

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.01.003

低感炸药低爆炸响应点测试研究^{*}

花 成^① 张艳丽^① 姚奎光^① 江 剑^② 于劭钧^① 赵学峰^①

①中国工程物理研究院化工材料研究所(四川绵阳,621900)

②南京理工大学机械学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 低感炸药机械感度的传统测试方法是撞击感度爆炸百分率法和 Bruceton 上下法,现普遍采用的落锤仪导轨受高度的限制,用这两种方法无法得到 50% 爆炸响应点即 H_{50} 值,也无法得到落高均值 μ 和方差 σ 的估计,故不能完全反映低感炸药在外界刺激下的安全性能。针对上述问题,采用 OSTR(one-shot transformed response)方法测试了低感炸药的爆炸响应点,为低感炸药的安全性能测试及使用提供进一步的信息和评估依据。研究表明:在低感和钝感炸药的机械撞击安全性能测试中,使用 OSTR 法可以得到较为准确的均值 μ 及方差 σ ,并经外推,可预估低爆炸概率点的估计值。单元试验发数 m 的选取对均值的估计影响较小,但对方差的估计有一定的影响,随着 m 的增大, σ 偏小的程度减小,这样得到的极低爆炸概率点的估计更为准确;但 m 较大时所需的总试验量 N 较大。综合考虑, m 取 6 或 8 较为适宜。

[关键词] 低感炸药;撞击感度;OSTR 方法

[分类号] TD235.2⁺1;064

引言

随着对武器安全性和有效性要求的提高,炸药对外界刺激量的敏感程度即炸药的感度,成为一个重要的研究内容。目前国内普遍的炸药特性落高测试方法为定步长的序贯试验方法,即 Bruceton 方法,该方法起始于二战期间的美国海军 Bruceton 实验室,具有计算方便、不需使用计算机和相关软件等优点,但存在均值估计差,标准偏差较真值系统偏小的缺点^[1];另一种方法为兰利法,是一种变步长的序贯试验方法,该法对均值的估值精度较高,但也存在标准偏差较真值系统偏小的缺点^[1-5]。上述两种方法主要用于 50% 爆炸概率响应点的估计。1974 年出现于美国的 OSTR(one-shot transformed response)方法^[6],主要用来估计给定的 p 响应点, p 一般为 20% 以下或 79% 以上。

PBX-3 炸药是一种低感炸药,在 10 kg、25 cm 标准撞击条件下的撞击感度测试结果为 0 ~ 4%,且 GJB772A—1997 方法 601.2 规定对于低感炸药只有 10 kg、50 cm 和变落高 5 kg 测试条件,使用 10 kg 落锤及加大落高后,击柱会产生严重塑性形变;在试验药量 35 mg、锤质量 5 kg 条件下,特性落高的测试结果受国内普遍使用落锤仪高度的限制,无法测出均

值,只能定高度进行爆炸概率测试,并将结果表示为 $H_{50} > 100$ cm。本文尝试使用 $m = 3$ 和 $m = 6$ (m 为一试验刺激量的最大试探次数)的 OSTR 方法^[7-8]测试该炸药在 $p = 0.2063$ 和 $p = 0.1092$ 时的爆炸概率响应点。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置与试样准备

按 GJB772A—1997 方法 601.2 的要求,采用炸药特性落高测试装置,使用由击柱、击套组成的标准撞击装置,试验药量 35 mg、锤质量 5 kg。

1.2 试验方法

试验按 GJB/2377A—1994 感度试验用数据统计方法中方法 102 OSTR 法进行^[9]。OSTR 方法为一种变步长的序贯试验方法,根据试验目的确定一个应优先得到其较好精度的 p 响应点估计值,据此 p 值由 OSTR 方法,求出一个整数的各刺激量单元试验数 m 值,在试验中分别选定 $m = 3$ 、 $p = 0.1092$ 和 $m = 3$ 、 $p = 0.2063$ 。对 PBX-3 炸药根据以前经验积累并结合实际,取试验高响应刺激量(实际高度对数值) $X_U = 2.255$,适当放宽最大全不响应刺激量(实际高度对数值) $X_L = 1.300$,试验完预定的 N 发或出现一定的升降转换次数后停止。

^{*} 收稿日期:2014-05-13

基金项目:国防基础科研项目(B1520132004)

作者简介:花成(1967~),男,副研究员,研究方向为含能材料安全性能测试与研究。E-mail:huac1988@126.com

通信作者:江剑(1973~),男,博士,研究方向为机电一体化和测控技术研究。E-mail:83905118@163.com

1.3 试验结果处理方法

假设炸药临界刺激量的对数值服从正态分布,则定义最大似然函数 L 及其对数函数 $\log_{10}L$,用牛顿法求 $\log_{10}L$ 最大值,算法^[10]如下。

预备步:求区间 (X_{1L}, X_{0U}) 中刺激量 X_i 的个数 N_m ,置均值初值 $\mu_0 = (X_{1L} + X_{0U})/2, \sigma_0 = k \times (X_{0U} - X_{1L})/[8 \times (N_m + 2)]$,计算精度 $\varepsilon = 0.001$ 。

主步:

1)逐步求方程组(1)的解 $\Delta\mu, \Delta\sigma$:

$$\begin{cases} f + f_{\mu}\Delta\mu + f_{\sigma}\Delta\sigma = 0; \\ g + g_{\mu}\Delta\mu + g_{\sigma}\Delta\sigma = 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f, f_{\mu}, f_{\sigma}, g, g_{\mu}, g_{\sigma}, \Delta\mu, \Delta\sigma$ 为迭代公式中的计算变量,其意义参见文献[11]。

2)如果 $|\Delta\mu| + |\Delta\sigma| < \varepsilon$,停止迭代,得均值 μ 和方差 σ 的估计值。反之则置 $\mu = \mu_0 + \Delta\mu, \sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$ 转式(1)继续迭代。按上述算法编制程序进行试验结果处理。

2 试验与试验结果处理

2.1 使用 OSTR 方法测试特屈儿标准炸药低爆炸概率响应点

为求出 $X_{0.01}$ 点的估计,按照 OSTR 方法的一般设计,每个单元试验发数,即每个高度的试探发数 m 大于 18 发,总的试验量大于 200 发,由于人力、物力的限制,无法直接测试爆炸概率为 0.01 的点。一般取 $m = 3$,得到 $X_{0.2063}$ 的爆炸概率点估计,再通过外推得到爆炸概率为 $X_{0.10}, X_{0.01}$ 的点估计。 $m = 3$ 时 U(up)对应于响应结果列 000(1:代表爆炸,0:代表不爆炸),D(down)对应于 3 种可能列 001,01,1。

使用 OSTR 方法测试特屈儿标准炸药感度,药量 50 mg、锤质量 5 kg,相对湿度 65%,室温 25℃,试验结果如表 1 所示。

从表 1 可见 $X_{1L} = X_2 = 1.300, X_{0U} = X_{10} = 1.559$,有混合结果区 $(1.300, 1.559)$,该组试验含 16 个试验单元,共试验 36 发。置均值初值 $\mu_0 = 1.46$ 、方差初值 $\sigma_0 = 0.04$,精度 $\varepsilon = 0.001$,得最大似然估计 $\sigma = 0.13, \mu = 1.576$,实际落高为 37.7 cm,满足 GJB772A—1997 方法 601.2 要求的 (41 ± 9) cm 范围。查正态分位数表, $U_{0.2063} = -0.819, X_{0.2063} = 1.576 - 0.819 \times 0.13 = 1.470$, 20.63% 爆炸概率响应点高度为 29.5 cm。

2.2 PBX-3 炸药 20.63% 低爆炸概率 $X_{0.2063}$ 点测试

选定 $p = 0.2063$ 、各刺激量单元试验数 $m = 3$,根据经验积累并结合实际取高响应刺激量(对数值) $X_U = 2.30$,适当放宽最大全不响应刺激量估计值 $X_L = 1.30$ (对数值),试验终止准则一般取总试验

表 1 特屈儿标准炸药 OSTR 方法感度试验

Tab.1 Sensitivity test results of standard explosive Tetrylby OSTR method

i	对数高度	实际高度/ cm	响应 情况	结果	N_i	n_i
X_U	1.900	79.4	—	—	—	—
X_L	1.100	12.6	—	—	—	—
1	1.500	31.6	1	D	1	1
2	1.300	20.0	01	D	2	1
3	1.200	15.9	000	U	3	0
4	1.250	17.8	000	U	3	0
5	1.375	23.7	1	D	1	1
6	1.313	20.6	000	U	3	0
7	1.353	22.6	000	U	3	0
8	1.627	42.3	1	D	1	1
9	1.490	30.9	000	U	3	0
10	1.559	36.2	01	D	2	1
11	1.525	33.5	000	U	3	0
12	1.542	34.8	1	D	1	1
13	1.534	34.2	01	D	2	1
14	1.423	26.5	001	D	3	1
15	1.312	20.5	000	U	3	0
16	1.368	23.3	01	D	2	1
合计/发					36	

注:0—不爆炸、1—爆炸, N_i —刺激量 X_i 处不爆炸总发数, n_i —刺激量 X_i 处爆炸总发数,U—up,D—down。

量 N 为 30 至 40,即试验完 N 发后停止,依上述规定程序各进行两组试验,试验相对湿度为 65%~67%,室温为 25~26℃,试验结果如表 2、表 3。

表 2 PBX-3 炸药低爆炸概率

$X_{0.2063}$ 点估计(第 1 组)

Tab.2 Low exploded percentiles estimation of PBX-3 at $X_{0.2063}$ (the first group)

i	对数高度	实际高度/ cm	响应 情况	结果	N_i	n_i
X_U	2.300	—	—	—	—	—
X_L	1.300	—	—	—	—	—
1	1.800	63.2	000	U	3	0
2	2.050	112.2	001	D	3	1
3	1.925	84.4	000	U	3	0
4	1.988	97.3	000	U	3	0
5	2.144	139.3	000	U	3	0
6	2.186	153.5	1	D	1	1
7	2.165	146.2	01	D	2	1
8	2.077	119.4	000	U	3	0
9	2.121	132.1	001	D	3	1
10	2.099	125.6	000	U	3	0
11	2.110	128.4	000	U	3	0
合计/发					30	

表 3 PBX-3 炸药低爆炸概率

$X_{0.2063}$ 点估计(第 2 组)

Tab. 3 Low exploded percentiles estimation of PBX-3 at $X_{0.2063}$ (the second group)

i	对数高度	实际高度/ cm	响应 情况	结果	N_i	n_i
X_U	2.255	179.9	—	—	—	—
X_L	1.300	20.0	—	—	—	—
1	1.777	59.9	000	U	3	0
2	2.016	103.8	000	U	3	0
3	2.136	136.6	001	D	3	1
4	2.076	119.1	1	D	1	1
5	1.927	84.5	000	U	3	0
6	2.002	100.3	001	D	3	1
7	1.963	91.7	000	U	3	0
8	1.983	96.1	000	U	3	0
9	2.059	114.6	01	D	2	1
10	2.021	105.0	000	U	3	0
11	2.040	109.7	000	U	3	0
12	1.148	140.4	000	U	3	0
13	2.185	153.0	01	D	2	1
14	2.167	146.7	1	D	1	1
15	2.104	126.9	000	U	3	0
合计/发					39	

从表 2 可见, $X_{1L}=2.050$, $X_{0U}=2.165$, 有混合结果区(2.050,2.165), 该组数据含 11 个试验单元,共试验 30 发。数据中的 U、D 转换次数为 6, 出现于 i 值为 1、2 间, 5、6 间,6、7 间,7、8 间,8、9 间, 9、10 间。置均值初值 $\mu_0=(2.050+2.165)/2=2.1075$ 、方差初值 $\sigma_0=0.0294$,精度 $\varepsilon=0.001$,得极大似然估计 $\mu=2.205$, $\sigma=0.101$, $U_{0.2063}=-0.82$, $X_{0.2063}=2.205-0.82\times0.101=2.12$, 故 20.63% 爆炸响应点实际高度为 $10^{2.12}=132.4\text{ cm}$ 。

从表 3 可见, $X_{1L}=X_6=2.002$, $X_{0U}=X_{13}=2.185$,有混合结果区(2.002,2.185), 该组数据含 15 个试验单元,共试验 39 发。

置均值初值 $\mu_0=(2.002+2.185)/2=2.094$ 、方差初值 $\sigma_0=0.0346$, $\varepsilon=0.001$,得极大似然估计 $\mu=2.157$, $\sigma=0.106$, $U_{0.2063}=-0.82$, $X_{0.2063}=2.157-0.82\times0.106=2.070$, 故 20.63% 爆炸概率响应点实际高度为 $10^{2.07}=117.5\text{ cm}$ 。

2.3 PBX-3 炸药低爆炸概率 $X_{0.1092}$ 点测试

选定 $p=0.1092$ 、单元试验发数 $m=6$, 根据经验积累并结合实际取 $X_U=2.255$, 适当放宽最大全不响应刺激量估计值 $X_L=1.300$, 试验相对湿度 65%, 室温 25℃, 试验终止准则取数据中的 U、D 转换次数为 5, 依上述规定程序试验得数据记录如

表 4。

表 4 PBX-3 炸药低爆炸概率 $X_{0.1092}$ 点估计

Tab. 4 Low exploded percentiles estimation of PBX-3 at $X_{0.1092}$

i	对数高度	实际高度/ cm	响应 情况	结果	N_i	n_i
X_U	2.255	179.9	—	—	—	—
X_L	1.300	20.0	—	—	—	—
1	1.778	59.9	000000	U	6	0
2	2.016	103.8	01	D	2	1
3	1.897	78.9	000001	D	6	1
4	1.599	39.7	000000	U	6	0
5	1.748	56.0	000000	U	6	0
6	1.882	76.2	0001	D	4	1
7	1.815	65.3	000000	U	6	0
8	1.849	70.6	000000	U	6	0
9	2.052	112.7	000000	U	6	0
10	2.154	142.4	000000	U	6	0
11	2.186	153.5	001	D	3	1
合计/发					57	

从表 4 可见, $X_{1L}=X_6=1.882$, $X_{0U}=X_{11}=2.186$, 有混合结果区(1.882,2.186), 该组数据含 11 个试验单元,共试验 57 发。数据中的 U、D 转换次数为 5, 出现于 i 值为 1、2 间,3、4 间,5、6 间,6、7 间,10、11 间。

置初值 $\mu_0=(1.882+2.186)/2=2.034$ 、方差初值 $\sigma_0=0.100$, $\varepsilon=0.001$, 得 $\mu=2.211$, $\sigma=0.173$ 。

查正态分位数表, $U_{0.1092}=-1.23$, $X_{0.1092}=2.211-1.23\times0.173=1.998$, 10.92% 爆炸概率响应点实际高度为 $10^{1.998}=99.5\text{ cm}$ 。

3 结果讨论

对于 PBX-3 炸药,由表 2、表 3 试验结果可以看出,当各刺激量单元试验数 $m=3$ 、总试验发数分别为 30、39 时,进行 20.63% 爆炸概率响应点的估计时,均值估计分别为 2.205 和 2.157, 方差估计分别为 0.101 和 0.106, 这说明均值和方差的估计随试验的发数增加略有小的波动,但变化范围不大,其中也含有炸药试样随机性产生的随机波动。同时 $X_{0.2063}$ 点的估计值变化有小的差别,与感度测试仪器的误差相当。

对比表 2、表 3、表 4 的试验结果可以看出,单元试验数 $m=3$ 和 $m=6$ 对试验结果的影响。 $m=6$ 时由于单个刺激量处的试探发数为 6, 为保证 OSTR 方法规定的 U(up)、D(down) 转换次数,总的试验发数增加明显。 $m=3$ 时测试结果的方差估计值由

0.101、0.106 变化为 $m = 6$ 时的 0.173, 方差估计值明显增大, 均值估计变化较小。由于升降法试验存在方差估计系统偏小的问题, 因此 $m = 6$ 时的方差估计值更为可信。

对比表 2、表 3、表 4 的试验结果还可发现, 单元试验数 $m = 3$ 时由于方差估计值偏小, 对 $X_{0.10}$ 以下爆炸概率响应点的估计值会偏大, 当总的试验发数较少时, $m = 3$ 时的测试结果仅用于估计 $X_{0.2063}$ 爆炸概率响应点是较为稳妥的。

4 结论

1) 在低感和钝感炸药的机械撞击安全性能测试中, 使用 OSTR 法可以有效获得均值 μ 及方差 σ 的估计值, 可以获得其安全性信息。

2) 当总的试验发数较少、单元试验数为 3 时的测试结果, 仅用于估计 $X_{0.2063}$ 爆炸概率响应点是较为稳妥的, 不易用于使用外推方法进行更低爆炸概率点的估计。

3) 各刺激量单元试验数 m 的选取对均值的估计影响较小, 但对方差的估计有一定的影响。随着 m 的增大, σ 系统偏小的程度减弱, $m = 6$ 时的方差估计值更为可信, 这样经外推, 可得预定更低爆炸概率点的估计较为准确。但 m 较大时所需的总试验量 N 较大, 不利于实际试验, 这可能是欧洲部分国家选用 $m = 6$ 的部分原因。

参 考 文 献

- [1] Bolt B A. Design and estimation in small sample quantal response problems; a monte carlo study [R]. AD-A208 115, 1989.
- [2] Langlie H J. A reliability test method for one-shot item [M]. Aeronutronic Publication, 1962.

- [3] 田玉斌, 王典鹏, 房永飞. 火工品发火点估计方法比较研究[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 58-62.
Tian Yubin, Wang Dianpeng, Fang Yongfei. Comparative study of estimating method of firing level of pyrotechnics [J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2010, 18(1): 58-62.
- [4] 苏芳, 田玉斌. 二元响应模型的选择[J]. 应用数学, 2004, 17(增刊): 59-62.
Su Fang, Tian Yubin. Binary response model choice [J]. Mathematica Applicata, 2004, 17(Suppl.): 59-62.
- [5] Tian Yubin, Wu Kedian. Percentiles estimation for a response distribution [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 11(4): 424-428.
- [6] Einbinder S K. One shot sensitivity for extreme percentage points [C]//Proceeding of the 19th Conference on the Design of Experiments in Army Research Development and Testing, 1974.
- [7] MIL-STD-331A. Environmental and performance test for fuse and fuse components [S]. 1976.
- [8] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
Cai Ruijiao. Pyrotechnics design principle [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999.
- [9] GJB/2377A—1994. 感度试验用数据统计方法[M]. 北京: 国防科工委军标出版社, 1995: 22-33.
- [10] 刘宝光. 敏感性数据分析与可靠性评定[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
Liu Baoguang. Sensitive data analysis and reliability assessment [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.

Test on Low Percentiles of Low Sensitive Explosive at Firing Level

HUA Cheng^①, ZHANG Yanli^①, YAO Kuiguang^①, JIANG Jian^②, YU Shaojun^①, ZHAO Xuefeng^①

①Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics (Sichuan Mianyang, 621900)

②School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The conventional methods to test the sensitivity of low sensitive explosives are the exploded percentage of explosive method and the Bruceton "up and down" method. Because of the limitation of the height of the falling hammer machine, in some condition the sensitivity of low sensitive explosive (such as H_{50} , μ and σ) cannot be measured by above the two methods. So it cannot completely reflect the safety property of low sensitive explosive with external stimulus. In order to provide further information and evidence for the safety property tests and using of low sensitive explosive, the sensitivity of PBX-3 explosive was tested on drop hammer machine with the one-shot transform response (OSTR) method. The test results indicate that more reasonable average μ and variance σ are obtained with OSTR method in the collision tests and that the low exploded percentiles estimation can be made by extrapolating. Besides, the choice of unit test number m has little effect on the estimation of average, but it has some effect on the estimation of variance. As m increases, the decreased tendency of variance σ reduces and the low exploded percentiles estimation becomes more accuracy. But the total number N that tests need is much higher when m is larger. Based on the consideration, unit test number m is 6 or 8.

[KEY WORDS] low sensitive explosive; impact sensitivity; OSTR method