

桥丝式电火工品发火过程的数值仿真

龙兵¹, 常新龙¹, 张磊¹, 余堰峰¹, 张有宏^{1, 2}, 胡宽¹

(1. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安, 710025; 2. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安, 710072)

摘 要: 应用有限元分析软件 ANSYS, 建立了桥丝式电火工品的有限元仿真模型, 对桥丝式电火工品的直流发火过程和电容放电发火过程进行了有限元分析, 得出了两种情况下火工品的温度分布云图、径向温度分布曲线和桥丝与药剂交界面的温度变化曲线, 并对仿真结果进行了分析讨论。

关键词: 电火工品; 有限元方法; 热分解; 数值仿真; 发火

中图分类号: TJ450.1 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of Firing Sequence of Bridge-wire EED

LONG Bing¹, CHANG Xin-long¹, ZHANG Lei¹, YU Yan-feng¹, ZHANG You-hong^{1,2}, HU Kuan¹

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi'an, 710025; 2. Northwest Polytechnical University, Xi'an, 710072)

Abstract : Using ANSYS engineering analysis software, the finite element analysis model for the bridge-wire EED was set up in this paper. The finite element analysis is carried out for firing sequence on direct current firing and capacitor discharge firing condition. Radial temperature, radial temperature distribution and temperature curve at the interface of bridge-wire and ignition powder were procured and the results were discussed.

Key words : Electro-explosive device ; Finite element analysis ; Thermal decomposition ; Numerical simulation ; Firing

电火工品 (Electro-explosive device, EED) 具有作用迅速准确、发火能量低以及可以大量同时使用的优点, 目前已广泛应用于民用、军械系统和航空航天系统中^[1-2]。由于电火工品可能因为射频或静电放电等引起意外起爆^[3], 因此, 电磁干扰导致电火工品意外起爆的问题引起了人们的极大关注。

桥丝式电火工品的发火是电能转化为热能, 桥丝升温, 热能向药剂传播, 药剂发生热分解反应, 直到发生爆炸的过程。谭伟等人^[4]对桥丝式电火工品的静电发火过程进行了数值模拟, 利用 ANSYS 对桥丝式电火工品的发火过程进行仿真模拟, 得到了更加直观的结果。本文应用有限元软件 ANSYS, 对电火工品

建立有限元仿真模型, 对其直流电流和电容放电发火过程进行了仿真模拟。

1 桥丝式电火工品的有限元模型

1.1 基本假设

(1) 假定药剂热分解速率服从零次阿累尼乌斯定律^[5]; (2) 桥丝和药剂的接触面为理想接触面, 忽略其热阻和热容; (3) 药剂和环境之间不发生热交换, 反应放热全部用来使桥丝和药剂升温; (4) 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, 药剂中无电流通过。

收稿日期: 2009-07-20

作者简介: 龙兵 (1986-), 男, 硕士研究生, 从事失效物理与可靠性研究。

基金项目: 中国博士后科学基金资助。

1.2 几何模型

图1为桥丝式电火工品的结构示意图,本文采用理想模型进行建模。

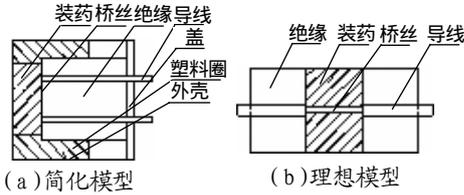


图1 桥丝式电火工品结构示意图

Fig.1 Structure sketch of bridge-wire EED

由图1可以看出电火工品的理想模型为轴对称结构,在有限元分析时只取其1/4进行建模,划分网格后的结果如图2所示。



图2 网格划分结果
Fig.2 Grid partition

桥丝及药剂的各种热物性和化学动力学参数^[4]

取值如表1所示。

表1 桥丝和装药的各种热物性参数

Tab.1 Thermal parameters of bridge-wire EED

参数	l ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	ρl ($kg \cdot m^{-3}$)	$c l$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	$d l$ (m^{-1})	$Q_d l$ ($J \cdot kg^{-1}$)	E ($J \cdot mol^{-1}$)	A (s^{-1})
桥丝	9896	8900	437.5	632 $\times 10^6$	-	-	-
装药	5	1720	1570	-	247 $\times 10^6$	1.97 $\times 10^5$	1.00 $\times 10^{19}$

桥丝的直径为2.4 μm ,长度为0.5mm,恒定电流式电火工品的电流为2A,电容放电式电火工品的初始电压 $U_0=50V$,电容为 $C=0.5\mu F$,电路串联电阻为 $R_s=10\Omega$,温度系数 $\alpha=0.00013K^{-1[1-2]}$ 。

1.3 理论模型

桥丝式电火工品的热传导方程^[1]为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda \nabla^2 T + q_v \quad (1)$$

由于为轴对称结构,因此式(1)可以表示为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\theta}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (2)$$

式(1)~(2)中: ρ 为密度,kg/m³; c 为比热容, J/(kg·K); T 为温度, K; λ 为热传导系数, W/(m·K); t 为时间, s; q_v 为内热源强度, J/(m³·s)。

式(1)和(2)中的内热源强度由桥丝和起爆药剂两部分组成。其中桥丝的内热源方程^[4]为:

$$q_{v1} = \frac{P}{\pi r_0^2 l} \quad (3)$$

式(3)中: P 为功率, W; l 为桥丝长度, m; r_0 为桥丝的半径, m。

由式(3)可以分别算出两种电火工品的桥丝内热源。在直流发火时:

$$q_{v1} = \frac{P}{\pi r_0^2 l} = \frac{I^2 \sigma}{\pi^2 r_0^4} \quad (4)$$

式(4)中: σ 为桥丝电阻率, Ω/m ; I 为电流, A。

在电容放电式电火工品中,考虑桥丝温度系数对电阻的影响,有:

$$q_{v1} = \left[\frac{U_0}{R_s + R_b} e^{-\frac{t}{(R_s + R_b)C}} \right]^2 R_b (1 + \alpha T) / \pi r_0^2 l \quad (5)$$

式(5)中: U_0 为初始电压, V; R_s 为串联电阻, Ω ; C 为电容, F; α 为桥丝温度系数, K⁻¹。

起爆药剂的内热源强度即为它的分解放热,根据Arrhenius定律^[4]可知:

$$q_{v2} = \rho Q_0 A e^{-E/RT} \quad (6)$$

式(6)中: ρ 为密度; Q_0 为起爆药反应热; A 为频率因子, s⁻¹; E 为活化能, J/mol; R 为热力学常数, 8.314J·mol⁻¹·K⁻¹。

2 计算结果及分析

图3和图4分别给出了桥丝式电火工品在直流发火和电容放电发火时的温度分布云图。



图3 直流发火时径向温度云图



图4 电容放电发火时径向温度云图

Fig.3 Radial temperature on direct current firing condition Fig.4 Radial temperature on capacitor discharge firing condition

图5和图6分别给出了直流发火和电容放电发火时电火工品的桥丝与药剂界面的温度变化曲线。

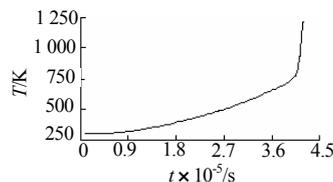


图5 直流发火时桥丝与药剂界面的温度曲线
Fig.5 Temperature curve at the interface of bridge wire and ignition powder on direct current firing condition

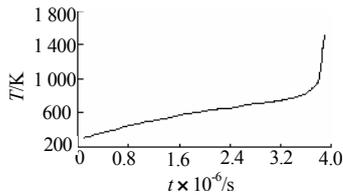


图6 电容放电发火时桥丝、药剂界面的温度曲线

Fig.6 Temperature curve at the interface of bridge wire and ignition powder on capacitor discharge firing condition

从图 5~6 中可以看出药剂的温度升高可以分为两个阶段：第 1 阶段主要是桥丝被通电电流加热，热能通过交界面传递给药剂，药剂的热分解对于药剂温度的影响处于次要的地位，但随着温度的不断升高，药剂热分解速率越来越快，直至临界点；在第 2 阶段，药剂温度突然升高，此时热分解速率瞬间加快，可以认为发生点火。从图 5~6 中可以看出直流电流发火时电火工品在 2A 电流作用下的点火时间为 $41\mu\text{s}$ ，而电容放电发火时间则更短，为 $3.8\mu\text{s}$ 。

图 7~8 为直流发火和电容放电发火时桥丝式电火工品在不同时刻的径向温度分布。

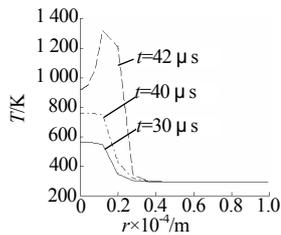


图7 直流发火时火工品径向温度分布

Fig.7 Radial temperature distribution of EED on direct current firing condition

从图 7 看出，在 $42\mu\text{s}$ 时桥丝和药剂的温度都急剧上升，桥丝与药剂界面温度达到最高，此时电火工品起爆。

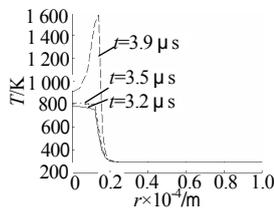


图8 电容放电发火时火工品径向温度分布

Fig.8 Radial temperature distribution of EED on capacitor discharge firing condition

图 8 中在 $3.9\mu\text{s}$ 时桥丝和药剂的温度都急剧上升，但温度的最高点在离桥丝与药剂界面约 $0.2\mu\text{m}$ 处，而不是在桥丝与药剂界面上。从图 7~8 可以看出传热主要在桥丝周围很薄的一层药剂中进行。

3 结论

本文在考虑桥丝径向散热和药剂反应放热的基础上，建立了桥丝式电火工品的有限元分析模型。通过 ANSYS 软件分析得出桥丝与药剂界面的温度分布曲线和径向温度分布。

(1) 传热主要是在桥丝周围很薄的一层药剂中进行，这主要是由于时间很短造成的。

(2) 直流发火时电火工品的起爆点在桥丝与药剂界面，而电容放电发火时起爆点则在离界面一定的距离处。

(3) 电容放电发火时间为 $3.8\mu\text{s}$ ，直流电流发火时间为 $41\mu\text{s}$ ，电容放电发火能量比直流电流发火的能量要高，起爆时间较短。

参考文献：

- [1] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999.
- [2] 曹建华,蔡瑞娇,董海平,李意起. 电火工品桥丝与药剂升温模型及其在可靠性设计中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2004,24(1):90-95.
- [3] 陈明华,高敏,卢斌,战志波. 射频电流对桥丝式电雷管安全性与可靠性影响数值计算[J]. 火工品,2007(4):21-25.
- [4] 谭伟,高奔庆,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(1):1-5.
- [5] 王鹏,林志明. 桥丝式电火工品热点火理论[J]. 火工品, 2007(3):26-30.