

基于安全火花试验装置的 电感分断电弧电阻建模研究

赵永秀, 刘树林, 王 孟, 付 善, 付 焱

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西西安 710054)

摘 要: 研究电感分断电弧电阻模型是建立电感电路非爆炸本安性能评价的基础. 运用 IEC 安全火花试验装置对电感分断电弧放电特性进行试验研究, 深入分析电弧电阻随放电时间的变化规律, 并采用非线性回归的方法得出分断电弧放电时间与电感和初始电流之间的函数关系式. 考虑安全火花试验装置钨丝和镉盘电极结构特点, 建立了一种极间电弧放电区域的物理模型, 并推断出二维泊松方程的边界条件. 基于此, 利用分离变量法求解泊松方程, 推导出电弧电阻的数学表达式, 得出了电感分断电弧放电电压和电流的关系表达式. 仿真分析及实验结果证明了理论分析及所提出电弧电阻数学模型的准确性和可行性.

关键词: 电感分断放电; 电极结构; 电弧电阻; 最小建弧电压; 泊松方程

中图分类号: TD68, TM13

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)05-1078-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.05.008

Arc Resistance Modeling of Inductor-Disconnected Circuit Based on Safety Spark Test Apparatus

ZHAO Yong-xiu, LIU Shu-lin, WANG Meng, FU Shan, FU Yao

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Inductor-Disconnected-Discharged (IDD) arc resistance model established is foundation of the evaluation of the non-explosive intrinsically safe performance for inductive circuit. The IDD characteristics were studied through test, based on the IEC safety spark test apparatus. The change laws of the discharge resistance with duration were deeply analyzed. By using non-linear regression method, the function relationship was obtained between the IDD time, inductance and initial current. Considering the tungsten and cadmium electrode structures of the IEC spark-test apparatus, a physical model of the inter-electrode arc discharge was established, and the boundary conditions of two-dimension Poisson's equation were inferred. Based on this, the algorithm of variable separation was applied to solve the Poisson's equation. Then, the mathematical expression of arc resistance was deduced. The relational expression between the arc discharge voltage and current of the IDD discharge were obtained for the low voltage circuits. The simulation and experiment results show that the theoretical analysis and proposed model are valid and feasible.

Key words: inductor-disconnected-discharged (IDD); electrode structure; arc resistance; minimum arcing voltage; poisson equation

1 引言

运用 IEC 安全火花试验装置对电感电路进行爆炸性试验是研究易燃易爆环境电感分断放电特性的最基本手段. 该试验装置电极分离便形成电感分断故障, 这将可能燃爆爆炸性混合性气体, 严重影响危险环境的

安全^[1~3]. 因此为了运用电路模型模拟该爆炸性试验过程, 迫切需要研究电感电路分断放电电阻和放电时间模型, 同时进行相关理论研究也是至关重要的.

实际上基于 IEC 安全火花装置的电感电路分断放电特性呈现出高度的非线性^[4~7], 国内外学者对电感电路分断放电电流建模进行了大量研究, 对其放电电弧

电阻模型的研究较少. 目前一些放电电流数学模型: 线性衰减、抛物线、伏安特性和指数模型^[8-10], 推导出电弧电压、电流和电阻表达式. 其中线性模型与实际电弧电流和电压波形相差很大; 抛物线模型没有体现建弧电压对电弧电阻的影响; 线性伏安特性模型对于小电感, 电弧放电电压存在较大误差; 指数模型采用试探法假定电弧电流表达式, 求解电弧电压和电阻. 上述电弧电阻模型中, 均未考虑电极特性、极间气体等参数对其放电特性的影响, 因此无法较为准确地定量分析放电电弧电阻等参数. A. A. Shcherba 等人研究了非线性电弧电阻模型^[11], 但未涉及电感对放电特性的影响. 作者提出了一种基于能量平衡的电弧电阻指数模型^[12], 近似用三分段函数表示指数系数, 可见所提数学模型并不能全面地反映电感分断放电电压和电流特性.

影响电感分断放电时间的因素很多, 很难得到准确表达式. 目前可利用各种放电电流数学模型近似求解放电时间^[8,9]. 文献[13]讨论了放电时间对密闭室内甲烷混合气体爆炸参数的影响, 没有定量计算放电时间. 文献[14]应用迭代法推导出 Boost 变换器内部电感分断放电时间和输出电压变化量, 并利用能量等效得出等效电感电流.

本文运用 IEC 标准的火花试验装置对电感电路分断进行大量放电试验研究, 深入分析电感分断放电电弧电阻和放电时间的变化规律, 基于安全火花试验装置钨丝和钨盘电极物理结构特点, 建立一种电感电路分断放电电弧电阻的数学模型, 并求解出放电电压和电流等放电参数. 与传统电弧放电模型和实验结果进行对比分析, 验证所提出的电弧电阻模型的可行性, 为电感电路分断放电过程的电路仿真及本质安全电路设计奠定良好的理论基础.

2 安全火花试验装置电极结构及放电电阻特点

电感电路分断试验原理图如图 1 所示, 在密闭室内布置钨盘和钨丝电极 (G), 钨丝电极以约 25cm/s 的速度侧向划过钨盘电极而形成电感分断放电, 放电体系的电极间距逐渐增大, 并周而复始. V_i 为电源电压, R_0 和 L 分别为电感电路的串联电阻和电感, $u_{arc}(t)$ 和 $i_{arc}(t)$ 分别为电感分断放电电压和电流.

图 1 中, 在电感分断过程中, 电源和电感储存电能均向电极间隙放电. 通过对大量试验波形的统计分析, 可得电感分断放电各阶段的等效曲线图如图 2 所示. 图 2 中, I_0 为电感放电初始电流, I_1 和 U_1 分别为截弧电流和电压, $U_{arc.min}$ 为最小建弧电压, T 为电感分断电弧放电时间.

从图 2 可看出, 电感分断放电过程分成三个阶段^[12], 则电感分断放电特性及放电电阻特点如下:

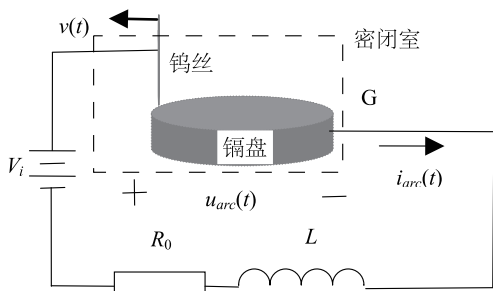


图1 电极结构及电感电路分断放电原理图

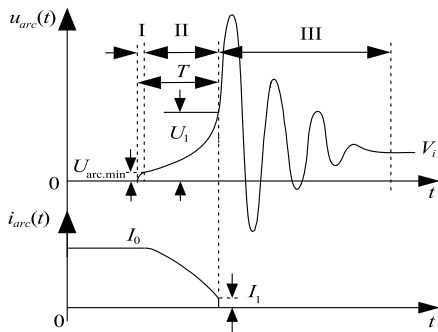


图2 电感电路分断放电等效波形

(1) 第 I 阶段-建弧. 钨丝和钨盘两电极分断前初始电极接点处于闭合状态, 放电电弧电阻为试验装置等效内阻, 约 0.5Ω ; 当钨丝和钨盘电极开始分断, 分断处电压快速上升到 $U_{arc.min}$, $i_{arc}(t)$ 从 I_0 开始下降, 分断处形成电弧, 此段持续时间非常短 (仅为几个 ns 级), 近似认为放电电弧电阻为 $U_{arc.min}/I_0$.

(2) 第 II 阶段-电弧放电. $i_{arc}(t)$ 按指数规律下降到截弧电流 I_1 , $u_{arc}(t)$ 缓慢上升, 此时段电弧电阻近似以指数规律增长, 其增长幅度是逐渐增大. 此时电感分断电弧放电时间为 T , 约为几十至几百微妙.

(3) 第 III 阶段-辉光放电. $i_{arc}(t)$ 迅速降为零, 因此电感两端感应出很高感应电动势, 电感值越大电动势越高 (约 $100 \sim 400V$), 从而引起辉光放电, 此时钨丝和钨盘两电极彻底断开. 经若干衰减周期后, 分断处电压稳定于 V_i , 放电电阻将趋于无穷大.

3 电感分断放电电弧电阻数学模型

3.1 分断放电电弧电阻的求解思路

由上述分析可知, 电感电路分断放电建弧和辉光放电阶段, 放电能量不足以引燃爆炸性气体, 因此忽略该时段对放电回路的影响, 本节只针对电弧放电阶段进行建模分析.

为了运用电路模型模拟爆炸性环境电感分断放电特性, 把电感分断放电电弧看成非线性时变电阻, 利用图 1 回路电压方程 (1) 求解电弧放电特性.

$$\frac{di_{\text{arc}}(t)}{dt} = \frac{1}{L} [V_i - R_0 i_{\text{arc}}(t) - R_{\text{arc}}(t) i_{\text{arc}}(t)] \quad (1)$$

式中,关键是确定电弧电阻,而其电阻受电路参数、电极材料及弧隙等参数影响,很难直接求解.设想若能够得出电感分断电弧放电区域内的电势分布,则可通过式(2)求解放电电弧电阻,即

$$R_{\text{arc}}(t) = \frac{u_{\text{arc}}(t)}{i_{\text{arc}}(t)} = \frac{\Delta\varphi(t)}{i_{\text{arc}}(t)} \quad (2)$$

式中, $\Delta\varphi(t)$ 为电感分断放电电弧电势差.

3.2 安全火花试验装置电极物理模型

当电感电路分断时,电弧电流流入钨丝和镉盘之间空气间隙.由于金属表面发射电子的物理机理比较复杂,其物理尺度极小,所以完全真实地反映其物理现象较困难.因此采用人为地从阴极边界注入发射电子,电子从镉盘阴极端部流向钨丝阳极过程中会逐渐扩散,在钨丝和镉盘之间区域看成一个矩形如图3所示,BD是镉盘边界,AC是钨丝边界,AB和CD是电弧纵向边界, r 为钨丝半径, l 为两电极间距, φ 为电弧电势.

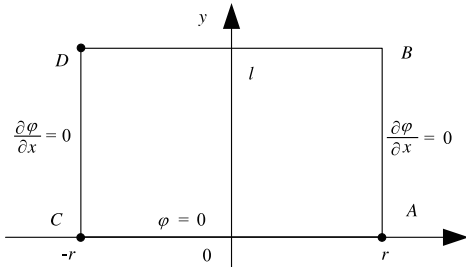


图3 钨丝和镉盘电极间物理模型

3.3 电弧放电区域泊松方程及边界条件

在电感分断电弧放电区域内,电弧电势满足泊松方程,并且该放电区域内粒子近似满足电中性,故不考虑电子碰撞引发电离,认为体电荷密度近似为零,泊松方程可表示为

$$\nabla^2 \varphi(x, y) = \frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

其中, $-r < x < r, 0 < y < l$. 假定电子从镉盘阴极(BD)向钨丝阳极(AC)均匀发射,则由欧姆定律的微分形式可得阴极表面电场强度 $E_{\text{BD}}(t)$,

$$E_{\text{BD}}(t) = \frac{j_{\text{BD}}(t)}{\sigma} = \frac{j_{\text{BD}}(t)}{n_e \mu_e e} = \frac{1}{n_e \mu_e e} \cdot \frac{i_{\text{arc}}(t)}{S_{\text{BD}}} \quad (4)$$

式中, $j_{\text{BD}}(t)$ 为电子发射电流密度; σ 为电导率; n_e, μ_e 和 e 分别为电子密度、迁移率和电子电量; S_{BD} 为电极放电表面积; $i_{\text{arc}}(t)$ 为电感分断电弧电流.

由上述分析可得电势计算的边界条件为:

(1) 良导体边界: 钨丝和镉盘两电极均是金属导体,满足切向电场量为零;模拟的带电粒子进入电极表面,视为被边界吸收,而且AC面为一等势面. 假定AC

面电势为零,则边界条件为 $\varphi(x, y)|_{y=0} = 0$ 和 $\nabla \varphi_y(x, y)|_{y=0} = 0$.

(2) 对称轴边界: 由于电弧放电区域对称性,及电子是均匀发射,则AB和CD面法向方向上无电势梯度,即 $\nabla \varphi_x(x, y) = 0, x = \pm r, 0 < y < l$.

(3) 镉盘电极表面(BD)电势的导数与电弧电流有关,又有 $E = \nabla \varphi$,则由式(4)计算阴极表面电势的边界条件为

$$\nabla \varphi_y(x, y)|_{y=l} = \frac{1}{n_e \mu_e e} \cdot \frac{i_{\text{arc}}(t)}{S_{\text{BD}}} = K \cdot i_{\text{arc}}(t) \quad (5)$$

式中, $K = 1/(n_e \mu_e e S_{\text{BD}})$.

3.4 电感分断放电电弧电阻的数学模型

根据上述设想,关键是求解泊松方程. 本文利用分离变量法,设该电弧放电区域内泊松方程的通解形式为

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \sin \alpha y [A_n \cosh(\alpha x) + B_n \sinh(\alpha x)] + K i_{\text{arc}}(t) y \quad (6)$$

式中, α 为分离系数. 现确定式(6)中的系数 A_n, B_n 和 α .

在满足对称轴边界条件情况下,可求得系数 $B_n = 0$,则式(6)可化简为

$$\varphi(x, y) = K i_{\text{arc}}(t) \cdot y + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cosh \alpha x \sin \alpha y \quad (7)$$

由良导体边界和式(5),对式(7) x 求偏导以及对 y 从0到 $2r$ 对 x 求积分,推导出

$$\sum_{n=0}^{\infty} \alpha A_n \sinh \alpha r = -K i_{\text{arc}}(t) \cdot r \quad (8a)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n \sinh \alpha r \cos \alpha l = 0 \quad (8b)$$

因此可得出系数 $\alpha = \frac{2n+1}{2l} \pi, A_n = -\frac{K i_{\text{arc}}(t) r}{\sinh \alpha l}$,则电

弧电势表达式为

$$\varphi(x, y) = K i_{\text{arc}}(t) \cdot y - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{K r i_{\text{arc}}(t)}{\sinh \alpha r} \cosh \alpha x \sin \alpha y \quad (9)$$

由电感电路分断电弧放电阶段的电弧电阻 $R_{\text{arc}}(l) = [\varphi(r, l) - \varphi(0, 0)]/i_{\text{arc}}(t)$ 和试验装置钨丝和镉盘电极间隙^[10] $l(t) = [25 + 1940 \sin(1370 \pi t)] t, t = 0 \sim T$,推导出电感分断放电电弧电阻的数学表达式为

$$R_{\text{arc}}(t) = K[l(t) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{r}{\alpha \sinh \alpha r} \cdot \cosh(\alpha r) \sin[\alpha l(t)]] \quad (10)$$

式中, $\alpha = (2n+1)\pi/2l(t)$. 实际上电弧电阻仅与电弧放电区域气体浓度、电极结构尺寸和极间距有关,其电弧电流项被抵消.

3.5 电感分断电弧放电时间的确定

为了模拟电感分断电弧电阻的变化趋势,必须先确定 T . 影响电弧放电时间的因素很多,其中最重要的

是电感量和电感分断时的初始电流,下面针对这两个因素进行讨论分析.为此,在同一实验条件下进行多次电感分断电弧放电试验,分别分析电弧放电时间与 L 或 I_0 对应关系,如图 4 和 5 所示.

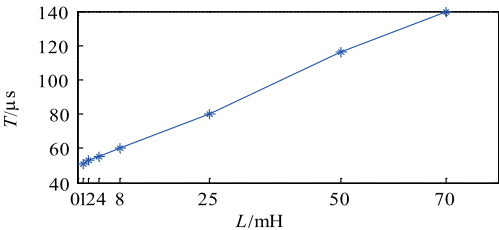


图4 电感量与放电时间 T_1 关系曲线 ($V_i=24\text{V}$, $R_0=100$)

从图 4 和 5 可知,放电时间 T_1 随电感 L 增加近似呈线性增加,而 T_2 随电感初始电流 I_0 呈非线性增加趋势.因此,电感分断电弧放电时间 T 可用 L 和 I_0 的函数 $T=f(L, I_0)$ 表示.故选择多参数非线性回归函数进行拟合 T ,即令

$$T=a_0+a_1L+a_2I_0+a_3I_0^2+a_4I_0^3+a_5I_0^4 \quad (12)$$

令残差的平方和为

$$S(\hat{a})=\sum_{i=1}^mr_i^2(\hat{a})=\sum_{i=1}^m[T_i-f(L_i,I_{0,i},\hat{a})]^2 \quad (13)$$

式中, $\hat{a}$ 为系数($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$); r_i 为第 i 组数据残差; $L_i, I_{0,i}, T_i$ 为第 i 组实验数据.

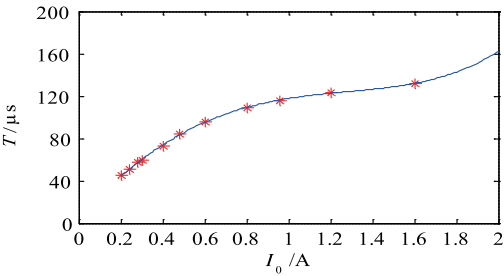


图5 电感初始电流与放电时间 T_2 关系曲线 ($L=1\text{mH}$)

令系数估计值为 $\hat{a}(0)$,使残差平方和最小,将 $f(L_i, I_{0,i}, \hat{a})$ 在 $\hat{a}(0)$ 处展开泰勒级数,并利用高斯-牛顿迭代法求出各系数: $a_0=2.98, a_1=1.66, a_2=221.37, a_3=-119.38, a_4=-25.67, a_5=24.1$ 代入式(12)得

$$T=2.98+1.66L+221.37I_0-119.38I_0^2-25.67I_0^3+24.1I_0^4 \quad (14)$$

为了验证该拟合方法的可行性,针对不同电感电路参数进行分断电弧放电试验,对每一电路进行多次放电试验,取其平均值作为最终放电时间,并与式(14)计算结果进行对比,得出其相对误差,如表 1 所示.可看出,不同电感分断电弧放电时间的相对误差均小于 5%,故所构造放电时间模型是可行的.

表 1 放电时间 T 的平均相对误差

实验参数	$I_0=0.17\text{A}$ $L=0.11\text{mH}$	$I_0=0.48\text{A}$ $L=0.36\text{mH}$	$I_0=0.6\text{A}$ $L=0.5\text{mH}$	$I_0=0.9\text{A}$ $L=0.875\text{mH}$	$I_0=0.34\text{A}$ $L=1.1\text{mH}$	$I_0=0.6\text{A}$ $L=4\text{mH}$	$I_0=0.6\text{A}$ $L=27.6\text{mH}$	$I_0=0.15\text{A}$ $L=80\text{mH}$
仿真值(μs)	37.24	80.77	91.23	104.07	65.58	97.04	136.22	166.23
实验值(μs)	39	79.8	96	108	63	100	140	160
相对误差 f	4.51%	1.22%	4.96%	3.64%	4.095%	2.96%	2.7%	3.89%

4 模型验证与分析

为了验证电感分断电弧放电的相关理论及推导的正确性,利用安全火花试验装置在 1atm 空气环境下进行简单电感电路的分断放电实验.假定 $V_i=24\text{V}, U_{\text{arc.min}}=10\text{V}, i_{\text{arc}}(0)=I_0=V_i/R_0, i_{\text{arc}}(T)=0, u_{\text{arc}}(0)=U_{\text{arc.min}}, R_{\text{arc}}(0)=U_{\text{arc.min}}/I_0$,放电初始时刻为 0,结束时刻为 T ;实验电极模型参数为: $e=1.602\times 10^{-19}\text{C}, r=0.1\text{mm}, S_{\text{BD}}=0.5\times 10^{-3}\text{cm}^2, \mu_e=1.36\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $n_e=0.5\times 10^{12}/\text{cm}^3$.

针对 24V、360 μH 、50 Ω 电感分断过程中, $I_0=0.48\text{A}$,代入式(23)得电弧放电时间为 80.77 μs .将模型参数代入式(10),模拟了钨丝和铜盘极间电弧放电电阻随放电时间的变化曲线,如图 6(a) 计算值所示.将 $R_{\text{arc}}(t)$ 和 $u_{\text{arc}}(t)=R_{\text{arc}}(t)i_{\text{arc}}(t)$ 代入式(1),利用四阶龙格库塔数值方法进行求解,得出电感分断电弧电流和电压的特性曲线,如图 6(b) 和(c) 计算值所示.为了

验证理论模型的适用性,以线性衰减、抛物线、指数模型和文献[14]中的电弧电阻、电流和电压与计算值和实验值进行对比,如图 6(a)、(b) 和(c) 所示.

由图 6 可看出,在 $t=0\sim 60\mu\text{s}$ 时,指数模型中的电弧电阻、电流和电压无明显变化; $t>60\mu\text{s}$ 时,其电弧放电特性参数快速变化,与实测值差距较大.对于线性和抛物线模型,电弧电阻波形较接近实测波形,但没有考虑 $U_{\text{arc.min}}$ 的影响,电弧电阻从 0.5 Ω 基本按指数规律增长,但抛物线模型中的电弧电压和电流与实测波形比线性模型的误差大.对于文献[14],电弧电流较接近实测值,只是电弧放电起始阶段电弧电流变化较缓慢;由于近似用三分段函数表示指数系数,导致在电弧放电阶段后期电弧电阻迅速增大,同时由于电弧电流快速减小,以至于电弧电压先快速上升后减小,该方法电压误差较大.

根据图 6(a)、(b) 和(c) 可见,本文提出的电感分断放电电弧电阻模型计算得到的电弧电阻、电流和电

压波形和实验波形的变化趋势较为一致,放电时间约 $79.8\mu\text{s}$,相对误差为 1.22% . 在钨丝和铜盘两电极分断过程中,电弧电阻按照指数规律增加,且增长幅度是逐渐增加的,电弧电流呈非线性下降,电弧电压起始快速上升到最小建弧电压(约为 10V),随后电弧电压缓慢上升. 在电弧放电阶段即将结束时,电弧电阻和电压快速增大、电弧电流快速减少到零,这是因为极间粒子复合和扩散速度大于电离速度,即极间绝缘恢复能力增强.

为了进一步验证所提出的电感分断电弧放电理论模型,选取两组实验电路参数分别为 $360\mu\text{H}$ 、 0.48A 和 4mH 、 0.6A ,假定电弧放电初始时刻为 $10\mu\text{s}$, 4mH 电感电路的极间电子密度约为 $0.2\times 10^{13}/\text{cm}^3$,电极物理模型参数如前所述. 对这两组参数进行分断放电实验和理论模

型仿真,可得电弧放电特性曲线如图 7 所示. 由图 7 可看出,计算的电弧电阻、电流和电压波形和实验波形的变化趋势基本一致. 综上所述,本文提出的电感分断电弧放电理论模型能够模拟电感分断电弧放电特性.

但从图 6 和图 7 中可看出,理论仿真和实验波形还是存在一定误差,这主要是:(1)在电极分离过程中,没有考虑粒子碰撞电离、扩散和复合对电极间隙内的空间电荷分布影响,认为阴极发射电子是固定的,这样将使电极间隙空气绝缘强度恢复较快,所以图 6 中电弧放电中期电弧电阻增加幅度有点快;(2)假设电极表面是光滑平面以及电弧放电区域为对称矩形平面,忽略电极表面的粗糙度,这必然影响阴极电子发射能力;(3)最小建弧电压受试验环境等因素的影响,其值在一定范围内随机变化.

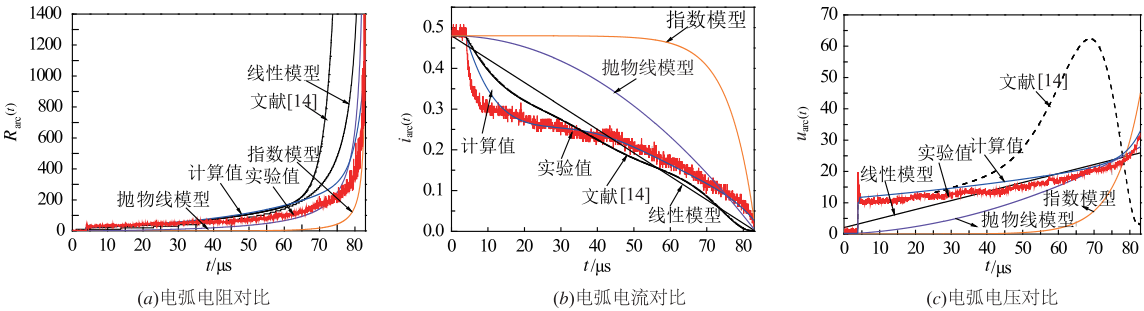


图6 电感电路分断电弧放电特性仿真和实验波形 (24V , $360\mu\text{s}$, 50Ω)

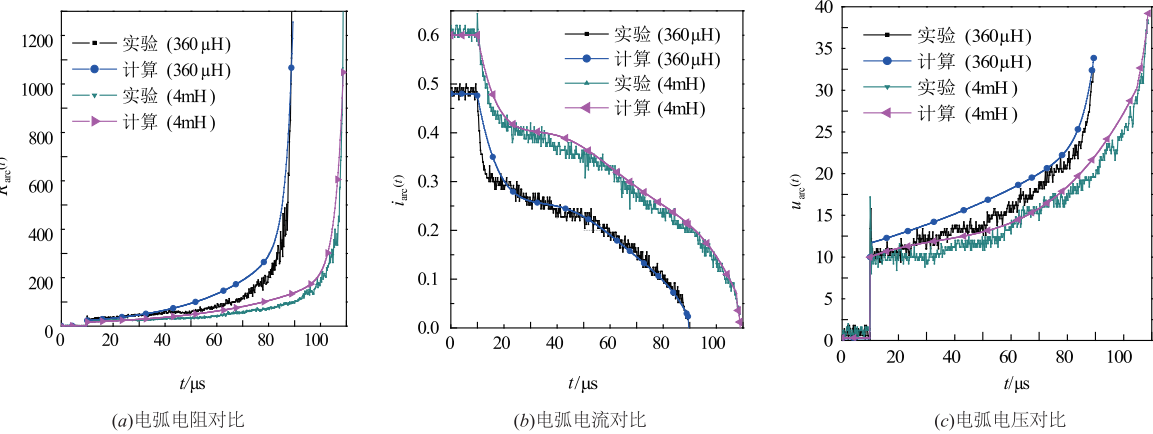


图7 不同电路参数的电弧放电特性对比

5 结论

对电感分断电弧放电特性曲线进行深入分析,推断出各放电阶段电弧电阻的变化规律. 综合考虑电感电路电感和初始电流对电弧放电时间 T 的影响,拟合出 T 与 L 和 I_0 的函数关系式. 发现 T 随 L 增加近似呈线性增长,而随 I_0 增加呈非线性增长. 考虑安全火花试验装置钨丝和铜盘电极物理结构及极间电弧电势,提

出了一种电弧电阻数学模型,得出了电弧电阻随电弧放电时间变化曲线以及电感分断电弧电压和电流的关系表达式,这可为利用电路模型模拟电感电路分断爆炸性电弧放电试验提供理论指导. 对传统电弧放电模型和不同电路参数进行仿真分析,结果证明了所提出的电弧电阻模型的准确性和可行性. 该研究思路可为下一步研究工作打下良好理论基础.

参考文献

- [1] He Wei, LIU Xing-hua, XIAN Richang, et al. Kinetics characteristics and bremsstrahlung of argon DC discharge under atmospheric pressure[J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15(4): 335 – 342.
- [2] 刘蜀阳, 韩志宏, 吴南星, 等. 负极性电火花加工时表面做功能量研究及其参数分析[J]. 电子学报, 2014, 42(3): 578 – 582.
Liu Shuyang, Han Zhihong, Wu Nanxing, et al. The study of work energy on machined surface during negative polarity EDM and its parameters analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(3): 578 – 582. (in Chinese)
- [3] 钟久明, 刘树林, 王玉婷等. 基于模拟电荷法的微间隙场增强因子研究[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 1003 – 1008.
Zhong Jiuming, Liu Shulin, Wang Yuting, et al. Study on the electric field enhancement factor for micro-gap based on CSM[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4): 1003 – 1008. (in Chinese)
- [4] Philippe Castera, Paul-Quentin Elias. Resistance models applied to the return stroke phase of negative pulsed surface discharges in air[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(7): 1922 – 1931.
- [5] L Jonathan, L Craig. Influence of cathode shape on vacuum arc thruster performance and operation [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(1): 198 – 208.
- [6] A D Grasso, S Pennisi, M Paparo, et al. Estimation of in-cylinder pressure using spark plug discharge current measurements[A]. IEEE 2013 European Conference on Circuit Theory and Design, Dresden[C]. Germany, 2013, 1 – 4.
- [7] 任红霞, 郝跃, 郑德修等. AC PDP 多脉冲放电特性一维流体模型的数值分析[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 80 – 83.
Ren Hongxia, Hao Yue, Zheng De-xiu, et al. The Numerical analysis of multi-pulse discharge characteristics in AC PDP by one-dimensional fluid discharge model[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(11): 80 – 83. (in Chinese)
- [8] 孟庆海, 牟龙华, 王崇林, 刘建华. 基于电流线性衰减模型分析低能电弧放电特性[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 654 – 656.
Meng Qinghai, Mu Longhua, Wang Chonglin, et al. Analysis of low energy arc discharge characteristics based on linear current attenuation model[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(6): 654 – 656. (in Chinese)
- [9] 刘建华. 爆炸性气体环境下本质安全电路放电理论及非爆炸评价方法的研究[D]. 中国矿业大学, 2008.
- [10] 杨玉岗, 祁麟, 吴建鸿. 三相交错并联磁集成 Boost 变换器的内部本质安全特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 54 – 62.
Yang Yugang, Qi Lin, Wu Jianhong. Analysis of inner-intrinsic safety for three-phase interleaving magnetic integrated boost converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 54 – 62. (in Chinese)
- [11] A A Shcherba, N I Suprunovska. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-spark load[A]. IEEE 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)-Kyiv [C]. Ukraine, 2014, 50 – 54.
- [12] 赵永秀, 刘树林, 马一博. 爆炸性试验电感电路分断放电特性分析与建模[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1698 – 1704.
Zhao Yongxiu, Liu Shulin, Ma Yibo. Analysis and modeling of inductor-disconnected-discharged characteristics based on explosive test[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1698 – 1704. (in Chinese)
- [13] Zhang Qi, Li Wei, Liang Huimin. Effect of spark duration on explosion parameters of methane/air mixtures in closed vessels[J]. Safety Science, 2012, 50: 1715 – 1721.
- [14] Liu Shulin, Li Yan. Research on intrinsic safety behavior of inductor-disconnected-discharge of boost DC-DC converters[A]. 5th International Conference on Information Assurance and Security[C]. IAS, 2009. 758 – 761.

作者简介



赵永秀 女, 1978 年出生于安徽淮北, 博士生, 讲师. 研究领域为本质安全电路放电及防爆理论分析.

E-mail: yongxiu_zhao@163.com



刘树林 (通信作者) 男, 1964 年生于四川成都, 博士、教授、博士生导师. 研究领域为开关变换器、功率集成电路. 发表论文 100 余篇, 其中 SCI、EI 收录 60 余篇; 出版专著及教材 6 部, 其中国家“十一五”规划教材 1 部.

E-mail: lsigma@163.com