

高空核电磁脉冲对爆炸箔起爆器安全性的影响

同红海, 褚恩义, 周密, 王寅, 李蛟

(陕西应用物理化学研究所, 西安 710061)

摘要: **目的** 评估爆炸箔起爆器(EFI)在高空核电磁脉冲下的安全性。**方法** 通过吉赫兹横电磁波室(GTEM)强电磁脉冲模拟系统,开展辐射方式下EFI电极塞在模拟高空核电磁脉冲(HEMP)下的感应电流试验测试。HEMP主要是通过电磁辐射方式在EFI脚线上耦合能量,在爆炸箔上产生感应电流,用光纤场强计监测模拟HEMP的电场强度,并在EFI爆炸箔电极塞脚线上套装电流环,通过示波器监测爆炸箔上的感应电流波形。**结果** 在爆炸箔电极塞两根脚线上分别连接相同长度的导线,按导线长度不同分为5、10、20、30、40、50 cm共6组,使导线成180°状态,EFI的脚线可等效为偶极天线,感应电流随脚线长度增加而增大,两者呈线性关系。**结论** EFI在HEMP下的感应电流远小于发火电流,对核电磁脉冲环境具有较高的耐受能力,具有较高的安全性。

关键词: 高空核电磁脉冲; 爆炸箔起爆器; 感应电流; 安全性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.09.006

中图分类号: TJ450

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)09-0040-04

Effects of HEMP on Safety of Exploding Foil Initiator

TONG Hong-hai, CHU En-yi, ZHOU Mi, WANG Yin, LI Jiao
(Shaanxi Applied Physical Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

ABSTRACT: **Objective** To assess the safety of the exploding foil initiator (EFI) under the nuclear electromagnetic pulse. **Methods** The induced current of exploding foil under simulated high-altitude nuclear electromagnetic pulse (HEMP) was tested in a GTEM intensive EMP simulation system. HEMP mainly coupled energy on EFI by electromagnetic radiation to generate induced current on explosive foil, and monitor the electric field intensity of HEMP by optical fiber field intensity meter. An electric current loop was installed on the foot of the EFI to monitor the induced current waveform on explosive foil by oscilloscope. **Results** The same length of wires were connected on the two feet of the EFI, according to the length of wires, they were divided into six groups: 5, 10, 20, 30, 40 and 50 cm. Each pair of wires were kept at 180 degrees, which might be equivalent to dipole antenna. The induced current increased with the increase of the wire length. The induced current and wire length were a linear relationship. **Conclusion** The induced current of EFI under HEMP is much less than the ignition current, and it has high tolerance and safety to HEMP.

KEY WORDS: HEMP; EFI; induced current; safety

高安全性是现阶段武器弹药的主要发展趋势之一,这也是钝感弹药相比传统弹药的突出优点。美国等北约国家即将装备或在研的武器弹药在设计阶段都考虑了钝感弹药的相关技术要求,试验项目和结果

均需符合钝感弹药相关军用标准要求。爆炸箔起爆器(EFI)是本质安全性火工品的典型代表,EFI的作用过程是在电容上千伏高电压放电产生的陡脉冲大电流作用下,金属桥箔瞬间爆炸汽化,产生高温高压

收稿日期: 2019-03-19; 修订日期: 2019-04-27

作者简介: 同红海(1976—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为高新火工技术。

等离子, 驱动薄飞片通过加速膛高速撞击炸药, 当飞片撞击炸药产生的冲击脉冲压力和持续时间满足非均质炸药窄脉冲起爆判据时, 引起炸药爆轰^[1]。EFI 所用药剂是直列式许用药剂六硝基芪 (HNS), 可用于直列式起爆序列, 在钝感弹药中应用具有一定优势^[2-3]。EFI 发火条件苛刻, 功率高达兆瓦级, 人体静电、杂散电流、射频等普通电磁环境不可能产生 EFI 的发火条件, 因此 EFI 是现阶段最安全的电火工品之一。

核电磁脉冲是由离地面 30~500 km 的高空区域发生核爆炸产生的 γ 射线激发电离大气层产生的电磁脉冲, 也被称为高空电磁脉冲 (HEMP)。由于大气的衰减作用, 高空核爆炸产生的热、冲击波、辐射等效应, 对地面设施的危害不如电磁脉冲效应大。随着核技术的发展, 发达国家已研制出核电磁脉冲弹, 增强了电磁脉冲效应, 电磁脉冲的破坏力明显增大。HEMP 具有峰值场强高、上升时间短、频谱宽、覆盖面积广等特点^[4], 会对武器装备中的指挥、控制、通信系统造成严重危害, 对弹药引信起爆系统的危害可能会产生灾难性后果。军事强国都十分重视武器装备电磁环境效应和防护加固技术的研究, 美国针对核电磁脉冲的严重威胁, 要求每开发一种武器, 必须考虑电磁脉冲防护能力。MIL-STD-464C 和 MIL-STD-331D 分别对电磁脉冲影响系统要求和引信电爆装置的 HEMP 测试提出了具体要求^[5-6]。国内对起爆系统电磁防护的研究, 基本都停留在电磁兼容范畴内, 未重视电磁脉冲防护。EFI 作为本质安全性火工品的代表, 研究其在 HEMP 下的响应特性, 对明确 EFI 在核电磁脉冲环境下的安全性具有重要意义。

1 HEMP 特征及 EFI 对其响应方式

1.1 HEMP 波形及参数

核电磁脉冲中 HEMP 的破坏力最强, 其波形呈双指数曲线, 上升时间为 3~10 ns, 持续时间为 0.2~1 μ s, 峰值场强约 50 kV/m^[7]。关于 HEMP 的标准和公开出版物一般都用双指数函数来描述其典型波形^[8-9]。

$$E(t) = E_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

式中: $E(t)$ 为瞬变场强; E_0 为电场强度峰值; k 为修正系数; α 和 β 为衰减指数。

文中试验用 HEMP 波形参考 MIL-STD-461E^[10], 其波形参数为: $\alpha = 4 \times 10^{-7} \text{ s}$, $\beta = 6 \times 10^8 \text{ s}$, $k = 1.3$, 上升时间 $t_r \approx (2.3 \pm 0.5) \text{ ns}$, 半高宽 $\tau_{\text{FWHM}} \approx (23 \pm 5) \text{ ns}$, 峰值场强 $E_0 = 50 \text{ kV/m}$, 波形如图 1 所示。

1.2 EFI 对 HEMP 的响应方式

任何暴露于电磁场中的金属导体均可认为是天线, 电火工品中的金属导体、导线、引线等都可以作

为天线耦合电磁波产生电压或电流。HEMP 对 EFI 的能量耦合方式有两种: 一是传导方式, 即通过直接的电气通道向 EFI 注入 HEMP 能量; 二是辐射方式, 即通过电磁辐射向 EFI 耦合 HEMP 能量。当 EFI 处于核电磁脉冲场中时, 其脚线可接收电磁脉冲能量, 在金属爆炸箔上产生感应电流。如果感应电流幅值很大, 参数接近发火条件时, 可能会使 EFI 误作用, 带来严重后果。

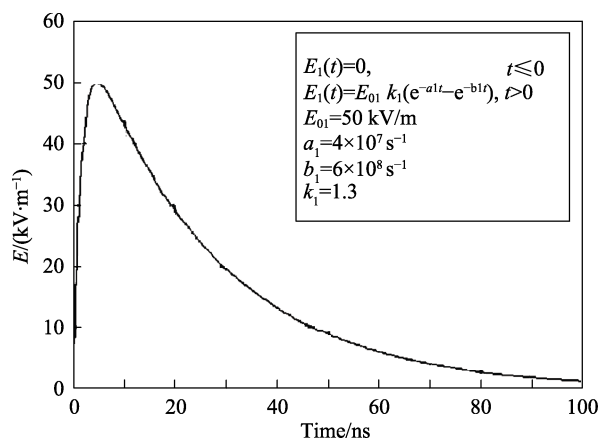


图 1 MIL-STD-461E 定义的 HEMP 波形

实际使用状态中, HEMP 主要是通过电磁辐射方式在 EFI 脚线上耦合能量, 在爆炸箔上产生感应电流。因此, 文中研究辐射方式下 EFI 爆炸箔电极塞在模拟 HEMP 中的感应电流。

2 试验

试验研究 EFI 脚线作为偶极天线接收 HEMP 电磁能量时, 爆炸箔上的感应电流大小与脚线长度的关系, 测试不同脚线长度下的感应电流波形, 以评估 EFI 在 HEMP 作用下的安全性。

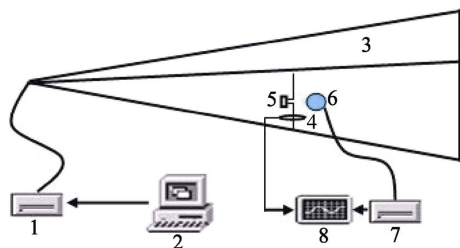
2.1 测试系统

实验室参照 GJB 151B—2013 中的方法 RS105 瞬态电磁场辐射敏感度, 建立了电火工品抗核电磁脉冲模拟测试系统, 对电火工品进行模拟核电磁脉冲测试技术研究^[11]。借助吉赫兹横电磁波室 (GTEM) 强电磁脉冲模拟系统, 可进行核电磁脉冲测试技术研究。其中 HEMP 的参数按 MIL-STD-461E 执行, GTEM 强电磁脉冲电磁场模拟系统用于爆炸箔起爆器感应电流测试的框图组成如图 2 所示。试验测试系统模拟的 HEMP 波形如图 3 所示, 波形参数: 上升时间 $t_r \approx 3 \text{ ns}$, 半高宽 $\tau_{\text{FWHM}} \approx 23 \text{ ns}$, 峰值场强 $E_0 \approx 50 \text{ kV/m}$ 。

2.2 试验方法

核电磁脉冲对 EFI 的辐射测试是在 GTEM 小室内产生模拟 HEMP, 将 EFI 的爆炸箔电极塞脚线打开,

并竖直放置在 GTEM 小室中。为降低测试过程的电磁干扰,用光纤场强计监测模拟 HEMP 的电场强度,并在 EFI 爆炸箔电极塞脚线上套装电流环,通过示波器监测爆炸箔上的感应电流波形。在爆炸箔电极塞两根脚线上分别连接相同长度的导线,按导线长度不同分为 5、10、20、30、40、50 cm 共 6 组,使导线成 180°状态。此时,EFI 的脚线可等效为偶极天线,如图 4 所示。



1-功率源,2-控制台,3-GTEM 小室,4-电流探头,5-爆炸箔起爆器,6-场强计,7-接收器,8-示波器

图 2 EFI 感应电流测试系统

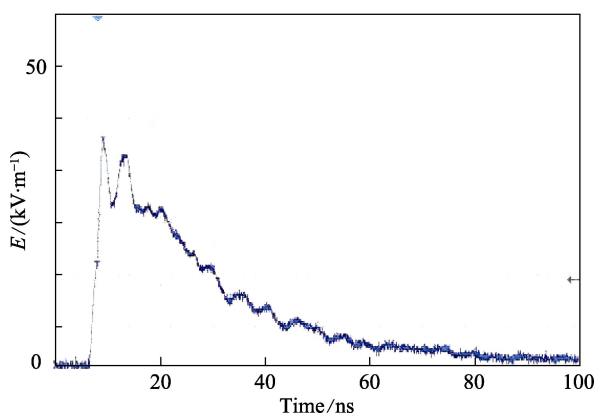


图 3 试验模拟 HEMP 波形

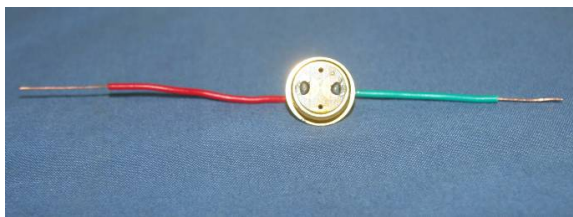


图 4 试验用爆炸箔电极塞

将接有导线的爆炸箔电极塞两根导线拉直,并成 180°,分别固定在有机玻璃试验架子上,竖直放置在 GTEM 小室中,测试脚线延长的爆炸箔在模拟 HEMP 下的感应电流波形。此时,爆炸箔电极塞的导线可等效为偶极天线接收、耦合 HEMP 的电磁脉冲能量。在此状态下,爆炸箔上的感应电流最大,这是为了得到最恶劣情况下 EFI 爆炸箔上的感应电流,以评估其安全性。爆炸箔电极塞在 GTEM 小室中的放置状态如图 5 所示。

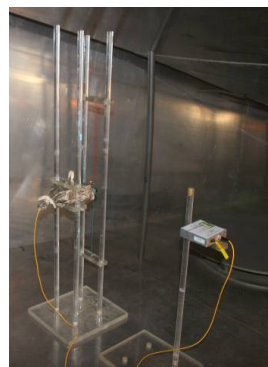


图 5 爆炸箔电极塞测试状态

3 结果及分析

对 6 组导线长度不同的爆炸箔电极塞在模拟 HEMP 下的感应电流进行了测试。为了对比并保证试验数据的有效性,每组分别测两次感应电流,测试试验参数及试验数据见表 1。图 6 给出了表 1 中 6 组试验数据中的 6 个感应电流示波器记录波形,感应电流峰值分别为 0.77、2.88、8.01、12.39、16.24、19.49 A。经过 HEMP 试验后的爆炸箔在外观上没有变化,电阻正常。试验后的爆炸箔电极塞装配成 EFI 后可以正常发火。

表 1 感应电流测试数据

序号	脚线长度/cm	场强峰值/(kV·m ⁻¹)	感应电流峰值/A
1	5	55.3	0.77
		55.3	0.73
2	10	54.7	2.90
		54.1	2.88
3	20	47.5	7.91
		52.3	8.01
4	30	52.3	12.39
		51.7	12.32
5	40	52.9	16.24
		52.3	15.92
6	50	54.1	19.71
		52.9	19.49

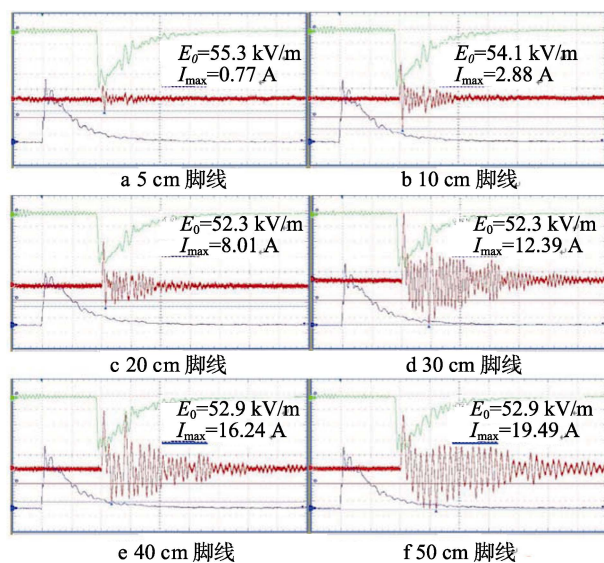


图 6 感应电流波形

EFI 的发火条件是电流峰值达上千安培的窄脉冲大电流,从感应电流测试结果可以看出,感应电流峰值随脚线长度增加而增大。导线长度增加到 50 cm 时,感应电流峰值不超过 20 A。这比没有加延长导线的爆炸箔的感应电流显著增大,根据表 1 可知,脚线长度 5 cm 时,爆炸箔上的感应电流约为 0.77 A。正常状态下,EFI 的爆炸箔脚线长度不超过 5 cm,因此 HEMP 对 EFI 的安全性不会产生危害。这可从试验后的爆炸箔没有破坏,外观和电阻正常得到证明。6 个感应电流波形的电流峰值和其对应的导线长度的拟合关系如图 7 所示,可以看出,两者呈线性关系。

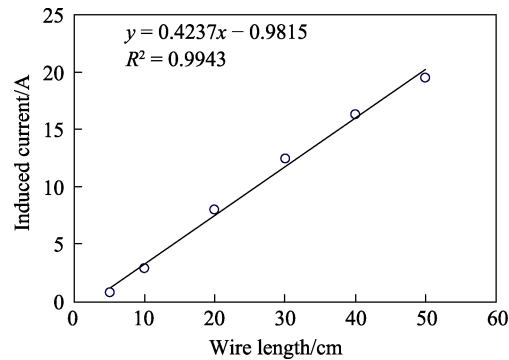


图 7 感应电流与导线长度的拟合曲线

4 结论

- 1) 在试验模拟 HEMP 作用下,EFI 爆炸箔上的感应电流随脚线长度的增加而增大,两者呈线性关系。EFI 脚线长度延长后,感应电流最大 19.49 A,远低于 EFI 上千安培的发火电流。
- 2) 在试验模拟 HEMP 作用下,EFI 爆炸箔上的

感应电流未对其产生破坏性影响,EFI 在核电磁脉冲环境中具有很高的适应性和安全性。

参考文献:

- [1] WALKER F E, WASLEY R J. Critical Energy for Shock Initiation of Heterogeneous Explosives[J]. Explosivstoffe, 1969, 17(1): 9-13.
- [2] STEVEN M H, SANDRA E K. Development of an Ultrafine HNS for Use in Modern Slapper Detonators[C]// 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno Nevada, 2003.
- [3] MIL-STD-1316E, Fuze Safety Design Criteria[S].
- [4] 孙红鹏. 核电磁脉冲对飞机及机载电子设备的威胁和防护试验[J]. 飞机设计, 2008, 28(5): 59-61.
- [5] MIL-STD-464C, Electromagnetic Environmental Effects Requirement for Systems[S].
- [6] MIL-STD-331D, Fuzes, Ignition Safety Devices and Other Related Components, Environmental and Performance Tests for[S].
- [7] 侯民胜, 秦海潮. 强电磁脉冲模拟技术[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 409-412.
- [8] BARDET O, DAFIF C, JECKO B. Time-domain Analysis of a Large EMP Simulator[J]. IEEE Trans,1987, 29(1): 40-48.
- [9] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787.
- [10] MIL-STD-461E, Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment[S].
- [11] GJB 151B—2013. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S].