

文章编号: 1006-9941(2012)06-0766-04

用 D-最优化法估算空气隙传爆界面的可靠性

张利敏¹, 穆慧娜¹, 董海平¹, 李志良²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 北方特种能源集团西安庆华公司火工品研究所, 西安 710025)

摘要: 以空气隙长度为变量设计了用于确定空气隙传爆界面可靠性的试验方案, 并构建了试验装置。采用 Neyer-D 最优化法, 试验并估算了隔板起爆器中由雷管、空气隙和导爆药组成的空气隙传爆界面的可靠性。结果表明, 空气隙的临界起爆长度为 18.76 mm。由 p 分位数的区间估计所得的置信度为 $\gamma = 0.95$ 的界面作用可靠度为 0.999925。

关键词: 军事化学和烟火技术; 火工品、空气隙; 传爆可靠性; Neyer-D 最优化法

中图分类号: TJ410.3; TP114

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.023

1 引言

隔板起爆器具有能长时间耐高温高压而不穿孔、保持结构完整、防止气体反向泄露等优点, 在航天火工系统中的应用越来越广泛, 该装置的可靠性要求也越来越高^[1]。其中空气隙传爆界面是隔板起爆器的传爆结构之一, 主要由火焰雷管、空气隙和导爆药等元件构成, 该界面的可靠性将影响整个装置预定功能的实现。因此, 对空气隙传爆可靠性要求很高, 一般要求其传爆可靠度达到 0.9999。如此高的可靠度, 其可靠性评估是一个难题。

对于该界面的可靠性评估, 可以采用计数法和计量法。若采用计数法^[2]来评估其作用可靠性, 如在置信度为 0.95, 可靠度为 0.9999 时, 要求做 29956 发试验, 且无一失效, 才能验证该可靠性指标要求, 不仅工作量大, 而且试验费用高, 难于实施; 计量法由于利用了感度分布的信息, 使用较小的样本量就能达到所要求的估计精度, 常用的有升降法、兰利法、OSTR 法、Neyer-D 最优化法^[3]等。1994 年 Neyer^[4] 对该方法参数的估计效率与升降法、兰利法和概率单位法等传统的感度试验方法做了对比模拟研究, 袁俊明^[5] 将该方法应用于炸药感度试验中, 结果表明这种方法效果较好, 能代替升降法测试感度。付东晓等^[6] 人也对

Neyer-D 最优化法在不同的初始试验信息的条件下的估值精度和使用性进行了分析, 认为该方法相对于升降法是一种更优的感度试验方法。周利东^[7] 通过模拟得出 Neyer-D 最优化法在样本量小于 20 发时, 就能达到工程应用所要求的估计精度。本文采用 Neyer-D 最优化法对某隔板起爆器的空气隙传爆界面进行可靠性评估和试验研究, 得到该界面的传爆可靠度, 可为同类型结构的评估提供参考。

2 Neyer-D 最优化评估方法

2.1 试验方法及程序

本文研究的空气隙传爆界面由雷管、一定长度的空气隙和导爆药构成, 其作用过程为雷管被起爆后产生的冲击波及爆轰产物经空气隙衰减后起爆导爆药, 完成预定的功能。采用 Neyer-D 最优化方法对空气隙传爆界面进行可靠性评估之前, 需要确定空气隙临界起爆长度服从的感度分布类型, 依据历史数据积累和工程经验分析, 设定空气隙临界起爆长度服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 其中 μ 和 σ 分别为临界起爆长度的均值和标准差。此外还需要给出均值的上、下限估计 μ_{\min} 和 μ_{\max} , 标准差的估计 σ_{guess} , 以及试验样本量。试验过程主要包括以下三个步骤^[7]:

(1) 首先将上下限的平均值作为第一试验点进行试验。利用不断改进的二分法逼近期望真值, 直到至少得到一次响应和一次不响应的结果, 且要求最小响应值和最大不响应值的差值(记为: $Diff$)比标准偏差初始估计值 σ_{guess} 小。

收稿日期: 2011-09-25; 修回日期: 2012-04-16

作者简介: 张利敏(1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为火工品可靠性。e-mail: zhanglimingc@163.com

通讯作者: 穆慧娜(1981-), 女, 讲师, 研究方向为火工系统可靠性。e-mail: muhuina@bit.edu.cn

(2) 取得唯一的极大似然估计值。当出现数据混合区,即 $Diff < 0$ 时,可以利用极大似然函数得到参数 μ 和 σ 的唯一估计值。然后结合前面的试验数据,通过计算得到使信息矩阵行列式最大的刺激量水平作为下一个试验水平。

(3) 根据试验结果对所得极大似然估计值进行不断地修正,直到达到预定的试验样本量。

2.2 参数估计

Neyer-D 最优化法主要特点是利用了 Fisher 信息矩阵以及前面的所有试验数据,求出使该矩阵最大化的刺激量作为下一个试验点。该方法是一种变步长的感度试验方法,在不断的试验过程中,根据已有样本信息一步步逼近参数的较精确估计,并根据估计值按 D 最优原则修正步长,因此参数的初始估计对参数估计的影响不大。

空气隙临界传爆长度服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 设 x_i 为第 i 次试验的刺激量, n_i 为该刺激量下的试验次数, p_i 为响应概率。由于空气隙的传爆可靠度随着刺激量增大而降低,令 $z_i = (\mu - x_i) / \sigma_i$, 则响应概率为:

$$P(z_i) = \int_{-\infty}^{z_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\{-z_i^2/2\} dx \quad (1)$$

令 $Q(z_i) = 1 - P(z_i)$, $q_i = 1 - p_i$, 则似然函数为^[8]:

$$L(\mu, \sigma) = \prod_i \binom{n_i}{p_i n_i} P(z_i)^{p_i n_i} Q(z_i)^{q_i n_i} \quad (2)$$

使似然函数取最大值的 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}$ 称作极大似然估计值。如果成功数和失败数存在混合结果区(也就是最小响应刺激量小于最大不响应刺激量),则极大似然估计存在唯一值。为了能从试验数据中得到分布参数最多的信息量, Fisher 信息矩阵提供了较为有效的方式。它通过计算似然函数对数的二阶导数的期望而获得,信息矩阵如下^[9]:

$$I(\theta) = (I_{jk})_{2 \times 2} \quad (3)$$

$$\text{式中, } I_{jk} = E\left(\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial \theta_j} \times \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial \theta_k}\right)$$

对于感度试验, $E(p_i) = P(z_i)$, 定义

$$J_j(z_i) = P^2(z_i) (-z_i)^j / [P(z_i) Q(z_i) \sigma^2] \quad (4)$$

则感度试验的信息矩阵中的元素:

$$I_{jk} = \sum_i n_i J_{j+k}(z_i) \quad (5)$$

k 是通过综合利用估计每个试验水平的 $J_j(z_i)$ 函数建立的。

通过信息矩阵的逆可获得极大似然估计值的渐近方差:

$$\text{var} \hat{\mu} = I_{11} / (I_{00} I_{11} - I_{01}^2) \quad (6)$$

$$\text{var} \hat{\sigma} = I_{00} / (I_{00} I_{11} - I_{01}^2) \quad (7)$$

参数的双侧置信区间可以表示如下:

$$CI(\mu) = \mu_e \pm z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\text{var} \mu_e} \quad (8)$$

类似的, p 分位点估计的双侧置信区间可以表示如下:

$$CI_\alpha(p) = \mu_e - z_p \sigma_e \pm z_{(1-\alpha/2)} \sqrt{\text{var} \mu_e + z_p^2 \text{var} \sigma_e} \quad (9)$$

式中, z_p 为正态分布的 p 分位数。

对于本试验这类小样本量情况,统计中通常用 t 分布分位数 $t_{(1-\alpha/2)}(k-1)$ 代替上式中的 $z_{(1-\alpha/2)}$, k 为样本量。则 p 分位数的单侧置信区间为:

$$CI_\alpha(p) = \mu_e - z_p \sigma_e \pm t_{(1-\alpha/2)}(k-1) \sqrt{\text{var} \mu_e + z_p^2 \text{var} \sigma_e} \quad (11)$$

通过求出可靠度 R 对应的 p 分位数的区间估计与工况点对比,来判断产品是否满足可靠性指标要求。

在 Neyer-D 试验中,当前面几个试验刺激量很大而又不响应时,再使用 Fisher 信息矩阵求下一个刺激量,则可能产生负刺激量。对于本试验来说,空气隙长度不可能为负值,为了保证在出现负刺激量的情况下试验仍能继续,本文使用改进的程序,用 $\mu + 1.138\sigma$ 代替出现的负刺激量^[6],其中 μ , σ 由极大似然估计所得,正负号根据上一刺激量响应与否来选择,不响应选择负号,响应选择正号。经过处理后不会再出现负值,估计的精度略差,但仍在接受范围内。

3 试验装置设计及结果分析

3.1 试验装置设计

对空气隙传爆界面采用 Neyer-D 最优化方法进行可靠性评估的试验装置进行研究,设计出该结构的试验装置,并对试验结果进行分析。该界面的可靠度指标要求为 $\gamma = 0.95$, 可靠度为 0.9999。

除了空气隙传爆界面以外,隔板起爆器还包括输入界面、隔板传爆界面等多个能量传输结构,为了减少变量、控制试验误差,此处针对空气隙传爆界面设计了一套试验装置。试验装置须满足两个要求:一是作用过程尽可能接近隔板起爆器的实际情况,如原结构的约束、不同界面之间的接合等;二是考虑到试验装置加工的可行性,加工件的可重复性,以便缩短试验时间,节约成本。

在尝试了一些试验装置之后,针对出现的问题,对试验装置进行了如下改进:

(1) 为避免火焰雷管输出爆轰波的泄露,将电点火头、火焰雷管和空气隙做成一体结构;

(2) 空气隙外的管壳不能太厚, 过厚会导致爆轰波轴向衰减的比较多, 评估出的结果过于保守;

(3) 为防止导爆药被爆轰波吹出, 在导爆药柱下加一定厚度的底片。底片过薄则起不到作用, 过厚则会影响输出结果的判断, 通过一定的摸底试验, 将导爆药的底片厚度设计为 0.3 mm。

设计的装置实物图见图 1, 先加工一个套筒, 然后

将火焰雷管放进去, 上面加一个堵头, 套筒与施主装药之间用 502 胶粘合。2 mm 厚的铅板用于鉴定施主装药是否被起爆, 在其下面垫有与铅板直径相当的钢圈。由于 Neyer-D 最优化法的后一发刺激量要依据前面的试验结果来确定, 为节省试验时间, 预先加工了一些较长空气隙的壳体, 试验过程中根据上一发试验的结果, 通过削减相应壳体长度来调整空气隙的长度。

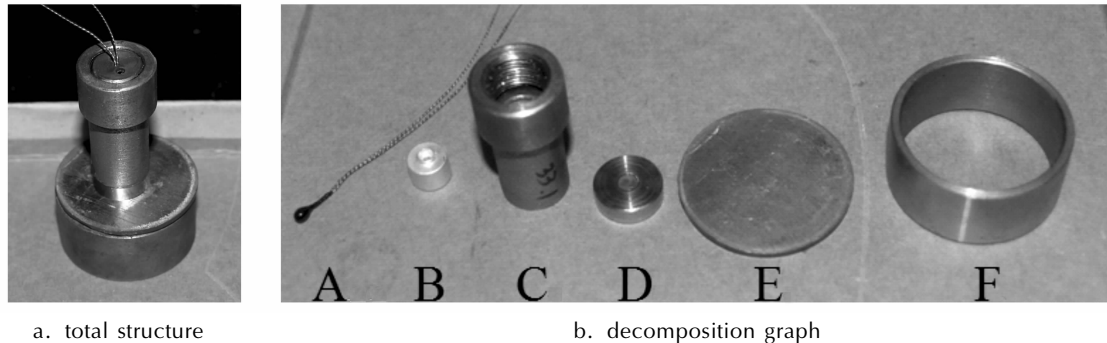


图 1 试验装置实物图

A—电点火头, B—火焰雷管, C—试验装置壳体, D—导爆药, E—鉴定铅板, F—钢圈

Fig. 1 Physical figure of testing device

A—electric igniter, B—flame detonator, C—metal shell, D—explosive, E—lead for judgment, F—steel ring

3.2 试验结果及分析

采用图 1 所示的试验装置对该界面进行可靠性评估, 取 μ 的初值为 $\mu_{\max} = 30$ mm, $\mu_{\min} = 4$ mm, σ 的初值估计 $\sigma_{\text{guess}} = 1$, 样本量为 18 发。由于受加工精度的限制, 空气隙长度值只能精确到一位小数, 试验中为保守起见, 按小数点后第二位均向左进一位对计算值进行处理。试验数据见表 1。

根据试验结果分析可得, 空气隙感度均值 μ 及标准差 σ 估计分别为 $\hat{\mu} = 18.76$ mm, $\hat{\sigma} = 2.25$ mm。通过计算, 在设计值条件下当置信度 $\gamma = 0.95$ 时, 不同 p 值下对应分位数估计的下限, 如表 2 所示。由表 2 的结果可知, 在置信度 $\gamma = 0.95$ 时, 该界面传爆可靠度下限为 0.999925。

表 1 Neyer-D 最优化试验数据及结果

Table 1 Test data and results of Neyer-D optimized test

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
length of air-gap /mm	17	23.5	20.3	18.7	19.5	17.8	19.1	17.8	17.2
detonate or not	yes	no	no	yes	no	yes	no	no	no
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
length of air-gap /mm	15.5	15.9	16.1	19.5	20.9	20.6	22.5	22.2	15.5
detonate or not	yes	yes	yes	yes	no	yes	no	no	yes

表 2 不同空气隙长度对应的传爆可靠度

Table 2 Reliability of air gap with different lengths

P value	0.99999	0.999925	0.9999	0.999	0.99
length of air-gap /mm	2.14	4	4.23	6.63	9.52

4 结论

试验研究得出空气隙传爆界面的临界传爆长度的均值为 $\hat{\mu} = 18.76$ mm, 方差为 $\hat{\sigma} = 2.25$ mm, 当置信度 $\gamma = 0.95$ 时, 在设计空气隙长度条件下, 该界面的传爆可靠度为 0.999925, 满足可靠度指标要求。

参考文献:

- [1] 王凯民, 温玉全. 军用工工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] GJB376-87, 火工品可靠性评估方法[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1987.
- [3] Barry T. Neyer. More efficient sensitivity testing[R]. Technical-ReportMLM-3609, EG&G Mound Applied Technologies, Miamisburg, OH, 1989.
- [4] Barry T Neyer. A D-Optimality-Based sensitivity test[J]. *Technometrics*, 1994, 36(1): 61-70.
- [5] 袁俊明. Neyer D-最优化感度试验方法及其应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2005.
- [6] 付东晓, 张蕊, 李芳, 等. 不同先验信息下 D-优化法的估值精度

- 及其适用性[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 339-343.
- FU Dong-xiao, ZHANG Rui, LI Fang, et al. Estimation and its applicability of D-optimality - based sensitivity test under different prior information[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(3): 339-343.
- [7] 周利东, 张利敏, 温玉全. Neyer D-最优化感度试验方法分析 [C]//中国兵工学会火工烟火专业委员会工作会议和第十五届学术年会暨火工烟火专业情报网 2009 年学术年会, 2009. 10: 202-209.
- [8] 赵宇, 杨军, 马小兵. 可靠性数据分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [9] 卯诗松, 王静龙, 濮晓龙. 高等数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

Detonation Transmission Reliabilities Estimation of Air-gap Interface by D-optimized Method

ZHANG Li-min¹, MU Hui-na¹, DONG Hai-ping¹, LI Zhi-liang²

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Initiator Research Institute of Xi'an Qinghua Co. Ltd, Xi'an 710025, China)

Abstract: Determination test of the reliability of air gap detonation transmission interface was designed through air gap length as variable and testing device were constructed. The reliability of air gap detonation transmission interface composed of including detonator, air gap and detonating explosive in partition initiator was tested and estimated by Neyer-D Optimized method. Results show that the critical functioning length of air gap is 18.76 mm. The reliability of the interface function obtained by interval estimation of p quantile is 0.999925 at confidence level of $\gamma = 0.95$.

Key words: military chemistry and pyrotechnics; initiator & pyrotechnics; air-gap; detonation transmission reliability; Neyer-D optimized method

CLC number: TJ410.3; TP114

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.023