

# 不同丝径与放电周期对铜丝电爆炸的影响分析\*

周长安, 鲁怡展, 肖波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 通过数值模拟对真空中的铜丝电爆炸过程进行了研究, 重点考察了丝径和放电周期对铜丝电爆炸过程的影响。模拟结果表明, 采用细金属丝 (直径 0.3mm) 比粗丝 (直径 3mm) 具有更高的电爆炸能量利用效率, 细丝的能量利用率可达 80% 以上, 而粗丝小于 10%。此外, 细丝电爆炸的效果几乎不受放电快慢的影响, 而对于粗丝来说, 缩短放电周期可将能量利用效率提升 2 倍左右, 但电爆炸的空间均匀性会随之变差。

**关键词:** 电爆炸; 磁流体力学; 场路耦合; 金属丝; 放电周期

**中图分类号:** TJ55; O384; O521.3

**文献标识码:** A

金属丝电爆炸作为强脉冲电流驱动下金属材料经历极端快速相变并产生高温等离子体的复杂物理过程, 是脉冲功率与放电等离子体领域的经典研究方向。该技术能将电能高效转化为热能、辐射能及冲击波能, 因此在 Z 箍缩惯性约束聚变<sup>[1,2]</sup>、高性能纳米粉体制备<sup>[3,4]</sup>、油气开发<sup>[5]</sup>、新型含能材料精密点火以及特种冲击波加工<sup>[6]</sup>等领域展现出广阔前景。在一些应用领域, 例如金属丝电爆炸生成气溶胶或纳米粉体, 实验上有时希望抑制电爆炸的剧烈程度, 避免金属丝上沉积能量过高, 得不到想要的气溶胶或粉体粒径分布状态。与此同时, 大多数此类实验一般都期望电爆炸具有较好的空间均匀性。

如何根据金属丝负载特征来恰当地设计放电回路以达到期望的电爆炸状态, 是实验设计人员十分关心的问题。金属丝的电爆炸特性受到负载参数 (如材料、丝径) 和驱动源参数 (如电流大小、放电周期) 的共同影响。例如, 丝径或质量<sup>[7]</sup>的增加会显著延缓金属丝的气化与电离过程, 表现为电压峰值时刻延后、脉冲展宽; 而并联丝阵<sup>[8]</sup>中各丝相变的不同步性则会导致能量沉积与等离子体发展得不均匀。同时, 放电回路的特征决定了能量注入的速率, 是决定金属丝经历“欠热”还是“过热”爆炸模式<sup>[9]</sup>的关键。许多工作<sup>[10]</sup>聚焦于单一参数 (如固定脉冲波形下的丝径影响, 或固定丝径下的脉冲能量影响) 的独立作用, 对于丝径与放电周期等关键参数间的耦合影响机制的研究还不充分。这种对各个参数影响下的物理过程认知的不足, 制约了面向特定应用的负载精细化设计与性能优化能力<sup>[11]</sup>。

数值仿真是研究电爆炸规律和指导实验设计的重要手段, 国内外已开展了大量的电爆炸丝的建模与仿真技术研究, 下面是一些与本文相关度较高的文献。早在 2006 年, 蒋吉昊等<sup>[12]</sup>就建立了电爆炸的一维磁流体模型, 该模型可以定性分析电爆炸过程中电流、电压波形。2016 年, Chung 等<sup>[13]</sup>基于考虑了液气相变的物态方程和电导率公式建立了水中铜丝电爆炸模型, 获得了与实验数据较为符合的数值模拟结果。2020 年, 王坤等<sup>[14]</sup>对电爆炸物理过程进行了建模, 模型中以实验测量电流波形作为模型的输入, 通过数值模拟研究了不同直径铝丝电爆炸特性。2021 年, 韩若愚等<sup>[15]</sup>建

\*收稿日期: 2026-01-08; 修回日期: 2026-03-16

基金项目: 国家自然科学基金 (12472397)

作者简介: 周长安 (2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事磁流体力学数值模拟研究. E-mail: zhouchangan23@gscaep.ac.cn

通讯作者: 肖波 (1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事电磁驱动实验理论与数值模拟分析、磁流体力学数值模拟方法以及磁流体程序开发研究. E-mail: homenature@139.com

立了水中铜丝电爆炸的一维磁流体数值模型。2022年,刘志刚等<sup>[16]</sup>建立了水中金属丝电爆炸的二维磁流体模拟方法。2023年,薛创等<sup>[17]</sup>基于一维磁流体模拟构建的水中金属丝电爆炸的零维模型,能够较好地刻画电爆炸的物理行为。

本文以数值仿真为手段,以常用于各项试验的金属铜丝为研究对象,开展不同丝径以及不同放电周期条件下的电爆炸过程研究。重点分析了丝径与放电周期对电爆炸过程中的能量利用率和爆炸均匀性的影响,为相关实验设计提供参考。

## 1 铜丝电爆炸过程仿真技术简介

### 1.1 铜丝电爆炸装置模型

本文的主要研究方式是通过数值模拟来探究不同丝径和放电周期对金属丝电爆炸的影响。在金属丝材料上我们选用在电爆炸实验中广泛使用的铜。基于柱对称假设,采用如图1所示的模拟装置,其中中间绿色材料为铜丝,粉色为外圈套筒表示回流罩,二者之间的灰色部分为真空。取铜丝长度为5cm,选择0.3mm和3.0mm两种不同直径分别代表细丝和粗丝两种典型工况(大部分电爆炸实验都是选亚毫米直径以下的细丝,有时受材料加工局限或需要提高单发实验的气溶胶或纳米粉体产量,也会将毫米以上的粗丝纳入实验设计考虑)。回流罩直径取为2cm。回路电感如未作特别说明则取为1200nH。

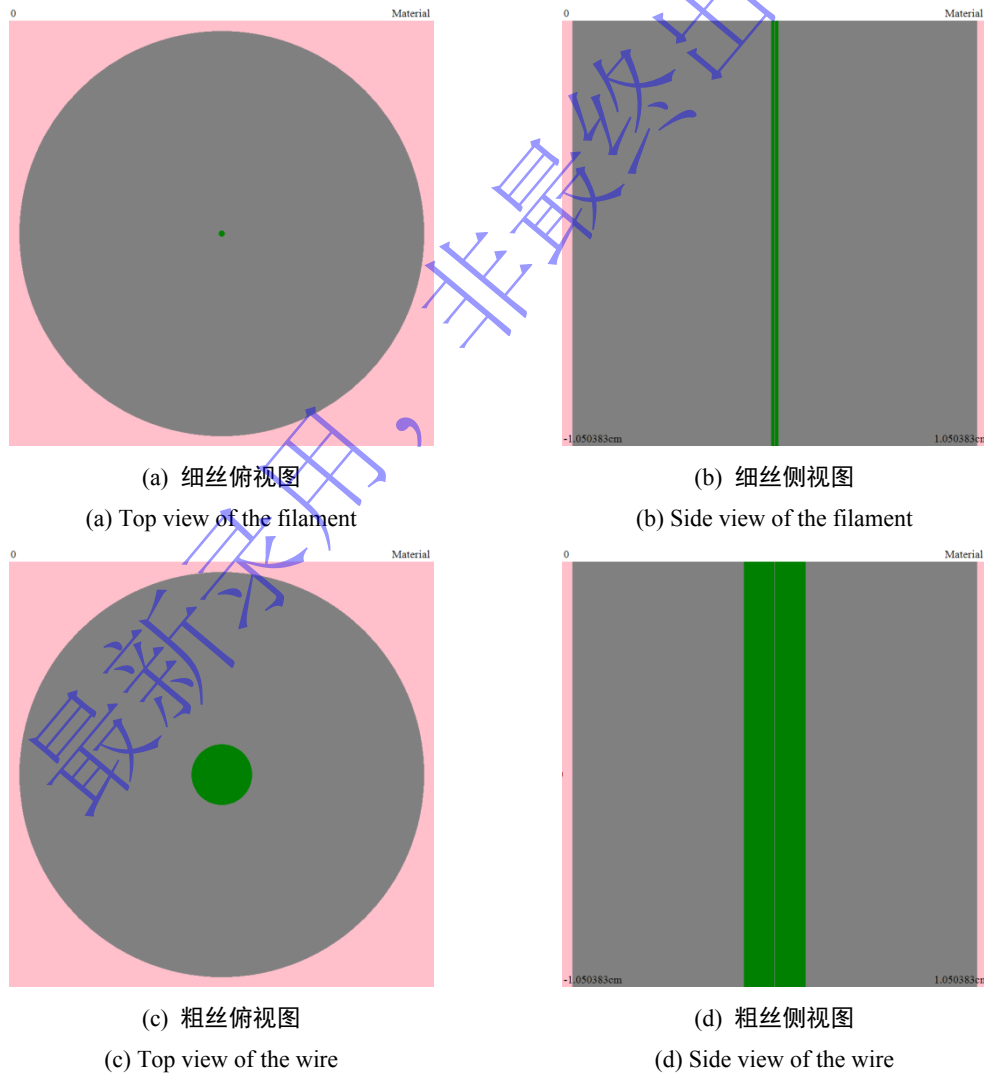


图1 金属丝电爆炸装置模型

Fig.1 The system model for electrical explosion of wires

## 1.2 磁流体力学控制方程与放电回路方程的耦合求解

本文采用 RLC 回路与一维柱面磁流体力学相结合的场路耦合模型来刻画铜丝电爆炸过程，基本原理如图 2 所示，右图中的竖线代表了磁流体力学模拟中的网格划分。

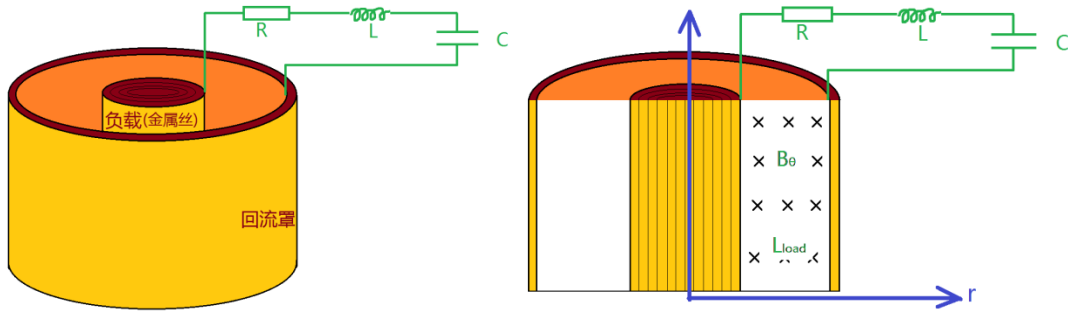


图 2 RLC 回路与一维柱面磁流体力学耦合模型

Fig.2 The Coupled RLC Circuit and 1D Cylindrical Magnetohydrodynamic Model

其中，RLC 电路方程如式(1)所示：

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} = \frac{Q}{C} - RI - R_{load}I - \frac{dL_{load}}{dt} \\ \frac{dQ}{dt} = -I \end{cases} \quad \#(1)$$

方程中， $R$ 、 $L$ 、 $C$  分别表示回路电阻、电感和电容， $I$  表示回路电流， $Q$  为电容器上电荷， $L_{load}$  和  $R_{load}$  分别表示负载区的电感和电阻。

介质中的一维柱面磁流体力学方程组如式(2)所示

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) \\ \rho \frac{du_r}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{1}{2\mu_0} B_\theta^2 \right) - \frac{1}{r} \left( \frac{1}{2\mu_0} B_\theta^2 \right) \\ \rho \frac{de}{dt} = -p \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\eta}{\mu_0^2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rB_\theta) \right)^2 \\ \frac{dB_\theta}{dt} = -B_\theta \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\eta}{\mu_0 r} \frac{1}{\partial r}(rB_\theta) \right) \end{cases} \quad \#(2)$$

方程中， $\rho$ 、 $u_r$  和  $e$  分别表示材料的密度、径向速度和比内能， $p$  为压强， $B_\theta$  是电流产生的环向磁场。

RLC 回路方程(1)和磁流体力学方程(2)之间通过图 2 中的处于负载与回流罩之间空腔单元进行耦合，具体如下：负载的阻抗  $R_{load}$  由空腔单元的磁扩散速率确定，即  $R_{load}I = d\Phi_\theta/dt$ ；空腔单元的运动和形变决定了负载区电感的变化，即  $L_{load} = h \ln(r_2/r_1)\mu_0/(2\pi)$ ；最后，从回路电流  $I$  可以得到空腔单元与介质交界处的  $B_\theta$  磁场边界条件，即  $B_\theta = \mu_0 I / 2\pi r$ 。

以上放电回路与一维磁流体力学方程的数值离散求解采用拉格朗日方法，采用算子分裂将方程分解为理想磁流体、磁扩散和电路演化三个步骤。这些计算通过自研程序 Cylinder1D<sup>[18]</sup>予以实现。

值得注意的是，本文场路耦合建模与一些文献<sup>[19]</sup>中的做法不有所不同。以上建模中考虑了金属丝中的磁扩散过程，而不是如文献中那样直接假定金属丝中的电流处于平衡分布状态(或称“磁扩散平衡”)。这也是为何模型中通过空腔单元的磁扩散来计算负载有效电阻，而不是对金属中的电导率进行积分(如文献<sup>[19]</sup>中的方程(3))。平衡电流假设适用于金属丝足够细或者放电足够慢的情形，由于本文需要研究更一般的情形，因此采用了更一般的一维磁流体力学方程组。也要注意，一维

磁流体模型虽然能刻画金属丝电爆炸沿半径  $r$  方向的分布特征，但不能刻画沿  $z$  方向发生膨胀和不稳定性。为此，下文中将要讨论到的空间均匀性和趋肤效应均指沿径向的分布特征，且相应结论主要适用于电爆炸早期  $z$  方向膨胀还不明显时的行为。

### 1.3 材料模型

金属丝电爆炸模拟效果的真实性很大程度上取决于材料模型的准确性。与电爆炸过程紧密相关的材料模型主要包括了材料状态方程和电阻率模型。在状态方程方面本文选择了列表型状态方程<sup>[20]</sup>，其是以离散表格形式提供物质的热力学数据，能够统一描述多项物质在极端条件下的热力学响应。在电阻率模型方面我们选择了修正过后的 Burgess 电阻率模型<sup>[20],[21]</sup>，该模型能连续描述金属从固态、液态到等离子态的电阻率变化，更适合模拟材料发生高温快速相变的问题。

## 2 丝径与放电周期对金属丝电爆炸过程的影响分析

电爆炸实验人员关心放电快慢（即，电流周期）对电爆炸过程的影响规律，以便更好地进行电爆炸实验设计。本节将围绕这一问题展开讨论。考虑到放电快慢对不同粗细的金属丝电爆炸过程的影响不同，2.2 和 2.3 节中分别以细丝（直径取 0.3mm）和粗丝（直径取 3.0mm）两种情形进行数值模拟，最后在 2.4 节对不同丝径与放电周期对金属丝电爆炸的影响规律开展分析。

### 2.1 铜丝电爆炸阈值能量密度估算

首先，为了下文分析的方便，我们在本节中先对铜丝发生电爆炸所需的能量密度阈值进行一个估算。电爆炸能量阈值本质上可视为一种材料的特征属性之一，它对应了将单位质量（或单位体积）材料从室温室压快速加热到电阻率快速跃升所对应的温度  $T_c$ （一般在材料的汽化点附近）所需的能量，即  $e_c = [e(\rho_c, T_c) - e(\rho_0, T_0)]$ 。原则上来说，材料的电爆炸能量阈值可以根据材料的状态方程

(EOS) 以及电爆炸点  $(\rho_c, T_c)$  直接计算得到。但是电爆炸点  $(\rho_c, T_c)$  的精准定义本身也还存在一定的人为不确定性。鉴于此，我们这里以一种更符合实验直观的方式来估算电爆炸能量密度阈值，即：将刚好能够使金属丝发生急速膨胀对应的单位质量电爆炸能量沉积定义为该金属的电爆炸比内能阈值。采用不同直径的金属丝可能会得到不完全一致的阈值，为了消除这种不一致性，得到能代表材料属性的值，可以约定以“半径无穷小”的金属丝作为参考标准。实验或模拟中不能实现真正的无穷小半径，只能以尽可能细的金属丝来近似代替。

本文中以直径为 0.3mm 细丝的电爆炸数值模拟，来估算使铜丝发生电爆炸的最低能量密度。模拟中回路电阻取为 0，从而使电容器的储能全部沉积在金属丝上，便于准确计算金属丝上的沉积能量。针对电容为 1mF，电压分别取 0.3kV、0.32kV、0.33kV 三种不同情形进行模拟。模拟到 400us 时刻，结果如图 2 所示。可以看到，在电压低于 0.32kV 时，虽然铜丝有显著升温，但是还未达到显著膨胀的程度，因此认为没有到达爆炸状态。当电压提高到 0.33kV 后，铜丝发生急剧膨胀，可认为达到了爆炸状态。由此，我们根据 0.32kV 的电压估算出使 0.3mm × 5cm 的铜丝发生电爆炸的最低能量为

$$E_c = \frac{1}{2}CU^2 = 0.5 \times 1\text{mF} \times (0.32\text{kV})^2 = 0.051\text{kJ}$$

由此得到金属铜的电爆炸能量密度阈值为

$$e_c = \frac{\frac{1}{2}CU^2}{\pi r^2 h \rho} = \frac{0.051\text{kJ}}{\pi \times (0.3\text{mm})^2 \times 5\text{cm} \times 8.7\text{g/cm}^3} = 0.42\text{kJ/g}$$

为了验证上述结果的合理性，我们还采用以下近似公式对  $e_c$  进行了一个估算

$$e_c = e(\rho_c, T_c) - e(\rho_0, T_0) \approx c_v(T_c - T_0)$$

其中，比热  $c_v$ 、汽化温度  $T_c$  以及常温  $T_0$  分别取值为 0.385J/(K.g)、2567K 和 300K，得到的  $e_c$  估算值为 0.87kJ/g，与上述结果基本一致。

理想条件下的铜丝电爆炸温度分布如图 3 所示，其中图中数值按  $10^4\text{K}$  归一，在图片顶部表示 1，在图片中央表示 0。

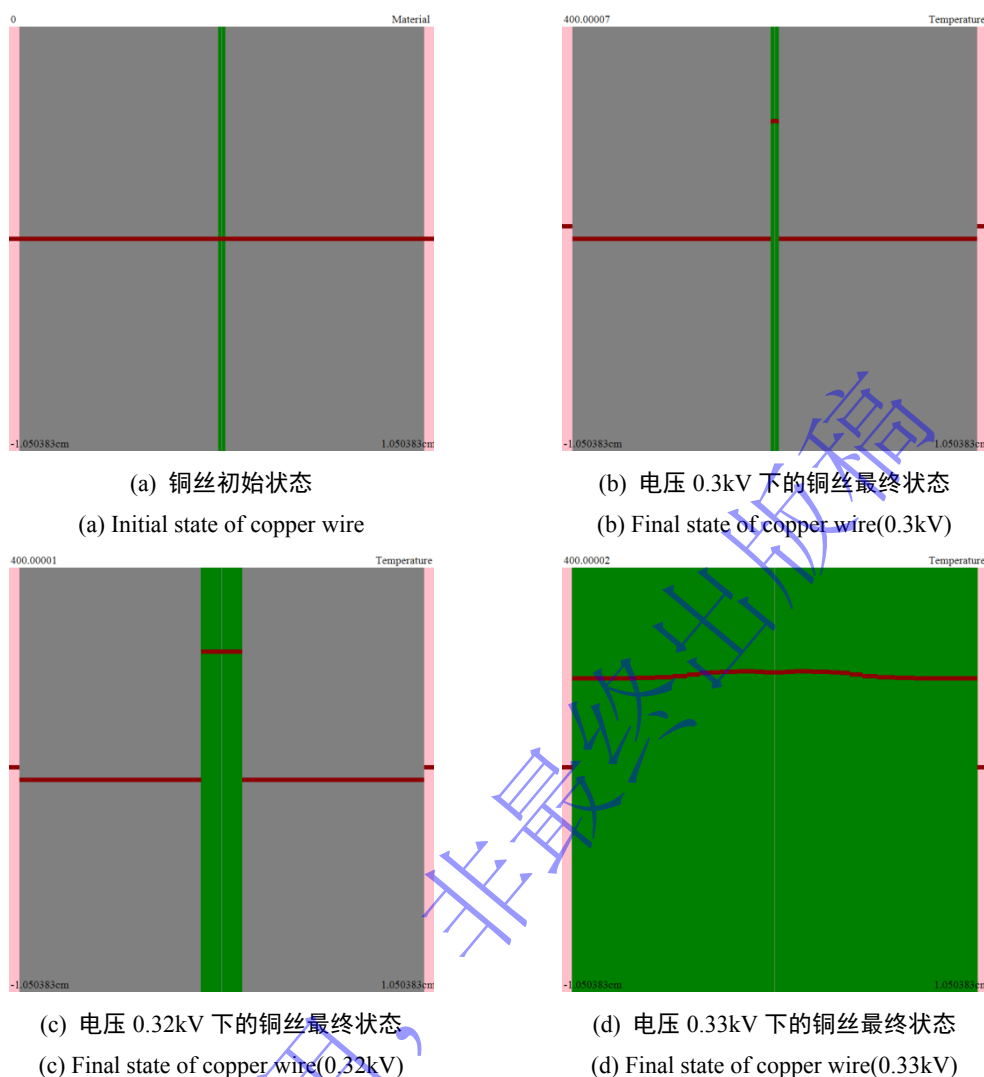


图 3 理想条件下（即回路电阻为零）下的铜丝电爆炸模拟。其中棕色曲线表示温度分布

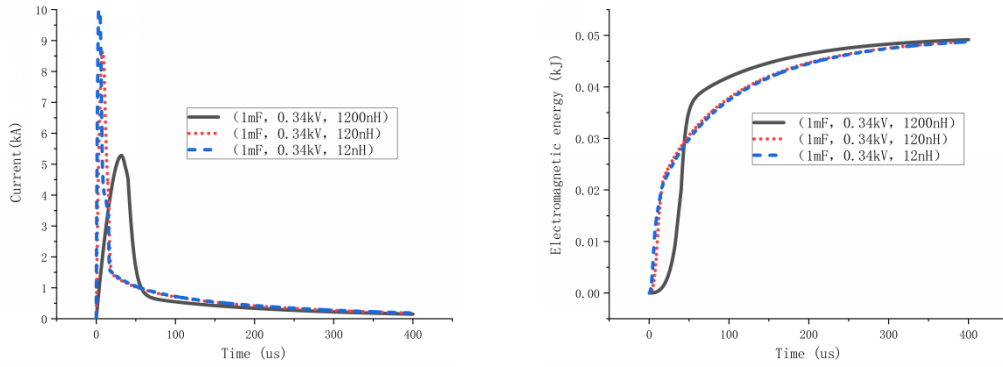
Fig.3 Simulation of copper wire explosion in an idealized circuit ( $R=0$ )

## 2.2 细丝电爆炸的数值模拟结果

在下文的模拟中，根据实验中的常见做法将回路电阻取为  $R=10\text{m}\Omega$ 。针对细丝的模拟，首先将电容和电压设定为  $(1\text{mF}, 0.34\text{kV})$ 、电感  $1200\text{nH}$ ，它对应了金属丝未发生显著爆炸，属于略低于起爆状态的情形。在此基础上，保持电容和电压不变，将电感降至  $120\text{nH}$  和  $12\text{nH}$ ，分别代表了不同的放电周期。三种情形对应的模拟结果如图 3 所示。可以看到，加快放电过程只能加快金属丝早期的能量沉积速率，对金属丝上最终沉积的能量几乎没有影响，金属丝上的最终能量沉积始终停留在  $0.049\text{kJ}$  附近，少于实现电爆炸所需的  $0.051\text{kJ}$ 。

随后，以  $(1\text{mF}, 0.35\text{kV})$  为基准，此时金属丝发生了急速膨胀，属于略高于起爆状态的情形。仍然保持电容和电压不变，将电感降至  $120\text{nH}$  和  $12\text{nH}$ ，三种情形对应的模拟结果如图 4 所示。可以看到，与上文未起爆情形类似，放电快慢对金属丝上最终沉积的能量没有明显影响，都等于  $0.052\text{kJ}$  左右，均略高于发生电爆炸的阈值。

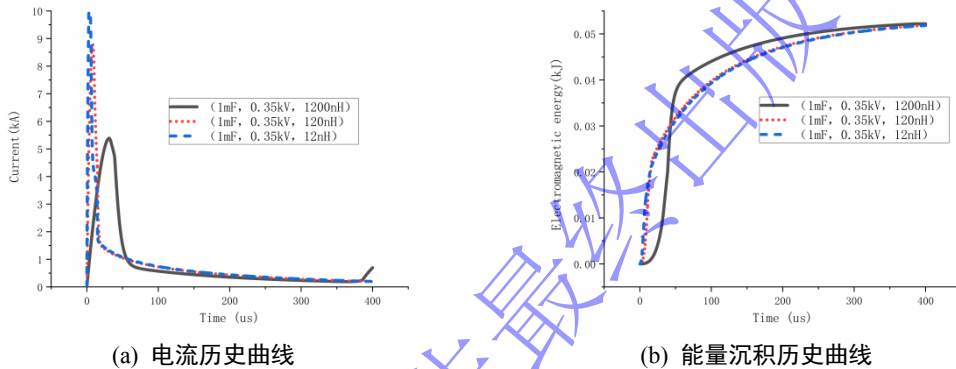
综上，电源的放电周期对细金属丝上的最终能量沉积没有明显影响，对于金属丝是否会发生电爆炸没有太大关系。



(a) 电流历史曲线 (b) 能量沉积历史曲线  
(a) Current history curve (b) Energy deposition history curve

图4 细铜丝在不同放电周期下的电爆炸结果对比 (电压 0.34kV)

Fig.4 Comparison of electrical explosion results of fine copper wire under different discharge cycles(0.34kV)



(a) 电流历史曲线 (b) 能量沉积历史曲线  
(a) Current history curve (b) Energy deposition history curve

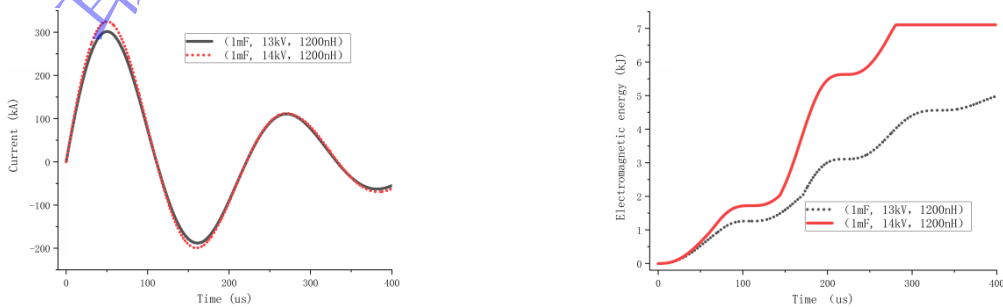
图5 细铜丝在不同放电周期下的电爆炸结果对比 (电压 0.35kV)

Fig.5 Comparison of electrical explosion results of fine copper wire under different discharge cycles(0.35kV)

### 2.3 粗丝电爆炸的数值模拟结果

本节中对粗丝电爆炸过程开展数值模拟。在此之前，让我们先对粗丝发生电爆炸的回路参数条件进行一个简单的预估。参考上文细丝的情形，(1mF, 0.35kV)才能够起爆细丝，那么从储能角度来看，这里的需要将电压至少提高到 3.5kV (即使储能增大 100 倍)才能起爆粗丝。

我们开展了一系列不同电压下的粗丝电爆炸模拟，图 6 中给出的是其中电压取值为 13kV 和 14kV 的代表性结果。这些模拟表明，当电压增大至 13kV (远大于预估的 3.5kV) 时，铜丝中的能量沉积仍未达到发生电爆炸所需的 5.1kJ (如图 6b 黑线)，铜丝只是发生了一定的膨胀 (如图 6c)；当电压提升至 14kV 时，粗丝中的能量沉积相比 13kV 情形有了大幅增加 (如图 6b 红线)，铜丝急剧膨胀 (如图 6d)，发生了充分的电爆炸。



(a) 电流历史曲线 (b) 能量沉积历史曲线  
(a) Current history curve (b) Energy deposition history curve

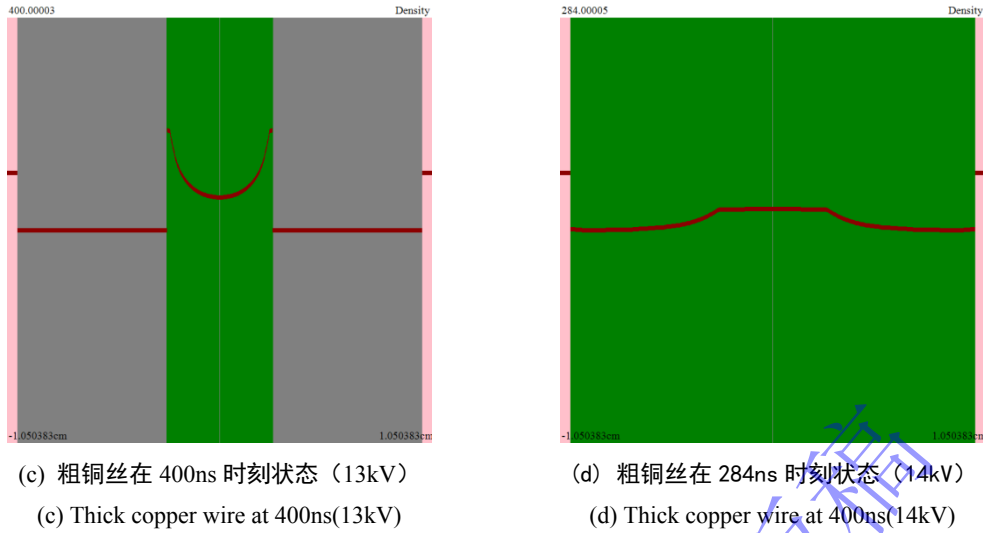


图 6 粗铜丝在不同电压下的电爆炸结果对比

Fig.6 Comparison of electrical explosion results of thick copper wire under different voltages

接下来开展不同放电周期下的粗丝电爆炸模拟。在 (1mF, 14kV) 参数基础上分别选取电感为 1.2nH、12nH、120nH 和 1200nH 四种情况开展模拟。图 7 是不同电感下的放电电流波形和铜丝上沉积的能量历史曲线的对比。该结果表明, 电流周期对粗丝的电爆炸能量沉积具有较大影响, 减小电感加快放电能够使得金属丝上最终沉积的能量更多。图 8 中给出了不同放电快慢下铜丝在爆炸膨胀时期的温度空间分布形态, 结果显示, 放电越慢铜丝中的电爆炸均匀性越好。

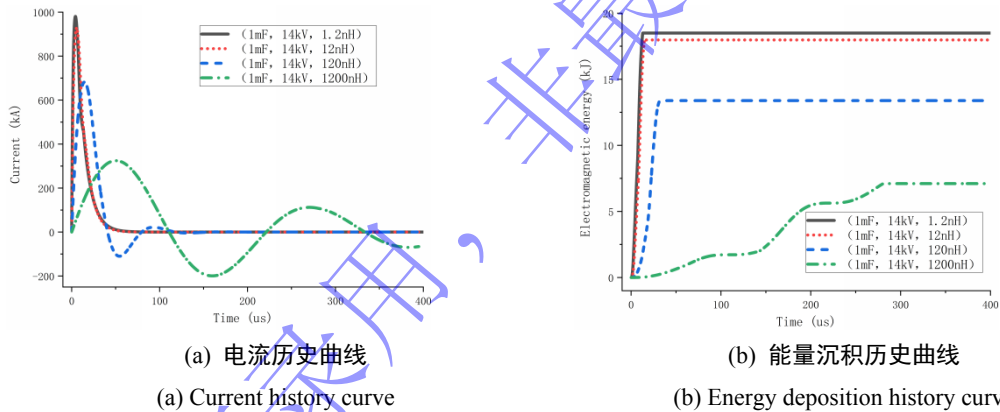
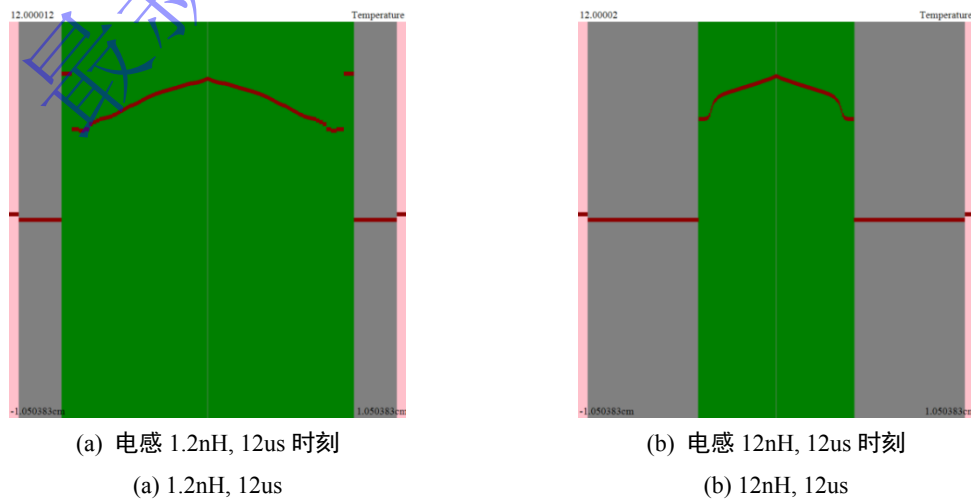
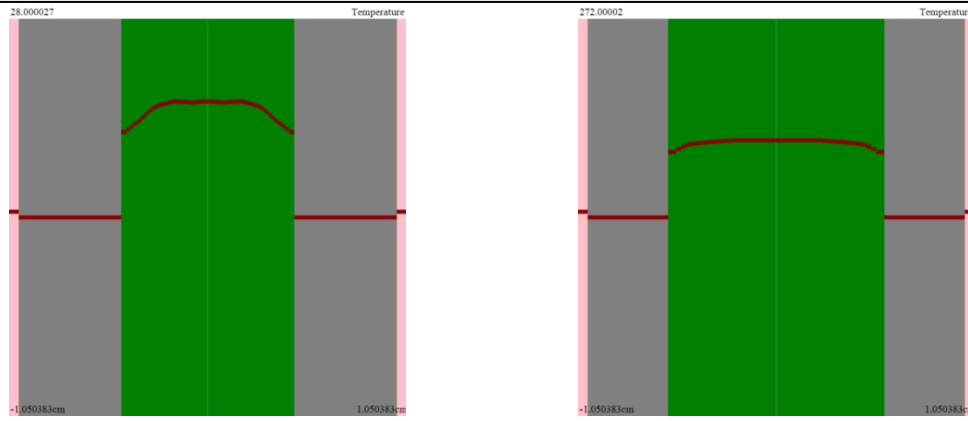


图 7 粗铜丝在不同放电周期下的电爆炸结果 (电流与沉积能量) 对比

Fig.7 Comparison of electrical explosion results of thick copper wire under different discharge cycles





(c) 电感 120nH, 28us 时刻

(d) 电感 1200nH, 272us 时刻

(c) 120nH, 28us

(d) 1200nH, 272us

图 8 粗铜丝在不同放电周期下的电爆炸结果（温度分布）对比

Fig.8 Comparison of electrical explosion results (temperature distribution) of thick copper wire under different discharge cycles

## 2.4 结果分析与讨论

本节中我们来理解上文中不同丝径与放电周期下的铜丝电爆炸模拟结果。首先，为了便于工程分析，引入 3 个定义，如下：

1) 电爆炸的能量利用率

$$R_{LS} = E_L/E_S$$

2) 电爆炸的“电爆炸超能比”

$$R_{LC} = E_L/E_C$$

3) 电爆炸的“起爆储能比”

$$R_{SC} = E_S/E_C$$

其中  $E_C$  表示金属丝的电爆炸阈值能量、 $E_L$  表示金属丝中实际沉积的能量、 $E_S$  表示电源储能，在电爆炸情形下它们满足： $E_C < E_L < E_S$ 。然后，从图 4 中 0.35kV 对应的模拟结果我们可以得到细丝情形下的相关物理量。例如，细丝下的能量利用率为

$$\frac{0.052\text{kJ}}{\frac{1}{2}CU^2} = \frac{0.052\text{kJ}}{0.5 \times 1\text{mF} \times (0.35\text{kV})^2} = 85\%$$

类似地，从图 5 中 14kV 对应的模拟结果，我们可以得到粗丝情形下的电爆炸相关物理量。这些结果整理如表 1 所示。

表 1 细丝与粗丝情形下的电爆炸结果

Table 1 Electrical explosion results for thin and thick wire configurations

	thin wire	thick wire
Energy utilization efficiency	85%	7.2%
Specific energy of electrical explosion	1.02	1.39
Energy storage ratio for initiation	1.2	19.2

第一，为何粗丝电爆炸的能量利用率会显著小于细丝？这是因为粗丝的电阻要小于细丝，对于同样的回路电阻，粗丝在回路中分到的欧姆功率占比降低，从而能量利用率降低（注意：能量利用率的定量结果是与回路电阻的具体值紧密关联的，我们这里选取的回路电阻值  $R=10\text{m}\Omega$  与实验实际值会有差别，所以此处的分析只具有代表性意义）。这也同时解释了粗丝电爆炸的“起爆储能比”为何会远高于细丝。

第二，为何粗丝电爆炸的“电爆炸超能比”要比细丝更大？宏观来看，这由于粗丝情形下电源的储能远高于细丝电爆炸所需的能量，一旦电源的参数足以使粗丝发生电爆炸，电路就很容易沉积

大量的能量在金属丝上，使得粗丝中最终沉积的能量显著高于其电爆炸能量阈值。我们还可以从图 6 的结果以及图 9 给出的负载电阻率演化曲线来更深入地探究其缘由。首先从图 6a 中可以看出，电压 13kV 和 14kV 对应的电流曲线差异很小，这意味着我们可以把电流理解为一个外部“恒流源”，负载的欧姆功率主要由负载的电阻决定。从图 9 中我们看到，13kV 情形下，金属丝的电阻率虽然不断上升，但是没有能够达到跳跃点；而 14kV 情形下，大约在 250us 时刻，电阻率开始进入快速抬升阶段（从图 6b 中可以发现这是因为金属丝中沉积的能量已经迈过了 5.2kJ 的阈值点），而从图 6a 中可以看到此时的电流虽然有所衰减但依然还有可观的幅值。在大电阻率和电流的联合作用下，金属丝中的能量沉积在 250us 之后依然有强劲的增长趋势，这一点也从图 6b 中 250us 之后红色曲线的增长趋势得到印证，这种后续的能量增长势头使爆炸丝中最终沉积的能量大大超过了其电爆炸阈值能量。

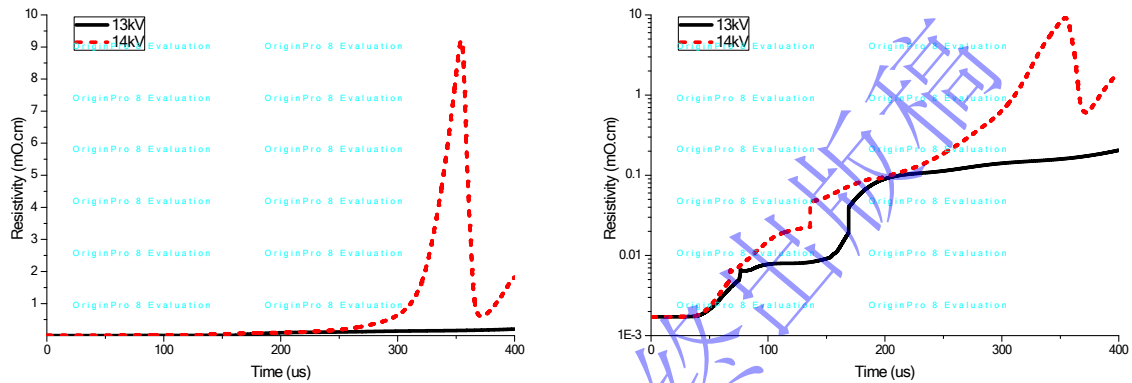
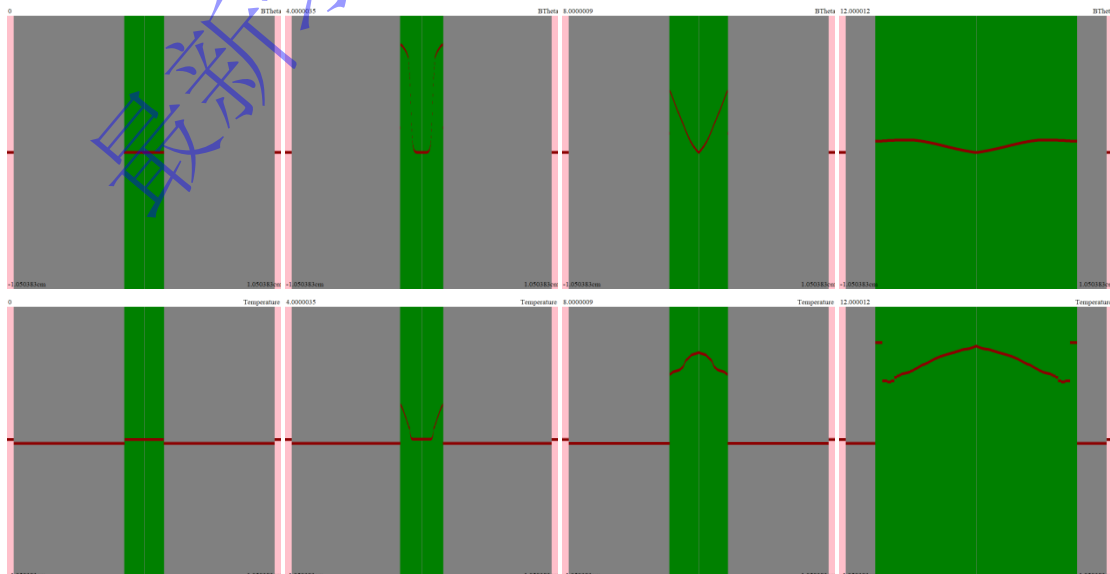


图 9 电压 13kV 和 14kV 下粗丝中心的电阻率演化曲线（左图：线性坐标；右图：对数坐标）

Fig.9 Resistivity evolution curves at the center of thick wires under voltages of 13 kV and 14 kV

第三，为何放电越快粗丝中的电爆炸均匀性越差？本文认为其原因可归结为趋肤效应，即，电流放电越快趋肤效应越显著，使得电爆炸不均匀性越突出。为了验证这种理解，图 10 和图 11 中分别给出了与图 8 算例中 1.2nH 和 1200nH（分别对应快和慢放电）的电爆炸过程中金属丝中的物理场分布的演化过程。对于图 10 中的快放电过程，磁场分布（图 10 第一排）在 4us 时刻出现了明显的趋肤效应：磁场还只扩散到了金属丝的外层，意味着电流和欧姆加热也只存在于外层，这一点从温度分布（图 10 第二排 4us 时刻）中也能得到印证。该趋肤效应使得金属丝外层先膨胀，密度先降低（如图 10 第三排 4us 时刻所示）。而对于图 11 中的慢放电过程，磁场分布始终保持着近似的线性分布（意味着是电流处于近平衡态），从而金属丝各处的欧姆功率基本一致，温度整体均匀上升。总之，这些结果表明，快放电情形下的趋肤效应引起了的电爆炸的不均匀性。



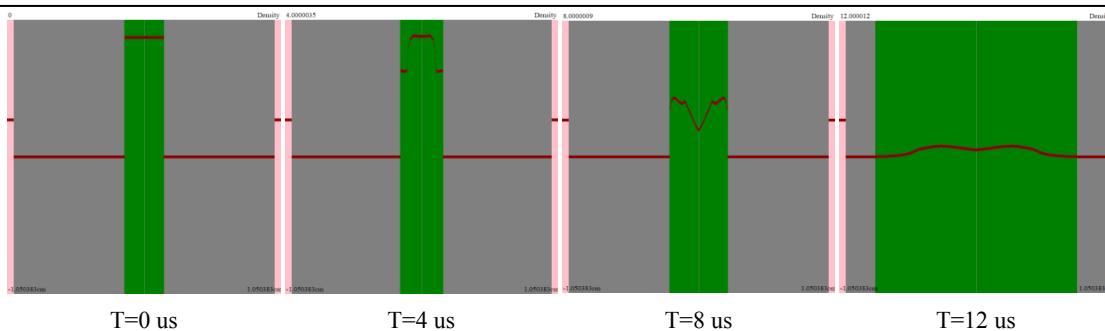


图 10 粗铜丝在 1.2nH 下的电爆炸演化过程（第一行：磁场，按 150T 归一；第二行：温度，按  $10^4\text{K}$  归一；第三行：密度，按  $10\text{g/cm}^3$  归一。下同）

Fig.10 Evolution of electrical explosion of thick copper wires under 1.2nH inductance

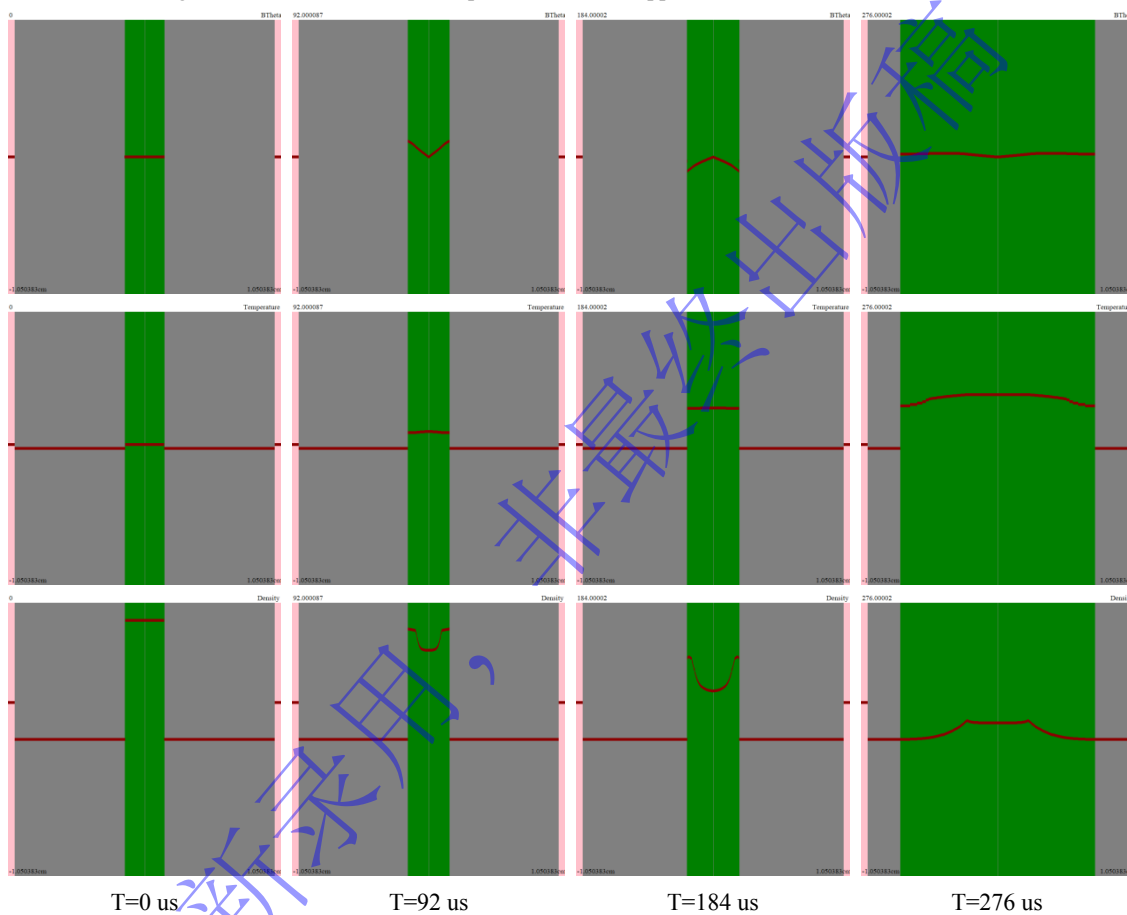


图 11 粗铜丝在 1200nH 下的电爆炸演化过程

Fig.11 Evolution of electrical explosion of thick copper wires under 1200nH inductance

第四，为何减小电感加快放电能够使得粗丝上最终沉积的能量更多？作者认为其中的机理并不显然，因为直观的认识是：加快放电只是加快了能量沉积速率，并且电路中每个电阻元件上的能量沉积速率是同时加快的，所以并不意味着沉积在金属丝负载上能量占总能量的比例一定会增大。本文在这里尝试给出一种解释，但其合理性需要读者斟酌：加快放电加剧了趋肤效应，金属丝中的有效过流面积变小，使得金属丝在回路中的等效电阻增大，从而增大了其在电路中的能量沉积占比。

### 3 结 论

本文基于场路耦合一维磁流体数值模拟对金属丝的电爆炸问题开展了一些研究,重点关注了细丝与粗丝的电爆炸特征的区别,并考察了放电快慢对金属丝电爆炸过程的影响。粗丝与细丝电爆炸的特征差异总结如下:1)细丝的电爆炸相比粗丝具有更高的能量利用效率;2)细丝电爆炸获得的能量能够做到略高于其电爆炸能量密度阈值的状态,而粗丝容易“能量雪崩”,电爆炸后的能量密度很容易大幅超过其电爆炸能量密度阈值;3)放电的快慢与细丝的电爆炸效果没有太大关系;而对于粗丝来说,放电越快“趋肤效应”越明显,电爆炸的均匀性越差,但是放电越快能够提高能量利用效率。(提醒读者注意本文结论的适用范围。一方面所谓的放电快慢是相对的,一般而言丝越细对应的快慢分界点时间越小。另一方面,回路参数以及丝的长度的具体取值也会影响这些结论的适用范围。)

在一些实验中,由于加工的局限,难以获得高品质的细丝,而不得不在实验中采用粗丝。如果这类实验想要电爆炸有较好的空间均匀性,并且希望金属丝中的能量沉积不要大幅超过其电爆炸能量密度阈值。根据上述原理,那就需要从两个方面来进行设计:一是通过增大电感或者电容使放电周期足够长,从而提高电爆炸均匀性;二是,将回路电阻减小到极限以减小回路损耗,从而提高粗丝电爆炸的能量利用率。另外,从“趋肤”效应来看,如果加工允许的话,采用空心粗丝来代替实心粗丝,或许也能够有助于使电爆炸具有更好的空间均匀性。

## 参考文献

- [1] 邱爱慈, 吴坚, 孙凤举, 等. Z 箍缩动力学行为及其直接驱动型脉冲源研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 7007-7023.  
QIU A C, WU J, SUN F J, et al. Research Progress on Z-pinch Dynamics and Its Direct-Driven Pulsed Power Sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 7007-7023.
- [2] 肖德龙, 丁宁, 王冠琼, 等. Z 箍缩巨变及高能量密度应用研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 33(9).  
XIAO D L, DING N, WANG G Q, et al. Research Progress on Z-pinch Stagnation and Its High Energy Density Applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 33(9).
- [3] 吴坚, 石桓通, 蔡金. 气氛中金属丝电爆炸特性及其在纳米粉体制备中的应用进展[J]. 火炸药学报, 2021, 44(6): 735-744.  
WU J, SHI H T, CAI J. Atmospheric Electrical Explosion of Wires: Characteristics and Recent Advances in Applications for Nanopowder Preparation[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2021, 44(6): 735-744.
- [4] 秦军. 丝电爆炸 3D 打印金属粉控制系统与试验研究[D]. 兰州理工大学, 2021.  
QIN J. Control System and Experimental Study of Metal Powder Production via Wire Electrical Explosion for 3D Printing[D]. Lanzhou University of Technology, 2021.
- [5] 韩忠星. 面向井下金属丝电爆炸装置设计的参数匹配及其爆炸冲击研究[D]. 中国石油大学, 2024.  
HAN Z X. Parameter Matching for Downhole Wire Electrical Explosion Device Design and Its Explosion Shock Characteristics[D]. China University of Petroleum, 2024.
- [6] 石桓通. 真空中金属丝电爆炸沿面击穿及其抑制技术研究[M]. 清华大学出版社, 2020.  
SHI H T. Surface Flashover during Vacuum Wire Electrical Explosion and Its Suppression Techniques[M]. Tsinghua University publishing house, 2020.
- [7] 石桓通, 范云飞, 阴国锋. 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 H T, FAN Y F, YIN G F. An Experimental Study of Copper Wire Electrical Explosion in Water: Effects of Varying Load Size[J]. High Voltage Engineering, 2024, 224:112094.

- [8] 孟杨, 申赛康, 王亚楠. 空气中并联金属丝阵列电爆炸等离子体自辐射特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2671-2681.  
MENG Y, SHEN S K, WANG Y N. Optical Emission Characteristics of Plasma Generated by Electrical Explosion of Parallel Wire Arrays in Air[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2671-2681.
- [9] 冯娟, 白洁, 袁伟. 纯水和液氮中金属丝电爆炸与等离子体气泡特性实验研究[J]. 石油学报, 2023, 39(5): 1153-1161.  
FENG J, BAI J, YUAN W. Experimental Investigation on Electrical Explosion of Metal Wires and Resultant Plasma Bubble Characteristics in Deionized Water and Liquid Nitrogen[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 39(5): 1153-1161.
- [10] 姚伟博, 周海滨, 汤俊萍. 空气中  $\mu\text{s}$  级脉冲电流作用下金属丝电爆炸产生脉冲强闪光的光脉冲参数测量[C]// 第四届全国脉冲功率会议, 2015: 518-521.  
YAO W B, ZHOU H B, TANG J P. Measurement of Optical Pulse Parameters from Intense Flash Generated by  $\mu\text{s}$ -timescale Pulsed Current-Driven Wire Explosion in Air[C] // The 4th National Conference on Pulsed Power Technology, 2015: 518-521.
- [11] 白洋伟, 张爱华, 段靖邦. 带载丝电爆炸提高沉积能量的研究[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(6): 065001.  
BAI Y W, ZHANG A H, DUAN J B. Study on Enhancing Deposited Energy via Preloaded Wire Electrical Explosion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(6): 065001.
- [12] 蒋吉昊, 杨宇, 胡熙静, 等. 电爆炸丝 1 维磁流体模型数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3).  
JIANG J H, YANG Y, HU X J, et al. Numerical simulation of electric exploding wires via 1D MHD models[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(3).
- [13] CHUNG K J, LEE K, HWANG Y S, et al. Numerical model for electrical explosion of copper wires in water[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(20): 203301.
- [14] 王坤, 姜林村, 张董, 等. 真空中金属丝电爆炸数值模拟研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2020, 40(4): 6.  
WANG K, JIANG L C, ZHANG D, et al. Numerical Simulation of Electrical Explosion of Metal Wires in Vacuum[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2020, 40(4): 6.
- [15] 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 R Y, LI L X, QIAN D, et al. Exploding Metal Wires in Liquids: Current Situation and Prospects[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 766-777.
- [16] 刘志刚, 邹晓兵, 王新新. 水中金属丝电爆炸拉氏磁流体动力学模拟方法[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(7): 075002.  
LIU Z G, ZOU X B, WANG X X. A Lagrangian Magnetohydrodynamic Simulation Method for Electrical Explosion of Metal Wires in Water[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(7): 075002.
- [17] 薛创, 宁成, 彭先觉. 水中金属丝电爆炸动力学过程的零维模型[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(5): 150-175.  
XUE C, NING C, PENG X J. Zero-dimensional modeling of the underwater electrical explosion of wires[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(5): 150-175.
- [18] 肖波, 王刚华, 阚明先. 强磁场与导电液体相互作用一维磁流体力学模拟程序教学版 V1.0[CP]. 2024, 软件著作权登记号: 2024SR0634091.

- XIAO B, WANG G H, KAN M X. 1D-MHD-EP: A 1D Magnetohydrodynamic Code for Strong Magnetic Field Conductive Fluid Interaction (Educational Version V1.0)[CP]. 2024, Software Copyright Registration Number: 2024SR0634091.
- [19] HAN R Y, LI C, OUYANG J, et al. Electrical explosion across gas-liquid interface: Aerosol breakdown, shock waves, and cavity dynamics[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(7): 077115.
- [20] 罗斌强. 金属箔电爆炸及其在冲击动力学中的应用[D]. 安徽:中国科学技术大学,2012.  
LUO B Q. Electrical Explosion of Metallic Foils and Its Applications in Shock Dynamics[D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2012.
- [21] 阚明先, 王刚华, 赵海龙. 金属电阻率模型[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(3): 282-286.  
KAN M X, WANG G H, ZHAO H L. Metal Electrical Resistivity Model[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(3): 282-286.

## Influence of Different Wire Diameter and Discharge Period on Copper Wire

### Electrical Explosion

ZHOU Changan, LU Yizhan, XIAO Bo

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

**Abstract:** In this paper, the electrical explosion process of copper wires in vacuum through numerical simulation is investigated, with particular focus on the effects of wire diameter and discharge period. The simulation results indicate that thin wires (0.3 mm diameter) exhibit significantly higher energy utilization efficiency compared to thick wires (3 mm diameter). The energy efficiency for thin wires can exceed 80%, whereas for thick wires it is less than 10%. Furthermore, the performance of thin wire electrical explosion is nearly independent of the discharge speed. In contrast, for thick wires, reducing the discharge period can enhance the energy utilization efficiency by approximately a factor of two, albeit at the cost of degraded spatial uniformity of the explosion.

**Keywords:** electric explosion; magnetohydrodynamics; field-circuit coupling; wire; discharge cycle