

真空中铝单丝电爆炸的实验研究

王坤 史宗谦 石元杰 白骏 李阳 武子骞 邱爱慈 贾申利

Experimental investigation on the electrical explosion of single aluminum wire in vacuum

Wang Kun Shi Zong-Qian Shi Yuan-Jie Bai Jun Li Yang Wu Zi-Qian Qiu Ai-Ci Jia Shen-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 015203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.015203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.015203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于最大熵估计 Alpha 谱缩放与平移量的温度与发射率分离算法

A temperature and emissivity separation algorithm based on maximum entropy estimation of alpha spectrum's scaling and translation

物理学报.2015, 64(17): 175205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.175205>

介质环境对铜丝电爆炸制备纳米粉体的影响

Effect of medium on nanopowders prepared by Cu wire electrical explosion

物理学报.2015, 64(7): 075203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.075203>

双绞铝丝纳秒电爆炸实验研究

Nanosecond electrical explosion of twisted aluminum wires

物理学报.2014, 63(20): 205203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.205203>

并联金属丝提高电爆炸丝沉积能量的数值模拟

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

物理学报.2014, 63(14): 145206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.145206>

高压击穿铜丝物相研究

Study on phase analysis of nanoparticles by high-voltage electrical explosion method of copper wire

物理学报.2012, 61(22): 225206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.225206>

## 真空中铝单丝电爆炸的实验研究\*

王坤<sup>1)</sup> 史宗谦<sup>1)†</sup> 石元杰<sup>1)</sup> 白骏<sup>1)</sup> 李阳<sup>1)2)</sup> 武子骞<sup>1)</sup>  
邱爱慈<sup>1)2)</sup> 贾申利<sup>1)</sup>

1) (西安交通大学, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

2) (西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2015年6月19日收到; 2015年9月22日收到修改稿)

开展了铝单丝在负极性电流脉冲作用下电爆炸特性的研究. 利用皮秒激光探针, 搭建了阴影、纹影和干涉的光学诊断平台, 得到了不镀膜铝丝典型的能量沉积过程, 在电压崩溃时刻其沉积能量为 2.4 eV/atom. 为了增加金属丝内的沉积能量, 开展了相同电参数及金属丝尺寸下的镀膜铝丝电爆炸实验, 其沉积能量可达到 5 eV/atom, 实现了在电压崩溃之前铝丝完全气化(完全气化所需能量为 4 eV/atom). 阴影图像展示了高密度丝核区域的膨胀过程, 不镀膜铝丝平均膨胀速度为 2.2 km/s, 而镀膜铝丝因为沉积能量大, 其膨胀速度约为不镀膜铝丝的 2.3 倍, 高密度区域膨胀速度为 5 km/s. 由于阴影不能反映低密度等离子体的膨胀, 开展了平行双丝实验, 通过测量自发光辐射, 估算了低密度等离子体的膨胀速度. 利用条纹相机拍摄了不镀膜铝丝电爆炸过程中自发光区域的图像. 纹影图像清晰地展示了不镀膜铝丝在电爆炸过程中形成的核冕结构, 而镀膜铝丝电爆炸过程中核冕结构得到了一定程度的抑制. 从干涉图像计算了相移, 在轴对称假设下对相移进行阿贝尔逆变换, 重构了三维的铝原子数密度分布.

关键词: 单丝电爆炸, 光学诊断, Z 箍缩

PACS: 52.80.Qj, 52.70.Kz

DOI: 10.7498/aps.65.015203

## 1 引言

单丝电爆炸在丝阵 Z 箍缩物理研究<sup>[1]</sup>、金属纳米粉制备<sup>[2,3]</sup>、极端条件下物态性质研究<sup>[4]</sup>、强磁场源等<sup>[5]</sup>物理领域有非常重要的应用. 丝阵负载在 Z 箍缩实验研究中 X 射线产额的突破是推进单丝电爆炸研究的主要动力<sup>[6]</sup>. 丝阵 Z 箍缩预脉冲阶段中金属丝的初始状态对内爆等离子体均匀性和 X 射线产额有决定性的影响<sup>[7]</sup>. 金属丝在纳秒级电流脉冲作用下温度迅速上升进而熔化, 并排出表面吸附的气体. 由于金属丝材料在凝聚态(固态和液态)下的电阻率随温度上升而增大, 电流脉冲作用会随之增大, 这使得金属丝负载上的电压也迅速提高, 最终将金属丝周围的气体(包括脱附气体、杂质和金

属蒸汽)击穿形成等离子体<sup>[8]</sup>, 出现电压崩溃的现象. 此时, 金属丝的能量沉积阶段结束. 金属丝形成由低密度、高温度的冕层等离子体包围稠密、低温度的丝核的二元结构. 由于电流迅速地转移到冕层等离子体中, 丝核进一步的加热和电离是通过周围等离子体的辐射和热传导完成的<sup>[9]</sup>. 对单丝电爆炸物理过程的研究有助于建立完善的丝阵 Z 箍缩“冷启动”(计算从室温开始)模型<sup>[10]</sup>, 完整、自洽的预测内爆等离子体热化、滞止和发射 X 射线的现象.

近年来, 为了深入理解单丝电爆炸的物理过程, 促进在相关领域更好地应用这一技术, 研究者开展了大量的实验和数值模拟研究<sup>[11-13]</sup>. 直径几微米到十几微米的金属丝在纳秒级电流脉冲作用下的发展过程和演化规律的研究, 需要高时空分辨率的设备. 分幅相机、条纹相机和光谱仪可以拍摄

\* 国家自然科学基金(批准号: 51322706, 51237006, 51325705)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-11-0428)和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zqshi@mail.xjtu.edu.cn

冕层等离子体的自发光辐射<sup>[14]</sup>. 研究丝核以及等离子体的密度分布和形态则需要X射线背光照相或者激光探针<sup>[15,16]</sup>. 单丝电爆炸的行为与多种因素有关, 其中包括金属丝材料、尺寸, 是否镀膜, 电流上升率、脉宽、极性, 金属丝与电极接触情况, 金属丝表面状态等. Sinars等<sup>[17]</sup>利用X射线背光研究了不同材料金属丝电爆炸过程的能量沉积、稠密丝核的膨胀速率. Sarkisov等<sup>[18]</sup>的实验结果表明, 电流上升率对金属丝电爆炸行为有非常重要的影响; Duselis等<sup>[19]</sup>的研究结果表明, 更高的电流上升率导致更多的能量沉积在金属丝内. 金属丝表面镀膜能够延长阻性加热时间, 增加金属丝内的沉积能量<sup>[20]</sup>. Li等<sup>[21]</sup>研究了绝缘膜对铝丝电爆炸行为的影响. Sarkisov等<sup>[22]</sup>采取高电流上升率、金属丝表面镀膜等措施, 实现了镀膜钨丝的“无晕”电爆炸. Wu等<sup>[8]</sup>采用负极性电流脉冲开展镀膜钨丝和铂丝的电爆炸实验, 得到了部分完全气化的金属丝. 除了采用金属丝镀膜的方式来延长阻性加热时间的方法外, 对金属丝进行预热去除表面的吸附气体也可以延缓等离子体的形成, 改善单丝电爆炸特性<sup>[23]</sup>. Sarkisov等<sup>[24]</sup>研究了单丝电爆炸过程中的径向电场, 解释了电流脉冲的极性效应对金属丝击穿和能量沉积的影响. Duselis等<sup>[19]</sup>在研究影响单丝电爆炸能量沉积因素的实验中得到, 金属丝与电极之间采用焊接的连接方式有助于提高金属丝内的能量沉积. 目前开展的实验研究侧重对单丝电爆炸物理过程的理解, 对于通过设计负载参数和电参数来优化单丝电爆炸过程中能量沉积以及膨胀速率等电爆炸特性, 需要进一步的实验研究. 与正极性电流脉冲研究相比, 负极性电流脉冲作用下单丝电爆炸的实验研究比较少, 并且, 对于采用负极性电流脉冲的Z箍缩装置而言, 开展负极性电流脉冲作用下单丝电爆炸实验研究是非常必要的. 因此, 采用多种诊断手段, 研究负极性电流脉冲作用下单丝电爆炸的特性对于理解丝阵早期行为和聚爆初始条件有重要意义, 而且对校验单丝电爆炸“冷启动”数值模拟也有直接的帮助.

本文利用皮秒级激光探针诊断手段, 开展了真空中负极性电流脉冲作用下铝单丝电爆炸的实验研究, 得到了不镀膜铝丝电爆炸的能量沉积过程. 为了增加金属丝中的沉积能量, 也开展了相应的镀膜铝丝的实验研究. 自发光强度采用光电倍增管测量, 而自发光的区域采用条纹相机拍摄. 根据阴影图像, 计算了高密度丝核区域的膨胀速度. 并且,

通过测量平行双丝电爆炸过程中的自发光辐射, 估算了低密度等离子体的膨胀速度. 纹影图像展示了不镀膜铝丝电爆炸过程中形成的核冕结构, 而镀膜铝丝对核冕结构的形成具有一定的抑制作用. 针对激光干涉图像进行了定量的分析, 重构了铝中性原子的密度分布.

## 2 实验装置及原理

1 kA 纳秒级电流脉冲源电气原理如图1所示.  $C_p$  为初级储能电容,  $C_s$  为次级储能电容, S 为填充氮气的自击穿开关.  $C_s$  采用同轴型低电感电容器, 有助于提高脉冲电流的上升率. 高压源对初级储能电容  $C_p$  充电, 当达到预设电压值后, 操作触发模块使氢闸流管导通,  $C_p$  通过脉冲变压器(变比 1 : 4)对次级储能电容  $C_s$  充电. 自击穿开关 S 导通之后,  $C_s$  向负载放电. 实验中, 电压、电流分别通过安装于 P 点的电阻分压器和罗氏线圈测量. 罗氏线圈为自积分式罗氏线圈, 并且通过标准 Pearson 线圈标定, 其灵敏度为 1.7 mV/A. 电阻分压器由 2 k $\Omega$  与 0.1  $\Omega$  电阻组成, 其灵敏度为 0.05 mV/V. 负载置于真空腔内, 实验中真空腔气压约为  $10^{-3}$  Pa, 以防止气体的击穿.

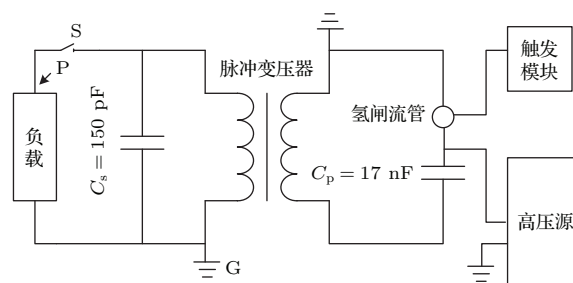


图1 脉冲电流源电气示意图

Fig. 1. The electrical schematic diagram of the pulsed-current source.

实验装置的电感对纳秒级电流脉冲下单丝电爆炸实验有比较大的影响. 由测量的电压计算电阻电压分量需要准确的负载部分的电感. 使用直径为 25 mm、长度为 2 cm 的粗铜杆代替金属丝进行短路实验. 短路电压、电流波形如图2所示. 铜杆的电阻忽略不计, 根据短路电流可以得到当负载部分总电感(铜杆电感以及实验装置负载端电感)  $L_c = 38$  nH 时, 电感电压与短路电压符合得较好. 圆柱形负载的电感可以通过下式计算<sup>[25]</sup>

$$L = 2l \ln \frac{D}{d}, \quad (1)$$

其中,  $l$  为负载的长度,  $D=70\text{ mm}$  为回流柱所在圆周直径,  $d$  为负载直径. 用于短路实验的铜杆电感  $L_1 = 4\text{ nH}$ , 实验装置负载端电感  $L_0 = L_c - L_1 = 34\text{ nH}$ . 当负载是直径为  $15\text{ }\mu\text{m}$ 、长度为  $2\text{ cm}$  的铝丝时, 金属丝电感  $L_w = 33\text{ nH}$ . 此时, 单丝电爆炸负载部分总电感为  $L = L_0 + L_w = 67\text{ nH}$ .

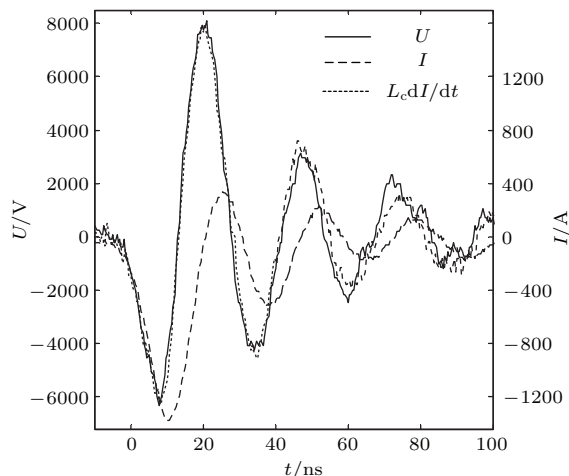


图2 直径为  $25\text{ mm}$ 、长度为  $2\text{ cm}$  的铜杆短路实验电压、电流波形以及电感  $L_c = 38\text{ nH}$  时计算的电感电压  
Fig. 2. The short-circuit waveforms of the voltage and current of  $25\text{ mm}$ -diameter,  $2\text{ cm}$ -long copper rod and the reconstructed inductive voltage for  $L_c = 38\text{ nH}$ .

利用 EKSPLA-PL2251C ( $30\text{ ps}$ ,  $532\text{ nm}$ ) 激光器, 建立了激光阴影、纹影和干涉的诊断系统. 单丝电爆炸自发光辐射相对强度通过光纤与光电倍增管测量. 激光成像均为  $4f$  ( $f$  为凸透镜焦距) 成像系统, 图像采用 Canon 相机记录. 光学诊断系统的光路如图 3 所示.

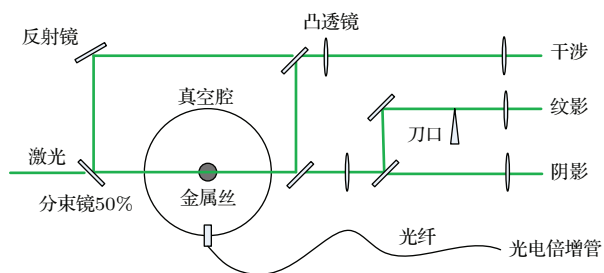


图3 激光阴影、纹影、干涉诊断光路图以及自发光辐射测量系统  
Fig. 3. The schematic diagram of the shadowgraphy, schlieren, interferometry diagnostics and the measurement system of the light emission.

激光束通过分束镜 ( $50\%$  透射,  $50\%$  反射) 分成物光和参考光. 参考光和物光形成马赫-曾德尔干涉诊断. 物光可直接成像构成阴影诊断, 也可以经过刀口之后成像形成刀口纹影诊断. 刀口纹影诊断

是根据冕层等离子体和丝核折射率不同来分辨等离子体区域和中性气体区域, 其原理如图 4 所示.

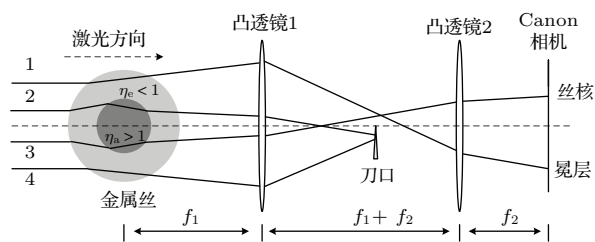


图4 刀口纹影原理示意图

Fig. 4. The schematic diagram of the knife-edge schlieren.

金属丝电爆炸形成冕层等离子体包围丝核的二元结构. 等离子体中离子对折射率的贡献可忽略不计<sup>[11]</sup>, 折射率以自由电子的贡献为主, 电子的折射率  $\eta_e < 1$ . 高密度丝核平均电离度很低<sup>[16]</sup>, 折射率以中性原子的贡献为主, 其折射率  $\eta_a > 1$ . 如图 4 所示, 金属丝和刀口与凸透镜 1 的距离均等于凸透镜 1 的焦距  $f_1$ , 刀口和成像相机与凸透镜 2 的距离均等于凸透镜 2 的焦距  $f_2$ . 光线 1 在冕层等离子体作用下向外偏折, 经过凸透镜 1 后可绕过刀口在相机中成像. 光线 2 经过中性原子和等离子体的综合作用, 经过凸透镜 1 后被刀口挡住不能在相机中成像. 同理, 光线 3 携带丝核的信息可以绕过刀口在相机中成像, 光线 4 被刀口挡住. 因此, 虚线两侧的成像平面分别显示冕层等离子体和丝核的分布信息.

### 3 实验结果

#### 3.1 电参数测量结果

负载为直径  $15\text{ }\mu\text{m}$ 、长度  $2\text{ cm}$  的不镀膜铝丝电爆炸典型的电压、电流、自发光辐射波形和条纹相机拍摄图像如图 5 所示. 实验中初级储能电容充电电压为  $16\text{ kV}$ , 自击穿开关充  $2$  个大气压氮气. 铝丝在焦耳加热的作用下温度不断升高, 当铝的密度高于临界密度时, 电阻率随温度的升高而增大<sup>[26-28]</sup>. 因此, 电压不断升高. 在  $t_0$  时刻脱附气体以及铝金属蒸汽在强电场作用下电离形成等离子体, 此时, 电流迅速地转移到冕层等离子体中, 电压开始下降, 总电流上升并伴随着自发光辐射. 电流上升率约为  $60\text{ A/ns}$ , 峰值为  $1.1\text{ kA}$ , 电阻电压峰值为  $27\text{ kV}$ .

由图 5 可以看出, 从电压崩溃时刻  $t_0$  起开始出现自发光辐射. 自发光辐射的强度和自发光区域都

逐渐增大. 随着放电电容能量释放, 总电流逐渐减小, 焦耳加热功率降低, 自发光辐射的强度逐渐降低. 并且, 由于等离子体的扩散导致密度降低, 发光区域也逐渐缩小. 由图 5 (a) 条纹相机图像发光区域逐渐增大的部分 ( $t_0$ —50 ns) 计算其扩张速度约为 12 km/s.

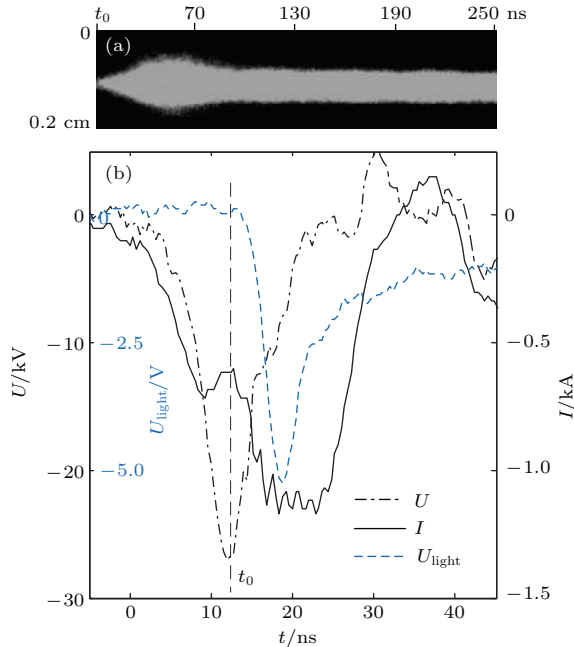


图 5 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的不镀膜铝丝电爆炸典型波形 (a) 条纹相机拍摄自发光区域; (b) 典型电压、电流以及自发光辐射强度波形

Fig. 5. The typical waveforms of the electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long uncoated aluminum wire: (a) The streak camera image for the light emission area; (b) the typical waveforms of the voltage, current and the intensity of light emission.

图 5 (b) 所示电压为测量总电压减去电感电压之后的电阻电压. 焦耳加热功率  $P = UI$ , 而阴极与阳极之间的电阻  $R = U/I$ . 由图 5 (b) 可以得到不镀膜铝丝电爆炸过程中焦耳加热功率、沉积能量以及电阻变化的规律, 如图 6 所示. 焦耳加热功率  $P$  和电阻  $R$  在电压崩溃时刻  $t_0$  达到峰值. 焦耳加热功率峰值  $P_{\text{max}} = 17 \text{ MW}$ , 电极间电阻的最大值  $R_{\text{max}} = 42 \Omega$ . 在  $t_0$  时刻之后电流转移到冕层等离子体中, 冕层等离子体的电阻率随着温度的升高而降低, 焦耳加热功率和电极间电阻逐渐降低. 在本文中, 沉积能量的单位采用 eV/atom, 表示平均每个原子中沉积的能量. 到电压崩溃时刻时, 金属丝内沉积能量为 2.4 eV/atom, 约为铝全部气化 ( $\sim 4 \text{ eV/atom}$ ) 所需能量的 60%. 由于电流迅速地转移到冕层等离子体中,  $t_0$  时刻之后的能量主要沉

积在冕层中.

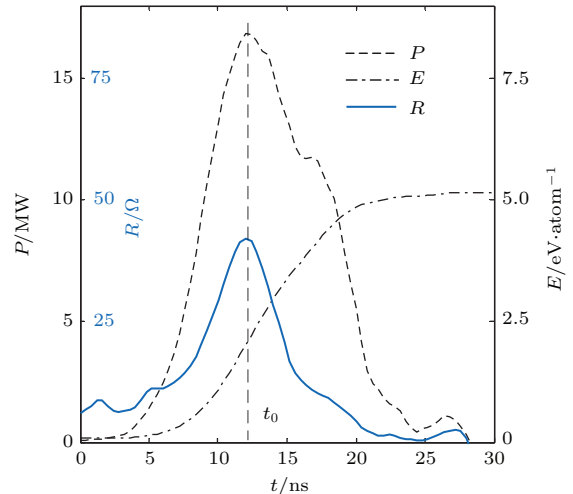


图 6 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的不镀膜铝丝电爆炸典型的焦耳加热功率、电阻以及沉积能量随时间的演化规律  
Fig. 6. The evolution of the joule heating power, resistance and energy deposition of the electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long uncoated aluminum wire.

假设在电压崩溃之前忽略金属丝的热膨胀, 电阻率  $\rho = R\pi d^2/(4l)$ . 根据实验结果可以得到金属丝电阻率与沉积能量的关系. 图 7 为不同发次中得到的沉积能量与电阻率的关系. 金属丝经历了熔化阶段 (10—25  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 图 7 中灰色区域) [25], 曲线 1 电阻率最大值达到 52  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 此时电极间的电阻为 59  $\Omega$ , 对应的沉积能量  $E_1 = 4.2 \text{ eV/atom}$ . 根据 Lee-More-Desjarlais 电导率模型 [29,30], 当密度 2.7  $\text{g/cm}^3$  时, 电阻率是 52  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 对应的温度约为 0.6 eV. 此时, 丝核的温度比较接近铝的临界点温度 0.69 eV [27]. 曲线 2 电阻率最大值为 32  $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ , 电极间电阻 36  $\Omega$ , 对应的沉积能量  $E_2 = 2 \text{ eV/atom}$ , 根据电阻率反推温度为 0.2 eV. 曲线 2 对应的金属丝的温度和沉积能量都小于曲线 1, 这说明铝丝在整体击穿之前, 已经存在局部的导电通道. 图 7 中虚线表示电压崩溃之后的能量沉积与电阻率的关系, 此时能量主要沉积在冕层等离子体中.

在很多发次的镀膜铝丝电爆炸实验中, 铝丝的沉积能量都处在 2—4 eV/atom 之间, 不能达到铝丝完全气化所需要的能量. 为了提高铝丝的沉积能量, 获得更好的电爆炸特性, 开展了镀膜铝丝的电爆炸实验. 图 8 为长度为 2 cm、直径为 15  $\mu\text{m}$ 、镀 2  $\mu\text{m}$  聚酰亚胺的铝丝电爆炸典型的电压、电流以及自发光辐射波形. 初级储能电容充电电压为 16 kV, 自击穿开关充 2 个大气压氮气. 与不镀膜铝

丝电爆炸相比, 镀膜铝丝电爆炸电压峰值和自发光辐射相对强度要高出约 60%.

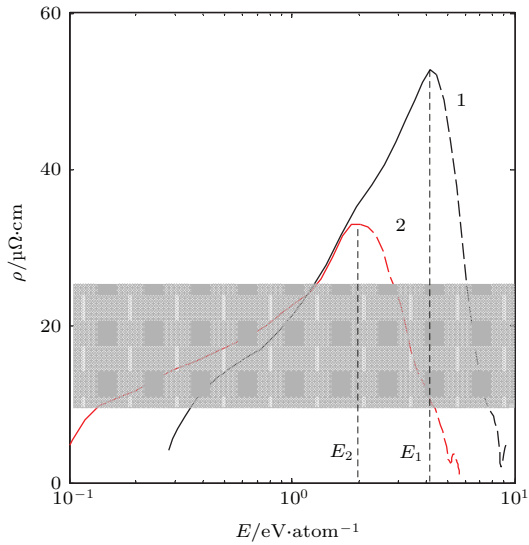


图 7 (网刊彩色) 不同发次中电阻率与沉积能量的关系  
Fig. 7. (color online) The relationship between resistivity and energy deposition derived from different shots.

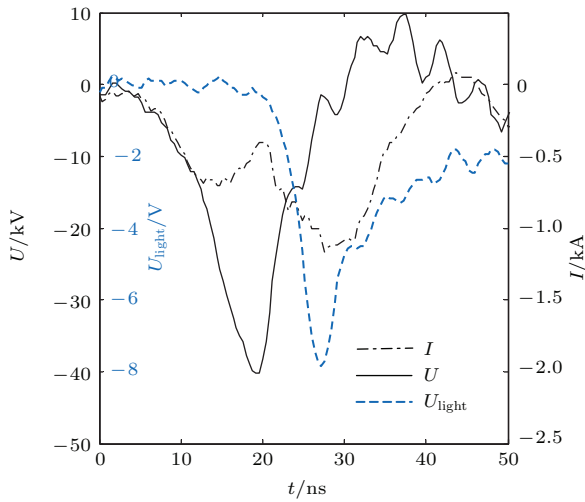


图 8 长度为 2 cm、直径为 15  $\mu\text{m}$ 、镀 2  $\mu\text{m}$  厚聚酰亚胺膜的铝丝电爆炸典型的电压、电流以及自发光辐射波形  
Fig. 8. The typical waveforms of the voltage, current and light emission of the electrical explosion of 2 cm-long, 15  $\mu\text{m}$ -diameter aluminum wire with 2  $\mu\text{m}$  polyimide coating.

镀膜铝丝电爆炸能量沉积过程如图 9 所示. 镀膜铝丝在电压崩溃时刻  $t = 20$  ns 时, 沉积能量  $E = 5$  eV/atom, 约为不镀膜铝丝电爆炸沉积能量的两倍, 达到了铝丝完全气化所需要的能量. 其能量沉积时间(金属丝开始流通电流到电压崩溃的时间)比不镀膜铝丝延长了 8 ns.

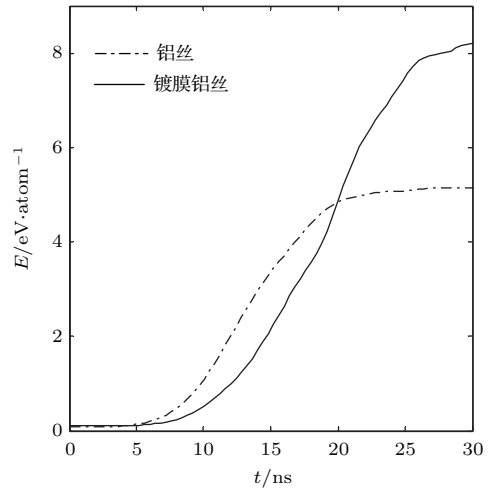


图 9 不镀膜铝丝与镀膜铝丝电爆炸能量沉积过程对比  
Fig. 9. The comparison of the energy deposition derived from the electrical explosion of uncoated and coated aluminum wire.

在单丝电爆炸过程中, 由于金属丝周围气体被击穿形成等离子体, 导致出现电压崩溃的现象, 并且伴随着电流转移到冕层等离子体中, 金属丝的能量沉积阶段结束. 一般认为, 金属丝表面的脱附气体、杂质和金属蒸汽在这一过程中都发挥着重要的作用 [8,23,31]. 从图 5、图 8 和图 9 可以得出, 镀膜铝丝与不镀膜铝丝电爆炸特性相比, 具有更长的能量沉积时间, 更多的能量沉积在金属丝中. 在本文的实验研究中, 镀膜铝丝与电极接触部分的聚酰亚胺膜没有去除. 聚酰亚胺通常需要几千伏的电压才能击穿 [20], 这也导致镀膜铝丝两端有更高的电压. 镀膜铝丝电爆炸过程中电极之间的电压可高达约 40 kV, 而不镀膜铝丝只有 27 kV. 然而, 驱动电流幅值没有明显的变化, 这增加了金属丝内的沉积能量. 另一方面, 聚酰亚胺膜可以阻止金属丝表面脱附气体、金属蒸汽和杂质的膨胀, 从而延缓了击穿过程, 增加金属丝内的沉积能量. 在镀膜铝丝电爆炸过程中, 由于绝缘膜的焦耳加热可以忽略不计, 其本身不会成为蒸气源, 可能是聚酰亚胺膜表面吸附的气体被击穿形成等离子体, 最终出现电压崩溃现象.

### 3.2 光学诊断结果

采用 EKSPLA-PL2251C (30 ps, 532 nm) 激光器建立了阴影、纹影以及干涉的诊断平台. 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的不镀膜铝丝电爆炸典型纹影以及阴影的图像见图 10. 激光探针时间为相对于电压崩溃时刻之后的时间. 图 10 (a) 为脉冲放

电之前初始金属铝丝的阴影图像,图 10(b)为 35 ns 时刻刀口纹影图像. 35 ns 时刻纹影展示了折射率  $\eta_a > 1$ ,  $\eta_e < 1$ ,  $\eta = 1$  的物质的分布信息. 结合图 4 刀口纹影原理示意图分析可以得到,纹影图像左侧为折射率  $\eta_a > 1$  的中性气体(丝核)区域,右侧为  $\eta_e < 1$  等离子体(冕层)区域,清晰地展示了金属丝电爆炸过程中形成的核冕结构. 放电通道内空白部分为中性气体与等离子体综合作用致使折射率  $\eta = 1$  的区域. 纹影图像中虚线为初始金属丝位置. 与纹影图像不同,阴影图像反映高密度区域的信息. 在单丝电爆炸的阴影诊断研究中,激光不能透射过的区域可以近似认为是高密度丝核区域,而激光可以透射过的区域近似归为低密度区域. 图 10(c)和图 10(d)分别为 35 和 140 ns 时刻阴影图像. 由阴影图像可以看出,在负极性电流脉冲的极性效应作用<sup>[25]</sup>下,金属丝在阴极侧的沉积能量略高于其他部分的沉积能量.

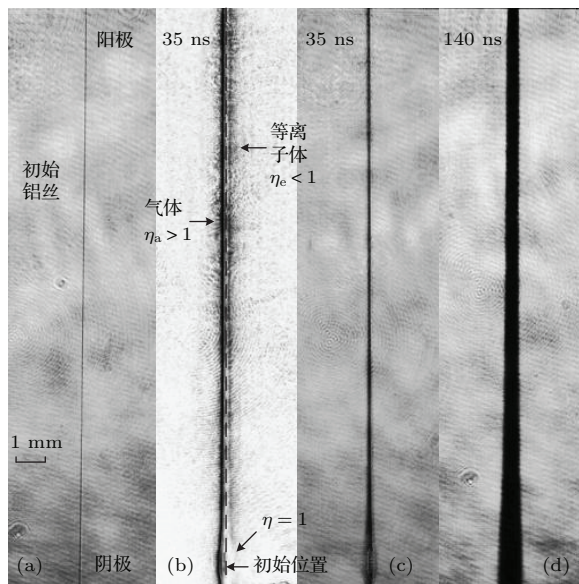


图 10 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的不镀膜铝丝电爆炸典型的纹影和阴影结果 (a) 脉冲放电之前的初始铝丝阴影图像; (b) 35 ns 时刻纹影图像; (c) 35 ns 时刻阴影图像; (d) 140 ns 时刻阴影图像

Fig. 10. The typical schlieren images and shadowgrams of the electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long uncoated aluminum wire: (a) The shadowgram of the initial aluminum wire before the current discharge; (b) the schlieren image at 35 ns; (c) the shadowgram at 35 ns; (d) the shadowgram at 140 ns.

图 11 是直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm、镀 2  $\mu\text{m}$  厚聚酰亚胺膜的铝丝电爆炸典型的纹影和阴影图像. 镀膜铝丝电爆炸沉积能量比不镀膜铝丝多,容易实现铝丝击穿前完全气化. 图 11(a)为脉冲放电

之前的镀膜铝丝阴影图像,图 11(b)为 41 ns 时刻镀膜铝丝纹影图像. 结合前文镀膜铝丝与不镀膜铝丝电爆炸过程的分析,其沉积能量高于完全气化的能量,因此,纹影图像中可以看到明显的中性气体通道,然而等离子体通道不明显. 与不镀膜铝丝电爆炸相比,核冕二元结构得到一定程度的抑制. 图 11(c)和图 11(d)分别为 53 和 156 ns 时刻阴影图像,从中可以看到很强的不均匀性,这是由于铝丝的机械强度比较低,镀膜的工艺受到限制,表面镀膜具有初始的不均匀性引起的.

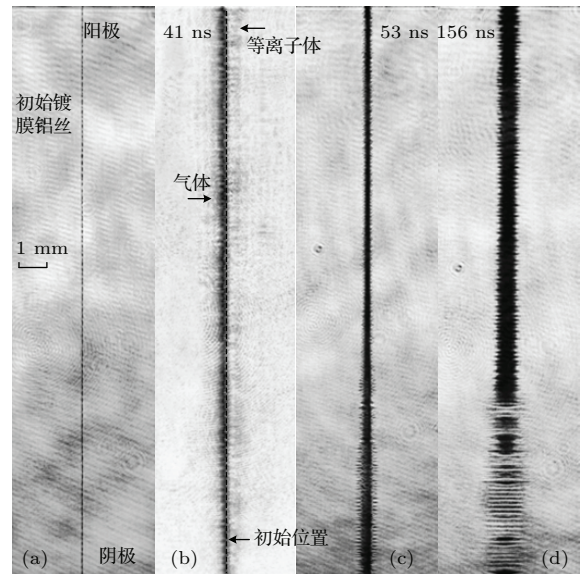


图 11 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的镀膜铝丝电爆炸典型的纹影和阴影结果 (a) 脉冲放电之前初始镀膜铝丝阴影图像; (b) 41 ns 时刻纹影图像; (c) 53 ns 时刻阴影图像; (d) 156 ns 时刻阴影图像

Fig. 11. The typical schlieren images and shadowgrams of the electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long coated aluminum wire: (a) The shadowgram of the initial coated aluminum wire before the current discharge; (b) the schlieren image at 41 ns; (c) the shadowgram at 53 ns; (d) the shadowgram at 156 ns.

图 10(c)、图 10(d)和图 11(c)、图 11(d)阴影图像清晰地展示了不能透射激光的高密度丝核区域的膨胀. 阴影图像不能反映可透射激光的低密度区域的信息. 在本文中,采用分析图像灰度值的方法来判断丝核的边界,计算金属丝中间部分的膨胀半径. 由阴影图像得到的不镀膜铝丝和镀膜铝丝在电爆炸过程中不同时刻的半径如图 12 所示. 不镀膜铝丝高密度丝核膨胀速度约为 2.2 km/s,而镀膜铝丝膨胀速度约为 5 km/s.

单丝电爆炸阴影诊断不能拍摄低密度等离子体壳的膨胀. 为了估算低密度等离子体的膨胀速

度,开展了平行双丝实验.通过测量自发光辐射的时间差来估算等离子体的膨胀速度.图13为193 ns时刻平行双丝电爆炸阴影图像,在193 ns时,高密度丝核已经非常接近,沉积能量高的区域已经出现比较明显的融合现象.图13中箭头所指的两条平行的细线为脉冲放电之前初始平行双丝的阴影图像,两根铝丝相距0.14 cm.由光纤、光电倍增管测量的平行双丝电爆炸自发光辐射如图14所示.

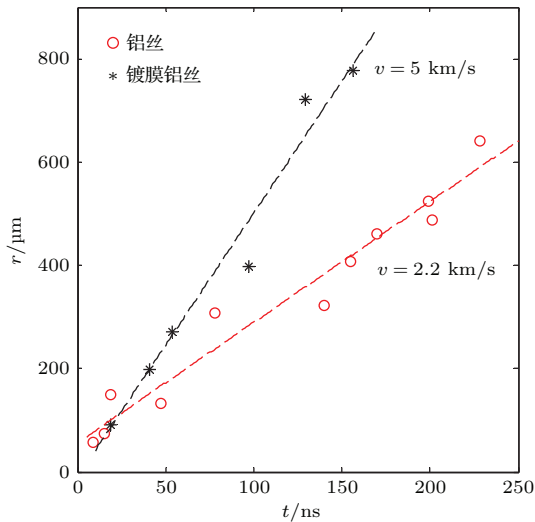


图12 (网刊彩色) 不镀膜铝丝和镀膜铝丝高密度丝核在不同时刻的半径  
Fig. 12. (color online) The radii of the electrical explosion of coated and uncoated aluminum wire at different times.

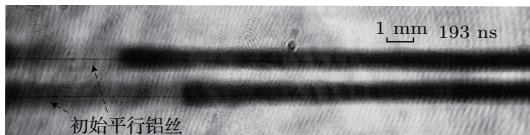


图13 平行双丝电爆炸193 ns时刻阴影图像  
Fig. 13. The shadowgram of the electrical explosion of two parallel wire at 193 ns.

在本文实验研究中,平行双丝电爆炸电流幅值约为1 kA.从图14可以看出,在 $t_1 = 120$  ns时刻之前,单丝和平行双丝电爆炸自发光辐射波形基本是重合的,这表明平行双丝电爆炸初始阶段金属丝之间的相互影响是可以忽略不计的,每根金属丝独立地进行加热、熔化、蒸发和电离的过程,最终形成冕层等离子体包围丝核的二元结构.伴随着丝核消融成为等离子体,等离子体也高速地向另一根金属丝方向膨胀.相向运动的等离子体在 $t_1$ 时刻开始融合、碰撞,这使得平行双丝电爆炸自发光辐射开始增强.由这个现象可以估算低密度等离子体的膨胀速度约为5.8 km/s.直到 $t_2$  ( $t_2 \approx 2t_1$ )时刻,平行

双丝自发光开始减弱.这可能是由于等离子体已经到达另一根金属丝的轴线位置,前沿的等离子体开始与另一根金属丝等离子体同向地向外膨胀,导致碰撞减少,并且此时放电电容的能量已经很低,因而自发光辐射开始减弱.

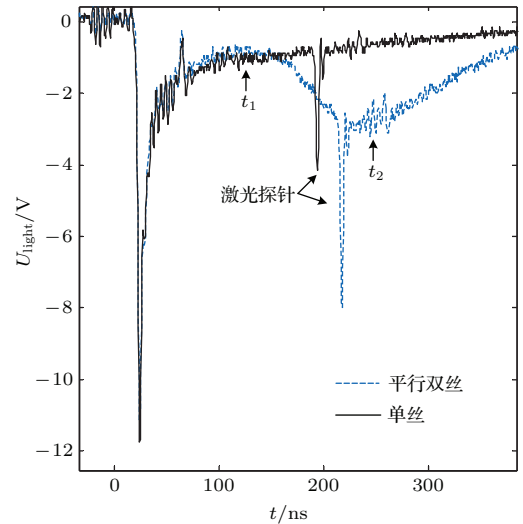


图14 (网刊彩色) 平行双丝以及单丝电爆炸自发光辐射对比  
Fig. 14. (color online) The comparison of the light emission derived from electrical explosion of two parallel wires and single wire.

干涉图像可以得到相移的信息,根据相移分布可以重构密度分布.当电子与中性原子的贡献都不可忽略的情况下,干涉条纹的相移可以表示成<sup>[16,25]</sup>

$$\delta(y) = \frac{2\pi\alpha}{\lambda} \int n_a dx - 4.49 \times 10^{-19} \lambda \int n_e dx, \quad (2)$$

其中, $\lambda$ 为激光波长; $\alpha$ 为铝原子极化强度; $n_a$ ,  $n_e$ 分别为中性原子数密度和电子数密度; $x$ ,  $y$ 分别为沿着和垂直于激光探针的方向.在低电离度等离子体和气体中,中性原子对折射率的贡献大于电子对折射率的贡献,因此,可以忽略电子的贡献,采用单波长干涉计算中性原子数密度.对于高温、完全电离的等离子体,电子对折射率的贡献大于中性原子对折射率的贡献,则可以忽略中性原子的贡献.然而,在电子和中性原子折射率相当的情况下,需要采用双波长干涉来确定电子和中性原子数密度.

图15(a)是直径为15  $\mu\text{m}$ 、长度为2 cm的不镀膜铝丝脉冲放电之前初始金属丝干涉图像,图15(b)为150 ns时刻不镀膜铝丝电爆炸干涉图像.对干涉条纹进行傅里叶变换等处理,可求得二维相移的分布<sup>[32]</sup>,如图15(c)所示.假设等离子体柱具有轴对称的特性,应用阿贝尔逆变换就可以重



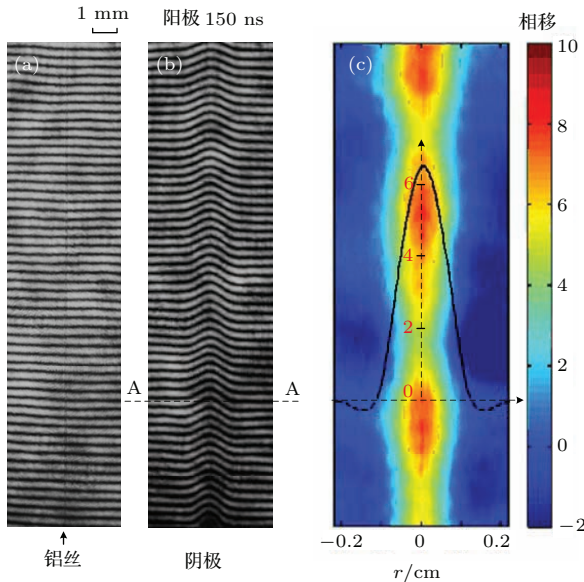


图 15 (网刊彩色) 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的不镀膜铝丝电爆炸干涉图像 (a) 脉冲放电之前初始铝丝干涉图像; (b) 150 ns 时刻电爆炸干涉图像; (c) 150 ns 时刻干涉图像二维相移分布

Fig. 15. (color online) The interferogram of the electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long uncoated aluminum wire: (a) The interferogram of the initial aluminum wire before the current discharge; (b) the interferogram at 150 ns; (c) the two-dimensional distribution of the phase shift recovered from the interferogram at 150 ns.

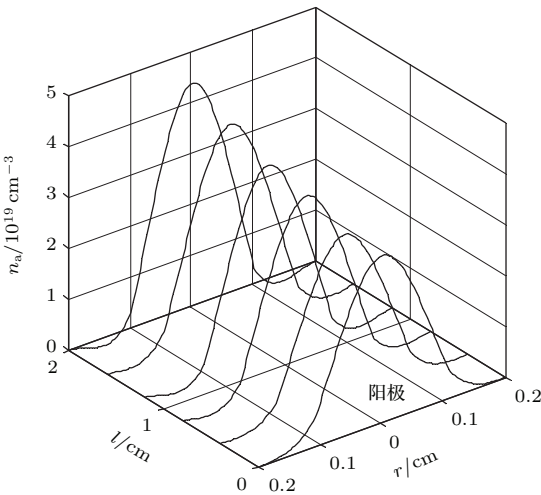


图 16 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的不镀膜铝丝电爆炸 150 ns 时刻铝原子密度分布

Fig. 16. The atomic density distribution of the electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long uncoated aluminum wire at 150 ns.

构粒子数密度. 为了清晰地展示相移的正负分布范围, 选取干涉图像的 A-A 截面, 其相移分布如图 15(c) 中曲线所示. 半径 0.1 cm 的区域内相移为正值, 此区域内物质折射率  $\eta > 1$ , 以中性原子(丝

核区域)为主. 距离中心轴 0.1—0.2 cm 的区域内相移为负值, 此区域内物质折射率  $\eta < 1$ , 以等离子体为主. 在气体区域, 中性原子对相移的贡献远远大于电子对相移的贡献. 因此, 忽略电子贡献部分, 根据简化的 (2) 式对相移进行阿贝尔逆变换得到中性原子的三维密度分布如图 16 所示.

### 4 结 论

本文开展了金属铝丝在负极性电流脉冲作用下电爆炸特性研究. 由直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的不镀膜铝丝电爆炸典型的电压、电流波形, 计算得到在电压崩溃时刻金属丝沉积能量为 2.4 eV/atom, 约为完全气化能量的 60%. 而相应的镀膜铝丝实验中, 金属丝沉积能量为 5 eV/atom, 实现了电压击穿前金属丝完全气化. 根据激光探针的阴影图像计算不镀膜铝丝高密度区域膨胀速度为 2.2 km/s, 而镀膜铝丝为 5 km/s. 通过测量平行双丝电爆炸过程中自发光辐射, 估算低密度等离子体膨胀速度约为 5.8 km/s. 假设金属丝电爆炸过程中具有轴对称结构, 通过干涉图像重构了三维中性原子粒子数密度分布. 金属丝展现出沉积能量的不均匀性, 在阴极附近粒子数密度为  $4.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , 阳极附近为  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . 在单丝电爆炸过程中, 即使在相同的外电路电参数情况下, 不同发次的实验中沉积能量会有差别. 充电电压为 16 kV, 自击穿开关充 2 个大气压氮气时, 金属丝的沉积能量变化范围为 2—4 eV/atom. 这可能是金属丝与电极的接触状态以及金属丝表面状态不同所带来的影响, 在今后的实验中需要进一步的研究.

### 参考文献

- [1] Xu R K, Li Z H, Yang J L, Xu Z P, Ding N, Guo C, Jiang S L, Ning J M, Xia G X, Li L B, Song F J, Chen J C 2005 *Chin. Phys.* **14** 1613
- [2] Bi X S, Zhu L, Yang F L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 078105 (in Chinese) [毕学松, 朱亮, 杨富龙 2012 物理学报 **61** 078105]
- [3] Zou X B, Mao Z G, Wang X X, Jiang W H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045206
- [4] Cl erouin J, Noiret P, Blottiau P, Recoules V, Siberchicot B, Renaudin P, Blancard C, Faussurier G, Holst B, Starrett C E 2012 *Phys. Plasmas* **19** 082702
- [5] Haines M G 2011 *Plasma Phys. Control. Fusion* **53** 093001

- [6] Spielman R B, Deeney C, Chandler G A, Douglas M R, Fehl D L, Matzen M K, McDaniel D H, Nash T J, Porter J L, Sanford T W L, Seamen J F, Stygar W A, Struve K W, Breeze S P, McGurn J S, Torres J A, Zagar D M, Gilliland T L, Jobe D O, McKenney J L, Mock R C, Vargas M, Wagoner T, Peterson D L 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2105
- [7] Beg F N, Lebedev S V, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G 2002 *Phys. Plasmas* **9** 375
- [8] Wu J, Li X W, Wang K, Li Z H, Yang Z F, Shi Z Q, Jia S L, Qiu A C 2014 *Phys. Plasmas* **21** 112708
- [9] Chittenden J P, Lebedev S V, Ruiz-Camacho J, Beg F N, Bland S N, Jennings C A, Bell A R, Haines M G, Pikuz S A, Shelkovenko T A, Hammer D A 2000 *Phys. Rev. E* **61** 4370
- [10] Ding N 2002 *China Nuclear Science and Technology Report* **00** 170 (in Chinese) [丁宁 2002 中国核科技报告 **00** 170]
- [11] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Struve K W 2008 *Phys. Rev. E* **77** 056406
- [12] Tkachenko S I, Mingaleev A R, Pikuz S A, Romanova V M, Khattatov T M, Shelkovenko T A, Ol'khovskaya O G, Gasilov V A, Kalinin Y G 2012 *Plasma Phys. Rep* **38** 1
- [13] Sarkisov G S, Sasorov P V, Struve K W, McDaniel D H 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 1674
- [14] Zhao J P, Zhang Q G, Yan W Y, Liu X D, Liu L C, Zhou Q, Qiu A C 2013 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **41** 2207
- [15] Zhao T, Zou X B, Zhang R, Wang X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075205
- [16] Wu J, Li X W, Li Y, Yang Z F, Shi Z Q, Jia S L, Qiu A C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 125206 (in Chinese) [吴坚, 李兴文, 李阳, 杨泽锋, 史宗谦, 贾申利, 邱爱慈 2014 物理学报 **63** 125206]
- [17] Sinars D B, Hu M, Chandler K M, Shelkovenko T A, Pikuz S A, Greenly J B, Hammer D A, Kusse B R 2001 *Phys. Plasmas* **8** 216
- [18] Sarkisov G S, Struve K W, McDaniel D H 2004 *Phys. Plasmas* **11** 4573
- [19] Duselis P U, Vaughan J A, Kusse B R 2004 *Phys. Plasmas* **11** 4025
- [20] Sinars D B, Shelkovenko T A, Pikuz S A, Hu M, Romanova V M, Chandler K M, Greenly J B, Hammer D A, Kusse B R 2000 *Phys. Plasmas* **7** 429
- [21] Li Y, Sheng L, Wu J, Li X W, Zhao J Z, Zhang M, Yuan Y, Peng B D 2014 *Phys. Plasmas* **21** 102513
- [22] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Struve K W, McDaniel D H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 035004
- [23] Beilis I I, Baksht R B, Oreshkin V I, Russkikh A G, Chaikovskii S A, Labetskii A Y, Ratakhin N A, Shishlov A V 2008 *Phys. Plasmas* **15** 013501
- [24] Sarkisov G S, Sasorov P V, Struve K W, McDaniel D H, Gribov A N, Oleinik G M 2002 *Phys. Rev. E* **66** 046413
- [25] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Cochrane K R, Struve K W, Deeney C, McDaniel D H 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046404
- [26] Shi Z Q, Wang K, Li Y, Shi Y J, Wu J, Jia S L 2014 *Phys. Plasmas* **21** 032702
- [27] Oreshkin V I 2009 *Tech. Phys. Lett.* **35** 36
- [28] Wang K, Shi Z Q, Shi Y J, Bai J, Wu J, Jia S L 2015 *Phys. Plasmas* **22** 062709
- [29] Lee Y T, More R M 1984 *Phys. Fluids* **27** 1273
- [30] Desjarlais M P 2001 *Contrib. Plasma Phys.* **41** 267
- [31] Hu M, Kusse B R 2004 *Phys. Plasmas* **11** 1145
- [32] Hipp M, Woisetschlager J, Reiterer P, Neger T 2004 *Measurement* **36** 53

# Experimental investigation on the electrical explosion of single aluminum wire in vacuum\*

Wang Kun<sup>1)</sup> Shi Zong-Qian<sup>1)†</sup> Shi Yuan-Jie<sup>1)</sup> Bai Jun<sup>1)</sup> Li Yang<sup>1)2)</sup> Wu Zi-Qian<sup>1)</sup>  
Qiu Ai-Ci<sup>1)2)</sup> Jia Shen-Li<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

( Received 19 June 2015; revised manuscript received 22 September 2015 )

## Abstract

The electrical explosion of single wire occurs in many application fields, such as wire-array Z-pinch, synthesis of the nanopowder, high-intensity magnetic field source, etc. The initial stage of the electrical explosion of single wire has a critical influence on the stagnation and X-ray yield in the wire-array Z-pinch. The impressive result of X-ray yield from wire-array Z-pinch is a major motivation to promote the research in this field. Although numerous studies have been carried out to gain a deep insight into the physics of the electrical explosion of single wire, more experimental investigations are necessary to optimize the energy deposition and expansion rate. It is important to investigate the characteristics of the electrical explosion of single wire under the negative polarity pulsed-current, which is adopted in many Z-pinch facilities. In this paper, the electrical explosion of aluminum wire under negative polarity pulsed-current in vacuum is investigated. In the present experiments, the light emission is measured by the photomultiplier and streak camera. A laser probe EKSPLA-PL2251C (30 ps, 532 nm) is adopted to perform the shadowgraphy, schlieren and interferometry diagnostics. The radial knife-edge schlieren scheme is employed to translate the regions with plasma refractivity and gas-type refractivity. The interferometry is constructed based on Mach-Zehnder interferometer. The shadowgram, schlieren image and interferogram are recorded by Canon cameras. The typical waveforms of the voltage, current and light emission from the electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long aluminum wire are derived. The energy deposition at the instant of voltage collapse is about 2.4 eV/atom (vaporization energy is about 4 eV/atom). In order to increase the energy deposited into the wire, the 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long aluminum wire with 2  $\mu\text{m}$  polyimide coating is exploded with the same electrical parameters. The energy deposition in the coated wire is about 5 eV/atom. From the shadowgram of the electrical explosion of uncoated aluminum wire, the expansion velocity of the high-density region can be estimated to be about 2.2 km/s. However, the expansion velocity of the high-density region of the polyimide-coated aluminum wire is about 5 km/s. The schlieren images show that the wire is exploded into a binary structure, i.e., a high-density core surrounded by the low-density corona. It should be noted that the energy deposition in the coated wire is larger than the vaporization energy, indicating that the aluminum wire is totally in gaseous state. Thus, the plasma region in the schlieren image of electrical explosion of coated wire is not distinct. The core-corona structure is depressed by the insulating coatings to a certain extent. The configuration of the parallel wire is adopted to estimate the expansion velocity of the plasma shell. The expansion velocity of the low-density plasma

\* Project supported by the National Science Foundation of China (Grant Nos. 51322706, 51237006, 51325705), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-11-0428), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China.

† Corresponding author. E-mail: [zqshi@mail.xjtu.edu.cn](mailto:zqshi@mail.xjtu.edu.cn)

is about 5.8 km/s. Two-dimensional distribution of the phase shift is derived through the interferogram. The central part of the gas-type material with a radius of 0.1 cm exhibits a large positive phase shift, while the peripheral plasma shows a small negative phase shift. The three-dimensional atomic density distribution is reconstructed in the gas-type distribution area in which the contribution of electrons is negligible. In our experiments, the energy deposition of the electrical explosion of uncoated wire ranges from 2 to 4 eV/atom. This may be caused by the initial conditions of the wire surface and the connection between the wire and electrode. Further research should be carried out for a better understanding of this phenomenon.

**Keywords:** electrical explosion of single wire, optical diagnosis, Z-pinch

**PACS:** 52.80.Qj, 52.70.Kz

**DOI:** [10.7498/aps.65.015203](https://doi.org/10.7498/aps.65.015203)