

文章编号: 1003-1480 (2006) 03-0009-05

基于动物第一类爆炸损伤伤情的 凝聚相炸药爆炸威力评价

易建坤, 吴腾芳, 谢俊杰, 王红建, 翟国锋

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京, 210007)

摘要: 在16种炸药的动物效应试验基础上, 从动物的第一类爆炸损伤伤情出发, 通过将定性的损伤伤情描述转化为定量指标后, 对各炸药的第一类爆炸损伤威力进行了简化的量化评价, 获得了16种炸药的第一类爆炸损伤威力排序。同时, 也讨论了这种基于动物损伤伤情的数学评价方法的优点以及有待完善的方面。

关键词: 第一类爆炸损伤; 爆炸威力; 贴近度; 量化评价

中图分类号: TQ564

文献标识码: A

Assessment of Explosion Strength of Condensed Explosives Based on

Animals' Primary Blast Injuries

YI Jian-kun, WU Teng-fang, XIE Jun-jie, WANG Hong-jian, ZHAI Guo-feng

(Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Sci. & Tech., Nanjing, 210007)

Abstract: Based on the results of experiment on the primary blast injuries of mice and rabbits produced by sixteen kinds of explosives explosion, the qualitative characterizations of primary blast injuries are transformed into quantitative indices and a simplified assessment on the explosion strength of explosives producing the primary blast injuries has been processed. As a result, a rank of the power of sixteen explosives has been proposed. Moreover, merits of the mathematic method of assessment have been discussed, so do the aspects of it which should be improved.

Key words: Primary blast injury; Explosion strength; Approximate degree; Quantitative assessment

评价炸药爆炸威力的大小, 通常都要根据实际爆炸能量输出和爆炸作用对象确定相应的冲击波参数来作为评价指标^[1]。炸药爆炸对生物体产生的第一类爆炸损伤是由单纯的冲击波对生物体的直接作用造成的。而生物体出现的第一类爆炸损伤伤情通常都是冲击波的多个特性参数, 如冲击波超压峰值、压力作用时间(包括负压)、压力上升或下降时间等综合作

用的结果^[2]。故单以其中一个冲击波参数, 如冲击波峰值超压来评估炸药的爆炸损伤威力大小显然是不全面的, 必定会与实际产生的动物损伤严重程度产生出入。所以要反映不同炸药的爆炸损伤威力的大小关系, 最根本的也是最可靠的方法就是对动物的实际损伤伤情进行考察。本文通过具体的生物效应试验探讨这种评价炸药爆炸损伤威力大小的方法。

收稿日期: 2006-03-27

作者简介: 易建坤(1978-), 男, 在读博士研究生, 从事爆破器材爆炸作用及应用研究。

1 鼠、兔第一类爆炸损伤效应试验设计及损伤结果

1.1 试验设计

本次试验的目的：获得不考虑各类反射影响条件下的各类炸药爆炸对鼠兔产生的具体的第一类爆炸损伤伤情，故具体试验设置为：

炸药类型：PETN、JH - 2、LX-14、HMX、RDX、PBX - HMX、PBX - RDX、C - 4、钝化 RDX、钝化 HMX、B、SH - 4、TNT、2#岩石、粉状乳化、浆状乳化；

装药形式：圆柱形裸露装药无限空中爆炸；

药量：各炸药均 40g；

炸高：取 50cm；

试验对象：大白鼠 137 只、家兔 67 只；

鼠兔放置位置：鼠固定在与装药同高度而距爆心水平 50cm、100cm、150cm、200cm 的 4 个不同测点处；兔固定在与装药同高度、距爆心水平 50cm、100cm 的两个不同测点处。各炸药在各点处的鼠兔只数不少于 1 只。

1.2 试验结果

爆炸后马上对鼠兔进行医学解剖，观察鼠、兔的爆炸损伤情况，不考虑受损伤生物体的代偿期效应和损伤的发展过程，目的是获得各类炸药爆炸对生物体产生的第一类冲击损伤的即时效应。观察的部位主要有脑、心、肺和腹腔及内部器官。耳器官虽然是动物对爆炸冲击损伤最敏感的器官，可以将其伤害情况作

为评判爆炸危害范围的一个判据，但是由于耳器官的爆炸损伤情况通常不是致命的，而且在爆炸对肺器官产生严重损伤的爆炸严重危害区域内，并不一定都会出现耳器官的损伤^[3]。故此处未将耳器官列入重点医学观察部位，而只重点观察了脑、胸腔和腹腔部位。

表 1 是本次生物效应试验鼠兔损伤的整体情况。

从表 1 的各类损伤的统计百分比可看出在 2m 范围内，所有的试验鼠兔中出现肺爆炸损伤的比例是最大的，其次是其它器官（肠、肝、脾等）的爆炸损伤，然后是心脏，最小的是头部。这也反映了动物在承受爆炸冲击压力时，躯体中最易出现损伤的部位，即躯体中最脆弱的部位就是那些具有较大密度差的组织分界（气液、气固和液固分界）躯体组织部位这一规律^[4]。胸腔和腹腔部位正是动物体内气液固三相共存部位。脑部由于有坚硬颅壳保护，相对其它部位而言是最难受到爆炸冲击损伤。头部损伤基本上都出现在 100cm 范围内，这其中兔的头部受到爆炸损伤较鼠的头部要难。其次就是鼠兔的心脏部位，其损伤主要表现在爆炸压力（正压和负压）直接对心脏肌肉的损伤，出现心肌出血和撕裂等症状。心脏部位的损伤症状绝大部分发生在鼠上，这也表明兔的心脏较鼠的心脏部位要难于受到爆炸损伤。而随着与爆心距离的增加，肺损伤的比例也显著下降，处于离爆心 1.0m 处的兔和 2.0m 处的鼠产生肺损伤症状的现象已不普遍了。

表 2 为试验中能使鼠兔产生上述较难出现的损伤症状的炸药类型的统计情况。

表 1 鼠兔各器官爆炸损伤统计情况

Tab.1 Statistics of blast injuries of mice and rabbits

种类	动物总数	平均体重/kg	水平距爆心/cm	动物数量/只	脑损伤百分比/%	心脏损伤百分比/%	肺损伤百分比/%	其它器官损伤百分比/%	1种损伤的百分比/%	2种损伤的百分比/%	3种损伤的百分比/%	4种损伤的百分比/%	当场休克或死亡比例/%
鼠	137	0.341	50	57	14	19.2	87.7	22.8	52.6	31.6	8.77	1.75	12.28
			100	30	10	16.67	40	10	43.3	10	3.33	-	3.33
			150	26	0	0	53.85	11.54	53.85	3.85	-	-	-
			200	24	0	4.17	37.50	8.33	45.83	-	4.17	-	-
兔	67	1.69	50	45	8.89	8.89	88.89	31.11	60	28.89	6.67	-	4.44
			100	22	4.55	4.55	40.91	18.18	40.91	13.64	-	-	-

表2 较难出现的鼠兔损伤伤情和所对应的炸药类型统计

较难出现的鼠兔损伤伤情类型	对应的炸药类型有
致鼠脑损伤	HMX、C-4、LX-14、PBX-RDX、JH-2、PETN
致兔脑损伤	PETN、RDX、JH-2、LX-14
致鼠心损伤	RDX、PETN、HMX、钝化RDX、B、SH-4、C-4、粉状乳化、PBX-RDX、JH-2
致兔心损伤	PBX-HMX、钝化HMX、钝化RDX、LX-14
100cm处致兔出现肺损伤	浆状乳化、钝化HMX、HMX、RDX、SH-4、C-4、JH-2
200cm处致鼠出现肺损伤	PBX-HMX、B、HMX、TNT、LX-14

2 基于损伤伤情的炸药爆炸损伤威力评价

2.1 评价指标的确定

在表1中的整体试验结果中,16种炸药爆炸均对鼠兔产生了多脏器的损伤,且在不同设置点处产生的损伤伤情程度亦不同。若单以某测点处的某一脏器(如肺)的损伤程度作为各炸药爆炸损伤威力的评价指标,则每改变一脏器,就会得到不同炸药爆炸损伤威力大小排序;其次,单一点处的单一脏器的损伤情况亦不能全面反应出各类炸药在整个损伤范围内对动物体产生的爆炸损伤程度。

一般来讲,炸药爆炸损伤威力越大,表2中鼠兔较难出现的爆炸损伤症状出现的可能性就越大。反过来,也可通过表2中的爆炸损伤类型出现的情况来推

断相应炸药的爆炸威力的大小,即可将表2中6种爆炸损伤类型当作反评炸药威力的6个指标。

2.2 评价方法及过程

设存在 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_{16}\}$, x_1, x_2, \dots, x_{16} 为威力待评价的16种炸药。每种炸药有6个指标(表2中的6种损伤伤情)可评价其爆炸威力,即 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i6})$ ($i = 1, 2, \dots, 16$)。为了能用纯数学的方法来评定各炸药的爆炸损伤威力,将表2中的6种定性描述的指标转化为定量指标,即出现此类损伤的则将指标值量化为1,否则为0。这样表2即可转化为表3。在将6种损伤伤情的定性描述转化为定量指标的过程中,存在一定的简化,即忽略了对6种损伤伤情各自的严重程度的考虑,仅依据某类损伤的出现与否来对指标赋值。更为仔细的量化过程应是对各类损伤的损伤程度进行轻度、中度和严重划分后,再赋以相应的具体值,而不是简单的1。

表3 炸药爆炸损伤威力的评价指标

Tab.3 Assessment target for the explosion strength of the condensed explosives

炸药名称	评价炸药威力的指标 x_{ij} ($i=1,2,\dots,16; j=1,2,\dots,6$)					
	鼠脑损伤	兔脑损伤	鼠心损伤	兔心损伤	100cm处兔的肺损伤	200cm处兔的肺损伤
JH-2	1	1	1	0	1	0
RDX	0	1	1	0	1	0
HMX	1	0	1	0	1	1
PBX-RDX	1	0	1	0	0	0
PBX-HMX	0	0	0	1	0	1
PETN	1	1	1	0	0	0
LX-14	1	1	0	1	0	1
钝化HMX	0	0	0	1	1	0
钝化RDX	0	0	1	1	0	0
C-4	1	0	1	0	1	0
SH-4	0	0	1	0	1	0
B	0	0	1	0	0	1
TNT	0	0	0	0	0	1
2°岩石	0	0	0	0	0	0
粉状乳化	0	0	1	0	0	0
浆状乳化	0	0	0	0	1	0
x_i	1	1	1	1	1	1

表3中的 x_n 是人为假定的一种基准炸药,即认为它对鼠兔产生爆炸损伤的威力比表3中的16种炸药的损伤威力都要大,能够使表2中的6种较难出现的爆炸损伤伤情都出现,所以将它的6个指标值 x_{nj} 都设为1。将表3再进行平移——极差变换^[5]。

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}^{(j)}}{x_{\max}^{(j)} - x_{\min}^{(j)}} \quad (1)$$

(1)式中: x_{ij} 是第*i*种炸药的第*j*个指标的指标值, $x_{\min}^{(j)}$ 、 $x_{\max}^{(j)}$ 分别是这16种炸药第*j*个指标的最大值和最小值, \bar{x}_{ij} 是标准化后第*i*种炸药的第*j*个指标的标准值。由于在量化指标值的过程中存在量化,各指标值的最大值和最小值均为1和0,故将表3作上述的平移——极差变化后,得到的标准化结果依然与表3相同,即有 $x_{ij} = \bar{x}_{ij}$ 。

标准化后可利用(2)式计算表3中各炸药对基准炸药的贴进度 $\sigma(x_n, x_i)$ ^[6]。

$$\sigma(x_n, x_i) = 1 - \sum_{j=1}^6 a_j |\bar{x}_{nj} - \bar{x}_{ij}|, \quad (2)$$

(2)式中:用加权系数 a_j ($j=1,2,\dots,6$; $\sum_{j=1}^6 a_j = 1$),代替了原海明贴进度定义式里均值系数,表示各个指标在评价炸药对鼠兔的爆炸损伤威力时所占的权重是各不相同的。

根据分析,已知的各器官损伤伤情出现的难易程度排序为:兔、鼠脑损伤,兔、鼠心损伤,最后为肺损伤,故各指标体现炸药爆炸损伤威力的权重也应反映这个难易程度排序。所以各指标的权重分配的原则是,越难出现的那一类损伤伤情所对应的指标的加权系数就越大。根据表1中6种损伤的统计百分比与1之差的绝对值之间的比例关系,确定6个指标的加权系数值。各指标的加权系数值分配见表4。

表4 各指标的加权系数值

Tab.4 Weighting factor of the target

指标	鼠脑损伤	兔脑损伤	鼠心损伤	兔心损伤	100cm处兔的肺损伤	200cm处兔的肺损伤
x_{ij}	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}	x_{i5}	x_{i6}
a_j	0.176	0.201	0.139	0.201	0.138	0.145

比较各炸药与基准炸药的贴进度,因为假定基准炸药的爆炸损伤威力是最高的,故与基准炸药贴进度

越高,则表明炸药的第一类爆炸损伤威力也就越大。根据计算出的各炸药的贴进度可比较各炸药爆炸损伤威力的大小关系。根据(2)式计算各炸药的贴进度见表5。

表5 各炸药对基准炸药的贴进度

Tab.5 Approximate degrees of the explosives to the standard explosive

炸药名称	与基准炸药的贴进度
JH-2	0.654
RDX	0.478
HMX	0.598
PBX-RDX	0.315
PBX-HMX	0.346
PETN	0.516
LX-14	0.723
钝化HMX	0.339
钝化RDX	0.340
C-4	0.453
SH-4	0.277
B	0.284
TNT	0.145
2#岩石	0
粉状乳化	0.139
浆状乳化	0.138
x_n	1

由表5中计算的贴进度结果,可排出各炸药的第一类爆炸损伤威力的高低顺序为:LX-14、JH-2、HMX、PETN、RDX、C-4、PBX-HMX、钝化RDX、钝化HMX、PBX-RDX、B、SH-4、TNT、粉状乳化、浆状乳化、2#岩石。

2.3 评价方法的优点

(1)动物损伤伤情是冲击波各特性参数综合作用的结果,故基于动物损伤伤情的评价方法能充分反映出各炸药爆炸产生的冲击波各种特征指标对损伤伤情的贡献,因而也能较全面地反映出各炸药的第一类爆炸损伤威力的大小。

(2)将依据动物的损伤伤情对炸药爆炸威力进行笼统的定性评价,转化成较为精确的量化评价,方法上更为科学。

(3)不是以某一个测点处的单一损伤伤情作为评价指标,而是以整个损伤范围内的多种损伤伤情作为评价指标,这样能更全面地反应出动物实际的损伤情况,故也更能如实、全面地反映出各类炸药爆炸损伤威力的大小。

3 结论

(1) 在 16 种各类型炸药的动物损伤试验的基础上,提出了一种炸药第一类爆炸损伤威力大小的简化量化评价方法。

(2) 利用简化的数学评价方法得出了 16 种炸药的第一类爆炸损伤威力排序: LX-14、JH-2、HMX、PETN、RDX、C-4、PBX-HMX、钝化 RDX、钝化 HMX、PBX-RDX、B、SH-4、TNT、粉状乳化、浆状乳化、2#岩石。

(3) 加权系数 a_j 值只是以 1 次试验的 6 种损伤类型的统计结果为依据大致确定的,代表性不强。若能采用专家评议的方法,对本文中的 6 个评价指标的重要性程度做出评估,来最终确定 a_j 值,将会得出更符合实际的炸药威力排序^[7]。

(4) 在评价过程中,将动物各类损伤伤情作为评价指标进行量化时,若能更详细地对试验结果中的损伤伤情的等级进行划分,再依据损伤等级对指标赋值,这样将能使评价方法更全面、更为精确地量化评

(上接第 8 页)

4 结论

(1) 根据单点火试验结果,对影响尾部点火性能的因素进行了试验分析,经过初始设计参数、点火方式等的选择或调整,设计出了满足发动机性能要求的点火装置。

(2) 本文只是结合工程实际,重点介绍了单点火试验在小型固体火箭发动机尾部点火设计中的应用情况,不免带有一定的局限性,但其设计思路可为其它类型的小型固体火箭发动机点火设计所借鉴。

参考文献:

- [1] A.K.KM.ulkarni,M.Kumar,K.K.Kuo.Rewiew of solid propellant ignition studies[R].AIAA 1980-1 210.

价各炸药的第一类爆炸损伤威力的大小关系。

参考文献:

- [1] 叶序双. 爆炸作用理论基础[M].南京: 中国人民解放军理工大学工程兵工程学院, 1991: 266~274.
- [2] Harry W. Severance, blast-related injuries: special considerations for mass-casualties management[J]. TraumaVue, 1999, VII (1) : 1~4.
- [3] Ralph G. DePalma,, David G. Burris,, Howard R. Champion, and Michael J. Hodgson. Blast injuries[J].The New England Journal of Medicine ,2005, (352):1 335~1 342.
- [4] 王正国编著. 冲击伤[M]. 北京: 人民军医出版社, 1983: 45~55.
- [5] 杨伦标, 高英仪编著. 模糊数学原理及应用[M].广州: 华南理工大学出版社, 1993: 59~61.
- [6] 胡庆贤.关于炸药作功能力的讨论[R].GF-B0043365G , 1999,11:3~4.
- [7] 张跃,邹寿平,宿芬编著. 模糊数学方法及其应用[M]. 煤炭工业出版社, 1992:166~180.

- [2] M.A.Eagar. Ignition transient model for large aspect ratio solid motors[R]. AIAA 1996-3 273.
- [3] J.C.T.Wang.Modern SRM ignition transient modeling (part 5): prospective developments in CFD simulation[R]. AIAA 2001-3 447.
- [4] J.W.Weber, K.C.Tang, etc. Ignition of composite solid propellants: model development, experiments, and validation[R]. AIAA 2003-4 629.
- [5] J.C.T. Wang, E.M.Landsbaum, etc. Recent progress in SRM ignition transient modeling[R].AIAA 2003-5 115.
- [6] J.C.Wang. Experimental study of some problems of small solid propellant rockets[R]. AIAA 1977- 0 902.
- [7] ZHANG Qiufang, WANG Ningfei, TIAN Weiping. Experimental research of tail-ignition in solid rocket motor[C]. Theory and Praticce of Energetic Materials, 2005: 698 ~ 703.