

# 液体中金属丝电爆炸的研究现状与展望

韩若愚<sup>1,2</sup>, 李柳霞<sup>3</sup>, 钱盾<sup>4</sup>, 刘毅<sup>3</sup>, 周海滨<sup>5</sup>, 姚伟博<sup>6</sup>, 孙滢<sup>7</sup>,  
李元<sup>2</sup>, 黄逸凡<sup>8</sup>

(1. 北京理工大学物理学院静电研究实验室, 北京 100081; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 3. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074; 4. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 5. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094; 6. 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024; 7. 山东大学山东省特高压输电技术与装备重点实验室, 济南 250061; 8. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055)

**摘要:** 液体中金属丝电爆炸(丝爆)不同于介质电击穿过程, 涉及复杂金属相变, 可产生具有更高能量效率的冲击波, 已在化石能源开发等领域取得成功应用, 也凸显出在地质勘探、矿山与安全工程等领域的巨大应用潜力。文中回顾了电爆炸冲击波技术的发展历程, 基础研究方面分别从丝爆物理过程与冲击波产生机理、测量诊断和评估方法、冲击波特性和影响因素进行阐述, 并从理论与实验角度提出了现阶段面临的科学问题与技术难点; 应用研究方面简述了液体中丝爆在石化能源开发、物性研究装置、纳米材料制备等方面的应用与工程实践, 给出了当前电爆炸冲击波技术在应用中亟待解决的瓶颈问题和方向。最后, 归纳提出了该技术的发展趋势和路线图。

**关键词:** 金属丝电爆炸; 脉冲功率应用; 液中放电; 放电等离子体; 冲击波

## Exploding Metal Wires in Liquids: Current Situation and Prospects

HAN Ruoyu<sup>1,2</sup>, LI Liuxia<sup>3</sup>, QIAN Dun<sup>4</sup>, LIU Yi<sup>3</sup>, ZHOU Haibin<sup>5</sup>, YAO Weibo<sup>6</sup>, SUN Ying<sup>7</sup>, LI Yuan<sup>2</sup>,  
HUANG Yifan<sup>8</sup>

(1. Research Center for Electrostatics and Applications, School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 4. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 5. Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China; 6. State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China; 7. Shandong Provincial Key Laboratory of UHV Transmission Technology and Equipment, Shandong University, Jinan 250061, China; 8. Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Different from electric breakdown of liquids, exploding metal wires involves a series of complex phase transition processes, resulting in shock waves with higher energy transfer efficiency. The shock wave source based on wire explosions has been successfully applied in reservoir exploitation, and it also shows emerging prospects in geological exploration, mine and safety engineering, etc. This paper reviews the development and current research situation of wire explosion in liquids. The physics of phase transition, as well as the generation, diagnostics, influencing factors of the shock waves are presented. Meanwhile, the related applications in reservoir stimulation, basic physics, nano-material preparation, etc are introduced in detail. The key points and difficulties in future research are put forward in the aspects of fundamental research and industrial applications. Finally, a roadmap for the technology of exploding metal wires in liquids is summarized and proposed.

**Key words:** electrical wire explosion; pulsed power application; liquid discharge; discharge plasmas; shock waves

基金资助项目: 国家自然科学基金(51907007); 强电磁工程与新技术国家重点实验室开放课题(AEET 2019KF006); 电力设备电气绝缘国家重点实验室开放课题(EIPE 20204); 深圳市科技研发资金(JCYJ20180507182200750)。  
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51907007), State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (AEET 2019KF006), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (EIPE 20204), Shenzhen S&T Innovation Committee (JCYJ20180507182200750).

## 0 引言

金属丝电爆炸(electrical explosion of wires, 简称丝爆)是指将一定参数范围的脉冲电流注入金属丝, 在焦耳加热的作用下, 金属丝急剧相变, 先后经历固态、液态、气态与等离子体态, 最终发展形成等离子体通道, 同时伴随光辐射、冲击波等物理现象, 电爆炸可以在真空、气体与液体中发生, 现象差异明显<sup>[1-2]</sup>。从 20 世纪 70 年代开始, 由于高功率脉冲技术发展的需求, 特别是 90 年代以来快 Z 箍缩技术的牵引<sup>[3]</sup>, 电爆炸理论与技术得到飞速发展, 各类电爆炸在惯性约束聚变、脉冲光源、断路开关、材料制备/处理等领域取得重要应用<sup>[4-5]</sup>。

与真空或气体介质相比, 一方面, 液相介质中金属丝电爆炸更加均匀、沉积能量更高、无冕层形成、极性效应不显著<sup>[6]</sup>, 这对研究金属相变过程与物性带来了方便; 另一方面, 液相介质(例如水)的弱可压缩性与高密度特性, 使得小的体积扰动带来大的压力变化, 因而液体中丝爆冲击波具有峰值压力高、衰减小的特点, 是产生强冲击波的重要技术手段。

在液电冲击波工业应用上, 最初液体中金属丝电爆炸常笼统地归为液电效应的一种, 在解广润先生编译的《电水锤效应》一书中, 将金属丝电爆炸归为“热爆”法, 即冲击电流使金属丝过热而爆炸, 这种方法能够在金属工件附近实施放电<sup>[7]</sup>。其他涉及液体中金属丝爆的报道, 如液电成形、电火花震源等, 液体中金属丝爆常与液电效应一并提及, 或作为液电技术的补充<sup>[8-9]</sup>。但是, 电爆炸后爆炸产物扩散至环境介质, 不能直接实现重频运行, 需要附加换丝机构, 因而在早些年工程应用中未实现广泛使用。

在基础研究方面, 液体中金属丝电爆炸逐步深入, 涉及领域不断拓展。1960 年, Martin E A 报导了利用金属丝诱导水中长间隙击穿产生高温高压力的电弧等离子体<sup>[10]</sup>。1970 年以来, 随着电爆炸物理装置、特别是断路开关的发展, 液体中金属丝电爆炸的开断特性也得到了充分研究<sup>[11]</sup>。1980 年代以来, 对温稠密等离子体(warm dense matter, WDM)的研究掀起热潮, 由于脉冲电流驱动水或毛细管中金属丝电爆炸能够在较宽参数范围内产生温稠密的金属等离子体, 同时能够直接获得等离子体电导率, 推动了液体中金属丝电爆炸技术在获取非理想等离

子体物性参数方面的应用<sup>[12-13]</sup>。2000 年代以来, 利用液体中金属丝电爆炸制备材料的相关研究不断涌现, Cho C 指出该方法制备的纳米颗粒分布要优于气体氛围情况<sup>[14]</sup>, Gao X 等人近期报导了利用水介质中碳纤维的爆炸制备微纳金刚石<sup>[15]</sup>。与此同时, 针对水中金属丝电爆炸冲击波效应的基础物理特性研究迅速开展, 推进了各类数值计算与诊断技术不断进步; 在负载构型上, 经历了从金属单丝到金属丝阵的不断进步与演变<sup>[16]</sup>, 其中, 利用液体中金属丝阵内爆冲击波产生温稠密等离子体或进行冲击载荷加载受到越来越多的关注<sup>[17]</sup>。

随着储能和功率电子技术的不断进步, 特种高功率脉冲电源和送丝机构(重复频率的实现)不再成为制约金属丝电爆炸应用的主要工程难题, 金属丝电爆炸的高冲击波能量转换效率与可控性受到越来越多青睐。近年来, 液体中金属丝电爆炸在化石能源开发领域的应用重新受到关注, 特别是在在煤层气、页岩油等非常规油气的开采中取得成功应用与推广<sup>[18-20]</sup>。同时, 得益于多年的丝爆基础研究, 人们对电爆炸的物理图像有了更为深入的认识, 金属丝电爆炸过程的调控手段发展更加成熟, 使液体中金属丝电爆炸冲击波调控技术展现出巨大的需求适应潜力。在安全工程领域, 火工品的使用愈发受限, 高储能下的金属丝爆能够产生与火炸药相比拟的冲击波强度, 且更为安全可控, 将在越来越多的场合下成为火工品的理想替代。可以预见不久的将来, 液体中金属丝爆将在更多领域有所作为, 取得应用与推广。本文在作者多年的工作基础上, 结合参考文献, 从液体中丝爆的基础研究和水下冲击波源技术研发两个角度介绍该方向的研究现状和发展趋势, 希望能给读者以参考, 吸引更多青年学者投入到电爆炸相关基础与应用研究中来, 促进液相介质中电爆炸在基础、技术和应用研究中的发展与进步, 在能源、国防等领域更好地服务国家战略需求。

## 1 液体中金属丝爆过程及其冲击波效应

### 1.1 液体中金属丝电爆炸的过程

液体中金属丝电爆炸是液相脉冲放电的一种, 因冲击波现象与液电效应类似, 一般与液电效应一同论述, 但两者机理上有所不同。传统意义上液电效应一般指水中电极间隙的电击穿, 与之不同, 液体中金属丝爆在间隙两电极间预置金属丝, 可为放电电流提供初始通道, 消除放电时延与抖动(使得冲

击波时延可控), 有助于降低预击穿能量损耗、提高放电/冲击波的可靠性、稳定性和一致性、提升冲击波能量转换效率, 可达 24%<sup>[21]</sup>。图 1 给出了水间隙击穿(8 mm 间隙)与水中金属丝电爆炸负载(6 cm 金属丝)特点以及典型放电波形的差异<sup>[22]</sup>。两者都是在同一脉冲电源驱动下进行的, 但水间隙经历了数十微秒的放电通道起始-形成-发展过程后主放电才发生, 见图 1(a); 而金属丝负载则无此过程, 放电通道在金属丝及其爆炸产物中形成, 其间金属丝经历了复杂相变过程, 电导率也相应发生急剧变化, 是典型的非线性电阻负载, 表现为图 1(b)中更为复杂的放电波形。可以看出, 击穿水间隙或者说在水介质中形成流注通道并不容易, 这个过程会消耗相当的能量, 且放电通道的发展不可控, 难以形成实现长间隙击穿, 而金属丝可以很容易在较低电压下(数 kV)实现数厘米量级间隙的击穿。

Tucker T J 等人根据丝爆炸电参数变化的特征, 人为地将电爆炸过程分为固态加热、液化、液态加热、气化(含相爆)、击穿、等离子体 6 个阶段<sup>[23]</sup>, 例如气化阶段金属-绝缘转换过程中电阻的骤升, 表现为负载电压的快速上升和回路电流的下降, 而击穿/电离发生后, 电阻下降, 回路电流上升(储能充足时)。水介质中丝爆被认为能够实现较为均匀的相变, 但实际上复杂的气化过程以及不稳定性, 使得金属丝负载从液态加热开始变得并不均匀, 这些阶段之间的界限变得模糊, 甚至等离子体通道形成后气化过程仍在进行, 比如形成等离子体-金属蒸汽混合物<sup>[24]</sup>。图 2 给出了金属丝爆气化过程示意, 以及放电过程中的通道膨胀、冲击波的情况<sup>[25-27]</sup>。可以看出, 金属丝气化阶段体积发生巨大变化, 从数十/百微米量级变为数毫米量级, 产生冲击波, 放电通道本身也会产生光辐射。但是, 相爆、冲击波与光辐射这些物理过程并不能精确地反映在电压、电流波形上, Tucker 模型“唯象”的划分只能作为参考。

以冲击波的产生、传播为关注点切入可以对液体中金属丝电爆炸过程进行更合理的划分, 图 3 给出了水中铜丝电爆炸电压电流与通道膨胀过程示意图<sup>[28]</sup>, 图中  $P_1$  对应上述固态加热阶段, 金属丝直径变化较小, 无冲击波形成;  $P_2$  对应上述液化到气化过程(相爆发生前)之间的阶段, 体积增加, 并产生弱压力波;  $P_3$  对应相爆(快速剧烈气化)阶段, 在此阶段强冲击波开始产生;  $P_4$  表示从电压峰值到冲击波-爆炸产物分离的这段时间,  $P_5$  表示分离后的阶

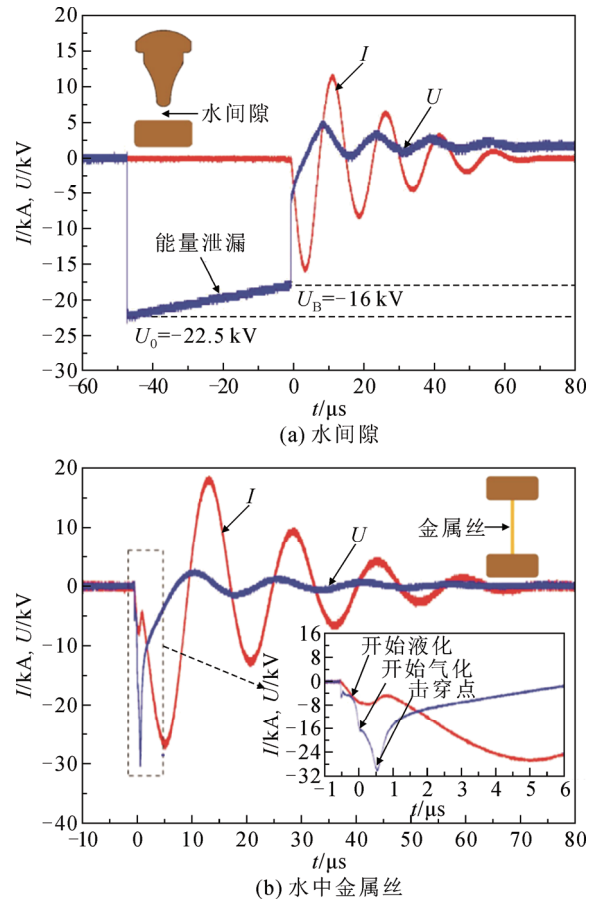


图 1 水间隙和水中金属丝负载结构和典型放电波形比较<sup>[22]</sup>  
Fig. 1 Load structure and discharge waveforms of a water gap and exploding wire<sup>[22]</sup>

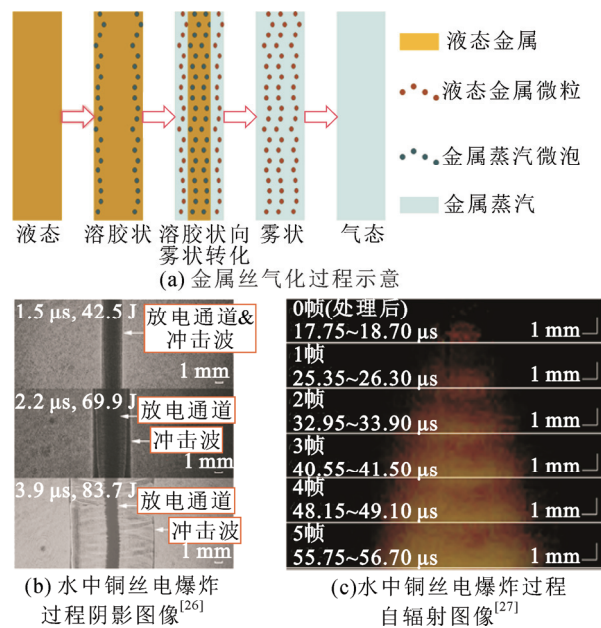


图 2 金属丝爆气化过程示意以及放电过程中的通道膨胀、冲击波情况

Fig.2 Schematic of vaporization in exploding wire, and situation of channel expansion and shock wave during discharge

段。这种分法围绕冲击波形成为核心, 强冲击波开始于相爆, 并追赶合并之前的弱压力波, 在电压下降沿冲击波与爆炸产物分离。

除了冲击波效应, 电爆炸等离子体的光辐射效应也不可忽视, 在一些场合中, 这种脉冲强光可以被用来驱动含能材料起爆<sup>[29]</sup>。但一般地, 在液相介质的包覆与束缚作用下, 电爆炸等离子体的光辐射行为表现出一定“特殊性”, 一是滞后(热惯性/弛豫), 在放电结束后, 仍持续相当长一段时间; 另一是光谱以连续谱为主, 甚至有吸收谱。因此, 几乎无法从光谱诊断上得到有价值的电爆炸等离子体信息, 或者说测得的信息仅反映了爆炸产物-介质界面状态的信息<sup>[30]</sup>。对此不难解释, 以水中电爆炸为例, 由于水介质的束缚, 爆炸产物膨胀速率在 0.1 mm/ $\mu$ s 量级(如图 3)<sup>[28]</sup>, 比空气中情况小一个数量级, 这样缓慢的“膨胀”造成的结果是在放电能量快速沉积的阶段, 放电通道几乎处于较高密度状态(非光学薄), 放电通道内部的光不能有效辐射出来, 而金属等离子体不能有效地与周围介质碰撞冷却, 因而高温的等离子体状态(表现为光辐射)在放电结束后依然能够持续很久<sup>[27]</sup>。

### 1.2 液体中金属丝电爆炸的冲击波效应

#### 1.2.1 冲击波的产生机制与特点

液体中金属丝电爆炸过程中的冲击波产生与能量转换机制十分复杂, 目前尚未有完备的理论进行描述。对于水下爆炸, 其冲击波特征参数可以由峰值压力、比冲量、正压作用时间(衰减时间常数)来表征<sup>[31-32]</sup>。实验发现, 脉冲功率驱动源、介质环境参数、金属丝参数与材质等因素对冲击波参数都有影响, 且不同因素之间可能是耦合的、非线性的。人们一直试图寻找放电参数与冲击波参数之间的关联性, 例如描绘研究沉积能量及其速率、峰值电压、初始储能与冲击波压力、特征时间、能量之间的关系, 但是不同实验之间结果差异很大, 目前只能获得特定条件下的趋势性描述或经验公式, 亟待建立电爆炸冲击波特性的—般性理论。

从物理过程上看, 液体中金属丝电爆炸可以近似看做一个向外膨胀的柱状活塞, 只要有足够快的加速(体积突变)过程, 就会产生冲击波, 体积变化一般对应相变的发生。而金属丝的相变是复杂的, 因而整个电爆炸过程可以产生强弱不同的、时空上有一定次序的多个冲击波。图 4 给出了消声水池(无反射)中定点测得的电爆炸冲击波的压力波形随时

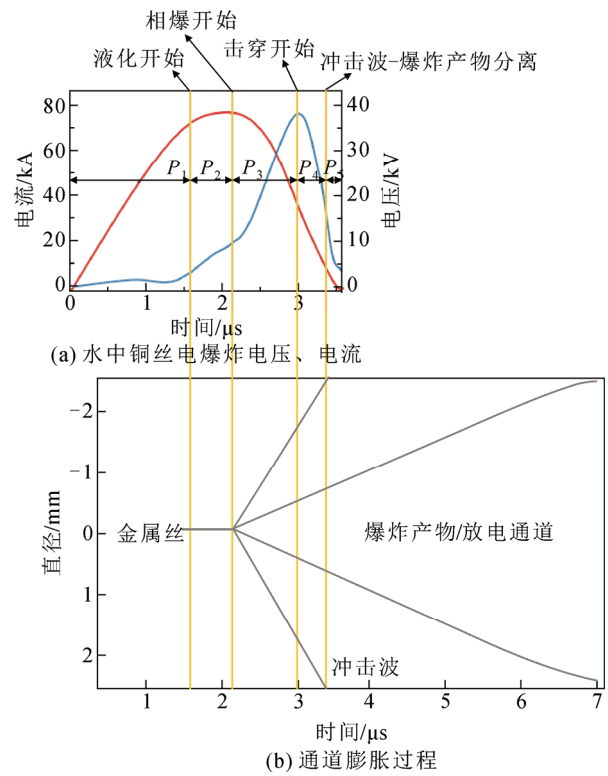


图 3 以冲击波产生为关注点的电爆炸过程阶段划分

Fig.3 Stages of a wire explosion based on shock wave generation

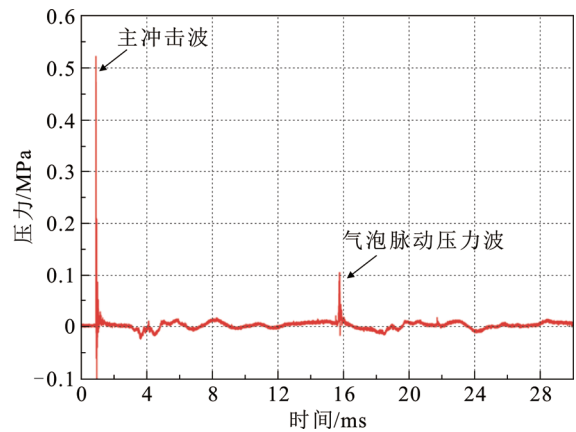


图 4 消声水池中的金属丝电爆炸冲击波压力波形

Fig.4 Pressure waveforms of shock waves generated by wire explosion in an anechoic tank

间变化的曲线<sup>[25]</sup>。除了由于金属丝快速膨胀阶段产生的主冲击波外, 在放电结束后, 金属丝爆炸产物形成的气泡会继续存在一段时间, 气泡脉动也会产生压力波, 但较主冲击波弱很多, 一般关注较少。

通过图像诊断与放电波形联合, 可以判断冲击波波阵面的时空演化。以色列理工学院的 Krasik Y E 课题组关注相变过程的冲击波, 基于条纹图像,



发现相爆炸开始前,金属丝会产生3个弱的冲击波,分别来源于固-液相变、气化早期过程中体积小幅度突增,而相爆发生后,会产生一个强的冲击波,追赶并合并前序弱冲击波<sup>[33]</sup>。清华大学王新新课题组通过改变系统储能的大小,测量了液化过程的弱冲击波,以及增加储能后弱冲击波被相爆强冲击波合并的过程<sup>[34]</sup>。除相变过程外,有电流间歇情况的电爆炸,可以观测/探测到两组冲击波,图5给出了该过程的示意。通过改变电流间歇的长短,可以对这两个冲击波的时序进行调制,当电流间歇较短时,两组冲击波会在源区附近逐渐合并,在远场区将仅能测到一个冲击波。

但是,大部分研究仅关注了电爆炸冲击波波阵面的时空演化情况,即通过图像诊断结果判断哪个阶段产生了冲击波。然而,电爆炸冲击波的形成过程是复杂的,波阵面后的能量/密度分布很难通过光学手段确定。显然,通过冲击波波阵面的时空演化情况仅能获取部分冲击波信息,近期实验表明,不同驱动源与负载条件下,冲击波波形显示出更为复杂的特征,例如冲击波脉宽呈现出与系统储能一定正相关关系。也就是说,液体中电爆炸冲击波的形成,不仅依赖于早期相爆过程,更与放电过程等离子体行为密切相关,在高储能下(百kJ以上),等离子体发展过程对冲击波影响将不可忽略。对于工程应用,不仅需要知道冲击波幅值,更要知道其冲量、能量、频谱等参数,以便针对不同需求,对冲击波进行优化或定标,目前对此研究尚不充分。

### 1.2.2 冲击波的测量与诊断

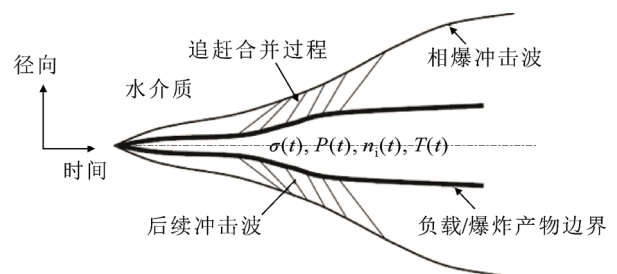
与化学爆炸相比,电爆炸是一种物理爆炸,其特点是爆炸过程短暂(微秒甚至纳秒),爆炸产物膨胀迅速但很快趋于平缓,最终冲击波前沿陡、幅值高,但波阵面之后压力很快下降,因此丝爆冲击波的高频分量丰富,这给信号的准确测量带来困难。一般采用光学方法(间接方法)或压力探头(直接方法)对冲击波进行诊断,两种方法各有优劣。

光学方法一般采用流场诊断的阴影法,用闪光灯或激光作为背光,高速/分幅相机或条纹相机作为记录设备,通过成像系统,将不同时刻冲击波的半径记录下来,得到放电通道与冲击波波阵面的轨迹( $r-t$ 曲线),结合水介质的状态方程,计算冲击波的幅值,这种方法被称为飞行时间法(time of flight, TOF)。飞行时间法的优点在于非接触测量,理论上能够准确地获得冲击波的幅值,但无法获得波阵面

之后的冲击波参数。基于激光探针的纹影法(Schlieren)是在阴影法的基础上在成像系统中加入刀口(光阑),使得成像能够反映出电爆炸放电通道的密度分布信息<sup>[35]</sup>。图6给出了高速相机记录的水中铜丝电爆炸冲击波传播过程的阴影图像,图中标注了距放电起始时刻的时间,通过记录不同时刻的放电通道与冲击波波阵面位置,便可推断其参数。

压力探头方法一般基于压电材料,如压电陶瓷、电气石、聚偏氟乙烯等,但是这些探头具有一定尺寸,机械上很难兼顾高强度和高频率响应,一般高频最高到兆赫兹量级,因此无法准确测量冲击波压强信号中相当一部分的高频分量,将引起较大的测量误差。图7给出了水下爆炸常见的PCB138探头和Müller-plate探头对冲击波压力自由场的测量结果<sup>[25]</sup>。

可以看出,不同压力传感器对同一冲击波的响应并不相同,这是由于探头的频率响应不同导致的。为解决该问题,Krasik Y E课题组提出了冲击波波形重建的方法,旨在对探头采集的冲击波压力波形进行恢复<sup>[36]</sup>。西安交通大学的张永民课题组对该方法进行了完善,可以更为准确地估计冲击波峰值压力与能量,同时尝试了利用压力探头进行TOF方法的可能性<sup>[37]</sup>。



$\sigma(t)$ 、 $p(t)$ 、 $n_i(t)$ 、 $T(t)$ 分别为电导率、压强、数密度、温度

图5 具有放电电流间歇情况的冲击波产生过程示意图

Fig.5 Pressure waveforms of shock waves generated by wire explosion in an anechoic tank

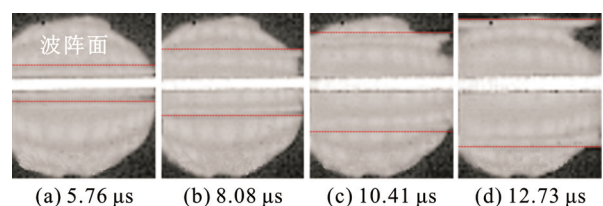


图6 冲击波传播阴影法高速摄影图片

Fig.6 Shadow images captured by high-speed camera for shock wave propagating

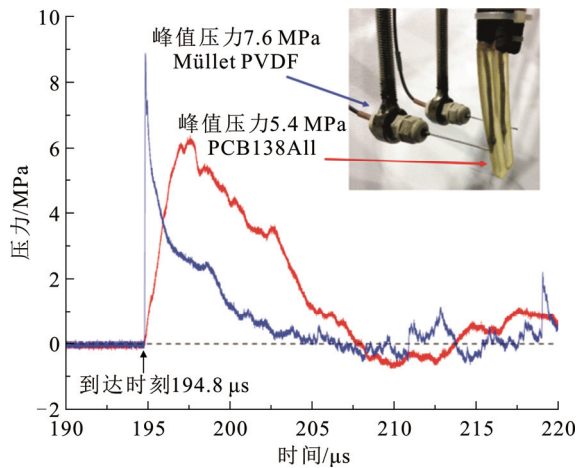


图7 两种水下冲击波探头对同一电爆炸冲击波的测量结果  
Fig.7 Measuring of shock waves with two different probes for underwater pressure sensor

### 1.2.3 冲击波的特性与评估

电爆炸冲击波参数受到多种因素影响, 涉及到复杂的相变与膨胀过程, 人们很早就试图建立金属丝爆特征参数(例如沉积能量)和冲击波效应之间的关联性, 但一直没有定论。一种可行的方法是通过磁流体模型进行计算, 从室温开始计算到等离子体阶段(“冷启动”), 但是计算依赖于物理过程上的合理简化以及准确的物态方程<sup>[38]</sup>, 在冲击波特性的获取上不易实施。

近些年人们从实验角度开展了诸多冲击波特性研究, 给出了特定条件下电源参数、金属丝尺寸、放电参数与冲击波参数之间的部分规律<sup>[39-40]</sup>, 并提供了一些经验公式<sup>[41]</sup>。不难理解, 提高金属丝电爆炸等离子体形成前的能量沉积有助于提高冲击波的强度, 包括使用更快的脉冲电流源提高过热系数<sup>[42]</sup>, 或使用更大质量的金属丝使得大部分系统储能用于金属相变<sup>[43]</sup>, 但只是一个趋势性描述, 更为细致的放电参数与冲击波参数之间的量化描述十分困难, 有待更为深入的研究。

对于水间隙击穿产生的冲击波, 前苏联的德拉卜金娜根据流体动力学的基本方程式对气体中放电产生冲击波的原理进行过计算, 任格尔曼将这些计算应用于液体得到了水中放电产生冲击波初始峰值压力  $p_{\text{peak}}$  的计算式为<sup>[7]</sup>

$$p_{\text{peak}} = \beta \sqrt{\frac{\rho w}{\tau T}} \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为复杂积分, 在水中取值为 0.7;  $\rho$  为水的密度;  $\tau$  为冲击波的前沿;  $T$  为冲击波的底宽;  $w$  为

放电通道单位长度上放电电流的总能量。

然而, 由于金属丝电爆炸过程涉及金属相变与水介质的耦合, 情况更为复杂, 目前仍没有该类经验公式出现。虽然 Zhou H 等人通过对千焦量级储能下大量金属丝电爆炸实验数据的总结, 给出了百微米量级直径、厘米量级长度金属丝电爆炸放电参数与冲击波参数之间的关联性<sup>[41]</sup>。但是, 目前对于更高储能、更大直径的金属丝负载, 相爆后类电弧(arc-like)过程的能量沉积仍很高, 对冲击波的贡献将不能忽略, 不同阶段、不同物理过程中冲击波能量耦合机制仍不明确, 电爆炸与液电效应之间机制的异同也有待更深一步挖掘。

### 1.3 影响液体中金属丝电爆炸冲击波行为的因素

除了脉冲电源和金属丝参数的配合外, 金属丝材质和环境介质也对液体中金属丝爆的冲击波行为存在显著影响, 引起了人们的关注。从目前已有的研究来看, 影响液体中金属丝电爆炸冲击波行为因素主要如下所述。

#### 1.3.1 金属丝尺寸与最佳匹配

经研究发现, 金属丝气化过程对冲击波贡献显著, 为产生特定储能下的最强冲击波, 需要在确保负载完全气化的前提下(大于其原子化焓), 使金属丝的质量(驱动质量)尽可能大, 即存在脉冲功率驱动源和金属丝参数之间的优化与匹配问题。为了尽可能高效地获取更强冲击波, 需要考虑以下两点:

1) 金属丝质量应尽可能大, 即在驱动源允许的范围, 尽可能长或粗; 然而, 长金属丝需要考虑系统是否能够耐受金属丝相变时产生的数倍或数十倍的过电压(相比于充电电压), 同时长金属丝相变很难均匀, 相变及热应力等因素会使得部分区域首先相爆或击穿形成等离子体; 粗金属丝的问题在于可能的集肤效应使得加热不均匀, 而更低的电流密度也使得能量沉积速率更低, 后续的磁流体不稳定性也更严重。因此, 在考虑集肤效应、系统绝缘水平、磁流体不稳定性等因素的前提下, 金属丝尺寸的选取不可能无限制增加。

2) 脉冲电流尽可能快, 即脉冲功率驱动源能快速将能量加载到金属丝上; 众所周知, 快脉冲驱动下金属丝过热系数更高, 爆炸初始冲击波更强, 但是, 同样需要考虑集肤效应、驱动源内阻等问题。以电容储能型脉冲功率源为例, 纳秒或亚微秒脉冲一般是高电压、小电容的放电, 如果要储存数百焦耳的能量, 充电电压可能需要到百千伏量级, 快放

电的过电压更明显,绝缘裕度要足够;从工程实践来看,微秒尺度的脉冲功率电源能够驱动更大质量的金属丝,同时不稳定性的影响不甚明显,系统绝缘要求低,容易紧凑小型化,是未来液体中金属丝电爆炸的发展趋势。

综合考虑上述因素后,自然要考虑金属丝尺寸与系统储能的最佳匹配(optimal mode)与能量转换效率的问题。能量转换效率有两个环节,从储能到金属丝负载的沉积能量 $\eta_1$ ,以及从沉积能量到冲击波能 $\eta_2$ ,沉积能量一般表现为阻性沉积,与液电效应类似<sup>[44]</sup>。一般来说,需要明确储能大于金属丝完全气化所需的能量(储能下限),保证相爆能够正常发生,否则不能产生较强的冲击波。从放电波形来看,在相同储能下,达到最佳匹配的情况时(最高的冲击波产生效率),放电电流波形是非周期形式的,也就是说大部分储能用于金属相变或产生温稠密等离子体,这时往往能够产生最强的冲击波。

### 1.3.2 金属丝材质的影响

液相介质的高密度与介电强度对阻碍金属丝表面过程,即使是钨丝电爆炸也不会形成明显的芯-晕结构,这是由于环境介质抑制了钨丝表面的电子发射过程<sup>[45]</sup>。虽然在形貌演化上,不同材质金属丝的差异并不显著,然而物性参数、特别是热力学参数的差异,仍然使得通道膨胀轨迹不同,冲击波参数也有差异,体现在<sup>[46]</sup>:

1) 低熔点金属(Al, Cu, Ag, Pt 等)制成的金属丝在电压峰值前的沉积能量为其原子化焓的2倍以上,通常能够产生较强的冲击波,其中铜丝、铝丝能够产生的冲击波最强。

2) 高熔点金属(Nb, Mo, Ta, W, Re 等)制成的金属丝大量沉积能量被用于气化,不能产生足够强的冲击波,但能够产生较强的光辐射。

3) 化学性质较为活泼的金属(Al, Fe, Ti 等)在电爆炸过程中与水发生反应,伴随强烈的光辐射,且化学反应释放的热量能够加速金属丝相变过程。

### 1.3.3 环境介质的影响

作为冲击波源,实际工程中金属丝周围的环境可能极为复杂,除了介质种类不同,还有介质状态的巨大差异,例如实际井下或深海可能遇到的高温、高电导率、以及高静压力液体介质的情况,其影响主要体现在<sup>[47-49]</sup>:

1) 金属等离子体与介质的反应(燃烧、爆燃)在某些条件下能够对冲击波起到增强作用,例如铝

丝在甘油介质中的电爆炸。

2) 高密度的液体(如85%钨酸钠溶液,  $3\text{g}/\text{cm}^3$ )能够提高沉积能量,但是对于冲击波的强度没有明显的提升作用。

3) 具有较高电导率的介质(如NaCl溶液)等效于在金属丝旁并联电阻,对金属丝的能量沉积有分流作用,金属丝能够耐受一定程度的分流而继续爆炸,因此能够在较高盐度的环境下工作。

4) 静压力对于相爆过程几乎没有影响,一般条件下,介质环境静压力比放电通道压力小一个数量级以上,但是介质的高压力将对通道后续的膨胀过程产生显著的抑制,因此产生的冲击波参数将有所不同。

总体而言,高压里水环境(注水井和深海)有利于电爆炸过程和冲击波的输出,高静水压有利于绝缘性能的提升,但是污水(深海盐水、油井中含油污水)环境对强冲击波产生有很大的不利影响。对于高静水压,甚至近临界/超临界液体介质中的电爆炸物理现象,迄今鲜有报导。但是可以确定的是,由于金属的临界状态,如临界压力、温度远高于一般液体,因此相变特征可能有差异,但相爆与冲击波仍可以发生。

## 2 液体中金属丝电爆炸的应用和发展趋势

### 2.1 液体中金属丝爆在化石能源开发方面的应用

液体中金属丝电爆炸放电稳定性高,冲击波可再现性好、能量转换效率高,同时由于电压直接施加在低阻抗金属丝上,绝缘结构承受高电压脉冲时间短,可大大减少异常放电等故障的发生;同时污水中电击穿存在击穿延迟、能量泄漏等固有缺陷,使得能量更有效地沉积到金属丝负载上<sup>[19]</sup>。正因为这些优点,该技术从油井解堵,到储层增透,再到非常规油气开发,都有十分广泛的应用。近年来,西安交通大学对该技术开展了系统全面研究,并实施多项工程应用,取得了显著成效,见图8<sup>[50-51]</sup>。

该技术的优势在于放电可靠性高、绝缘要求低和能量转换效率高,设备与材料也是本质安全的,工程难点是在不同应用环境中实现稳定可靠的爆炸丝输送与安装。实验室与工程实践中发现,无论采用水中电击穿还是金属丝电爆炸产生冲击波,所输出冲击波能量都仅依赖于装置的储能,而油气井(孔)中空间有限,装置储能提高受到限制,制约了该技术的进一步发展。为进一步提高冲击波强度,西安



交通大学张永民等人提出将含能材料包裹在金属丝周围, 利用金属丝电爆炸产生的等离子体、冲击波以及强电磁辐射等效应驱动含能材料释能的技术。图 9 给出了 3 种基于脉冲放电负载的致裂效果<sup>[22]</sup>。

总体而言, 在化石能源的开发中, 液体中丝爆冲击波产生技术安全、稳定, 高频分量丰富, 在致裂上有助于产生复杂裂隙, 具有一定特色。在工程应用上, 一方面需要重复频率, 另一方面需要有尽可能宽的冲击波参数调节范围, 以满足不同储层的需求。然而, 金属丝本身依赖相爆过程引导的冲击波, 无论是强度、还是频谱, 可调范围都相对有限。特别地, 金属丝复合含能材料爆炸的方法, 不仅能够实现冲击波的增强, 还可以大幅提高冲击波的可控可调性, 是实现储层增透改造的有效手段, 也是电爆炸技术在化石能源领域应用的发展方向。

## 2.2 液体中金属丝爆在基础物理研究中的应用

### 2.2.1 温稠密等离子体与金属物性参数

液体中金属丝电爆炸可用于以温稠密等离子体为代表的物性参数研究。温稠密等离子体(WDM)是一种介于凝聚态、气体、理想等离子体之间的物质状态, 也被称为非理想等离子体/强耦合等离子体, 在这个区域中, 库伦作用与电子简并都不能忽略, 经典的等离子体与凝聚态理论无法进行描述, 需要对其物态方程、输运参数等进行研究。此外, 该区域中的金属-绝缘(Metal-insulator Transition)转化、等离子体参数、临界点相变等问题也受到了广泛的关注。

温稠密等离子体产生手段有很多, 常见的有飞片碰撞对物质的冲击压缩、炸药内爆、金属丝电爆炸、脉冲激光打靶等。其中金属丝电爆炸容易实现, 既可以直接测量温稠密等离子体的电导率, 又可以获得多种金属的相变、超临界状态, 是温稠密等离子体研究的重要手段。液相介质或毛细管中的电爆炸被认为可以产生较为均匀的圆柱状金属等离子体<sup>[13]</sup>, 在电爆炸产物扩散开之前, 爆炸产物处于温稠密等离子体区域, 可以方便地测量温密金属等离子体的电导率。实际上, 如果金属丝表面过程不显著(如沿面击穿), 金属丝电爆炸过程的电导率变化实质上是金属跨越温密区域转变为金属等离子体的自然结果<sup>[52]</sup>。

近年来, 利用水中金属丝电爆炸研究温稠密金属等离子体的文献不断涌现, 大部分用于对电阻率模型与物态方程(equations of state, EOS)的修正, 这

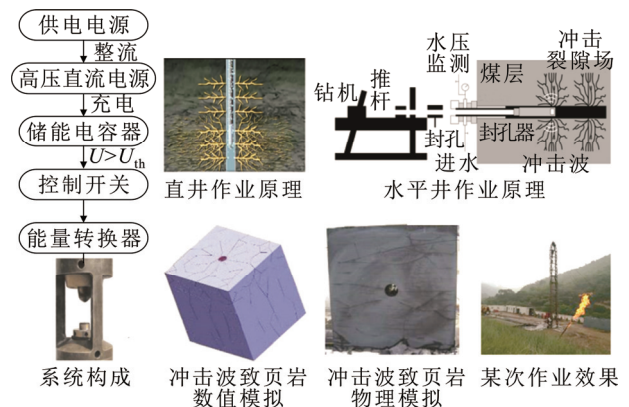


图 8 液体中金属丝电爆炸在化石能源开发方面的应用

Fig.8 Application of wire explosion in liquids to reservoir exploitation

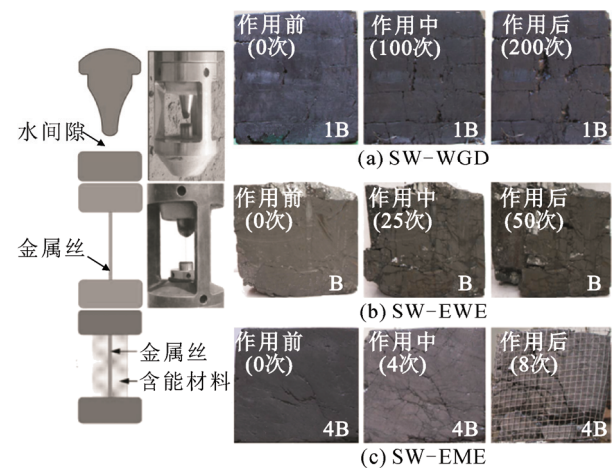


图 9 3 种典型冲击波源作用下煤样的致裂效果比较

Fig.9 Fracturing effect of coal samples under three kinds of shock wave sources

要求在实验上对于金属丝放电参数与动力学过程的精确测量。

### 2.2.2 冲击波物理

如前所述, 与化学爆炸相比, 液体中丝爆产生的冲击波更加安全可控, 同时冲击波源的形状可以自由设定(丝阵), 具有其特色与优势, 在冲击波物理领域受到越来越多的关注。利用金属丝构成不同形式的金属丝阵, 可以产生不同形式的冲击波, 如平面型丝阵产生平面冲击波、圆柱型丝阵产生柱状汇聚冲击波、球型丝阵产生更强的汇聚冲击波<sup>[53]</sup>, 图 10 给出了一种柱型丝阵负载与汇聚冲击波示意。

对于平面型丝阵负载, 一般认为在源区可以得到比较规则的平面冲击波, 可以用于冲击波参数的诊断与估计。对于圆柱或球形丝阵, 冲击波在汇聚



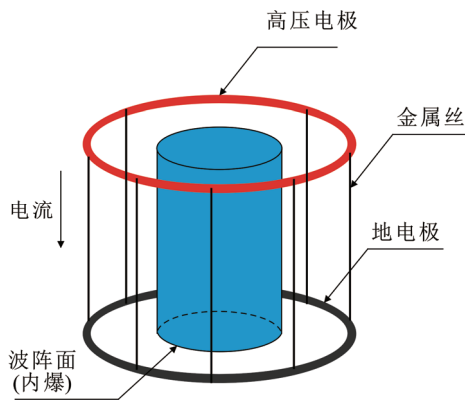


图 10 圆柱型丝阵负载与汇聚冲击波

Fig.10 Cylindrical wire array and converging shock wave

时会越来越强，波阵面速度越来越快，密度越来越高，最终达到百 GPa 或 TPa 量级的极端状态，形成温稠密等离子体。此外，这种强冲击波也可以用于冲击压缩加载<sup>[54]</sup>。近几年，帝国理工学院<sup>[49]</sup>、以色列理工学院<sup>[54]</sup>、清华大学<sup>[55]</sup>、北京理工大学<sup>[56]</sup>等单位在这方面开展了大量研究，许多形式新颖的液体中电爆炸负载与冲击波源被相继报导。

### 2.3 液体中金属丝电爆炸在其他领域的应用

#### 2.3.1 纳米材料制备

金属丝电爆炸产物快速膨胀，与周围低温介质碰撞损失能量，冷凝形成细小颗粒<sup>[57]</sup>。调节电爆炸的放电参数与介质参数，可以获得不同粒度分布纳米粉体，平均粒度最小可以达几十纳米量级<sup>[58]</sup>。近年来有不少关于液体中金属丝爆制备纳米粉末的报道，如水、液氮、乙醇等，由于液体中丝爆沉积能量更大，相较于气体氛围可以得到更细的纳米粉末。

#### 2.3.2 液电成形

液电成形是基于液相介质中间隙击穿或金属丝电爆炸产生的冲击波对零件进行冲击作用，将零件压缩到所需的模具上，使之成为所需的形状。其优点在于成形速度快、质量高，易于实现机械化、自动化等优点，已成为高速成形技术中重要手段之一<sup>[59]</sup>。在更为精细的加工环节中，有望通过冲击波的调控，将成形技术用于尺度更为精细的加工中去。

#### 2.3.3 震源与声源

液体中金属丝电爆炸是电火花震源负载的一种<sup>[60]</sup>，具有能量转换效率高、冲击波频谱宽的特点，也更能够适应高压、高电导率的环境，但是难点在于重复频率的实现和频率的调制。

#### 2.3.4 矿山开采工程

2020年8月，在中国工程科技论坛暨“煤炭安

全智能精准开采协同创新组织”成立三周年学术研讨会上，邱爱慈院士提出了“重复可控冲击波技术用于煤炭开采中的实践与设想”，提出了丝爆冲击波技术在矿山开采上应用这一设想与实践路线。

### 3 液体中金属丝电爆炸发展路线图

在过去几十年间，液体中金属丝电爆炸经历了从早期工程实践，再到基础研究，再到变革性工程技术的历程，液体中金属丝电爆炸的基础研究与工程实践相辅相成。基础研究为工程实践提供理论基础，工程实践引导基础研究不断调整理论突破点。现阶段，金属丝电爆炸的研究，无论是在基础科学还是工程实践都存在相当大的发展空间，是充满活力的理论实用型研究领域。

从基础物理研究来看，液体中金属丝爆仍然是温稠密等离子体研究的重要环节，是探索新材料制备的有效技术手段，也在冲击波物理的研究中扮演越来越重要的角色。在实验(诊断)技术方面，丝爆过程中冲击波和等离子体参数的准确时空测量仍然需要更为精细深入的研究。

结合相关工程实际需要来看，液体中金属丝电爆炸发展重点应该是围绕冲击波可控、重频技术发展，面向石油天然气工程、矿山开采工程、震源、冲击波物理等方面的迫切需求，研究高强度冲击波产生新机理、小型化高功率可重复脉冲源、等离子体驱动综合能量转换系统等研究，研发一系列重复可控冲击波产生装备等。

液体中丝爆发展近中期目标是：(1)探索百 kJ 级储能下电爆炸冲击波特性与能量耦合机制；(2)完善丝阵电爆炸技术；(3)金属丝复合含能材料爆炸技术。中长期目标是：(1)开发用于大型汇聚冲击波的高功率、大容量脉冲功率驱动源与冲击波诊断系统；(2)可用于极端工况下金属丝复合含能材料爆炸的特种脉冲功率电源与冲击波系统源，开拓非常规油气、地质/海洋勘探等利用领域。长远目标则是发展脉冲功率技术在国防、能源环境领域的更多应用。图 11 给出了液体中金属丝电爆炸发展路线图。

### 4 结论和建议

对液体中金属丝电爆炸的关键物理过程进行了介绍，回顾了当前液体中金属丝电爆炸的主要工程应用，主要结论如下：

1) 冲击波是液体中金属丝电爆炸技术的核心，

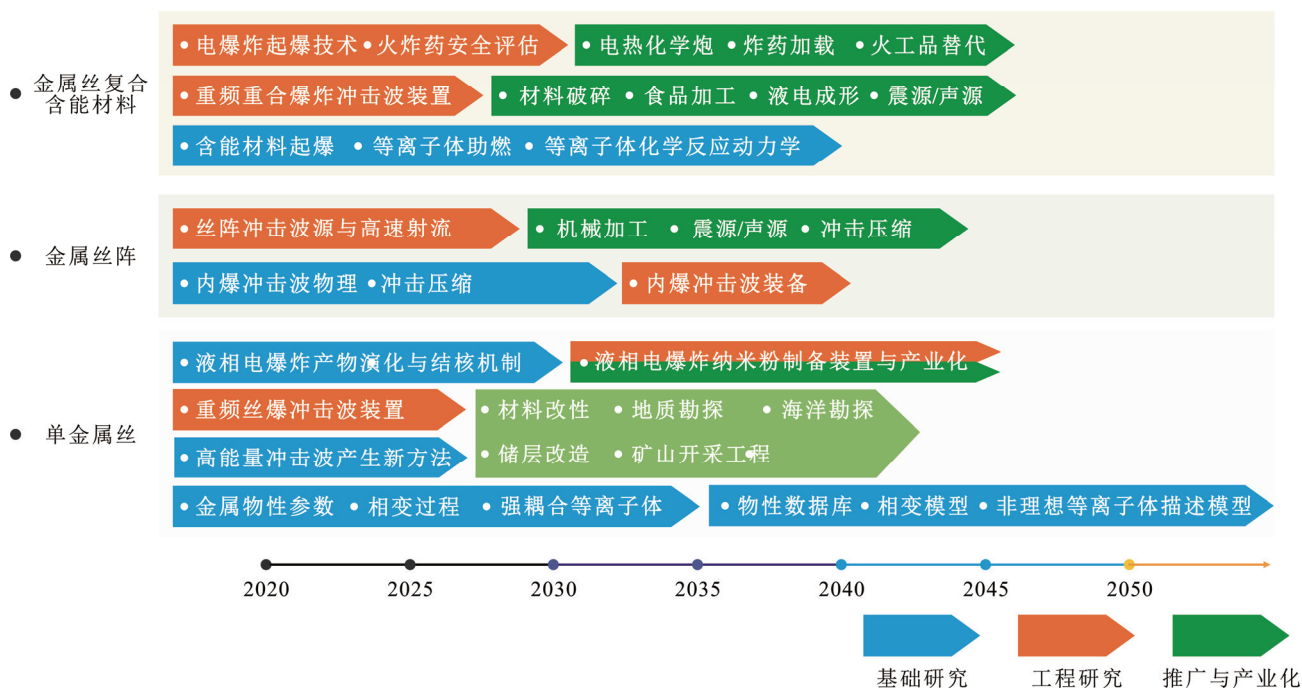


图 11 液体中金属丝电爆炸技术发展路线图

Fig.11 Roadmap of wire explosion in liquid medium

大部分应用都围绕冲击波展开, 实现重复频率、波形可调的冲击波是液体中金属丝电爆炸的工程实践基础。

2) 液体中金属丝电爆炸在等离子体物理、冲击波物理领域的应用十分广泛, 但机理研究不够丰富、细致, 特别是工程应用中的新问题亟待解决。

3) 当前液体中金属丝电爆炸应用研究多集中在化石能源开发领域, 其他领域放电冲击波源多以电火花为主, 液体中金属丝电爆炸应用推广空间大。

但是, 迄今针对液体中金属丝电爆炸的研究与实践中所用脉冲功率源储能基本在 5 kJ 以下, 对于数十甚至百 kJ 级储能下的金属丝电爆炸物理过程与效应的研究报道甚少, 其待研究的内容更加丰富, 应用前景也更为广阔。

重点发展建议如下:

1) 液体中金属丝电爆炸冲击波特性与能量耦合机制, 开展 kJ 至百 kJ 量级储能下、不同参数金属丝负载的冲击波行为研究, 寻找放电参数与冲击波参数的关联性, 探寻不同能量加载过程金属丝负载冲击波能量耦合机制, 给出工程用经验模型。

2) 金属丝复合含能材料爆炸技术, 这项技术是实现冲击波参数在大范围内调节、实现可控的重要途径, 兼具金属丝电爆炸的易控和化学爆炸威力大的优势。这样一来, 有望在非常规油气开发、机

械加工、声纳、冲击压缩方面有更进一步的应用。

3) 金属丝阵电爆炸技术, 这项技术能够通过调节金属丝阵的构型实现不同的冲击波加载形式, 产生更强的内爆冲击波, 有望在国防领域取得更多应用。

4) 金属丝相变模型与物性数据库建设, 水中金属丝电爆炸是研究物性参数有力工具, 但长期以来数据库难以获取, 阻碍了基础研究进一步进行, 通过制定标准化实验条件, 对金属丝电爆炸过程中的物性变化进行测量, 将有效弥补这一短板。

## 参考文献 References

- [1] CHACE W G, MOORE H K. Exploding wires[M]. New York, USA: Plenum Press, 1959.
- [2] 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.
- [3] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016.  
QIU Aici. Pulsed power technology applications[M]. Xi'an, China: Shaanxi Science and Technology Press, 2016.
- [4] 高翔, 万元熙, 丁宁, 等. 可控核聚变科学技术前沿问题和进展[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 25-31.  
GAO Xiang, WAN Yuanxi, DING Ning, et al. Frontier issues and progress of controlled nuclear fusion science and technology[J]. Engineering Sciences, 2018, 20(3): 25-31.
- [5] 王莹, 孙元章, 阮江军, 等. 脉冲功率科学与技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.  
WANG Ying, SUN Yuanzhang, RUAN Jiangjun, et al. Science and

- technology on pulsed power[M]. Beijing, China: Beihang University Press, 2010.
- [6] GRINENKO A, EFIMOV S, FEDOTOV A, et al. Addressing the problem of plasma shell formation around an exploding wire in water[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(5): 052703.
- [7] 解广润. 电水锤效应[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1962.  
XIE Guangrun. Electrohydraulic effect[M]. Shanghai, China: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1962.
- [8] 秦曾衍, 左公宁, 王永荣, 等. 高压强脉冲放电及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2000.  
QIN Zengyan, ZUO Gongning, WANG Yongrong, et al. High voltage strong pulsed discharge and applications[M]. Beijing, China: Beijing University of Technology Press, 2000.
- [9] 李春峰. 高能率成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.  
LI Chunfeng. High energy rate forming[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2001.
- [10] MARTIN E A. Experimental investigation of a high-energy density, high-pressure arc plasma[J]. *Journal of Applied Physics*, 1960, 31(2): 255-267.
- [11] GUENTHER A H, KRISTIANSEN M, MARTIN T. Opening switches[M]. New York, USA: Plenum Press, 1987.
- [12] DESILVA A W, KUNZE H J. Experimental study of the electrical conductivity of strongly coupled copper plasmas[J]. *Physical Review E*, 1994, 49(5): 4448-4454.
- [13] FORTOV V, IAKUBOV I, KHRAPAK A. Physics of strongly coupled plasma[M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 2006.
- [14] CHO C, CHOI YW, KANG C, et al. Effects of the medium on synthesis of nanopowders by wire explosion process[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(14): 141501.
- [15] GAO X, HUANG K, TAN Z, et al. Formation of nanodiamond by pulsed discharge of carbon fiber wires[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(8): 081902.
- [16] 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.
- [17] YANUKA D, THEOCHAROUS S, BLAND S N. Pulsed power driven cylindrical wire array explosions in different media[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(12): 122704.
- [18] 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/OL]. *高电压技术*, 2020: 1-13(2020-06-01). <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200528006>.  
WU Jiawei, DING Weidong, HAN Ruoyu, et al. Review of electrode erosion in a spark gap switch under large pulsed currents[J/OL]. *High Voltage Engineering*, 2020: 1-13(2020-06-01). <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200528006>.
- [19] 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.
- [20] HAN R Y, WU J W, ZHOU H B, et al. Experiments on the characteristics of underwater electrical wire explosions for reservoir stimulation[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 5(4): 047201.
- [21] 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.
- [22] ZHOU H B, ZHANG Y M, LI H L, et al. Generation of electrohydraulic shock waves by Plasma-Ignited energetic materials: III. shock wave characteristics with three discharge loads[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, 43(12): 4017-4023.
- [23] TUCKER T J, TOTH R P. EBW1: a computer code for the prediction of the behavior of electrical circuits containing exploding wire elements[R]. Albuquerque, USA: Sandia Laboratories, 1975.
- [24] SHEFTMAN D, SHAFER D, EFIMOV S, et al. Evaluation of electrical conductivity of Cu and Al through sub microsecond underwater electrical wire explosion[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19(3): 034501.
- [25] 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.  
ZHOU Haibin. Study on shock wave generation mechanism and energy conversion characteristics of underwater cu-wire micro-second explosion[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2017.
- [26] QIAN D, LIU Z G, LI L X, et al. Observation of early stage of underwater electrical wire explosion by shadowgraph[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 85968-85972.
- [27] HAN R Y, ZHU W Y, WU J W, et al. Spatial-temporal evolution of plasma radiation in electrical wire explosion: a morphological observation[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53(34): 345201.
- [28] GRINENKO A, SAYAPIN A, GUROVICH V T, et al. Underwater electrical explosion of a Cu wire[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(2): 023303.
- [29] 周海滨, 张永民, 刘巧珏, 等. 铜丝电爆炸等离子体对含能材料的驱动特性[J]. *高电压技术*, 2017, 43(12): 4026-4031.  
ZHOU Haibin, ZHANG Yongmin, LIU Qiaojue, et al. Ignition performance of Cu-wire electrical explosion plasma on energetic materials[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(12): 4026-4031.
- [30] FEDOTOV A, SHEFTMAN D, GUROVICH V T, et al. Spectroscopic research of underwater electrical wire explosion[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(8): 082704.
- [31] COLE R H. Underwater explosions[M]. New Jersey, USA: Princeton University Press, 1948.
- [32] 高建华, 陆林, 何洋扬. 浅水中爆炸及其破坏效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
GAO Jianhua, LU Lin, HE Yangyang. Explosion in shallow water and its destructive effect[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2010.
- [33] 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.
- [34] LI L X, QIAN D, ZOU X B, et al. Underwater electrical wire explosion: shock wave from melting being overtaken by shock wave from vaporization[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(5): 053502.
- [35] FEDOTOV-GEFEN A V, KRASIK Y E. Polarimetry and Schlieren diagnostics of underwater exploding wires[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(9): 093303.1-093303.8.
- [36] SAYAPIN A, GRINENKO A, EFIMOV S, et al. Comparison of different methods of measurement of pressure of underwater shock waves generated by electrical discharge[J]. *Shock Waves*, 2006, 15(2): 73-80.
- [37] ZHOU H B, ZHANG Y M, HAN R Y, et al. Signal analysis and waveform reconstruction of shock waves generated by underwater electrical wire explosions with piezoelectric pressure probes[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 573.
- [38] DONEY R L, VUNNI G B, NIEDERHAUS J H. Experiments and simulations of exploding aluminum wires: validation of ALEGRA-MHD[R]. Adelphi, Maryland: Army Research Laboratory, 2010.
- [39] 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.
- [40] LI L X, QIAN D, ZOU X B, et al. Effect of deposition energy on underwater electrical wire explosion[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(10): 3444-3449.
- [41] YAO W B, ZHOU H B, HAN R Y, et al. An empirical approach for parameters estimation of underwater electrical wire explosion[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(9): 093502.
- [42] GRINENKO A, KRASIK Y E, EFIMOV S, et al. Nanosecond time scale, high power electrical wire explosion in water[J]. *Physics of*



- Plasmas, 2006, 13(4): 042701.
- [43] VIROZUB A, GUROVICH V T, YANUKA D, et al. Addressing optimal underwater electrical explosion of a wire[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23(9): 092708.
- [44] 刘 毅, 黄仕杰, 赵 勇, 等. 液中大电流脉冲放电电弧阻抗特性分析[J/OL]. 高电压技术, 2020: 1-8(2020-07-31). <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200648>.  
LIU Yi, HUANG Shijie, ZHAO Yong, et al. Analysis of arc impedance characteristics of high current pulsed discharge in liquid[J/OL]. High Voltage Engineering, 2020: 1-8(2020-07-31). <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20200648>.
- [45] YANUKA D, ROSOSHEK A, THEOCHAROUS S, et al. Multi frame synchrotron radiography of pulsed power driven underwater single wire explosions[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(15): 153301.
- [46] HAN R Y, WU J W, QIU A C, 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.
- [47] LIU B, WANG D G, GUO Y B. Influence of water conductivity on shock waves generated by underwater electrical wire explosion[J]. Physics Letters A, 2018, 382(1): 49-54.
- [48] 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(5): 053512.
- [49] YANUKA D, THEOCHAROUS S, BLAND S N. Pulsed power driven cylindrical wire array explosions in different media[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(12): 122704.
- [50] 张永民, 安世岗, 陈殿赋, 等. 可控冲击波增透保德煤矿 8#煤层的先导性试验[J]. 煤矿安全, 2019, 50(10): 14-17.  
ZHANG Yongmin, AN Shigang, CHEN Dianfu, et al. Preliminary tests of coal reservoir permeability enhancement by controllable shock waves in Baode coal mine 8# coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(10): 14-17.
- [51] 张永民, 蒙祖智, 秦 勇, 等. 松软煤层可控冲击波增透瓦斯抽采创新实践——以贵州水城矿区中井煤矿为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2388-2400.  
ZHANG Yongmin, MENG Zuzhi, QIN Yong, et al. Innovative engineering practice of soft coal seam permeability enhancement by controllable shock wave for mine gas extraction: a case of Zhongjing Mine, Shuicheng, Guizhou Province, China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2388-2400.
- [52] LINDEMUTH I R, BROWNELL J H, GREENE A E, et al. A computational model of exploding metallic fuses for multimegajoule switching[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 57(9): 4447-4460.
- [53] 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.
- [54] GUROVICH V, VIROZUB A, ROSOSHEK A, et al. Quasi-isentropic compression using compressed water flow generated by underwater electrical explosion of a wire array[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(18): 185902.
- [55] LIU Z G, QIAN D, ZOU X B, et al. Effect of reflection patterns on converging shock waves generated by underwater electrical wire array explosion[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(10): 103503.
- [56] 李 琛, 韩若愚, 刘 毅, 等. 空气中单丝和丝阵电爆炸特性的比较[J]. 物理学报, 2020, 69(7): 075203.  
LI Chen, HAN Ruoyu, LIU Yi, et al. Comparison of electrical wire explosion characteristics of single wire and wire array in air[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(7): 075203.
- [57] 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.
- [58] 毛志国. 电爆炸金属丝制备纳米粉体的研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.  
MAO Zhiguo. Nano-powder production by electrical explosion of metallic wires[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2009.
- [59] 庞桂兵, 张赟阁, 赵益昕, 等. 高速率成形技术进展[J]. 大连工业大学学报, 2014, 33(5): 381-386.  
PANG Guibing, ZHANG Yunge, ZHAO Yixin, et al. Advance in high speed forming technology[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2014, 33(5): 381-386.
- [60] 左公宁. 海洋电火花震源的电极结构[J]. 石油地球物理勘探, 1981, 16(4): 56-62.  
ZUO Gongning. The electrode structure of marine electric spark[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1981, 16(4): 56-62.



HAN Ruoyu  
Ph.D.

Associate professor



LI Liuxia  
Ph.D.



QIAN Dun  
Ph.D. candidate



HUANG Yifan  
Ph.D., Professor  
Corresponding author

#### 韩若愚

1991—, 男, 博士, 副研究员  
主要从事金属丝电爆炸、放电等离子体源与诊断方面的研究工作  
E-mail: r.han@bit.edu.cn

#### 李柳霞

1987—, 男, 博士, 讲师  
主要从事气体放电与等离子体、脉冲功率技术等方面的研究工作  
E-mail: llx@hust.edu.cn

#### 钱 盾

1994—, 男, 博士生  
主要从事主要脉冲功率、水中金属丝电爆炸方面的研究工作  
E-mail: qian94@gmail.com

#### 黄逸凡(通信作者)

1982—, 男, 博士, 研究员, 博导  
研究方向为高电压与放电等离子体  
E-mail: yf.huang@siat.ac.cn

收稿日期 2021-01-29 修回日期 2021-02-22 编辑 曹昭君