

变压器燃爆故障模拟的金属丝电爆炸引弧实验研究

李元琦¹, 汪黎¹, 葛亦宁¹, 汪可², 李金忠³, 梁帆⁴, 刘轩东¹, 李刚², 李戈琦²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 100192, 北京;

3. 国家电网有限公司, 100031, 北京; 4. 国网河南省电力公司郑州供电公司, 450099, 郑州)

摘要: 针对变压器有载分接开关电弧故障对输电安全和稳定性构成重大威胁的现实,以及校核变压器安全性的燃爆实验所采用的金属丝引弧方式存在金属丝电爆炸产物对变压器电弧故障压力特性影响机制尚不明确的问题,提出了一种基于金属丝爆炸实验与特性分析的对比研究方法。通过搭建油中金属丝电爆炸实验平台,研究了油中金属丝电爆炸的典型发展过程及其放电特性和压力特征,实验结果表明:金属丝电爆炸放电过程可以分为相爆前、相爆至电压峰值、电离以及击穿4个阶段;过程中,系统储能将显著影响金属丝电爆炸的放电模式以及后续压力特性,而金属丝尺寸则与引弧过程的能量损失具有直接联系,二者均会对放电通道的状态以及电弧通道的能量沉积过程产生影响,进而显著影响电弧初期的冲击波压力及其传播规律。该研究结果有助于深入认识油中金属丝电爆炸过程,并为完善变压器燃爆模拟试验方案提供参考。

关键词: 有载分接开关;燃爆实验;电弧故障;金属丝电爆炸;压力特性

中图分类号: TM403.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202508017 **文章编号:** 0253-987X(2025)08-0177-10

Experimental Investigation of Wire-Explosion Triggered Arcing for Transformer Fire-Explosion Failure Simulation

LI Yuanqi¹, WANG Li¹, GE Yining¹, WANG Ke², LI Jinzhong³,

LIANG Fan⁴, LIU Xuandong¹, LI Gang², LI Geqi²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. China Electric Power Research Institute,

Beijing 100192, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 4. Zhengzhou Power Supply Company,

State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450099, China)

Abstract: To address the critical threat posed by arcing faults in transformer on-load tap changers to power transmission safety and stability, and the unclear mechanisms of how wire-explosion byproducts influence pressure characteristics in conventional transformer fire-explosion tests, this study proposes a comparative research methodology combining wire-explosion experiments with characteristic analysis. An oil-immersed wire-explosion experimental platform is established to investigate the typical development process, discharge characteristics, and pressure features. The findings demonstrate that: the wire-explosion discharge process exhibits four distinct phases-pre-explosion, explosion-to-voltage-peak, ionization, and breakdown; system stored energy significantly

收稿日期: 2024-12-12。 作者简介: 李元琦(2001—),男,硕士生;刘轩东(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金

项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2402100)。

网络出版时间: 2025-03-31

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250331.1447.008>

determines discharge modes and subsequent pressure characteristics, while wire dimensions directly correlate with energy loss during arc initiation, both critically affecting discharge channel conditions and energy deposition processes; these factors collectively govern initial shockwave pressure and propagation patterns. This research provides fundamental insights into oil-immersed wire electrical explosion processes and offers valuable references for optimizing transformer fire-explosion simulation test protocols.

Keywords: on-load tap changer; explosion test, arc fault; metal wire electrical explosion; pressure characteristics

近年来,为实现能源战略转移,我国大力发展远距离、大容量高压直流输电。换流变是直流输电工程中最关键、最昂贵的核心设备,其可靠性直接关系到超、特高压输电的稳定性和安全性^[1-3]。有载分接开关是换流变压器的重要组成部分,能实现直流电压较大幅度的分档调节,以满足换流变的工作要求^[4-6]。油浸式有载分接开关主要依靠油的绝缘性实现对主触头电弧的熄弧,在切换过程中可能引起油室内的电弧故障,进而导致绝缘油分解产生高温高压气体,引发燃爆事故^[7-10]。油浸真空式有载分接开关依靠真空管熄弧,可以减少绝缘油的碳化,但仍然存在因真空管漏气引起的级间短路故障^[6],该类故障将产生高能量的电弧,导致设备损坏、区域性停电甚至换流站火灾事故,产生巨大的经济损失和社会影响。

电弧故障伴随着油的裂解和气化,所产生气体吸收能量后温度升高、体积膨胀,而变压器油对这种膨胀有阻碍作用,二者之间的压力差作用产生了冲击波^[11]。目前为了研究油浸式电力设备内电弧故障过程的压力特性,学界常常采用铜丝短接两极的方式开展电弧故障实验。如刘泽洪等^[12]针对变压器升高座区域开展大电流、高爆燃容量模拟短路实验,最大放电能量达到 56 MJ,产生了大约 2.5 MPa 压力的冲击波;李金忠、陈洪波等^[13-14]针对有载分接开关油室开展大容量电弧故障实验,实验能量分别为 6 MJ 和 533 kJ,并检测到最大压力往往出现在油室顶部。

由于接近真实工况的大容量电弧实验放电能量通常在 MJ 级别,实验条件苛刻,实验难度较高。一些学者开展了千焦级别电弧实验,得到了不同外部条件对电弧故障产生压力的影响规律。徐海君、闫晨光等^[15-16]开展了放电能量从 19 kJ 到 400 kJ 不等的电弧放电实验,并采用高速相机记录了电弧放电副产物的膨胀过程,提出电弧诱导气泡动力学模型,为电弧故障的压力仿真研究提供了系统方法。Tadokoro 等^[17]开展了放电电流在 7 kA 左右,放电能

量在 50 kJ 左右的电弧故障实验,研究了气相和液相冲击波的异同,以及爆炸深度对冲击波的影响。

以上开展的电弧实验均是采用铜丝引弧的方式进行,大部分学者默认测量到的冲击波压力由电弧过程产生,忽略了金属丝的引入对实验结果产生的影响。事实上,当金属丝上通过脉冲大电流时,电流的热效应会瞬间沉积大量能量,使金属丝发生相变,体积快速膨胀,并产生着巨大爆炸声和发光现象,这种过程称为金属丝电爆炸^[18]。金属丝电爆炸过程同样会产生明显的冲击波压力,这将导致使用铜丝引弧的实验方法产生的冲击波与真实工况存在一定的差异。

为了探究油中金属丝电爆炸放电的具体过程以及其产生冲击波压力特性的影响因素。本文搭建了油中电弧过程放电特性和压力特性实验平台,探究了油中金属丝电爆炸的发展过程,所产生冲击波随传播距离的衰减特征,以及系统储能、金属丝长度和直径对油中金属丝电爆炸放电和冲击波的影响规律。研究结果为油浸式电力设备电弧故障的实验技术提供参考。

1 实验平台及其可靠性校核

1.1 油中金属丝电爆炸实验平台

本研究针对放电前期过程以及由此产生的冲击波,主要考察金属丝的引入对冲击波压力特性的影响。油中金属丝电爆炸实验平台由高压电源、电容单元、实验腔体、数据采集系统等结构组成,如图 1 所示。高压电源最高输出 20 kV 电压,用于脉冲电容的充电;充电电阻阻值 1 k Ω ;电容单元选用容值为 2、10 μ F 的高压脉冲电容器,可实现 0~100 J 的系统储能变化。

实验腔体内部结构示意图和实物图如图 2 所示,实验腔体材料为不锈钢,其直径为 458 mm 与有载分接开关油室相同,高度为 600 mm。腔体侧边布置有 3 个直径为 150 mm、厚度为 20 mm 的亚克力材料观察窗,腔体内充满绝缘油。

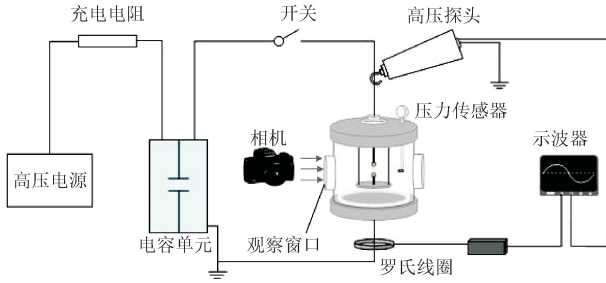


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental platform schematic diagram

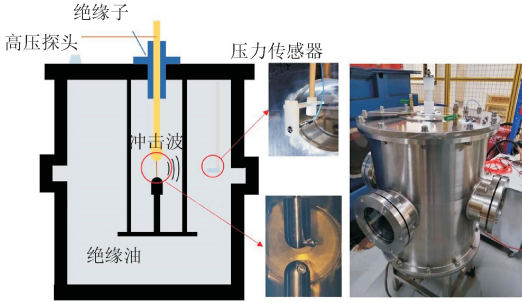


图 2 实验腔体示意图

Fig. 2 Experimental chamber schematic diagram

罗氏线圈和高压探头分别用于测量电容放电过程中的电流和电压。选择 PCB Piezotronics 公司的 PCB113B24 压电式压力传感器测量压力信号,压力传感器固定于腔体侧面,位置可调。

1.2 实验腔体强度校核

液体中金属丝电爆炸会产生巨大的冲击波,为了保证实验过程中的安全,防止腔体发生爆炸,需要对其进行强度校核。实验中设计的腔体为圆筒形,不同壁厚的圆筒可根据特征参数径比(外径与内径之比) k 分为薄壁圆筒和厚壁圆筒; $k > 1.2$ 的圆筒称为厚壁圆筒; $k \leq 1.2$ 的圆筒称为薄壁圆筒。 k 的计算公式^[19]如下

$$k = \frac{D_o}{D_i} \quad (1)$$

式中: D_o 为圆筒外径; D_i 为圆筒内径。

本实验腔体内径为 458 mm,厚度为 15 mm,所以 $k = 1.07 \leq 1.2$,属于薄壁圆筒,而对于薄壁圆筒,一般使用中径公式进行强度校核^[20],其中中径为平均直径。按中径公式,周向薄膜应力为第 1 主应力,则等效应力 σ_1 的计算公式如下

$$\sigma_1 = \frac{p_c D}{2\delta} = \frac{p_c (D_i + \delta)}{2\delta} \quad (2)$$

式中: σ_1 为等效应力,MPa; p_c 为计算压力,MPa; D 为圆筒中径,mm; δ 为圆筒厚度,mm。

令

$$\sigma_1 = \frac{p_c}{2} \left(\frac{2}{k-1} + 1 \right) = [\sigma]^t \varphi \quad (3)$$

式中: $[\sigma]^t$ 表示设计温度 t 下圆筒材料的许用应力,MPa; φ 表示焊接接头系数。

由式(3)可以得到圆筒能承受的压力为

$$p_s = 2[\sigma]^t \varphi \frac{k+1}{k-1} \quad (4)$$

式中: p_s 表示圆筒能承受的压力,MPa。

不锈钢材料在室温下的许用应力 $[\sigma]^t$ 为 137 MPa,焊接接头系数 φ 取 1,圆筒 k 为 1.07,由式(4)可以得到实验所用腔体能够承受的最大压强为 9.27 MPa。在水中金属丝电爆炸的相关实验中,系统储能 500 J 时,微秒级脉冲电流驱动所产生的金属丝电爆炸冲击波压力不超过 8 MPa^[21]。

2 油中金属丝电爆炸放电过程分析

2.1 油中金属丝电爆炸放电过程

为了厘清变压器发生电弧故障时内部电弧通道的放电过程,需要首先对变压器燃爆实验中所采用的金属丝电爆炸放电过程展开研究。将 $2 \mu\text{F}$ 的脉冲电容器充电至 5 kV,此时的电容储能是 20 J,选取直径为 $80 \mu\text{m}$,长度为 5 mm 的铜丝,控制电容对铜丝放电后得到如图 3 所示的典型波形。采用高速摄像机对金属丝电爆炸过程进行拍摄,得到了图 4 所示的金属丝电爆炸发展过程。

图 3(a)为放电前期过程的电压电流波形,基于铜丝在被加热的过程中自身电阻会发生变化,对于其前期过程可以基于 $t_1 \sim t_5$ 5 个关键时刻进行阶段分析。具体如下:从 t_1 时刻起,铜丝上的电流开始不断增加,铜丝进入固态加热状态;随着铜丝的加热,电压随之增长,并在 t_2 时刻出现第 1 个拐点,从 t_2 时刻起,铜丝开始液化;随后在 t_3 时刻电压出现第 2 个拐点,自 t_3 时刻起,铜丝开始气化,电阻迅速增大; t_4 时刻对应着铜丝蒸汽的突然膨胀时刻,即相爆时刻; t_5 时刻起两电极之间被击穿,但是热以及磁流体的不稳定性发展使得铜丝相变不均匀^[22], t_5 时刻起,电流经短暂回升后逐步下降。以上过程各阶段的界限较为模糊,总体对应图 4(a)所示的成像结果。由于液化、气化过程都伴随着体积的膨胀(特别是气化过程体积的突然膨胀),该过程将产生很强的冲击波^[23]。

图 3(b)所示为放电中期的电压、电流以及冲击波压力波形,可见两电极之间发生击穿后产生了电流振荡,相爆在图 3(a)中的 t_4 时刻发生之后,其冲击

波经过 $108.11\ \mu\text{s}$ 传播到达距离铜丝 $151\ \text{mm}$ 处的压力传感器。对应图 4(b), 可以看到此时两电极之间已经形成了柱形的放电通道, 冲击波已经传播到了球形电极的外围, 并以接近球面的形状向外传播。

如图 3(c) 所示, 大约在 $400\ \mu\text{s}$ 处出现了第 2 个冲击波。这是由于放电过程中绝缘油被加热并发生了气化和分解, 在内外压力的作用下, 油气化和分解的产物将发生膨胀和收缩过程。产物的膨胀最终导致了第 2 冲击波的形成, 如图 4(c)~4(f) 所示。

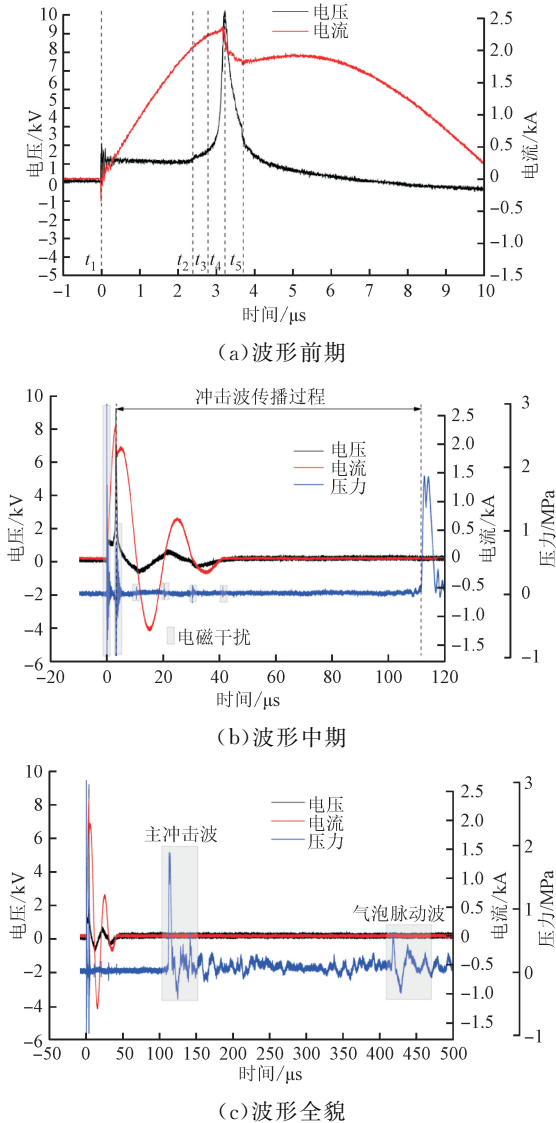


图 3 油中金属丝电爆炸典型波形

Fig. 3 Typical arc discharge waveforms of copper wire explosion in oil

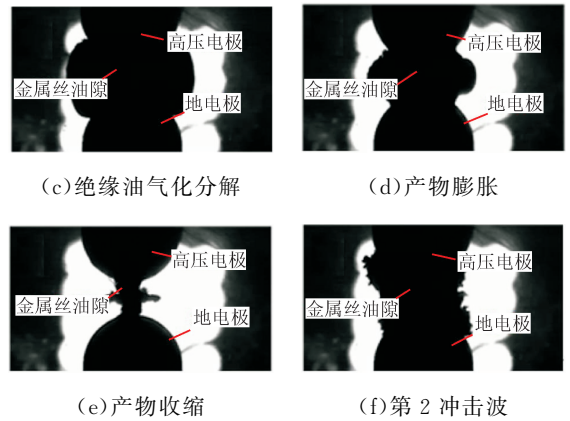
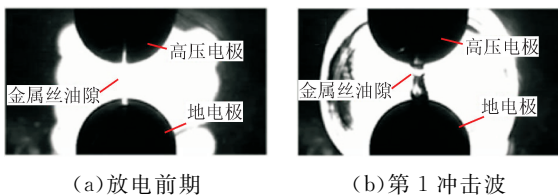


图 4 油中金属丝电爆炸过程高速影像

Fig. 4 Arc discharge process of copper wire explosion in oil

由上述对于油中金属丝电爆炸过程的分析可知, 采用铜丝进行引弧的实验方式本质上是利用铜丝吸能后的相变和相爆为电极之间电弧的形成创造条件, 有助于降低电力设备电弧故障实验的设备要求和实验难度。但是, 铜丝引弧的实验方式也可能对电弧故障实验结果的准确性造成不利影响, 具体有以下几个方面:

(1) 在实验能量方面, 在金属丝电爆炸过程中, 铜丝的相变需要消耗一部分的系统储能, 使得参与电弧击穿过程的真实能量略小于标称能量, 这一差异在大能量实验中可忽略不计, 但在较小能量的实验中将造成显著影响;

(2) 铜丝的相变所导致的体积膨胀将作为额外的压力源作用于冲击波的早期过程, 这可能导致其产生的冲击波压力峰值高于真实电弧故障所产生的压力峰值;

(3) 在冲击波持续时间方面, 铜丝引弧方式虽然有助于在绝缘油中引发电弧过程, 但铜丝相爆后电弧过程将难以在实验的能量水平下长久维持, 可能导致金属丝电爆炸所产生的冲击波持续时间短于真实电弧故障过程的冲击波持续时间。

2.2 油中金属丝电爆炸冲击波传播规律

明确冲击波在油中随传播距离的衰减规律, 对掌握冲击波在油中的动态传播过程和正确认识电弧故障实验结果具有重要意义。

若将多个压力传感器同时布置在冲击波传播路径的不同位置, 传感器本身会阻挡冲击波的传播, 进而影响相互之间的压力测量。为了获得冲击波随距离的衰减规律, 开展了多次油中金属丝电爆炸实验, 在保持其他参数一致的情况下, 每次实验只布置一个传感器对冲击波压力进行测量。传感器距离压力

源的距离为 106~249 mm。不同传播距离下冲击波压力曲线如图 5 所示。

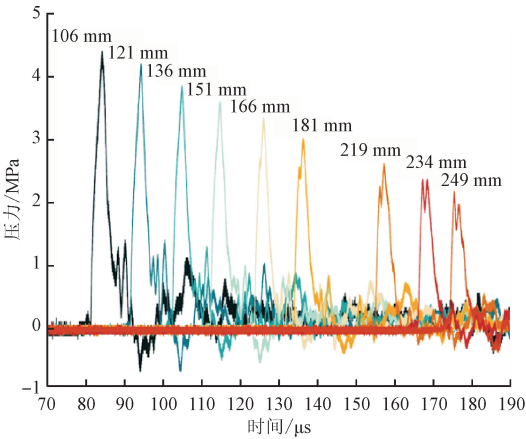


图 5 油中金属丝电爆炸压力随传播距离衰减波形
Fig. 5 Attenuation waveform of pressure with propagation distance in oil for electric explosion of copper wire

从图 5 可以看到,随着传播距离增加,冲击波压力峰值明显衰减,当传播距离由 106 mm 增加至 249 mm 时,冲击波压力峰值由 4.49 MPa 衰减至 2.17 MPa。除此之外,随着传播距离增加,在冲击波的峰值附近,冲击波曲线逐渐由单峰变为双峰;在 106~151 mm 距离范围内,冲击波表现为单峰,而在较远距离下冲击波表现为双峰。这主要是由于冲击波波阵面并非理想平面。当波阵面前沿接触到传感器时,传感器测得压力信号值增加,波阵面后沿离开传感器时,传感器压力信号值衰减。根据活塞理论^[24],随着传播距离的增加,波阵面长度增加,压力峰值持续时间将变长,而波阵面内部的压力是不一致的,由此导致随着传播距离的增加,冲击波压力峰值出现波动,并表现为多峰。

通常来说,冲击波压力峰值和传播距离有以下幂函数关系^[25-26]

$$p_{\text{peak}} = p_0 r^{-\alpha} \tag{5}$$

式中: p_{peak} 表示不同传播距离下的冲击波压力峰值,Pa; p_0 表示参考点的初始压力,Pa; r 表示传播距离,m; α 为压力波在介质中传播的衰减系数。对于不同的爆炸源和传播介质, p_0 和 α 往往不同, α 在一定程度上能够反应冲击波随距离衰减的快慢。

对不同距离下的冲击波压力峰值用式(5)进行拟合,得到结果如图 6 所示。冲击波压力峰值随传播距离的拟合曲线的确定系数为 0.97,拟合可信度较高。同时,可以发现冲击波压力峰值随距离增大呈现出幂指数形式的衰减规律。

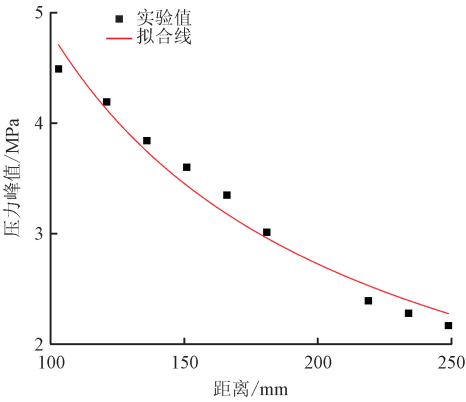


图 6 不同传播距离下冲击波压力峰值拟合结果
Fig. 6 Fitting results of shock wave pressure peaks at different propagation distances

3 油中金属丝电爆炸影响因素研究

3.1 系统储能对油中金属丝电爆炸的影响

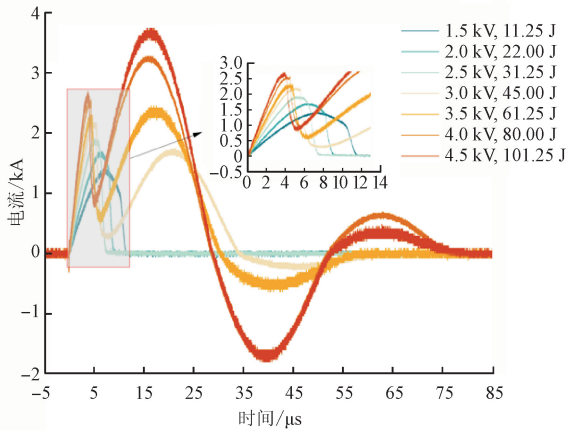
系统储能会影响注入金属丝中的能量以及后续电弧过程的能量大小,影响油中金属丝爆炸的放电过程以及冲击波的产生和发展过程,从而影响电弧故障实验结果,进而对燃爆实验模拟变压器真实电弧故障的准确性产生影响。因此,有必要明确系统储能对油中金属丝电爆炸的影响。

选取直径为 0.1 mm、长度为 15 mm 的金属丝进行实验,将 10 μF 的脉冲电容器充电至 1.5~4.5 kV,对应储能 11.25~101.25 J。不同系统能量下油中金属丝电爆炸的电压电流波形如图 7 所示。

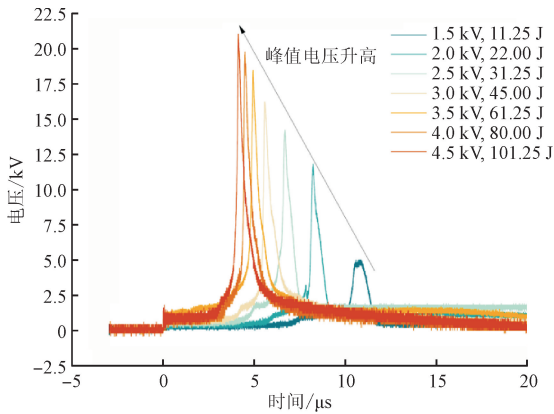
由图 7(a)所示,电流波形可以分为前期的金属丝相变过程以及后期电极间的击穿过程。总的来说,随着系统储能的增加,金属丝相变过程的电流幅值增加,同时击穿过程的电流也逐渐增大。不同系统能量下,金属丝电爆炸的电流波形存在差异:在电容充电至 1.5~2.5 kV,储能为 11.25~31.25 J 时,电容的能量全部用于金属丝的相变,没有形成电弧通道,电流表现为单峰;当充电电压大于 2.5 kV,即系统储能大于 31.25 J 时,放电模式发生了变化,出现两电极的击穿,电流信号变为多峰形式。可以推知,实验所选用的直径 0.1 mm、长度 15 mm 的铜丝相变需要的能量大致在 30~45 J 之间。

由图 7(b)可以看到,随着系统储能的增大,电压峰值升高,且电压峰值的出现时间提前,对应金属丝相变所需时间的缩短。同时可以看到,当充电电压为 1.5 kV 时,电压峰值过渡比较平缓,说明此时金属丝气化不完全,金属丝的电阻变化较为平缓;而

在更高充电电压下,金属丝完全气化,电阻变化速度较快导致了电压波形变陡。



(a) 电流波形



(b) 电压波形

图7 不同系统储能下金属丝电爆炸电压电流波形

Fig. 7 Voltage and current waveforms of copper wire explosion under different energy storage systems

对于本文所研究的冲击波,冲击波总能量 E 可由下式计算

$$E(r, t) = \int_0^t W(r, t) dt = \int_0^t \int_S \frac{p^2(t)}{\rho_0 c_0} dS dt \approx \int_0^t 4\pi r^2 \frac{p^2(t)}{\rho_0 c_0} dt \quad (6)$$

式中: $p(t)$ 为冲击波压力; ρ_0 为冲未扰动液体密度; c_0 为静压下液体中的声速; W 为当冲击波为球面波时,冲击波在距离波源距离为 r 的球面 S 上的总辐射功率,可由下式计算

$$W(r, t) = \iint_S w(r, t) dS \approx \iint_S \frac{p^2(t)}{\rho_0 c_0} dS \quad (7)$$

其中, w 为能流密度,计算式^[27]如下

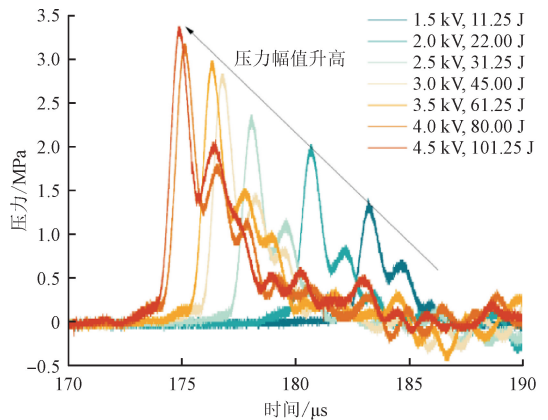
$$w = \frac{p^2}{\rho c} \approx \frac{p^2}{\rho_0 c_0} \quad (8)$$

其中, ρ 为冲击波阵面通过后的液体密度, c 为液体

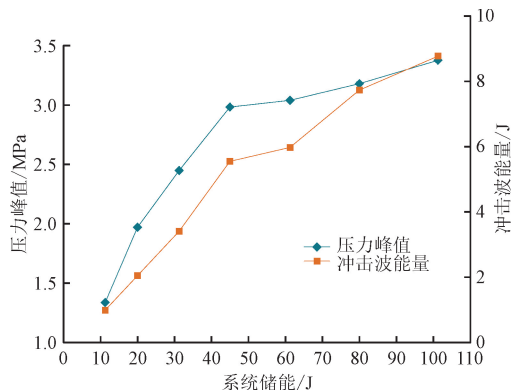
的声速。

图8为不同系统储能下冲击波压力波形和特征的变化规律。由图8(a)可以看到,随着系统储能增加,压力峰值升高,压力波的起始点提前,但不同系统储能之间的压力波波形没有出现明显变化。由图8(b)可见,随着系统储能增加,冲击波峰值和能量在放电模式转变之前增长较快,而在放电模式转变之后增幅明显变小,呈现饱和趋势,在系统能量为11.25~15.00 J范围内,每一阶段冲击波压力峰值的增长为47.38%、24.28%和21.86%,而在此之后每一阶段冲击波压力峰值的增长分别为1.88%、4.64%和6.20%。

推测压力峰值和能量的饱和趋势与铜丝的相变过程有关。虽然理论上一定尺寸的铜丝相变所需要的能量是一定的,但除铜丝相变会消耗能量外,能量的注入和释放之间还将产生一定的能量损失,这一能量损失随着系统储能的增大而增加,进而导致放电模式转变后,压力峰值随系统储能增大的增长速度变慢。



(a) 压力波形



(b) 冲击波压力峰值及能量

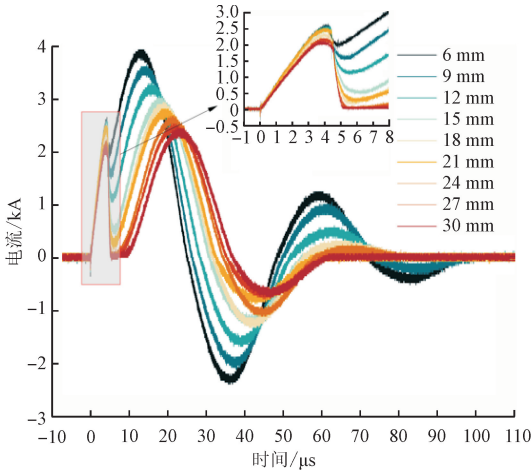
图8 不同系统储能下压力波形及其特征

Fig. 8 Pressure waveforms and their characteristics under different energy storage systems

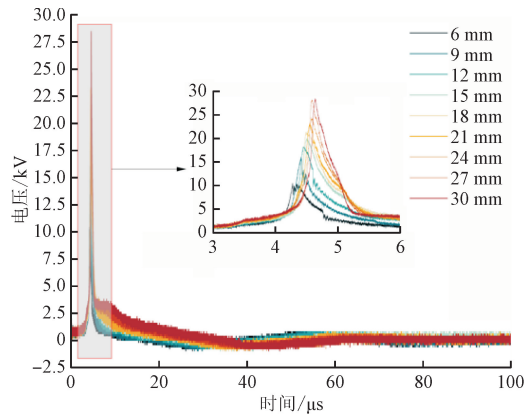
3.2 金属丝长度对油中金属丝电爆炸的影响

根据对油中金属丝电爆炸的物理过程的认识,金属丝的长度会影响放电通道电阻,进而影响放电过程和能量沉积行为,最终影响电弧故障实验结果。同样,也会对燃爆实验模拟变压器真实电弧故障的准确性产生影响,因此有必要明确金属丝长度对油中金属丝电爆炸的影响。

选取直径为 0.1 mm、长度为 6~30 mm 的金属丝,在 10 μ F 脉冲电容充电至 4 kV(系统储能为 80.00 J)的条件下开展实验,所得电压、电流波形如图 9 所示。



(a) 电流波形



(b) 电压波形

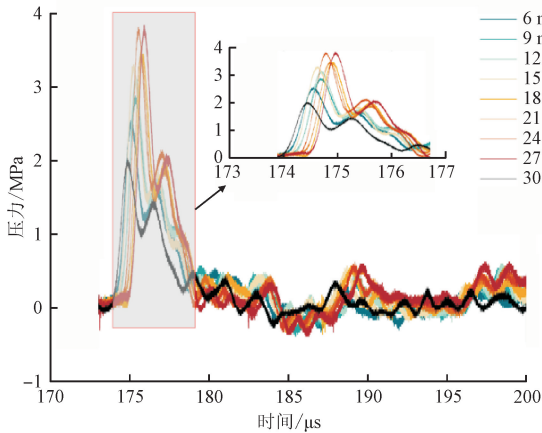
图 9 不同金属丝长度下油中电爆炸电压、电流波形
Fig. 9 Voltage and current waveforms of oil explosion under different copper wire lengths

由图 9(a)可以看到,金属丝的长度并没有明显影响铜丝相变阶段的电流波形,这是由于铜丝的电阻相对于回路的固有电阻值较小:常温下,直径为 0.1 mm、长度为 6 mm 的铜丝的电阻约为 13.0 m Ω ,直径为 0.1 mm、长度为 30 mm 的铜丝的电阻约为 64.9 m Ω ,而放电回路的固有电阻约为 140 m Ω ,是铜丝阻值的数倍。除此之外,可以看到随着金属丝长度的增加,电流信号波形逐渐出现了电流暂歇现

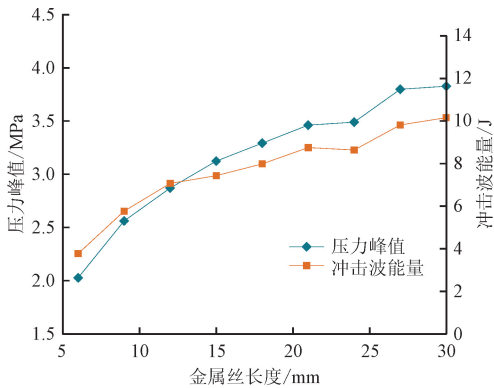
象。电流暂歇现象指的是电流信号从第 1 个峰结束到第 2 个峰开始之前出现的电流维持为 0 的现象。该现象的出现是由于通道内的电离不足以支撑放电通道的形成,导致金属丝在一段时间内呈现高阻状态,使得出现了高电压的保持和电流暂歇。在本研究中,说明金属丝长度的延长伴随着两电极间的距离增大,使得相爆发生后放电通道的形成更加困难。

由图 9(b)可以看到,随着金属丝长度的增加,电压峰值增大,这是由于在回路固有电感的作用下,放电无法间断,在相爆发生之后,两电极之间的区域呈现高阻状态。金属丝越长,区域空间内的等效阻值越大,进而电压峰值也就更大。并且,电压峰值出现的时间随着金属丝长度的增加而延后,这是由于在相爆完成前,金属丝越长,其相态变化需要的时间也越长。

整个过程所产生的冲击波压力波形及压力特征如图 10 所示,可以看到,随着金属丝长度的增大,冲击波形态无明显变化,但冲击波的压力峰值和冲击波能量均随之增大且呈现出一定的饱和趋势。这同样与金属丝相态变化过程以及通道电离过程的延长有关。



(a) 压力波形



(b) 冲击波压力峰值及能量

图 10 不同金属丝长度下压力波形及其特征
Fig. 10 Pressure waveforms and their characteristics under different metal wire lengths

总的来说,金属丝长度的增加会导致金属丝相变所需能量的增大以及相变时间的延长,相变带来的体积膨胀也将对压力波的前期过程产生更大的影响;另外,更长的电极间距也将延长通道的电离过程,阻碍电弧的发展。

3.3 金属丝直径对油中金属丝电爆炸的影响

与金属丝长度对油中金属丝电爆炸过程的影响类似,金属丝直径同样会影响到放电行为和能量沉积过程,需开展实验明确其对油中金属丝电爆炸的影响。

选取长度为 15 mm,直径为 0.03~0.15 mm 的铜丝,在 10 μ F 脉冲电容充电至 4 kV(系统储能为 80.00 J)的条件下开展实验,电压、电流波形如图 11 所示。

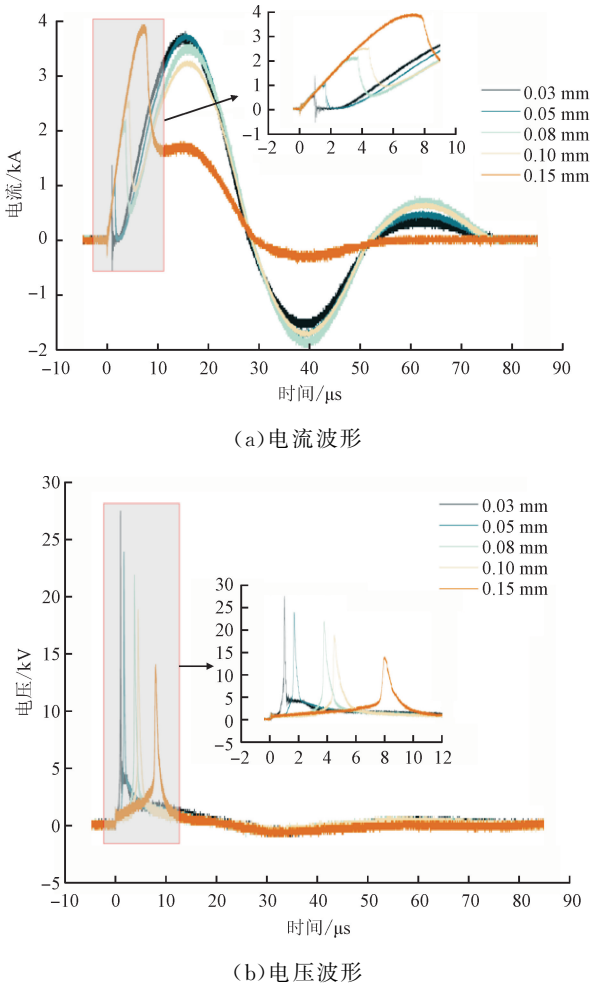


图 11 不同金属丝直径下金属丝电爆炸电压、电流波形
Fig. 11 Voltage and current waveforms of metal wire electrical explosion under different wire diameters

由图 11(a)可见,不同金属丝直径下,电流信号在相变过程的上升速率基本一致,这说明金属丝直径变化对放电的前期过程影响较小。而直径越大的

金属丝相变需要的能量越多,可以进行更多的能量沉积,因此直径越大的金属丝对应电流信号的增长时间越长。除此之外,金属丝的直径越大,出现电流暂歇的趋势越不明显。在击穿阶段,金属丝直径为 0.15 mm 的实验组产生的电流信号与其余实验组相比存在较大差异,具体表现为相变过程的电流峰值较高而击穿过程的电流峰值较低,这是由于直径 0.15 mm 的金属丝在相变过程中消耗了较多的能量。

如图 11(b)所示,随着金属丝直径的增加,电压信号峰值降低。不仅如此,电压峰值出现的时间也随之延后,这是由于在相爆完成前,金属丝直径越大,其相态变化需要的时间也越长。

不同金属丝直径下,油中金属丝电爆炸的冲击波压力波形及特征的变化如图 12 所示。

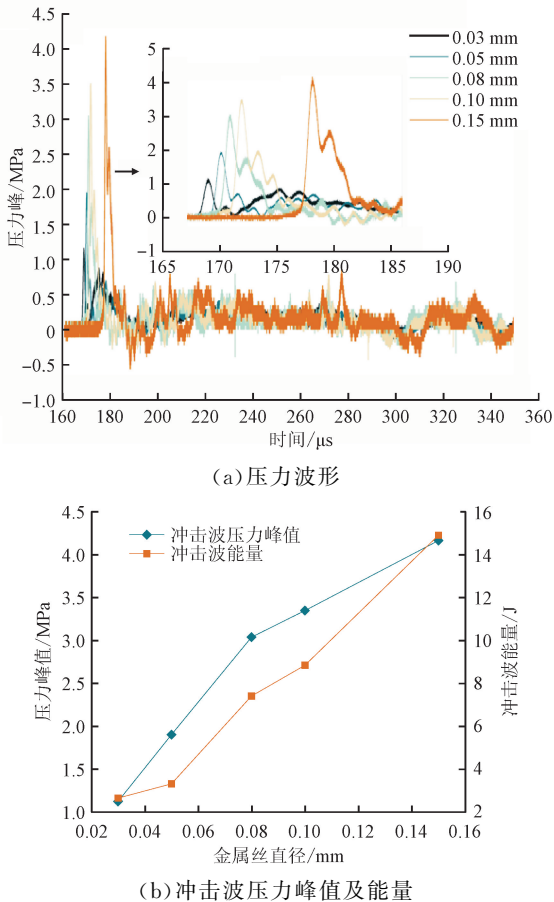


图 12 不同金属丝直径下压力波形及其特征
Fig. 12 Pressure waveforms and their characteristics under different wire diameters

从图 12 可以看到,随着金属丝直径的增加,冲击波压力峰值从 1.12 MPa 持续增加到 4.16 MPa,冲击波能量同步增加。特别地,当金属丝直径为

0.03 mm 时,冲击波压力出现较为明显的电弧压力过程,峰值为 0.85 MPa,是主冲击波的 76%,而随着金属丝直径增加,电弧压力过程越发不明显。这是由于随着金属丝直径的增加,虽然电极之间的电离距离没有发生变化,但金属丝相变所需要的能量增大,相应的电弧过程的能量减小,击穿过程持续时间被压缩,最终表现为电弧压力过程被弱化。

4 结 论

本文依托变压器燃爆故障模拟时的金属丝引弧实验平台,针对引弧金属丝的电爆炸过程及其放电特性和压力特性展开了研究。首先对油中金属丝电爆炸放电过程进行细化分析,并对不同传播距离下的冲击波进行了测量,得到了冲击波随距离的衰减规律;然后开展了系统储能、金属丝长度和直径等因素对油中金属丝电爆炸放电过程和冲击波的影响研究,得到以下结论。

(1)油中金属丝电爆炸放电过程可以分为相爆前过程、相爆至电压峰值过程、电离过程和击穿过程 4 个典型阶段。当系统储能不足时,不存在击穿过程阶段,放电过程形成的冲击波随传播距离的增加呈现幂指数衰减规律。

(2)系统储能增加时,油中金属丝电爆炸放电模式发生转变,能量从用于铜丝相变转变为用于形成稳定的电弧通道;冲击波压力峰值随系统储能增大而增大,并且这一增大过程受到能量损失随系统储能增大而增加的影响呈现出一定的饱和趋势。

(3)引弧过程中金属丝的相变将产生能量损失,导致后续过程的电弧能量略小于理论值,且金属丝长度的增加以及直径的增大都将使得金属丝相变消耗的能量增大,进而导致电弧过程的能量损失增多。因此,为了减小金属丝电爆炸过程对放电所产生冲击波强度的影响,提高燃爆实验对于变压器真实电弧故障工况模拟的准确性,进而实现变压器更有效的防爆设计,应当在实验允许的条件下,选择长度更短、直径更小的金属丝进行实验。

参考文献:

[1] 饶宏,冷祥彪,潘雅娴,等. 全球直流输电发展分析及国际化拓展建议 [J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 1-7.
RAO Hong, LENG Xiangbiao, PAN Yaxian, et al. Analysis of the global HVDC power transmission develop-

ment and the suggestion of the HVDC export [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 1-7.
[2] 刘冀邱,张珊珊,熊凌飞,等. 高海拔特高压换流变压器冷却性能修正研究 [J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 242-249.
LIU Jiqu, ZHANG Shanshan, XIONG Lingfei, et al. Research on the cooling performance correction for UHVDC converter transformers at high altitudes [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 242-249.
[3] 谢毓城. 电力变压器手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2014.
[4] 朱英浩,沈大中. 换流变压器用有载分接开关 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
[5] 张知先. 变压器有载分接开关振动信号分析与状态诊断方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
[6] 刘雪丽,李金忠,高飞,等. ± 800 kV 换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5350-5356.
LIU Xueli, LI Jinzhong, GAO Fei, et al. Key technology research for vacuum type on-load tap-changer of ± 800 kV direct current convertor transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5350-5356.
[7] 王绍武,李鹏,李金忠,等. 变压器真空有载分接开关研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6893-6907.
WANG Shaowu, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Overview of transformer vacuum-type on-load tap changers [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6893-6907.
[8] 金雷,鲁非,周凯,等. 一起 220 kV 变压器真空有载分接开关故障诊断及分析 [J]. 变压器, 2021, 58(9): 84-87.
JIN Lei, LU Fei, ZHOU Kai, et al. Fault diagnosis and analysis of 220 kV transformer vacuum OLTC [J]. Transformer, 2021, 58(9): 84-87.
[9] DUAN Ruochen, WANG Fenghua. Fault diagnosis of on-load tap-changer in converter transformer based on time-frequency vibration analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3815-3823.
[10] 李博宇,郝治国,李斯盟,等. 油浸式电力设备内部电弧引发的压力特征 [J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 198-206.
LI Boyu, HAO Zhiguo, LI Simeng, et al. Pressure characteristics of oil-immersed power equipment under internal arc [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 198-206.
[11] 卢理成,董弘川. 特高压变压器油箱防爆措施及改进研究 [J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 64-70.

- LU Licheng, DONG Hongchuan. Study on explosion proof measures and improvements for the UHV transformer tank [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 64-70.
- [12] 刘泽洪, 卢理成, 周远翔, 等. 变压器升高座区域电弧故障与压力特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4688-4697.
- LIU Zehong, LU Licheng, ZHOU Yuanxiang, et al. Research on pressure characteristics of AC turret on arc fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4688-4697.
- [13] 李金忠, 汪可, 任家帆, 等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7651-7658.
- LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7651-7658.
- [14] 陈洪波, 曹培, 高凯, 等. 换流变压器有载调压开关防爆试验研究与分析 [J]. 高压电器, 2024, 60(2): 119-126.
- CHEN Hongbo, CAO Pei, GAO Kai, et al. Research and analysis on explosion-proof test of converter transformer OLTC [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 119-126.
- [15] 徐海军, 王进, 廖文锋, 等. 换流变有载分接开关非电量保护优化配置试验研究 [J]. 变压器, 2021, 58(10): 48-52.
- XU Haijun, WANG Jin, LIAO Wenfeng, et al. Experimental study on optimal configuration of pressure relief device, pressure and oil flow relay of on-load tap-changer [J]. Transformer, 2021, 58(10): 48-52.
- [16] YAN Chenguang, XU Che, LIU Hao, et al. Research on oil pressure rise and fluctuation due to arcing faults inside transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1483-1492.
- [17] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel-pressure fluctuation of depth direction in oil [J]. Electrical Engineering in Japan, 2018, 202(2): 43-53.
- [18] 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.
- [19] 袁承春. 煤制气工程鲁奇式气化炉的研制 [J]. 压力容器, 2011, 28(9): 37-41.
- YUAN Chengchun. Research on Lurgi gasification furnace of coal gas project [J]. Pressure Vessel Technology, 2011, 28(9): 37-41.
- [20] 黄泽, 郑津洋, 刘鹏飞, 等. 内压圆筒厚度计算公式分析讨论 [J]. 压力容器, 2012, 29(8): 18-21.
- HUANG Ze, ZHENG Jinyang, LIU Pengfei, et al. Discussion on thickness formula of cylindrical shell under internal pressure [J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(8): 18-21.
- [21] 韩若愚. 微秒电流脉冲下水中金属丝电爆炸过程及特性实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [22] ORESHKIN V I. Thermal instability during an electrical wire explosion [J]. Physics of Plasmas, 2008, 15(9): 092103.
- [23] 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.
- [24] TOUYA G, REESS T, PÉCASTAING L, et al. Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2006, 39(24): 5236-5244.
- [25] GRINENKO A U, SAYAPIN A F, EFIMOV S V, et al. Experimental and theoretical study of strongly coupled copper plasma generated by underwater electrical wire explosion [J]. AIP Conference Proceedings, 2006, 808(1): 91-94.
- [26] MARTIN J, REESS T, DE FERRON A, et al. A new formula for predicting the amplitude of the dynamic pressure wave resulting from breakdown in water gap [C]//2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 423-426.
- [27] 饶国宁. 爆炸能量输出特性及爆炸波与目标作用的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

(编辑 刘杨 陶晴)