第 49 卷 第 6 期：2671-2681 高电压技术 Vol.49, No.6: 2671-2681
2023 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221037

空气中并联金属丝阵列电爆炸等离子体自辐射特性

孟 杨[1]，申赛康[1]，王亚楠[1]，丁卫东[1]，张永民[1]，闫家启[2]
（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. 北京航天航空大学航天学院，北京 100190）

摘 要：在空气中开展了平面丝阵的电爆炸实验，对比研究了非难熔金属铜丝阵列和难熔金属钽丝阵列在电爆炸过程中的能量沉积特性，重点分析了其等离子体通道演化过程及光辐射特性。实验结果表明，随着铜丝阵列或钽丝阵列根数(质量)的增加，丝阵列在电压峰值前沉积的能量会有所增加且总体相变时间会变长。对于铜丝阵列，当其能量沉积速率较快时，电爆炸过程中的光辐射强度会随金属丝根数的增加而有所增加，但光辐射持续时间相对于单丝较短。铜丝和铜丝阵列电爆炸等离子体通道膨胀过程较快，放电中心通道内的加热和电离过程不够集中。当铜丝根数增加时，放电过程中各丝之间的相变时刻不够同步，放电等离子体通道发展极不均匀。对于钽丝阵列，在储能一定的条件下，随着钽丝阵列根数(质量)的增加，其光辐射强度会有所下降。钽丝和钽丝阵列在相变过程中的气液混合通道能够被加热到较高的温度，放电通道内热电离过程显著，等离子体通道易于发展，但放电通道膨胀速率要明显慢于铜丝。丝阵列放电过程中各丝之间相变时刻的不同步会影响电流的分布，进而导致各丝之间的能量沉积过程不同，使得丝阵列中各丝等离子体通道的建立过程不同步。
关键词：金属丝电爆炸；放电等离子体；沉积能量；光辐射；脉冲功率应用

Plasma Self-radiation Characteristics of Electrical Wire Arrays Explosion in Air

MENG Yang[1], SHEN Saikang[1], WANG Yanan[1], DING Weidong[1], ZHANG Yongmin[1], YAN Jiaqi[2]
(1. State key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100190, China)

Abstract：The experiment of electrical wire arrays explosion in the air was carried out. The energy deposition characteristics of the copper wire array and tantalum wire array during the electrical explosion were compared. The evolution process of the plasma channel and the characteristics of light radiation were analyzed. The results show that the deposited energy before the voltage peak and the overall phase transition time will increase when the wire array mass increases. For the copper wire array, when the energy deposition rate is high, the intensity of the light radiation will increase with the increase of the mass, whereas the light radiation duration is shorter than that of a single wire. The expansion process of its discharge channel is fast, and the heating and ionization process in the discharge center channel is not concentrated. When the number of copper wires increases, the phase transition time of each wire is not synchronous enough, and the development of the discharge plasma channel will be more non-uniform. For the tantalum wire array, the light radiation will decrease with the increase of the mass. The gas-liquid mixture channel of tantalum wire and tantalum wire array can be heated to a higher temperature in the phase transition process. The thermal electron emission process of metal particles in the discharge channel is significant, which may strengthen the ionization process of the discharge channel and enable the plasma channel to develop easily, whereas its discharge channel expansion rate is obviously slower than that of copper wire. The measurement results of copper wires with different diameters and lengths show that the energy deposition characteristics of the two wires are obviously different in the explosion process. The first phase transition wire may lead to the current redistribution and accelerate the energy deposition process of the other wires in parallel, and further affects the development process of the subsequent plasma channel.
Key words：exploding wires; discharge plasma; deposition energy; light radiation; pulsed power application

基金资助项目：国家重点研发计划(2020YFA0710500)
Project supported by National Key R&D Program of China (2020YFA0710500).

0 引言

金属丝电爆炸是指向金属丝快速注入高密度脉冲电流(10^6~10^8 A/cm^2)时，沉积能量使金属丝快速经历固态加热、熔化、汽化以及击穿的物理过程，伴随着金属丝物性参数的剧烈变化，产生强烈的光辐射和冲击波。金属丝电爆炸是开展高温、高压等极端物理条件下物质物性参数研究的有效方法之一[1]，也是实验室密集等离子体产生和爆炸模拟的重要方式。不同介质中的金属丝电爆炸在 Z 箍缩[2-3]、X 射线[4]、纳米材料制备[5-6]、油气井增产[7-8]等领域有广泛应用。

水中金属丝电爆炸具有良好的可控性、重复性和环境友好性，能够对油气储层进行精细改造，在非常规油气资源开采中有广阔应用前景。由于井下空间狭小，设备的储能容量受限，会在一定程度上影响产生的冲击波强度和储层改造的效果。近期研究表明，采用金属丝电爆炸驱动含能材料可产生更强的冲击波，从而突破设备储能密度的制约[9-10]。金属丝电爆炸过程中的光辐射效应被认为是驱动含能材料的主要机制之一[11]，增强金属丝电爆炸过程中的光辐射强度是提升驱动含能材料效果的有效方法，是当前金属丝电爆炸研究的重要方面。

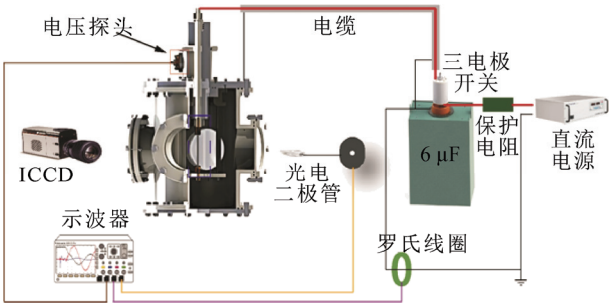
在金属丝电爆炸光辐射特性研究方面，国内外已经开展了大量的研究工作。Pochapsky T E[12]和 Marcus R A[13]等系统地研究了金属丝电爆炸过程中的光辐射现象，分析了辐射光脉冲的强度、持续时间和光辐射的能量转换效率。Sarkisov G S 和 Krasik Y E 等研究了真空和水中金属丝电爆炸过程中光辐射强度随时间的演变[14-15]，并指出金属丝电爆炸过程中的光辐射主要包括电离辐射、复合辐射以及爆炸产物的高温辐射。Han R 等较为全面地研究了单根金属丝在空气中和水中电爆炸的时空演化和光辐射特性[16-17]，并对比分析了不同材质金属丝光辐射特性的差异。Yao W 等在空气中研究了单根超长金属丝电爆炸等离子体的轴向光辐射均匀性[18]。相比于单丝，多根金属丝并联组成的丝阵列在电爆炸过程中能够产生更大面积的脉冲光源，相同质量下的平面丝阵列的光辐射强度高于单丝[19]。

对含能材料的引爆而言，丝阵列可能具有更优异的效果，但丝阵列电爆炸时的相变过程和放电等离子体通道的稳定性要比单丝复杂。在相同储能条件下，同质量丝阵列的相变进程早于单丝，其放电通道内部存在局部不同步的电离现象[20]。此外丝阵列电爆炸产生的等离子体在微米或更小的水平上具有强烈的不均匀性[21]。丝阵列放电的不稳定性与电流分布的不均匀性[22]和金属丝之间的相互作用以及其各自的热力学状态相关[23]，丝阵列放电过程中各丝能量沉积的均匀性对电爆炸过程中光辐射特性有显著的影响。

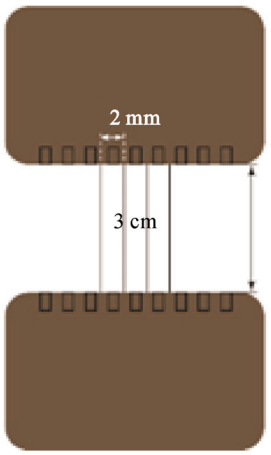
目前对于丝阵列的研究大多集中在 Z 箍缩领域，而对于微秒金属丝电爆炸的研究较少。丝阵列放电过程中光辐射特性的研究对于含能材料的起爆有着重要的价值，有必要进一步明确丝阵列电爆炸等离子体的自辐射演化过程。本文在空气中开展了平面丝阵的电爆炸实验，对比研究了非难熔金属铜丝阵列和难熔金属钽丝阵列在电爆炸过程中的能量沉积特性，重点分析了其等离子体通道自辐射演化过程，讨论了丝阵列电爆炸过程中电流分布的不均匀性和等离子体通道电离的不均匀性。

1 实验平台

金属丝电爆炸实验平台如图 1(a)所示，包含大电流脉冲电源、放电腔体和金属丝阵列负载以及测



(a) 实验平台示意图



(b) 金属丝阵列装配示意图

图 1 金属丝电爆炸实验平台和负载装配示意图

Fig.1 Schematic diagram of wire electrical explosion platform and load assembly

量系统。脉冲电源储能采用一个 50 kV、6 μF 的电容器，直流电源通过保护电阻来使电容器充电 15~20 kV。实验腔体为内径 400 mm 的不锈钢容器，侧壁设石英玻璃观察窗。平面金属丝阵列固定在腔体的中心轴线上，材质选用铜丝(非难熔金属)和钽丝(难熔金属)。

金属丝长度 3 cm，直径 200 μm，丝间距 2 mm，金属丝根数分别为 1、2、4、6 根，装配示意图如图 1(b)所示。回路主放电开关采用三电极火花开关，电容器通过三电极开关和同轴电缆对放电腔体内的金属丝负载放电。三电极火花开关的触发脉冲形成电路如图 2 所示，包括充放电电容、封闭式双间隙伪火花开关[24]、脉冲变压器和基于雪崩三极管的高压纳秒脉冲电源[25-26]。

在实验过程中，充放电电容上的电压设置为 15 kV，通过数字延时同步触发器(DG645)控制基于雪崩三极管的高压纳秒脉冲电源产生幅值 8 kV、前沿 8 ns 的纳秒脉冲触发伪火花开关导通。当伪火花开关导通时，脉冲变压器副边会形成幅值 58 kV、前沿 198 ns 的高压脉冲，该脉冲用于触发处于高电位端的三电极火花开关。在该触发条件下，三电极火花开关的抖动可控制在 5 ns 内，满足金属丝电爆炸放电光学诊断实验的同步需求。

回路放电电流采用罗氏线圈(Pearson 4418)测量，金属丝两端放电电压采用自制电容分压器测量，分压比为 26 730:1，电压电流波形由 Tektronix MDO3054 示波器记录。金属丝阵列电爆炸的等离子体通道演化过程通过 ICCD(iStar 334T，Andor)采集，自辐射发光强度采用光电二极管测量(DET10A2，Thorlabs)。放电回路和光学诊断的同步由数字延时同步触发器 DG645 控制。本文实验中，金属丝负载上的阻性电压、功率和沉积能量由下式计算：

$$U_{\mathrm{r}}(t)=U_{\mathrm{m}}(t)-L_{\mathrm{w}}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}-L_{\mathrm{s}}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

$$L_{\mathrm{w}}=\frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\left(\frac{4l}{d}-\frac{3}{4}\right)\right) \tag{2}$$

$$P(t)=U_{\mathrm{r}}(t)I(t) \tag{3}$$

$$E_{\mathrm{d}}=\int_0^t P(t)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

$$E=\frac{E_{\mathrm{d}}}{N} \tag{5}$$

式中：$U_{\mathrm{m}}(t)$ 为电容探头测量获得的电压值；$U_{\mathrm{r}}(t)$ 为金属丝上的阻性电压；L_{w} 为金属丝上的电感；L_{s} 为测量点到金属丝负载处的固有电感，通过仿真计算为 154.2 nH；μ_0 为真空磁导率；l 和 d 分别为金属的长度和直径；E_{d} 为金属丝上沉积的能量；N 为金属丝的原子数；E 为比沉积能量。通过短路试验测试，放电回路的总电阻和电感分别为 58.7 mΩ 和 1.6 μH。

当电源储能充足时，空气中金属丝电爆炸在汽化前会经历固态加热、熔化、液态加热等阶段，在汽化后主要经历击穿/电离过程和等离子体扩展阶段[23]，如图 3 所示。本文研究的重点是金属电爆炸后期的等离子体扩展阶段。

2　实验结果

2.1　铜丝阵列电爆炸等离子体自辐射演化

不同的铜丝根数(直径均为 200 μm)在储能 1200 J 条件下的电流、电压、电功率和沉积能量如图 4 所示。从图中可以看出，随着铜丝根数的增加，总回路电流峰值有所增加，铜丝电压峰值呈现下降趋势且到达峰值的时间延后，击穿电离的时间变长。表 1 给出了不同根数下铜丝阵列的电爆炸参数对比，可以看到铜丝阵列击穿前沉积能量随丝阵列根

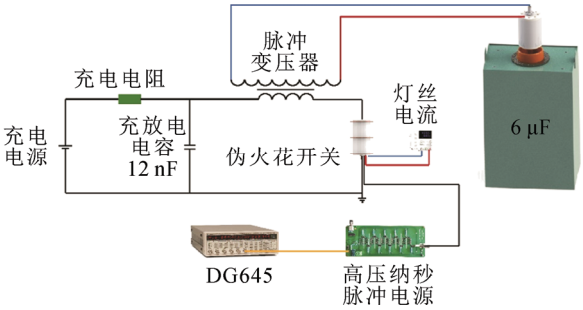


图 2　三电极开关触发回路

Fig.2　The trigger circuit of the three-electrodes switch

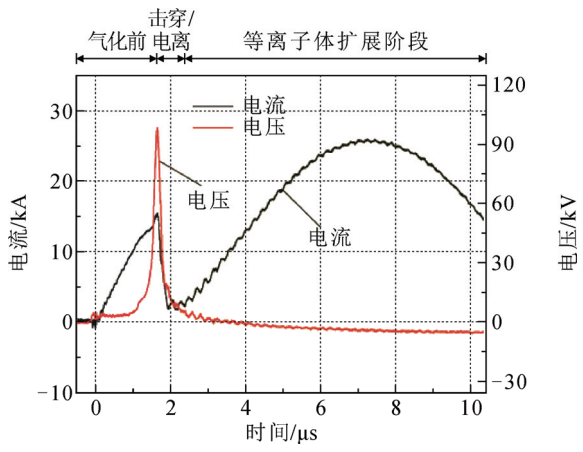


图 3　空气中铜丝电爆炸典型放电波形

Fig.3　Typical discharge waveform of copper wire electrical explosion in air

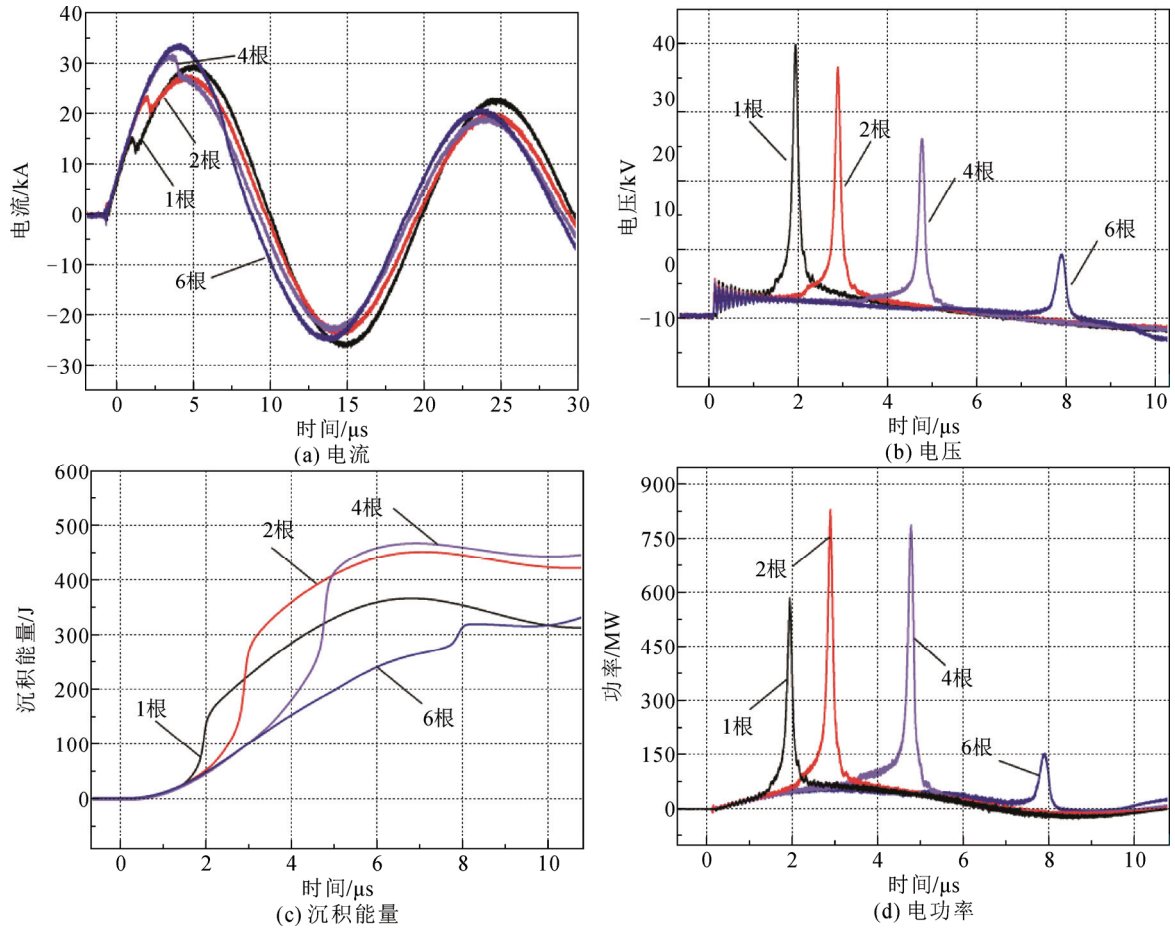


图 4 不同根数铜丝阵列的放电参数

Fig.4 Discharge parameters of the copper wire arrays

表 1 不同根数的铜丝阵列电爆炸参数对比

Table1 Parameter comparison of electrical explosion parameters of different copper wire arrays

根数	初始电阻/mΩ	电压峰值时刻/μs	汽化能量/J	击穿前沉积能量/J	比沉积能量/eV	峰值功率/MW
1	16.7	1.9±0.01	52.1	119.1±1.71	9.3±0.13	587.8±4.11
2	8.4	2.8±0.03	104.3	201.4±2.62	7.9±0.10	834.8±1.73
4	4.2	4.8±0.01	208.4	347.1±1.31	6.8±0.02	791.8±1.81
6	2.8	7.8±0.02	312.6	359.1±2.10	4.7±0.03	149.3±2.12

数(质量)的增加而增加，但其比沉积能量在下降，铜丝阵列上的电功率呈现先增大后减小的趋势。这表明铜丝阵列的质量和电阻等物性参数与脉冲电源的储能和回路电阻等系统参数存在最佳匹配关系。当电爆炸过程中金属丝阵列的质量增加时，金属丝相变时刻后移，一方面会使得汽化前电容的初始储能在回路电阻上的耗散增加，沉积在金属丝上的能量减少；另一方面会使汽化前储存在回路电感中的能量增加，导致汽化后能量沉积速率增加，因此 2 根丝和 4 根丝电爆炸时的电功率较高。

不同根数(质量)的铜丝阵列的电爆炸光辐射强度如图 5 所示。

从图 5 中可以看到当金属丝阵列的能量沉积速率较快时，铜丝阵列电爆炸的光辐射峰值随金属丝根数的增加而有所增加。相对于单丝，铜丝阵列电爆炸光辐射持续时间较短，这可能是由于金属丝相变后其内部通道的爆炸产物密度不同所导致的。爆炸产物(高温金属蒸汽和金属颗粒)的密度会影响放电通道的电导率、温度变化以及高温蒸汽的电离过程，通常密度的增加会使得等离子体通道建立时间变长，光辐射强度衰减变快。当铜丝阵列增加到 6 根时，电爆炸过程中的光辐射强度明显降低，这可能主要是由于电源储能大部分用于相变，以及其后续的等离子体发展过程不充分、不均匀所导致的。

为了更直观地反映单丝和丝阵列电爆炸放电通道的物理信息，本文给出了铜丝和铜丝阵列电爆炸等离子体的自辐射演化过程，如图 6 所示。图 6 中颜色越较高代表放电通道中电离度越高，等离子体发展越集中。

从图 6 中可以看出，铜丝的加热和电离过程表现的较不均匀。在铜丝刚发生汽化时刻(2 μs)，电极附近的发光强度较高，这可能是由于金属丝和电极之间的接触电阻较高所导致的。由于回路电感的作用，铜丝瞬间汽化后的阻抗虽然很高，但电流不会立即衰减。在沉积能量的作用下放电通道将不断膨胀，爆炸产生的高温高密的铜蒸汽一部分向外扩散，另一部分向内上下翻涌。铜丝汽化后电极两端的电压可达充电电压的几倍，放电通道温度可达上万 K，此时放电通道内主要存在局部较强的碰撞电离过程。局部等离子体的加热效应将进一步使得爆炸产物向外不均匀地湍流(4 μs)。随着放电通道的不断膨胀以及爆炸产物向外的湍流，中心放电通道的发光强度逐渐均匀起来，但光辐射强度也在逐渐减弱。在放电的前几微秒内，放电通道边缘的发光强度较高，这表明放电通道边缘的电离过程比中心通道强烈。这可能是由于在铜丝汽化的瞬间，放电通道内部的密度和温度较高，爆炸产生的铜蒸汽需要扩散一定的时间才有可能满足局部电离的条件。但当铜蒸汽满足局部电离的条件后，电极两端的电压跌落，放电通道内部仅存在部分的高能粒子，中心通道难以维持高强度的电离。因此在放电电流第一次过零点时(约 10 μs)，其中心发光强度虽然比边缘高，但光辐射强度总体较弱。随着爆炸产物的扩散以及密度的变化，放电回路的阻抗有所降低，回路处于欠阻尼放电状态，电爆炸产生的等离子体不断地消散，这一过程的持续时间较长。

图 7 为两根铜丝电爆炸等离子体的自辐射演化过程。从图中可以看出，两根铜丝的电离发展过程较为同步，且在前几微秒内放电产生的等离子体光辐射强度较高。相对于单丝，两根铜丝在汽化和击穿时间段内的能量沉积速率较快，能够加热到相对较高的温度，放电通道的阻抗小于单丝，故电极两端产生的过电压也不会高于单丝负载。因此后续放电通道的电离过程没有单丝剧烈，放电仅在前几微秒内比较强烈，在电流第一次过零点后，其总体的光辐射强度弱于单丝。此外，两根铜丝在电爆炸过程中的爆炸产物朝向放电通道内部喷涌，造成放电通道内部的爆炸产物密度要远高于边缘区域，因此可以看到在 6~9 μs 时刻，放电通道边缘的发光强度要高于放电通道中心内部。这将会导致电流后续分布发生变化，大部分的能量趋向于从放电通道边缘耗散，而放电通道中心内部不会存在较强的碰撞

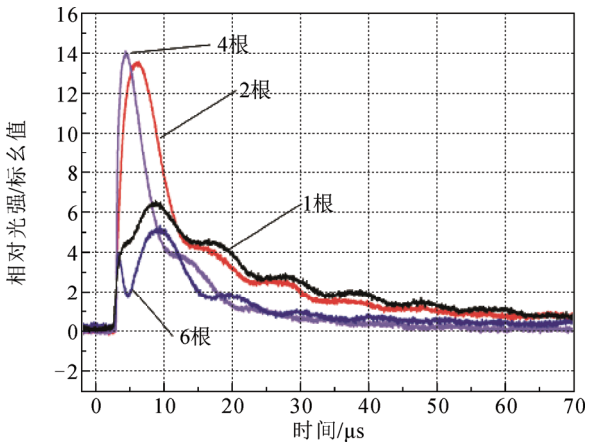


图 5　不同根数下铜丝阵列电爆炸光辐射强度(储能 1200 J)

Fig.5　Electric explosion radiation intensity of the copper wire array with different numbers (stored energy is 1200 J)

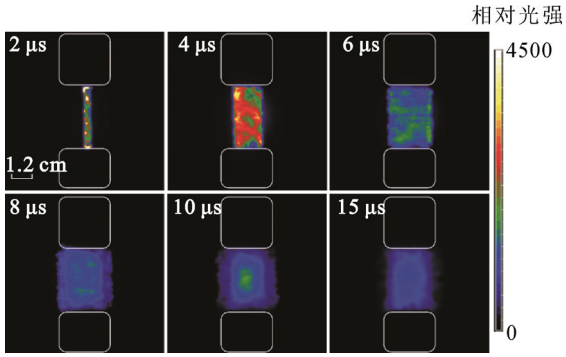


图 6　铜单丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.6　Self-radiative evolution process of a copper wire electric explosion plasma (stored energy is 1200 J)

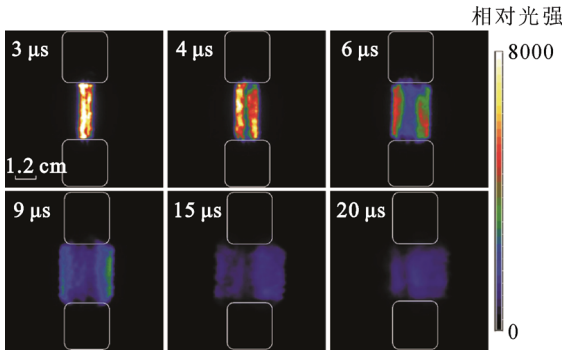


图 7　2 根铜丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.7　Self-radiative evolution process of two copper wires electric explosion plasma (stored energy is 1200 J)

电离过程，中心通道的等离子体消散过程较快。

图 8 为 4 根铜丝电爆炸等离子体的自辐射演化过程。该条件下的放电过程与 2 根铜丝相似，也是在放电前几微秒内的电离过程比较强烈。放电中心通道内部的爆炸产物密度更高，中心通道的等离子

体消散过程更快。图 9 给出了 6 根铜丝电爆炸等离子体的自辐射演化过程，由于此时铜丝阵列质量的增加，汽化所需要的能量变多，相变时间明显滞后。相变前电容中的初始储能已经有一部分消耗在了回路电阻上，此时丝阵负载的阻抗不会变化到非常大的值，电极两端的电压相对于单丝较低。因此，其放电通道的电离过程较为微弱，各丝之间的电离过程不够均匀，等离子体通道随机出现且消散过程加快，放电通道的膨胀速率相对较慢。对比不同根数的铜丝阵列在汽化前的能量沉积速率，发现当能量沉积速率较快时，铜丝相变较快，后续放电等离子体通道发展较为均匀。

此外，铜丝阵列负载在击穿电离时刻的阻抗变化也会影响后续的等离子体通道的电离过程。相比单丝，铜丝阵列在相同储能条件下放电通道的膨胀速率较慢，这可能表明各丝之间的相变过程和能量沉积过程会相互影响。

2.2 钽丝阵列电爆炸等离子体自辐射演化

图 10 为不同钽丝根数(直径均为 200 μm)在储能 1200 J 条件下的电流、电压、电功率和沉积能量。从图中可以看出，钽丝在电爆炸过程中电流跌落过程并不明显，放电回路不存在较高的过电压，这表明钽丝放电过程中的阻抗变化速率相对铜丝较小。从放电电压波形中可以看到，在电流瞬间注入时，由于钽丝的固液相初始电阻较高，施加在钽丝上的电压会瞬间抬升，此时的能量沉积速率较快。随着钽丝根数的增加，回路电流峰值变化不大，放电电压峰值呈现下降趋势且到达峰值的时间延后，钽丝阵列在击穿前沉积的能量和功率有所增加，具体参数见表 2。从表 2 中可以看出，钽丝阵列的比沉积能量先增加后减小，这可能是由于能量沉积速率和金属丝阵列的质量的匹配关系存在差异所导致的。在 1200 J 储能下，钽丝阵列在击穿前的沉积能量不足以使其完全汽化，因此其后续的击穿电离过程可能在气液混合通道中发展。

图 11 为钽丝阵列在不同根数(质量)下的电爆炸光辐射强度。从图中可以看出，钽丝阵列在电爆炸过程中的光辐射强度弱于铜丝，这可能由于钽丝相变通道内的高温高密度持续时间较长，部分储能耗散在了相变和回路电阻中，其后续等离子体扩展阶段的电离度要弱于铜丝。随着钽丝阵列根数(质量)的增加，电爆炸过程中的光辐射强度逐渐下降。相比于铜丝阵列，钽丝阵列等离子体消散过程更长，

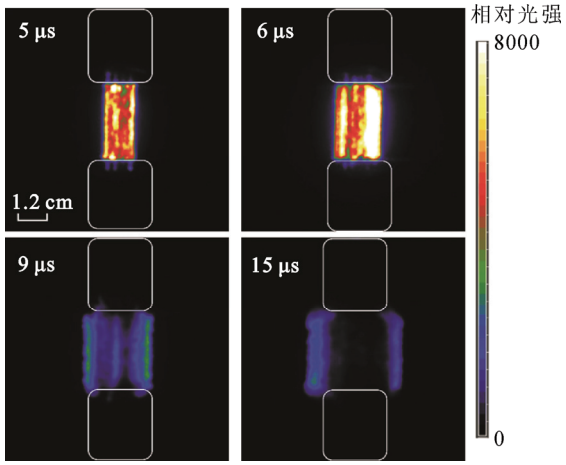


图 8 4 根铜丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.8 Self-radiative evolution process of four copper wires electric explosion plasma (stored energy is 1200 J)

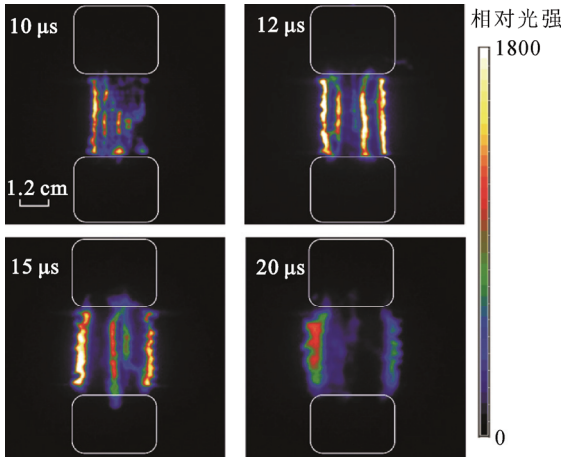


图 9 6 根铜丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.9 Self-radiative evolution process of six copper wires electric explosion plasma (stored energy is 1200 J)

这可能与其内部放电通道的阻抗和爆炸产物的扩散过程相关。

图 12 为钽单丝电爆炸等离子体的自辐射演化过程。从图 12 中可以看到，钽丝的放电通道并没有像铜丝一样迅速膨胀，其放电发展过程比较均匀，没有出现非均匀的局部等离子体。由于在电压峰值时刻，钽丝的沉积能量不足以使其完全汽化，在放电前几微秒内，等离子体的电离过程主要在钽丝的气液混合相的通道中发展。虽然宏观上钽丝电爆炸过程中的阻抗变化没有铜丝大，电极两端不会产生较大的过电压，但此时钽丝的气液混合相温度较高，放电通道内金属微粒的热电子发射过程显著，这使得中心通道的电离过程加强，等离子体通道易于发

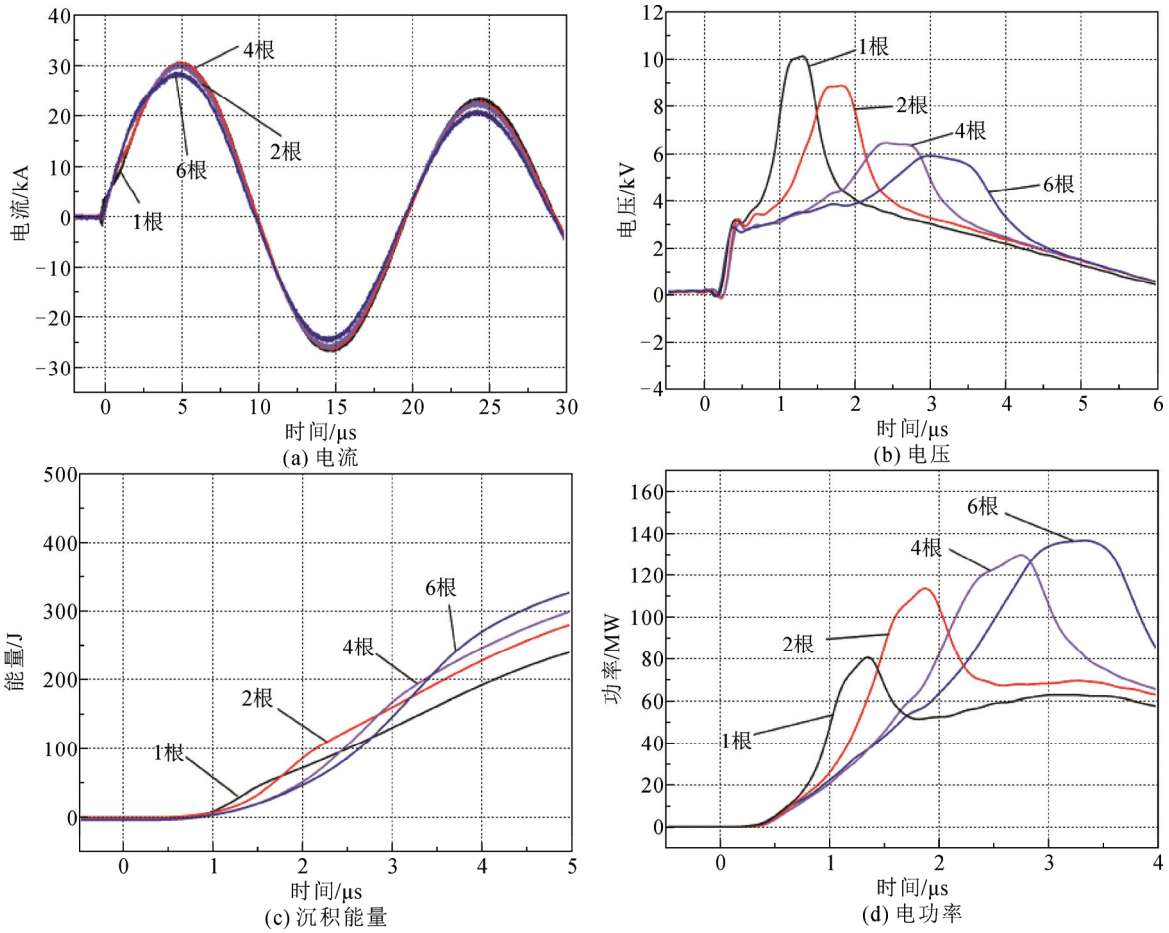


图 10　不同根数钽丝阵列的放电参数

Fig.10　Discharge parameters of different tantalum wire arrays with different numbers

表 2　不同根数钽丝阵列的电爆炸参数对比

Table2　Parameter comparison of electrical explosion parameters of different tantalum wire arrays

根数	初始电阻/mΩ	电压峰值时刻/μs	汽化所需能量/J	击穿前沉积能量/J	比沉积能量/eV	峰值功率/MW
1	119.4	1.3±0.02	84.2	66.2±1.21	7.9±0.18	80.6±1.12
2	59.7	1.8±0.03	168.5	143.7±1.13	8.6±0.10	113.7±2.23
4	29.9	2.7±0.03	336.9	223.7±1.03	6.7±0.05	129.9±1.47
6	20.0	3.6±0.04	505.4	309.9±1.01	6.2±0.02	139.9±2.18

展。从 6~10 μs 的放电发展来看，钽丝似乎是由外向内逐层汽化，放电通道边缘的电离过程比放电通道中心剧烈。随着放电通道内部温度的衰减以及放电通道中产生的钽蒸汽向外的逐渐扩散，中心通道的等离子体逐渐淬灭，光辐射强度变弱。

图 13—图 15 分别为 2、4、6 根钽丝阵列电爆炸等离子体自辐射的演化过程，可以看到随着丝根数的增加，各丝之间的加热过程和相变过程开始变得不同步，放电等离子体通道的发展也开始变得不

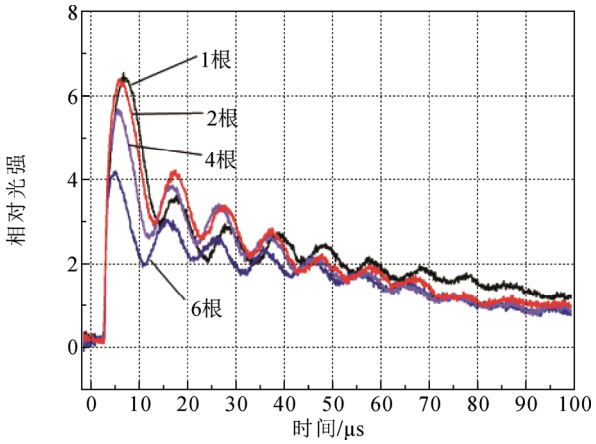


图 11　不同根数下钽丝阵列电爆炸光辐射强度(储能 1200 J)

Fig.11　Light radiation intensity of different tantalum wire arrays(stored energy is 1200 J)

均匀。等离子体的光辐射强度在电流第一次过零点后就变得相对较弱。相对于钽单丝，钽丝阵列的加热过程更长，放电通道内部爆炸产物密度更高，当通道内部大量高温粒子的热电离过程结束后，放电

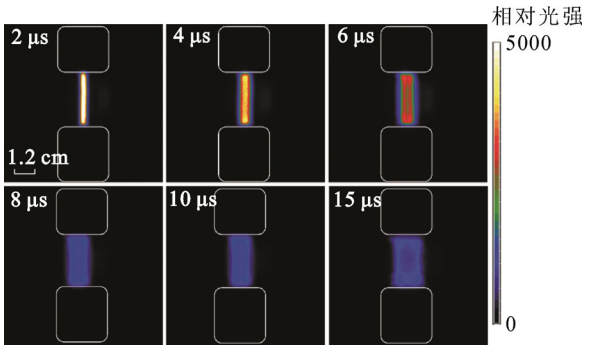


图 12 钽单丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.12 Self-radiative evolution process of a tantalum wire electric explosion plasma (stored energy is 1200 J)

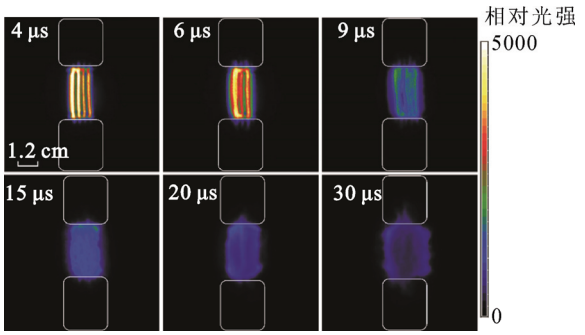


图 14 4 根钽丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.14 Self-radiative evolution process of four tantalum wires electric explosion plasma (Stored energy is 1200 J)

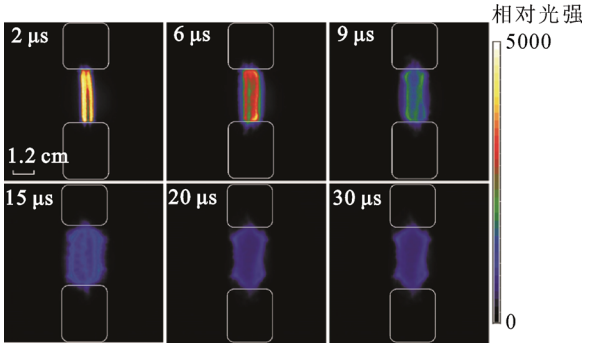


图 13 2 根钽丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.13 Self-radiative evolution process of two tantalum wires electric explosion plasma (stored energy is 1200 J)

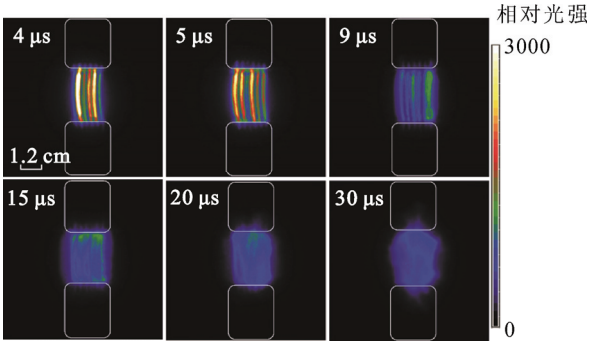


图 15 6 根钽丝电爆炸等离子体自辐射演化过程(储能 1200 J)

Fig.15 Self-radiative evolution process of six tantalum wires electric explosion plasma (stored energy is 1200 J)

通道内部无法满足持续电离的条件，其等离子体消散过程便会加快，且稍快于单丝。

从上述的结果中可以发现，钽丝的汽化和等离子体通道发展过程与铜丝完全不同，这可能主要是源于两者熔、沸点温度的不同。由 Webb FH 和 Tkachenko S I 等[27-28]提出的相变波模型可知，对于熔、沸点较低的金属(如铜、铝)，金属丝外部会首先汽化，并产生向内核传播的稀疏波，该稀疏波具有低压力的特性，使内部金属压力变小，也随之发生汽化，但此时的汽化过程可能不会特别均匀。汽化过程的加快将使得非难熔金属的放电通道温度和高温金属微粒的分布与难熔金属有较大差异，其电爆炸后期的放电等离子体通道发展比较弥散。对于高熔沸点金属(如钽、钨)，随着金属丝外部的逐渐汽化，向内核传播的稀疏波不足以使内核液态金属立即汽化，其整体的汽化过程将由外向内逐层发展，放电中心通道的温度较高。此时其放电通道内部的主要电离方式不仅包括碰撞电离还包括热电子发射过程(金属温度升高时，金属中自由电子动能超过逸出功的电子逃逸后发射出来的电子)，放电通道发展的起始条件容易满足，等离子体通道发展较为均匀。

2.3 丝阵列放电不均匀性研究

金属丝阵列电爆炸过程中各丝的相变过程很难实现同步发展，不同步的相变过程会导致电流分布不均匀，从而导致各丝的能量沉积过程出现差异。为了明确这一差异对其后续等离子体发展过程的影响，本文对比了不同直径和不同长度时铜丝在双丝并联电爆炸时的沉积能量过程和等离子体通道发展趋势，电流测量示意图见图 16。

图 17 给出了储能 675 J 下，两根相同直径和长度的铜丝(直径 200 μm、长度 3 cm)并联电爆炸时的放电参数及放电等离子体通道。从图 17 中可以看到，尽管两根铜丝的直径和长度相同，但二者在电压峰值前的能量沉积过程明显不同，这可能是由于两根金属丝与电极之间的接触电阻不同导致的。

铜丝 2 的电流跌落时间比铜丝 1 的跌落时间提前约 0.2 μs。在电压峰值时刻，铜丝 2 的沉积能量比铜丝 1 多约 10.3 J，这表明铜丝 2 的相变过程要

稍早于铜丝 1。当铜丝 2 率先相变时，回路电压会瞬间抬升，此时电流将重新分配，流过铜丝 1 的电流会瞬间增加，这一过程将加速铜丝 1 的能量沉积速率和相变过程。当铜丝 1 完成相变时，大量的电流又会重新流向铜丝 2 的放电通道，这加快了铜丝 2 的局部等离子体通道的形成(见图 17(d))，同时也使得铜丝 2 后续能沉积的能量多于铜丝 1。

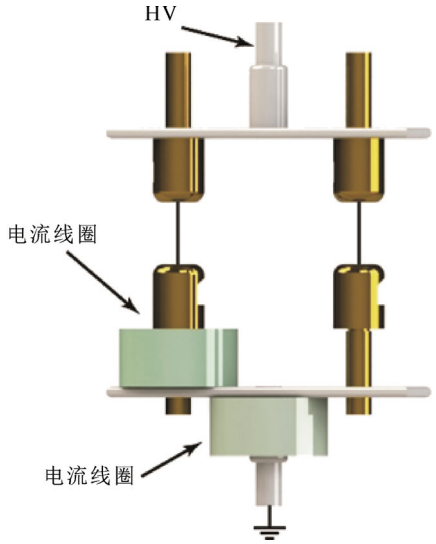


图 16　双丝并联电爆炸电流测量示意图

Fig.16　Schematic diagram of the current measurement

图 18 为储能 675 J 下，两根不同直径的铜丝(直径分别为 100 μm 和 200 μm、长度 3 cm)电爆炸时的放电参数及放电等离子体通道。从图中可以看到，直径为100 μm的铜丝先于直径200 μm铜丝相变(早约 0.12 μs)。这可能主要是由于细金属丝与电极之间的接触电阻较高[21]，在放电开始时细金属丝和电极附近容易被率先加热所导致的。

当直径 100 μm 金属丝发生相变后(并未完全汽化)，其阻抗会迅速增加，此时回路电流将发生第一次重新分配，大部分电流将主要流向直径 200 μm 的铜丝中，且电流注入速率较快，其能量沉积速率可达图 17 中相同丝直径并联电爆炸条件下铜丝 1 的两倍。直径 200 μm 的铜丝在较快电流注入速率条件下能够迅速汽化，此时其通道阻抗远大于直径 100 μm 铜丝通道的阻抗。由于电容中的储能并未全

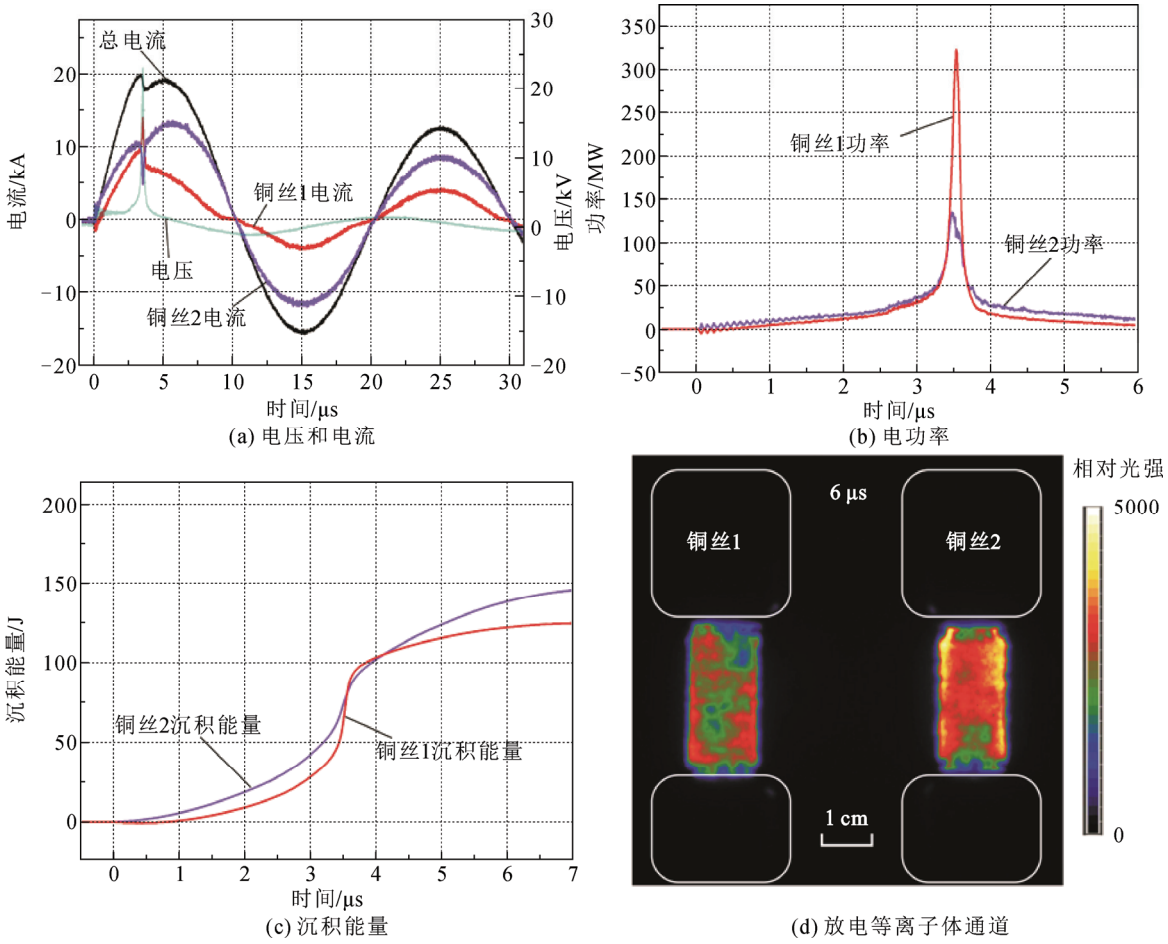


图 17　相同丝径并联电爆炸的放电参数

Fig.17　Discharge parameters of the same diameter wire

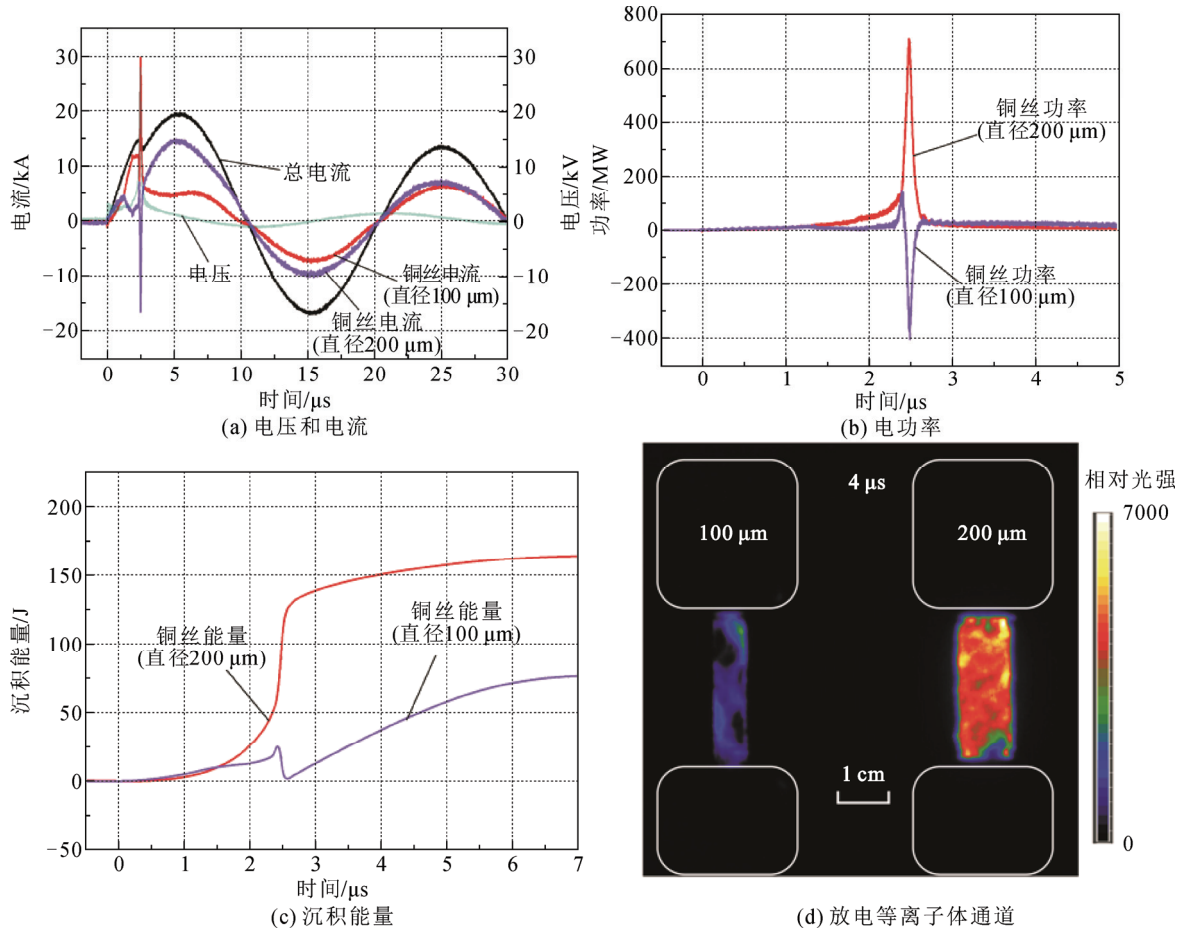


图 18 不同丝直径并联电爆炸的放电参数

Fig.18 Discharge parameters of different diameter wires

部耗散，主回路电流将快速发生第二次重新分配过程，直径 100 μm 的支路电流会出现明显的振荡现象，其放电通道的电离过程将缓慢发展，并逐渐形成等离子体。

3 结论

1）不论是铜丝还是钽丝，随着丝阵列根数(质量)的增加，丝阵列上击穿前沉积的能量会有所增加且总体相变时间变长。铜丝阵列在电爆炸过程中阻抗变化较大，在放电时会产生较高的过电压。对于铜丝阵列，当其能量沉积速率较快时，电爆炸过程中的光辐射强度会随金属丝根数的增加而有所增加，但光辐射持续时间相对于单丝较短，这可能与其爆炸产物的密度分布相关。

2）铜丝和铜丝阵列在相变后的爆炸产物会首先向内翻涌然后再不断地向外湍流，其电爆炸等离子体通道膨胀过程较快，放电中心通道内的加热和电离过程相对不够集中，发展较不均匀。此外，铜丝阵列在电爆炸过程中放电通道边缘的电离过程和光辐射强度要强于放电中心通道，当金属丝根数增加时，放电过程中各丝之间相变时刻的不同步开始逐渐凸显，放电等离子体通道发展极不均匀。

3）对于钽丝阵列，在储能一定的条件下，随着钽丝阵列根数(质量)的增加，电爆炸过程中的光辐射强度会有所下降。这可能由于当钽丝阵列根数增加时，其相变通道内高温高密度的持续时间加长，部分储能耗散在了相变和回路电阻中，从而导致后续等离子体辐射强度有所降低。钽丝阵列在相变过程中的气液混合通道能够被加热到较高的温度，放电通道内金属微粒的热电子发射过程和热电离显著，这使得放电中心通道的电离过程加强，等离子体通道易于发展，但通道膨胀速率要明显慢于铜丝。

4）丝阵列放电过程中各丝之间相变时刻的不同步会影响电流的分布，进而导致各丝之间的能量沉积过程不同，使得丝阵列中各丝等离子体通道的建立过程不同步。

参考文献　References

[1] CHACE W G, MOORE H K. Exploding wires (volume 1~4)[M]. New York, USA: Plenum Press, 1969.

[2] HAINES M G. A review of the dense *Z*-pinch[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2011, 53(9): 093001.

[3] 盛　亮，彭博栋，袁　媛，等. 表面绝缘混合平面丝阵 Z 箍缩激光阴影图像诊断[J]. 物理学报，2014，63(23)：233-239.
SHENG Liang, PENG Bodong, YUAN Yuan, et al. Laser shadowgraphy diagnostics for insulated-ordinary mixed planar wire array Z pinches[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(23): 233-239.

[4] ZHAO T, ZOU X B, ZHANG R, et al. X-ray backlighting of two-wire Z-pinch plasma using X-pinch[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(7): 075205.

[5] BORA B, WONG C S, BHUYAN H, et al. Understanding the mechanism of nanoparticle formation in wire explosion process[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 117: 1-6.

[6] 毕学松，朱　亮，杨富龙. 丝电爆过程的电流导入机理[J]. 物理学报，2012，61(7)：078105.
BI Xuesong, ZHU Liang, YANG Fulong. Mechanism of current injection in the process of wire electrical explosion[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(7): 078105.

[7] 张永民，邱爱慈，周海滨，等. 面向化石能源开发的电爆炸冲击波技术研究进展[J]. 高电压技术，2016，42(4)：1009-1017.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, ZHOU Haibin, et al. Research progress in electrical explosion shockwave technology for developing fossil energy[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1009-1017.

[8] 韩若愚，李柳霞，钱　盾，等. 液体中金属丝电爆炸的研究现状与展望[J]. 高电压技术，2021，47(3)：766-777.
HAN Ruoyu, LI Liuxia, QIAN dun, et al. Exploding metal wires in liquids: current situation and prospects[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 766-777.

[9] LIU Q J, YAO W B, ZHANG Y M, et al. Study on ignition mechanism and shockwave characteristics of nitramine powders ignited by microsecond exploding wire plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(10): 4500-4505.

[10] SHI H T, YI G F, LI X W, et al. Electrical wire explosion as a source of underwater shock waves[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(40): 403001.

[11] 刘巧珏. 金属丝微秒电爆炸驱动含能材料的基本过程及特性研究[D]. 西安：西安交通大学，2018.
LIU Qiaojue. Basic process and characteristics of energetic materials ignited by microsecond wire explosion[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2018.

[12] POCHAPSKY T E. Heat capacity and resistance measurements for aluminum and lead wires[J]. Acta Metallurgica, 1953, 1(6): 747-751.

[13] MARCUS R A. Application of the exploding wire technique in photochemistry[M]. CHACE E G, MOORE H K. Exploding Wires. New York, USA: Plenum Press, 1959.

[14] SARKISOV G S, SASOROV P V, STRUVE K W, et al. State of the metal core in nanosecond exploding wires and related phenomena[J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(3): 1674-1686.



孟　杨
1997—，男，博士生
主要从事脉冲功率放电等离子体方面的研究工作
E-mail:348303305@qq.com

MENG Yang
Ph.D. candidate



丁卫东(通信作者)
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压与绝缘技术及脉冲功率技术的研究
E-mail:wdding@mail.xjtu.edu.cn

DING Weidong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-06-2　修回日期　2023-02-17　　编辑　曹昭君