

文章编号:1006-9941(2019)06-0481-06

桥丝电爆炸过程中的电磁脉冲效应

赵丽君^{1,2}, 易涛¹, 朱宏娜², 付秋菠³, 孙秀娟³, 杨爽³, 郑万国¹, 江少恩¹

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999; 2. 西南交通大学物理学院, 四川 成都 610031; 3. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 金属桥丝爆炸实验中,金属桥丝是否完全电起爆对火工品能否正常发火十分重要,为此,提出了一种通过电磁脉冲辐射效应来判断桥丝起爆状态的方法,利用天线探测金属桥丝在起爆中的电磁脉冲信号,并对其进行分析以判断桥丝起爆状态。研究结果表明,完全电起爆和不完全电起爆状态产生的电磁脉冲在持续时间和辐射频谱上存在显著差异。当桥丝完全电起爆时,金属桥丝初始加热阶段的电磁效应和本征爆炸阶段的电磁效应产生的电磁信号持续时间短,等离子体阶段的电磁效应产生的电磁信号持续时间长,电磁脉冲信号中包括90~100 MHz高频电磁辐射;当桥丝没有完全电起爆时,金属桥丝初始加热阶段的电磁效应和本征爆炸阶段的电磁效应产生的电磁信号持续时间长,等离子体阶段的电磁效应产生的电磁信号持续时间短,电磁脉冲信号的频率主要集中在40 MHz以下的低频区域。

关键词: 电起爆;桥丝;电磁特性;天线

中图分类号: TJ5; TQ560.72

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018357

1 引言

金属桥丝是电雷管的重要部件,它安全性高、抗干扰能力强,已经受到国内外研究人员的广泛关注^[1]。金属桥丝电起爆状态对火工品的发火状态尤为重要。目前爆炸桥丝的研究主要集中在静电放电对火工品的危害和对其性能的影响,电路模拟静电对桥丝式火工品的危害^[2-5],以及金属桥丝起爆系统的性能检测与优化、仿真模拟^[6-8]。对电起爆状态的判断目前研究报道较少。褚恩义等^[9]利用Tucker的格尼能公式对电起爆状态的诊断进行了计算,通过理论计算和实验验证获得了冲击片冲击起爆的判断公式,但是Tucker的格尼能公式需要一定的经验修正,影响计算精度。谭迎新^[10]通过对爆炸后产生的碎片在药柱上产生的凹痕深浅来判断起爆状态,测量起爆后在铝鉴定块上产生

的凹痕深度,并与已知的临界深度对比,判断爆炸情况。这两者方法操作复杂,没有办法实现快速的、实时的远距离在线判别。

金属桥丝起爆的原理^[11]是,起爆装置产生脉冲大电流并注入到桥丝上,在高密度脉冲电流作用下桥丝迅速释放能量产生电爆炸,金属桥丝在脉冲大电流作用下发生固态-液态-气态的转变形成高温高压等离子体,脉冲电流通过导体和由自由电子、带电粒子组成的等离子体产生的电磁效应会发射电磁脉冲。桥丝电爆炸过程中产生的电磁脉冲辐射,有可能通过测量电磁脉冲辐射信号实现桥丝起爆状态的判断,为起爆实验提供诊断信息。因此为了研究金属桥丝电爆炸过程中产生的电磁辐射特性,本研究主要通过天线探测金属桥丝起爆过程中产生的电磁信号,对金属桥丝电爆炸过程中产生的电磁信号进行采集研究,对比不完全起爆和完全起爆时产生的电磁辐射特性,完成金属桥丝电爆炸程度的判断。

2 实验部分

2.1 仪器与材料

实验布局图如图1所示,包括高压电源、桥丝、示

收稿日期:2018-12-21;修回日期:2019-01-28

网络出版日期:2019-04-25

作者简介:赵丽君(1995-),女,硕士研究生,主要从事激光辐照材料的电磁特性研究。e-mail:1944651748@qq.com

通信联系人:易涛(1980-),男,副研究员,主要从事电磁脉冲辐射研究。e-mail:yitao2008@caep.cn

引用本文:赵丽君,易涛,朱宏娜,等.桥丝电爆炸过程中的电磁脉冲效应[J].含能材料,2019,27(6):481-486.

ZHAO Li-jun, YI Tao, ZHU Hong-na, et al. Electromagnetic Pulse Effect During the Bridge Wire Electric Explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(6):481-486.

波器、天线、罗果夫斯基线圈和高压探头等。实验中采用的爆炸桥丝的材料为金丝,纯度 99.99%。高压电源型号 PS350/5000 V-25 W, 加压范围 0~5000 V, 放电电流正弦波。天线为直径 35 mm, 高度 26.5 mm, 等效作用面积 306.25π , 频率为 0.005~12 GHz 的宽带全向型天线^[12]。天线的方向性模拟如图 2 所示, 天线在水平方向增益高, 在垂直方向增益低, 在水平方向上天线全向型好, 对各个方向的电磁信号均能接收。示波器型号 Tektronix DPO7014, 带宽 1 G, 最高采样率 $40 \text{ GS}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

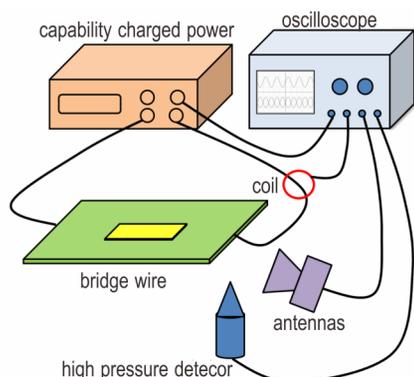


图 1 桥丝电爆炸电磁效应测量实验布局图

Fig.1 The schematic for the experimental setup of the bridge wire electric explosive for testing the electromagnetic effect

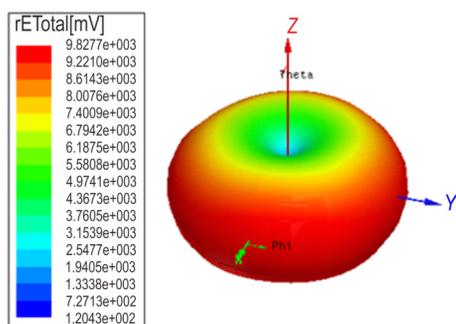


图 2 宽带天线方向性仿真图

Fig.2 The simulation diagram for the directionality of the broadband antenna

2.2 实验原理与步骤

采用罗果夫斯基线圈测量电爆炸过程中的爆发电流, 高压探头测量爆发电压。实验中将天线水平侧向爆炸桥丝放置, 距离爆炸桥丝 2 cm, 通过天线测量电爆炸过程中产生的电磁辐射信号, 示波器记录存储数据, 电压和电流通道示波器接 1000 倍衰减。实验前对电起爆装置的电爆特性进行测量, 电起爆装置的短路电流曲线如图 3 所示, 测试时充电电压为 1000 V, 电容容量为 $0.22 \mu\text{F}$, 放电周期为 $1.79 \mu\text{s}$ 。根据 R-L-C

放电曲线^[12], 可以获得回路的电阻为 $229 \text{ m}\Omega$, 电感为 364 nH 。通过对比不同加载电压下电爆炸过程中产生的电压、电流和电磁辐射, 分析不同加载电压下产生的信号特性与电爆炸状态的关系, 最终实现电爆炸状态的判断。保持爆炸桥丝材料、天线放置取向不变、仅改变起爆电压进行验证实验。

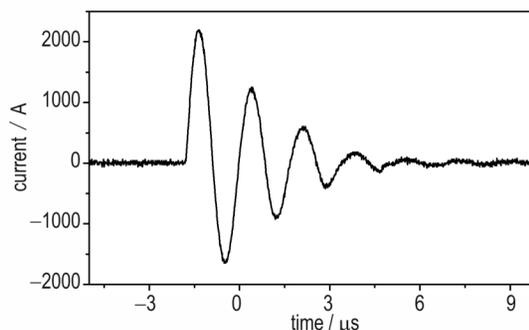


图 3 电起爆装置的短路电流曲线

Fig.3 The discharging current curve of circulation

3 结果与讨论

3.1 电爆炸状态判断及电磁信号与电爆炸过程的对应关系

为研究金属桥丝电爆炸过程中产生的电磁辐射信号与电爆炸程度之间的关系, 对金属桥丝电爆炸过程中产生的电磁信号进行记录分析。桥丝电爆炸一般发生在电流的上升阶段, 桥丝在脉冲大电流的作用下产生焦耳热, 桥丝由固态变为液态最后转化为气态, 电阻迅速增大, 当桥丝的电阻达到最大值时, 电压也到达峰值, 发生爆炸。图 4 为加载电压 500 V 和 1000 V 时, 金属桥丝电爆炸过程中产生的电流、电压以及电磁脉冲信号。由图 4a 可知, 在加载电压为 500 V 时, 金属桥丝的电压峰值出现在第 $0.743 \mu\text{s}$, 而电流的峰值出现在第 $0.502 \mu\text{s}$, 电压峰严重滞后于电流峰, 能量转换率低, 金属桥丝起爆需要更高的加载电压。由图 4b 可知, 在加载电压为 1000 V 时, 金属桥丝的电压峰值出现在第 $0.385 \mu\text{s}$, 而电流的峰值出现在第 $0.335 \mu\text{s}$, 电压峰略微滞后于电流峰, 能量转换率高。所以在加载电压为 500 V 时, 加载电压过低, 金属桥丝电爆炸不充分; 加载电压为 1000 V 时, 金属桥丝电爆炸充分, 完全起爆。

从图 4 看, 电磁脉冲辐射分为三个阶段, 对应图中的 1, 2, 3。第一个阶段(1)由桥丝的加热初始阶段^[14-16]产生, 此时脉冲强电流刚被加载到金属桥丝上, 桥丝等效于一个微波天线, 在脉冲强电流的激励下向空间辐

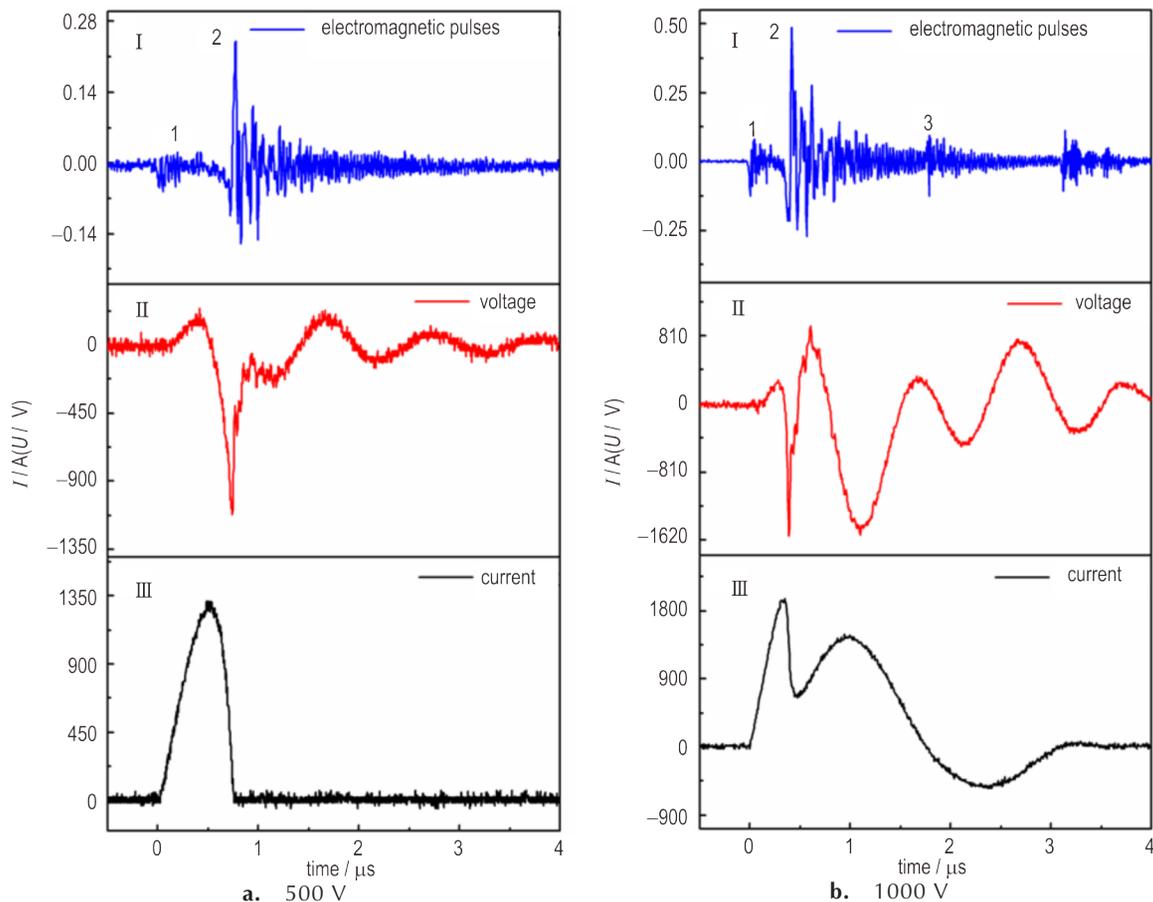


图4 加载电压500 V时和加载电压1000 V时的信号

Fig.4 Tested signals at 500 V and 1000 V charged voltages

射电磁信号,此阶段的特点是金属桥丝膨胀不明显,电磁脉冲频率低;第二个阶段(2)由桥丝的本征爆炸阶段^[14-16]产生,此阶段金属桥丝电阻显著增大一直到发生爆炸,电压峰值出现的起爆时刻产生强烈的等离子体辐射,其特点是产生电磁脉冲幅值大,频率较高,持续时间较短;第三个阶段(3)由等离子体阶段^[14-16]产生,此阶段气化的金属在持续加载的电流的作用下发生电离形成高浓度的等离子体,此时的等离子体运动速度快产生的电磁脉冲频率高,持续时间较长。

3.2 不同起爆状态下电磁信号的特性

由图4a可以看出,在不完全起爆状态下,桥丝的加热初始阶段(第一个电磁脉冲到第二个电磁脉冲)产生的电磁脉冲辐射持续时间为 $0.27\ \mu\text{s}$,桥丝的本征爆炸阶段(第二个电磁脉冲到第二个电磁脉冲峰值的十分之一)产生的电磁脉冲辐射持续时间为 $2.1\ \mu\text{s}$ 。在完全电起爆状态下,桥丝的加热初始阶段(第一个电磁脉冲到第二个电磁脉冲)产生的电磁脉冲辐射持续时间为 $0.18\ \mu\text{s}$,桥丝的本征爆炸阶段(第二个电磁脉冲

到第三个电磁脉冲)产生的电磁脉冲辐射持续时间为 $1.34\ \mu\text{s}$,桥丝的等离子体阶段(第三个电磁脉冲到第三个电磁脉冲峰值的十分之一)产生的电磁脉冲持续时间为 $2.08\ \mu\text{s}$ 。当加载电压较小时,能量转化率低,桥丝初始加热阶段持续时间长,能量都被耗费在加热内能上,电阻增大慢,产生的电磁脉冲频率低。当加载电压较大时,能量转化率高,桥丝初始加热阶段持续时间短,本征爆炸阶段电阻迅速增大,桥丝在脉冲强电流的作用下气化产生高浓度的等离子体,带电粒子之间碰撞电离,产生的电磁脉冲频率高。当桥丝完全电起爆时,金属桥丝初始加热阶段和本征爆炸阶段产生的电磁信号持续时间短,等离子体阶段产生的电磁信号持续时间长;当桥丝没有完全电起爆时,金属桥丝初始加热阶段和本征爆炸阶段产生的电磁信号持续时间长,等离子体阶段产生的电磁信号持续时间短。

3.3 不同起爆状态下电磁信号的频率特性

图5是加载电压为500 V时、加载电压为1000 V时以及空载条件下的电磁脉冲辐射的频率对比。空载

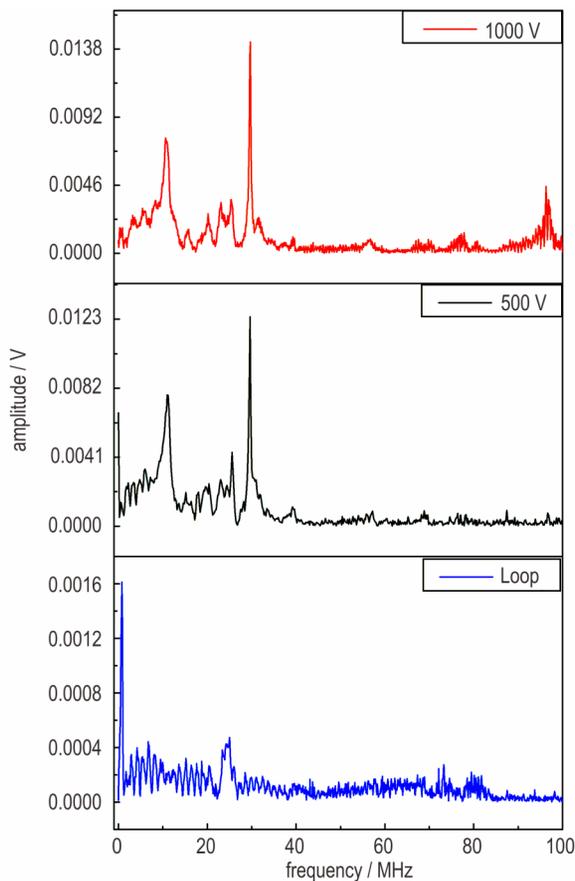


图5 加载电压500 V和加载电压1000 V和空载情况下的电磁场频谱对比

Fig. 5 Comparison of the electromagnetic field spectrum with load voltage of 500 V, 1000 V and no-load conditions

是指没有加载爆炸桥丝的情况下,回路产生的电磁脉冲辐射。由图5可知,在空载情况下,电磁脉冲频率极低,电磁频谱在5.8 MHz处出现峰值,幅度为0.001 V;加载电压为500 V时,电磁脉冲仅在低频区域出现两个峰值,频率分别10.7 MHz和29.6 MHz,幅度分别为0.0072 V和0.0125 V;加载电压为1000 V时,电磁脉冲在低频区域有两个峰值,高频区域有一个峰值,低频区域频率分别为10.8 MHz和29.7 MHz,幅度分别为0.008 V和0.0143 V,高频区域频率为96.3 MHz,幅值为0.0045 V。金属桥丝电爆炸过程中出现的第一个电磁频率峰值对应着电爆过程中的金属桥丝的初始加热阶段,是由脉冲强电流加载到金属桥丝上产生的空间电磁辐射,此时的电磁脉冲频率,幅值小;金属桥丝电爆炸过程中出现的第二个电磁频率峰值对应着电爆炸过程中的本征爆炸阶段,是电压达到峰值时产生的强烈的等离子体辐射,此时的电磁脉冲频率较高,幅值也比第一阶段大;金属桥丝电爆炸过程中出现的第三个电磁频率峰值对应着电爆炸过程中等离子体阶段,此时产生的等离子体浓度高,运动速度快,产生的电磁脉冲频率高。通过对电磁场频域的分析,可以判断爆炸桥丝起爆系统的状态。没有完全起爆时,电磁辐射频率较低,主要集中在40 MHz以下;完全起爆时,电磁辐射出现较高频成分,除了40 MHz以下的电磁辐射还存在100 MHz的较高频电磁辐射。

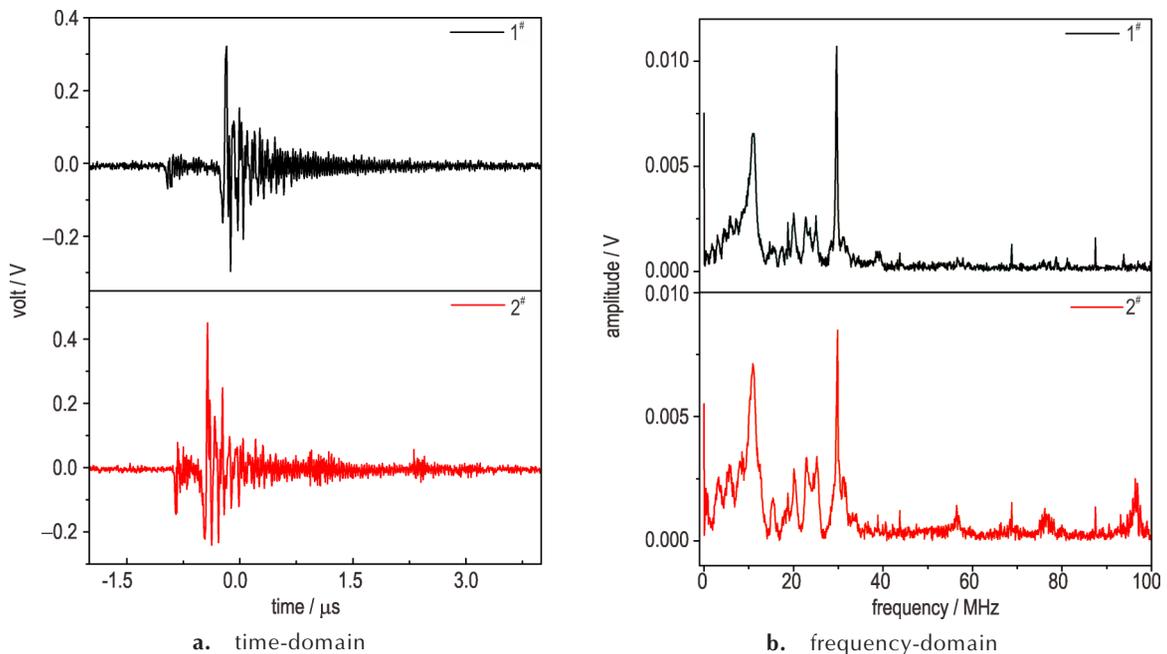


图6 加载电压为400 V和加载电压为1200 V时的电磁场信号对比图

Fig. 6 Comparison of electromagnetic field signals with load voltage of 400 V and 1200 V

3.4 桥丝电爆炸电磁判断法的实验验证

根据爆炸桥丝起爆过程中电磁辐射特性的特点,又进行了验证实验。即保持爆炸桥丝材料、天线放置取向、罗果夫斯基线圈和高压探头的测量位置不变,分别在起爆电压为1200 V和400 V的情况下对其他两组爆炸桥丝的爆炸状态进行了判断,如图6所示。图6a是1#和2#桥丝的爆炸瞬间的时域信号,图6b为1#桥丝和2#桥丝的爆炸瞬间的频域信号。从图6a可以看出,1#桥丝的加热初始阶段产生的电磁脉冲辐射持续时间为0.25 μs ,桥丝的本征爆炸阶段产生的电磁脉冲辐射持续时间为2.2 μs ,2#桥丝的加热初始阶段产生的电磁脉冲辐射持续时间为0.17 μs ,桥丝的本征爆炸阶段产生的电磁脉冲辐射持续时间为1.3 μs ,桥丝的等离子体阶段产生的电磁脉冲持续时间为2.02 μs 。从图6b可以看出,1#桥丝频率主要集中在10~30 MHz的低频区域,频率分别为10.9 MHz和29.6 MHz,2#桥丝频率分为两个阶段,第一阶段是10~30 MHz的低频区域,频率分别为10.9 MHz和29.8 MHz,第二阶段是90~100 MHz的高频区域,频率为96.8 MHz。根据爆炸桥丝起爆过程中电磁辐射特性的特点可以判断,1#的加载电压为400 V,桥丝未完全起爆;2#的加载电压为1200 V,桥丝完全起爆。

4 结论

研究了爆炸桥丝起爆过程中的电磁脉冲辐射效应,通过对爆炸过程中电磁脉冲效应时域和频域的分析,证明可以通过起爆瞬间产生的电磁脉冲的持续时间和频率范围实现爆炸状态的判断。实验发现,(1)金属桥丝没有完全电起爆时,产生的电磁脉冲频率低,集中在10~40 MHz范围内;金属桥丝完全电起爆时产生的电磁脉冲出现高频成分,主要集中在90~100 MHz范围内。(2)金属桥丝没有完全电起爆时初始加热阶段和本征爆炸阶段产生的电磁脉冲持续时间长,等离子体阶段的电磁效应产生的电磁信号持续时间短;金属桥丝完全电起爆时初始加热阶段和本征爆炸阶段产生的电磁辐射持续时间短,等离子体阶段产生的电磁辐射持续时间长。本次实验为冲击片雷管起爆系统的起爆状态的判断提供了依据,为进一步的等离子体演化的详细过程的电磁特性分析提供了实验基础,为复杂环境的起爆诊断提供了思路。

参考文献:

- [1] 付秋菠, 蒋小华, 郭菲, 等. 爆炸箔尺寸对飞片速度的影响[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 434-436.
FU Qiu-bo, JIANG Xiao-hua, GUO-fei, et al. Effect of exploding foil size on flyer velocity [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 434-436.
- [2] 李志鹏, 张攀军, 吕子剑, 等. 爆炸桥丝火工品的高压静电放电响应[J]. 含能材料, 2015, 23(6): 578-582.
LI Zhi-peng, ZHANG Pan-jun, LÜ Zi-jian, et al. Response to high voltage electrostatic discharge for exploding bridgewire detonators [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(6): 578-582.
- [3] 赵彦, 曾庆轩, 梁琦. 电爆炸桥箔电导率模型研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(8): 902-906.
ZHAO Yan, ZENG Qing-xuan, LIANG-Qi. Study of theoretical model for conductivity of electric exploding foil [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(8): 902-906.
- [4] 于鸿源, 严楠, 陈树肖, 等. 基于电路仿真的桥丝式电火工品静电危害预测[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 682-687.
YU Hong-yuan, YAN-Nan, CHEN Shu-xiao, et al. Electrostatic hazard prediction of bridge wire explosive device based on the circuit simulation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(7): 682-687.
- [5] 李志鹏, 文雯, 吕子剑, 等. 静电放电对爆炸桥丝火工品作用性能影响研究[J]. 火工品, 2014(3): 6-9.
LI Zhi-peng, WEN Wen, LÜ Zi-jian, et al. Research on the effect of ESD on the performance of EBW [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014(3): 6-9.
- [6] 奥成刚, 任炜, 白颖伟, 等. 某桥丝电雷管抗高过载性能检测与加固设计[J]. 含能材料, 2012, 20(3): 349-354.
AO Cheng-gang, REN-Wei, BAI Ying-wei, et al. Performance determination and structure reinforced design of detonator in high acceleration overload environments [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(3): 349-354.
- [7] 李涛, 傅华, 谭多望, 等. 金属桥丝电爆炸及飞片驱动过程的计算[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1): 70-74.
LI-tao, FU-hua, TAN Duo-wang, et al. Calculation of metal bridge foil electric explosion and flying blade driving process [J]. *Explosion and Shock*, 2010, 30(1): 70-74.
- [8] 朱进初, 吴志勇. 爆炸桥丝起爆系统及其应用[J]. 测井与射孔, 2008(2): 76-78.
ZHU Jin-chu, WU Zhi-yong. Explosive bridge wire detonation system and its application [J]. *Logging and Perforating*, 2008(2): 76-78.
- [9] 褚恩义, 任西, 钱勇, 等. 爆炸箔冲击片起爆设计参数研究[J]. 火工品, 2008(3): 26-27.
ZHU En-yi, REN Xi, QIAN Yong, et al. Study on design parameters of explosive foil impactor detonation [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(3): 26-27.
- [10] 谭迎新, 张景林, 谭汝媚. 飞片冲击起爆炸药的爆炸判据研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2005, 26(5): 348-350.
TAN Ying-xin, ZHANG Jing-lin, TAN Ru-mei. Study on the explosion criterion of flyer [J]. *Journal of North University of China*, 2005, 26(5): 348-350.
- [11] 王窈, 孙秀娟, 郭菲, 等. Al/Ni爆炸箔电爆特性及驱动飞片能力研究[J]. 火工品, 2016(3): 5-8.
WANG Yao, SUN Xiu-juan, GUO Fei, et al. Study on electrical characteristic and flyer driven ability of Ni/Ni exploding

- foil[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016(3): 5-8.
- [12] YANG Jin-wen, LI Ting-shuai, YI Tao, et al. Electromagnetic pulses generated from laser target interactions at shenguang II laser facility [J]. *Plasma Science and Technology*, 2016, 18 (10): 1044-1048.
- [13] 黄娜,唐洪佩,黄寅生,等.冲击片雷管爆炸箔的制备与电爆炸性能[J].含能材料,2014(4):514-520.
HUANG Na, TANG Hong-pei, HUANG Yin-sheng, et al. Preparation and electrical performance of exploding foil in slapper detonator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014(4): 514-520.
- [14] 李业勋.金属丝电爆炸机理及特性研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2002.
LI Ye-xun. Study on the mechanism and characteristics of electrically exploding wire [D]. *China Academy of Engineering Physics*, 2002.
- [15] 曾庆轩,袁士伟,罗承沐,等.新型电爆炸箔系统电压对爆发电流影响的实验研究[J].火工品,2002(1):41-42.
ZENG Qing-xuan, YUAN Shi-wei, LUO Cheng-mu, et al. Study to the effect of the voltage of a new type of exploding foil initiator system to firing current [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2002(1): 41-42.
- [16] 赵军平,张乔根,周庆,等.铝丝电爆炸过程的光学诊断[J].强激光与粒子束,2012,24(3):544-548.
ZHAO Jun-ping, ZHANG Qiao-gen, ZHOU Qing, et al. Optical diagnosis of electrical explosion process of aluminum wire [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24 (3) : 544-548.

Electromagnetic Pulse Effect During the Bridge Wire Electric Explosion

ZHAO Li-jun^{1,2}, YI Tao¹, ZHU Hong-na², FU Qiu-bo³, SUN Xiu-juan³, YANG Shuang³, ZHENG Wan-guo¹, JIANG Shao-en¹

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. Southwest Jiaotong University, Institute of Physics, Chengdu 610031, China; 3. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: Since it is important to judge the metal bridge wire completely detonated whether or not in the metal bridge wire explosion experiment, a method was proposed to judge the detonation state of the bridge wire by the electromagnetic pulse radiation effect. The electromagnetic pulse signal of the metal bridge wire during the detonation process was measured by the antenna, while the measured electromagnetic pulse signal was analyzed to judge the bridge wire detonation status. The electromagnetic pulse signal shows that the electromagnetic pulse generated by the complete detonation and the incomplete detonation state, has a significant difference in duration and radiation spectrum. When the bridge wire is completely detonated, the electromagnetic signal duration in the intrinsic explosion phase is short, and the electromagnetic signal generated in the plasma phase lasts long. The electromagnetic pulse signal includes high frequency electromagnetic radiation of 90 MHz to 100 MHz. When the bridge wire is not completely detonated, the electromagnetic signal generated during the intrinsic explosion phase lasts for a long time, while the electromagnetic signal generated during the plasma phase has a short duration. The frequency of the electromagnetic pulse signal is mainly concentrated in the low frequency region below 40 MHz.

Key words: electric detonation; bridge wire; electromagnetic characteristics; antenna

CLC number: TJ5; TQ560.72

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018357

(责编:姜梅)