

文章编号:1006-9941(2021)03-0241-10

TNT 爆炸电磁辐射信号测量及分析

崔元博,孔德仁,张学辉,王良全

(南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要: 为了提高爆炸场电子设备抗电磁干扰能力,对炸药爆炸产生的电磁辐射特性进行研究,设计一套基于超宽带无源全向天线和短波无源全向天线的电磁辐射测量装置,设置8个测试点进行60 kg TNT爆炸产生的电磁辐射测量实验和数据分析。结果表明,炸药爆炸产生的电磁辐射可持续至爆炸后600 ms,爆炸产生的电磁辐射信号最强烈的时段为爆炸后80~110 ms,爆炸产生的电磁辐射信号频率主要集中在100 MHz以下,其中50 MHz以下的低频段能量分布最为明显,爆心距离对电磁信号的频谱分布有明显影响,不同方向的电磁辐射频率分布不一致。爆炸产生的电磁辐射强度范围主要在64.33~348.25 V·m⁻¹,电磁辐射强度随爆心距离增大而递减,且递减幅度较大,不同方向的测试点测得的电磁辐射强度也有一定差距,相差范围在11.1%~17.7%。

关键词: TNT;电磁辐射;天线测量;信号分析**中图分类号:** TJ55; O389; O441.5; O536**文献标志码:** A**DOI:**10.11943/CJEM2020181

1 引言

炸药在爆炸时会产生较强的电磁辐射,不同强度或频率的电磁辐射会对一定范围内的电子设备(如无人机、引信装置、通信设备等)产生电磁干扰,严重时造成设备无法启动甚至损坏,引发事故。为了提升电子设备抗电磁干扰性能,有必要对炸药爆炸时产生的电磁辐射进行测量研究。

国外对炸药电磁辐射的研究较早,1954年Kolsky^[1]首先发现了炸药爆炸可以产生电脉冲这一现象,随后国外学者相继对该现象进行了实验研究。Boronin^[2-3]对凝聚炸药爆炸产生电磁场的物理机制进行研究,提出通过爆炸产生无线电辐射的机制与激波前沿的电离空气中某些电子基因的加速或减速过程有关,这一观点后被称作“Boronin效应”。Boronin等人的

工作首次详细阐述了炸药爆炸产生电磁辐射的机理,并给以后相关研究指引了方向。A.L.Kuhl等^[4]对TNT产生电磁波的机理进行了阐述,认为电离原子、离子和电子的运动是产生爆炸电磁波现象的原因,爆轰产物的膨胀在周围空气中引起强烈的震动,形成了持续时间约20 μs的强烈热波(约11000 K),这样的温度使空气产生明显的电离作用,离子斑块的运动产生电流,这些电流产生电场和磁场。另外,Kuhl^[5]对TNT爆炸的数值模拟来研究这些运动的影响,采用高阶Godunov公式对一维气体动力学守恒定律进行积分,通过一个非常精细的网格化(10 μm)来获得收敛的温度和电导率剖面,用于预测TNT爆炸产生的三维电磁波。

国内对含能材料电磁辐射的研究起步较晚,1997年陈生玉^[6]对20~120 g带壳装药爆炸电磁辐射进行了研究,发现电磁脉冲的最大幅值随药量的增大而增大。此后十年间国内没有相关研究报道,2014年王长利等^[7]对36~128 g B炸药和梯黑铝两种典型炸药爆炸过程的电磁辐射进行了研究,测得这两种炸药爆炸产生的电场强度范围为0.39~1.75 V·m⁻¹,单一测试点的辐射强度与炸药当量的1/3次方呈线性关系,信号持续时间约0.5 μs,电磁辐射信号频段主要集中在100 MHz以下,不同种类的炸药爆炸产生的频谱特征明显不同,但由于实验样本较少,未能给出电磁辐射与

收稿日期:2020-07-10;修回日期:2020-11-06

网络出版日期:2021-01-26

基金项目:国防科工局技术基础科研项目(995-14021006010401);国家自然科学基金(11372143)

作者简介:崔元博(1991-),男,博士研究生,主要从事爆炸电磁辐射测量及信号分析研究。e-mail:cyb6226@njust.edu.cn

通信联系人:孔德仁(1964-),男,教授,主要从事测试计量及仪器研究。e-mail:derenkong@hotmail.com

引用本文:崔元博,孔德仁,张学辉,等. TNT爆炸电磁辐射信号测量及分析[J]. 含能材料,2021,29(3):241-250.

CUI Yuan-bo, KONG De-ren, ZHANG Xue-hui, et al. Measurement and Analysis of Electromagnetic Radiation Signals of TNT Explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(3):241-250.

测点距离和炸药当量的明确关系公式。栗建桥等^[8]针对爆炸对自然磁场扰动进行理论机理和数值模拟研究,发现了炸药起爆参数对磁场扰动有很大影响,指出炸药几何不对称的时候,在自然磁场取不同方向时将会产生不同的磁场扰动强度,不同种类工况模拟得到的磁场扰动幅值不同,这一研究成果在相关领域尚且无人关注,具有较高的创新价值。任会兰等^[9]对4.5, 6.0, 7.5 kg的B炸药爆炸过程中产生的电磁辐射进行测量,捕捉到了三个脉冲信号,发现第一个脉冲信号是爆轰产生的高温高压等离子体直接产生的电磁脉冲,其到达时间对炸药药量不敏感;第二个脉冲信号是空气冲击波阵面处形成的等离子体产生的电磁脉冲,其出现时间与炸药当量呈指数关系,药量越大出现时间越晚;第三个脉冲信号是冲击波撞击测量线圈引起的无效信号,电磁信号频谱主要分布在0~50 kHz。

从国内外研究现状来看,对于炸药爆炸产生电磁辐射的研究,大多集中在10 kg以下,缺少大当量炸药电磁辐射相关研究,实验测试点较少,测试点分布较集中,对爆炸场的电磁分布特征缺乏分析。为此,本研究采用双天线协同测量及高速采集卡记录数据方式,对60 kg TNT爆炸产生的电磁辐射进行测量,利用信号降噪、傅里叶变换、补偿衰减等方法对电磁信号进行分析,得到了较为全面、完整、精确的爆炸电磁辐射特性,以期为爆炸场电子设备抗电磁干扰设计提供参考数据。

2 实验方法

采用短波天线和超宽带天线协同测量方法,覆盖

频段最高至500 MHz,使用高速采集卡记录数据,信号时域数据精确至 10^{-9} s,记录时长达810 ms。电磁辐射测量装置如图1所示,前端测试点由短波无源全向天线、超宽带无源全向天线、信号调理器组成,短波无源全向天线采样带宽为1.5~30 MHz,垂直极化方式,驻波比 ≤ 2.5 ,天线增益 ≥ -35 dBi(大于5 MHz),最大承受功率50 W,输出阻抗50 Ω ,高度2000 mm;超宽带全向天线为双锥加载结构,垂直极化方式,采样带宽为30~512 MHz,天线增益在30~100 MHz频段 ≥ -15 dBi,在0.1~3 GHz频段 ≥ 0 dBi,输出阻抗50 Ω ,高度450 mm;信号调理器为自主设计,具备合路器、信号放大器、限幅器三种功能,可以将两种不同采样频段天线输出的信号进行合路,同时将信号放大,放大系数为10 dB,限幅器功能是防止过高的信号功率对采集卡造成损坏,限制功率大于10 W。前端测试点通过同轴电缆(SYV50-5-1)与数据采集设备连接,采用SPECTRUM公司的M4x.2212型号高速采集卡记录数据,设置最高采样率 $1.25 \text{ GS}\cdot\text{s}^{-1}$,根据Nyquist采样定理,可采集最高500 MHz频率的信号,和天线采样带宽相匹配,采样时长设置810 ms,其中触发前采样时长10 ms,触发后采样时长800 ms。

炸药爆炸产生的电磁辐射实验受到炸药当量、引爆方式、化学成分以及地形和传播距离等影响,不同实验条件下产生的电磁脉冲频谱不同,电磁波的幅度变化范围也很大,实验成本和难度较高,实验重复性差^[10-12]。由于炸药爆炸时产生的电磁辐射呈现出以爆心为原点向四周发散的特点,测试获得的爆炸场单点电磁辐射参数并

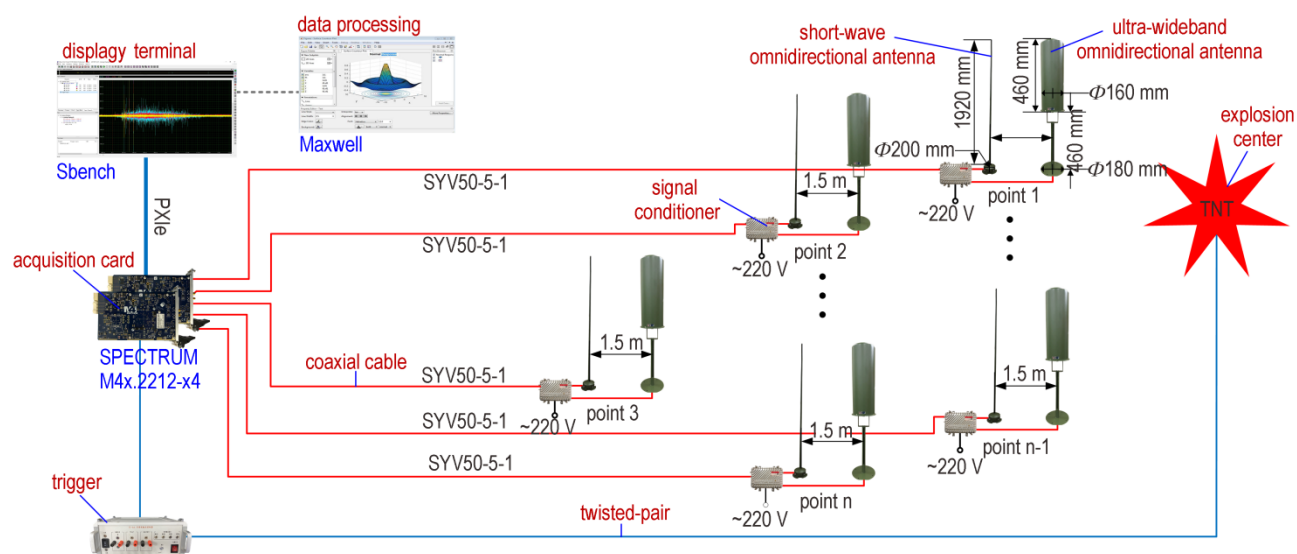


图1 炸药爆炸电磁辐射信号测量装置

Fig.1 Electromagnetic radiation signal measuring device of explosion

不具有代表性,有必要研究爆炸场环境下电磁辐射多点同步测试方法。测试点分布如图 2a 所示,根据被测工况的质量,参考相关实验所测得的炸药威力大小,考虑对天线等测量装置的保护^[13],将距离爆心最近的测试点 1 设置于 15 m 位置,其余测试点分成两条测试线,测试线 1 由测试点 2、3、4、8 组成,分布在爆心与掩体的连接线上,分别距离爆心 20,35,50,100 m,测试线 2 由测试点 5、6、

7 组成,分别距离爆心 20,35,50 m,测试线 1 和测试线 2 之间夹角为 45°。

炸药爆炸电磁测试实验现场如图 2b 所示,实验场地平坦开阔,测量设备按照图 2a 所示测点分布图进行安置,天线固定牢固,天线、信号调理器、同轴电缆之间连接处用锡箔纸进行屏蔽保护,强、弱电线电缆进行隔离防止弱电线电缆受到干扰,本实验对 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射进行测量。

3 结果与讨论

3.1 电磁辐射全时域及峰值信号

在实验开始前,首先测试实验场地电磁背景噪声,测得环境背景中的电磁信号最大电压 62.5 mV,平均电压 12.531 mV,电磁信号波形平稳无波动,可以认为实验场地电磁噪声对本次实验干扰极弱,可以进行爆炸电磁辐射实验,测得的电磁辐射信号如图 3 所示。

3.2 电磁辐射信号时域分析

从图 3 可以看出,60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射主要集中在起爆后 0~40 ms、70~170 ms、220~230 ms 等时间段,能量最集中时段为 80~110 ms,在 500 ms 之后则无明显电磁信号产生,各个测试点所采集到的电磁信号持续时间大体一致,时间分布有一定规律性,在所有测试点中,1、2、3、5 点所测得的电磁信号最为密集,测试点 8(掩体位置)的电磁信号持续时间最短,说明距离爆心的远近对电磁信号采集有影响,距离爆心越远,采集到的电磁信号持续时间越短,对于距爆心相同距离的测试点,不同的测试方向所测得的电磁信号持续时间也有所不同。

在采样周期内电磁信号延迟时间、峰值到达时间、持续时间是电磁信号时域分析的关键参数,通过 Sbench 数据处理程序可以非常精确地得到采样周期内的电磁信号峰值坐标,为了便于全面分析电磁信号时域特性,将电磁信号关键参数列于表 1。

从表 1 可知,所有测试点在起爆后的首次电磁信号均出现在 46~60 μs 附近,同等距离下,测试线 2 方向上的电磁信号比测试线 1 方向的电磁信号滞后 5~10 μs 。对比之前的研究,文献[1]的实验中炸药爆炸产生的电磁辐射最大值出现在爆炸后 50 μs 左右;文献[9]实验表明三个电磁脉冲信号和触发点的时间差分别为 0.019, 4.424 ms 和 20.514 ms;文献[14]的实验表明距离爆心 2 m 处的测试点测得的电磁辐射信号出现时刻在爆炸后 62~78 μs 。由此可以看出,尽管管理

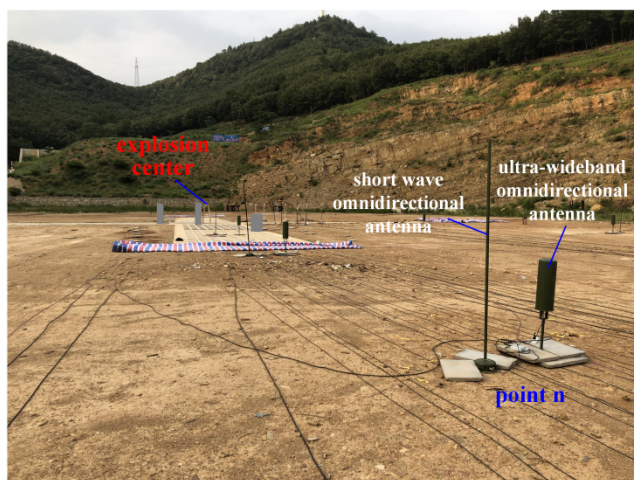
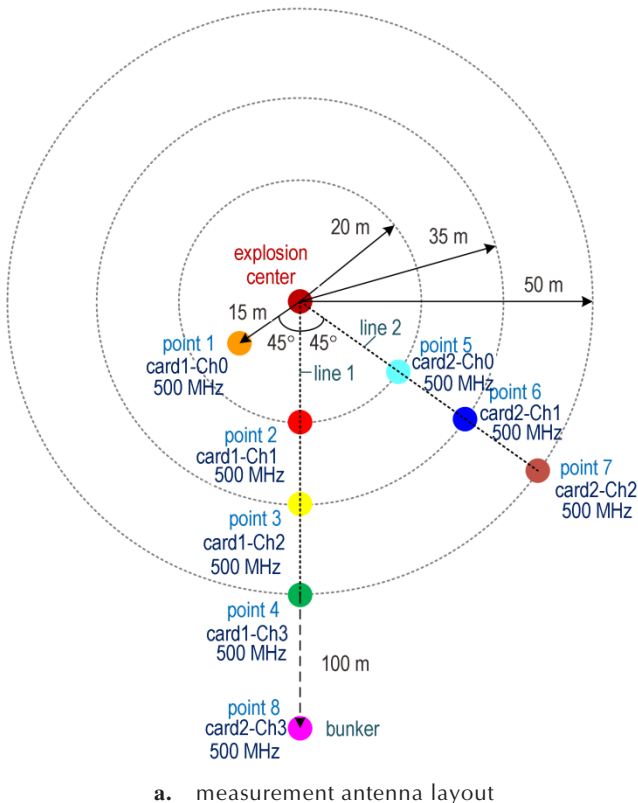
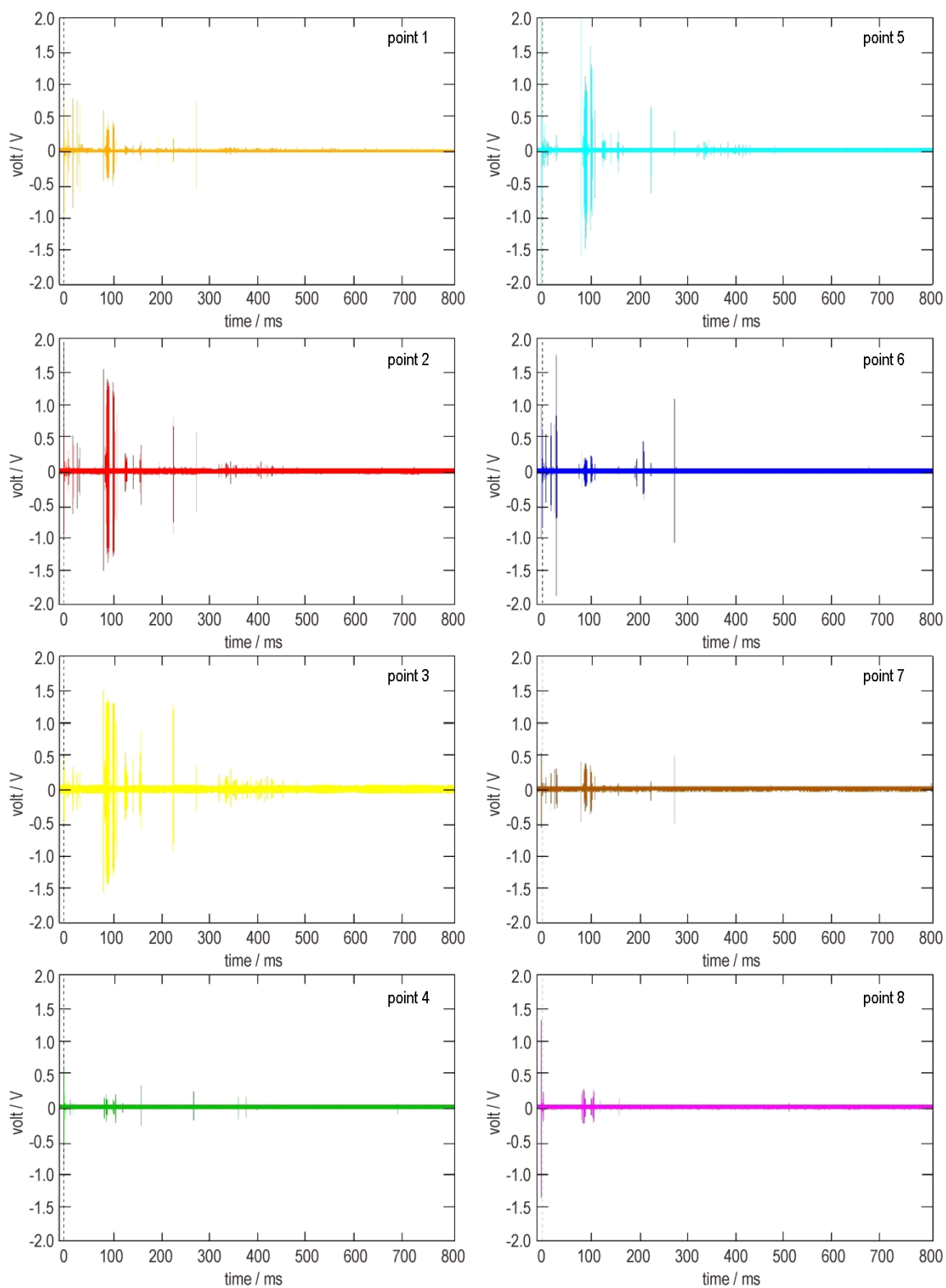
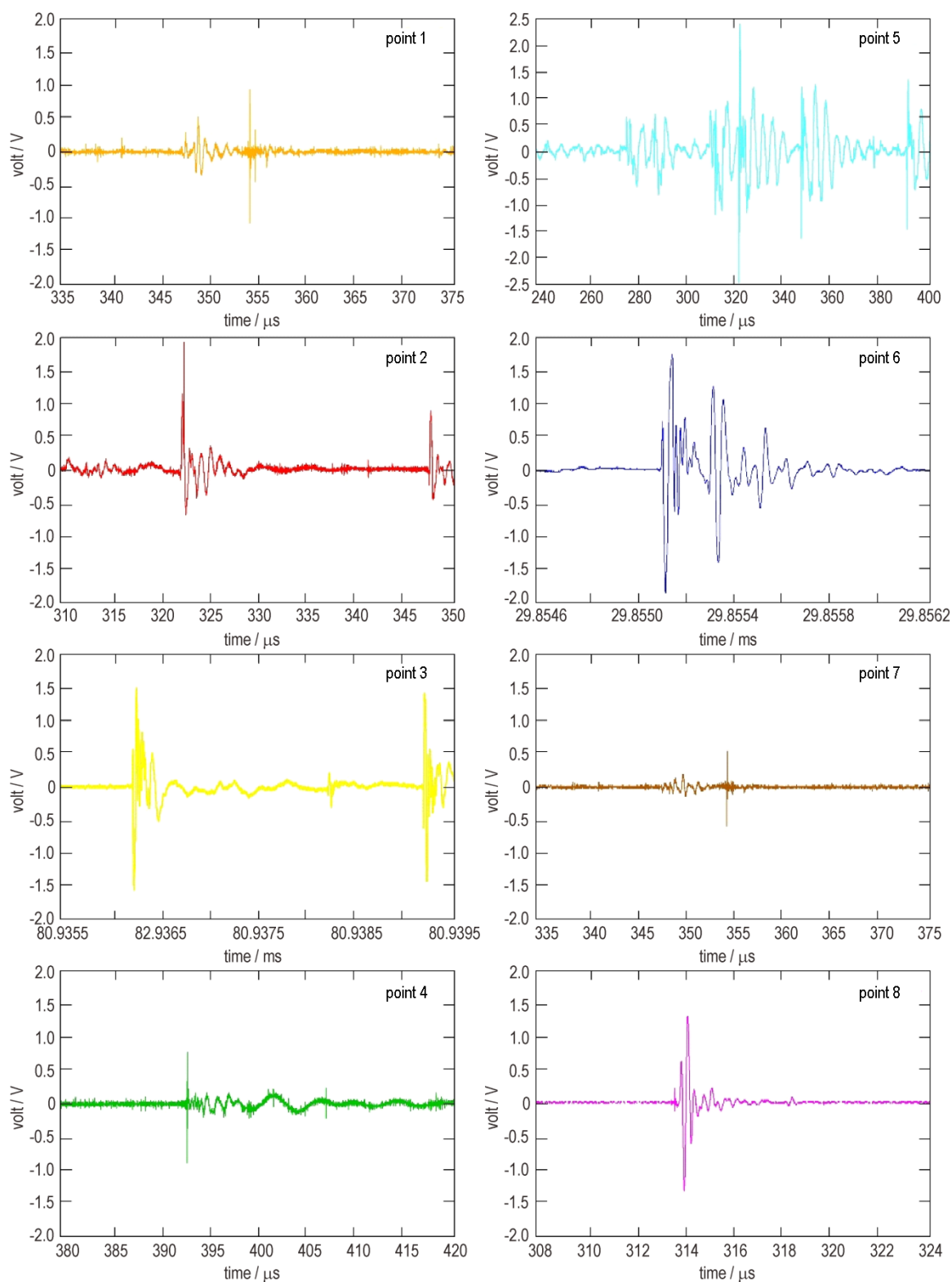


图 2 测量天线布局及实验现场图

Fig.2 Measurement antenna layout and experiment arrangement



a. overall signals of electromagnetic radiation



b. enlarged peak signals of electromagnetic radiation

图3 60kg TNT爆炸产生的电磁辐射信号及峰值信号放大图

Fig.3 Overall and enlarged peak signals of electromagnetic radiation generated by 60 kg TNT explosion

表1 60 kg TNT爆炸产生电磁辐射信号主要时间参数

Table 1 Main time parameters of electromagnetic radiation signals generated by 60 kg TNT explosion

test point	distance / m	duration time / ms	start time / μ s	peak arrival time / ms
point 1	15	85	52.731	0.354
point 2	20	105	51.632	0.322
point 5	20	70	51.532	0.322
point 3	35	91	51.890	80.936
point 6	35	91	60.981	29.855
point 4	50	25	46.185	0.392
point 7	50	66	61.506	0.354
point 8	100	25	46.493	0.314

论上电磁辐射信号与触发信号采样时间应该一致,但实际上各个实验所测的电磁信号延迟响应时间各不相同,说明炸药爆炸产生电磁辐射是一个复杂的过程,电磁信号的延迟响应时间受到炸药种类、质量、地形、测试系统等诸多因素影响。

各个测试点所测得电磁信号持续时间在25~105 ms,随着距离爆心越远,持续时间越短;大部分测试点所测的电磁信号峰值出现时间在爆炸后0.3~0.4 ms,但测试点3和测试点6测得电磁信号峰值出现时间在80.936 ms和29.855 ms,说明起爆后的相当一段时间内,爆炸场仍有可能产生较强的电磁辐射信号,这一点

与其它爆炸参量(冲击波、地震波、热流密度等)幅值随时间推移递减的规律明显不同^[15-16]。另外,此前国内学者对爆炸电磁辐射的研究主要集中于起爆后50 ms内,被测炸药均在10 kg以下,本研究测量了10 kg以上炸药爆炸产生的电磁辐射,并把采样时长扩展到800 ms,发现了炸药在起爆后数百毫秒时间依然可以采集到电磁信号,爆炸产生的电磁辐射具有持续性和间断性。

3.3 电磁辐射信号频域分析

炸药爆炸过程中电磁辐射的频谱分布是电磁信号分析中的重要参数,最常用的频谱分析方法为快速傅里叶变换,通过对电磁辐射信号进行快速傅里叶变换,可以得到该电磁信号的频谱分布,但是单纯的快速傅里叶变换会使幅度比较小的频点被覆盖。由于炸药爆炸产生的电磁辐射信号属于随机、未知被测信号,Hanning窗的泄露、波动都较小,选择性也较高,选用Hanning窗傅里叶变换对电磁信号进行处理。本次实验中,在爆炸之前采集了电磁环境背景噪声,由于实验场地进行了无线电屏蔽措施,与实验室相比,采集到的电磁环境背景噪声较低,对背景噪声信号进行db7小波基5层分解,将背景噪声信号中淹没的电磁信号提取出来^[17]。电磁辐射信号频谱分析过程如图4所示,通过对原始时域信号进行Hanning窗傅里叶变换得到图4a的原始频谱分布图,采用同样方法得到图4b的

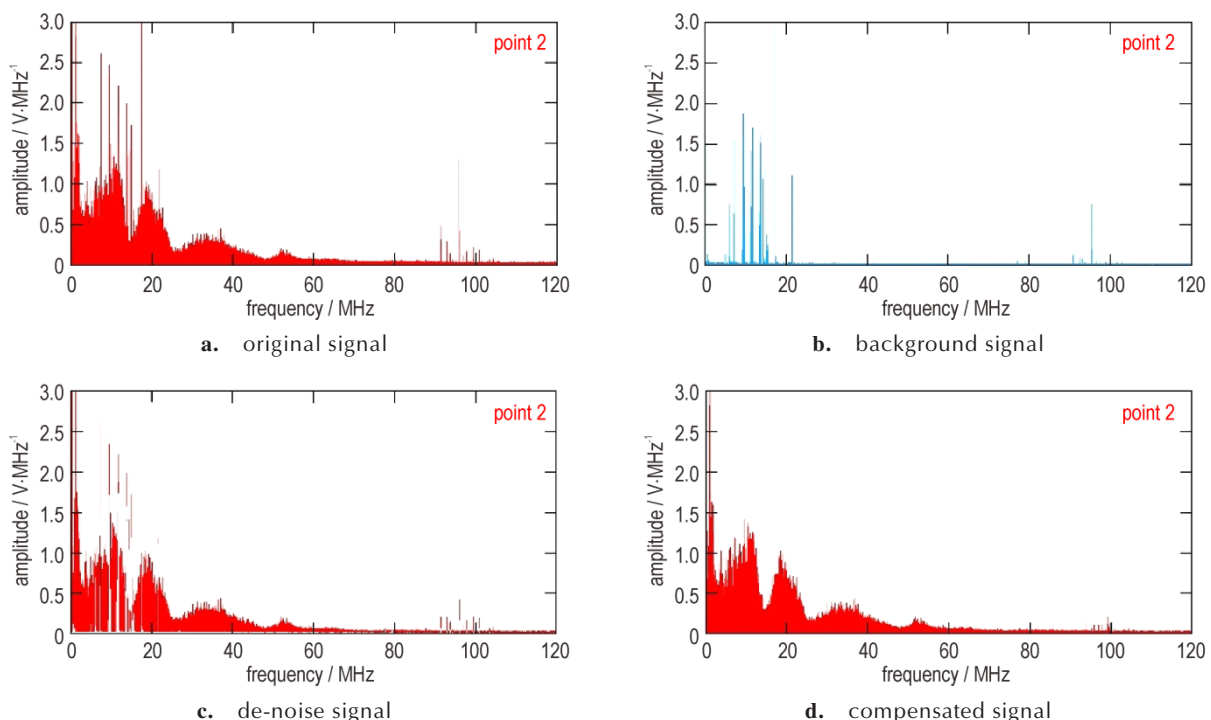


图4 电磁信号频谱处理图

Fig.4 Spectrum processing diagram of electromagnetic signal

背景噪声 FFT 频谱图,从原始频谱中滤除背景噪声频谱即可得到图 4c 的降噪频谱图,最后将提取处的背景噪声中的淹没信号补偿给降噪频谱图,得到图 4d 所示处理后的电磁频谱图。

通过对各个通道采集得到的电磁辐射信号进行处理,得到如图 5 所示的 60 kg TNT 爆炸电磁辐射频率分布图。由图 5 可知,60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射信号频率主要集中在 100 MHz 以下,不同测试点的频谱分布差距较大,各测试点电磁信号频谱参数如表 2 所示。

由此可见,距离爆心较近的测试点频谱分布范

围较大,在 0~100 MHz 频段内均有分布,距离爆心较远的测试点频谱分布范围较小,频段主要集中在 50 MHz 以内,距离爆心最远的测试点 8 频谱分布范围最小,能量最弱,说明距离远近对电磁信号的频谱分布有明显影响,在同等距离下,不同方向的电磁频率分布有一定差别,说明电磁辐射是呈不均匀分散传播的。文献[8]指出炸药爆炸时在自然磁场取不同方向时会产生不同的磁场扰动强度,本实验表明炸药爆炸后电磁辐射在不同方向的频谱分布是不均匀的,这一结果与文献[8]的数值模拟一致。

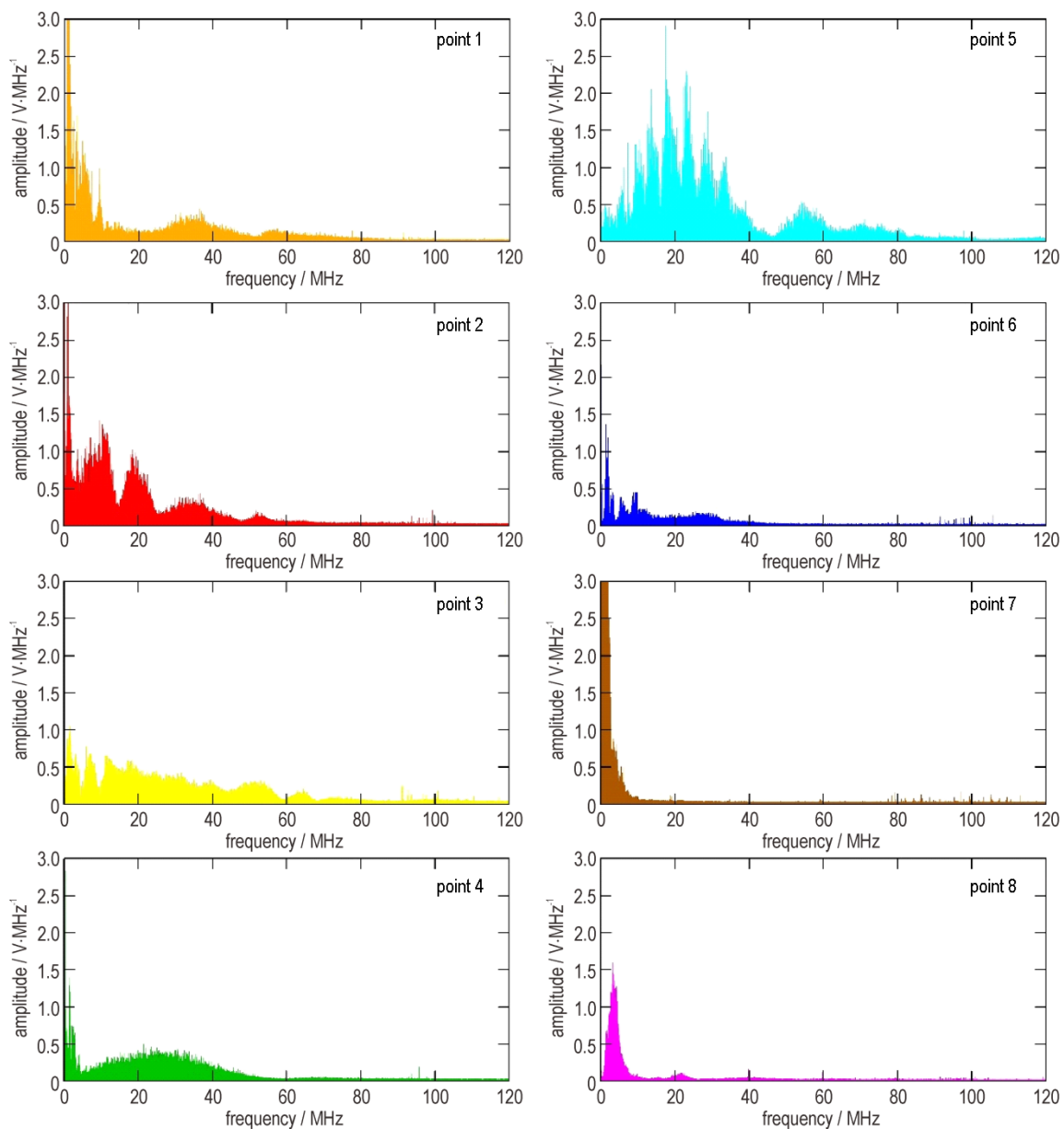


图 5 60 kg TNT 爆炸电磁辐射频谱分布

Fig.5 Spectrum distribution of electromagnetic radiation generated by 60 kg TNT explosion

表2 各测试点电磁信号频谱参数

Table 2 Spectrum parameters of electromagnetic signals at all test points

test point	frequency distribution / MHz	important spectrum / MHz
point 1	0-100	0-50
point 2	0-50, 90-105	0-25
point 3	0-60, 90-100	0-20
point 4	0-50	0-30
point 5	0-100	0-40
point 6	0-40	0-15
point 7	0-20	0-10
point 8	0-30	0-15

3.4 电磁辐射强度分析

电磁射频辐射危害主要包括防护位置、频谱特性、功率强度、信号时域特征、防护要求等内容,瞬态电磁危害环境分析主要包括防护位置、频段、强度等内容,其中电磁强度是电磁危害防护最重要的参考量值^[18-19]。本试验使用的炸药质量较大,爆炸能量较强,数据采集设备被放置于掩体中保护,数据采集设备与前端传感器(天线)之间距离较远,实验中采用SYV50-5-1型同轴电缆进线信号传输,同轴电缆总长为100 m,随着信号频率的增加,该型号同轴电缆的衰减率会逐渐增大,在实验数据处理中需进行衰减补偿和增益修正,同时考虑天线系数、天线增益、信号调理器增益和转接头损耗等因素,本实验装置修正参数如表3所示。

电磁测量系统前端电磁传感器(天线)的输出量是电压值,利用天线系数、等效功率值可以将电压值转换为电场强度 $E(\text{V}\cdot\text{m}^{-1})$,测量天线的输出电压为 $U(\text{V})$,经过校准计量的天线增益为 $G(\text{dB})$,天线系数为 AF

($\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$),则有^[20-21]:

$$\text{空间能流密度: } S = \frac{1}{2} E^2 / 120\pi \quad (1)$$

$$\text{天线有效面积: } A = G\lambda^2 / 4\pi \quad (2)$$

$$\text{天线接收功率: } P = S \cdot A = U^2 / 2Z_0 \quad (3)$$

式中, Z_0 为系统阻抗, $Z_0=50\ \Omega$,电磁波在真空中的传播速度为光速 $c(3.0\times 10^8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,电磁频率 $f(\text{Hz})$ 和波长 $\lambda(\text{m})$ 之间的关系满足: $\lambda=c/f$,利用这些关系可求得:

$$U = \frac{96.82}{\pi} E \sqrt{G} \frac{1}{f_M} \quad (4)$$

式中, f_M 单位为MHz。

天线系数 AF 表示:

$$AF = \frac{E}{U} = \frac{\pi f_M}{96.82 \sqrt{G}} \quad (5)$$

以 $AF(\text{dB})$ 表示则有:

$$AF = 20 \log f_M - 10 \log G - 29.78 \quad (6)$$

信号功率 $P(\text{dBm})$ 和空间场强的转换关系:

$$P = E - AF - 107 \quad (7)$$

式中, E 表示空间场强度, $\text{dBuV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

经过数据处理后的实验结果如表4所示,由表4可知,对于60 kg TNT爆炸产生的电磁辐射强度,除了掩体处测试点8测得的电磁辐射强度极小($4.43\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$)外,测试点1~7测得的电磁辐射强度在 $64.33\sim 348.25\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$,信号功率范围在 $12.727\sim 43.865\ \text{dBm}$,距离爆心最近(15 m)的测试点1测得的电磁辐射强度最大,为 $348.25\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$,测试线1上测试点2~4测得的电磁辐射强度从 $168.89\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 至 $75.74\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 依次递减,测试线2上测试点5~7测得的电磁辐射强度从 $151.99\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 至 $64.33\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ 依次递减。相比爆炸近场范围的电磁辐

表3 实验数据修正参数

Table 3 Experiment data correction parameters

frequency / MHz	antenna factor / $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	antenna gain / dB	signal conditioner gain / dB	coaxial cable attenuation / $\text{dB}\cdot(100\ \text{m})^{-1}$	splice loss / dB
1.5	17.30	-43.58	10	-2.10	-1.5
7	15.47	-33.37	10	-2.50	-1.5
10	13.35	-28.15	10	-2.71	-1.5
18	9.42	-20.12	10	-3.25	-1.5
30	7.23	-6.48	10	-4.03	-1.5
50	6.09	0.07	10	-5.45	-1.5
70	5.92	0.14	10	-6.24	-1.5
100	4.58	0.50	10	-7.79	-1.5
200	1.78	1.20	10	-11.79	-1.5
300	0.96	2.60	10	-14.49	-1.5

射强度,距离 100 m 处的测试点测得的电磁辐射强度极为微弱。对于相同距离、不同方向的测试点,其测得的电磁辐射强度也有一定差距,测试线 2 上测试点测得的辐射强度普遍比测试线 1 测得的强度低,相差范围在 11.1%~17.7%,相差不大但也进一步验证了爆炸

场电磁辐射传播的不均匀性质。60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射强度峰值达到 $348.25 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$,这一强度数值已经远远超过了 GJB 8678-2015 陆军用弹药装卸、装填和发射电磁辐射环境标准由此可见此类炸药爆炸产生的电磁辐射会对武器系统有不利影响。

表 4 60kg TNT 爆炸电磁辐射强度

Table 4 Electromagnetic radiation intensity generated by 60kg TNT explosion

test point	distance / m	peak voltage / V	effective voltage / V	signal power / dBm	electric field intensity / $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
point 1	15	1.074	34.895	43.865	348.25
point 2	20	1.914	20.468	39.231	168.86
point 5	20	2.500	18.881	38.530	151.99
point 3	35	1.563	15.841	37.005	130.68
point 6	35	1.875	14.168	30.714	114.05
point 4	50	0.898	9.181	32.268	75.74
point 7	50	0.585	4.214	25.504	64.33
point 8	100	1.348	0.968	12.727	4.43

4 结论

针对大当量炸药爆炸过程产生的电磁辐射现象,进行了 60 kg TNT 爆炸电磁辐射测量实验,通过对实验结果进行分析,得到如下结论:

(1) 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射可持续至爆炸后 600 ms,电磁脉冲主要集中在 0~300 ms,能量最集中时段为 80~110 ms,由于此前相关文献对该类实验的研究都局限于爆炸后数毫秒内,从未对 50 ms 后的电磁辐射进行测量,所以这一实验结果应当引起重视。

(2) 60 kg TNT 爆炸过程中,各个测试点在触发时刻后的电磁信号到达时间集中在 46~62 μs ,根据最近几年的相关研究,不同质量炸药爆炸过程中首次电磁辐射信号出现时间不同,但都集中在 100 μs 以内。

(3) 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射信号频率主要集中在 100 MHz 以下,距离爆炸越近的测试点测得的电磁信号频谱分布更宽,能量更强,电磁辐射信号在不同方向的频谱分布存在差异。

(4) 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射强度最大值为 $348.25 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$,电磁辐射强度呈现出与爆心距离较强的相关性,随着距离增大而递减,且递减幅度较大;对于相同距离、不同方向的测试点,其测得的电磁辐射强度也有一定差距,相差范围在 11.1%~17.7%。

参考文献:

[1] Kolsky H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives[J]. *Nature*, 1954, 173(4393): 77-77.

- [2] Boronin A P, Vel'Min V A, Medvedev Y A, et al. Experimental study of the electromagnetic field in the near zone of explosions produced by solid explosives[J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1968, 9(6):712-717.
- [3] Boronin A P, Kapinos VN, Krenev SA, et al. Physical mechanism of electromagnetic field generation during the explosion of condensed explosive charges[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1990, 26: 597-602.
- [4] Kuhl A L, White D A, Kirkendall B A. Electromagnetic waves from TNT explosions[J]. *Journal of Electromagnetic Analysis & Applications*, 2014, 6(10):280-295.
- [5] Soloviev S P. Generation of electric and magnetic field during detonation of high explosive charges in boreholes[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2005, 110(1):1-14.
- [6] 陈生玉, 孙新利. 化爆引起的电磁辐射[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(4): 363-368.
CHEN Sheng-yu, SUN Xin-li. Electromagnetic radiation caused by chemical explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(4):363-368.
- [7] 王长利, 李迅, 刘晓新, 等. 典型炸药爆炸过程的电磁辐射实验研究[J]. *兵工学报*, 2014, 35(增刊 2):188-192.
WANG Chang-li, LI Xun, LIU Xiao-xin, et al. The experimental research on the electromagnetic radiation aroused by detonation of explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2014(Suppl. 2): 188-192.
- [8] 栗建桥, 马天宝, 宁建国. 爆炸对自然磁场干扰机理[J]. *力学学报*, 2018, 50(5):238-250.
LI Jian-qiao, MA Tian-bao, NING Jian-guo. Mechanism of explosion-induced disturbance in natural magnetic field[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(5):238-250.
- [9] 任会兰, 储著鑫, 栗建桥, 等. B 炸药爆炸过程中电磁辐射研究[J]. *力学学报*, 2020, 52(4):1199-1210.
REN Hui-lan, CHU Zhu-xin, LI Jian-qiao, et al. Research on electromagnetic radiation during the explosion progress of composition b explosives [J]. *Chinese Journal of Theoretical*

- and Applied Mechanics, 2020, 52(4):1199-1210.
- [10] V.A.J. van Lint. Electromagnetic emission from chemical explosions[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, NS-29(6): 1844-1849.
- [11] 崔元博, 商飞, 孔德仁, 等. 爆炸场电磁辐射特性测试技术研究[J]. *火工品*, 2019(5):1-5.
CUI Yuan-bo, SHANG Fei, KONG De-ren, et al. Research on testing technology of electromagnetic radiation characteristics in explosive field[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2019(5): 1-5.
- [12] 戴晴, 李传庐, 陈国强, 等. 低温等离子体激励宽带电磁波信号的实验研究[J]. *电子信息对抗技术*, 2009, 24(5):72-74, 78.
DAI Qin, LI Cuan-lu, CHEN Guo-qiang, et al. Experimental study of wideband electromagnetic radiation from plasma cloud[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2009, 24(5): 72-74, 78.
- [13] Latter R, Karzas W J. Electromagnetic radiation from a nuclear explosion in space[J]. *Phys Rev*, 1962, 126(6): 40-47.
- [14] 陈鸿, 何勇, 潘绪超, 等. RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号特性实验研究[J]. *含能材料*, 2020, 28(5):475-482.
CHEN Hong, HE Yong, PAN Xu-chao, et al. Experimental study on characteristics of explosive electromagnetic radiation signals of RDX based aluminized explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2020, 28(5): 475-482.
- [15] 崔元博, 商飞, 孔德仁. 云爆弹爆炸电磁辐射测试试验研究[J]. *测试技术学报*, 2020, 34(2):99-103.
CUI Yuan-bo, SHANG Fei, KONG De-ren. Experimental study on electromagnetic radiation test of cloud explosion bomb[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2020, 34(2):99-103.
- [16] 曹景阳, 谢树果, 苏东林, 等. 航天火工品爆炸引起的电磁干扰测量[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(11):1384-1387.
CAO Jing-yang, XIE Shu-guo, SU Dong-lin, et al. Electromagnetic interference caused by aerospace explosives [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(11):1384-1387.
- [17] 麻智超, 谢树果, 曹景阳. 基于小波变换的聚能爆炸电磁辐射分析[J]. *火工品*, 2010(5):26-29.
MA Zhi-chao, XIE Shu-guo, CAO Jing-yang. Analysis of electromagnetic radiation from explosion of shaped charge by wavelet transform [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(5): 26-29.
- [18] 刘胜祥. 电场强度、接收电压、功率密度和接收功率之间的关系[J]. *微波与卫星通信*, 1994(4):38-41.
LIU Sheng-xiang. Relationship between electric field intensity, receiving voltage, power density and receiving power [J]. *Wireless Communication Technology*, 1994(4):38-41.
- [19] Xu S Z, Peng Y F, Li S . Suppression effectiveness research on multi-level EMI filter in thermal electromagnetic interactive filed of explosion-proof three-level NPC converter [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2019, 15:100510.
- [20] Jamshed M A, Fabien Hélot, Brown T W C. A survey on electromagnetic risk assessment and evaluation mechanism for future wireless communication systems[J]. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 2020, 4(1): 24-36.
- [21] 崔元博, 孔德仁. 某型弹静爆过程中电磁辐射频谱分析[J]. *火工品*, 2020(5): 18-22.
CUI Yuan-bo, KONG De-ren. Analysis of electromagnetic radiation spectrum of a certain type of bomb during static explosion[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(5):18-22.

Measurement and Analysis of Electromagnetic Radiation Signals of TNT Explosives

CUI Yuan-bo, KONG De-ren, ZHANG Xue-hui, WANG Liang-quan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the anti-electromagnetic interference capability of the electronic equipment on blast field, the characteristics of electromagnetic radiation generated by high explosive were studied. An electromagnetic radiation measurement device based on ultra-wideband omnidirectional antenna and shortwave omnidirectional antenna was designed while 8 test points were set up for electromagnetic radiation measurement of 60 kg TNT explosion. The experimental results show that the electromagnetic radiation signals generated by TNT explosion last up to 600 ms after the explosion, the most intense period of electromagnetic radiation signal produced by TNT explosion is from 80 ms to 110 ms after the explosion. The frequency of the electromagnetic radiation signals generated by the explosion is mainly concentrated below 100 MHz, where the energy distribution in the low frequency band which below 50 MHz is the most obvious. The distance of the center of explosion has a significant effect on the spectrum distribution of electromagnetic signals, and the frequency distribution of electromagnetic radiation in different directions was inconsistent. The electromagnetic radiation intensity generated by TNT explosion mainly ranges from $64.33 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ to $348.25 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, and the electromagnetic radiation intensity decreased largely with the increase of detonation distance. The electromagnetic radiation intensity measured by test points in different directions also has a certain gap, and the difference ranges from 11.1% to 17.7%.

Key words: TNT; electromagnetic radiation; antenna measurement; signal analysis

CLC number: TJ55; O389; O441.5; O536

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020181

(责编: 王艳秀)