

## 空气中单丝和丝阵电爆炸特性的比较\*

李琛<sup>1)</sup> 韩若愚<sup>1)†</sup> 刘毅<sup>2)</sup> 张晨阳<sup>1)</sup> 欧阳吉庭<sup>1)</sup> 丁卫东<sup>3)</sup>

1) (北京理工大学物理学院, 北京 100081)

2) (华中科技大学, 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

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

(2019年11月27日收到; 2020年1月15日收到修改稿)

本文开展了500 J储能下、大气空气介质中微秒脉冲电流源驱动平面型铜丝阵负载电爆炸放电特性研究, 并与铜单丝电爆炸进行了比较. 实验中保持铜电极间距2 cm不变, 选择2—16根直径100  $\mu\text{m}$ 的铜丝组成平面型铜丝阵, 同时选择直径50—400  $\mu\text{m}$ 的单根铜丝作为对照, 对电爆炸过程中负载电压、回路电流与光辐射强度进行测量, 计算得到电功率、沉积能量等参数, 研究质量变化对铜导体电爆炸过程的影响规律; 特别地, 对于相同质量下单丝与丝阵负载情况进行比较. 实验结果表明, 随着质量增加, 单丝电爆炸气化与电离过程变缓, 宏观表现为电压峰值时刻延后、半高宽增大(约0.07  $\mu\text{s}$ 增至约0.64  $\mu\text{s}$ ); 与之不同, 虽然丝阵电爆炸时刻随质量增加延后, 但气化与电离持续时间变化不明显, 电压峰半高宽稳定在 $0.11 \pm 0.01 \mu\text{s}$ , 且击穿发生前丝阵负载沉积能量低于同质量单丝负载. 光辐射强度方面, 丝阵电爆炸光辐射强度比三次同质量下单丝电爆炸分别强约28%, 49%和52%. 造成单丝与丝阵电爆炸过程差异的原因可能有两个方面: 一是比表面积的差异使得细丝的相变过程更加迅速, 表现为相同质量下细丝丝阵比粗单丝爆炸过程快; 二是电热/磁流体不稳定性在丝阵与单丝中发展程度不同, 表现为光强-时间曲线的差异.

关键词: 金属丝电爆炸, 平面型铜丝阵负载, 强耦合等离子体, 光辐射测量

PACS: 52.80.Qj, 52.59.Qy, 52.27.Gr, 52.70.Kz

DOI: 10.7498/aps.69.20191797

## 1 引言

金属丝电爆炸作为脉冲功率与放电等离子体领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>, 是指当脉冲电流流过金属丝时, 在焦耳加热的作用下, 金属丝急剧相变, 先后经历固态、液态、气态与等离子体态, 最终发展形成等离子体通道的过程. 金属丝电爆炸能够将储能单元中储存的电能/磁能转化为其他形式的能量, 如热能、辐射能、冲击波能等.

将多根金属丝按照一定结构排布, 可构成金属丝阵. 真空中丝阵电爆炸后形成具有一定空间分布

的等离子体, 在洛伦兹力的作用下内爆获得高温高密度等离子体(称为Z箍缩等离子体), 产生大功率脉冲X射线辐射<sup>[4-7]</sup>, 美国Sandia实验室曾使用嵌套式双层丝阵结构得到功率290TW、总能量1.9MJ的X射线源, 丝阵负载动能转化为X射线辐射能量效率高达60%<sup>[8]</sup>, 为惯性约束聚变提供了可能的技术途径.

相比于大型脉冲功率装置驱动的真空中丝阵Z箍缩, 一般工程应用更关注介质中的金属丝电爆炸, 特别是冲击波与光辐射效应, 如惰性气体介质中的电爆炸制备纳米粉<sup>[9,10]</sup>、水介质中电爆炸产生冲击波<sup>[11]</sup>、含能材料的电爆炸点火等<sup>[12]</sup>. 对于冲击

\* 国家自然科学基金(批准号: 51907007)、中国博士后科学基金(批准号: 2019M650511)和强电磁工程与新技术国家重点实验室开放基金(批准号: AEET 2019KF006)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: r.han@bit.edu.cn

波现象, 通过研究铜单丝电爆炸不同阶段沉积能量对冲击波参数的影响, 发现气化过程对冲击波形成起主导作用<sup>[13,14]</sup>; 对于光辐射现象, Sandia 实验室的 Sarkisov 等<sup>[15]</sup> 与以色列理工学院的 Grinenko 等<sup>[16]</sup> 分别针对纳秒尺度真空与水中丝爆过程中光辐射强度随时间的变化关系开展了研究, 他们认为金属丝电爆炸过程中的光辐射主要由放电过程中的等离子体光辐射和爆炸产物的高温辐射以及复合辐射引起. 但是, 介质中冲击波的产生依赖于放电通道气化膨胀, 而等离子体在该过程中形成, 阻碍能量在放电通道的进一步沉积, 致使产生的冲击波衰减快、总能量低. 因此, 在不改变负载结构的前提下, 单丝电爆炸冲击波强度存在上限. 采用金属丝阵替代金属单丝被认为是一种增强冲击波强度的有效手段. 清华大学的 Qian 等<sup>[17]</sup> 用 16 根 50  $\mu\text{m}$  金属丝阵替代 1 根 200  $\mu\text{m}$  金属单丝后, 发现水中冲击波峰值从 30 MPa 提升到了 90 MPa. 帝国理工学院的 Bland 等<sup>[18]</sup> 在 MACH 装置 (2 MA, 450 ns) 上开展了去离子水中丝阵内爆汇聚冲击波的研究, 在丝阵中心区域得到了压强大于 300 GPa、密度约 3  $\text{g}/\text{cm}^3$  的温密物质 (超临界水). Krasik 等<sup>[19]</sup> 开展了水中平面型、圆柱形、球形、锥形丝阵负载的电爆炸, 能够产生高达 TPa 量级的汇聚冲击波. 可见, 介质中金属丝阵与单丝电爆炸的过程与效应并不相同, 金属丝阵电爆炸作为冲击波源、含能材料点火源有更大应用潜力<sup>[20,21]</sup>.

然而, 已有丝阵电爆炸的研究多关注电爆炸发生后的演化过程, 如金属丝芯消融与内爆过程<sup>[22]</sup> (Z 箍缩)、不同介质汇聚冲击波冲击压缩过程<sup>[23]</sup> (水中丝阵) 等, 对于丝阵早期过程关注较少, 表现为丝阵电爆炸特性研究较少、过程物理图像不够清

晰, 不能为冲击波源技术、含能材料起爆技术提供有效支撑, 制约了电爆炸技术的发展与应用. 因此, 需要开展针对介质中金属丝阵电爆炸早期行为的研究.

为实现内爆, 丝阵电爆炸的研究多采用圆柱型与球型丝阵构型<sup>[24–26]</sup>, 也有一些研究人员使用结构简单、可操作性强、易于诊断的平面丝阵负载<sup>[27]</sup>. 本研究采用平面铜丝阵负载开展研究, 铜丝相变过程清晰、不易形成冕层, 方便研究丝阵电爆炸的基本过程. 且有研究表明, 平面型铜丝阵能够将系统储能有效地转化为水中动能, 产生可观的冲击波参数<sup>[28,29]</sup>, 对后续工程应用具有直接参考价值. 此外, 考虑到固定初始储能时, 平面丝阵负载可通过增加丝根数的方法增大质量, 对负载电感影响小, 便于比较研究. 本研究采用大气压空气介质, 与真空相比, 空气能够一定程度上抑制表面放电, 且更符合实际应用工况; 与水介质相比, 空气介质能够较为真实地反映光辐射信息, 有助于理解丝阵电爆炸过程.

## 2 实验平台与方法

图 1(a) 为实验装置示意图, 实验所用脉冲驱动源由直流高压电源与 6  $\mu\text{F}$ , 50 kV 脉冲电容器组成, 实验时将电容器充电至所需电压, 触发三电极开关, 电脉冲通过同轴高压电缆对金属丝负载放电, 实现电爆炸过程. 金属丝负载由一对铜电极固定并置于高 400 mm、直径 377 mm 的金属腔体内, 电脉冲加于高压电极, 地电极通过回流柱与金属腔构成回流结构, 铜电极结构如图 1(b) 所示, 实验在大气压下进行.

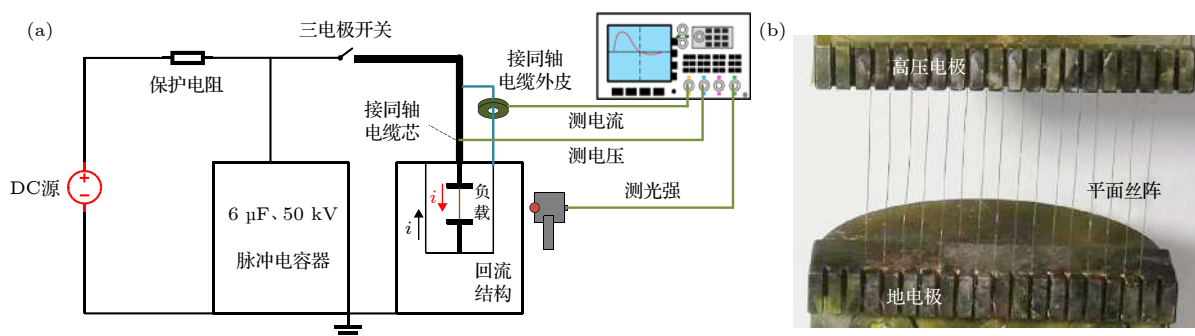


图 1 实验装置图 (a) 电路示意图; (b) 丝阵负载实物图

Fig. 1. Experimental setup: (a) Circuit diagram; (b) wire array load.

实验中固定电源充电电压+12.9 kV, 此时初始系统储能为 500 J. 实验用铜丝纯度为 99.99%, 密度为 8.9 g/cm<sup>3</sup>. 固定铜电极间距 2 cm, 单丝电爆炸实验选用直径为 50, 100, 150, 200, 300 和 400 μm 的铜单丝负载, 丝阵电爆炸实验中选用 2, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 16 根直径 100 μm 的铜单丝组成丝阵负载, 每根丝间距为 2 mm. 其中 200 μm 铜单丝与 4 根 100 μm 铜丝阵、300 μm 铜单丝与 9 根 100 μm 铜丝阵、400 μm 铜单丝与 16 根 100 μm 铜丝阵质量 (初始横截面积) 相同. 实验测量参数为电压信号、电流信号和光强信号, 分别由 TektronixP6015A 探头 / 自制阻容分压器、Pearson101 线圈和 ET-2030 光电探头测得, 测量信号通过 Tektronix DPO4104B 示波器储存. 负载阻性电压、电功率、沉积能量由下式计算 [2]:

$$U_R = U - L_W \frac{dI}{dt} - L_S \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

$$P = U_R I, \quad (2)$$

$$W = \int_T P dt, \quad (3)$$

式中  $U$  表示探头测得的电压值;  $L_W$  表示金属丝电感;  $L_S$  表示测点至金属丝间设备结构的固有电感,  $T$  表示电爆炸各个阶段持续的时间.

根据放电参数变化的特征, 当初始储能充足时, 对于金属丝电爆炸的过程划分, 可人为地分为固态加热、液化、液态加热、气化-相爆、击穿/电离、等离子体六个阶段  $T_1$ — $T_6$  [30,31], 如图 2 所示. 对于沉积能量而言, 通常关注至击穿发生前阶段  $T_1$ — $T_4$ .

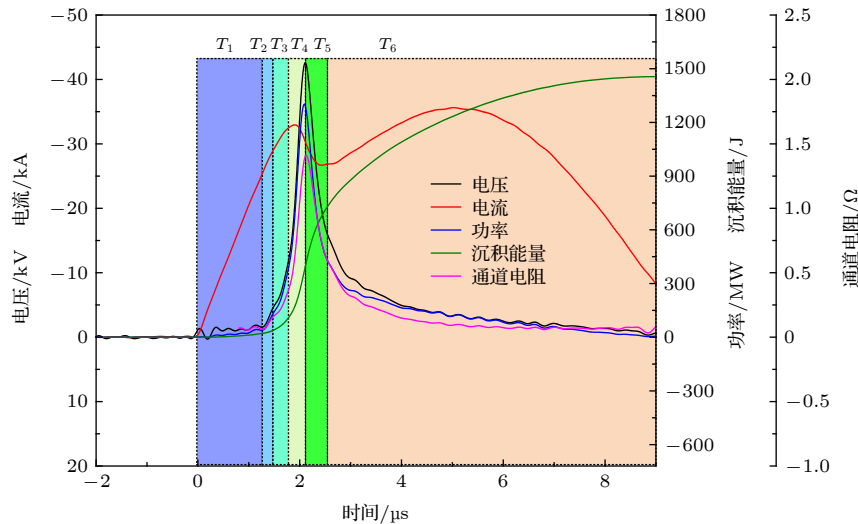


图 2 金属丝电爆炸放电参数与阶段划分

Fig. 2. Parameters and stages of explosive discharge of wire.

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 质量变化对铜单丝负载放电参数的影响

对于直径 50—400 μm 铜单丝电爆炸, 典型电压、电流、电功率、沉积能量以及电阻的波形如图 3 所示, 铜丝直径已在图中注明.

从图 3 中可以看出, 随着铜单丝质量增加, 电爆炸电压、电流、电功率以及电阻峰值均发生变化, 且峰值出现时间推迟; 电压峰半高宽展宽; 沉积能量增加, 但当质量达到一定值时反而减小. 具体参

数值见表 1 (部分数据取自 NIST-JANAF 数据库).

铜丝直径由 50 μm 增至 400 μm 的过程中, 电压峰值出现时间由 0.26 μs 延至 6.45 μs, 第一个电流峰值下降点也不断延后, 直径 300 μm 时, 拐点已经出现至电流下降沿, 这是因为随着金属丝质量增加, 相变至气化所需时间增加, 电爆炸时刻推迟; 电压峰值由 46.2 kV 降至 7.1 kV, 这是因为随金属丝质量增加, 其初始电阻不断减小, 在金属丝相变至气化过程中, 丝电阻大幅度增加 (单丝 50 μm 时, 电阻的双峰可能是因为放电时的高频振荡所致), 但气化时粗丝电阻仍远小于细丝电阻, 虽然随

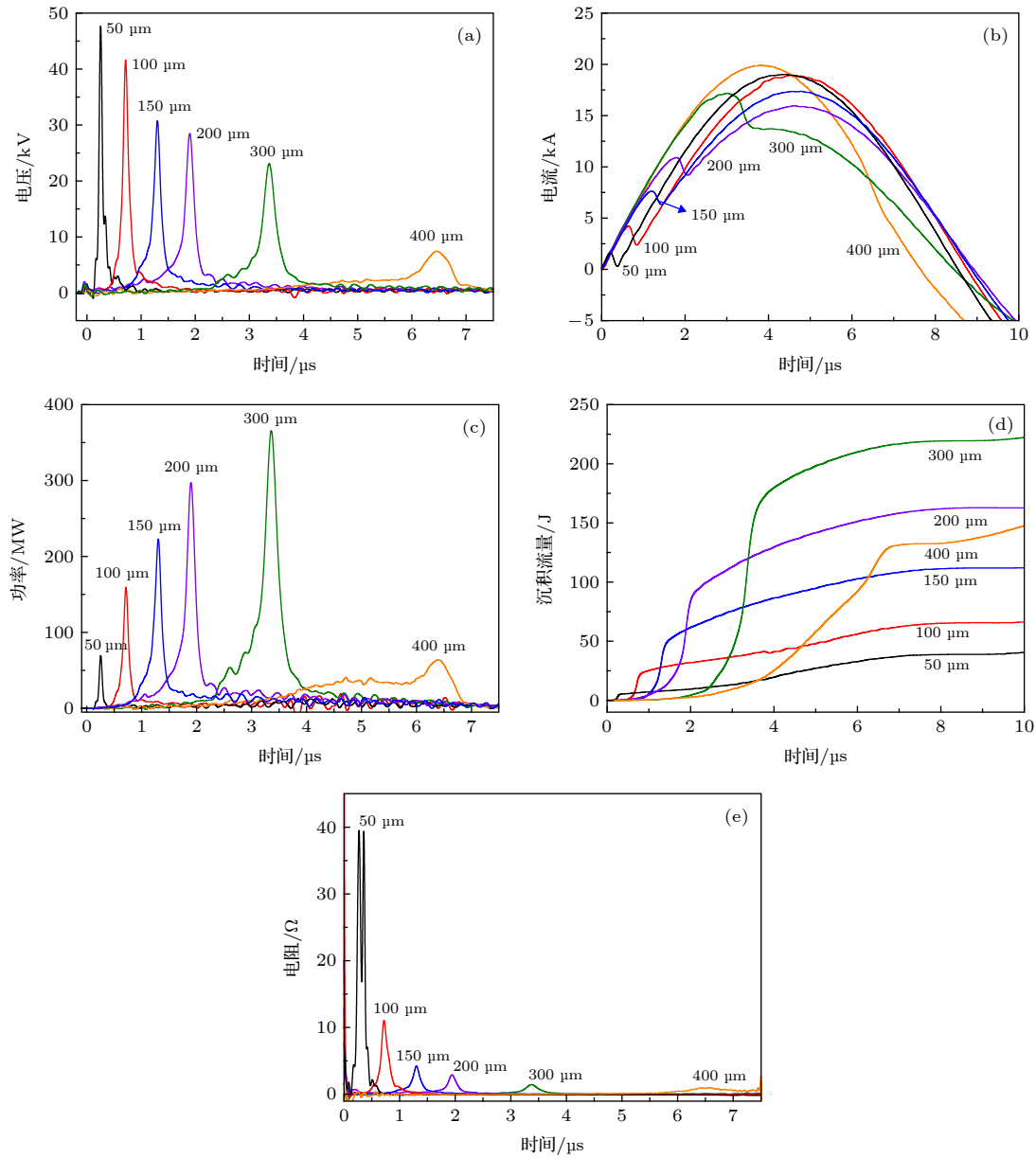


图 3 铜单丝不同质量(直径)下参数随时间的变化规律 (a) 电压; (b) 电流; (c) 电功率; (d) 沉积能量; (e) 电阻

Fig. 3. Parameter variation of copper single wire with time varying under different mass (diameter): (a) Voltage; (b) electric current; (c) power; (d) deposited energy; (e) resistance.

表 1 铜单丝不同质量(直径)下的参数比较

Table 1. Parameter comparison of copper single wire under different mass(diameter).

参数种类	铜单丝直径/ $\mu\text{m}$					
	50	100	150	200	300	400
电压峰值/kV	$46.2 \pm 2.7$	$42.1 \pm 1.5$	$31.7 \pm 1.9$	$28.9 \pm 0.7$	$24.1 \pm 1.1$	$7.1 \pm 0.4$
电压峰值出现时间/ $\mu\text{s}$	$0.26 \pm 0.01$	$0.77 \pm 0.06$	$1.30 \pm 0.03$	$1.93 \pm 0.02$	$3.40 \pm 0.04$	$6.45 \pm 0.04$
电压峰半高宽/ $\mu\text{s}$	$0.07 \pm 0.01$	$0.12 \pm 0.01$	$0.14 \pm 0.01$	$0.17 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$	$0.64 \pm 0.02$
电压峰前沉积能量/J	$2.7 \pm 0.2$	$13.9 \pm 0.5$	$34.7 \pm 2.3$	$61.6 \pm 3.4$	$115.8 \pm 4.1$	$123.8 \pm 5.8$
电流第一个过零点前沉积能量/J	$40.2 \pm 1.4$	$70.3 \pm 3.3$	$118.6 \pm 4.9$	$159.2 \pm 5.1$	$217.5 \pm 8.4$	$138.9 \pm 4.6$
初始电阻/ $\text{m}\Omega$	178.3	44.6	19.8	11.1	4.9	2.8
开始气化所需能量/J	0.5	2.0	4.5	8.0	18.0	32.2
完全气化所需能量/J	2.2	8.6	19.4	34.5	77.2	137.9



丝直径增大, 气化过程推迟, 粗丝气化时电流大于细丝, 但电压峰值仍随质量增大呈现下降趋势; 金属丝相变至气化阶段, 经历相爆过程, 电导率急剧下降, 伴随通道中电流下降, 电极间电压上升, 促进电离过程, 最终形成等离子体通道. 宏观表现为电压升高至顶点后快速下降, 称为电压坍塌, 有的文献称为击穿过程<sup>[32]</sup>. 实验表明, 铜丝直径由 50  $\mu\text{m}$  增至 400  $\mu\text{m}$  时, 电压峰半高宽由 0.07  $\mu\text{s}$  增至 0.64  $\mu\text{s}$ , 这说明随质量增加, 电爆炸过程中气化与电离击穿过程持续时间增长, 即电压的上升沿、下降沿更缓; 从图 3 中也可以看出, 除丝直径 400  $\mu\text{m}$  情况, 电功率、沉积能量均随质量增大而增大, 当丝直径为 400  $\mu\text{m}$  时, 电参数与沉积能量均发生明显变化, 此时电压崩前沉积能量低于完全气化所需要的能量, 且从图 3(b) 中可以看出金属丝气化前电流已经开始下降, 说明初始储能已经不足; 其次实验在短路情况下测得回路电阻约为 76.0  $\text{m}\Omega$ , 而负载初始电阻为 2.8  $\text{m}\Omega$ , 由于 400  $\mu\text{m}$  时相较其他情况气化过程慢得多, 即在相变过程中的一定时间内, 电容初始储能有大部分消耗在回路电阻上; 这些可能是电参数产生显著差异的主要原因. 电压崩前沉积能量随质量增大而增多, 但可以看到直径 400  $\mu\text{m}$  情况下, 电压崩前沉积能量约占第一个电流过零点前沉积能量的 89.1%, 说明铜丝质量增加至一定程度时, 大部分的沉积能量用于电离击穿前的相变阶段, 即  $T_1-T_4$  阶段.

### 3.2 质量变化对铜丝阵负载放电参数的影响

分别使用 2—16 根 100  $\mu\text{m}$  铜单丝组成金属丝阵, 其电爆炸得到的电压、电流、电功率、沉积能

量以及电阻的波形如图 4 所示, 铜丝阵根数已在图中注明.

铜丝阵负载放电特性与铜单丝负载有一定相似之处, 随铜丝阵质量 (根数) 增加, 电压、电阻峰值总体呈现下降趋势, 电流峰值增大, 且电压峰与第一个电流峰出现时间延后; 电功率与沉积能量变化趋势不随质量单调变化, 呈现先增大, 后趋于不变, 再减小的趋势; 同时, 电压峰半高宽基本不随质量改变. 具体参数值见表 2.

铜丝根数由 2 根增至 14 根时, 电压峰值由 41.3 kV 降至 21.2 kV, 峰值出现时间由 1.06  $\mu\text{s}$  延至 4.32  $\mu\text{s}$ . 但在丝阵根数为 10 根时, 电压、电功率峰值下降明显, 后保持稳定, 可以看到丝根数达到 10 根后, 电压崩前沉积能量已经不足以使金属丝完全气化. 丝阵电爆炸中电压峰半高宽基本不随质量增加发生改变, 稳定在  $0.11 \pm 0.01 \mu\text{s}$ , 与单根 100  $\mu\text{m}$  铜丝电爆炸情况类似. 说明了初始储能足够的条件下, 丝阵电爆炸过程很可能为每根细丝同时爆炸, 细微的差异可能是因为每根细丝电爆炸时间上的不同步性所致, 详见 Rososhek 等<sup>[28]</sup> 拍摄的水中平面型丝阵电爆炸条纹图像结果. 此外, 丝阵电爆炸沉积能量不随质量增加而单调变化, 丝根数由 2 根增至 8 根时, 沉积能量由 84.3 J 增至 157.0 J, 而后随丝根数增加沉积能量基本不再发生变化. 但丝根数 16 根时, 其电参数、沉积能量均发生突变, 其原因可能与单丝 400  $\mu\text{m}$  情况相同, 电爆炸前期负载电阻与固有电阻相当而造成的能量耗散和系统初始储能不足, 很大程度上影响了电爆炸过程, 导致明显差异.

表 2 铜丝阵不同质量 (根数) 下的参数比较  
Table 2. Parameter comparison of copper wire array under different mass (number of wires).

参数种类	铜丝阵根数/根								
	2	4	6	8	9	10	12	14	16
电压峰值/kV	41.3±2.6	34.2±1.2	32.7±1.1	32.6±0.6	28.3±1.0	22.8±0.8	21.1±1.1	21.2±0.4	7.9±0.2
电压峰值出现时间/ $\mu\text{s}$	1.06±0.01	1.61±0.05	2.20±0.01	2.72±0.08	2.96±0.08	3.20±0.04	3.84±0.02	4.32±0.21	5.01±0.36
电压峰半高宽/ $\mu\text{s}$	0.10±0.01	0.09±0.02	0.11±0.01	0.11±0.008	0.11±0.01	0.12±0.009	0.11±0.01	0.12±0.01	0.27±0.03
电压峰前沉积能量/J	24.2±1.6	39.1±2.7	58.9±1.7	72.9±6.5	83.6±1.5	82.3±3.6	86.7±2.0	97.7±3.6	95.3±3.3
电流第一个过零点前沉积能量/J	89.2±3.6	122.1±4.2	142.3±3.3	150.5±9.1	152.0±7.3	155.7±3.5	151.5±5.6	148.2±6.2	130.0±5.7
初始电阻/ $\text{m}\Omega$	22.3	11.1	7.4	5.6	4.9	4.5	3.7	3.2	2.8
开始气化所需能量/J	4.0	8.0	12.0	16.0	18.0	20.0	24.0	28.0	32.0
完全气化所需能量/J	17.2	34.4	51.6	68.8	77.4	86.0	103.2	120.4	137.6

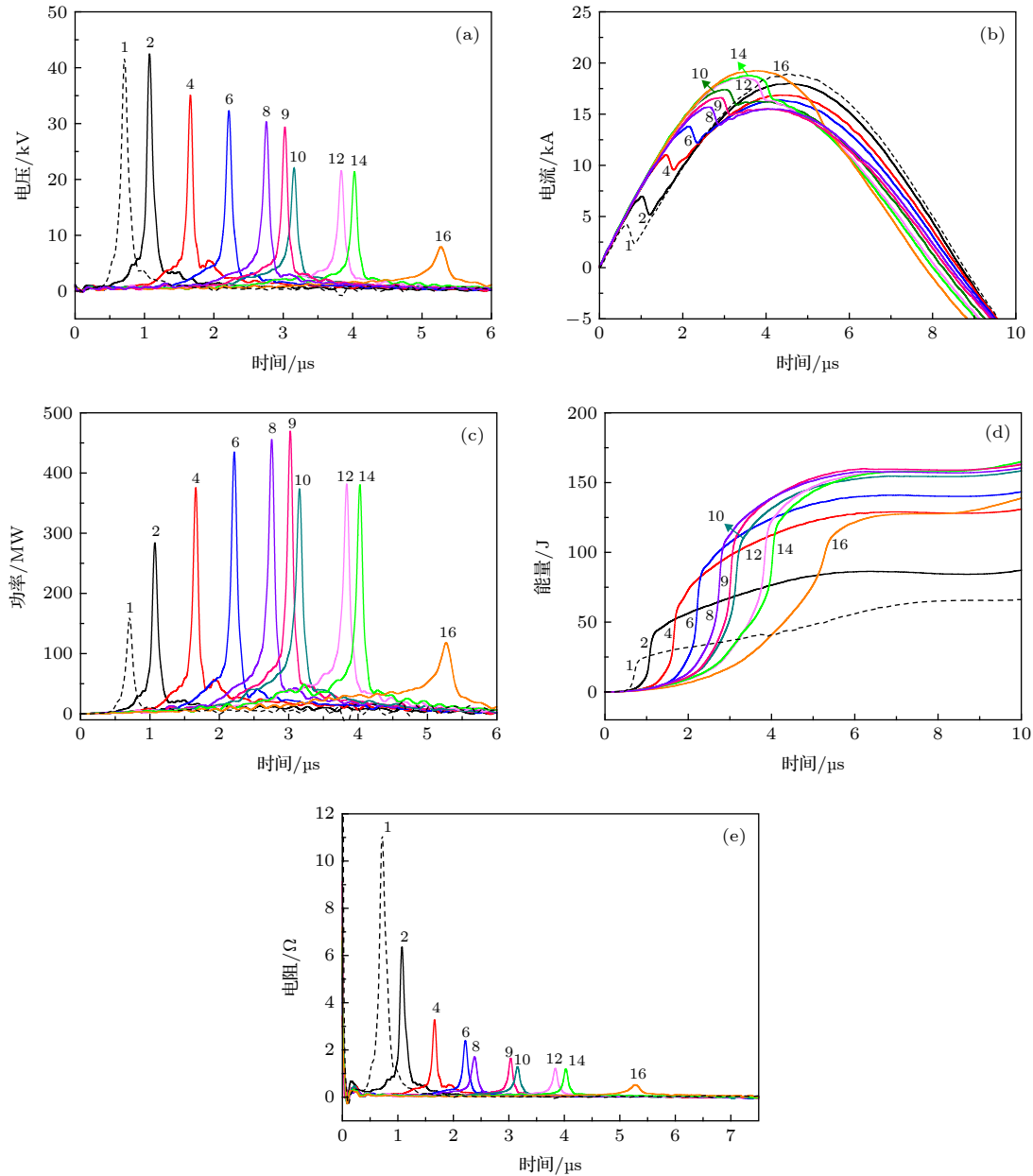


图 4 铜丝阵不同质量 (根数) 下参数随时间变化规律 (a) 电压; (b) 电流; (c) 电功率; (d) 沉积能量; (e) 电阻

Fig. 4. Parameter variation of copper wire array with time varying under different mass (number of wires): (a) Voltage; (b) electric current; (c) power; (d) deposited energy; (e) resistance.

### 3.3 质量变化对单丝与丝阵负载光辐射特性的影响

金属丝电爆炸过程的光辐射能够反映其物理过程的重要信息. 实验使用光电二极管配合衰减片记录了光辐射强度随时间变化的曲线, 能够定性分析金属丝电爆炸过程中的光辐射过程. 本文分别选取了铜单丝 200  $\mu\text{m}$  与 100  $\mu\text{m}$  铜丝阵 4 根情况为例, 给出了电流、电功率、光辐射以及光辐射一阶导数随时间变化的图像, 如图 5 所示. 从图中可以看出光辐射起始于电流第一个下降点附近, 此时

金属丝经历气化阶段, 伴随着电离过程的开始, 而后击穿形成等离子体通道. 此外, 还可以看到光辐射下降沿斜率与电流振荡引起的功率变化有一定关系, 光辐射下降平缓处总是出现在电流幅值附近, 这可能是因为等离子体通道中流过的电流对辐射强度存在影响.

不同质量单丝与丝阵负载的光辐射波形如图 6 所示, 图中光辐射起始点已对齐.

从图 6 中可以看出, 铜丝直径 50—300  $\mu\text{m}$  时, 铜单丝电爆炸光辐射幅值随质量增大呈上升趋势,

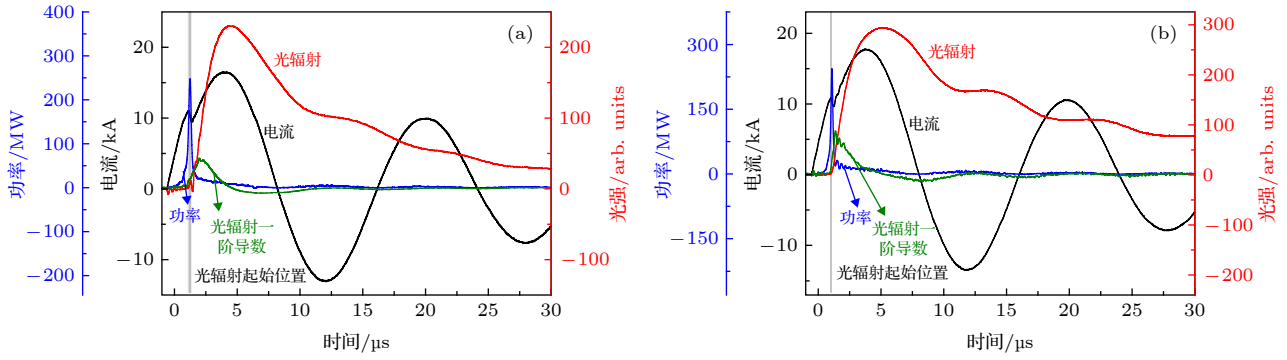


图5 铜单丝与丝阵负载电流、功率、光辐、及光辐射一阶导数波形图 (a) 铜单丝 200 μm; (b) 铜丝阵 4 根

Fig. 5. Waveforms of current and light radiation of copper single wire and wire array: (a) Copper singlewire with 200 μm diameter; (b) copper wire array with 4 wires.

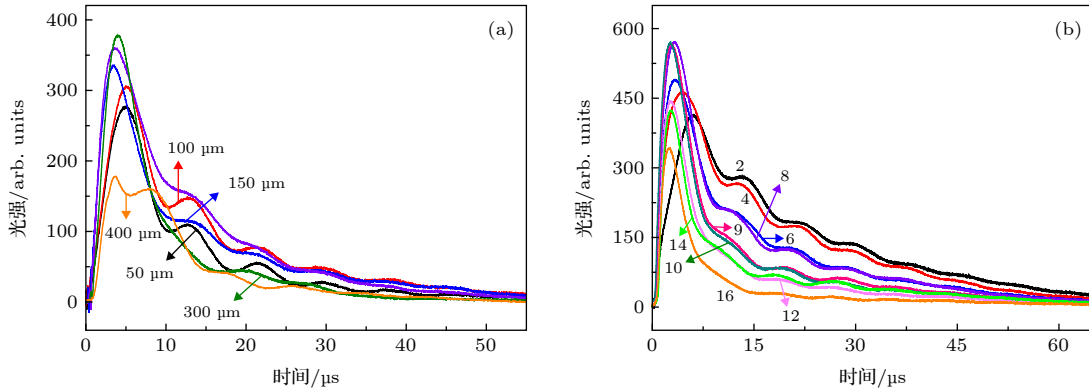


图6 铜单丝与丝阵负载光辐射随质量变化规律图 (a) 铜单丝负载; (b) 铜丝阵负载

Fig. 6. Light radiation variation of copper single wire and wire array under different mass: (a) Copper single wire load; (b) copper wire array load.

但光辐射持续时间并不随质量单调变化. 根据 3.1 部分分析可知, 直径 400 μm 铜单丝电爆炸大部分沉积能量用于电离击穿前的相变过程, 后续电离及等离子体过程微弱, 导致此种情况下铜单丝电爆炸产生的光辐射幅值远低于其他直径情况, 且光辐射持续时间短. 在铜丝阵电爆炸过程中, 光辐射峰值不随质量单调变化, 丝根数 2—6 根时, 光辐射幅值随质量增大而增大, 8—10 根情况下, 光辐射幅值基本不变, 12—16 根情况时, 光辐射幅值随质量增大而减小, 但光辐射持续时间整体上随质量增大而变短.

图 7 所示为光辐射采集过程示意图. 实际上, 在不考虑箍缩效应的情况下, 测量得到的光辐射功率/强度受到等离子体通道膨胀速率与等离子体状态的影响. 一方面, 电离阶段  $T_5$  通道膨胀使得更多的光进入光电探头, 造成测得的光强升高; 另一方面, 等离子体阶段  $T_6$  通道膨胀变缓后, 能量注入不同导致等离子体状态与分布不同, 造成光强不

同. 对于单根金属丝 (图 6(a)), 随着金属丝直径增加, 气化、电离后形成的放电通道越粗 (探头进光量增加), 表现为光辐射强度峰值的升高 (50—300 μm), 另一方面, 金属丝直径的增加将使更多能量用于相变, 最终使得等离子体发展不充分, 表现为光辐射强度的降低 (400 μm). 对于金属丝阵 (图 6(b)), 金属丝的根数增加能够提升进光量, 有利于提高光辐射强度, 但是丝阵负载质量/根数增加时, 丝阵中平均每根丝的沉积能量减少, 也使得等离子体发展不充分, 最终呈现光辐射强度先上升后下降的趋势.

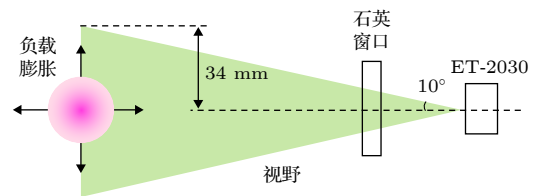


图7 光辐射信号采集示意图

Fig. 7. Acquisition process of light radiation.

### 3.4 相同质量下单丝与丝阵负载的比较

直径为 200, 300, 400  $\mu\text{m}$  的单丝负载分别对应质量相同的 4 根、9 根、16 根丝阵负载, 其质量分别为 5.59, 12.51, 22.35 mg. 质量相同情况下, 两种形式负载的放电参数比较见图 8.

由电压、电流、电功率峰值出现先后顺序可以看到, 丝阵电爆炸明显早于相同质量下的单丝电爆

炸, 这可能是因为相同质量时, 相较单丝负载, 丝阵负载构型能够有效地增大比表面积有利于相变过程的发生, 加快电爆炸过程; 此外, 丝阵负载电爆炸电压峰、电功率峰半高宽均窄于同质量下的单丝负载, 说明丝阵负载电爆炸拥有更快的气化以及电离击穿过程, 且丝阵负载电爆炸功率峰值高于单丝负载, 说明丝阵负载电爆炸  $T_4$  和  $T_5$  阶段具有更高的能量沉积速率. 从电爆炸光辐射波形中可以

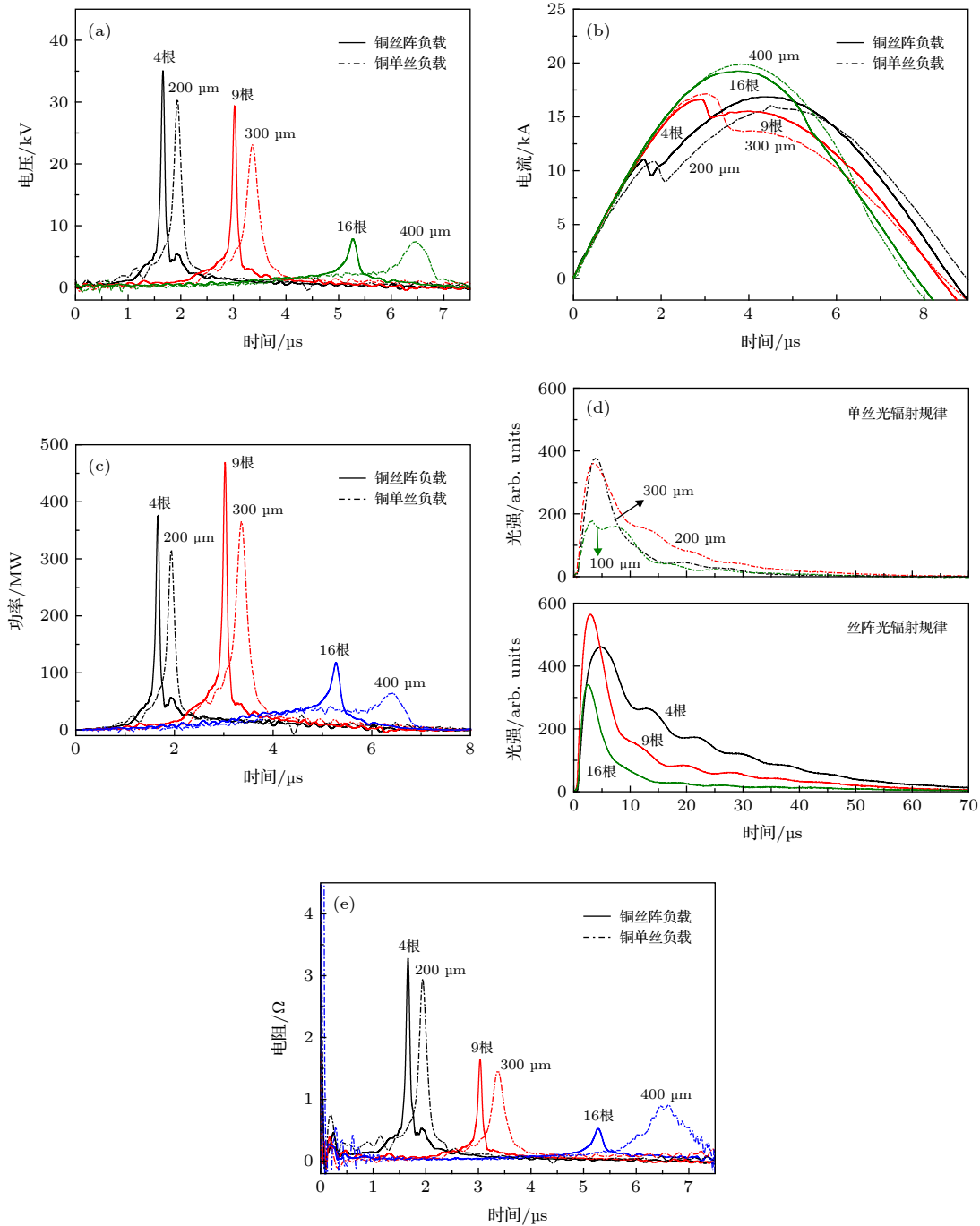


图 8 相同质量时单丝负载与丝阵负载的参数比较 (a) 电压; (b) 电流; (c) 电功率; (d) 光辐射; (e) 电阻

Fig. 8. Parameter comparison of copper single wire and wire array with the same mass: (a) Voltage; (b) electric current; (c) power; (d) light radiation; (e) resistance.



看出, 丝阵负载电爆炸光辐射幅值远高于单丝负载, 对于三次质量相同情况, 丝阵光辐射峰值分别比单丝高约 28%, 49% 和 52%, 这也说明了相同储能、相同质量下, 两种不同形式负载经历的电爆炸过程有明显差异.

相同质量下, 金属单丝与丝阵负载放电电流差异不大 (单丝 200  $\mu\text{m}$  情况下气化前电流上升速率略低于丝阵 4 根情况), 这表明气化前金属丝能量注入速率基本只由放电负载的电阻值决定. 从电阻图 (图 8(e)) 中可以看出, 质量 5.59 和 12.51 mg 时, 丝阵负载气化前电阻略高于单丝负载, 但相差不大, 而在质量 22.35 mg 时, 单丝负载气化前电阻则高于丝阵负载, 这说明单丝负载气化前能量注入速率与丝阵负载相差不大, 甚至在质量大时略高于丝阵负载, 但丝阵电爆炸相变 (气化、电离) 仍快于单丝电爆炸且持续时间短, 在质量大时这种现象尤为明显. 此外, 根据之前实验结果 [2], 在固定储能、改变电流上升速率 (7.7 A/ns 至 66.1 A/ns) 时发现, 不同能量注入速率对电压峰波形有一定影响 (电压峰半高宽由 0.18  $\mu\text{s}$  降至 0.11  $\mu\text{s}$ ), 但不如文

中改变负载形式的作用效果明显. 从目前实验结果看能量注入速率应该不是单丝与丝阵相变过程差异的主要原因. 莫斯科物理技术学院的 Tkachenko 与乌克兰科学院脉冲研究与工程研究所的 Kuskova 等 [33–35] 提出的相变波理论指出, 电爆炸相变过程并非均匀发展, 而是从丝表面向内发展. 由于丝爆的相变过程是脉冲电流通过金属丝时产生的焦耳热效应所致, 若金属丝相变过程从外向内发展, 那么更大的比表面积可能会对相变进程起到一定程度的促进作用. 后续会进行更细致的工作探究比表面积对电爆炸的影响机制.

图 9 分别给出了电压崩前  $E$  和电流第一个过零点前  $E$  的沉积能量 [36] 与每个原子沉积能量随质量的变化规律, 并标出了三次质量相同点. 图中蓝色虚线为大气压下将铜金属从室温 298.15 K 加热至沸点并完全气化所需的能量, 即 392.2 kJ/mol, 用  $E_{\text{sg}}$  表示.

单丝负载与丝阵负载电压崩前沉积能量均随质量增大而增加, 但增加速率明显减小. 单丝负载每个原子沉积能量先随质量增大而增加, 至 3.14 mg

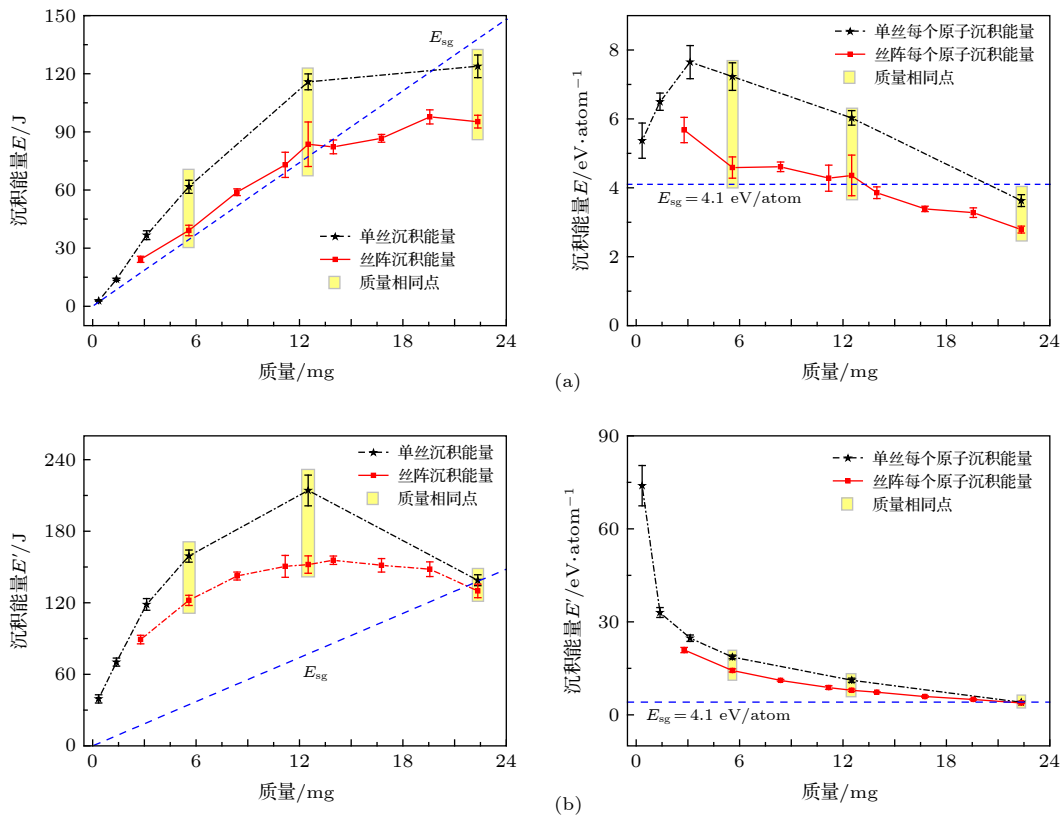


图 9 单丝负载与丝阵负载沉积能量随质量变化规律 (a) 电压崩前沉积能量; (b) 电流第一个过零点前沉积能量

Fig. 9. Deposited energy of copper single wire and wire array with mass varying: (a) Deposited energy before voltage collapse; (b) deposited energy before the current first crosses zero.

表 3 质量相同时单丝负载与丝阵负载沉积能量数值表  
Table 3. The value of deposited energy of copper single wire and wire array with the same mass.

参数种类	5.59 mg		12.51 mg		22.35 mg	
	200 $\mu\text{m}$ 单丝	丝阵4根	300 $\mu\text{m}$ 单丝	丝阵9根	400 $\mu\text{m}$ 单丝	丝阵16根
电压崩前沉积能量/J	$61.6 \pm 3.4$	$39.1 \pm 2.7$	$115.8 \pm 4.1$	$83.6 \pm 1.5$	$123.8 \pm 5.8$	$95.3 \pm 3.3$
电压崩前每个原子沉积能量/ $\text{eV}\cdot\text{atom}$	$7.2 \pm 0.4$	$4.6 \pm 0.3$	$6.0 \pm 0.2$	$4.4 \pm 0.1$	$3.6 \pm 0.2$	$2.8 \pm 0.1$
电流第一个过零点前沉积能量/J	$159.2 \pm 5.1$	$122.1 \pm 4.2$	$217.5 \pm 8.4$	$152.0 \pm 7.3$	$138.9 \pm 4.6$	$130.0 \pm 5.7$
电流第一个过零点前每个原子沉积能量/ $\text{eV}\cdot\text{atom}^{-1}$	$18.7 \pm 0.6$	$14.3 \pm 0.5$	$11.2 \pm 0.4$	$7.9 \pm 0.4$	$4.1 \pm 0.1$	$3.8 \pm 0.2$

(直径 150  $\mu\text{m}$ ) 后减小, 而丝阵负载随质量增大整体呈下降趋势. 对于第一个电流过零点前沉积能量, 两种形式负载均随质量增大呈现先增大后减小的趋势, 每个原子沉积能量均不断减少. 这说明当固定系统储能不变时, 质量增大只能在一定范围内对沉积能量的增加起作用. 此外, 可以看到单丝直径 400  $\mu\text{m}$  与丝阵 16 根情况时, 电流第一个过零点前沉积能量已经略低于铜金属完全气化所需的能量, 这可能是造成放电参数相较其他参数出现明显差异的原因.

从图 9 中标记区域可以看出, 质量相同时, 无论是电压崩前沉积能量还是电流第一个过零点前沉积能量, 单丝负载均高于丝阵负载, 具体数值见表 3. 这可能是由于丝阵负载中每根丝的均匀性存在差异, 致使每根丝经历了不同的电爆炸过程. 爆炸前期存在着一种电流的自稳定性效应, 即某根丝或某几根丝受热过多提前进入气化阶段, 致使电阻增大, 大部分电流自动转移至相变较晚的丝中, 一旦某根丝或某几根丝电极之间电压与通道条件足以形成放电通道则会短路其他丝, 从而使能量以振荡的形式消耗掉而不能有效地沉积到每一根丝中. 此外, 丝阵负载功率峰值虽大于同质量下的单丝负载, 但作用时间短, 尤其是在大质量时更为明显, 这可能也是同质量下丝阵负载沉积能量低于单丝负载的原因.

## 4 结 论

本文对微秒尺度下相同储能, 不同质量下的铜单丝负载以及铜丝阵负载的电参数、光辐射和沉积能量随质量变化的特性开展了研究. 实验表明, 单丝负载电爆炸随质量 (直径) 增加, 整个电爆炸过程延后, 表现为电压峰、电流第一个峰出现时间推迟; 金属丝气化与电离、击穿过程持续时间增长, 表现为电压峰半高宽增大; 电爆炸沉积能量随质量

增大而增多, 但质量增加到一定值时沉积能量反而减小, 且电参数与光辐射均发生突变 (文中为单丝直径 400  $\mu\text{m}$  情况). 对于丝阵负载电爆炸, 随质量 (根数) 增加, 电爆炸过程同样发生推迟, 但电爆炸过程中金属丝气化与电离、击穿持续时间基本不随质量增大而发生变化, 稳定保持在  $0.11 \pm 0.01 \mu\text{s}$ , 基本等同于直径 100  $\mu\text{m}$  单丝电爆炸气化与电离、击穿持续时间; 丝阵负载电爆炸沉积能量随质量增大先增加后趋于稳定, 但在质量增至一定值时同样发生突变而减小 (文中为丝阵 16 根情况). 对比单丝负载与丝阵负载随质量变化时的光辐射特性发现, 单丝电爆炸随质量增大, 光辐射峰值不断增高, 但丝阵电爆炸光辐射峰值则呈现先增高后不变, 再减小的趋势, 此外, 丝阵电爆炸光辐射持续时间随质量增大而变短.

比较相同质量下的单丝负载与丝阵负载发现, 丝阵电爆炸相变进程早于单丝电爆炸, 且气化及电离、击穿过程持续时间短, 这可能是由于丝阵负载相较单丝负载有更大的比表面积所致. 此外, 丝阵电爆炸相较单丝电爆炸拥有更优越的光辐射性质, 文中丝阵电爆炸光辐射比三次同质量下单丝电爆炸分别强约 28%, 49% 和 52%. 但丝阵负载电爆炸无论是电压崩前沉积能量还是电流第一个过零点前沉积能量均低于单丝电爆炸. 后续将进行进一步深入的研究.

感谢清华大学王新新教授、西北核技术研究院张永民教授在工作开展过程中的指导以及全球能源互联网发展合作组织吴佳玮博士在讨论部分提供的帮助.

## 参考文献

- [1] Wu J, Li X W, Li M, Li Y, Qiu A C 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 403002
- [2] Han R Y, Wu J W, Ding W D, Zhou H B, Qiu A C, Zhang Y M 2019 *Proc. Chin. Soc. Elect. Eng.* **39** 0258 (in Chinese) [韩若愚, 吴佳玮, 丁卫东, 周海滨, 邱爱慈, 张永民 2019 中国电机

工程学报 39 0258]

- [3] Zhang Y M, Yao W B, Qiu A C, Tang J P, Hu Y X 2019 *High Voltage Engin.* **45** 2668 (in Chinese) [张永民, 姚伟博, 邱爱慈, 汤俊萍, 王宇, 呼义翔 2019 *高电压技术* **45** 2668]
- [4] Qiu A C, Kuai B, Zeng Z Z, Wang W S, Qiu M T, Wang L P, Cong P T, Lv M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5917 (in Chinese) [邱爱慈, 蒯斌, 曾正中, 王文生, 邱孟通, 王亮平, 从培天, 吕敏 2006 *物理学报* **55** 5917]
- [5] Haines M G 2011 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **53** 093001
- [6] Dan J K, Ren X D, Huang X B, Zhang S Q, Zhou S T, Duan S C, Ouyang K, Cai H C, Wei B, Ji C, He A, Xia M H, Feng S P, Wang M, Xie W P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 245201 (in Chinese) [但加坤, 任晓东, 黄显宾, 张思群, 周少彤, 段书超, 欧阳凯, 蔡红春, 卫兵, 计策, 何安, 夏明鹤, 丰树平, 王勐, 谢卫平 2013 *物理学报* **62** 245201]
- [7] Wu J 2012 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [吴坚 2012 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [8] Li Y X 2002 *M. S. Thesis* (Mianyang: China Academy Of Engineering Physics) (in Chinese) [李业勋 2002 硕士学位论文(绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [9] Mao Z G 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [毛志国 2009 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [10] Kotov Y A 2003 *J. Nanopart. Res.* **5** 539
- [11] Li X W, Chao Y C, Wu J, Han R Y, Zhou H B, Qiu A C 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 023301
- [12] Han R Y, Wu J W, Zhou H B, Zhang Y M, Qiu A C 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 153302
- [13] Han R Y, Zhou H B, Wu J W, Thomas C, Ren H, Wu J, Zhang Y M, Qiu A C 2017 *Phys. Plasmas* **24** 063511
- [14] Li L X, Zou X B, Wang X X 2018 *Phys. Plasmas* **25** 053502
- [15] Sarkisov GS, Satorov PV, Struve KW, McDaniel D H 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 1674
- [16] Grinenko A, Krasik YE, Efimov S, Fedotov A, Gurovich V T 2006 *Phys. Plasmas* **13** 042701
- [17] Qian D, Li L X, Zou X B, Wang X X 2019 *IEEE Puled Powerand Plasma Science Conference* Orlando, USA, June 23–28, 2019, P6 E2
- [18] Bland S N, Krasik Y E, Yanuka D, Gardner R, MacDonald J, Virozub A, Efimov S, Gleizer S, Chaturvedi N 2017 *Phys. Plasmas* **24** 082702
- [19] Krasik Y E, Efimov S, Sheftman D, Fedotov-Gefen A, Antonov O, Shafer D, Yanuka D, Nitishinskiy M, Kozlov M, Gilburd L, Toker G, Gleizer S 2016 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **44** 412
- [20] Zhang Y M, An S G, Chen D B, ShiQ M, Zhang Z H, Zhao Y Z, Luo H G, Qiu A C, Qin Y 2019 *Safety. In. Coal. Mines.* **50** 1003 (in Chinese) [张永民, 安世岗, 陈殿斌, 师庆民, 张增辉, 赵有志, 罗伙根, 邱爱慈, 秦勇 2019 *煤矿安全* **50** 1003]
- [21] Xue L X, Pan W, Feng B, Feng X S, Zhao J, Feng X J 2019 *Chin. J. Expl. Propell.* **1** 6 (in Chinese) [薛乐星, 潘文, 冯博, 封雪松, 赵娟, 冯晓军 2019 *火炸药学报* **1** 6]
- [22] Zhang J H, Qiu A C, Wang L P, Li M, SunT P, Li Y, Cong P T, Sheng L 2019 *At. Energ. Sci. Technol.* **53** 1509 (in Chinese) [张金海, 邱爱慈, 王亮平, 李沫, 孙铁平, 李阳, 从培天, 盛亮 2019 *原子能科学技术* **53** 1509]
- [23] Yanuka D, Theocharous S, Bland S N 2019 *Phys. Plasmas* **26** 122704
- [24] Efimov S, Fedotov A, Gleizer S, Gurovich V T, Bazalitski G, Krasik Y E 2008 *Phys. Plasmas* **15** 112703
- [25] Fedotov-Gefen A, Efimov S, Gilburd L, Bazalitski G, Gurovich V T, Krasik Y E 2011 *Phys. Plasmas* **18** 062701
- [26] Antonov O, Efimov S, Yanuka D, Kozlov M, Gurovich V T, Krasik Y E 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 124104
- [27] Sheng L, Peng B D, Yuan Y, Zhang M, Li K N, Zhang X J, Zhao C, Li M 2014 *Acta Phys. Sin.* **23** 235205 (in Chinese) [盛亮, 彭博栋, 袁媛, 张美, 李奎念, 张信军, 赵晨, 李沫 2014 *物理学报* **23** 235205]
- [28] Rososhek A, Efimov S, Virozub A, Maler D, Krasik Y E 2019 *Appl. Phys. Lett.* **115** 074101
- [29] Efimov S, Gurovich V T, Bazalitski G, Fedotov A, Krasika Y E 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 073308
- [30] Zhou H B 2016 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Jiaotong University) (in Chinese) [周海滨 2016 博士学位论文(西安: 西安交通大学)]
- [31] Tucker T J, Toth R P 1975 *Sandia Rept.* **75** 0041
- [32] Sarkisov G, Struve KW, McDaniel D H 2005 *Phys. Plasmas* **12** 052702
- [33] Tkachenko SI, Kuskova NI 1999 *J. Phys.-Condes. Matter.* **11** 2223
- [34] Kuskova N I 1998 *Tech. Phys. Lett.* **24** 559
- [35] Kuskova N. I, Tkachenko SI, Koval S V 1997 *J. Phys.-Condes. Matter.* **9** 6175
- [36] Yao W B, Zhou H B, Han R Y, Zhang Y M, Zhao Z, Xu Q F, Qiu A C 2019 *Phys. Plasmas* **26** 093502

# Comparison of electrical wire explosion characteristics of single wire and wire array in air\*

Li Chen<sup>1)</sup> Han Ruo-Yu<sup>1)†</sup> Liu Yi<sup>2)</sup> Zhang Chen-Yang<sup>1)</sup>  
 Ouyang Ji-Ting<sup>1)</sup> Ding Wei-Dong<sup>3)</sup>

1) (*School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081, China*)

2) (*State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

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

( Received 27 November 2019; revised manuscript received 15 January 2020 )

## Abstract

In this paper, discharge characteristics of a planar copper wire array explosion driven by a microsecond pulsed current source (500 J stored energy) in atmospheric air medium were studied. Meanwhile, controlled experiments were performed with single wire cases. With a 2 cm distance between electrodes, 2-16 copper wires with a diameter of 100  $\mu\text{m}$  were selected to form planar copper wire arrays, and single copper wires with diameter of 50-400  $\mu\text{m}$  were selected for comparisons. Load voltage, circuit current and light radiation intensity were measured. Electric power and deposited energy were calculated. The experimental results show that for the single wire case, with the increase of mass (diameter), the process of vaporization and ionization become slower, manifested as a delay of the voltage peak and an increase of the full width half maximum (FWHM) of the voltage pulse from 0.07  $\mu\text{s}$  to 0.64  $\mu\text{s}$ . In contrast, although the explosion time of wire array load was delayed with the increase of mass, the duration of vaporization and ionization did not change significantly with a FWHM of  $0.11 \pm 0.01 \mu\text{s}$ . In addition, the deposited energy of wire array load before breakdown was lower than that of single wire load with the same mass. As for the optical radiation intensity, under three cases with the same mass, the peak intensity of wire array explosion is about 28%, 49% and 52% higher than that of single wire explosion. There may be two reasons which cause the difference between the single wire load and wire array load. First, the larger specific surface area of the wire array load makes faster phase transitions. Second, the development of thermal or magnetohydrodynamics for the two kinds of loads was different, which should be responsible for the differences in energy deposition and optical emission.

**Keywords:** exploding wires, wire array Z-pinches, strongly-coupled plasmas, optical measurements

**PACS:** 52.80.Qj, 52.59.Qy, 52.27.Gr, 52.70.Kz

**DOI:** [10.7498/aps.69.20191797](https://doi.org/10.7498/aps.69.20191797)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation (Grant No. 51907007), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2019M650511), and the State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Grant No. AEET 2019KF006).

† Corresponding author. E-mail: [r.han@bit.edu.cn](mailto:r.han@bit.edu.cn)