

水中铝丝和铜丝电爆炸特性的实验研究

张少杰, 张永民, 罗成, 赵和杰, 陆锦波, 孟杨, 邱爱慈

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对水中金属丝电爆炸冲击波技术的负载材质选用问题, 对比研究了具有相同长度和初始电阻的铝丝、铜丝水中电爆炸的放电特性和冲击波特性。采用初始储能约 53.5 kJ 的脉冲电流源驱动 4 组铝丝和铜丝产生电爆炸, 测量放电过程中的负载电压、回路电流与冲击波压力波形, 并计算电功率、沉积能量及冲击波冲量密度等。实验结果表明: 铝丝电爆炸具有更快的相变过程, 而铜丝电爆炸具有更高的电压峰值、电功率峰值, 相应地具有更快的击穿/电离过程以及更低的等离子体电导率; 铝丝和铜丝电爆炸在相变过程的沉积能量相似, 但前者在电压峰值后的沉积能量更多, 总沉积能量更多; 4 组对比实验铝丝电爆炸产生的冲击波的峰值压力、冲量密度和能量密度相较于铜丝电爆炸分别高出 1%~9%、55%~87% 和 33%~62%。

关键词: 水中金属丝电爆炸; 负载材质; 放电特性; 冲击波

中图分类号: TM89 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509004 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0033-08

Experimental Study on Electrical Explosion Characteristics of Aluminum and Copper Wires in Water

ZHANG Shaojie, ZHANG Yongmin, LUO Cheng, ZHAO Hejie,

LU Jinbo, MENG Yang, QIU Aici

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the selection of load materials for the shockwave technology based on underwater electrical wire explosion, the discharge and shockwave characteristics of explosions of aluminum and copper wires with the same length and initial resistance is investigated. A pulsed current source with an initial stored energy of approximately 53.5 kJ is used to drive four sets of aluminum and copper wires for electrical explosion. The load voltage, circuit current, and shock wave pressure waveforms are measured during the discharge process, and the electrical power, deposited energy, and shock wave impulse density are calculated. The experimental results show that aluminum wire explosions exhibit a faster phase transition process, while copper wire explosions demonstrate higher peak voltage, peak electrical power, and faster breakdown/ionization, but lower plasma conductivity. The deposited energy during the phase transition is similar for both materials, but aluminum wires accumulate more energy after the voltage peak, resulting in greater total deposited energy. Compared to copper wire explosions, aluminum wire explosions produce shock waves with 1%—9% higher peak pressure, 55%—87% higher impulse

density, and 33%—62% higher energy density in 4 groups of comparative experiments.

Keywords: underwater electrical wire explosion; load material; discharge characteristic; shock wave

金属丝电爆炸是指一定参数的脉冲电流驱动金属丝快速相变(固态、液态、气态和等离子体态),并伴随着冲击波、光辐射等现象的物理过程,可以在真空、空气和水等多种介质中进行^[1-3]。相比于真空和空气等介质,水介质的可压缩性弱且绝缘强度高,可以增强金属丝电爆炸的冲击波效应^[4-6]。近几年来,水中金属丝电爆炸被认为是传统火工品的理想替代,已经逐渐应用于储层改造、人工震源、隧道硬岩预裂等领域^[7-8]。

对于水中金属丝电爆炸,不同金属的电学和热物理性质的差异会影响能量沉积、放电等离子体通道/爆炸产物膨胀以及电离过程,进而影响冲击波和光辐射行为^[9-12]。根据 Romanova 等^[10]和 Han 等^[11]的实验研究,易熔金属丝(如 Al、Cu、Ag、Au)水中电爆炸产生的冲击波强于难熔金属丝(如 Nb、Mo、Ta、W),但产生的光辐射强度低一个数量级。此外,具有中等电导率、熔点及沸点金属丝(如 Ti、Fe、Ni 和 Pt)水中电爆炸产生的冲击波强度介于易熔金属丝和难熔金属丝之间。Grikshtas 等^[12]对 12 种材料的金属丝在亚微秒时间尺度的水中电爆炸特性进行了对比研究,结果表明 Cu、Pt、Ag、Zn 和 Al 的冲击波强度较高。实际上,对于以水中金属丝电爆炸为冲击波源的科学研究和工程应用,通常使用铜材或铝材,因为其易获取且经济性好。研究人员也因此对铜丝和铝丝水中电爆炸的冲击波效应开展了大量研究。Rososhek 等^[13]采用电学和光学联合诊断技术研究了铜丝和铝丝水中电爆炸的冲击波产生过程。Yuan 等^[14]和 Yin 等^[15]研究了回路参数对水中铜丝电爆炸冲击波特性的影响。Han 等^[16]和 Liu 等^[17]探讨了水介质参数对水中铜丝电爆炸冲击波特性的影响。部分研究人员还对比研究了相同尺寸的铝丝和铜丝水中电爆炸的冲击波特性。石桓通等^[6,18]在相同的脉冲电流源驱动下,对长度 4 cm、直径 0.1~0.4 mm 的铝丝和铜丝进行了水中电爆炸实验,结果表明直径为 0.1、0.3、0.4 mm 的铝丝电爆炸产生的冲击波峰值压力大于相同参数的铜丝,而 0.2 mm 直径下则相反。Han 等^[11]在相同的实验条件下开展了长度为 4 cm、直径为 0.1~0.3 mm 的铝丝和铜丝水中电爆炸实验,结果表明直径为 0.1、0.2 mm 时铝丝电爆炸产生的冲击波的

峰值压力更高,而直径为 0.3 mm 时则是铜丝更高。Gao 等^[19]也在相同的实验条件下开展了长度 5 cm、直径 0.1~0.6 mm 的铝丝和铜丝水中电爆炸实验,结果表明 0.1、0.2、0.5、0.6 mm 直径下铝丝电爆炸产生的冲击波的峰值压力更高,而 0.3、0.4 mm 直径下铜丝更高。这些研究结果表明,相同尺寸的铝丝和铜丝水中电爆炸产生的冲击波峰值压力的大小关系并非固定,而是受到金属丝直径的影响。也就是说,以金属丝直径为定量对比研究相同长度的铜丝和铝丝水中电爆炸特性是不合适的,无法明确铜材和铝材中哪一种更适合于水中金属丝电爆炸冲击波技术。

本文尝试引入初始电阻作为固定量,开展相同长度、初始电阻的铝丝和铜丝水中电爆炸实验,并分析放电特性和冲击波特性,进一步明确丝材质对电爆炸特性的影响。实验结果可为水中金属丝电爆炸冲击波技术的工程应用提供重要参考。

1 实验平台与方法

图 1(a)为水中金属丝电爆炸实验装置布局示意图。脉冲电流源由两个并联的 217 μF 脉冲电容器和气体火花开关组成。电流源的输出通过长约 29 m 的高压同轴电缆传输至同轴组件(用于固定金属丝),驱动金属丝发生水中电爆炸。电爆炸在 $\Phi 2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的钢制腔体中进行。图 1(b)为电路示意图。380 V 交流电经过变压器 T 升压至 660 V,再经过 30 kV 高压直流电源整流、升压,向电容器充电。所有实验中电容器的充电电压为 15.7 kV,初始储能约 53.5 kJ。通过短路实验,计算得到同轴组件的电阻和电感分别为 $R_1 = 4.15\text{ m}\Omega$ 、 $L_1 = 265.70\text{ nH}$,电容器、气体火花开关及高压同轴电缆总的电阻和电感分别为 $R_2 = 30.96\text{ m}\Omega$ 、 $L_2 = 6.61\text{ }\mu\text{H}$ 。

放电回路电流波形 $i(t)$ 通过 Power Electronic Measurements 公司的 CWT 1500 电流线圈(带宽为 0.03 Hz~16 MHz)获得。同轴组件(含金属丝)的端电压波形 $u(t)$ 通过 North Star 公司的 PVM-1 阻容分压器(带宽为 120 MHz)获得。

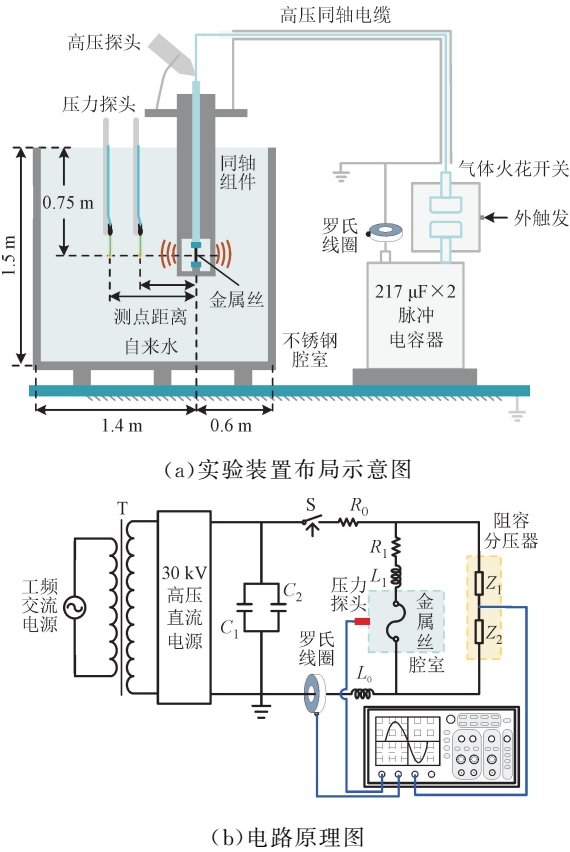


图 1 实验装置示意图与电路原理图

Fig. 1 Layout diagram and schematic circuit diagram of experimental setup

金属丝的阻性电压 $u_w(t)$ 的计算公式为

$$u_w(t) \approx u(t) - R_1 i(t) - L_1 \frac{di(t)}{dt} - L_{w0} \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: L_{w0} 为金属丝的初始电感, 计算公式为

$$L_{w0} = \frac{\mu_0 l_w}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{2l_w}{r_{w0}}\right) - \frac{3}{4} \right] \quad (2)$$

其中, μ_0 为真空磁导率, l_w 为金属丝长度, r_{w0} 为金属丝初始半径。下述讨论的所有电压均为金属丝的阻性电压。获得金属丝的阻性电压和回路电流后, 可以进一步计算放电过程中金属丝的电功率 $P(t)$, 以及 Δ 放电阶段的沉积能量 E_Δ , 计算公式分别如下

$$P(t) = u_w(t) i(t) \quad (3)$$

$$E_\Delta = \int_{t_0}^{t_1} P(t) dt \quad (4)$$

式中: t_0 和 t_1 分别为 Δ 放电阶段的起始时刻和结束时刻。将 E_Δ 除以金属丝质量可以获得能量沉积密度, 再除以 Δ 放电阶段的持续时间则可以获得能量密度沉积速率。

压力波形通过 PCB Piezotronics 公司的 PCB138A11 型号水中压力探头记录。在距离金属

丝轴线约 41 和 60 cm 处分别安装了传感器, 敏感元件与金属丝中心保持水平。传感器和爆源在腔体内的相对位置如图 1 所示。实验中所有诊断获得的波形均采用 Tektronix 的 MDO3054 记录。

选择 4 组相同长度、初始电阻的铝丝和铜丝开展水中电爆炸实验。表 1 列出了所选金属丝的直径、质量、初始电阻和升华能(金属丝的升华能指的是大气压下将金属丝从室温加热至沸点并完全气化所需的能量)。所有金属丝的长度均为 10 cm。铝丝的直径均为标准尺寸, 而铜丝采用拉线板自制得到。自制铜丝的直径均通过千分尺标定, 误差为 ± 0.01 mm。对于 4 组实验设置, 同时考虑实验设计和加工制作引入的误差, 初始电阻的误差均小于 $\pm 3\%$, 是可以接受的误差范围。

表 1 铝丝和铜丝的直径、质量、初始电阻和升华能

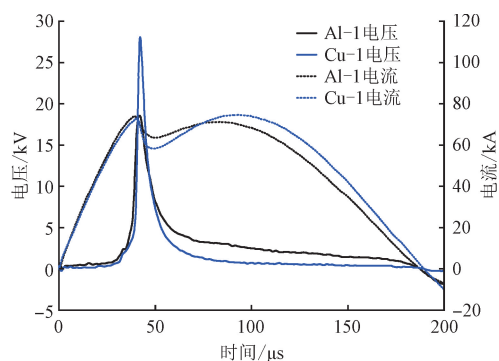
Table 1 Diameter, mass, initial resistance, and atomization of aluminum and copper wires

编号	直径/ mm	质量/ mg	初始电阻/ $\mu\Omega$	升华能/ kJ
Al-1	1.20	305.4	2 343.1	4.1
Cu-1	0.96	648.5	2 321.0	3.8
Al-2	1.60	542.9	1 318.0	7.3
Cu-2	1.27	1 135.0	1 326.2	6.7
Al-3	1.80	687.1	1 041.4	9.2
Cu-3	1.43	1 439.0	1 046.0	8.5
Al-4	2.00	848.2	843.5	11.4
Cu-4	1.59	1 779.1	846.1	10.5

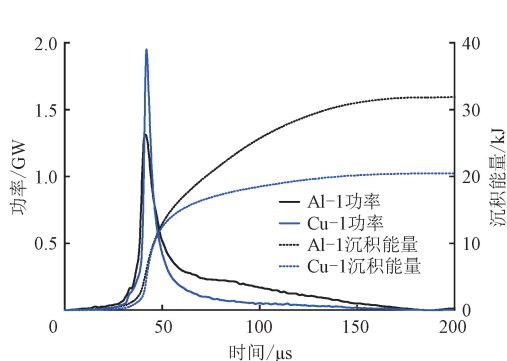
2 实验结果与讨论

2.1 电特性

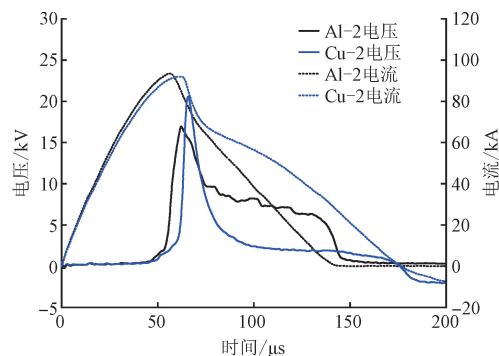
图 2 为电爆炸的电压、电流、功率和沉积能量波形。可以看出, 放电初期铝丝和铜丝电爆炸的电参数波形基本一致, 因为它们的初始电阻远小于回路固有电阻。随着焦耳加热的进行, 金属丝电阻提高, 此时由于铜丝和铝丝的热容与电阻温度系数不同, 电参数波形出现差异。从图 2 还可以看出, 铜丝电爆炸的电压峰值、电功率峰值总是高于铝丝, 表明铜丝电爆炸在气化完成时刻(电压峰值时刻)放电通道的电导率更低。考虑到铜和铝的沸点基本一致, 且铜的电阻温度系数低于铝, 可以推出铜丝电爆炸在气化完成时刻放电通道的温度更高、过热程度更高。Cu-2 的电压峰值、电功率峰值均高于 Al-1 佐证了这个推论, 因为 Cu-2 比 Al-1 具有更小的初始电阻、更大的初始直径。



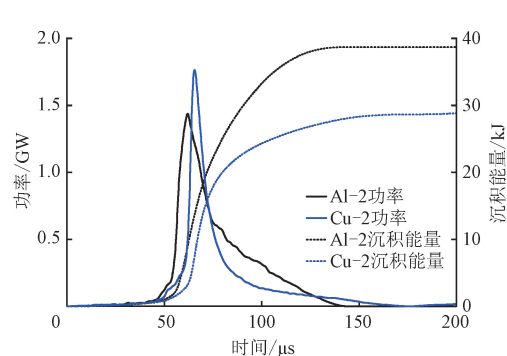
(a) 第1组电压和电流波形



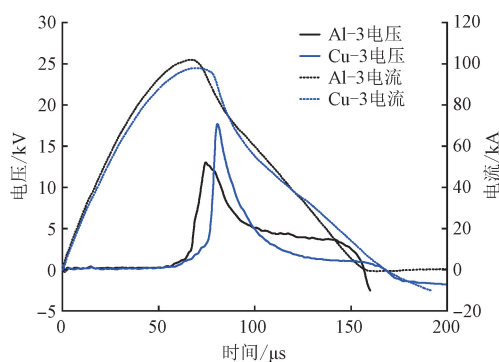
(b) 第1组功率和沉积能量波形



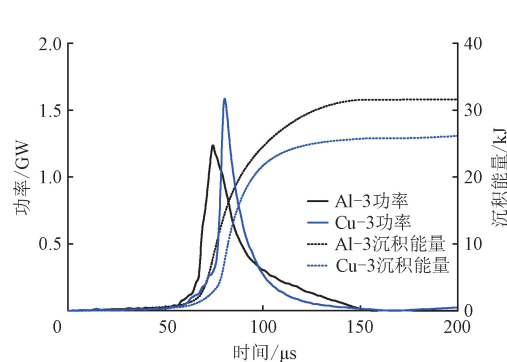
(c) 第2组电压和电流波形



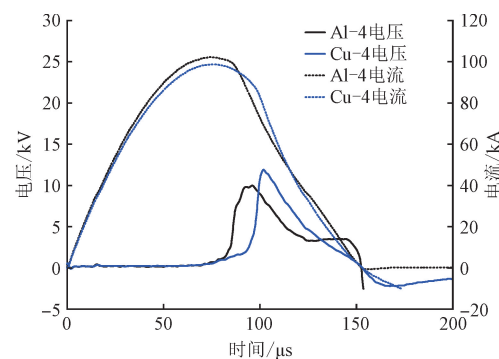
(d) 第2组功率和沉积能量波形



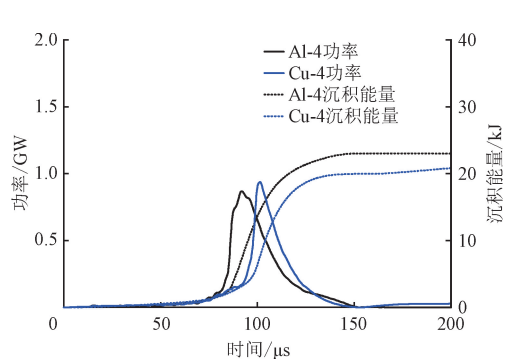
(e) 第3组电压和电流波形



(f) 第3组功率和沉积能量波形



(g) 第4组电压和电流波形



(h) 第4组功率和沉积能量波形

图2 电爆炸的电压、电流、功率和沉积能量波形

Fig. 2 Waveforms of voltage, current, power, and energy deposition for electrical explosions

此外,铜丝电爆炸的电压峰值、电功率峰值总是晚于铝丝出现,且随着初始电阻的减小,延迟时间变长。这表明尽管铝丝的升华能比相同初始电阻的铜

丝更大,但由于铝的电阻温度系数更大,铝丝电爆炸的相变过程(从放电开始至电压峰值)持续时间更短。在电压和电功率峰值后,铜丝电爆炸的电压和

电功率下降速度显著快于铝丝,表明铜丝电爆炸的击穿/电离过程更快。尽管铜的电离能(7.7 eV)高于铝的电离能(6.0 eV),但铜丝电爆炸的电压峰值更高、气化完成时刻放电通道的温度更高,促进了其击穿/电离过程。总得来说,铝丝水中电爆炸具有更快的相变过程,而铜丝电爆炸则具有更高的电压和电功率峰值、更快的击穿/电离过程。

从图 2 的沉积能量波形可以看出,铝丝电爆炸的总沉积能量总是高于铜丝,且随着初始电阻的减小,二者的差异不断缩小。为了探究原因,表 2 列出了电爆炸相变过程的沉积能量 E_1 、从电压峰值至电流第一次过零点的沉积能量 E_2 以及总沉积能量 $E(E_1 + E_2)$ 。电流第一次过零点后的沉积能量很小且难以耦合到冲击波中,通常不考虑^[20-21]。从表 2 可以看出,1~3 组实验中铝丝和铜丝电爆炸的 E_1 基本一致,第 4 组实验结果的差异可能源于铝丝电爆炸的电压峰值时刻不明显。然而,4 组实验中铝丝电爆炸的 E_2 均显著高于铜丝。这也是铝丝电爆炸的 E 显著高于铜丝的原因。从图 2 还可以看出,电压下降沿后半段铜丝电爆炸的电压显著低于铝丝,表明其等离子体的电导率更高,相应地具有更小的 E_2 。这可能是因为铜丝电爆炸的电压峰值以及气化完成时刻放电通道的温度更高。此外,随着初始电阻减小,电爆炸的电压峰值时刻延迟,进而电压峰值至电流

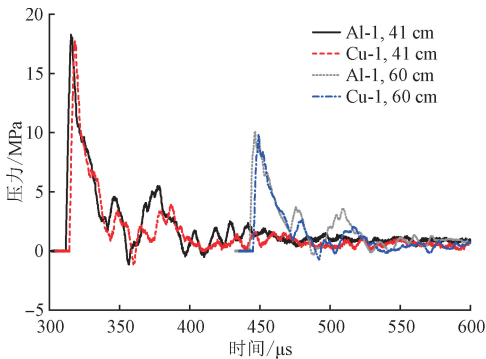
第一次过零点的持续时间缩短,使得铜丝和铝丝电爆炸的 E_2 、 E 的差异不断缩小^[23]。

表 2 电爆炸在不同放电阶段的沉积能量
Table 2 Energy deposition during different discharge processes in electrical explosions

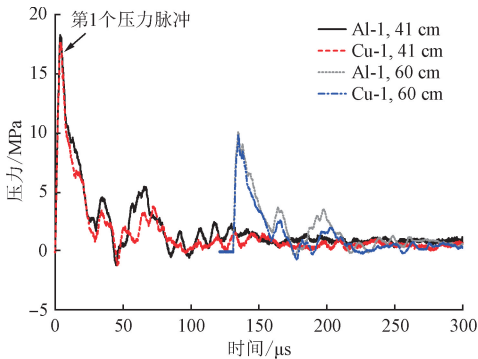
编号	E_1 /kJ	E_2 /kJ	E /kJ
Al-1	5.7 ± 0.3	24.8 ± 0.9	30.5 ± 1.0
Cu-1	5.1 ± 0.2	15.4 ± 0.6	20.5 ± 0.7
Al-2	9.0 ± 0.4	30.1 ± 0.5	39.1 ± 0.4
Cu-2	8.3 ± 0.3	20.3 ± 1.0	28.6 ± 1.2
Al-3	8.5 ± 0.7	21.6 ± 1.3	30.1 ± 0.9
Cu-3	8.8 ± 0.7	17.3 ± 0.5	26.1 ± 0.3
Al-4	12.4 ± 0.8	13.2 ± 0.9	25.6 ± 1.4
Cu-4	9.3 ± 0.9	11.4 ± 0.3	20.7 ± 0.6

2.2 冲击波特性

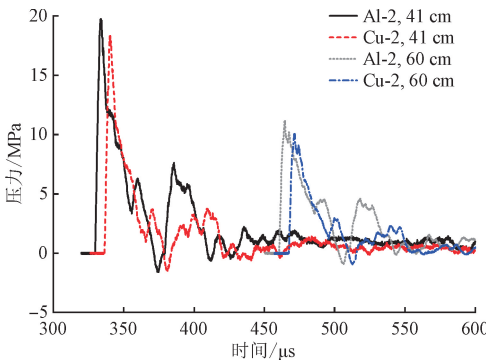
图 3 为电爆炸产生的冲击波压力波形,其中(a)、(c)、(e)和(g)的时间零点为放电起始时刻,(b)、(d)、(f)和(h)的时间零点为冲击波到达 41 cm 处压力探头的时刻。从原始压力波形可以看出,铜丝电爆炸产生的冲击波到达压力探头的时刻总是晚于铝丝,且随着初始电阻的减小,延迟时间变长。这与电特性中电压峰值、电功率峰值时刻的规律一致,因为冲击波阵面在电压峰值时刻附近与放电通道分离。



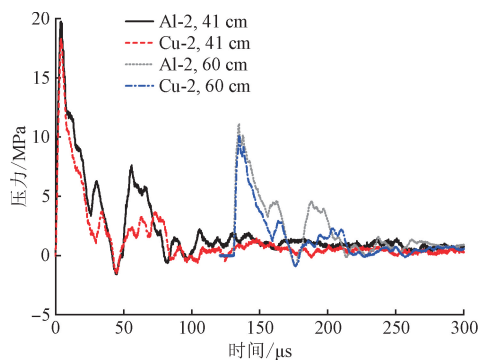
(a) 第 1 组原始压力波形



(b) 第 1 组对齐到达时刻的压力波形



(c) 第 2 组原始压力波形



(d) 第 2 组对齐到达时刻的压力波形

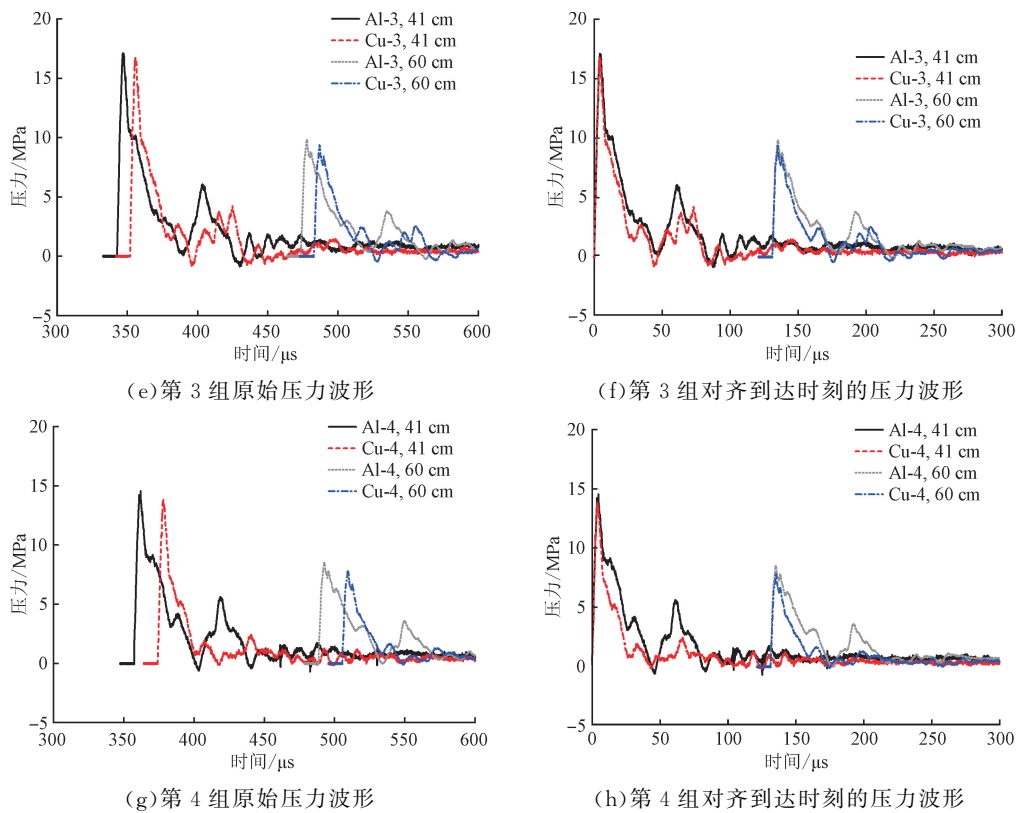


图 3 电爆炸产生的冲击波压力波形

Fig. 3 Pressure waveforms of shock waves generated by electrical explosions

从图 3 中对齐到达时刻的压力波形可以看出, 铝丝电爆炸产生的冲击波的峰值压力总是略大于铜丝。表 3 列出了电爆炸产生的冲击波在 41 cm 和 60 cm 处的峰值压力。

表 3 电爆炸产生的冲击波峰值压力
Table 3 Peak pressure of shock waves generated by electrical explosions

编号	峰值压力/MPa	
	41 cm 处	60 cm 处
Al-1	18.6±0.3	10.2±0.1
Cu-1	17.9±0.2	9.9±0.2
Al-2	19.8±0.2	11.0±0.2
Cu-2	18.2±0.2	10.1±0.2
Al-3	17.1±0.5	9.7±0.2
Cu-3	16.9±0.3	9.4±0.2
Al-4	14.7±0.5	8.6±0.3
Cu-4	14.0±0.6	7.9±0.4

对于单一材质、相同长度的金属丝水中电爆炸, 冲击波的峰值压力主要取决于能量密度沉积速率和沉积能量^[13,22-24], 其中能量密度沉积速率影响初始压力扰动的强度, 沉积能量影响峰值的衰减速度; 而材质不同时, 冲击波的峰值压力还受到金属物性参数(沸点的气化热、比热容)和状态方程等因素影响。表 4 列出了电爆炸的沉积能量、能量沉积密度和能量

密度沉积速率。可以发现, 除了第 3 组中铝丝电爆炸的沉积能量小于铜丝, 其余所有的沉积能量、能量沉积密度和能量密度沉积速率均是铝丝更大。然而, 同组中铜丝在沸点的气化热(Cu-1 为 3.02 kJ)小于铝丝(Al-1 为 3.32 kJ), 且铜的比热容比铝小, 也即铜丝在沸点气化并升高一定温度所需要吸收的热量低于铝丝。这些因素共同导致了铝丝电爆炸产生的冲击波的峰值压力总是略大于铜丝。

表 4 电爆炸在气化过程的能量沉积参数
Table 4 Energy deposition parameters during the vaporization process in electrical explosions

编号	沉积能量/kJ	能量沉积密度/(kJ·g ⁻¹)	能量密度沉积速率/(kJ·g ⁻¹ ·μs ⁻¹)
Al-1	3.06±0.04	10.0±0.1	3.72±0.08
Cu-1	2.1±0.2	3.2±0.3	2.50±0.20
Al-2	6.6±0.2	12.1±0.4	2.19±0.03
Cu-2	5.1±0.3	4.5±0.2	1.10±0.10
Al-3	6.2±0.2	9.1±0.3	1.10±0.02
Cu-3	7.1±0.6	4.9±0.4	0.39±0.01
Al-4	10.1±0.6	11.9±0.8	0.59±0.06
Cu-4	8.1±0.7	4.5±0.4	0.17±0.02

从图 3 中对齐零点的压力波形还可以看出,相比于铜丝,铝丝电爆炸产生的冲击波的第一个压力脉冲在峰值压力后衰减速度更慢,且后续多个压力脉冲的局部峰值压力更高。这表明铝丝电爆炸产生的冲击波的冲量密度和能量密度大于铜丝。表 5 列出了电爆炸产生的冲击波在 41 cm 处的冲量密度和能量密度,60 cm 处的冲击波叠加了水面和腔体底部反射的稀疏波,不计算冲量密度和能量密度。

表 5 电爆炸产生的冲击波在 41 cm 处的冲量密度和能量密度

Table 5 Impulse density and energy density of shock waves generated by electrical explosions at 41 cm

编号	冲量密度/(Pa·s)	能量密度/(kJ·m ⁻²)
Al-1	754.2±57.8	2.3±0.1
Cu-1	402.1±6.6	1.49±0.04
Al-2	786.6±34.4	2.9±0.1
Cu-2	495.0±15.8	1.84±0.02
Al-3	681.6±15.1	2.13±0.08
Cu-3	437.3±21.4	1.59±0.02
Al-4	605.1±18.6	1.62±0.08
Cu-4	380.5±45.9	1.0±0.1

冲击波的冲量密度 J 和能量密度 e 分别为

$$J = \int_{t_2}^{t_3} p(t) dt \tag{5}$$

$$e = \int_{t_2}^{t_3} \frac{p(t)^2}{\rho_0 c_0} dt \tag{6}$$

式中: $p(t)$ 为压力探头测得的冲击波压力波形; t_2 为冲击波阵面到达压力探头的时间; t_3 为冲击波压力下降到几乎为零的时间,这里取 t_2 后 700 μ s 对应的时刻; ρ_0 和 c_0 为未扰动水的密度和声速。铝丝电爆炸产生的冲击波的冲量密度和能量密度高于铜丝是由两个因素共同决定的:一是铝丝电爆炸的 E_2 高于铜丝,在压力波阵面与放电通道分离后有更多的能量耦合进冲击波;二是铝与水可能发生了化学反应^[11,25],为冲击波补充了额外的能量。

3 结 论

本文在约 53.5 kJ 初始储能下开展了 4 组相同长度和初始电阻的铝丝和铜丝水中电爆炸,对比分析了铜丝和铝丝电爆炸在电特性和冲击波特性方面的差异。

(1)在电特性方面,放电初期铝丝和铜丝电爆炸的电参数波形基本一致,但随着焦耳加热的进行,金

属丝电阻提高,电参数波形出现差异;铝丝电爆炸具有更快的相变过程,而铜丝电爆炸具有更高的电压峰值、电功率峰值,更快的击穿/电离过程,更低的等离子体电导率;铝丝和铜丝电爆炸在相变过程的沉积能量基本一致,但前者在电压峰值至电流第一次过零点期间的沉积能量更多,相应地总沉积能量更多。

(2)在冲击波特性方面,铝丝电爆炸产生的冲击波在两个测点处的峰值压力均略大于铜丝,在 41 cm 处的冲量密度和能量密度显著大于铜丝电爆炸。

参考文献:

[1] 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.

[2] WANG Xinxin. Research at Tsinghua University on electrical explosions of wires [J]. Matter and Radiation at Extremes, 2019, 4(1): 017201.

[3] KRASIK Y E, GRINENKO A, SAYAPIN A, et al. Underwater electrical wire explosion and its applications [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(2): 423-434.

[4] 吴坚,阴国锋,范云飞,等. 金属丝电爆炸研究进展(Ⅱ): 水环境 [J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 4003-4012.
WU Jian, YIN Guofeng, FAN Yunfei, et al. Review of electrical exploding wires: II underwater [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 4003-4012.

[5] 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.

[6] SHI Huantong, YIN Guofeng, LI Xingwen, et al. Electrical wire explosion as a source of underwater shock waves [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2021, 54(40): 403001.

[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] HAN Ruoyu, WU Jiawei, ZHOU Haibin, et al. Ex-

- periments on the characteristics of underwater electrical wire explosions for reservoir stimulation [J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 5(4): 047201.
- [9] CHANDLER K M, HAMMER D A, SINARS D B, et al. The relationship between exploding wire expansion rates and wire material properties near the boiling temperature [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(2): 577-587.
- [10] ROMANOVA V M, IVANENKOV G V, MINGALEEV A R, et al. Electric explosion of fine wires: three groups of materials [J]. *Plasma Physics Reports*, 2015, 41(8): 617-636.
- [11] HAN Ruoyu, WU Jiawei, QIU Aici, et al. Electrical explosions of Al, Ti, Fe, Ni, Cu, Nb, Mo, Ag, Ta, W, W-Re, Pt, and Au wires in water: a comparison study [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124(4): 043302.
- [12] GRIKSHTAS R, ASMEDIANOV N, MALER D, et al. Electrical properties of different materials studied by sub-microsecond underwater electrical explosions of single wires [J]. *Physics of Plasmas*, 2024, 31(6): 063502.
- [13] ROSOSHEK A, EFIMOV S, GUROVICH V, et al. Evolution of a shock wave generated by underwater electrical explosion of a single wire [J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(4): 042302.
- [14] YUAN Wei, HAN Ruoyu, LI Pengfei, et al. Evolution of underwater shock wave in far-field regime of electrical wire explosion system over wide range of electric pulse energy [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 149: 111022.
- [15] YIN Guofeng, SHI Huantong, FAN Yunfei, et al. Effects of circuit inductance on electrical and shock wave characteristics at underwater wire explosion [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(19): 195502.
- [16] HAN Ruoyu, WU Jiawei, ZHOU Haibin, et al. Effects of water states on the process of underwater electrical wire explosion under micro-second timescale pulsed discharge [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2020, 135(1): 50.
- [17] LIU Ben, WANG Deguo, GUO Yanbao. Effect of circuit parameters and environment on shock waves generated by underwater electrical wire explosion [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(9): 2519-2526.
- [18] 石桓通, 范云飞, 阴国锋, 等. 不同负载尺寸下水中铜丝电爆炸特性的实验研究 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(7): 2599-2606.
- SHI Huantong, FAN Yunfei, YIN Guofeng, et al. Experimental study on underwater electrical explosion of copper wires with varied diameter and length [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(7): 2599-2606.
- [19] GAO Yang, YANG Tonghui, WANG Cheng, et al. A novel method for investigating the underwater explosion loads and bubble evolution [J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(9): 096101.
- [20] HAN Ruoyu, ZHOU Haibin, WU Jiawei, et al. Relationship between energy deposition and shock wave phenomenon in an underwater electrical wire explosion [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(9): 093506.
- [21] 周海滨. 水中铜丝微秒电爆炸冲击波产生机制和能量转换特性研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2017.
- [22] MALER D, LIVERTS M, EFIMOV S, et al. Addressing the critical parameters for overdamped underwater electrical explosion of wire [J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29(10): 102703.
- [23] ZHANG Shaojie, CHEN Wansheng, LU Yong, et al. Effects of wire size on electrical and shock-wave characteristics in underwater electrical explosions of aluminum wires [J]. *Physics of Plasmas*, 2024, 31(7): 073502.
- [24] ZHANG Shaojie, CHEN Wansheng, LU Yong, et al. Underwater electrical wire explosions under different discharge types: an experimental study with high initial energy storage [J]. *Physics of Plasmas*, 2024, 31(4): 043505.
- [25] EFIMOV S, GUROVICH V T, BAZALITSKI G, et al. Addressing the efficiency of the energy transfer to the water flow by underwater electrical wire explosion [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(7): 073308.

(编辑 亢列梅)