

## 【制造技术与实践】

# 桥丝式电火工品瞬态脉冲试验中桥丝的轴向温度分布

张玉令, 高俊国

(军械工程学院 弹药实验中心, 石家庄 050003)

**摘要:**依据传热学的基本理论,结合电器学的原理模型对桥丝式电火工品瞬态脉冲试验中桥丝的轴向温度分布进行了研究,在假设模型的基础上得出了桥丝段和脚线段的导热方程,利用方程的初始和边界条件对方程进行求解,研究得出在一定时间阶段桥丝的轴向温度分布规律.

**关键词:**电火工品;瞬态脉冲试验;传热模型;温度分布

中图分类号:TQ560

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2008)01-0129-03

20世纪60年代以来,许多学者对桥丝式电火工品的无损检测进行了大量的研究,根据瞬态脉冲试验制备的仪器也越来越先进,但其热参数的处理方程仍建立在集总热模型上,即认为在升温过程中桥丝上的温度为均温,而实际上沿桥丝的轴向有温度分布,为更加接近实际情况,必须建立新的模型.

## 1 桥丝传热模型

### 1.1 传热特点

桥丝-药剂-脚线系统类似于电器中的电阻器.由电器的基础理论可知:由于桥丝部分相对于脚线部分具有很大的电阻,因此,桥丝部分发热较集中,且由于脚线的散热条件比药剂的要好,桥丝的热量向脚线传递,从而使桥丝的轴向温度不均匀,呈两头低、中间高的曲线形状,而不是均匀的温度分布.

### 1.2 模型条件

桥丝式电火工品发火过程桥升温曲线如图1所示.曲线的OA段,桥丝的温度很低,桥丝向药剂传递的热量也很少,药剂化学反应不显著;

曲线AB段,桥丝的平均温度趋于一定,桥丝向药剂传递的热量逐渐增多,后期药剂的化学反应变得不可忽略;曲线BC段药剂的化学反应越来越显著,并自行加速形成自持反应使电火工品发火<sup>[1]</sup>.由此可见,AB段是桥丝-药剂系统能量积累并最终导致发火的关键阶段,本研究的重点是AB段.

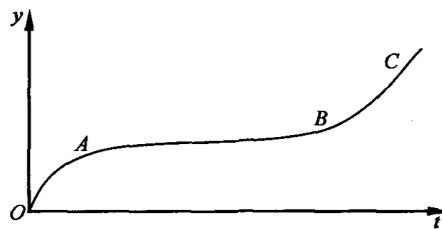


图1 发火过程桥升温曲线

在桥丝式电火工品的瞬态脉冲试验中,桥丝的电热响应曲线如图2所示.在示意图中,AB段相当于图1中的OA段,BC段相当于图1中的AB段,由于在瞬态脉冲试验中,输入的电流较小,不足以使桥丝升温到药剂形成自行化学反应,因此,在曲线中没有像图1中的BC段的曲

\* 收稿日期:2007-09-10

作者简介:张玉令(1983—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事军事化学与烟火技术研究.

线,下面以图2中的BC段为对象进行研究.

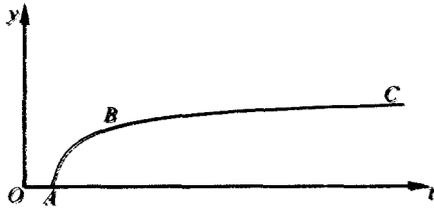
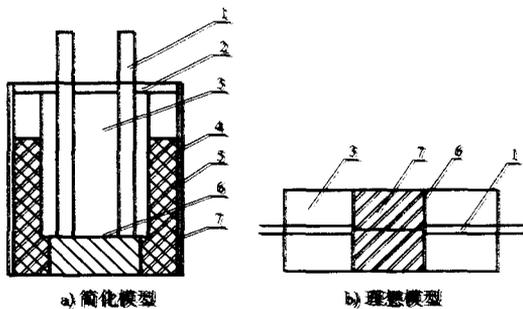


图2 电热响应曲线

桥丝式电火工品结构如图3所示,本研究采用理想模型(b)<sup>[2]</sup>,模型的假设条件为<sup>[3]</sup>:

- 1) 桥丝、药剂和脚线为各向同性物质,且物理化学性质在整个过程中保持不变;
- 2) 由于相对于桥丝脚线的电功率非常低,忽略脚线向绝缘塞的传热;
- 3) 桥丝和药剂、桥丝和脚线为理想接触,忽略之间的热阻和热容;
- 4) 桥丝-药剂-脚线系统中的传热方式只有热传导,忽略热辐射和对流传热.



1.脚线; 2.盖; 3.绝缘塞; 4.塑料圈;  
5.外壳; 6.桥丝; 7.火工药剂

图3 桥丝式电火工品结构

### 1.3 建立方程

分别取桥丝和脚线为研究对象.桥丝和脚线都为圆柱形的导体.假设桥丝和脚线都为各向同性的轴对称圆柱形,则桥温模型只与轴向坐标 $z$ 和径向坐标 $r$ 有关,模型如图4.

对于桥丝-药剂系统,由于桥丝直径很小,忽略桥丝自身的径向温度分布,该系统径向分布主要是向药剂的分布.对于脚线,忽略其向绝缘层的径向导热.

以桥丝的轴向中心为原点,以桥丝轴向为 $z$ 轴,以垂直于 $z$ 轴的方向为 $r$ 轴建立坐标系.模型

的坐标系如图5.

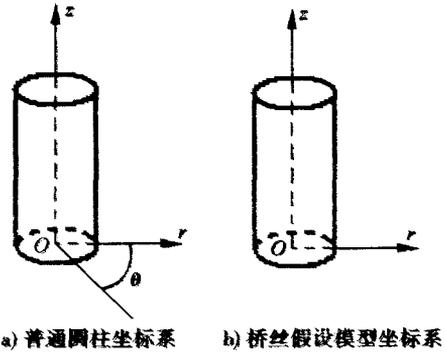


图4 圆柱坐标系

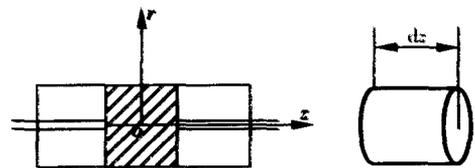


图5 系统坐标与微元体

取 $z$ 轴上的一个微元体为研究对象,采用一维传热的研究方法研究二维传热的问题,由图2可知在BC段桥温基本趋于稳定,因此在本研究把时间 $t$ 看为一个常数.则根据热平衡方程,流进微元体 $dz$ 的热量,加上微元体本身的发热功率等于通过传导出 $dz$ 的热量加上散发到周围介质的热量<sup>[4]</sup>.即

$$dQ_1 + P(t) = dQ_2 + dQ_3 \quad (1)$$

其中: $dQ_1$ 为流进微元体的热量; $P(t)$ 为微元体的发热功率; $dQ_2$ 为流出微元体的热量; $dQ_3$ 为散发到周围介质的热量.

根据传热学

$$dQ_1 = -\lambda S \frac{dT}{dz} \quad P(t) = \frac{I^2 \rho}{S} dz$$

$$dQ_2 = -\lambda S \frac{d}{dz}(T + dT)$$

$$dQ_3 = KLTdz$$

代入式(1)并整理可得出桥丝部分的传热方程为

$$\lambda_1 S_1 \frac{d^2 T_1}{dz^2} - KLT_1 + \frac{I^2 \rho_1}{S_1} = 0 \quad (2)$$

其中: $\lambda_1$ 为桥丝的导热系数; $S_1$ 为桥丝的截面积; $T_1$ 为桥丝温度; $K$ 为药剂的散热系数; $L$ 为桥丝的周长; $I$ 为电流; $\rho_1$ 为桥丝的电阻系数.则式(2)的通解为

$$T_1 = \frac{I^2 \rho_1}{KLTS_1} + c_1 e^{\sqrt{\frac{KL}{\lambda_1 S_1}} z} + c_2 e^{-\sqrt{\frac{KL}{\lambda_1 S_1}} z} \quad (3)$$

其中  $c_1, c_2$  为常系数.

$$\text{设 } \alpha = \sqrt{\frac{KL}{\lambda_1 S_1}}, \beta = \frac{I^2 \rho_1}{KLS_1}$$

则式(3)变为

$$T_1 = \beta + c_1 e^{\alpha z} + c_2 e^{-\alpha z} \quad (4)$$

对于脚线部分,由于忽略了脚线向绝缘塞的传热,因此传热平衡方程为

$$dQ_1 + P(t) = dQ_2$$

整理得

$$\lambda_2 S_2 \frac{d^2 T_1}{dz^2} + \frac{I^2 \rho_2}{S_2} = 0 \quad (5)$$

其中:  $\lambda_2$  为脚线的导热系数;  $S_2$  为脚线的截面积;  $T_2$  为脚线温度;  $I$  为电流;  $\rho_2$  为脚线的电阻系数.

则(5)式的通解为

$$T_2 = -\frac{I^2 \rho_2}{2\lambda_2 S_2^2} z^2 + c_3 z + c_4 \quad (6)$$

其中  $c_3, c_4$  为常系数.

$$\text{设 } \gamma = -\frac{I^2 \rho_2}{2\lambda_2 S_2^2}$$

则式(6)变为

$$T_2 = \gamma z^2 + c_3 z + c_4 \quad (7)$$

### 1.4 边界条件

① 设桥丝的长度为  $2a$ , 则边界条件为

$$z = a, T_1 = T_2.$$

② 由于脚线自身的电功率非常小, 因此可认为

$$z = b (b \gg 2a), T_1 = T_0;$$

$$z = -b, T_1 = T_0 (T_0 \text{ 为常温}).$$

$$\textcircled{3} z = a, \frac{dT_1}{dz} = \frac{dT_2}{dz} \quad (8)$$

$$\textcircled{4} T_1|_{z=a} = T_1|_{z=-a} \quad (9)$$

## 2 数值求解

由式(4)和(6)结合边界条件可计算得

$$c_1 = c_2 = \frac{2\gamma\alpha^2}{\alpha(e^{\alpha a} - e^{-\alpha a})}$$

$$c_3 = 0$$

$$c_4 = T_0 - \gamma b^2$$

综上可得

$$T_1 = \beta + \frac{2\gamma\alpha^2 (e^{\alpha z} + e^{-\alpha z})}{\alpha(e^{\alpha a} - e^{-\alpha a})} \quad (10)$$

$$T_2 = \gamma(z^2 - b^2) + T_0 \quad (11)$$

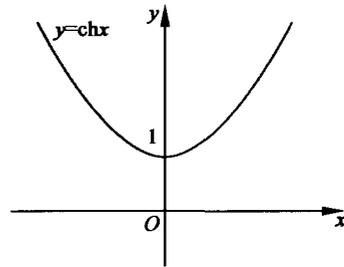


图6 双曲余弦图形

## 3 温度曲线

双曲余弦函数  $y = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$  的曲线为

$$\gamma = -\frac{I^2 \rho_2}{2\lambda_2 S_2^2}$$

则  $\gamma < 0$ . 所以由式(10)可得在桥丝段轴向温度分布曲线如图7.

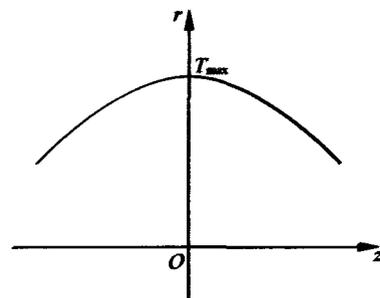


图7 桥丝段轴向温度分布

由式(11)可知脚线的轴向温度分布形状为系数为负数的二次方程式的曲线, 所以可得系统总的轴向温度分布曲线为:

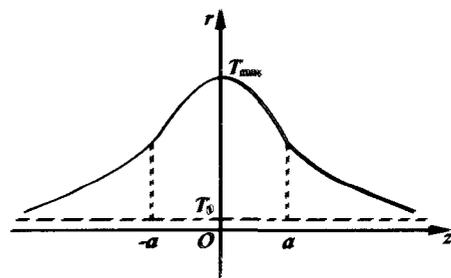


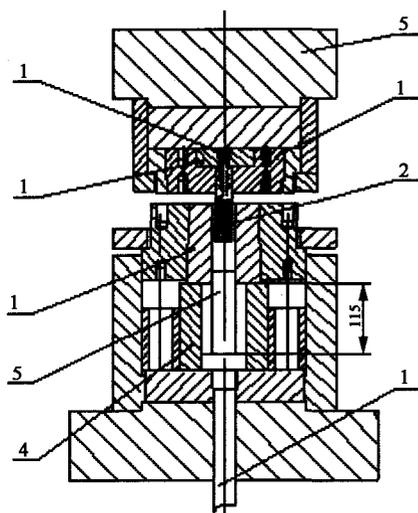
图8 桥丝—脚线轴向温度分布

### 3 成形模具设计和制造

花键套毛坯挤压模具结构如图8所示,其中模架采用的是315冷挤压通用模架,凹模采用二层组合凹模,组合凹模的过盈量取0.5%,配合斜度为 $1.5^\circ$ ,凸模的工作尺寸按照式(1)计算:

$$dT = (d + 3/4\Delta) - \delta$$

其中: $dT$ 为凸模尺寸; $d$ 为产品内孔尺寸; $\Delta$ 为产品公差; $\delta$ 为凸模的公差; $\delta = (1/5 \sim 1/10)\Delta$ .



1. 凸模固定板,2. 凸模,3. 顶杆,4. 垫圈,5. 顶杆,  
6. 组合凹模,7. 垫板,8. 螺钉,9. 通用模架  
图8 花键套毛坯挤压模具结构

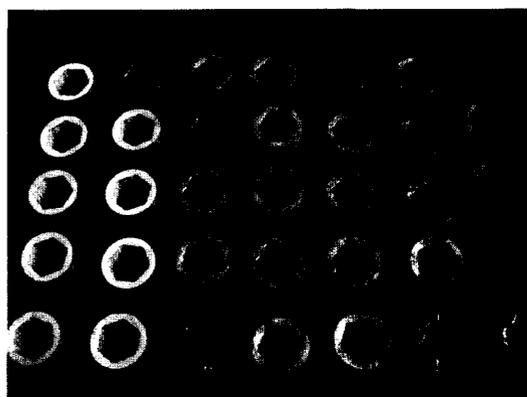


图9 花键套冷挤压件

与机械加工工艺相比,挤压成形的毛坯能显著提高生产效率,减少加工工时,并能提高材料利用率.

#### 参考文献:

- [1] 洪深泽. 挤压工艺及模具设计[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 张志文. 锻造工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [3] 贾俐俐. 挤压工艺及模具[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [4] 吴诗淳. 冷温挤压技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

(上接第131页)

本研究在同时考虑桥丝的轴向散热、脚线的轴向散热和桥丝向药剂的传热的基础上,建立了瞬态脉冲试验中桥丝-药剂-脚线系统的传热模型,得出了桥丝式电火工品瞬态脉冲试验中桥丝的轴向温度分布.

由桥丝-脚线轴向温度分布图可知,桥丝向药剂传热过程中,由于桥丝具有轴向温度的分布,桥丝的不同部分向药剂的传热效率肯定不同,因此,本研究证明了瞬态脉冲试验中桥丝存在轴向温度分布,为对桥丝发火过程的研究提供了依据和参考.

#### 参考文献:

- [1] 张冠生. 电器学[M]. 北京:机械工业出版社,1993:195-202.
- [2] 陈福梅. 火工品原理与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1990:173-183.
- [3] 谭伟,高本庆,刘波. 桥丝式电火工品静电发火过程的数值模拟[J]. 火工品,2003,(3):1-5.
- [4] 周彬. 桥丝式电火工品瞬态脉冲无损检测技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.