

文章编号: 1006-9941(2012)02-0214-04

# 弹道抛掷法测试无雷管感度工业炸药作功能力研究

郑思友, 夏斌, 陆丽园

(煤科总院爆破技术研究所, 安徽 淮北 235000)

**摘要:** 为了研究弹道抛掷法测试无雷管感度工业炸药作功能力的可行性, 以 200 g 乳化基质、铵油炸药(多孔硝酸: 柴油 = 94 : 6)、重铵油炸药(铵油炸药: 乳化基质 = 2 : 1)为试样, 以 100 g TNT 和 2 号岩石粉状乳化炸药作为传爆药进行了弹道抛掷试验。结果表明: 该方法测试无雷管感度工业炸药几乎不受传爆药作功能力的影响, 测试数据精度高, 结果可靠。同时选择了在乳化基质中加入铝粉作为试样, 验证了弹道抛掷法对无雷管感度工业炸药组分变化的敏感性。结果表明: 弹道抛掷法对无雷管感度工业炸药试样组分变化具有较高的敏感性。

**关键词:** 应用化学; 工业炸药; 无雷管感度; 作功能力; 弹道抛掷法; 可行性

**中图分类号:** TJ55; O69

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.017

## 1 引言

炸药的作功能力是指炸药爆炸所产生的冲击波和爆轰气体产物作用于介质, 对介质产生压缩、破碎和抛移的能力, 是衡量工业炸药爆炸性能的一个重要指标<sup>[1-2]</sup>。如何对工业炸药作功能力进行较为准确地表征是困扰工业炸药发展的一大难题, 目前常用的测定方法主要有铅壘法、弹道臼炮法和弹道摆试验等, 但以上测定方法试验药量都较少<sup>[1-3]</sup>, 且要求被测炸药具有雷管感度, 对不具有雷管感度的炸药不能使用。无雷管感度工业炸药, 因冲击波敏感度较低而具有较高安全性, 是工业炸药的发展方向, 用量越来越大, 因此, 准确测试这类炸药的作功能力具有重要的现实意义。

目前, 无雷管感度工业炸药还没有较为适用的作功能力测试方法。水下爆炸法<sup>[4-5]</sup>是测试工业炸药作功能力比较科学的方法, 它可从能量的角度有效地区别不同炸药的爆炸威力特性, 测试结果准确、可靠, 所测结果接近于利用爆热弹所测炸药的爆热值; 但是水下爆炸测试系统投资大, 试验复杂, 测试成本高, 对试验人员专业知识要求较高, 不利于普及。弹道抛掷法是国内外根据国外相关测试方法建立的测试工业炸药作功能力的新方法。王肇中<sup>[2,6-7]</sup>利用弹道抛掷法对工

业炸药的作功能力进行了研究, 研究表明, 弹道抛掷法测试工业炸药作功能力不需要复杂的仪器, 试验药量大, 操作简单, 测试结果准确、可靠, 能够比较客观地反映工业炸药的做功特征, 且测试成本低, 易于普及。故本工作对弹道抛掷法测试无雷管感度工业炸药作功能力的适用性进行了研究。

## 2 试验

### 2.1 试验材料

试验材料主要有: 乳化基质、多孔硝酸、梯恩梯(TNT)、2 号岩石粉状乳化炸药、柴油和 8 号工业电雷管等, 所用试验材料均为国内某民爆器材化工厂提供。

### 2.2 试验装置与方法

参照文献[2]的装置与方法, 试验装置主要由圆形炮筒、圆形钢盖和钢筋混凝土基础等部分构成, 测试示意图如图 1 所示。炮筒固定在混凝土基座上, 筒轴线与地平面成 45°角。测试时, 根据炸药种类称取一定量的试样, 按炸药的原密度制成药卷, 将待测药卷固定在炮筒中央, 使炸药轴线与炮筒的轴线重合, 并使药卷的传爆方向与钢盖的抛掷方向相同或相反。炸药爆炸作功使钢盖以 45°角斜向上抛出, 钢盖运动轨迹呈抛物线形, 由于钢盖运动速度低(10~20 m·s<sup>-1</sup>), 空气阻力的影响较小, 可忽略。测出钢盖被抛出的水平距离  $L$ 。利用抛掷距离  $L$  衡量炸药的作功能力, 也可换算成能量  $E$  进行定量评价炸药作功能力。

收稿日期: 2011-03-23; 修回日期: 2011-06-24

作者简介: 郑思友(1982-), 男, 工程师, 主要从事工业炸药、起爆器材检测及工程爆破技术研究。e-mail: zhengsiyou@126.com

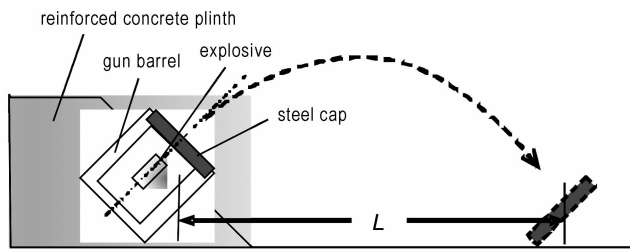


图1 弹道抛掷测试示意图

Fig.1 Sketch of the ballistic projectile

由能量守恒定律,钢盖的初始动能可由式(1)表示:

$$E = \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{1}{2} mgL \quad (1)$$

式中,  $E$  为钢盖获得的能量, J;  $m$  为钢盖的质量, 通常为

200 kg;  $V_0$  为钢盖初始速度,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.81 m \cdot s^{-2}$ ;  $L$  为钢盖被抛出的水平距离, m。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 测试结果统计分析

分别称取 200 g 乳化基质、铵油炸药(多孔硝铵: 柴油 = 94 : 6, 手工搅拌)、重铵油炸药(自制的铵油炸药: 乳化基质 = 2 : 1, 手工搅拌)进行弹道抛掷试验, 经试验验证所测样品均无雷管感度, 试验测试分别用 TNT(1<sup>#</sup>) 和 2 号岩石粉状乳化炸药(2<sup>#</sup>) 作为传爆药, 传爆药量均为 100 g。试验前首先测试传爆药的空白值, 并将空白值扣除, 平行试验 6 次, 取平均值。测试结果见表 1。

表1 无雷管感度工业炸药试样在不同传爆药下的测试结果

Table 1 Test results of non-capsensitivity industrial explosives by different primers

explosive	initiating explosive	projectile distance/m	average/m	standard deviation/m	power/J
emulsion matrix	1 <sup>#</sup>	15.38, 15.06, 15.47, 15.53, 15.20, 15.07,	15.28	0.20	14974
	2 <sup>#</sup>	15.09, 15.43, 14.98, 15.33, 15.73, 15.50	15.34	0.27	15033
ANFO	1 <sup>#</sup>	12.58, 13.33, 13.17, 12.50, 12.65, 12.97,	12.87	0.34	12613
	2 <sup>#</sup>	12.38, 12.99, 12.59, 13.34, 13.31, 12.89	12.92	0.38	12662
heavy ANFO	1 <sup>#</sup>	12.92, 12.68, 14.00, 13.11, 13.80, 13.56,	13.34	0.52	13073
	2 <sup>#</sup>	12.70, 13.46, 13.28, 13.69, 12.78, 14.20	13.35	0.57	13083

利用数理统计方法对表 1 中三种炸药试样的测试数据进行分析, 分析比较被测试样在不同起爆药起爆下的两组数据是否具有显著差异, 以验证利用弹道抛掷试验通过传爆药起爆测试无雷管感度工业炸药作功能力的可靠性。

当两组数据的总体方差未知时, 可用  $F$  检验比较两组数据的方差。

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (2)$$

式中,  $F$  为两个方差的比值;  $S$  为标准差, 固定较大者标准差值为  $S_1$ , 较小者为  $S_2$ 。

计算出的统计量  $F$  值与  $F$  分布表中的临界值  $F_{0.05}$  作比较: 若  $F > F_{0.05}$ , 表示两个标准差有显著差别, 否则表示两者没有显著差别。若两标准差没有显著差异, 则对两组数据再进行  $t$  检验。

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\bar{S} \sqrt{\frac{n}{2}}} \quad (3)$$

式中,  $t$  为  $t$  检验的统计量;  $\bar{X}_1$  为第一组数据平均值;  $\bar{X}_2$  为第二组数据平均值;  $\bar{S}$  为合并标准差,  $\bar{S} = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{2}}$ ;

$n$  为每组数据自由度(即数据个数)。

将式(3)求出的  $t$  和  $t$  分布表中的  $t$  值比较, 若  $|t| \leq t_{0.05}$ , 则表示两组数据没有显著差异; 否则, 表示两组有显著差异。

把表 1 中三个被测试样的数据分别带入式(2)和式(3)计算知:

乳化基质:  $F = 1.82 < F_{0.05} = 4.28, t = 0.44 < t_{0.05} = 2.45$ ;

铵油炸药:  $F = 1.25 < F_{0.05} = 4.28, t = 0.67 < t_{0.05} = 2.45$ ;

重铵油炸药:  $F = 1.20 < F_{0.05} = 4.28, t = 0.06 < t_{0.05} = 2.45$ 。

故三个被测试样在不同传爆药起爆下的两组数据均没有显著差异。这说明, 弹道抛掷法测试无雷管感度工业炸药的作功能力在保证能够完全爆轰的前提下不受传爆药作功影响, 从每个测试样品在相同传爆药起爆的 6 次平行试验数据可看出, 试验数据离散性很小, 乳化基质、铵油炸药和重铵油炸药在 TNT 起爆下的 6 次测试数据的标准偏差分别只有 0.20, 0.34, 0.52 m, 在 2 号粉状乳化炸药起爆下的标准偏差分别是 0.27, 0.38, 0.57 m, 测试数据精确度高, 试验重复性好, 结果可靠。证明利用弹道抛掷试验测试无雷管感度工业炸药是可行的, 可以定量表征炸药的作功能力。

### 3.2 不同药量测试结果的相关性

称取不同药量的乳化基质,用 100 g 2 号岩石粉状乳化炸药引爆,考察药量与抛掷距离的关系,结果见图 2。从图 2 中药量与抛掷距离关系的曲线可看出,抛掷距离随药量的增大而增加,在一定范围内,呈良好的线性关系。利用最小二乘法对药量与抛掷距离进行线性分析,得一元线性回归方程:  $y = 0.0733x + 1.515$ , 能量线性相关系数为 0.9993,标准误差为 0.43 m。试验证明,弹道抛掷试验测试的抛掷距离与药量之间相关性好,测试结果的标准误差小,试验结果精度较高。对于同一批次炸药,通过弹道抛掷试验测试的一组不同药量下的结果可估算其它药量下的作功能力。

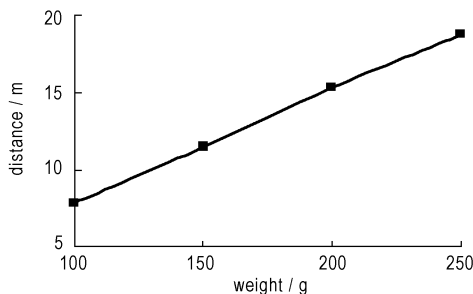


图 2 抛掷距离与炸药量的关系

Fig. 2 A plot of projectile distance and explosive mass

### 3.3 敏感性分析

铝粉能够提高工业炸药的作功能力,一般认为铝粉不直接参与炸药成份间的反应,而是与爆炸产物进行二次反应,使爆轰产物的高压持续时间变长,这就大大提高了炸药的爆热和威力。本试验通过改变铝粉含量及粒度验证弹道抛掷试验对炸药组分差别的敏感性。称取 200 g 乳化基质,分别外加 0%、2%、4%、6%、8%、10% 和 12% 粒度为 45  $\mu\text{m}$  的铝粉制备含铝炸药试样,测试结果见表 2。称取 200 g 乳化基质,分别加入(外加 6%) 粒度为 75, 45, 15  $\mu\text{m}$  的铝粉,制备含铝炸药试样,测试结果见表 3。经试验,所制备的含铝炸药试样均无雷管感度,利用 100 g 2 号岩石粉状乳化炸药传爆。表中数据均为 6 次平行试验的平均值,且已扣除传爆药做功。

从表 2、表 3 可看出,乳化基质作功能力随着铝粉含量增加而增大,铝粉粒度越小作功能力越大,利用弹道抛掷法测试的无雷管感度含铝工业炸药的作功特征符合含铝工业炸药的作功特征<sup>[8-9]</sup>,试样中铝粉含量、铝粉粒度的微小差异所引起的炸药作功能力的变化可以明显地反映出来。试验证明,弹道抛掷试验对无雷

管感度工业炸药试样组分变化具有较高的敏感性。

表 2 铝粉含量与抛掷距离的关系

Table 2 Correlation of aluminium powder mass and projectile distance

Al/%	0	2	4	6	8	10	12
L/m	15.70	16.85	18.21	19.45	20.80	21.62	22.50
E/J	15402	16530	17864	19080	20405	21209	22072

Note: Emulsion matrix is 200 g. L is projectile distance of stell cap;  
E is energy of steel cap obtained.

表 3 铝粉粒度与抛掷距离的关系

Table 3 Correlation of aluminium powder diameter and projectile distance

diameter of aluminium/ $\mu\text{m}$	75	45	15
L/m	19.01	19.45	20.53
E/J	18649	19080	20140

Note: Emulsion matrix is 200 g.

## 4 结 论

(1) 弹道抛掷法试验药量较大,能满足用传爆药起爆无雷管感度工业炸药的试验条件,它以测试炸药爆炸对其作用介质的抛掷距离(或者换算成能量)表征炸药作功,较符合爆破实际,测试结果几乎不受传爆药作功的影响,测试数据精度高,试验数据重复性好,结果可靠。

(2) 弹道抛掷试验测试的被测试样对作用介质的抛掷距离与测试药量之间,在一定的范围内具有良好的线性相关性,对于同一批次炸药,可通过弹道抛掷试验测试的一组不同药量下的结果可估算其它药量下的作功能力。

(3) 弹道抛掷试验对无雷管感度工业炸药的组分变化具有较高的敏感性。结果表明,利用弹道抛掷试验测试无雷管感度工业炸药作功能力是可行的,测试数据的精度、结果的可靠性以及对无雷管感度工业炸药组分变化的敏感性等方面都可以满足测试无雷管感度工业炸药作功能力的要求,能够比较客观地反映出不同类型的无雷管感度工业炸药的作功特征。弹道抛掷法完善了工业炸药性能测试方法体系,对推动、指导无雷管感度工业炸药进一步发展和应用具有实际意义。

### 参考文献:

- [1] 汪旭光. 乳化炸药(第 2 版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.

- WANG Xu-guang. Emulsion Explosives(2nd Edition) [M]. Beijing: Metallurgical Industry, 2008.
- [2] 王肇中,汪旭光,李国仲,等. 测试工业炸药作功能力的方法: 弹道抛掷法[J]. 有色金属, 2006(4): 109-111.  
WANG Zhao-zhong, WANG Xu-guang, LI Guo-zhong, et al. A power test method for industrial explosives: Ballistic projectile method[J]. *Nonferrous Metals*, 2006(4): 109-111.
- [3] 郑思友,周易坤. 工业炸药作功能力测试方法综述[J]. 煤矿爆破, 2009(2): 22-26.  
ZHENG Si-you, ZHOU Yi-kun. Summary on power test method of industrial explosives[J]. *Coal Mine Blasting*, 2009(2): 22-26.
- [4] 史锐,徐更光,刘德润,等. 炸药爆炸能量的水中测试与分析[J]. 火炸药学报, 2008, 31(4): 1-5.  
SHI Rui, XU Geng-guang, LIU De-run, et al. Underwater test and analysis for explosion energy of explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(4): 1-5.
- [5] 赵琳,李兵,闫吉杰,等. 炸药能量测试的水下爆炸方法[J]. 声学技术, 2003, 22(2): 72-75.  
ZHAO Lin, LI Bin, YAN Ji-jie, et al. A method of the blast energy measurement by underwater explosion[J]. *Technical Acoustics*, 2003, 22(2): 72-75.
- [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 Zhao-zhong, WANG Xu-guang, XIA Bin. Study on testing method of power for powdery emulsion explosives[J]. *Explosive Materials*, 2007, 36(4): 7-9.
- [7] 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): 24-30.  
WANG Zhao-zhong, WANG Xu-guang, XIA Bin. Study on power test method of industrial explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(6): 24-30.
- [8] 郑思友,夏斌,刘尊义. 利用弹道抛掷法评价含铝工业炸药作功能力[J]. 煤矿爆破, 2007(2): 9-12.  
ZHENG Si-you, XIA Bin, LIU Zun-yi. Estimating the power of industrial aluminiferous explosive by way of ballistic projectile method[J]. *Coal Mine Blasting*, 2007(2): 9-12.
- [9] 王肇中,汪旭光. 含铝工业炸药作功能力测试研究[J]. 工程爆破, 2008, 14(4): 70-72.  
WANG Zhao-zhong, WANG Xu-guang. Study on explosive power test of aluminiferous industrial explosive[J]. *Engineering Blasting*, 2008, 14(4): 70-72.

## Power Test of Non-capsensitivity Industrial Explosive by Ballistic Projectile Method

ZHENG Si-you, XIA Bin, LU Li-yuan

(Blasting Technology Reseach Institute of CCRI, Huaibei 235000, China)

**Abstract:** In order to study the feasibility of ballistic projectile method used in the power test of non-capsensitivity industrial explosive, ballistic projectile tests using 200 g emulsion matrix, ammonium nitrate and fuel oil mixture (ANFO) explosive and heavy ANFO explosive as samples and 100 g TNT and 2# rock powdery emulsion explosive as primers were conducted. Results show that this method is hardly affected by the power of primer and has good accuracy and reliability. Moreover, the sensitivity of the ballistic projectile method to the change of the components of non-capsensitivity industrial explosive was verified by adding aluminite powder into the emulsion matrix samples, and the results show the ballistic projectile method has high sensitivity to the change of the components of non-capsensitivity industrial explosives.

**Key words:** applied chemistry; industrial explosive; non-capsensitivity; power; ballistic projectile method; feasibility

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.017