

概率统计在感度测试中的应用

胡庆贤, 吕子剑, 花 成

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 应用概率统计的方法, 导出了炸药的爆炸概率与落锤试验中测试一组(25发)试样时, 出现 k 发连续爆炸的概率的关系式, 给出了相应的概率表, 为测试结果的可靠性提供了检测方法。

关键词: 落锤试验; 感度; 概率统计

中图分类号: TQ560; O211.9

文献标识码: A

1 引言

在炸药的研制中, 常用落锤仪测试炸药的撞击感度。国内一般是用10 kg落锤、25 cm落高、50 mg试样条件下平行测试两组(每组25发)试样的爆炸百分数。用两组试样的爆炸百分数平均值、置信水平为0.95时的置信区间表示炸药的撞击感度^[1]。有时, 在炸药配方的研制、生产中, 为了及时了解炸药感度的变化, 只做一组(25发)试验。由于试验发数较少, 置信水平为0.95时的置信区间常常较宽。如测得一组试样的爆炸百分数为0.40, 其置信水平为0.95的置信区间下限为0.21, 上限为0.61, 上、下限相差0.40。若要较准确地求出该炸药的爆炸概率, 还需做多组试验求其平均值。为了从一组试验中取得更多的信息, 从25发试验中得到的数据能更可靠的反映出炸药在撞击下的敏感程度, 本文导出了炸药的爆炸概率与落锤试验中测试一组(25发试样)试样, 出现连续爆炸 k 发(25次试验中试样连续爆炸的最高次数)的概率的关系式, 给出了相应的表, 由此可以从25发试验结果了解试样的爆炸概率在置信区间中的大体位置, 也可以判断测试中是否出现了由于仪器或人为因素造成较大的误差。为测试结果的可靠性提供了检测方法。

2 方法概述^[2,3]

落锤试验中一组(n 发)感度试验随机变量 x 的概率分布是:

收稿日期: 2001-04-01; 修回日期: 2002-01-28

作者简介: 胡庆贤(1942-), 男, 研究员, 长期从事炸药机械感度研究及测试工作, 获国防科工委科技进步奖五项, 发表论文30篇。

$$f(x) = \binom{n}{x} P^x (1-P)^{n-x} \quad x = 0, 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, x 为 n 次试验中试样爆炸的次数; P 为试样的爆炸概率。

在 $n+1$ 次试验中出现至少 k 发连续爆炸的事件, 可以分解为两个互不相容的事件: 1) 在前 n 次试验中已出现至少 k 发连续爆炸, 其概率为 y_n ; 2) 只在 $n+1$ 次试验后才出现至少 k 发连续爆炸, 此事件的出现等价于下列 a, b, c 三个事件同时出现:

a: 在前 $n-k$ 次试验中不出现至少 k 发连续爆炸, 其概率 $P(a) = 1 - y_{n-k}$;

b: 在第 $n-k+1$ 次试验中不出现爆炸, $P(b) = 1 - P$;

c: 在其余 k 次试验中都出现爆炸, $P(c) = P^k$;

由于上述三个事件均是独立事件, 它们同时出现的概率为 $(1 - y_{n-k}) \cdot (1 - P) \cdot P^k$ 。因此, 在 $n+1$ 次试验中出现至少 k 发连续爆炸的概率 y_{n+1} 由下式确定:

$$y_{n+1} = y_n + (1 - y_{n-k})qP^k \\ q = 1 - P; P > 0; n \geq k; k \geq 2 \quad (2)$$

式中, y_{n+1} 为爆炸概率为 p 时, $n+1$ 次试验中出现至少 k 发连续爆炸的概率; y_n 为爆炸概率为 P 时, n 次试验中出现至少 k 发连续爆炸的概率。

取 $n=24$, 可以得到25次试验中出现至少 k 发连续爆炸的概率 $y_{25}(k)$, 用式(3)求出25次试验中出现 k 发连续爆炸的概率。

$$y_{25}^*(k) = y_{25}(k) - y_{25}(k+1) \quad (3)$$

选取不同的 k, P 进行计算, 可以得到不同的爆炸概率 P 下, 25次试验中, 有 k 发连续爆炸的概率 $y_{25}^*(k, P)$ 。

选取爆炸概率为 P , 分别按(3)式计算一组(25发)试验中, 各个可能的连续爆炸发数 $k(k=2, 3, \dots, m)$ 对应的概率 $y_{25}^*(k)$, 按(4)式计算 25 发试验中无连续爆炸的概率 $y_{25}^*(1)$ 。

$$y_{25}^*(1) = 1 - [y_{25}^*(2) + \dots + y_{25}^*(m)] \quad (4)$$

分别用(2)、(3)和(4)式计算不同爆炸概率 P 下, 一组(25发)试验中试样连续爆炸 k 发的概率 $y_{25}^*(k)$, 列于表 1。

表 1 不同爆炸概率下, 一组(25发)试验中试样发生连续爆炸的概率表

Table 1 Probability table of occurring successive explosion in one group (25sets) under various explosion probability

$P \backslash y_{25}^*(k)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1.00																								
0.96								0.01	0.02	0.02	0.03	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
0.92						0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02
0.88					0.02	0.04	0.06	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
0.84				0.01	0.04	0.07	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01			
0.80			0.006	0.03	0.08	0.11	0.13	0.12	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01					
0.76			0.02	0.06	0.12	0.14	0.14	0.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01						
0.72			0.04	0.11	0.16	0.17	0.14	0.11	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01									
0.68		0.007	0.07	0.15	0.19	0.17	0.13	0.10	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01											
0.64		0.02	0.11	0.20	0.21	0.16	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01												
0.60		0.04	0.16	0.23	0.21	0.14	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01													
0.56		0.07	0.22	0.26	0.19	0.12	0.07	0.04	0.02	0.01														
0.52		0.11	0.27	0.26	0.17	0.09	0.05	0.03	0.01															
0.48		0.17	0.31	0.25	0.14	0.07	0.03	0.02	0.006															
0.44	0.007	0.24	0.34	0.22	0.11	0.05	0.02	0.01	0.003															
0.40	0.04	0.31	0.34	0.18	0.08	0.03	0.01	0.004																
0.36	0.08	0.38	0.32	0.14	0.05	0.02	0.007																	
0.32	0.13	0.44	0.28	0.10	0.03	0.01	0.004																	
0.28	0.19	0.48	0.23	0.07	0.02	0.005																		
0.24	0.30	0.47	0.17	0.04	0.01	0.003																		
0.20	0.43	0.43	0.11	0.02	0.004																			
0.16	0.56	0.35	0.07	0.01																				
0.12	0.72	0.24	0.03																					
0.08	0.87	0.12																						
0.04	1																							

根据一组试验中试样连续爆炸的最高发数 k , 可由表 1 查出试样最可能的爆炸概率(与 $y_{25}^*(k)$ 最大值对应的 P 值)。从试验得到的爆炸概率点估计值($P_{\text{点}}$)及 25 发试验置信水平为 0.95 时的置信区间(由 GJB772A-97 查出), 判明所测试样最可能的爆炸概率范围。

3 结果及讨论

(1) 图 1 绘出了爆炸概率分别为 0.60, 0.44 和 0.28 的试样在 25 发试验中, 出现连续爆炸发数 k 与其

相应概率 $y_{25}^*(k)$ 的关系曲线。从表 1、图 1 可见, 对应于某一爆炸概率 P , $y_{25}^*(k)$ 与 k 的关系曲线上都有与 $y_{25}^*(k)$ 最大值对应的 k 。随 P 值的增加, k 也增加。三条曲线的形状大致相似。

(2) 表 2、表 3 分别是 从 每 组 爆 炸 百 分 数 都 为 0.24 的 24 组(每组 25 发)JO-9159、每组爆炸百分数都为 0.48 的 43 组精制特屈儿撞击感度测试结果中统计的, 出现连续爆炸发数 k 的百分数 $y_{25}^*(k)$ 。其 $y_{25}^*(k) - k$ 的关系如图 2、图 3 所示。

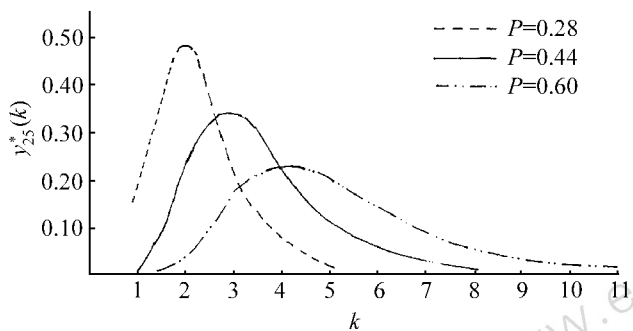


图 1 连爆发数概率—连爆次数图

Fig.1 Successive explosion number vs. its probability

表 2 24 组 JO-9159 炸药的统计结果

Table 2 Statistical results of 24 groups

drop-hammer test of JO-9159

连爆发数 k	1	2	3	4
组数	5	12	6	1
所占百分比	0.21	0.50	0.25	0.04

注：该批产品爆炸百分数平均值为 0.24。

表 3 43 组精制特屈儿的统计结果

Table 3 Statistical results of 43 groups

drop-hammer test of refined Tetryl

连爆发数 k	1	2	3	4	5	6	7
组数	0	8	22	10	2	0	1
所占百分比	0	0.19	0.51	0.23	0.05	0	0.02

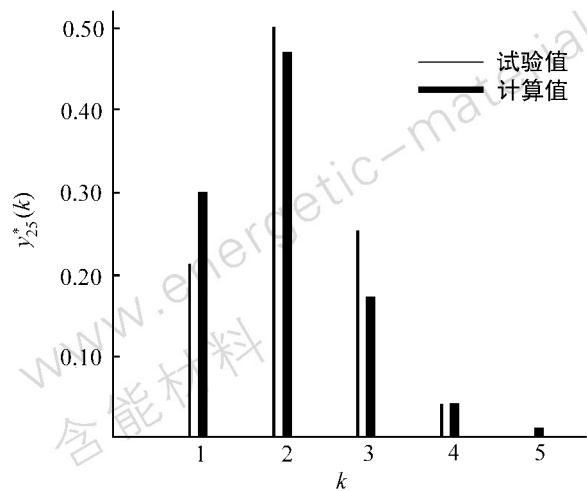


图 2 JO-9159 炸药的连爆 k 发的百分数—连爆次数图

Fig.2 Successive explosion percentage of JO-9159 vs. its successive explosion number

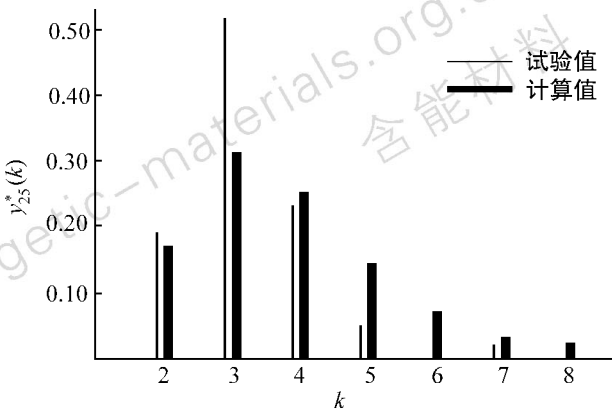


图 3 精制特屈儿连爆 k 发的百分数—连爆次数图

Fig.3 Successive explosion percentage of refined Tetryl vs. its successive explosion number

为了进行比较,分别在图 2、图 3 中画出了由表 1 分别查出的,当 $P = 0.24$ 、 $P = 0.48$ 时,相应 k 对应的 $y_{25}^*(k)$ 值。由图 2、图 3 可知,计算值与统计值所显示的结果,随 k 的增加其变化趋势接近。由于试验组数少,24 组 JO-9159 中未出现连爆 5 发的情况,43 组精制特屈儿的数据中,尚未出现连爆 6 发、8 发的情况,当试验数据较多时,试验值才能与计算值较为一致。

(3) 由落锤试验知道一组(25 发)试验中发生连爆的发数 k 后,可由表 1 查出与 k 相对应的最可能出现的 P 值。结合该组试验测得的爆炸百分数和相应的置信区间,可判明所测试样的爆炸概率在置信区间中的大体位置。这比仅由一组试验的爆炸百分数和相应的置信区间表示的结果,能更进一步确定试样的爆炸概率范围。例如,测试一组试样的撞击感度,得到爆炸百分数为 0.44,试验中连续爆炸发数为 4。查表 1 知道置信水平为 0.95 时的置信区间为 (0.24, 0.65),查表 1 可知, $k = 4$ 时, $y_{25}^*(4)$ 的最大值 0.26 对应的 P 为 0.52 或 0.56,表明试样最可能的爆炸概率为 0.52 或 0.56。为了估计该试样的爆炸概率在置信区间内的哪个范围可能性最大,可作如下考虑:若试样爆炸概率为 0.24(上述置信区间的下限), $y_{25}^*(4)$ 为 0.04,若试样爆炸概率为 0.28, $y_{25}^*(4)$ 为 0.07,由于此时 $y_{25}^*(k)$ 的值比较小,表明试样爆炸概率为 0.24、0.28 的可能性相对来说比较小。由表 1 也可知,当试样的爆炸概率为 0.64 时, $y_{25}^*(4)$ 为 0.20,表明出现这种情况的可能性仍较大,选取区间 0.32 ~ 0.64 表示该试样爆炸概率最可能的范围,此区间既包含在上述 (0.24, 0.65) 区间内,又包含了绝大部分与 $y_{25}^*(4)$ 较大值对

应的 P 值,因此,可以认为该试样的爆炸概率最可能在 0.32 ~ 0.64 之间。

(4) 落锤试验中,落锤仪导轨滑动表面对水平面的垂直度、钢砧倾斜度、击柱与击柱套间的间隙、击柱的倒角等因素,对测试结果都有影响。用特屈儿感度标准物质进行仪器标定时,按国军标的规定,进行一组试验,其爆炸概率在 0.40 ~ 0.56 之间为仪器标定合格。若再根据表 1 的数据,考查试验中的连续爆炸发数 k ,可进一步判断仪器状态是否正常。若在仪器标定中,测试一组特屈儿感度标准物质的爆炸百分数为 0.40,连续爆炸发数 k 为 8,或测试一组特屈儿感度标准物质的爆炸百分数为 0.56,连续爆炸发数 k 为 10 时,虽然按军标规定,仪器为标定合格,但由表 1 可知,试样爆炸概率分别为 0.40、0.56 时,一组试验出现连续爆炸 8 发、10 发的概率分别是 0.004、0.01,由于 $y_{25}^*(k)$ 值很小,表明仪器很可能不正常。应仔细检查落锤仪和撞击装置,重新进行一组标定试验,合格后,再进行样品的试验为好。

(5) 本文的计算方法把试样的爆炸概率和测试一组试样时,试样的连续爆炸次数联系在一起,可从另一个角度反应试样的感度高低。测试一组试样的撞击感度,所得爆炸百分数与试样的爆炸概率 P 不一定一致,可从表 1 的值判断测试结果的合理性,为检验测试结果的可靠性提供了方法。

(6) 若一组试验结果的爆炸概率点估计值 $P_{\text{点}}$ 和由最高连续爆炸发数 k 求得的试样最可能的爆炸概率相差较大时,根据笔者的经验,如果仪器工作正常,多

是由于某种原因试样连续爆炸的发数 k 增加了,较大地偏离了最大值 $k_{\text{最大}}$ (表 1 中当 $P = P_{\text{点}}$ 时, $y_{25}^*(k)$ 最大值对应的 k) 造成的。此时,可由 $P_{\text{点}}$ 及 25 发试验置信水平为 0.95 时的置信区间 (由 GJB772A - 97 查出),以及 $k_{\text{最大}}$ 所在的列或接近 $k_{\text{最大}}$ 的 k 所在的列中相应的 $y_{25}^*(k)$ 值,判明所测试样最可能的爆炸概率范围。例如测试一组试样的撞击感度,得到爆炸百分数为 0.32,试验中连续爆炸发数为 5,由 k 求得的试样最可能的爆炸概率为 0.60 或 0.64,与 $P_{\text{点}}$ 相差 0.20 以上。此时 $k_{\text{最大}}$ 为 $P = 0.32$ 时 $y_{25}^*(k)$ 最大值对应的 $k = 2$ 。经检查,仪器工作正常,可通过由 $P_{\text{点}}$ 对应的 0.95 置信区间 (0.15, 0.54)、及接近 $k_{\text{最大}}$ 的 k 所在的列 ($k = 3$ 的列) 中相应的 $y_{25}^*(k)$ 值,求出该试样的爆炸概率最可能在 0.20 ~ 0.56 之间。

(7) 在测试高聚物粘结炸药的撞击感度时,应注意试样的粒度和均匀性。有时测试的爆炸百分数与从表 1 查出的 P 值差别较大,其原因是由于试样包覆不一致或试样的颗粒度不一致造成的,今后将进一步研究。

参考文献:

- [1] GJB 772A - 97. 炸药试验方法. 方法 601.1. 撞击感度爆炸概率法[S].
- [2] 严士健, 王隽骧, 刘秀芳. 概率论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [3] 王梓坤. 概率论基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

Application of Probabilistic Method in the Sensitivity Test

HU Qing-xian, Lü Zi-jian, HUA Cheng

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Some equations of explosive explosion probability and probability of occurring number k successive explosion in one group (25sets) in drop-hammer test are deduced with probabilistic method in this paper, as well as the relative table. This is a method to improve the reliability of test results.

Key words: drop-hammer test; sensitivity; probabilistic method