

含电爆炸元件电路的 PSpice 模拟和实验研究

杨 宇, 谢卫平, 王敏华, 郝世荣, 韩文辉, 张南川, 伍友成

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

PSpice Simulation and Experiment of the Circuit with Electric Exploding Component

YANG Yu, XIE Wei-ping, WANG Min-hua, HAO Shi-rong,
HAN Wen-hui, ZHANG Nan-chuan, WU You-cheng

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

摘要: 基于金属上流过脉冲大电流产生电爆炸时金属电阻率与注入能量的关系建立了含电爆炸元件电路的集总参数 PSpice 电路模型, 通过该模型可以对含电爆炸元件电路进行快速模拟计算, 给出一些规律性的结果。模拟表明常见金属中银丝的使用效果较好, 并且预计使用金丝可能得到更好的效果, 负载的大小对于爆炸丝的断路效果有重要影响。这些结论和已知实验规律相符, 能够帮助理解电爆炸过程和较好的解释实验现象。

关键词: 电爆炸丝; 电路模拟; 软件

中图分类号: TM245

文献标志码: A

Abstract: A lumped parameter PSpice model to simulate the circuit with electric exploding component is built based on the relation between metal conductivity and injected energy in the explosion due to strong pulse current flowing through the metal. This model can be applied to quickly simulate the circuit and obtain some electric exploding rules. The simulation results indicate that silver has better characteristic than other commonly used metal materials except gold, and the load also affect the circuit output obviously.

Key words: electrical explosion wire; circuit simulation; software

0 引言

实际应用中经常要求脉冲功率源向有效负载输出很高的脉冲功率(几十 GW 甚至上百 GW), 通常的能量源如爆磁压缩发生器、电容器等均无法直接提供这样高的峰值功率而必须经过脉冲调制, 通过缩短输出前沿、压缩输出脉宽等手段使输出变成快前沿的高功率脉冲。电感储能型脉冲功率调制装置把来自初始能源的能量通过储能电感暂时储存, 当储能达到一定值的时候通过断路开关迅速切断电流, 使储能电感上感生出高压脉冲从而使负载上得

到高功率脉冲。

电感储能脉冲功率装置关键的部件是断路开关, 目前相关断路开关的研究已经取得了很大的进步, 出现了电爆炸断路开关、等离子体融蚀断路开关、爆炸断路开关等多种高功率、高电压、强电流的断路开关。但是其中应用方便、技术成熟、能够与低阻抗负载匹配的是电爆炸断路开关。电爆炸断路开关利用强电流流过金属丝时产生的焦耳热瞬间加热金属丝使其汽化、爆炸, 在爆炸过程中金属丝的电阻急剧增加起到了切断电路的作用^[1]。电爆断路开关是一种强非线性元件, 要准确的掌握其在实际电路中的工作状况和理想参数必须对金属丝发生电爆炸时的规律和电学特性有深入的认识, 这需要模拟计算从而对实验提供方向和对结果进行预估, 避免实验的盲目性。

PSpice 是一个通用电路仿真软件, 具备可靠的计算能力和良好的用户界面, 支持用户自建模块, 可以方便的建立模拟电路的集总参数模型, 适合含电爆炸元件的电路模拟, 可以方便的改变爆炸丝和电路参数进行计算, 得到规律性认识。

1 基本原理

定义电流流过金属丝时的比作用量为^[2]

$$g = \int_0^t j^2 dt \quad (1)$$

其中 g 为比作用量; j 为金属中的电流密度; t 为通电时间。显然, 比作用量的物理意义就是 t 时间内金属丝单位横截面积内的电流通过 1Ω 电阻时所产生的焦耳热。

电爆丝的集总参数计算模型基于准静态近似, 假设金属电阻只在两个基本过程中发生变化, 即定

相加热过程和相变过程。在此假设下定相加热阶段金属电阻率可以由注入金属的比作用量确定

$$\rho = \rho_{\exp} [(g/g_{\max}) \cdot \ln \frac{\rho_{\max}}{\rho}], 0 \leq g \leq g_{\max} \quad (2)$$

其中 $g_{\max}$ 、 $\rho_{\max}$ 分别为加热相末端点, 即熔点点和汽化点的比作用量和电阻率。相变阶段的金属电阻率与比作用量的关系可由下式确定

$$\rho = \frac{\rho}{\sqrt{1 - \frac{\rho^2 - \rho_{\max}^2}{\rho_{\max}^2} \cdot \frac{g}{g_{\max}}}}, 0 \leq g \leq g_{\max} \quad (3)$$

$$g_{\max} = \frac{H \rho_m}{2 \rho \rho} (\rho + \rho) \quad (4)$$

其中 ρ 、 ρ 分别为两相的电阻率; ρ_m 为金属质量密度; H 为相变潜热。由于实验测定或者计算 $g_{\max}$ 、 $\rho_{\max}$ 等参量存在较大困难, 所以实际上通过测定特定金属的电阻率-时间 (ρt) 曲线和比作用量-时间 ($g-t$) 曲线后坐标变换为 ρg 曲线。这样只要测得流过金属的电流曲线, 就可以推出任意时刻的金属电阻率。典型的 ρg 曲线见图 1。

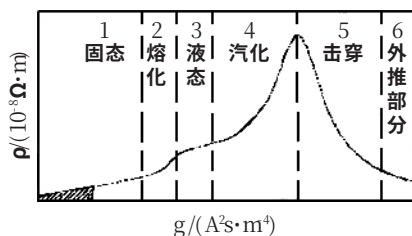


图1 典型的金属电爆炸时 ρg 曲线

根据比作用量模型可以设计如下的电爆丝电阻率迭代流程: 在模拟过程中, 对流过电爆丝的电流密度进行积分, 得到比作用量, 查电阻率-比作用量数据表得到此时的电阻率从而得到电爆丝该时刻的电阻, 然后计算该电阻对电路的影响。计算中不考虑丝半径的变化。计算流程见图 2。

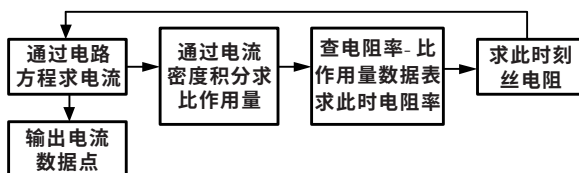


图2 PSpice 模拟计算流程图

2 计算结果与分析

由于电爆炸断路开关中的金属材料是其关键部件, 所以选择合适的金属材料是首先要考虑的问题, 根据文[2]给出的 ρg 曲线数据在给定的相同电路参数下对 4 种金属的电爆炸特性进行了模拟计算, 其中电路参数取: 储能电容 2 μF ; 回路电感(包括集中储能电感和分布电感) 1.5 μH ; 充电电压 60 kV; 金属丝直径 0.07 mm, 50 根爆炸丝, 长度 400 mm, 负载 100 Ω 。结果见图 3。

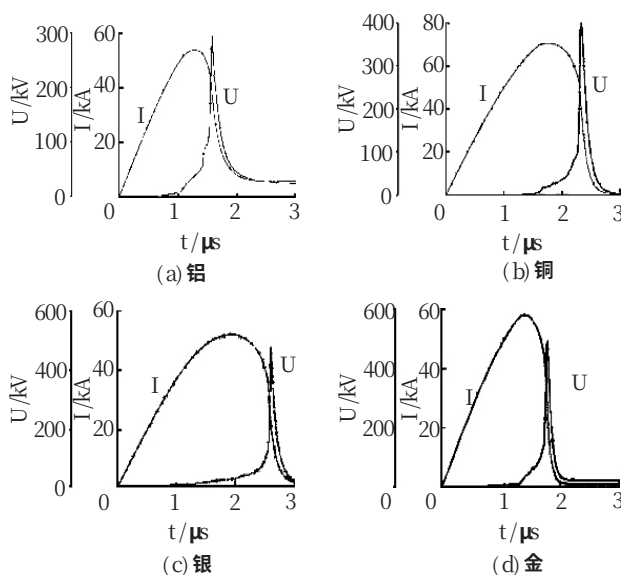


图3 在相同电路参数下 4 种金属的电爆炸模拟结果

从图3 可以看出, 常用金属(铝、铜、银)中银的电爆炸效果最好, 可以得到约 470 kV 的峰值电压, 明显大于铝(300 kV)和铜(400 kV)。表 1 列出了在电路参数均为: 10 根长 225 mm 及 $\phi 0.07$ mm 金属丝、充电电压 20 kV、储能电容 2 μF 、回路电感 1.1 μH 、无负载时铝、铜、银 3 种材料的电爆炸实验结果。

表1 不同金属在同一条件下的电爆炸实验结果

金属种类	峰值电压/kV
铝	54.3
铜	70.8
银	176

由表 1 可见, 在相同条件下, 银的电爆炸效果明显优于铝和铜。这说明准静态近似模型的计算结果和实验规律符合, 是可信的。

图 3(d) 是金的电爆炸模拟结果, 可见其电压峰值(490 kV)比银电爆炸时产生电压峰值更高, 这说明在实验条件许可和指标要求较高的情况下, 可以尝试采用金丝作为电爆炸断路开关, 有可能得到更好的断路效果并产生更高的峰值电压。

造成各种金属电爆炸效果差异的原因非常复杂, 与金属的初始电阻率、熔解热、汽化热和汽化后蒸汽膨胀速度等多种因素密切相关, 准静态近似模型不能提供金属电爆炸过程中的微观图像, 需要更为精确的磁流体动力学模型来解决^[3]。

但是准静态近似模型很好地避开了复杂的微观影响因素, 把微观过程的变化和影响均包括在 ρg 曲线中, 这样只要在某一电路参数下较为准确地测定了某特定金属的 ρg 曲线, 就可利用此曲线数据把该金属制成的电爆炸断路元件在 PSpice 软件中生成一个表格模型, 这样在电路参数没有发生重大改变的情况下, 含有此种金属制成的电爆炸断路开

关的电路就可以用 PSpice 进行模拟。这种基于实验数据的模拟方法原理简单、计算迅速,但是模拟准确性依赖于实测的 ρ_g 曲线的准确性和测定 ρ_g 曲线的实验条件与待模拟的实验条件的相似性,二者越相似则结果越准确。

在选定金属材料为银之后,使用 PSpice 对负载大小对电路特性的影响进行了计算,以验证模型的适用性。由于爆炸丝在爆炸时的峰值电阻并不太大,在 $20\ \Omega$ 左右,如果负载电阻与其相当,则爆炸丝断路开关和理想断路开关的工作状态差别很大,换流效果随负载不同而差别很大。图 4 给出了负载变化时的丝上电流电压曲线,计算的主要参数为:储能电容 $2\ \mu\text{F}$,回路电感(包括储能电感和分布电感) $1.5\ \mu\text{H}$,金属丝直径 $0.07\ \text{mm}$ 长度为 $400\ \text{mm}$ 充电电压 $60\ \text{kV}$,负载分别为 10 、 30 、 50 、 70 和 $100\ \Omega$ 。

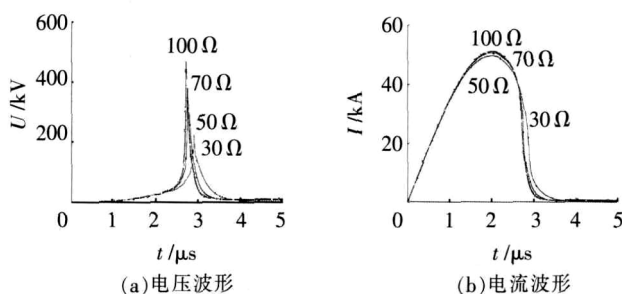


图 4 不同负载时金属丝上电压与电流波形

由图 4 可见负载对丝电压的影响比较明显,这和实验结果相符,在丝长 $500\ \text{mm}$ 、充电 $60\ \text{kV}$ 、 30 根丝的情况下,电路带 $8\ \Omega$ 左右负载得到的丝电压为 $400\ \text{kV}$ 左右,而不带负载(相当于无穷大)时的丝电

压为 $600\ \text{kV}$ 左右。

分析认为这是由于丝电压主要由爆炸过程中的干路(储能电容)电流变化在储能电感上产生,当负载较大(大于爆炸丝峰值电阻)时,不管在金属丝爆炸前还是爆炸后干路电流都主要由爆炸丝通过,此时爆炸丝电阻的变化会直接反映到干路电流大小上,从而强烈影响干路电流,使感生电压更高。当负载较小时,金属丝爆炸时电流有相当部分从负载上流走,而这部分基本是不发生快速变化的,所以较小的负载实际上弱化了爆炸丝的爆炸效应,使干路电流波形后沿变柔和,感生电压随之降低。

3 结语

从以上分析可以看出,使用 PSpice 软件可以方便的进行含电爆炸元件电路的集总参数电路模拟,迅速的、低成本的得到和实验结果相符的电路运行规律性结论,为不同参数下的实验结果提供预测,增强实验的目的性,对电爆炸断路开关的设计和运行有重要意义。

参考文献:

- [1] 龚兴根. 电爆炸断路开关 [J]. 强激光与粒子束, 2002, 14 (4): 577-582.
- [2] TUCKER T J, EBWL A. A Computer Code for the Prediction of the Behavior of Electrical Circuits Containing Exploding Wire Elements[Z]. NITS: SAND750041.
- [3] 杨宇, 谢卫平, 蒋吉昊, 等. 电爆炸金属丝电路特性的研究 [J]. 电工技术, 2005(6): 54-57.

(上接第 450 页)

表 3 分闸弹簧的数据表

	原设计		优化后	
	内	外	内	外
d/mm	4.5	6.0	4.5	6.0
D ₂ /mm	33.5	45.0	36.5	47.5
n	19.0	14.0	14.5	12.0
K/(N·mm ⁻¹)	5.633 0	9.968 3	5.706 9	9.888 3
K-K _b	+0.006 7		+0.000 6	
K _{dg}	+1.590 0		+1.559 8	
f ₁ /(10 ⁻³)	4.016 6		3.613 6	

分闸弹簧的力特性,提高了弹簧刚度的抗干扰能力。

另在原设计方案中,内簧的高径比大于 5.4,不满足稳定性要求。经过优化后,内簧的高径比降为 5.0,满足稳定性要求。

4 结语

笔者关于分闸弹簧的多目标综合优化设计考虑了加工误差等各种影响设计质量的因素,比传统常规设计及普通优化设计更接近客观实际,且弹簧刚

度的抗干扰能力强,质量好。由于采用离散变量优化方法实现,优化结果无需圆整,设计更精确。与传统设计相比,优化过程简单易行,设计结果理想并使功能参数得到优化。

参考文献:

- [1] 刘久富, 沈春林, 王宁生. 圆柱螺旋弹簧刚度的稳健性设计 [J]. 中国机械工程, 2003, 14(5): 389-391.
- [2] GREENWOOD W H, CHASE K W. Worst Case Tolerance Analysis With Nonlinear Problems [J]. Trans of the ASME, J. of Mech. Design, 1988, 110(8): 232-235.
- [3] 侯顺强, 张丽丽. 螺旋圆柱压缩弹簧优化设计 [J]. 煤矿机械, 2006, 27(2): 202-204.
- [4] 苑舜. 高压断路器弹簧操动机构 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [5] 刘惟信. 机械最优化设计 (第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [6] 刘泽深. 圆柱组合压缩螺旋弹簧的优化设计 [J]. 山东交通学院学报, 2002, 10(3): 11-14.