

文章编号: 1003-1480 (2004) 03-0033-04

# 传爆药柱参数可靠性设计方法研究

刘平, 谷乃古

(中国航天科技集团公司四院设计部, 陕西 西安, 710025)

**摘要:** 根据航天火工装置传爆序列高安全性、高可靠性要求, 本文进行了传爆药柱参数可靠性设计方法研究, 针对研制的不同阶段, 结合界面可靠性, 提出可靠性设计、可靠性验证及可靠性评估 3 个参数优化程序。以柱形爆炸器传爆药柱设计为实例, 说明传爆药柱参数界面可靠性设计方法是可行的。

**关键词:** 传爆药柱; 参数选择方法; 可靠性

中图分类号: TJ456      文献标识码: A

## A Study on the Parameter Reliability Design Method of the Transmitting-Explosive

LIU ping, GU Nai-gu

(The Design Department of the Fourth Academy of CASC, Xi'an, 710025)

**Abstract:** Based on the high-safety and high-reliability demand of the space flight initiating devices, the parameter reliability design method of the transmitting-explosive is studied. According to the difference stages of the research, with the reliability of the boundary surface, three parameter-selected procedures, including the reliability design, the reliability test and the reliability assessment, are provided. For the design of the transmitting-explosive in the column-explosion-device example, showing that the parameter reliability design method of the transmitting-explosive is positive.

**Key words:** The transmitting-explosive; The parameter-selected method; Reliability

在航天火工装置传爆序列中, 传爆药柱的作用是传递和增强爆轰波。由于在应用中经常出现传爆不可靠的现象, 对航天火工装置的安全性和可靠性影响极大, 故如何根据装置的安全性和可靠性要求, 选择传爆药柱、优化药柱参数就成为航天火工装置研究的关键问题之一。本文提出的传爆药柱参数可靠性设计方法, 针对不同研制阶段进行可靠性设计、可靠性验证及可靠性评估, 通过单层传爆药柱设计实例, 说明了其可行性。同时通过研制初期的界面可靠性设计, 能够发现薄弱环节, 为研制节省时间及经费。

## 1 影响传爆可靠性的主要因素

国内一般采用冲击波感度较高的猛炸药 PETN、RDX、HMX 等作为基本药, 再加入适量的粘合剂, 压制成有一定强度和密度的传爆药柱。影响传爆药柱传爆可靠性的因素很多, 其中主要因素如下: (1) 炸药性能 包括炸药成分、颗粒度及装药密度等; (2) 传爆药柱尺寸 包括药柱直径、高度、外壳厚度及材料、隔层厚度等; (3) 装药参数 包括装药量、药柱层数、分层装药量、分层

收稿日期: 2004-03-01

作者简介: 刘平 (1969 - ), 女, 高级工程师, 从事固体火箭发动机自毁装置研究。

体密度等参数，装药量常取主装药量的1%~10%；  
 (4)起爆参数 包括起爆压强、起爆面积等；(5)  
 被引爆参数 要求输出压强、接触面积、有无隔层  
 和间隙等。

## 2 传爆药柱设计要求

### 2.1 确保安全性

不同型号、不同系统对安全性有不同的要求，炸药的选择是确保安全性的关键。传爆药柱的炸药应和传爆系统、爆炸装置的炸药基本一致。感度在一个数量级上，安全性才能基本相同，不能将敏感的起爆药和钝感的猛炸药混合使用，否则整个系统的安全性就会降低到起爆药的安全性水平以下。在处理安全性和可靠性的矛盾时，首先要保证系统对安全性的要求。

### 2.2 提高可靠性

根据系统可靠性要求，参数选择要留有一定余量，尽量减少传爆序列分界面，减少装药体密度偏差，稳定工艺。

### 2.3 合适的感度

在考虑安全性的前提下，炸药应具有高于主装药，或高于一般猛炸药的冲击波感度。

### 2.4 足够的威力

炸药的输出应可靠起爆主装药，爆速应大于主装药。

## 3 可靠性设计评估方法

航天火工传爆装置已进行了几十年的研究，过去在研制初期，当影响因素多，又无法测量某一性能影响时，只能用成败型进行试验，用计数法来评估可靠性。然而计数法需要的试验量较大，随着系统可靠性要求越来越高，采用计数法评估显得不切实际。目前，普遍使用计量法进行试验及评估，本文运用计量法进行可靠性设计。

### 3.1 安全系数法预定可靠性指标<sup>[1]</sup>

设计初期没有试验数据，根据系统可靠性的要求，用安全系数法预定可靠性指标，进行可靠性设计。已知设计值  $U_s$ 、试验值  $U_1$ ，在符合正态分布的条件下，用下式计算安全系数  $f$ 。

$$f = \frac{U_s}{U_1} \quad (1)$$

表1为  $f$  与可靠度  $R$  的关系(置信度0.7)。已知  $f$  值，可从表1中查得  $R$ 。

表1  $f$  与  $R$  的关系

Table 1 Relation of  $f$  and  $R$

$f$	1.00	1.10	1.20	1.40	1.50	1.524	1.575	1.75	1.925	2.11	2.31	2.52	2.76
$R$	0.50	0.75	0.90	0.99	0.996	0.996	0.9 <sub>3</sub>	0.9 <sub>4</sub>	0.9 <sub>5</sub>	0.9 <sub>6</sub>	0.9 <sub>7</sub>	0.9 <sub>8</sub>	0.9 <sub>9</sub>

注：表中下标数字为小数点后9的个数。

### 3.2 正态容许上限(下限)法评估可靠性<sup>[2]</sup>

在研制中，当参数可以从试验中直接测量，测量值又服从正态分布，则可以用正态统计容许限评估可靠性。根据样本特征值  $n$ 、 $\bar{x}$ 、 $s$ ，由给定的容许上限  $L_u$  或下限  $L_l$ ，按(2)(3)式计算正态容许限系数  $K_u$  或  $K_l$ 。

$$K_u = \frac{L_u - \bar{x}}{s} \quad (2)$$

$$K_l = \frac{\bar{x} - L_l}{s} \quad (3)$$

式中  $\bar{x}$ 、 $s$  为样本的算术平均值和标准偏差。在置信度  $\alpha$  下，求出  $K_u$  或  $K_l$ ，可以从参考文献[2]

附表C中查出可靠度  $R$ 。以下可靠性评估中  $s$  取保守值容许上限  $L_u$  或下限  $L_l$  的0.1倍。

## 4 传爆药柱可靠性设计实例

以柱形爆炸器单层传爆药柱设计为例，结合界面可靠性，说明传爆药柱参数可靠性设计的方法。柱形爆炸器结构示意图如图1所示，直径42mm，主装药炸药成分为TNT(50%±5%)/RDX(50%±5%)，装药量107g。首先满足安全性及感度、威力的要求，根据主装药炸药性能，确定传爆药为聚黑-14C，主要成分RDX(占98%)，压

制装药。已知上界面能够给传爆药柱提供稳定爆轰，根据传爆序列界面可靠性来确定装药体密度、装药尺寸等参数。

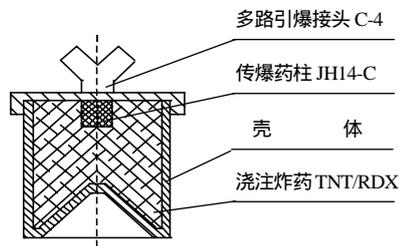


图 1 柱形爆炸器结构示意图

Fig.1 Simple structure diagram of column-explosion-device

4.1 不同炸药接触传爆序列性能参数选择

在不同的压药压强下每一种炸药具有不同的装药体密度，作为设计计算，可以采用如下简化公式计算。

爆速  $D$  和体密度  $\rho$  的关系：

$$D = A + B(\rho - 1) \tag{4}$$

爆压  $P_J$  与爆速  $D$ 、体密度  $\rho$  的关系：

$$P_J = \frac{1}{4} \rho D^2 \tag{5}$$

临界起爆压强  $P_C$  与爆压  $P_J$  的关系：

$$P_C = CP_J \tag{6}$$

式中： $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数，不同炸药不同，可从表 2 中查出。

表 2 几种常用炸药参数

Table 2 Parameters of the common explosive

参数	RDX ( $A=5.408\text{km/s}$ , $B=4.160 \times 10^{-15}\text{km}^4/\text{g}\cdot\text{m}$ , $C=0.274$ )						
体密度 / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.00	1.20	1.40	1.50	1.60	1.65	1.70
爆速 / ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5.41	6.24	7.07	7.49	7.90	8.11	8.32
爆压 / GPa	7.32	11.68	17.50	21.03	24.99	27.14	29.42
临界起爆压强 / GPa	2.00	3.20	4.80	5.76	6.86	7.43	8.06
参数	C-4 ( $A=5.600\text{ km/s}$ , $B=4.000 \times 10^{-15}\text{km}^4/\text{g}\cdot\text{m}$ , $C=0.370$ )						
体密度 / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.00	1.20	1.40	1.50	1.60	1.65	1.70
爆速 / ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5.60	6.40	7.20	7.60	8.00	8.20	8.40
爆压 / GPa	7.84	12.29	18.14	21.66	25.60	27.74	29.99
临界起爆压强 / GPa	2.90	4.55	6.71	8.01	9.47	10.26	11.10

4.2 参数设计

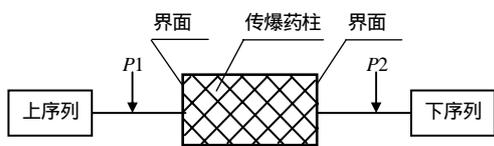


图 2 传爆药柱传爆序列示意图

Fig.2 Simple transmitting array of transmitting-explosive

传爆药柱传爆序列如图 2 所示， $P_1$  为已知上界面能够提供的起爆压强 21.66GPa； $P_2$  为主装药达到稳定爆轰所需的输出压强 10.3GPa，。

根据系统可靠性要求，对可靠性指标进行分配，上、下界面可靠性要求均为 0.999 9，置信度 0.7。界面，从表 2 中查得输入爆压为临界起爆压强的 1.75 倍，根据式 (6) 计算临界起爆压强  $P_{1C}$

= 12.4GPa；界面，输出爆压为下界面达到稳定爆轰临界起爆压强的 1.75 倍，因此  $P_{2J}=18.025\text{GPa}$ 。查表 2 传爆药柱体密度在  $1.5\sim 1.7\text{g}/\text{cm}^3$  之间，确定为  $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。根据主装药量确定传爆药量为 10g，为了增加传爆药与主装药的接触面积，确定药柱外径为 20mm，计算药柱高度为 19.9mm，从装配工艺考虑，确定药柱高度 19.5mm，再根据药量 10g，反算最后体密度为  $1.63\text{g}/\text{cm}^3$ 。

传爆药柱参数设计值：外形尺寸 20.0mm×19.5mm，装药量 10g，体密度为  $1.63\text{g}/\text{cm}^3$ 。是否最优设计，根据式 (1) 计算出上、下界面的安全系数进行比较。体密度  $1.63\text{g}/\text{cm}^3$  的聚黑 14-C 临界起爆压强 6.49GPa，爆压 26.27GPa。界面： $f=3.34$ ， $R=1.0$ ；界面： $f=2.55$ ， $R=0.9_8$ ，上下界面可靠性基本一致，达到了优化设计。

## 5 试验验证及可靠性评估

### 5.1 试验方法

产品完成设计后，须通过试验验证，根据试验结果进行可靠性评估。验证试验有两种：一种称为变组分法，适用于求被发药有变化的情况；另一种称为变激励法，适用于主发药有变化的情况。以下试验均采用变激励法进行。

### 5.2 多路引爆接头到传爆药柱界面传爆试验

采用15发引传爆试验验证界面传爆可靠性，将多路引爆接头中C-4装药密度由设计值 $1.49 \sim 1.53 \text{g/cm}^3$ 降为 $1.20 \text{g/cm}^3$ ，传爆药柱压药密度 $1.63 \text{g/cm}^3$ ，引爆聚能炸药索，从切割靶板的痕迹判断传爆药柱是否达到正常爆轰。试验结果全部成功。

### 5.3 柱形爆炸器穿透钢柱试验

采用5发柱形爆炸器进行穿透钢柱试验，验证界面传爆可靠性。降低传爆药柱的体密度及装药量，从穿透钢柱的穿透深度判断主装药是否达到爆轰。试验结果满足设计要求，如表3所示。

表3 穿透钢柱试验结果

Table 3 Measure results of penetrated steel block tests

浇注炸药成分 TNT/RDX	浇注炸药药量 /g	传爆药柱密度 /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	传爆药柱药量 /g	穿透钢柱深度 /mm
50/50	117.0	1.2	7.35	147
50/50	117.4	1.0	6.12	146
50/50	117.0	1.0	6.12	148
70/30	116.0	1.0	6.12	137
50/50	117.0	1.1	6.74	145

### 5.4 可靠性评估

从试验结果得到界面可靠性：输入爆压降为 $12.3 \text{GPa}$ ，设计值 $21.99 \text{GPa}$ ，根据式(2)，计算正态容许限系数 $K_U=4.4$ ，置信度 $0.7$ ， $R=0.99998$ ；界面可靠性：传爆药柱体密度降到 $1.0 \text{g/cm}^3$ ，输出爆压由 $26.27 \text{GPa}$ 降到 $7.32 \text{GPa}$ ，正态容许限系数 $K_U=7.21$ ，置信度 $0.7$ ， $R=1.0$ 。

从可靠性评估结果看，、界面试验可靠性完全满足系统可靠性要求，上界面试验可靠性 $0.99998$ 低于设计可靠性 $1.0$ ，是由于试验值C-4体密度 $1.2 \text{g/cm}^3$ 并没有达到临界值。

## 6 结语

通过单层传爆药柱设计实例，其参数可靠性设计方法是可行的，可运用于如多层传爆药柱、双向传爆药柱等其他传爆序列的设计。结合界面可靠性的运用，在产品初期，缺少试验数据，通过安全系数法预计可靠性；在产品研制阶段，通过可靠性试验，考核产品可靠性；最后通过试验数据，进行可靠性评估。根据以上参数选择过程，参数在产品初期就得到优化设计。由于爆压测试存在一定偏差，因此本文中运用的一些参数还停留在理论阶段，有待于进一步研究。

### 参考文献：

- [1] 胡昌寿. 可靠性工程 - 设计、试验、分析管理 [M]. 宇航出版社, 1988.
- [2] GJB376-87. 火工品可靠性评估方法 [S], 1987.