

文章编号:1006-9941(2019)06-0473-08

亚微秒内金丝电爆炸的激光探针测试及三维动力学仿真

王万军¹,孙秀娟¹,张雷²,雷凡¹,郭菲¹,杨爽¹,付秋菠¹

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 空军装备部驻绵阳地区第二军事代表室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了获得亚微秒时间尺度内金丝电爆炸流场的演化规律,采用激光干涉测试技术,对直径为0.04 mm的金丝电爆炸流场膨胀过程进行了实验分析,采用光电探针建立了流场演化过程与放电电流曲线在时间维度上的对应关系;考虑爆点之后的焦耳热沉积,采用包含能量补充项的JWL状态方程描述金丝电爆炸产物的动力学行为,对金丝电爆炸过程进行了三维动力学仿真研究。结果表明,在储能电容为0.22 μF ,充电电压为3900 V的条件下,金丝电爆炸产物的最大膨胀速度可达8913 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,在传播1.63 mm后下降为3000~4000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,该条件下的最大输出压力大于2.4 GPa;数值模拟结果与试验结果的对比显示,计算所得电爆炸产物传播距离随时间的变化规律与实验结果基本一致,表明采用考虑能量补充项的JWL状态方程能够较好的描述金丝电爆炸产物的动力学行为,电爆炸产物膨胀过程中界面压强和密度的衰减规律能够用多项式函数描述。

关键词: 亚微秒;电爆炸;流场演化;激光干涉;动力学仿真;JWL状态方程

中图分类号:TJ55;O384;O381

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018336

1 引言

金属丝电爆炸是爆炸丝雷管和断路开关的关键物理过程。以爆炸丝雷管为例,其作用原理为:放电回路的开关闭合瞬间,储能电容放电,形成峰值为数千安培的脉冲电流,金属丝在脉冲电流的作用下,发生快速的固-液-汽连续相变,并且最终形成高温高压等离子体,激发与其接触的炸药发生快速化学反应并且形成爆轰^[1-3]。等离子体压力和密度随时间和空间的变化规律是认识爆炸丝雷管作用机理的关键问题。国内外学者针对金属丝的电爆炸问题开展了大量实验和数值模拟研究,在实验研究方面,Grinenko A^[4-5]和Sarkisov G S^[6-7]等对铝丝、铜丝和钨丝在水下和真空中的电爆炸过程开展了系统的实验研究;国内的学者也开展了大量的实验观测^[8-12],张寒虹等^[8]采用高速阴影摄影

和扫描摄影,对亚毫秒时间尺度内水下金属丝电爆炸过程中的冲击波传播特性、气炮增长和等离子体半径变化规律进行了研究;王坤^[9]等利用皮秒激光探针,对纳秒时间尺度内的能量沉积结构、铝丝膨胀速度以及其核冕结构进行了研究;张桂夫等^[10]采用高速摄影,揭示了毫秒时间尺度下直管中爆炸诱导气泡和射流的典型演变过程。在数值模拟方面,蒋吉昊^[13]等采用一维磁流体模型,获得了电爆炸丝电流、电压随时间的变化,以及电爆炸过程中爆炸丝的密度随空间的分布;贺佳等^[14]通过自编的一维数值计算程序建立了微型金属箔电爆炸的数值模拟方法。

可以看出,目前对金属丝电爆炸的实验测试大多是在亚毫秒时间尺度内开展,而且主要研究金属丝的膨胀速度、半径变化等特性,对输出压力等不易直接观测的物理量研究仍较少,而且并未建立金属丝电爆炸流场演化与放电曲线的关联;数值模拟仍以简化的一维仿真为主,对于非轴对称条件下的三维数值模拟研究仍相对较少。本文采用激光探针测试技术,对非轴对称条件下金丝电爆炸产物的膨胀过程进行实验测试,并且基于光电探针建立不同时刻流场图像与放电电流曲线在时间轴上的对应关系;采用JWL状态方程描述电爆炸产物的动力学行为,建立一种金丝电爆炸流场演

收稿日期:2018-12-03;修回日期:2019-01-31

网络出版日期:2019-04-01

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11872342)

作者简介:王万军(1989-),男,助理研究员,主要从事爆炸与冲击动力学、火工品集成设计研究。e-mail:wangwanjun@caep.cn

通信联系人:付秋菠(1977-),女,副研究员,主要从事火工品集成设计研究。e-mail:fuqiubo@caep.cn

引用本文:王万军,孙秀娟,张雷,等.亚微秒内金丝电爆炸的激光探针测试及三维动力学仿真[J].含能材料,2019,27(6):473-480.

WANG Wan-jun, SUN Xiu-juan, ZHANG Lei, et al. Sub-microsecond Interferometry Diagnostic and 3D Dynamic Simulation of the Bridgewire Electrical Explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(6):473-480.

化的三维动力学计算方法,在此基础上对金丝电爆炸产物的压力、密度随传播距离的衰减规律进行研究。

2 金丝电爆炸的激光探针测试

2.1 实验原理和装置

基于 Mach-Zehnder 干涉光路的激光干涉技术是研究微型电爆炸流场演化的有效手段^[15-17],采用的激光干涉实验原理图如图 1 所示。首先, DG535 信号发生器产生两路触发信号, 触发信号 1 传输至爆炸丝放电电路的触发开关, 使电路闭合, 储能电容放电产生脉冲电流, 电容容值为 $0.22 \mu\text{F}$, 充电电压为 3900 V ; 触发信号 2 传输至激光脉冲发生器, 经延时后产生脉冲激光, 脉冲激光的波长为 532 nm , 由 30 ps Nd:YAG 激光器产生 (型号为 Ekspla PL2251C), 脉冲激光经分光镜后分为两束, 其中一束穿过电爆炸流场, 再经过 45° 反光镜反射后到达照相机 (Canon 700D), 另外一束经过相同长度的光程后, 与第一束脉冲激光汇合。由于第一束脉冲激光在穿过电爆炸流场时发生相位变化, 因此与第二束激光汇合后产生的干涉条纹将有所变化, 通过干涉图样就能够获得第一束激光穿过电爆炸产物时的流场形貌。

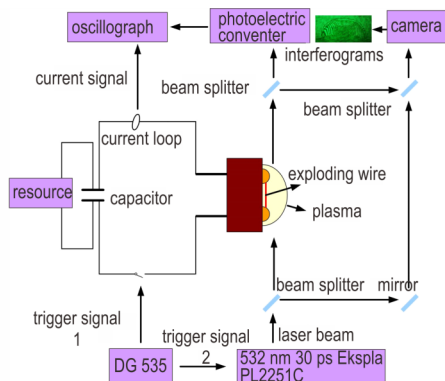


图 1 电爆炸产物流场的激光干涉测试系统示意图

Fig.1 Experiment arrangement of the interferometry diagnostic system

在第一束脉冲激光穿过电爆炸流场后的光路上放置光电探针, 将脉冲激光信号转化为电信号, 转化而成的电信号在示波器上形成尖峰 (见图 2), 该尖峰对应激光信号穿过电爆炸流场的时刻; 同时采用罗氏线圈测试放电电流曲线, 并且采用同一台示波器进行记录 (图 2)。定义电流曲线的起跳点为时间零点, 通过图中光电探针形成的尖峰和放电电流曲线的对比, 就能够获得测试所得流场形貌对应的具体时刻。

本实验中, 电流信号从产生到记录, 包含罗氏线圈

响应、电流信号传输以及示波器响应三个环节; 光电探针信号从产生到记录, 包含光电转换器响应、信号传输以及示波器响应三个环节。其中, 由于两种信号采用同一台示波器进行记录, 因此示波器的响应时间一致, 不影响同步精度; 两种信号的信号传输线长度均为 1 m , 因此信号的传输时间也一致, 不影响同步精度; 罗氏线圈和光电转换器的响应时间虽然不完全一致, 但两者均为 5 ns 左右, 两者之差小于 5 ns , 综合分析, 光电探针信号与电流信号的同步误差小于 5 ns 。

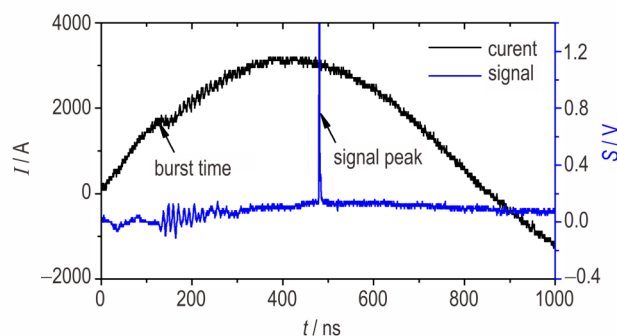


图 2 放电电流信号和光电探针信号

Fig.2 Transient current and photoelectric converter signal

2.2 实验样品

采用的实验样品示意图如图 3 所示, 由脚线、电极塞、焊点和金丝构成。脚线一端与储能电容连接, 另一端通过焊接方式与金丝连接, 金丝纯度为 99.99% 。部分金丝直径 D 、长度 L 以及金丝与电极塞距离 H 等尺寸如表 1 所示。在实验前, 采用电子显微镜对选取

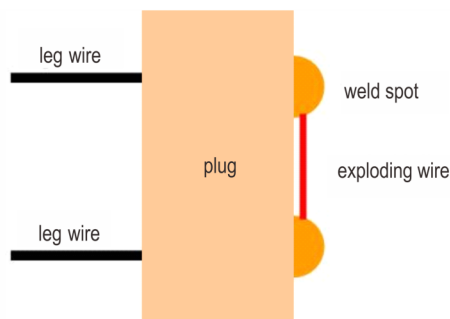


图 3 测试用样品示意图

Fig.3 Schematic diagram of the samples in experiments

表 1 实验用金丝主要尺寸

Table 1 Parameters of the bridgewire used in experiments

	D / mm	L / mm	H / mm
1#	0.04	1.18	0.10
2#	0.04	1.17	0.10
3#	0.04	1.18	0.10
4#	0.04	1.17	0.10
5#	0.04	1.17	0.10

的实验样品的关键尺寸,如金丝的直径、长度以及金丝距离电极塞的高度等进行了细致的筛选,以确保选用的实验样品具有较高的一致性。

2.3 实验结果及分析

2.3.1 电爆炸流场形貌特征分析

采用图1所示的实验装置,以电流起跳点为时间零点,获得了5个不同时刻的电爆炸流场,如图4所示。需要说明,采用本实验装置,单次实验只能获得一幅实验图像,因此图4中不同时刻的图像是在多次实验中采用具有相同状态的不同实验样品获得的。

从图4可以看出,在不同的时刻,电爆炸流场均具有如下典型特征:第一,流场中心区域的干涉条纹较模糊,而远离中心区域的干涉条纹较清楚。分析认为,该现象主要是电极塞阻止了爆炸产物向下运动,

爆炸产物在局部堆积,使该区域的物质密度较大,脉冲激光不易穿透;而且,该区域的自由电子数密度同样较大,对激光的吸收作用也较强,造成干涉条纹较模糊;外侧的爆炸产物密度相对较低,对激光的屏蔽和吸收作用均较弱,因此脉冲激光容易穿透流场形成清晰的干涉条纹。第二,干涉条纹在流场最外缘的一个薄层区域内形成了比较明显的双层干涉条纹。分析认为,这是由于电爆炸产物的膨胀速度远大于空气声速,在膨胀过程中必然压缩空气形成冲击波,在冲击波波阵面和爆炸产物外界面之间形成了一个层状的受压缩空气区域,该区域的物质种类、密度和微观粒子组成均与爆炸产物显著不同,因此其干涉条纹的形态也有所不同,形成了观测图像中外缘的双层干涉条纹。

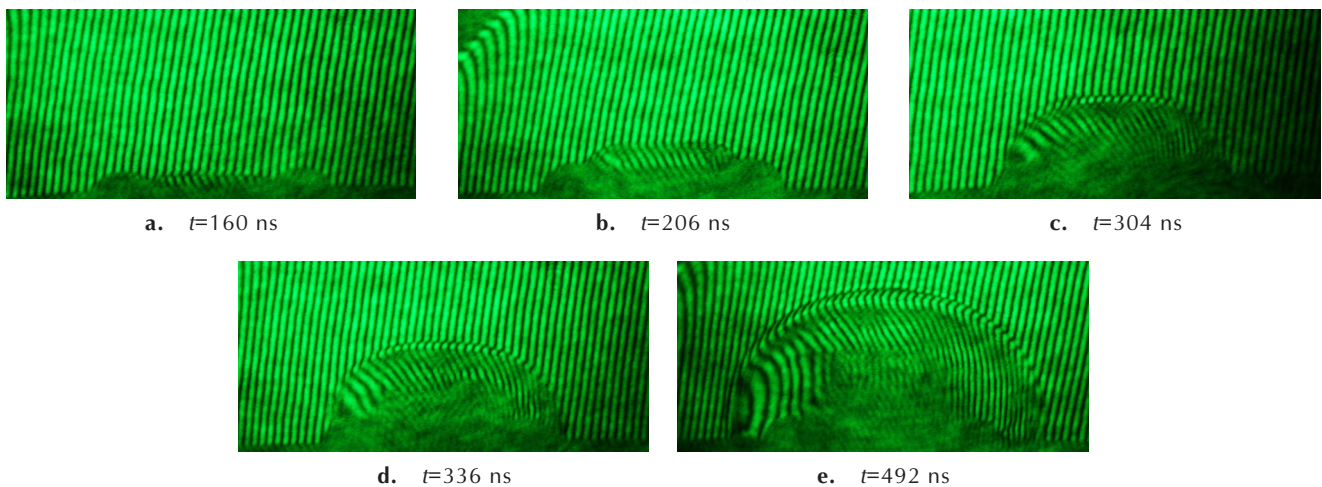


图4 不同时刻的电爆炸流场

Fig.4 The flow field of the explosion product at different typical moments

2.3.2 电爆炸流场膨胀速度分析

在计算电爆炸流场的膨胀速度之前,需要首先确定金丝膨胀的起始时刻。金丝在开始膨胀瞬间,其体积急剧增大,电子密度快速下降,电阻突跃上升,因此可以将放电回路的电阻开始急剧增大的时刻作为金丝的膨胀起始时刻^[18]。然而,放电过程的动态电阻难以直接测量,考虑到电阻急剧增大时,会在电流曲线上形成向下的拐点,所以可以将电流曲线中向下的拐点近似作为金丝的爆发时刻。本实验中,如果以电流起跳点为时间零点,则金丝的膨胀起始时刻为132 ns,如图2所示。

通过对实验图像(图4)进行数据判读,获得了不同时刻电爆炸流场传播距离(干涉条纹顶端与金丝初始位置的距离)随时间的变化规律,并计算获得了不同

时间段内的平均传播速度,如表2所示。传播距离的判读是以每个实验样品的电极塞直径为标尺,确定图像中每个像素点对应的实际长度后,再从图中读取电爆炸产物的传播距离。单个像素点对应的实际长度约为0.02 mm,因此空间判读精度大约为0.02 mm。

从表2中可以看出,金丝爆发瞬间的膨胀速度并非最大,而是经历了先增大后减小的变化过程:在爆发后0~28 ns内,电爆炸产物的平均膨胀速度为 $3571 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,大约为空气中声速的10.5倍,必然压缩空气产生冲击波,进一步验证了2.3.1节中对双层干涉条纹成因的分析;在金丝爆发后的28~74 ns之间,电爆炸产物的平均膨胀速度增大至 $8913 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,膨胀速度之所以能够增大,是由于爆发后仍有电流持续通过爆炸产物,不断向其中沉积能量,导致爆炸产物在初始阶段的膨胀过

程中, 能量密度反而有所增大; 之后, 膨胀速度持续下降, 例如在 1.63 mm 处, 膨胀速度下降为 $3000 \sim 4000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这主要是由于后续补充的能量不足以维持爆炸产物高速膨胀引起的能量损耗, 导致能量密度持续下降。综合而言, 在金丝电爆炸过程中, 由于能量补充和能量消耗之间的竞争关系, 使得其爆炸产物的膨胀速度出现先增大后减小的现象, 这也表明, 金丝爆发点之后的能量沉积对于其流场演化过程具有重要的影响。

表 2 不同时刻电爆炸流场传播时间、传播距离及平均传播速度
Table 2 The travel time, travel distance and average velocity of the explosion product at different typical moments

time / ns	travel time / ns	travel distance / mm	average velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
132	0	0	-
160	28	0.10	3571
206	74	0.51	8913
304	172	0.99	4898
336	204	1.12	4063
492	360	1.63	3269

3 动力学数值模拟研究

3.1 计算模型

金丝电爆炸产物流场的演化过程与炸药爆轰产物的流场演化过程存在相似性, 两者均是高温高压气团的膨胀过程, 这就为采用与爆轰产物类似的经验型状态方程(如 JWL 状态方程^[19])描述电爆炸产物的压力-密度-比内能关系提供了可能。金丝电爆炸与炸药爆轰产物的膨胀仍存在显著不同, 主要表现在炸药爆轰产物的膨胀过程是等熵的, 膨胀过程中没有额外能量的注入, 而电爆炸过程中在爆发点以后仍有焦耳热不断产生, 在一定程度上弥补爆炸产物膨胀引起的能量损耗, 延缓其内部压力的衰减, 从而对流场演化过程造成影响。如果采用包含能量补充项的 JWL 状态方程, 将爆发点后形成的焦耳热注入到电爆炸产物中, 则能够对金丝电爆炸过程开展动力学数值仿真。

采用非线性动力学数值模拟软件 AUTODYN^[20], 对金丝在空气中的电爆炸过程进行了三维数值模拟研究。采用多物质欧拉网格建立了 1/2 平面对称计算模型, 如图 5 所示, 模型包括电极塞、焊点、爆炸丝和空气。电极塞的厚度对爆炸产物的膨胀过程影响较小, 为了减小计算量, 将电极塞厚度减小为 0.1 mm, 焊点、

金丝和空气通过填充的方法进行建模, 网格采用 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 的正方体网格。电极塞材料为 PC, 焊点材料为金, 空气采用理想气体方程描述, 均采用 AUTODYN 材料库内的本构模型和材料常数。

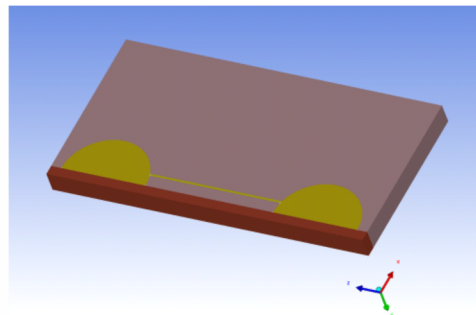


图 5 金丝空中电爆炸计算模型

Fig. 5 The simulation model for the electric explosion of the bridgewire in air

金丝电爆炸产物采用包含能量耦合项的 JWL 状态方程进行描述, 如式(1)所示。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\rho}{R_1\rho_0} \right) e^{-\frac{R_1\rho_0}{\rho}} + B \left(1 - \frac{\omega\rho}{R_2\rho_0} \right) e^{-\frac{R_2\rho_0}{\rho}} + \omega\rho \left(\frac{E_0 + Q(t)}{m} \right) \quad (1)$$

式中, p 压强, Pa; ρ 为金丝电爆炸产物的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, ρ_0 为其初始值, 取为金材料的原始密度; A (Pa)、 B (Pa)、 R_1 和 R_2 为拟合参数; 假设电爆炸产物为单原子构成的理想气体, 其多方气体指数 γ 为 1.67, ω 取为 $\gamma-1=0.67$; E_0 是金丝爆发点之前沉积的能量, J; $Q(t)$ 为爆发点之后补充的焦耳热, J; E_0 和 $Q(t)$ 均通过金丝爆发过程中的电流曲线和电压曲线积分获得, 分别如式(2)和式(3)所示; m 为金丝的总质量, kg。

表 3 金丝爆炸产物 JWL 状态方程参数

Table 3 Parameters of JWL EOS for the explosion product

ρ_0 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	A (Pa)	B (Pa)	R_1	R_2	ω
19.24	300.0e11	30.0e11	6.2	1.5	0.67

$$E_0 = \int_0^{t_c} I(t)U(t)dt - \Delta H \cdot m \quad (2)$$

$$Q(t) = \int_{t_c}^t I(t)U(t)dt \quad (3)$$

式中, t_c 为爆发时刻, s; $I(t)$ 为爆发过程的动态电流, A; $U(t)$ 为爆发过程的动态电压, V; ΔH 为金的汽化热, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; m 为金丝的总质量, kg。

动态电流和电压分别采用柔性电流环和高压探针

进行测试,采用示波器进行记录,测试结果如图6所示。可以看出,原始的电流曲线和电压曲线存在明显的相位差,在电流为零的时刻,电压值不为零,表明测试电压中除了电阻电压外,还包含明显的感生电压。由于感生电压对于加热金丝电爆炸产物没有作用,因此在根据式(2)和式(3)计算 E_0 和 $Q(t)$ 之前,必须首先将测试电压曲线中的感生电压消除。考虑到电流为零的时刻,电阻电压也为零,此时测试电路两端的电压完全由电感产生,因此可以根据此时电流的瞬时变化率和测试电压值计算得到电流零点时的测试电路电感值。从实验数据出发,对电感的变化规律用2次函数进行拟合,然后将电感函数代入式(4)以消除感生电压对测试电压曲线的影响,消除感生电压之后的电压曲线如图6所示,明显可以看到,修正后的电压相位与电流基本保持一致。

$$U' = U - L(dI/dt) \quad (4)$$

分别采用修正前后的电压曲线和电流曲线的积分可以获得修正前后能量输入曲线,如图7所示,可以看出,在去除了电感电压之后,修正后的能量输入要明显小于修正前的能量输入。截止到爆发点 $t_c=132$ ns的沉积能量 $E_0=0.18$ J。在计算过程中, $Q(t)$ 的输入通过AUTODYN软件的二次开发实现,通过编写

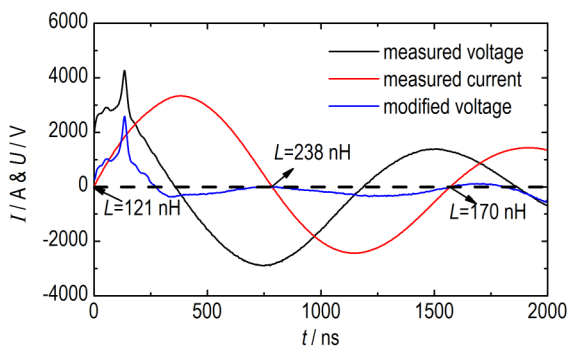


图6 测试电流电压曲线和消除电感后的电压曲线

Fig.6 Measured current and voltage trace and modified voltage

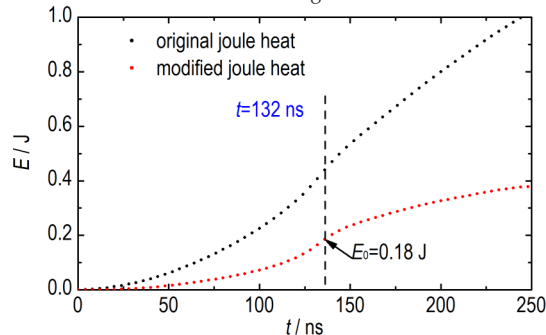


图7 修正前后能量输入曲线

Fig.7 Original and modified energy history

AUTODYN程序中的“EXSIE”用户子程序,重新编译形成定制化的AUTODYN计算程序,能够实现向计算模型中选定的材料按照任意形式的曲线进行能量输入。

3.2 计算结果及分析

仿真获得的电爆炸产物膨胀距离随时间的变化规律与实验结果的对比如表4所示,数值模拟获得的密度云图与对应时刻的激光干涉测试图像的对比如图8所示。由表4可以看出,在不同的时刻,冲击波波阵面的传播距离与实验结果基本吻合,误差不超过10%,表明本研究采用的计算模型能够正确描述金丝电爆炸产物在膨胀过程中的动力学特性,但是也可以看出初始阶段计算所得的膨胀距离小于实验结果,随着时间的推移,计算所得的膨胀距离逐渐接近并超过实验测试结果,分析认为这主要是由于在实际物理过程中,电流产生的焦耳热主要集中在金丝初始位置附近,到膨胀后期,该部分能量对于爆炸产物膨胀的影响是逐渐变小的,而在数值模拟过程中,是将该部分能量均匀注入到电爆炸流场中,导致扩大了后期注入能量对电爆炸产物膨胀的影响,使得后期的计算膨胀距离逐渐偏大。

表4 电爆炸产物膨胀距离随时间变化规律仿真结果与实验结果对比

Table 4 Comparison of the product travel distance between the simulation and experimental results

time / ns	simulation travel distance / mm	experimental travel distance / mm	error / %
160	0.09	0.10	10.0
206	0.46	0.51	-9.8
304	0.94	0.99	-5.1
336	1.10	1.12	-1.8
492	1.75	1.63	7.4

从图8可以看出,受电极塞约束作用的影响,数值仿真中密度较大的区域集中在靠近底板的部位,实验测试中激光干涉条纹较为模糊的区域与数值仿真结果中密度较大的区域基本重合,表明流场中心部位干涉条纹较为模糊确实是由于物质密度较大导致激光无法穿透导致的。另外从数值仿真结果还可以看到,由于爆炸产物的膨胀速度远远大于空气中的声速,因此压缩空气形成了空气冲击波,在爆炸产物外表面和冲击波波阵面之间形成了一个密度较大的受压缩空气薄层区域,对应于激光干涉条纹外缘的双层条纹现象,进一步验证2.3.1节中对干涉条纹的分析。

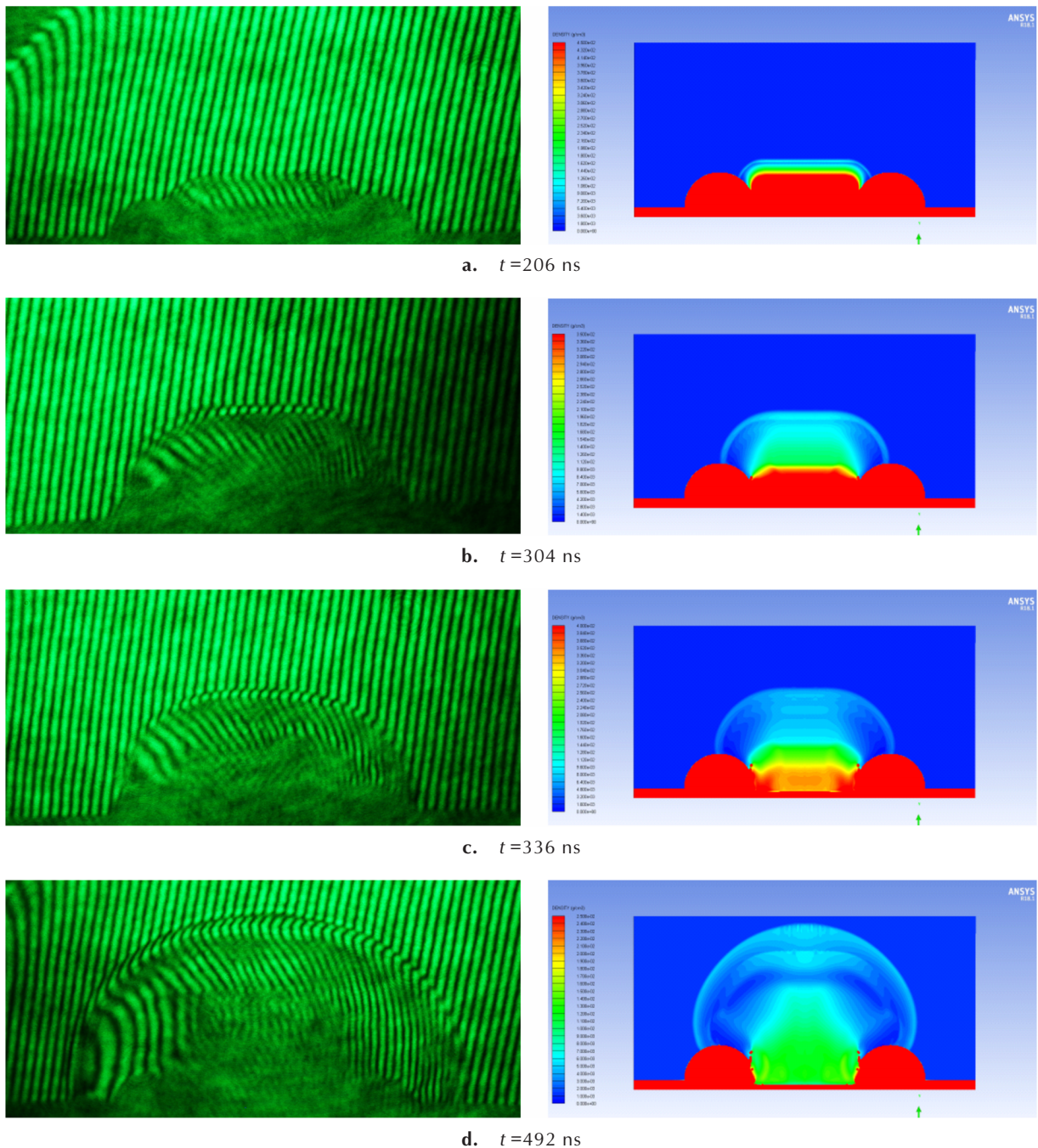


图8 不同时刻的电爆炸流场实验结果(左)与计算结果对比(右)

Fig.8 Comparison of the explosion field between the experimental (left) and simulation (right) result

3.3 流场压力和密度变化规律

在数值模拟中,在流场中心线上距离金丝初始位置不同距离处设置了若干观测点,记录该点处的界面压强和界面密度,从而获取界面压强和密度在膨胀过程中的衰减规律。第一个观测点距离金丝的距离为0.04 mm,后续观测点的距离依次增加0.1 mm,电爆炸产物在不同观测点处的界面压强和密度随距离的衰减规律如图9和图10所示。从图9中可以看出,在距

离金丝初始位置0.04 mm处,电爆炸产物的界面压强可达2.4 GPa,之后迅速衰减,在距离0.14 mm处衰减为0.22 GPa,大约下降了一个数量级,在距离为1.14 mm处衰减为0.021 GPa。这是由于电爆炸产物压缩空气时,爆炸产物的能量不断转化为受压缩空气的动能和内能,同时由于爆炸产物体积变大,其单位体积的能量密度不断减小。密度的衰减规律与压强类似,在距离金丝初始位置0.04 mm处,界面密度为 $3.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,在

距离 0.14 mm 处衰减为 $0.23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 衰减幅度超过一个数量级, 在距离 1.14 mm 处的衰减为 $0.0061 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。采用多项式函数对电爆炸产物的界面压强和密度随传播距离的衰减规律进行了拟合, 拟合结果如图 9 和图 10 所示, 可以看出, 多项式函数能够很好的拟合压强和密度随传播距离的衰减。

由前文所述, 在距离金丝中心线 0.04 mm 处的界面压强大约为 2.4 GPa。由冲击动力学基本理论可知^[21], 如果金丝外围介质为 PETN 炸药等凝聚态材料, 由于 PETN 材料的 p - u 冲击 Hugoniot 曲线位于空气介质之上, 因此即使对于相同的金丝和起爆条件, 金丝爆发后在 PETN 介质中形成的透射波压力也要大于 2.4 GPa, 这对于研究爆炸丝雷管的作用机理具有一定的参考价值。

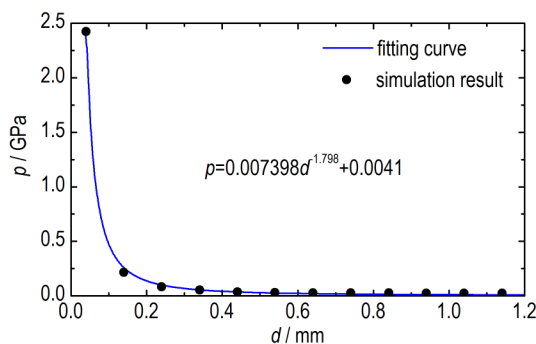


图 9 压强随距离衰减规律拟合曲线

Fig.9 Fitting curve of pressure vs. travel distance

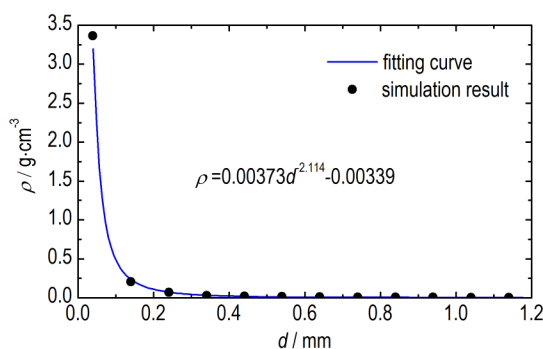


图 10 密度随距离衰减规律拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of density vs. travel distance

4 结论

采用基于 Mach-Zehnder 干涉光路的激光探针测试技术, 获得了 0.04 mm 金丝电爆炸流场在亚微秒时间尺度内的流场演化过程, 并建立了其与放电电流曲线的同步对应关系; 采用 JWL 作为金丝电爆炸产物的状态方程对金丝产物膨胀过程进行了数值仿真, 具体

结论如下:

(1) 金丝电爆炸产物的膨胀速度先增大后减小, 表明爆发点之后的能量沉积对于流场膨胀具有积极作用, 最高膨胀速度可达 $8913 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 之后逐步减小, 在膨胀距离达到 1.63 mm 处时, 膨胀速度下降至 $3000\sim 4000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;

(2) 采用 JWL 状态方程, 考虑爆发点之后的能量补充, 能够较好的描述金丝电爆炸产物膨胀过程中的动力学行为, 计算所得流场演化规律与实验结果吻合较好;

(3) 金丝电爆炸产物膨胀过程中, 界面压强和界面密度随空间的衰减规律可以通过多项式函数进行较好的描述, 在本研究采用的实验条件下, 金丝电爆炸的输出压强大于 2.4 GPa。

致谢: 感谢西安交通大学卢一晗博士、吴坚老师等人在激光探针测试方面给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Lee E A, Drake R C, Richardson J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators -part 1: electrical characterisation[C]//18th APS-SCCM, USA, 2014.
- [2] Lee E A, Drake R C, Richardson J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators -part 2: bridgewire output[C]//18th APS-SCCM, USA, 2014.
- [3] Lee E A, Drake R C, Richardson J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators -part 3: explosive initiation characterisation[C]//18th APS-SCCM, USA, 2014.
- [4] 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): 4448.
- [5] Grinenko A, Efimov S, Fedotov A, et al. Efficiency of the shock wave generation caused by underwater electrical wire explosion[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(11): 2105.
- [6] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Cochrane K R, et al. Nanosecond electrical explosion of thin aluminum wires in a vacuum: experimental and computational investigations[J]. *Physical Review of Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2005, 71(2): 046404.
- [7] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Struve K W. Thermodynamical calculation of metal heating in nanosecond exploding wire and foil experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(4): 5063.
- [8] 张寒虹, 陈志福, 张弛. 水中电爆炸的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(4): 363-367.
ZHANG Han-hong, CHEN Zhi-fu, ZHANG Chi. Experimental researches on underwater wire exploding [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(4): 363-367.
- [9] 王坤, 史宗谦, 石元杰, 等. 真空中铝丝电爆炸的实验研究[J]. *物理学报*, 2016, 65(1): 015203.
WANG Kun, SHI Zong-qian, SHI Yuan-jie, et al. Experi-

- tal investigation on the electrical explosion of single aluminum wire in vacuum[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2016, 65(1): 015203.
- [10] 张桂夫, 朱雨建, 李元超, 等. 狭长直管约束条件下水下电爆炸产生的气泡运动和界面射流[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(5): 609-616.
- ZHANG Gui-fu, ZHU Yu-jian, LI Yuan-chao, et al. Bubble and jet induced by underwater wire explosion in a narrow tube[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(5): 609-616.
- [11] 金涌, 栗保明. 铜丝电爆炸的光谱分析[J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(2): 252-256.
- JIN Yong, LI Bao-ming. Spectral analysis on electrical explosion of copper wire[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(2): 252-256.
- [12] 张振涛, 郭昭亮, 蒲国红, 等. 爆炸丝线起爆装置研制及应用[J]. *强激光与离子束*, 2014, 26(3): 035004-1~5.
- ZHANG Zhen-tao, GUO Zhao-liang, PU Guo-hong, et al. Development and application of exploding wire initiation system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 035004-1~5.
- [13] 蒋吉昊, 杨宇, 胡熙静, 等. 电爆炸丝一维数值模拟[C]//四川省电子学会高能电子学专业委员会第四届学术会议, 北京, 2005.
- JIANG Ji-hao, YANG Yu, HU Xi-jing, et al. Numerical simulation of electric exploding wires via 1D MHD modles[C]//4th Sichuan electronics association academic conference, Beijing, 2005.
- [14] 贺佳, 罗斌强, 庞树财, 等. 微型爆炸箔电爆炸过程的数值模拟[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(1): 21-26.
- HE Jia, LUO Bin-qiang, PANG Shu-cai, et al. Numerical simulation of electrical explosion of micro-exploding foil[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(1): 21-26.
- [15] WU Jian, LI Xing-wen, YANG Ze-feng, et al. Effects of load voltage on voltage breakdown modes of electrical exploding aluminum wires in air[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(6): 042509.
- [16] WU Jian, LI Xing-wen, WANG Kun, et al. Transforming dielectric coated tungsten and platinum wires to gaseous state using negative nanosecond-pulsed-current in vacuum[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(11): 98-101.
- [17] WU Jian, LU Yi-han, SUN Feng-ju, et al. Preconditioned wire array Z-Pinches driven by a double pulse current generator[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2018, 60: 075014.
- [18] WANG Wan-jun, ZHU Ming-shui, FU Qiu-bo, et al. Numerical simulation of energy conversion mechanism in electric explosion[C]//18th APS-SCCM, USA, 2017.
- [19] 陈清畴, 蒋小华, 李敏. RDX基高聚物黏结炸药JWL状态方程[J]. *含能材料*, 2011, 19(2): 213-216.
- CHEN Qing-chou, JIANG Xiao-hua, LI Min. JWL equation of state for RDX-based PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 213-216.
- [20] HUANG Hao, JIAO Qing-jie, NIE Jian-xin, et al. Numerical modeling of underwater explosion by one-dimensional ANSYS-AUTODYN[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2011, 29(4): 292-325.
- [21] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 4-6.
- TAN Hua. Introduction to experimental shock-wave physics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 4-6.

Sub-microsecond Interferometry Diagnostic and 3D Dynamic Simulation of the Bridgewire Electrical Explosion

WANG Wan-jun¹, SUN Xiu-juan¹, ZHANG Lei², LEI Fan¹, GUO Fei¹, YANG Shuang¹, FU Qiu-bo¹

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Second Military Representative Office of Air Fore Equipment Department in Mianyang Area, Mianyang 621999, China)

Abstract: Electrical explosion of the thin golden wire is fundamental for the EBW detonator. In this paper, the expansion process of plasma generated in 0.04 mm wire explosion was captured using interferometry diagnostic. Moreover, the transient current during the electrical explosion was also measured in order to establish the connection between current and plasma expansion in time domain using a photoelectric transducer. 3D dynamic simulation of plasma expansion was conducted, in which JWL equation of state containing energy term was selected to describe the dynamic behavior of plasma. The results shows the simulation result was in good agreement with experimental results. And under the condition of 0.22 μF capacitor and 3900 V charging voltage, the expansion velocity of plasma reaches 8913 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, and then 3000-4000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ after travelling for 1.63 mm. The pressure of plasma is higher than 2.4 GPa. The satisfactory agreement between simulation and experiment indicates that the JWL equation of state is suitable for plasma generated in electrical explosion. The simulation results show that the change of the pressure and density of plasma with travelling distance could be described using polynomial function. The result in this paper was able to give more insight of the mechanism of EBW detonator and thus provide suggestions for the design of the EBW detonator.

Key words: sub-microsecond; electric explosion; expansion; interferometry diagnostic; dynamic simulation; JWL equation of state

CLC number: TJ55; O384; O381

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018336

(责编:姜梅)