相比,随着距离的增加,冲击波超压增量越大,在 4 m 距离处,冲击波超压增加 15%,与同体积单一海萨尔装药相比,冲击波超压下降约 15%。结果表明:复合装药结构对提高战斗部径向冲击波超压无明显优势。

表 3 冲击波超压及其增益

Table 3 Shock wave overpressure and gain

距离/m	冲击波超压/MPa					复合装药冲击波超压增益/%			
	TNT	JO-8	TNT /JO-8	海萨尔	海萨尔 /JO-8	TNT/JO-8 比 TNT	TNT/JO-8 比 JO-8	海萨尔/JO-8 比海萨尔	海萨尔/JO-8 比 JO-8
2	0.081 1	0.087 4	0.068 0	0.101 8	0.085 0	−16	−22	−17	−3
3	0.031 5	0.032 7	0.031 1	0.039 3	0.033 7	−1.3	−1.2	−14	3
4	--	0.019 4	--	0.026 0	0.022 3	--	--	−14	15

3.2 冲击波冲量随距离的变化

对冲击波超压曲线进行积分,获得各工况下,冲击波冲量平均值及复合装药相对单一装药冲击波冲量增益,如表 4 所示。由表 4 可知:(1) 理想/理想复合装药(TNT/JO-8)相比单一装药(TNT、JO-8),在 2 m 距离处,冲击波冲量增益约−10%,在 3 m 距离处,冲击波冲量增益约+5%;(2) 非理想/理想复合装药(海萨尔/JO-8)相比单一海萨尔装药,2 m 距离处冲击波冲量为负增益,3～4 m 处为正增益,且随距离的增加增益量增加,而在 4 m 距离处冲击波增益约+20%;(3) 非理想/理想复合装药(海萨尔/JO-8)相比单一 JO-8 装药,冲击波冲量增益大于+10%,且距离越远增益越大,3 m 处冲击波冲量增益约+25%。结果表明:采用复合装药结构后,相同距离处冲击波冲量相比单一装药提高,且随距离的增加,冲量增益逐渐增大。而且,采用非理想/理想复合装药,更有利于提高战斗部的径向输出威力。

3.3 结果分析

由 3.1 和 3.2 节可知,与同体积单一装药相比,内外层复合装药的径向冲击波超压无明显优势,但冲击波冲量显著增加,且采用非理想/理想复合装药更有利于提高冲击波冲量。产生这一现象与复合装药结构和非理想炸药自身的特点密切相关,具体分析如下。

表 4 冲击波冲量及其增益

Table 4 Shock wave impulse and gain

距离/m	冲击波冲量/(Pa·s)					复合装药冲击波冲量增益/%			
	TNT	JO-8	TNT/JO-8	海萨尔	海萨尔/JO-8	TNT/JO-8比TNT	TNT/JO-8比JO-8	海萨尔/JO-8比海萨尔	海萨尔/JO-8比JO-8
2	34.4	36.2	31.4	68.4	40.5	−8.7	−13	−40.8	11.9
3	26.5	26.3	27.7	33.4	37.4	4.5	5.3	12	25.5
4	--	--	--	24.4	29.4	--	--	20.5	--

(1) 内外层理想/理想复合装药的径向冲击波超压无增益。复合装药主要是利用内外层炸药的爆速差，是内层装药在轴线方向产生超压爆轰，增强其轴向的能量输出，但基于能量守恒的原则，轴向输出能量提高，径向输出能量必然降低，因此在复合装药结构下，其径向冲击波超压相比单一高能装药反而降低。

(2) 内外层复合装药有利于提高径向冲击波冲量。复合装药利用其内外层炸药爆速的不同，使内层炸药产生超压爆轰，且外层装药爆轰后，部分爆轰产物侧向运动，增强了对内层装药的约束。在外层炸药的约束下，外侧稀疏波进入较晚，使得冲击波压力随时间、距离的衰减速度减慢，进而提高冲击波的冲量，即提高了战斗部的能量释放率。

(3) 非理想/理想复合装药更有利于提高冲击波冲量。非理想炸药中的铝粉主要是在 C-J 面之后参加反应，且反应过程在爆轰产物膨胀过程中逐渐完成[12]。因此，在复合装药结构约束的基础上，冲击波持续时间越长，使得参加反应的铝粉越多且燃烧越充分，进一步提高了战斗部的能量释放率，冲击波冲量的增益更显著。

4 结　论

通过冲击波超压测试实验，得到了 TNT/JO-8 复合装药、海萨尔/JO-8 复合装药、TNT、装药、JO-8 装药、海萨尔装药在距爆心 2、3、4 m 处的冲击波超压曲线，通过积分获得了相应距离处的冲击波冲量，经分析获得主要结论如下：

(1)复合装药结构能够减缓战斗部径向冲击波压力的衰减速度，能够提高远距离处冲击波冲量，增大杀伤威力；

(2)非理想/理想复合装药比理想/理想复合装药更有利于提高战斗部的径向输出威力，且其径向冲击波冲量增益随距离的增加而增大。

参考文献：

[1] ANDREWS S, GLANCY B, FORBES J, et al. Experiments on the modification of the energy release rate in a non-ideal[J]. AIP Conference Proceedings, 1996,370:799-802.

[2] KATO H, MURATA K, ITOH S, et al. Application of overdriven detonation in high density explosive to shaped charge[C]// GALVEZ F, SANCHEZ-GALVEZ V. 23rd International Symposium On Ballistics. Tarragona, Spain: IBC, 2007:223-230.

[3] KATO H, MURATA K, ITOH S, et al. Investigation of jet formation with overdriven detonation in high density explosive[J]. Materials Science Forum, 2008,566:327-332.

[4] ZHANG X, HUANG Z, QIAO L. Detonation wave propagation in double-layer cylindrical high explosive charges [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2011,36(3):210-218.

[5] 张先锋，赵晓宁. 夹层装药的超压爆轰研究综述[J]. 含能材料，2011，19(3)：352-360.
ZHANG Xianfeng, ZHAO Xiaoning. Review on overpressure detonation of intercalated charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011,19(3):352-360.

[6] 张先锋，丁建宝，赵晓宁. 夹层聚能装药作用过程的数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2009，29(6)：617-624.

ZHANG Xianfeng, DING Jianbao, ZHAO Xiaoning. Numerical simulation of the process of sandwich shaped charge[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(6):617-624.

[7] 向梅.复合装药的安全性及能量输出特性研究[D].南京:南京理工大学,2012.

[8] 章少方.复合装药爆轰能量输出及冲击波感度的数值模拟研究[D].南京:南京理工大学,2010.

[9] MAYSELESS M, HIRSCH E, HARVEY W B, et al. Is higher detonation velocity needed for shaped-charges[C]//BAKER E, TEMPLETON D. 26th International Symposium on Ballistics. Miami, FL, United States: DEStech Publications Inc., 2011:155-166.

[10] COLCLOUGH M E. A novel tuneable effects explosive charge[C]//2012 NDIA IM&EM Symposium. Las Vegas, NV: Nation Defense Industrial Association, 2012:124-134.

[11] SLYKE J V, LUDWIG W, GAMBLE J, et al. Effect of convergent detonation on gurney energy and cylinder expansion[C]// WICKERT M, SALK M. 27th International Symposium On Ballistics. Freiburg, Germany: DEStech Publications Inc., 2013:22-26.

[12] 计冬奎,高修柱,肖川.含铝炸药作功能力和JWL状态方程尺寸效应研究[J].兵工学报,2012,33(5):552-555.
JI Dongkui, GAO Xiuzhu, XIAO Chuan. Study on dimension effect of accelerating ability and JWL equation of state for aluminized explosive[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(5):552-555.

Shock wave propagation characteristics of double layer charge explosion in the air

LI Mei, JIANG Jianwei, WANG Xin

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: This paper studies the radial energy output of double-layer charge overpressure detonation based on the tests of single charge and double-layer charge explosion carried out on shock wave overpressure using ideal and non-ideal explosive of TNT, JO-8 and Hesar. The shock wave overpressure at 2, 3, 4 m was measured using the free filed piezoelectric sensor. The pattern of the shock wave overpressure and impulse varying with the distance was obtained by eliminating the zero-drift and integrating the software Origin. The effect of the charge structure and material was also examined. The results show that the overpressure of TNT/JO-8 double-layer charge in the radial direction was not improved as compared with the single charge with the same volume while the shock wave impulse exhibited a positive gain and increased with the distance. The material selection for the double-layer charge has great influence on the shock wave impulse. The overpressure gain at 4 m was about 15% for the non-ideal/ideal charge, which is much more beneficial in the radial output than for the ideal/ideal charge.

Keywords: double layer charge; shock wave; propagate; overpressure; impulse.

(责任编辑 王小飞)