

文章编号: 1006-9941(2008)02-0209-03

## 基于发火可靠度裕度的生产方风险分析

董海平, 穆慧娜

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 基于火工品感度分布模型及 GJB376-87 给出的火工品发火可靠度裕度系数定义, 推导出了生产方风险与火工品发火可靠度裕度系数之间的定量关系式。利用该关系式和升降法试验, 求得某针刺雷管发火可靠度裕度系数为 1.74, 生产方风险为 0.003%; 某电雷管发火可靠度裕度系数为 1.48, 生产方风险为 0.00096%。结果表明, 本文给出的这种定量关系与实际产品相符。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 火工品; 可靠性; 裕度; 生产方风险

**中图分类号:** TJ450

**文献标识码:** A

### 1 引言

设计火工品时, 通常要求有一定的设计裕度, 即设计的工作刺激量要大于给定置信水平下的最小全发火刺激量, 以降低设计风险和生风险。GJB1307A<sup>[1]</sup> 规定火工品发火可靠度设计裕度系数  $M \geq 1.2$ 。在 GJB376-87 中也给出了火工品发火可靠度裕度系数估计的公式<sup>[2]</sup>。对于生产方, 火工品发火可靠度设计裕度是产品能达到可靠性指标, 顺利通过设计定型和生产定型的基础。工程中火工品是否达到可靠性指标一般由抽取部分样品按 GJB376 进行可靠性评估来判定。如果可靠度评估结果  $R$  值大于或等于指标中的可靠度值  $R_L$ , 就认为产品合格; 否则, 认为产品不合格。分析 GJB376 的试验方案, 可以发现: 这实质上是一个极限可靠性水平方案(称为 LQ 方案)<sup>[3]</sup>, 只考虑了使用方的风险, 没有考虑生产方风险。凭经验, 提高设计裕度可以降低生产方风险。但受诸多因素的限制, 设计裕度也不可能无限地增大, 如何合理权衡设计裕度与风险之间的关系是生产方非常关注的问题。本文从抽样检验的风险角度, 分析研究了设计裕度与风险之间的定量关系, 从设计角度为降低生产方风险提供依据。

### 2 发火可靠度裕度与生产方风险的关系

按 GJB376 中的规定, 火工品发火可靠度裕度系数估计值由公式(1)计算:

$$M = \frac{I_0}{I_{AF\gamma}} \quad (1)$$

其中,  $I_0$  为设计的工作刺激量;  $I_{AF\gamma}$  为给定置信水平下的最小全发火刺激量的估计值。在假定火工品感度分布服从正态分布的情况下, 由升降法试验数据根据 GJB/Z377A 可以求得统计数据  $n, \hat{\mu}, \hat{\sigma}, \sigma_{\hat{\mu}}, \sigma_{\hat{\sigma}}$ <sup>[4]</sup>, 根据给定的可靠度  $R_L$  和置信水平  $\gamma$ ,  $I_{AF\gamma}$  按公式(2)计算。

$$I_{AF\gamma} = \hat{\mu} + U_{R_L} \hat{\sigma} + t_\gamma(\nu) \sqrt{\sigma_{\hat{\mu}}^2 + U_{R_L}^2 \sigma_{\hat{\sigma}}^2} \quad (2)$$

公式(2)中,  $U_{R_L}$  是  $R_L$  的标准正态分位数,  $t_\gamma(\nu)$  为  $t$  分布的双侧  $\gamma$  分位数, 自由度为  $\nu$ 。当服从对数正态分布时, 公式中参数先用对数单位计算, 然后再进行反变换。

按 GJB376 规定的计数法进行评估时, 对于生产批来说, 可按二项分布来处理。在二项分布的可靠性抽样检验中, 生产方风险  $\alpha$  可以用二项分布的抽样特性函数(OC 函数)按公式(3)计算<sup>[3]</sup>:

$$\alpha = 1 - L(p) = 1 - \sum_{r=0}^c \binom{n}{r} (1-p)^r p^{n-r} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为生产方风险,  $p$  为设计的工作刺激量  $I_0$  下的发火概率,  $n$  为试验量,  $c$  为不发火数。对于可靠性高的火工品, 一般  $c=0$ , 此时, 公式(3)简化为公式(4)。

$$\alpha = 1 - p^n \quad (4)$$

按 GJB376 进行评估, 一般  $n$  是事先确定的, 公式(4)反映了  $p$  越大,  $\alpha$  越小。

在前面的正态分布假设和由升降法求得感度分布参数  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$  的基础上, 公式(4)变为公式(5)。

$$\alpha = 1 - \Phi\left(\frac{I_0 - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)^n \quad (5)$$

其中,  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布函数。

把公式(1)代入公式(5)得正态分布条件下, 发火可靠度裕度系数  $M$  与生产方风险  $\alpha$  的关系, 如公式(6)所示。

$$\alpha = 1 - \Phi\left(\frac{I_0 - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)^n = 1 - \Phi\left(\frac{MI_{AF\gamma} - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)^n \quad (6)$$

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-08-07

作者简介: 董海平(1969-), 男, 博士, 讲师, 从事火工燃爆产品可靠性评估与设计方法研究。e-mail: dhpphd@bit.edu.cn

在工程中,通过升降法试验求取  $\hat{\mu}, \hat{\sigma}, I_{AF_\gamma}$  后,根据公式(6)可以得到发火可靠度裕度系数  $M$  和生产方风险  $\alpha$  的定量关系。根据该定量关系,可以计算产品在给定设计裕度下的生产方风险或在给定生产方风险下应达到的设计裕度值。

若火工品感度服从逻辑斯谛分布,由升降法试验数据根据 GJB/Z377A 可求得统计数据  $n, \hat{\mu}, \hat{\gamma}, \sigma_{\hat{\mu}}, \sigma_{\hat{\gamma}}$  [4], 根据给定的可靠度  $R_L$  和置信水平  $\gamma, I_{AF_\gamma}$  按公式(7)计算。

$$I_{AF_\gamma} = \hat{\mu} + U_{R_L} \hat{\gamma} + t_\gamma(\nu) \sqrt{\sigma_{\hat{\mu}}^2 + U_{R_L}^2 \sigma_{\hat{\gamma}}^2} \quad (7)$$

式中,  $U_{R_L} = \log \frac{R_L}{1-R_L}, t_\gamma(\nu)$  为  $t$  分布的双侧  $\gamma$  分位数,自由度为  $\nu$ 。同样可以推导得  $M$  与  $\alpha$  之间的关系,如公式(8)所示。

$$\alpha = 1 - L\left(\frac{MI_{AF_\gamma} - \hat{\mu}}{\hat{\gamma}}\right)^n \quad (8)$$

式中,  $L(\cdot)$  为标准逻辑斯谛分布  $L(0,1)$  的分布函数

$$L(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

### 3 应用

应用以上推导的关系式,计算实际产品的发火可靠度裕度系数  $M$  和生产方风险  $\alpha$  值,并假设工作刺激量可变的情况下,画出  $M$  和  $\alpha$  的关系曲线图,然后进行分析。

#### (1) 某针刺雷管

某针刺雷管产品可靠性指标为:  $\gamma = 0.90, R = 0.999$ 。发火上限为落高 8 cm,落锤  $(52 \pm 1)$  g。进行 3 组升降法试验,每组 50 发,试验数据见表 1。利用极大似然估计原理求出其参数估计值(对数单位)见表 2。

对  $\hat{\sigma}$  进行纠偏 [5], 纠偏后的 3 组升降法参数估计值的平均值为:

$$\bar{\hat{\mu}} = 0.646, \bar{\hat{\sigma}} = 0.257$$

根据 GJB/Z377A 方法 103 中的 4.2 计算出  $n, \sigma_{\hat{\mu}}, \sigma_{\hat{\sigma}}$ , 然后把  $n, \bar{\hat{\mu}}, \bar{\hat{\sigma}}, \sigma_{\hat{\mu}}, \sigma_{\hat{\sigma}}$  代入公式(2), 并进行对数反变换后, 可得  $I_{AF_\gamma} = 4.595$ 。由公式(1), 求得发火可靠度裕度系数  $M = 1.74$ , 由公式(6)求得该产品的生产方风险  $\alpha = 0.003\%$ 。如果人为地降低  $I_0$  的值, 就能得到在不同发火可靠度裕度系数  $M$  下对应的生产方风险  $\alpha$  值, 如图 1 所示。

从图 1 看出, 如果在设计时不考虑裕度, 即当  $M = 1$  时, 则生产方的风险为 51.4%, 被拒收概率这么大, 生产方是不能接受的。因此, 产品必须有设计裕度。当裕度上升到 1.2 时, 生产方风险下降为 0.47%。而本产品的裕度为 1.74, 生产方风险降为 0.003%, 这说明了火工

品生产厂家为了尽量降低风险, 会使设计裕度较大。

表 1 3 组某针刺雷管升降法试验数据

Table 1 Results from three groups of up-and-down method test for a stab detonator

stress level/cm	group 1		group 2		group 3	
	fire	no-fire	fire	no-fire	fire	no-fire
1.2	0	1	0	2	0	5
1.5	1	12	2	9	5	13
1.8	11	8	8	8	12	6
2.1	7	4	7	5	5	2
2.4	4	1	5	2	2	0
2.7	1	0	2	0		

表 2 3 组某针刺雷管升降法参数估计结果

Table 2 Parameter estimations of three groups of up-and-down method test for a stab detonator

sequence number	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
1	0.619	0.218
2	0.645	0.294
3	0.673	0.173

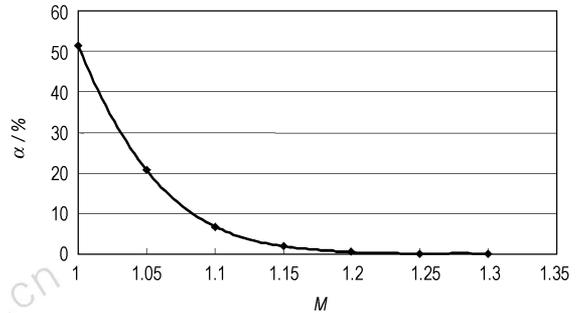


图 1 某针刺雷管发火可靠度裕度与生产方风险的关系图

Fig. 1 Relationship between margin of firing reliability ( $M$ ) and producer risk ( $\alpha$ ) of a stab detonator

#### (2) 某电雷管

某电雷管可靠度指标为:  $\gamma = 0.95, R = 0.999$ 。发火电流为 700 mA。进行 3 组升降法试验, 每组 50 发, 试验数据见表 3。

表 3 3 组某电雷管升降法试验数据

Table 3 Results from three groups of up-and-down method test for an electronic detonator

stress level/cm	group 1		group 2		group 3	
	fire	no-fire	fire	no-fire	fire	no-fire
300	0	1	0	1	0	1
320	1	7	1	10	1	8
340	7	12	10	9	8	11
360	12	4	9	4	11	4
380	4	1	4	1	4	1
400	1	0	1	0	1	0

利用极大似然估计原理求出参数估计值,见表4。

表4 3组某电雷管升降法参数估计结果

Table 4 Parameter estimations of three groups of up-and-down method test for an electronic detonator

sequence number	$\hat{\mu}$	$\hat{\gamma}$
1	347	16.96
2	345	19.04
3	346	17.77

对  $\hat{\gamma}$  进行纠偏<sup>[5]</sup>, 纠偏后的3组升降法参数估计值的平均值为:

$$\bar{\mu} = 346, \bar{\gamma} = 18.1$$

根据 GJB/Z377A 方法 103 中 4.2 计算出  $n, \sigma_{\hat{\mu}}, \sigma_{\hat{\gamma}}$ , 然后把  $n, \bar{\mu}, \bar{\gamma}, \sigma_{\hat{\mu}}, \sigma_{\hat{\gamma}}$  代入公式(7), 可求得  $I_{AF\gamma} = 474.56$ , 由公式(1), 求得发火可靠度裕度系数  $M = 1.475$ , 由公式(8)可求得该产品的生产方风险  $\alpha = 0.00096\%$ 。如果人为地降低刺激量, 可得在不同发火裕度系数情况下的生产方风险值, 如图2所示。

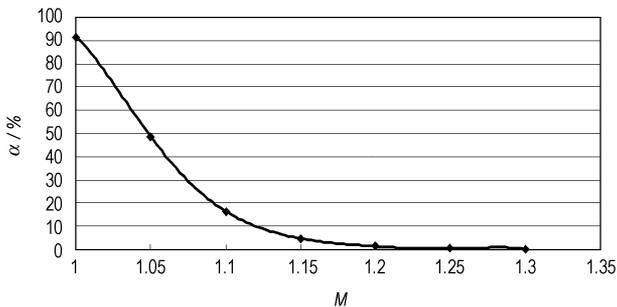


图2 某电雷管发火可靠度裕度与生产方风险的关系图  
Fig.2 Relationship between margin of firing reliability ( $M$ ) and producer risk ( $\alpha$ ) of an electronic detonator

从图2看出,如果在设计时不考虑裕度,即当  $M = 1$  时,生产方的风险为 91.5%,被拒收概率这么大,生产厂家是不能接受的。因此,产品必须有设计裕度。当裕度上升到 1.2 时,这时生产方的风险下降为 1.29%。而本产品的裕度为 1.48,这同样说明为了使生产方风险尽量低,也采取了尽量提高产品设计裕度的做法。

## 4 结论

从 GJB376 中的发火可靠度裕度定义出发,研究了发火可靠度裕度与生产方风险之间的关系,推导出了它们之间的数学关系式。利用两个实际产品的试验数据验证了它们之间的关系式是与实际产品相符的。通过试验,得出了火工品的发火可靠度裕度系数一般都会大于 1.2,这样生产方风险就会较小。产品裕度越大,生产方风险越小。研制方可以通过提高裕度来降低生产方风险。也可以通过它们之间的关系,在保证生产方所能承受风险的情况下,权衡提高产品的可靠度裕度和其它设计因素之间的关系,对产品设计有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] GJB1307A - 2004. 航天火工装置通用规范[S]. 国防科学技术工业委员会. 2004.
- [2] GJB376 - 87. 火工品可靠性评估方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1987.
- [3] 张训浩, 肖德辉. 可靠性及其应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991.
- [4] GJB/Z377A - 94. 感度试验用数理统计方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1994.
- [5] 董海平, 温玉全, 蔡瑞娇. 升降法试验标准差估计的偏差研究[C] // 中国航空学会可靠性工程专业委员会第十届学术年会论文集, 北京: 国防工业出版社, 2006.

## Producer Risk Analysis Based on Margin of Firing Reliability for Initiating Explosive Devices

DONG Hai-ping, MU Hui-na

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on sensitivity distribution and the definition of margin of firing reliability for initiating explosive devices given in GJB376, the quantitative relationship between producer risk and margin of firing reliability of initiating explosive devices was deduced. According to the relationship and up-and-down method test data, the margin of firing reliability and producer risk of a stab detonator are 1.74 and 0.003% respectively, and the margin of firing reliability and producer risk of an electronic detonator are 1.48 and 0.00096% respectively. Results show that the quantitative relationship between producer risk and margin of firing reliability of initiating explosive devices is accordant with practical products.

**Key words:** military chemistry and technique of pyrotechnics; initiating explosive device; reliability; margin; producer risk