

文章编号: 1006-9941(2014)04-0521-04

电热火工品感应电流与连续电磁波频率的关系

白颖伟¹, 任 炜¹, 刘举鹏¹, 钟建武²

(1. 陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室, 陕西 西安 710061; 2. 总参陆航部驻株洲地区军事代表室, 湖南 株洲 430220)

摘 要: 电热火工品电磁波环境下的响应效应与规律性是开展电磁安全性研究及环境适应性设计的基础。为了得到影响电热火工品电磁响应的重要参数与规律, 用实验室建立的连续电磁波环境模拟系统与感应电流测试装置, 研究了电热火工品电磁波环境下感应电流与频率间的关系。结果表明, 电热火工品感应电流与电磁波频率间存在谐振关系。以火工品垂直脚线状态为例, 其脚线长度为 0.72 m 时, 对应感应电流谐振频率约为 200 MHz。在此基础上开展的理论计算与仿真研究, 证实了火工品脚线的天线特性是影响其电磁响应的关键因素。电热火工品在其脚线长度对应的谐振频率点处感应电流值最大。

关键词: 爆炸力学; 电热火工品; 电磁波环境; 感应电流; 谐振频率

中图分类号: TJ45; O389

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.018

1 引 言

电热火工品是武器装备中大量使用的一类火工品产品, 其作用原理是在恒定或脉冲电流激励下, 通过桥丝电阻发热引发周围火工药剂(序列)的具体作用^[1]。电热火工品的电热换能机理及其初始装药类型(普遍采用斯蒂酚酸铅、氮化铅等敏感药剂), 决定了该类火工品具有结构简单、发火能量低等优点, 但同时也导致其安全性稍差, 如特别易受电磁环境的影响, 产生电磁干扰等危害现象。

分析电磁环境对电热火工品的危害形式, 较为普遍的电磁危害耦合方式是以电热火工品脚线电磁环境下形成的接收天线特性^[2], 使得在电热火工品回路上产生电磁感应电流, 电磁感应电流的存在会导致桥丝发热与热积累的产生, 进而影响电热火工品电磁环境下的作用性能^[3-4]。因此, 电热火工品电磁环境作用机理研究主要包括典型电磁环境场模拟技术、火工品感应参量测试技术等, 自 20 世纪 80 年代以来, 国内仿照美军颁布了 GJB786-1989, GJB1389-2005 等相关标准, 对电爆装置电磁环境下的危害容限与要求等进行了明确规定^[5-7]。

电热火工品电磁响应效应与测试技术是研究其电磁危害的基础。侯冬云等^[8]探讨了电磁辐射与感应

电流之间的关系, 为理论分析与研究工作提供了重要参考; 王韶光等^[9]建立了一种白光干涉型光纤测试系统, 实现了对桥丝温度的测试, 为电热火工品的电磁安全性评估提供了有效手段。但国内关于电热火工品感应电流测试与影响规律的研究相对较少, 为了进一步揭示电磁环境下电热火工品感应电流与电磁场参数之间的关系, 本研究采用试验测试、理论分析与仿真研究相结合的方法, 探讨连续电磁波频率对电热火工品感应电流的影响规律。

2 电热火工品电磁环境模拟与感应电流测试系统

电热火工品电磁环境模拟与感应电流测试系统如图 1 所示, 主要由射频信号源、功率放大器、场强计、GTEM(吉赫横电磁波)小室、双屏蔽电缆、电流探头(环)等组成, 其射频信号源频率范围为 1 MHz ~ 18 GHz, 输出功率为 0 ~ 100 W。

测试时, 通常将电热火工品脚线掰开(图 2a)形成对称振子天线, 在该放置状态下火工品脚线接收的感应能量最大, 属最不利条件^[10]。电磁探头(环)装配如图 2b 所示, 主要用于电热火工品电磁感应电流的探测, 并采用双屏蔽电缆进行信号传输。

3 电热火工品电磁感应电流测试结果与分析

采用图 1 所示的测试系统与图 2 所示的状态进行试验, 在电热火工品试件选取方面, 为了防止意外发火引起

收稿日期: 2013-08-26; 修回日期: 2013-12-10

作者简介: 白颖伟(1972-), 男, 高级工程师, 主要从事高新火工品技术研究。e-mail: baiyw@126.com

的不利影响, 仅以桥丝换能元器件进行测试^[11]。其中, 桥丝换能元桥丝材料为镍铬合金, 电阻为 7Ω , 其脚线展开长度为 0.72 m , 试验分别在 $120, 160, 200, 240, 280, 320, 360 \text{ MHz}$ 七个频率点, $30, 40, 50, 60, 70 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 五个场强条件下进行感应电流测试, 结果见表 1。



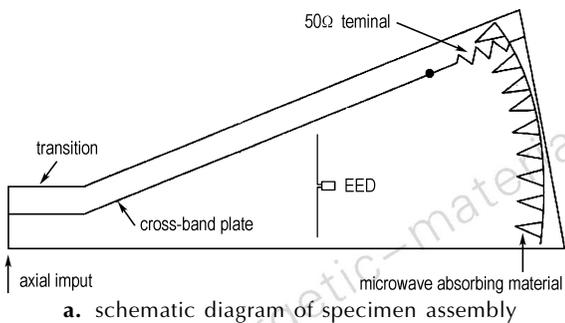
a. signal source, amplifier, field intensity detector



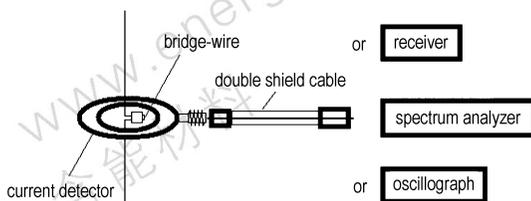
b. gigahertz transverse electromagnetic (GTEM) cell

图 1 电磁环境模拟测试系统

Fig. 1 Test system of simulating the electromagnetic environment



a. schematic diagram of specimen assembly



b. schematic diagram of current ring assembly

图 2 电热火工品与测试电流环装配图

Fig. 2 Assembly configuration of electro-explosive device (EED) and test current ring

表 1 不同频率不同场强下电热火工品感应电流测试结果

Table 1 Induced currents of EED under different electromagnetic frequencies and intensity mA

frequency /MHz	field intensity / $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$				
	30	40	50	60	70
120	14.44	19.48	24.52	29.14	33.54
160	15.38	20.52	25.83	30.69	36.08
200	68.08	90.79	114.30	135.85	159.60
240	23.96	31.96	40.23	47.27	54.90
280	16.96	22.62	28.48	34.24	39.77
320	18.88	24.89	31.70	38.55	44.78
360	19.77	24.61	30.62	36.82	44.11

由表 1 的结果进行拟合, 得到如图 3 所示的电磁波频率与电热火工品感应电流的关系曲线。

由图 3 可知, 电磁波频率的变化对电热火工品的感应电流影响较大, 五种场强条件下的关系曲线均显示在约 200 MHz 附近电热火工品的感应电流最大, 较其它六个试验频率点约大 $3 \sim 5$ 倍, 说明电热火工品的最大感应电流存在特定的敏感频段, 可能与试件装配状态对应的谐振特性有关。

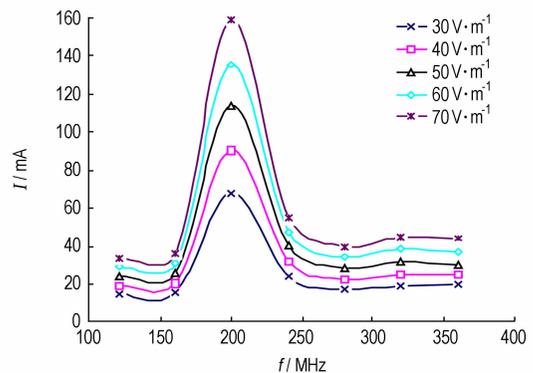


图 3 电热火工品感应电流与电磁波频率的关系

Fig. 3 Relation between the induced current and the electromagnetic wave frequency

结合侯冬云等^[8]关于电磁辐射与感应电流关系的理论分析结果, 在连续电磁波辐射条件下, 电子器件的电缆长度直接影响其干扰频率下的谐振耦合特性, 认为, 电热火工品的电磁波谐振频率也应与火工品的脚线长度有关, 见式 (1):

$$f_{\text{MHz}}^{\text{max}} = (2n-1) \frac{150}{l} \quad (n=1, 2, 3) \quad (1)$$

式中, l 为火工品脚线展开长度, m 。

本研究所用试件脚线展开长度为 0.72 m , 将该数值代入公式 (1) 计算得出试件谐振频率约为 208.3 MHz , 与试验测试结果 200 MHz 能够很好地吻合。综上, 理论分析与试验结果均表明连续电磁波

辐射环境下火工品脚线长度对应的谐振频率是影响其电磁响应特性(最大感应电流)的重要因素。

4 电热火工品电磁波频率耦合特性仿真分析

为了进一步研究验证连续电磁波频率对电热火工品感应电流的影响,采用电磁仿真计算软件,对电热火工品连续电磁波环境下的响应特性进行分析。在仿真模型建立过程中考虑到电热火工品结构的复杂性,对部分参数进行了简化,即首先忽略壳体与药剂材料对电热火工品电磁响应的影响,其次根据电热火工品的结构与试验状态(桥丝长度与脚线长度相比尺度非常小),主要考虑其阻抗效应,重点研究脚线长度等关键参数对其电磁响应的影响,最后建立了如图4所示的电热火工品电磁响应仿真计算简化模型。

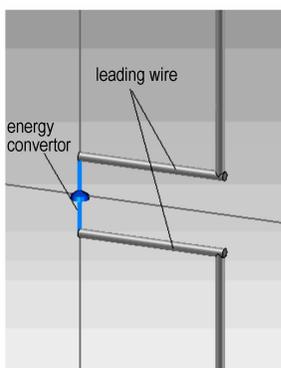


图4 电热火工品电磁响应仿真计算简化模型
Fig.4 Simplified model for the simulation calculation of electromagnetic response for EED

本仿真研究主要是为了验证试验与理论结果,因此,仿真计算模型中参数设置应与试验状态保持一致,在忽略壳体与药剂材料的影响,仅考虑换能元脚线的电磁耦合效应,其几何模型按照试验用换能元试件参数进行建模,并以换能元垂直脚线状态进行仿真计算。采用的具体结构参数如图5所示,图中 l 是单脚线长度(mm), d 是脚线直径(mm), a 是脚线间距(mm), b 是换能元高度(mm), E 是电磁场方向, θ 是电磁场与脚线垂直方向的夹角。

表2给出了本仿真计算采用的电热火工品换能元具体结构参数。

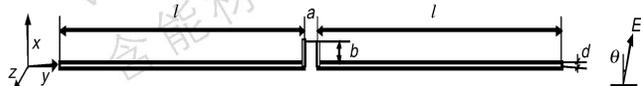


图5 垂直脚线状态下电热火工品仿真计算结构参数
Fig.5 Simulation structure parameters for EED under vertical leg wire state

表2 电热火工品仿真计算换能元结构参数

Table 2 Converter structure parameters of the simulation calculation for EED

parameter	value
single wire length(l) /mm	360
wire diameter(d) /mm	0.6
space between wire(a) /mm	3.6
converter height(b) /mm	5
magnetic field direction(E)	0

仿真分析采用正弦电磁波的形式,并以 $70 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 的固定场强进行加载,共仿真计算了 120,160,200,240,280,320,360,400,440,480,520,560,600,640,680,720,760,800,840,880,920,960,1000,1050,1100,1150,1200,1250,1300,1350,1400,1450,1500,1550,1600,1650,1700,1750,1800,1850,1900,1950,2000 MHz 等 43 个频率点条件下换能元器件上感应的电流值。

图6为200 MHz频率点,仿真得到的换能元感应电流波形,图中,横坐标为时间(ns),纵坐标为感应电流(A),如图6所示,换能元感应电流波形呈正弦波变化,其初期呈震荡上升,约20 ns后达到最大值0.4 A并趋于稳定。

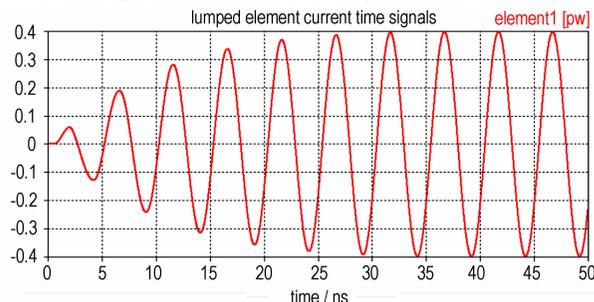


图6 仿真得到的200 MHz频率下感应电流波形
Fig.6 Typical induced current shape in 200 MHz by simulation

图7为固定脚线长度(0.72 m)、固定场强($70 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$)条件下,通过改变电磁波频率进行仿真计算,根据仿真结果拟合得到的电热火工品感应电流与电磁波频率之间的关系曲线。

从图7可看出,大约在200 MHz频率点处电热火工品的感应电流达到最大值,之后随着频率的增加,感应电流呈减小趋势,但大约在600,1000,1400,1850 MHz处又出现峰值极点。分析认为,由于仿真计算是在固定脚线长度条件下完成的,根据谐振频率理论计算公式(1),该状态下电热火工品感应电流谐振频率理论计算值应为208.3 MHz,仿真得到的200 MHz频率点处电热火工品的感应电流最大,与理论计算以及试验测试值基本吻合,仿真结果进一步验证了关于感应电流谐振频率的分析与结论,而奇数倍谐振频率处(600,1000,1400,1850 MHz)

又出现峰值极点,对理论公式(1)也形成了初步验证。

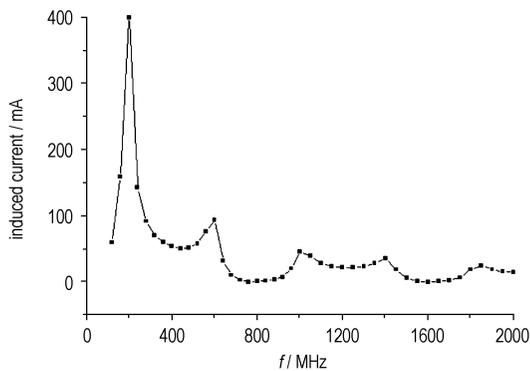


图7 仿真得到的电热火工品感应电流与电磁波频率的关系

Fig.7 Relation between the induced current and electromagnetic wave frequency by simulation

此外,在 200 MHz 频率下,电热火工品的感应电流仿真值与试验测试值存在较大差异,分析其原因主要在于仿真模型中对许多影响参数进行了理想化与简化处理,以及数据判读与测试误差的影响,但两者变化规律是一致性,证明了仿真结果的可信性。

5 结论

电磁环境下电热火工品受脚线接收天线特性的影响,导致其桥丝换能元上会产生感应电流,进而影响电热火工品的作用性能,其中,脚线长度是影响电热火工品电磁响应的重要参数。通过试验测试、理论分析与仿真研究,结果表明,电热火工品最大感应电流与脚线长度对应的谐振频率间存在一定关系,即特定的脚线长度(如 0.72 m)对应一定的谐振频率点(208.3 MHz),而在谐振频率点处电热火工品的感应电流最大。因此,为了尽量避免最大感应电流的出现,电热火工品装

备使用应特别注意其装配天线结构引起的谐振特性,尽量避开谐振频率点带来的不利影响。

参考文献:

- [1] 蔡瑞娇, 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [2] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线[M]. 陕西: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [3] Willie R C Bogan. Comparison of EMP and HERO programs, Naval Postgraduates School[R], 1988.
- [4] 李锦荣. 电热火工品电磁危害分析[J]. 火工品, 1992(4): 24-31. LI Jin-rong. Analysis on electromagnetic hazards in electric explosive device[J]. *Intiator & Pyrotechnics*, 1999(4): 24-31.
- [5] MIL-STD-461F. Requirements for the control of electromagnetic interference emission and susceptibility[S]. 2007
- [6] GJB151A-1997, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求[S]. 1997. GJB151A-1997. Electromagnetic emission and susceptibility requirements for military equipment and subsystems[S]. 1997.
- [7] GJB1389A-2005. 系统电磁兼容性要求[S]. 2005 GJB1389A-2005. Electromagnetic compatibility requirements for systems[S]. 2005
- [8] 侯冬云, 张炜, 陆建. 浅谈电磁辐射与感应电流的关系[J], 舰船电子工程, 2004, 24(3): 114-116, 126. HOU Dong-yun, ZHANG Wei, LU Jian. Discuss the relationship between electromagnetic radiation and inductive current [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2004, 24(3): 114-116, 126.
- [9] 王韶光, 魏光辉, 陈亚洲. 电热火工品电磁危害的光纤测试方法[J], 高电压技术, 2007, 33(5): 6-10. WANG Shao-guang, WEI Guang-hui, CHEN Ya-zhou. Optic-fiber test method for electromagnetic hazards of EED [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(5): 6-10.
- [10] 赵团, 封青梅, 王丽霞, 等. 电爆装置电磁危害定量测试方法研究[C]//2011 国际推进剂、炸药、烟火技术秋季研讨会论文集, 2011: 100-102. ZHAO Tuan, FENG Qing-mei, WANG Li-xia, et al. Study on the quantitative test technique of electromagnetic hazards to EED [C]//2011 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics 2011: 100-102.
- [11] 王可暄, 白颖伟, 任炜, 等. 电热火工品连续电磁波环境下响应规律[J]. 含能材料, 2012(5): 610-613. WANG Ke-xuan, BAI Ying-wei, REN Wei, et al. Response rule of hot-wire EED in continuous electromagnetic environment[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(5): 610-613.

Relationship between Continuous Electromagnetic Wave Frequency and EED Induced Current

BAI Ying-wei¹, REN Wei¹, LIU Ju-peng¹, ZHONG Jian-wu²

(1. National Key Laboratory of Applied Physics and Chemistry, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. The General Department Air Division of the Chinese People's Liberation Army, military representative office in Zhuzhou, Zhuzhou 430220, China)

Abstract: The response effect and rule of an electro-explosive device(EED) in an electromagnetic wave environment are the basis of research on electromagnetic safety and environmental adaptability design. To get the response rules and some important parameters affecting the EED response, the relationship between the induced current and frequency in the electromagnetic environment of electro-explosive device was studied by using a continuous electromagnetic wave environment simulation system and an induced current testing device established in the laboratory. Results show that there is a resonance relation between the induced current and the electromagnetic wave frequency of EED. Taking EED vertical leg wire state as a sample, when the length of EED leg wire is 0.72 m, corresponding induced current resonance frequency is about 200 MHz. The theoretical calculation and simulation study performed on the basis of these results prove that the antenna characteristics of EED leg wire are the key factors that affect the electromagnetic response. The maximum induced current is at the resonance frequency point corresponding to the length of EED leg wire.

Key words: explosion mechanics; electro-explosive device(EED); electromagnetic environment; induced current; resonance frequency
CLC number: TJ45; O389 **Document code:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.04.018