

文章编号:1006-9941(2020)05-0475-08

RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号特性实验研究

陈 鸿,何 勇,潘绪超,焦俊杰,沈 杰,张江南

(南京理工大学智能弹药国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 为了得到黑索今(RDX)以及RDX基含铝炸药爆炸过程中的电磁辐射信号特征,采用宽带天线测量系统对炸药爆炸电磁辐射信号进行了实验研究。结果表明,RDX以及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号发生时刻与起爆时刻相比有明显延迟。距爆心2 m处,爆炸电磁辐射信号强度在 $1.87\sim 15.20\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 范围内,随距离的增加而衰减。当含铝量从0~20%时,爆炸电磁辐射信号强度随含铝量的增加而增强;当含铝量从20%~30%时,爆炸电磁辐射信号强度随含铝量的增加而降低。RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号频率主要分布在500 MHz以内,铝的添加会改变爆炸电磁辐射信号的频率成分,不同含铝量炸药爆炸电磁辐射信号频谱不同。

关键词: RDX基含铝炸药;电磁辐射;天线测量;频谱分析

中图分类号: TJ55;O389;O441.5

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2019261

1 引言

炸药爆炸过程中伴随的电磁辐射现象是炸药爆炸重要宏观物理现象之一,研究爆炸电磁辐射对炸药爆轰理论、炸药应用途径的拓展以及爆炸测试中的电磁干扰防护具有重要意义。而炸药爆轰是一个非常复杂的多物理场耦合作用过程,目前对爆炸电磁辐射机理研究仍处于原理探索阶段,尚未形成完善的理论模型,实验测量依旧是此类研究的主要手段。自20世纪50年代以来国内外学者相继对爆炸电磁辐射现象进行了实验研究^[1-6],研究结果表明炸药爆炸过程伴随着电磁辐射信号的产生,炸药组份、壳体外形以及测试环境等均会对爆炸电磁脉冲波形和幅度产生影响,不同类型炸药爆炸产生的电磁频谱不同,频谱从赫兹到吉赫兹量级均有报道。随着测试技术的发展,近年来美国洛斯拉莫斯实验室学者Jeremiah Harlin等^[7-10]采用不同测试方法对TNT和PBX爆炸电磁辐射信号进行了较

为全面的测量,推测爆炸电磁辐射源来自于爆轰波区域的带电粒子。Boronin等^[11]对部分公开报道的实验进行了总结,认为爆炸电磁辐射来源于炸药爆炸产生的高温高压电离区,信号的延迟时间与持续时间与电离区产生的时间和存在时间有关,信号强度与爆轰产物的电离度及带电粒子的偶极变化有关。

随着炸药的发展以及爆炸电磁辐射现象研究的深入,国内外学者发现爆炸生成的带电粒子的种类以及运动过程变化会影响爆炸电磁辐射过程,导致爆炸电磁辐射信号特征发生改变^[12],而活性金属的添加能够改变炸药爆轰反应进程,对爆轰速度、爆热、爆压以及粒子速度产生影响,并且爆轰反应生成的含金属元素粒子使爆轰产物组份、粒子数目等发生变化,从而影响爆炸电磁辐射信号,这引起了学界的广泛关注,各国学者尝试通过改变装药结构、添加活性金属等方式增强爆炸电磁辐射^[13]。戴晴等^[14]采用一种铝镁混合物炸药,测得一个持续时间为50 ns,频率在0.1~4 GHz范围内的宽带电磁辐射信号。王长利等^[15]测量了梯黑铝爆炸产生的电磁辐射,认为梯黑铝爆炸电磁辐射信号主要与炸药有关,铝粉对信号影响较小。Kuhl等^[16-17]计算了含铝TNT爆轰过程中等离子体参数,并指出等离子体参数的改变会直接影响电磁辐射信号特征。在含铝炸药爆轰性能方面,国内外学者^[18-21]进行了大量研究,证明铝粉的添加能够改变炸药爆轰反应

收稿日期:2019-10-10;修回日期:2019-11-25

网络出版日期:2020-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助(11504173)

作者简介:陈鸿(1994-),男,博士研究生,主要从事爆炸电磁辐射研究。e-mail:chenhong@njust.edu.cn

通信联系人:何勇(1964-),男,教授,主要从事爆炸力学研究。

e-mail:yonghe1964@163.com

引用本文: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.

进程,增加爆轰反应时间,提高爆轰产物电导率。

目前,国内外学者对炸药爆炸电磁辐射现象进行了相关的实验研究,并探讨了爆炸电磁辐射产生机理,但是对添加活性金属的炸药爆炸电磁辐射现象的定量研究还尚少见报道。含铝炸药作为典型的含金属炸药,其常规爆轰性能参数已取得一定研究成果,但在含铝炸药爆炸电磁辐射方面还需系统研究。开展铝含量对炸药爆炸电磁辐射信号特征的影响,可为炸药爆炸电磁辐射过程以及含铝炸药爆炸过程特性研究提供借鉴,拓展炸药的使用领域。为此,本研究拟开展RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号特征实验研究,通过对实验结果的分析,以期获取RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号场强量级,电磁辐射信号延迟时间,电磁辐射强度以及爆炸电磁辐射频谱特性与含铝量之间的关系,揭示RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号特征,为炸药爆炸电磁辐射特性研究以及炸药的拓展应用提供支撑。

2 实验方法

RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号测量

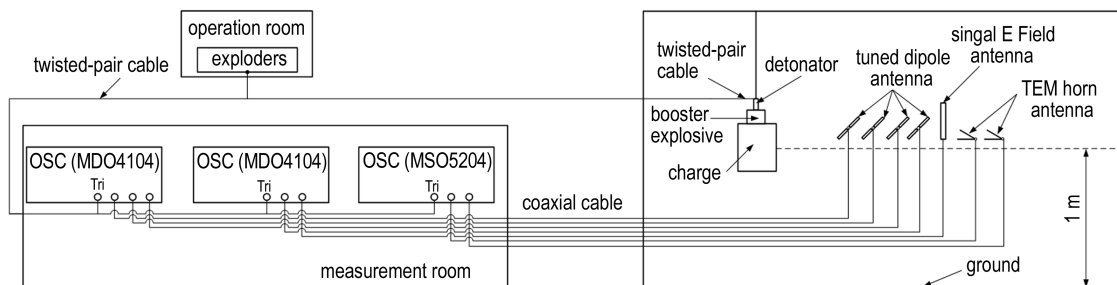


图1 RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号测量实验总体布局图

Fig.1 General layout of electromagnetic radiation signal measurement experiment of RDX and RDX based aluminized explosives

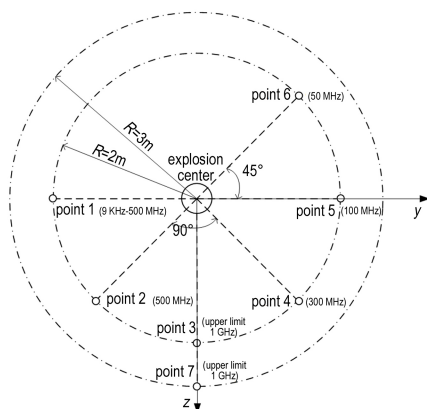


图2 测试天线分布图

Fig.2 Test antenna layout diagram



实验总体布局图如图1所示。实验选在无电磁干扰的开阔场地进行,炸药裸露悬挂于距离地面1 m高处,测试天线沿炸药径向方向2 m以及3 m距离处布置,各天线测点高度距离地面1 m。实验测试系统由测试天线、同轴电缆及示波器构成,各部分均经过标准标定(天线因子标定精度 ± 1.0 dB)。实验共采用7组测试天线,其中3组为宽带测试天线,4组为固定频率的调谐偶极子天线。天线分布如图2所示,测点1为宽带单轴E场天线,测试频率范围为9 kHz~500 MHz;测点3与测点7为宽带TEM喇叭天线(无限长非共面扇形天线),上限接收频率为1 GHz;测点2、测点4、测点5与测点6是中心接收频率分别为500,300,100 MHz以及50 MHz的调谐偶极子天线。测点1至测点6距离爆心2 m,测点7距离爆心3 m。测点3及测点7所布置的宽带TEM喇叭天线测试结果用于计算爆炸电磁辐射信号衰减比例系数。数据采集装置采用示波器,带宽1 GHz,采样率 $1.25 \text{ G}\cdot\text{s}^{-1}$,采集长度8 ms,天线端口与示波器之间采用同轴电缆连接,数据采集系统放置于电磁屏蔽柜,距离火工品起爆操作间50 m。

实验选用圆柱型压装 RDX 以及 RDX 基含铝炸药作为实验对象,炸药直径为 50 mm,长径比为 1:1,具体情况如表 1 所示。实验起爆方式采用瞬发电雷管起爆传爆药,传爆药起爆主装药的形式,采用起爆器起爆。传爆药选用直径 20 mm,高度 20 mm 的圆柱型药柱,成分为 RDX,质量为 20 g。为消除雷管及传爆药柱爆炸电磁辐射信号的影响,本次实验在同等测试条件下对雷管及传爆药爆炸电磁辐射信号进行了实验测量。将起爆器电压输出信号作为实验数据采集系统的触发信号, $t=0 \mu\text{s}$ 时刻为起爆回路起爆器放电初始时刻。

表 1 RDX 及 RDX 基含铝炸药组分及相关参数

Table 1 Composition and related parameters of RDX and RDX based aluminized explosives

type of explosive	$w / \%$	density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	diameter / mm	length / mm	mass / g
	$w_{\text{RDX}} : w_{\text{AL}} : w_{\text{binder}}$				
1	91:0:9	1.63	50	50	160
2	81:10:9	1.75	50	50	172
3	71:20:9	1.83	50	50	180
4	61:30:9	1.92	50	50	188

3 实验结果分析

3.1 电磁辐射信号延迟时间

距爆心 2 m 处各天线所测电磁辐射信号出现时刻

表 2 距爆心 2 m 处各测点 RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号出现时刻记录结果

Table 2 The start time of radiation signal from RDX based aluminized explosives at 2 m

type of explosive	start time / μs						random error / %
	point 1	point 2	point 3	point 4	point 5	point 6	
1	77.55	77.55	77.50	77.55	77.54	77.55	0.07
2	69.26	69.26	69.22	69.27	69.26	69.27	0.08
3	62.70	62.69	62.65	62.70	62.69	62.71	0.10
4	75.67	75.66	75.62	75.66	75.67	75.67	0.08

表 3 测点 3 处 RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号出现时刻、峰值到达时刻、持续时间记录结果

Table 3 The start time, peak arrival time, duration time of the radiation signal of RDX based aluminized explosives recorded at point 3

type of explosive	start time / μs	peak arrival time / μs	duration time / μs
1	77.50	77.52	0.11
2	69.22	69.23	0.11
3	62.65	62.66	0.12
4	75.62	75.63	0.12

记录结果如表 2 所示,根据标准偏差及随机误差分析^[22]计算得到各组实验测点 1~6 所测爆炸电磁辐射信号波形出现时刻的标准偏差在 0.019~0.021 μs 范围内,随机误差在 0.07%~0.1% 之间。从表 2 可以看出,同种炸药爆炸电磁辐射信号出现时刻基本一致,不同种类炸药爆炸电磁辐射信号出现时刻明显不同。考虑到爆炸场的复杂性以及爆炸脉冲辐射场信号测试的瞬态性^[22],可以近似认为爆炸电磁辐射信号来源于同一稳定辐射源,且在炸药径向方向上传播无明显差别。

为说明 RDX 及 RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号延迟时间特征,选取各组实验中测点 3 TEM 喇叭天线所测辐射信号出现时刻、峰值到达时刻以及电磁辐射信号持续时间记录结果列于表 3。由表 3 可以看出,炸药爆炸电磁辐射信号存在明显延迟时间,电磁辐射信号峰值到达时刻出现在起爆后 62.66~77.52 μs 之间,测试结果随机误差在 5%~7% 范围内,辐射信号持续时间为 0.1 μs 。

4 种炸药爆炸电磁辐射信号峰值到达时刻与含铝量关系如图 3 所示。由图 3 可以看出,当含铝量从 0 增至 20% 时,随铝粉的增加,峰值信号到达时刻逐渐减小;当含铝量为 20% 时,峰值信号到达时刻最小;当含铝量从 20% 增至 30% 时,峰值信号到达时刻逐渐增大,含铝量与爆炸电磁辐射延迟时间之间是非线性关

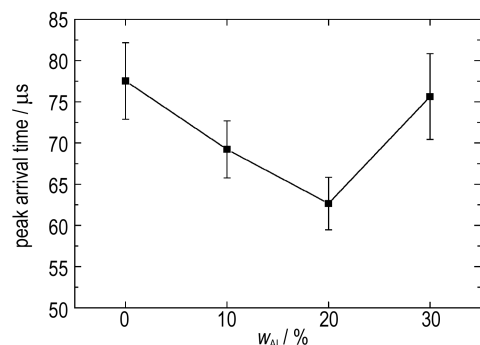


图 3 距离爆心 2 m 处 TEM 喇叭天线电场峰值信号到达时刻与含铝量关系

Fig.3 Relationship between peak arrival time of TEM horn antenna at 2 m distance from detonation center and aluminum content

系。Boronin A P等^[11]指出爆炸电磁辐射信号延迟时刻与炸药质量相关,而实验结果表明爆炸电磁辐射信号延迟时间与炸药组份也有明显关系,铝含量对RDX炸药爆炸电磁辐射信号延迟时间有明显影响。炸药爆炸电磁辐射是由爆炸过程中形成的带电粒子团的加速运动产生,爆炸产生的带电粒子团形成有效电磁辐射源这一过程是导致电磁辐射信号产生明显延迟的主要原因,铝的添加引起的爆轰参数和爆轰产物的改变是爆轰电磁辐射延迟时间发生变化的主要原因。RDX炸药添加铝粉后改变了炸药爆轰反应进程以及爆轰产物组份,导致爆炸电磁辐射延迟时间发生变化。当铝粉含量在一定范围时,铝粉的添加会促进有效爆炸电磁辐射源的快速形成,该过程中爆速爆压有一定下降,但含铝带电粒子的快速产生以及爆热的增加促进了有效爆炸电磁辐射源的形成,当铝粉含量达到一定极限时,随着爆速爆压下降以及铝粉含量增多,爆轰产物粒子数目的减少,大质量粒子的增多致使有效爆炸电磁辐射源的形成时间变长。

3.2 电磁辐射信号强度衰减规律

图4为RDX爆炸过程中距爆心2 m处各测试点天线所测典型波形,其他炸药爆炸电磁辐射信号波形与之类似。如图4a所示为示波器记录的6组天线时域上的整体波形,坐标轴显示时间为1 ms。天线所测数据在0~10 μs以内为明显的起爆器放电干扰信号,在10~50 μs以内无明显辐射信号,爆炸电磁辐射信号主要集中在50~100 μs以内。图4b为测试结果中峰值信号的具体波形,由图4b可以看出,爆炸电磁辐射信号波形在时域上为典型的脉冲形式,从偶极辐射原理来看^[21],爆炸电磁辐射时域信号波形与带电粒子偶极变化在时域上产生的辐射波形相符,说明爆炸电磁辐射信号来源与爆炸过程中的带电粒子有关^[12]。

炸药爆炸瞬间产生的巨大能量,使气体温度迅速升高,温度约为3500 K,这导致气体分子与原子发生热电离形成带电粒子团。随着爆轰反应的进行,带电粒子团运动产生了电磁辐射信号^[12],假设爆炸产生的电磁辐射来自于爆炸产生的带电粒子的偶极变化,则根据偶极辐射理论可得方程^[21]:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} P + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 cr^2} \frac{dP}{dt} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \frac{d^2P}{dt^2} \quad (1)$$

式中, P 是偶极矩,为电荷量与电荷位置半径的乘积, $C \cdot m$; ϵ_0 为真空介电常数($8.85 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$); c 为光速($3.0 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$); r 为观测点距离。

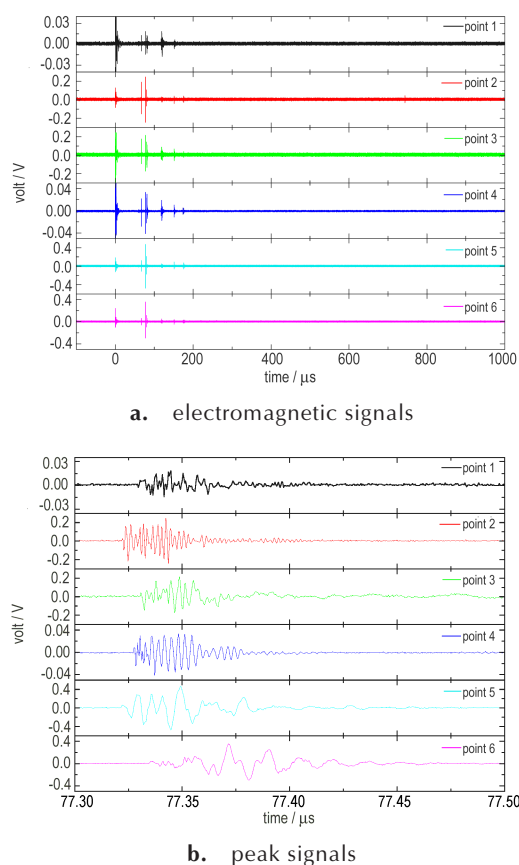


图4 距爆心2m处测点1~测点6 RDX爆炸电磁辐射信号波形及峰值信号局部放大图

Fig.4 Electromagnetic and the peak signals of point 1~6 at 2 m when RDX exploded

电磁辐射信号在空气中传播时,当 $r \ll \lambda$,电场强度以 $1/r^3$ 衰减,该区域属于偶极辐射的近场电离区;当 $r \sim \lambda$,电场强度以 $1/r^2$ 衰减,该区域属于中区;当 $r \gg \lambda$ 时,电场强度以 $1/r$ 衰减,该区域属于远区。根据2 m、3 m处TEM喇叭天线测试结果,计算得到在距爆心2 m至3 m范围内爆炸电磁辐射信号强度随距离衰减系数,如表4所示,随着炸药含铝量的增加,电磁辐射信号强度的衰减系数逐渐降低。由于实验条件有限,根据计算结果可以初步推断实验所用一定当量的RDX及RDX基含铝炸药在距爆心2 m、3 m处接收的爆炸电磁辐射

表4 RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号强度衰减系数

Table 4 Attenuation coefficient of the field strength of RDX based aluminized explosives

type of explosive	attenuation coefficient
1	$1/r^{1.83}$
2	$1/r^{1.31}$
3	$1/r^{1.10}$
4	$1/r^{1.09}$

来自于偶极辐射场的中远区,后续有待深入研究。

3.3 电磁辐射信号强度与 AL 含量关系

实验共测量了 6 组炸药爆炸产生的电磁辐射信号,其中 2 组为雷管和传爆药,另外 4 组为 RDX 及 RDX 基含铝炸药。爆炸电磁辐射信号强度测试结果如表 5 所示,所有数据最终记录结果为各组炸药 3 次重复实验结果的平均值,由于爆炸场环境复杂,同种炸药爆炸电磁辐射信号 3 次重复实验测量数值存在一定偏差,采用重复测量数据随机误差分析方法^[22],计算所得辐射场强测试结果随机误差在 8%~15% 范围内。如表 5 所示,距爆心 2 m 处 RDX 及 RDX 基含铝炸药爆炸电磁

辐射信号强度在 1.87~15.20 V·m⁻¹ 范围内。由表 5 中雷管及传爆药爆炸电磁辐射信号强度测试结果可以看出,在同等测试条件下,雷管以及传爆药爆炸电磁辐射信号强度低于单轴 E 场天线以及 TEM 喇叭天线所设置的最小接收信号,未测到明显信号。4 组调谐偶极子天线测量敏感度较高,所测雷管及传爆药爆炸电磁辐射信号强度与 RDX 及 RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号强度的最小值相差十几至数十倍,与最大值相差数百倍,因此在 RDX 及 RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号强度分析中可以忽略来自雷管及传爆药的影响。

表 5 RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号强度测试结果

Table 5 Experimental result of the field strength of RDX based aluminized explosives

type of explosive	field strength / V·m ⁻¹						
	at 2 m						at 3 m
	point 1	point 2	point 3	point 4	point 5	point 6	point 7
detonator	- ¹⁾	0.012	-	0.002	0.024	0.003	-
booster explosive	-	0.059	-	0.006	0.047	0.008	-
1	2.60	1.03	5.51	0.14	1.11	0.46	2.62
2	4.33	1.46	6.13	0.15	1.38	0.47	3.60
3	13.94	3.43	15.20	0.66	3.30	1.63	9.73
4	1.92	0.80	1.87	0.09	0.76	0.25	1.20

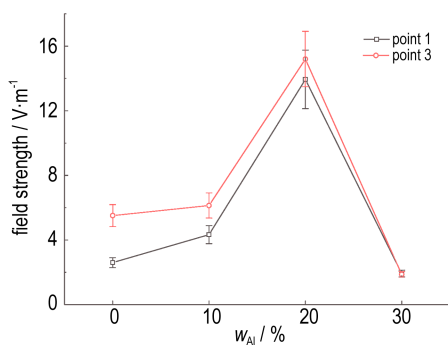
Note: 1) - indicates no obvious signal.

图 5a 所示为距爆心 2 m 处宽带 E 场天线和 TEM 喇叭天线所测爆炸电磁辐射信号强度与含铝量关系,图 5b 所示为距爆心 2 m 处中心频率分别为 500, 300, 100, 50 MHz 调谐偶极子天线所测爆炸电磁辐射信号强度与含铝量关系。由图 5a 和图 5b 可以看出,爆炸电磁辐射信号强度宽带天线测试结果与固定中心频率天线测试结果随炸药含铝量的变化趋势相同,当含铝量从 0 增至 20% 时,爆炸电磁辐射信号强度随含铝量的增加而增强;当含铝量为 20% 时,爆炸电磁辐射信号强度最大;当含铝量从 20% 增至 30% 时,爆炸电磁辐射信号强度随含铝量的增加而降低,并且低于 RDX 爆炸电磁辐射信号。爆炸电磁辐射由炸药爆炸过程中形成的带电粒子团加速运动产生,铝粉的添加会改变带电粒子的种类、数目以及速度,对爆炸电磁辐射信号强度产生影响。当含铝量从 0 增至 20% 时,爆炸过程中带电粒子的种类、数目以及速度会随着铝粉含量的增大而增大,导致爆炸电磁辐射信号强度逐渐增强;当含铝量增至 20% 时,铝粉的添加使得爆炸过程中形成的电磁辐射源达到最大,爆炸电磁辐射信号强度达到

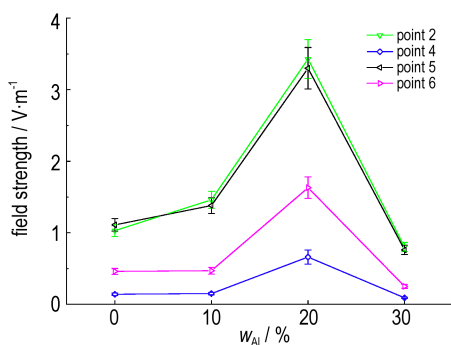
峰值;当含铝量增至 30% 时,由于爆轰过程中产生的分子总数急剧减少,高密度凝聚相 AL₂O₃ 等大质量粒子的形成^[22],使得整体带电粒子总数平均质量增大,数目减少,速度降低,从而导致爆炸电磁辐射信号强度急剧降低。

对比图 3 与图 5 可以看出,含铝量与爆炸电磁辐射信号延迟时间及爆炸电磁辐射信号强度之间均是明显的非线性关系,并且在含铝量为 20% 时,变化趋势发生改变。当含铝量从 0 增至 20% 时,随着铝粉的添加,RDX 爆炸过程中含铝带电粒子的产生以及在高温高压环境下大量电子的逸出,促进了有效爆炸电磁辐射源的快速形成,导致爆炸电磁辐射信号延迟时间逐渐缩短,同时,大量带电粒子的产生使得爆炸电磁辐射信号强度逐渐增强;实验中,当含铝量增至 20% 时,爆炸电磁辐射信号延迟时间达到最小,强度达到最大;当含铝量增至 30% 时,由于爆速爆压的降低、大质量粒子的形成以及粒子数目的降低,导致有效爆炸电磁辐射源的形成时间变慢,强度降低。RDX 基含铝炸药爆炸电磁辐射信号延迟时间及强度与含铝量之间的关系

均表明炸药爆炸过程中形成的带电粒子的种类、数目以及运动过程是爆炸电磁辐射源产生速度和强度的重要影响因素,金属元素的添加不仅能改变炸药爆炸热力学特性,对炸药爆炸的电磁辐射特性也有着重要影响,由于实验条件所限,实验中未能给出电磁辐射与含铝量的明确关系公式,具体量化关系还需进一步深入研究。



a. field strength of E-field antenna and TEM horn antenna at 2 m



b. field strength of tuned dipole antenna at 2 m

图5 距爆心2 m处测点1~6电磁辐射信号强度测试结果随炸药含铝量关系

Fig5 Relationship between w_{Al} and field strength of point 1 to point 6 at 2 m

3.4 电磁辐射信号频谱分析

为说明RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号频率组份,将爆炸电磁辐射信号时域波形进行快速傅里叶变化,得到4种炸药爆炸电磁辐射信号频谱对比结果,如图6所示。从爆炸电磁辐射信号频谱分析来看,RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号是一个宽带低频信号,炸药爆炸电磁辐射信号频率主要集中在500 MHz以内,不同炸药爆炸电磁辐射信号整体频谱分布明显不同。偶极辐射机理表明^[21],带电粒子偶极变化产生的辐射其频谱为覆盖一定频率范围的连续谱,这与图6所示爆炸电磁辐射信号频谱相符。由图6可以看出,4种炸药爆炸电磁辐射信号在100 MHz以

内的频谱分布基本相同,频率基本分布在30 MHz、60 MHz以及80 MHz附近,且该频段为整体信号能量集中部分,该频段信号主要与RDX爆轰反应产生的带电粒子有关。在100 MHz以上频率范围内,铝含量的变化会导致爆炸电磁辐射信号出现不同频率组份。当含铝量为10%时,爆炸电磁辐射频谱在380 MHz附近有明显频率成分;当含铝量为20%时,爆炸电磁辐射频谱在310 MHz附近以及380 MHz附近有明显频率成分。当含铝量为30%时,爆炸电磁辐射信号较弱,整体频谱能量主要集中在100 MHz以内,100~500 MHz频率范围内无明显频率组份。含铝量为10%和20%的炸药爆炸电磁辐射信号在300~380 MHz附近的频率分量主要与爆轰过程中生成的含铝元素带电粒子有关。当含铝量为30%时,爆炸产生的有效带电粒子辐射源变小,粒子数目以及粒子速度的下降导致电磁辐射频谱改变。

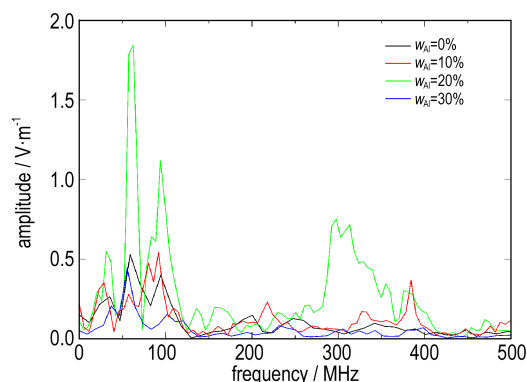


图6 RDX及RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射典型频谱对比

Fig.6 Comparison of typical spectrum of electromagnetic radiation of RDX and RDX based aluminized explosives

4 结论

(1) 炸药爆炸电磁辐射信号出现时刻有明显延迟,距爆心2 m处所测爆炸电磁辐射信号延迟时间在62.66~77.52 μs 之间,RDX基含铝炸药爆炸产生的电磁辐射信号延迟时刻与含铝量是明显的非线性关系。

(2) 距爆心2 m处,RDX及RDX基含铝炸药爆炸产生的电磁辐射信号强度在1.87~15.20 $V \cdot m^{-1}$ 范围内,随距离的增加而衰减,不同含铝量炸药爆炸电磁辐射信号强度在空气中随距离的衰减系数不同。

(3) RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号强度与含铝量是非线性关系,当含铝量为0~20%时,电磁辐射信号强度随含铝量的增加而增强;含铝量为20%~

30%时,电磁辐射信号强度随含铝量的增加而减小。

(4) 铝粉的添加会明显改变炸药爆炸电磁辐射信号频谱,RDX基含铝炸药爆炸电磁辐射信号频率集中在500 MHz以内。当含铝量为0和30%时,爆炸电磁辐射信号频率主要集中在100 MHz以内,当含铝量为10%和20%时,爆炸电磁辐射信号在100 MHz以内且在300~380 MHz范围内有明显频率组份。

参考文献:

- [1] Kolsky H. Electromagnetic Waves emitted on Detonation of Explosives [J]. *Nature*, 1954, 173(4393):77-77.
- [2] Takakura T. Radio Noise Radiated on the Detonation of Explosive [J]. *Publications- Astronomical Society of Japan*, 1955, 7:210.
- [3] Andersen W H, Long C L. Electromagnetic Radiation from Detonating Solid Explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(4):1494.
- [4] Lint V A J V. Electromagnetic Emission from Chemical Explosions [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1983, 29(6):1843-1849.
- [5] 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 Sheng-yu, SUN Xin-li, QIAN Shi-ping et al. Electromagnetic radiation caused by chemical explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(4): 363-368.
- [6] 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, (11):1384-1387, 1394.
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, (11):1384-1387, 1394.
- [7] Harlin J, Nemzek R. Physical Properties of Conventional Explosives Deduced from Radio Frequency Emissions [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2009, 34(6):544-550.
- [8] Wilde Z, Gibson J, Nakamoto T, et al. Probing detonator performance through radio wave emissions [C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018, 19791): 160031.
- [9] Smith D K, Francois E, Gibson J, et al. Modeled diagnostics for detonator characterization [C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018, 19791): 100038.
- [10] Tasker D, Bowden P, Francois E, et al. Rogowski coils for studies of detonator initiation and other diagnostics [C]//AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018, 19791): 160028.
- [11] 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.
- [12] ОРЛЕХКО Л П. 爆炸物理学(下册) [M]. 孙承纬, 译. 北京: 科学出版社, 2011: 1080-1115.
- [13] Cherepenin V A, Shumilin V P. About Mechanism of Wide-band Microwave Radiation at Explosion of Condensed High Explosives [C]//Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 4. Springer, Boston, MA, 2002:33-39.
- [14] 戴晴, 何建国, 王尚武, 等. 等离子体云团宽带电磁辐射源的实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(6):1399-1403.
DAI Qing, HE Jian-guo, WANG Shang-wu, et al. Experimental study on wideband electromagnetic radiation from plasma cloud [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(6):1399-1403.
- [15] 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, (S2):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, (S2): 188-192.
- [16] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V E, et al. Spherical combustion clouds in explosions [J]. *Shock Waves*, 2013, 23(3): 233-249.
- [17] 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.
- [18] 殷海权, 潘清, 张建亮, 等. 铝粉对炸药性能的影响 [J]. 含能材料, 2004(05):68-70+6.
YIN Hai-quan, PAN Qing, ZHANG Jian-liang, et al. The Influence of Aluminum Power on Explosive Performance [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004(05):68-70+6.
- [19] 胡栋, 孙珠妹. 铝粉颗粒度对黑索金含铝炸药粉快速反应影响的微观特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(2):122-128.
HU Dong, SUN Zhu-mei. Studies on the Micro-Behaviour of the Influence of the Aluminum Particle Size on the High Speed Reaction for RDX Power Containing Aluminum [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1995, 15(2):122-128.
- [20] 裴红波, 焦清介, 覃剑峰. 基于圆筒实验的RDX/Al炸药反应进程 [J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(5):636-640.
PEI Hong-bo, JIAO Qing-jie, QIN Jian-feng. Reaction process of aluminized RDX-based explosives based on cylinder test [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2014, 34(5):636-640.
- [21] 周霖, 廖英强, 徐更光. 爆轰产物导电性的实验测量 [J]. 含能材料, 2005, 13(3):148-149.
ZHOU Lin, LIAO Ying-qiang, XU Geng-guang. Experimental Measurement of Conductivity for the Detonation Product [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3):148-149.
- [22] 陈元金. 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析 [M]. 第1版. 北京: 国防工业出版社, 1997:1-46.
- [23] 郭硕鸿. 电动力学 [M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 240-274.
- [24] ОРЛЕХКО Л П. 爆炸物理学(上册) [M]. 孙承纬, 译. 北京: 科学出版社, 2011: 347-363.

Experimental Study on Characteristics of Explosive Electromagnetic Radiation Signals of RDX Based Aluminized Explosives

CHEN Hong, HE Yong, PAN Xu-chao, JIAO Jun-jie, SHEN Jie, ZHANG Jiang-nan

(Ministerial key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to obtain the characteristics of electromagnetic radiation signals during the explosion of RDX and RDX-based aluminized explosives, the broadband antenna measurement system is utilized in explosion experiments. The experimental results show that the electromagnetic radiation signal of the RDX and RDX-based aluminized explosives has a significant delay compared with the detonation time. At 2 m distance, the field strength of the explosive electromagnetic radiation signal is 1.8–15.2 V·m⁻¹ and decreases with the increase in the explosive distance. When the aluminum content is from 0% to 20%, the field strength of the electromagnetic radiation signal generated by the explosion increases with the increase of aluminum content. When the aluminum content is from 20% to 30%, the field strength of the electromagnetic radiation signal generated by the explosion decreases as the aluminum content increases. The frequency of electromagnetic radiation signals generated by the explosion of RDX and RDX based aluminized explosives is mainly distributed within 500 MHz. The addition of aluminum changes the frequency component of the electromagnetic radiation signal, and the spectrum of the electromagnetic radiation signal of different aluminized explosives is different.

Key words: RDX based aluminized explosive; electromagnetic radiation; antenna measurement; spectrum analysis

CLC number: TJ55;O389;O441.5

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019261

(责编:姜梅)