

# 两种可靠性评估方法对总体样本中 哑弹检出效率的研究

李芳<sup>1</sup>, 麻宏亮<sup>1</sup>, 张鹏辉<sup>1</sup>, 胡伟<sup>1</sup>, 宫兆飞<sup>2</sup>, 谢明伟<sup>1</sup>

(1. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 西安 710061;

2. 陆装沈阳军代局驻抚顺地区军代室, 辽宁 抚顺 113000)

**摘要:** **目的** 运用 GJB 376A—2019 和 GJB 8185—2015 可靠性评估方法, 通过样本的发火试验, 对发生哑弹的故障中与火工品关联的底事件检出率进行研究, 提出更合理、更科学的应用方法以及改进建议。**方法** 采用蒙特卡洛模拟仿真的方法, 研究升降法标准差估值无偏情况下, 2 个标准中规定的可靠性评估方法对底事件的检出效率。**结果** GJB 376A—2019 规定的方法对于哑弹的检出效率远高于 GJB 8185—2015 规定的方法。**结论** GJB 376A—2019 更便于工程应用, GJB 8185—2015 存在哑弹检出效率方面的局限性, 建议在标准中进行的升降法试验程序中, 增加对于出现的不发火样品的约束条件。

**关键词:** 火工品; 可靠性; 评估方法; 哑弹; 模拟仿真; 检出效率

中图分类号: TJ450.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)12-0111-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.12.014

## Efficiency of Two Reliability Evaluation Methods in Detecting Duds in Overall Samples

LI Fang<sup>1</sup>, MA Hong-liang<sup>1</sup>, ZHANG Peng-hui<sup>1</sup>, HU Wei<sup>1</sup>, GONG Zhao-fei<sup>2</sup>, XIE Ming-wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Physics-chemistry, Shaanxi Applied Physics-chemistry Research Institute, Shaanxi Xi'an 710061, China; 2. Military Office of Army Equipment Shenyang Military Bureau in Fushun, Liaoning Fushun 113000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the detection rate of bottom events associated with initiating explosive devices in the fault of duds through the fire test of samples according to the reliability evaluation methods of GJB 376A-2019 and GJB 8185-2015, and propose more reasonable and scientific application methods and improvement suggestions. The Monte Carlo simulation method was used to study the detection efficiency of the reliability evaluation method specified in the two standards when the standard deviation estimation of the lifting method was unbiased. The method specified in GJB 376A-2019 was much more efficient for the detection of duds than the method specified in GJB 8185-2015. GJB 376A-2019 is more convenient for engineering applications. GJB 8185-2015 has limitations in the detection efficiency of duds. It is recommended to add restrictions on the non-igniting samples in the lifting test procedure carried out in the standard.

**KEY WORDS:** initiating explosive devices; reliability; assessment method; dud; simulation; detection efficiency.

作为一次性作用产品, 每发火工品均存在一个临界刺激量, 通常将该刺激量处的发火概率称为该刺激

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2023-09-21

Received: 2023-07-24; Revised: 2023-09-21

引文格式: 李芳, 麻宏亮, 张鹏辉, 等. 两种可靠性评估方法对总体样本中哑弹检出效率的研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 111-115.  
LI Fang, MA Hong-liang, ZHANG Peng-hui, et al. Efficiency of Two Reliability Evaluation Methods in Detecting Duds in Overall Samples[J].  
Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 111-115.

量处的发火可靠度<sup>[1]</sup>。火工品作为武器装备的首发元件,其发火可靠性指标要求很高,可靠度通常需要达到 0.999 或 0.999 9。火工品的高可靠性需要采用一定的火工品可靠性评估方法进行评估。通常的做法是按照 GJB 376A—2019《火工品可靠性评估方法》(2019 年前参照 GJB 376—1987《火工品可靠性评估方法》),首先采用计数法对火工品进行可靠度  $R=0.99$ 、置信水平  $\gamma=0.90$  或  $\gamma=0.95$  的验证;再以感度试验统计方法估计  $R=0.999$ 、 $\gamma=0.90$  或  $\gamma=0.95$  的全发火性能;最后以产品设计时的设计裕度来保证火工品有大于 0.999 或更高的可靠性。在这种情况下,验证  $R=0.99$ 、 $\gamma=0.95$  的火工品的可靠性,需要进行 298 发且无一发失效的计数法试验(“Go No-Go”试验)。如果用计数法验证更高的可靠性(如  $R=0.999$ 、 $\gamma=0.90$ ),则需要 2 303 发且无一发失效的计数法试验<sup>[2]</sup>,这是许多火工品供应商很难接受的。一直以来,如何科学有效地对火工品的可靠性进行评估是研究人员关注的一个热点<sup>[3-7]</sup>。

近年来,国内外科研工作者开展了多种可靠性评估方法的研究,以期在较小的样本量下提高火工品发火可靠性评估结果的精度。如关于计量-计数综合评估方法的理论和试验研究<sup>[8-11]</sup>,基于 Bayes、信息熵的小子样可靠性评估方法理论及应用方面的研究<sup>[12-16]</sup>。这些研究的重要成果之一就是以国军标的形式确定了小样本的可靠性评估方法——GJB 8185—2015《火工品可靠性评估信息熵等值鉴定与验收》<sup>[17]</sup>。与 GJB 376A—2019《火工品可靠性评估方法》相比,GJB 8185—2015 的重要特点就是显著降低了可靠性评估的试验样本量。以置信度 0.90、可靠度 0.999 的可靠性指标为例,GJB 376A—2019 中需要 2 303 发试验(无一发失效),而 GJB 8185—2015 仅需 172 发(升降法试验 150 发,计数试验 22 发)。该小样本的可靠性评估方法在针刺火帽等火工品的可靠性评估中得到了正确性验证<sup>[18-21]</sup>。但验证用的针刺火帽等这些火工品多属于第一代和第二代火工品,一、二代火工品的一个重要特点是“输入输出呈线性关系”,即存在一个临界刺激量。当外界施加的刺激量超过临界刺激量时,火工品作用(发火),否则不作用(不发火)。研究表明,对输入输出呈线性关系的火工品,采用信息熵等值理论,通过降低样本量进行可靠性评估是可行的<sup>[22]</sup>;对于输入输出不呈线性关系的火工品,典型的如哑弹(Dud)问题(少装或漏装药)、EFI 的高压旁路击穿的可靠性问题等,是否可以采用信息熵等值方法进行火工品的可靠性验证则未见有相关的研究结果报导。

2010 年颁布的美军标 MIL-DTL-23659F 中专门强调了感度试验的局限性,提出所有的感度试验方法都是基于小样本的,在评估中出现错误是难免的。认

为即使有较大百分率的哑弹存在,也没有一种感度试验方法能确定爆炸箔起爆器(EFI)在任何电压都不会作用的哑弹的存在<sup>[23-25]</sup>。因此,需要有大样本量的实验来完成对于可靠性的评估。

另外,由于采用升降法进行感度试验得到的参数中,对于均值  $\mu$  的估计是无偏的,而对于标准差  $\sigma$  的估计是有偏的。本文采用蒙特卡洛模拟仿真的方法,对存在哑弹这种失效模式,而  $\sigma$  估值无偏情况下,采用信息熵等值方法对火工品的可靠性验证问题进行了研究,分析了计数-计量综合评估方法在火工品可靠性评估方面的适用性。

## 1 仿真模型及仿真计算参数

### 1.1 火工品的感度模型与哑弹模型

火工品感度可用刺激量来表示。假设每个火工品样品都存在一个临界刺激量  $x_c$ ,当外界施加的输入能量  $x_1 \geq x_c$ ,则样品一定发火,记为响应。当  $x_1 < x_c$  时,则样品一定不发火,记为不响应。临界刺激量  $x_c$  是一个随机变量,假设其服从正态分布。对于哑弹,由于其临界刺激量为无穷大,无论  $x_1$  为任何值,样品都不发火,记为不响应。

### 1.2 仿真模型

假设模拟的样本总量  $n=100\ 000$  发,样本感度服从分布  $N(10,1^2)$ ,且产品设计时的工作刺激量  $x_1$  为 26.18,工作刺激量下的可靠度为  $R_{xH} \geq 0.999\ 999$ 。在样本中随机插入  $m$  发哑弹,分别按 GJB 376A—2019 和 GJB 8185—2015 中规定的试验样本量和规定方法计算相应的刺激量<sup>[12]</sup>,并从总体中随机抽取样本进行发火试验,每组试验抽样 10 000 次,并重复 10 次,取 10 次的平均值为结果,以保证抽样的随机性。

### 1.3 仿真计算参数的确定

根据 GJB 376A—2019 和 GJB 8185—2015 中规定的方法分别确定发火试验的模拟计算参数。当产品设计时的工作刺激量  $x_1$  为 26.18,工作刺激量下的可靠度为  $R_{xH} \geq 0.999\ 999$ ,且样品的感度服从  $N(10,1^2)$  分布时,采用 GJB 8185—2015 的评估步骤,在不考虑升降法对总体参数有估值精度问题的情况下,其可靠度  $p$  对应的最小全发火刺激量可以由式(1)计算得到。

$$x_{AF\gamma} = \hat{\mu} + U_p \hat{\sigma} \quad (1)$$

其裕度系数的验证可以由式(2)得到。

$$M_d = \frac{x_{H1}}{x_{AF\gamma}} \approx 2 \quad (2)$$

通过查 GJB 8185—2015 的附录 E 表 E.1 和 E.2

可以得到计数试验样本量  $n_{xH}$  和  $n_{xL}$ 。根据式 (3) 和式 (4) 确定低刺激量  $x_L$ 。

$$R_{xL} = \exp\left(\frac{n_{xH}}{n_{xL}} \ln R_{xH}\right) \quad (3)$$

$$x_L = \hat{\mu} + \hat{\sigma} U_{R_{xL}} \quad (4)$$

由式 (4) 计算 GJB 8185—2015 规定的低刺激量  $x_L$ 。在  $x_L$  上抽取规定的试验样本量进行发火试验, 统计其检出哑弹的次数。根据标准计算得到的仿真计算

参数见表 1。

## 2 仿真结果与讨论

计算时, 哑弹数量  $m$  为模拟样本总量中含有的哑弹发数, 即分别在模拟样本总量中放入 100、10、1 发哑弹。 $m$  为不同值时, 不同可靠度下, 根据 GJB 376A—2019 和 GJB 8185—2015 仿真计算得到的不发火样品及哑弹的检出次数见表 2。

表 1 模拟计算参数  
Tab.1 Simulation parameters

参照标准	总样本量/发	试验样本量/发		工作刺激量 (一般是指产品规定的技术指标, 是不变的, 本文指 26.18)	
		$R=0.99 (\gamma=0.95)$	$R=0.999 (\gamma=0.95)$	$R=0.99 (\gamma=0.95)$	$R=0.999 (\gamma=0.95)$
GJB 376A—2019	100 000	298	2 996	26.18	26.18
GJB 8185—2015	100 000	14	29	14.09	13.71

表 2 根据 GJB 376A—2019 和 GJB 8185—2015 仿真得到的哑弹数  
Tab.2 Number of duds obtained by simulation according to GJB376A—2019 and GJB 8185—2015

$m$	$R=0.99 (\gamma=0.95)$				$R=0.999 (\gamma=0.95)$			
	GJB376A—2019		GJB8185—2015		GJB376A—2019		GJB8185—2015	
	不发火数	哑弹数	不发火数	哑弹数	不发火数	哑弹数	不发火数	哑弹数
100	2 571.4	2 571.4	139.2	135.7	9 513.3	9 513.3	310.6	284.2
10	291.2	291.2	19.1	15.6	2 631.2	2 631.2	64.3	32
1	28.8	28.8	4.1	1.6	294.9	294.9	21.9	3
0	0	—	3.5	—	0	—	25.5	—

从表 2 的仿真结果可以看出, 如果总体样本中没有哑弹, 在进行可靠度  $R=0.99 (\gamma=0.95)$  和可靠度  $R=0.999 (\gamma=0.95)$  的验证试验时, 无论采用 GJB 376A—2019 规定的方法还是采用 GJB 8185—2015 规定的方法, 得到的不发火数相差不大。这说明如果总体样本中没有哑弹的情况存在, 这 2 种标准规定的方法对于不同可靠度的验证都是比较准确的, 而 GJB 8185—2015 则由于工作刺激量设置偏低而结果偏保守。

若总体样本中存在哑弹, 则 GJB 376A—2019 规定的方法对于哑弹的检出次数远高于 GJB 8185—2015 规定的方法。从表 2 中还可以看出, 随着可靠度的增加, 2 个标准规定的试验样本量增加, 对于哑弹的检出数也增加。随着总体样本中哑弹数的增加, 对于哑弹的检出数也增加。究其原因主要是, 哑弹是一类特殊的产品, 它的发火可靠性是不随外界刺激量而变化的。因此, GJB 8185—2015 这类以通过降低产品的临界发火能量来减少试验样本量的小样本的可靠性评估方法, 对于产品 (样品) 批中哑弹这种失效模式的检测效率是很低的。另一方面, 置信水平是一个与样本量相关的量, 与刺激量也是无关的。在任何情况下, 用于试验的样本量越大, 对于总

体样本可靠度的推断也越正确。

## 3 结论

1) 采用小样本的可靠性评估方法来及早有效地发现哑弹是不可取的。这一点在美军标修订的 MIL-DTL-23659D/E/F 的 3 个版本中都进行了强调, 并有专门的说明<sup>[23-25]</sup>。该标准认为目前“满足此标准规定可靠度  $R=0.99 (\gamma=0.95)$  的唯一验证方法是进行 298 发的 ‘Go No-Go’ 试验”。

2) GJB 376A—2019<sup>[2]</sup>能够满足火工品可靠性和质量评定的要求。

3) GJB 8185—2015<sup>[17]</sup>对哑弹的检出率偏低。特别是对于 EFI 这类存在着高电压旁路击穿的新型火工品, 采用感度试验的方法无法得到其可靠性的正确验证。这一点在美军标 MIL-DTL-23659F 附录 A 中有特别的说明<sup>[25]</sup>, 即“有些开发者可能提出, 依据对有效的统计分析方法 (感度试验方法) 的外推估计来验收 EFI 的可靠性。结果是不可靠的 EFI 也可用统计的方法外推估计出可接收的 EFI 全发火电压, 因此, 这是毫无价值的”。

4) 从仿真的结果可以看出, 样品批中没有哑弹

存在的情况下,若升降法的总体参数估值较准,GJB 8185—2015对于可靠性的验证是比较准确的。特别是对于输入和输出呈线性关系的火工品(如机械类火工品)是适用的,且效率较高。因此,在进行可靠性验证时,建议根据样品本身的情况对参照标准进行慎重选择。

5)为了提高GJB 8185—2015的使用可靠性,建议在标准中进行3组150发升降法试验程序中,增加对于出现不发火样品的约束条件。如对试验中出现的不发火的样品,应先以2倍全发火刺激量使其发火。如仍不发火,则该发试验作废,并以哑弹处理。这样做不但能提高升降法感度试验的准确度,而且有助于哑弹的检出。

#### 参考文献:

- [1] 程立,董海平,穆慧娜,等.基于感度分布均值的火工品发火可靠性小样本评估方法[J].兵工学报,2020,41(12):2444-2450.  
CHENG L, DONG H P, MU H N, et al. A Small Sample Assessment Method for Firing Reliability of Explosive Initiator Based on the Mean of Sensitivity Distribution[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(12): 2444-2450.
- [2] GJB 376A—2019,火工品可靠性评估方法[S].  
GJB 376A—2019, Assessment Method of Reliability Of Initiating Devices[S].
- [3] 张强.火工品可靠性评定方法的分析与研究[J].舰船科学技术,2010,32(5):92-94.  
ZHANG Q. Analysis and Study on Reliability Assessment Method of Initiating Devices[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(5): 92-94.
- [4] 伊泉剑,董海平,翟志强,等.基于应力-强度干涉模型的火工品可靠性设计方法[J].北京理工大学学报,2014,34(10):1007-1011.  
YI X J, DONG H P, ZHAI Z Q, et al. Reliability Design for Initiating Devices Based on Stress-Strength Interference Model[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(10): 1007-1011.
- [5] 王凯民.火工品工程[M].北京:国防工业出版社,2014:720-721.  
WANG K M. Pyrotechnics Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 720-721.
- [6] 花成,张艳丽,姚奎光,等.低感炸药低爆炸响应点测试研究[J].爆破器材,2015,44(1):12-15.  
HUA C, ZHANG Y L, YAO K G, et al. Test on Low Percentiles of Low Sensitive Explosive at Firing Level[J]. Explosive Materials, 2015, 44(1): 12-15.
- [7] 付东晓,张国兴,张蕊,等.基于蒙特卡罗的复杂火工系统可靠性预计精度研究[J].火工品,2019(5):29-32.  
FU D X, ZHANG G X, ZHANG R, et al. Research on Reliability Prediction Accuracy of Complex Initiators System Based on Monte Carlo[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019(5): 29-32.
- [8] 田玉斌,李国英,房永飞.火工品可靠性试验数据的综合分析方法[J].系统科学与数学,2006,26(2):147-158.  
TIAN Y B, LI G Y, FANG Y F. The Synthetically Analytical Method for Data Sets on Pyrotechnics Reliability Test[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2006, 26(2): 147-158.
- [9] 蔡瑞娇,柳维旗,董海平.关于“试验信息熵”[J].含能材料,2007,15(6):604-607.  
CAI R J, LIU W Q, DONG H P. Study on “Test Information Entropy”[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(6): 604-607.
- [10] 董海平,赵霞,蔡瑞娇.基于信息量等值的火工品可靠性评估小样本方法[J].兵工学报,2011,32(5):554-558.  
DONG H P, ZHAO X, CAI R J. An Assessment Method of Reliability of Initiating Devices Based on Information Measure Equivalency[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(5): 554-558.
- [11] 温玉全,洪东跑,王玮.基于试验熵的火工品可靠性评估理论与方法研究[J].爆炸与冲击,2007,27(6):553-556.  
WEN Y Q, HONG D P, WANG W. Study on Theory and Method of Reliability Assessment of Explosive Initiator Based on Testing Entropy[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(6): 553-556.
- [12] 周美林,蔡瑞娇,韩敦信.火工品可靠度的经典估计与Bayes估计[J].含能材料,2005,13(2):94-98.  
ZHOU M L, CAI R J, HAN D X. Bayes Estimation and Classical Reliability Estimation Methods of Initiating Devices[J]. Energetic Materials, 2005, 13(2): 94-98.
- [13] 董海平,蔡瑞娇,翟志强,等.火箭弹射座椅Bayes可靠性评估方法[J].北京理工大学学报,2007,27(8):671-674.  
DONG H P, CAI R J, ZHAI Z Q, et al. Bayesian Reliability Assessment Method of Rocket Ejection Seat[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(8): 671-674.
- [14] 杨新莉,田玉斌.一次性作用产品可靠度的Bayes置信下限[J].北京理工大学学报,2002,22(5):544-548.  
YANG X L, TIAN Y B. Lower Bayes Confidence Limits for the Reliability of One-Shot Products[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(5): 544-548.
- [15] 刘炳章,丁同才.小子样验证高可靠性的可靠性评估方法及其应用[J].质量与可靠性,2004(1):19-22.  
LIU B Z, DING T C. Reliability Evaluation Method of Small Sample Verification High Reliability and Its Application[J]. Quality and Reliability, 2004(1): 19-22.
- [16] 刘杰,王普,刘炳章.最大熵试验法及其应用[J].自动化学报,2007,33(11):1226-1228.  
LIU J, WANG P, LIU B Z. Test Method with the Maximum Entropy and Its Application[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(11): 1226-1228.
- [17] GJB 8185—2015,火工品可靠性评估信息熵等值鉴定与验收[S].

- GJB 8185—2015, Information Entropy Equivalence Identification and Acceptance of Pyrotechnics Reliability Assessment[S].
- [18] 田玉斌, 王典鹏. 火工品发火可靠性小样本鉴定试验方法[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 426-431.  
TIAN Y B, WANG D P. A Qualification Test Method for Firing Reliability of Initiator with Small Samples[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(4): 426-431.
- [19] 蔡瑞娇, 翟志强, 董海平, 等. 火工品可靠性评估试验信息熵等值方法[J]. 含能材料, 2007, 15(1): 79-82.  
CAI R J, ZHAI Z Q, DONG H P, et al. Assessment Method for Reliability of Initiating Devices Based on Test Information Entropy Equivalence[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(1): 79-82.
- [20] 温玉全, 张利敏, 洪东跑. 基于感度的火工品发火可靠性试验数据分析[J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1498-1501.  
WEN Y Q, ZHANG L M, HONG D P. Analysis on Reliability for Explosive Initiator Based on Sensitivity[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(11): 1498-1501.
- [21] 董海平, 蔡瑞娇, 穆慧娜, 等. 火工品可靠性的感度参数设计法[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(6): 613-616.  
DONG H P, CAI R J, MU H N, et al. A Sensitivity Parameter Design Method for Reliability of Explosive Initiators[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(6): 613-616.
- [22] 董海平, 蔡瑞娇, 穆慧娜. 火工品可靠性计量-计数评估方法的有效性研究[J]. 含能材料, 2008, 16(5): 553-555.  
DONG H P, CAI R J, MU H N. Validity of Variables-Attributes Assessment Method for Reliability of Initiating Explosive Devices[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 553-555.
- [23] MIL-DTL-23659D, Detail Specification Initiators, Electric, General Design Specification for[S].
- [24] MIL-DTL-23659E, Detail Specification Initiators, Electric, General Design Specification for[S].
- [25] MIL-DTL-23659F, Detail Specification Initiators, Electric, General Design Specification for[S].

责任编辑: 刘世忠