

高压物理学报

金属丝材质对电-化耦合爆炸能量沉积的影响

王铖 汪航宇 李星翰 韦丁 林家睿 陈浩东 甘云丹

Effect of Metalwire Materials on the Energy Deposition in Electro-Chemical Coupling Explosions

WANG Cheng, WANG Hangyu, LI Xinghan, WEI Ding, LIN Jiarui, CHEN Haodong, GAN Yundan

引用本文:

王铖, 汪航宇, 李星翰, 等. 金属丝材质对电-化耦合爆炸能量沉积的影响[J]. 高压物理学报, 2026, 40(5):050111. DOI: 10.11858/gywlb.20251173

WANG Cheng, WANG Hangyu, LI Xinghan, et al. Effect of Metalwire Materials on the Energy Deposition in Electro-Chemical Coupling Explosions[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2026, 40(5):050111. DOI: 10.11858/gywlb.20251173

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20251173>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

极端条件下含能材料的模拟研究思考

Some Viewpoints on the Simulation Research of Energetic Materials under Extreme Conditions

高压物理学报. 2025, 39(1): 010102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240911>

不同磁性金属丝对氢气爆炸的影响机理研究

Influence Mechanism of Different Magnetic Wires on Hydrogen Explosion

高压物理学报. 2023, 37(1): 015201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220611>

RDX塑性炸药的爆电耦合效应

Explosion-Electricity Coupling Effect of RDX Plastic Explosive

高压物理学报. 2021, 35(6): 065201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210744>

电爆炸金属桥箔早期过程中电磁-热-力多物理场耦合建模与分析

Electric Explosion Early Process Analysis of Metal Bridge Foil Based on an Electromagnetic-Thermal-Mechanical Model

高压物理学报. 2024, 38(1): 012301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230711>

有限空间内桥丝式电点火元件的发火特性

Ignition Characteristic of Bridgewire Electric Ignition Element in Limited Space

高压物理学报. 2025, 39(2): 025102 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240847>

不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征

Energy and Damage Evolution Characteristics of Rock Materials under Different Water Contents

高压物理学报. 2023, 37(3): 034105 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220699>

金属丝材质对电-化耦合爆炸能量沉积的影响

王 铖¹, 汪航宇¹, 李星翰², 韦 丁¹, 林家睿¹, 陈浩东¹, 甘云丹¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065;

2. 西南交通大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610031)

摘要:为提高含能材料爆炸能量的输出总量和功率,通过金属丝电爆炸产生的等离子体驱动含能材料环四亚甲基四硝胺(HMX)起爆,实现电能与化学能的耦合释放。通过搭建的电-化耦合爆炸实验系统,在常温常压空气中测量了爆炸过程中的电压、电流曲线,将电-化耦合爆炸划分为金属丝相变、电流暂停、等离子体放电和振荡放电4个典型阶段。研究表明,不同材质金属的主要能量沉积发生在不同阶段:镍和铜等凭借中等沸点及高电阻温度系数在金属丝相变和电流暂停阶段实现了高效的相变能量沉积;在等离子体放电阶段,铝因氧化层破裂发生爆发式汽化,并凭借低电离能形成高导等离子体,沉积能量显著跃升;钨通过液态显热蓄积和电阻急剧上升,在等离子体放电阶段的沉积能量占比超过80%。研究还发现,电流暂停现象受到金属材质(如电阻温度系数、沸点及汽化潜热等)的影响,其中,铜表现出最长的电流暂停时间,而钨则未出现该现象。研究结果揭示了金属材质对能量沉积过程的影响机制,为提升含能材料的能量输出总量和功率提供了实验依据与技术支撑。

关键词:金属丝电爆炸;含能材料;电-化耦合;能量沉积

中图分类号:O521.9; TM62

文献标志码:A

为提高含能材料在爆炸过程中的能量释放效率,研究人员通常将含能材料的化学能与其他形式的能量进行耦合,其中,电-化耦合爆炸技术是一种高效的释能途径。电-化耦合爆炸技术是利用金属丝电爆炸过程中产生的大量金属蒸汽与等离子体驱动含能材料爆炸,由于电爆炸与含能材料爆炸的时间尺度较为接近^[1-3],电-化耦合爆炸技术具备高效耦合化学能与电能的能力,不仅可提高含能材料的释能总量,还具有释能功率高、可设计性强的优点。电爆炸的脉冲瞬态放电可在回路中激发数百千安级电流,产生高达数百吉帕的压力和数万开尔文的温度^[4-6],铜丝和铝丝电爆炸可实现高达200 eV/atom的能量沉积^[7],而TNT在爆轰状态下的对应能量仅为0.39 eV/atom,因此,电爆炸可实现远超传统含能材料爆轰点的压力、温度和释能总量。电爆炸的释能功率可以通过设计电脉冲结构轻松调控,这对于传统含能材料来说十分困难。选用不同尺寸的金属丝^[8]或构建特定的丝阵结构^[9],可以调控爆炸效果。Han等^[10]发现,脉冲放电电爆炸可在微秒级时间内产生焦耳热与冲击波,作用于包覆的含能材料并诱发耦合爆炸,其能量释放受线材直径、金属特性及充电电压等多种参数影响。Wang等^[11]研究了金属丝-含能材料复合负载在大电流脉冲下的耦合爆炸能量释放行为,发现提高充电电压可缩短电流暂停时间,并提升释能功率和沉积能量。尽管目前对电爆炸在含能材料中的应用已开展了一些研究,但对于其中各爆炸阶段的能量沉积特性、关键物理过程及其与化学反应的耦合机制仍缺乏系统性认识。深入研究电爆炸过程中金属丝的能量沉积规律,对于揭示电-化耦合作用下的整体能量释放机制具有重要意义,可为提升含能材料的能量输出性能提供理论依据与技术支撑。

* 收稿日期: 2025-08-26; 修回日期: 2025-10-29

基金项目: 国家自然科学基金(12102338, 11902276)

第一作者: 王 铖(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事电爆炸研究. E-mail: wcheng726@163.com

通信作者: 甘云丹(1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事爆炸力学研究. E-mail: ganyundan@163.com

本研究拟通过测试爆炸过程中的电压、电流等参数,依据放电时程曲线将电-化耦合爆炸过程划分为不同阶段,分析各阶段平均功率与沉积能量的分布规律,重点阐明金属丝材质对电-化耦合爆炸能量沉积特性的影响机理。

1 实验装置

电-化耦合实验测试系统主要由脉冲功率驱动源、实验腔体和触发装置3部分组成,如图1所示。其中,脉冲功率驱动源采用高压恒流电源为脉冲瞬态电容充电,触发装置为3个电极的气体开关。在充电前,向空腔内充入一定氮气,增大腔体气压,从而调节气体开关的击穿电压。充电后,通过控制触发开关,释放气体开关所在腔体内的氮气,气压降低后开关发生击穿,使电路闭合。最后,将具有数百纳秒的上升沿脉冲电流施加到金属丝负载。分别使用高压探头和罗氏线圈测量放电过程中的电压和电流波形。

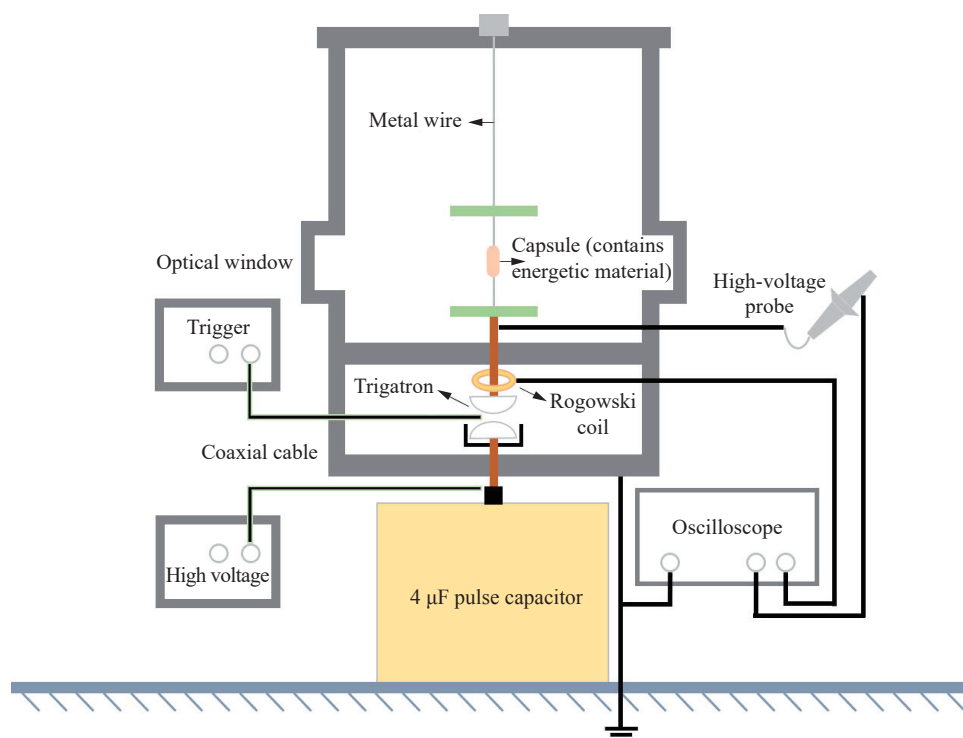


图1 电-化耦合实验测试系统

Fig. 1 Electro-chemical coupling experimental test system

电-化耦合爆炸放电回路模型及含能负载模型如图2所示。在耦合爆炸过程中,脉冲电流通过RLC放电回路获取,如图2(a)所示,其中 C_0 为脉冲电容器电容, R_0 、 L_0 分别为回路中的电阻及电感, $R_w(t)$ 、 $L_w(t)$ 分别为含能负载的电阻与电感。一般认为,回路电阻 R_0 远小于金属丝电阻 $R_w(t)$,因此, R_0 可忽略不计。高压电源对电容器充电完成后,触发气体开关,电容存储的能量向回路中的阻感负载放电,负载在数微秒内经受高密度脉冲大电流迅速加热而发生爆炸。在负载电压测量中,高压探头测得的电压可表示为

$$U = R_w I + \frac{d(L_w I)}{dt} + L_0 \frac{dI}{dt} \quad (1)$$

式中: U 为高压探头测得的电压, I 为罗氏线圈测得的回路电流。实验测得的电压为负载的阻性电压与感性电压之和,为计算功率、沉积能量以及金属丝电阻的变化情况,还需要得到负载阻性电压

$$U_R \approx U - (L_w + L_0) \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

L_w 可以根据经验公式进行估算

$$L_w = 2l_w \ln \frac{D}{d_w} \tag{3}$$

式中： l_w 为金属丝长度， d_w 为金属丝直径， D 为实验腔体内径。 L_0 通过短路实验进行测量，用一根铜棒取代金属丝进行高压放电实验，测量电流波形，根据放电时间参数计算总电感，再减去铜棒电感可得到杂散电感 L_0 。根据测得的放电电压及电流波形，还可计算爆炸过程中回路的电阻 $R(t)$ 、功率 $P(t)$ 及沉积能量 $E(t)$

$$R(t) = \frac{U_R(t)}{I(t)} \tag{4}$$

$$P(t) = U_R(t)I(t) \tag{5}$$

$$E(t) = \int_0^t U_R(t)I(t)dt \tag{6}$$

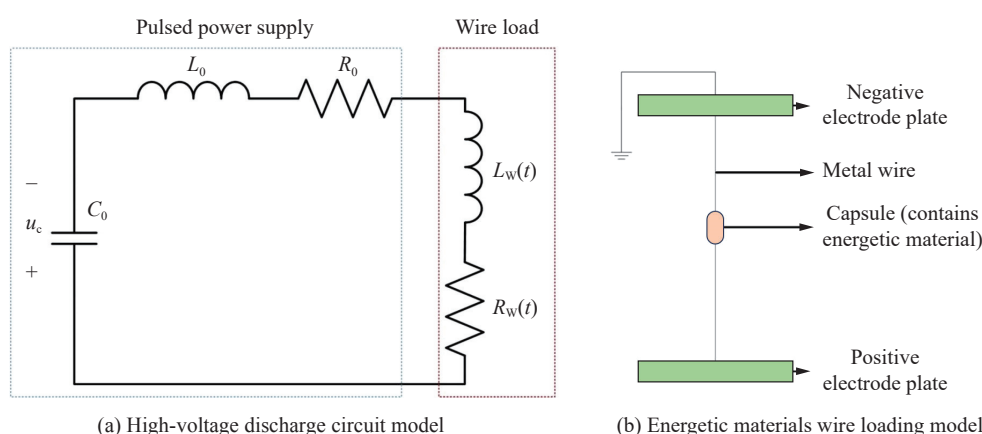


图 2 电-化耦合爆炸模型

Fig. 2 Electro-chemical coupling explosion model

含能材料负载结构如图 2(b) 所示。将含能材料压实装入胶囊，质量为 0.8 g，密度为 1.9 g/cm³，胶囊及含能材料由金属丝沿轴线穿过，金属丝的两端分别连接高压正、负极板，高压负极板接地。实验选取的金属丝材质为铝，有效长度为 15 cm；选取的含能材料为环四亚甲基四硝胺 (HMX)，其主要物性参数如表 1^[11] 所示，其中， ρ_0 为含能材料密度， p 为爆压， D 为爆速， Q_v 为爆热。

表 1 HMX 的主要物性参数^[11]
Table 1 Principal physical properties of HMX^[11]

Molecular formula	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	p/GPa	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_v/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	1.9	39.1	9 100	6 038

2 结果与讨论

2.1 电-化耦合爆炸物理阶段划分

在 35 kV 充电电压作用下进行电-化耦合爆炸实验，测得的电压、电流波形如图 3(a) 所示。电流在 0.64 μs 时达到第 1 个峰值 (20.13 kA)，随后迅速下降并保持在数百安，此状态被称为电流暂停。暂停过程持续约 2.7 μs ，然后电流再次上升，并于 6.25 μs 时达到第 2 个峰值 (58.36 kA)，随后开始振荡衰减。电压在 0.62 μs 时达到峰值 (39.87 kV)，为充电电压的 1.14 倍。在电流暂停阶段，电压保持在 29 kV 左右，暂停结束后迅速下降并振荡衰减。计算得到负载的阻性电压与感性电压，如图 3(a) 所示。阻性电压波

形与总电压波形的变化趋势相似,在 $0.63\ \mu\text{s}$ 时达到峰值($53.08\ \text{kV}$),随后迅速下降并在电流暂停阶段同样保持在 $29\ \text{kV}$ 左右,暂停结束后缓慢下降至零点附近;感性电压与阻性电压的变化趋势相反,在 $0.68\ \mu\text{s}$ 时达到负峰值($-13.61\ \text{kV}$),随后迅速上升并在电流暂停阶段维持在数百伏,暂停结束后振荡回归至零点附近。

电流暂停是图3中放电波形的重要特征。如图3(b)所示,在电流暂停阶段,放电功率由 $1\ \text{GW}$ 迅速下降至数十兆瓦,沉积能量的上升速率也变得缓慢。Rososhek等^[12]和Liu等^[13]的研究表明,电流暂停主要出现在细长金属丝中。在充电电压一定的情况下,增加金属丝长度会引起轴向电场强度减弱,从而导致击穿更加困难。而金属丝过细又会导致相爆后的电离过程不足以形成放电通道,金属丝在一段时间内呈现高阻状态,电极间维持较高的电压(数十千伏)以及较弱的电流(几百安)。同时注意到,金属丝高阻态的出现及结束时间与电流暂停发生时间基本重合,进一步验证了电流暂停是由维持高阻值的气态金属引起的。放电间歇持续一段时间后,随着爆炸产物的扩散,放电通道相对更易形成,部分金属蒸汽开始电离,电阻迅速下降,金属负载发生二次击穿,电流从暂停状态上升到峰值。发生电离后,金属等离子体与含能材料相互作用,该阶段功率再次上升(峰值为 $413\ \text{MW}$),沉积能量从 $3.92\ \mu\text{s}$ 时的 $725.18\ \text{J}$ 上升至 $8.26\ \mu\text{s}$ 时的 $1\ 857.33\ \text{J}$,实现了电能与含能材料化学能的高效耦合。由于放电回路处于欠阻尼状态,且电阻变化较小,电压/电流波形与RLC放电回路相似,在放电过程后期呈现出振荡衰减的状态。

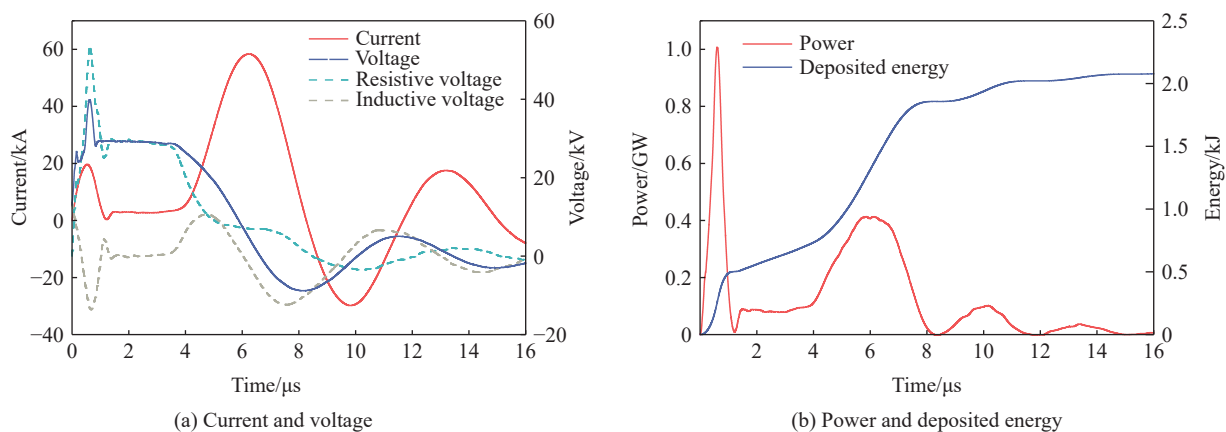


图3 电-化耦合爆炸典型曲线

Fig. 3 Typical curves of electro-chemical coupling explosions

由图3中的放电波形可知,电流暂停的出现将金属丝相变以及等离子体过程分开,整个功率曲线呈现2个峰值、1个低谷以及后续振荡过程。爆炸过程的能量沉积速率在不同阶段存在较大区别,该特性可能会进一步影响后续耦合爆炸过程的发展,因此,有必要进行阶段划分。Han等^[14]依据金属丝相态的变化以及放电波形峰值时刻对电爆炸过程进行划分,并比较了各阶段的沉积能量及能量沉积效率。然而,对于电-化耦合机理来说,金属丝的相态变化时刻以及电压/电流峰值等细节并非研究重点,电爆炸能量释放的快慢对含能材料起爆的影响更值得关注。能量沉积速率是实现电能与含能材料化学能高效耦合的核心指标。因此,结合能量沉积特征,对电-化耦合爆炸阶段进行划分,并以金属丝电爆炸作为对比,如图4所示。

图4(a)给出了电-化耦合爆炸阶段划分,其中, S_1 为金属丝相变阶段,在脉冲大电流作用下,金属丝在 $1\ \mu\text{s}$ 的时间内经历熔化以及汽化过程,进入气态,电阻迅速增大,回路呈现高阻态,这一阶段电流、电压以及电阻曲线依次出现峰值,能量沉积速率较快。 S_2 为电流暂停阶段,金属丝进入气态后,由于直径较小,不足以形成放电通道,金属蒸汽无法立刻发生电离,放电过程出现间歇。这一阶段放电回路维持高阻值状态,电压保持在数万伏,放电电流大约只有数百安,能量沉积缓慢。 S_3 为等离子体放电阶段,随着爆炸产物沿着径向扩散,放电通道逐渐形成并膨胀,金属蒸汽开始电离,发生二次击穿,进入等

离子体态。等离子体放电开始后,电阻迅速下降至 $1\ \Omega$ 以下,同时电压平台也开始下降,放电电流则上升并达到第 2 个峰值,能量沉积速率加快。虽然等离子体放电阶段的功率峰值低于相变阶段,但持续时间更长,从开始电离到功率曲线第 1 次下降至零点,沉积了整个爆炸过程约 54% 的能量。 S_4 为回路振荡放电阶段,为整个爆炸过程的“收尾”阶段,电压、电流曲线在振荡中逐渐趋于平稳,能量沉积速率相比等离子体放电阶段大幅降低,沉积能量缓慢积累直至爆炸过程完全结束。在该阶段放电回路参数满足

$$\lambda = \frac{R_0 + R_w(t)}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0 + L_w(t)}} < 1 \quad (7)$$

式中: λ 为阻尼度, $\lambda < 1$ 时,回路发生欠阻尼放电,电压与电流波形发生振荡衰减。

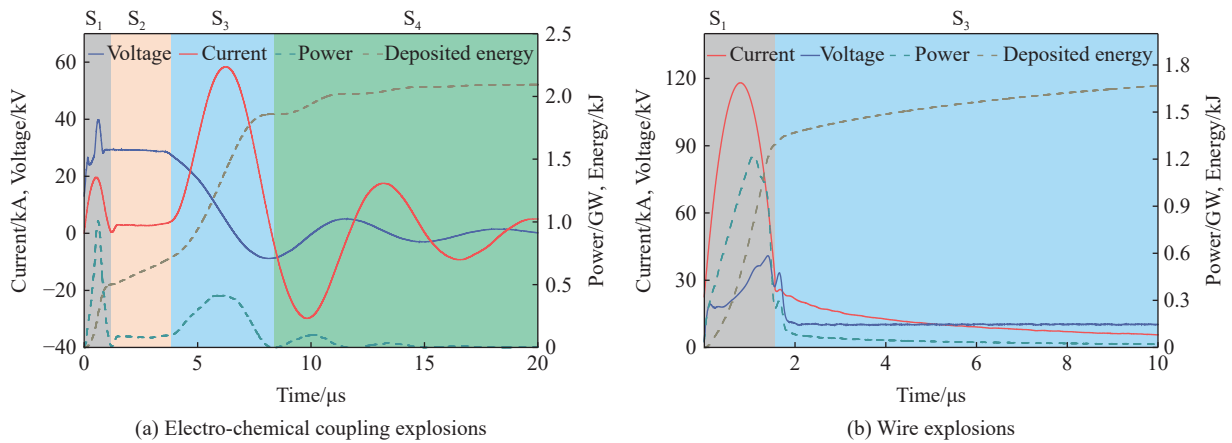


图 4 爆炸阶段划分

Fig. 4 Phase division for explosions

振荡周期 T 表示为

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{(L_0 + L_w(t))C_0} - \frac{(R_0 + R_w(t))^2}{4(L_0 + L_w(t))^2}}} \quad (8)$$

从式 (8) 可以看出,当电阻值增大时,振荡周期也会变大,衰减程度增加。由图 3(a) 中的放电波形可知,阶段 S_4 中的回路电阻基本保持不变,可近似认为 λ 为常数,回路可等效为发生欠阻尼放电的 RLC 电路。阶段 S_4 的振荡周期约为 $7\ \mu\text{s}$,经历约 2 个振荡周期后,储能器件中的残余电荷基本全部释放,沉积能量小幅上升。

图 4(b) 展示了基于电-化耦合爆炸阶段划分标准的金属丝电爆炸过程。其中,实验采用的金属丝完全汽化所需的热量约为 $178\ \text{J}$,远低于脉冲电容释放的能量,金属丝在爆炸过程中发生电离,形成等离子体放电通道,因此,将图 4(b) 中后续阶段划分为 S_3 ,与电-化耦合爆炸过程相比,该过程存在明显差异:电爆炸的能量沉积主要集中在金属丝相变阶段(阶段 S_1),期间功率迅速达到峰值后急剧下降,同时能量快速沉积。进入阶段 S_3 后,功率逐渐衰减至零,沉积能量则缓慢增加。

从整个爆炸过程来看,高速率能量沉积主要集中在金属丝相变阶段及等离子体放电阶段,与功率曲线的 2 个峰值对应。其中,相变阶段对应的脉冲高而窄,功率峰值高达 $1\ \text{GW}$,脉宽约为 $1\ \mu\text{s}$,可见,金属丝相变过程在极短的时间内就沉积了较高的能量,迅速完成金属丝相态变化。而等离子体放电阶段对应的功率峰值虽然只有 $413\ \text{MW}$,但脉宽超过 $4\ \mu\text{s}$,是整个爆炸过程中的主要能量沉积阶段,这一特征是耦合爆炸与电爆炸最明显的区别,结合前文分析,等离子体放电阶段也是含能材料起爆并与金属丝电爆炸实现耦合的重要阶段。

2.2 金属丝材质对能量沉积过程的影响

为探究金属丝材质对电-化耦合爆炸能量沉积过程的影响,分别采用不同材质的金属丝进行实验。选取铝丝、铜丝、镍丝、钨丝与HMX进行电-化耦合爆炸实验,金属丝有效长度均为15 cm、直径为0.2 mm,充电电压为25 kV,其放电波形如图5所示。

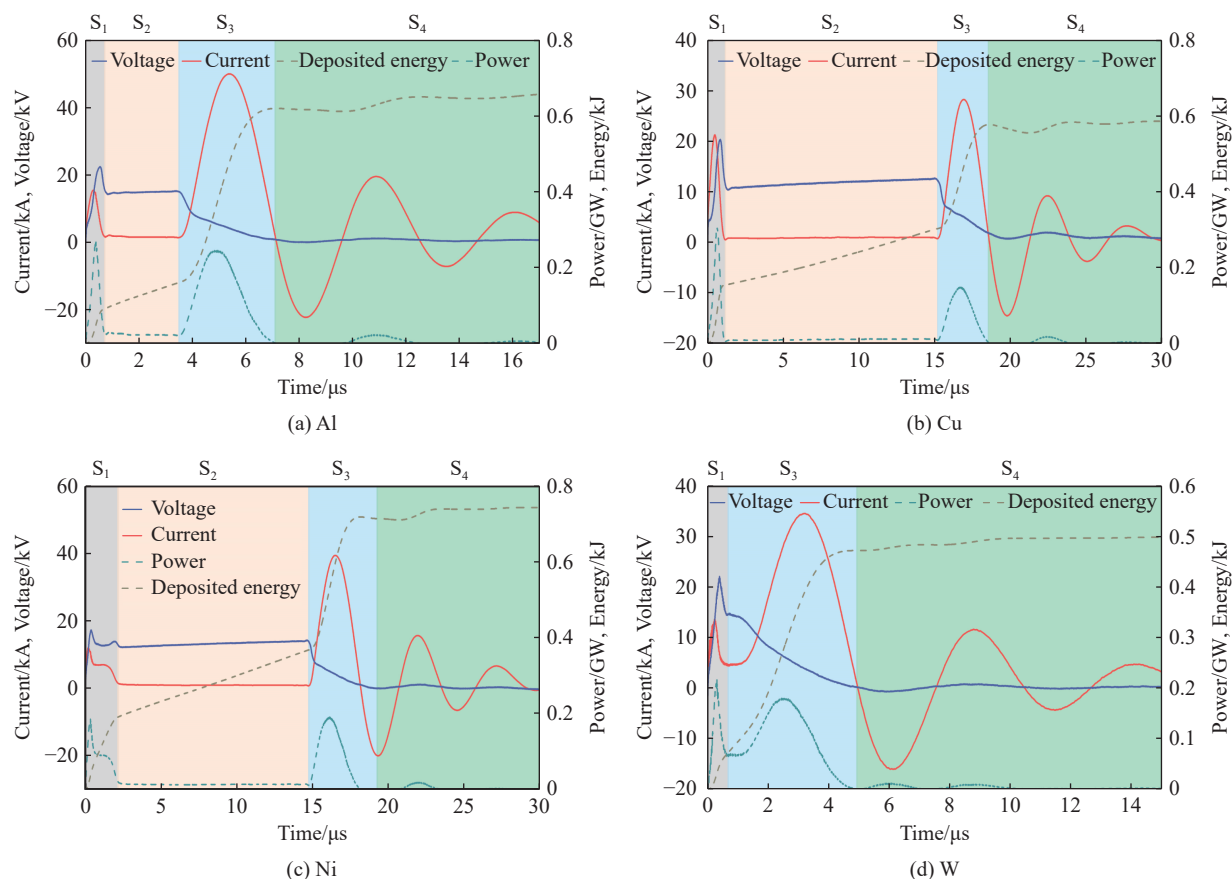


图5 不同材质金属丝的放电曲线

Fig. 5 Discharge curves of metal wires with different materials

铝丝的放电波形如图5(a)所示,在阶段 S_1 ,金属丝发生相变,释能功率先快速上升到第1个峰值272.82 MW,随后迅速下降,沉积能量上升至46.39 J;进入阶段 S_2 ,出现了持续时间为2.8 μs 左右的电流暂停,在此期间功率维持在几十兆瓦的较低水平,沉积能量缓慢上升至160.94 J;随后进入阶段 S_3 ,金属蒸汽电离进入等离子体态,功率再次迅速上升至第2个峰值245.70 MW,随后缓慢下降,沉积能量在此阶段大幅增加至619.25 J;进入阶段 S_4 ,回路振荡放电,功率维持在接近零点的极低水平,沉积能量的增加极为缓慢,最终稳定在655.70 J。

图5(b)为铜丝的放电波形,在阶段 S_1 ,其沉积能量快速上升至154.58 J,功率达到第1个峰值304.65 MW后迅速下降;值得注意的是,铜丝放电过程的阶段 S_2 时长相较铝丝有大幅增加,电流暂停达到了13.6 μs ,几乎占据整个放电过程时长的1/2,在此期间功率保持在12 MW以下,沉积能量缓慢上升至298.02 J;进入阶段 S_3 后,功率上升至第2个峰值148.69 MW,随后缓慢下降,期间沉积能量增加至576.62 J; S_4 为振荡放电阶段,功率逐渐归零,沉积能量缓慢增加后稳定在585.80 J。

镍丝的放电波形如图5(c)所示,整体与铜丝的放电波形相似,但功率峰值明显下降,在阶段 S_1 ,功率快速上升至第1个峰值186.29 MW,随后在快速下降至90 MW左右时出现约0.6 μs 暂停,而后继续下降至20 MW左右,沉积能量上升至192.22 J;阶段 S_2 的电流暂停时长12.5 μs ,功率保持在15 MW以下,沉积能量缓慢上升至368.91 J;进入阶段 S_3 后,功率上升至第2个峰值191.33 MW,随后缓慢下降,

期间沉积能量增加至 719.68 J; 阶段 S_4 振荡放电, 功率逐渐归零, 沉积能量缓慢增加后稳定在 744.38 J。

图 5(d) 为钨丝的放电波形, 值得注意的是, 其放电过程没有阶段 S_2 , 即未出现电流暂停, 阶段 S_1 和 S_3 的沉积能量均快速上升。其中, 阶段 S_1 的沉积能量上升至 72.58 J, 功率达到第 1 个峰值 216.44 MW 后迅速下降, 到达 65.18 MW 后进入阶段 S_3 , 沉积能量继续增加至 472.91 J, 功率再次上升至第 2 个峰值 180.07 MW, 随后下降至零点附近后进入 S_4 振荡放电阶段, 沉积能量缓慢增加, 最终稳定在 499.66 J。

为探究金属丝材质对爆炸能量沉积过程的影响, 总结了不同材质金属丝的放电波形特征参数, 如表 2 所示, 其中, t_{cp} 为电流暂停时间, U_p 为电压峰值, I_{p1} 为第 1 个电流峰值, I_{p2} 为第 2 个电流峰值, P_{p1} 为第 1 个功率峰值, P_{p2} 为第 2 个功率峰值。金属丝材质对爆炸过程最直观的影响在电流暂停阶段, 铜丝的电流暂停时间最长, 为 13.6 μs ; 镍丝与铜丝相当, 为 12.5 μs ; 铝丝与两者相差较大, 仅为 2.8 μs ; 而钨丝最特殊, 表现出无电流暂停的特征。电流暂停现象是金属丝电爆炸中的关键特征, 其本质是金属材料从高电导率的凝聚态向低电导率的等离子体态转变过程中, 电阻率发生剧烈变化的结果。针对不同金属丝材质中电流暂停现象表现出的不同特点, 主要考虑电阻温度系数、沸点、汽化潜热、电导率和热导率几个关键物理参数。铜和镍因具有高电阻温度系数和相对适中的相变能垒, 最容易且最显著地表现出电流暂停现象。铝虽然也容易汽化, 但可能受氧化层或热导率的影响, 表现略弱。而在钨中未观察到电流暂停现象, 可能有 2 个主要原因: (1) 在给定的实验条件下, 钨的极端物理性质(如超高熔点、沸点、汽化潜热)阻止其完成充分的汽化相变, 使其电阻未能发生足以导致明显电流跌落的跃升; (2) 钨的汽化点极高, 导致其易发生沿面击穿, 沿面击穿会提前形成等离子体通道, 绕过金属蒸汽, 使电流恢复, 从而“消除”电流暂停现象。关于表 2 中的其他特征参数, 受不同材质金属丝多方面物理性质的影响, 未表现出较明显的特征规律。

表 2 不同材质金属丝的放电曲线特征参数

Table 2 Characteristic parameters of discharge curves for metal wires with different materials

Material	$t_{cp}/\mu\text{s}$	U_p/kV	I_{p1}/kA	I_{p2}/kA	P_{p1}/MW	P_{p2}/MW
Al	2.8	22.38	15.45	49.86	272.82	245.70
Cu	13.6	20.31	21.24	28.18	304.65	148.69
Ni	12.5	17.43	12.11	39.56	186.29	191.33
W		22.15	13.64	34.64	216.44	180.07

为进一步对比不同材质金属丝在各阶段的平均功率与沉积能量, 对相关数据进行统计处理, 如图 6 所示。在阶段 S_1 和 S_2 , 镍丝、铜丝、铝丝和钨丝的沉积能量依次递减。而到了阶段 S_3 , 铝丝的沉积能量大幅跃升, 显著超越其他金属丝, 成为该阶段沉积能量最高的材质, 与此同时, 钨丝的沉积能量也急剧增加, 跃居第 2 位, 仅次于铝丝。值得注意的是, 钨丝在阶段 S_3 的沉积能量占比为整个放电过程能量的 80.06%, 铝丝的沉积能量占比次之, 为 69.88%, 铜丝和镍丝的沉积能量占比分别为 46.66% 和 46.52%, 钨丝和铝丝在阶段 S_3 表现出极高的能量集中度。在阶段 S_4 , 铜丝的能量沉积量显著低于其他 3 种金属丝, 而铝丝、镍丝和钨丝在该阶段的沉积能量则较为接近。在平均释能功率方面, 铝丝显著高于其他 3 种金属丝, 而铜丝、镍丝和钨丝的平均功率曲线相互交织, 未表现出明显差异。

不同金属丝在爆炸各阶段的能量沉积差异主要源于其固有物理性质与动态相变过程的耦合作用。在阶段 S_1 和 S_2 , 镍丝和铜丝因中等沸点和高电阻温度系数, 能够高效吸收能量完成熔化和汽化相

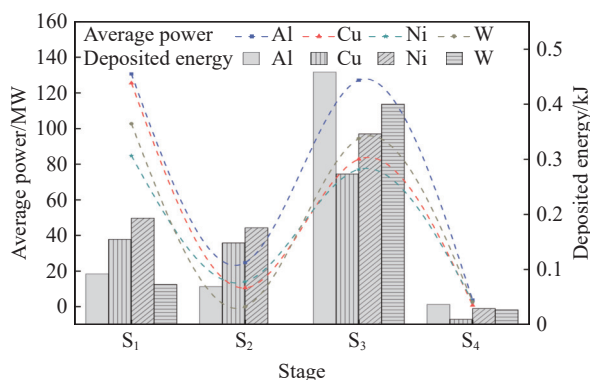


图 6 不同材质金属丝各阶段平均功率与沉积能量

Fig. 6 Average power and deposited energy of metal wires with different materials at each stage

变,因此,能量沉积较高;铝丝受限于表面氧化层的隔热效应,前期能量沉积受阻;而钨丝因超高沸点与汽化潜热,能量主要消耗于显热升温而非相变,能量沉积最低。进入阶段 S_3 ,铝丝因氧化层破裂引发熔融铝的爆发式汽化,结合其低电离能形成高导等离子体,实现能量跃升;钨丝则因液态显热蓄积和液电阻骤增,在延迟的欧姆加热中集中释放能量;铜丝和镍丝因早期已完成高效汽化,在阶段 S_3 的能量占比显著低于铝丝和钨丝。阶段 S_4 的铜丝因高热导率促使等离子体快速冷却,振荡放电能耗最低;其余金属因未汽化残留物的持续耗能,能量沉积相近。铝丝的最高平均功率源于阶段 S_3 氧化层破裂的雪崩式能量沉积与等离子体高电导特性,而其他3种金属丝因等离子体电导率衰减趋势相似,功率曲线无显著分化。

3 结 论

研究了金属丝与含能材料电-化耦合爆炸过程中的能量沉积特性。基于实验测得的电压、电流曲线,将耦合爆炸过程划分为金属丝相变、电流暂停、等离子体放电和振荡放电4个阶段,得到以下主要结论。

(1) 不同金属的能量沉积主导阶段各异:镍、铜在相变和电流暂停阶段(S_1 、 S_2)的沉积效率高;铝因氧化层隔热而受限,钨因沸点高、汽化潜热大而沉积最低;在等离子体放电阶段(S_3),铝因氧化层破裂发生爆发式汽化,能量跃升,钨依靠液态显热蓄积实现集中释放(占80.06%),铜、镍因前期已充分汽化,占比低于50%;在振荡放电阶段(S_4),铜因热导率高,冷却快,能耗最低。铝在阶段 S_3 的平均功率最高,铜、镍、钨的等离子体电导率衰减趋势相近。

(2) 电流暂停时间受金属材质影响:铜(13.6 μs)和镍(12.5 μs)因高电阻温度系数和适中相变能垒而电流暂停时间较长;铝因氧化层和热导率影响导致电流暂停时间较短(2.8 μs);钨因未充分汽化且易发生沿面击穿,未出现电流暂停现象。

(3) 提出了四阶段划分方法,揭示了不同金属对能量沉积的影响机制,特别是电流暂停的材质依赖性;发现了铝、钨等金属的爆发式能量沉积行为,为能量调控提供了新思路。

综上,通过调整金属丝材质可精确调控电-化耦合爆炸的能量沉积过程。本研究深化了对相关机理的认识,为含能器件的能量设计与可控释放提供了理论依据和实验支持。后续将进一步探讨其他参数的影响及其物理机制。

参考文献:

- [1] KRASIK Y E, EFIMOV S, SHEFTMAN D, et al. Underwater electrical explosion of wires and wire arrays and generation of converging shock waves [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(4): 412–431.
- [2] MALER D, ROSOSHEK A, EFIMOV S, et al. Efficient target acceleration using underwater electrical explosion of wire array [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(3): 034901.
- [3] ROSOSHEK A, EFIMOV S, TEWARI S V, et al. Phase transitions of copper, aluminum, and tungsten wires during underwater electrical explosions [J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(10): 102709.
- [4] FEDOTOV-GEFEN A, EFIMOV S, GILBURD L, et al. Generation of a 400 GPa pressure in water using converging strong shock waves [J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(6): 062701.
- [5] 伍俊英, 冯长根, 陈朗, 等. 金属电爆炸等离子体辐射温度测量 [J]. *战术导弹技术*, 2006(5): 31–33.
WU J Y, FENG C G, CHEN L, et al. Plasma radiation temperature measurement of metal explosion [J]. *Tactical Missile Technology*, 2006(5): 31–33.
- [6] 伍俊英, 于红新, 汪龙, 等. 金属桥箔水中电爆炸流场数值模拟研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(Suppl 1): 51–56.
WU J Y, YU H X, WANG L, et al. Numerical simulation of electric exploding of metal bridge foil in water [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(Suppl 1): 51–56.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] KRASIK Y E, GRINENKO A, SAYAPIN A, et al. Generation of sub-Mbar pressure by converging shock waves produced by the underwater electrical explosion of a wire array [J]. *Physical Review E*, 2006, 73(5): 057301.
- [10] HAN R Y, ZHOU H B, LIU Q J, 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.
- [11] WANG H Y, WEI D, GAN Y D, et al. Energy release in electrical wire explosions coupled with energetic materials [J]. *AIP Advances*, 2024, 14(10): 105116.
- [12] ROSOSHEK A, EFIMOV S, VIROZUB A, et al. Particularities of shocks generated by underwater electrical explosions of a single wire and wire arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(7): 074101.
- [13] LIU H Y, ZHAO J P, ZHANG R, et al. Dimensional effects of electrically exploding aluminum wires in argon gas: experimental investigation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(7): 073301.
- [14] HAN R Y, ZHOU H B, WU J W, et al. Relationship between energy deposition and shock wave phenomenon in an underwater electrical wire explosion [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(9): 093506.

Effect of Metalwire Materials on the Energy Deposition in Electro-Chemical Coupling Explosions

WANG Cheng¹, WANG Hangyu¹, LI Xinghan², WEI Ding¹, LIN Jiarui¹, CHEN Haodong¹, GAN Yundan¹

(1. *Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China;*

2. *School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China*)

Abstract: To enhance the total output energy and power of energetic materials, plasma that generated by electrically exploded metal wires was employed to initiate the detonation of energetic materials, thereby achieving the coupled release of electrical and chemical energy. The voltage and current curves of electro-chemical coupling explosion were measured using a self-built experimental system under ambient temperature and pressure in air during the explosion process. The electro-chemical coupling explosion was divided into four typical phases: metal wire phase transition, current pause, plasma discharge, and oscillatory discharge. The research results indicate that the primary energy deposition of different metal materials occurs at different stages. Nickel and copper wires with medium boiling points and temperature coefficients of high resistance achieve efficient phase change energy deposition during the wire phase transition and current pause stages. During the plasma discharge stage, aluminum undergoes explosive vaporization due to fracture of the oxide layer. This process forms a highly conductive plasma owing to its low ionization energy, which leads to a significant leap in energy deposition. The resistance of tungsten increases sharply due to latent heat accumulation in the liquid phase, accounting for over 80% of its energy deposition during the plasma discharge stage. The study also reveals that the unique current pause phenomenon in electro-chemical coupling explosions is influenced by metal properties (such as temperature coefficient of resistance, boiling point, and latent heat of vaporization). Copper wires exhibit the longest current pause duration, while tungsten wires show no such phenomenon. This paper systematically investigates the power and energy deposition characteristics during electro-chemical coupling explosions, elucidates the influence mechanisms of metal materials on the energy release process, and provides experimental evidence and technical support for enhancing the total output energy and power of energetic materials.

Keywords: electrical wire explosion; energetic materials; electro-chemical coupling; energy deposition