

文章编号: 1001-1455(2009)02-0205-04

电爆炸过程中金属丝阻抗的变化^{*}

杨家志, 刘钟阳, 许东卫, 刘天杰

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为了掌握金属丝阻抗的变化规律, 通过分压器和罗氏线圈分别测量出电爆炸过程中金属丝上的电压和电流, 并由此计算出金属丝阻抗等相关电参数随时间变化的规律; 采用 F. D. Bennett 和 A. Hobson 模型对金属丝阻抗进行了数值模拟, 得到金属丝阻抗随时间的变化规律。实验结果和模拟结果比较表明: 两个模型的模拟结果均在金属丝气化前和部分初始放电电压下有效; 当放电时电容器初始电压较大时, 能量沉积速度更快, 金属丝液化、气化、完全气化所用的时间更短; 在金属丝爆炸过程中, 金属丝阻抗存在一个最大值。

关键词: 爆炸力学; 阻抗变化; 数值模拟; 金属丝电爆炸

中图分类号: O389

国标学科代码: 130 · 35

文献标志码: A

1 引言

电爆炸过程中, 由于在极短的时间 ($10 \mu\text{s}$) 内, 注入较大的能量 (1 kJ), 金属丝上的能量密度可达 $1 \text{ TA}/\text{m}^2$ ^[1], 所以金属丝会快速液化、气化, 体积迅速膨胀, 随之发生爆炸, 并伴随着剧烈的光、冲击波以及未气化金属的四周飞溅等现象^[2-3]。金属丝阻抗变化对应着不同的物理阶段, 是金属丝电爆炸机理研究中重要的部分, 同时, 金属丝的电参数 (如电压、电流、阻抗等) 与最终形成涂层的质量密切相关。因而, 研究电爆炸过程中金属丝阻抗的变化规律有重要意义。

本文中通过电爆炸实验中由分压器和罗氏线圈分别测得的金属丝上的电压和电流, 计算出不同电容器初始电压条件下金属丝阻抗随时间的变化曲线; 并采用 F. D. Bennett^[4-5] 和 A. Hobson^[6] 的阻抗模型在当前实验条件下进行计算机数值模拟, 分别计算出在不同电容器初始电压条件下阻抗随时间的变化曲线。对实验结果和数值模拟结果的对比分析后, 得到金属丝阻抗变化规律。由于两个模型在当前实验参数基础上能够有效模拟的时间小于 $10 \mu\text{s}$, 而且金属丝电爆炸过程中金属丝完全气化的时间通常为数微秒, 所以本文中数值模拟时取 $10 \mu\text{s}$ 内金属丝阻抗的变化规律, 在得到实验结果的时候确定金属丝完全气化所需要的时间, 并在这个时间内对模拟结果和实验结果进行分析。

2 实验

实验装置的实际线路图见图 1, 充电电源产生几万伏的交流电, 经半波整流后给脉冲电容器组充电。触发脉冲经脉冲变压器放大后, 产生的高压触发信号使三电极气隙开关击穿, 则储存在脉冲电容器组中的能量瞬时释放到金属丝上, 使之熔化、气化并发生爆炸。实验中用电容分压器和罗氏线圈测量金属丝上的电压和电流, 并用示波器记录。金属丝为长 $l=120 \text{ mm}$ 、直径 $d=0.5 \text{ mm}$ 的铜丝, 三电极开关前端储能电容器组容值 $C=14 \mu\text{F}$, 回路电感 $L=3.9 \mu\text{H}$, 回路阻抗 $R_c=28 \text{ m}\Omega$, 金属丝初始阻抗 $R_{w0}=10.2 \text{ m}\Omega$ 。

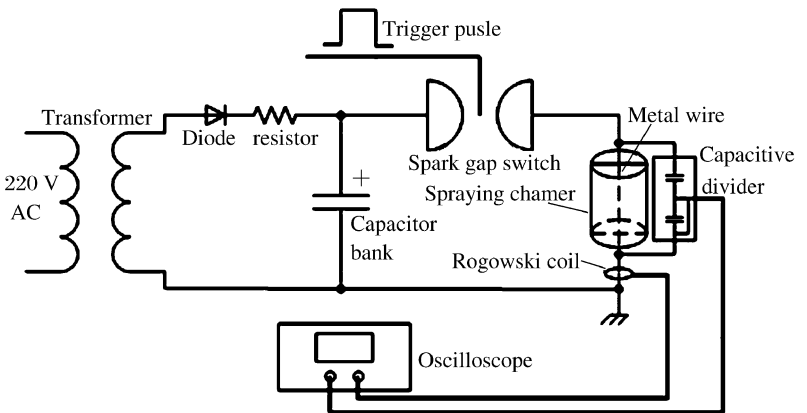


图 1 金属丝电爆炸装置示意图

Fig. 1 Circuit diagram of wire exploding equipment

^{*} 收稿日期: 2007-11-28; 修回日期: 2008-03-20

作者简介: 杨家志(1981—), 男, 博士研究生。

在电容器初始电压分别为 10、15 kV, 其他电路参数如前所述的条件下, 测出了金属丝上的电压 $U(t)$ 和电流 $I(t)$, 并根据 $U(t)/I(t)$ 计算出金属丝阻抗 $R(t)$ 曲线^[7]。金属丝的电压、电流、阻抗及沉积的能量随时间变化的情况如图 2 所示。图中的曲线均为对实验中采集的数据点拟合而成, 其中竖直点状线代表最大阻抗出现的时间。

从图 2 可以看出, 在金属丝爆炸的前 10 μs 内, 金属丝阻抗存在一个最大值, 此时刻被认为是部分金属丝达到沸点而气化的时刻。当电容器初始电压为 10、15 kV, 金属丝阻抗达到最大值时, 金属丝吸收的能量分别约为 405、780 J, 而实验中所用的铜丝完全气化所需要的能量约为 1 kJ, 所以此时只有部分金属丝气化。这是因为金属丝在爆炸过程中被不均匀加热, 在部分金属丝气化时, 还有一部分金属丝呈液态。

3 金属电阻模型

F. D. Bennett^[5] 和 A. Hobson 等^[6] 分别在 RLC 电路理论的基础上, 考虑了回路中阻抗随时间非线性变化这一特殊情况, 并做了一些假定, 最终通过不同的方法获得了阻抗随时间变化的曲线。

3.1 F. D. Bennett 模型

F. D. Bennett^[5] 对金属丝熔化前及熔化后的一段时间的电路方程做了一个近似解, 对于其中最全面的近似解

$$R_w = R_{w0} \exp \left[A^* t^3 \left(1 - \frac{3(R_c + R_{w0})t}{4L} + \frac{3(R_c + R_{w0})^2 t^2}{20L^2} \right) \right] \quad (1)$$

来说, 需要满足: (1) 忽略爆炸过程中能量的散失; (2) 阻抗与温度呈线性关系。式 (1) 中 R_w 和 R_{w0} 分别为金属丝阻抗和初始阻抗, A^* 在给定的条件下为一常量, t 为时间, R_c 为回路中的阻抗, L 为回路电感。

从文献[4-5]可以得到

$$A^* = (\beta c / \alpha) A \quad (2a)$$

$$R_w = R_{w0} [1 + \beta(e - e_0)] = R_{w0} [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2b)$$

$$A = \frac{16}{3\pi^2} \frac{\alpha U_0^2}{\sigma_0 \rho c d^4 (L_c + L_w)^2} \quad (2c)$$

式中: β 为阻抗的比能系数, c 为比热容, α 为阻抗的温度系数, e 为比能, T 为绝对温度, e_0 为温度 T_0 下的比能, U_0 为电容器初始电压, σ_0 为常温下金属丝电导率, ρ 为常温下金属丝密度, d 为金属丝的直径, L_c 和 L_w 为分别为回路中的电感和金属丝的电感, 由于金属丝的电感相对于回路电感很小, 故可以忽略。

从文献[4]中给出的 A 的数值和公式 (2c) 可以计算出本实验条件下的 A 的数值。但是无法得到 β 具体的数值或公式, 而 β 是计算 A^* 时必须的。对比能 e 做出以下推导

$$e - e_0 = \frac{1}{m} \int_0^t R_w i^2 dt = c(T - T_0) \quad (3)$$

式中: m 为金属丝质量。把式 (3) 代入式 (2b) 可得

$$\beta = \alpha(T - T_0) / (e - e_0) = \alpha / c \quad (4)$$

把式 (4) 代入式 (2a) 中, 可得 $A^* = A$ 。经计算, 本实验条件下, $U_0 = 10$ kV 时, $A^* = 2.10 \times 10^{-4} \mu\text{s}^{-3}$; $U_0 = 15$ kV 时, $A^* = 4.72 \times 10^{-4} \mu\text{s}^{-3}$ 。那么把其他电路条件代入式 (1), 可得到 R_w 随 t 变化的关系, 如图 3 所示。

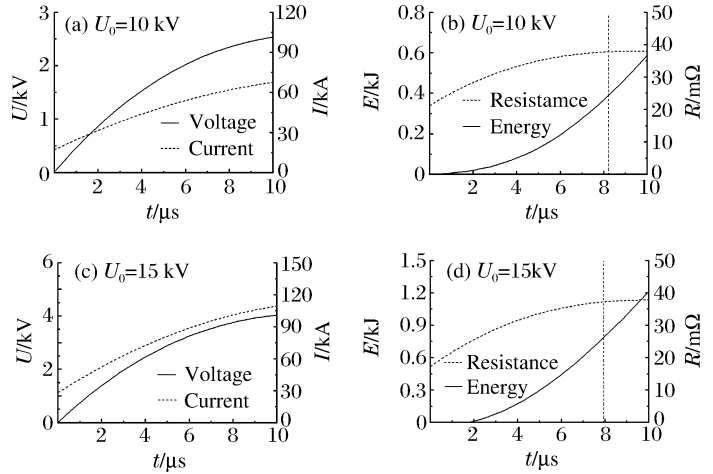


图 2 金属丝上电压、电流及计算所得阻抗和能量变化曲线
Fig. 2 Time-dependent voltage, current, resistance and energy of exploding wire

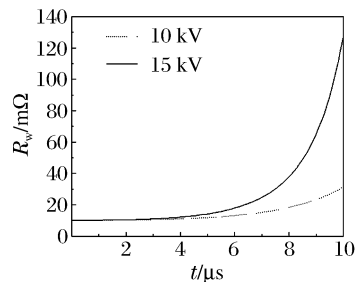


图 3 F. D. Bennett 模型下金属丝阻抗变化曲线
Fig. 3 Time-dependent resistance of exploding wire in F. D. Bennett's model

3.2 A. Hobson 模型

A. Hobson 等^[6]在 RCL 电路的基础上,采用二阶近似法得到了金属丝阻抗 R_w 随时间 t 变化的解析式。与 F. D. Bennett 解析式相同的是,A. Hobson 解析式中仅包含电路和金属丝的初始参数,且在前 1/5 周期内能很好地吻合实际情况(本实验条件下周期约为 $50 \mu\text{s}$)。

A. Hobson 解析式经进一步推导,得

$$R_w = R_{w0} + \frac{\beta}{LC^2} \left[\frac{t^3}{3} - \frac{(R_{w0} + R_c)t^4}{4L} \right]$$

式中: β 为量纲一数值,且 $\beta = Q_0^2 R_{w0}^2 \alpha / (mcL)$, Q_0 为电容器上的初始电量。不同电容器初始电压下 R_w 随 t 变化的关系见图 4。

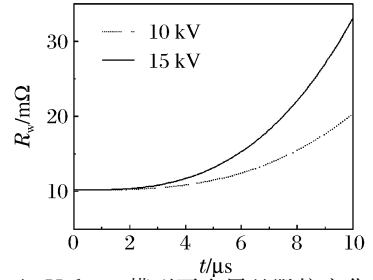


图 4 A. Hobson 模型下金属丝阻抗变化曲线
Fig. 4 Time-dependent resistance of exploding wire in A. Hobson's model

4 分析与讨论

由实验结果可知,在电爆炸过程中,金属丝阻抗经历一个先增大后减小的过程,这是由于,在部分金属丝气化后,伴随着等离子体的产生和电弧放电通道的形成,放电电极间的阻抗逐渐下降。因此,金属丝阻抗达到最大值的时刻就是部分金属丝气化的时刻。而在 F. D. Bennett 模型和 A. Hobson 模型中则没有考虑到这种情况,也就是说这 2 个模型只在部分金属丝气化前有效。

从 F. D. Bennett 模型和 A. Hobson 模型中推导出的公式来看,前者基于金属丝电爆炸机理,后者基于实验参数,前者比后者具有更广的适用性。

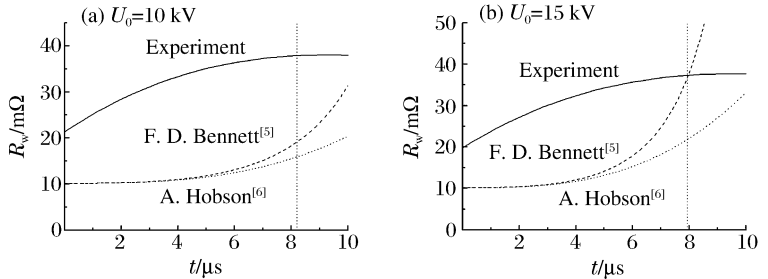


图 5 实验及数值模型得到的金属丝阻抗变化曲线

Fig. 5 Time-dependent resistance of exploding under experiment and numerical models

图 5 为不同电压下,实验和数值模型得到的金属丝阻抗变化曲线对比图,其中点状竖直线代表金属丝最大阻抗出现的时间。从图 5 中可以看出,当电容器初始电压为 10 kV 时,金属丝在 $8.2 \mu\text{s}$ 时完全气化,当时的阻抗为 38 mΩ,而当电容器初始电压为 15 kV 时,金属丝在 $7.9 \mu\text{s}$ 时完全气化,当时的阻抗为 37 mΩ。可见,当电容器初始电压增大时,能量沉积速度更快,金属丝液化、气化、完全气化所用的时间更短,完全气化时的阻抗非常接近,可以视为测量误差。

在电容器初始电压为 10 kV,时间为 $8.2 \mu\text{s}$ 时,F. D. Bennett 模型和 A. Hobson 模型下的金属丝阻抗值分别为 19 和 16 mΩ,较接近,但是跟实验结果相差较大,说明两个模型在 10 kV 下的模拟结果均不理想。在电容器初始电压为 15 kV,时间为 $7.9 \mu\text{s}$ 时,F. D. Bennett 模型和 A. Hobson 模型下的金属丝阻抗值分别为 38 和 22 mΩ,前者与实验结果相符,而 A. Hobson 模型和实验结果相差较大。可见,在电容器初始电压为 10 kV 时,两个模型计算的金属丝完全气化时的阻抗较相似,但是不符合实际情况;当电容器初始电压为 15 kV 时,F. D. Bennett 模型与实际结果非常接近。这证实了 F. D. Bennett 模型的适应性较广的推断。

从图 5 可以看出,模拟曲线在起始阶段增长较慢,接近完全气化增长较快。这主要是因为,在建立模型时,忽略了金属丝上的电感;忽略了随金属丝温度的升高,能量损失也增加;并且假定金属丝阻抗的温度系数是一个常数;忽略了金属丝熔化时的潜热。在实验结果中,金属丝的起始阻抗均比模型中的起始阻抗高,这是由于测量时没有考虑金属丝与放电电极之间的接触电阻。

5 结论

(1)通过实验和数值模拟的方法分别得到了电爆炸过程中部分金属丝气化前、后的阻抗及吸收能量的变化规律,金属丝气化时吸收的能量表明:只有一部分金属丝气化,而且随着电容器初始电压的增加,金属丝的气化率增加。

(2)F. D. Bennett 和 A. Hobson 模型只在部分金属丝气化前有效。电容器初始电压为 10 kV 时,两个模型的模拟结果均不理想;电容器初始电压为 15 kV 时,F. D. Bennett 模型与实际结果较接近。

(3)当电容器初始电压较大时,能量沉积速度更快,金属丝液化、气化、完全气化所用的时间更短。

(4)在将来的研究中,若能在实验的基础上对 F. D. Bennett 模型加以修正,得出能更好符合实际情况的模型,将极大地方便金属丝电爆炸实际应用中电路参数的理论计算,并对实际应用具有指导意义。

参考文献:

- [1] Phung P V, Miles D O. Information from measured current in exploding wires[J]. *Journal of Applied Physics*, 1975,46(2):730-737.
- [2] 杨家志,刘钟阳,许东卫.用线爆喷涂技术改性玻璃表面的试验研究[J].*高电压技术*,2007,33(2):199-201,205.
YANG Jia-zhi, LIU Zhong-yang, XU Dong-wei. Experimental research of glass surface modification based on wire exploding spray coating technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2007,33(2):199-201,205.
- [3] 王莹.电爆炸导体及其应用[J].*爆炸与冲击*,1986,6(2):184-192.
WANG Ying. Electrical exploding conductor and its applications[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1986,6(2):184-192.
- [4] Bennett F D. Initial heating rates and energy inputs for exploding wires[J]. *The Physics of Fluids*, 1964,7(1):147-148.
- [5] Bennett F D. Nonlinear equations for circuits containing exploding wires[J]. *The Physics of Fluids*, 1966,9(3):471-477.
- [6] Hobson A, Manka C K. Premelt variation of current, temperature, and resistance in exploding wires[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966,37(4):1897-1901.
- [7] Branitskii A V, Grabovskii E V, Frolov I N, et al. Peculiarities of wire resistance behavior on initial stage of explosion[C]//Marcovits M, Shiloh J. *Proceedings of the 12th International Conference on High-Power Particle Beams*. Haifa, Israel. 1998:599-602.

Wire resistance variation during its electrical explosion

YANG Jia-zhi, LIU Zhong-yang*, XU Dong-wei, LIU Tian-jie

(*Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China*)

Abstract: The voltage and current of an exploding wire before its complete evaporation was obtained experimentally, and the variation of wire resistance and other parameters were calculated based on the experimental results. Bennett and Hobson's models were applied in simulating the resistance variation under the experimental parameters. The comparison between the experimental and simulated results shows that these two models are useful to guide the practice. These two models are both effective before the complete evaporation of the wire and under certain initial voltages of the capacitor. When the initial voltage of the capacitor is higher, the energy deposition velocity is faster, the time needed for the wire to melt and vaporize is shorter, and there lies a maximum resistance of the wire during its electrical explosion.

Key words: mechanics of explosion; resistance variation; numerical simulation; exploding wire

* Corresponding author: LIU Zhong-yang
Telephone: 86-411-84706505

E-mail address: zyliu@dlut.edu.cn