

文章编号: 1003-1480 (2003) 03-0001-05

# 桥丝式电火工品静电发火过程的数值模拟

谭伟, 高本庆, 刘波

(北京理工大学信息科学技术学院电子工程系, 北京, 100081)

**摘 要:** 根据灼热桥丝式电火工品的电热起爆机理, 考虑桥丝的轴向和径向散热以及药剂自身的分解放热, 建立了灼热桥丝式电火工品静电发火的数理模型。用有限差分法对该模型方程进行求解, 得出了桥丝式电火工品的三维温度场分布, 并对结果进行了分析。

**关键词:** 电火工品 (EED); 静电放电 (ESD); 热分解; 有限差分法

**中图分类号:** TJ450.2      **文献标识码:** A

## Numerical Simulation of Electrostatic Firing Sequence of Bridgewire EED

TAN Wei, GAO Ben-qing, LIU Bo

(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

**Abstract:** Based on the electrical thermal explosion theory of electro-explosive device (EED), and the considerations of the axial and radial heat diffusion of the bridgewire and thermal decomposition of the composition, an ideal mathematical model of electrostatic firing is developed. The model equations are computed by means of a finite-difference method. The three dimensions of temperature fields for EED are gained and the results are discussed.

**Key words:** Electro-explosive device (EED); ESD; Thermal decomposition; Finite difference method

电火工品由于其作用时间短, 可靠性好, 广泛应用于各类民爆器材、军械弹药以及航空航天装置中。电火工品是以电能作为激发冲能的, 它可能会因射频 (RF) 或静电放电 (ESD) 等引起意外起爆。因此, 电磁干扰导致电火工品意外作用的问题引起了人们的极大关注<sup>[1-2]</sup>。

桥丝式电火工品的发火过程, 是电能转化为热能, 桥丝升温, 热能向药剂传递, 形成热点自持化学反应, 直到发生爆炸的过程。迄今为止, 国内外许多学者在桥丝式电火工品的恒流发火方面已做了大量的研究工作<sup>[3]</sup>。与恒流发火过程相

比, 其静电发火过程有其自身特点, 静电放电时间短, 且电功率不为恒值。本文在建模进行数值模拟时, 不但考虑桥丝的轴向和径向散热, 同时还考虑了药剂化学反应放热对桥丝温度的影响, 因此更接近电火工品电热起爆的真实情况。

## 1 静电发火数理模型

### 1.1 模型假设

EED 的电热起爆过程, 是一个物理化学过程, 本质上是一个含化学反应的三维热传导问题, 建

收稿日期: 2003-01-09

作者简介: 谭伟 (1971-), 男, 在站博士后, 主要从事电磁兼容及数值计算方面的研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69931030)。

模时做了以下几点假设：

(1) 桥丝药剂均为各向同性物质，且物理化学性质在整个点火过程中保持不变；

(2) 桥丝和药剂的接触面为理想接触面，忽略其热阻及热容；

(3) 因药剂电阻远大于桥丝电阻，故可视药剂为电的理想绝缘体，药剂中无电流流过；

(4) 假定药剂均匀，药剂热分解服从零次阿累尼乌斯规律。

### 1.2 药剂温度控制方程

图1所示是一个典型的桥丝电火工品示意图。

$$K_r \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + K_r \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + K_z \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + \frac{K\theta}{r^2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \theta^2} + q_v = \rho_2 c_2 \frac{dT_2}{dt} \quad (2)$$

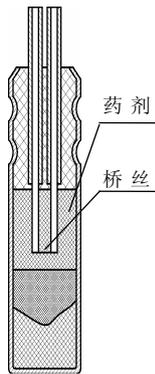


图1 典型桥丝式 EED 示意图

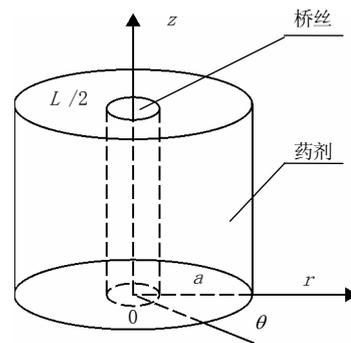


图2 柱坐标系中的 EED

在药剂区域 ( $r \geq r_0$ )，内热源为药剂的化学反应放热。起爆药的热分解服从零次阿累尼乌斯规律

$$q_v = \rho_2 Q A e^{-E/RT_2} \quad (3)$$

式中： $T_2$ ——药剂温度；

$\rho_2$ ——药剂密度；

$C_2$ ——药剂的热容；

$Q$ ——药剂的反应热；

$A$ ——频率因子；

$E$ ——药剂活化能；

$R$ ——普适气体恒量。

### 1.3 桥丝温度控制方程

由于桥丝为细线结构，并且它具有很高的导热率，因此忽略桥丝的径向温度梯度。如图3所示，选取长为  $\Delta z$  的桥丝为研究对象，桥丝产生的

由于电火工品的发火时间短，因此传热主要在桥丝及其附近的药剂中进行。以桥丝的中心为  $Z$  轴，并选取桥丝的轴向中点为原点，建立圆柱坐标系，如图2所示。根据能量守恒条件，药剂系统的传热控制方程为<sup>[4]</sup>：

$$\rho c \frac{dT}{dt} = -k \nabla^2 T + q_v \quad (1)$$

式中， $q_v$ ——内热源；

$K$ ——热扩散率。

在柱坐标系中，该方程为：

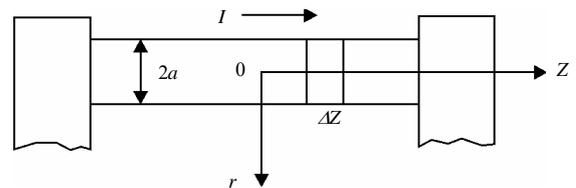
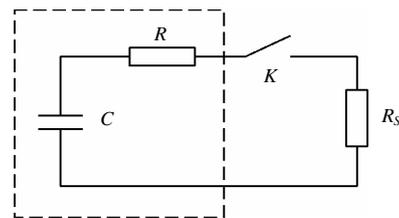


图3 桥丝示意图



ESD 模型

图4 静电放电等效电路图

焦耳热为：

$$E_1 = I^2 \frac{\sigma}{\pi a^2} \Delta z \Delta t \quad (4)$$

$\Delta z$  单元体  $Z$  方向的热量增量为

$$E_2 = K_1 (\pi a^2) \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \Delta z \Delta t \quad (5)$$

$\Delta z$  单元体径向传给药剂的热量见式 (6)。

$$E_3 = K_2 (2\pi a) \Delta z \Delta t \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=a} \quad (6)$$

$$I^2 \frac{\sigma}{\pi a^2} \Delta z \Delta t + K_1 (\pi a^2) \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \Delta z \Delta t + K_2 (2\pi a) \Delta z \Delta t \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=a} = \rho_1 C_1 (\pi a^2) \Delta z \Delta T_1 \quad (8)$$

经化简整理, 并取  $\Delta t \rightarrow 0$ , 则有

$$I^2 \frac{\sigma}{\pi^2 a^4} + K_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + K_2 \frac{2}{a} \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=a} = \rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \quad (9)$$

式中:  $I$ ——通过桥丝的电流;

$\sigma$ ——桥丝的电阻率;

$a$ ——桥丝半径;

$T_1$ ——桥丝温度;

$T_2$ ——药剂温度;

$K_1$ ——桥丝的热扩散率;

$K_2$ ——药剂的热扩散率;

$C_1$ ——桥丝的热容。

计算时, 需要得出静电放电时通过桥丝的电流, 因此应确定所采用的静电放电 (ESD) 模型。从目前国内外的报道资料来看, ESD 模型主要有 8 种<sup>[5]</sup>, 其中人体模型、场增强模型和机器模型所代表的带电体静电放电能量较大, 可能对桥丝式电火工品构成危害。这 3 种 ESD 模型都可用一充电的电容  $C$  串联一电阻  $R$  作为等效电路, 由此得出灼热桥丝式电火工品的静电发火等效电路如图 4。因此, 通过桥丝的电流为

$$I(t) = \frac{U}{(R + R_s)^2} e^{-\frac{2t}{(R + R_s)C}} \quad (10)$$

式中:  $U$ ——电容器的初始电压;

$R_s$ ——桥丝的电阻。

$$T_{2i,k}^{n+1} = T_{2i,k}^n + \frac{K_2 \Delta t}{\rho_2 C_2} \left[ \frac{T_{2i+1,k}^n - T_{2i-1,k}^n}{2r \Delta r} + \frac{T_{2i+1,k}^n - 2T_{2i,k}^n + T_{2i-1,k}^n}{(\Delta r)^2} + \frac{T_{2i,k+1}^n - 2T_{2i,k}^n + T_{2i,k-1}^n}{(\Delta z)^2} \right] + \frac{QA \Delta t}{C_2} e^{-E/RT_{2i,k}^n} \quad (15)$$

$\Delta z$  单元体自身内能的增加为

$$E_4 = -\rho_1 C_1 (\pi a^2) \Delta z \Delta T_1 \quad (7)$$

根据能量守恒, 对于长为  $\Delta z$  的桥丝, 综合方程 (4) ~ (7), 则桥丝的温度控制方程见式 (8)。

#### 1.4 初始条件和边界条件

桥丝及药剂的起始温度为常温  $T_0$ , 初始条件为

$$t = 0, T(r, \theta, z) = T_0 \quad (11)$$

桥丝两端与引脚形成良好的热接触, 因此可视为常温。由于作用时间短, 药剂中大于  $20a$  处则可视为常温。此外, 根据对称性, 在  $Z=0$  平面上无热传递。故边界条件为

$$z = L/2, T = T_0 \quad Z = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$r \rightarrow \infty, T = T_0 \quad (13)$$

根据假设, 忽略了桥丝与药剂的交界面的热容和热阻, 因此在交界面处温度相等。

$$r = r_0, T_1 = T_2 \quad (14)$$

## 2 数值求解

### 2.1 方程离散化

求解时, 考虑桥丝药剂系统具有轴对称的性质, 因此该模型方程可以简化为二维来处理。本文用有限差分法对模型方程进行离散化。药剂温度方程的差分格式见式 (15)。

桥丝温度方程的差分格式为:

$$T_{1k}^{n+1} = T_{1k}^n + \frac{\sigma \Delta t}{\pi^2 a^4 \rho_1 C_1} (I^n)^2 + \frac{K_1 \Delta t}{\rho_1 C_1} \frac{T_{1k+1}^n - 2T_{1k}^n + T_{1k-1}^n}{(\Delta z)^2} + \frac{2K_2 \Delta t}{\rho_1 C_1 a} \frac{T_{22,k}^n - 2T_{21,k}^n}{\Delta r} \quad (16)$$

$$I^n = \frac{U}{(R + R_s)^2} e^{-\frac{2(n\Delta t)}{(R+R_s)C}} \quad (17)$$

边界条件的差分格式分别为

$$z = 0, \quad T_{2i,0}^n = T_{2i,1}^n \quad (18)$$

$$r = r_0, \quad T_{1k}^n = T_{21,k}^n \quad (19)$$

## 2.2 典型 EED 计算结果

求解时, 桥丝及药剂的相关物理化学参数取值如表 1 所示<sup>[3,6]</sup>。此外, 桥丝的长度为 1mm, 直径为 2.54 $\mu\text{m}$ 。静电放电模型中, 电阻  $R$  为 100 $\Omega$ , 电容  $C$  为 500pF, 放电电压为 12kV。考虑到数值计算的稳定性, 空间步长  $\Delta r$  取 0.25 $\mu\text{m}$ ,  $\Delta Z$  取 10 $\mu\text{m}$ , 时间步长  $\Delta t$  为 4ns。

表 1 桥丝及药剂的相关物理化学参数

参数	桥丝	药剂
$K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	98.96	0.88
$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8 900.0	1 468.0
$C / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	437.5	1 023.0
$\sigma / (\Omega \cdot \text{m})$	$6.32 \times 10^{-6}$	-
$Q / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	-	$6.9 \times 10^6$
$E / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	-	8 000.0
$A / (\text{s}^{-1})$	-	$1.0 \times 10^7$

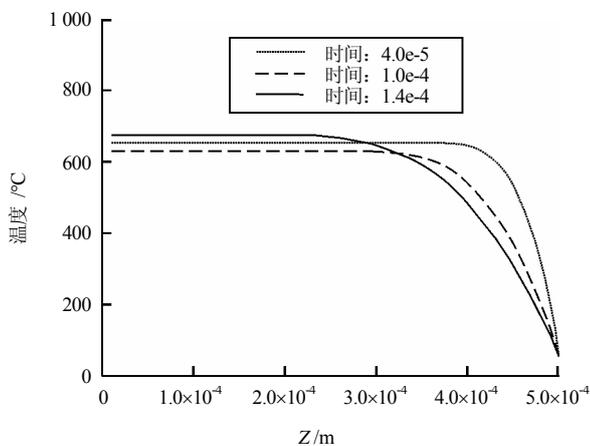


图 5 桥丝轴向温度分布

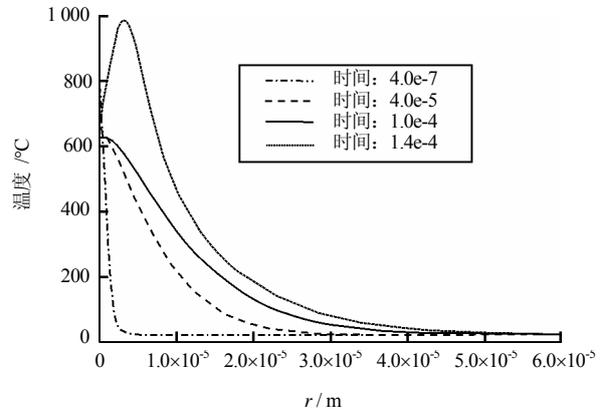


图 6 药剂径向温度分布

图 5 给出了时间分别为 40 $\mu\text{s}$ , 100 $\mu\text{s}$  和 140 $\mu\text{s}$  时桥丝的轴向温度分布。由于静电放电作用时间极短, 桥丝是在很短时间内 (时间常数为 50ns) 升到很高温度的。此后随着传热的进行, 温度不断降低, 因此桥丝 100 $\mu\text{s}$  时各点的温度比 40 $\mu\text{s}$  时低。随着药剂温度的升高和加热层厚度的增加, 自身反应放热加剧, 药剂温度超过桥丝的温度, 药剂将向桥丝传热, 桥丝温度又会升高。因此, 桥丝 140 $\mu\text{s}$  时中间部分的温度比 100 $\mu\text{s}$  时高。图 6 是在  $Z=0$  的平面上不同时刻药剂的径向温度分布。在时间为 140 $\mu\text{s}$  时, 药剂的温度突然升高, 这时药剂化学反应加剧, 形成热点自持化学反应, 电火工品将起爆。

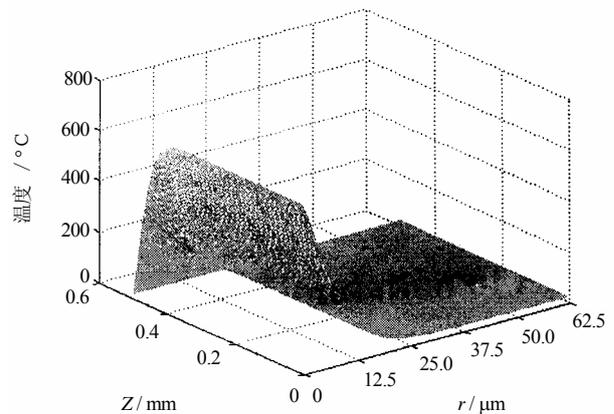


图 7 药剂轴截面温度分布 ( $t=40\mu\text{s}$ )

图 7 和图 8 是时间分别为 40 $\mu\text{s}$  和 140 $\mu\text{s}$  时药剂的轴截面温度分布。由图 7 和图 8 可以看出, 传热

主要在桥丝周围很薄的一层药剂中进行（小于 $50\mu\text{m}$ ）。此外，药剂温度急剧升高出现在距桥丝药剂交界面约 $4\mu\text{m}$ 处，而不是在桥药交界面处。这是因为桥丝加热时间很短，而且具有很高的导热率，交界面处药剂的热量不易积累所致。

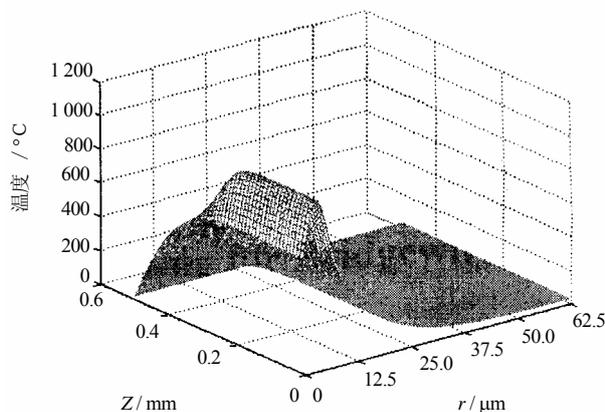


图8 药剂轴截面温度分布 ( $t=140\mu\text{s}$ )

### 3 结论

本文在同时考虑桥丝径向、轴向散热及药剂反应放热的基础上，建立了电火工品静电发火的数理模型。用有限差分方法进行求解，得出了桥丝的轴向一维温度分布及药剂的三维温度场。计算结果表明，传热主要在桥丝周围很薄的一层药剂中进行，且药剂的起爆点在离交界面一定的距离处。这与恒流发火时的情况不同，由于恒流发火是持续加热

的，紧贴桥丝处的药剂温度最高，首先形成反应核心，因而起爆点在桥丝药剂的交界面处。

根据建立的数理模型，可以方便地模拟电火工品在静电放电作用下的桥丝及药剂的温度场分布，通过改变桥丝药剂的物理化学参数、静电放电模型及参数，研究它们对静电发火的影响，从而为电火工品的防静电设计提供指导和参考。

### 参考文献:

- [1] Kenneth E. Willis. Methods of protecting electro-explosive devices from the effects of RF radiation and ESD [C]. 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Washington, 1997.
- [2] Koucherng Roger Lee and John E. Bennett. New method for assessing EED susceptibility electromagnetic radiation [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1991, 33 (4): 328~333.
- [3] 王道有. 灼热桥丝电火工品点火过程的数理化模型 [J]. 兵工学报 (火工品分册), 1979, (1).
- [4] 姚仲鹏编. 传热学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [5] Owen J. McAteer. Electrostatic discharge control [M]. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- [6] Barry T. Neyer. Bridge wire heating [C]. Proceedings of Sixteenth Symposium on Explosives and Pyrotechnics, Essington, PA, April 1997.

### 新产品、新技术

## AEL Smartdet 系统和 AEL Electrodet 系统

AEL Smartdet 系统和 AEL Electrodet 系统是非洲炸药有限公司 (African Explosive Limited, 简称 AEL) 目前正在研制的两种电子雷管系统。

AEL Smartdet 电子起爆系统是市场上最先进的起爆系统。其工艺技术在爆炸设计和优化爆破效果，以及安全性和可行性方面是有最佳灵活性。其他的优点是：对振动和爆炸气浪、碎片、废屑堆积等有良好的控制能力，从而得到很好的破碎效果，提高装填和运输、安全环境和常规采矿效率，节省了费用。

AEL Smartdet 系统分 3 种 (1) 窄矿脉系统 (The Narrow Reef System)；(2) 隧道爆破系统 (The Blasting System)；(3) 通用爆破系统。

AEL Electrodet 系统是按照国际采矿业高安全性能级和提高生产率的要求设计的，AEL Electrodet 系统可提供集成的电子系统，这种集成的电子系统包括：窄矿脉爆破和地面爆破专用系统，具有临界爆破性能的、监控和在大功率信息设备中将数据储存在一起的两个软件组件。

Electrodet 爆炸软件由两个交替工作的组件组成，这两个组件分别是经过几年来的努力，完成将关键性爆破性能、监控和资源数据汇集到可以从地面办公计算机中存取的大功率信息工作中的 Detnet 2000 和 MiMine 管理信息系统。

Detnet 2000 控制所有的爆破管理功能，而 MiMine 是完全自动化的、可根据特殊用户的要求从 Detnet 2000 选择和分类大量数据，然后将这些数据转换成用户欢迎的表值或者图示形式的管理信息系统。

—— 徐苒报道