

文章编号: 1006-9941(2015)02-0163-05

耗氧效应对温压战斗部及装药的毁伤评估

胡 岚, 严 蕊, 熊贤锋, 刘志伟, 王婧娜

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 为了实现对温压战斗部及其装药的毁伤评估, 采用静爆实验对某温压战斗部静爆耗氧量进行了试验研究, 得到环境中氧气浓度-时间动态曲线。根据试验条件下温压战斗部的耗氧量及耗氧持续时间, 分别对装药的能量释放效率以及战斗部毁伤威力进行了评估。结果表明, 温压战斗部装药能量释放效率和毁伤威力分别是高聚物粘结炸药(PBX)战斗部的 1.13 倍和 1.55 倍, 与利用冲击波、温度等参数评估结果相当。

关键词: 温压战斗部; 耗氧效应; 毁伤评估

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.011

1 引 言

温压弹药是 20 世纪发展起来的一种新概念高效毁伤弹药。爆轰后会产生较高的温度、压力和耗氧效应。由于需要依赖环境中的氧气, 其能量释放特性和爆炸毁伤效应与常规弹药有很大不同, 耗氧效应的强弱与弹药及其装药的能量释放和毁伤威力密切相关。

目前, 美国陆军研究实验室(ARL)和弹道研究实验室(BRL)两大军方实验室针对目标毁伤评估, 开展了大量研究^[1]。俄罗斯自前苏联时代就非常重视毁伤效能评估工作, 积累了大量目标易损性数据。国外进行弹药毁伤研究的代表人物是美国加州大学的 A. K. Oppenheim 和劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 A. L. Khul 等^[2-4], 他们主要通过激波管试验、自由场试验, 利用冲击波、温度以及生物效应等进行研究; 国内的研究手段主要以试验模拟理论推导和试验测试为主。西安近代化学研究所的宋浦等^[5]通过对 C-J 模型条件下多方状态方程的修正, 得到炸药非理想爆轰过程的压力-体积关系。南京理工大学的李向东^[6-7]、中北大学王志军^[8-9]分别进行了 AHEAD 弹、破片聚焦战斗部等对水面目标、战斗机等重点毁伤效能评估。中国工程物理研究院的钱立新^[10]等完成了“防空战斗部威力评定方法研究”。这些工作主要

以目标毁伤效应为研究对象, 解决了具体的工程需求问题。

但是, 炸药本身性质对毁伤能量利用效率的影响, 是毁伤效能评估研究不能回避的问题^[11]。准确把握炸药性质对毁伤能量转换效率的影响, 对全面认识炸药的威力性能以及合理使用炸药, 充分发挥炸药的潜力具有实际意义。国内外的科学家们利用试验模拟和理论计算相结合的方式, 对炸药的爆炸效应和能量释放规律进行了研究。重点集中在以冲击波超压、爆炸温度、生物效应以及爆速、爆压、爆热、温度等常规参数为对象进行评估方面。对于温压炸药的耗氧特性, 国内已有研究者关注并开展初步研究^[12], 但尚未用于弹药毁伤评估。胡岚等^[13-15]采用电化学传感器技术进行了爆轰气体及火药气体的实时测试, 建立了耗氧效应的测试评估方法, 为毁伤效能评估提供了技术支撑。目前, 对温压弹药的毁伤评估引起了军方的高度重视。除去冲击波超压、温度效应、生物效应等技术, 利用新技术开展“化学能”转变为“毁伤能”的研究, 将炸药装药能量评估纳入弹药毁伤评估体系已成为行业的共识。

本研究通过对温压战斗部及装药在静爆试验中耗氧量及耗氧持续时间的测试, 进行了耗氧效应研究。利用耗氧效应, 进一步评估了装药的能量释放效率, 以及弹药的毁伤威力。

2 研究内容

2.1 建筑物内静爆试验

在设计建筑物靶标内进行相同药量某温压战斗

收稿日期: 2013-11-13; 修回日期: 2014-03-16

基金项目: 二炮演示验证项目(00401030401)

作者简介: 胡岚(1968-), 女, 硕士, 研究员, 主要从事含能材料理化性能研究。e-mail: hulan204@126.com

部(thermo-baric warhead)和塑料粘结体系战斗部(PBX warhead)的静爆毁伤威力对比试验。测试以爆心为圆点不同方位,不同半径处建筑物内环境氧气浓度测试布点图见图1。

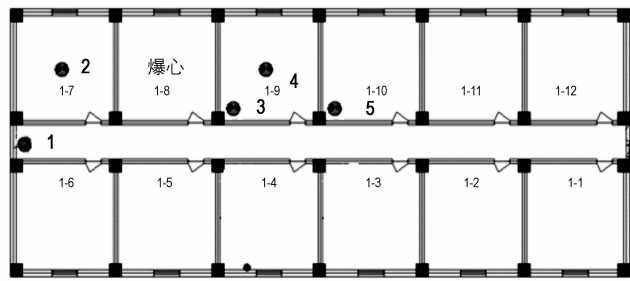


图1 温压、PBX战斗部静爆试验耗氧测试布点图
Fig.1 Distribution map of oxygen consumption test by static explosive experiment for thermo-baric warhead and PBX warhead

2.2 自由场静爆试验

选择地面平坦,视野开阔的专业靶场进行试验。将试验样弹竖直放置于弹架上,用雷管起爆。试验前,以样弹为圆心,在半径方向依次设置8 m,12 m,14 m三个氧气含量测试传感器,测量爆炸瞬间环境中氧气含量的动态变化曲线。

2.3 数据采集

在不同房间布设氧含量测试传感器,测量爆炸过程中氧气浓度随时间变化曲线。测量范围内所获得的曲线连续无中断,则判定所获取的数据有效。利用数据线传输信号,在距离爆心200 m以上的掩体内放置数据采集终端,记录实验数据。

3 测试结果

温压战斗部和PBX战斗部测试结果列于表1和表2。各测试点处氧气浓度随时间的变化曲线列于图2。

表1 温压战斗部测试数据统计表

Table 1 Test data statistics of thermo-baric warhead

test point	$C_{IOC}/\%$	$C_{LLO}/\%$	t_{DOC}/s	d/m
1			—	
2	21.04	20.15	71	6.18
3	20.65	19.11	954	4.50
4			—	
5	20.40	19.65	654	9.61

Note: C_{IOC} represents initial oxygen concentration; C_{LLO} represents lower limits of oxygen concentration; t_{DOC} represents duration of oxygen consumption; d represents distance from test point to the explosion center.

PBX战斗部2[#](4.5 m)和4[#](9.61 m)处的测试曲线如图3所示。表1和表2中,初始氧浓度(C_{IOC}),最低氧浓度(C_{LLO}),耗氧持续时间(t_{DOC})为原始测试值。其中,在实时测试曲线上可以明确判读出爆炸时间。以此为时间起始点,连续计算到传感器测试数据恢复到空气中初始氧浓度的时间为耗氧持续时间。

表2 PBX战斗部测试数据统计表

Table 2 Test data statistics of PBX warhead

test point	$C_{IOC}/\%$	$C_{LLO}/\%$	t_{DOC}/s	d/m
1	20.40	19.26	300	7.21
2	20.32	2.95 *	~200	4.50
3			—	
4	20.90	3.22 *	~240	9.61
5			—	

Note: * represents concussion of explosive.

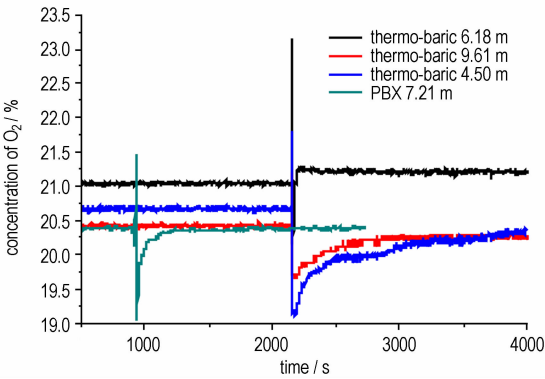


图2 温压与PBX战斗部氧气浓度-时间曲线
Fig.2 O₂ concentration-time curve on thermo-baric and PBX warhead

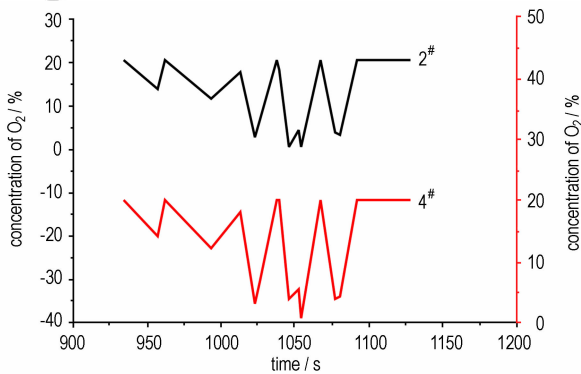


图3 PBX战斗部2[#],4[#]测点氧气浓度-时间曲线
Fig.3 O₂ concentration-time curve on 2[#] and 4[#] of PBX warhead

4 结果分析与讨论

4.1 温压战斗部装药爆炸能量释放效率

1) 配方理论耗氧量

根据装药组成及配方的氧平衡 (Oxygen balance, OB), 可计算得到装药的理论耗氧量 (Q_{TOC})。根据图 4 流程对所选配方的单位质量耗氧量、空气消耗量进行计算, 结果见表 3。

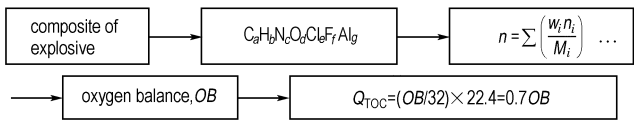


图 4 理论耗氧量计算流程

Fig. 4 Calculation process of the theoretical oxygen consumption (Q_{TOC})

表 3 单位质量理论耗氧量

Table 3 Theoretical oxygen consumption per weight for two kinds of warhead

warhead	$OB/g/kg$	$Q_{TOC}/L \cdot kg^{-1}$
PBX	-456.98	319.89
thermo-baric	-623.35	436.34

2) 试验绝对耗氧量 (Q_{EOC})

试验绝对耗氧量是指温压战斗部在爆炸过程中消耗氧气的绝对量。从一个侧面反映了爆炸能量释放的完全程度。绝对耗氧量越高, 温压炸药爆炸的后燃效应越强烈, 爆炸能量释放越完全。

绝对耗氧量为:

$$Q_{EOC} = \frac{(V \times O_2 \%_{\text{初始值}} - V \times O_2 \%_{\text{测量值}})}{22.4} \times 32$$

式中, V 的计算利用球形假设。

假设装药的爆炸以爆心为球心呈对称扩散, 则氧气的浓度在球体内的分布是均匀的。布设点距爆心距离作为半径。那么, 以半径为积分区间, 求在不同半径梯度上的氧气测试浓度对球体半径的积分, 则是试验绝对耗氧量。

$$Q_{EOC} = \int_0^r C(r) 4\pi r^2 dr$$

式中, C 代表环境中氧气的浓度, %; r 是测试点和爆心的距离, m; $C(r)$ 为氧气浓度随距离变化的函数, 可通过每次实验的测试数据拟合出 $C-r$ 曲线。在有效数据有限的情况下, 对单点数据分段累积计算出绝对耗氧量 (Q_{EOC})。

3) 不同配方能量释放的对比

通过两种不同配方装药单位质量耗氧量之比, 分析配方温压效应的优劣。同时将温压装药在实际爆轰情况下的耗氧量 (Q_{EOC}) 与理论耗氧量 (Q_{TOC}) 之比作为装药释能评估参数-能量释放效率 (Energy release

efficiency) (%), 得到装药的性能评估。两种装药的评估结果列于表 4。

表 4 不同装药温压能量释放效率

Table 4 Energy release efficiency evaluation of different warhead

warhead	$Q_{TOC}/L \cdot kg^{-1}$	$Q_{EOC}/L \cdot kg^{-1}$	ratio of Q_{EOC}	energy release efficiency/%	ratio ¹⁾
PBX	319.89	192.25 216.89	1.61	60.1 67.8	64.0
thermo-baric	436.34	311.10 321.15	1.48	73.6 71.3	72.5

Note: 1) represents ratio of the energy release efficiency between thermo-baric warhead and PBX warhead; Q_{EOC} represents experimental oxygen consumption.

由表 4 数据可以看出, 两种装药战斗部在建筑物内爆炸时, 温压战斗部的耗氧效应高于 PBX 战斗部。通过球形假设计算, 温压战斗部的绝对耗氧量 (Q_{TOC}) 平均是 PBX 战斗部的 1.55 倍。同时, 通过对能量释放效率的比对也可以得出, 在相同试验条件下, 温压战斗部的释能效率高于 PBX 战斗部, 它们的能量释放效率分别平均为 64.0% 和 72.5%, 温压战斗部能量释放效率是 PBX 战斗部的 1.13 倍。

4.2 温压装药战斗部毁伤威力评估

对氧气浓度随时间的变化曲线, 选择测试点环境中氧气浓度低于空白值所持续的时间 (t_1-t_2) 段进行积分, 积分面积代表战斗部耗氧效应。从图 2、图 3 中可以看出, 氧浓度积分面积越大, 耗氧效应越强烈, 战斗部毁伤威力越大。将与氧气浓度-时间曲线的积分定义为“耗氧效应”, 用公式表示为

$$\text{耗氧效应} = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt$$

式中, $Q(t)$ 为测点处环境氧气浓度随时间变化曲线; t 为耗氧效应持续的时间, s。

对测得的数据利用上述方法进行计算, 结果列于表 5。由表 5 数据可以看出, 在相同测点处, 温压战斗部的毁伤威力大于 PBX 战斗部, 前者是后者的约 1.09 ~ 1.31 倍, 略高于炸药能量释放效率 (1.13 倍)。这是因为战斗部结构的优化, 为毁伤增添了威力。

4.3 数据间断的分析

表 2 数据中, PBX 装药 2[#]、4[#] 测点原始曲线中出现了间断现象, 且这个间断周期是不定长的。测试数据由空气中氧气原始值 (20.9%) 下降到较低氧含量 3.22%, 出现间断, 再基本回到氧气 20% 以上。如此重复几个周期。

表5 不同装药战斗部毁伤威力测试数据(建筑物内)

Table 5 Damage power data of different warhead in construction

warhead	d /m	C_{IOC} /%	C_{LLO} /%	t_{DOC} /s	$S^{1)}$	ratio ²⁾
thermo-baric	4.50(3 [#])	20.65	19.11	954	403.62	1.31
	6.18(2 [#])	21.04	20.15	71	31.66	0.56 ³⁾
	9.61(5 [#])	20.40	19.65	654	286.16	1.09
PBX	4.50(2 [#])	20.32	2.95	~200	308.06	
	7.21(1 [#])	20.40	19.26	300	56.174	
	9.61(4 [#])	20.90	3.22	~240	261.89	

Note: 1) S represents integral area of oxygen concentration-time curve; 2) represents ratio of damage power between thermo-baric warhead and PBX warhead; 3) represents exception data, outliers.

2[#]、4[#]点布设在爆心不同的方位,同时同步出现了数据的间断震荡,排除了仪器自身故障,这是一个新的现象。可能是由于爆轰冲击波在建筑物内因墙壁阻挡产生反射叠加,造成压力波的周期性震荡。当外界压力大于等于传感器内压力时,测试数据正常;当外界压力小于大气压力,则传感器无法接触爆轰气体,出现数据间断。

4.4 自由场测试结果

本次试验测得有效数据两个,见表6,均在距爆心8 m处,而12 m处由于数据线被破片截断,未能取得数据,14 m处于爆炸火球半径以外,未能测得氧气浓度的变化。按照球形假设计算其绝对耗氧量为227.76 L·kg⁻¹,为理论耗氧量的52.20%。这个数据低于建筑物内评估值,是由于试验时当地风力过大,对开放空间氧气浓度测量影响所致。

表6 温压战斗部测试数据统计表

Table 6 Test data of thermo-baric warhead

test point	C_{IOC} /%	C_{LLO} /%	t_{DOC} /s	Q_{EOC} /L·kg ⁻¹	Energy release efficiency/%
1	21.19	19.56	170		
2	20.40	19.40	280		
3		—		227.76	52.20%
4		20.29			

5 结论

(1) 研究的温压战斗部耗氧量是PBX战斗部的1.55倍,毁伤威力是1.1~1.3倍,与利用冲击波、温度等参数评估结果相当。利用耗氧效应进行弹药及装药毁伤威力评估是可行的。

(2) 炸药装药能量释放效率的研究是毁伤威力评估的一部分,应该纳入毁伤评估的体系之中。

(3) 建议在现有研究基础上,进一步系统开展在不同试验条件下、不同配方、不同药量温压炸药装药耗氧效应的研究,建立标准的试验方法,积累数据,形成评价准则。

参考文献:

- [1] Jeffrey T. Bush, Captain, USAF. Visualization and animation of a Missile/Target encounter[R], AD-A336994, USA, 1998.
- [2] Volk F, Bathelt H, Schedlbauser F et al. Detonation products of Insensitive cast high explosives[C]//8th Symposium (International) on Detonation, July 15-19, 1985, Albuquerque, USA.
- [3] Volk F. Detonation gases and residues of composite explosives[J]. *Journal of Energetic Materials*, 1986, 4(1-4): 93-113.
- [4] Volk F, Energy Output of Insensitive High Explosives by Measuring the Detonation Products[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1993, 18(6): 332-336.
- [5] 宋浦, 肖川, 沈飞, 等. 炸药非理想爆轰能量释放与能量利用的关系[J]. *火炸药学报*, 2011, 34(2): 44-46.
SONG Pu, XIAO Chuan, SHEN Fei, et al. Relationship of energy release and utilization of non-ideal detonation of explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(2): 44-46.
- [6] 焦晓娟. AHEAD弹对典型目标会上的计算模拟与仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
JIAO Xiao-juan. Target damage study of AHEAD warhead by computer simulation[D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 2002.
- [7] 张凌. 聚焦战斗部对巡航导弹的毁伤及引战配合研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
ZHANG Ling. Damages and Fuze-warhead coordination of missile by focusing warhead[D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 2008.
- [8] 陈超, 王志军. 蒙特卡洛法在武器系统毁伤概率计算中的应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2002, 22(1): 48-50.
CHEN Chao, WANG Zhi-jun. The application of Monte Carlo method to the calculation of weapon system kill probability[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2002, 22(1): 48-50.
- [9] 尹建平. MEFP智能雷对装甲目标毁伤效能研究[D]. 太原: 华北工学院, 2003.
YIN Jian-ping. Target damage efficiency study on armored target by MEFP[D]. Taiyuan: North University of China, 2003.
- [10] 钱立新. 防空导弹战斗部威力评定与目标毁伤研究, GF-A0055529G[R]. 绵阳: 中国工程物理研究院总体工程研究所, 1998.
QIAN Li-xin. Target damage study and lethality assessment on airdefense missile warhead, GF-A0055529G[R]. Mianyang: China academy of engineering physics, 1998.
- [11] 王树山. 毁伤效能评估原理、方法与实践[C]//毁伤效能评估技术研讨会论文集, 北京, 2013: 11-26.
WANG Shu-shan. The principle, method and practice of damage-effectiveness evaluation[C]//The symposium on damage effectiveness evaluation, Beijing, 2013: 11-26.
- [12] 胡岚, 刘红妮, 任春燕, 等. 某温压弹爆轰气体靶场测试技术[J]. *含能材料*, 2010, 18(2): 196-199.

- HU Lan, LIU Hong-ni, REN Chun-yan, et al. Target determination technology on detonation gaseous products of a thermo-baric warhead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*), 2010, 18(2): 196-199.
- [13] 胡岚,王婧娜,高朗华,等. 模拟珠峰环境火种灯炭柱燃烧气体产物研究[J]. *火炸药学报*, 2009, 32(2): 80-83.
- HU Lan, WANG Jing-na, GAO Lang-hua, et al. Study on the gas-products of olympic kindling spark in simulation test of jolmo lungma[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(2): 80-83
- [14] 胡岚,张皋,王婧娜,等. 火药燃烧气体产物检测方法研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 527-529.
- HU Lan, ZHANG Gao, WANG Jing-na, et al. Determination methods for the gas-fired of propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*), 2008, 16(5): 527-529.
- [15] 胡岚,张婷,严蕊,等. 火炸药多组分气体动态校准技术研究[J]. 含能材料, 2012, 20(4): 450-453.
- HU Lan, ZHANG Ting, YAN Rui, et al. Dynamic calibration technology of multicomponent gas of propellants and explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*(*Hanneng Cailiao*), 2012, 20(4): 450-453.

Damage Assessment of Thermo-baric Warhead and Charge with Oxygen Consumption Effect

HU Lan, YAN Rui, XIONG Xian-feng, LIU Zhi-wei, WANG Jing-na

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

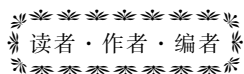
Abstract: In order to evaluate damage power of thermo-baric warhead, the oxygen consumption of one thermo-baric warhead was studied by static experiment. The real-time variety graph of oxygen concentration-time was obtained. The energy releasing efficiency and damage power were evaluated by duration of oxygen consumption and quantity. Results show that the energy releasing efficiency and damage power of thermo-baric warhead are 1.13 and 1.55 times higher than that of plastic bonded explosive warhead, respectively. The assessment results are consistent with those evaluated using parameters of by shock wave and temperature.

Key words: thermo-baric warhead; oxygen consumption effect; damage assessment

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.011



读者·作者·编者

《含能材料》固体推进剂专栏征稿

高能量、低特征信号、低易损、低成本、低污染、灵活能量管理和高可靠性成为当前固体推进剂面临的紧迫课题,为促进其研究,本刊将于2015年开设推进剂研究专栏,以专题报道固体推进剂研究的最新研究进展。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部