

文章编号: 2095-4980(2018)04-0742-06

起爆方式对反应式脉冲发生器的影响试验

潘绪超^{1,2}, 何勇², 沈晓军¹, 于成大¹, 王永锋¹, 陈政新¹

(1.北京特种机电研究所, 北京 100012; 2.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:反应式脉冲发生器是一种利用快速化学反应变化而产生高功率电磁脉冲的脉冲发生系统, 其工作的核心是通过爆炸产生化学反应所需的环境, 为了研究起爆方式对其产生的脉冲影响情况, 以典型 $\Phi 26$ mm 脉冲发生器为研究对象, 设计了端面点起爆、两端起爆和中心起爆 3 种起爆方式, 并进行了试验, 试验结果表明, 充电电压为 5 kV 时, 中心起爆能产生最大的脉冲电压, 两端起爆次之, 点起爆最小; 试验得到的电压与反应材料的冲击波历经时间成二次曲线变化。

关键词: 爆炸力学; 脉冲功率技术; 脉冲发生器; 起爆

中图分类号: TN784

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0742

Influence of electromagnetic pulse generator based on fast chemical reactions

PAN Xuchao^{1,2}, HE Yong², SHEN Xiaojun¹, YU Chengda¹, WANG Yongfeng¹, CHEN Zhengxin¹

(1.Beijing Special Electro Mechanical Research Institute, Beijing 100012, China; 2.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: The reactive pulse generator could generate high-power electromagnetic pulse by the rapid chemical reaction. The principle of the generator is to produce the required environment for chemical reaction by explosion. In order to study the impact of the explosion mode on the pulse, the typical $\Phi 26$ mm pulse generator is studied by the test. Three experiments are designed and carried out, including end surface point detonation test, both ends detonation test and centrality detonation test. According to the test results, when the charging voltage is 5 kV, the centrality detonation test could produce the maximum pulse voltage, and the end surface point detonation test could produce the minimum pulse voltage; the pulse voltage changes with time of impact wave according to a quadratic curve.

Keyword: explosive mechanics; pulsed power technology; pulse generator; detonation

电磁脉冲武器是一种利用电磁脉冲对敌方电子设备进行攻击的定向能武器^[1-2], 其能量大, 打击范围广, 杀伤力强的特点使其成为国内外研究的热点。高功率脉冲发生器是电磁脉冲武器的重要组成部分, 一般可分为 Marx 和炸药驱动类脉冲发生器 2 种类型, Marx 庞大的体积和复杂的控制电路限制了其在武器上的应用; 炸药驱动类脉冲发生器成为电磁脉冲武器重要研究方向^[3-11]。反应式脉冲发生系统^[12]隶属于炸药驱动类脉冲发生器, 通过高速化学反应而使物质电磁参数发生变化, 进而产生高功率脉冲的一种高压脉冲发生器, 其核心依赖于反应材质的确定和反应环境的产生, 因此, 反应环境的产生情况是影响其性能的重要因素。

基于此, 本文拟对起爆方式对反应式脉冲发生器产生脉冲影响情况进行试验研究, 以 $\Phi 26$ mm 典型反应式脉冲发生器为研究对象, 通过雷管来实现端面点起爆和两端起爆、通过中心起爆线来进行中心线起爆, 并测量发生器负载两端电压的输出情况, 以得到起爆方式对产生的脉冲影响情况。

1 试验原理

1.1 反应式脉冲发生器作用原理

反应式脉冲发生器主要由起爆系统、化学反应装置、高能炸药和线圈组成。其中初始能源电容为反应式脉冲

发生器提供初始储能电感,在化学反应装置中放入反应前后具有磁导率巨大变化的化学反应材料。当起爆系统起爆高能炸药产生反应装置所需的环境时,其中的化学物质开始反应,在极短的时间内,化学反应结束,导致化学反应空间中的相对磁导率在极短时间内发生巨大的变化,在电路中引起电感的变化,从而形成感应电动势,其作用原理如图1所示。

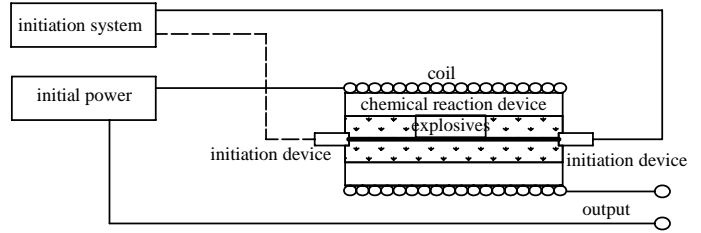


Fig.1 Principle of reactive pulse generator
图1 反应式脉冲发生器作用原理图

1.2 起爆原理

试验中涉及到端面点起爆、两端起爆和中心起爆3种起爆方式,前两者起爆采用起爆器起爆雷管、雷管起爆导爆索、导爆索起爆高能炸药,从而实现起爆。中心起爆则采用桥丝来起爆高能炸药,其起爆原理如图2所示。充电开关闭合后,由充电电源对储能电容器进行充电,充电电压在2000V时,闭合放电开关,引爆爆炸桥丝,由爆炸桥丝引爆高能炸药,由于爆炸桥丝的爆炸速度在纳秒量级^[7],故可以忽略桥丝的爆炸时间,从而使高能炸药实现中心线起爆。

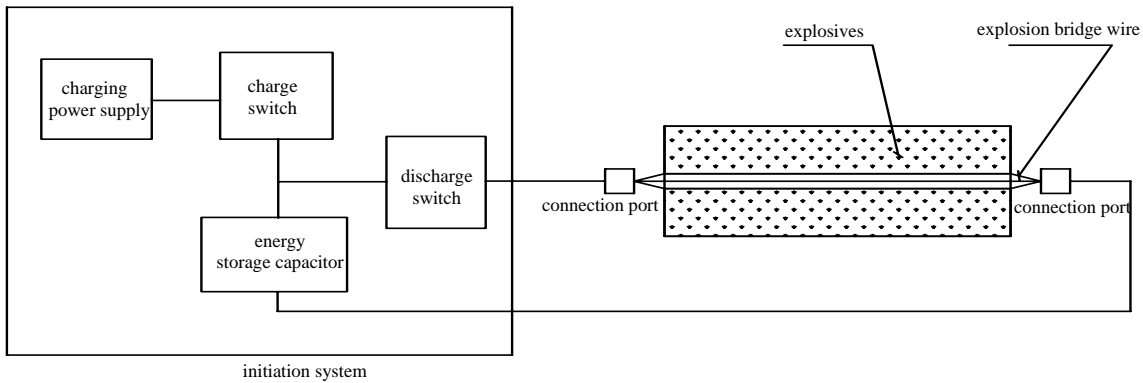


Fig.2 Schematic diagram of central detonation
图2 中心起爆作用原理图

1.3 试验原理

试验原理如图3所示。通过电源对电容(初始种子源)进行充电,当电压达到一定数值以后,同步开关 K_1 ,分流器 K_3 开始工作,当电路中电流达到首个峰值以后,按照一定的时序延时控制后,同步开关 K_2 和反应式脉冲发生器 L_1 开始工作,在耦合负载 L_2 上产生放大的脉冲高电压,在负载 Z 上产生快前沿的高压,从而实现负载上的电压放大。当改变不同的起爆条件时,其他条件不变,可以负载上不同的高压变化,从而得到起爆方式对反应式脉冲发生器的影响情况。

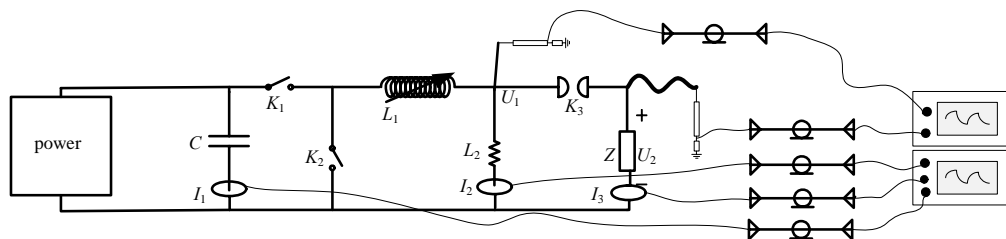


Fig.3 Schematic diagram of the test
图3 试验原理图

2 试验系统组成

按照图3所示的试验原理,整个系统由爆炸掩体、电木绝缘板、初始能源(低压电源,高压模块和电容)、起爆与延时控制系统(起爆器,爆炸开关,导爆索和三通)、负载、反应式脉冲发生器 L_1 、测试系统(高压探头,罗氏线圈和示波器)7部分组成。其中脉冲发生器线圈由1mm直径的漆包线缠绕,共250匝,线圈直径为60mm,长

度为40 mm，反应装置中装有反应物为还原铁粉，炸药由SY共晶炸药压制为密度 1.65 g/cm^3 的圆柱装药结构，长度为40 mm，直径为26 mm，中心孔直径为3 mm，负载电感为8 mH。

首先进行静态试验，如图 4~图 5 所示。测试反应式发生器的静态参数和耐压，获得发生器的电感以及在不同等级电压下的静态电流以检测耐压情况，并得到电流的峰值电流时间，以此来得到不同的起爆与延迟控制系统中导爆索长度等。然后进行动态试验，改变端面点起爆、两端起爆和中心起爆 3 种起爆方式，测试负载两端电压随时间的变化情况，并记载在示波器上，从而可以得到起爆方式对脉冲发生器的影响情况。

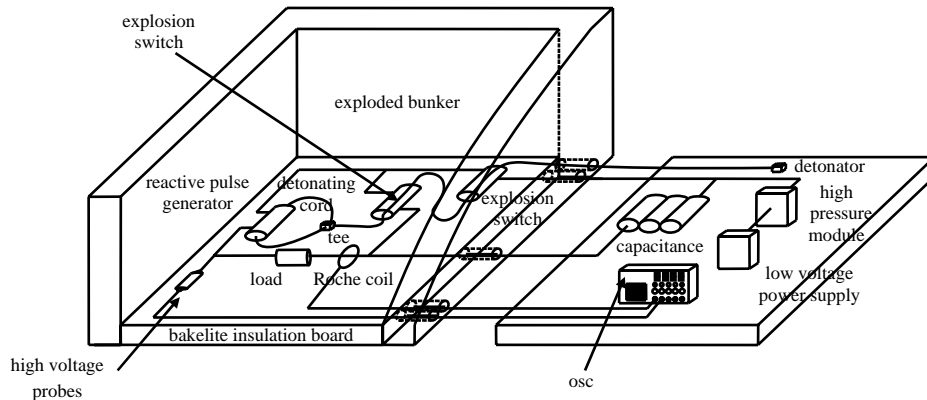


Fig.4 Test system layout
图 4 试验系统布局图



(a) generator physical map



(b) test part of the physical map

Fig.5 Experimental scene graph
图 5 实验场景图

3 试验结果及分析

3.1 静态测试试验结果

按照上述试验布置进行试验，得到的静态测试结果如图6所示，由结果可知，当充电电压为5.1 kV时，电流幅值358.4 A， $T/4=1.08 \text{ ms}$ 。当导爆索的爆速为7 000 m/s时，可知，两者之间的延迟距离为7.56 m，也即导爆索的长度为7.56 m。

3.2 动态测试结果

按照静态实验结果进行动态试验，试验结果如图7~图8所示，整个系统成功联动，3种起爆方式均顺利实现起爆，其中图8为试验爆炸相关残留物。

由试验结果可知，其他条件不变时单端起爆、两端起爆和中心起爆在负载两端产生的电压数值为12.1 kV，12.6 kV和13.6 kV，单点起爆产生的电压数值最小，两端起爆次之，中心线起爆电压最大。

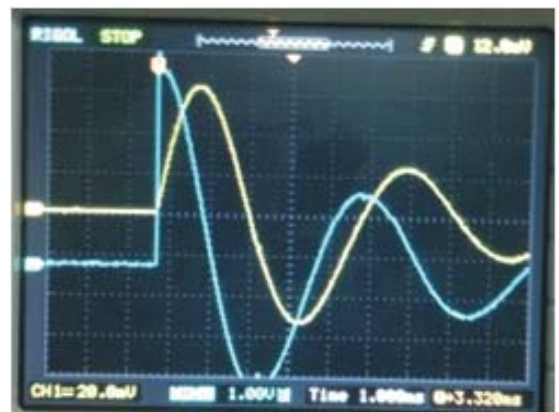


Fig.6 Static test results
图 6 静态测试结果图

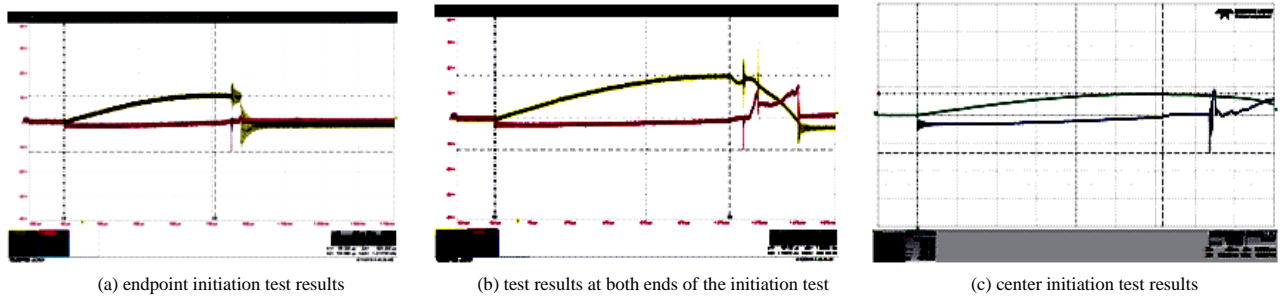


Fig.7 Test results of different initiation methods
图7 不同起爆方式测试结果图

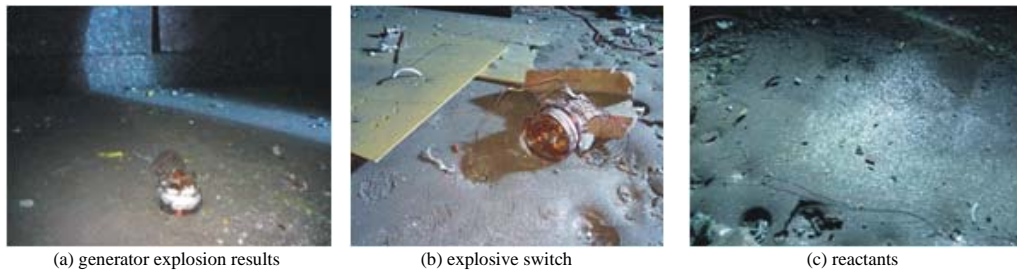


Fig.8 Results after the explosion
图8 爆炸后相关结果图

3.3 试验结果分析

根据图3试验原理可知,耦合电感两端的电压可以表示为:

$$U = -\frac{L_0^2 I_0}{Lg(t)^2} \left(R_0 + \frac{dLg(t)}{dt} \right) e^{-\int_0^t \frac{R_0}{Lg(t)} dt} \quad (1)$$

式中: R_0 为电路中存在的等效电阻; L_0, I_0 分别为化学反应器的初始电感和初始电流; $Lg(t), I$ 分别为化学反应器的时变电感和回路电流。

可以看出,时变电感的变化规律和它对时间的变化率对电压脉冲的形成有着较大的影响。电感的变化由爆炸产生的反应环境的变化速度决定,反应环境由爆炸反应传播到反应区的时间和爆炸温度的形成时间决定,而反应环境由爆炸的方式决定,对两者对反应区的形成时间进行分析。

3种起爆方式产生的反应环境的时间和速度不同。假设冲击波接触到反应物时,化学反应能够完全进行,则反应式脉冲发生器产生电压依赖于冲击波完全传过反应区的时间。按照反应式脉冲发生器的结构,对反应区的形成时间进行数值仿真分析,利用有限元仿真软件AUTODYNE,建立反应区的有限元模型,如图9所示,并建立如图所示的高斯观察窗(1,2,3,4),分别利用端面点起爆、两端起爆和中心线起爆来起爆中心炸药,其中反应物利用铁材料来代替。

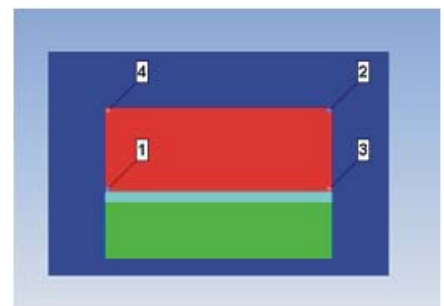


Fig.9 Simulation model of reactive pulse generator
图9 反应式脉冲发生器仿真模型图

3种起爆方式冲击波传过反应材质的时间分别如图10中(a),(b),(c)所示,取冲击波第一次经历反应材料的时间间隔作为发生器工作时间,得到3种起爆方式的反应经历 t 分别为 5.7×10^{-3} ms, 2.8×10^{-3} ms和 2.0×10^{-3} ms,端面点起爆的反应时间历程最大,两端起爆次之,中心起爆时间最小;当反应是瞬态时,可知中心起爆产生的电压数值和两端起爆数值结果接近,两者都比单点起爆数值要大;分析表明,试验结果与反应历经的时间与试验得到的结果成反比。按照时间与测得的电压数值进行二项式拟合,可以得到,电压随时间的变化曲线为:

$$U = 0.291t^2 - 2.647t + 17.73 \quad (2)$$

由式(2)可知,试验得到的电压与反应历经的时间 t 成抛物线变化。在3种起爆方式所需的反应时间范围内,得到的电压与反应经历时间成抛物线变化,可以增大起爆的速度、减少反应经历时间来提高试验得到的电压数值。

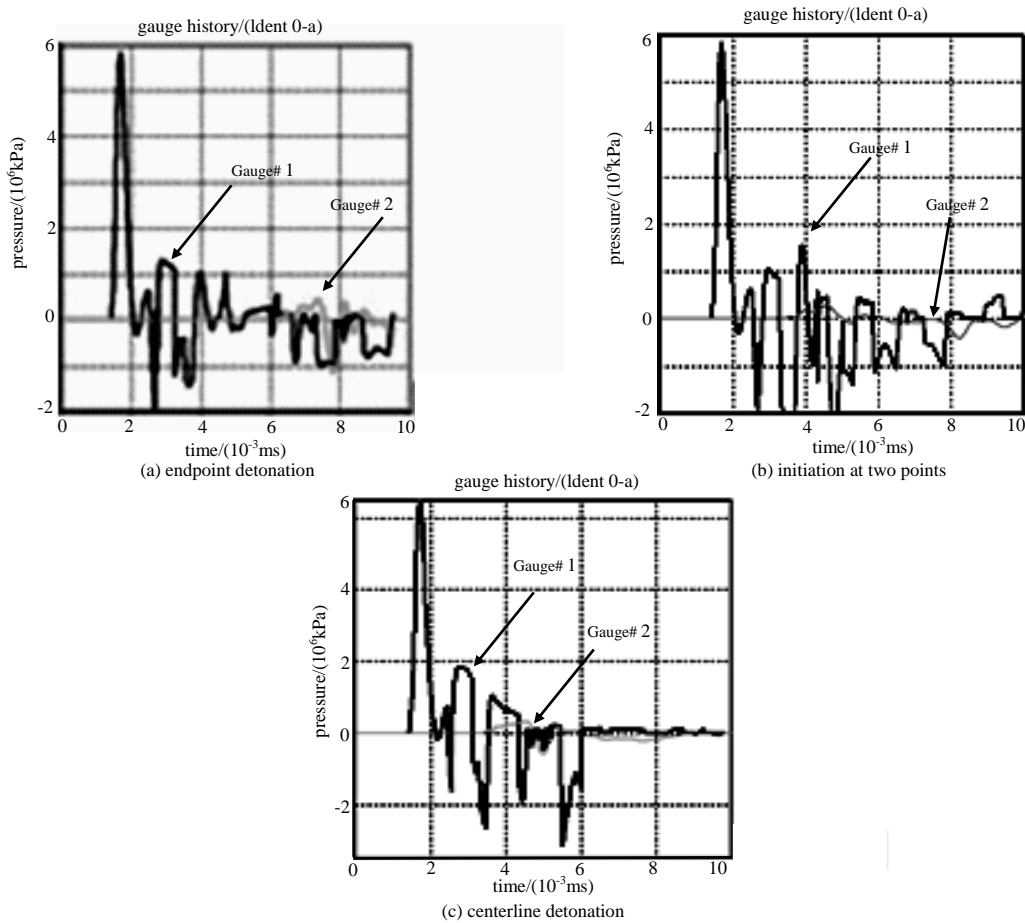


Fig.10 Simulation results of reactive pulse generator
图10 反应式脉冲发生器仿真结果图

4 结论

试验结果表明,对于典型 $\Phi 26$ mm脉冲发生器,充电电压为5 kV时,中心起爆能产生最大的脉冲电压,两端起爆次之,点起爆最小;端面点起爆的反应时间历程最长,两端起爆次之,中心起爆时间最短;试验得到的电压与反应材料的冲击波历经时间成抛物线变化;可以增加起爆的速度、减少反应经历时间来提高试验得到的电压数值。下一步可以考虑反应时间,测得反应物的反应历程曲线,来进一步研究反应式脉冲发生器相关机理。

参考文献:

- [1] 贺元吉. 爆电能源高功率超宽带脉冲发生器研究[D]. 北京:国防科学技术大学, 2001. (HE Yuanji. Study on explosive electric energy Ultra-Wideband(UWB) electromagnetic pulse generator[D]. Beijing:National University of Defense Technology, 2001.)
- [2] 孟凡宝. 高功率超宽带电磁脉冲产生和辐射[C]// 中国工程物理研究院科技年报. 成都:四川科学技术出版社, 1999:194. (MENG Fanbao. Generation and radiation Ultra-Wideband(UWB) electromagnetic pulse[C]// The annual report of science and technology of China academy of engineering physics. Chengdu,China:Sichuan Science and Technology Press, 1999:194.)
- [3] REISMAN D B, JAVEDANI J B, ELLSWORTH G F, et al. Explosive flux compression generators at LLNL[C]// 2012 IEEE International Conference on Megagauss, 2012:1-10.
- [4] WALTER J, HEMMERT D. Comparison of Ultra-Compact Seed Sources for MFCG's[C]// 2005 IEEE Pulsed Power Conference, Monterey, CA, USA:IEEE, 2005:1353-1355.
- [5] ELSAYED M, KRISTIANSEN M, NEUBER A. Fast-charging compact seed source for magnetic flux compression generators[J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(12):124702.
- [6] WANG Y, ZHANG J, CHEN D, et al. Fast modeling of flux trapping cascaded explosively driven magnetic flux compression generators[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(1):014703.

- [7] SHKURATOV S I, TALANTSEV E F, DICKENS J C, et al. Longitudinal-shock-wave compression of Nd₂Fe₁₄B high-energy hard ferromagnet: the pressure-induced magnetic phase transition[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(8): 1248–1250.
- [8] SHKURATOV S I, TALANTSEV E F, DICKENS J C, et al. Transverse shock wave demagnetization of Nd₂Fe₁₄B high-energy hard ferromagnetics[J]. Journal of Applied Physics, 2002(92): 159–162.
- [9] TALANTSEV E F, SHKURATOV S I, DICKENS J C, et al. The conductivity of a longitudinal-shock-wave-compressed Nd₂Fe₁₄B hard ferromagnetics[J]. Modern Physics Letters B, 2002(16): 545–554.
- [10] LEE J, CHOI J S, YIM D W, et al. Output characteristics of explosively-driven ferromagnetic generators[C]// 2001 IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference. [S.l.]: IEEE, 2001: 154–157.
- [11] SHKURATOV S I, BAIRD J, TALANTSEV E F. Effect of shock front geometry on shock depolarization of Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃ ferroelectric ceramics[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(7): 074702.
- [12] 陈海川, 杨晓庆, 黄卡玛. 新型脉冲电源等效电路动态特性研究[J]. 计算机仿真, 2012(2): 332–335. (CHEN Haichuan, YANG Xiaoqing, HUANG Kama. Study on dynamic characteristic of equivalent circuit of novel pulse source[J]. Computer Simulation, 2012(2): 332–335.)

作者简介:



潘绪超(1982–), 男, 山东省枣庄市人, 博士, 副研究员, 现从事脉冲功率技术相关的研究. email: pxchxc@njust.edu.cn.

何勇(1964–), 男, 湖北省麻城市人, 博士, 教授, 现从事新概念战斗部相关的研究.

沈晓军(1959–), 男, 江苏省海门市人, 高级工程师, 主要研究方向为弹药论证及研究.

于成大(1976–), 男, 北京市人, 在读博士研究生, 工程师, 主要研究方向为高功率微波、强电磁脉冲发生及电磁环境效应方面.

王永峰(1983–), 男, 山东省日照市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁脉冲效应与防护.