



·脉冲功率技术·

水中金属丝爆引燃铝粉悬浮液冲击波增强效应*

袁 伟¹, 韩若愚¹, 李 琛¹, 王亚楠², 张永民²

(1. 北京理工大学 物理学院, 北京 100081; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘 要: 开展了水中铜丝电爆炸引燃铝粉悬浮液的实验研究, 将铝粉悬浮液置于有机玻璃管中, 同轴心方向穿过 200 μm 的金属铜丝, 经脉冲功率驱动后快速相变发生电爆炸为铝粉爆燃提供反应条件。通过比对不同质量球状铝粉 (μm 粒径) 的悬浮液在相同脉冲电容器储能条件下的放电和冲击波参数, 获得了电爆炸驱动铝粉放电特性和冲击波增强效应的规律。实验发现, 电爆炸起爆铝粉的冲击波有两个明显的波峰, 分别对应于金属丝电爆炸 (一次冲击波) 和由产物气体胀裂管壁产生的二次冲击波, 且铝粉爆燃对二次冲击波的增强效应非常显著, 在 300 mg 铝粉的悬浮液环境中, 二次冲击波峰值达到 2.77 MPa, 是无铝粉添加环境中二次冲击波的 2.25 倍, 冲击波冲量增强了约 50%。对不同储能条件下 200 mg 铝粉的悬浮液环境中金属丝爆的冲击波进行了对比研究, 发现随着驱动源储能的增加, 电爆炸引发的主冲击波和二次冲击波压力均逐渐增大, 600 J 时分别达到了 3.17 和 1.91 MPa, 冲击波冲量也随储能增加而增加, 在 600 J 储能条件时的冲量为 41.12 Pa·s, 储能条件约 300 J 时 20.24 Pa·s 冲量的 2 倍。

关键词: 金属丝电爆炸; 冲击波; 含能材料; 等离子体诊断; 脉冲功率技术

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220008

Enhancement of underwater shock waves generated by exploding-wire-initiated reactions of aluminum powder suspension

Yuan Wei¹, Han Ruoyu¹, Li Chen¹, Wang Ya'nan², Zhang Yongmin²

(1. School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

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

Abstract: Underwater electrical wire explosion igniting energetic materials can generate stronger shock waves (SW), which is also considered as an important direction for the development of controllable shock wave technology. Compared with other energetic materials, the liquid-phase aluminum powder suspension has more advantages in terms of safety and uniformity that is easy to obtain and has a high reaction heat. It has great potential for civil applications. This paper reports an experimental study on the detonation of aluminum powder suspension by underwater electrical wire explosion. The aluminum powder suspension was confined in a plexiglass tube and passed through a 200 μm metal copper wire in the coaxial direction. After being driven by a high-voltage pulse source, it rapidly phased transformation and explosion, providing reaction conditions for aluminum powder. By comparing the discharge parameters and SW pressure signals of different quality aluminum powder suspensions, the electric explosion-driven aluminum powder discharge characteristics and the law of SW enhancement effect are obtained. The experiment shows that SW has two obvious peaks, which correspond to the evaporation SW (the first peak) and the breakup of the tube (the second peak). The effect of aluminum powder deflagration on the second SW is very significant. In the 300 mg aluminum powder suspension environment, the peak value of the second SW reaches 2.77 MPa, increased by 2.25 times compared to an optimal underwater electrical wire explosion, and the impulse of the SW is increased by about 50%. This paper also compares the SW signals in the suspension environment of 200 mg aluminum powder under different energy storage. It is found that with the increase of energy storage, both of two peaks of SW increase, reaching 3.17 MPa and 1.91 MPa respectively at 600 J. The impulse of SW also increases with the increase of energy

* 收稿日期: 2022-01-05; 修订日期: 2022-04-27

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (3212034); 国家自然科学基金项目 (51907007); 电力设备电气绝缘国家重点实验室开放课题 (EIPE20204); 北京理工大学实验室研究项目 (2019BITSYA31)

联系方式: 袁 伟, 1145623396@qq.com。

通信作者: 韩若愚, han.ruoyu@hotmail.com。

storage. The impulse at 600 J energy storage is 41.12 Pa·s, which is twice as high as that at 300 J energy storage.

Key words: underwater electrical wire explosion, shock wave, energetic materials, plasma diagnostics, pulsed power technology

水下金属丝电爆炸能够产生强烈的水下冲击波,因而在国防、能源探测与开发等领域受到重视^[4]。然而,尽管冲击波能量转化效率高达 24%,但是在实际应用中受限于周围环境、以及电流的集肤效应等物理机制,无限地增大脉冲放电储能和金属丝负载的质量并不可取^[5]。为了产生更强、更加可控的冲击波,使用金属丝电爆炸驱动含能材料爆炸被视为是一种解决方案^[6]。现有研究表明,电爆炸金属等离子体在起爆炸药(电爆炸桥丝/箔火工品)、引燃推进剂等方面已有较为成熟的应用^[7-8]。另一方面,西安交通大学石桓通等人提出了一种由硝基甲烷、铝粉和氧化铜粉末混合的含能材料,这一材料经由钨丝电爆炸驱动。实验发现,当加入 2.8 g 该含能材料时,水下金属丝电爆炸冲击波的振幅和能量分别提升了 1.7 和 7.9 倍,钨丝爆炸的焦耳热与化学反应相辅相成,成为引爆含能材料的关键^[9]。除此之外,也有实验报道铝丝在水或甘油介质中电爆炸冲击波波阵面后的爆燃现象^[10]。已有研究发现,对于金属丝电爆炸起爆含能材料而言,电爆炸一般要先于化学反应发生,此后由化学反应维持的爆轰波将追赶并增强由相爆引发的冲击波^[11]。对于低能量释放速率的含能材料,上述追赶过程较长,当含能负载尺寸较小时,两组冲击波来不及合并,通常可以观察到两个分立的冲击波^[6]。

与一般含能材料相比,微、纳米尺度的铝粉制备的水介质悬浮液是一种易获得的含能材料,并且点火阈值高。当氧化铝作为纯铝与水发生化学反应的产物时,可以释放大量的能量。该反应的点火温度大约为 1000 K,所需要的能量沉积密度在 2.6~5 kJ/g,可以释放达 15 kJ/g Al 的能量,但是常规方法难以达到反应条件,因此铝粉悬浮液并不被视为爆炸物^[11]。而金属丝电爆炸的特点是丝的快速相变,形成温度高达数个电子伏特的稠密等离子体,并产生中心压力高达 5 GPa 的冲击波,有望起爆铝粉悬浮液^[11-12]。事实上,以色列理工学院的 Y.E. Krasik 等人将金属单丝负载置于铝粉悬浮液中,发现水中金属丝电爆炸能够驱动铝粉悬浮液爆燃,其效率大致在 32%~79% 之间^[12]。虽然不少文献已给出铝粉悬浮液在电爆炸作用下剧烈反应的证据,但是对于实际应用而言,该化学反应对于金属丝电爆炸负载的冲击波影响效应仍不明确。基于此,本文开展了 μs 时间尺度下、铜丝电爆炸驱动不同质量铝粉悬浮液的实验。通过对照不同质量铝粉的悬浮液负载的加入对放电参数及冲击波特性影响,分析铝粉环境中放电模式的改变和冲击波信号的变化。此外还对比了不同储能条件下相同质量铝粉的悬浮液的放电及冲击波参数特性,对铜丝爆炸驱动铝粉悬浮液给出了更为清晰的物理图像。通过研究,有望获得水中金属丝电爆炸起爆铝粉悬浮液影响最终冲击波的一般特征,从而支撑实际应用。

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)为负载结构示意图。变压器产生的高压直流电源通过整流硅堆 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。本实验中脉冲电容器为 6 μF ,耐压 50 kV。图 1(b)为负载装置示意图,金属丝电爆炸发生在盛满水的腔体中,球状铝粉(粒径 10 μm)悬浮液置于内径为 14 mm 的有机玻璃管中,穿过直径为 200 μm 、长度为 4 cm 的铜丝后两端堵头用热熔胶封住,夹在两侧的铜电极之间。冲击波探头被放置在与负载等高处 30 cm 远的位置,在每次的电爆炸实验中,有机玻璃管会在金属丝电爆炸产生的冲击波与爆炸产物作用下碎裂。

实验中主要诊断设备如下:电压信号通过高压探头 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,冲击波压强信号由冲击波探头(PCB113B24, 100 kHz)获得。负载的阻性电压 U_R 、沉积能量 E_d 及总沉积能量 E_{total} 通过以下公式计算

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

$$E_d = \int_{t_0}^{t_{\text{uppeak}}} U_R I dt \quad (2)$$

$$E_{\text{total}} = \int_{t_0}^{t_{\text{zero}}} U_R I dt \quad (3)$$

式中: U 为测得的电压信号, L_S 为负载结构的电感, I 为测得的电流信号, t_0 时放电开始时刻, t_{uppeak} 是电压峰值时刻,

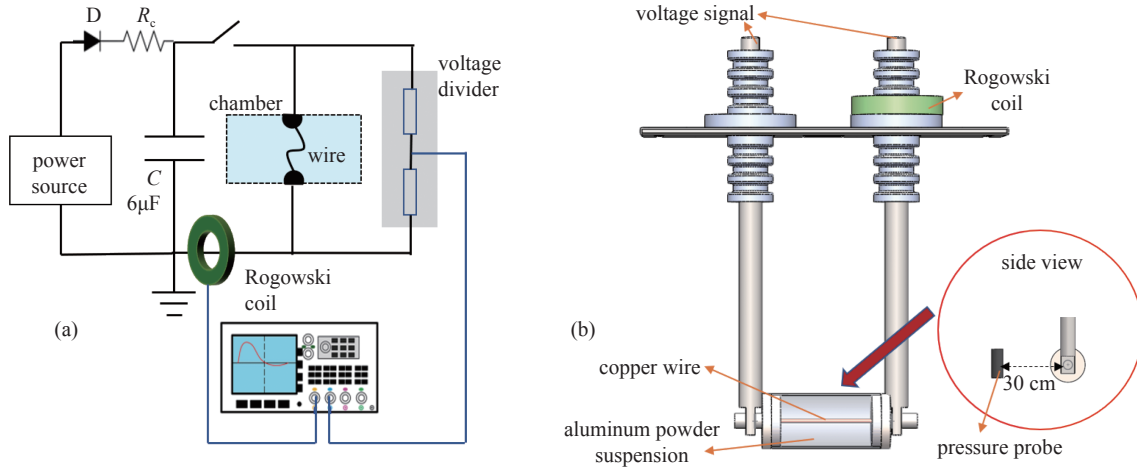


Fig. 1 Schematics of the experimental setup and configurations

图 1 电爆炸实验平台原理图

t_{zero} 是电流过零时刻。

2 实验结果与讨论

2.1 起爆铝粉悬浮液电参数的比较

图 2 给出了在脉冲电容器储能为 12.9 kV 条件下, 直径 200 μm 的铜丝引爆不同质量含能铝粉的悬浮液时的放电波形。表 1 中对放电参数进行了归纳。

图 2(a) 和图 2(c) 给出了金属丝电爆炸发生时负载的电压和电阻典型波形, 可以看到, 随着悬浮液中铝粉质量不断增加, 电压峰值逐渐降低, 无铝粉添加时峰值达到了 37.02 kV, 而在 300 mg 的铝粉悬浮液中仅为 6.69 kV, 而与

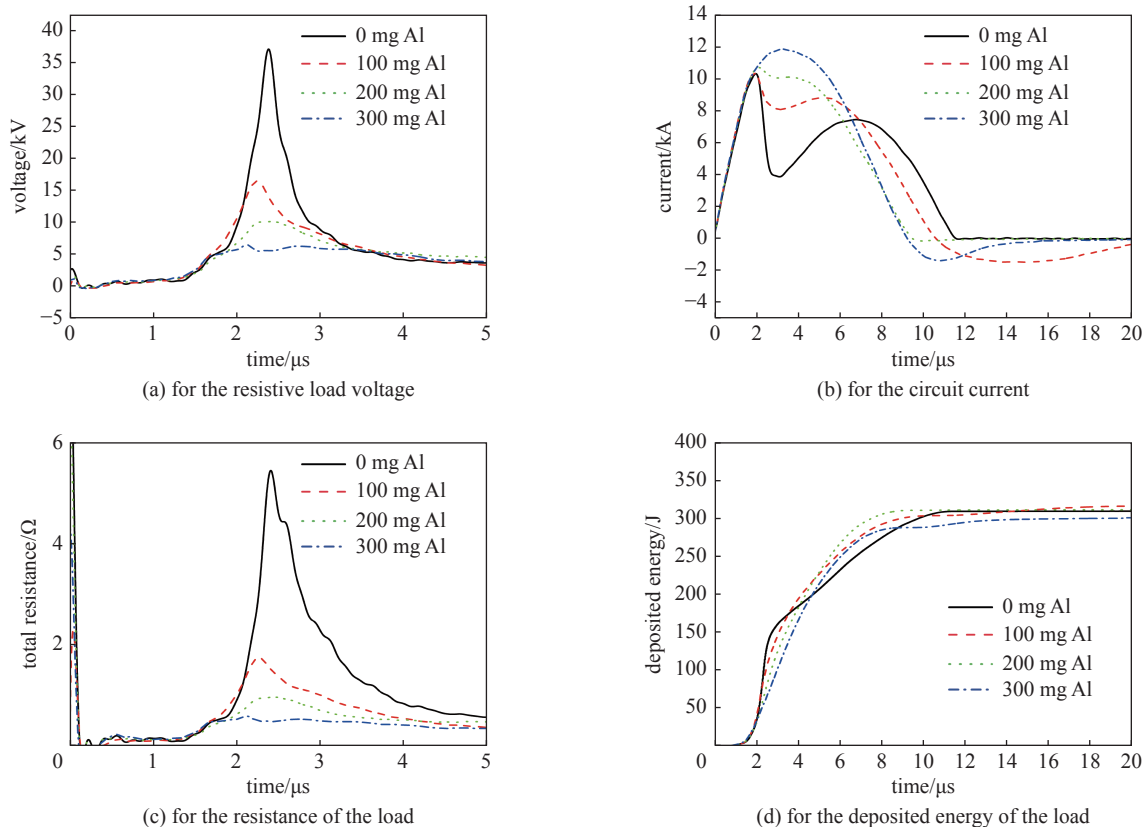


Fig. 2 Representative electrical waveforms of exploding 4-cm-long Cu with diameters of 200 μm under 500 J stored energy

图 2 典型放电波形(直径 200 μm , 长度 4 cm, 储能 500 J)

表 1 放电参数结果统计 (典型值)
Table 1 Statistics of the discharge parameters

aluminum powder quantity/mg	maximum voltage/kV	maximum current/kA	maximum measured resistance/ Ω	deposited energy E_d /J	total deposited energy E_{total} /J
0	37.02	10.24	5.43	116.12	309.15
100	16.46	10.37	1.75	85.04	312.67
200	10.21	10.72	0.96	76.17	310.28
300	6.69	11.87	0.61	46.95	299.71

之对应,电阻峰值在从无铝粉添加时的 5.43 Ω 逐步降低至 300 mg 铝粉添加时的 0.61 Ω , 这表明了爆炸发生过程中,铝粉悬浮液中存在并联放电路径。图 2(b)给出了典型的电流波形,无铝粉添加时,电流在 1.96 μs 处达到峰值为 10.24 kA,此时金属丝汽化,负载电阻迅速增大,电流随之下落,在 3.16 μs 时,第一个电流脉冲结束,等离子体通道开始形成,电流再次增大。而铝粉悬浮液的增加改变了这一放电模式,在 300 mg 铝粉的悬浮液环境中,负载电流在 3.21 μs 达到峰值 11.81 kA,从趋势来看,此时等离子体放电通道已经形成,说明了铝粉的添加对于金属丝爆炸后续等离子体通道的形成有明显的促进作用,或者说金属丝附近的铝粉和水介质的化学反应降低了通道电阻。图 2(d)展示了负载沉积能量随时间变化趋势,从能量的角度来看,在电压崩溃时,无铝粉添加的环境中沉积能量最高,达到 116.12 J,随着铝粉的添加,这一沉积能量会逐渐降低,这可能是爆炸过程中形成的并联电路的影响。

2.2 起爆铝粉悬浮液冲击波特性对比

结合放电参数特性的对比,证实了铝粉悬浮液的添加对于铜丝电爆炸的放电行为造成了影响。图 3 给出了距离负载 30 cm 处冲击波的典型波形。图 3(a)展示了冲击波信号从产生至逐渐衰减为零的过程,从图 3(b)的二维折线图可以看到,在无铝粉添加的悬浮液环境中,探测到一个峰值 2.01 MPa 的主冲击波,大约 10 μs 后,再次探测到一个更弱的峰值为 1.23 MPa 的二次冲击波,这是在该系统 12.9 kV 的储能条件下,无含能材料的环境得到的最强

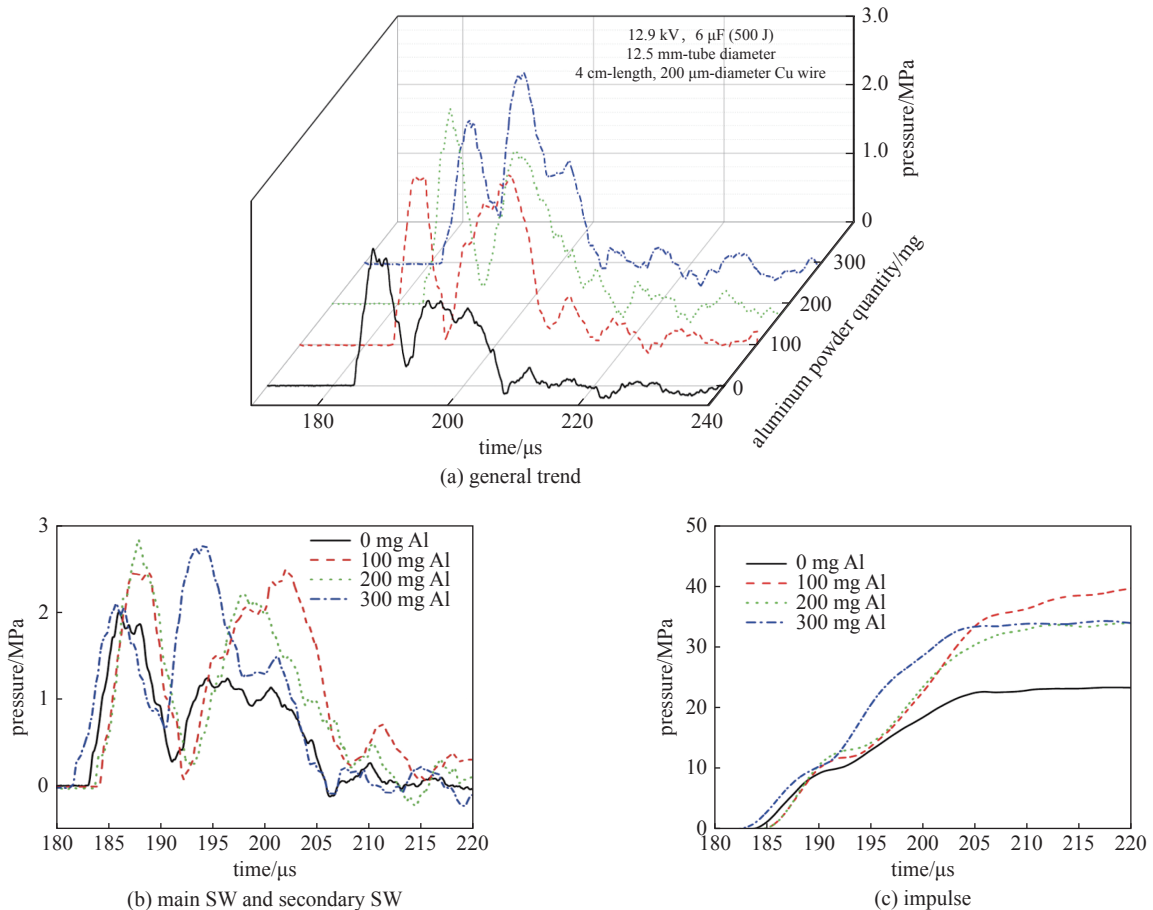


Fig. 3 SW pressure signal of suspension with aluminum powder of different mass

图 3 铜丝电爆炸驱动不同质量含能铝粉悬浮液冲击波信号

冲击波。在添加有 100 mg 和 200 mg 铝粉的悬浮液环境中,可以看到探测到的主冲击波峰值有明显的增高,分别达到了 2.43 MPa 和 2.86 MPa,二次冲击波的增长幅度更大,分别达到了 2.47 MPa 和 2.21 MPa,相较于无铝粉添加悬浮液的二次冲击波近乎扩大了 2 倍,说明了铝粉的爆燃对于冲击波增强确有作用。在添加有 300 mg 铝粉的悬浮液中,反常的是主冲击波峰值与无铝粉添加的环境区别并不大,但是二次冲击波不仅到来的时刻更快,峰值更是高达 2.77 MPa,达到了无铝粉添加时二次冲击波的 2.25 倍。图 3(c)给出了计算所得的单位面积的冲量,计算公式为

$$J(t) = \int_0^t P(t)dt \quad (4)$$

式中: $J(t)$ 为单位面积的冲量; $P(t)$ 是 t 时刻冲击波的压强。从图 3(c)可以看到,含能铝粉的添加增加了冲击波的单位面积冲量,从 23.41 Pa·s 最多增加至了 100 mg 铝粉悬浮液时的 39.55 Pa·s,但是这一增加并不与加入铝粉的质量呈正相关的线性关系,在 200 mg 和 300 mg 时出现了下降,说明随着铝粉质量的加入,铝粉反应的效率会降低。

2.3 不同储能电压条件下起爆铝粉悬浮液对比

不同质量铝粉的悬浮液对于金属丝爆炸的影响已经被讨论了,随后我们进行了在不同储能条件下添加 200 mg 铝粉的悬浮液的特性对比,图 4 中给出了分别脉冲电容器在 10 kV、11.5 kV、12.9 kV 及 14.2 kV,对应储能条件为 300 J、400 J、500 J 和 600 J 下典型的电流、电阻、冲击波及其冲量的波形。

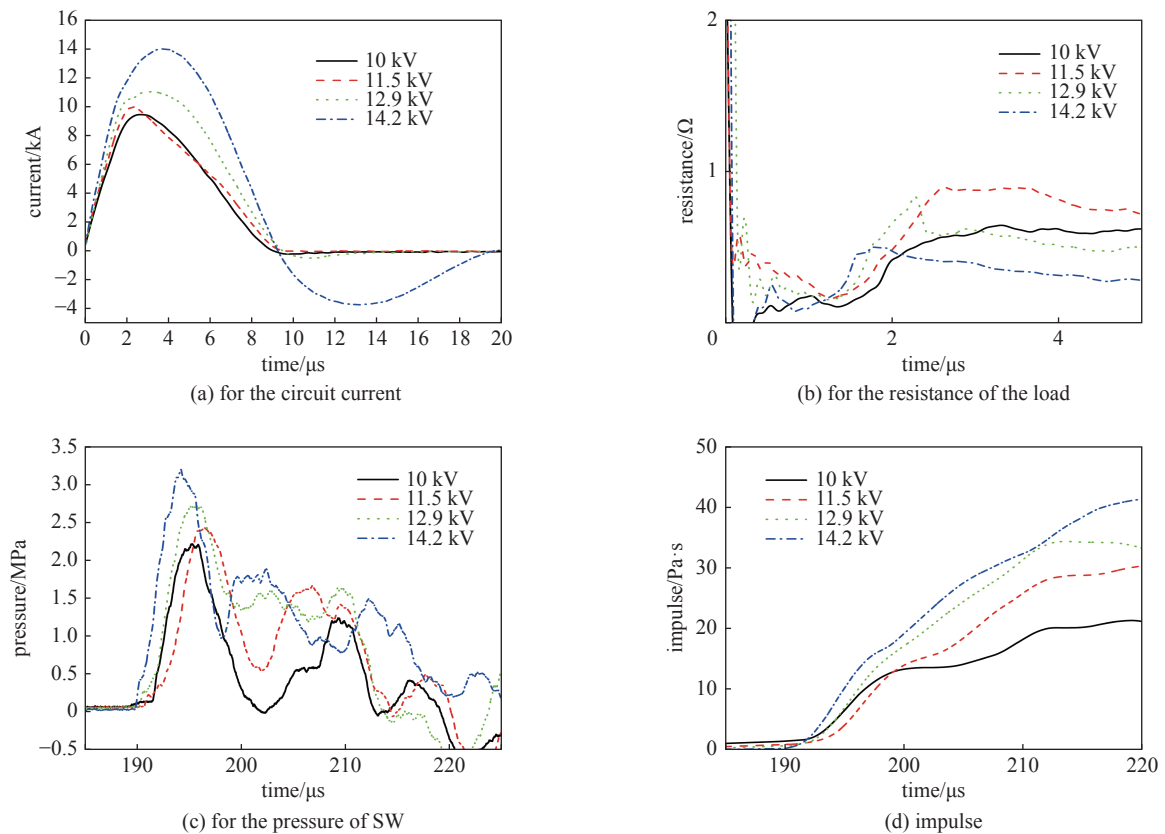


Fig. 4 Typical waveforms under different energy storage conditions

图 4 不同储能条件下典型波形

从图 4(a)和图 4(b)的电流及电阻波形图中我们可以看到,在脉冲电容器储能电压为 10 kV,对应储能 300 J 时,金属丝爆炸电流波形未出现明显二次上升的现象,也就是说通道没有经历相爆炸后的高阻状态,电爆炸丝在气化过程中由于某种电离增强机制提前形成了放电通道。随着储能的增加,电流峰值从 300 J 时的 9.50 kA,逐步增加至 600 J 时的 14.06 kA,且在放电过程中,负载的阻值均低于 1Ω,低于相同条件下水中金属丝电爆炸电阻,说明了即使储能 300 J,悬浮液中铝粉也能够被引燃,这从图 4(c)的冲击波压强波形图中也可以得到证实。在各种储能条件下,都出现了较为强烈二次冲击波。而主冲击波和二次冲击波的强度均与储能正相关,在 600 J 时主冲击波达到最大峰值为 3.17 MPa,此时二次冲击波的峰值为 1.91 MPa。我们也发现,随着储能电压的增加,主冲击波和二次冲击波间的时间间隔会缩短,说明两个冲击波开始逐步合并。图 4(d)展示了计算所得的冲击波冲量,随着储能的增加,冲击波冲量也随之增大,300 J 储能条件下冲击波归零点前的冲量约为 20.24 Pa·s,而在 600 J 储能时这一数值

达到了 41.12 Pa·s, 增至原来的 2 倍。

通过光电管测量了上述丝爆过程中的相对光强, 并将其归一化结果展示在图 5 之中。从图可以看出, 在 200 mg 铝粉的悬浮液环境中, 不同储能条件下金属丝电爆炸产生的相对光强曲线在达到峰值后, 紧随其后的下降趋势会出现明显的拖尾现象。观察脉冲电容器储能为 14.2 kV 时的相对光强曲线, 这一现象尤为明显。相较于极为迅速的等离子体过程, 光强曲线在较长时间尺度保持了一定的幅值, 这是铝粉反应发光的直接证据, 也直接证实了金属丝电爆炸引爆含能铝粉悬浮液理论上是可行的。

3 结 论

本文采用放电参数诊断联合冲击波压强信号的分析, 对水下铜丝电爆炸驱动铝粉悬浮液引爆的放电参数以及冲击波演化行为进行了研究。通过比较有无铝粉添加时的金属丝电爆炸放电模式以及对不同质量铝粉的悬浮液环境中冲击波压强信号, 结果发现: (1) 含能铝粉的添加有利于金属丝电爆炸后期等离子体放电通道的形成, 在铝粉环境悬浮液中, 存在并联电路路径降低了通道电阻; (2) 金属丝电爆炸驱动铝粉悬浮液对冲击波的增强效应虽然在主冲击波有所体现, 但更多地展现在二次冲击波增强方面, 在 300 mg 铝粉的悬浮液环境中, 二次冲击波相较无铝粉添加环境增强了 2.25 倍; (3) 即使脉冲电容器储能低至 300 J, 悬浮液中的铝粉仍能够被点燃, 而随着储能的增加, 主冲击波和二次冲击波均会增大, 并逐步合并, 冲击波冲量也会随储能增加逐渐提高。研究证实了金属丝电爆炸驱动含能铝粉悬浮液从而增强冲击波的方案是可行的, 含能铝粉的添加能进一步提升金属丝电爆炸冲击波的强度与做功能力, 这一结果对可控冲击波的产生技术有一定推进作用, 有望应用于化石能源开发、矿山工程、城市爆破、隧道掘进等领域。

参 考 文 献:

- [1] 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)
- [2] 吴佳玮, 丁卫东, 韩若愚, 等. 大电流条件下气体火花开关电极烧蚀的研究进展[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3367-3379. (Wu Jiawei, Ding Weidong, Han Ruoyu, et al. Review of electrode erosion in a spark gap switch under large pulsed currents[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3367-3379)
- [3] 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 Yongming, 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)
- [4] Han Ruoyu, Wu Jiawei, Zhou Haibin, et al. Experiments on the characteristics of underwater electrical wire explosions for reservoir stimulation[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 5: 047201.
- [5] Grinenko A, Efimov S, Fedotov A, et al. Efficiency of the shock wave generation caused by underwater electrical wire explosion[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100: 113509.
- [6] Han Ruoyu, Zhou Haibin, Liu Qiaojue, et al. Generation of electrohydraulic shock waves by plasma-ignited energetic materials: I. Fundamental mechanisms and processes[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(12): 3999-4008.
- [7] 金涌. 电热等离子体对固体火药的辐射点火及燃烧特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014. (Jin Yong. Study on radiation ignition and combustion characteristic of solid propellant by electrothermal plasma[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014)
- [8] 李海元, 栗保明, 李鸿志. 等离子体增强火炮发射性能的实验研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2007, 27(2): 297-299,312. (Li Haiyuan, Li Baoming, Li Hongzhi. Experimental study on gun performance augmentation by plasma[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, 27(2): 297-299,312)
- [9] Shi Huantong, Hu Yujia, Li Tuan, et al. Detonation of a nitromethane-based energetic mixture driven by electrical wire explosion[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55: 05LT01.
- [10] Yanuka D, Rososhek A, Krasik Y E. Comparison of electrical explosions of Cu and Al wires in water and glycerol[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 053512.
- [11] Rososhek A, Efimov S, Goldman A, et al. Microsecond timescale combustion of aluminum initiated by an underwater electrical wire explosion[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 053510.
- [12] Efimov S, Gilburd L, Fedotov-Gefen A, et al. Aluminum micro-particles combustion ignited by underwater electrical wire explosion[J]. *Shock Waves*, 2012, 22(3): 207-214.

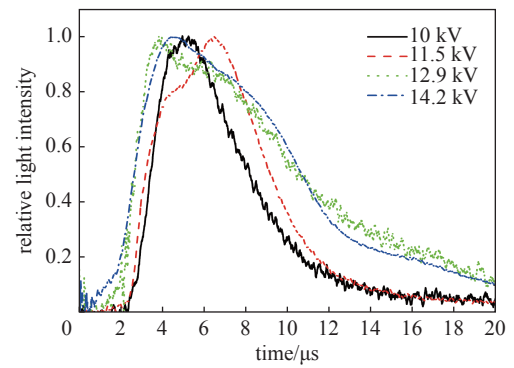


Fig. 5 Typical waveforms of relative light intensity under different energy storage conditions

图 5 不同储能条件下相对光强典型波形