DOI: 10.11858/gywlxb.20190735

组合装药的撞击安全性与内爆威力试验研究

张广华,屈可朋,沈 飞,王 辉

(西安近代化学研究所,陕西西安 710065)

摘要:为了验证某组合装药的撞击安全性与内爆威力,开展了组合装药的大型落锤试验及爆炸罐内爆威力试验研究。结果表明:单一温压炸药在400 kg 落锤作用下的临界落高为2.2 m, 组合装药分别在2.2、2.3、2.5 和2.7 m 落高时均未发生爆炸反应,证明组合装药具有更好的撞击 安全性;组合装药的初始冲击波超压峰值是单一温压炸药的61.9%,比冲量是单一温压炸药的 99.4%,准静态压力峰值是单一温压炸药的94.5%。考虑到炸药在有限空间内爆炸的能量释放 特性,将准静态压力峰值作为威力评价标准更为合适。试验结果证明组合装药的内爆威力与单 一温压炸药相当。

关键词:组合装药;撞击安全性;内爆威力;比冲量;准静态压力

中图分类号:TJ55;O389 文献标识码:A

随着弹药技术的不断发展,弹药在储存、使用等过程中的安全性要求日益提高,不敏感弹药设计 受到越来越多的关注。组合装药技术是降低弹药敏感性的重要技术手段之一,与研制新型不敏感炸药 相比,通过对现有炸药进行合理的组合设计以提高装药的安全性具有更灵活、更实用的特点,同时还能 在提升装药安全性的前提下保证装药较高的威力。

国内外先后针对组合装药技术开展了许多研究工作^[1-6],例如:美国开展了由B2249/WFQ组成的复合装药结构的相关研究,证明了该复合装药不仅具有较低的敏感性,同时爆炸威力也得到了显著的提升;向梅等^[7-8]研究了由钝感炸药和高能炸药组成的复合装药在冲击波和枪击作用下的响应特性,证明该复合装药结构可以提升整体装药的安全性;尹俊婷等^[9]研究了3种金属加速/高爆热复合装药的能量输出特性,通过试验验证了其破片驱动能力及冲击波超压特性;牛余雷等^[10]选择GH-1和GUHL-1两种炸药,采用内外层和上下叠加两种典型的组合装药结构,测量了组合装药水下冲击波的超压时程曲线,得到了组合装药的水下爆炸能量输出特性;屈可朋等^[11]和肖玮等^[12]通过大型落锤试验获取了RDX基炸药在不同应力率加载下的力学响应特性及反应情况,探讨了应力率对炸药撞击安全性机理的影响。

综上所述,国内外关于组合装药开展了较多相关研究,但多数只关注装药安全性或爆炸威力等某 一方面,很少有文献对同一组合装药的安全性及爆炸威力进行同步分析。本研究以某温压战斗部用组 合装药为研究对象,开展大型落锤试验及爆炸罐内爆试验,并将试验结果与单一温压炸药的安全性及 威力性能数据进行比较,对比分析该组合装药的安全性及内爆威力。

1 装药安全性

1.1 试验装置

采用西安近代化学研究所的大型落锤试验系统作为加载源,模拟装药发生意外跌落、发射、穿甲时的受力环境,进行装药的撞击安全性研究。试验装置主要包括:落锤、轨道、爆炸室、试验样品、压

 ^{*} 收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-03-18
 基金项目: 国防基础科研专项(05020501)
 作者简介: 张广华(1987-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事毁伤理论与技术研究. E-mail: guanghua0611@sina.com
 通信作者: 王 辉(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事炸药爆轰性能研究. E-mail: land_wind@163.com

力传感器、防护掩体等。其中,落锤质量为400kg, 通过调节落高使其在一定高度自由下落对试验 药柱进行冲击加载,如图1所示。试验过程中,落 锤通过活塞对样品进行冲击加载,利用压力传感 器和记录仪记录炸药的受力过程。

1.2 试验样品和试验方法

试验样品分为 2 种,均由西安近代化学研究 所提供。试样 1 为普通 HMX 基温压炸药(HA-1), 主要由 HMX、铝粉和黏结剂组成,质量分数分别 为 65%、30% 和 5%,通过压装工艺成型,尺寸为 Ø40 mm×40 mm,密度为 1.85 g/cm³;试样 2 为组合 装药,包括高能炸药和不敏感炸药两部分,高能 炸药选用 HA-1,不敏感炸药的选择应在满足不敏 感要求的前提下具有较高能量,因此选用某 RDX 基不敏感炸药(RAP-1),主要由 RDX、铝 粉、高氯酸铵(AP)、黏结剂及增塑剂组成,质量 分数分别为 30%、31%、28%、5%、6%,浇注成型, 密度为 1.82 g/cm³。落锤试验中组合装药的排布 如图 2 所示:上部为 RAP-1,下部为 HA-1,药柱尺 寸均为Ø40 mm×20 mm。

试验时,首先对试样1进行加载,通过调整 落锤高度,获取试样1发生爆炸时的临界落高 h_l, 然后以 h_l 作为试样2的落锤落高对其进行加载, 观察试样2的反应情况。

1.3 试验结果及分析

通过对试样1进行落锤加载试验,得到其发 生爆炸时的临界落高为2.2m,相同工况下,B炸



图 1 落锤试验装置示意图





药的临界落高为 1.75 m^[12]。试样 1 的典型加载曲线如图 3 所示,其中图 3(a)为未发生爆炸反应的加载曲线,图 3(b)为发生爆炸反应的加载曲线。



图 3 典型落锤加载曲线

Fig. 3 Typical loading curve of drop hammer

将落锤高度 h 分别设定为 2.2、2.3、2.5 和 2.7 m, 加载组合装药试样 2。为避免试验结果的 随机性, 每种高度各进行 2 次试验, 加载结果如 _ 表 1 所示, 其中 σ 为加载应力, 炸药均未发生爆炸。_

分析落锤试验结果可知:采用组合装药可以 提升装药的撞击安全性,这是由于组合装药由撞 击感度相对较高的 HA-1 和撞击感度相对较低的 RAP-1 组成,与单一温压炸药相比,当落锤以相同 落高作用于组合装药时,加载应力首先作用于具 有较低撞击感度的 RAP-1,而 RAP-1 在落锤加载 作用下不会发生反应;加载应力经 RAP-1 衰减后 作用于 HA-1,使得作用于 HA-1 的加载应力低于 – 其临界反应阈值,因此 HA-1 也未发生反应;另

表 1 组合装药落锤试验结果 Table 1 Drop hammer experimental results of

composed charge					
No.	<i>h</i> /m	σ/MPa	<i>t</i> /ms	Response characteristics	
1	2.2	829	5.54	No-ignition	
2	2.2	827	6.01	No-ignition	
3	2.3	839	5.55	No-ignition	
4	2.3	837	5.54	No-ignition	
5	2.5	881	5.63	No-ignition	
6	2.5	875	5.82	No-ignition	
7	2.7	902	5.77	No-ignition	
8	2.7	895	5.57	No-ignition	

外,由于 RAP-1 中含有约 6% 的增塑剂,一定程度上增强了 RAP-1 的塑性,与单一温压炸药相比,组合 装药中的 RAP-1 炸药在落锤加载时会发生较大变形^[13],耗散掉部分能量,进一步降低了组合装药的撞 击感度,从而提升其装药安全性。

2 内爆威力试验

2.1 试验装置

考虑温压炸药的作战环境一般在密闭或半 密闭舱体内,因此选择在爆炸罐内开展炸药威力 研究。如图 4 所示,爆炸罐外观为胶囊形,直径 2.6 m,圆柱部长 3.2 m,主体由抗爆承压层、隔音 层和内衬装甲层组成,罐体中心壁面均匀分布 4 个法兰盘,用于安装传感器等测量装置。

2.2 试验样品

内爆威力试验样品如图 5 所示。其中扩爆 药柱为Ø25 mm×25 mm的 JH-14C 药柱,质量 20 g, 中心带有雷管孔,通过军用 8#电雷管起爆主装 药。主装药由两部分组成,其中装药 1 和装药 2 各 1 kg,直径为 97 mm,长度根据装药的密度而 定。试验共设置 3 种主装药成分:第 1 种为 2 节 HA-1 药柱;第 2 种为 2 节 RAP-1 药柱;第 3 种为 组合装药,装药 1 为 RAP-1,装药 2 为 HA-1。

图 6 为真空爆炸罐示意图,在法兰盘1 和法 兰盘4上各安装2个壁面压力传感器和2个准静 态压力传感器,分别用于测量正反射冲击波超压 及准静态压力。为减小爆轰不均匀性带来的测







量误差,两个法兰盘上安装的传感器参数相同,处理数据时对2个测点的测试结果进行均值处理,所有 传感器的输出信号均经过信号适调器进行放大。冲击波压力传感器采用美国 PCB 公司生产的 113B22型通用高频压力传感器,谐振频率大于500 kHz,上升时间小于1 μs,量程为0~34.5 MPa;准静 态压力传感器采用昆山双桥公司生产的 CYG508型压阻式高频压力传感器,测量精度0.5级,测试组件 上升时间为 0.24 ms, 量程为 0~5 MPa; 采用美国 PCB 公司的信号试调器, 型号 482C05, 频率带宽可达 1 MHz。 为防止高温对测量结果产生影响, 压力传感器的感应面涂抹炮油。





2.3 试验结果及分析

2.3.1 冲击波超压

为分析不同试验装药的内爆威力,引入2kg TNT 炸药的测试结果以便对比分析,实测不同装 药的冲击波超压曲线如图7所示。由于冲击波在 罐体内的反射效应较为明显,其超压峰值有时波 动较大,常以尖脉冲方式出现,为了便于对比,图7 中将各种炸药的冲击波超压曲线沿时间坐标进 行了适当平移。

通过图 7 所示的冲击波超压实测曲线可知, 冲击波超压峰值高,反射次数多,作用时间为 10 μs 量级,通过对图 7 所示冲击波超压进行相应处理, 得到不同装药的冲击波超压峰值 ΔP 和比冲量,如 表 2 所示。

通过表 2 可以看出: HA-1 炸药的冲击波超压 峰值最高, 这是由于冲击波峰值超压的大小主要 与无氧反应阶段的释能有关, HA-1 中含有 65% 的 HMX, 爆炸瞬间会释放较多的冲击波能; RAP-1 炸药的冲击波超压峰值最低, 这是由于 RAP-1 中 仅含有约 30% 的 RDX, 爆炸瞬间仅有这部分炸药 发生无氧爆轰转化成冲击波能, 铝粉和 AP 之间 的氧化还原反应主要是在 RDX 发生无氧爆轰后



Fig. 7 Measured blast wave overpressure curves

表 2 冲击波超压峰值及比冲量 Table 2 Blast wave overpressure and specific impulse

	-	· ·
Explosive	$\Delta P/MPa$	Specific impulse/(Pa·s)
TNT	8.29	893
HA-1	12.75	1170
RAP-1	6.37	658
Dual charge	7.89	1110

进行的,其能量释放以后燃烧为主¹¹⁴,因此对冲击波的贡献不大;将 HA-1 与 RAP-1 进行质量比为 1:1 的 混合后(即组合装药),其超压峰值介于二者之间,但是与 HA-1 相比还有一定的差距。

通过表 2 数据还可以看出, HA-1 炸药的比冲量最高, 组合装药与 HA-1 的比冲量较为接近, 达到了 HA-1 比冲量的 99.4%, 这是由于组合装药中的 RAP-1 中含有 28% 的 AP 作为氧化剂, 可以为炸药体系 提供更多的氧, 使得 HA-1 及 RAP-1 中铝粉的能量能够进行更有效的释放, 且组合装药中的 HA-1 炸药 在爆轰过程中能为铝粉反应提供更强的压力及更高的温度环境, 进一步提升了能量释放率及利用率, 因此, 组合装药拥有比 HA-1 更强的后燃效应。Ahmed 等^[15] 通过数值计算及试验发现, 温压炸药的后 燃反应会导致压力的衰减较传统炸药缓慢,冲量显著增加,他们认为铝粉的燃烧虽然减缓了初期爆炸的能量释放率,但并没有降低整体爆炸能量。

2.3.2 准静态压力

由于准静态压力的实测曲线中有一些高频干 扰信号,因此首先对试验结果进行了滤波处理,最 终获得结果如图 8 所示。

通过图 8 可知,组合装药的准静态压力峰值高 于 TNT 和 RAP-1,与单一温压炸药相差不大。经过 分析,这与准静态压力的形成过程及炸药的成分配 比有关,准静态压力的大小与炸药无氧阶段及有氧 后燃烧阶段的能量释放均有关系,即准静态压力既 与炸药爆轰产生的大量气体有关,也与有氧后燃烧 阶段爆炸释能引起密闭空间内温度升高进而导致 压力上升有关。组合装药中既含有具有较高初始 冲击波能的 HA-1,能够为组合装药贡献较高的冲击



Fig. 8 Quasi-static pressure curves of different charges

波超压,同时还含有铝粉及 AP, AP 在炸药爆炸过程中会释放大量的氧与铝粉进行反应,使得铝粉能量进行更有效的释放,产生更多的热量,进而提升组合装药的准静态压力。综上所述,与 RAP-1 相比,由于组合装药中含有具有较高初始冲击波超压的 HA-1炸药,且二者均具有较高的后燃烧释能,因此在初始冲击波超压及后燃烧释能的共同作用下组合装药的准静态压力高于 RAP-1;与 HA-1 相比,虽然组合装药的初始冲击波超压相对较小,但其具有更高的后燃烧释能,二者共同作用下使得组合装药的准静态压力值与 HA-1 相当。

通过图 8 还可以看出,无论哪种炸药,准静态压力峰值均为冲击波超压峰值的 1/20 左右甚至更小, 与文献 [16] 所述一致,但准静态压力作用时间较长,为百毫秒量级,而冲击波超压的作用时间尺度仅为 10 μs 量级。

2.3.3 组合装药内爆威力分析

通过对试验结果进行分析可知,组合装药的冲击波超压峰值与单一温压炸药相比相差较大,为单 一温压炸药的 61.9%,但由于组合装药具有更强的后燃烧效应,压力衰减相对较慢,所以其比冲量与单 一温压炸药相当,为单一温压炸药的 99.4%。

考虑到炸药在有限空间内爆炸时的做功环境及释能方式,进行密闭空间内炸药威力对比时通常采 用准静态压力作为评价标准,而非冲击波超压,原因如下^[17]。(1)炸药爆炸后,罐体内气体压力经历了 "不平衡"到"平衡"的过程。文献 [18] 将准静态压力定义为"装药在有限容积的密闭结构内爆炸,由于 受约束爆轰气体不能无限膨胀,气体趋于稳定时的压力",亦即准静态压力为气体"平衡"后的压力,显 然"平衡"后的准静态压力与罐体相对位置无关,而冲击波超压与其在罐体内的分布和位置有关。 (2)冲击波超压脉宽小、频率高且衰减迅速,加之炸药形状、传感器安装方式、爆炸罐内部结构、传感 器与舱体发生共振^[19]等因素都会影响冲击波超压的测量精度,导致较难准确测量超压值;而对于准静 态压力,同一发试验中,不同准静态压力传感器所获数据的吻合性较好,且受其他因素的干扰也较小。 (3)密闭空间内的部分燃料在未燃烧前被抛掷到舱体壁面,与壁面发生碰撞反射后会有部分动能转化 为热能进行二次燃烧,撞击过程中会发生额外的压力响应。(4)冲击波超压主要表征炸药在无氧爆轰 阶段的能量释放,准静态压力与无氧爆轰及有氧后燃烧阶段的释能均有关。

综上所述,准静态压力能够更全面、真实地表征炸药在内爆环境下的释能特性,美国海军水面武器中心在比较密闭空间内的炸药威力时,便仅采用准静态压力作为评价标准^[20-21]。本研究中,组合装药的准静态压力是单一温压炸药的 94.5%,证明采用组合装药的方式能够保证其内爆威力与单一温压炸药相差不大。

第 33 卷

3 结 论

(1)单一温压炸药的临界落高为 2.2 m, 组合装药在临界落高为 2.7 m 时仍未发生爆炸反应, 证明采 用组合装药结构可以有效提升装药的撞击安全性。

(2)组合装药的冲击波超压峰值为单一温压炸药的 61.9%, 而比冲量达到单一温压炸药的 99.4%, 准静态压力峰值达到单一温压炸药的 94.5%。考虑到组合装药的具体作战环境及释能特性, 用准静态 压力峰值评价其内爆威力更为合适, 试验结果证明该组合装药的内爆威力与单一温压炸药相当。

参考文献:

- KERNEN P.Way and methods to insensitive munitions: IM recipes version [C]//Processing of Insensitive Munitions Technology Symposium. Williamsburg: NSWC, 1994.
- [2] 韩勇,鲁斌,蒋志海,等. JO-9159/ECX 复合装药的冲击波感度研究 [J]. 含能材料, 2008, 16(2): 164–166.
 HAN Y, LU B, JIANG Z H, et al. Shock sensitivity of JO-9159/ECX composite charge [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(2): 164–166.
- [3] NOUGUEZ B.Dual formulation warheads: a mature technology [C]//Processing of Insensitive Munitions Technology Symposium. Williamsburg:NSWC,1996.
- [4] 沈飞, 王辉, 罗一鸣. DNTF 基同轴双元装药的爆轰波形及驱动特性 [J]. 含能材料, 2018, 26(7): 614–619.
 SHEN F, WANG H, LUO Y M. Detonation wave-shape and driving performance of coaxial binary charge of DNTF-based Aluminized explosives [J]. Energetic Materials, 2018, 26(7): 614–619.
- [5] VITTORIA M, BURGESS W.Sympathetic detonation testing of a dual explosive warhead concept for large diameter warheads [C]//Processing of Insensitive Munitions Technology Symposium. Williamsburg: NSWC, 1994.
- [6] 沈飞, 王辉, 罗一鸣. 一种同轴双元组合装药的爆轰波形及驱动特性 [J]. 火炸药学报, 2018, 41(6): 588–593.
 SHEN F, WANG H, LUO Y M. Detonation waveform and driving performance of a kind of coaxial binary composite charge
 [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2018, 41(6): 588–593.
- [7] 向梅, 黄毅民, 饶国宁, 等. 复合装药结构隔板实验与数值模拟 [J]. 兵工学报, 2013, 34(2): 246–250.
 XIANG M, HUANG Y M, RAO G N, et al. Experimental and numerical simulation study of the shockwave sensitivity of composite charge explosive [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(2): 246–250.
- [8] 向梅, 饶国宁, 彭金华. 钝感复合装药结构枪击试验尺寸效应的数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2010, 33(6): 30–33. XIANG M, RAO G N, PENG J H. Numerical simulation on bullet impact test dimensional effect for the composite structure of insensitive ammunition [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(6): 30–33.
- [9] 尹俊婷, 蔚红建, 栗宝华, 等. 金属加速炸药/高爆热炸药复合装药爆炸特性研究 [J]. 火工品, 2015(3): 33–37. YIN J T, WEI H J, LI B H, et al. Explosion characteristics of metal accelerating explosive/ high detonation heat explosive composite charge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2015(3): 33–37.
- [10] 牛余雷, 王晓峰, 余然. 双元复合炸药装药水下爆炸能量输出特性 [J]. 含能材料, 2009, 17(4): 415–419.
 NIU Y L, WANG X F, YU R. Characteristics of energy output of underwater explosion for dual explosive charge [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(4): 415–419.
- [11] 屈可朋, 沈飞, 王世英, 等. RDX 基 PBX 炸药在不同应力率下的撞击安全性 [J]. 火炸药学报, 2014, 37(6): 40-43.
 QU K P, SHEN F, WANG S Y, et al. Research on impact safety of a RDX-based PBX explosive at different stress rate [J].
 Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014, 37(6): 40-43.
- [12] 肖玮, 李亮亮, 屈可朋, 等. 某 RDX 基含 Al 炸药发射安全性 [J]. 含能材料, 2015, 23(1): 62–66.
 XIAO W, LI L L, QU K P, et al. Launch safety of RDX-based aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(1): 62–66.
- [13] 陈鹏万, 丁雁生. 高聚物粘结炸药的力学行为及变形破坏机理 [J]. 含能材料, 2000, 8(4): 161–164.
 CHEN P W, DING Y S. Mechanical behaviour and deformation and failure mechanisms of polymer bonded explosives [J].
 Chinese Journal of Energetic Materials, 2000, 8(4): 161–164.
- [14] 黄亚峰, 田轩, 冯博, 等. 温压炸药爆炸性能实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(4): 573-576.

HUANG Y F, TIAN X, FENG B, et al. Experimental study on explosion performance of thermobaric explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(4): 573–576.

- [15] AHMED K M, HOSAM E K, ELBASUNEY S. Nanoscopic fuel-rich thermobaric formulations: chemical composition optimization and sustained secondary combustion shock wave modulation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 301: 492–503.
- [16] 张玉磊,苏健军,李芝绒,等. TNT 内爆炸准静态压力特性 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(6): 1429–1434.
 ZHANG Y L, SU J J, LI Z R, et al. Quasi-static pressure characteristic of TNT's internal explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(6): 1429–1434.
- [17] 金朋刚, 郭炜, 王建灵, 等. 密闭条件下 TNT 的爆炸压力特性 [J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 39-41.
 JIN P G, GUO W, WANG J L, et al. Explosion pressure characteristics of TNT under closed condition [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(3): 39-41.
- [18] 蒋浩征, 俞明义. 导弹技术词典 [M]. 北京: 宇航出版社, 1986: 144-145.
- [19] AMES R G, DROTAR J T, SILBER J, 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: Office of Naval Research, 2006.
- [20] DAVID P E. Internal blast test to support the Tomahawk and APET programs "munitions survivability in unified operations" [C]//Insensitive Munitions Technology Symposium. Las Vegas, NV, 1996.
- [21] 杨雄, 王晓峰, 黄亚峰, 等. 真空环境下铝含量对 HMX 基炸药爆炸场压力和温度的影响 [J]. 火炸药学报, 2017, 40(6): 73-77.

YANG X, WANG X F, HUANG Y F, et al. Effect of Al content on the explosion fild pressure and temperature of HMX-based explosive in vacuum environment [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(6): 73–77.

Experimental Study on Impact Safety and Implosing Energy Release Characteristics of Composed Charge

ZHANG Guanghua, QU Kepeng, SHEN Fei, WANG Hui

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

Abstract: To verify impact safety and implosion power of a composed charge, the drop hammer tests and implosion power experiments were conducted. The results show that critical height of the single thermo-baric explosive is 2.2 m under loading of 400 kg hammer, while the composed charge did not ignite under height from 2.2 m to 2.7 m, which means that the composed charge holds a better impact safety property. Peak overpressure of the composed charge was 61.9% of the single thermo-baric explosive, the impulse of the composed charge was 99.4% of the single thermo-baric explosive, and the peak quasi-static pressure of the composed charge was 94.5% of the single thermo-baric explosive. Considering energy release characteristics within a limited space, it is more suitable to use peak quasi-static pressure as an evaluation standard. The test results show that implosing energy release characteristics of the composed charge is almost the same as the single thermo-baric explosive.

Keywords: composed charge; impact safety; implosion power; specific impulse; quasi-static pressure