

典型炸药爆炸过程中电磁辐射特性分析*

崔元博,孔德仁,张学辉,张逸飞

(南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094)

摘要:设计了一套基于短波全向天线、超宽带全向天线的电磁辐射测量装置,对不同质量 TNT 爆炸产生的电磁辐射进行测量,通过数据处理得到电磁辐射特性。结果表明,炸药质量对爆炸产生的电磁辐射时域特性有显著影响,质量越大,电磁信号延迟响应越短,持续时间越长,峰值出现时间越早。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,在 0~50 MHz 频段能量最集中,炸药成分对频谱分布的影响最大,不同成分的炸药爆炸产生的电磁辐射频谱分布有明显特异性。炸药爆炸产生的电磁辐射强度呈现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。装药构型和起爆方式会使炸药在爆炸过程中的几何运动模式发生变化,导致爆炸电磁辐射传播呈现非均匀性特征。

关键词:炸药;电磁辐射;天线;信号分析;数值模拟

中图分类号:O389;O441.5;O536 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2022)06-070-11

Analysis of electromagnetic radiation characteristics during typical explosives explosion

CUI Yuanbo, KONG Deren, ZHANG Xuehui, ZHANG Yifei

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

Abstract: A set of electromagnetic radiation measurement devices based on short-wave omnidirectional antennas and ultra-wideband omnidirectional antennas was designed to measure the electromagnetic radiation generated by TNT explosions, and the data was processed to obtain electromagnetic radiation characteristics. The results show that the explosive mass has a significant effect on the time domain characteristics of the electromagnetic radiation generated by the explosion. The greater the mass, the shorter the delayed response of the electromagnetic signal, the longer the duration, and the earlier the peak time. 60 kg TNT explosion generated electromagnetic radiation signal frequency is mainly concentrated below 100 MHz, the most concentrated energy is in the 0~50 MHz band, the explosive composition has the largest effect on the spectrum distribution, and the electromagnetic radiation spectrum distribution generated by different components of the explosive explosion has obvious specificity. Electromagnetic radiation intensity generated by dynamite explosion shows a strong correlation with the distance from the burst center. The intensity decreases with the distance increasing, and the magnitude of the decrease is large. Charge configuration and detonation mode will change the geometric movement pattern of the explosive during the explosion process, resulting in the non-uniformity characteristics of the explosion electromagnetic radiation propagation.

Keywords: explosives; electromagnetic radiation; antenna; signal analysis; numerical simulation

随着越来越多的电子设备应用于现代战争,日益复杂的战场电磁环境对电子设备的正常工作造成干扰。通过对炸药爆炸产生的电磁辐射特性进行研究,掌握电磁辐射信号的特征规律,有利于更加安全、有效地使用火工品^[1-2]。

1954年,Kolsky发现化学炸药爆炸可以产生电磁脉冲^[3],此后国内外科研人员对炸药爆炸电磁辐射进行了研究,取得了一定的科研成果。但是由于缺乏实验数据,对爆炸电磁辐射的特性和分布特征没有形成系统的认识,缺乏完整的理论模型。目前相关研究表明,炸药爆炸产生的电磁

辐射频率主要集中在0~100 MHz^[4-7],除了戴晴等在150 g铝、镁等球形工质电磁辐射测试实验中测得电磁辐射能量主要集中在1~4 GHz频段外^[8],其余实验极少测得100 MHz以上的电磁辐射^[9]。对于炸药爆炸产生的电磁辐射强度,国内基本都是对1 000 g以下的小当量炸药进行实验,所测得的电磁辐射持续时间不超过1 ms,电场强度最大不超过20 V/m。对于炸药当量和电磁辐射强度的关系,基本形成了两者呈正相关的共识。并且王长利等认为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^[10-13]。

* 收稿日期:2020-12-02

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

作者简介:崔元博(1991—),男,江苏宿迁人,博士研究生,E-mail:cyb6226@njst.edu.cn;

孔德仁(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:derenkong@hotmail.com

本文对 30 kg TNT 和 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射进行测量,将电磁信号采样时长扩展至 800 ms,得到了非常完整的爆炸电磁辐射信号,对于全面分析炸药爆炸电磁辐射特性具有重要意义。本文采用信号降噪、小波分析、衰减补偿等方式对电磁辐射能量密度进行分析,有效验证了常规炸药爆炸对自然磁场扰动的理论机理和数值模拟等研究成果。

1 电磁测量实验方法

1.1 实验系统

电磁辐射测量实验装置如图 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、信号调理器和限幅器组成。短波无源全向天线为单极子天线,采样频率为 1.5~30 MHz,输出阻抗为 50 Ω,高度为 2 000 mm。超宽带无源全向天线为偶极子天线,采样频率为 30~512 MHz,输出阻抗为 50 Ω,高度为 450 mm。信号调理器为一个可调式放大器,根据电磁辐射强度设置相应的放大系数。前端测试点通过同轴电缆(SYV50-5-1)与数据采集设备连接,采用高速采集卡记录数据,设置最高采样率为 1.25 GS/s,覆盖电磁波频段可达 500 MHz,采样时长设置为 810 ms,其中包括触发前采样 10 ms 和触发后采样 800 ms,触发模式为低电平外触发模式^[14]。

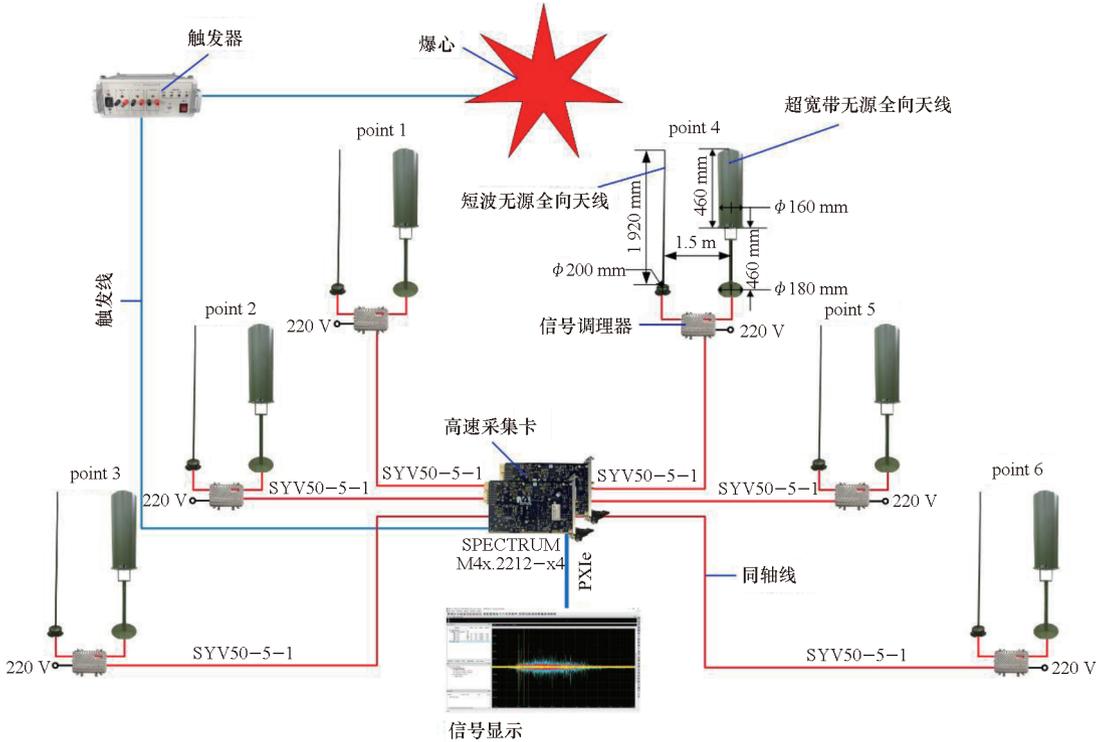


图 1 电磁辐射测量装置

Fig. 1 Electromagnetic radiation experimental test device

1.2 实验过程

炸药爆炸电磁辐射测量实验需要考虑爆炸场内电磁辐射强度、传播规律和方向、等效试验以及天线装置保护等因素^[15]。根据爆炸力学及电磁学理论,设 f 为特征时间, $f = t/m^{1/3}$, m 为工况质量,气体爆炸产物的速度 $u(f)$ 、爆炸产物中固体粒子的速度 $v(f)$ 以及壳体破片速度 u 的关系式^[16-17] 为:

$$u(f) = \frac{dR(f)}{df} \quad (1)$$

$$v(f) = u(0) \exp(-Bf) + B \cdot \exp\left[-Bf \int_0^f u(f) e^{Bf} df\right] \quad (2)$$

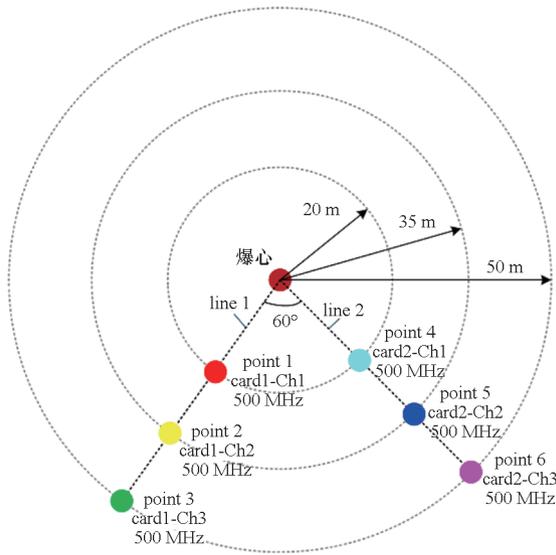
$$u = \frac{D}{2} \left\{ \frac{1}{2U+1} \left[1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^4 \right] \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$$\begin{cases} B = \frac{9}{5} \frac{Z}{a^2 d} m^{1/3} \\ U = \frac{M_c}{m} \end{cases} \quad (4)$$

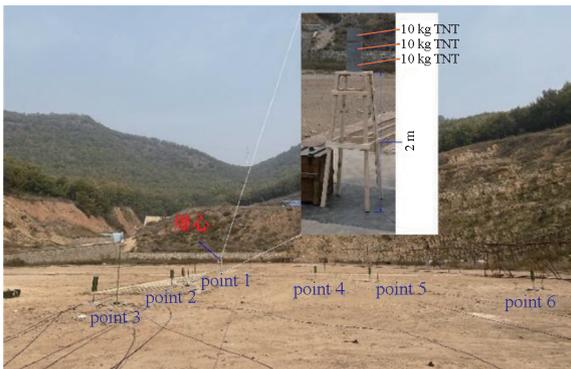
其中: $R(f)$ 是气体爆炸产物与壳体接触面半径, $R(f) = 1 + 4.6 \times 10^4 f - 0.57 \times 10^8 f^2 + 3.3 \times 10^{10} f^3 - 10^{13} f^4 + 1.2 \times 10^{15} f^5$; $u(0)$ 是初始时刻气体爆炸产物的速度。式(4)中, a 为固体粒子半径, d 为粒子密度, Z 为黏性系数,根据凝聚炸药的特性, $2 \mu\text{m} \leq a \leq 5 \mu\text{m}$, $d \approx 2 \text{ g/cm}^3$, $\eta \approx 1.0 \times 10^3 \text{ g/(cm} \cdot \text{s)}$, 当工况质量一定的情况下, B 可以认为是一个常

数。式(3)中, r_0 为装药半径, r 为装药壳体在爆炸作用下的极限膨胀半径, 忽略 $(r_0/r)^4$ 则式(3)变成 $u \approx D/[2(2U+1)^{1/2}]$, 因此研究固体含能材料电磁辐射时, 只要考虑参量 m, M_c, f, B 和 D 就等价考虑了 $u(f), v(f)$ 和 u 。在电磁学上有: $E = q/(4\pi Xr^2)$, 因此可以忽略电量 q , 只要考虑电场强度 E 、空气电介质常数 X 和天线与爆心的距离 r 即可^[18-19]。

根据爆炸力学理论分析, 结合本实验所用炸药质量, 设计出如图 2(a) 所示的测试点分布图, 共计 6 个测试点: line 1 由 point 1、point 2、point 3 组成, 分别距离爆心 20 m、35 m、50 m; line 2 由 point 4、point 5、point 6 组成, 分别距离爆心 20 m、35 m、50 m; line 1 和 line 2 之间的夹角为 60°。测试设备按照图 2(a) 进行放置, 炸药爆炸电磁辐射测量实验现场如图 2(b) 所示, 本实验分别对 30 kg 和 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射进行测量。



(a) 测试点分布
(a) Test point layout



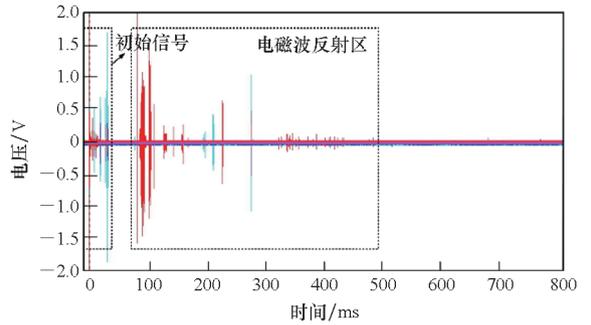
(b) 实验现场
(b) Experiment field

图 2 测试点分布及实验现场

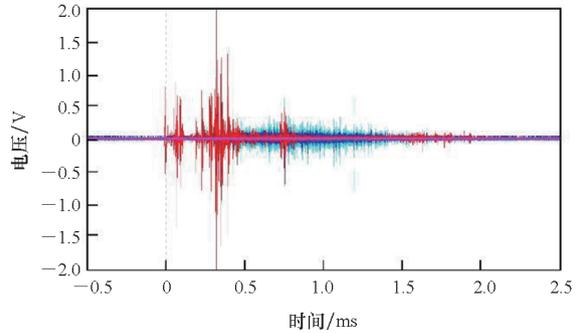
Fig. 2 Test point layout & experiment field

2 实验结果分析

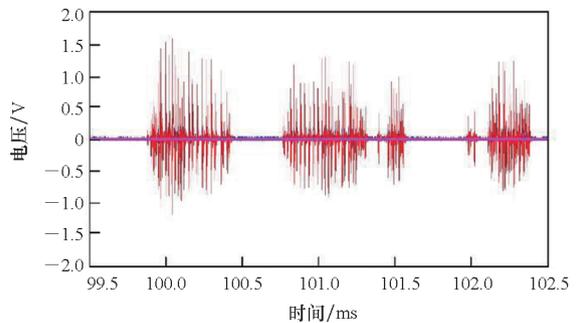
60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射信号如图 3 所示, 图中为采样通道 1~4 的信号, 由于炸药当量较大, 电磁辐射信号持续时间较长, 在 50 ms 之后产生了明显的电磁波反射叠加现象。为了便于和以往文献数据进行比较, 探索爆炸电磁辐射规律, 提取初始 2.5 ms 内的电磁信号, 结合小当量炸药爆炸的实验结果, 进行规律总结和研究。



(a) 爆炸电磁辐射信号时域图
(a) Time domain diagram of explosive electromagnetic radiation signal



(b) 爆炸电磁辐射初始信号
(b) Initial signal of explosive electromagnetic radiation



(c) 爆炸电磁辐射反射信号
(c) Reflected signal of explosive electromagnetic radiation

图 3 TNT 爆炸产生的电磁辐射信号

Fig. 3 Electromagnetic radiation signal of TNT explosion

2.1 电磁信号时域分析

电磁辐射的时域特征主要包括采样周期内的

持续时间、延迟响应时间、峰值到达时间等主要参数^[20]。本文共进行两次有效实验,分别测量了30 kg TNT和60 kg TNT炸药的电磁信号,采集到的初始电磁信号如图4和图5所示,每组实验包含6个通道的信号,各个通道与测试点point 1~6对应。从初始电磁信号图上可以看出,60 kg TNT爆炸产生的电磁信号明显强于30 kg TNT爆炸产生的电磁信号。

通过提取图4和图5中电磁信号的时域参数,得到如表1所示数据。由表可知,30 kg TNT爆炸产生电磁辐射信号出现时间在触发前1.5~2.7 ms,在9.8 ms附近出现一个幅值较大的电磁脉冲,各个测试点信号延迟响应时间相差不大,距离爆心较远的测试点信号出现时间稍迟一些,大部分测试点电磁信号峰值出现时间基本集中在8~9 ms附近。

60 kg TNT爆炸产生的电磁辐射信号在触发时刻后到达时间集中在46~62 μs之间,同等距离下,测试线line 2上的测试点电磁信号出现时间比测试

线line 1上的测试点延迟5~10 μs;大部分测试点所测的电磁信号峰值出现时间在0.31~0.39 ms之间。对比30 kg和60 kg TNT爆炸产生的电磁辐射信号可以发现,60 kg TNT的电磁信号出现时间明显早于30 kg TNT,60 kg TNT爆炸产生的电磁信号持续时间也明显长于30 kg TNT,60 kg TNT爆炸产生的电磁信号峰值时间明显早于30 kg TNT。

在最近两年的相关研究中,文献[12]表明第一个电磁脉冲信号和触发点的时间差为0.019 ms,第二个电磁脉冲信号和触发点的时间差为4.424 ms,第三个电磁脉冲信号和触发点的时间差为20.514 ms。文献[13]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之间。由此可以看出,对于典型炸药,其质量对爆炸产生的电磁辐射时域特性有显著影响,质量越大,电磁信号延迟响应越短,持续时间越长,峰值出现时间越早;对于同等质量的炸药,炸药的种类和成分对其爆炸产生的电磁辐射时域特性无明显影响。

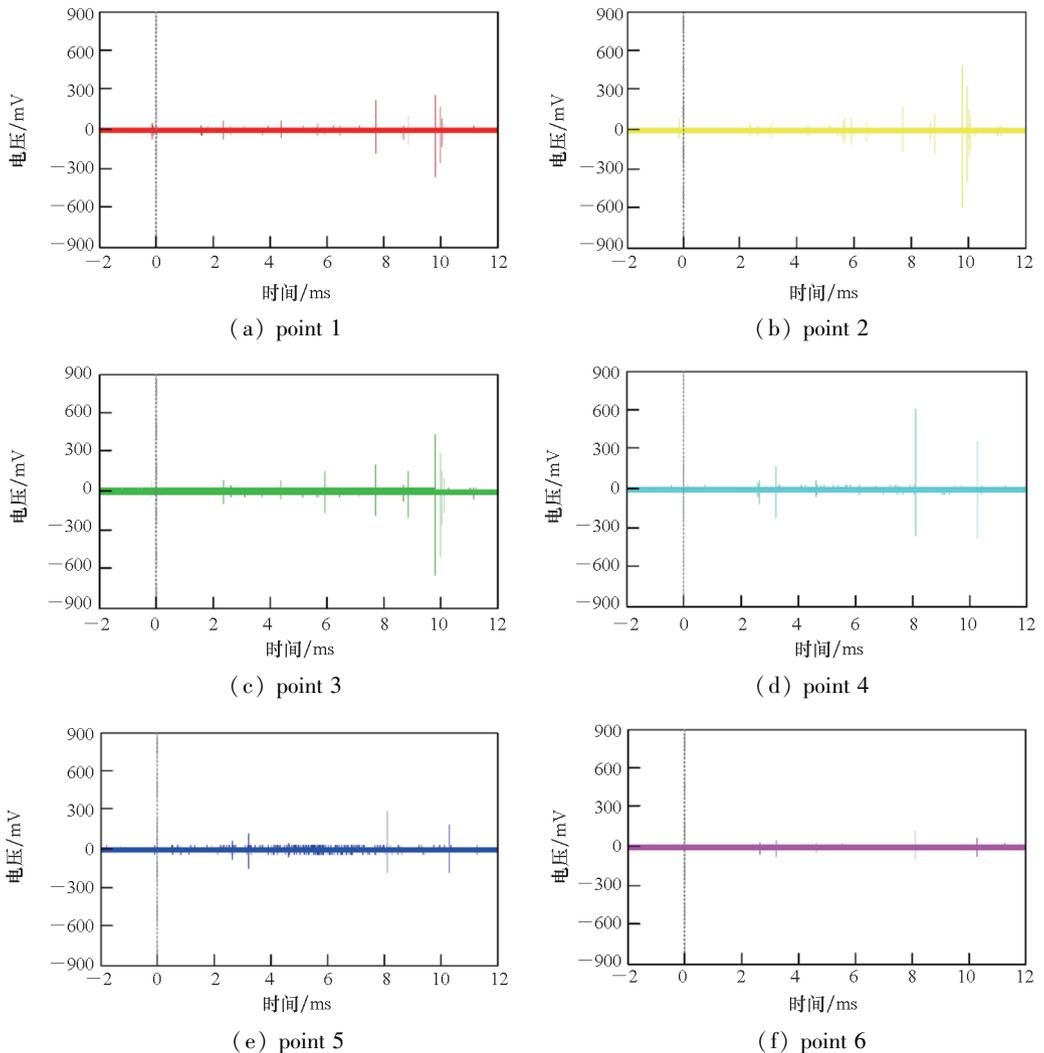


图4 30 kg TNT爆炸电磁辐射信号

Fig. 4 Electromagnetic radiation signal of 30 kg TNT explosion

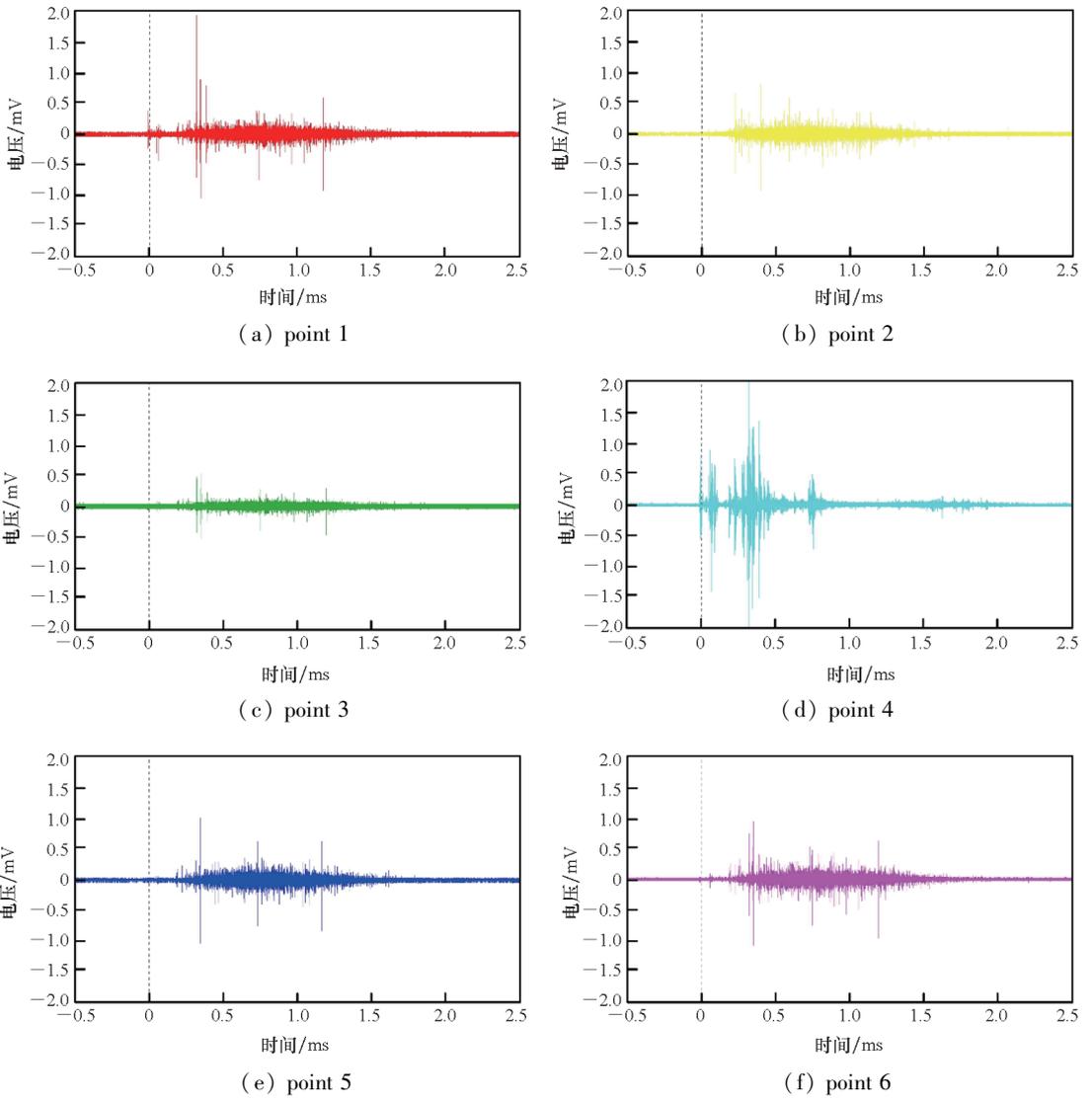


图 5 60 kg TNT 爆炸电磁辐射信号

Fig. 5 Electromagnetic radiation signal of 60 kg TNT explosion

表 1 TNT 爆炸产生的电磁辐射信号时域参数

Tab. 1 Time domain parameters of electromagnetic radiation signal generated by TNT explosion

| 测试点 | 距离/m | 延迟时间/ms | | 峰值时间/ms | | 峰值电压/V | |
|---------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 30 kg TNT | 60 kg TNT | 30 kg TNT | 60 kg TNT | 30 kg TNT | 60 kg TNT |
| point 1 | 20 | 1.545 | 0.046 1 | 9.816 | 0.314 | 1.426 | 1.914 |
| point 2 | 35 | 2.360 | 0.051 6 | 9.816 | 0.322 | 0.644 | 1.563 |
| point 3 | 50 | 2.356 | 0.060 9 | 9.816 | 0.327 | 0.703 | 0.898 |
| point 4 | 20 | 2.619 | 0.046 4 | 8.134 | 0.322 | 0.507 | 2.500 |
| point 5 | 35 | 2.653 | 0.051 8 | 8.134 | 0.354 | 0.683 | 1.875 |
| point 6 | 50 | 2.653 | 0.061 5 | 8.134 | 0.392 | 0.332 | 0.585 |

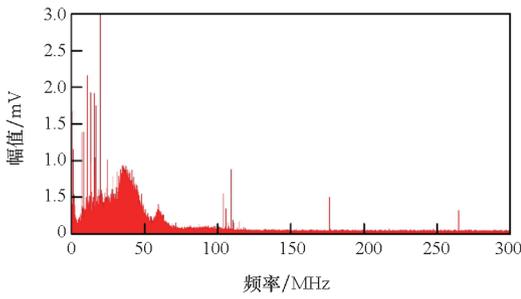
2.2 电磁信号频域分析

电磁辐射的频谱分布是电磁信号分析中的重要参数,采用加 Hanning 窗傅里叶变换的方式对电磁辐射信号进行处理^[21-22]。图 6 为 60 kg TNT

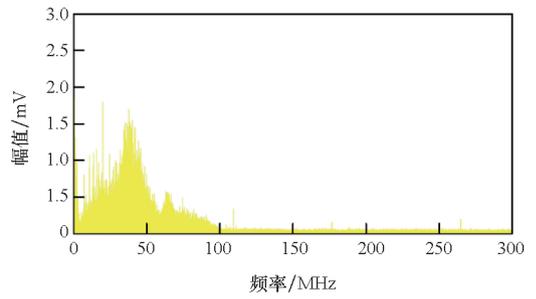
电磁辐射信号的频率分布,由图可知,爆炸产生的电磁辐射频率主要分布在 0 ~ 100 MHz,其中 0 ~ 50 MHz 低频段电磁辐射能量分布最密集。不同测试点的频谱分布差距较大,距离爆心较近的测

试点 point 1、point 4 频谱分布较明显,在 0 ~ 100 MHz频段内均有分布,距离爆心较远的测试

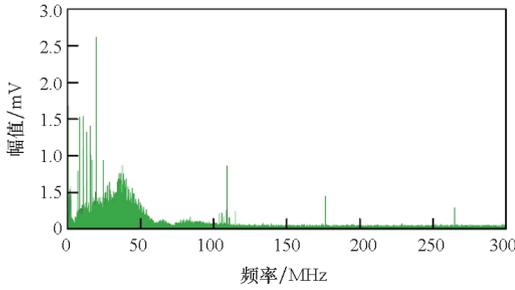
点 point 3、point 6 频谱能量分布较弱,这一结果与文献[10]中的结论一致。



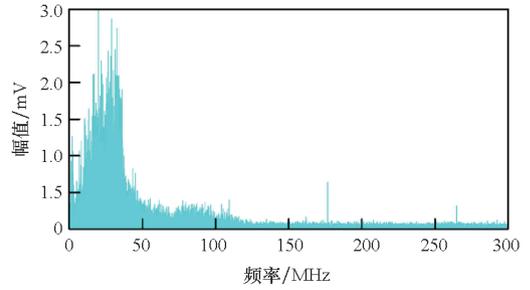
(a) point 1



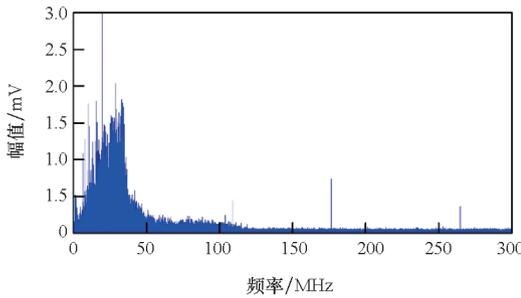
(b) point 2



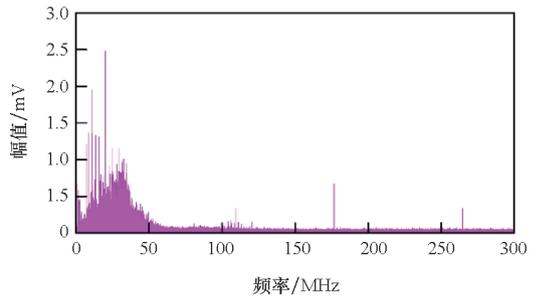
(c) point 3



(d) point 4



(e) point 5



(f) point 6

图6 60 kg TNT 电磁辐射信号频率分布

Fig.6 Frequency distribution of electromagnetic radiation signal of 60 kg TNT

由文献[10,12-13]中的实验数据,可以得到如图7所示各组分炸药电磁频谱分布图,PETN爆炸产生的电磁辐射频率在30 MHz、60 MHz、80 MHz附近有明显分布,聚黑炸药(RDX 96.5%,氟橡胶3%,石墨0.5%)爆炸产生的电磁辐射频率在20 MHz、40 MHz附近有明显分布,B炸药爆炸产生的电磁辐射频率主要分布在0~50 kHz,RDX基含10%铝炸药爆炸产生的电磁辐射在380 MHz附近有明显分布,RDX基含20%铝炸药爆炸产生的电磁辐射在310 MHz和380 MHz附近有明显分布。

结合TNT爆炸实验数据可以得出:对于炸药爆炸产生的电磁辐射,炸药质量越大,爆炸产生的电磁辐射信号频率分布范围越大,能量越聚集;炸药成分对频谱分布的影响最大,不同成分的炸药

爆炸产生的电磁辐射频谱分布有明显特异性,这一结论可以应用于炸药成分的识别和鉴定。同等质量炸药爆炸产生的电磁辐射,距离爆心越近,电磁信号频率分布范围越大,并且不同方向的电磁辐射频率分布有明显差别。

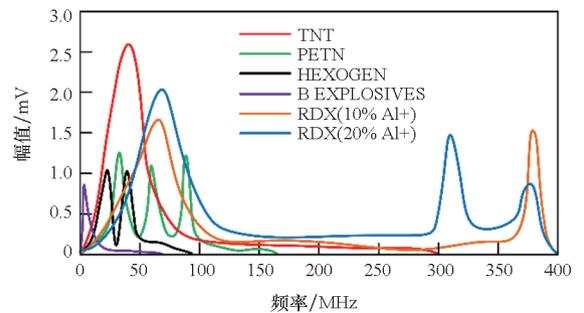


图7 不同组分炸药爆炸电磁辐射频谱分布
Fig.7 Spectrum distribution of electromagnetic radiation of different explosives

2.3 电磁辐射强度分析

电磁辐射强度的分析首先要将天线输出的电压值转换为电场强度 $E/(V/m)$ 。测量天线的输出电压为 U/V , 经过校准计量的天线增益为 G , 自由空间的特性阻抗 120π 是以 $H = E/(120\pi)$ 的关系将电场 E 和磁场 H 结合的量, 故电场强度 $E/(\mu V/m)$ 和功率密度 $P_u/(mW/m^2)$ 之间存在如式(5)^[23-24] 所示关系。

$$10^{-3}P_u = \frac{(10^{-6}E)^2}{120\pi} \quad (5)$$

根据式(5), $10\lg E/(dB \cdot \mu V/m)$ 和 $10\lg P_u/(mW/m^2)$ 的关系为:

$$10\lg P_u = 20\lg E - 90 - 10\lg(120\pi) \quad (6)$$

设电场强度为 $E/(\mu V/m)$, 则增益为 G (真值) 的天线有效长度 L_{eff}/m 为:

$$L_{eff} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G}{1.64}} \quad (7)$$

所以感应电压 $V/\mu V$ 为:

$$V = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{G}{1.64}} \sqrt{\frac{Z_0}{Z_r}} \quad (8)$$

根据式(8), $20\lg E/(dB \cdot \mu V/m)$ 和 $20\lg V/(dB \cdot \mu V)$ 的关系为:

$$20\lg V = 20\lg E + 20\lg(\lambda/\pi) + 10\lg G - 2.15 + 10\lg(Z_0/Z_r) \quad (9)$$

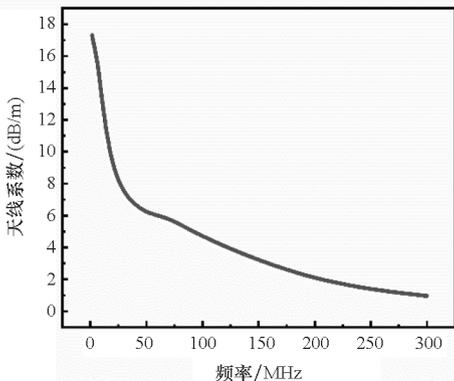
内部阻抗为 Z_0/Ω , 接收电压为 $V/\mu V$, 则功率 P_r/mW 为:

$$P_r = \left(\frac{10^{-6}V}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{Z_0} \times 10^3 \quad (10)$$

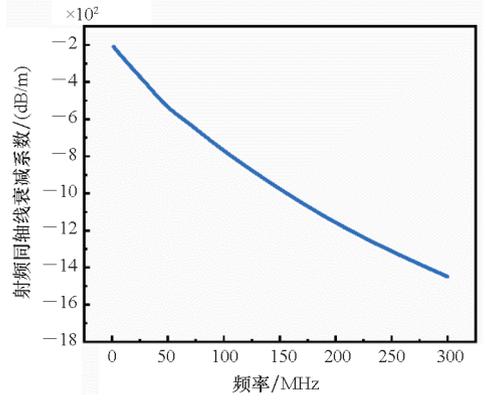
因此, $10\lg P_r = 20\lg V - 10\lg Z$, 当 $Z_0 = 50 \Omega$ 时, $20\lg V/(dB \cdot \mu V)$ 和 $10\lg P_r/dBm$ 的关系为:

$$10\lg P_r = 20\lg V - 113 \quad (11)$$

电磁辐射测量装置中的高速采集卡得到的天线输出电压为原始电压, 在测量装置采样过程中存在天线增益、放大器增益、传输线缆损耗、接头损耗等多种因素影响, 为了得到实际电磁辐射强度, 需要对实验数据进行处理, 数据修正参数如图 8 所示。

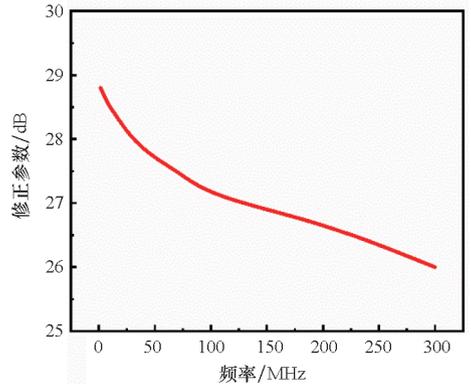


(a) 天线系数
(a) Antenna factor



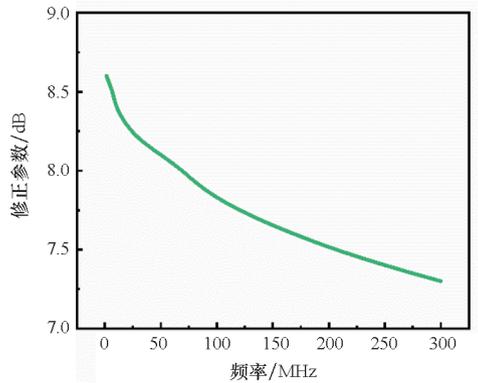
(b) 射频同轴线衰减系数

(b) RF coaxial line attenuation coefficient



(c) 30 kg TNT 修正参数

(c) 30 kg TNT correction parameter



(d) 60 kg TNT 修正参数

(d) 60 kg TNT correction parameter

图 8 实验数据修正参数

Fig. 8 Experimental data correction parameters

经过数据修正后的实验结果如表 2 所示, 分析发现, 30 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射强度最大值为 85.56 V/m, 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射强度最大值为 168.86 V/m, 相同测试点测得 60 kg TNT 的电磁辐射强度比 30 kg TNT 高出 96.2% ~ 304.3%。由此可见, 不同质量的炸药爆炸产生的电磁辐射强度相差在 1 倍以上, 对于同等质量的炸药爆炸产生的电磁辐射强度, 呈现电

磁强度随爆心距离增大而递减的特性;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差距,30 kg TNT 不同方向的测试点测得电磁

辐射强度相差较大,差值范围为 17.35% ~ 102.17%,60 kg TNT 不同方向的测试点测得电磁辐射强度相差较小,差值范围为 11.1% ~ 17.7%。

表 2 TNT 爆炸电磁辐射强度

Tab.2 Electromagnetic radiation intensity of TNT explosion

| 测试点 | 峰值电压/V | | 有效电压/V | | 信号功率/dBm | | 电场强度/(V · m ⁻¹) | |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|
| | 30 kg TNT | 60 kg TNT | 30 kg TNT | 60 kg TNT | 30 kg TNT | 60 kg TNT | 30 kg TNT | 60 kg TNT |
| point 1 | 1.426 | 1.914 | 11.408 | 20.468 | 34.154 | 39.231 | 85.56 | 168.86 |
| point 2 | 0.644 | 1.563 | 7.187 | 15.841 | 30.141 | 37.005 | 57.49 | 130.68 |
| point 3 | 0.703 | 0.898 | 2.371 | 9.181 | 20.508 | 32.268 | 18.73 | 75.74 |
| point 4 | 0.507 | 2.500 | 5.161 | 18.881 | 27.264 | 38.530 | 42.32 | 151.99 |
| point 5 | 0.683 | 1.875 | 3.829 | 14.168 | 24.672 | 36.036 | 29.29 | 114.05 |
| point 6 | 0.332 | 0.585 | 2.152 | 4.214 | 19.667 | 25.504 | 15.96 | 64.33 |

3 电磁辐射数值模拟

在炸药爆炸过程中,导电气体在自然磁场中产生磁场压缩和扩散,导致磁场扰动,爆炸瞬间冲击波前沿超高速碰撞的等离子体基本处于热平衡状态,结合热电离模型和磁流体动力学(magnetohydrodynamics, MHD)模型来表示爆炸过程中导体气体的运动和磁场演化^[11]。

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{U} \\ \mathbf{B} \\ \rho e_{\text{MHD}} \end{bmatrix} + \nabla \cdot \begin{bmatrix} \rho \mathbf{U} \\ \rho \mathbf{U} \mathbf{U} + p_{\text{MHD}} \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{\mu_e} \\ \mathbf{U} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{U} \\ (\rho e_{\text{MHD}} + p_{\text{MHD}}) \mathbf{U} - \frac{\mathbf{B}}{\mu_e} (\mathbf{U} \cdot \mathbf{B}) - \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U} \end{bmatrix} + \nabla \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\boldsymbol{\tau} \\ -v_e \nabla \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} = -(\nabla \cdot \mathbf{B}) \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\mathbf{B}}{\mu_e} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{U} \cdot \frac{\mathbf{B}}{\mu_e} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,ρ 为密度, **U** 为流场速度矢量, **B** 为磁感应强度矢量, $v_e = 1/(\sigma \mu_e)$ 为磁扩散率, μ_e 为磁导率, **I** 为单位张量, **τ** 为流体黏性力张量, e_{MHD} 为磁流场比内能, p_{MHD} 为强流场压强。式(12)等号左边分别为时间变化项、对流项和扩散项。全 MHD 方程是一个对流扩散项方程,高能炸药爆炸时大部分空间的磁扩散率很高,而近场区域由于气体电离度较高,从而磁扩散率较低,导致磁场的对流和扩散同时起作用,所以需要分为两种情况进行求解。

3.1 不考虑磁场扩散

在不考虑磁场扩散的情况下进行对流问题的

求解,式(12)可化为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{U} \\ \mathbf{B} \\ \rho e_{\text{MHD}} \end{bmatrix} + \nabla \cdot \begin{bmatrix} \rho \mathbf{U} \\ \rho \mathbf{U} \mathbf{U} + p_{\text{MHD}} \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{\mu_e} \\ \mathbf{U} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{U} \\ (\rho e_{\text{MHD}} + p_{\text{MHD}}) \mathbf{U} - \frac{\mathbf{B}}{\mu_e} (\mathbf{U} \cdot \mathbf{B}) \end{bmatrix} + \nabla \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ -\boldsymbol{\tau} \\ 0 \\ -\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U} \end{bmatrix} = -(\nabla \cdot \mathbf{B}) \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\mathbf{B}}{\mu_e} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{U} \cdot \frac{\mathbf{B}}{\mu_e} \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过 AUSM 类格式分裂对流通量,黏性项的单元界面值取两侧单元的平均,完成一次时间步的计算,并且演化求解的自由度,这时得到一个对流过程之后的磁场。

3.2 仅考虑磁场扩散

仅考虑磁场的扩散过程,磁扩散方程原始形式为:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times (v_e \nabla \times \mathbf{B}) \quad (14)$$

由于磁场是无源场,其散度为 0,根据旋度变换关系 $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{B}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla \cdot (\nabla \mathbf{B})$ 可得磁扩散方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \cdot (v_e \nabla \mathbf{B}) = 0 \quad (15)$$

炸药爆炸是一类强间断非线性问题,模拟的目的是探索高能炸药爆炸产生的电磁辐射空间区域分布情况。以自然电磁场为背景,对高能炸药爆炸过程中产生的电磁扰动进行数值仿真,以图 2(a)为基准坐标系,进行 line 1 方向和 line 2

方向的模拟计算,数值模拟参数如图 9 所示。

60 kg TNT 爆炸过程中的电磁辐射数值仿真如图 10 所示,由图可知,当起爆点不同时,爆炸引起

的电磁扰动有很大不同,也就是说当几何不对称的炸药爆炸时,会产生不同的电磁扰动,这种不同主要表现在量级上,起爆点距离地面越近,爆炸场范

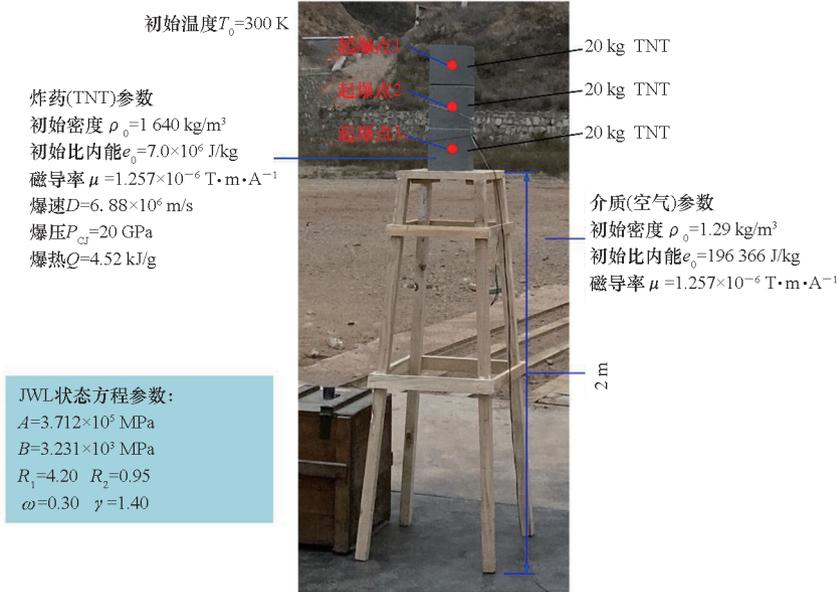


图 9 60 kg TNT 爆炸电磁辐射数值模拟参数

Fig. 9 Numerical simulation parameters of electromagnetic radiation of 60 kg TNT explosion

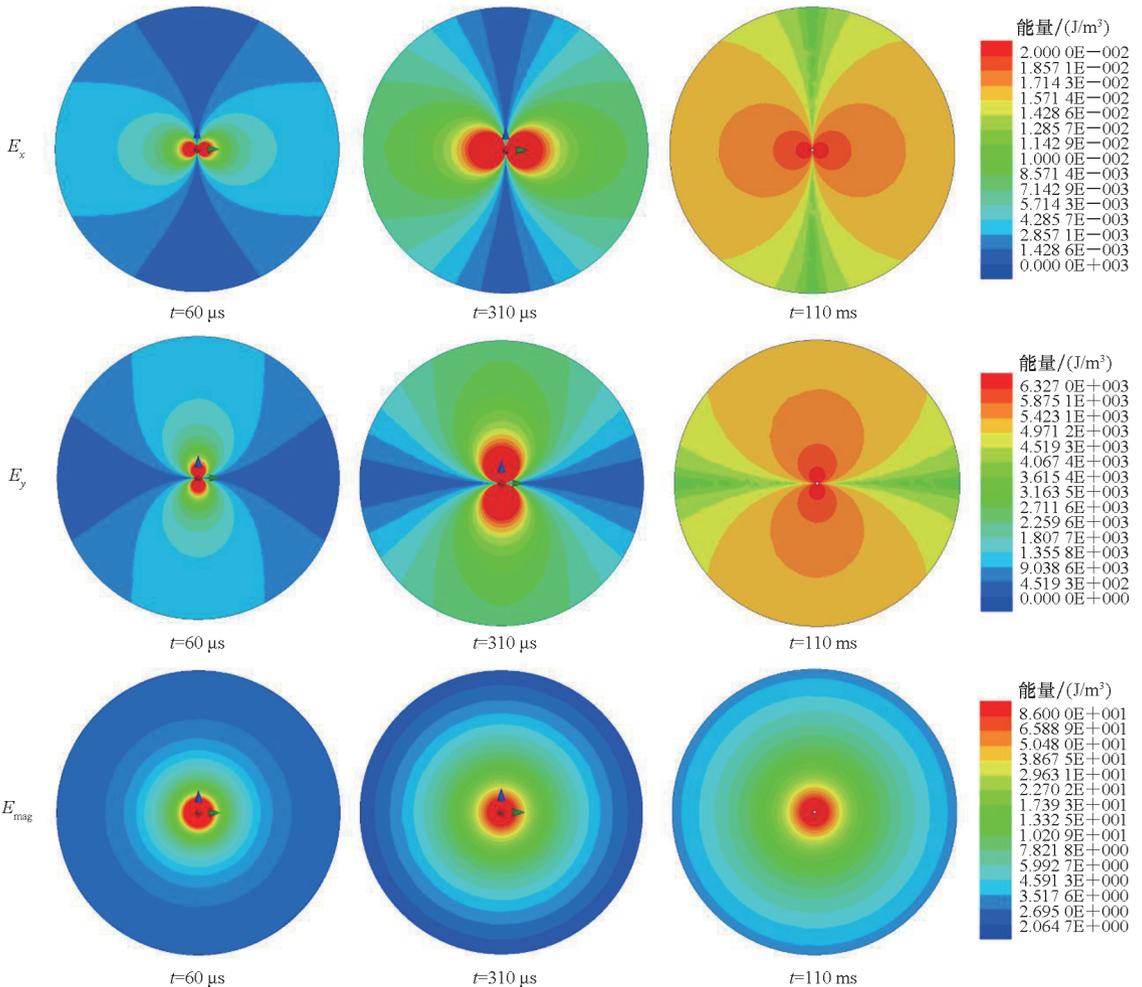


图 10 60 kg TNT 爆炸电磁辐射数值仿真

Fig. 10 Numerical simulation of electromagnetic radiation of 60 kg TNT explosion

围内的电磁能量分布量级越大。图中 E_{mag} 为不同起爆点条件下的电磁能量数值仿真,从中可以看出,炸药爆炸产生的电磁能量以爆心为中心向外不断衰减,因此相同方向上各个测试点测得的电场强度随着爆心距离的增加而减小。图中 E_x 和 E_y 表示不同方向上的电场强度分布,可知炸药爆炸产生的电磁辐射传播具有明显的方向性,主要是因为炸药的几何不对称(炸药在起爆过程中不可能呈完全对称扩散)引起了流场参数的空间不对称,影响电磁场扰动的主要因素是流场中的能量分布,而能量分布直接影响电导率分布结果。电磁辐射的传播受空间电导率直接影响,从数值模拟图来看,电导率的空间分布差异很大,在 x 和 y 方向上均有集中的地方,在集中位置的电磁扩散较慢,而其余位置的电导率较小,产生的电磁扰动以极快的速度向周围扩散,难以形成明显的电磁扰动。当炸药爆轰产物膨胀到一定时间后,膨胀模式逐渐变成球形膨胀,后期的电磁场演化模式及扰动幅度基本相同,因此即使爆炸初期电磁辐射呈不对称扩散,在爆炸后期也会形成对称的几何运动状态,此时爆轰产物的膨胀运动对电磁场的扰动都是相同的,这也就是 E_{mag} 模拟图呈现能量均匀扩散的原因。综上所述,炸药起爆点位置的不同导致炸药爆炸过程中几何运动模式的不同,使得不同方向上产生的电磁辐射扰动幅值产生较大差异。

4 结论

本文针对典型炸药爆炸产生电磁辐射的现象,进行了 TNT 爆炸电磁辐射测量实验,结合相关文献对比分析,得到了如下主要结论:

1) TNT 爆炸产生电磁辐射的时域特性受炸药质量影响最大,炸药质量越大,电磁辐射信号延迟响应越短,峰值出现时间越早,产生的电磁辐射持续时间越长;对于同等质量的炸药,不同位置测试点测得的电磁辐射时域分布大体一致,但距爆心越远电磁辐射持续时间越短,且不同方向测试点测得的电磁辐射时域分布有一定差别。

2) 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,炸药质量越大,电磁辐射频率分布范围越广,能量越集中。炸药成分对频谱分布的影响最大,不同成分的炸药爆炸产生的电磁辐射频谱分布有明显特异性,这个特点可以应用于炸药成分的识别和鉴定。

3) 60 kg TNT 爆炸产生的电磁辐射强度比 30 kg TNT 高出 1 倍以上,同等质量的炸药爆炸产

生的电磁辐射强度呈现出随距离增大而大幅递减的特性;相同距离而不同方向测试点测得的电磁辐射强度存在较大差距,30 kg TNT 不同方向的测试点测得电磁辐射强度的差值范围为 17.35% ~ 102.17%,明显高于 60 kg TNT 的差值范围(11.1% ~ 17.7%)。

4) 装药构型和起爆方式会使得炸药爆炸过程中几何运动模式发生变化,导致爆炸电磁辐射传播呈现非均匀性特征。

参考文献 (References)

- [1] 王军,李勇,周彬,等. 电火工品电磁环境适应性的研究进展及展望[J]. 含能材料, 2017, 25(11): 954-963. WANG J, LI Y, ZHOU B, et al. Research progress and prospect of electromagnetic compatibility of electro-explosive device[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(11): 954-963. (in Chinese)
- [2] 崔元博,商飞,孔德仁. 云炸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 Y B, SHANG F, KONG D R. Experimental study on electromagnetic radiation test of cloud explosion bomb[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020, 34(2): 99-103. (in Chinese)
- [3] KOLSKY H. Electromagnetic waves emitted on detonation of explosives[J]. Nature, 1954, 173(4393): 77.
- [4] VAN LINT V A J. Electromagnetic emission from chemical explosions [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1982, 29(6): 1843-1849.
- [5] BORONIN A P, KAPINOS V N, KRENEV S A, et al. Physical mechanism of electromagnetic field generation during the explosion of condensed explosive charges. Survey of literature [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 1990, 26(5): 597-602.
- [6] KUHL A L, WHITE D A, KIRKENDALL B A. Electromagnetic waves from TNT explosions [J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2014, 6(10): 280-295.
- [7] 陈生玉,孙新利,钱世平,等. 化爆引起的电磁辐射[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(4): 363-368. CHEN S Y, SUN X L, QIAN S P, et al. Electromagnetic radiation caused by chemical explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(4): 363-368. (in Chinese)
- [8] 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 Q, LI C L, CHEN G Q, et al. Experimental study of wideband electromagnetic radiation from plasma cloud [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2009, 24(5): 72-74, 78. (in Chinese)
- [9] 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, 1394. CAO J Y, XIE S G, SU D L, et al. Electromagnetic interference caused by aerospace explosives [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1384-1387, 1394. (in Chinese)
- [10] 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 C L, LI X, LIU X X, et al. The experimental research on the electromagnetic radiation aroused by detonation of explosive[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(Suppl 2): 188-192. (in Chinese)
- [11] 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): 1206-1218.
- LI J Q, MA T B, NING J G. Mechanism of explosion-induced disturbance in natural magnetic field[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(5): 1206-1218. (in Chinese)
- [12] 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 H L, CHU Z X, LI J Q, 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. (in Chinese)
- [13] 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 H, HE Y, PAN X C, et al. Experimental study on characteristics of explosive electromagnetic radiation signals of RDX based aluminized explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28(5): 475-482. (in Chinese)
- [14] 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 Y B, SHANG F, KONG D R, et al. Research on testing technology of electromagnetic radiation characteristics in explosive field[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019(5): 1-5. (in Chinese)
- [15] 王长利, 周刚, 蔡宗义, 等. 带壳装药热爆炸冲击波超压测量及分析[J]. 兵工学报, 2012, 33(5): 574-578.
- WANG C L, ZHOU G, CAI Z Y, et al. Measurement and analysis of shock wave overpressure of thermal explosion of charge with shell[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(5): 574-578. (in Chinese)
- [16] 马天宝, 任会兰, 李健, 等. 爆炸与冲击问题的大规模高精度计算[J]. 力学学报, 2016, 48(3): 599-608.
- MA T B, REN H L, LI J, et al. Large scale high precision computation for explosion and impact problems[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(3): 599-608. (in Chinese)
- [17] 姚成宝, 王宏亮, 浦锡锋, 等. 空中强爆炸冲击波地面反射规律数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11): 24-31.
- YAO C B, WANG H L, PU X F, et al. Numerical simulation of intense blast wave reflected on rigid ground[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(11): 24-31. (in Chinese)
- [18] 任会兰, 宁建国, 许香照. 不同炸药量在工事中爆炸的三维数值模拟[J]. 高压物理学报, 2013, 27(2): 216-222.
- REN H L, NING J G, XU X Z. The 3-D numerical simulation for different explosive charges in the fortifications[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(2): 216-222. (in Chinese)
- [19] 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 Y B, KONG D R. Analysis of electromagnetic radiation spectrum of a certain type of bomb during static explosion[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(5): 18-22. (in Chinese)
- [20] 薛颖, 杨安民, 李欣, 等. 半导体桥火工品连续电磁波环境效应研究[J]. 火工品, 2020(2): 21-24.
- XUE H, YANG A M, LI X, et al. Research of environmental effect of electromagnetic waves on semiconductor initiator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(2): 21-24. (in Chinese)
- [21] 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 Z C, XIE S G, CAO J Y. Analysis of electromagnetic radiation from explosion of shaped charge by wavelet transform[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(5): 26-29. (in Chinese)
- [22] REN H L, CHU Z X, LI J Q. Study on electromagnetic radiation generated during detonation[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2019, 44(12): 1541-1553.
- [23] 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 L J, YI T, ZHU H N, et al. Electromagnetic pulse effect during the bridge wire electric explosion[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2019, 27(6): 481-486. (in Chinese)
- [24] 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 Y B, KONG D R, ZHANG X H, et al. Measurement and analysis of electromagnetic radiation signals of TNT explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(3): 241-250. (in Chinese)