

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.008

# 一种评估炸药作功能力的新测试方法\*

冯海云 胡宏伟 赵向军 安 华 王 钢 张立建 宋 浦

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 建立了一种评估炸药作功能力的新测试方法——金属薄板炸坑法,对典型高爆炸药、含铝炸药及含铝和高氯酸氨(AP)的混合炸药的作功能力进行了测试,并研究了铜薄板变形与炸药爆轰参数之间的关系。结果表明:金属薄板炸坑法能很好地测试各类炸药的作功能力,金属薄板深度和体积的 TNT 当量和综合考虑爆速和爆热贡献计算得到 TNT 当量的排序一致,测试相对标准偏差最大仅为 1.17%。该方法简便、准确、实用,可广泛用于各种炸药的作功能力的测试与评估研究。

[关键词] 爆炸力学;作功能力;测试方法;金属薄板炸坑法

[分类号] O383;TJ55

## 引言

炸药作功能力是评价炸药威力的重要参数,它是指炸药爆炸时对周围介质各种机械作用的统称<sup>[1]</sup>。如何衡量和评价炸药的威力,以及如何才能准确地进行评价,一直是各国爆炸力学工作者关注的热点问题<sup>[2-8]</sup>。目前,国内外炸药作功能力的测试标准方法有铅墙扩孔法和弹道臼炮法。然而其试验药量仅限于 10 g,试样的装填密度与实际偏差很大,对于临界直径大、爆轰感度低的新型炸药不适用。

随着弹药技术的飞速发展,新型非理想、钝感炸药不断增加,上述两种方法已经不适应当前科研的需要,其结果很难为进一步改进炸药配方和定量估计实际爆炸效果提供很多有用的信息。科研工作者又提出了爆炸漏斗法和水下爆炸试验法等适用于大药量、爆轰感度较低炸药的作功能力测试方法。爆炸漏斗法试验药量较大,不需要专门的仪器设备,易于普及,但其结果受介质条件的影响较大,重复性不好。水下爆炸试验法能够适用于几十克到几十公斤的药量,理论比较严谨,数据重复性也较好,但水下爆炸测试法不仅需要建立大型试验水池,而且还需要昂贵的试验仪器设备,大大限制了其普及性。

本文研制了一套金属薄板测量装置,利用爆炸载荷作用下金属薄板的形变值衡量炸药的作功能力,此法操作简便,性能稳定,性价比高,测试样品参数和实际相同,比较实用。文中对典型炸药进行了作功能力测试研究。

## 1 试验

### 1.1 试验装置

金属薄板测量装置主要由金属薄板、底架、压紧板及连接件螺栓螺母组成,如图 1 所示。薄板的材料为铜,长宽尺寸为 390 mm × 390 mm,厚度为 3 mm,公差为 +0.05。试验前将薄板通过连接件螺母和螺栓压紧固定于压紧板和底架之间,中间有效受载面积为直径 300 mm 的圆形。炸药爆炸载荷作用于薄板上,使其产生塑性变形,根据变形情况评估炸药的威力。

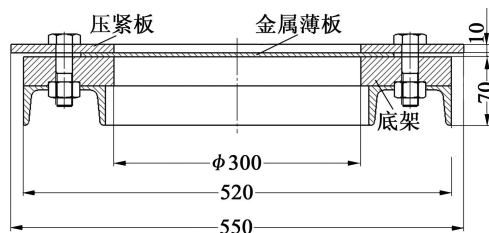


图 1 金属薄板测量装置示意图(单位:mm)

Fig. 1 Sketch map of sheet metal measuring device(unit:mm)

### 1.2 试验样品

试验炸药为 TNT、JO-8、JH-14、WY-1 和 HL-01,样品为圆柱形药柱,全部为压装,质量均为 400 g,长径比为 1.2 : 1.0,具体参数见表 1。采用一端带 8# 雷管孔的 JH-14 传爆药端面中心起爆。每种炸药进行 3 发以上平行性试验。

### 1.3 测试方法

\* 收稿日期: 2013-09-03

基金项目: 国防科技工业新产品创新计划火炸药科研专项; 国家安全重大基础研究(61314303); 总装预研专项(00404010201)

作者简介: 冯海云(1981~),女,硕士,工程师,主要从事爆炸作用与毁伤技术研究。E-mail: dahai99-2005@163.com

通信作者: 宋 浦(1973~),男,研究员,主要从事爆炸作用与毁伤技术研究。E-mail: dahai99-2005@163.com

表 1 试验样品

Tab. 1 Experimental samples

样品名称	配    方 (质量分数)	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	爆速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	爆热/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
TNT	TNT	1.57	6 900	4 522
JO-8	HMX95%/ 塑料/聚四氟 乙烯/蜡	1.82	8 765	5 939
JH-14	RDX96.5%/黏 结剂/石墨	1.71	8 428	5 644
WY-1	HMX60%/ Al26%/黏结剂	1.88	7 410	7 856
HL-01	HMX26%/ AP30%/Al30%/ 黏结剂	1.94	6 211	8 500

将待测炸药装药放置于金属薄板测量冲击装置的正上方,炸药下端面与金属薄板面平行,炸药装药的轴线过金属薄板的中心,调节炸药装药中心到金属薄板面的垂直距离(简称炸高)为 50 cm。

放置金属薄板测量装置应选坚硬地面,要求距金属薄板测量装置 3 m 范围内地面平坦无障碍物,以免影响金属薄板成型效果,引起测量误差。

炸药爆炸后,金属薄板在爆炸载荷作用下,向下产生塑性变形形成炸坑。回收已变形的金属薄板,测量记录炸坑的体积和中心深度。按同样的方法每种炸药至少再做 2 发平行试验,试验结果的差值不大于 0.1 L,计算试验炸坑体积的平均值,将该值作为炸药的作功能力值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沿径向挠曲线和凹坑深度

将一等厚度的垫板置于变形的薄板上,垫板与薄板的直径重合,并以一端边缘为零点,用深度尺沿薄板径向每隔 1 cm,测量一个深度值,如图 2 所示。共测量两个直径方向的深度值,然后取平均值,就可得到薄板直径方向各个位置的挠度,进而亦可得到炸坑的最大深度。

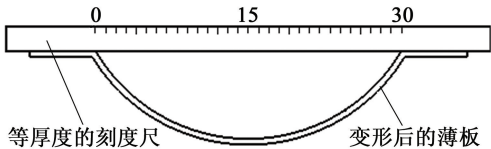


图 2 深度测量示意图(单位:cm)

Fig. 2 Depth measurement chart (unit:cm)

将数据沿径向绘制成挠曲线图,如图 3 所示,图中横坐标  $x$  表示薄板的径向位置,零点为薄板直径的任一端边缘,纵坐标  $\omega$  表示薄板的挠度。由图 3 可直观地看出质量相同、炸高相同时不同炸药爆炸载荷作用下,铜薄板的变形情况。可以按炸药爆炸

对铜薄板作用大小,分成 3 个等级。第 1 等级 JO-8 和 JH-14,这类在高爆速猛炸药作用下铜薄板的变形最大,且形变值与其它炸药相比要高出很多。第 2 等级 WY-1 炸药和 TNT,它们之间的区别不大。最低的是含铝和 AP 的混合炸药 HL-01。

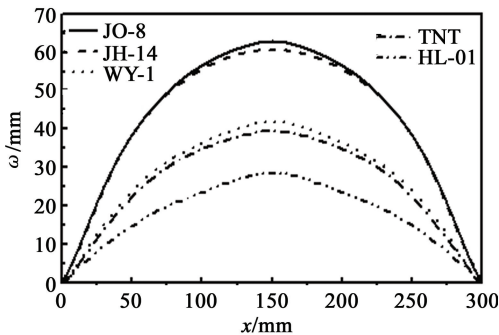


图 3 不同炸药爆炸作用下铜薄板的径向挠曲线图

Fig. 3 Radial deflection curves of copper sheet by different explosives

表 2 列出了质量相同、炸高相同时不同炸药爆炸载荷作用下,铜薄板炸坑的最大深度。由表 2 可以看出:如果以 TNT 对铜薄板作用为基准,JO-8 和 JH-14 高爆速炸药是 TNT 的 1.5 ~ 1.6 倍;WY-1 炸药和 TNT 的作用效果差不多,仅有 TNT 的 1.12 倍;HL-01 炸药比 TNT 的效果差,仅是 74%。

表 2 不同炸药炸坑的最大深度

Tab. 2 Maximum depths of crater by different explosives

炸药名称	炸坑最大深度/mm	TNT 当量
JO-8	61.79	161
JH-14	59.96	156
WY-1	42.93	112
TNT	38.36	100
HL-01	28.53	74

### 2.2 炸坑的体积

表 3 列出炸坑体积的结果。由表 3 可以看出:如果以 TNT 对铜薄板作用为基准,JO-8 和 JH-14 高爆速炸药大约是 TNT 的 1.6 倍;WY-1 和 TNT 的作

表 3 不同炸药的炸坑体积

Tab. 3 Crater volumes by different explosives

炸药名称	炸坑体积/mL	TNT 当量
JO-8	2 298	163
JH-14	2 186	155
WY-1	1 562	111
TNT	1 410	100
HL-01	1 058	75

用效果差不多,仅有 TNT 的 1.1 倍;HL-01 炸药比 TNT 的效果差,仅是 TNT 的 75%。

2.3 铜薄板变形与炸药爆轰参数的关系

根据空中爆炸理论,爆轰过程中爆轰产物所产生冲击波初始压力的计算公式为<sup>[9]</sup>:

$$p = \frac{2\rho_a D^2}{\gamma + 1} \quad (1)$$

式中: $p$  为冲击波压力; $D$  为炸药爆速; $\rho_a$  为空气的初始密度; $\gamma$  为绝热指数。从式(1)可以看出,冲击波初始压力与炸药爆速的平方成正比。

另外从能量的角度看,根据能量守恒,在空爆过程中,有公式<sup>[9]</sup>:

$$\Delta p = \frac{3(\gamma - 1)\rho_0 Q}{2} \left( \frac{r_0}{r_H} \right)^3 + \frac{p_a}{2} \quad (2)$$

式中: $\Delta p$  为冲击波超压; $r_0$  为装药半径; $r_H$  为距爆心距离; $\rho_0$  为炸药的密度; $Q$  为炸药爆热; $\gamma$  为绝热指数; $p_a$  为大气压力。

综上所述,空气中冲击波超压与炸药爆速和爆热有关,是爆速和爆热的函数,根据量纲关系,可以表示为:

$$\Delta p = f(D, Q) = \alpha D^2 + \beta Q \quad (3)$$

式中: $\alpha, \beta$  为待定系数。

以往 TNT 当量是其它炸药的爆热与 TNT 爆热的比值,这种换算没有考虑爆速,然而很多的试验结果表明爆速对超压的影响很显著,特别是对于含铝的非理想炸药而言,用以往的方法计算出的数据偏差较大。所以有必要从爆速、爆热两个角度对非理想炸药超压进行计算。

下面确定待定系数  $\alpha$  和  $\beta$ 。炸药的空爆能量一般包括 3 部分:一次反应的爆轰热,二次反应的无氧燃烧热以及有氧后燃烧反应的后燃烧热。后燃烧热在自由场环境中对爆炸初始冲击波不起作用。炸药的作功能力与爆破热有着密切的关系,用于提供给爆破作用的爆破热为爆轰热和部分无氧燃烧热的总和<sup>[1,9]</sup>,即:

$$Q_b = Q_d + xQ_2 \quad (4)$$

$$\text{由于 } Q_v = Q_d + Q_2, \quad (5)$$

$$\text{所以 } Q_b = (1 - x)Q_d + xQ_v \quad (6)$$

式中: $Q_v$  为爆热; $Q_b$  为爆破热; $Q_d$  为爆轰热; $Q_2$  为无氧燃烧热, $x$  为小于 1 的系数。

爆轰热与爆速的函数关系为<sup>[9]</sup>:

$$Q_d = D^2 / [2(\gamma^2 - 1)] \quad (7)$$

$$\text{因此 } Q_b = \frac{(1 - x)D^2}{2(\gamma^2 - 1)} + xQ_v \quad (8)$$

那么,综合考虑爆速和爆热的 TNT 当量的表述

见下式:

$$w = \frac{\frac{1}{2(\gamma^2 - 1)}D^2 + \frac{x}{1 - x}Q}{\frac{1}{2(\gamma^2 - 1)}D_{TNT}^2 + \frac{x}{1 - x}Q_{TNT}} \quad (9)$$

式中: $w$  为 TNT 当量; $\gamma$  为绝热指数; $D$  和  $Q$  分别为被测炸药的爆速和爆热; $D_{TNT}$  和  $Q_{TNT}$  分别为参比炸药 TNT 的爆速和爆热。

$$\text{令 } \eta = 2(\gamma^2 - 1)x / (1 - x); \quad (10)$$

$$\text{则 } w = \frac{D^2 + \eta Q}{D_{TNT}^2 + \eta Q_{TNT}} \quad (11)$$

假定各种炸药无氧燃烧热对空爆冲击波超压的贡献比例相同,即  $x$  相同。通过对过去大量的炸药空爆超压试验结果归纳整理,显示当  $x = 0.6 \sim 0.8$  时,计算结果与试验结果很接近。取  $x = 0.7, \gamma = 3$ 。将炸药的爆速、爆热数据代入式(11),便可得到综合考虑爆速和爆热的 TNT 当量,见表 4。

表 4 不同炸药的 TNT 当量

Tab. 4 TNT equivalent of different explosives

炸药	综合爆速和爆热的 TNT 当量	深度 TNT 当量	体积 TNT 当量
JO-8	1.61	1.61	1.63
JH-14	1.49	1.56	1.55
WY-1	1.16	1.12	1.11
TNT	1.00	1.00	1.00
HL-01	0.81	0.74	0.75

2.4 试验方法的可靠性和精度

表 4 列出了综合考虑爆速和爆热贡献得出不同炸药的 TNT 当量及本文试验得出的炸坑最大深度和体积的 TNT 当量。

分析表 4 数据可得到:综合考虑爆速和爆热贡献 TNT 当量的计算值与本次试验得到的深度和体积的 TNT 当量排序基本一致。说明金属薄板炸坑法是一种简便、可靠的炸药作功能力的测试方法。

为了考察试验方法的精度,对不同的炸药试样进行了 5 次平行性测试试验,试验结果见表 5。

由表 5 可看出:用金属薄板炸坑法测试不同炸药的威力,相对标准偏差最大仅为 1.17%,说明该测试方法具有很好的精度。

3 结论

1) 综合考虑爆速和爆热的贡献,计算得到 TNT 当量的计算值与本次试验得到的深度和体积的 TNT 当量排序基本一致。说明用铜薄板炸坑法作为评价炸药威力的测试方法是准确可靠的。

2) 金属薄板炸坑法测试不同炸药的威力,相对

表 5 金属薄板炸坑法测试精密度试验结果

Tab. 5 Precision test results of sheet metal crater method

炸药	深 度			体 积		
	炸坑深度/ mm	平均深度/ mm	相对标准 偏差/%	炸坑体积/ mL	平均体积/ mL	相对标准 偏差/%
JO-8	62.44,60.70, 61.83,62.27,61.71	61.79	1.10	2 326,2 259,2 304, 2 312,2 289	2 298	1.11
WY-1	42.56,43.23,43.65, 42.45,42.76	42.93	1.17	1 548,1 576,1 585, 1 543,1 558	1 562	1.15
TNT	38.41,38.61,37.60, 38.72,38.46	38.36	1.15	1 416,1 420,1 398, 1 428,1 388	1 410	1.17
HL-01	28.81,28.73,28.60, 28.11,28.40	28.53	0.99	1 071,1 064,1 059, 1 043,1 053	1 058	1.01

标准偏差最大仅为 1.17%，该测试方法具有很好的精度。

3)金属薄板炸坑法是一种简便、准确、实用的测试炸药作功能力的方法。

参 考 文 献

[1] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995.

[2] 郑孟菊,俞统昌,张银亮. 炸药的性能及测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.

[3] Sućeska M. Test methods for explosives[M]. New York: Springer, 1995: 168-170.

[4] 王肇中,汪旭光,夏斌. 工业炸药作功能力的测试方法研究[J]. 火炸药学报,2007,30(6):24-26,30.  
Wang Zhaozhong, Wang Xuguang, Xia Bin. Study on power test method of industrial explosives[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellents, 2007,30(6):24-26,30.

[5] 韩勇,黄辉,黄毅民,等. 不同直径含铝炸药的作功能力[J]. 火炸药学报,2008,31(6):5-7.  
Han Yong, Huang Hui, Huang Yimin, et al. Power of aluminized explosives with different diameters [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellents, 2008,31

(6):5-7.

[6] 王肇中,汪旭光,夏斌. 粉状乳化炸药作功能力测试方法的研究[J]. 爆破器材,2007,36(4):7-9.  
Wang Zhaozhong, Wang Xuguang, Xia Bin. Study on testing method of power for powdery emulsion explosives [J]. Explosive Materials,2007,36(4):7-9.

[7] 卢校军,王蓉,黄毅民,等. 两种含铝炸药作功能力与JWL方程研究[J]. 含能材料,2005,13(3):144-147.  
Lu Xiaojun, Wang Rong, Huang Yimin, et al. Study on work ability and JWL equation of state of two aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2005,13(3):144-147.

[8] 朱荣强,贾章成,黄寅生. 爆炸排水法测试炸药作功能力探讨[J]. 爆破器材,2006,35(5):12-13.  
Zhu Rongqiang, Jia Zhangcheng, Huang Yinsheng. Discussion on the test method of output energy using explosion drained water[J]. Explosive Materials, 2006, 35(5):12-13.

[9] Л. И. 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承纬,译. 北京:科学出版社,2011.  
Л. И. Orr Rienk. Explosion physics [M]. Beijing: Science Press,2011.

A New Test Method to Assess the Acting Ability of Explosive

FENG Haiyun, HU Hongwei, ZHAO Xiangjun, AN Hua, WANG Gang, ZHANG Lijian, SONG Pu  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] A new test method, metal sheet crater method, has been established for power assessment of high explosives, by which power of typical high explosive, aluminized explosive and composite explosive containing aluminum and AP was tested. The relationship between deformation of copper sheet and detonation parameters of explosive was also researched in this study. The results show that the metal sheet crater method can be a good test for evaluating the work ability of various explosives. The TNT equivalent of depth and volume of the metal sheet crater sorts the same order with the TNT equivalent calculated by detonation velocity and heat, with a lower relative standard deviations by 1.17%. The method is simple, accurate, and practical which could be applied with satisfaction to the power determination of a variety of high explosives.

[KEY WORDS] explosion mechanics; acting ability; test method; metal sheet crater method