

文章编号: 1006-9941(2008)05-0560-04

## 灼热桥丝式电火工品发火可靠性设计方法

董海平, 蔡瑞娇, 穆慧娜, 曹建华

(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:** 提出一种灼热桥丝式电火工品发火可靠性设计方法。该方法首先建立桥丝升温模型和药剂温度分布模型, 然后根据热量平衡方程和初选的设计参数计算药剂临界发火能量, 并判断发火可靠度裕度是否满足要求, 否则重新进行设计。采用该方法通过调整设计参数, 计算得某电作动器的临界发火电压为 4.75 V, 发火可靠度裕度系数为 1.2, 可使产品满足要求。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 灼热桥丝式电火工品; 感度; 桥丝; 药剂; 发火可靠度

**中图分类号:** TJ450

**文献标识码:** A

### 1 引言

灼热桥丝式电火工品通过电阻丝的电热效应, 引燃或引爆含能材料, 广泛应用于武器弹药和爆破工程中, 其发火可靠性要求高。火工品的发火可靠性是由产品的感度特性决定的<sup>[1]</sup>。对于灼热桥丝式电火工品来说, 感度特性与桥丝和药剂的升温过程有关。Massey<sup>[2]</sup>、Valintines Servas<sup>[3]</sup>、汪佩兰<sup>[4]</sup>、谭伟<sup>[5]</sup>、王鹏<sup>[6]</sup>等对起爆模型的建立和桥丝、药剂温度的计算进行了研究, 但没有从理论上对如何保证产品可靠性进行探讨。实际工程中, 火工品的可靠性主要依靠“画、加、打”的方式保证, 增加了试验费用, 延长了研制周期。本文建立了桥丝升温模型和药剂的温度分布模型, 在火工品研制过程中, 可先通过这种模型计算确定药剂的临界发火感度, 再判断产品发火可靠度裕度是否满足要求。

### 2 桥丝和药剂的升温模型

#### 2.1 桥丝升温模型

灼热桥丝式电火工品的起爆输入一般有电容放电和直流电流输入两种方式。电容放电加载比直流电流加载更复杂, 其火工品的发火可靠性研究更具代表性, 因此本文将仅对此问题进行讨论。

在电容放电加载方式下, 电容放电时间短, 桥丝和与桥丝接触的一薄层药剂升温快。当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大于药剂向外散失的热量, 则药剂出现点火。为建立这一过程的

桥丝升温模型, 需要作以下假设: ① 在桥丝的周围有一炸药薄层, 其厚度与热点直径相当; ② 桥丝与药剂薄层的接触面为理想接触面, 即在接触面上无间隙, 且桥丝材料与药剂温度相同; ③ 在桥丝中只存在径向热传导, 忽略轴向热传导, 同时假设桥丝中不存在温度梯度; ④ 在药剂层中的传热采用圆筒壁传热模型; ⑤ 药剂中发生化学反应放出的热可以忽略。基于上述假设, 电容放电的桥丝升温方程为:

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

式中,  $r_1$  为桥丝半径, m;  $L$  为桥丝长度, m;  $\rho$  为桥丝材料密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c$  为桥丝材料比热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ;  $T_1$  为桥丝温度,  $\text{°C}$ ;  $U$  为电容初始电压, V;  $R_s$  为放电电路中的串联电阻,  $\Omega$ ;  $R_b$  为桥丝电阻,  $\Omega$  ( $R_b = \rho' L / \pi r_1^2$ ,  $\rho'$  为桥丝材料电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ );  $C_F$  为电容, F;  $t$  为时间变量, s;  $\lambda$  为药剂导热系数,  $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ ;  $r_2$  为药剂外层到桥丝中心的距离, m;  $T_0$  为桥丝初始温度,  $\text{°C}$ 。式(1)左边为桥丝升温吸收热量, 右边第一项为电流通过桥丝产生热量, 第二项为桥丝向药剂散发的热量。从式(1)可求得桥丝在任一时间  $t$  的桥丝温度  $T_1$ , 因此可画出  $T_1$  与  $t$  的关系曲线。图1所示为镍铬桥丝在起爆药三硝基间苯二酚铅(LTNR)中的升温曲线。

图1中所用的参数值分别为:  $r_1 = 0.006 \text{ mm}$ ,  $L = 0.5 \text{ mm}$ ,  $C_F = 0.25 \text{ } \mu\text{F}$ ,  $U = 26 \text{ V}$ ,  $r_2 = 10 r_1$ ,  $R_s = 0.10 \text{ } \Omega$ ,  $T_0 = 20 \text{ } \text{°C}$ 。关于镍铬桥丝材料的基本参数见文献[7], 起爆药 LTNR 的基本参数见文献[8]。

#### 2.2 药剂层的温度分布模型

建立药剂的温度分布模型时, 对药剂层作如下假

收稿日期: 2008-04-11; 修回日期: 2008-07-09

作者简介: 董海平(1969-), 男, 博士, 从事火工燃爆系统可靠性研究。

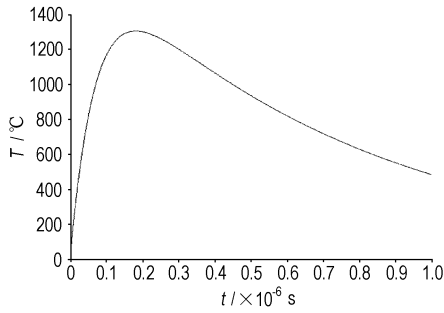


图1 电容放电方式下的桥丝升温曲线

Fig.1 Temperature curve of bridge-wire with capacitor discharge

设：① 药剂是理想的连续介质；② 药剂层中仅在径向方向上存在热传导和温度梯度；③ 药剂层中除热传导外不存在其它传热方式；④ 药剂的基本参数不受温度影响。

将药剂层分成极微小的薄层，其厚度为  $\Delta h$ ，距离桥丝中心轴为  $h$ 。药剂薄层  $\Delta h$  从温度较高的内层吸收热量，自身也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，则温度不断升高；相反，则温度降低。设想在距离桥丝 10 倍半径处，即  $h = 10r_1$  处，药剂不受温度变化的影响，即该处  $T_e = T_0$ 。药剂温度分布方程可描述如下：

$$-2\pi h L \lambda \frac{\partial T_c(h,t)}{\partial h} - 2\pi h L \Delta h q \rho_c C_1 Z \exp\left[-\frac{E}{RT_c(h + \frac{\Delta h}{2}, t)}\right] + 2\pi(h + \Delta h)L\lambda \frac{\partial T_c(h + \Delta h, t)}{\partial h} + 2\pi h L \Delta h \rho_c c_c \frac{\partial T_c(h + \frac{\Delta h}{2}, t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中， $T_c$  为药剂薄层  $\Delta h$  的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $h$  为药剂薄层到桥丝轴心线的距离， $\text{m}$ ； $\Delta h$  为药剂薄层厚度， $\text{m}$ ； $q$  为单位质量药剂的反应热， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； $Z$  为频率因子； $R$  为气体常数； $c_c$  为药剂比热， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ； $C_1$  为药剂有效浓度，是  $T_c$  和  $t$  的函数， $C_1(h, t)|_{t=0} = 1$ 。

式(2)中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，第三项是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。式(2)的边界条件和初始条件为：

- ①  $T_c|_{t=0}^{h \leq 10r_1} = T_0$ ；
- ②  $T_c|_{t \geq 0}^{h=10r_1} = T_0$ ；
- ③  $T_c|_{t \geq 0}^{h=r_1} = T_1(t)$ 。

对式(2)化简可得式(3)：

$$\Delta h \rho_c c_c \frac{\partial T_c(h + \frac{\Delta h}{2}, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T_c(h, t)}{\partial h} + \Delta h q \rho_c C_1 Z \exp\left[\frac{-E}{RT_c(h + \frac{\Delta h}{2}, t)}\right] -$$

$$(1 + \frac{\Delta h}{h}) \lambda \frac{\partial T_c(h + \Delta h, t)}{\partial h} \quad (3)$$

式(3)可用有限差分方法求解  $T_c$ ，它的有限差分格式如下：

$$T_c(i+1, j+1) = \frac{2\lambda \Delta t}{\rho_c c_c \Delta h^2} \left[ (1 + \frac{\Delta h}{h}) T_c(i+2, j) + T_c(i, j) \right] - \left[ \frac{2(2 + \frac{\Delta h}{h}) \lambda \Delta t}{\rho_c c_c \Delta h^2} + 1 \right] T_c(i+1, j) + \frac{q C_1(i+1, j) \Delta t}{c_c} Z \exp\left[-\frac{E}{RT_c(i+1, j)}\right] \quad (4)$$

结合式(2)的边界条件和初始条件，可由式(4)迭代计算  $T_c$ 。图2为 LTNR 药剂层在边界温度  $T_1 = 680^{\circ}\text{C}$ 、初始温度  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ 、 $t = 0.1 \text{ ms}$  时的温度分布曲线。

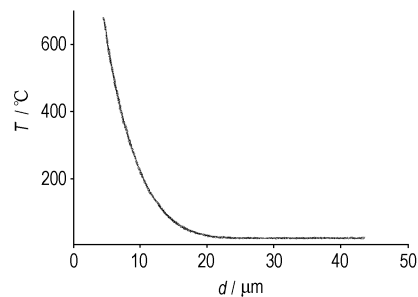


图2 LTNR 的温度分布曲线

Fig.2 Temperature distribution curve of LTNR

从图2可见，从放电开始的很短时间内，药剂层内存在的温度梯度很大，靠近桥丝的药剂层温度基本与桥丝相同。所以，在足够短的时间内，可以将桥丝温度看作是靠近桥丝的薄药剂层的温度。

### 3 火工品临界发火感度计算

根据热点起爆理论，对于电容放电起爆的灼热桥丝式电火工品，发火的条件应满足：

$$\text{I. } Q_c = Q_e, \text{ II. } T_c \geq T_c, \text{ III. } t_c > 10^{-7} \text{ s} \quad (5)$$

式中， $Q_c$  为桥丝传递给药剂热点层的热量； $Q_e$  为药剂热点层发生爆炸所需的热量； $T_c$  为药剂薄层  $\Delta h$  (热点层) 的温度； $T_c$  为药剂层的临界发火温度； $t_c$  为  $T_c$  的温度保持高于  $T_c$  的时间。

当电容放电时，电流通过桥丝发热，桥丝接收的热量可由下式计算：

$$Q_b = \int_0^{t_f} P(t) dt = \int_0^{t_f} \left\{ \frac{U}{R_b + R_s} \exp\left[-\frac{t}{(R_b + R_s)C_f}\right] \right\}^2 R_b (1 + \alpha T_1) dt \quad (6)$$

式中， $Q_b$  为桥丝接收的热量， $\text{J}$ ； $P(t)$  为桥丝的电功率， $\text{W}$ ； $t_f$  为放电时间， $\text{s}$ ； $U$  为电容器电压， $\text{V}$ ； $\alpha$  为桥

丝材料的电阻温度系数,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

由于  $\alpha$  通常很小, 因此  $1 + \alpha T_1 \approx 1$ , 则式(6)可变换为下式:

$$Q_b = \frac{U^2 R_b C_F}{2(R_b + R_s)} \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{2t_f}{(R_b + R_s) C_F} \right] \right\} \quad (7)$$

热点层外的药剂吸收的热量可用下式计算:

$$Q_a = \int_{r_1+2d}^{\infty} 2\pi h L \rho_c c \theta dh \quad (8)$$

式中,  $d$  为热点半径;  $\theta$  为药剂层与外界介质间的温度差, 是  $h$  和  $t$  的函数。  $\theta$  的边界条件和初始条件是:

$$\theta|_{h=r_1+2d} = T_c - T_0, \theta|_{r=\infty} = 0, \theta|_{t=0} = 0$$

该式需要首先用药剂分布模型计算药剂层的温度分布, 求得  $\theta$ , 然后利用分层积分求和的方法计算出  $Q_a$ 。积分上限  $\infty$  可以用  $h = 10r_1$  取代。药剂层温度分布计算表明, 在不发生爆炸的情况下, 距离桥丝中心  $10r_1$  处的药剂在短时间内能保持常温。热点层从桥丝吸收的热量可近似表示如下:

$$Q_c = Q_b - Q_a - \pi r_1^2 L \rho_c (T_1 - T_0) \quad (9)$$

式中等号右边第三项表示桥丝升温所用的热量。

对于热点层发火所需的能量, 即临界发火能量  $Q_c$ , 可近似计算如下:

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

式中,  $d$  为热点半径, m;  $\rho_c$  为药剂密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $E$  为活化能,  $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $M$  为药剂的分子摩尔质量,  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

如果  $Q_c \geq Q_c$ , 则可认为炸药能发火。当  $Q_c = Q_c$  时, 由式(7)、(8)、(9)和(10)可得:

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

通过上式可求解:

$$U = \sqrt{\frac{\pi [(r_1 + 2d)^2 - r_1^2] L \rho_c E / M + \pi r_1^2 L \rho_c (T_1 - T_0) + Q_a}{\frac{R_b C_F}{2(R_b + R_s)} \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{2t_f}{(R_b + R_s) C_F} \right] \right\}}} \quad (12)$$

由式(12)计算出的  $U$  就是电容放电起爆方式下的灼热桥丝式电火工品的临界发火电压, 即发火率为 50% 的平均电压。

## 4 灼热桥丝式电火工品发火可靠性设计

### 4.1 方 法

先利用桥丝升温模型和感度计算模型进行理论计算, 计算出灼热桥丝式电火工品的临界发火感度, 然后计算出满足可靠度指标的刺激量, 与规定的工作刺激量

比较并计算产品发火可靠度裕度系数。若发火可靠度裕度不满足要求, 则调整参数, 重新进行计算和设计。

### 4.2 算 例

某型电作动器的技术要求是: 发火电压为 7 V, 置信度 0.90 时, 发火可靠度大于 0.999。

根据该电作动器的发火条件和工程经验, 选用 0.5 mm 长的  $\Phi 12 \mu\text{m}$  镍铬桥丝作发热元件, 点火药为 LTNR, 电容为 0.33  $\mu\text{F}$ 。镍铬桥丝和点火药 LTNR 的基本参数见文献[7]和文献[8]。  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $t_f = 20 \mu\text{s}$ , 查得热点半径为 1  $\mu\text{m}$  时热点起爆临界温度约为 880  $^{\circ}\text{C}$  [9]。将以上数据代入式(1)计算得: 桥丝在接通电源后 7  $\mu\text{s}$  的时间内温度升到了 880  $^{\circ}\text{C}$ , 并在该温度以上维持了 46  $\mu\text{s}$ 。从式(4)对药剂温度分布的计算结果显示, 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, 即  $T_c = T_1$ 。说明在 7 ~ 53  $\mu\text{s}$  时间段内, 药剂薄层的温度  $T_c$  始终高于热点起爆临界温度  $T_c$ 。

由式(8)可计算得热点层外的药剂吸收的热量为:  $Q_a = 8.314 \times 10^{-6} \text{ J}$

由式(12)计算临界发火电压为:  $U = 5.8 \text{ V}$

根据相似产品的步进法试验结果, 该产品感度服从逻辑斯谛分布, 可取其变差系数  $k = 0.05$ , 则可计算得其刻度参数为  $\gamma = Uk\sqrt{3}/\pi = 5.8 \times 0.05 \times \sqrt{3}/\pi = 0.16$ , 按感度分布模型可计算出满足可靠度要求的发火电压为:  $U_{0.999} = U - \gamma \ln \left( \frac{1-R}{R} \right) = 5.8 - 0.16 \times$

$\ln \left( \frac{1-0.999}{0.999} \right) = 6.91 \text{ V}$ , 则发火可靠度裕度为:  $7/6.91 = 1.01$ 。显然, 该裕度太小, 达不到设计要求。因此应调整参数, 重新进行设计。经过分析, 可以通过调整桥丝的尺寸来提高感度。若选用直径为  $\Phi 10 \mu\text{m}$ , 长度为 0.45 mm 的桥丝, 其他参数不变, 将相关数据代入式(12), 可计算得  $U = 4.75 \text{ V}$ , 此时对应的满足可靠度要求的发火电压为: 5.86 V, 对应的发火可靠度裕度为:  $7/5.86 = 1.2$ , 符合火工品可靠性设计的要求。与只根据工程经验来进行此产品的设计相比, 采用本方法先经过理论计算, 能够使产品设计更科学。

## 5 结 论

本文方法可用于灼热桥丝式电火工品的临界发火感度计算和发火可靠性设计。实际产品设计中, 设计者可在工程经验基础上, 采用本方法先进行理论计算, 对设计参数进行优化选择, 以确定最佳设计方案, 减少研

