

真空及空气中金属丝电爆炸特性研究

王坤 史宗谦 石元杰 赵志刚 张董

Characteristics of electrical explosion of single wire in a vacuum and in the air

Wang Kun Shi Zong-Qian Shi Yuan-Jie Zhao Zhi-Gang Zhang Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 185203 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.185203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.185203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

真空中铝单丝电爆炸的实验研究

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

物理学报.2016, 65(1): 015203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.015203>

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>

## 真空及空气中金属丝电爆炸特性研究\*

王坤<sup>1)</sup> 史宗谦<sup>2)†</sup> 石元杰<sup>2)</sup> 赵志刚<sup>1)</sup> 张董<sup>1)</sup>

1) (河北工业大学, 河北省电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室, 天津 300130)

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

(2017年5月3日收到; 2017年6月24日收到修改稿)

开展了铝丝在真空和空气环境中的电爆炸特性研究. 从金属丝电爆炸的电压、电流波形得到了金属丝内的沉积能量, 并基于以上电参数特征分析了电爆炸产物的状态, 获得了空气中铝丝电爆炸电流暂停时间随初级储能电容充电电压的变化规律. 真空和空气中铝丝电爆炸在电压击穿时刻的沉积能量分别为2.8和6 eV/atom. 采用波长为532 nm、亚纳秒激光探针对金属丝电爆炸物理过程开展了高时空分辨率的阴影和纹影诊断. 阴影图像清晰地展示了不同气氛环境中高密度电爆炸产物的膨胀过程, 根据光学诊断图像分析了高密度丝核沉积能量的结构和空气中铝丝电爆炸产生的激波的膨胀轨迹. 真空和空气环境中高密度电爆炸产物的平均膨胀速度分别为1.9和3 km/s. 基于实验数据和输运参数模型, 估算了金属丝在电压击穿时刻的温度.

关键词: 金属丝电爆炸, Z箍缩, 核冕结构, 光学诊断

PACS: 52.80.Qj, 52.70.Kz

DOI: 10.7498/aps.66.185203

## 1 引言

金属丝电爆炸在纳米颗粒制备<sup>[1]</sup>、材料性质研究<sup>[2]</sup>、化石能源开采<sup>[3]</sup>以及丝阵Z箍缩<sup>[4]</sup>等领域有重要的应用. 单丝电爆炸阶段为丝阵Z箍缩烧蚀等后续物理过程提供了初始条件, 对内爆质量和X射线产额有重要甚至决定性的影响<sup>[5]</sup>. 丝阵Z箍缩以其超强的X射线辐射功率被认为是一种实现惯性约束聚变能源非常有竞争力的技术途径, 而这极大地促进了金属丝电爆炸的研究.

初看起来, 金属丝对脉冲电流的响应是十分简单的, 然而金属丝电爆炸的物理过程非常复杂. 金属丝在强烈的焦耳加热作用下发生熔化、蒸发, 电爆炸产物很快发展成为非线性磁流体力学性态<sup>[6]</sup>, 伴随此过程的电离和辐射也增加了其复杂程度. 金属丝经历了从固态、液态、气态到等离子体态的剧烈的相变过程, 最终形成了低密度、高温度的冕层等离子体包围低温度、稠密丝核的核冕结构. 随着

冕层等离子体的快速膨胀, 几乎全部的电流从丝核迅速地转移到冕层等离子体通道内<sup>[7]</sup>. 此后, 能量主要沉积在冕层中, 金属丝的阻性加热阶段结束. 金属丝电爆炸形成的核冕结构成为阻碍金属丝内能量进一步沉积的屏障. 人们研究了各种因素对金属丝内沉积能量的影响. 例如, 电流上升率<sup>[8]</sup>、脉冲电流极性<sup>[9]</sup>、镀膜<sup>[10,11]</sup>、焊接<sup>[12]</sup>、预热除气<sup>[13]</sup>等因素. 值得指出的是, 清华大学邹晓兵等<sup>[14]</sup>在电极与金属丝之间植入闪络开关实现了完全气化钨丝电爆炸, 这拓宽了提高金属丝内沉积能量的研究思路. 目前, 通过采取多种有利于能量沉积的措施, 可有效地抑制核冕结构的形成, 易熔和难熔材料的金属丝都实现了均匀气化<sup>[15]</sup>. 金属蒸气、表面杂质以及吸附气体的电压击穿是形成核冕结构的关键因素. 金属丝表面镀膜或者将金属丝置于水、空气等环境中, 能够延缓电压击穿过程, 使得更多的能量沉积在金属丝内. 在不同环境中, 金属丝电爆炸产物的形态及行为特征存在较大的差异. 因此, 研究不同气氛环境中金属丝电爆炸, 对于深入理解单

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51322706, 51237006, 51325705) 和河北省高等学校青年拔尖人才 (批准号: BJ2017038) 资助的课题.

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

丝电爆炸物理过程和更有效地应用这一技术是非常有意义的。

本文针对真空和空气环境中铝丝电爆炸开展了实验研究。根据铝丝电爆炸电参数波形获得了典型实验条件下不同气氛环境中金属丝的能量沉积过程,分析了空气中金属丝电爆炸电流“暂停”现象。采用激光探针对单丝电爆炸物理过程进行了高时空分辨率的诊断,展示了不同丝核的膨胀过程和激波的膨胀轨迹,并对空气中金属丝电爆炸纹影图像的物理内涵进行了详细的阐述。结合实验数据和输运参数模型,估算了金属丝在电压击穿时刻的温度。

## 2 实验装置及原理

金属丝电爆炸实验在小型的脉冲电流源上开展<sup>[8]</sup>。脉冲电流源的电气原理示意图见图1。高压直流电源对初级储能电容 $C_p$ 充电,通过数字延时触发器DG535和触发电路控制氢闸流管导通,使得放电电流经过脉冲变压器(变比1:4)流向次级储能电容 $C_s$ 。当次级储能电容电压升高到自击穿开关的击穿电压时,脉冲电流开始在金属丝负载中流通。

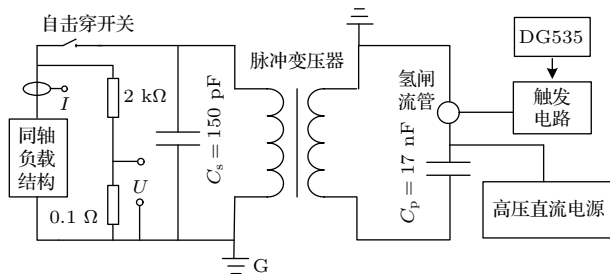


图1 脉冲电流源电气原理示意图

Fig. 1. The electrical schematic diagram of the pulsed current generator.

负载电流采用自积分式罗氏线圈测量,罗氏线圈的灵敏度为1.7 mV/A。金属丝两端的电压采用电阻分压器测量。电阻分压器由阻值为2 kΩ和0.1 Ω的无感电阻构成,其灵敏度为0.05 mV/V。罗氏线圈和电阻分压器的灵敏度通过50 Ω匹配电阻放电实验波形校验。

同轴负载结构安装在真空腔内,如图2所示。同轴负载结构由阴、阳电极和回流柱等组成。为了便于开展光学诊断研究,金属丝竖直固定在同轴负载结构的电极上。对于纳秒级金属丝电爆炸,负载

阻性电压是计算金属丝内沉积能量的重要参数。因此,需要准确计算实验装置的电感来获得阻性电压。采用直径为2.5 cm、长度为2 cm的粗铜杆代替金属丝开展短路实验。粗铜杆的电阻可忽略不计,测量的短路电压为电感电压。根据电流波形重构电感电压,当短路电感 $L_c = 38$  nH时,计算的电感电压与测量的短路电压基本一致。此时,短路电感包含粗铜杆电感和同轴负载结构电感。圆柱形负载的电感可通过下式计算<sup>[16]</sup>:

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

式中, $l$ 、 $d$ 分别为负载的长度和直径; $D$ 为回流柱所在圆周直径。短路实验中的粗铜杆的电感 $L_r = 4$  nH,同轴负载结构的电感 $L_0 = L_c - L_r = 34$  nH。直径为15 μm,长度为2 cm的金属丝负载电感 $L_w = 33$  nH,因此,采用金属丝负载时总电感 $L_1 = L_0 + L_w = 67$  nH。金属丝两端的阻性电压 $U_R = U - L_1 dI/dt$ 。实验中真空腔气压为 $10^{-3}$  Pa。

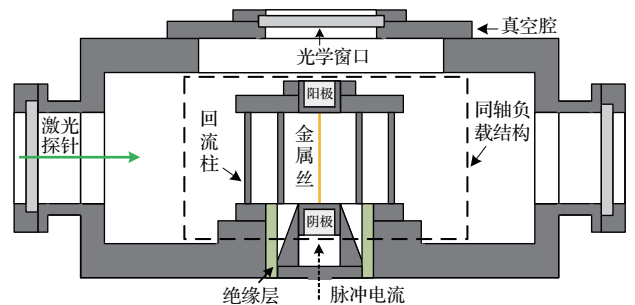


图2 实验装置同轴负载结构示意图

Fig. 2. The schematic diagram of the coaxial target unit in the experimental setup.

实验中利用波长为532 nm、脉宽为30 ps的激光探针(EKSPLA-PL2251C)搭建了阴影、纹影等光学诊断系统,光学诊断系统的光路图如图3所示。

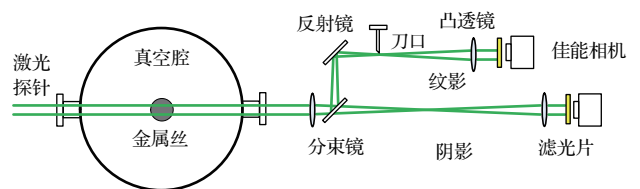


图3 光学诊断系统的光路图

Fig. 3. The beam path diagram of the optical diagnostic system.

激光探针照射金属丝后可在单反相机中形成阴影光学诊断。在阴影光路上设置分束镜(50%透射、50%反射),反射光经过刀口可形成刀口纹影诊

断. 刀口纹影诊断原理示意图见图4. 光学诊断成像采用典型的 $4f$  ( $f$ 为凸透镜的焦距)成像系统. 金属丝、刀口和相机与两面凸透镜的距离均为对应凸透镜的焦距. 金属丝电爆炸形成冕层等离子体包围丝核的核冕结构. 冕层等离子体对激光探针的折射率以电子为主, 其折射率 $\eta_e < 1$ . 高密度丝核的折射率以中性原子为主, 其折射率 $\eta_a > 1$ . 如图4所示, 光线1在冕层等离子体的作用下向外偏折, 经过凸透镜1后可绕过刀口在相机中成像. 然而, 光线2在冕层等离子体和丝核的综合作用下向内偏折, 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向内偏折可绕过刀口成像, 而光线4向外偏折被刀口挡住不能成像. 因此, 冕层等离子体和丝核分别在相机成像平面两侧成像. 光学诊断系统的分辨率为 $15\text{--}20\ \mu\text{m}$ . 脉冲电流源和光学诊断系统的同步及延时控制通过数字延时触发器DG535实现.

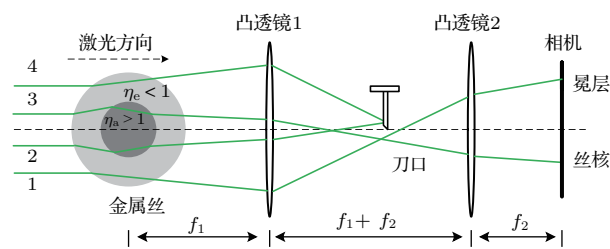


图4 刀口纹影原理示意图

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

### 3 实验结果与分析

在铝丝电爆炸实验中, 初级储能电容的充电电压为 $15\ \text{kV}$ , 自击穿开关填充氮气气压为 $3\ \text{atm}$  ( $1\ \text{atm} = 1.01325 \times 10^5\ \text{Pa}$ ). 长度为 $2\ \text{cm}$ 、直径为 $15\ \mu\text{m}$ 的铝丝在真空及空气环境中电爆炸的典型电压、电流和沉积能量波形如图5所示.

金属丝在剧烈的焦耳加热作用下, 温度迅速地升高. 当金属丝处于凝聚态(固态、液态)时, 电导率随着温度的升高而降低<sup>[17]</sup>, 因此, 随着脉冲电流的增大, 金属丝两端的电压也迅速地增大. 在放电初始阶段, 磁场和压强等对金属丝相变过程有重要影响的参数在径向并非均匀分布. 例如, 压强从金属丝中心轴到边界(金属丝与真空或空气分界面)逐渐降低, 而这会导致金属丝径向非均匀的熔化, 熔化区域的前沿从金属丝边界向中心轴传播<sup>[18]</sup>. 因

此, 如图5所示, 电压、电流波形并不能反映固-液相变过程中金属丝电导率跳变的特征.

金属丝内的沉积能量可用来表征金属丝所处的状态. 金属丝内沉积能量 $E$ 可通过下式计算:

$$E = \frac{1}{N} \int_0^t U_R I dt, \quad (2)$$

式中,  $N$ 为整根金属丝的粒子数. 在本文中, 沉积能量的单位选取 $\text{eV}/\text{atom}$ , 表示平均每个原子内的沉积能量. 根据金属丝内沉积能量推断, 真空中铝丝在 $t_1$ 时刻(空气中电爆炸相应参数带上标)沉积了 $0.2\ \text{eV}/\text{atom}$ 的能量, 此时金属丝温度达到熔点<sup>[19]</sup>, 开始进入固态向液态转变阶段, 并在 $\Delta t$ 时间内沉积了 $0.09\ \text{eV}/\text{atom}$ (熔化潜热)的能量使得铝丝完全熔化.

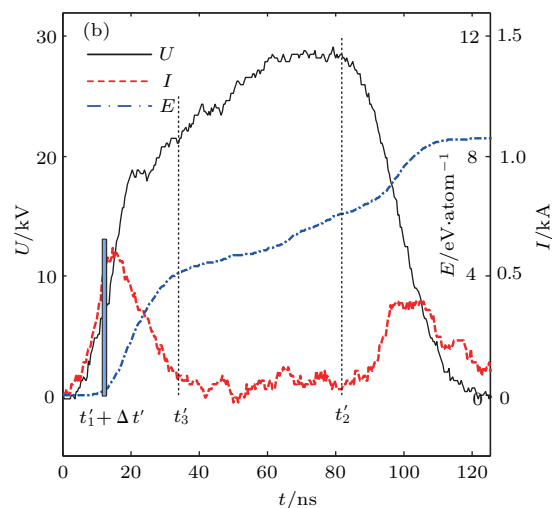
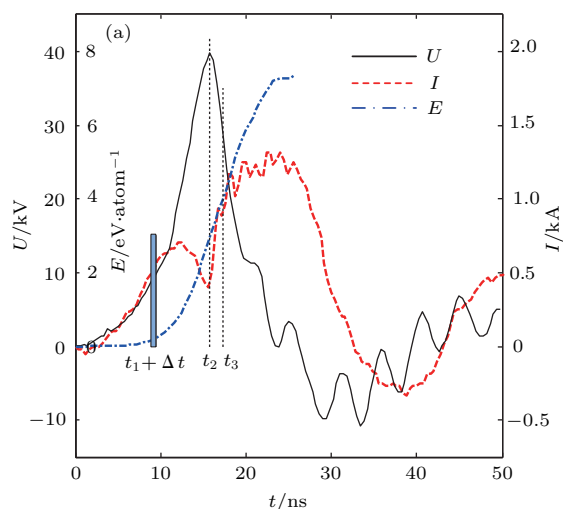


图5 长度为 $2\ \text{cm}$ 、直径为 $15\ \mu\text{m}$ 的铝丝电爆炸典型的电压、电流和沉积能量波形 (a) 真空环境; (b) 空气环境

Fig. 5. The typical waveforms for electrical explosion of  $2\ \text{cm}$ -long,  $15\ \mu\text{m}$ -diameter aluminum wire: (a) In vacuum; (b) in air.



液态丝核在脉冲电流剧烈的焦耳加热作用下温度进一步升高, 进而开始气化, 金属丝进入金属-非金属过渡区域<sup>[20]</sup>, 电爆炸产物的电导率降低, 致使电极之间的电阻增大, 流过金属丝的电流开始下降. 电流波形的第一个峰值时刻是金属丝气化过程的起点. 在真空环境中, 金属丝两端的电压迅速升高直到 $t_2$ 时刻发生电压击穿现象, 金属丝表面吸附气体及金属蒸气被击穿形成等离子体. 金属丝形成低密度、高温度的冕层等离子体包围高密度、低温丝核的核冕结构. 伴随着冕层等离子体的快速膨胀, 电流从丝核迅速地转移到冕层等离子体通道内, 金属丝的能量沉积阶段结束<sup>[21]</sup>. 在电压击穿时刻真空中铝丝电爆炸的沉积能量为2.8 eV/atom, 约占铝丝完全气化所需能量的70%. 在电压击穿之后的 $t_3$ 时刻, 金属丝内的沉积能量达到完全气化所需的4 eV/atom, 然而, 电压击穿之后的能量主要沉积在冕层等离子体中.

在空气环境中, 金属丝在开始气化之后, 电流逐渐降低, 但随后并未立刻发生电压击穿. 负载电流继续减小, 并出现了“暂停”现象. 金属丝内流通的电流逐渐降低到非常小的数值, 甚至是零, 金属丝两端的电压以相对缓慢的速率进一步升高. 电爆炸产物在电流暂停阶段继续膨胀了约48 ns之后发生电压击穿. 与真空中金属丝电爆炸不同的是, 铝丝在进入电流暂停阶段之前的 $t'_3$ 时刻就已经沉积了4 eV/atom的能量, 而在电压击穿 $t'_2$ 时刻金属丝内的沉积能量达到6 eV/atom, 沉积能量足够将金属丝转变为气体或等离子体状态. 从上述内容可以看出空气对电爆炸产物的形态演化有非常重要的影响, 一方面, 空气对金属丝表面爆炸发射的电子的运动有一定的抑制作用; 另一方面, 空气环境阻止了低密度金属蒸气和吸附气体的膨胀, 从而延缓了电压击穿过程, 增加了金属丝内的沉积能量.

直径为15  $\mu\text{m}$ 、长度为2 cm的铝丝在真空及空气环境中电爆炸的电阻演化过程如图6所示. 铝丝的电阻随着金属丝的相变过程发生了剧烈的变化. 在金属丝电爆炸初始阶段, 金属丝处于凝聚态, 电阻随着温度的升高而增大. 如图6(a)所示, 真空中铝丝电爆炸在 $t_2$ 时刻达到最大值62  $\Omega$ , 随后发生电压击穿现象. 由于冕层等离子体的形成, 金属丝的电阻迅速下降. 当 $t_3$ 时刻金属丝内的沉积能量达到铝丝气化焓时, 铝丝的电阻为35  $\Omega$ . 空气中铝丝电爆炸在电压击穿 $t'_2$ 时刻电阻高达816  $\Omega$ . 在电压

击穿之前的 $t'_3$ 时刻, 金属丝内沉积了使得铝丝完全气化的能量, 此时金属丝的电阻为204  $\Omega$ .

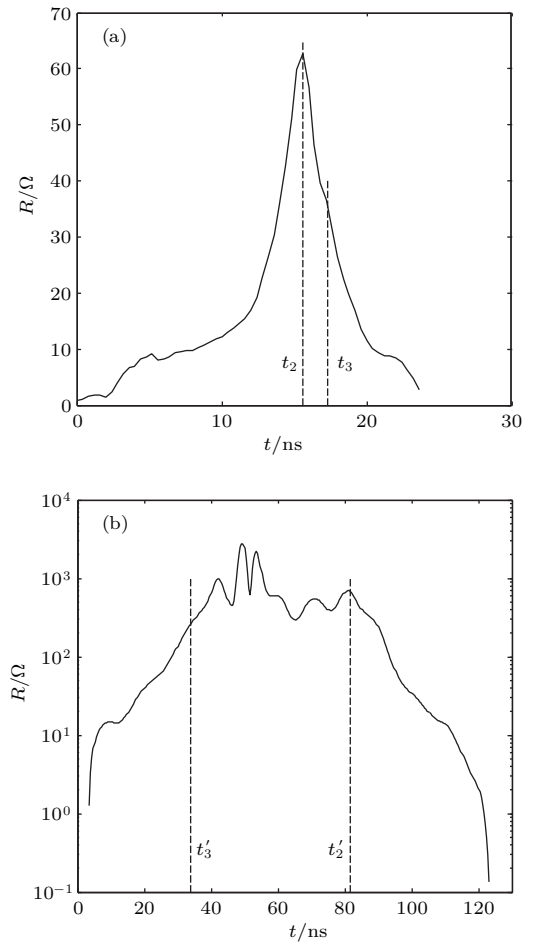


图6 铝丝电爆炸电阻演化过程 (a) 真空环境; (b) 空气环境

Fig. 6. The time evolution for resistance of the exploding aluminum wire: (a) In vacuum; (b) in air.

在电压击穿之前, 真空中金属丝的热膨胀是可以忽略的<sup>[5]</sup>. 因此, 忽略金属丝的热膨胀, 由图6中电阻演化过程可以得到电压击穿时刻铝丝的电导率为 $1.8 \times 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}$ . 根据输运参数模型<sup>[17]</sup>估算在 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ 的密度下,  $1.8 \times 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}$ 的电导率对应的温度约为0.9 eV. 而空气中铝丝电爆炸在电压击穿之前, 丝核在电流暂停阶段以3 km/s的平均速度膨胀了约48 ns. 因此, 由以上数据计算在电压击穿时刻铝丝的密度为 $6.6 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$ , 电导率为340 S·m. 同理, 估算空气中铝丝电爆炸产物在电压击穿时刻的温度为0.4 eV. 由于空气中铝丝电爆炸电流暂停阶段负载电流很小, 金属丝处于绝缘状态, 焦耳加热功率较低, 并且电爆炸产物膨胀速度较快, 因此, 在电压击穿时刻丝核温度低于真空中丝核的温度.

空气中铝丝电爆炸在电压击穿之前出现了电流暂停现象, 而这也是空气与真空中金属丝电爆炸物理过程的主要差异. 电流暂停时间  $dt$  随初级储能电容充电电压的变化规律如图 7 所示. 由于金属丝表面状态、金属丝与电极之间的接触情况难以保持一致, 不同发次电爆炸实验数据有一定的离散性. 图 7 中数据为若干发次电爆炸实验测量的电流暂停时间的平均值, 可以看出平均电流暂停时间随着初级储能电容充电电压增大而减小, 并且随着电压的增大, 电流暂停时间降低的速率减小. 当初级储能电容的充电电压从 13 kV 升高到 17 kV 时, 电流暂停时间从 95 ns 降低到 17 ns.

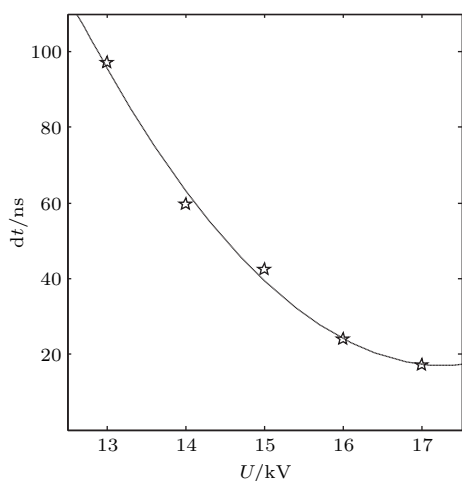


图 7 空气中铝丝电爆炸电流暂停时间随初级储能电容充电电压的变化规律

Fig. 7. The dependence of the dwell time for exploding aluminum wire in air on the initial charging voltage of the primary energy-storage capacitor.

高时空分辨率诊断是研究电爆炸产物形态和沉积能量结构的重要手段. 图 8 是直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 的铝丝在真空及空气中电爆炸不同时刻的阴影图像. 阴影图像反映高密度丝核的形态, 从阴影图像灰度值分析, 真空及空气环境中铝丝电爆炸的高密度丝核的中间部分的平均膨胀速度分别为 1.9 km/s 和 3 km/s. 在电压击穿时刻, 空气中铝丝电爆炸沉积能量高于真空中铝丝电爆炸, 因此阴影图像得到的空气中电爆炸丝核的膨胀速度高于真空中电爆炸丝核的膨胀速度.

在放电早期阶段, 由于受到光学诊断系统分辨率的限制, 不能清晰地区分真空及空气中铝丝电爆炸高密度电爆炸产物形态的细微差异. 真空中铝丝电爆炸的丝核呈现出极性效应, 阴、阳极附近区域的丝核膨胀速度高于中间部位丝核的膨胀速度, 膨

胀速度高的区域金属丝内的沉积能量也高.

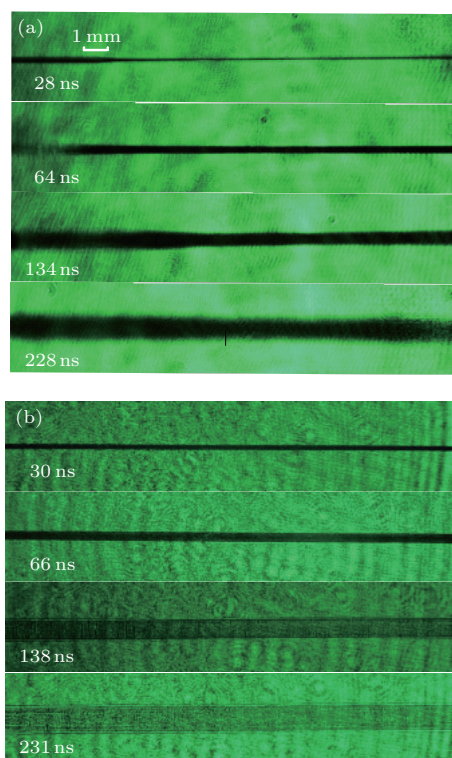


图 8 (网刊彩色) 直径为 15  $\mu\text{m}$ 、长度为 2 cm 铝丝电爆炸在不同时刻阴影图像 (a) 真空环境; (b) 空气环境

Fig. 8. (color online) The shadowgram for electrical explosion of 15  $\mu\text{m}$ -diameter, 2 cm-long aluminum wire at different times: (a) In vacuum; (b) in air.

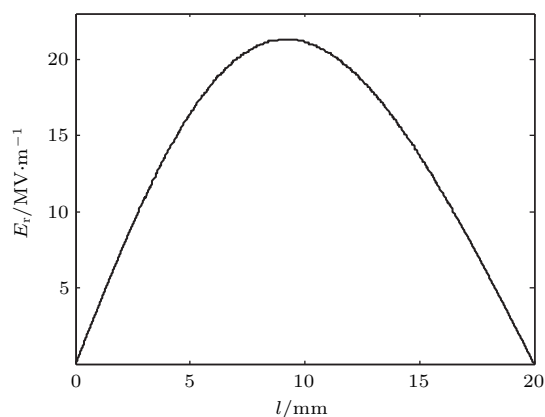


图 9 电压击穿时刻金属丝表面径向电场分布

Fig. 9. The distribution of the radial electric field on the wire surface at the instant of voltage breakdown.

利用 Comsol 软件针对图 2 中所示的实验装置同轴负载结构进行建模, 计算电爆炸过程中电场的分布. 在电压击穿时刻金属丝表面的径向电场分布如图 9 所示. 铝丝电爆炸实验中采用负极性脉冲电流, 负载电流从回流柱流向金属丝. 径向电场的方向从回流柱指向金属丝, 而这有助于金属丝表面电子的爆炸发射. 爆炸发射的电子在强电场的作用

下导致金属蒸气电离, 进而发生电压击穿现象. 从图9可以看出, 径向电场在靠近阴极约9 mm处达到最大值2.13 MV/m. 然而, 由于铜电极对径向电场有一定的屏蔽作用, 电极附近的径向电场很小. 因此, 金属丝中间部位比电极附近区域更容易发生电压击穿, 电极附近区域内的金属丝会沉积更多的能量, 膨胀速度也更快. 与真空中铝丝电爆炸形成的丝核相比, 由于空气对金属丝表面爆炸发射电子以及电子的运动都有比较强的抑制作用, 因此, 空气中铝丝电爆炸的沉积能量更加均匀.

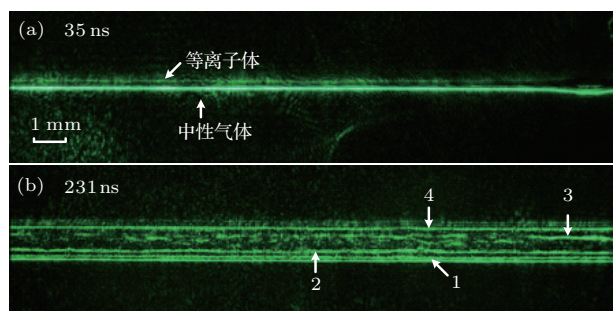


图10 (网刊彩色) 铝丝电爆炸纹影图像 (a) 真空中铝丝电爆炸35 ns时刻纹影图像; (b) 空气中铝丝电爆炸231 ns时刻纹影图像 (图中箭头1表示激波前沿, 2表示丝核的高密度梯度前沿, 3表示等离子体高密度梯度前沿, 4表示压缩空气层)

Fig. 10. (color online) The schlieren images for exploding aluminum wires: (a) The schlieren image for exploding aluminum wire in vacuum at 35 ns; (b) the schlieren image for exploding aluminum wire in air at 231 ns (arrow 1 for shockwave front, arrow 2 for the high-gradient front of the high-density core, arrow 3 for the high-gradient front of the plasma, arrow 4 for the compressed air layer).

随着电爆炸产物的演化, 真空和空气环境中铝丝电爆炸丝核的形态和沉积能量的结构出现了较大的差别, 最为显著的差异是空气中铝丝电爆炸在放电后期丝核周围产生了激波、压缩空气等通道. 本文通过刀口纹影来区分不同性质电爆炸产物的分布通道. 图10为真空及空气中铝丝电爆炸的纹影图像. 图10(a)为真空中铝丝电爆炸在35 ns时刻的纹影图像. 从图10可以看出, 真空中铝丝电爆炸形成了典型的核冕二元结构. 由于冕层等离子体和丝核对激光探针的折射率不同, 激光探针照射冕层等离子体和丝核后会出现不同方向的偏折. 如图4所示, 经过冕层等离子体的激光探针向外偏折, 而经过丝核的激光探针向内偏折. 在两面凸透镜的焦点处设置了刀口, 等离子体通道和丝核通道的高密度梯度前沿分别在成像平面两侧成像. 由于真空

中单丝电爆炸形成的等离子体密度较低, 纹影图像中等离子体通道与丝核区域相比亮度较低. 随着等离子体的快速膨胀, 冕层等离子体的密度进一步降低将不能在纹影图像中成像. 图10(b)为空气中铝丝电爆炸在231 ns时刻纹影图像. 与真空中铝丝电爆炸相比, 空气中铝丝电爆炸纹影图像展示了更为复杂的电爆炸产物, 此时丝核的半径约为0.7 mm. 从图10(b)可以看出: 图像下半部分通道分别是激波前沿(箭头1)和丝核高密度梯度前沿(箭头2); 图像上半部分通道分别是冕层等离子体高密度梯度前沿(箭头3)和压缩空气层(箭头4), 压缩空气层的位置处于等离子体通道与激波之间.

在空气等环境中产生激波是单丝电爆炸的重要应用. 本文对空气中铝丝电爆炸开展阴影和纹影光学诊断, 清晰地拍摄到激波的演化过程. 激波前沿的膨胀轨迹如图11所示. 从图11可以看出激波前沿的膨胀速度随着时间的演化逐渐减小. 激波膨胀轨迹数据的拟合曲线为  $r = 55 \times (t - 80)^{0.5}$ , 由此可以得到激波开始传播的时间约为80 ns, 而这与空气中铝丝电爆炸电压击穿时刻  $t_3$  (约81 ns) 是相对应的. 电压击穿之后, 出现剧烈的相爆过程, 进而激波开始产生并在空气中传播.

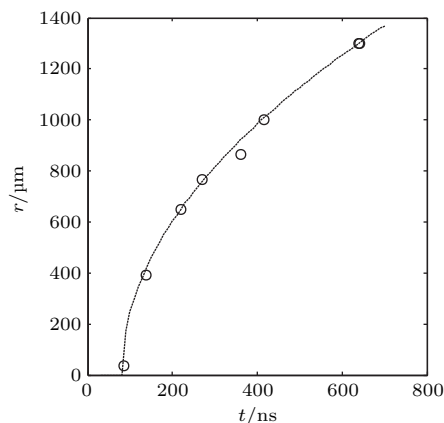


图11 空气中铝丝电爆炸激波前沿膨胀轨迹

Fig. 11. The expansion trajectory of the shockwave front for the exploding aluminum wire in air.

## 4 结 论

本文针对铝丝在真空及空气环境中电爆炸开展了实验研究. 真空中铝丝电爆炸在电压击穿时刻沉积能量为2.8 eV/atom, 约占铝丝气化焓的70%, 金属丝最大电阻为62 Ω. 与真空中铝丝电爆炸相比, 空气中铝丝电爆炸在电压击穿之前已沉积了



4 eV/atom 的能量, 之后金属丝进入电流暂停阶段. 在经历约 48 ns 的电流暂停阶段之后, 发生电压击穿现象. 此时, 铝丝内的沉积能量为 6 eV/atom, 电阻为 816  $\Omega$ . 532 nm 激光探针阴影图像展示了不同背景气氛环境中高密度电爆炸产物和激波的膨胀轨迹. 从阴影图像估算真空中高密度丝核的平均膨胀速度为 1.9 km/s, 而空气中高密度电爆炸产物的平均膨胀速度为 3 km/s. 从输运参数模型估算真空及空气中铝丝电爆炸在电压击穿时刻丝核的温度分别为 0.9 和 0.4 eV. 纹影图像展示了真空和空气中铝丝电爆炸产物的分布存在较大差异. 真空中单丝电爆炸形成了典型的核冕二元结构, 而空气中铝丝电爆炸纹影图像显示除了等离子体和高密度丝核的通道外, 还存在激波以及压缩空气层.

### 参考文献

- [1] Zou X B, Mao Z G, Wang X X, Jiang W H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 045206
- [2] Cl  rouin 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
- [3] Zhang Y M, Qiu A C, Zhou H B, Liu Q Y, Tang J P, Liu M J 2016 *High Voltage Eng.* **42** 1009 (in Chinese) [张永民, 邱爱慈, 周海滨, 刘巧珏, 汤俊萍, 刘美娟 2016 高压技术 **42** 1009]
- [4] Haines M G 2011 *Plasma Phys. Control. Fusion* **53** 093001
- [5] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Cochrane K W, Struve K, Deeney C, McDaniel D 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046404
- [6] Shi Z Q, Shi Y J, Wang K, Jia S L 2016 *Phys. Plasmas* **23** 032707
- [7] Duselis P U, Kusse B R 2003 *Phys. Plasmas* **10** 565
- [8] Shi Z Q, Wang K, Shi Y J, Wu J, Han R Y 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 243302
- [9] Sarkisov G S, Sasorov P, Struve K, McDaniel D, Gribov A, Oleinik G 2002 *Phys. Rev. E* **66** 046413
- [10] Wang K 2017 *Phys. Plasmas* **24** 022702
- [11] Li Y, Sheng L, Wu J, Li X, Zhao J, Zhang M, Yuan Y, Peng B 2014 *Phys. Plasmas* **21** 102513
- [12] Shi Y J, Shi Z Q, Wang K, Wu Z Q, Jia S L 2017 *Phys. Plasmas* **24** 012706
- [13] Beilis I I, Baksht B R, Oreshkin V I, Russkikh A G, Chaikovskii S A, Labetskii A, Ratakhin N A, Shishlov A V 2008 *Phys. Plasmas* **15** 013501
- [14] Shi H T, Zou X B, Wang X X 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 134105
- [15] Wu J, Li X W, Wang K, Li Z, Yang Z, Shi Q Z, Jia S L, Qiu A C 2014 *Phys. Plasmas* **21** 112708
- [16] Wang K, Shi Z Q, Shi Y J, Bai J, Li Y, Wu Z Q, Qiu A C, Jia S L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 015203 (in Chinese) [王坤, 史宗谦, 石元杰, 白骏, 李阳, 武子骞, 邱爱慈, 贾申利 2016 物理学报 **65** 015203]
- [17] Wang K, Shi Z Q, Shi Y J, Bai J, Wu J, Jia S L 2015 *Phys. Plasmas* **22** 062709
- [18] Tkachenkon S I, Gasilov V, Ol'khovskaya O 2011 *Math. Models Comput. Simul.* **3** 575
- [19] Chase Jr M W 1998 *J. Phys. Chem. Ref. Data Monograph* **9**
- [20] Desjarlais M P 2001 *Contrib. Plasma Phys.* **41** 267
- [21] Hu M, Kusse B R 2004 *Phys. Plasmas* **11** 1145



# Characteristics of electrical explosion of single wire in a vacuum and in the air\*

Wang Kun<sup>1)</sup> Shi Zong-Qian<sup>2)†</sup> Shi Yuan-Jie<sup>2)</sup> Zhao Zhi-Gang<sup>1)</sup> Zhang Dong<sup>1)</sup>

1) (Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

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

( Received 3 May 2017; revised manuscript received 24 June 2017 )

## Abstract

The characteristics of the electrical explosion of aluminum wire in a vacuum and in the air are investigated. The process of energy deposition is derived from the typical voltage and current waveforms. The energy deposited into the aluminum wire at the instant of voltage breakdown is very important for estimating the state of the metal wire. Energy of  $\sim 2.8$  eV/atom is deposited into the aluminum wire in a vacuum at the instant of voltage breakdown. However, the current flowing through the load for the electrical explosion of aluminum wire in the air decreases to zero gradually after the onset of the phase explosion, coming into the dwell stage. Energy of about 6 eV/atom is deposited into the wire at the instant of voltage breakdown for exploding aluminum wire in the air. Temperatures of 0.9 eV and 0.4 eV are estimated for exploding aluminum wires in a vacuum and in the air according to the experimental data combined with the transport coefficient model. The dwell stage is a significant feature for exploding aluminum wires in the air. The dependence of the dwell time on the initial charging voltage of the primary energy-storage capacitor is derived. The dwell time decreases from 95 ns to 17 ns with the increase of the initial voltage from 13 kV to 17 kV. The optical diagnostic equipment with high spatial and temporal resolution is constructed by a 532 nm, 30 ps laser probe. The shadowgram demonstrates the expansion trajectories of the high-density products in different media. The expansion velocities of the high-density core for exploding aluminum wire in a vacuum and in the air are 1.9 km/s and 3 km/s, respectively. The energy deposition into the aluminum wire near the electrode region is slightly higher than in the middle region due to the polarity effect, which is analyzed by the distribution of the radial electric field on the wire surface. Because the explosive emission of the electrons is suppressed substantially by the air, the structure of the energy deposition for exploding aluminum wire in the air is more homogeneous. The structures of the energy deposition and the expansion trajectory of the shock wave are analyzed. The schlieren diagnostic is used to translate the exploding products with different refractivities. The schlieren images for exploding aluminum wire in a vacuum show that the metal wire is exploded into two-phase structure, i.e., the low-density high-temperature corona plasma surrounding the high-density low-temperature core. However, the schlieren images for exploding aluminum wire in the air demonstrate that in addition to the core-corona structure, the channels of shock wave and compressed air layer are formed. The expansion trajectory of the shockwave front is derived according to the optical diagnostics.

**Keywords:** electrical explosion of single wire, Z-pinch, core-corona structure, optical diagnostic

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

**DOI:** 10.7498/aps.66.185203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51322706, 51237006, 51325705) and the Program for the Top Young and Middle-aged Innovative Talents of Higher Learning Institutions of Hebei, China (Grant No. BJ2017038).

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