



·高电压及脉冲功率技术·

铜镍合金丝电爆炸放电特性与时空演化行为^{*}

韩若愚¹, 邓成志¹, 冯娟¹, 李琛¹, 姚伟博², 欧阳吉庭¹

(1. 北京理工大学 物理学院静电研究实验室, 北京 100081; 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)

摘要: 脉冲电流驱动金属丝电爆炸可产生具有较高能量密度的等离子体, 并伴随脉冲电磁辐射、强冲击波等效应, 广泛应用于 Z 箍缩、电热化学武器、油气助采等领域; 与纯金属相比, 合金具备电阻率高、成分可调、相变复杂等特点, 在电爆炸效应参数的调控方面具有很大潜力。开展了大气空气介质中铜、镍、铜镍(康铜)丝在微秒时间尺度电脉冲作用下电爆炸实验研究, 通过放电参数与自辐射图像诊断, 获取电爆炸过程放电参数与时空演变的特性规律, 得到脉冲电流作用下合金电爆炸在相变与等离子体方面的特征。实验发现, 在电爆炸早期, 铜镍合金的高电阻率能够提高能量沉积效率: 铜 52%、镍 74%、铜镍合金 78%; 而相爆开始后, 合金丝负载则更接近纯镍丝负载性能。等离子体通道早期膨胀速率在 5 mm/ μ s 量级, 随后迅速衰减; 合金丝等离子体膨胀时间更久, 击穿后平均电阻率上升缓慢, 且等离子体辐射与金属爆炸产物在空间尺度上存在关联性。特别地, 铜镍合金气溶胶分层同时具有横向和纵向特征(特征尺度 10^{-1} mm), 但整体较铜气溶胶更为均匀。

关键词: 金属丝电爆炸; 温稠密等离子体; 光辐射; 等离子体诊断; 二元合金; 纳米材料制备
中图分类号: TM89 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210103

Discharge characteristics and spatial-temporal evolution of Cu-Ni alloy wire explosion

Han Ruoyu¹, Deng Chengzhi¹, Feng Juan¹, Li Chen¹, Yao Weibo², Ouyang Jiting¹

(1. *Research Center for Electrostatics and Applications, School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*
2. *State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

Abstract: Electrical explosion of wires (EEW) driven by pulse current can produce plasmas with high energy density, and is accompanied by electromagnetic pulses, strong shock waves, etc., therefore it is widely adopted in Z-pinch, electrothermal chemical weapons, oil and gas exploitation and other fields. Compared to pure metal, alloy has characteristics of the high resistivity, adjustable composition, and complex phase transitions. It has great potential in regulating parameters of EEW. This paper presents an experimental study on exploding Cu, Ni, and Cu-Ni alloy (constantan) wires in atmospheric air under a microsecond time-scale pulsed current. Through the diagnoses of electrical parameters and self-emission images, the discharge characteristics and spatial-temporal evolution of explosion products were obtained. Features of the alloy wire explosion in phase transition and plasma were acquired as well. Experiments revealed that in the early stage of EEW, the high resistivity of the alloy could improve the energy deposition efficiency, namely 52% for Cu, 74% for Ni, and 78% for Cu-Ni, while after the explosion, performance of the alloy wire was closer to that of the Ni wire. The initial expansion rate of the plasma channel reached 5 mm/ μ s level but then decayed. The expansion process of alloy wire endured longer, and the average resistivity went up slowly after the breakdown. Also, a correlation was found between plasma radiation and metal aerosol in spatial scale. Especially, the alloy aerosol has crossed striation features (10^{-1} mm), but it is more uniform than Cu aerosol generally.

Key words: electrical wire explosion; warm dense matter; optical emission; plasma diagnostics; binary alloy; nano-powder preparation

* 收稿日期: 2021-03-22; 修订日期: 2021-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907007); 中国博士后基金项目(2019M650511); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室开放课题(SKLIPIR1906)

作者简介: 韩若愚(1991—), 男, 博士, 副研究员, 从事金属丝电爆炸、脉冲放电等离子体源与诊断研究。

金属丝负载在脉冲电流作用下,从固态到等离子体态急剧相变并伴随脉冲电磁辐射、强冲击波等效应的现象,被称为金属丝电爆炸^[1]。电爆炸可以在真空、气体与液体介质中进行,现象差异显著^[1,2]。20世纪50年代,金属丝电爆炸现象开始受到广泛关注。此后围绕金属丝电爆炸物理过程与效应,国内外学者开展了金属丝电爆炸物理机理、诊断方法、数值模拟、特性实验、工程应用等方面的系统研究,促进了人们对金属丝电爆炸细节的深入认识,构建了以Z箍缩、温密物质、纳米材料制备、电热化学武器为代表的格局^[3-7]。

对于真空或气体介质电爆炸,爆炸产物扩散快,等离子体发展充分,光辐射效应显著。与纯金属相比,合金具备成分可调、相变复杂等特点,因而在上述等离子体与光辐射参数的调控方面具有很大潜力。在丝阵Z-pinch的诊断中,为产生不同参数的点X射线源,Pikuz等人将Ni-Cr合金丝应用在X-pinch中^[8]。在激光诱导击穿光谱学(LIBS)的研究中,脉冲激光束经聚焦作用在合金靶上,研究发现对于合金材料,在能量快速注入时,其相爆(爆炸沸腾)阈值、过热系数将有较大变化,进而影响负载膨胀、击穿发展与后续等离子体演化^[9]。除此之外,合金丝爆的报道也常见于纳米材料的制备上,但以爆炸产物的观测为主^[10]。总体上,人们对合金丝电爆炸物理过程的关注与研究较少,对于合金丝相变、电离等动力学过程以及不同组分金属材质之间相互作用物理图像的认识尚不清晰,鲜有相关特性与理论研究开展。

针对上述问题,本文从铜镍合金(6J40康铜)电爆炸入手,比较其与纯铜、镍丝电爆炸之间的异同,从放电特性与等离子体时空演化角度,分析合金电爆炸的主要特征;在此基础上开展系统实验,比较不同直径铜镍合金丝电爆炸的特性规律。通过研究,有望获得以铜镍合金为代表的二元合金丝电爆炸的一般特征,发掘二元合金电爆炸的部分机制。

1 实验平台

用于本文电爆炸实验的实验平台原理示意图如图1所示。图1(a)为电路原理示意图,图1(b)为装置结构示意图。高压通过试验变压器T产生,通过整流硅堆D与限流电阻 R_c 对脉冲电容器C充电,到达预设电压后,触发开关S导通,电容对金属丝负载放电,驱动电爆炸。本实验中充电电压为9 kV,对应储能约250 J。在实验中通过同步触发系统控制高速相机拍摄电爆炸过程中的时空分辨图像,其中单帧曝光时间为0.95 μs ,两帧间隔为1.52 μs (650 000 帧/s)。在一些情况下,使用并联钨丝方法拍摄金属丝爆炸产物的阴影图像^[11],更多关于此平台的细节见文献[12]。

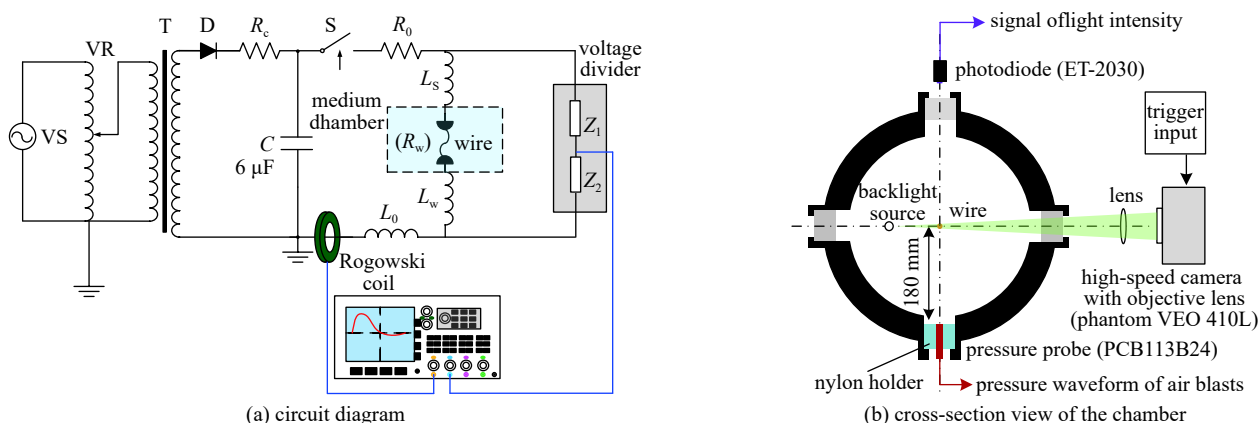


Fig. 1 Schematics of the experimental setup and configurations

图1 电爆炸实验平台原理图

实验中主要诊断设备如下:高速相机(Phantom VEO或Memrecam HX-3),光电二极管(ET-2030, 1.2 GHz),空气冲击波探头(PCB113B24, 100 kHz)。电压信号则通过高压探头P6015A(75 MHz)或PVM-5(80 MHz)采集,电流信号通过电流线圈Pearson101(4 MHz)采集。负载的阻性电压

$$U_R(t) \approx U - L_S \frac{dI(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: U 为测得的电压信号; L_S 为负载结构的电阻; I 为测得的电流信号。

实验中采用的铜丝、镍丝的纯度为99.99%,铜镍合金选取6J40牌号的康铜丝(约Ni-40%, Cu-58.6%, Mn-1.4%)。实验中金属丝的长度控制为2 cm,直径变化范围从25 μm 到300 μm 。

2 实验结果与讨论

2.1 铜、镍以及铜镍合金电爆炸的比较

图 2 给出了直径 300 μm 、长度 2 cm 的铜、镍与铜镍合金的放电波形,其中回路电阻和沉积能量由电压、电流波形简单计算得到。特别地,电爆炸过程负载电阻表现出明显的阶梯状特征(固态、液化、液态),而后伴随电阻急剧增加(汽化)与下降(电离),形成电阻峰^[13]。表 1 归纳了放电特征参数。

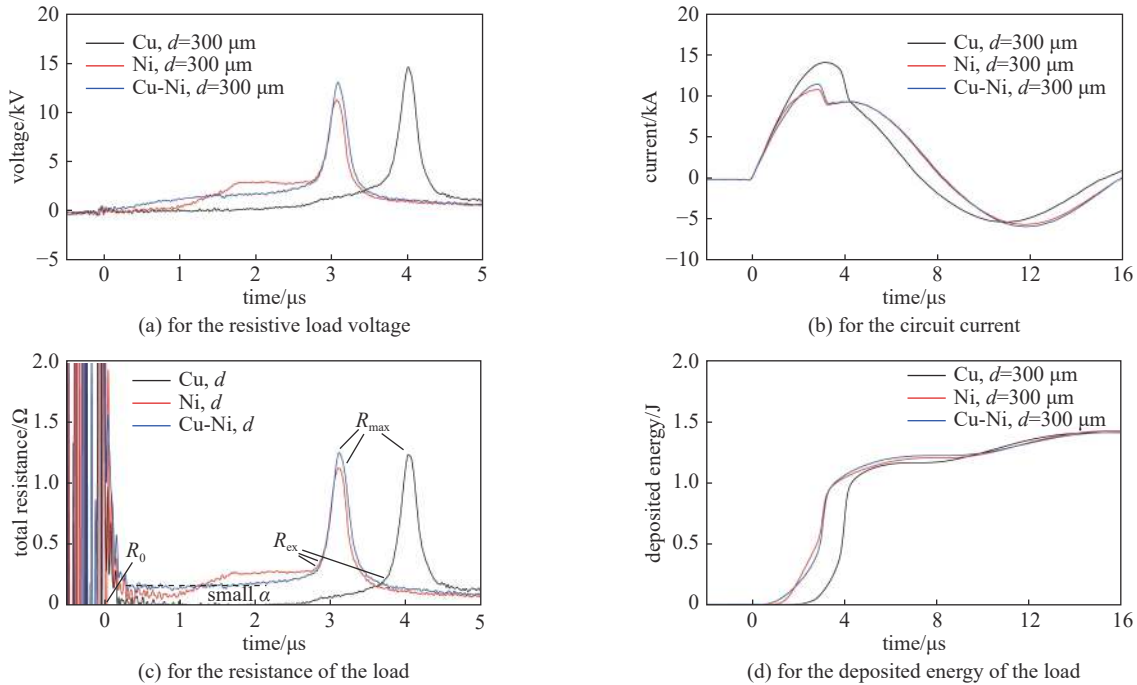


Fig. 2 Representative electrical waveforms of exploding 2-cm-long Cu, Ni, and constantan wires with diameters of 300 μm under 250 J stored energy in air

图 2 空气中铜、镍与铜镍合金电爆炸典型放电波形(直径 300 μm , 长度 2 cm, 储能 250 J)

表 1 放电参数结果统计

Table 1 Statistics of the discharge parameters above

wire type	initial calculated resistance R_0/Ω	maximum measured resistance R_{max}/Ω	maximum electric power P_{max}/MW	energy to vaporize the wire E_v/J	deposited energy E_d/J	overheating factor ζ	total deposited energy E_{total}/J
300- μm Cu	5.01×10^{-3}	1.30 ± 0.02	166.0 ± 3.5	78.23	56.2 ± 1.3	~ 0.72	117.4 ± 1.6
300- μm Ni	2.21×10^{-2}	1.15 ± 0.01	113.3 ± 3.1	106.67	59.6 ± 0.5	~ 0.56	121.6 ± 1.7
300- μm Cu-Ni	1.35×10^{-1}	1.28 ± 0.02	135.2 ± 0.4	89.26	56.8 ± 1.5	~ 0.64	120.3 ± 1.3

表中完全气化所需能量根据 NIST JANAF 数据库进行估计。从以上结果可以发现,三种材料的电阻变化和能量沉积明显不同,铜镍合金丝爆炸的特征也不是铜和镍放电参数的简单组合。根据 Tucker, Burtsev, Pikuz 等人的研究,电爆炸过程中金属导体电阻(率)变化一般有如下形式^[13-15]

$$\begin{cases} R/R_0 = \alpha_0 + \alpha[f(T) - f(T_0)] \\ R/R_{ex} = A \exp\{\beta[f(T) - f(T_{ex})]\} \end{cases} \quad (2)$$

其中,第一个式子可以用于描述固态加热、熔化、液态加热阶段的电阻变化,第二个式子用于描述气化(爆炸)阶段电阻的变化。 R, R_0, R_{ex} 分别为电阻、金属丝初始电阻、爆炸起始时刻(一般对应电流开始下降的拐点)的电阻; α_0 为常数(与固态加热/熔化/液态阶段初始电阻值有关), α 为电阻温度系数(TCR, 不同阶段取值不同), β 为力能系数(用于描述电阻指数增长陡度); A 为常数; f 为关于内能的函数, T 为温度(此阶段与放电时间正相关),部分文献定义为时间。在温度较低时($< 500^\circ\text{C}$),与纯铜和镍相比,铜镍合金(6J40 康铜)具有更高的初始电阻率,并且电阻温度系数 α 非常小(几乎为零),如图 2(c) 所示。因此,铜镍合金负载初始具有最高的电阻,且电阻变化不大,表现为平缓的电阻上升,即使在液态,铜镍合金的 α 系数仍然不高,但此时的值介于纯铜与镍之间。从能量角度来看,

铜镍合金依靠高初始电阻在最初 2 μs 内具有最高的能量沉积速率,如图 2(d)中的蓝线所示。但是,随着加热过程的不断进行,镍和铜的电阻率迅速增加,迅速超过铜镍合金的能量沉积速率,如图 2(d)中的红色和黑色线所示。气化开始后,所有三种材料都进入电压/功率的快速增加阶段,最大电功率对于铜而言最高,而对于镍而言最低,铜镍合金介于二者之间,更接近镍;过热系数 ζ 变化趋势与此相同。需要指出,铜初始电阻小,早期能量沉积速率低,达到爆炸前需要更多加热时间,因此铜电阻峰出现的时刻要迟于镍与铜镍合金,如图 2(c)所示。因此,考虑到回路电阻和金属丝负载电阻的能量分配,需要考虑能量沉积效率的问题,这也是很多工业应用中采用合金丝的原因。

对于合金丝而言,其显著特点是电阻率高,虽然三种金属丝在击穿前的沉积能量 E_d 的差距并不大,但是如果考虑回路损耗,能量沉积效率则存在不小差异,短路实验测得回路电阻 R_0 约为 $8.3 \times 10^{-2} \Omega$,因此击穿前沉积能量效率 η 计算如下

$$\eta = \int_{t=t_0}^t U_R I dt / \left(\int_{t=t_0}^t U_R I dt + \int_{t=t_0}^t I^2 R_0 dt \right) \quad (3)$$

计算得到,截止到击穿时刻,铜、镍、铜镍合金三者能量沉积效率分别为 0.52, 0.74, 0.78。因此,对于回路电阻较大的驱动电源,如并联电容、紧凑性差、引线长的情况,采用高电阻的合金丝能够有效提升能量沉积效率^[16]。

图 3 展示了上述三种情况的等离子体自辐射的高速相机图像,并对膨胀速率进行了统计。需要指出,由于高速相机的相邻帧之间为 μm 量级,因此每次拍摄初始帧与放电起始时刻的时间差会略有不同。由于金属丝并未完全气化,因此存在稠密的气液分散相(气溶胶)和等离子体并存的情况,从自辐射图像可以观察到本应充满等离子体的通道存在大量不发光的区域,便是这种稠密金属气溶胶。可见,三种材质的等离子体分布并不相同,铜最不均匀,而铜镍合金则最为均匀。等离子体发光区域伴随爆炸与电离过程的发生急剧膨胀,而后逐渐衰减,如图 3(d)所示。这种趋势与沉积能量曲线存在一定关联性,也有学者进行过相关报道^[17],但两者拐点间存在一定时延。从膨胀速率的统计数据来看,铜丝早期膨胀速率最高(电功率也最高),超过 5 mm/μs,镍丝和铜镍合金丝的膨胀速率相近,约为 3.5 mm/μs,最终三者的膨胀速率趋同,均衰减至约 1 mm/μs。

实际上,不同材质金属气溶胶的发展特点并不相同,利用并联钨丝电爆炸的方法可以方便地获取金属蒸气

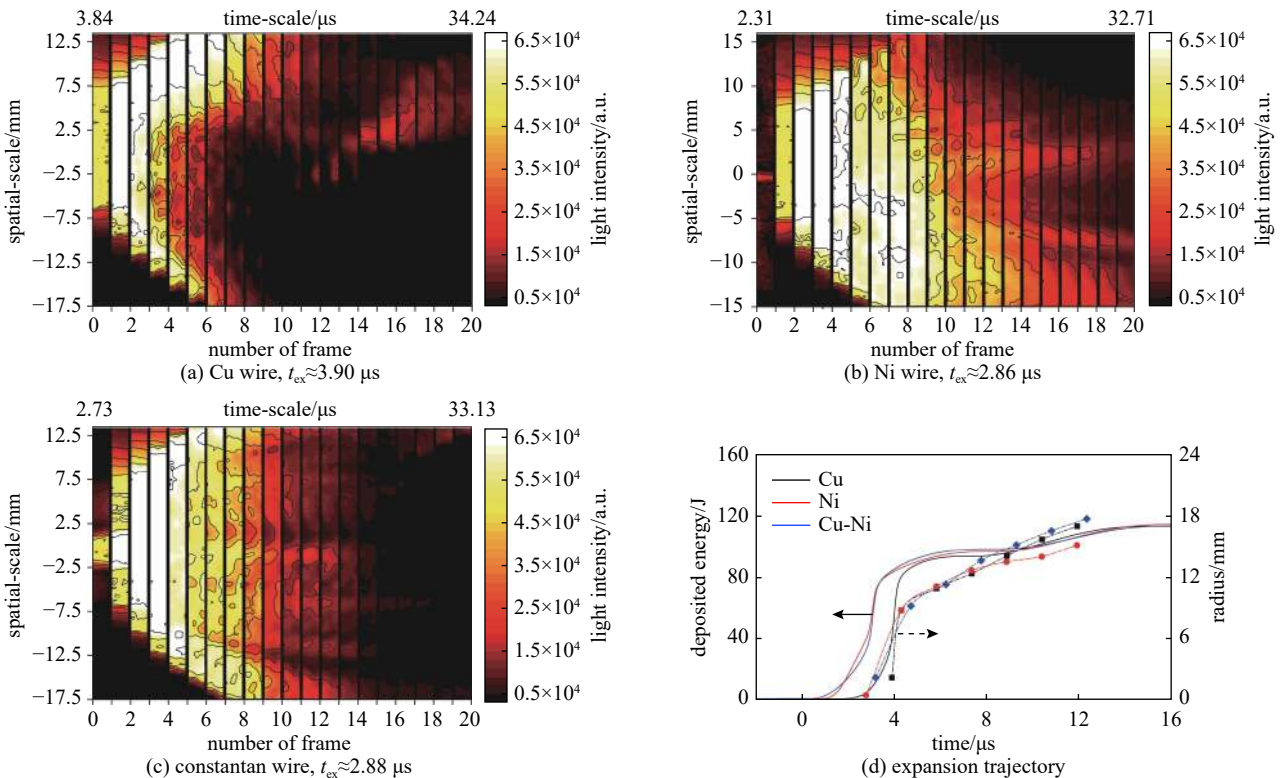


Fig. 3 High-speed images of exploding 2-cm-long Cu, Ni, and constantan wires with diameters of 300 μm under 250 J stored energy in air
图 3 空气中铜、镍与铜镍合金电爆炸自辐射时空演化图像(直径 300 μm, 长度 2 cm, 储能 250 J)

的阴影图像,这是由于钨丝与其他非难熔金属并联爆炸时,由于钨丝熔沸点、原子化焓、电阻率高,非难熔金属先气化相爆,随后电流转移至钨丝表面击穿,将高阻状态的非难熔丝爆炸产物短路,此时利用钨丝强光辐射透过爆炸产物便可进行观测,其原理布置如图1(b)所示^[18]。图4给出了钨丝电爆炸背光作用下的铜、镍、铜镍合金丝气溶胶的阴影图,实验条件为直径300 μm、长4 cm金属丝,500 J储能,其负载长度和系统储能均为图3情况的两倍。可以看出,铜丝电爆炸形成的气溶胶并不均匀,容易形成垂直通道的分层,特征长度为0.1~0.5 mm。与之不同,镍丝气溶胶更为均匀,分层的特征长度约为0.3 mm。而铜镍合金丝气溶胶则表现出横向和纵向分层交错的情况。

2.2 铜镍合金电爆炸的电爆炸特性

在250J储能下,对长2 cm、直径25 μm至270 μm的铜镍合金(6J40康铜)进行了一组实验,图5给出了典型情况下的电压电流波形。可以看出,在金属丝直径为25 μm时,出现了1 μs左右电流间歇,而后等离子体通道随着二次击穿过程产生。随着金属丝直径的增加,更多储能用于相变,电爆炸时刻向后推迟。

图6统计了上述电爆炸过程放电特性与部分热力学特性随金属丝直径(质量)的演化规律。其中 V_{peak} 、 I_{ex} 、 P_{peak} 分别表示电爆炸过程中电压峰值、首个电流峰值(其后发生相爆)、电功率峰值; E_d 、 E_{total} 、 ζ 分别表示电压峰值时刻沉积能量、总沉积能量、过热系数(电压峰值沉积能量与完全汽化所需能量比)。根据图6(a),随着金属丝直径增加,峰值电压 V_{peak} 呈现先增加后下降的趋势,最大值超过3倍充电电压,而25 μm直径情况下低峰值电压可能与放电模式(电流间歇)有关,直径大于60 μm后,电爆炸在电流上升沿发生,峰值电压逐步下降(电阻随横截面积增加而下降)。另一方面,电流 I_{ex} 和电功率峰值 P_{peak} 都表现出随金属丝直径增加而上涨的趋势,但增长速率在150 μm后放缓。能量沉积方面,图6(b)表明沉积能量随着金属丝直径(质量)增加呈现上升趋势,但过热系数 ζ (比沉积能量)都小于1,在0.5~0.9之间,表明电压击穿时刻,这种材质的金属丝并未达到完全气化;总沉积能量 E_{total} 随着金属丝直径(质量)的增加不断上升,随后趋于平缓,这与等离子体阶段的长短有关,当金属丝质量较小时,低阻抗的等离子体阶段主导放电过程,导致总沉积能量低。

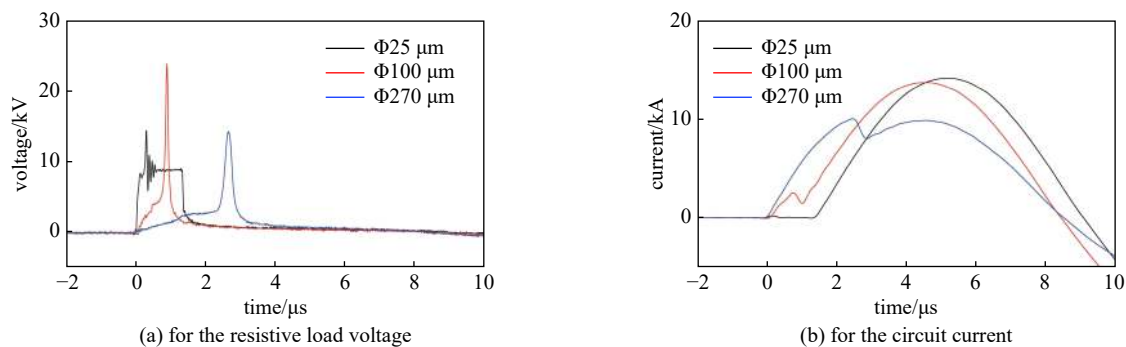


Fig. 5 Representative electrical waveforms of exploding 2-cm-long constantan wires under 250 J stored energy in air

图5 空气中铜镍合金电爆炸典型放电波形(直径25~270 μm,长度2 cm,储能250 J)

需要指出,虽然25 μm情况下的电爆炸很快发生(ns尺度),但沉积能量并不高,过热系数 ζ 甚至低于最慢的270 μm情况。这表明金属丝与电源之间需要合适的配合,从能量转移的角度,细丝电阻高(初始值约54 Ω),不利于能量从电容器到负载的释放;从相变的角度,高电阻导致的小电流容易在气化过程(很可能仅部分气化)中被截

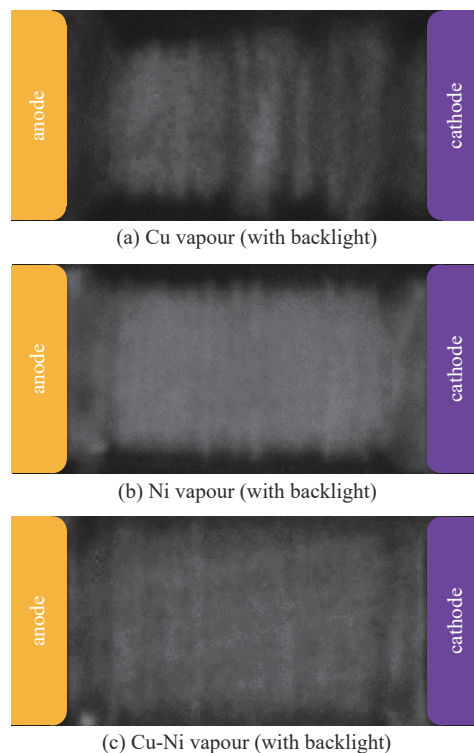


Fig. 4 Backlit images for single wire explosions of Cu, Ni, and Cu-Ni wire loads (around 10 μs after the explosion, exposure time 1 μs), the distance between two electrodes is 4-cm long

图4 空气中铜、镍与铜镍合金电爆炸阴影图像(拍摄时间约为爆炸发生后10 μs,曝光时间约1 μs),电极间距为4 cm

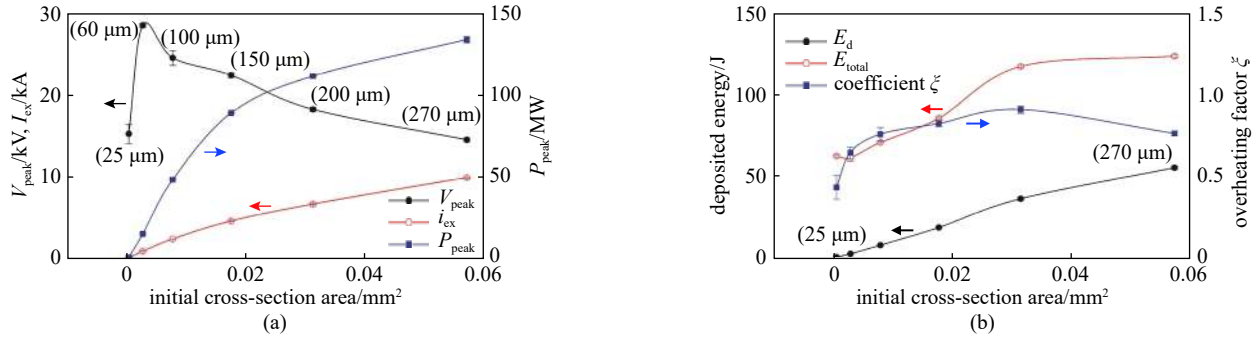


Fig. 6 Characteristic parameters of exploding 2-cm-long constantan wires with diameters of 25~270 μm under 250 J stored energy in air
图 6 空气中铜镍合金电爆炸特性参数统计

断,加上相变过程快,2 cm 的间隙击穿亦难以发展,因而产生电流间歇。

图 7 给出了直径 25 μm 与 100 μm 情况下自辐射图像,通过与 300 μm 情况比较(图 3(c)),可以发现如下特征:①电流间歇期间,气溶胶的直径在 mm 量级,如图 7(a)所示第一帧,而等离子体形成后,等离子体区域瞬间膨胀至 cm 量级;②热的金属爆炸产物与等离子体呈现一定关联,金属丝质量增加,爆炸产物体积增加,发光区域体积增加;③小直径金属丝爆炸过程快,而后等离子体通道几乎不再扩张,如图 7(a)所示,而粗金属丝爆炸并击穿后,等离子体通道仍继续缓慢膨胀,如图 7(b)与图 3(c)所示。

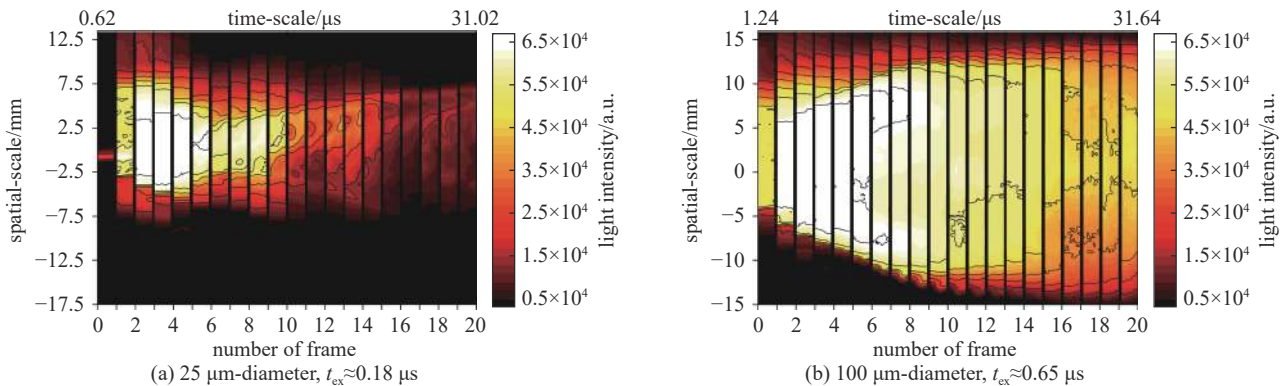


Fig. 7 High-speed images of exploding 2-cm-long constantan wires under 250 J stored energy in air
图 7 空气中铜镍合金电爆炸自辐射时空演化图像(长度 2 cm, 储能 250 J)

3 结 论

本文采用放电参数诊断联合高速摄影的方法,对铜镍合金丝(6J40 康铜)电爆炸的放电特性以及等离子体辐射的时空演化行为进行了研究。比较了纯铜/镍丝与铜镍合金丝电爆炸行为,初步明确了合金电爆炸放电参数与等离子体通道膨胀特征,发现合金的高电阻率有利于提升击穿前的能量沉积效率,而相爆后铜镍合金的行为更接近镍丝;观测了三种材质金属气溶胶的大尺度(10^{-1} mm 量级)分层特征,发现铜气溶胶最不均匀,而铜镍合金气溶胶虽然整体较为均匀,但存在交错的分层结构。在此基础上,对同一储能下,同一长度但不同直径的铜镍合金丝电爆炸开展了特性研究,得到了峰值电压、最大电功率、沉积能量等参数的变化规律,阐明了细丝电流间歇产生的原因;归纳了不同直径丝电爆炸等离子体时空演化特点。当前研究对合金丝电爆炸的物理机制关注较少,本文率先从实验角度开展了合金电爆炸过程研究,对于研究金属相变、纳米材料制备、优化电爆炸效应参数具有一定参考意义。在今后的工作中,将从放电和相变(包括电离)这两个角度开展更为深入细致的工作。

致 谢 感谢工作过程中清华大学王新新教授、西安交通大学张永民教授给予的指导和帮助。

参考文献:

[1] Chace W G, Moore H K. Exploding wires [M]. New York: Plenum Press, 1959.
[2] 张永民, 姚伟博, 邱爱慈, 等. 金属丝电爆炸现象研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2668-2680. (Zhang Yongmin, Yao Weibo, Qiu Aici, et al. Review of wire electrical explosion phenomena[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2668-2680)

- [3] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Pulsed power technology applications[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016.)
- [4] 高翔, 万元熙, 丁宁, 等. 可控核聚变科学技术前沿问题和进展[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 25-31. (Gao Xiang, Wan Yuanxi, Ding Ning, et al. Frontier issues and progress of controlled nuclear fusion science and technology[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 25-31)
- [5] 王莹, 孙元章, 阮江军, 等. 脉冲功率科学与技术[M]. 汕头: 汕头大学出版社, 2010. (Wang Ying, Sun Yuanzhang, Run Jiangjun, et al. Science and technology on pulsed power[M]. Shantou: Shantou University Press, 2010.)
- [6] 王俞卫, 陈冬群, 张自成, 等. 基于爆磁压缩发生器的紧凑脉冲功率源(英文)[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 025002. (Wang Yuwei, Chen Dongqun, Zhang Zicheng, et al. Compact pulsed power source based on explosively driven magnetic flux compression generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 025002)
- [7] 王坤, 姜林村, 史宗谦, 等. 纳秒级铝单丝电爆炸过程中金属态-非金属态转变研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2957-2964. (Wang Kun, Jiang Lincun, Shi Zongqian, et al. Metal-nonmetal transition in nanosecond electrical explosion of aluminum wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2957-2964)
- [8] Pikuz S A, Sinars D B, Shelkovenko T A, et al. High energy density z-pinch plasma conditions with picosecond time resolution[J]. Physical Review Letters, 2002, 89: 035003.
- [9] Ouyang Peixuan, Li Peijie, Leksina E G, et al. Effect of liquid properties on laser ablation of aluminum and titanium alloys[J]. Applied Surface Science, 2016, 360: 880-888.
- [10] Liao Qilong, Tannenbaum R, Wang Zhonglin. Synthesis of FeNi₃ alloyed nanoparticles by hydrothermal reduction[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(29): 14262-14265.
- [11] Chace W G. Liquid behavior of exploding wires[J]. The Physics of Fluids, 1959, 2(2): 230-235.
- [12] Han Ruoyu, Wu Jiawei, Qiu Aici, et al. A platform for exploding wires in different media[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88: 103504.
- [13] Tucker T J, Toth R P. EBW1: a computer code for the prediction of the behavior of electrical circuits containing exploding wire elements[R]. Albuquerque: USDOE, 1975.
- [14] Burtsev V A, Kalinin N V, Luchinski A V. Electrical explosion of conductors and its application in electro-physical installations[M]. Moscow: Energoatomizdat, 1990.
- [15] Tkachenko S I, Pikuz S A, Romanova V M, et al. Overvoltage pulse development upon electrical explosion of thin wires[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(6): 1742-1750.
- [16] Bigelmayr M, Pieterse P, Uhlandt D. Energy dissipation and efficiency of exploding stainless steel wires of various lengths and diameters[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 54: 045202.
- [17] Zhao Junping, Xu Zhuo, Yan Wenyu, et al. Characteristics and diffusion of electrical explosion plasma of aluminum wire in argon gas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(2): 185-192.
- [18] Han Ruoyu, Zhu Wanying, Wu Jiawei, et al. Spatial-temporal evolution of plasma radiation in electrical wire explosion: a morphological observation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53: 345201.