

# Experimental Research on the Effect of Aluminum Additive on the Electromagnetic Radiation in Detonation Process

Chen Hong, He Yong\*, Pan Xuchao, Shen Jie, He Xun

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

## Email address:

ch1012702581@163.com (Chen Hong), heyongnjust@163.com (He Yong), pxchxc@njust.com (Pan Xuchao), 799936210@qq.com (Shen Jie), 531723614@qq.com (He Xun)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Chen Hong, He Yong, Pan Xuchao, Shen Jie, He Xun. Experimental Research on the Effect of Aluminum Additive on the Electromagnetic Radiation in Detonation Process. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 6, 2016, pp. 398-404. doi: 10.11648/j.sd.20160406.19

Received: November 15, 2016; Accepted: December 5, 2016; Published: December 7, 2016

**Abstract:** Explosions of explosives can produce electromagnetic radiation signals. Based on the theory of the explosion of electromagnetic radiation, the effects of metal additives on the electromagnetic radiation produced by explosive detonation should be researched. In this paper, the electromagnetic radiation signal characteristic produced by the passivation RDX of metal additives explosion were studied by experimental. The rod-shaped antenna measurement system was used to measure the electromagnetic radiation signals generated by the different percentages of aluminum-containing passivation RDX and pure passivation RDX. The results show that the intensity of the electromagnetic radiation signal produced by the explosion is obviously increased by mixing aluminum. In the case of the same explosive mass, the signal intensity of the electromagnetic radiation generated by the explosion increases with the aluminum mass percentage is increased. When the content of aluminum is the same, with the increase of the mass of explosives, the intensity of the electromagnetic radiation signal generated by explosion also increases. The main component of the electromagnetic radiation signal frequency generated by explosives is less than 1MHz, the electromagnetic spectrum generated by explosives with the same composition is consistent.

**Keywords:** Explosives Addition of Aluminum, Detonation, Electromagnetic Radiation, Measurement, Spectrum Analysis

## 铝添加物对炸药爆轰过程中的电磁辐射影响实验研究

陈鸿, 何勇\*, 潘绪超, 沈杰, 何珣

智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京理工大学, 南京, 中国

## 邮箱

ch1012702581@163.com (陈鸿), heyongnjust@163.com (何勇), pxchxc@njust.com (潘绪超), 799936210@qq.com (沈杰), 531723614@qq.com (何珣)

**摘要:** 炸药爆炸能产生一定的电磁辐射信号, 为了研究金属添加物对炸药爆轰产生电磁辐射的影响, 本文基于爆炸产生电磁辐射的基本理论, 对钝化黑索金炸药添加金属后爆炸产生的电磁辐射信号特性进行了实验研究。实验中采用杆式天线测量系统分别测量不同含铝百分比炸药以及纯钝化黑索金炸药的爆炸电磁辐射信号, 并进行分析。分析结果表明: 炸药添加金属之后其爆炸产生的电磁辐射信号强度有明显的增强; 在混合炸药质量相同的情况下, 随着金属铝的质量百分比的增加, 爆炸产生的电磁辐射信号强度也随之增加; 在金属铝的含量相同的情况下, 随着炸药质量的增加, 爆炸产生的电磁辐射信号强度也随之增加; 混合炸药的电磁辐射信号频率主要成分在1MHz以内, 相同组份炸药爆炸电磁频谱基本一致。

**关键词:** 含铝炸药, 爆炸, 电磁辐射, 测量, 频谱分析

## 1. 引言

化学爆炸过程中常伴随着光、热力学、电磁效应。现有爆轰物理学对炸药爆轰过程中的热力学效应有了相当深入的研究。然而炸药爆轰是一个复杂的过程, 尤其对其爆轰过程产生电磁辐射的机理目前还停留在原理性解释阶段, 还未形成普遍适用的数学原理模型, 对于爆炸产生电磁辐射现象的研究主要是利用实验测试手段。1955年Tatuo Takakura[1]发表的文献中表明, 用0.1~0.4g叠氮化铅作为工质进行爆轰, 在起爆后的80~160us可测得一系列小于90MHz的电磁辐射信号[1]。W. H. Andersen和C. L. Long[2]在实验中用天线测试系统测得爆炸产生的电磁辐射信号频率在400~500MHz范围内[2]。此后V. I. Pechkovskii和G. S. Kalchik[3]进行了类似的相关实验, 作者利用10kg的硝酸铵作为工质, 试验测得电磁辐射频率范围为7.8GHz~11.2GHz[3]。VAJ. VanLintz[4]在1980年发表的文章中表明, 用低频宽带、高频和超高频窄带三种天线, 测量了0.01~345kg高能炸药爆炸产生的电磁辐射信号, 得到高能炸药爆炸产生的电磁辐射信号持续时间与炸药的当量成比例, 电磁辐射信号强度与距离的 $1/3$ 次方成比例, 并且作者表明, 试验中炸药爆炸高度不同其爆炸产生的电磁辐射信号方向也不同[4]。近年来国外学者针对核爆及非核爆产生电磁脉冲辐射的机理进行了相关理论研究, 学者F. Mende[5]根据经典电磁学以及现代电磁学对核爆产生电磁脉冲辐射机理进行了解释, 认为伴随着核爆产生的长波辐射可能是受约束等离子体中的横向等离子体共振的结果, 并根据该机理的推导, 认为常规炸药爆炸产生电磁辐射现象应同样也符合该理论, 作者通过该理论计算了三硝基甲苯发生爆炸反应时, 当每摩尔三硝基甲苯完全反应时, 其形成的等离子体团能产生的辐射能产生约为370V/m的电磁辐射[5]。I. Yu. Sergeev[6]研究了在电离层爆炸产生的电磁干扰的机理模型, 计算结果表明电磁干扰的传播方向沿着磁场的方向, 该模型可用于火箭引擎在电离层工作时产生的电磁干扰[6], 国内学者曹景阳[9-10]等对此也进行了一定研究。A. L. Kuhl[7]对TNT炸药产生电磁脉冲辐射的机理进行了研究, 依据TNT炸药爆炸产生电磁脉冲辐射信号的试验数据对炸药产生电磁辐射进行了仿真计算, 认为爆炸产生电磁辐射与爆轰产物中的带电粒子运动有关[7]。上述这理论与实验结果均表明, 炸药在爆炸过程中是伴随着强烈的电磁辐射效应的产生, 且电磁辐射的强度大于热辐射的强度, 并且爆炸产生电磁辐射这一现象与爆炸反应过程中产生的带电粒子的运动有关。

国内对炸药爆炸产生电磁辐射现象的研究起步较晚。其中, 陈生玉[8]等研究了带壳装药爆轰产生电磁辐射信号特性, 利用量纲分析法给出了定量的关系[8]。曹景阳[9-10]等通过地面模拟试验, 采用杆式天线测量了火箭分离时不同种类的航天火工品爆炸产生的电磁

辐射信号, 利用实时频谱仪对其进行了特性分析。通过对不同状态下记录的背景信号进行分析, 对于测试过程中的信号干扰, 采用了小波分析的方法, 提取了航天火工品爆炸产生的电磁辐射的主频率成分, 实验结果表明聚能炸药索爆轰引起的电磁辐射频率主要分布在2MHz以下[9-10]。戴晴[11]等用铝、镁等混合物作为工质进行爆轰实验, 在不同方向用4个宽带天线对球形工质产生的电磁辐射进行接收测量。实验使用150克工质, 测得一个衰减的不规则的电磁脉冲信号, 信号持续时间约50 ns。信号的频率范围为0.1~4.0GHz, 其中能量主要集中在1GHz~4GHz之间, 2GHz左右处的能量最大。爆轰点产生的功率约2W, 同时工质爆炸产生的电磁辐射能使5米外的计算机死机[11]。王长利等[12]测量了36~128g典型凝聚炸药(B炸药、梯黑铝)爆轰产生的电磁脉冲辐射, 测得的电磁辐射频率均在100MHz以内。作者指出, 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3500 K, 导致气体电离形成等离子体, 电磁辐射的根源可能就是等离子体的辐射[12]。

不同种类以及不同质量的炸药爆轰能产生不同的电磁辐射信号, 国内外大多数学者认为炸药在爆轰过程中会产生一个由激波前沿, 爆轰产物构成的电离区, 该电离区会对外辐射电磁波。基于该理论, 炸药爆轰过程中的冲击波速度, 爆热以及爆轰产物粒子浓度是影响爆炸电磁辐射的主要因素。其中学者A. L. Kuhl, JB Bell[13-14]等对TNT炸药爆炸中产生的球形燃烧云团体积大小、爆炸产生的热量随时间以及距离分布规律以及爆炸产生的燃烧云团中的电离离解过程进行了理论与数值仿真研究, 同时利用数值仿真研究了当在空气中散布铝粉及在炸药外层包覆一层铝薄膜时, 对爆炸产生云团的体积大小、热力学参数及电离程度的影响, 论文结果对现有爆炸产生电磁辐射理论中涉及的爆轰产生的等离子体区形成的研究, 提供了数值研究基础[13-14]。关于炸药添加金属后会改变炸药的爆轰性能, 在国内学者陈朗[15]的研究中表明, 含铝炸药爆轰过程中产生的爆热明显大于未添加金属铝的常规炸药[15], 而对于炸药添加金属后爆轰产生的电磁辐射特性报道较少, 相关研究正处于发展阶段。本文主要依据炸药爆轰产生等离子体区, 等离子体辐射产生电磁脉冲的原理, 设计了不同含铝量的钝化黑索金与铝粉的混合炸药, 通过对炸药爆轰的爆热以及爆轰产物离子浓度的改变, 研究金属铝对炸药钝化黑索金爆轰产生的电磁辐射的影响规律。本文共设计了7组实验, 通过对含金属炸药爆轰产生电磁辐射进行了测量和理论分析, 验证炸药添加金属之后对产生的电磁辐射是否有影响。对不同含铝量的钝化黑索金混合炸药、雷管、不含金属的纯钝化黑索金炸药爆炸电磁辐射信号进行了测量和分析; 依据试验测量结果对电磁辐射强度与炸药含铝量, 炸药总质量

之间的关系进行了分析；对不同含铝量的混合炸药、纯钝化黑索金和雷管的爆炸电磁辐射频率特性进行了研究，同时对比了钝化黑索金添加金属之后的混合炸药与钝化黑索金爆炸电磁辐射频谱特性。

### 2. 基础理论

在炸药爆轰过程中，爆轰波、爆轰产物和空气冲击波形成气动力场，并且向周围空间辐射能量，在这种情况下可以产生电磁脉冲辐射。常规凝聚炸药的爆轰产物与空气相互作用的初始时刻，空气冲击波的速度为7~9km/s，波阵面压力为0.07~0.09GPa，由于冲击波引起的部分电离和离解过程，其波阵面处空气被瞬间加热到(10~12) × 10<sup>3</sup>K，导致爆炸作用近区中非平衡、不完全电离的低温等离子体区域的形成，所形成的带电成分产生了准静止的电场和磁场，其场强与爆轰产物中的电荷非均匀分布有关[16]。凝聚炸药爆轰过程中，爆轰阵面区域中的电化学反应可能受制于冲击极化、电子随爆轰波阵面的扩散、压电效应、凝聚炸药晶体的破坏和炸药中包含气体的绝热压缩。在凝聚炸药爆轰过程中，可以将爆轰波作为一种结构，其组成元素是冲击阵面、振动弛豫区、反应激发区、快速放热反应区和膨胀区，如图1所示。

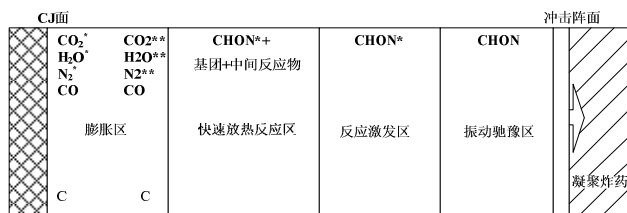


图1 凝聚炸药爆轰波结构图。

基于上述分析过程所述，炸药爆轰在爆轰阵面处产生了一个低温等离子体区，并且由等离子体辐射产生了电磁辐射。其中影响爆轰过程中低温等离子体产生的因素包含爆热、冲击波速度以及爆轰产物离子浓度。本文考虑到炸药在添加金属铝后会增加爆轰过程中的爆热与爆轰产物粒子浓度，设计了一种钝化黑索金炸药与金属铝的混合炸药，为了分析爆炸中产生电磁脉冲的现象，分析金属铝对炸药爆轰产生电磁脉冲辐射的影响，本文主要进行了试验研究。

### 3. 实验系统方法

实验装置和布局图如图2所示。实验在无电磁干扰，空旷，干净的室外空旷场地进行。实验测试装置采用宽杆式铜柱天线测试系统，通过杆式铜柱天线接收电磁辐射信号，信号经过同轴传输线传输并由示波器记录波形，由计算机分析处理实验记录的波形及数据。

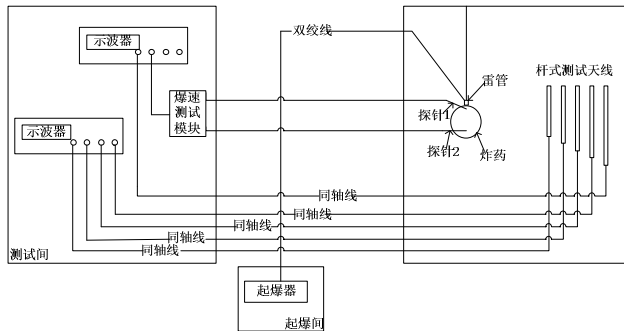


图2 试验布局图。

本文共设计了7组实验，其中为了排除电雷管爆炸产生的影响，单独设计了一组雷管单独引爆的试验。实验所用炸药通过原料钝化黑索金(8701)炸药和铝粉均匀混合后使用模具压制而成，炸药密度为1.68g/cm<sup>3</sup>，炸药呈圆柱状，由薄尼龙外壳包裹，如图3所示。试制混合炸药的铝质量含量分别为10%，20%，30%，炸药质量分为5g，10g，20g三种。实验布局如图2所示，试验过程中分别在距离爆炸中心1.0m，1.25m，1.5m，1.75m，2.0m处安放测试天线，炸药用细绳悬挂于距离地面1m的高处，在炸药的两个端面分别安放测量爆速所用的电探针，炸药的一端连接电雷管，起爆器起爆电雷管引爆炸药。

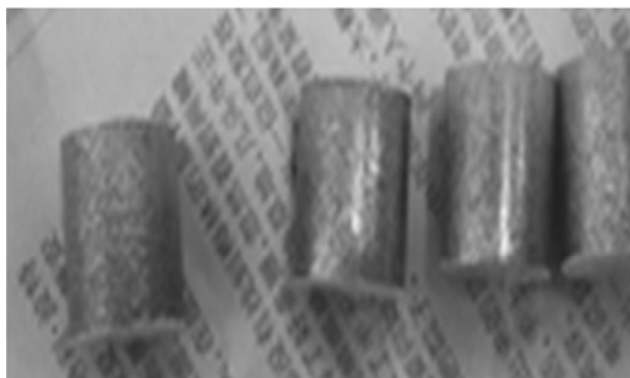


图3 试验用炸药。

### 4. 实验结果及分析

在炸药总质量均为10g的前提下，本文设计了铝质量百分比为10%，20%，30%三种不同的炸药，对电磁辐射强度与铝含量之间的关系进行了研究；在铝含量均为10%的前提下，设计了质量为5g、10g、20g三种不同的炸药，对电磁辐射强度与炸药质量之间的关系进行了研究；同时对不同铝含量混合炸药爆炸电磁辐射频率特性进行了研究。试验共进行7发有效试验，其中包含未添加金属铝的纯钝化黑索金(8701炸药)以及单个雷管的爆轰试验，对于每种类型的炸药，试验均在同样条件下重复一次，以确保实验数据可靠性，试验结果列于表1。

表1 实验结果。

序号	炸药种类	质量m (g)	含铝质量百分数 (%)	电场强度测量峰值(Volt/V)				
				1#天线	2#天线	3#天线	4#天线	5#天线
1	混合炸药	5	10%	0.81	/	0.65	0.47	0.39
2	混合炸药	10	10%	1.1	0.92	0.72	0.55	0.43
3	混合炸药	10	20%	1.38	/	0.96	0.91	0.80
4	混合炸药	10	30%	2.1	/	1.62	1.53	1.42
5	混合炸药	20	10%	1.1	/	0.75	0.70	0.64
6	8701炸药	5	0%	0.25	0.21	0.13	0.08	0.05

由于试验条件有限，2#测试天线存在4组实验未测到结果，其他数据明显异于其他测试结果，因此为了保证数据分析的可靠性，舍去2#天线测试结果。本文进行了一组电雷管单独引爆的试验，试验未测到电雷管爆轰产生的电磁辐射信号，基于该组对比试验，本次试验认为炸药爆炸产生的电磁辐射信号不是由电雷管的爆炸产生的。图4所示为典型的实验所测波形，图5为10g含铝量为10%混合炸药2m处电磁辐射不同时间分辨率的显示波形。实验中取测量结果的峰值，最后的结果以各测点测量结果的平均值确定。

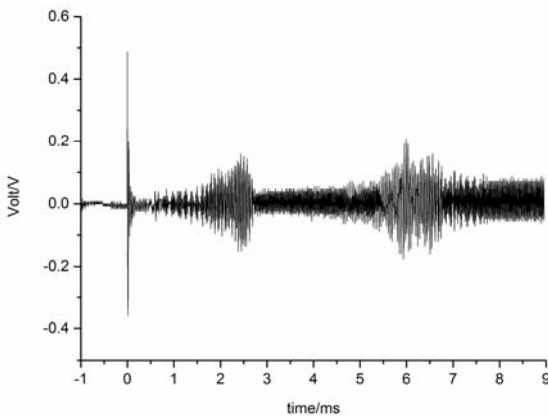


图4 含铝量为10%的10g混合炸药2m处电磁辐射信号。

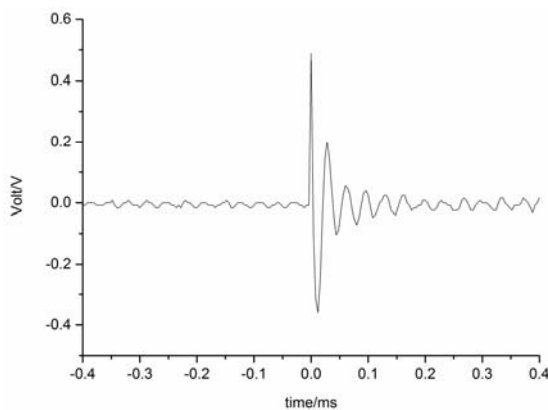


图5 含铝量为10%的10g混合炸药2m处电磁辐射高时间分辨率图。

#### 4.1. 时域信号分析

##### 4.1.1. 信号强度与铝质量含量的关系

据表1实验结果，本文在炸药质量均为10g的前提下，取炸药含铝量分别为10%、20%、30%时，比较试验所测电

磁辐射强度值，结果如图6所示。可以看出：当炸药当量一定时，其相同位置处测得的电磁脉冲辐射信号强度随着炸药含铝量百分比的增加，信号强度也随之增加，这说明纯炸药添加金属铝后对其爆炸产生的电磁脉冲信号有明显的改变；电磁脉冲信号随着距爆炸中心的距离的增加而减小，符合电磁波的传播规律。由于样本点较少未拟合出金属铝的含量对产生电磁辐射强度的具体关系。从文章第二节所述的电磁辐射产生机理上而言，即一定当量工质爆炸会产生较大量带电等离子体和带电爆轰产物，这些电磁辐射是由等离子体和带电荷的爆轰产物在地球磁场中运动造成的，而含铝炸药爆轰过程中会产生较大的爆热，并且铝含量的增加会增加爆轰产物中的离子浓度，这使得炸药添加金属铝后爆轰产生的电磁辐射信号强度有着明显的增加，这符合现有的炸药爆轰产生电磁脉冲辐射的基础理论。

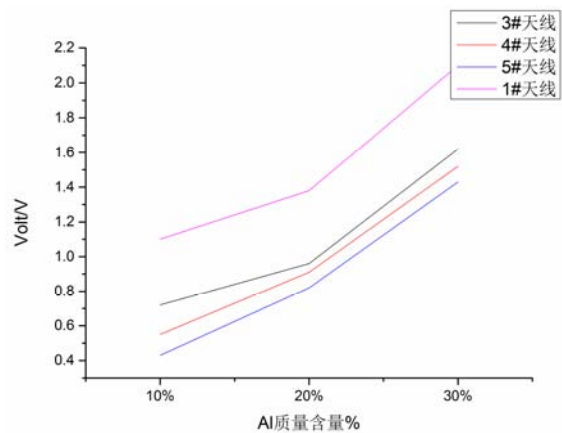


图6 相同质量炸药下含铝量与电磁辐射信号强度关系。

##### 4.1.2. 相同铝含量下信号强度与炸药质量的关系

据表1实验结果，当炸药铝质量含量均为10%的前提下，炸药质量分别为5g、10g、20g，比较其电磁脉冲辐射信号强度值，比较结果如图7所示。可以看出：当炸药含铝量一定时，其相同位置处测得的电磁脉冲辐射信号强度随着炸药质量的增加，信号强度也随之增加，由本次试验结果可以得到在该试验条件下，炸药质量从5g增加到10g时，在1m处测得电磁辐射强度增量为0.3V，而炸药质量从10g增加到20g时，在1m处测得的信号强度峰值基本一致。由文献[12]中所述，炸药爆轰在近场产生的电磁脉冲辐射信号测试环境较为复杂，因此在该点处测试数据会存在一定偏差。3#，4#，5#天线测得电磁脉冲辐射强度均随着炸药

质量的增加而有一定增加。如本文第二节所述理论，炸药质量的增加，其爆轰过程中的爆热，冲击波速度，爆轰产物粒子浓度均会增加，这有益于低温等离子体的形成，因此其辐射的电磁波应该是增强的。

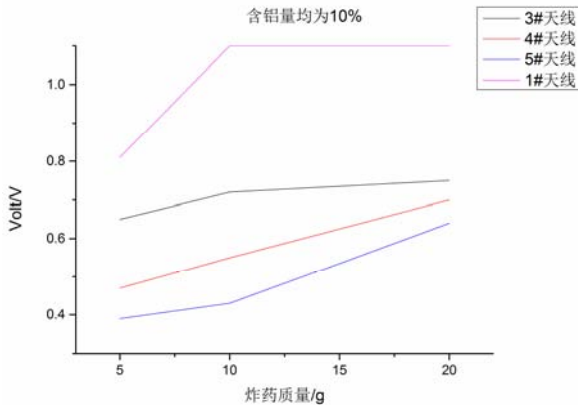


图7 含铝量均为10%时炸药质量与电磁辐射信号强度关系。

### 4. 1. 3. 爆轰产生电磁辐射信号分析

本次试验对纯炸药钝化黑索金爆轰产生的电磁辐射也做了测试，图8为5g纯钝化黑索金爆炸后，在距爆心1m处，1#天线所测波形。对比同样位置处质量为5g的含铝量为10%的混合炸药爆轰1#天线所测结果，可以发现：纯炸药在添加金属铝后，其爆轰产生的电磁脉冲辐射有一个明显的提高，而且纯钝化黑索金爆炸所测得的电磁脉冲辐射波形与图4和图5中含铝混合炸药测得波形有着明显的差异。这表明炸药在添加金属后对爆轰产生的电磁辐射有着明显的影响，在本次试验结果中可以得出，在一定当量下，添加金属铝会使炸药爆轰产生的电磁脉冲辐射信号强度增大。

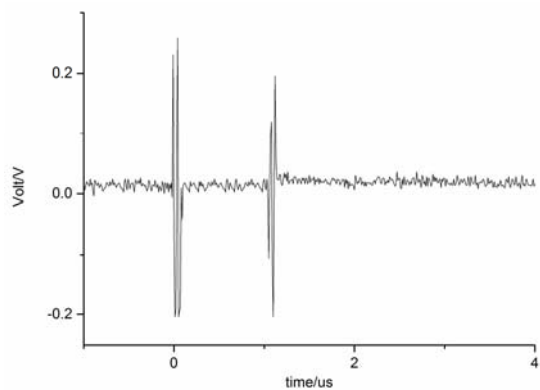


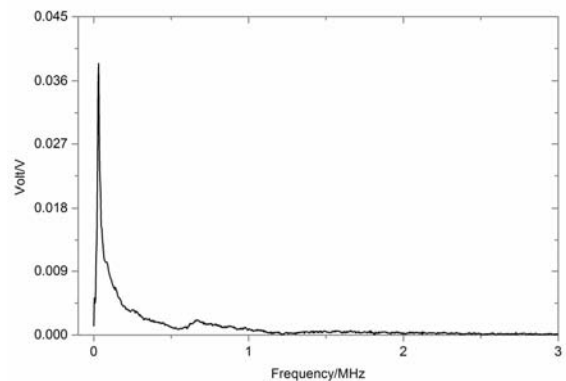
图8 纯钝化黑索金（8701）爆轰所测电磁辐射信号。

### 4. 2. 频域信号分析

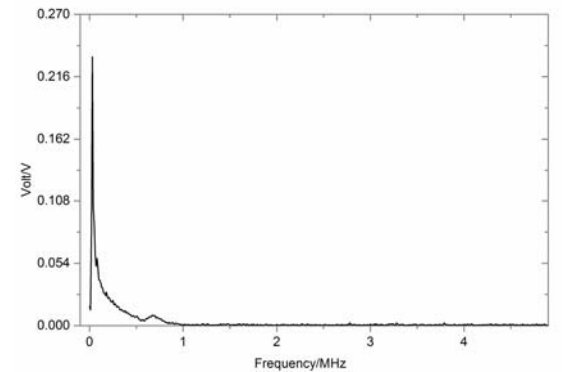
将纯炸药以及不同含金属比例的炸药爆炸测得的试验结果进行频谱对比分析，如图9所示。从典型波形的频谱分析来看，纯炸药爆炸产生的电磁辐射频率主要集中在6MHz以内，在24MHz附近还有一些较低幅值的分量。添加金属铝的混合炸药爆炸产生的电磁辐射频率主要集中在1MHz以内，不同种类混合炸药的电磁辐射频谱主要频率成

分比较接近，混合炸药与纯炸药的电磁辐射频谱主要频率成分不同，混合炸药产生的电磁辐射频谱的幅值大于纯炸药产生的电磁辐射频谱的幅值。本次试验测得添加金属铝的混合炸药爆炸产生的电磁辐射信号频率主要集中在1MHz以内，这主要与所选炸药的种类以及质量有关。

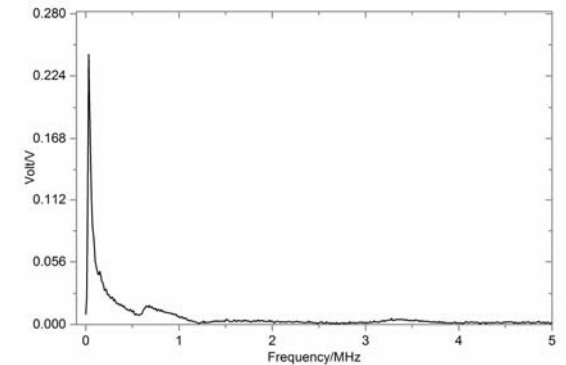
本节主要对比了炸药添加金属后对其爆炸产生的电磁辐射信号的影响，结果表明，相同组份炸药爆轰产生的电磁辐射的频谱基本相同，炸药在添加金属铝之后，频谱有明显的变化，说明在对炸药添加金属铝之后，其爆轰过程中产生的电磁辐射发生了明显的变化，这种变化是值得关注的。同时文章通过相同组份的同种炸药的多组试验测量结果表明，相同组份炸药爆炸产生的电磁辐射频谱具有一致性。



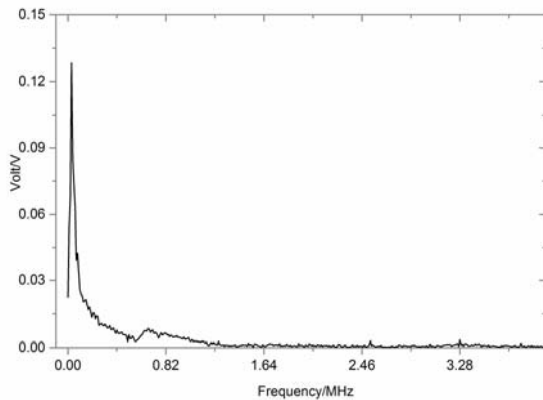
(a) 10g含铝量10%混合炸药频谱图



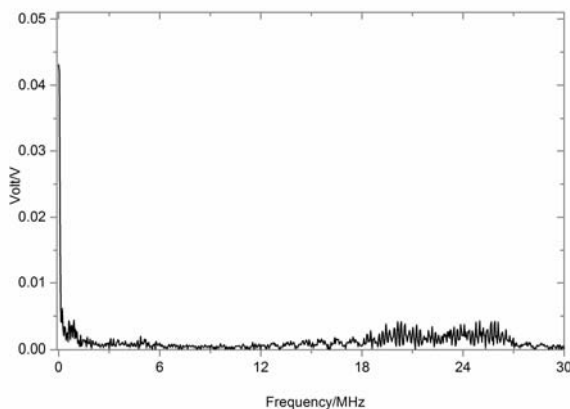
(b) 10g含铝量20%混合炸药频谱图



(c) 10g含铝量30%混合炸药频谱图



(d) 20g含铝量10%混合炸药频谱图



(e) 纯钝化黑索金炸药频谱图

图9 不同炸药频谱图对比。

## 5. 结论

- (1) 采用杆式天线测试系统测量了不同含铝混合炸药、纯钝化黑索金以及电雷管的爆炸电磁辐射信号。
- (2) 炸药添加金属之后其爆炸产生的电磁辐射信号强度有明显的变化，在取小药量混合炸药试验的前提下（质量均为10g），得到随着金属铝的质量百分比的增加，其电磁辐射信号强度也随之增加。
- (3) 在含铝量百分比相同（含铝量均为10%）的前提下，随着炸药质量的增加，其电磁辐射信号强度也随之增加。
- (4) 同种组份炸药爆炸产生的电磁辐射频谱基本一致，纯炸药在添加金属铝之后的电磁辐射频谱有明显变化，可作为分辨炸药种类的一种方式。
- (5) 炸药爆炸过程中的电磁辐射特性的研究对炸药爆炸机理、炸药的应用以及爆炸环境的测量工作起到一定作用。

## 致谢

本文研究受南京理工大学大学生课外学术科研基金项目资助，是《含金属炸药爆炸产生电磁脉冲辐射试验研究》

课题的阶段成果之一。本文受国家自然科学基金项目《聚能射流天线作用机理研究》(11502118)资助。

## 参考文献

- [1] Takakura T. Radio Noise Radiated on the Detonation of Explosive [J]. Publications- Astronomical Society of Japan, 1955, 7.
- [2] Andersen WH, Long CL. Electromagnetic Radiation from Detonating Solid Explosives [J]. Journal of Applied Physics, 1965, 36 (4): 1494-1495.
- [3] Cherepenin V A, Cherepenin V A, Shumilin V P. About Mechanism of Wideband Microwave Radiation at Explosion of Condensed High Explosives [M]. Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics Springer US, 2002:33-39.
- [4] Van Lint V A J. Electromagnetic Emission from Chemical Explosions [J]. Nuclear Science IEEE Transactions on, 1982, 29(6):1843-1849.
- [5] Mende F. Electrodynamics and thermodynamics of nuclear explosions and TNT [M]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
- [6] Sergeev I Y. Theoretical model of the electromagnetic disturbances caused by explosions in the ionosphere [C]// Electromagnetics in Advanced Applications, 2009. ICEAA. International Conference on. IEEE, 2009:93-96.
- [7] 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.
- [8] 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(4):363-368.
- [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.
- [10] Ma Z, Xie S, Cao J. Application of Wavelet Transform to Process Electromagnetic Pulses from Explosion of Flexible Linear Shaped Charge [C]// International Conference on Computer and Electrical Engineering. 2012.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V E, et al. Spherical combustion clouds in explosions [J]. Shock Waves, 2013, 23 (3): 233-249.

- [14] Kuhl A L, Balakrishman K, Bell J B. Ionization Effects in SDF Combustion Clouds [J]. 2012.
- [15] 陈朗, 赵玉华. 含铝炸药爆轰数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(4): 415-419.
- [16] 奥尔连科. 爆炸物理学下册[M]. 孙承伟, 北京: 科学出版社, 2011: 1080-1115.