

# 并联金属丝提高电爆炸丝沉积能量的数值模拟\*

石桓通 邹晓兵† 赵岫 朱鑫磊 王新新

(清华大学电机工程系, 北京 100084)

(2013年12月25日收到; 2014年3月15日收到修改稿)

对于低气压或真空环境中的电爆炸丝, 因丝沿面击穿会过早终止能量沉积过程, 使丝中沉积能量 ( $E_d$ ) 大大低于金属丝完全汽化时所需能量 ( $E_s$ ). 本文提出并联金属丝法延缓沿面击穿时刻以提高电爆炸丝沉积能量. 对电流上升时间为几十纳秒、幅值约为1 kA级作用下的金属丝电爆炸过程进行了数值模拟. 结果表明, 在电爆炸丝两端并联一定尺寸的金属丝可降低爆炸丝端电压上升率, 从而推迟电压上升过程中沿面击穿时刻, 显著提高丝中沉积能量和过热系数.

**关键词:** 电爆炸丝, 能量沉积, 过热系数, 沿面击穿

**PACS:** 52.80.Qj, 52.58.Lq

**DOI:** 10.7498/aps.63.145206

## 1 引言

电爆炸金属丝 (electrical explosion of wires, EEW) 是指通过向金属丝中快速注入高密度的脉冲电流 ( $10^4\text{--}10^6\text{ A/mm}^2$ ) 从而使金属丝瞬态加热到汽化温度的现象<sup>[1]</sup>, 目前已在快速熔断器、开断开关、脉冲光源、材料表面喷涂、纳米粉体制备、Z箍缩负载等诸多领域获得广泛应用<sup>[2-8]</sup>. 描述电爆炸丝行为的电参数包括丝电压  $u(t)$ 、丝电流  $i(t)$ 、沉积能量  $E_d(t)$ 、过热系数  $k$  等. 丝中沉积能量

$$E_d(T_d) = \int_0^{T_d} u(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

( $T_d$  为丝材料加热时间), 而过热系数  $k$  是指丝中总沉积能量  $E_d$  与丝完全汽化时所需能量  $E_s$  之比, 即  $k = E_d/E_s$ . 已有实验表明: 在高气压环境下电爆炸丝时,  $k$  通常能接近1或大于1 ( $k$  大于1称为过热丝爆). 而在低气压或真空环境中电爆炸丝时, 如低气压下用于纳米粉体制备的爆炸丝<sup>[9-11]</sup> 和真空中的Z箍缩爆炸丝负载<sup>[12,13]</sup>, 由于丝材料沿面击穿, 使电流从丝芯转移到周围晕层等离子体中, 过早终止了丝中的能量沉积过程,  $k$  都低于甚至大大低于

1 ( $k$  低于1称为欠热丝爆). 在纳米材料制备中, 此现象将导致粉体尺寸分布不均匀, 存在微米级或更大尺寸颗粒, 而对于Z箍缩爆炸丝负载, 其残存丝核中有部分质量将成为随后内爆阶段的拖尾质量, 极大地影响内爆等离子体的品质.

对于低气压或真空环境下的电爆炸丝, 本文提出并联金属丝法以延缓沿面击穿时刻, 提高丝中沉积能量. 采用Tucker建立的分段电阻率模型<sup>[14]</sup> 对丝爆过程进行了模拟计算, 分析比较了单丝电爆炸和双丝并联电爆炸 (下文中并联双丝分别称为目标丝和并联丝) 时的金属丝电压、电流以及沉积能量等参数变化情况. 研究表明: 并联金属丝后, 目标丝可获得更高的能量积累, 选择合适尺寸的并联金属丝, 可以使目标丝接近过热状态 ( $k \geq 1$ , 即一次性完全汽化整根丝).

## 2 计算模型

### 2.1 脉冲电流源模型

爆炸金属丝置于放电腔中, 放电腔外的脉冲电流源采用Conell大学专用于丝爆研究的小型脉冲装置<sup>[15]</sup>, 电路模型为RLC放电电路, 如图1(a)

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51177086, 11135007, 51237006) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: juxb@mail.tsinghua.edu.cn

所示.  $C$  为储能电容,  $C = 75 \text{ nF}$ , 其充电电压  $U_{c0} = 15 \text{ kV}$ ;  $L$  和  $R$  分别为除丝负载外放电回路总电感、总电阻,  $L = 0.62 \text{ } \mu\text{H}$ ,  $R = 10 \text{ m}\Omega$ . 负载短路时, 短路放电电流波形如图 1 (b) 所示.

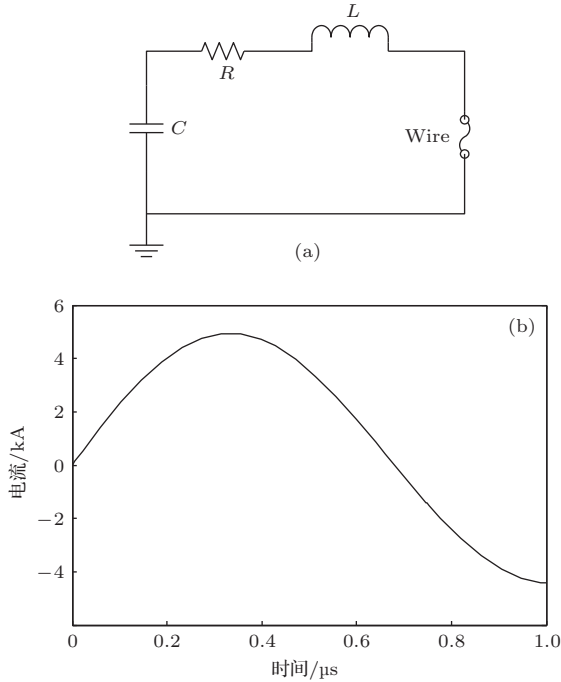


图 1 (a) 主回路电路原理图; (b) 短路放电的电流波形

### 2.2 负载金属丝电阻分段模型

在脉冲电流作用下金属丝快速加热, 丝材料先后经历以下五个阶段: 固态加热、熔化、液态加热、汽化以及等离子体形成. 各阶段爆炸丝电阻率都为比作用量

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

的函数<sup>[14]</sup>,  $j$  为电流密度,  $t$  为加热时间.

固态加热和液态加热属于定相加热, 熔化和汽化则属于相变加热. 爆炸丝电阻率  $\rho(t)$  采用 Tucker 模型 (由能量守恒推导出).

定相加热阶段电阻率  $\rho(t)$  为

$$\rho(t) = \rho_1 \cdot \exp \left[ \frac{g(t)}{g_m} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \right] \quad 0 \leq g \leq g_m, \quad (1)$$

式中,  $\rho_1, \rho_2$  为固态或液态加热阶段的起始和终止电阻率,  $g_m$  为定相阶段起始到结束所对应的比作用量.

相变加热阶段电阻率为

$$\rho(t) = \frac{\rho_1}{\sqrt{1 - \frac{\rho_2^2 - \rho_1^2}{\rho_2^2} \frac{g(t)}{g_m}}} \quad 0 \leq g \leq g_m, \quad (2)$$

式中,  $\rho_1, \rho_2$  为相变阶段的起始和终止电阻率,  $g_m$  为相变阶段起始到结束所对应的比作用量.

仿真时丝中沉积能量只需计算到沿面击穿时刻或金属丝完全汽化时刻, 所以随后的等离子体形成阶段的电阻率可用一个经验值来代替, 对沉积能量计算结果无影响. 本文等离子体电阻率模型采用如下表达式:

$$\rho(t) = \frac{\rho_2}{\sqrt{1 + \frac{(\rho_1^2 - \rho_2^2)(g(t) - g_m)}{\rho_1^2 g_m}}} \quad 0 \leq g \leq g_m, \quad (3)$$

式中,  $\rho_1, \rho_2$  为等离子体生成阶段的起始和终止电阻率,  $g_m$  为等离子体生成阶段起始到结束所对应的比作用量.

对应爆炸丝电阻率  $\rho(t)$  模型, 负载金属丝电阻采用如图 2 所示的分段模型, 分为五个变化阶段:  $R_{g1}(t), R_{g2}(t), R_{g3}(t), R_{g4}(t), R_{g5}(t)$ , 分别对应固态加热、熔化、液态加热、汽化以及等离子体形成阶段的电阻. 采用理想开关切换方式进行模拟, 理想开关的控制信号为金属丝实时比作用量. 图 2 中  $L_g$  为金属丝电感, 根据丝长度和半径可直接计算出  $L_g$ <sup>[16]</sup>, 对于几厘米长的细丝  $L_g$  为几十 nH 级, 并联丝时应考虑双丝之间的互感.

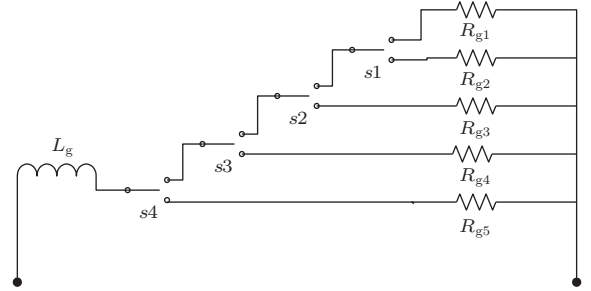


图 2 单丝的电路模型

本文以银丝 (Ag) 为例进行丝爆仿真, 各物理参数的选取如表 1 所示. 其中电阻率的单位为  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 比作用量的单位为  $\text{A}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-4}$ .

考察  $t_1 - t_2$  时间内电阻率对比作用量的积分:

$$\begin{aligned} & \int_{g(t_1)}^{g(t_2)} \rho(g) dg \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \rho(t) d \left( \int_0^t j^2 dt \right) \\ &= 10^{-5} \times \int_{t_1}^{t_2} \frac{I^2(t)r(t)}{V} dt (\text{J}/\text{mm}^3), \quad (4) \end{aligned}$$

式中,  $A$  为金属丝横截面积, 单位  $\text{mm}^2$ ;  $V$  为金属丝体积, 单位  $\text{mm}^3$ ;  $I(t)$  为金属丝电流, 单位  $A$ ;  $r(t)$  为电阻, 单位  $\Omega$ ; 比作用量

$$g = \int_0^t j^2 dt = \int_0^t \frac{I^2(t)}{A^2} dt.$$

可见电阻率对比作用量的积分恰好是  $t_1-t_2$  时间内金属丝的能量体积密度的积累量. 使用表 1 数据计算得到银汽化阶段结束时的能量密度 (即银丝完全汽化时所需要能量密度) 为  $20.5 \text{ J/mm}^3$ .

表 1 电阻率曲线拟合参数

材料	固态加热			熔化			液态加热		
	$\rho_1$	$\rho_2$	$g_m$	$\rho_1$	$\rho_2$	$g_m$	$\rho_1$	$\rho_2$	$g_m$
银	1.59	8.6	61682	8.6	15.9	10089	15.9	27.3	18361
铜	1.77	9.9	80492	9.9	18.9	13736	18.9	26.3	29780
铝	2.82	11.2	25238	11.2	23.1	6797	23.1	41.5	16616

材料	汽化			击穿生成等离子体		
	$\rho_1$	$\rho_2$	$g_m$	$\rho_1$	$\rho_2$	$g_m$
银	27.3	837.7	31000	837.7	39.9	23100
铜	26.3	620	48992	620	35	75200
铝	41.5	393	17215	393	60	25000

### 2.3 假设和近似

丝中沉积能量计算到丝沿面击穿时刻止, 而沿面击穿时刻则由沿面击穿电压值确定. 在脉冲电流 (电压) 作用下, 金属丝沿面击穿电压值受电压波形、气压、丝材料、丝尺寸等因素综合影响, 不能从理论上确定其精确值. 本文采用实验值, 文献 [15] 中实验表明: 直径  $25 \mu\text{m}$ , 长度  $3 \text{ cm}$  的银丝, 丝沿面击穿电压值约为  $30 \text{ kV}$ . 仿真时采用与文献 [15] 中相同的电源参数及爆炸丝参数, 丝沿面击穿电压值假设为  $30 \text{ kV}$ .

不考虑金属丝在加热过程中的膨胀等动力学过程, 认为该过程中金属丝吸收的电能全部转化为热量, 且不会因辐射等因素而损失.

## 3 数值模拟结果与讨论

### 3.1 单丝电路

利用 Ansoft 公司的 Simplorer 6.0 软件进行全电路仿真. 负载为金属单丝 (直径  $25 \mu\text{m}$ , 长度  $3 \text{ cm}$  的银丝), 按表 1 中参数进行计算, 即计算时先不考虑低气压下的沿面击穿.

图 3 为单丝负载时金属丝电压、电流、电阻以及能量密度等随时间的变化曲线. 在电流的加热作用

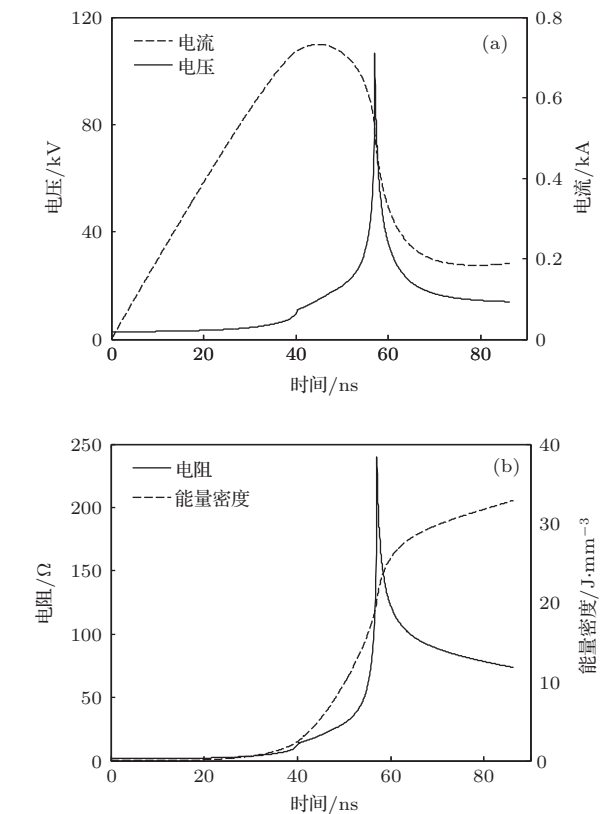


图 3 (a) 单丝负载电压和电流随时间变化; (b) 单丝负载电阻和能量密度随时间变化

下, 金属丝电阻值不断增大, 并在  $55 \text{ ns}$  附近急剧上升, 导致丝电流快速下降, 两端电压急剧上升并

迅速达到沿面闪络电压, 随后间隙击穿产生晕层等离子体, 金属丝的能量注入基本停止. 按照假设, 真空环境中 30 kV 即发生沿面闪络, 从曲线上读出至闪络时刻注入金属丝的能量体积密度约为  $15.0 \text{ J/mm}^3$ , 占完全汽化该金属丝所需能量的比例(过热系数)为  $k = 15.0/20.5 = 0.732$ , 这表示金属丝发生沿面闪络时还没有完全汽化.

### 3.2 双丝并联电路

观察单丝过程中的能量密度变化曲线可知, 金属丝能量注入最快的阶段为电阻急剧上升阶段, 因此希望设法延缓这一阶段金属丝两端电压的上升率, 即推迟沿面闪络的时间, 从而使目标金属丝获得更多的注入能量. 通过仿真发现并联适当直径和长度的金属丝可以实现这一目标.

图 4 为在目标丝两端并联直径为  $30 \mu\text{m}$ , 长度为 5 cm 的另一银丝时的电压、电阻等参数的变化曲线. 目标丝发生沿面闪络时的能量密度为  $18.04 \text{ J/mm}^3$ , 过热系数为  $k = 18.04/20.5 = 0.88$ , 虽然仍未完全汽化, 但已经明显高于单丝时的

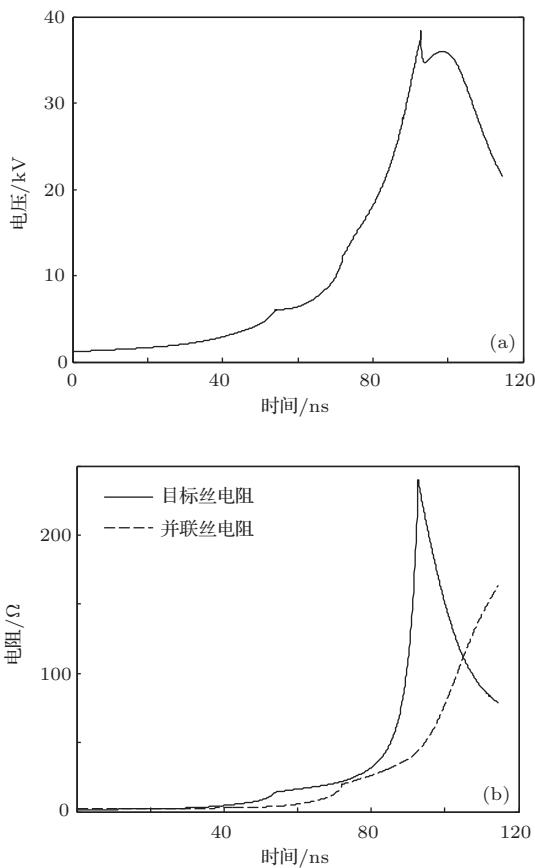


图 4 (a) 并联  $30 \mu\text{m}$ , 5 cm 银丝时目标丝端电压变化; (b) 并联  $30 \mu\text{m}$ , 5 cm 银丝时目标丝和并联丝电阻变化

0.732. 进一步比较单丝和双丝两种情况下目标丝的闪络时刻(目标丝电压达到 30 kV 的时刻), 单丝约为 55 ns, 双丝约为 90 ns, 可见并联丝的引入确实推迟了沿面闪络的发生时间, 提高了目标丝的过热系数.

可以从电阻分流的角度解释并联金属丝的作用: 并联丝的冷态电阻值大于目标丝, 因此初始阶段目标丝中流过较大电流, 目标丝在此电流作用下升温, 其阻值上升并超过并联丝; 随后目标丝进入汽化阶段其电阻急剧升高, 而并联丝由于能量密度较小仍保持在低电阻状态, 这时并联丝可以起到限制端电压的作用, 降低目标丝两端的电压上升率, 推迟发生闪络的时间, 从而使得目标丝发生闪络时所积累的能量增多.

改变并联丝的长度和直径进行仿真以研究并联丝尺寸对目标丝过热系数的影响. 图 5 和图 6 为目标丝的闪络时刻以及闪络时目标丝过热系数随并联丝直径和长度的变化.

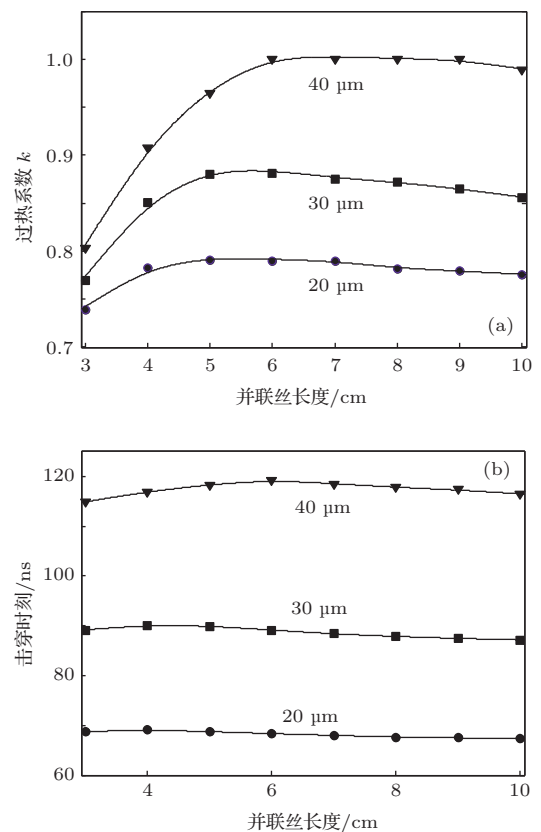


图 5 (a) 并联丝直径为 20, 30,  $40 \mu\text{m}$  时目标丝过热系数与并联丝长度的关系; (b) 并联丝直径为 20, 30,  $40 \mu\text{m}$  时目标丝闪络时刻与并联丝长度的关系

仿真结果表明, 适当选取并联丝的尺寸(如

$\Phi = 50 \mu\text{m}$ ,  $l = 7 \text{ cm}$ ) 可以使目标丝电阻上升到完全汽化电阻时端电压仍小于 30 kV. 这表明汽化阶段结束时目标丝仍然没有发生闪络而在继续沉积能量, 此状态下的丝中总沉积能量密度将超过完全汽化所需要的  $20.5 \text{ J/mm}^3$ , 过热系数  $k$  实际上大于 1. 由于所建立的模型只准确反映闪络发生前或完全汽化前电路的状况, 对于这种端电压始终低于闪络电压的情况, 仿真时丝中沉积能量只计算到完全汽化时刻 ( $k = 1$ ) 为止, 并将过热系数取值为 1, 相应的“闪络时刻”取为目标丝完全汽化时刻.

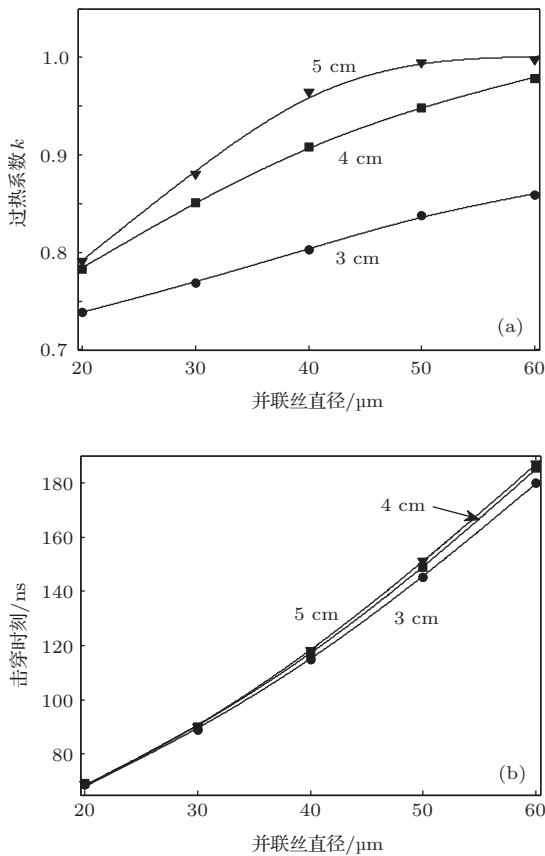


图6 (a) 并联丝长度为 3, 4, 5 cm 时目标丝过热系数与并联丝直径的关系; (b) 并联丝长度 3, 4, 5 cm 时目标丝闪络时刻与并联丝直径的关系

对比过热系数曲线和闪络时刻曲线可以发现, 目标丝闪络时的过热系数与闪络时间有很好的对应关系: 闪络越推迟, 目标丝积累能量的时间越长, 过热系数越大. 根据前文分析, 在目标丝电阻急剧上升将要发生沿面闪络时, 并联丝的阻抗越低则越有利于抑制目标丝的电压上升, 延长其积累能量的时间, 从而提高目标丝的过热系数. 为了验证这一推断, 将并联丝等效为一定值电阻和定值电感的串联, 分别改变电阻和电感值并计算目标丝的过热系数, 结果如图 7 所示. 可以发现目标丝过热系数确

实随着并联丝电阻和电感的减小而增大, 因此目标丝过热系数随并联丝尺寸变化的规律最终可以归结到并联丝尺寸对其阻抗的影响上.

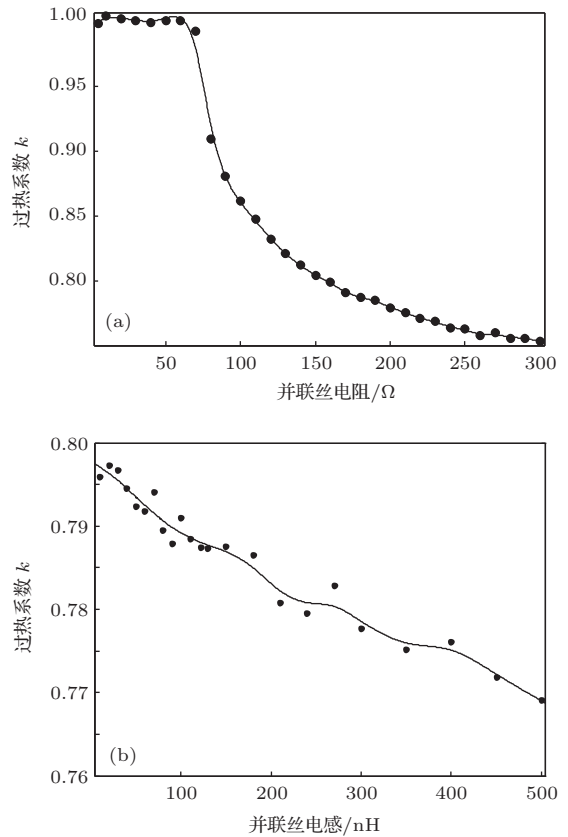


图7 将并联丝等效为定值电阻和定值电感串联后过热系数随电阻和电感值的变化 (a) 电感取值为 120 nH 时过热系数随电阻值的变化; (b) 电阻取值为 160  $\Omega$  时过热系数随电感值的变化

图 8 分别给出了直径  $30 \mu\text{m}$  并联丝闪络时刻电阻值随长度的变化以及长度 3 cm 并联丝闪络时刻电阻值随直径的变化. 根据定义, 并联丝电阻值满足表达式  $R(t) = 4\rho(t)l/(\pi d^2)$ , 其中  $\rho(t)$  为时变的电阻率,  $l$  为长度,  $d$  为直径. 对于一定直径的并联丝, 长度增大时质量相应增大, 吸收能量后其电阻率上升的速率减慢, 导致闪络时刻的电阻率减小. 图 8(a) 曲线表明在电阻率和长度两个因素共同作用下并联丝电阻随其长度的增大呈现出“先减小后增大”的过程, 这与目标丝过热系数“先增大后减小”的规律 (图 5(a)) 一致. 同理, 对于一定长度的并联丝, 直径增大时质量增大, 导致闪络时刻的电阻率减小, 直径和电阻率两个因素共同作用的结果为电阻随直径的增大而单调地减小, 相应的目标丝过热系数随并联丝直径的增大而增大 (图 6(a)). 另外, 由图 7 中曲线可知, 并联丝电感从 50 nH 增

大到300 nH时,目标丝过热系数仅减小0.015,说明并联丝电感对目标丝过热系数的影响远弱于电阻,因此,分析时可以忽略并联丝尺寸改变所造成的电感值的变化。

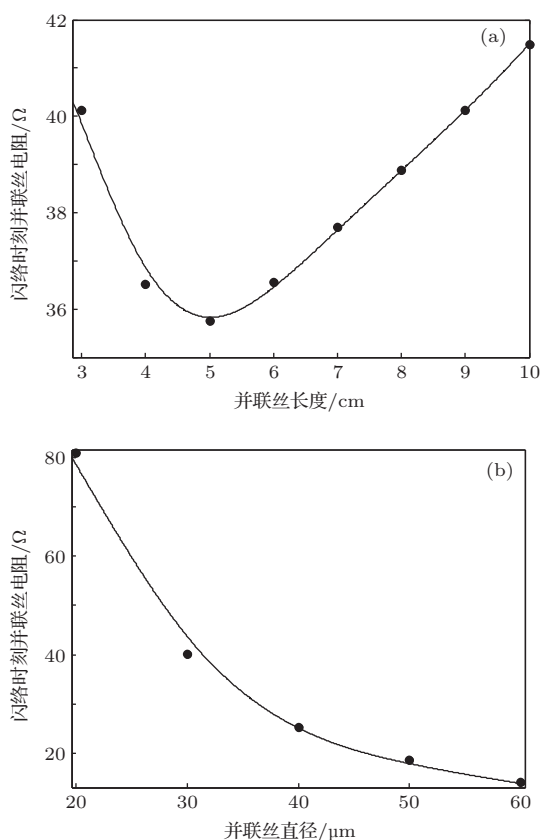


图8 (a) 直径30 μm 并联丝网络时刻电阻与长度的关系; (b) 长度3 cm 并联丝网络时刻电阻与直径的关系

对于铜、铝等与银具有相似电阻率变化曲线的材料可以进行类似的数值模拟,只需将电阻率模型中的参数修改为对应材料的参数即可.仿真结果表明,对于铜和铝,并联金属丝可以起到与银丝相同的效果。

需要再次指出的是,上述数值模拟是在假定金属丝沿面击穿电压为定值,以及不考虑金属丝膨胀动力学过程的前提下进行的.实际上,即便在相同放电条件下,沿面击穿电压值也会有涨落,具有一定统计性,因此数值模拟本身具有局限性,该方法的有效性尚需通过大量实验进一步验证.本文的重点在于提出一种可行的方案并初步证明其有效性。

## 4 结 论

本文提出并联金属丝法延缓沿面击穿时刻以提高电爆炸丝沉积能量.对电流上升时间为几十纳

秒幅值约为1 kA级作用下的金属丝电爆炸过程进行了数值模拟.结果表明,在电爆炸丝两端并联一定尺寸的金属丝可降低爆炸丝端电压上升率,从而推迟电压上升过程中沿面击穿时刻,显著提高丝中沉积能量和过热系数.该方法的效果主要由并联金属丝的阻抗所决定(电流上升率不是很大时主要由电阻决定):并联丝阻抗越小,减小电压上升率提高过热系数的效果越明显.仿真结果还表明:并联丝阻抗随直径增大单调下降,而随长度增大呈现出“先减小后增大”的变化趋势。

## 参考文献

- [1] Chace W G, Moore H K 1959 *Exploding Wires* (New York: Plenum Press) p7
- [2] Zhao T, Zou X B, Wang X X 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 646
- [3] Lü M, Wu G, Qiu A C, Kuai B, Wang L P, Cong P T, Qiu M T, Lei T S, Sun T P, Guo N, Han J J, Zhang X J, Huang T, Zhang G W, Qiao K L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4779 (in Chinese) [吕敏, 吴刚, 邱爱慈, 蒯斌, 王亮平, 从培天, 邱孟通, 雷天时, 孙铁平, 郭宁, 韩娟娟, 张信军, 黄涛, 张国伟, 乔开来 2009 物理学报 **58** 4779]
- [4] Li S W, Feng G Y, Li W, Han J H, Zhou S Y, Yin J J, Yang C, Zhou S H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 225206 (in Chinese) [李世文, 冯国英, 李玮, 韩敬华, 周晟阳, 殷家家, 杨超, 周寿桓 2012 物理学报 **61** 225206]
- [5] Chuvatin A S, Kokshenev V A, Aranchu L E, Hue D, Kurmaev N E, Fursov F I 2006 *Laser Part. Beams* **24** 395
- [6] Stenerhag B, Handel S K, Gohle B 1971 *Appl. Phys.* **42** 1876
- [7] Zhu L, Yang Q, Bi X S, Zhu J 2009 *High Voltage Engin.* **35** 2232 (in Chinese) [朱亮, 杨奇, 毕学松, 朱锦 2009 高电压技术 **35** 2232]
- [8] Zhao S, Xue C, Zhu X L, Zhang R, Luo H Y, Zou X B, Wang X X, Ning C, Ding N, Shu X J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045205
- [9] Kotov Y A 2003 *J. Nanopart. Res.* **5** 539
- [10] Mao Z G, Zou X B, Wang X X, Jiang W H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 181501
- [11] Zou X B, Mao Z G, Wang X X, Jiang W H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045206
- [12] Zhao T, Zou X B, Zhang R, Wang X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075205
- [13] Blesener I C, Greenly J B, Pikuz S A, Shelkovenko T A, Vishniakou S, Hammer D A, Kusse B R 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 123505-1
- [14] Tucker T J, Toth R P 1975 *Sandia Rept.* **75** 0041
- [15] Sinars D B, Hu M 2001 *Phys. Plasmas* **8** 216
- [16] Davis J, Gondarenko N A, Velikovich A L 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 170

# Numerical simulation of energy deposition improvement in electrical wire explosion using a parallel wire\*

Shi Huan-Tong Zou Xiao-Bing<sup>†</sup> Zhao Shen Zhu Xin-Lei Wang Xin-Xin

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

( Received 25 December 2013; revised manuscript received 15 March 2014 )

## Abstract

The energy deposition process of electrical wire explosion under vacuum or low gas pressure circumstances is usually terminated prematurely, owing to the flashover along the surfaces of wires. Therefore energy deposited into wires can be far less than the amount needed to fully vaporize them. In this paper, a parallel connection method of wire is introduced in order to improve the energy deposition of the concerned wire before flashover takes place. Wire explosion driven by a current with a rise time of tens of ns and an amplitude of about 1 kA is studied numerically, and the simulation results show that by connecting a wire of a certain size in parallel with both ends of the exploding wire, the voltage rising rate is suppressed and the flashover is delayed; therefore the energy deposited into the concerned wire is increased effectively.

**Keywords:** wire explosion, energy deposition, overheat coefficient, flashover

**PACS:** 52.80.Qj, 52.58.Lq

**DOI:** [10.7498/aps.63.145206](https://doi.org/10.7498/aps.63.145206)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51177086, 11135007, 51237006).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [juxb@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:juxb@mail.tsinghua.edu.cn)