

文章编号: 1001-1455(2004)01-0090-06

电火工品桥丝与药剂升温模型 及在可靠性设计中的应用*

曹建华, 蔡瑞娇, 董海平, 李意起

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 介绍了桥丝式电火工品的电容放电和直流输入方式的桥丝升温模型、药剂升温模型及其数值求解算法, 提出了估算感度的能量平衡方程和用于输入可靠性设计的理论计算方法。给出了一个算例, 并与实际产品作了比较, 结果表明, 将该模型用于可靠性设计的理论计算是可行的。

关键词: 爆炸力学; 升温模型; 可靠性设计; 电火工品; 桥丝; 药剂

中图分类号: O38; TJ450; TQ567.9 国标学科代码: 130°3599 文献标志码: A

1 引 言

电火工品在武器、航空航天等领域应用广泛, 作为动力源的启动装置, 其可靠性的高低决定了武器和航空器是否能实现最终的任务。因此, 对火工品进行可靠性设计尤为重要。考察火工品作用可靠性的一个重要指标是火工品的发火可靠度, 一般说来, 火工品的发火由输入、传递和输出三部分顺序作用完成, 因此发火可靠度可表示为 $R_F = R_{\text{输入}} \cdot R_{\text{传递}} \cdot R_{\text{输出}}$ 。在没有冗余设计时, 只有提高每个部分的可靠性, 才能提高整个火工品的发火可靠性。

本文中主要讨论用灼热桥丝式火工品的桥丝和药剂升温数理模型辅助进行火工品输入可靠性设计的可行性。桥丝式电火工品是在火工品中通入电流使桥丝发热, 通过桥丝加热周围的火工药剂, 在温度达到一定值时, 药剂积累了足够的能量, 因此发生强烈化学反应从而放出热量和气体做功。国内外已有人运用计算机对这一过程进行模拟计算研究, 如王道有等^[1]、汪佩兰等^[2]、徐义根等^[3]、G. R. Peevy 等^[4], 但未能与可靠性设计结合起来。对这一过程进行模拟, 可得出桥丝升温速率和药剂温度分布曲线, 从而判定药剂升温是否达到药剂热点临界温度(热点起爆所需要的最低温度)。通过对能量平衡方程的计算, 可以确定使药剂发生爆炸的临界输入电流。如果与可靠性设计方法相结合, 即可进行火工品各参数的设计。

2 桥丝升温的数理模型及解法

2.1 电容放电方式

对于用电容放电起爆的火工品, 由于放电时间极短, 桥丝在短时间内升温, 热量几乎来不及向外扩散, 桥丝温度就升高。电容放电完毕, 桥丝向周围的药剂散热开始降温, 而药剂吸收桥丝传来的热量和自身发生化学反应产生的热量而不断升温。如果药剂升温速率大于药剂向外散热速率, 则反应能加速进行直至药剂发火。

对这一过程作如下假设: (1)桥丝只存在径向散热, 忽略径向温度分布和轴向热损失; (2)桥丝和药剂接触面为理想接触面, 即桥丝表面与药剂表面(接触部分)的温度相等; (3)药剂中的传热按圆筒壁传热模型计算; (4)不考虑药剂化学反应放出的热量。

根据能量守恒原理, 电容放电的桥丝升温方程为

* 收稿日期: 2003-04-04; 修回日期: 2003-08-27

作者简介: 曹建华(1973—), 男, 博士研究生。

$$\pi r_1^2 L \rho c \frac{dT_1}{dt} = \frac{U^2}{(R_s + R_b)^2} \cdot \exp\left[\frac{-2t}{(R_s + R_b)C_F}\right] R_b(1 + \alpha T_1) - 2\pi L \lambda \frac{T_1 - T_0}{\ln(r_2/r_1)} \quad (1)$$

式中: r_1 为桥丝半径, m; r_2 为药剂外层到桥丝中心的距离, m; L 为桥丝长度, m; ρ 为桥丝材料密度, kg/m^3 ; c 为桥丝材料比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; C_F 为电容, F; T_1 为桥丝温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为初始温度, $^\circ\text{C}$; t 为时间, s; α 为桥丝材料的电阻温度系数, $^\circ\text{C}^{-1}$; λ 为药剂的导热系数, $\text{J}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; U 为电容电压, V; R_s 为电容放电时串联的电阻, Ω ; $R_b = \rho' L / (\pi r_1^2)$ 为桥丝电阻, Ω ; ρ' 为电阻率, $\mu\Omega \cdot \text{m}$ 。

式(1)中等号左边为桥丝升温吸收热量的速率, 等号右边第一项为电流通过桥丝产生热量的速率, 第二项为桥丝向药剂散热的速率。对于该方程, 可以用四阶 Runge-Kutta 法求数值解, 得到时间 t 与桥丝温度 T_1 的关系曲线。图 1 所示为用计算机计算出的镍铬桥丝在起爆药 LTNR(斯蒂酚酸铅)中的升温曲线。表 1 和表 2 给出了计算所用的材料基本参数。

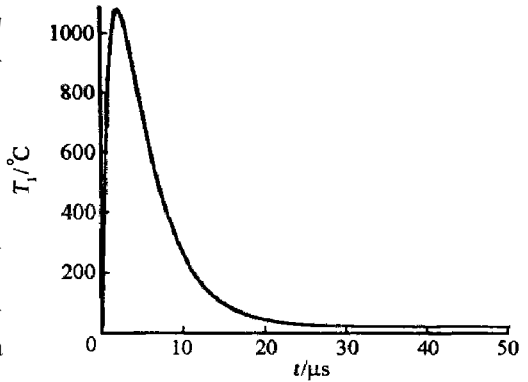


图 1 电容放电输入方式下的桥丝升温曲线
Fig.1 Temperature curve of bridgewire on capacitor discharge

表 1 镍铬桥丝材料的基本参数^[5]

Table 1 Essential parameters of Ni-Cr alloy^[5]

电阻率 $\rho' / (\mu\Omega \cdot \text{m})$	温度系数 $\alpha / (^\circ\text{C}^{-1})$	热容 $c / (\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	密度 $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$
1.2	0.00013	120	8200

表 2 LTNR 的基本参数^[6]

Table 2 Essential parameters of LTNR^[6]

生成热 $q / (\text{J}/\text{g})$	活化能 $E / (\text{kJ}/\text{mol})$	热容 $c / (\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	密度 $\rho_c / (\text{kg}/\text{m}^3)$	导热系数 $\lambda / (\text{J}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	摩尔质量 $M / (\text{g}/\text{mol})$
384.9	315.4	686(25 $^\circ\text{C}$)	3020	5.0	468.3

其余数据为: 桥丝直径 0.009mm, 桥丝长度 1mm, 电容 0.25 μF , 电容初始电压 57V, $r_2 = 10r_1$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, 电路串联电阻 10 Ω 。

2.2 直流放电方式

在直流放电方式下, 桥丝升温方程可表示如下

$$\pi r_1^2 L \rho c (dT_1/dt) = I^2 R_b(1 + \alpha T_1) - 2\pi L \lambda (T_1 - T_0) / \ln(r_2/r_1) \quad (2)$$

式中: I 为通入桥丝的电流, 其余各参数与式(1)相同。对以上方程结合初始条件 $T|_{t=0} = T_0$, 求解可得

$$T_1 = \frac{I^2 R_b(1 + \alpha)}{\alpha^2 R_b - 2\pi L \lambda / \ln(r_2/r_1)} \exp\left[\frac{\alpha^2 R_b - 2\pi L \lambda / \ln(r_2/r_1)}{\pi r_1^2 L \rho c} t\right] - \frac{I^2 R_b + (2\pi L \lambda / \ln(r_2/r_1)) T_0}{\alpha^2 R_b - 2\pi L \lambda / \ln(r_2/r_1)} \quad (3)$$

从式(3)中可见, 直流放电形式下, 桥丝温度随时间呈指数变化, 并趋近于某一极限值, 通过计算机可模拟不同参数下温度随时间变化的曲线。图 2 给出了 1.0A 直流电输入时的镍铬桥丝升温曲线, 其余数据与 2.1 节中相同。

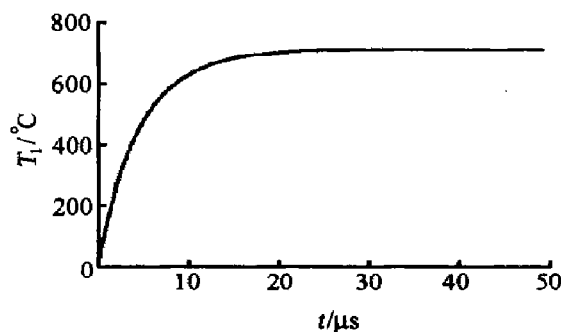


图 2 直流放电输入形式下的桥丝升温曲线
Fig.2 Temperature curve of bridgewire on direct current input

3 药剂升温的数理模型及求解

3.1 模型建立

由桥丝温度计算, 建立药剂的升温方程。对药剂升温方程假设: (1) 药剂为连续

介质；(2) 药剂只存在径向温度分布和径向热扩散，不存在轴向温度分布和热损失；(3) 药剂中只存在热传导，无对流和辐射传热；(4) 药剂的性能参数不随温度的变化而变化。

设在垂直于桥丝轴方向上距桥丝中心 h 处某一药剂薄层 Δh ，该薄层不仅从温度较高的内层吸收热量，其自身还发生化学反应放出一部分热量，同时向邻近的外层散热，如果吸热速率大于散热速率，则温度能不断升高。设想距离桥丝中心 $10r_1$ 处，药剂不受温度变化的影响，即该处 $T_2 = T_0$ 。药剂升温方程可描述如下

$$-2\pi hL\lambda \frac{\partial T_2(h, t)}{\partial h} - 2\pi hL\Delta hq\rho_e C_1 Z \exp\left[\frac{-E}{RT_2(h + \Delta h/2, t)}\right] + 2\pi(h + \Delta h)L\lambda \frac{\partial T_2(h + \Delta h, t)}{\partial h} + 2\pi hL\Delta h\rho_e c_e \frac{\partial T_2(h + \Delta h/2, t)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

边界和初始条件：(1) $T_2|_{t \leq 0}^{h \leq 10r_1} = T_0$ ；(2) $T_2|_{t \geq 0}^{h \geq 10r_1} = T_0$ ；(3) $T_2|_{t \geq 0}^{h=0} = T_1(t)$ 。

式中： T_2 为药剂薄层温度， $^{\circ}\text{C}$ ； h 为药剂薄层到桥丝轴心线的距离， m ； Δh 为药剂薄层厚度， m ； ρ_e 为药剂密度， kg/m^3 ； q 为单位质量药剂的反应热， J/g ； Z 为频率因子； E 为药剂活化能， kJ/mol ； R 为气体常数； c_e 为药剂比热， $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； C_1 为药剂有效浓度，是 T_2 和 t 的函数， $C_1(h, 0) = 1$ 。

式(4)中等号左边第一项为该药剂薄层从内层高温区吸收的热量，第二项为药剂薄层发生化学反应放出的热量，第三项为该薄层向外层药剂散发的热量，第四项为该药剂薄层升温所用热量。

3.2 模型的数值解法

对方程(4)化简可得

$$\Delta h\rho_e c_e \frac{\partial T_2(h + \Delta h/2, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T_2(h, t)}{\partial h} + \Delta hq\rho_e C_1 Z \exp\left[\frac{-E}{RT_2(h + \Delta h/2, t)}\right] - \left[1 + \frac{\Delta h}{h}\right] \lambda \frac{\partial T_2(h + \Delta h, t)}{\partial h} \quad (5)$$

用有限差分方法对式(5)进行离散化，可得以下差分格式

$$T_2(i + 1, j + 1) = \frac{2\lambda\Delta t}{\rho_e c_e \Delta h^2} \left[\left[1 + \frac{\Delta h}{h}\right] T_2(i + 2, j) + T_2(i, j) \right] - \left[\frac{2(2 + \Delta h/h)\lambda\Delta t}{\rho_e c_e \Delta h^2} + 1 \right] T_2(i + 1, j) + \frac{qC_1(i + 1, j)\Delta t}{c_e} Z \exp\left[\frac{-E}{RT_2(i + 1, j)}\right] \quad (6)$$

式中：变量 i 与 h 有关， j 与 t 有关， $C_1(i + 1, j)$ 可由下式计算

$$C_1(i + 1, j) = C_1(i + 1, j - 1) \left[1 - Z \exp\left[\frac{-E}{RT_2(i + 1, j)}\right] \Delta t \right]$$

结合方程(4)的边界条件可迭代计算 T_2 ，图3所示为在 $t = 0.1\text{ms}$ 时药剂的温度分布曲线，药剂基本参数见表2，边界温度 $T_1 = 680^{\circ}\text{C}$ ， $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ 。

4 火工品临界发火点感度估算

当输入电流时，电火工品的桥丝升温，并将热量传递给周围的药剂，当药剂吸热到一定程度，就会发生剧烈反应，并能将反应自行进行下去，直至爆炸。根据热点起爆理论，可以假设：(1) 在桥丝表面均匀地附着一层热点大小的药剂颗粒，即药剂层厚度为热点的直径；(2) 满足以下条件，药剂即可起爆：当桥丝通入足够大的电流，温度在极短时间内达到药剂热点临界温度，温度可保持在临界温度以上足够长时间(大于热点作用时间)，且传递给附着层药剂的热量超过药剂层反应所需能量。

对于电容放电方式，到 t_f 时刻，桥丝产生热量可由下式计算

$$Q_1 = \int_0^{t_f} P(t) dt = \int_0^{t_f} \left[\frac{U}{R_b + R_s} \exp\left[\frac{-t}{(R_b + R_s)C_F}\right] \right]^2 R_b (1 + \alpha T_1) dt \quad (7)$$

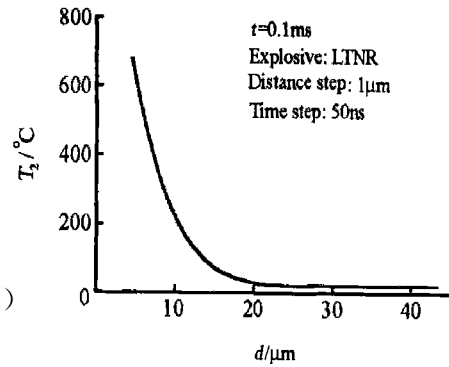


图3 LTNR的温度分布曲线

Fig. 3 LTNR's temperature distribution curve

式中: $P(t)$ 为桥丝发热功率, W ; t_f 为放电时间, s ; 其余各符号意义与式(1)相同。

因 α 很小, 可令 $(1 + \alpha T_1) = 1$, 则式(7)积分可得

$$Q_1 = \frac{U^2 R_b C_F}{2(R_b + R_s)} \left[1 - \exp \frac{-2t_f}{(R_b + R_s)C_F} \right] \quad (8)$$

传递给桥丝表面的药剂附着层的热量可近似表示为

$$Q_2 = Q_1 - \pi r_1^2 L \rho_c (T_1 - T_0) \quad (9)$$

对于药剂层发火所需的能量可近似计算如下

$$Q_3 = \pi ((r_1 + d)^2 - r_1^2) L \rho_c E / M \quad (10)$$

式中: d 为药剂层厚度, m ; ρ_c 为药剂密度, kg/m^3 ; E 为活化能, kJ/mol ; M 为药剂的分子摩尔质量, g/mol ; 其它符号与式(1)相同。

在满足其它条件的情况下, 如果 $Q_2 \geq Q_3$, 则可认为药剂能发火。

当 $Q_2 = Q_3$ 时, 由式(8)、(9)和式(10)可得

$$\frac{U^2 R_b C_F}{2(R_b + R_s)} \left[1 - \exp \frac{-2t_f}{(R_b + R_s)C_F} \right] - \pi r_1^2 L \rho_c (T_1 - T_0) = \pi ((r_1 + d)^2 - r_1^2) L \rho_c E / M$$

通过上式可求解

$$U = \sqrt{\frac{\pi r_1^2 L \rho_c (T_1 - T_0) + \pi ((r_1 + d)^2 - r_1^2) L \rho_c E / M}{\frac{R_b C_F}{2(R_b + R_s)} \left[1 - \exp \frac{-2t_f}{(R_b + R_s)C_F} \right]}} \quad (11)$$

式中: t_f 对应的 T_1 可由 2.1 节介绍的方法计算。将各参数代入式(11)计算, 即可求得临界发火电压 (50%发火电压) 的近似值。

对于直流输入的火工品, 除了桥丝产生热量的计算式不同于电容放电外, 其它计算与电容放电没有区别。

5 输入电流的可靠性设计

5.1 设计原理

从以上模型可初步估算灼热桥丝式火工品的 50%发火感度, 这可帮助设计者初步确定材料的选用和参数的确定。但这还不足以确定火工品的工作电流(电压), 这就需要进行可靠性设计, 使火工品在工作电流作用下, 能可靠起爆。其工作电流(电压)可用以下方法进行设计。

设火工品输入端药剂要求在置信度为 γ 时发火可靠度下限为 $R_{\gamma L}$, 即

$$P(R_F \geq R_{\gamma L}) = \gamma \quad (12)$$

假设在计数法试验中, 对 n 个产品进行试验, 有 f 个产品失效, 则产品的可靠度 R_F 可用下式计算^[7]

$$\sum_{i=0}^f \frac{n!}{i!(n-i)!} R_F^{n-i} (1-R_F)^i = 1 - \gamma \quad (13)$$

当 $f=0$ 时, 上式可简化为

$$R_F = \sqrt[n]{1 - \gamma}$$

则

$$n = \frac{\ln R_F}{\ln(1 - \gamma)} \quad (14)$$

因此, 确定 γ 和 R_F , 即可求用计数法作可靠性评估时需要试验的产品数量。

设每个产品试验成功的概率为 P_s , 那么 n 个产品都成功的概率为 P_s^n 。则试验 n 个产品都成功的概率为

$$P_s^n \geq \gamma \quad (15)$$

则

$$P_s \geq \sqrt[\gamma]{\gamma} \quad (15)$$

式(15)给出了每个产品的发火概率。

以电容放电起爆的火工品为例,当确定50%发火电压为 U_d ,若该产品的感度分布服从正态分布 $N(U_d, \sigma^2)$,由标准正态分布计算对应于 P_s 的分位数 u_p ,则工作电压可由下式计算

$$U_w = U_d + u_p \sigma \quad (16)$$

此电压即可设计为产品在置信度为 γ 时,发火可靠度为 R_F 的工作电压。

5.2 算例

某型电雷管的技术要求是:全发火电压65V、安全电流30mA、置信度0.95时,发火可靠度大于0.99。实际产品用1mm长的 $\varnothing 9\mu\text{m}$ 镍铬桥丝作发热元件,点火药为LTNR,电容为 $0.25\mu\text{F}$ 。经完全步进法试验,测得该产品的50%发火平均电压为57.16V,标准差 $\sigma=2.06\text{V}$,产品感度服从正态分布,评估后认为该产品的可靠度达到了技术要求。

下面用本文中介绍的方法作计算,将计算结果与实际产品的测试结果比较,即可得出结论。计算所用的材料参数见表1和表2, $d=1\mu\text{m}$ 、 $t_f=2\mu\text{s}$,计算LNTR的热点临界温度在热点直径为 $1\mu\text{m}$ 时约 680°C 。将以上数据代入式(1)用计算机计算可得:桥丝在接通电源后 $0.6\mu\text{s}$ 的时间内温度升到了 683°C 以上,并在该温度以上维持达到 $6\mu\text{s}$ 。从式(6)对药剂温度分布的计算结果显示,在这个时间内,药剂的温度分布梯度很大,药剂的高温区集中在紧贴桥丝表面的薄层(厚度约 $1\mu\text{m}$),其温度与桥丝相当。说明该时间段内,桥丝产生的热量主要用于对桥丝和紧贴其表面的药剂薄层升温,热量散失很小。

将各数据代入式(11)计算

$$U = \left[\frac{3.14 \times [(4.5 \times 10^{-6})^2 \times 10^{-3} \times 8200 \times 120 \times (700 - 25)]}{\frac{18.9 \times 0.25 \times 10^{-6}}{2(18.9 + 10)} \left[1 - \exp \frac{-2 \times 2 \times 10^{-6}}{(18.9 + 10) \times 0.25 \times 10^{-6}} \right]} + \frac{3.14 \times [(5.5^2 - 4.5^2) \times 10^{-12} \times 3000 \times 315.4 \times 10^3 / 468.3]}{\frac{18.9 \times 0.25 \times 10^{-6}}{2(18.9 + 10)} \left[1 - \exp \frac{-2 \times 2 \times 10^{-6}}{(18.9 + 10) \times 0.25 \times 10^{-6}} \right]} \right]^{1/2} = 55\text{V}$$

此结果即可作为式(16)中的 U_d 值,与实测值比较,理论计算值略小,这可能是在计算时未考虑其它散热因素造成的。

由式(15)计算得 $P_s = \sqrt[0.95]{0.95} = 0.9998$,查标准正态分布表得 $u_p = 3.5$ 。这里需要设计参数 σ ,可根据经验和设计水平取 $\sigma/U_d = 5\%$,即 $\sigma = 2.75\text{V}$,对于灼热桥丝式电火工品来说,这是一个较合理的取值。将 U 值代入式(16)计算可靠度对应的发火电压

$$U_w = U_d + u_p \sigma = 64.625\text{V}$$

6 结论

本文中所述的桥丝和药剂的温度模型接近火工品输入发火过程,可以用来计算桥丝和药剂的升温曲线,计算结果与发火温度条件比较,可以判定火工品点火药是否达到发火温度。用式(11)可估算灼热桥丝式火工品的发火感度,实例计算结果表明,理论值与实测值很接近。用式(15)和(16)可对产品进行可靠性设计,以估算产品的工作刺激量。

在实际产品的发火过程中,存在两个问题需考虑:一是药剂的化学反应很复杂,且药剂中的传热方式也是多样的;二是输入刺激量、桥丝电阻和药剂的感度受环境和人为操作的影响,往往都是随机变量,可能服从不同的分布。在以后的研究中,应将这两个问题考虑进去,使计算的结果更加精确。

参考文献:

- [1] 王道有,胡学先.灼热桥丝电火工品点火过程的数理化模型[A].中国兵工学会第九专业学会第一次学术会议[C].西安:213所,1979:1-25.
- [2] 汪佩兰,曾象志,张松正.灼热桥丝式火工品桥温的数值模拟[A].火工烟火会议论文集[C].西安:213所,1994:1-9.
- [3] 徐义根,魏光辉,刘尚合.灼热桥丝式电火工品静电发火数理模型[J].兵工学报·火化工分册,1997,19(1):48-51.

- XU Yi-gen, WEI Guang-hui, LIU Shang-he. Electrostatic initiating mathematics-physics model of hot bridgewire electric initiating explosive device[J]. ACTA Armamentarii *The Fascicule of Explosives & Propellants, 1997, 19(1): 48—51.
- [4] Peevy G R, Brigham W P, Lyons G R. Computer modeling of electrical performance of detonators[R]. AIAA 95-2854, 1995.
- [5] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 224—227.
- [6] 钟一鹏, 胡雅达, 江宏志. 国外炸药性能手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990: 93—95.
- [7] GJB376-87. 火工品可靠性评估方法[S].

The temperature rising models of bridgewire and explosive of electro-explosive device and application in reliability design

CAO Jian-hua^{*}, CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping, LI Yi-qi

(National Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disaster,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper introduced the temperature rising models of bridgewire considering capacitor discharge and direct current as input energy, the temperature rising model of explosive and their numerical analysis methods. Meanwhile the energy-balance equation for calculating sensitivity was presented and the theoretical method of reliability design of energy input for bridgewire electro-explosive device was described. A numerical example was given to compare with the real product and the result showed that the models were available for theoretical calculation in reliability design of bridge-wire electro-explosive devices.

Key words: mechanics of explosion; temperature rising model; reliability design; electro-explosive device; bridgewire; explosive

* Corresponding author; CAO Jian-hua; E-mail address: cjh51168@sina.com; Telephone: 010-68912706