



·脉冲功率技术·

带载丝电爆炸提高沉积能量的研究^{*}

白洋伟¹, 张爱华¹, 段靖邦¹, 王琦¹, 朱亮²

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 在丝电爆过程中, 金属丝的沉积能量是决定爆炸效果的关键参数。在研发连续送丝电爆装置的基础上, 提出带载丝电爆炸提高金属丝沉积能量的方法。根据金属丝在电爆过程中的相变理论及旁路并联电阻的非线性时变性, 建立了金属丝负载的电阻-能量分段模型。使用带载丝和裸丝分别开展电爆炸实验, 同步采集丝电爆过程中的放电波形并分析计算, 探究带载丝电爆炸相关机理以及沉积能量的变化规律。结果表明, 电爆炸前期, 由于载丝带具有绝缘性, 其旁路并联电阻大于裸丝, 从而使得带载丝电阻大于裸丝; 随着欧姆加热的进行, 带载丝中液态金属沿轴向由两端向中间聚集, 加快了电爆炸相变过程, 等效电阻减小, 延缓了沿面击穿过程, 从而获得更多的能量。

关键词: 连续丝电爆; 带载丝; 沉积能量; 电阻-能量分段模型; 沿面击穿

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220413

Study of increase in energy deposition by electrical explosion of carrier wire

Bai Yangwei¹, Zhang Aihua¹, Duan Jingbang¹, Wang Qi¹, Zhu Liang²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The energy deposition of wire is a critical parameter in determining the effectiveness of the explosion during the electrical wire explosion. Based on developing a continuous wire-feeding electrical explosion device, a method was proposed to increase wire energy deposition with electrical explosion carrier wire. According to the phase transition theory of metal wire in the process of electrical explosion and the nonlinear time-varying nature of bypass parallel resistance, the resistance-energy segmentation model of wire load was established. The electrical explosion experiments were carried out separately using the carrier and bare wire. The discharge waveforms during the wire electrical explosion process were collected synchronously and analyzed to investigate the mechanism associated with the electrical explosion of the carrier wire and the variation of the energy deposition. The results show that in the early stage of wire electrical explosion, due to the insulation of the carrier ribbon, the parallel bypass resistance is greater than that of the bare wire, thus the resistance of the carrier wire is higher than that of the bare wire. With the progress of ohmic heating, the liquid metal in the carrier wire accumulates from both ends to the middle in the axial direction, which accelerates the phase transition process of electrical explosion, reduces the equivalent resistance, delays the breakdown process along the surface, and obtains more energy.

Key words: continuous wire electrical explosion, carrier wire, energy deposition, resistance-energy segmentation model, breakdown along the surface

金属丝电爆炸 (Electrical Explosion of Wires, EEW), 简称丝电爆, 是将高密度脉冲电流导入金属丝, 使金属丝在欧姆加热的作用下快速经历相变并发生爆炸, 且伴随着冲击波、光辐射等物理现象的过程^[1]。金属丝电爆炸广泛应用于脉冲高温源^[2]、Z 箍缩^[3]、等离子体聚爆^[4-5]、纳米粉制备^[6], 以及材料表面喷涂^[7]等领域, 是一项极具工程应用价值的技术。在丝电爆过程中, 金属丝的沉积能量是决定爆炸效果的关键参数^[8-9]。在不同的应用环境下, 丝电

* 收稿日期: 2022-12-12; 修订日期: 2023-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51765038)

联系方式: 白洋伟, 1765469188@qq.com。

通信作者: 张爱华, zhangaihua@lut.edu.cn。

爆过程中金属丝的沉积能量需求各不相同,但通常希望在相应范围内尽量提高沉积能量以获得更好的爆炸效果。

为了提高金属丝的沉积能量,国内外专家开展了大量的研究工作。文献[10]将钨丝预热1h后进行电爆炸实验,延长了金属丝的欧姆加热时间,提高了沉积能量;但该方法中预热操作较繁琐,且需要分别探究不同种类规格金属丝的预热温度。文献[11]在铝丝表面覆盖聚酰亚胺绝缘涂层后进行电爆炸,铝丝的沉积能量得到了提高,但绝缘涂层使得金属丝无法击穿气隙放电,进而无法实现连续丝电爆。文献[12]开展了不同绞合波长的双绞铝丝纳秒电爆炸实验,结果表明特定绞合波长会对沉积能量、膨胀过程以及光辐射产生显著影响,但铝丝绞合波长难以精确控制。

此外,研发可自动连续电爆的装置是提高丝电爆的工作效率以及实现工业化应用的必要途径。文献[13]自主研发了丝电爆制粉装置,该装置可在不打开电爆腔体的情况下,通过转动手柄使预先装在腔体中的金属丝依次发生电爆炸,但爆炸8次后需要再次手动装丝。文献[14]为了实现短时间内多次电爆,研发了连续送丝机构,可实现连续丝电爆,但金属丝的一端为自由态,无法保证每次能够准确送达电极之间发生爆炸。

综上所述,本文提出带载丝连续电爆炸提高沉积能量的方法,研发带载丝连续电爆系统。将金属丝装配于载丝带进行电爆炸,实现金属丝连续自动送进的同时,提高其沉积能量。为了探究丝电爆过程中金属丝电阻的时变非线性特性,在理想条件下,基于金属丝在固态加热-熔化-液态加热-汽化阶段的能量沉积特性及物质相变等理论,建立丝电爆过程中金属丝负载的电阻-能量分段模型。在此基础上,以自主研发的丝电爆系统为平台,使用带载丝和裸丝分别开展电爆炸实验,理论分析与实验研究相结合,探究带载丝电爆炸过程中金属丝沉积能量的变化规律以及相关机理。

1 实验平台

实验平台由带载丝连续电爆系统和信号采集系统组成。带载丝制备流程如图1所示。首先将金属丝放置于载丝带的凹槽内,经过热束流加热后,在压力 F 的作用下载丝带发生塑性变形,凹槽两边向内收缩,形成对金属丝的半包裹。装配好的金属丝和载丝带称为带载丝,将其收集于绕丝盘。

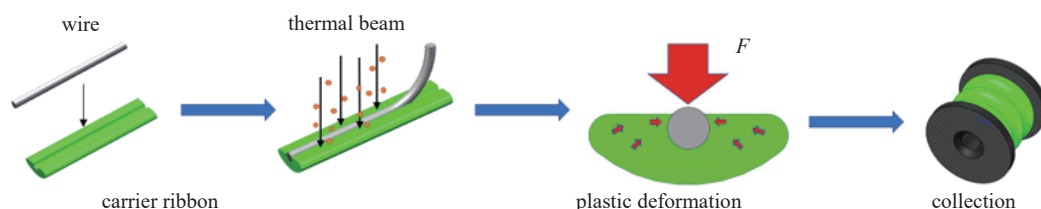


Fig. 1 Flow chart of preparation carrier wire

图1 带载丝制备流程图

带载丝连续电爆炸示意图如图2所示。在拉丝机构的驱动下,带载丝能够连续自动送进;受拉力作用,带载丝与电极在竖直方向保持恒定间距。当带载丝到达约束腔内的电极之间时,隔离开关导通,金属丝与电极间通过击穿气隙放电,脉冲大电流快速注入金属丝,金属丝发生电爆炸。

带载丝电爆过程的关键信息包含在装置放电回路的电信号中,因此设计并搭建信号采集系统对其进行采集和存储。带载丝电爆过程中的电压和电流信号具有高频高幅值的特性,采用Pearson101型罗氏线圈测量回路电流;采用Tektronix P6015A型高压探头测量电极间的电压信号,该电压包括金属丝两端以及金属丝与电极间气隙的压降。使用MSO5204数字示波器采集电流、电压信号并存储。带载丝电爆放电回路如图3所示: C 为储能电容; $i(t)$ 为回路电流; S 为隔离开关; R_1 、 L_1 分别为线路电阻和电感。

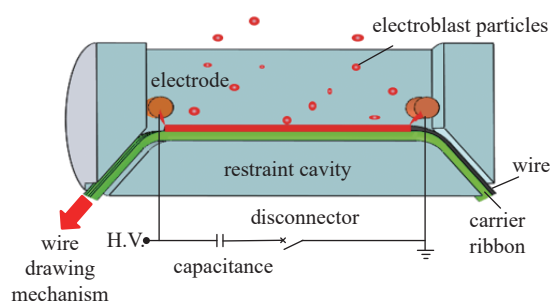


Fig. 2 Diagram of electrical explosion carrier wire

图2 带载丝电爆炸示意图

2 金属丝电爆炸过程分段模型

2.1 沉积能量

在丝电爆过程中,金属丝的沉积能量为

$$E = \int_0^{\tau} u_R(t) i(t) dt \quad (1)$$

式中： $i(t)$ 为回路电流； τ 为电 $u_R(t) = u(t) - L_w \frac{di(t)}{dt} - u_\delta(t)$ 爆炸结束的时刻； $u_R(t)$ 表示金属丝两端的阻性电压。根据图 3，则

$$u_R(t) = u(t) - L_w \frac{di(t)}{dt} - u_\delta(t) \quad (2)$$

式中： $u(t)$ 表示两个高压探头测点间的压降； L_w 为金属丝的电感； $u_\delta(t)$ 为气隙电压，包括金属丝与电极间气隙的阻性电压和感性电压，即

$$u_\delta(t) = i(t)R_\delta + L_\delta \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

式中： R_δ 为气隙电阻； L_δ 为气隙电感。

2.2 电阻-能量分段模型

在丝电爆过程中，如果电容器初始储能充足，金属丝在欧姆加热的作用下将依次经历固态加热、熔化、液态加热以及汽化等物理过程。在上述过程中，金属丝的电阻随时间发生复杂的非线性变化，将对金属丝的爆炸效果产生重要影响。为了研究金属丝电阻变化的一般规律，通过理想条件下的理论计算，建立金属丝电阻-能量分段模型^[15]，探究金属丝电阻与理论储能之间的关系及丝电爆相关机理。

在理论计算中，采用下标表示金属丝的状态和各阶段温度，其中 s 表示固体，sl 表示固体+液体，l 表示液体，lv 表示液体+蒸汽，v 表示蒸汽，t 表示丝电爆过程中的任意时刻的温度，0 表示 0 °C，m 表示熔化温度，v 表示汽化温度。

固态加热阶段，金属丝的理论储能为

$$E_{s,t} = M_{s,t} c_{s,t} \Delta T_1 \quad (4)$$

式中： M 为金属丝的质量，单位为 g； c 为比热容，单位为 J/(g·°C)； ΔT_1 为金属丝从常温到熔点的温度变化量。则金属丝电阻满足

$$\frac{R_{s,t}}{R_{s,0}} = 1 + \frac{\beta_{s,0}}{\alpha_{s,0}} \left[\left(1 + \frac{2E_{s,t}\alpha_{s,0}}{c_{s,t}M_{s,t}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \quad (5)$$

式中： β 为金属丝的电阻温度系数； α 为金属丝的比热容温度系数。

熔化阶段，金属丝理论储能为

$$E_{sl,t} = H_m M_{s,t} \quad (6)$$

式中： H_m 为金属丝的熔化潜热，单位为 J/g。忽略体积变化，则金属丝电阻满足

$$\frac{R_{sl,t}}{R_{s,m}} = \left[1 - \left(\frac{\rho_{l,m} - \rho_{s,m}}{\rho_{l,m}} \right) \left(\frac{E_{sl,t} - E_{s,m}}{H_m M_{s,t}} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

式中： ρ 为电阻率，单位为 mΩ·m。

液态加热阶段，金属丝理论储能为

$$E_{l,t} = M_{l,t} c_{l,t} \Delta T_2 \quad (8)$$

式中： ΔT_2 为金属丝熔点到沸点的温度变化量。则金属丝电阻满足

$$\frac{R_{l,t}}{R_{l,m}} = 1 + \beta_{l,m} \left(\frac{E_{l,t} - E_{l,m}}{M_{l,t} c_{l,t}} \right) \quad (9)$$

汽化阶段，金属丝理论储能为

$$E_{lv,t} = H_v M_{l,t} \quad (10)$$

式中： H_v 为金属丝的汽化潜热，单位为 J/g。则金属丝电阻满足

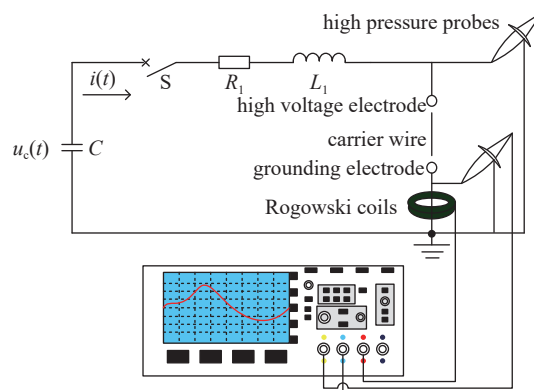


Fig. 3 Schematic diagram of the carrier wire electrical explosion discharge circuit

图 3 带载丝电爆炸回路示意图

$$\frac{R_{IV,t}}{R_{I,V}} = \left[1 - \frac{E_{IV,t} - E_{I,V}}{H_v M_{I,t}} \right]^{-1} \quad (11)$$

上述理论计算基于理想条件,总能量输入仅用于加热和相变,忽略了趋肤效应对丝电爆过程的影响,且未考虑机械膨胀和旁路电阻损耗。实际电爆过程中,随着欧姆加热的进行,金属丝两端电压逐渐升高,金属丝表面蒸汽会率先击穿形成小电弧,以并联的方式形成旁路通道。设金属丝电爆炸过程中旁路通道形成的非线性时变电阻为 $R_0(t)$,与金属丝电阻并联,建立如图4所示金属丝电爆炸过程电阻-能量分段模型。图中,相同工艺参数下,带载丝电爆炸过程中的 $R_0(t)$ 高于裸丝, $R_{s,t}$ 、 $R_{sl,t}$ 、 $R_{l,t}$ 、 $R_{IV,t}$ 分别为金属丝固态加热、熔化、液态加热和汽化阶段的时变电阻, L_0 为金属丝的电感。不同阶段电阻采用理想选择开关 S_E 进行切换,开关的控制信号为金属丝电爆炸的实时能量。

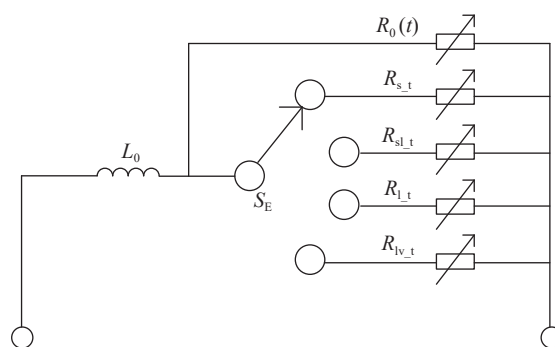


Fig. 4 Resistance-energy segmentation model

图4 电阻-能量分段模型

3 实验结果与分析

为了探究带载丝与裸丝电爆炸特性的区别,采用直径 0.40 mm、长度 60.00 mm 的铝丝作为电爆负载,将其制备成带载丝,使用带载丝和裸丝分别开展电爆炸实验。

3.1 带载丝电爆炸基本过程

以 10.00 kV 充电电压条件下带载丝电爆炸过程为例,基于电爆炸机理,通过放电波形各特征点以及计算相应时间段内沉积能量和功率的大小,对带载丝在欧姆加热过程中历经的各相态在放电波形上进行划分。图5(a)为放电回路电流和金属丝阻性电压随时间变化曲线,图5(b)为计算得到沉积能量和功率随时间变化曲线。

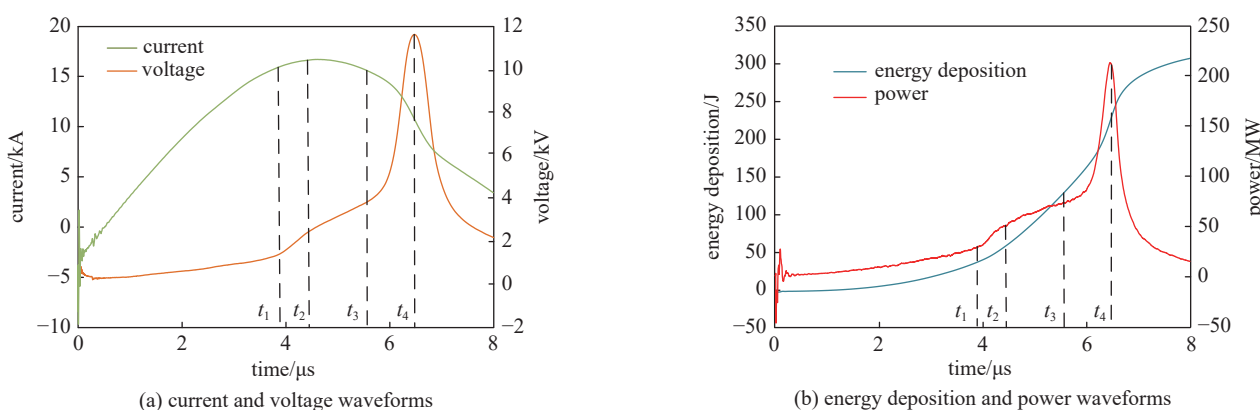


Fig. 5 Staging of electrical explosions carrier wire

图5 带载丝电爆炸阶段划分

根据文献[16]可知,金属丝的沉积能量与金属丝完全汽化所需要的能量之比称为过热系数,如果过热系数小于1,则称之为金属丝欠热电爆炸。根据式(1)~(3)计算得到带载丝发生电爆炸时沉积能量达到 231.8 J,根据式(4)、(6)、(8)、(10)以及表1中各物理量参数计算得到金属丝完全汽化所需要理论储能为 301.4 J,因此该参数条件下金属丝属于欠热电爆炸。

表1 铝的基本物理量参数

Table 1 Basic physical parameters of aluminium

solid density/ (g·cm ⁻³)	liquid density/ (g·cm ⁻³)	specific heat capacity of solids/(J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹)	specific heat capacity of liquid/(J·g ⁻¹ ·°C ⁻¹)	melting point/(°C)	boiling point/(°C)	latent heat of fusion/(J·g ⁻¹)	latent heat of vaporization/(J·g ⁻¹)
2.70	2.38	0.88	1.78	660	2520	398	10500

0~ t_1 时间段内,金属丝处于固态加热阶段,其阻性电压缓慢升高,金属丝的沉积能量约为 31 J,理论所需储能为 12.8 J,存在过热现象; t_1 时刻到达熔点,金属丝开始熔化,部分熔化后的液态金属从载丝带两端向中间慢慢汇聚,金属丝的截面积增大,电压上升速率有所提高; t_1 ~ t_2 时间段内,金属丝的沉积能量约为 49 J,理论所需储能为

8.8 J, 存在过热现象; $t_2 \sim t_3$ 时间段内, 金属丝处于液态加热阶段, 金属丝阻性电压和功率缓慢升高, 金属丝的沉积能量约为 60J, 理论所需储能为 48.1 J, 依然存在过热现象; t_3 时刻, 金属丝开始发生汽化, 其阻性电压和功率快速升高, 回路电流急剧下降; t_4 时刻, 金属丝阻性电压达到峰值, 金属丝表面蒸汽发生击穿, 电流转移到旁路放电通道, 使得金属丝所受磁压降低, 其液态内核最终断裂发生爆炸; 之后, 随着初始储能逐渐消耗殆尽, 丝电爆过程结束。

由上述分析可知, 理论计算基于理想条件, 未考虑实际环境和机械膨胀损耗, 且气隙击穿会消耗小量能量^[17]。因此金属丝为欠热电爆炸, 其固态加热、熔化、液态加热阶段依然可能存在过热现象。

3.2 带载丝对沉积能量的影响

在 9.38、10.00、10.63、11.25 kV 的充电电压条件下, 使用带载丝与裸丝分别进行电爆实验, 得到的放电波形如图 6 所示。图中电压分别为带载丝和裸丝的阻性电压, 电流为放电回路电流。

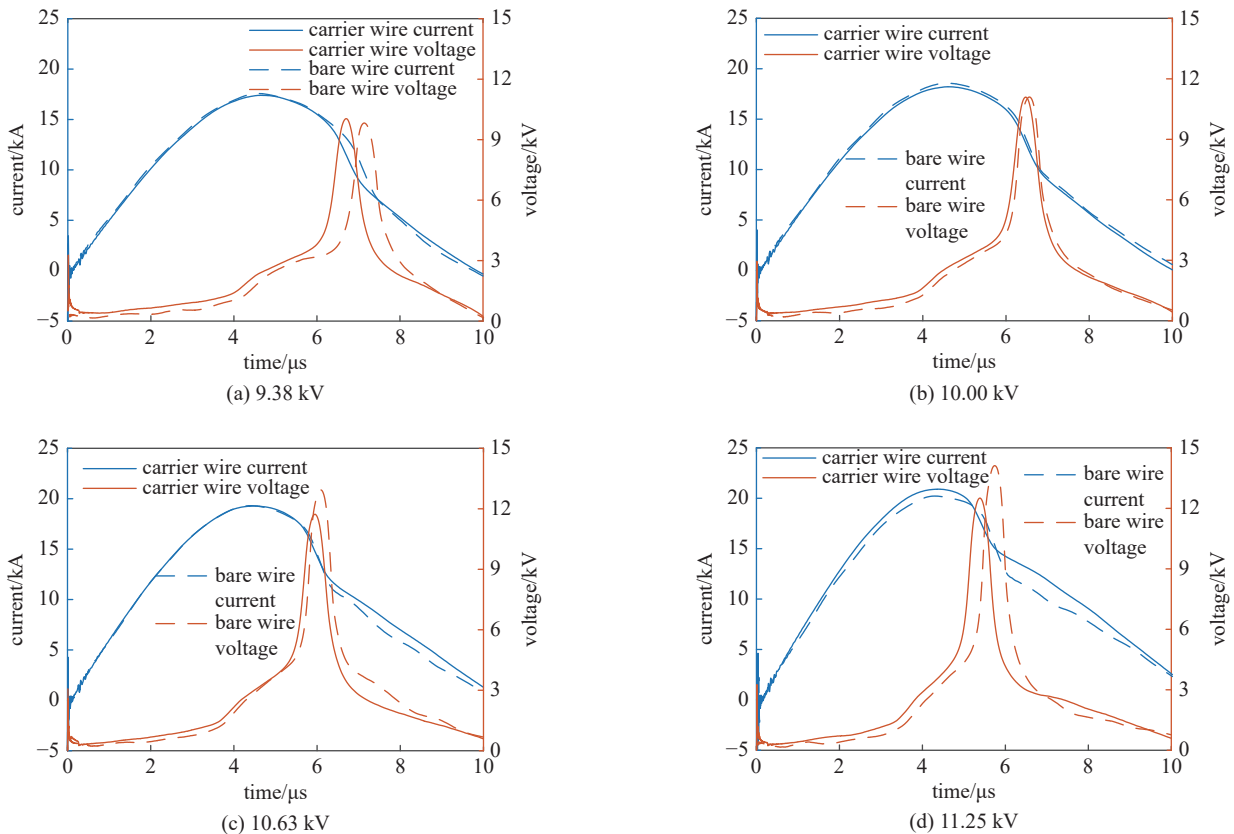


Fig. 6 Carrier wire and bare wire resistive voltage and loop current waveforms under different charging voltages

图 6 不同充电电压下带载丝和裸丝阻性电压及回路电流波形

随着初始充电电压的增加, 带载丝和裸丝的回路电流峰值以及阻性电压峰值均逐渐提高; 在相同充电电压下, 带载丝峰值前的阻性电压始终比裸丝峰值前的阻性电压大, 且电压达到峰值时刻早于裸丝, 加快了丝电爆相变过程。

图 7 为不同初始充电电压下带载丝和裸丝电爆炸过程中沉积能量随时间变化的曲线。随着充电电压的增大, 带载丝和裸丝的沉积能量均有所提高; 同一充电电压下, 相同时间内带载丝比裸丝沉积更多能量。计算得到带载丝发生电爆炸时刻获得的沉积能量分别为 220.7、231.8、246.3、257.4 J, 裸丝发生电爆炸时刻获得的沉积能量分别为 201.8、216.1、237.1、248.9 J。带载丝发生电爆炸时获得的沉积能量比裸丝发生电爆炸时获得的沉积能量平均增长约为 6%, 图 8 为不同充电电压下带载丝和裸丝电爆时刻沉积能量对比图。

实际电爆过程中, 金属丝的电阻计算公式为

$$R(t) = \frac{u_R(t)}{i(t)} \quad (12)$$

根据式(4)~(11)计算铝丝电阻随能量变化的理论值, 同时在 10.00 kV 充电电压下, 开展带载丝和裸丝电爆炸实验。理论分析与实验研究相结合, 探究带载丝和裸丝电爆炸过程中的能量沉积特性。计算得到金属丝的理论电

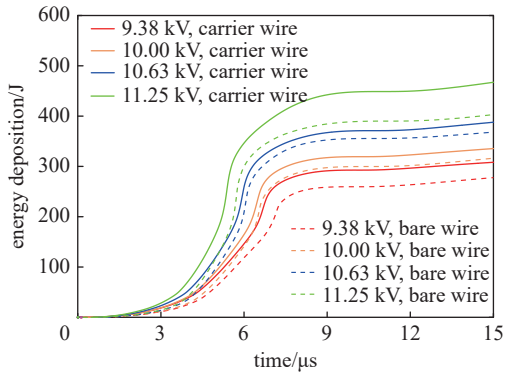


Fig. 7 Energy deposition of carrier wire and bare wire at different charging voltages

图 7 不同充电电压下载载丝和裸丝沉积能量变化曲线

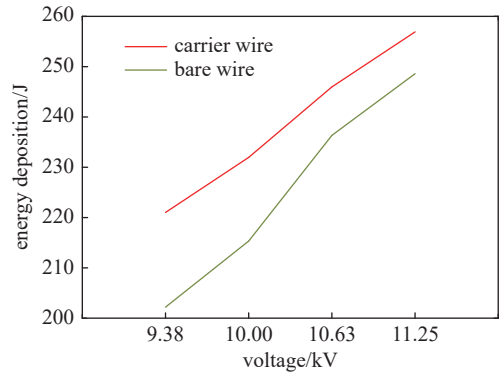


Fig. 8 Comparison of energy deposition at the time of electrical explosion of carrier wire and bare wire under different charging voltages

图 8 不同充电电压下载载丝和裸丝电爆时刻沉积能量的对比

阻以及带载丝、裸丝电爆实验过程中的电阻随能量变化曲线如图 9 所示。

理论上,当金属丝完全汽化时,沉积能量达到最大值,电阻变成无穷大;实验中,电弧击穿终止电阻上升。根据金属丝在欧姆加热过程中的理论储能计算结果,将丝电爆过程划分为固态加热(e_1 之前)、熔化($e_1 \sim e_2$)、液态加热($e_2 \sim e_3$)以及汽化-爆炸(e_3 之后)四个阶段。

在固态加热阶段,带载丝和裸丝电阻比理论值大,这是因为在放电回路气隙击穿过程中,根据汤森放电理论,电场将产生畸变,电流变化率很高,如图 10 所示,计算其趋肤深度约为 $0.9 \mu\text{m}$ 。气隙击穿后回路电流变化率有所降低,但仍然很大,趋肤深度约为 $2.6 \mu\text{m}$,导致金属丝在固态加热过程中趋肤效应明显。

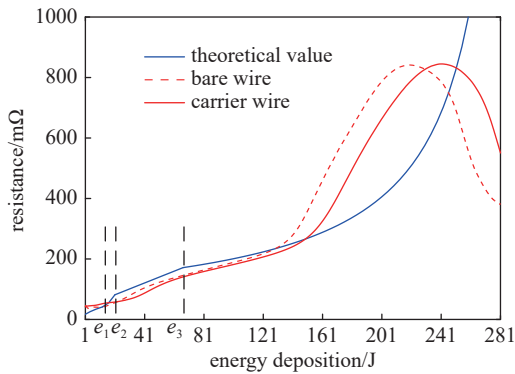


Fig. 9 Resistance varies with energy deposition

图 9 电阻随能量变化曲线

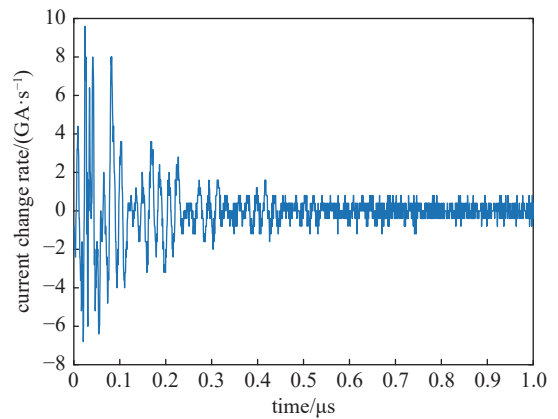


Fig. 10 Current change rate at air gap breakdown

图 10 气隙击穿时电流变化率

在熔化阶段,金属丝由固态逐渐转变为液态,带载丝和裸丝电爆炸过程中存在旁路并联电阻,因此电阻均小于理论值;由于载丝带具有绝缘性,其旁路并联电阻大于裸丝,从而使得带载丝的电阻大于裸丝。

在液态加热和汽化阶段,金属丝由液态逐渐转变为气态,推测带载丝因其部分未汽化的液态金属在中间聚集,加快了电爆炸相变过程,等效电阻减小,延缓了沿面击穿过程,从而获得更多的沉积能量。

4 结 论

为了提高金属丝的沉积能量,本文提出带载丝电爆炸的方法,研发了连续电爆装置;基于金属丝在欧姆加热过程中相变理论及旁路并联电阻的非线性时变性,建立了丝电爆过程中金属丝负载的电阻-能量分段模型。以铝丝为电爆负载,分别采用带载丝和裸丝进行电爆炸实验,采集了丝电爆过程中的放电波形,根据波形特征及金属丝沉积能量的变化规律,对电爆炸基本过程进行分析,探究带载丝电爆炸相关机理。主要结论如下:

(1) 使用带载丝既可以实现装置稳定连续的电爆炸,提高其工作效率;还能提高金属丝的沉积能量,获得更好的爆炸效果。

(2) 即使金属丝电爆炸为欠热电爆炸现象,其固态加热、熔化和液态加热阶段依然可能存在过热现象。随着

充电电压的升高,回路电流峰值以及带载丝和裸丝两端电压峰值均逐渐增大;在相同充电电压下,带载丝峰值前的阻性电压始终比裸丝峰值前的阻性电压大,且电压达到峰值时刻早于裸丝,加快了丝电爆相变过程。

(3)带载丝和裸丝电爆炸过程的旁路并联电阻具有非线性时变性。电爆炸前期,由于载丝带具有绝缘性,其旁路并联电阻大于裸丝,从而使得带载丝电阻大于裸丝;随着欧姆加热的进行,推测带载丝中液态金属沿轴向由两端向中间聚集,加快了电爆炸相变过程,等效电阻减小,延缓了沿面击穿过程,从而获得了更多的沉积能量。

(4)对于带载丝电爆炸的进一步研究,在制备带载丝的过程中需进行精确的测速和测温,且希望制备带载丝装置和丝电爆装置同步工作;可以通过高速摄像等检测方法,获得电爆炸过程金属丝和载丝带的变化状态,对于带载丝电爆炸的准确计算及机理研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] Chace W G. Exploding wires[J]. *Physics Today*, 1964, 17(8): 19-24.
- [2] 石恒通, 邹晓兵, 赵岫, 等. 并联金属丝提高电爆炸丝沉积能量的数值模拟[J]. *物理学报*, 2014, 63: 145206. (Shi Huantong, Zou Xiaobing, Zhao Shen, et al. Numerical simulation of energy deposition improvement in electrical wire explosion using a parallel wire[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 145206)
- [3] 吴坚, 李兴文, 邱爱慈, 等. 金属丝电爆炸研究进展—(I): 真空环境[J]. *高电压技术*, 2018, 44(6): 1898-1906. (Wu Jian, Li Xingwen, Qiu Aici, et al. Review of electrical exploding wires—(I): in vacuum[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(6): 1898-1906)
- [4] Yin Guofeng, Li Xingwen, Jia Shenli. Electrical characteristics of microsecond electrical explosion of Cu wires in air under various parameters[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(4): 972-981.
- [5] 韩若愚, 邓成志, 冯娟, 等. 铜镍合金丝电爆炸放电特性与时空演化行为[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 065010. (Han Ruoyu, Deng Chengzhi, Feng Juan, et al. Discharge characteristics and spatial-temporal evolution of Cu-Ni alloy wire explosion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 065010)
- [6] Suliz K, Miller A, Ivanov K, et al. Synthesizing multicomponent AlCrFeCuNi nanoparticles by joint electrical explosion of wires[J]. *Powder Technology*, 2022, 404: 117491.
- [7] 闫维亮, 王旭东, 周辉, 等. 电爆喷涂方法的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(8): 3020-3030. (Yan Weiliang, Wang Xudong, Zhou Hui, et al. Research progress of electrical explosion spraying method[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(8): 3020-3030)
- [8] 燕文宇, 张乔根, 赵军平, 等. 不同氩气气压下铝丝电爆炸的二次放电特性[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 025002. (Yan Wenyu, Zhang Qiaogen, Zhao Junping, et al. Second discharge characteristics of aluminum wire electrical explosion under various argon pressures[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 025002)
- [9] Pikuz S A, Tkachenko S I, Romanova V M, et al. Maximum energy deposition during resistive stage and overvoltage at current driven nanosecond wire explosion[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 2330-2335.
- [10] Russkikh A G, Baksht R B, Labetskii A Y, et al. Effect of the high-voltage electrode polarity and wire preheating on the energy characteristics of electric explosion of fine tungsten wires in vacuum[J]. *Plasma Physics Reports*, 2006, 32(10): 823-835.
- [11] Li Yang, Sheng Liang, Wu Jian, et al. Influence of insulating coating on aluminum wire explosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 102513.
- [12] 盛亮, 李阳, 吴坚, 等. 双绞铝丝纳秒电爆炸实验研究[J]. *物理学报*, 2014, 63: 205203. (Sheng Liang, Li Yang, Wu Jian, et al. Nanosecond electrical explosion of twisted aluminum wires[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 205203)
- [13] 毛志国, 邹晓兵, 王新新, 等. 电爆金属丝产生纳米粉体[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(3): 691-695. (Mao Zhiguo, Zou Xiaobing, Wang Xinxin, et al. Nanopowder production by electrical explosion of wires[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 691-695)
- [14] Kotov Y A. Electric explosion of wires as a method for preparation of nanopowders[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2003, 5(5/6): 539-550.
- [15] Tucker T J. Behavior of exploding gold wires[J]. *Journal of Applied Physics*, 1961, 32(10): 1894-1900.
- [16] 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)
- [17] 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(07): 500-505. (Bi Xuesong, Zhu Liang, Yang Fulong. Mechanism of current injection in the process of wire electrical explosion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(07): 500-505)